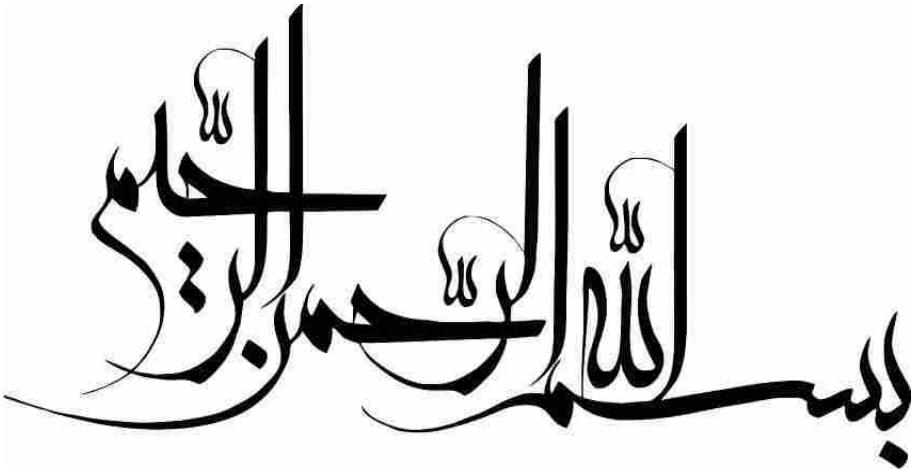

بسم الله الرحمن الرحيم

طراحی روسازی بتنی
ساختار و عملکرد

ویرایش دوم با تجدید نظر کلی

مترجم:

دکتر محمدرضا احدی

دانشیار، عضو هیئت‌علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

شماره نشر: ت- ۸٤٥

چاپ اول: ۱۳۹۸

سرشناسه	: دلیت، نوربرت ج Delatte, Norbert J
عنوان و نام پدیدآور	: طراحی روسازی بتنی: ساختار و عملکرد/[نوربرت ج. دلیت] ؛ مترجم محمدرضا احدی
وضعیت ویراست	: ویراست۲
مشخصات نشر	: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی،۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	: ل،٤٢٧ص
فروست	: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر: ت –۸٤٥.
شابک	: ۹۷۸–٦۰۰–۱۱۳–۲۱٦–۲
وضعیت فهرستنویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Concrete pavement design, construction, and performance, 2008
یادداشت	: ویراست قبلی کتاب حاضر در سال ۱۳۹۲ با همین عنوان با ترجمه محمدرضا احدی، فرید قیم‌اصغری، احسان یعقوبی توسط تایماز منتشر شده است.
موضوع	: روسازی با بتن
موضوع	: Pavements, Concrete
شناسه افزوده	: احدی، محمدرضا، ۱۳۳۹ – ، مترجم
شناسه افزوده	: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
شناسه افزوده	: Road, Housing and Urban Development Research Center
رده بندی کنگره	: ۲۷۸TE
رده بندی دیویی	: ٦۲٥/۸٤
شماره کتابشناسی ملی	: ٥۸۰۹۲۷۰

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

نام کتاب: طراحی روسازی بتنی ساختار و عملکرد
مترجم: محمدرضا احدی
شماره نشر: ت– ۸٤٥
ناشر: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
نوبت چاپ: اول ویرایش دوم
تیراژ:۲۰ جلد
قطع: وزیری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: اداره انتشارات و چاپ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
قیمت: **٥۲۰۰۰۰** ریال
شابک: ۹۷۸–٦۰۰–۱۱۳–۲۱٦–۲ **ISBN**: 978-600-113-216-2

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده نگارندگان محترم می‌باشد.
کلیهٔ حقوق چاپ و انتشار اثر برای مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی محفوظ است.

نشانی ناشر: تهران، بزرگراه شیخ فضل ا... نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۳۱٤٥–۱٦۹٦ تلفن: ٦–۸۸۲٥٥۹٤۲ دورنگار: ۸۸۳۸٤۱۳۲
پست الکترونیکی:pub@bhrc.ac.ir فروش الکترونیکی: http:// pub.bhrc.ac.ir

سخن مرکز

از ابتدای راه‌سازی مدرن از حدود یک‌صد سال قبل، آسفالت متداول‌ترین گزینه برای روسازی محسوب می‌شد. دلیل مهم دسترسی به قیر بسیار ارزان در نقاط مختلف کشور بوده است. در سال‌های اخیر هم به دلیل افزایش بسیار قابل‌توجه قیر و امکان صادرات آن و هم به دلیل گسترش کارخانه‌های تولید سیمان شاهد یک رویکرد به سمت رویه‌های بتنی هستیم و پروژه‌های متعددی در آزادراه‌ها و روسازی فرودگاه‌ها استفاده از بتن اجراشده یا درحال اجرا می‌باشد.

با این وجود نباید از نظر دور داشته باشیم اجری رویه‌های بتنی هم به تخصص قابل‌توجه و هم به ماشین‌آلات ویژه‌ای نیاز دارد و در طراحی نیز باید ملاحظات لازم را در نظر داشت. در کتاب حاضر علاوه بر ارائه اطلاعات‌پایه به موضوعات اصول طراحی روسازی در بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها و کف‌های صنعتی پرداخته‌شده است.

امید است با گسترش استفاده از رویه‌های بتنی اقدام مؤثری برای استقرار پایه‌های توسعه پایدار در حوزه ساخت راه‌ها انجام پذیرد.

محمد شکرچی زاده

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

پیشگفتار مترجم

با وجود این که تاریخچه اجرای روسازی بتنی در کشورهای توسعه یافته نظیر آمریکا به سال ۱۸۹۱ میلادی باز می‌گردد، در کشور ما ایران هنوز استقبال چندانی از این نوع روسازی نشده است. تا آنجا که علی‌رغم تدوین یک آیین‌نامه داخلی برای روسازی آسفالتی راه‌ها، نشریه ۲۳٤، آیین‌نامه‌ای داخلی برای روسازی بتنی در کشور وجود ندارد. این در حالی است که روسازی بتنی دارای مزایای چندی نسبت به روسازی آسفالتی است که تعدادی از آن‌ها عبارتند از: دوام و عمر خدمت‌دهی بیشتر (تا ٤٠ سال)، بازه زمانی طولانی‌تر بین دوره‌های ترمیم و بهسازی، عدم وقوع پدیده‌هایی نظیر هیدروپلانینگ به دلیل نبود خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی، ادامه روند افزایش مقاومت بتن با افزایش عمر روسازی، کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه استفاده کننده از راه، جذب گرمای کم‌تر خورشید و در نتیجه کاهش دمای هوا در مناطق شهری و ... .

با توجه به مطالب فوق و افزایش تمایل کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، به زیرساخت‌های پایدارتر و با توجه به فقدان منابع فارسی کافی در ارتباط با روسازی بتنی نیاز به مرجعی جامع برای شناساندن این نوع روسازی به جامعه مهندسین کشور احساس می‌شد. در نتیجه پس از بررسی کتب متعدد در این زمینه، کتاب حاضر انتخاب و اقدام به ترجمه آن شد. نوشته پیش‌رو را می‌توان به عنوان یک مرجع کامل که دربردارنده جوانب مختلف روسازی بتنی، شامل مصالح، افزودنی‌ها، طراحی، روش‌های اجرایی و ... است به کار گرفت.

در سال‌های اخیر پروژه‌های اجرای روسازی بتنی در مقیاس کوچک در تعدادی از استان‌های کشور تعریف شده است و انتظار می‌رود درصورت موفقیت این پروژه‌ها، بکارگیری این تکنولوژی در شبکه راه‌های کشور افزایش یابد. امید است کتاب «طراحی روسازی بتنی، ساختار و عملکرد» بتواند مرجع و راهنمای مناسبی برای مهندسین و محققین کشور عزیزمان ایران باشد.

در انتها لازم به ذکر است که به رغم تلاش‌های به عمل آمده در ترجمه و تنظیم این مجموعه نمی‌توان مدعی شد که این اثر عاری از هرگونه اشتباه باشد. لذا از اساتید بزرگوار، دانشجویان گرامی و کلیه خوانندگان عزیز استدعا داریم که ما را از پیشنهادات و انتقادات سازنده و صمیمانه خویش محروم نفرمایند و نظرات پیشنهادی را به m.ahadi@bhrc.ac.ir ارسال نمائید.

محمدرضا احدی

بهار۱۳۹۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- کلیات ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- تاریخچه ۲
۱-۳- آزمایش‌های اولیه جاده‌ای ۳
۱-٤- آزمایش جاده‌ای آشتو ۷
۱-۵- سیر تکاملی در طراحی ۹
۱-٦- برنامه درازمدت عملکرد روسازی ۱۲
۱-۷- اقتصاد، عمر خدمت‌دهی و هزینه‌های چرخه عمر ۱٤
۱-۸- چالش‌های آینده ۱٤
۱-۹- نگهداری و نوسازی ۱۵
۱-۹-۱- مواجهه با تراکم ترافیک و چالش‌های مربوط به ایمنی ۱۵
۱-۹-۲- بازیافت و استفاده مجدد از مواد ۱۹
۱-۹-۳- اثرات زیست محیطی ۲۲
۱-۹-٤- پایداری ۲٤
۱-۱۰- منابعی برای اطلاعات، گزارش‌های پژوهشی، خط‌مشی‌ها و استانداردها ۲۷
۱-۱۰-۱- بزرگراه‌ها ۲۹
۱-۱۰-۲- فرودگاه‌ها ۳۰

فصل دوم- انواع روسازی بتنی ۳۱
۲-۱- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار ۳۱
۲-۲- روسازی بتنی مسلح درزدار ۳٤
۲-۳- روسازی بتنی مسلح یکپارچه ۳٦
۲-٤- درزهای متداول روسازی ۳۷
۲-۵- درزهای عرضی انقباضی ۳۸
۲-٦- درزهای طولی ٤۱
۲-۷- درزهای اجرایی ٤۳
۲-۸- درزهای انبساطی ٤٤
۲-۹- روکش‌ها ٤٦
۲-۱۰- روسازی‌های بتنی پیش‌تنیده و پیش‌ساخته ٤۸

۲-۱۱- روسازی پیش‌تنیده ٤٨
۲-۱۲- پانل‌های روسازی پیش‌ساخته ٥١
۲-۱۳- بتن غلطکی متراکم ٥٣
۲-۱٤- بتن نفوذپذیر یا متخلخل ٥٤

فصل سوم- عملکرد روسازی ٥٧
۳-۱- ترک‌خوردگی ٥٨
۳-۱-۱- شکستگی‌های گوشه ٥٨
۳-۱-۲- ترک‌خوردگی دوام یا ترک‌خوردگی نوع D ٥٩
۳-۱-۳- ترک‌خوردگی طولی ٦٠
۳-۱-٤- ترک‌خوردگی عرضی ٦٠
۳-۲- خرابی‌های درز ٦٣
۳-۲-۱- تخریب آب‌بندی درز (طولی یا عرضی) ٦٣
۳-۲-۲- پوسته‌شدگی درز (عرضی یا طولی) ٦٤
۳-۳- خرابی‌های سطحی ٦٤
۳-۳-۱- ترک‌خوردگی سطحی ٦٤
۳-۳-۲- پوسته‌شدگی ٦٦
۳-۳-۳- صیقلی شدن سنگدانه‌ها ٦٧
۳-۳-٤- بیرون پریدگی ٦٨
۳-٤- خرابی‌های متفرقه ٦٨
۳-٤-۱- ترکیدگی ٦٨
۳-٤-۲- پلکانی شدن درزها و ترک‌های عرضی ٧٠
۳-۲-۳- افتادگی شانه نسبت به سواره‌رو ٧١
۳-٤-٤- جدایی سواره‌رو و شانه ٧١
۳-٤-٥- خرابی وصله ٧٢
۳-٤-٦- بیرون‌زدگی آب یا مکش ٧٣
۳-٤-۷- سوراخ‌شدگی ٧٤
۳-٤-۸- خرابی درز عرضی اجرایی ٧٥
۳-٥- مشخصات رویه ٧٦
۳-٥-۱- همواری ٧٦
۳-٥-۲- مقاومت لغزشی ٧٨
۳-٥-۳- سروصدا ٨١

فصل چهارم- بستر، زیراساس و زهکش ۸۵
٤-۱- لایه بستر ۸٦
٤-۱-۱- خاک بستر متورم شونده ۸۹
٤-۱-۲- خاک بستر آسیب‌پذیر در برابر یخبندان ۹۰
٤-۲- زیراساس و اساس ۹۱
٤-۲-۱- اساس تثبیت شده ۹٤
٤-۲-۲- انتخاب نوع اساس یا زیراساس تثبیت‌شده ۹۷
٤-۲-۳- اصطکاک و مواد جدا کننده ۹۸
٤-۳- زهکش سطحی ۹۹
٤-٤- زهکشی زیرسطحی ۱۰۰
٤-٤-۱- نرم‌افزار طراحی زهکش زیرسطحی ۱۰۳
٤-٤-۲- تعیین مقدار جریان آب درونی ۱۰٤
٤-٤-۳- طراحی اساس قابل نفوذ ۱۰۵
٤-٤-٤- طراحی لایه جدا کننده ۱۰۷
٤-٤-۵- مثال طراحی ۱۰۸
٤-۵- زهکش جانبی ۱۱۳
٤-۵-۱- مثال طراحی ۱۱٤
٤-۵-۲- بهبود زهکش‌های لبه ۱۱٤
٤-۵-۳- زهکشی فرودگاه ۱۱٦

فصل پنجم- انتخاب مصالح بتن ۱۱۷
۵-۱- سیمان ۱۱۸
۵-۲- مواد مکمل سیمانی ۱۱۹
۵-۲-۱- خاکستر بادی ۱۱۹
۵-۲-۲- سرباره ۱۲۰
۵-۲-۳- سایر مواد سیمانی مکمل ۱۲۰
۵-۳- مصالح سنگی و آب ۱۲۱
۵-۳-۱- مصالح درشت‌دانه ۱۲۳
۵-۳-۲- مصالح ریزدانه ۱۲۳
۵-۳-۳- دانه‌بندی بهینه شده مخلوط سنگدانه‌ها ۱۲٤
۵-۳-٤- سنگدانه‌های سبک ۱۲۸
۵-۳-۵- استفاده از مصالح زائد به عنوان مصالح سنگی ۱۲۹

۵-۳-٦- آب ۱۲۹
۵-٤- افزودنی‌ها ۱۲۹
۵-٤-۱- افزودنی‌های هواساز ۱۳۰
۵-٤-۲- افزودنی‌های تسریع‌کننده ۱۳۰
۵-٤-۳- افزودنی‌های کندگیرکننده ۱۳۰
۵-٤-٤- افزودنی‌های کاهنده آب ۱۳۱
۵-۵- سازگاری مواد ۱۳۱
۵-٦- تسلیح با الیاف ۱۳۳

فصل ششم- طرح اختلاط و تعیین نسبت‌ها ۱۳۵
٦-۱- کارآیی ۱۳۸
٦-۲- مقاومت ۱۳۹
٦-۳- دوام ۱٤۲
٦-۳-۱- دوام ذوب- انجماد ۱٤۳
٦-۳-۲- پوسته‌شدگی ۱٤۵
٦-۳-۳- حمله سولفاتی ۱٤۵
٦-۳-٤- خوردگی آرماتورها و میلگردهای اتصال ۱٤٦
٦-٤- افت و تغییر شکل حرارتی ۱٤٦
٦-۵- مثال تعیین نسبت‌های مخلوط ۱٤۸
٦-۵-۱- درشت‌دانه‌ها با اندازه بزرگ ۱٤۸
٦-۵-۲- درشت‌دانه‌ها با اندازه نرمال ۱٤۹
٦-۵-۳- اصلاح مخلوط در صورت مرطوب بودن مصالح سنگی ۱۵۰
٦-۵-٤- اصلاحات مخلوط برای مواد سیمانی مکمل ۱۵۰
٦-۵-۵- اصلاحات مخلوط برای افزودنی‌های کاهنده آب ۱۵۱
٦-٦- سرعت عمل در اجراء ۱۵۱
٦-٦-۱- عملیات اجرایی شبانه ۱۵۲
٦-٦-۲- عملیات اجرایی آخر هفته ۱۵۳
٦-٦-۳- دوام بتن با مقاومت اولیه بالا ۱۵۳

فصل هفتم- اصول طراحی ۱۵۷
۷-۱- بستر روسازی ۱۵۸
۷-۲- ترافیک ۱۵۸
۷-۲-۱- وسیله نقلیه واحد ۱۵۹

۷-۳- جریان ترافیکی مختلط ۱۵۹
۷-۳-۱- مفهوم محور معادل ۱۶۰
۷-۳-۲- تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی ۱۶۱
۷-٤- تنش‌های ناشی از بار ترافیک ۱٦٤
۷-٤-۱- تنش‌های ناشی از بارگذاری گوشه ۱٦٥
۷-٤-۲- تنش ناشی از بارگذاری لبه ۱٦٦
۷-٤-۳- تنش‌های ناشی از بارگذاری داخلی ۱٦۷
۷-٤-٤- ترکیب تنش‌های ناشی از پیچش، تاب‌خوردگی و بارگذاری ترافیک ۱٦۷
۷-٤-٥- افت‌وخیز دال ۱٦۸
۷-٤-٦- محاسبات کلی تنش و تغییر شکل از طریق برنامه‌های اجزای محدود ۱٦۹
۷-٥- طراحی ضخامت ۱۷۱
۷-٦- طرح درزهای عرضی و فاصله درزها ۱۷۳
۷-۷- فاصله بین درزها ۱۷۳
۷-۷-۱- درز با فواصل متغیر ۱۷۸
۷-۷-۲- درزهای با قفل‌وبست سنگدانه‌ای ۱۷۹
۷-۷-۳- درزهای دارای میلگردهای اتصال ۱۸۱
۷-۷-٤- قطر میلگردهای اتصال ۱۸۱
۷-۷-٥- درزهای مورب ۱۸۳
۷-۸- درزهای طولی و طراحی میل‌مهار ۱۸٤

فصل هشتم- طراحی روسازی بزرگراه‌ها ۱۸۷
۸-۱- راهنمای طراحی آشتو (آشتو ۱۹۹۳) ۱۸۷
۸-۱-۱- داده‌های طراحی ۱۸۸
۸-۱-۲- روش‌های حمل ۱۹۳
۸-۱-۳- مثال طراحی ۱۹۳
۸-۲- ضمیمه آشتو ۱۹۹۸ ۱۹٤
۸-۲-۱- ورودی‌های طراحی ۱۹٦
۸-۲-۲- مثال‌های طراحی ۱۹۷
۸-۳- طراحی به روش PCA۱۹۸٤ ۱۹۹
۸-۳-۱- معیار طراحی ۲۰۱
۸-۳-۲- ورودی‌های طراحی ۲۰۱
۸-۳-۳- حل دستی ۲۰۲
۸-۳-٤- نرم‌افزارهای PCAPAV و StreetPave ۲۰۳

۸-٤- مقدمه‌ای بر راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک- تجربی (M-E)..... ۲۰۳

فصل نهم- طراحی روسازی با ترافیک سبک..... ۲۰۷

۹-۱- راهنمای طراحی ACI 325.12R و ACI 330..... ۲۰۸

۹-۱-۱- نمونه مشخصات طراحی..... ۲۰۹

۹-۱-۲- مشخصات ترافیک..... ۲۱۰

۹-۱-۳- نحوه آرایش درزها..... ۲۱۰

۹-۲- نرم‌افزار طراحی StreetPave از انجمن روسازی بتنی آمریکا..... ۲۱۲

۹-۲-۱- تنظیمات کلی..... ۲۱۲

۹-۲-۲- ورودی سطح پروژه..... ۲۱۳

۹-۲-۳- ورودی‌های ترافیکی..... ۲۱٤

۹-۲-٤- مشخصات روسازی..... ۲۱۵

۹-۲-۵- آنالیز روسازی موجود و روسازی جدید..... ۲۱٦

۹-۲-٦- هزینه‌های چرخه عمر..... ۲۱۸

۹-۳- مثال‌های طراحی..... ۲۱۹

۹-٤- جداول طراحی روسازی با ترافیک سبک..... ۲۲۲

۹-٤-۱- روسازی بتنی نفوذپذیر..... ۲۲۸

۹-۵- تقاطع‌های بتنی..... ۲۳٤

۹-٦- روسازی مرکب با بتن غلطکی متراکم..... ۲۳۷

۹-۷- روسازی با دال‌های کوتاه و نازک..... ۲۳۷

فصل دهم- طراحی روسازی فرودگاه..... ۲۳۹

۱۰-۱- اساس و زیراساس روسازی فرودگاه‌ها..... ۲٤۱

۱۰-۲- ملاحظات طراحی..... ۲٤۲

۱۰-۳- تعیین حرکت معادل سالیانه هواپیمای طرح..... ۲٤۲

۱۰-٤- طراحی برای یخبندان و یخبندان دائمی..... ۲٤۵

۱۰-۵- طراحی روسازی صلب به روش سازمان هواپیمایی فدرال..... ۲٤۷

۱۰-۵-۱- تعیین مدول فنداسیون (مقدار k)..... ۲٤۷

۱۰-۵-۲- تعیین ضخامت دال بتنی..... ۲٤۷

۱۰-۵-۳- نواحی بحرانی و غیربحرانی..... ۲٤۸

۱۰-۵-٤- حجم بالای ترافیک..... ۲٤۸

۱۰-۵-۵- درزها..... ۲٤۹

۱۰-۵-٦- روسازی‌های مسلح و CRC..... ۲۵۰

۱۰-٦- طراحی روسازی الاستیک لایه‌ای ۲۵۰
۱۰-۷- نرم‌افزارهای طراحی روسازی فرودگاه ۲۵۲
۱۰-۷-۱- روش طراحی سازمان هواپیمایی فدرال استاندارد (فصل سوم) ۲۵۳
۱۰-۷-۲- طراحی الاستیک لایه‌ای (فصل ۷) ۲۵۷
۱۰-۸- مثال‌های طراحی ۲٦۰
۱۰-۹- روسازی فرودگاه برای هواپیماهای سبک ۲٦۲

فصل یازدهم- طراحی روسازی صنعتی ۲٦۵

۱۱-۱- روسازی‌های صنعتی متداول ۲٦۷
۱۱-۲- روسازی‌های صنعتی بتن غلطکی متراکم ۲٦۷
۱۱-۳- مثال طراحی روسازی صنعتی ۲۷۰
۱۱-۳-۱- مثال طراحی ۱- ماشین حمل کانتینر ۲۷۰
۱۱-۳-۲- مثال طراحی ۲- جرثقیل دروازه‌ای متحرک ۲۷۱
۱۱-٤- مطالعات موردی روسازی صنعتی ۲۷۲
۱۱-٤-۱- روسازی صنعتی متداول با سیمان بدون افت ۲۷۲
۱۱-٤-۲- توسعه پایانه بندر بین‌المللی نورفولک با بتن غلطکی متراکم ۲۷٤

فصل دوازدهم- نواحی انتقالی، جزئیات خاص و طراحی آرماتور روسازی بتنی مسلح یکپارچه ۲۷۵

۱۲-۱- نواحی انتقالی ۲۷۵
۱۲-۱-۱- نواحی انتقالی بین روسازی‌های بتنی و پل‌ها ۲۷٦
۱۲-۱-۲- نواحی انتقالی بین روسازی‌های بتنی و آسفالتی ۲۷۷
۱۲-۲- طراحی ضخامت برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه ۲۷۸
۱۲-۳- طراحی آرماتور روسازی بتنی مسلح یکپارچه برای راه‌های اصلی- آشتو ۲۸۰
۱۲-۳-۱- درصد فولاد بر پایه فاصله ترک‌ها ۲۸۰
۱۲-۳-۲- درصد فولاد بر پایه عرض ترک ۲۸۱
۱۲-٤- درصد فولاد براساس تنش فولاد ۲۸۲
۱۲-٤-۱- آرماتورهای عرضی روسازی بتنی مسلح یکپارچه ۲۸۳
۱۲-٤-۲- مثال طراحی ۲۸۳
۱۲-٤-۳- نرم‌افزار ۲۸٤
۱۲-٤-٤- عملکرد میدانی روسازی بتنی مسلح یکپارچه در راه‌های اصلی ۲۸۵
۱۲-۵- طراحی آرماتورهای روسازی بتنی مسلح یکپارچه برای فرودگاه‌ها ۲۸۷
۱۲-۵-۱- فولاد لازم برای مقاومت در برابر گیرداری بستر ۲۸۷

۱۲-۵-۲- فولاد برای مقاومت در برابر اثرات حرارتی..... ۲۸۷
۱۲-۵-۳- نسبت بتن به فولاد..... ۲۸۸
۱۲-۵-٤- آرماتورهای عرضی..... ۲۸۸
۱۲-۵-۵- مثال طراحی..... ۲۸۸
۱۲-٦- آرماتوربندی روسازی بتنی مسلح یکپارچه و مهاربندی انتهایی..... ۲۸۹
۱۲-٦-۱- جزئیات آرماتوربندی..... ۲۸۹
۱۲-٦-۲- مهاربندهای انتهایی و درزهای پایانی..... ۲۹۱
۱۲-٦-۳- درزهای عرضی اجرایی..... ۲۹۵
۱۲-٦-٤- روسازی بدون درز- مطالعه موردی..... ۲۹٦

فصل سیزدهم- اجرای بستر و زیراساس..... ۲۹۷
۱۳-۱- آماده‌سازی زمین..... ۲۹۷
۱۳-۱-۱- تسطیح و تراکم بستر..... ۲۹۸
۱۳-۱-۲- کنترل خاک‌های منبسط شونده..... ۳۰۱
۱۳-۱-۳- کنترل تراکم ناشی از یخبندان..... ۳۰۲
۱۳-۱-٤- تثبیت بستر..... ۳۰۳
۱۳-۱-۵- سایر ملاحظات مربوط به بستر..... ۳۰٤
۱۳-۲- اجرای زیراساس و اساس..... ۳۰٤
۱۳-۲-۱- زیراساس تثبیت نشده..... ۳۰۵
۱۳-۲-۲- اساس و زیراساس تثبیت‌شده توسط سیمان..... ۳۰٦
۱۳-۲-۳- اساس و زیراساس بتنی کم سیمان..... ۳۰۹
۱۳-۲-٤- زیراساس و اساس تثبیت‌شده با قیر..... ۳۱۰
۱۳-۲-۵- اساس نفوذپذیر..... ۳۱۱
۱۳-۲-٦- مسائل مرتبط با اساس تثبیت شده..... ۳۱۲

فصل چهاردهم- اجرای روسازی..... ۳۱۳
۱٤-۱- ملاحظات مربوط به تولید بتن..... ۳۱٤
۱٤-۲- اجرای روسازی با قالب لغزنده..... ۳۱۵
۱٤-۳- اجرای روسازی با قالب ثابت..... ۳۲۳
۱٤-٤- دستگاه‌های اجرای روسازی عرشه پل..... ۳۲۸
۱٤-۵- برنامه‌ریزی و رفع عیوب..... ۳۲۸
۱٤-٦- اجرای روسازی بتنی زودگیر..... ۳۲۹
۱٤-٦-۱- آزمایش رسیدن بتن..... ۳۳۰

فصل پانزدهم- پرداخت نهایی، ایجاد بافت سطحی، عمل‌آوری، برش و آب‌بندی درزها ۳۳۳
۱۵-۱- پرداخت نهایی و ایجاد بافت سطحی..... ۳۳۳
۱۵-۲- عمل‌آوری..... ۳۳٤
۱۵-۲-۱- عوامل تأثیرگذار بر ضوابط عمل‌آوری..... ۳۳۵
۱۵-۲-۲- عمل‌آوری اولیه..... ۳۳۸
۱۵-۲-۳- عمل‌آوری نهایی بتن..... ۳۳۹
۱۵-۲-٤- مدیریت دما..... ۳٤۱
۱۵-۲-۵- پایان عملیات عمل‌آوری و ارزیابی اثربخشی..... ۳٤۲
۱۵-۲-٦- ملاحظات مربوط به روکش‌های کم‌ضخامت..... ۳٤۳
۱۵-۳- برش و آب‌بندی درزها..... ۳٤۳
۱۵-٤- اقدامات اجرایی و عمل‌آوری روسازی در آب‌وهوای سرد و گرم..... ۳۵۰
۱۵-٤-۱- اقدامات احتیاطی در شرایط آب‌وهوایی گرم..... ۳۵۱
۱۵-٤-۲- اقدامات احتیاطی در شرایط آب‌وهوایی سرد..... ۳۵٤
۱۵-٤-۳- افت شدید دمای محیط..... ۳۵۵
۱۵-۵- نرم‌افزار HIPERPAV..... ۳۵٦

فصل شانزدهم- نگهداری روسازی بتنی..... ۳٦۳
۱٦-۱- مدیریت روسازی..... ۳٦۵
۱٦-۲- آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها..... ۳۷۰
۱٦-۲-۱- آب‌بندی مجدد درز..... ۳۷۱
۱٦-۲-۲- آب‌بندی مجدد ترک..... ۳۷۲
۱٦-۲-۳- نگهداری سامانه‌های زهکشی..... ۳۷۳

فصل هفدهم- ترمیم..... ۳۷۵
۱۷-۱- انتخاب روش‌های نگهداری و روکش..... ۳۷٦
۱۷-۲- تعمیرات عمیق و نیمه عمیق..... ۳۷۸
۱۷-۲-۱- وصله عمیق..... ۳۷۹
۱۷-۲-۲- وصله نیمه عمیق..... ۳۸۲
۱۷-۲-۳- تقویت با میلگردهای اتصال و میل‌دوخت‌گذاری متقاطع..... ۳۸۳
۱۷-۲-٤- میلگردهای اتصال تقویتی..... ۳۸٤
۱۷-۲-۵- میل‌دوخت‌گذاری متقاطع..... ۳۸٦
۱۷-۳- ساییدن و شیارزدن..... ۳۸۷
۱۷-٤- تثبیت دال..... ۳۹۰

فصل هجدهم- روکش‌ها و رویه‌های میانی ۳۹۳
۱۸-۱- روکش‌های بتنی برای روسازی بتنی ۳۹٤
۱۸-۱-۱- روکش‌های بدون پیوستگی ۳۹٤
۱۸-۱-۲- روکش‌های با پیوستگی کامل ٤۰۰
۱۸-۲- روکش‌های بتنی روسازی‌های آسفالتی ٤۰۵
۱۸-۲-۱- روکش‌های بتنی بر روی آسفالت ٤۰٦
۱۸-۲-۲- روکش‌های بتنی فوق نازک بر روی آسفالت ٤۰۹
۱۸-۲-۳- روکش‌های بتنی روی آسفالت ٤۱۵
۱۸-۲-٤- رویه‌های میانی بتنی ٤۱٦
واژه‌نامه ٤۱۷
اختصارات ٤۲۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

روسازی بتنی در بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها، خیابان‌ها، راه‌های محلی، محوطه پارکینگ‌ها، تسهیلات صنعتی و انواع دیگر زیرساخت‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که روسازی‌های بتنی به درستی طراحی و در اجرای آن‌ها از مصالح بادوام استفاده شود، می‌توانند چندین دهه با اندکی نگهداری یا حتی بدون نگهداری خدمت‌دهی کنند. عموماً هزینه اولیه روسازی بتنی بیشتر است اما دوام طولانی‌تر و هزینه تعمیر کم‌تری نسبت به آسفالت دارد.

با این وجود، در برخی موارد اشتباهات در طراحی یا اجرا و یا استفاده از مصالح نامرغوب به طور قابل ملاحظه‌ای عمر روسازی‌های بتنی را می‌کاهد. بنابراین دانش کافی مهندسین راهسازی درباره انتخاب مصالح، طرح اختلاط بتن، طراحی و جزئیات، زهکشی، تکنیک‌های اجرا و عملکرد روسازی حائز اهمیت خواهد بود. همچنین استفاده از روش‌های نظری طراحی که اساس روش‌های اجرایی متداول را در بر می‌گیرد از اهمیت زیادی برخوردار است. در این میان ضرورت دارد از محدودیت‌های روش‌های اجرایی آگاهی حاصل شود.

۱-۲- تاریخچه

اولین روسازی بتنی در بل فونتاین، اوهایو، در سال ۱۸۹۱ توسط جرج بارتلومو[1] ساخته شد. او تولید سیمان را در آلمان و تگزاس آموخته بود و منابع مواد خام، سنگ آهک و خاک رس را در اوهایوی مرکزی کشف کرده بود. از آنجا که این اولین روسازی بتنی محسوب می‌شد، شورای شهر او را به پرداخت ۵۰۰۰ دلار وجه‌الضمانه ملزم کرد تا عمر مفید روسازی را به مدت ۵ سال تضمین می‌کند. پس از گذشت صد سال، بخشی از این روسازی هنوز قابل استفاده است. جزئیات تاریخچه این پروژه توسط اسنل و اسنل سال ۲۰۰۲[2] تهیه شد.

انجمن روسازی بتنی آمریکا با ۱۰۰ سال نوآوری و وب‌سایت (www.pavement.com) عنوان کرد که این روسازی «یک موفقیت آنی» بود. در سال ۱۸۹۳، خیابان کورت و خیابان اوپرا و به دنبال آن در سال ۱۸۹٤ خیابان کلمبوس و قسمت‌های باقی‌مانده از خیابان اصلی شهر روسازی شدند. در آن زمان واژه بتن هنوز به طور عمومی مورد استفاده قرار نمی‌گرفت بلکه آن را «سنگ مصنوعی» می‌نامیدند و اختلاط آن به صورت دستی در قالب‌های مربعی ۱/۵ متری انجام می‌شد. از روسازی‌های بتنی دیگر خیابان فرانت در شیکاگو بود که در سال ۱۹۰۵ ساخته شد و ٦۰ سال عمر کرد. خیابان وودوارد در دیترویت احداث شده است.

احتمال دارد آزمایش‌های بتن حتی پیش از این تاریخ نیز انجام شده باشد. پاسکو[3] عنوان می‌کند طبق گزارش مهندسین راه آمریکایی بلانچارد[4] در سال ۱۸۷۹ در اسکاتلند، روسازی بتنی با سیمان پرتلند اجراء شد. در ادامه بلانچارد توضیح می‌دهد که اولین روسازی بتنی با سیمان پرتلند در سال ۱۸۹۳ در آمریکا در خیابان فیتزهیوی جنوبی در روچستر نیویورک توسط مک کلینتوک[5] مهندس بخش مونرو اجراء شد. هزینه این روسازی یک دلار به ازای هر یارد مربع (۰/۸٤ مترمربع) بود. با این وجود، روسازی به سرعت خراب شد. با ذکر این سابقه تاریخی، واضح است که بل‌فانتین اولین روسازی بتنی موفق با عمری طولانی بود.

در دسترس بودن و افزایش هرچه بیشتر خودروها سبب افزایش تقاضا برای راه‌های روسازی شده گردیده است. در سال۱۹۱۳، ۳۷ کیلومتر (۲۳ مایل) روسازی بتنی نزدیک

1- George Bartholomew
2- Snell & Snell
3- Pasko
4- Blanchard’s
5- McClintock

پاین بلاف در آرکانزاس با نرخ یک دلار به ازای هر فوت طول ساخته شد، که به «راه دلاری» معروف شد. این روسازی ۲/۷ متر (۹ فوت) عرض و ۱۲۵ میلی‌متر (۵ اینچ) ضخامت داشت. باقی‌مانده راه دلاری، در طول جاده مشهور US 6 به عنوان استراحتگاه استفاده می‌شود. این روند تا سال ۱۹۱٤ با ۷۹ کیلومتر (٤۹ مایل) روسازی بتنی برای جاده‌های روستایی در می‌سی‌سی‌پی ادامه یافت و تا اواخر همین سال مجموعاً ۳۷۷۸ کیلومتر (۲۳٤۸ مایل) روسازی بتنی در ایالات آمریکا ساخته شد.
علی‌رغم افزایش اهمیت خودرو، در حقیقت این انجمن دوچرخه‌سواران بود که با سازمان یافتگی و تأثیرگذاری نسبی، توانست احداث اولین بزرگراه فدرال را در سال ۱۹۱٦ به تصویب برساند. در همان سال تأسیس انجمن سیمان پرتلند در دستور کار قرار گرفت تا استفاده از سیمان پرتلند و بتن را ارتقاء دهد. صنعت بتن، با این امید که مردم نسبت به روسازی بتنی اقبال بیشتری پیدا کنند.

۱-۳- آزمایش‌های اولیه جاده‌ای

ضمن تکمیل تئوری‌های نظری برای ایجاد دستورالعمل‌های طراحی روسازی بتنی، در طی چندین سال آزمایش‌های جاده‌ای زیادی انجام شد. اعتقاد بر این است که اولین ارزیابی کنترل عملکرد روسازی بتنی در سال ۱۹۰۹ توسط وزارت کار عمومی دترویت انجام شد. کفشک‌های فولادی و چرخ‌های آهنین سنگین در انتهای یک محور نصب شدند که قابلیت چرخش را در یک مسیر مشخص دایره‌ای داشتند. بدین طریق می‌توانستند عبور و مرور اسب و واگن را در طول روز شبیه‌سازی کنند. قسمت‌های مورد آزمایش شامل بتن، گرانیت، بلوک کرئوزوت[1] و بلوک چوبی از درخت سرو بود. بر این اساس، در بخشی از میشیگان و خیابان وودوارد، روسازی بتنی اجراء و دو سال پس از آن شصت مایل دیگر از جاده‌ها با بتن سیمانی پوشیده شد.
بعد از سال ۱۹۱٦ در حالی که درباره الزامات و محدودیت‌های ضخامت روسازی اطلاعات زیادی در دست نبود، معابر بتنی با ضخامت ۲۲۵-۱۲۵ میلی‌متر (۹-۵ اینچ) اجراء می‌شدند. در طی سال‌های ۱۹۲۳-۱۹۱۲ ایالت ایلینوی آزمایش جاده‌ای بیتس را انجام داد. با استفاده از کامیون‌های قدیمی جنگ جهانی اول با بار چرخ ٤۵٤ تا ۵۹۰۰ کیلوگرم بر قطعه‌های مورد آزمایش، متشکل از مصالح و ضخامت‌های مختلف، بر روی روسازی مزبور ترافیک اعمال شد. قطعه‌های روسازی بتنی با سطح مقطع یکنواخت

1- Creosote

۲۲۵–۱۰۰ میلی‌متر (۹–٤ اینچ) ضخامت داشتند، در حالی که قطعه‌های با ضخامت لبه ۲۲۹–۱۲۵–۲۲۹ میلی‌متر و ۲۲۹–۱۵۲–۲۲۹ میلی‌متر (۹–۵–۹ و ۹–٦–۹ اینچ) وجود داشت و برخی نیز با نوارهای لبه بودند. نتایج آزمایش نشان داد که از ۲۲ قطعه آجری، ۱۷ قطعه آسفالتی و ۲٤ قطعه بتنی، یک قطعه آجری، ۳ قطعه آسفالتی و ۱۰ قطعه بتنی با رضایت‌مندی در برابر بارگذاری کامیون‌ها مقاومت کردند. در نتیجه چندین فرمول طراحی برای ایلینوی تهیه شد تا آن‌ها را در ساخت اولین سیستم بزرگراه ایالتی به کار ببرند. آزمایش جاده‌ای بیتس اطلاعاتی اساسی فراهم کرد که سال‌های متمادی توسط مهندسین طراح مورد استفاده قرار می‌گرفت.

به منظور جلوگیری از تشکیل ترک طولی نامنظم در روسازی‌هایی به عرض ٤/۹–۵/۵ متر (۱۸–۱٦ فوت)، تا سال ۱۹۲۲ روسازی‌های زیادی بدون درز اتصال و با بخش ضخیم شده مرکزی ساخته می‌شد. درزهای مرکزی براساس نتایج آزمایش جاده‌ای بیتس اجراء شد تا از به وجود آمدن ترک‌های طولی جلوگیری شود.

پس از آن، آزمایش‌های جاده‌ای دیگری صورت گرفت. آزمایش جاده پیتس‌برگ (Pittsburg) کالیفرنیا، بین سال‌های ۱۹۲۱ تا ۱۹۲۳ روسازی بتنی مسلح را با بتن غیرمسلح مقایسه کرد. این آزمایش هیچ برتری خاصی را برای بتن مسلح نشان نداد که در آن روسازی‌های آزمایشی بدون درز اتصال ساخته شده بودند و نمی‌توانست بازتابی برای روش اجرایی امروزی باشد.

در سال ۱۹۵۰ و ۱۹۵۱ آزمایش جاده‌ای One-MD توسط اداره راه‌های عمومی (اکنون FHWA) و با همکاری هیئت تحقیقاتی راه (اکنون تحت عنوان هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل شناخته می‌شود)، چندین ایالت، کارخانه‌های کامیون‌سازی و سایر صنایع وابسته به راهسازی، در نزدیکی جنوب واشنگتن به اجراء گذاشته شد. راه موجود به طول ۱/۱ مایل (۱/۸ کیلومتر) دارای دو خط عبوری به دقت صورت‌برداری، تجهیز و روزانه ۱۰۰۰ کامیون در طول آن عبور می‌کردند. نتایج آزمایش قابلیت انتقال بار مناسب میان دال‌ها، اثر سرعت و وزن محورها و مشکلاتی از قبیل مکش را نشان داد. این نتایج به نخستین فاکتور معادل چرخ دینامیک منتهی شد.

این آزمایش جاده‌ای، قطعه‌ای از راه US 301 متشکل از دو خط به عرض ۳/٦٦ متر (۱۲ فوت) با ضخامت سطح مقطع ۲۲۹–۱۷۸–۲۲۹ میلی‌متر و لبه‌های ضخیم شده را مورد ارزیابی قرار داد. روسازی در سال ۱۹٤۱ ساخته شده بود. دال‌ها به وسیله شبکه مفتولی مسلح شده و دارای درز انقباض به فاصله ۱۲/۲ متر (٤۰ فوت) و درز انبساط به فاصله ۳٦/٦ متر (۱۲۰ فوت) از همدیگر بود.

بار کامیون‌ها با محور تک از۸۰ و ۱۰۰ کیلونیوتن (۱۸۰۰۰ و ۲۲٤۰۰ پوند) و با محور دوگانه (تاندم) از ۱٤۲ و ۲۰۰ کیلونیوتن (۳۲۰۰۰ و ٤٤۸۰۰ پوند) در بین ماه‌های ژوئن و دسامبر در سال ۱۹۵۰ اعمال شد. این آزمایش جاده‌ای با هدف اولیه طراحی مسیر به کار گرفته نشد، بلکه هدف آن تعیین تخصیص مالیات‌ها بین راه‌آهن و راه بود.

آزمایش جاده‌ای شرایط ترافیک پرسرعت را بر روی روسازی اعمال کرد و ظرف چند ماه، عمر روسازی حاصل از ترافیک را شبیه‌سازی کرد. با این وجود، تسریع در اثرات محیطی غیرممکن بود. پاسکو (۱۹۹۸) اظهار می‌دارد: «نیازمند سیستمی هستیم تا اثرات متغیرهای کنترل نشده (محیطی) را نیز بر عملکرد روسازی در نظر بگیرد. مثال مناسب این موضوع آزمایش جاده‌ای One-MD است که در طول ماه‌های جولای و آگوست صدمات جزئی به وجود آورد. در ماه سپتامبر مسیر شاهد باران شدیدی بود. در ماه آگوست هشت درز دچار پدیده مکش شد در حالی که در سپتامبر و اکتبر به ترتیب ۲۰ و ۲۸ مورد مکش اتفاق افتاد. بعد از یک بارش شدید، مکش لبه در آگوست به طول ۵۰ متر (۱٦۲ فوت)، در سپتامبر ۱٤۰ متر (٤٦۲ فوت) و در اکتبر ۱۱٦ متر (۳۸۰ فوت) بود».

در آزمایش جاده‌ای مریلند، افزایش ترک‌خوردگی با گسترش مکش در ارتباط مستقیم بود. بر این اساس مشخص شد که بیشترین میزان مکش در درزهای انبساطی اتفاق می‌افتد. در خاک رس با خاصیت پلاستیک و نه در زیراساس شنی، با درصد پایین سیلت و رس مکش اتفاق می‌افتد. تغییر شکل‌های ناشی از انحناء و پیچ‌وتاب حرارتی نیز اندازه‌گیری و مشخص شد که شدت آن‌ها قابل توجه است.

اولین روسازی فرودگاه در سال ۱۹۲۸ در فورد فیلد[1] در دیربورن میشیگان احداث گردید. در سال بعد از آن، لانکن فیلد[2] در سینسیناتی اوهایو ساخته شد. مانند بسیاری از روسازی‌های اولیه، با استفاده از یک لبه ضخیم شده که ۵ میلی‌متر (۲ اینچ) نسبت به خط میانی ضخیم‌تر بود، ساخته شد. در طول دهه ۱۹۳۰ هواپیمای غالب، هواپیمای نسبتاً سبک DC-3 بود. بنابراین کامیون‌های سوخت‌رسان به هواپیما عامل کنترل کننده طراحی بودند. روسازی بتنی فرودگاه‌های اولیه عمدتاً ۱۵۲ میلی‌متر (٦ اینچ) ضخامت داشتند. ظهور بمب‌افکن‌های B-29 در جنگ جهانی دوم مستلزم احداث روسازی به ضخامت ۳۰۵ میلی‌متر (۱۲ اینچ) شد، بنابراین روسازی موجود با ضخامت ۱۵۲ تا ۱۷۸ میلی‌متر (۷-٦ اینچ) با استفاده از بتن جدید روکش شد. پس از جنگ با ظهور بمب‌افکن‌های

1- Ford Field
2- Lunken Field

بزرگ‌تر، ضخامت روسازی به ۵۰۸ تا ۶۸۶ میلی‌متر (۲۰ تا ۲۷ اینچ) افزایش پیدا کرد.
فعالیت گروه مهندسین ارتش آمریکا در توسعه و پیشرفت طراحی روسازی، به ویژه در زمینه فرودگاه چشم‌گیر بود. با حضور B-29 در اواخر جنگ جهانی دوم و متعاقب آن بمب‌افکن‌های سنگین‌تر و دوربرد، گروه مهندسی را در طراحی روسازی مقاوم در برابر بارهای خیلی سنگین، با مشکلاتی مواجه ساخت. در سال ۱۹۷۵، یودر و ویتزک[1] اظهار کردند که: «ارتش در طول ۲۰ سال گذشته، برنامه‌های تحقیقاتی گسترده‌ای را بر روی نمونه‌های روسازی و قطعه‌های آزمایشی اجراء کرده است».
ری[2] پیشرفت‌های حاصل بین سال‌های ۱۹۴۵ و ۱۹۸۰ در زمینه طراحی روسازی و عملکرد آن را این گونه جمع‌بندی کرد:

- برپایه مشاهدات انجام شده از تغییر شکل روسازی ناشی از انبساط و انقباض خاک‌های بسیار منبسط شونده در اواخر دهه ۱۹۳۰، راهکار اصلاح برای این نوع از خاک با استفاده از سیمان و یا آهک مطرح شد.
- سازوکار تورم ناشی از یخبندان شناسایی شد و مورد آنالیز قرار گرفت و برای ساخت دقیق‌تر بستر روسازی و لایه‌های زیراساس شنی به نسبت نازک و مقاوم در برابر تورم ناشی از یخبندان روش‌هایی ارائه و به کار گرفته شد.
- مکش به عنوان سازوکاری مخرب در درزهای روسازی بتنی و شرایط حساس شناخته شد که می‌تواند به وسیله زیراساس‌های شنی و درزهای متصل، کنترل شود.
- در زیراساس‌های دانه‌ای نازک، زهکشی ناکافی یا تراکم غیریکنواخت می‌تواند مشکلاتی را رقم بزند.
- اساس یا زیراساس‌های تثبیت شده با سیمان، بستری مناسب فراهم کرد که از به وجود آمدن مکش جلوگیری می‌کند.
- تحت شرایط مناسب، روسازی نازک بتنی می‌تواند خدمت‌دهی رضایت بخشی را ارائه دهد. برخی از روسازی‌های فرودگاه با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (۶ اینچ)، در جایی که بار چرخ هواپیما از حد مجاز تجاوز نکند، بیش‌از ۳۰ سال مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. به طور مشابه، راه‌های مواصلاتی روستایی از مزرعه به محل عرضه، در ایالت آیوآ تنها با ۱۱۰ میلی‌متر (۴ ۱/۲ اینچ) ضخامت ترافیک موجود را برای ۳۰ سال پذیرا بوده است.

1- Witzak & Yoder
2- Ray

- حتی اگر تنش‌های دال بالا نباشد، تغییر شکل‌های فراتر از حد می‌تواند مشکلاتی را به صورت خمش، پیچش و هوازدگی توأم در عملکرد روسازی به وجود آورد.
- ادارات راه‌وترابری به دلیل تورق، ترک‌خوردگی و شکست در قسمت مسلح ترک‌های متوسط، از روسازی بتنی مسلح درزدار به روسازی بتنی غیرمسلح درزدار روی آورده‌اند.
- مشکلات درزهای بدون میلگرد اتصال در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار فرودگاه و راه، منجر به استفاده گسترده‌تر میلگردهای اتصال[1] شد.
- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار با فواصل درز کوتاه به اندازه ٤/٦ متر (١٥ فوت)، کم‌ترین هزینه را در چرخه عمر دارد.
- شانه‌های بتنی درگیر با خط اصلی روسازی بتنی، تغییر شکل‌ها و تنش‌ها را کم‌تر کرده و ایمنی و زهکشی سطحی را افزایش و نیاز به نگهداری از شانه راه را کاهش می‌دهد.
- روکشی که به طور مناسب طراحی و ساخته شده باشد، می‌تواند خدمت‌دهی را برای سال‌ها فراهم آورد.

۱-٤- آزمایش جاده‌ای آشتو

براساس قرارداد راهسازی فدرال در سال ۱۹۵٦، ٦٦۰۰۰ کیلومتر (٤۱۰۰۰ مایل) بزرگراه بین ایالتی توسط آیزن هاور ایجاد شد که ٦۰ درصد این سیستم را روسازی بتنی تشکیل می‌داد. مسلماً انجام تحقیقاتی نیاز بود تا از این عملیات پشتیبانی کند. آزمایش جاده آشتو، یک مطالعه ۲۷ میلیون دلاری بود که در نزدیکی اتاوا- ایلینوی به اجراء درآمد. شش مسیر دایره‌ای متفاوت احداث شد و در طی ۲ سال مورد بارگذاری قرار گرفت. دوازده ترکیب مختلف از محورها و ضخامت‌های مختلف روسازی‌های آسفالتی و بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت و بدین وسیله روند عملکرد آن‌ها بدست آمد.

طبق اظهارات پاسکو (۱۹۹۸) در این باره:
«در آزمایش جاده آشتو، دو حالت خرابی مشخص برای روسازی بتنی وجود دارد. در روسازی‌های بسیار نازک، بر اثر مکش مداوم لبه خرابی اتفاق می‌افتد که ترک‌خوردگی لبه‌ای و در نهایت ادغام آن با ترک‌های لبه‌ای طولی حاصل می‌شود. در روسازی‌های

1- Dowel

ضخیم‌تر خرابی بر اثر مکش موجود در درز بین دو دال اتفاق می‌افتد و منجر به ترک‌های عرضی می‌شود. این پدیده در قسمتی از درز که ترافیک از آن عبور می‌کرد، شدت می‌یافت. اطلاعات بدست آمده از هر دو حالت، در تحلیل آزمایش جاده متعادل‌سازی شد تا یک رابطه کاربردی حاصل شود. با این وجود، در پایان آزمایش از ۸٤ مقطع با ضخامتی بیشتر از ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ)، تنها هفت مقطع، شاخص خدمت‌دهی کم‌تر از ٤ داشته‌اند. در واقع تنها سه مقطع را می‌توان در معرض خرابی در نظر گرفت. بنابراین، این نکته به ذهن متواتر می‌شود که گرچه اطلاعات بدست آمده از آزمایش آشتو بهترین اطلاعاتی است که در دست داریم، ولی پیش‌بینی خرابی در روسازی‌های با ضخامت فعلی (بیشتر از ۸ اینچ)، به سختی انجام می‌شود. علاوه بر آن، هیچ‌گونه خرابی ناشی از پانچ‌شدگی از قبیل آن‌هایی که بر اثر چرخ‌های فولادی در آزمایش جاده پیتزبرگ به وجود آمده‌اند و یا هرگونه خرابی محیطی دیگری مثل از هم پاشیدگی، پانچ‌شدگی‌های روسازی بتنی مسلح پیوسته و غیره در آزمایش جاده وجود ندارد.

روسازی‌های بتنی اولیه اغلب در اثر آسیب‌های ناشی از ذوب و انجماد متوالی، یخ‌زدایی با نمک یا مکش زیراساس دچار خرابی می‌شدند. در دهه ۱۹۳۰ این مشکلات مطرح و به منظور مقابله با مشکلات عمر خدمت‌دهی در بتن، عمل حباب‌سازی انجام شد. شرایطی که احتمال وقوع مکش در آن زیاد بود، مورد شناسایی شد که ناشی از خاک معلق بستر ریزدانه، وجود آب در بستر و بارگذاری متناوب توسط محورهای سنگین بودند. در شرایط مزبور برای جلوگیری از مکش بین روسازی بتنی و بستر از لایه‌های زیراساس استفاده می‌شود.

در این مدت، پیشرفت‌های صورت گرفته در تجهیزات تولید بتن به نسبت ناچیز بوده است و تنها به جایگزینی مخلوط‌کن‌های برقی به جای مخلوط‌کن‌های دستی اکتفاء شده است. همچنین در فرآیند روسازی از قالب‌های کناری به نسبت پرهزینه استفاده می‌شد. دستگاه ساخت روسازی بتنی لغزنده بین سال‌های ۱۹٤٦ و ۱۹٤۹ به وسیله دو مهندس راهساز ایالتی به نام‌های جیمز جانسون[1] و برت مایرز[2] در آیوآ ساخته شد. این نوآوری اولین بار در ۱۹٤۹ در ساخت یک راه با روسازی به عرض ۲/۷ متر (۹ فوت) و ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از دو دستگاه روساز در کنار هم یک راه اصلی را می‌توان با یکبار عبور روسازی کرد. در سال ۱۹۵۵، شرکت ساختمانی شهر کوآد یک دستگاه اجرای روسازی متحرک را ابداع کرد که می‌توانست مسیری به

1- James W. Johnson
2- Bert Myers

عرض ۷/۳ متر (۲٤ فوت) و به ضخامت ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) را روسازی کند. به مرور زمان دستگاه‌های اجرای روسازی بزرگ‌تری نیز ساخته شد. در طول این مدت درزهای ساخته شده با دست جای خود را به درزهای بریده شده توسط اره دادند که سبب شد سطح روسازی هموارتری بدست آید.
علاوه بر آن، روش‌های اجرایی نیز بهبود یافت. «در دهه شصت در ساخت‌وسازهای بین ایالتی، برخی از پیشرفت‌های موجود در تکنولوژی ساخت روسازی بتنی دیده می‌شد. کنترل‌های الکترونیکی به دستگاه‌های لغزنده اجرای روسازی اضافه شد. تراش دهنده‌های بستر، برای کنترل بهتر شیب معرفی شدند. شانه‌های قفل شده بتنی که برای اولین بار در سال ۱۹٦٤ در ایلینوی مشاهده شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند تا ارزش سازه‌ای قابل توجهی به روسازی بتنی بدهند. اره‌های برش بتن در اندازه‌ها و ظرفیت‌های مختلف تولید شدند». ظرفیت تولیدی کارخانه‌های اختلاط مرکزی بتن نسبت به فرآیند قدیمی بچینگ خشک تا ۱۰ برابر افزایش یافت. نتیجه کلی افزایش چشم‌گیر سرعت ساخت‌وساز بود.
اجزای قالب‌های لغزنده مدرن روسازی راه در اشکال ۱-۱ تا ۱-۳ نشان داده شده است. در شکل ۱-۱، برای فراهم آوردن شرایط انتقال بار در طول درز، آرماتورهای اتصال و خاموت‌های جاسازی‌شده در سبدهای فولادی پشتیبانی می‌شوند. شکل ۱-۲ خروج بتن از دستگاه لغزنده روساز و همچنین عملیات پایانی را نشان می‌دهد. شکل ۱-۳ چگونگی استفاده از روساز لغزنده را در قوس نشان می‌دهد.

۱-۵- سیر تکاملی در طراحی

براساس اظهار نظر یودر و ویتزک، روسازی بتنی اولیه، بدون توجه به نوع بستر یا شرایط زهکشی بر روی بستر قرار داده می‌شد. ضخامت معمول دال بین ۱۵۲ تا ۱۷۸ میلی‌متر (٦ تا ۷ اینچ) است. اگرچه موضوع مکش در اوایل ۱۹۳۲ مطرح شد ولی بعد از جنگ جهانی دوم با افزایش ترافیک، به عنوان یک پدیده مهم نمود پیدا کرد.
مقاطع با لبه ضخیم در دهه‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹٤۰ رواج یافت. به عنوان مثال، باید روسازی با ضخامت ۱۵۲ میلی‌متر (٦ اینچ) در مرکز و ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) در طول لبه ساخته و به آن طرح ۸-٦-۸ اتلاق می‌شد. روسازی‌ها نیز عمدتاً فقط ۵/۵ تا ٦/۱ متر (۱۸ تا ۲۰ فوت) عرض داشتند.

شکل ۱-۱: شبکه‌های آرماتور اتصال و خاموت در راستای فضاسازی مناسب برای دستگاه روساز لغزنده

(منبع عکس از شرکت ساختمانی Great Lake، هنکلی، اوهایو)

شکل ۱-۲: دستگاه روساز لغزنده (منبع عکس از شرکت ساختمانی Great Lake، هنکلی، اوهایو)

شکل ۱-۳: پرداخت روسازی در قوس (منبع عکس از شرکت ساختمانی Great Lake، هنکلی، اوهایو)

با پیشرفت در نحوه طراحی، روسازی‌ها بر روی زیراساس‌های شنی ساخته شدند تا از اثر مکش جلوگیری شود. در آب‌وهوای شمالی، لایه‌های ضخیم اساس نیز برای محافظت در برابر یخبندان به کار گرفته شد. ضخامت لایه روسازی برای راه‌ها به ۲۵٤-۲۲۹ میلی‌متر افزایش یافت. امروزه طرح‌های ضخیم‌تر را برای راه‌های پرتردد انتخاب می‌کنند.

۱-٦- برنامه درازمدت عملکرد روسازی

آخرین و بزرگ‌ترین آزمایش جاده‌ای در سال ۱۹۸۷ شروع شد و تا دو دهه بعد ادامه یافت (در واقع تا امروز ادامه دارد). این آزمایش در واقع آزمایش عملکرد درازمدت روسازی اداره راه فدرال بود که خود بخشی از برنامه استراتژیک تحقیقاتی راه محسوب می‌شد. آزمایش عملکرد بلندمدت روسازی آزمایش‌های میدانی را بر روی بیش از ۲٤۰۰۰ قطعه روسازی بتنی و آسفالتی به طول ۵۰۰ متر (۱٦٤۰ فوت) در آمریکا و کانادا انجام داد.

این برنامه از دو بخش روسازی در حال خدمت‌دهی (بخش مطالعات کلی روسازی) و از روسازی با عملکرد بلندمدت تشکیل شده است که با عنوان بخش ویژه مطالعات

روسازی در نظر گرفته شدند. قطعات بخش ویژه مطالعات روسازی در هر آزمایش با یک طرح آزمایشگاهی مخصوص ساخته می‌شد. در برنامه اصلی ۷۷۷ سایت مطالعات جامع و ۲۳٤ بخش ویژه مطالعات روسازی وجود داشت. آزمایش تکمیلی با عنوان برنامه نظارت فصلی که روی اثرات محیطی تمرکز می‌کرد نیز به کار گرفته شد.

در مدت اجرای مراحل مطالعات جامع روسازی، برنامه‌های GPS-4، GPS-3 و GPS-5 به ترتیب روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار و روسازی بتن مسلح یکپارچه را تحلیل کردند.

دو آزمایش دیگر، روکش بتنی روی روسازی را تحلیل می‌کردند که GPS-8 برای روکش پیوسته و GPS-9 برای روکش ناپیوسته در نظر گرفته شده بود. با این حال، برنامه روکش پیوسته ادامه پیدا نکرد.

پنج مورد از نه برنامه بخش ویژه مطالعات جامع، مربوط به روسازی صلب بود. این موارد شامل: SPS-2، فاکتور سازه‌ای، SPS-4، اثرات نگهداری پیشگیرانه، SPS-6، نوسازی، SPS-7، روکش بتنی پیوسته و SPS-8، مطالعه در مورد اثرات محیطی در غیاب بارگذاری سنگین بود. به دلیل این که تعداد معدودی از ایالت‌ها تمایل به ساخت روکش بتنی پیوسته داشتند، تنها چهار سایت برای آن ساخته شد و نیز آزمایش SPS-7 زودتر از زمان موعد خاتمه یافت.

تمام سایت‌ها، حاوی اطلاعات جمع‌آوری شده اصلی متشکل از مصالح، تجهیزات و نمونه‌های مصالح بود. برای جمع‌آوری اطلاعات بخش‌های مربوط به عملکرد بلندمدت روسازی، بازرسی‌های دوره‌ای توسط پیمانکاران انجام می‌شد. اطلاعات جمع‌آوری شده شامل ترافیک، پروفیل روسازی، همواری، خرابی، اصطکاک و افتادگی توسط دستگاه خیزسنج وزنه‌ای بود. در عین حال اطلاعات آب‌وهوایی نیز گردآوری شد.

برنامه عملکرد بلندمدت روسازی نسبت به آزمایش‌های جاده‌ای قبلی مزیت‌های فراوانی داشت. تست‌های جاده‌ای گذشته به یک مکان جغرافیایی منحصربه‌فرد محدود می‌شد و عموماً بارگذاری ترافیکی به صورت تسریع یافته صورت می‌گرفت که این امر اثرات محیطی را کم‌رنگ‌تر می‌کرد. در مقابل، از آغاز برنامه بلندمدت روسازی نزدیک دو دهه می‌گذرد که در طول این زمان، شرایط واقعی بارگذاری و محیطی مورد نظارت قرار گرفته است.

برنامه عملکرد بلندمدت روسازی، گزارش‌های متعدد، طرح‌ها و وسایل تحلیل روسازی، شامل روند طرح روسازی صلب مطابق با آیین‌نامه آشتو را در پی داشت. اما بیشترین اهمیت برنامه عملکرد بلندمدت روسازی، ایجاد و کالیبره کردن مدل‌ها برای راهنمای

طراحی روسازی تجربی- مکانیکی آشتو بود.
برای سهولت دسترسی استفاده کنندگان به اطلاعات عملکرد بلندمدت روسازی، FHWA چندین نسخه نرم‌افزاری DataPave ارایه شد. چندین سال از اطلاعات و نرم‌افزار عملکرد بلندمدت روسازی در رقابت‌های دانشجویی استفاده می‌شد. وب‌سایتی نیز برای دسترسی به این نرم‌افزار به وجود آمد که همگان بتوانند از آن استفاده کنند و آنالیزهای خود را انجام دهند. هیئت تحقیقات حمل‌ونقل نیز برنامه‌ای برای مطالعات عملکرد بلندمدت روسازی دارد.

۱-۷- اقتصاد، عمر خدمت‌دهی و هزینه‌های چرخه عمر

کارشناسان راهسازی اعلام کرده‌اند که عمر خدمت‌دهی روسازی بتنی در حدود ۲۵ تا ٤۰ سال، یا به طور کلی ۱½ تا ۲ برابر عمر خدمت‌دهی روسازی آسفالتی با استانداردهای مشابه است. در کل، از بتن برای روسازی‌های پرترافیک استفاده می‌شود و توان باربری کامیون‌های سنگین در آن چهار برابر آسفالت است. هزینه‌های چرخه عمر در طرح‌های روسازی تا حد زیادی به قیمت مصالح به کار رفته در زمان ساخت بستگی دارد. هرچند هزینه اولیه احداث روسازی بتنی ممکن است بیشتر از روسازی آسفالتی شود، ولی معمولاً هزینه نگهداری کم‌تری را تحمیل می‌کند.

۱-۸- چالش‌های آینده

هرچند در برخی از موارد، مهندسان و مسئولان ساخت راه‌ها و سیستم راه‌های بین ایالتی در گذشته مسئولیت سبک‌تری نسبت به امروز داشتند ولی سیستم راه‌های بین ایالتی، مأموریتی بزرگ و تاریخی بود. وقتی که ساخت یک راه عبوری به پایان می‌رسد، باید نگهداری، تعمیر و در برخی مواقع بازسازی شود که در اغلب موارد لازم است تا این عملیات همزمان با ترافیک در حال جریان انجام شود. امروزه کنترل‌های دقیق‌تری برای شرایط آب‌وهوایی به کار گرفته می‌شود و در بسیاری از مناطق مصالح خام مورد استفاده در احداث راه رو به اتمام هستند. روسازی بتنی از جمله عوامل مهم در به روز رسانی و نگهداری شبکه سراسری محسوب می‌شود. مصالح و تکنیک‌های سریع اجرای روسازی بهبود یافته‌اند تا روسازی در کم‌ترین زمان ممکن بر روی ترافیک گشوده شود.

۱-۹- نگهداری و نوسازی

حتی بهترین طراحی و ساخت روسازی بتنی در نهایت خراب می‌شود و نیاز به نگهداری و بهسازی دارد. عملکرد و خرابی‌های روسازی بتنی در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفته است. تکنیک‌های نگهداری و مدیریت نگهداری در فصل ۱۶ بررسی شده و در فصل ۱۷ به تکنیک‌های نوسازی پرداخته شده است. تشخیص زمان مناسب برای نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است و این امر به طور قابل توجهی عمر روسازی را افزایش داده و زمان بازسازی را به تأخیر می‌اندازد.

یک برنامه نوسازی و نگهداری مؤثر نیازمند درک عمیق از رفتار روسازی می‌باشد. با جنبه‌های اساسی طراحی در فصل ۷ می‌توان نگاه دقیق‌تری داشت به این که آیا خرابی روسازی مربوط به کافی نبودن ضخامت است یا مصالح زیرساختی ناپایدار می‌باشد یا شاید فاصله درز انبساط‌ها زیاد و فراتر از حد متعارف خود است.

۱-۹-۱- مواجهه با تراکم ترافیک و چالش‌های مربوط به ایمنی

نوسازی راه‌های امروزی نیاز به مدیریت ترافیک و روش‌های اجرایی سریع و کارآمد دارد، تا نتیجه آن یک روسازی راحت و با عمر خدمت‌دهی طولانی باشد. نگهداری و نوسازی روسازی‌ها، به ویژه با حجم بالای ترافیک، مخصوصاً در نواحی متمرکز شهری، با چالش‌هایی همراه است.

انجمن آمریکایی روسازی بتنی دستنامه‌ای با عنوان مدیریت ترافیک و دستنامه‌ای برای نوسازی و بازسازی روسازی بتنی منتشر کرده است که برخی از این مسائل را مورد بررسی قرار می‌دهد. برخی از نکات ارائه شده به صورت زیر است:

- در بسیاری از پروژه‌های بازسازی آزادراه‌های شهری، هزینه‌های ناشی از تأخیر استفاده کنندگان از راه ممکن است به ازای هر روز به ۵۰۰۰۰ دلار برسد.
- روسازی‌های بتنی نیازی به تعمیر ۱۴-۵ روزه قبل از بازکردن ترافیک ندارند. طرح اختلاط‌هایی موجود است که می‌تواند پس از ۸-۶ ساعت به ترافیک اجازه عبور دهد.
- محدود کردن پیمانکار به بستن فقط یک خط عبور یا کار شبانه ممکن است کار عاقلانه‌ای از لحاظ ایمنی و بازدهی نباشد.
- اصولاً مردم پروژه‌های کوتاه‌مدت با مشکلات بزرگ را به پروژه‌های بلندمدت با مشکلات کوچک ترجیح می‌دهند.

- مشکلاتی که باید مدنظر قرار گیرد عبارتند از: محدودیت‌های پروژه، مدیریت ترافیک، ایمنی، نیازهای ساخت، مزایده خلاقانه، قابلیت ساخت، برنامه‌ریزی حیاتی، اطلاعات عمومی و هماهنگی.
- مزایده خلاقانه و روش‌های عقد قرارداد، مثل تشویق یا تنبیه و پیشنهاد افزایش مبلغ یا زمان، انگیزه و تلاش پیمانکاران را در اتمام پروژه‌ها، سرعت می‌بخشد.
- تکیه‌گاه‌های انتهایی دوطرف پل و رفع موانع، ممکن است سبب محدود شدن امکانات ترکیب‌بندی موجود در محدوده عملیات اجرایی شود که باید در ابتدای فرآیند برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود.
- بازیافت مصالح روسازی در محل، که در این فصل مورد بحث قرار خواهد گرفت، مدت اجرای پروژه را کاهش می‌دهد.
- در دسترس بودن و ظرفیت مسیرهای انحرافی و همچنین دسترسی برای ماشین‌آلات ساخت ملاحظات کلیدی هستند. روسازی و پل‌ها در مسیرهای انحرافی که افزایش ترافیک قابل توجهی را خواهند داشت، باید مورد ارزیابی سازه‌ای قرار گیرند.
- لازم است درباره آثار، منافع آینده و پیشرفت پروژه به مردم اطلاع‌رسانی شود.
- تکنولوژی آزمایش‌های غیرمخرب، مانند آزمایش رسیدن بتن یا آزمایش فراصوت می‌تواند با اندازه‌گیری مقاومت روسازی در محل، شرایط را برای استفاده از بستر احداث شده فراهم آورد. انجمن روسازی بتنی آمریکا، مقاومت لازم برای استفاده ترافیک عبوری از روسازی‌های بتنی را در قالب جدولی ارائه کرده است.

ایمنی کارگاه‌های احداث بزرگراه‌ها در آمریکا در قسمت ششم از راهنمای یکسان‌سازی تجهیزات کنترل ترافیک (FHWA, 2003) مورد بحث قرار گرفته است. می‌توان تراکم ترافیک و ظرفیت مسیر را با استفاده از کتابچه راهنمای ظرفیت راه تحلیل و بررسی نمود. تسریع در ساخت‌وساز و بازسازی روسازی‌های بتنی نیز توسط دستورالعمل مؤسسه بتن آمریکا، روش‌های تسریع در اجرای روسازی بتنی، ACI325.11R-01، مورد بحث قرار گرفته است. توجه به این نکته مهم است که اجرای روسازی بتنی تسریع شده همیشه نیازمند مقاومت اولیه بالا نیست. با مصالح و مخلوط‌های در حال استفاده امروزی، روسازی‌های بتنی معمولی به طور کلی ظرف ٤-٢ روز به مقاومت کافی برای تحمل ترافیک می‌رسند، در نتیجه اگر باز کردن مسیر به روی ترافیک تا این اندازه با تأخیر انجام شود، هیچ نیازی به استفاده از بتن با مقاومت اولیه بالا نیست. در پروژه‌های کوچک نظیر

پروژه‌های تقاطع شهری که در آن‌ها امکان بستن مسیر فقط در روزهای تعطیل آخر هفته امکان‌پذیر است، می‌توان مسیر را با روسازی بتنی معمولی اجراء کرد. اگر تمام عملیات بتن‌ریزی تا عصر شنبه اجراء شود، در نهایت یک روز و نیم برای عمل آمدن بتن زمان وجود دارد تا صبح روز دوشنبه ترافیک به‌روی آن باز شود.

یک مطالعه موردی جالب، بازسازی مسیر پرترافیک در بزرگراه بین ایالتی ۱۵ کالیفرنیای جنوبی است. ٤/٥ کیلومتر (۲/۸ مایل) از قطعه بتنی خطوط مخصوص عبور کامیون به شدت دچار خرابی شده بود که با بستن مسیر در دو دوره نه روزه، بازسازی شد. از آنجایی که این مسیر شاهراه اصلی بین لس‌آنجلس و لاس‌وگاس است، در تعطیلات آخر هفته ترافیک سنگینی را متحمل می‌شود. پروژه مورد نظر توسط لی و همکارانش (Lee et al, 2005) با جزئیات کامل مورد بحث قرار گرفت. برخی از ویژگی‌های کلیدی پروژه عبارتند از:

- بازسازی در مدت نه روز و در مسیر بسته انجام شد. این عمل در مقابل کار در شب صورت گرفت. چرا که مشخص شد بستن کامل مسیر در دوره‌های طولانی‌تر سبب افزایش بازدهی پیمانکاران می‌شود.
- بستن مسیر به مدت طولانی‌تر سبب کاهش اختلال در سفرهای عمومی، افزایش عمر متوسط روسازی، ارتقای ایمنی و کاهش قابل توجه هزینه‌های ساخت شد.
- روسازی موجود با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) بتن بر روی ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) اساس تثبیت شده با سیمان و ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ) اساس سنگدانه‌ای با ۲۹۰ میلی‌متر (۱۱ ۱/۲ اینچ) لایه بتنی بر روی ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) آسفالت بر روی نیمی از اساس که مجدداً مورد استفاده قرار می‌گرفت، جایگزین شد. شیب روسازی تغییر نکرد. خط کناری مخصوص عبور کامیون به میزان ٦۰۰ میلی‌متر (۲ فوت) عریض شد تا تنش‌های ناشی از بارگذاری لبه کاهش یابد.
- اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا تلاش قابل توجهی را انجام داد تا با عموم مردم ارتباط برقرار کند و طرح توجیهی خود را در زمینه چگونگی استراتژی انتخاب شده در کاهش زمان انجام پروژه و به حداقل رسیدن اختلالات سفر را توضیح دهد. یک سیستم خودکار اطلاع‌رسانی، اطلاعات مربوط به زمان سفر و مسیرهای انحرافی را بر روی تابلوهای پیام متغیر در اختیار عموم قرار می‌داد. موارد اطلاع‌رسانی دیگر شامل بروشورها و آگهی‌های جامع، تابلو اعلانات الکترونیکی برای مشاوره ساخت و یک خط تلفن اختصاصی برای اطلاع‌رسانی

درباره پروژه بود. به منظور تبادل اطلاعات پروژه با مردم و دریافت بازخوردهای آن، از یک وب‌سایت نیز استفاده شد. در همین راستا چندین جلسه عمومی برای افراد محلی برگزار شد.

- با استفاده از سیمان تیپ III، بتن سریعاً به مقاومت مورد نیاز می‌رسید، به طوری که روسازی بعد از ۱۲ ساعت برای رفت‌وآمد آماده می‌شود. در حدود ۵۰ درصد از پروژه قادر به استفاده از بتن مرسوم با سیمان تیپ II بود، به شرط آن که ۲٤ ساعت برای عمل آمدن بتن فراهم شود.
- زمان تکمیل پروژه، مشوق‌ها، بازدارنده‌ها و جریمه‌های مربوط به دیرکرد در قرارداد مشخص شده بود.

در پروژه‌های بزرگ‌تر ممکن است، بخش عمده‌ای با بتن معمولی روسازی شود با این تفاوت که نوار محصور کننده نهایی، از جنس بتن با مقاومت اولیه بالا مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد برای حل چالش‌های به وجود آمده در طول ساخت باند جدید در مسیر حساس و حیاتی ارتباط دهنده به باند، در فرودگاه بین‌المللی کلیولند هاپکینز[1] اتخاذ گردید. با این حال با برنامه‌ریزی مناسب، بتن معمولی مقاومت اولیه کافی را بدست می‌آورد و نیازی به بتن با مقاومت اولیه بالا نیست.

مطالعات موردی پروژه‌های مشابه می‌تواند بینش ارزشمندی درباره تکنیک‌ها و استراتژی‌های موجود فراهم کند. پشکین[2] و همکارانش درباره فرودگاه مطالعاتی موردی را انجام دادند. گزارش انجمن روسازی بتنی آمریکا، مدیریت ترافیک- دستنامه بازسازی و نوسازی روسازی‌های بتنی، درباره مطالعات موردی راه و خیابان به این صورت بحث می‌کند:

- به منظور استفاده گسترده از تکنیک‌های تسریع در اجرای روسازی مربوط به بازسازی بزرگراه عدن در شمال حومه شیکاگو، به اداره حمل‌ونقل ایلینوی نیاز بود که اطلاعات بسیاری را برای دستنامه انجمن روسازی بتنی آمریکا فراهم آورد.
- در دنور، کلرادو، ۷۵ روز از جدول زمان‌بندی ۲۰۰ روزه، برای ساخت یک راه شریانی شهری کاسته شد.
- در بخش جانسون، کانزاس، یک تقاطع اصلی با روسازی آسفالتی، فقط در طول یک آخر هفته با روسازی بتنی روکش شد.

1- Cleveland Hopkins
2- Peshkin

اگر قرار باشد بتن با مقاومت اولیه بالا استفاده شود، لازم است دوام آن مورد توجه قرار بگیرد. در برخی از مخلوط‌ها که در ۸-٦ ساعت به مقاومت خود می‌رسند، مشکلات مربوط به دوام ظاهر می‌شود. دوام بتن با مقاومت اولیه بالا توسط وان دام و همکارانش[1] در فصل ٦ بحث شده است. برای نهادهای مسئول امری ناخوشایند است که تعمیرات صورت گرفته به سرعت خراب شوند و نیاز به تعمیر مجدد پیدا کند.

۱-۹-۲- بازیافت و استفاده مجدد از مواد

از ابتدای قرن گذشته، احداث راه‌ها، پل‌ها و ساختمان‌ها، به خصوص در مناطق پرجمعیت افزایش یافته است. با گذشت زمان این امکانات نیازمند تعمیر و یا جایگزینی دارند. چرا که عمر خدمت‌دهی آن‌ها به پایان رسیده و یا طرح موجود، دیگر جوابگوی افزایش نیازهای ناشی از رشد جمعیت یا ترافیک نمی‌باشد. این حقایق سبب به وجود آمدن دو مسئله مهم شده‌اند. اول، تقاضای رو به رشد برای مصالح سنگی روسازی و دوم، افزایش میزان ضایعات ناشی از ساخت‌وساز است. در آمریکا هر ساله دو میلیارد تن مصالح سنگی تولید می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۰ تولید به بیش از ۲/۵ میلیارد تن در سال برسد. این امر باعث افزایش نگرانی در مورد استفاده از مصالح سنگی طبیعی و مناطق دارای معادن جدید شده است. از طرف دیگر، ضایعات حاصل از تخریب ساختمان‌ها به تنهایی ۱۲۳ میلیون تن در سال تخمین زده می‌شود. در طول تاریخ، متداول‌ترین روش مدیریت این مواد، دفن آن‌ها در خاک‌چال‌ها بوده است. از آنجا که هزینه، مقررات زیست محیطی و سیاست‌های استفاده از اراضی برای خاک‌چال‌ها عاملی محدود کننده است، نیاز به راهکاری برای استفاده مجدد از ضایعات و مصالح افزایش یافته است. این وضعیت باعث شد تا سازمان‌های ایالتی و صنایع تولید مصالح، بازیافت نخاله‌های بتنی را به عنوان یک ماده جایگزین آغاز کنند.

روسازی‌های مسلح شده با فولاد را نیز می‌توان بازیافت کرد. امروزه تجهیزاتی ساخته شده است که می‌توان با آن آرماتورها و میلگردهای اتصال را به طور اقتصادی و بدون نیاز به نیروی کار انسانی از روسازی جدا کرد. فولاد یا مش پیوسته، عمدتاً در سایت تخریب برداشته می‌شود، در حالی که میل‌مهارها و میلگردهای اتصال در یک کارخانه پردازش مصالح استخراج می‌شوند. تمام فولاد موجود در بتن باید برداشته شود.

بتن موجود را می‌توان خرد و بازیافت کرد و به عنوان روسازی جدید بتنی و یا به عنوان یک لایه اساس یا لایه زیراساس، در زیر روسازی بتنی به کار برد. خرد کردن و پردازش

1- Van Dam et al

ممکن است در محل سایت احداث یا نزدیک به آن انجام شود. برخی از مزایای مصالح سنگی بازیافت شده از بتن به شرح زیر است:

- نیاز به مصالح بکر را کاهش می‌دهد.
- از حجم مواد زائدی که باید به خاک‌چال‌ها منتقل شود می‌کاهد.
- سبب می‌شود هزینه‌های حمل‌ونقل و نیز تعداد کامیون‌هایی که باید به کارگاه وارد شده یا از آن خارج شوند کاهش یابد که این خود باعث می‌شود زمان و هزینه‌های پروژه کاهش یابد.
- خواص سیمانی باقی‌مانده و نیز تیزگوشه بودن تکه‌های بتن خرد شده، پایداری و صلبیت اساس و زیراساس ساخته شده از بتن بازیافتی را ارتقاء می‌دهد.
- زمانی که بتن قدیمی خرد و به اندازه‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شود، خطر ترک‌خوردگی در محل درز کاهش می‌یابد.

استفاده مجدد یا بازیافت بتن‌های موجود با خطرها و ریسک‌هایی همراه می‌باشد:

- بتن موجود اغلب خواص ناشناخته‌ای دارد. نخاله‌های ساختمانی ممکن است حاوی مواد زائد دیگری مانند آجر، چوب، فولاد، سرامیک و کاشی، شیشه یا مواد دیگر باشد. در نتیجه، برخی از شرکت‌های ساختمانی و راهسازی تنها اجازه می‌دهند از بتن‌های موجود که در پروژه‌های پیشین خودشان یا در پروژه‌های اداره راه و حمل‌ونقل به کار رفته است برای بازیافت و به کار بردن در پروژه‌های جدید استفاده شود.
- استفاده از سنگدانه بتنی بازیافتی در بتن جدید می‌تواند مشکلات مربوط به کارایی بتن را به وجود آورد، مگر این که درصد رطوبت مصالح کنترل شده باشد.
- برخی از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی قبل از استفاده در بتن جدید نیاز به شستشو دارند که این خود به هزینه‌ها اضافه می‌کند.
- در صورت عدم شستشو سنگدانه، بتنی بازیافتی گردوخاک و ذرات ریزدانه می‌تواند مقاومت فشاری بتن را کاهش دهد.
- به دلیل این که سنگدانه بتنی بازیافتی متشکل از سیمان، آب‌وهوا است، نسبت به مصالح سنگی اصلی استفاده شده در بتن (شن و ماسه) قدرت جذب بیشتر و وزن مخصوص کم‌تری دارد. بهتر است توده‌های این مصالح در شرایط اشباع با سطح خشک نگه داشته شود.
- زمانی که سنگدانه بتنی بازیافتی به عنوان اساس یا زیراساس استفاده می‌شود،

باید مرطوب نگه داشته شوند تا مقدار گرد و خاک کاهش پیدا کند و لایه روسازی دچار جداشدگی سنگدانه‌ها نشود. همچنین مصالح باید در یک شرایط کاملاً اشباع فشرده و متراکم شوند.

- زمانی که سنگدانه بتنی بازیافتی در یک لایه زهکش یا نزدیک منبع آب استفاده شود، خطر آبشستگی وجود دارد.

تیم بازیافت اداره راه فدرال آمریکا گزارشی ملی درباره وضعیت اجرایی مصالح سنگی بازیافت شده از بتن در برنامه حمل‌ونقل ارائه کرد. این تحقیق ٤١ ایالتی را که سنگدانه بتنی بازیافتی تولید می‌کنند، ۳۸ ایالتی که آن را به عنوان سنگدانه اساس استفاده می‌کنند و ۱۱ ایالتی که از آن به عنوان سنگدانه برای روسازی بتنی با سیمان پرتلند استفاده می‌کنند، شناسایی کرد. این گزارش نتیجه اجرای این مصالح را در تگزاس، ویرجینیا، میشیگان، مینسوتا و کالیفرنیا بازبینی و جمع‌بندی کرد. تگزاس، مینسوتا و کالیفرنیا گزارش کردند که عملکرد سنگدانه بتنی بازیافتی در اساس از سنگدانه‌های دست نخورده بهتر است. یک طرح پیشنهادی با کمک مهندسی ارزش توانست با استفاده از سنگدانه بتنی بازیافتی در پروژه ۳ میلیون دلاری در میشیگان ۱۱٤,۰۰۰ دلار صرفه جویی کند. میشیگان همچنین از بتن بازیافتی به عنوان خاکریز پشت کانال آبروها و زهکش‌ها استفاده کرده است. دو پیشرفت که استفاده از سنگدانه بتنی بازیافتی را جذاب‌تر می‌کند، یکی استفاده از واحدهای سنگ‌شکن متحرک است که می‌توان آن‌ها را به کنار توده‌های نخاله ساختمانی انتقال داد و دیگری واحدهای سنگ‌شکن قابل‌حملی است که روسازی را در محل خرد کرده و به مصالح اساس و زیراساس تبدیل می‌کند. FHWA وب‌سایتی که نشانی زیر برای ارائه اطلاعات در مورد بازیافت ایجاد کرد:

(http:/www.fhwa.dot.gov./pavement/recycling/index.cfm).

ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای خرابی بتن همیشه دلیلی وجود دارد. اگر بتن در اثر خستگی دچار خرابی شده باشد، استفاده از آن به عنوان مصالح بازیافتی با کمی ریسک همراه است. از طرف دیگر، اگر این گسیختگی به دلیل خرابی‌های مربوط به مصالح تشکیل دهنده بتن، از قبیل واکنش قلیایی- سیلیس باشد، بازیافت این مصالح برای استفاده در بتن جدید، به سادگی زمینه را برای گسیختگی بعدی فراهم خواهد کرد. یک داستان عبرت‌آموز در زمینه مشکلاتی که در اثر بازیافت بتن خرد شده در محیط مستعد حملات سولفاتی به وجود می‌آید با جزئیات آن توسط رولینگز و همکارانش (2006 ,Rollings et al) مطرح شده است و به طور خلاصه در فصل پنجم مورد بررسی قرار گرفته است. کار عاقلانه این است که بتن موجود را به دقت از لحاظ واکنش قلیایی-

سیلیس و ترک‌خوردگی‌های محل درز مورد بررسی و آزمایش قرار دهیم تا مشخص شود که آیا بازیافت گزینه‌ای مناسب است یا خیر.
اگر روسازی بتنی یک روکش نازک آسفالتی داشته باشد، می‌توان آسفالت و بتن را باهم خرد کرد و به عنوان اساس و زیراساس مورد استفاده قرار داد، اما این امکان در یک لایه جدید بتنی وجود ندارد. آسفالت موجود مضر نیست و لازم نیست تا از روکش جدا شود. ایالت مینسوتا اجازه می‌دهد حدود ۳ درصد قیر یا حدود ۵۰ درصد روسازی آسفالتی بازیافت شده در مواد تشکیل دهنده اساس استفاده شود. ایالت کالیفرنیا کمی فراتر می‌رود و اجازه می‌دهد تا هر ترکیبی از سنگدانه بتنی بازیافتی و روسازی آسفالتی بازیافت شده مورد استفاده قرار گیرد. انجمن روسازی بتنی آمریکا گزارشی تحت عنوان «روسازی بتنی بازیافتی، نشریه تخصصی P.014-TB» چاپ کرد که در مورد روسازی بتنی بازیافتی از روسازی‌های قدیمی، خرد کردن بتن و جانشین‌سازی روسازی‌های جدید بحث می‌کند. این نشریه جنبه‌های مهم و حساس طرح اختلاط سنگدانه بتنی بازیافتی در بتن جدید را در بر دارد. ممکن است لازم باشد میزان بهینه مصالح ریزدانه بتن بازیافتی در مخلوط تعیین شده و درصد آب مخلوط به دقت کنترل شود. در این نشریه یک دستورالعمل پیشنهادی نیز ارائه شده است.

۱-۹-۳- اثرات زیست محیطی

ساخت جاده و فرودگاه و تولید بتن و سایر مصالح ساختمانی، همراه با اثراتی است که بر روی محیط‌زیست می‌گذارد. به استثنای روسازی‌های قدیمی، صرف‌نظر از نوع آن، تأثیر بر روی مناظر بیشترین سهم را دارد. همچنین، روسازی آسفالتی و بتنی نیازمند مقادیر بسیار زیادی از مصالح سنگی هستند. بنابراین از لحاظ عملیات انجام شده در معدن و تولید تأثیر آن‌ها کاملاً یکسان است.
اثرات زیست محیطی تولید سیمان پرتلند به دلیل مصرف مقدار زیاد انرژی و در نتیجه انتشار CO_2 در اتمسفر می‌باشد. برای تولید یک مترمکعب بتن تقریباً به ۳/٤ گیگاژول انرژی نیاز است. «به عنوان بخش عمده‌ای از اقتصاد جهانی، صنعت بتن باید نقش فعالی در توسعه پایدار داشته باشد. چرا که تکنولوژی‌های جدیدی که می‌توانند CO_2 خارج شده از کارخانه‌های تولید سیمان پرتلند را کاهش دهند، اندک هستند. هرچند، این مهم (کاهش CO_2 خروجی) با کاهش خروجی کلینگر سیمان نیز تحقق می‌یابد (:2006 , 42Malhotra).
میزان تولید سالانه خاکستر بادی در جهان حدود ۹۰۰ میلیون تن است که چین، هند و

آمریکا بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. چین به تنهایی دوسوم از این مقدار را تولید می‌کند. انتظار می‌رود استفاده از ذغال‌سنگ در نیروگاه‌ها و تولید خاکستر بادی، در این کشورها دهه آینده افزایش چشمگیری داشته باشد. در حال حاضر این کشورها به طور تقریبی در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد خاکستر بادی در بتن استفاده می‌کنند. در ایالات متحده، خاکستر بادی در کارخانه‌های تولید بتن به صورت جداگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که اغلب در سایر کشورها خاکستر بادی به مقدار ۲۰ درصد از کل مخلوط با سیمان ترکیب می‌شود.

استفاده از انواع خاکستر بادی در بتن مناسب نیست. بخش اعظمی از خاکسترهای بادی استفاده شده در بتن از نوع F هستند که آن هم یک محصول جانبی از سوخت آنتراسیت (ذغال‌سنگ خشک و خالص) یا ذغال‌سنگ قیردار می‌باشد و خواص پوزولانیک دارد و فاقد خواص سیمانی است. خاکستر بادی با کلسیم بالا، از نوع C، که هم خاصیت سیمانی و هم خاصیت پوزولانی دارد، از لیگنایت (ذغال‌سنگ چوب‌نما) یا ذغال‌سنگ قیردار بدست می‌آید. با این وجود، تکنولوژی‌هایی وجود دارد که می‌تواند خاکسترهای بادی را که میزان نرمی و درصد مورد نیاز کربن در آن‌ها (دو مورد از مهم‌ترین پارامترهای خاکستر بادی به کار رفته در بتن) شرایط لازم را احراز نمی‌کند، مورد بهره‌برداری قرار دهند. این تکنولوژی شامل جداسازی کربن به وسیله روش‌های الکترواستاتیکی و شناورسازی می‌باشد. همچنین روش‌های خرد کردن و روش‌های طبقه‌بندی توسط هوا برای تولید خاکستر بادی با نرمی بالا به کار رفته است. مالهوترا[1] کاهش انتشار CO_2 را توسط استراتژی‌های زیر پیشنهاد می‌کند:

- استفاده کم‌تر از سیمان پرتلند؛
- استفاده بیشتر از مواد سیمانی مکمل؛
- استفاده درصد آب کم‌تر با استفاده بیشتر از افزودنی‌های کاهنده آب و فوق روان کننده‌ها؛
- استفاده از مصالح سنگی بازیافتی در بتن و ...؛ و
- در صورت امکان، تعیین میزان مقاومت ۵۶ یا ۹۱ روزه بتن به جای مقاومت ۲۸ روزه آن.

پس از آن، برای اجرای روسازی بتنی، استراتژی‌های کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار CO_2 به شرح زیر می‌باشند:

- به حداکثر رساندن مصرف مصالح دانه‌بندی شده به منظور به حداقل رساندن

1- Malhotra

حجم کلی ملات مخلوط همان‌گونه که در فصل ٦ بحث خواهد شد.
- استفاده از روان کننده‌ها، به منظور کاهش مقدار آب و در نتیجه کاهش درصد مواد سیمانی مورد نیاز برای حفظ همان نسبت آب به سیمان (w/c).
- جایگزینی حداکثر مقدار ممکن سیمان با خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی.

مالهوترا نوعی بتن با خاکستر بادی حجیم تهیه کرده است که در آن نیمی یا بیشتر از سیمان از خاکستر بادی جایگزین شده است. براساس اطلاع نویسنده تا به امروز از بتن با خاکستر بادی حجیم برای روسازی استفاده نشده است.

برخی دیگر از مواد سیمانی مکمل که می‌توان در روسازی بتنی به کار برد، سرباره کوره آهن‌گدازی، پوزولان طبیعی، خاکستر سبوس برنج، گرد سیلیکا و متاکائولین هستند. تاکنون از سرباره کوره آهن‌گدازی به طور گسترده در روسازی بتنی استفاده شده است، اما این مصالح به میزان محدود در دسترس است و فقط حدود ۲۵ میلیون تن (۲۸ میلیون تن) در یکسال تولید می‌شود. خاکستر سبوس برنج در مقیاس تجاری موجود نیست اما پتانسیل تولید آن را در سراسر جهان ۲۰ میلیون تن برآورد کرده‌اند. گرد سیلیکا و متاکائولین در سراسر جهان تنها در مقادیر نسبتاً کم موجود است. تا به امروز، بخار سیلیکا و متاکائولین به مقدار زیاد در روسازی استفاده نشده‌اند. از گرد سیلیکا برای روکش فشرده بتنی عرشه پل استفاده شده است و می‌توان آن را برای روکش پیوسته روسازی بتنی به کار برد.

۱-۹-٤- پایداری

امروزه توسعه پایدار در دایره توجه قرار گرفته است، به طوری که در سال ۱۹۹٦ در آیین‌نامه اخلاقی جامعه مهندسین راه و ساختمان آمریکا وارد شده است. این موضوع به عنوان بند «1e» به آن اضافه شد که مهندسین باید فرصت‌هایی را جستجو نمایند تا به طور مفید به جامعه خود خدمت‌رسانی کنند و برای پیشرفت امنیت، سلامت و رفاه جامعه و حفظ محیط‌زیست با عملی کردن توسعه پایدار تلاش کنند.

توسعه پایدار را به صورت «چالش‌های موجود درباره برطرف کردن نیازهای بشر در منابع طبیعی، محصولات صنعتی، انرژی، غذا، حمل‌ونقل، پناهگاه و مدیریت مؤثر ضایعات و در عین حال نگهداری و لزوم حفظ کیفیت محیط‌زیست و منابع طبیعی برای توسعه آینده» تعریف کرده‌اند. عنوان دیگر توسعه پایدار، ساخت‌وساز سبز است. روسازی‌ها زمینه بالقوه‌ای در مفهوم پایداری دارند. از آنجا که منابع غیرقابل تجدید جهان

مانند سوخت‌های فسیلی و مصالح سنگی استفاده شده در راهسازی رو به کاهش هستند، برای همه سطوح دولت واجب است که به جای مبنا قرار دادن هزینه‌های اولیه ساخت، سازه‌های روسازی را براساس مفاهیم پایدار مورد بررسی قرار دهند.

بعضی مزایای زیست محیطی و پایدار روسازی‌های بتنی شامل موارد زیر است:

- کاهش ۳۰-۲/٤ درصدی در انرژی مورد نیاز برای ساخت و نگهداری روسازی و صرفه جویی بیشتر برای راه‌های با ترافیک بسیار زیاد.
- کاهش مصرف سوخت وسیله نقلیه و تولید گاز گلخانه‌ای (مخصوصاً CO_2)، زیرا روسازی بتنی مقاومت غلطشی کم‌تری دارد، بنابراین وسیله نقلیه برای حرکت به نیروی کم‌تری نیاز دارند. کاهش مصرف سوخت تا ۲۰ درصد مشاهده شده است.
- روسازی بتنی مصالح سنگدانه کم‌تری را در ساخت روسازی مصرف می‌کند چرا که به لایه اساس نیاز ندارد و این در حالیست که روسازی آسفالتی در مقایسه با نوع بتنی آن بیش از دو برابر مصالح سنگی استفاده می‌کند. این مصالح در حال کاهش هستند و حمل آن‌ها توسط کامیون‌ها نقش قابل توجهی از اثرات زیست محیطی ساخت راه‌ها به عهده دارد.
- مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و گرد سیلیکا، محصولات جانبی صنعتی هستند و کاربرد آن‌ها در بتن حجم ضایعات را کاهش می‌دهد.
- روسازی بتنی اثر جزیره گرما را کاهش می‌دهد. نواحی شهری ۵°C (۹°F) گرم‌تر از حومه شهر می‌باشند؛ چرا که روسازی‌های تیره (آسفالتی) و بام ساختمان‌ها حرارت را نگه می‌دارند. روسازی بتنی دارای یک رنگ روشن‌تر می‌باشد و با انعکاس نور اثر گرما را کاهش می‌دهد. سطوح سیاه می‌توانند ۲۱°C (۳۸°F) گرم‌تر از سطوح سفید انعکاس دهنده باشند. همچنین کاهش اثر جزیره گرما می‌تواند اوزون و مه ناشی از دود را در نواحی شهری کاهش دهد.
- چون بتن بازتابنده‌تر از آسفالت است، برای پارکینگ‌ها با روسازی بتنی به روشنایی کم‌تر مورد نیاز است و در نتیجه کاهش مصرف انرژی را به همراه دارد (Smith-Jolly, 2005). یک وب‌سایت مربوط به آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا درباره اثر جزیره گرما بیان می‌کند: «برای میلیون‌ها آمریکایی در داخل و اطراف شهرها، جزیره گرما سبب افزایش نگرانی‌ها شده است. این پدیده درجه حرارت شهری و حومه شهر را که ۲°F تا ۱۰ (٦°C تا ۱) گرم‌تر

از نواحی روستایی هستند، تشریح می‌کند. افزایش درجه حرارت در جوامع با افزایش تقاضای انرژی، هزینه‌های مربوط به تهویه هوا، سطح آلودگی هوا و بیماری و مرگ‌ومیرهای ناشی از گرما را به همراه دارد (EPA, 2006)». برای کاهش اثر جزیره گرما رنگ‌های روشن‌تر و مصالح متخلخل توسط اداره حفاظت از محیط‌زیست توصیه شده است.

یک راه بیان پایداری در تسهیلات ساختمانی از طریق برنامه مدیریت انرژی و طراحی زیست محیطی می‌باشد. اگرچه اصول برنامه مدیریت انرژی و طراحی زیست محیطی در ساختمان‌ها مطرح شد، اما اصولی را فراهم کرد که پایداری کلی را نیز در بر گرفت. به طوری که از آن در پارکینگ‌ها و روسازی صنعتی نیز استفاده شد. موارد کاربردی برنامه مدیریت انرژی و طراحی زیست محیطی برای بتن آماده شامل مدیریت آب‌های سطحی، اجرای روسازی در مناظر طبیعی، مدیریت ضایعات ساخت، استفاده از مصالح بازیافتی و کاهش استفاده از سیمان پرتلند است. استراتژی‌های ممکن در برنامه مدیریت انرژی و طراحی زیست محیطی عبارتند از:

- استفاده از روسازی بتنی قدیمی، که در فصل دوم بحث شده است.
- کاهش اثر جزیره گرما در پارکینگ‌های با روسازی بتنی.
- دور نگه داشتن ضایعات ساختمانی از خاک‌چال‌ها با انجام بازیافت که اصولاً در مورد روکش‌ها کاربرد دارد و در فصل ۱۸ بحث شده است.
- استفاده از محصولات جانبی به عنوان مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، گرد سیلیکا یا خاکستر سبوس برنج. کاربرد این مواد در بتن عمدتاً مقدار سیمان پرتلند مورد نیاز را کاهش می‌دهد.
- کاربرد مصالح محلی به منظور کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل.

هیئت محیط‌زیست سازمان بتن بیان می‌کند که:

«بتن مانند یک ماده تقریباً خنثی، وسیله‌ای نسبتاً ایده‌آل برای بازیافت ضایعات یا محصولات جانبی صنعتی است. بسیاری از مصالحی که باید به خاک‌چال‌ها منتقل شوند را می‌توان در ساخت بتن به کار برد. سرباره کوره آهن‌گدازی، پلی‌استیرن بازیافتی و خاکستر بادی در بین موادی هستند که می‌توانند در مخلوط بتن به کار برده شوند که سبب افزایش مطلوبیت آن می‌شود. امروزه از ضایعاتی مثل تایرهای پاره و گردوخاک دودکش‌ها در سوخت کارخانه سیمان استفاده می‌کنند. حتی بتن قدیمی خود می‌تواند به عنوان سنگدانه برای مخلوط جدید مورد استفاده قرار گیرد».

از مزایای دیگر زیست محیطی بتن، صرفه جویی در مصرف انرژی است. از تولید تا

حمل‌ونقل و فرآیند ساخت، بتن در مصرف انرژی متواضع و در بازگشت سرمایه بخشنده است. تنها مصرف زیاد انرژی به تولید سیمان پرتلند مربوط می‌باشد که ۱۵-۱۰ درصد بتن را تشکیل می‌دهد. از آنجایی که مصالح مورد نیاز برای تولید بتن به وفور در دسترس هستند، محصولات بتنی و بتن آماده را می‌توان از منابع محلی تهیه و در نزدیکی کارگاه پردازش کرد. حمل محلی، نیاز به سوخت و حمل‌ونقل را به حداقل می‌رساند.

۱-۱۰- منابعی برای اطلاعات، گزارش‌های پژوهشی، خط‌مشی‌ها و استانداردها

تعدادی از سازمان‌ها نشریاتی را چاپ نمودند که برای مهندسین طراح روسازی بتنی می‌تواند مفید باشد. بیشتر این نشریات در مدت تهیه این کتاب مورد مشاوره قرار گرفتند و در فهرست مراجع کتاب آورده شده‌اند. اگرچه بیشتر این سازمان‌ها در ایالت متحده هستند، ولی گزارش آن‌ها اغلب در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

وب‌سایت‌ها نیز می‌تواند برای مطالعه کنندگانی که به دنبال کردن موضوعات مورد بحث علاقه دارند، مفید باشد. همچنین خوانندگانی که قصد دارند پابه‌پای آخرین پیشرفت‌ها به پیش روند و یا در عمل مشارکت داشته باشند، می‌توانند در یک یا چند تا از این سازمان‌ها عضو شوند.

یکی از قدیمی‌ترین سازمان‌های تهیه کننده اطلاعات روسازی بتنی، انجمن سیمان پرتلند با وب‌سایت www.cement.org می‌باشد. انجمن سیمان پرتلند تعدادی از روش‌های مهم طراحی روسازی را تا پایان دهه ۱۹۸۰ تهیه کرد. انجمن روسازی بتنی آمریکا، با وب‌سایت www.pavement.com، متعاقباً اکثر کارهای روسازی بتنی انجمن سیمان پرتلند را به عهده گرفته است. در حال حاضر، انجمن روسازی بتنی آمریکا طرح و اسناد ساخت راه‌ها، پارکینگ‌ها، خیابان‌ها و راه‌های محلی، فرودگاه‌ها و روسازی‌های صنعتی را منتشر می‌کند. انجمن روسازی بتنی آمریکا و انجمن سیمان پرتلند همچنین تعدادی از نرم‌افزارهای رایانه‌ای طراحی روسازی بتنی را بفروش می‌رسانند. انجمن سیمان پرتلند به منتشر کردن مطالب علمی در رابطه با روسازی بتنی متراکم شده با غلطک و نیز لایه اساس و زیراساس تثبیت شده با سیمان و همچنین نشریه‌ای کلیدی با عنوان «طرح و کنترل مخلوط بتن» ادامه داده است.

انجمن ملی بتن آماده، در حال حاضر اصلی‌ترین منبع در مورد روسازی بتنی نفوذپذیر است. همچنین انجمن ملی بتن آماده گواهی‌نامه‌هایی را برای پیمانکاران و تهیه کنندگان

بتن فراهم کرده است. انجمن سیمان پرتلند، انجمن روسازی بتنی آمریکا و انجمن ملی بتن آماده، همگی انجمن‌های صنعتی هستند که توسط اعضای خود حمایت و تأمین مالی می‌گردند. این سه سازمان، مهندسینی را برای تهیه پیش‌نویس اطلاعات فنی خود استخدام کرده و برای تحقیقات خارجی قرارداد بسته‌اند.

انجمن بتن آمریکا به منظور ارتقای آگاهی در زمینه بتن از طریق وب‌سایت www.concrete.org و با همکاری شمار زیادی از کمیته‌های فنی به فعالیت می‌پردازد. چهار کارگروهی که به طور مستقیم با روسازی بتنی در ارتباط می‌باشند، عبارتند از: روسازی بتنی (۳۲۵)، روسازی بتنی متراکم شده با غلطک (۳۲۷)، پارکینگ و محوطه‌سازی با روسازی بتنی (۳۳۰) و بتن نفوذپذیر (۵۲۲). اعضای کارگروه‌های فنی شامل عضوهایی از انجمن‌های صنعتی، نماینده‌های دولتی (برای مثال: FHWA، FAA، USACE که در زیر بحث شده‌اند)، افراد دانشگاهی و مهندسین مشاور می‌باشند. اطلاعات و اسناد مربوط به این چهار کارگروه طی یک روند کلی موشکافانه به وجود آمده است، در نتیجه مدت بیشتری برای تهیه آن‌ها صرف شده و قابل اعتمادتر از سایر منابع می‌باشند. اسناد حاصل از این چهار کارگروه به همراه گزارش‌های سایر منابع، که در ارتباط مستقیم با روسازی هستند (مانند: طرح اختلاط، آزمایش‌ها و عمل‌آوری) در شش جلد «راهنمای اجرایی بتن» آورده شده‌اند که می‌توان آن‌ها را نیز به صورت جداگانه خریداری کرد. همچنین انجمن بتن آمریکا برنامه‌های مدون را برای استفاده در آزمایشگاه‌ها و برای پیمانکاران تهیه کرده است.

نشریات انجمن بتن آمریکا، انجمن روسازی بتنی آمریکا و انجمن سیمان پرتلند درباره مواردی از روسازی بتنی، به ویژه آن‌هایی که توسط سازمان‌های دولتی مانند FHWA و آشتو مشخص نشده‌اند، بحث می‌کنند. این موارد شامل پارکینگ‌ها، خیابان‌ها و راه‌های محلی، بتن‌های نفوذپذیر و روسازی‌های صنعتی می‌شود.

انجمن آمریکایی برای آزمایش مواد، با استفاده از کمیته‌های تکنیکی با رفتاری شبیه انجمن بتن آمریکا کار می‌کند، به طوری که برخی از اعضای این دو مؤسسه نیز مشترک هستند. انجمن آمریکایی آزمایش و مواد، با وب‌سایت www.astm.org، به طور مشابه با انجمن بتن آمریکا، از طریق کارگروه‌های فنی همکاری می‌کند. بعضاً برخی از اعضا در هر دو انجمن به فعالیت مشغولند. ASTM قراردادهای مربوط به آزمایش مواد و استانداردهای مربوط به مصالح را منتشر می‌کند.

هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل، با وب‌سایت www.trb.org، بخشی از هیئت تحقیقاتی ملی است. هیئت تحقیقاتی ملی به طور مشترک توسط دانشکده ملی علوم، دانشکده ملی

مهندسی و انجمن پزشکی اداره می‌شود. هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل یک سازمان بسیار بزرگ با اعضای بین‌المللی می‌باشد که موضوعات گسترده‌ای در زمینه حمل‌ونقل، شامل بتن و روسازی بتنی را در بر می‌گیرد. نتایج تحقیقات انجام شده در مورد روسازی بتنی اغلب در جلسات سالیانه هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل ارائه می‌شود و مقالات ارائه شده در ژورنال آن، تحت عنوان Transportation Research Record، چاپ می‌شود. هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل مانند ACI و ASTM با استفاده کارگروه‌های تشکیل دهندهٔ خود، فعالیت می‌کند. هیئت تحقیقات حمل‌ونقل سابقاً هیئت تحقیقاتی بزرگراه‌ها نامیده می‌شده است.

انجمن بین‌المللی روسازی بتنی (ISCP)، انجمنی است که فعالیت اصلی خود را ساماندهی کنفرانس‌های بین‌المللی در رابطه با روسازی بتنی قرار داده است. تاکنون هشت کنفرانس هر چهار سال یکبار برگزار شده است و مقالات ارائه شده، یک منبع اطلاعاتی ارزشمند محسوب می‌شود. بسیاری از اعضای انجمن بین‌المللی روسازی بتنی همچنین در هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل و ACI عضو هستند.

۱-۱۰-۱- بزرگراه‌ها

دپارتمان حمل‌ونقل بزرگراه‌های فدرال (FHWA) زیر نظر اداره حمل‌ونقل آمریکا، مسئولیت راه‌های اصلی را به عهده دارد. نتایج تحقیقات روسازی FHWA را می‌توان به طور رایگان از وب‌سایت آن بارگیری کرد. FHWA همچنین یک برنامه رایانه‌ای برای طراحی زهکش روسازی دارد که این را نیز می‌توان به صورت رایگان بارگیری کرد. این برنامه به همراه جزئیات در فصل ٤ مورد بررسی قرار گرفته است.

AASHTO راهنمای طراحی روسازی و استانداردهای مصالح و آزمایش‌های مربوطه را به فروش می‌رساند. استانداردهای AASHTO اغلب مشابه یا برابر استانداردهای ASTM است. بسیاری از اسناد AASHTO، شامل راهنماهای طراحی روسازی، با انجام تحقیقات قراردادی توسط برنامه تحقیقاتی تعاونی ملی راه‌ها (NCHRP) که خود زیر نظر هیئت تحقیقاتی حمل‌ونقل قرار دارد، تهیه شده است. نشریات به‌روز NCHRP را می‌توان به طور رایگان از وب‌سایت آن بارگیری کرد. بسیاری از ادارات ایالتی حمل‌ونقل آمریکا وب‌سایت‌های حاوی نتایج حاصل از تحقیقات و استانداردها را دارند که تعداد آن‌ها بیش از آن است که در اینجا از آن‌ها نام برده شود.

۱-۱۰-۲- فرودگاه‌ها

در ایالت متحده، کارهای عمرانی برای حمل‌ونقل هوایی توسط اداره هوانوردی فدرال اداره می‌شود. استانداردهای طراحی و ساخت‌وساز اداره هواپیمایی فدرال، در سری ۱۵۰ توصیه‌نامه منتشر شده‌اند، که آن‌ها را به طور رایگان می‌توان از وب‌سایت سازمان هواپیمایی فدرال بارگیری کرد. همچنین سازمان هواپیمایی فدرال برنامه‌های رایانه‌ای طراحی را در نظر گرفته است که آن‌ها را می‌توان به صورت رایگان بارگیری کرد. این مطلب در فصل ۱۰ مورد بحث قرار گرفته است.

بنیاد تحقیقات ابتکاری روسازی تعدادی از نتایج تحقیقات راجع به روسازی فرودگاه‌ها منتشر کرده است. گزارش‌های بنیاد تحقیقات ابتکاری روسازی را می‌توان به صورت رایگان از وب‌سایت آن بارگیری کرد.

برای تسهیلات ارتش آمریکا، استانداردها و کتابچه‌های راهنمایی توسط گروه مهندسان ارتش آمریکا تهیه شده است و معیارهای یکپارچه تسهیلات، در وب‌سایت آن منتشر شده است که شامل «کتابچه استانداردهای اجرایی برای روسازی صلب» و «طراحی روسازی برای فرودگاه‌ها» می‌باشد.

فصل دوم

انواع روسازی بتنی

تا به حال انواع مختلفی از روسازی بتنی اجراء شده است. اکثر آن‌ها دو خصوصیت مشترک دارند: اول این که به خاطر مقاومت خمشی بتن در مقابل بارهای ناشی از ترافیک مقاوم هستند. آرماتور تنها برای کنترل ترک‌ها استفاده می‌شود و کاربردی در تحمل نیروی ترافیکی ندارد. عامل دوم این است که روسازی بتنی بر اثر افت ناشی از خشک شدن بتن منقبض و بر اثر تغییرات دما منبسط و منقبض می‌شود. این گونه تغییر حجم‌ها باید کنترل شود. انواع مختلف روسازی بتنی از درز یا آرماتور فولادی یا هر دو استفاده می‌کنند. عبارت «روسازی بتنی معمولی» عموماً برای روسازی‌های بتنی غیرمسلح، درزدار مسلح و یا مسلح یکپارچه استفاده می‌شود و انواع دیگر را شامل نخواهد شد. طراحی و جزئیات درزها برای این نوع روسازی بسیار حائز اهمیت است. هر سه نوع روسازی متداول بتنی، به عنوان روکش نیز استفاده می‌شود، در این میان نوع درزدار غیرمسلح بسیار رایج‌تر است.

روسازی‌های بتنی پیش‌تنیده و پیش‌ساخته نیز برای کاربردهای مشابه روسازی بتنی معمولی استفاده می‌شود ولی خیلی رایج نیستند. انواع دیگر روسازی مانند بتن غلطکی متراکم و بتن نفوذپذیر یا بتن متخلخل معمولاً برای موارد خاص صنعتی یا پارکینگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار

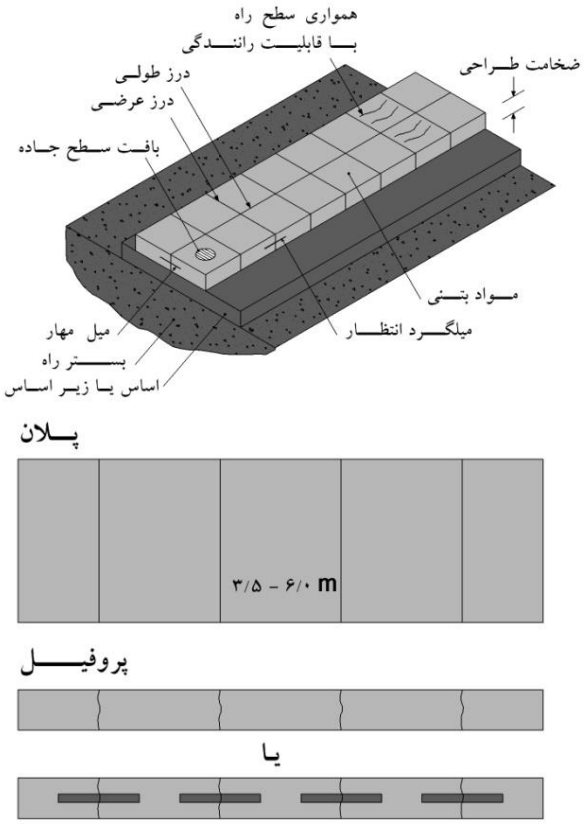
روسازی بتنی غیرمسلح درزدار (JPCP) از یک دال بتنی به طول ۳/٦ تا ٦ متر (۱۲ تا ۲۰ فوت) به همراه درز انقباضی عرضی بین دال‌ها تشکیل شده است. درزها به اندازه‌ای

نزدیک به هم قرار داده می‌شوند تا از شکل‌گیری ترک‌ها تا پایان عمر روسازی جلوگیری شود. در نتیجه، در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار انبساط و انقباض بتن از طریق درزها کنترل می‌شود. این نوع روسازی در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است.

یکی از عملکردهای مهم در ارتباط با این نوع روسازی، انتقال نیرو از طریق درزها است. در صورت خرابی درزها، رانندگان با ناهمواری در ناحیه درز مواجه می‌شوند و یک رانندگی به دور از راحتی را تجربه خواهند کرد. دو روش برای انتقال بارها در طول درز استفاده می‌شود: قفل‌وبست سنگدانه‌ای و میلگردهای اتصال (انتظار).

درزهای با قفل‌وبست سنگدانه‌ای، در زمان ساخت با بریدن روسازی در ۱/۳ تا ۱/۴ از ضخامت آن، برای ایجاد یک سطح کم‌مقاومت به وجود می‌آید. سپس در زمان انقباض بتن ترک در ضخامت باقی‌مانده از روسازی شروع به انتشار می‌کند. این ترک به دلیل این که در اطراف سنگدانه‌ها و از میان چسب سیمانی منتشر می‌شود دارای سطح خشنی است و تا زمانی که عرض کمی دارد، توانایی انتقال نیروها در طول ترک از یک دال به دال دیگر را از طریق تنش ایجاد شده در سطح تماس سنگدانه‌ها، خواهد داشت. هنگامی که درزها از هم فاصله بگیرند یا سنگدانه‌ها از بین روند انتقال نیرو با مشکل مواجه می‌شود. کیفیت مصالح نگهدارنده دال بتنی در محل درز نیز بر انتقال بارها اثر می‌گذارد.

وقتی‌که روسازی متحمل ترافیک سنگین خودروها به خصوص در سرعت‌های بالا می‌شود، به مرور زمان قفل‌وبست سنگدانه‌ها از بین خواهد رفت و موجب تخریب روسازی در طول مدت عمر آن خواهد شد. در این موارد برای انتقال بار در طول درز از میلگردهای اتصال استفاده می‌شود. میلگردهای اتصال، آرماتورهای مسطحی هستند که عموماً ساده یا پوشیده از اپوکسی می‌باشند و عمدتاً سطح جانبی آن‌ها گریس‌کاری یا روغن‌کاری شده است تا باز و بسته شدن درز بدون مقاومت انجام شود.



شکل ۲-۱: روسازی بتنی غیرمسلح درزدار

به دلیل هزینه ساخت کم‌تر، روسازی بتنی غیرمسلح درزدار رایج‌ترین انواع روسازی محسوب می‌شود. براساس تحقیقاتی که در سال ۱۹۹۹ توسط انجمن روسازی بتنی آمریکا صورت گرفت، مشخص شد ۳۸ ایالت آمریکا در حال ساخت این نوع روسازی هستند. روسازی بتنی غیرمسلح درزدار به دلیل عدم نیاز به استفاده از آرماتور در دال‌ها یا نیروی کار برای اجرای آرماتوربندی، اقتصادی و مقرون به صرفه است. در اکثر مناطق پیمانکاران نسبت به سایر انواع روسازی آشنایی بیشتری با این نوع روسازی دارند. در مناطقی که خطر زنگ‌زدگی وجود دارد استفاده نکردن از آرماتوربندی فولادی به معنای نبود این مشکل است. با این حال میلگردهای اتصال همچنان در خطر زنگ‌زدگی هستند. برای جلوگیری از فرسوده شدن و زنگ‌زدگی میلگردهای اتصال، تحقیقات گوناگونی بر روی انواع مختلف مصالح و پوشش‌های استفاده شده در این میلگردها انجام شده است.

روسازی بتنی غیرمسلح درزدار در خطوط ترافیکی مجاور هم مانند سایر روسازی‌های متداول بتنی برای اتصال غالباً از میل‌مهارها استفاده می‌کند. میل‌مهارها نوعی آرماتور آجدار هستند که برخلاف میلگردهای اتصال اجازه باز و بسته شدن را به مفاصل نمی‌دهند. میل‌مهارها برای جداسازی خطوط روسازی بتنی در راه‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اتصال تمام مفاصل در فرودگاه‌ها از میلگردهای اتصال استفاده می‌شود.

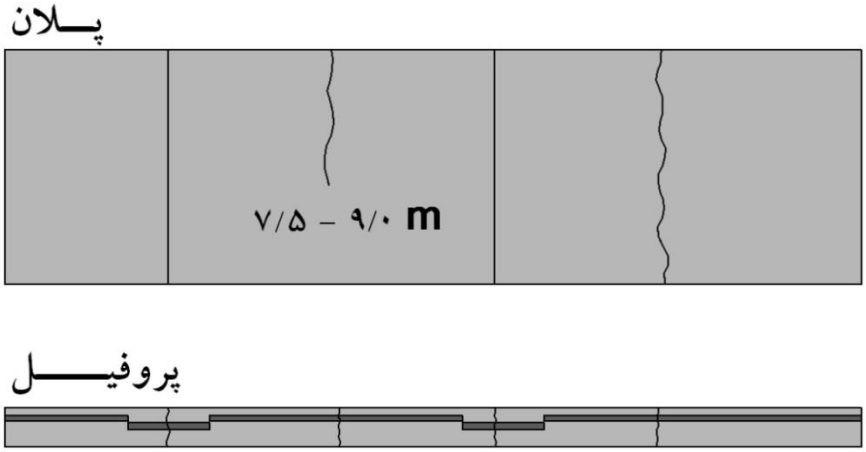
به دلیل پرکاربرد بودن روسازی بتنی غیرمسلح درزدار اکثر رهنمودهای مربوط به طراحی و ساخت ارائه شده در این کتاب، در ارتباط با این نوع روسازی می‌باشد. ملاحظات خاص مربوط به انتقال بین روسازی و پل‌ها و روسازی‌های مسلح درزدار در فصل ۱۲ مورد بحث قرار گرفته است.

عملکردهای کلیدی در رابطه با روسازی بتنی غیرمسلح درزدار عبارتند از:

- همواری اولیه سطح روسازی که حاصل تجربه اجرایی است؛
- ضخامت مناسب روسازی برای جلوگیری از ترک در میان دال؛
- کم کردن فاصله بین درز، مجدداً برای جلوگیری از ترک میان دال؛ و
- طراحی مناسب و بررسی کافی جزئیات ساخت درزها.

۲-۲- روسازی بتنی مسلح درزدار

وجه تمایز روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP) از روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، دال‌های با طول بیشتر و آرماتوربندی سبک است. این آرماتوربندی سبک غالباً با عنوان آرماتور حراراتی شناخته می‌شود. اگرچه دال‌هایی به طول ۳۰ متر (۱۰۰ فوت) نیز ساخته شده است اما طول دال‌های روسازی بتنی آرماتوربندی شده درزدار عموماً بین ۷/۵ تا ۹ متر (۳۰-۲۵ فوت) قرار دارد. با این طول دال در درزهای موجود حتماً باید میلگرد اتصال تعبیه شود. درصد فولاد به کار رفته در دال‌ها عموماً بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ درصد از سطح مقطع دال در جهت طولی و مقداری کم‌تر از آن در جهت عرضی است. از میلگردهای مجزا، یا مفتول و شبکه‌های فولادی در این روسازی استفاده می‌شود. به دلیل این که فولاد در محور خنثی یا محور دال آرماتوربندی شده قرار داده می‌شود، تأثیری بر روی عملکرد خمشی بتن ندارد و تنها از پیشرفت ترک‌ها جلوگیری می‌کند. این نوع روسازی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

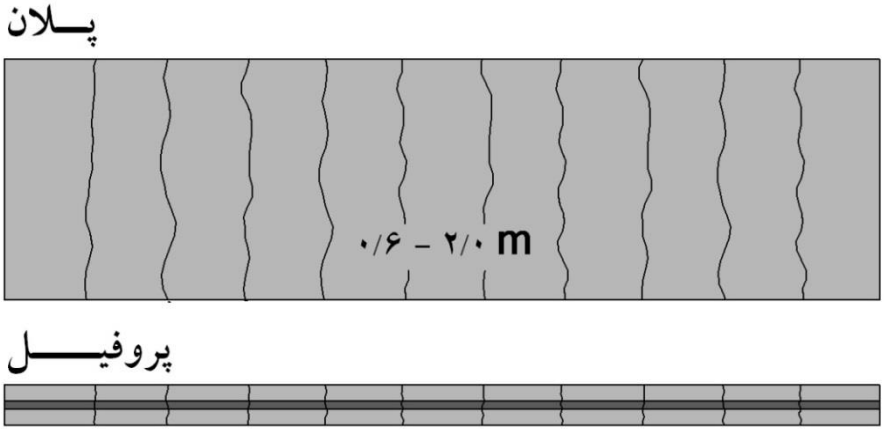


شکل ۲-۲: روسازی بتنی مسلح درزدار

اگرچه روسازی مسلح درزدار در گذشته بسیار مورد استفاده بوده است اما امروزه کم‌تر از آن استفاده می‌شود. تنها برتری روسازی بتنی مسلح درزدار نسبت به روسازی بتنی غیرمسلح درزدار تعداد کم‌تر درزهای آن است که در مقابلِ هزینه آرماتوربندی و عملکرد ضعیف درزها و ترک‌های ناشی از آن، کم‌اهمیت به نظر می‌رسد. چون در این روسازی درزها در فاصله دورتری نسبت به روسازی غیرمسلح درزدار قرار می‌گیرند، بنابراین بازشدگی بیشتری اتفاق می‌افتد و با تعریض درزها انتقال بار با مشکل مواجه می‌شود. در درزهای روسازی بتنی مسلح درزدار همواره میلگرد اتصال تعبیه می‌شود. اگرچه دال‌ها در این روسازی طول بیشتری دارد ولی ترک‌ها در همان فواصل روسازی ساده درزدار شکل می‌گیرند. بنابراین روسازی‌های مسلح درزدار یک یا دو ترک داخلی در دال‌های خود دارند. آرماتوربندی سبک به کار رفته در روسازی بتنی مسلح درزدار قدرت کافی برای انتقال نیرو را ندارد. بنابراین ترک‌ها نیز مانند درزها تخریب می‌شوند. در نتیجه در آخرین دستورالعمل پیشنهاد شده در AASHTO M-EPDG هیچ بندی درباره روسازی بتنی مسلح ارائه نشده است. در تحقیقات ارائه شده در سال ۱۹۹۹ توسط انجمن روسازی بتنی آمریکا، تنها ۹ ایالت آمریکا در حال ساخت روسازی مسلح درزدار بوده‌اند که تعدادی از این ایالت‌ها از شبکه بزرگراهی کوچکی برخوردار می‌باشند.

۲-۳- روسازی بتنی مسلح یکپارچه

روسازی بتنی مسلح یکپارچه (CRCP) با آرماتوربندی فولادی سنگین و بدون درز، شناخته می‌شود. این روسازی در مقایسه با روسازی مسلح درزدار مقادیر بسیار بیشتری از فولاد به مقدار ۰/٤ تا ۰/۸ درصد از سطح مقطع طولی استفاده می‌شود. در جهت عرضی درصد آرماتور بسیار کم‌تر است و به همان مقدار به کار رفته در آرماتور حرارتی محدود می‌شود. روسازی مسلح یکپارچه در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: روسازی بتنی مسلح یکپارچه

ترک‌ها در روسازی مسلح یکپارچه تقریباً در فاصله ۰/٦ تا ۲ متر از یکدیگر رخ می‌دهد. آرماتوربندی ترک‌ها را محکم کنار یکدیگر نگه می‌دارد و قفل‌وبست سنگدانه‌ها و انتقال برش را ممکن می‌سازد. برای جلوگیری از انقباض انتهای روسازی که بر اثر انقباض بتن اتفاق می‌افتد و نیز کمک به ایجاد الگوی مناسب در ایجاد ترک، روسازی مسلح یکپارچه نیازمند اجرای مهاربندهایی در ابتدا و انتهای راه است. ملاحظات خاص طراحی روسازی مسلح یکپارچه، از جمله تعیین درصد مناسب آرماتور، در فصل ۱۲ ارائه گردید.

در سال ۱۹۲۱ استفاده آزمایشی از روسازی مسلح یکپارچه در جاده کلمبیا پایک در ویرجیانا صورت گرفت و تا سال ۱۹۸۲ بیش از ۲۲۵۰۰ کیلومتر راه اصلی دوخطه در سراسر آمریکا را فرا گرفت. این روسازی همچنین در فرودگاه‌های اصلی سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است.

به دلیل استفاده از فولاد در ساخت این روسازی، قیمت تمام شده بیشتری نسبت به روسازی بتنی مسلح درزدار دارد و کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، رانندگی راحت‌تر و طول عمر بیشتری نسبت به سایر انواع روسازی دارد. بنابراین در ایالت‌های

الینویز و تگزاس به سایر روسازی‌ها ترجیح داده می‌شود. طی مطالعات انجام شده در سال ۱۹۹۹ توسط انجمن روسازی بتنی آمریکا تنها ۸ ایالت در حال ساخت و استفاده از این نوع روسازی هستند.
در بسیاری از مناطق عملکرد روسازی مسلح یکپارچه بسیار خوب بوده است. برای تحقیق و بررسی بر روی ١٤ قطعه روسازی در ایالت‌های آلاباما، فلوریدا، جورجیا، می‌سی‌سی‌پی، کارولینای شمالی و جنوبی، در سال ۲۰۰۰ مطالعاتی درباره روسازی بتنی در ایالت‌های جنوب شرقی آمریکا انجام گرفت که در آن از پایگاه اطلاعاتی عملکرد بلندمدت روسازی استفاده شد. در زمان انجام مطالعات، ۲۱ تا ۳۰ سال از عمر این روسازی‌ها سپری شده بود و در طی این مدت زیر ترافیک سنگین، همچنان در وضعیت خیلی خوب تا عالی قرار داشتند. به جز سه روسازی، با وجود این که از عمر طراحی ۲۰ ساله خود عبور کرده بودند، بقیه روسازی‌ها شاخص خدمت‌دهی ٤ یا بالاتر داشتند.
خصوصیات بارز روسازی بتنی مسلح یکپارچه عبارتند از:

- همواری اولیه سطح روسازی؛
- ضخامت کافی روسازی برای جلوگیری از ایجاد بیش از حد ترک‌های عرضی؛ و
- آرماتور کافی برای نگهداشتن ترک‌ها کنار هم و جلوگیری از سوراخ‌شدگی. سوراخ‌شدگی یک مکانیزم مستقل از روسازی مسلح یکپارچه می‌باشد و در فصل ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-٤- درزهای متداول روسازی

روسازی‌های متداول (JPCP، JRCP و CRCP) از چند نوع درز عرضی و طولی استفاده می‌کنند. درزهای عرضی انقباضی معمولاً با میگلردهای اتصال در روسازی بتنی مسلح درزدار و روسازی بتنی غیرمسلح درزدار استفاده می‌شود. در پایان هر روز عملیات اجرای روسازی یا در وقفه طولانی در اجرای روسازی، درزهای عرضی اجرایی و به طور کلی در محل قرارگیری درزهای انقباضی عرضی برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح درزدار قرار داده می‌شود. در نقاطی که پدیده انبساط روسازی به پل‌های مجاور و یا سازه‌های زهکشی خسارت وارد می‌کند، درزهای عرضی انبساطی یا درزهای جدا کننده قرار داده می‌شود. زمانی‌که دو یا چند خط عبور یا شانه راه اجراء می‌شود، درزهای طولی انقباضی را نیز می‌توان به طور همزمان به وجود آورد. در مقابل، درزهای طولی، بین دو خط عبوری و شانه راه روسازی شده، در زمان دیگری مورد

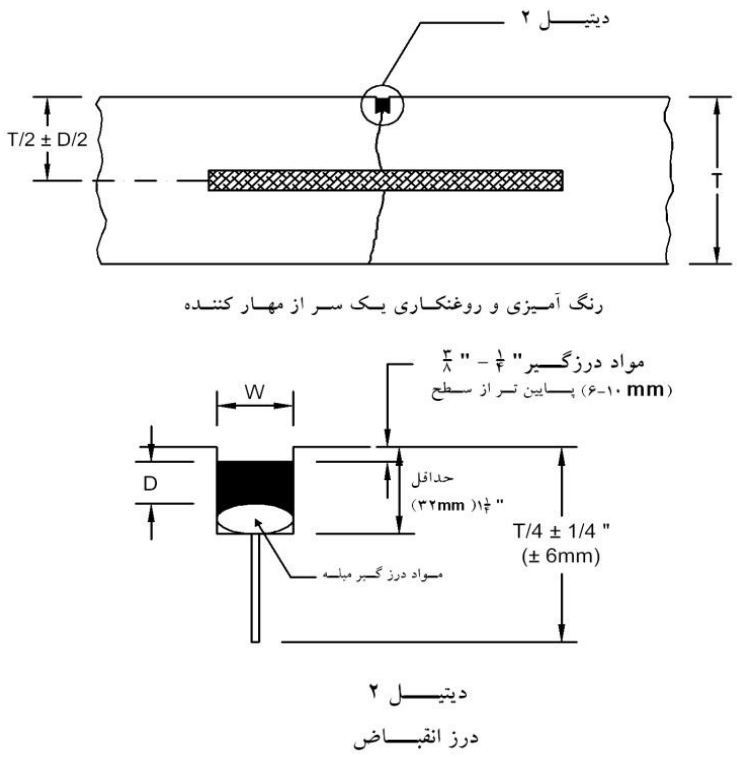
استفاده قرار می‌گیرد.
عملکرد روسازی بتنی تا حد زیادی به رضایت‌بخش بودن عملکرد درزهای آن مربوط می‌شود. گسیختگی در محل درزِ اکثر روسازی‌های بتنی درزدار عامل اصلی گسیختگی می‌باشد و ضعف باربری سازه‌ایَ از علت‌های ثانویه محسوب می‌شود. خرابی‌هایی که سبب گسیختگی درزها می‌شوند شامل: ترک‌خوردگی، مکش، خردشدگی، شکستگی در گوشه‌ها، شکم‌دادگی و ترک‌خوردگی در وسط دال بتنی می‌باشد. خصوصیاتی که عملکرد مناسب درز، مانند انتقال بار کافی و یکپارچگی مناسب بتن را رقم می‌زند، حاصل تحقیقات و تجارب میدانی می‌باشد. بکارگیری این مشخصات در طراحی، ساخت و نگهداری روسازی بتنی، درزهایی با عملکرد رضایت‌بخش را در طول عمر روسازی خواهد داشت. همچنین عملکرد درز در گرو استانداردهای طراحی روسازی، کیفیت مصالح و اجراء و نگهداری خوب می‌باشد.

۲-۵- درزهای عرضی انقباضی

درزهای عرضی انقباضی به صورت شیار بریده شده، شکل یافته یا قلم‌زنی شده در یک دال بتنی که یک صفحه عمودی تضعیف شده به وجود می‌آورد، تعریف می‌شود. این درز محل شکستگی ناشی از تغییر ابعاد در یک دال را تنظیم می‌کند و تاکنون یکی از متداول‌ترین نوع درزهای موجود در روسازی‌های بتنی می‌باشد.
درزهای انقباضی در روسازی‌های تحت بارگذاری سبک بر قفل‌وبست سنگدانه‌ها در طول درز تکیه می‌کنند. روسازی‌های تحت بارگذاری سنگین‌تر، از میلگردهای اتصال برای انتقال بار استفاده می‌کنند. میلگردهای اتصال از حرکت عمودی یا گسیختگی در میان دال‌ها جلوگیری می‌کند اما این اجازه را به دال می‌دهد تا با بازوبسته شدن درزها، تنش‌های ناشی از تغییرات حرارتی و رطوبتی در روسازی بتنی تخلیه شود. ترکیبی از میلگردهای اتصال با پوشش اپوکسی برای مقاومت در مقابل خوردگی در شکل ۲-٤ نشان داده شده است. همچنین بافته‌هایی از میلگردهای اتصال در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

شکل ۲-٤: میلگردهای اتصال با پوشش اپوکسی مقاوم در مقابل خوردگی

در راه‌های اصلی درزدار، درزهای عرضی عمود بر جهت رفت‌وآمد و درزهای طولی به صورت موازی با جهت رفت‌وآمد و بین خط‌های عبوری استفاده می‌شود. در فرودگاه، عرض روسازی پهن‌تر می‌باشد و درزها به صورت مربعی یا نزدیک به یک شکل مربعی با میلگردهای اتصال در هر چهار طرف دال استفاده می‌شود. شکل ۲-۵ نمای سطح مقطع یک درز عرضی با میلگردهای اتصال را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: درز با میلگردهای اتصال

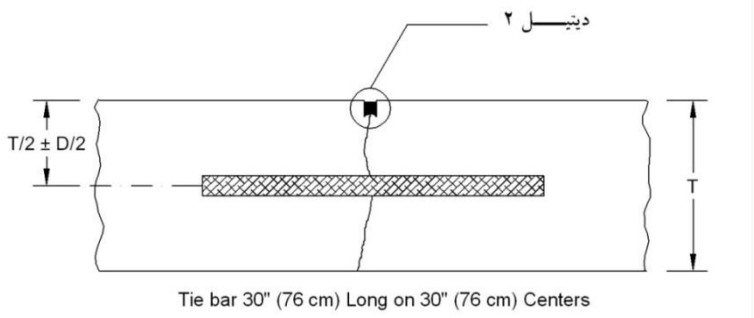
هدف اصلی از اجرای درزهای عرضی انقباضی، کنترل ترک‌هایی می‌باشد که نتیجه تنش‌های کششی و خمشی در یک دال بتنی است. این امر خود به خاطر روند آبدهی، بارهای ناشی از ترافیک و محیط می‌باشد. از آنجا که تعداد این درزها زیاد است، عملکردشان تا حد زیادی بر عملکرد روسازی اثر می‌گذارد. درزی که دچار خرابی می‌شود، غالباً داری ترک‌خوردگی یا خردشدگی می‌باشد. عملکرد ضعیف درز به مرور زمان منجر به خرابی‌های بیشتر نظیر شکستگی گوشه دال، برآمدگی و ترک در وسط دال می‌شود. این شکستگی‌ها ممکن است به تدریج خودشان به عنوان درز عمل کنند و خرابی‌های مشابهی را به وجود آورند. عملکرد درزهای عرضی انقباضی به سه عامل اصلی ارتباط دارد: فاصله درزها، انتقال بار در طول درزها، شکل درزها و مشخصات درزگیر. خرابی‌های روسازی و درز، در فصل سوم مورد بحث قرار گرفته‌اند. فاصله درز و انتقال بار در فصل هفتم و شکل درز و درزگیرها نیز در فصل پانزدهم مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-٦- درزهای طولی

درز طولی به این صورت تعریف می‌شود که بین دو دال، بدون جداشدگی یا شکستگی، اجازه تاب برداشتن را می‌دهد. درزهای طولی به منظور آزاد کردن تنش‌های ناشی از انحنای دال به کار می‌روند و به طور کلی اگر عرض دال از ٤/٦ متر یا ۱۵ فوت فراتر برود، استفاده از آن‌ها اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. اگرچه دال‌های با عرض برابر یا کم‌تر از مقدار مذکور محتمل به بروز ترک‌های طولی هستند ولی بدون درز طولی دارای عملکرد رضایت بخشی می‌باشند. تا جایی که مقدور است درزهای طولی باید بر روی دو لبه یک خط عبور قرار گیرند تا عملکرد ترافیکی را بهبود بخشند. نوار خط‌کشی در خط عبوری تعریض شده باید در ۳/۷ متری اجراء شود و توصیه می‌شود که از شیارهای لرزاننده در قسمت تعریض شده استفاده شده باشد. انتقال بار در درزهای طولی برعهده قفل‌وبست سنگدانه است.

اغلب در طول درزهای طولی برای کمک به انتقال بار از میل‌مهارها استفاده می‌شود. میل‌مهارها از میلگردهای اتصال، باریک‌تر بوده و برای این منظور آرماتورهای آجدار به کار می‌رود، در حالی که در میلگردهای اتصال از آرماتورهای بدون آج استفاده می‌شود. طراحی درزهای طولی و میل‌مهارها در فصل هفتم مورد بحث قرار می‌گیرد. میل‌مهارها بلندتر و باریک‌تر از میلگردهای اتصال هستند و همچنین برای حفاظت در برابر خوردگی از پوشش اپوکسی برخوردار می‌باشند. شکل ۲-۷ نمای سطح مقطع یک درز طولی را با میل‌مهار نشان می‌دهد.

شکل ۲-۶: شبکه آرماتورگذاری با پوشش اپوکسی ضدخورندگی



شکل ۲-۷: درز طولی

درزهای طولی ممکن است تراشیده و یا همزمان با فرآیند ساخت اجراء شوند. اگر این درزها به وسیله تراش ایجاد گردند، مطابق شکل ۱-۱ و ۲-۶ آرماتورهای بافته شده مورد استفاده قرار می‌گیرند و مشابه روش درز عرضی انقباضی اجراء می‌شود. اگر همزمان با فرآیند ساخت اجرای روسازی اتفاق بیفتد، از میل‌مهارها برای مرتبط کردن بتن قدیمی و جدید به یکدیگر استفاده می‌شود. برای اجرای روسازی در محل قوس این امر حائز اهمیت است که یک درز طولی با جزئیات مناسب در قوس پیش‌بینی شود. در غیر این صورت، ایجاد ترک در این نقطه تقریباً قطعی می‌باشد.

۲-۷- درزهای اجرایی

یک درز اجرایی در بین دال‌ها نتیجه بتن‌ریزی در زمان‌های مختلف می‌باشد. این نوع درز می‌تواند بعدها به عنوان درزهای عرضی و درزهای طولی مورد استفاده قرار گیرد. سرصفحه و شبکه میلگردهای اتصال برای درز اجرایی عرضی در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. پس از اجرای روسازی تا بالای سرصفحه، آن را بر می‌دارند. روز بعد، اجرای بتن جدید را در کنار بتن قدیم شروع می‌کنند.

بهتر است محل درزهای اجرایی عرضی با محل درزهای انقباضی طراحی شده منطبق باشد، اما این درزها نباید مورب باشند. زیرا در این صورت بتن‌ریزی و مقاومت قابل انتظار از آن به سختی حاصل خواهد شد. در درزهای اجرایی عرضی باید میلگردهای اتصال، تعبیه شده باشد. درزهای عرضی قفل شده به مرور خرد می‌شوند. به جای آن استفاده از درزهای عرضی اجرایی به صورت تراشیده و آب‌بندی، پیشنهاد می‌شود. ابعاد مرجع بهتر است شبیه ابعادی باشد که برای درزهای عرضی انقباضی استفاده شده است.

در ادامه درزهای طولی اجرایی با میل‌مهارها مورد بحث قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که میل‌مهارها باید به طور محکم در بتن مهار شوند. میل‌مهارها باید زمانی که بتن حالت خمیری دارد به صورت مکانیکی نصب شوند و یا به صورت ملیگردهای دو جزئی با قابلیت اتصال (نری و مادگی) سوار شوند. توصیه می‌شود که تست‌های کشش بیرونی به صورت دوره‌ای انجام شود تا از قفل بودن میل‌مهارها در بتن اطمینان حاصل شود. خم کردن بست‌ها پیشنهاد نمی‌شود، از این‌رو در جایی که خم کردن میل‌مهارها ضروری باشد، پیشنهاد می‌شود که از میلگردهای دوجزئی و سیستم متصل شونده به جای میل‌مهارها استفاده شود. اگر خم کردن میلگردها الزامی است و بعداً در طول ساخت صاف خواهند شد، باید فولاد درجه ٤٠ (تاب جاری شدن کم‌تر از ٢٧٦ MPa یا ٤٠ ksi) استفاده شود زیرا تحمل بهتری در مقابل خم شدن دارد. ممکن است کاربرد مجدد روکش مقاوم در برابر خوردگی برای میل‌مهارها پس از صاف شدن مجدد ضروری باشد. اجرای آزمایش کشش بیرونی را باید بعد از صاف کردن میل‌مهارها انجام داد.

توصیه می‌شود که درزهای طولی اجرایی، تراشیده شده و آب‌بندی شوند. بهتر است ابعاد مرجع شبیه ابعادی باشد که برای درزهای طولی استفاده شده است.

شکل ۲-۸: سرصفحه و شبکه میلگردهای اتصال به منظور ایجاد درز عرضی اجرایی

درزهای طولی قفل شونده در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفتند اما اکنون کم‌تر متداول هستند. این درزها برای انتقال برش از نوعی زبانه و شیار استفاده می‌کنند، به طوری که یک دال دارای شکاف، و دال مجاور دارای کلید است که در شکاف دال مجاور قرار می‌گیرد. تصمیم‌گیری برای استفاده از درزهای طولی با سازوکار کلیدی باید با دقت و توجه بسیاری همراه باشد. قسمت فوقانی دال در محل قفل شدگی، به طور مکرر در اثر برش تخریب می‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود در این سیستم ضخامت روکش کم‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر (۱۱۰ اینچ) نباشد. در این موارد میل‌مهارها باید برای انتقال بار طراحی شوند.

۲-۸- درزهای انبساطی

درز انبساطی، درزی است که در جای خاصی تعبیه می‌شود تا به دال اجازه دهد بدون صدمه زدن به سازه‌های مجاور و یا به خود روسازی، انبساط پیدا کند. توجه به این نکته عموماً در پایه پل‌ها و در سازه‌های تأسیساتی خیابان‌ها ضروری است. به عنوان مثال شکل ۲-٤ یک درپوش سازه تأسیساتی را در مجاورت یک مجموعه شبکه میلگرد اتصال نشان می‌دهد. سازه تأسیساتی جاسازی شده در روسازی به درز انبساطی نیاز دارد.

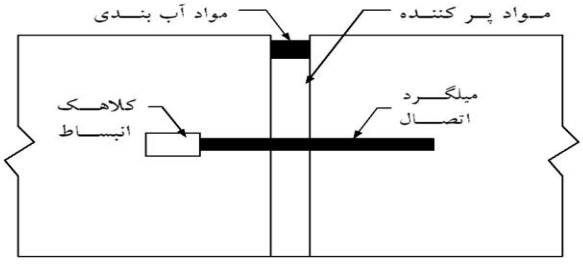
در طرح‌های اولیه روسازی از درزهای عرضی انبساطی مانند درزهای عرضی انقباضی استفاده می‌شد، اما عملکرد آن ضعیف بود. طرح اخیر به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که درزهای انبساطی را در فواصل ۲۸ متری (۹۰ فوت) از هم قرار می‌دهد و درزهای اجرایی در فواصل ۹ متری (۳۰ فوت) در بین درزهای انبساطی اجراء می‌شوند. بدین

ترتیب تا حد بسیار زیادی به درزهای انبساطی قابلیت بسته شدن و به درزهای اجرایی امکان باز شدن را می‌دهند.

طراحی و نگهداری مناسب از درزهای اجرایی در واقع ضرورت استفاده از درزهای انبساطی را به استثنای موارد ثابت مانند سازه‌ها، حذف کرده است. زمانی که از درزهای انبساطی استفاده می‌شوند روسازی احداث شده در طی چند سال برای بستن درزهای انبساطی مهار نشده جابه‌جا شود. در این صورت، چندین درز اجرایی مجاور ممکن است باز شده و در نتیجه آب‌بندی و قفل‌وبست بین سنگدانه‌های خود را تخریب کند. عرض درزهای انبساطی نوعاً (۱۹ میلی‌متر) ۳/۴ اینچ یا بیشتر است. مواد پرکننده معمولاً۲۵-۱۹ میلی‌متر (۱ تا ۳/۴ اینچ) زیر سطح دال ریخته می‌شوند تا فضای کافی برای مواد آب‌بندی وجود داشته باشد. میلگردهای اتصال به عنوان روش انتقال بار در طول درز انبساط بیشترین استفاده را دارند. میلگردهای اتصال، ساختار ویژه‌ای با یک سرپوش در دو انتهای میلگرد دارند و با توجه به این که دال مجاور اتصال انبساطی را می‌بندد، فضایی خالی برای تعبیه میلگرد اتصال در دال ایجاد می‌کند. این جزئیات در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.

در پل‌ها، درزهای انبساطی بسیار مهم هستند. زیرا انبساط روسازی می‌تواند نیروی قابل توجهی ایجاد کند و به سازه پل و پایه‌های آن صدمه وارد کند. درزهای انبساطی در پل‌ها در فصل ۱۲ بحث می‌شوند.

درزهای آزاد کننده فشار با همان هدف درزهای انبساطی اجراء می‌شوند، با این تفاوت که پس از اجرای اولیه و برای آزادسازی فشار از روی سازه‌های موجود و کاهش احتمال برآمدگی در روسازی نصب می‌شوند. درزهای آزاد کننده فشار برای تأسیسات مرسوم پیشنهاد نمی‌شود. با این وجود قادر هستند تا برای کاهش صدمات حتمی سازه یا در شرایطی که تنش‌های فشاری بیش از حد مجاز است، مورد استفاده قرار بگیرند.



شکل ۲-۹: جزئیات درز انبساطی (FHWA 1990a)

۲-۹- روکش‌ها

روسازی بتنی ممکن است برای آسفالت‌های موجود و یا روسازی‌های بتنی به عنوان روکش استفاده شود. در هر یک از دو نوع روسازی، براساس این که روکش با روسازی موجود پیوسته باشد و یا این که پیوستگی لایه قدیمی و جدید در طرح و اجراء نادیده گرفته شود، دو طبقه‌بندی وجود خواهد داشت. مبحث کاملی راجع به روکش‌های بتنی، توسط اسمیت و همکارانش (Smith et al, 2002) و انجمن بتن آمریکا با عنوان «روکش‌های بتنی در نوسازی روسازی» ارائه شده است. راجع به روکش‌ها، با جزئیات بیشتر در فصل ۱۸ بحث شده است.

قدیمی‌ترین نوع روکش بتنی به کار رفته بر روی روسازی آسفالتی موجود با عنوان روکش بتنی بر روی آسفالت شناخته می‌شود. به طور کلی هیچ راهکار خاصی برای حصول یا پیشگیری از اتصال بین بتن جدید و آسفالت قدیم وجود ندارد. اکثر آن‌ها در آمریکا و در زمانی ساخته شد که رویه آسفالتی راه‌های اصلی به سیستم بزرگراه‌های بین ایالتی پیوست و گسترش یافت. جهت نیل به تمام اهداف اجرایی، آسفالت موجود به عنوان یک اساس با کیفیت بالا در نظر گرفته شد و روکش‌های بتنی مانند روسازی‌های متداول بتنی طراحی و ساخته شدند. جزئیات بیشتر زمانی ضرورت یافتند که عرض بتن جدید می‌بایست بیشتر از آسفالت موجود در نظر گرفته شود. در طراحی سنتی پوشش سفید (روکش بتنی روی آسفالت) کاهش تنش خمشی ناشی از پیوستگی لایه جدید و قدیمی، نادیده گرفته می‌شود.

مدت زمان کوتاهی است که میزان قفل‌وبست بین بتن و آسفالت مشخص شده است و بر این اساس روکش‌های نازک‌تری تهیه شده‌اند. روکش‌های بتنی فوق نازک در اوایل دهه ۱۹۹۰ در آمریکا به صورت روکش‌هایی با ضخامت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر (۲ و ٤ اینچ) ارائه شدند. به منظور کاهش فشارهای پیچ‌خوردگی در چنین روسازی‌های نازکی، آن‌ها را به ابعاد ۰/٦-۲ متری (٦-۲ فوت) برش می‌دهند. حداقل ضخامت این پوشش‌ها به ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) می‌رسد.

برای پرکردن فاصله بین روکش‌های بتنی فوق نازک در ترافیک سبک و روکش‌های بتنی متداول بر روی آسفالت، از روکش نازک بتنی استفاده شد که عموماً مربع‌هایی با ضخامت ۲۰۰-۱۰۰ میلی‌متر (۸-٤ اینچ) و طول و عرض ۲-۱/۲ متر (٤/٦ فوت) را شامل می‌شوند. برای کاهش تنش‌های خمشی همانند روکش‌های بتنی فوق نازک، روکش‌های نازک بتنی روی آسفالت نیز نیازمند قفل‌وبست با لایه زیرین است. بحث تکمیلی راجع به

روکش‌های نازک و فوق نازک بتنی روی آسفالت توسط راسموسن و روزیکی[1] ارائه شده است.

روکش بتنی ناپیوسته بر روی روسازی بتنی موجود ساخته شده و با روش‌های ویژه‌ای از چسبیدن دو لایه جلوگیری می‌کند. این کار معمولاً توسط لایه نازکی از آسفالت گرم انجام می‌شود. علت بکارگیری لایه مذکور، دور نگهداشتن ترک‌ها و دیگر آسیب دیدگی‌ها در روسازی موجود و جلوگیری از گسترش آن‌ها به روسازی جدید است. این گسترش ترک را در اصطلاح «ترک‌های انعکاسی» می‌گویند. با بکارگیری لایه جدا کننده از جنس آسفالت، روسازی موجود به عنوان لایه اساس با کیفیت بالا برای روسازی جدید عمل خواهد کرد. روکش‌های بتنی به هم پیوسته نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین روکش‌هایی، روسازی بتنی موجود با دقت آماده می‌شود تا شرایط پیوستگی با روکش را فراهم نماید. جزئیات این روش توسط دلات و همکارانش[2] مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت این نوع روکش‌ها می‌تواند به دلیل رفتار مرکبی که با روسازی موجود دارد، به نازکی ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) باشد، با این حال هرگونه خرابی در لایه روسازی بتنی موجود منجر به انعکاس آن خرابی در روکش می‌شود. روکش‌های بتنی به هم پیوسته محدود به شرایطی است تا روسازی موجود در وضعیت خوبی قرار داشته باشد. شاید این دلیل اصلی کمیاب بودن این گونه روکش‌ها باشد. این نوع از روسازی صرفاً برای روسازی‌هایی مناسب است که شرایط نسبتاً خوبی داشته باشند، بنابراین شرکت‌های راه‌سازی نسبت به سرمایه‌گذاری در زمینه این گونه روسازی‌ها تمایلی ندارند و بیشتر ترجیح می‌دهند تا سرمایه‌های خود را به روسازی‌هایی با شرایط بد اختصاص دهند. دلیل دیگر این بود که اگر پیوستگی لازم به درستی حاصل نشود، روکش نازک موجود به سرعت از بین خواهد رفت.

سومین نوع روکش بتنی که در گذشته برروی روسازی بتنی استفاده می‌شد، روکش بتنی نیمه پیوسته بود. در این نوع روکش راهکار خاصی برای جلوگیری یا ایجاد پیوستگی اتخاذ نمی‌شود، به این معنا که بتن جدید به سادگی بر روی بتن قدیمی اجراء می‌شود. برخی از این روسازی‌ها، باند فرودگاه‌های ساخته شده توسط مهندسین ارتش آمریکا بود که در آن‌ها رویه‌های ضخیم بتنی بر روی روسازی نازک موجود اجراء می‌شد. در نتیجه سهم روسازی موجود کاهش می‌یافت. در روسازی‌هایی که اخیراً اجراء شده است رویه بتنی نیمه پیوسته خیلی کم دیده می‌شود. روکش بتنی نیمه پیوسته، حداقل از لحاظ تئوری،

1- Rasmussen & Rozycki
2- Dellatte et al

در مقابل ترک‌های انعکاسی آسیب پذیر می‌باشد.

۲-۱۰- روسازی‌های بتنی پیش‌تنیده و پیش‌ساخته

همه روسازی‌های متداول بتنی به مقاومت خمشی بتن در برابر بارگذاری ترافیکی در طول زمان وابسته هستند. با بکارگیری کابل یا میلگرد پیش‌تنیده برای القای نیروی فشاری خالص در مقطع روسازی، کاهش ضخامت روسازی به طور قابل‌ملاحظه‌ای امکان پذیر می‌باشد. علت این امر آن است که بارگذاری ترافیک قبل از این که منجر به تنش کششی خالص و خستگی در روسازی شود باید بر تنش فشاری غلبه کند.
علاوه بر روسازی‌های پیش‌تنیده، روسازی‌های پیش ساخته، هم به صورت روسازی متداول و هم به صورت پیش‌تنیده، در وصله‌کاری عمیق استفاده می‌شود.

۲-۱۱- روسازی پیش‌تنیده

پاسکو (Pasco, ۱۹۹۸) اظهار می‌کند که:
«بتن‌های پیش‌تنیده در اواخر سال ۱۹٤۰ میلادی معرفی و اولین بار در روسازی فرودگاه به کار گرفته شدند. در حدود سال ۱۹۵۹ دال بتنی پیش‌تنیده دوطرفه برای ساختن باند فرودگاه نظامی بیگز در تگزاس استفاده شد. روسازی غیرمسلح ٦۱۰ میلی‌متری (۲٤ اینچی) جای خود را به روسازی پیش‌تنیده ۲۳۰ میلی‌متری (۹ اینچی) داد. متأسفانه هراس از نیاز به نیروی انسانی متخصص بیشتر و سرعت یک مایل در روز برای قالب‌های لغزنده، بی‌میلی پیمانکار را برای پذیرفتن این تکنولوژی امتحان نشده به همراه داشت و باعث شد این تکنولوژی که مصرف بتن را کاهش می‌داد عقب نگه داشته شود. حدود دوازده محور اصلی با روسازی بتنی پیش‌تنیده که طرح‌های متفاوتی داشتند بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ در آمریکا ساخته شد».
اولین راه اصلی آزمایشی شناخته شده برای روسازی بتنی پیش‌تنیده، به اجرای قطعه کوتاهی از مسیر در سال ۱۹۷۱ واقع در دلاور آمریکا مربوط می‌شود. پروژه‌های دیگری که اجراء شدند فرودگاه دالاس، به همراه دو فرودگاه در پنسیلوانیا بود.
پروژه دیگری که به نمایش گذاشته شد، یک روکش ناپیوسته در فرودگاه بین‌المللی شیکاگو، در باند 8R-27L بود که نتایج آن در چکیده بخش مهندسی سازمان هواپیمایی فدرال، شماره ۲٤، آمده است. اساس روسازی بتنی مسلح یکپارچه با ضخامت ۳۰۵ میلی‌متر (۱۲ اینچ) بر روی سنگ آهک شکسته با ضخامت ٤۵۷ میلی‌متر (۱۸ اینچ) بود.

روکش پیش تنیده با ضخامت ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) در نیمه غربی و ۲۲۸ میلی‌متر (۹ اینچ) در نیمه شرقی براساس هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ اجراء شد. ابعادی به اندازه ۲۴۴ متر (۸۰۰ فوت) در ۴۶ متر (فوت ۱۵۰) به رویه اختصاص یافت. روسازی در هر دو راستای طولی و عرضی پیش‌تنیده بود.

راهنمای سال ۱۹۹۳ طرح روسازی آشتو، راجع به طراحی روسازی‌های پیش‌تنیده بحث کرده است. مزیت بالقوه روسازی پیش‌تنیده شامل کارآمدی بیشتر در بکارگیری مصالح ساخت (به دلیل کاهش ضخامت روسازی) و درزها و ترک‌های کم‌تر و همچنین نیاز کم‌تر به نگهداری مستمر و افزایش طول عمر روسازی است. مواردی که باید مورد توجه قرار بگیرد عبارتند از:

- روسازی می‌تواند فقط در راستای طولی پیش‌تنیده باشد (همراه با روسازی بتنی غیرمسلح یا مسلح عرضی)، یا می‌تواند در هر دو جهت طولی و عرضی و یا به طور مورب (در یک زاویه خاص) پیش‌تنیده باشد.
- اگرچه روسازی پیش‌تنیده می‌تواند بر روی تکیه‌گاه ضعیف اجرا شود، اما به طور کلی زیراساس‌های با مقاومت نسبتاً زیاد ۵۴ مگاپاسکال بر متر (۲۰۰ psi/in) یا بیشتر استفاده می‌شود.
- دال‌های بتنی پیش‌تنیده با طولی بسیار بیشتر از روسازی‌های رایج اجراء می‌شوند. طول آن‌ها به طور عمومی ۲۰۰ متر (۴۰۰ فوت) می‌باشد، اگرچه در اروپا تا طول ۳۰۰ متر (۱۰۰۰ فوت) هم ساخته می‌شوند.
- میزان پیش‌تنیدگی نوعاً بین ۲۰۷۰-۶۸۹ کیلوپاسکال (۳۰۰-۱۰۰ psi) در جهت طولی و ۱۳۸۰-۰ کیلوپاسکال (۲۰۰-۰ psi) در جهت عرضی است.
- اعضای کششی عموماً کابل‌های ۱۵ میلی‌متری (۰/۶ اینچ) هستند که تا ۸۰ درصد تنش تسلیم کشیده می‌شوند و با فواصل ۲ تا ۴ برابر ضخامت دال در راستای طولی و ۳ تا ۶ برابر ضخامت دال در راستای عرضی کار گذاشته می‌شوند.
- به دلیل این که اطلاعات کمی درباره خستگی بتن پیش‌تنیده در دست قرار دارد و به خاطر علایم کمی که ممکن است قبل از به وجود آمدن خرابی دیده شود، طراحان باید ضرایب اطمینان مربوط به خستگی را به طور محافظه کارانه به کار بگیرند.
- ضخامت روسازی پیش‌تنیده در حدود ۵۰-۴۰ درصد ضخامت روسازی بتنی متداول یا در حدود ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر (۶-۴ اینچ) برای راه‌های اصلی می‌باشد.

- جلوگیری از سایش زیراساس فاکتور مهمی است که باید رعایت شود و معمولاً لایه‌های کاهنده سایش مانند ورقه‌های پلی‌اتیلن استفاده می‌شوند.
- اتلاف نیروی پیش‌تنیدگی در حدود ۲۰-۱۵ درصد باید در طراحی لحاظ شود.

سازمان هواپیمایی فدرال عنوان می‌کند که:

«روسازی بتن پیش‌تنیده در فرودگاه‌های اروپا و در برخی مناطق آمریکا، مورد استفاده قرار گرفته است. روسازی‌های بتن پیش‌تنیده فرودگاه‌ها معمولاً از میلگردهای با مقاومت بالا پس‌تنیده می‌شوند. این روسازی معمولاً به طور قابل ملاحظه‌ای از روسازی‌های بتنی غیرمسلح، درزدار مسلح یا مسلح پیوسته نازک‌تر هستند، اما در عین حال ظرفیت باربری بیشتری دارند. طول دال‌های به کار رفته در حدود۱۵۰-۱۲۰ متر (فوت ۵۰۰-۴۰۰) می‌باشد».

در برخی از این پروژه‌ها میلگرد پیش‌تنیده فقط در یک جهت وجود دارد که به دلیل عدم پیش‌تنیدگی در جهت عرضی ترک هم‌راستا با میلگرد پیش‌تنیده ایجاد می‌شود. یک روسازی ۱۵۰ میلی‌متری (٦ اینچ) با پیش‌تنیدگی در دو جهت، به طول ۱/٦ کیلومتر (۱ مایل) در مسیر شماره I-35 تگزاس ساخته شد و پس از گذشت ۱۷ سال هنوز در وضعیت عالی بسر می‌برد.

اخیراً گرایشل به سیستم‌های پیش‌تنیده و پیش‌ساخته دوباره بالا گرفته است. تیسون و مریت[1] (2005) این پروژه‌ها را توصیف می‌کنند:

- برای اثبات قابلیت اجرایی روسازی پیش‌ساخته پیش‌تنیده، در سال ۲۰۰۲ نمونه‌ای از پروژه‌های اداره حمل‌ونقل تگزاس در نزدیکی جورج با این روش به انجام رسید. اداره حمل‌ونقل تگزاس روسازی دوخطه (به همراه شانه راه) به طول ۷۰۰ متر (۲۳۰۰ فوت) واقع در حریم راه اصلی بین‌ایالتی ۳۵ را اجراء کرد.
- در آوریل ۲۰۰٤ اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا پروژه‌ای را به عنوان نمونه اجرایی ارائه داد. این پروژه شبانه و با بستن مسیر به مدت کوتاهی، در حریم یک راه اصلی بین ایالتی اجراء شد. روسازی، در حریم راه اصلی بین‌ایالتی شماره ۱۰ با طول ۷٦ متر (۲۵۰ فوت) و به صورت دوخطه (به همراه شانه راه) در ال مونت[2] کانادا اجراء شد. جزئیات این پروژه توسط مریت و همکارانش (۲۰۰۵) بحث شده است.

1- Tyson & Merritt
2- El Monte

در سال ۲۰۰۵ در حالی که این مقاله تدوین می‌گردید، نمونه پروژه‌های دیگری نیز برای میسوری و ایندیانا در حال برنامه‌ریزی بود.

سیستمی که تیسون و مریت در مورد آن بحث کردند شامل خصوصیات زیر است:

- پانل‌های منفرد پیش‌ساخته پیش‌تنیده با ضخامت تقریبی ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ)، که سریع‌تر ساخته می‌شوند. ضخامت آن‌ها تقریباً برابر با روسازی‌های معمولی به ضخامت ۳۵۵ میلی‌متر (١٤ اینچ) و با همان گنجایش ترافیک است. این پانل‌ها در تمام عرض روسازی اجراء می‌شوند.
- سه نوع از پانل‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل پانل‌های درزدار، پانل‌های با تنش در مرکز و پانل‌های اساسی هستند.

پانل‌های درزدار در انتهای مقاطع پس‌تنیده قرار گرفته که در آن و برای جذب جابه‌جای‌های افقی دال از درزهایی با میلگردهای اتصال استفاده شده است. پانل‌های با تنش مرکزی، در وسط هر مقطع پس‌تنیده قرار می‌گیرند که همان فرورفتگی‌ها یا بیرون‌زدگی‌هایی هستند که کابل‌های پس‌تنیدگی در داخل مجرا و تحت تنش قرار می‌گیرند. پانل‌های اساسی که عمده‌ترین قسمت روسازی را تشکیل می‌دهند، در بین پانل‌های درزدار و پانل‌های با تنش مرکزی قرار داده می‌شود. در حین یک عملیات اجرایی، کارگران می‌بایست حداقل یک مقطع کامل را از یک پانل درزدار تا پانل درزدار دیگر قرار بدهند.

- پانل‌ها روی یک لایه تسطیح کننده از آسفالت گرم قرار داده می‌شوند.
- نواحی دندانه‌دار در امتداد لبه‌های دال، تسطیح عمودی حین اجراء را آسان و با جلوگیری از شکست درز، رانندگی با کیفیت کافی را تأمین می‌کند.

۲-۱۲- پانل‌های روسازی پیش‌ساخته

پانل‌های بتنی پیش‌ساخته به دو صورت برای نوسازی روسازی بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از:

- تعویض موقت دال‌های برداشته شده تا بسته شدن مسیر در مرحله بعد، بتن‌ریزی انجام شود؛ و
- روسازی دائمی (تعویض انتخابی پانل‌ها).

مزایای دال‌های بتنی پیش‌ساخته شامل کیفیت بالای بتن، عمل‌آوری بهتر، پایین بودن ریسک توقف کار به دلیل تغییر وضعیت آب‌وهوایی و کاهش زمان بستن مسیر بر عبور و مرور می‌باشد. تسطیح پانل‌ها در یک تراز برای جلوگیری از برآمدگی لبه‌ها و انتقال

بارهای ترافیکی بین دال‌های پیش‌ساخته یا در بین دال پیش‌ساخته و روسازی موجود از جمله نکاتی است که باید بدان‌ها توجه کرد. به منظور جلوگیری از ورود آسیب در حین حمل و جابه‌جایی، عمدتاً دال‌های پیش‌ساخته با فولاد نرم مسلح می‌شوند.

در سال ۱۹۹۰ از پانل‌های پیش‌ساخته برای تعطیلی موقت برای بازسازی تقاطع باند پرواز فرودگاه بین‌المللی چارلستون و فرودگاه بین‌المللی سلوانا- هیلتون[1] استفاده شد. روسازی هر دو تقاطع در چندین تعطیلی ۸ ساعته و با استفاده از بتن زودگیر، به طور شبانه بازسازی شد. در هر تعطیلی دو قطعه به ابعاد ۷/٦ در ۷/٦ متر (۲۵ فوت در ۲۵ فوت) خاکبرداری و با بتن پر می‌شد. قبل از ساخت، پانل‌های پیش‌ساخته در ابعاد تقریبی ۳/۸ متر (۱۲½ فوت) (چهار عدد در هر قطعه) و یا ۳/۸ در ۲/٤ متر (۱۲½ فوت در ۸ فوت) (شش عدد در هر قطعه) به دلایل زیر جایگذاری می‌شد:

- تولید دال‌های پیش‌ساخته به پیمانکار این اجازه را داد که تجربه‌هایی بدست آورد و مشخصات، کارایی و مقاومت اولیه بتن‌های زودرس را بازبینی کند.
- پانل‌ها می‌توانند در حین اتفاقات ناگهانی برای باز کردن ترافیک باند پرواز مورد استفاده قرار گیرند.
- قابلیت اجرای این امکان را فراهم می‌کرد تا پس از هر تعطیلی شبانه یک مقطع با پانل‌های پیش ساخته پر شود. در دوره بعدی، پانل‌ها برداشته و بتن جدید جایگزین می‌شد.

پیمانکار پروژه ساوانوا توانست از پروژه چارلستون بازبینی به عمل آورد و فرآیند اجراء را بهبود ببخشد.

پانل‌های پیش‌ساخته در بزرگراه ۱۲ خطه ٤۲۷ تورنتو کانادا مورد ارزیابی قرار گرفت. این راه، اصلی‌ترین مسیر سفرهای کاری رفت‌وبرگشتی شمال به جنوب تورنتو است. همه دال‌های تعویض شده با آرماتورهای پوشیده شده از اپوکسی مسلح شدند. سه روش مختلف آزمایش شد، که دو روش آن انحصاری بود و با وجود این که پیمانکار نسبتاً بی‌تجربه بود، هر سه روش عملکرد خوبی از خود نشان دادند.

در اکتبر و نوامبر ۲۰۰۳، ۱۵۷ قطعه دال واقع در ۱۸ محل از مسیر I-25 شمال دنور کولورادو که دچار خرابی بودند، با پانل‌های پیش‌ساخته نوسازی شد. با این روش پایداری و استحکام دال‌ها و انطباق با ارتفاع روسازی موجود به وسیله فوم‌های پلی‌اورتان فشرده تأمین و درزها با یک نوع ماده متصل کننده پر شدند. در طول درزها به جای میل‌مهار رشته‌های نازک فایبرگلاس به کار رفت اما در مجاورت برخی از دال‌ها ترک‌هایی ظاهر

1- Savanah/Hilton Head International Airport

شد. با افزایش آشنایی کارگران نسبت به این تکنولوژی، سرعت اجراء افزایش یافت. در مجموع، دال‌های پیش‌ساخته برای به کار گرفتن در مسیرهای عبوری با تعطیلی کوتاه‌مدت روشی مناسب است که نمونه آن را می‌توان در پروژه‌های چارلستون و فرودگاه سوانا دید.

سیستم نوین درزهای فشرده در ژاپن بهبود یافته و در ساخت ۸۰۰ مترمربع (۸۶۰۰ فوت‌مربع) از روسازی باند فرود هواپیما در فرودگاه سندای استفاده شده است. دال‌ها به صورت منفرد و پیش‌تنیده در ابعاد ۱٤/۵ متر طول و با ۲/۵ متر عرض و با ۲٤۰ میلی‌متر ضخامت (٤۷/٦ فوت در ۸/۲ فوت در ۹/٤ فوت) می‌باشند. کابل‌های پیش‌تنیده در درزها به یکدیگر متصل و به منظور انتقال بار کشیده شده‌اند. رویه آسفالتی موجود دچار خرابی شدید بود که فرآیند ترمیم آن در طی تعطیلی‌های شبانه مسیر، از ساعت ۹ شب الی ۷ صبح انجام شد.

۲-۱۳- بتن غلطکی متراکم

جزئیات روسازی بتن غلطکی متراکم توسط کمیته ۳۲۵ انجمن بتن آمریکا و در گزارش ACI 325.10R (ACI 1995) شرح داده شده است. بتن غلطکی متراکم مخلوط بسیار خشکی است که می‌توان آن را به صورت درجا تهیه کرد ولی اغلب در دستگاه اختلاط تولید می‌شود. گرچه روش‌های اختلاط و اجرای بتن غلطکی متفاوت است ولی به طور گسترده برای ساخت یا نوسازی سد به کار می‌رود. بتن غلطکی مخلوطی با اسلامپ صفر یا بسیار کم می‌باشد، که نسبت به بتن خمیری متداول، به اساس تثبیت شده بیشتر شباهت دارد. مراحل اجرای آن همانند روسازی با آسفالت گرم است. مصالح با کامیون به محل اجرای روسازی حمل شده و در دستگاه پخش روسازی قرار می‌گیرد و سپس با غلطک‌های چرخ فولادی غلطک‌زده می‌شود. پس از آن باید مبادرت به عمل‌آوری بتن غلطکی متراکم ورزید. ممکن است در روسازی ترک‌های طبیعی به وجود آید. با توجه به این که افت حجمی در بتن غلطکی متراکم کم‌تر از بتن معمولی است می‌توان فاصله درزها و ترک‌ها را نسبت به روسازی بتنی غیرمسلح درزدار بیشتر در نظر گرفت.

به طور سنتی، فرآیند اجرای روسازی بتن غلطکی متراکم به گونه‌ای است که زبری سطح برای سرعت‌های بالای ترافیک مناسب نمی‌باشد. سطح روسازی بتن غلطکی متراکم کاربردهای صنعتی زیادی دارند، از جمله می‌توان به زیرساخت‌های حمل بار با مدهای گوناگون، کارخانه‌های اتومبیل‌سازی و تسهیلات نظامی اشاره کرد. پروژه‌های اخیر صنعتی با مقیاس بزرگ شرکت هوندا و مرسدس در آلاباما از این روش برای احداث

زیرساخت خود بهره برده‌اند.
سطح رویه سواره‌رو روسازی بتن غلطکی متراکم، با آسفالت گرم پوشیده می‌شود. به طور گسترده از این روش در راه‌های فرعی جدید در کلمبوس، اوهایو، و برای خیابان‌ها و جاده‌های استان کبک کانادا استفاده شده است. شکل ۲-۱۰ اجرای روسازی بتن غلطکی متراکم برای مسیرهای فرعی جدید را در کلمبوس نشان می‌دهد.
برخی از پروژه‌های ایالتی کوچک در کارولینا جنوبی و تنسی به صورت نمایشی اجراء شد. در ایالت جرجیا از بتن غلطکی متراکم برای تعویض شانه‌های آسفالتی خراب شده در راه اصلی بین ایالتی شماره ۲۸۵ حوالی آتلانتا استفاده شده است. اطلاعات مربوط به این پروژه و دیگر پروژه‌ها توسط شرکت توسعه سیمان جنوب شرق در وب‌سایت http ://www.rccpavement.info قابل دسترسی است.
ثابت شده است که اجرای روسازی بتن غلطکی متراکم بسیار اقتصادی است. بتن غلطکی متراکم در مقایسه با روسازی بتنی غیرمسلح درزدار به قالب، میلگردهای اتصال یا میل‌مهارها و برای پرداخت نهایی به نیروی کار انسانی نیاز ندارد، در نتیجه هزینه اجرای آن‌ها بسیار پایین‌تر است. همچنین هزینه تعمیر و نگهداری آن از سایر روسازی‌ها پایین‌تر است. مقاومت خمشی روسازی بتن غلطکی برابر یا بهتر از بتن متداول است. بررسی‌های اخیر در مورد بتن غلطکی متراکم نشان می‌دهد که عملکرد درازمدت آن عالی می‌باشد.
برای استفاده از روسازی بتن غلطکی متراکم در سرعت‌های بالا، استفاده از روکش بتنی به هم پیوسته مورد بررسی قرار گرفت و نمونه آزمایشی این روسازی در تسهیلات صنعتی میشیگان ساخته شد.

۲-۱۴- بتن نفوذپذیر یا متخلخل

تمام انواع روسازی‌های ذکرشده در فوق، پوششی نفوذ ناپذیر فراهم می‌کنند. به جز مقادیر کم آب‌های سطحی که بین ترک‌ها و درزها نفوذ می‌کند، آب‌های ناشی از بارش در سطح روسازی جریان یافته و باید با استفاده از یک سیستم زهکشی مجزا تخلیه شوند. با این وجود در بسیاری از نواحی، سازندگان در استفاده از پوشش نفوذ ناپذیر محدود هستند. این موضوع به افزایش استفاده از روسازی متخلخل یا نفوذپذیر منتهی شده است. یعنی نوعی از روسازی که اجازه عبور جریان سریع آب را در سازه خود می‌دهد. انواع گوناگون روسازی‌های متخلخل، مانند بتن نفوذپذیر توسط فرگوسن شرح داده شده است (Ferguson, 2005). شکل ۲-۱۱ نفوذپذیری روسازی‌های بتنی متخلخل را در پروژه‌های اجرا شده در کلیولندِ اویاهو را نشان می‌دهد.

بتن‌های نفوذپذیر عمدتاً از بتن‌های معمولی ضعیف‌تر هستند. نیتلات و همکارانش، (Niethelath et al, 2005) مزایای بتن متخلخل را در کاهش سروصدای روسازی مورد بحث قرار دادند، اما در مورد اجرای یک روسازی بادوام از لحاظ سازه‌ای در یک راه اصلی صحبتی نکرده است. راه‌حلی که احتمالاً بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد روسازی بتنی معمولی با یک لایه روکش متخلخل می‌باشد.

مراحل طراحی و اجرای روسازی بتنی نفوذپذیر توسط کمیته ACI 522 منتشر شده است. اطلاعات مربوط به بتن نفوذپذیر توسط شرکت توسعه سیمان جنوب شرقی در وب‌سایت http://www.pervious.info/ قابل دسترسی است.

به دلیل این که بتن نفوذپذیر نسبت به بتن معمولی مقاومت خمشی کم‌تری دارد، به طور گسترده از این روسازی برای پارکینگ‌ها، خیابان‌ها و جاده‌های با ترافیک سبک استفاده می‌شود. برای این منظور، ضخامتی برابر با ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) کافی است. با این وجود در آینده، شاید استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذپذیر برای ترافیک‌های سنگین گسترش یابد. احتمال دارد روسازی‌های نفوذپذیر اجرا شده در پارکینگ‌ها، به عنوان بخشی از پروژه‌های ساختمانی یاد شود که از آن به منظور گسترش موارد طراحی منطبق با انرژی و محیط‌زیست استفاده شود.

شکل ۲-۱۰: اجرای روسازی بتن غلطکی متراکم- کلومبوس، اویاهو

شکل ۲-۱۱: نمایش نفوذپذیری در پروژه نمایشی روسازی نفوذپذیر- کلیولند، اویاهو

فصل سوم

عملکرد روسازی

مهندسی روسازی بتنی، مجموعه‌ای است از روش طراحی، مصالح و روش‌های اجرایی که عملکرد رضایت‌بخشی را در طول عمر روسازی تضمین می‌کند. برای استفاده‌کنندگان میزان خدمت‌دهی روسازی، یعنی هموار بودن و مقاومت اصطکاکی راه، نسبت به عملکرد سازه‌ای آن اهمیت بیشتری دارد. به استثناء زمانی که مصالح انتخابی روسازی دارای کیفیت بد و یا روش اجرایی، همراه با خطا باشد که در این صورت قبل یا اندکی پس از بازگشایی ترافیک، روسازی دچار نقص خواهد شد، به طور معمول روسازی، به تدریج تحت تأثیر بار ترافیک و اثرات محیطی دچار خرابی می‌شود.

FHWA به عنوان بخشی از برنامه عملکرد بلندمدت روسازی دستورالعمل شناسایی خرابی‌ها را تهیه کرده است. این کتابچه راهنما، حاوی توضیحات و عکس‌هایی برای شناسایی انواع خرابی‌های روسازی و طبقه‌بندی شدت آن‌ها است.

انواع خرابی‌ها براساس این دستورالعمل برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح درزدار به‌شرح زیر است:

- ترک‌خوردگی: به انواع شکستگی گوشه، ترک‌های محل درز، ترک‌های طولی و ترک‌های عرضی تقسیم می‌شوند.
- نواقص درزها: خرابی آب‌بند درزها (طولی و عرضی) و خردشدگی در محل درز.
- نواقص سطحی: به انواع ترک‌های سطحی، پوسته‌شدگی، صیقلی شدن سنگدانه‌ها و بیرون پریدگی تقسیم می‌شود.
- خرابی‌های متفرقه: به ترکیدگی، پلکانی شدن ترک‌ها یا درزهای عرضی، افتادگی

شانه، جدایی شانه و سواره‌رو، تخریب وصله‌ها و مکش طبقه‌بندی می‌شوند.
این دفترچه راهنما، انواع خرابی‌ها را برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه به صورت زیر بیان کرده است:

- ترک‌خوردگی: مانند فوق به جز این که روسازی بتنی مسلح یکپارچه شکستگی گوشه ندارد.
- نواقص سطحی: مانند آنچه که در بالا ذکر شده است.
- خرابی‌های متفرقه: مانند بالا، به اضافه لهیدگی، تخریب درزهای اجرایی عرضی و تخریب آب‌بندهای درزهای طولی. همچنین از آنجا که روسازی بتنی مسلح یکپارچه فاقد درز می‌باشد، پلکانی شدن درز در آن رخ نمی‌دهد.

کمیته شماره ACI 201 در گزارش 201.1R-92 با عنوان راهنمای بررسی وضعیت بتن در حال خدمت‌دهی، دستورالعمل اجرایی تهیه کرده است.

۳-۱- ترک‌خوردگی

به استثناء ترک‌های عرضی ریز نزدیک به هم که در ابتدا در روسازی بتنی مسلح یکپارچه تشکیل می‌شوند، در روسازی‌های بتنی ممکن است ترک‌ها به علت اضافه بار در یک زمان یا خستگی در اثر بارگذاری‌های پی‌درپی رخ دهد.

۳-۱-۱- شکستگی‌های گوشه

شکستگی‌های گوشه تنها در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا روسازی بتنی مسلح درزدار رخ می‌دهد. یک قطعه مثلثی بتن به ابعاد ۰/۳ متر (۱ فوت) تا نیمی از عرض دال، شکسته می‌شود. این نوع از خرابی بیشتر در دال‌های با طول زیاد اتفاق می‌افتد. زیرا وقتی که دال تاب برمی‌دارد، گوشه‌های دال بدون تکیه‌گاه مانده و در اثر عبور یک وسیله نقلیه سنگین می‌شکنند. طبق نظر هوانگ[1] با بارگذاری متناوب و از دست رفتن تکیه‌گاه، انتقال بار در طول درز دچار ضعف می‌شود و تنش‌های حرارتی یا تاب برداشتن بر اثر رطوبت، معمولاً سبب شکستگی گوشه می‌شود. با محدود کردن طول دال، به ویژه با زیراساس سخت‌تر و فراهم کردن شرایط انتقال بار به دال‌های مجاور و با استفاده از میلگردهای انتظار و میل‌مهارها می‌توان از شکستگی گوشه جلوگیری کرد. نمونه‌ای از یک شکستگی گوشه با شدت متوسط در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

1- Huang

شکل ۳-۱: شکستگی گوشه (ACPA 1996a: VIII-16)

۳-۱-۲- ترک‌خوردگی دوام یا ترک‌خوردگی نوع D

ترک‌خوردگی دوام یا ترک‌خوردگی نوع D در نزدیکی درزها، ترک‌ها و لبه‌های آزاد رخ می‌دهد، که به عنوان ترک‌هایی با الگوهای هلالی شکل نزدیک به هم شناخته می‌شود. بتن در محل این ترک‌ها اغلب تیره‌تر از محل‌های بدون ترک می‌باشد. یودر و ویتزاک عنوان کرده‌اند که این پدیده موضعی است و به دلیل استفاده از مصالح کم‌دوام و یا شرایط آب‌وهوایی سخت رخ می‌دهد. این خرابی یک فرآیند پیش‌رونده تخریبی محسوب می‌شود که ممکن است سرانجام به از هم پاشیدگی تمام دال منجر شود. طبق نظر هوانگ این خرابی به دلیل انبساط بعضی از سنگدانه‌های درشت در اثر فرآیند ذوب و انجماد رخ می‌دهد. میندس و همکارانش[1] بیان می‌کنند که این مشکل در سنگ‌های آهکی واقع در میانه غربی آمریکا به صورت مکرر اتفاق می‌افتد. همچنین اندازه‌ای بحرانی برای بسیاری از سنگدانه‌ها وجود دارد که سنگدانه‌های کوچک‌تر از آن مستعد ترک‌خوردگی نمی‌باشند. بنابراین برای جلوگیری از ترک‌های نوع D می‌توان از مصالح مستعد استفاده نکرد و یا اگر این نوع مصالح تنها مصالح موجود باشند، مصالح با بزرگ‌ترین قطر سنگدانه کوچک‌تر را به کار برد. ابعاد بحرانی برخی از سنگ‌های رسوبی با استحکام ضعیف، به

1- Mindess et al

اندازه ۲۵-۱۲ میلی‌متر (۱/۲ تا ۱ اینچ) می‌باشد. ترک‌خوردگی نوع D با شدت زیاد در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

۳-۱-۳- ترک‌خوردگی طولی

در تعریف ترک‌های طولی باید گفت که با خط مرکزی روسازی موازی هستند. به نظر هوانگ، ترک‌های طولی بر اثر مجموعه عواملی مانند بارگذاری‌های مکرر سنگین، از بین رفتن تکیه‌گاه مناسب، تنش‌های ناشی از اعوجاج و کمانش دال و یا اجرای نامناسب درزهای طولی رخ می‌دهند. اگر ترک‌های طولی در مسیر چرخ‌های وسایل نقلیه نباشند و به اندازه قابل توجهی پلکانی نشده باشند، در عملکرد روسازی اثر قابل توجهی نخواهند داشت. نبود اتصالات طولی، وقوع این ترک‌ها را محتمل‌تر می‌کند. نمونه‌ای از ترک‌های طولی با شدت زیاد در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

۳-۱-٤- ترک‌خوردگی عرضی

ترک‌های عرضی بر خط مرکزی روسازی عمود هستند. این ترک‌ها شاخص اصلی اندازه‌گیری عملکرد روسازی بتنی غیرمسلح درزدار می‌باشند. چرا که پلکانی‌شدن یک ترک عرضی، باعث به وجود آمدن یک سطح کاملاً ناهموار می‌شود. روسازی بتنی غیرمسلح درزدار در طول ترک، فاقد آرماتوری است که آن‌ها را در کنار هم نگه دارد. ترک‌خوردگی می‌تواند تا حدی پیشرفت کند که باعث خرد شدن دال و در نهایت ناگزیر به تعویض آن شود. هوانگ بیان می‌کند که ترک‌های عرضی غالباً به دلیل ترکیبی از بارگذاری‌های سنگین متناوب، تنش‌های ناشی از افت دما، رطوبت و افت بتن در اثر از دست دادن رطوبت به وجود می‌آیند. ترک‌های عرضی با شدت زیاد در شکل ۳-٤ نشان داده شده است.

شکل ۳-۲: ترک‌خوردگی نوع D با شدت زیاد (Miller & Bellinger, 2003: 37)

شکل ۳-۳: ترک طولی با شدت زیاد (Miller & Bellinger, 2003:39)

شکل ۳-٤: ترک‌های عرضی با شدت زیاد در JRCP (Miller & Bellinger, 2003: 41)

یو و همکارانش[1] در سال ۱۹۹۸ دریافتند که در آب‌وهوای خشک با تغییرات حرارتی شدیدتر، احتمال ترک‌خوردگی عرضی که درزها با فاصله بیشتری از هم قرار دارند، بالاتر می‌رود. به طور کلی، افزایش فاصله بین درزها، ترک‌خوردگی عرضی را افزایش می‌دهد. تعیین فاصله مناسب درز به طور مفصل در فصل ۷ مورد بحث قرار گرفته است. انتظار می‌رود که در روسازی بتنی مسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح یکپارچه، ترک‌های عرضی تشکیل شود و تفاوت اساسی در نحوه عملکرد ترک‌هاست. در روسازی بتنی مسلح یکپارچه، فولاد کافی برای محکم نگه داشتن ترک‌ها به یکدیگر وجود دارد مگر این که بر اثر توسعه ترک‌ها، شکستگی ایجاد شود. در روسازی بتنی مسلح درزدار فولاد کافی برای جلوگیری از تخریب ترک‌ها و پلکانی شدن آن‌ها وجود ندارد.

۳-۲- خرابی‌های درز

از آنجایی که فقط روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح درزدار دارای درز هستند، تنها این نوع روسازی‌ها محتمل به خرابی هستند. تخریب آب‌بندی درز و پوسته‌شدگی از جمله خرابی‌های محتمل است.

۳-۲-۱- تخریب آب‌بندی درز (طولی یا عرضی)

آب‌بندی درز برای جلوگیری از ورود مواد تراکم ناپذیر و آب به درزهای نفوذپذیر استفاده می‌شود. مواد تراکم ناپذیر می‌توانند در روسازی در زمان باز و بسته شدن درزها به تمرکز فشار منجر و نهایتاً سبب خوردگی قسمتی از بتن شوند. متعاقب آن، آب باعث تخریب روسازی و لایه‌های زیرین آن می‌شود.

انواع رایج خرابی در آب‌بندی درز شامل بیرون آمدگی (مواد آب‌بندی از درز بیرون می‌زند)، سخت شدن، از بین رفتن چسبندگی (کمبود چسبندگی)، از بین رفتن پیوستگی (جدا شدگی)، از دست دادن کامل آب‌بندی، نفوذ مواد خارجی یا رشد علف هرز در درز می‌شوند. این آسیب‌ها بیان‌گر لزوم نگهداری درزها است به طوری که باید مرتباً تمیز و آب‌بندی شوند.

تخریب آب‌بندی درز عرضی فقط برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح درزدار رخ می‌دهد. تخریب آب‌بندی درزهای طولی ممکن است در هر نوع متداول از روسازی بتنی اتفاق بیفتد.

1- Yu et al

۳-۲-۲- پوسته‌شدگی درز (عرضی یا طولی)

پوسته‌شدگی درز به صورت ترک‌خوردگی، شکست، دانه‌دانه شدن یا ساییدگی لبه‌های دال به فاصله ۰/۳ متر (۱ فوت) از درز تعریف شده است. پوسته‌شدگی یک پدیده سطحی می‌باشد و به طور عمومی به دلیل تمرکز فشار ناشی از ورود مواد تراکم ناپذیر در درزها و باز و بسته شدن درز در زمان انبساط دال یا بارگذاری ترافیک به وجود می‌آیند. همچنین ممکن است به دلیل طراحی نامناسب یا عملکرد ضعیف میلگردهای انتقال بار به وجود آیند. بنابراین بهترین راه برای جلوگیری از پوسته‌شدگی نگهداری مناسب درزهاست. همچنین پوسته‌شدگی ممکن است به دلیل ضعف در روش‌های اجرایی مانند عمل‌آوری نامناسب درزهای روسازی پس از ایجاد برش اره‌ای باشد. پوسته‌شدگی درزهای عرضی با شدت زیاد در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

۳-۳- خرابی‌های سطحی

برخلاف ترک‌خوردگی و خرابی‌های درز، عمدتاً خرابی‌های سطحی ارتباطی با طراحی ندارند. این خرابی‌ها یا به دلیل کیفیت بد مصالح انتخابی یا ضعف در شیوه‌های ساخت‌وساز یا هردو است.

۳-۳-۱- ترک‌خوردگی سطحی

ترک‌های سطحی مجموعه‌ای از ترک‌ها هستند که فقط در سطح فوقانی دال گسترش پیدا می‌کنند. ترک‌های بزرگ‌تر غالباً در راستای طولی روسازی گسترش می‌یابند و به وسیله ترک‌های ریزتر عرضی یا ترک‌های اتفاقی قطع می‌شوند. میندِس و همکارانش[1] ذکر کردند که ترک‌های سطحی می‌توانند به دلیل تعرق زیاد، افت پلاستیک بتن و پرداخت بیش‌از اندازه یا زودتر از موعد بتن باشد که منجر به ترک‌های ریز می‌شود. همچنین واکنش قلیایی- سیلیسی عامل ایجاد ترک‌های درشت است. ترک‌های سطحی در شکل ۳-٦ نشان داده شده است.

1- Mindess et al

شکل ۳-۵: پوسته‌شدگی درزهای عرضی با شدت زیاد (ACPA 1996a: VIII-47)

شکل ۳-٦: ترک‌خوردگی سطحی (Miller & Bellinger, 2003: 48)

توانایی تشخیص ترک‌های سطحی ناشی از مشکلات مربوط به پرداخت نهایی که احتمال پیشروی آن‌ها کم است و ترک‌های سطحی ناشی از واکنش قلیایی- سیلیس که احتمال پیشروی آن‌ها زیاد است و باعث تخریب تدریجی روسازی می‌شود، امری مفید خواهد بود. واکنش قلیایی- سیلیسی یکی از دو نوع واکنش سنگدانه‌های قلیایی در بتن است. این واکنش بین مواد قلیایی سیمان و نوعی ماده سیلیسی فعال در سنگدانه‌ها اتفاق می‌افتد،

در حالی که واکنش دیگر به صورت قلیایی- کربناتی است. عناصر واکنش‌زای موجود در مصالح عبارتند از اُپال[1]، شیشه سیلیکا، سنگ یمانی[2]، کوارتز کرسیتوبالیت[3] و سنگ کوارتز که ممکن است در سیلیس، سنگ آتشفشانی و سنگ کوارتز وجود داشته باشد. مشکلات موجود در فرآیند ساخت در آمریکا از اواخر دهه ۱۹۲۰ تا اوایل دهه ۱۹٤۰ مشاهده شد و مشخص گردید که این مشکلات اساساً در غرب و جنوب غربی بیشتر مشاهده می‌شود. فاکتورهایی که واکنش قلیایی- سیلیس را تحت تأثیر قرار می‌دهد شامل طبیعت، مقدار و اندازه ذرات واکنش پذیر سیلیسی، مقدار مواد قلیایی موجود و وجود رطوبت می‌باشد. از آنجا که روسازی بتنی را نمی‌توان دور از رطوبت نگاه داشت، راه‌حل اول استفاده از سیمان با درجه قلیایی پایین‌تر و راه‌حل دیگر استفاده از مواد غیرواکنشی می‌باشد. در برخی مناطق استفاده از مصالح سنگی غیرواکنشی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی برای کاهش اثرهای واکنش قلیایی- سیلیسی مفید هستند. خاکستر بادی نوع F عموماً حفاظت کافی را در صورت جایگزین شدن با ۲۰-۱۵ درصد از سیمان انجام می‌دهد، ولی خاکستر بادی نوع C اثر کم‌تری دارد.

واکنش‌های مشابه که حالتی از واکنش قلیایی- سیلیسی را شامل می‌شود، در مصالح شن و ماسه‌ای رودخانه‌ای، در ایالت کانزاس، نِبراسکا، آیوآ، میزوری و ویومینگ وجود دارد و واکنش قلیایی- کربناتی را نیز در بر می‌گیرد. در بعضی ایالت‌های میانه غربی و شرقی و شرق کانادا در سنگ‌های کربنی واکنش قلیایی- کربناتی رخ می‌دهد. در گزارش ACI 221.1R-98 واکنش قلیایی- سیلیسی و سایر واکنش‌های قلیایی مصالح سنگی به طور مفصل توضیح داده شده است.

۳-۳-۲- پوسته‌شدگی

پوسته‌شدگی عبارتست از خرابی محدوده بین ۱۳-۳ میلی‌متری از سطح فوقانی دال، که ممکن است در هر جایی از روسازی اتفاق بیفتد. پوسته‌شدگی ممکن است در اثر پیشرفت ترک‌خوردگی سطحی به وجود آید. نمونه‌ای از پوسته‌شدگی در شکل ۳-۷ نمایش داده شده است.

پوسته‌شدگی ممکن است در اثر استفاده مکرر از نمک جهت برطرف کردن یخبندان سطح

1- Opal
2- Chalcedony
3- Cristobalite Tridymite

جاده به وجود آید و احتمال وقوع آن در سطح بتنی که به درستی پرداخت نشده است، بیشتر می‌باشد.

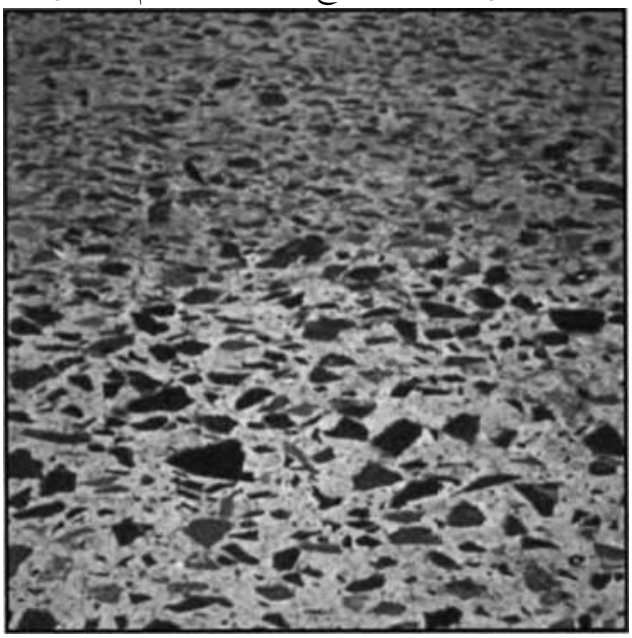
شکل ۳-۷: پوسته‌شدگی (Miller & Bellinger, 2003: 48)

۳-۳-۳- صیقلی شدن سنگدانه‌ها

مشکل مربوط به صیقلی شدن سنگدانه‌ها، به ملات سطحی، از بین رفتن آن و در نتیجه بدون پوشش ماندن درشتدانه‌ها باز می‌گردد. این مسئله باعث کاهش اصطکاک سطح روسازی می‌شود. این کاهش اصطکاک می‌تواند باعث کاهش ایمنی روسازی مخصوصاً در هوای بارانی شود. صیقلی شدن سنگدانه‌های سطحی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. از آنجایی که سیمان مقاومت سایشی خوبی ندارد، مقاومت سایشی بتن به سختی مصالح به کار رفته در آن وابسته است. پرداخت نهایی ضعیف، ممکن است به سطحی سست با مقاومت سایشی کم منجر شود. مقاومت اصطکاکی را می‌توان با خراش‌های الماسی در سطح جاده به حالت اول بازگرداند، ولی برای مصالح سنگی نرم‌تر این کار باید هرچند سال یکبار تکرار شود.

۳-۳-٤- بیرون پریدگی

بیرون پریدگی، تکه‌های کوچکی هستند که در سطح روسازی لَق و از آن جدا می‌شوند. معمولاً قطر آن‌ها بین ۱۰۰-۲۵ میلی‌متر و عمقشان بین ۵۰-۱۳ میلی‌متر می‌باشد. بیرون پریدگی ناشی از انبساط، دوام کم، دانه‌بندی غیریکنواخت و عمل ذوب و یخ‌زدگی متناوب است. بیرون‌پریدگی و ترک‌های نوع D تحت مکانیزم مشابهی ایجاد می‌شوند.



شکل ۳-۸: سطح متراکم پرداخت شده (Miller & Bellinger, 2003: 49)

۳-٤- خرابی‌های متفرقه

۳-٤-۱- ترکیدگی

ترکیدگی به جابه‌جایی موضعی سطح روسازی به سمت بالا در محل درزهای افقی یا ترک‌ها اطلاق می‌شود که معمولاً با خرد شدن بتن در آن نقاط همراه می‌شود. ترکیدگی شکست‌های ناشی از کمانش در بتن می‌باشند که به دلیل تنش‌های فشاری در روسازی بتنی به وجود می‌آیند. اگر درز عرضی یا ترک اجازه انبساط نداشته باشد و بعضاً با مواد غیرقابل تراکم پر شده باشد، در آب‌وهوای گرم باعث ایجاد این نوع از خرابی خواهد شد. همچنین ترکیدگی در محل وصله تأسیسات موجود در مسیر، ورودی‌های سیستم

زهکشی و یا زمانی که ترک‌خوردگی نوع D سبب ضعف بتن در محل درز شده باشد، به وجود می‌آیند. نمونه یک ترکیدگی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.

شکل ۳-۹: ترکیدگی (Miller & Bellinger, 2003: 52)

روش‌های مرسوم در جلوگیری از ترکیدگی، نگهداری مناسب درزها به منظور انباشته نشدن مواد تراکم ناپذیر در محل درز و یا اجرای درزهای کاهش فشار می‌باشند. درزهای انبساطی در پل‌ها و درزهای جدا کننده در وصله‌های اطراف تأسیسات موجود در مسیر یا مدخل‌های زهکشی استفاده می‌شوند.

در بسیاری از مواقع، طراحی، اجراء و نگهداری مناسب درزها، فضای کافی را برای جابه‌جایی در اختیار می‌گذارد که بدین وسیله از فرآیند ترکیدگی جلوگیری به عمل خواهد آمد. این مسئله به دلیل انقباض دال ناشی از دست دادن آب بتن، برای غلبه بر انبساط حرارتی کافی است. البته حالت استثنا زمانی رخ می‌دهد که پس از یک تابستان بسیار گرم روسازی در هوای سرد اجراء شود. همچنین ترکیدگی زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله بین درزها مانند روسازی بتنی مسلح درزدار، زیاد باشد. این حالت به این دلیل رخ می‌دهد که جابه‌جایی‌های درز در امتداد طول دال است.

۳-٤-۲- پلکانی شدن درزها و ترک‌های عرضی

پلکانی شدن به صورت اختلاف ارتفاع در دو طرف درز یا ترک تعریف می‌شود. این خرابی سبب ضعف در سیستم انتقال بار می‌شود. پلکانی شدن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت رانندگی دارد و به ویژه سبب افزایش اعتراضات مسافران سیستم حمل‌ونقل عمومی می‌شود. شکل ۳-۱۰ یک ترک عرضی پلکانی شده را نشان می‌دهد. عکسبرداری از خرابی پلکانی کار دشواری است، اما خیلی سریع توسط مسافران عمومی مورد توجه قرار می‌گیرد.

پلکانی شدن در درزهایی که بین سنگدانه‌های آن قفل‌وبست وجود دارد و همچنین در ترک‌های وسط دال روسازی بتنی غیرمسلح درزدار اتفاق می‌افتد. عموماً در حالت پلکانی، ارتفاع دال پیش‌رو (در جهت حرکت) بالاتر از دال پشت سر می‌باشد. به دلیل این که وقتی ترافیک از روی درز عبور می‌کند بر روی دال عقبی بارهای ضربه‌ای وارد می‌کند و مصالح لق شده را از زیر دال عقب به زیر دال پیش رو می‌راند. این پدیده مکش نامیده می‌شود.

میلگردهای اتصال با اندازه مناسب برای جلوگیری از پلکانی شدن مؤثر هستند. اگر میلگردهای اتصال کوچک باشند فشار بالای تکیه‌گاهی بر روی بتن می‌تواند باعث شود که میلگردهای اتصال ساییده و لق شوند. فولاد کمی که در روسازی بتنی مسلح درزدار استفاده می‌شود برای جلوگیری از پلکانی شدن درزهای وسط دال کافی نیست. اما عمدتاً فولاد روسازی بتنی مسلح یکپارچه برای جلوگیری از پلکانی شدن ترک‌های عرضی باریک و کم‌فاصله کفایت می‌کند.

عوامل مهم دیگری که سبب پلکانی شدن می‌شوند شامل زهکشی، کیفیت مصالح زیراساس یا بستر روسازی و فاصله درزها هستند. برای وقوع پدیده مکش نیاز به رطوبت است. مصالح تثبیت نشده در زیر روسازی نیز مستعد مکش هستند. اگر مصالح بستر روسازی ضعیف باشد، استفاده از مصالح با کیفیت بالاتر می‌تواند به جلوگیری از مکش کمک کند. فاصله زیاد بین درزها سبب جابه‌جایی بیشتر در محل درز و حفظ شرایط انتقال بار بسیار دشوار می‌شود. به طور معمول، در جاهایی که وزن یا سرعت وسایل نقلیه کم می‌باشد، درز را به وسیله قفل‌وبست سنگدانه‌ها در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار ایجاد می‌کنند. اگر فاصله بین درزها کم باشد و سنگدانه‌های بزرگ‌تر و سخت‌تر مورد استفاده قرار بگیرد، حالت پلکانی کاهش پیدا خواهد کرد. خازانوویچ و همکارانش[1]

1- Khazanovich et al

به این نتیجه رسیدند که روسازی غیرمسلح درزدار در شرایط آب‌وهوایی یخبندان و مرطوب، مخصوصاً آن‌هایی که دارای بستر خاکی ریزدانه باشد، بیشتر مستعد پلکانی شدن هستند. قرار دادن یک لایه درشت‌دانه در زیر لایه زیراساس زهکشی را بهبود می‌بخشد و پلکانی شدن را به ویژه در روسازی‌های بدون میلگردهای اتصال، کاهش می‌دهد. همچنین تغییر مکان‌های گوشه در دال‌های عریض‌تر و پلکانی شدن در آن‌ها تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه افزایش ضخامت دال به تنهایی نمی‌تواند مشکلات پلکانی شدن درز را حل کند.

۳-۲-۳- افتادگی شانه نسبت به سواره‌رو

افتادگی شانه نسبت به سواره‌رو عبارتست از اختلاف ارتفاع بین لبه دال و شانه بیرونی که بر اثر نشست شانه بیرونی اتفاق می‌افتد. در صورت استفاده از شانه بتنی که توسط میل‌مهارها به سواره‌رو متصل است، احتمال وقوع افتادگی بسیار کم می‌شود. اما با این حال شانه روسازی‌های بتنی ممکن است از نوع آسفالتی، سنگدانه‌ای یا خاکی باشند. این شانه‌ها به دلیل یخبندان و خاک‌های فعال، می‌توانند نسبت به دال دچار برآمدگی شوند. افتادگی یا برآمدگی در شانه راه برای رانندگانی که بالاجبار باید از آن‌ها استفاده کنند خطراتی را ایجاد خواهد کرد که با نگهداری یا تعویض شانه اصلاح می‌شود.

۳-٤-٤- جدایی سواره‌رو و شانه

منظور از جدایی سواره‌رو و شانه، تعریض درز بین شانه و دال است. در صورتی که درز به اندازه کافی آب‌بندی شده باشد تا از ورود آب به درون روسازی جلوگیری نماید، این پدیده خرابی محسوب نمی‌شود. دلایل به وجود آمدن آن عاملی مانند پایین افتادگی شانه می‌باشد. رایج‌ترین روش ترمیم، آب‌بندی درز تعریض شده می‌باشد.

شکل ۳-۱۰: ترک عرضی پلکانی شده (عکس از نویسنده)

۳-٤-۵- خرابی وصله

خرابی وصله به قسمت‌های بزرگ‌تر از ۰/۱ مترمربع (۱۱ فوت‌مربع) یا تمام دال اصلی روسازی بتنی اشاره دارد که تعویض شده باشد و یا در آن مصالح اضافی پس از اجرای اصلی به کار رفته باشد. خرابی وصله می‌تواند به دلیل ترافیک، مصالح بی‌کیفیت یا ضعف در روش‌های اجرایی باشد. روش مناسب ترمیم این خرابی در فصل ١٦ بحث شده است. معمولاًاجرای مناسب و صحیح روسازی، در گام نخست نسبت به راه‌هایی که به صورت شتاب‌زده احداث و عجولانه ترمیم می‌شود، ارزان‌تر و آسان‌تر است.

۳-٤-٦- بیرون‌زدگی آب یا مکش

مکش، تراوش و خارج شدن آب از زیر روسازی است که از طریق ترک‌های موجود اتفاق می‌افتد. در برخی موارد این نوع خرابی به وسیله رسوب مصالح باقی‌مانده بر روی سطح روسازی خارج شده از لایه‌های زیرین، به صورت لکه مشاهده می‌شوند. مکش و بیرون‌زدگی آب می‌تواند از درزها، ترک‌ها و لبه روسازی رخ دهد. عکس ۳-۱۱ نمونه‌ای از پدیده مکش می‌باشد.

یودر و ویتزاک به خوبی درباره مکش بحث کرده‌اند. مکش فعال معمولاً بلافاصله پس از بارندگی به وضوح مشخص می‌شود. اولین‌بار مکش زمانی مورد توجه قرار گرفت که روسازی به طور مستقیم بر روی خاک رس خمیری قرار گرفته بود. خاک زیر بار ترافیک متراکم شده و فضای حفره مانندی را در زیر روسازی ایجاد می‌کند که محل مناسبی برای تجمع آب محسوب می‌شود. آب محبوس در فضای خالی بر اثر بار ترافیک عبوری و در مجاورت مصالح با مکش قابل توجه، نظیر خاک رس با خاصیت خمیری بالا به بیرون رانده می‌شود. این فرآیند ممکن به تدریج و به آرامی انجام گرفته و تا چند سال پس از ساخت مورد توجه قرار نگیرد. آب گل‌آلود خارج شده معمولاً لکه‌هایی بر روی سطح روسازی به وجود می‌آورد.

هوانگ شرایط انجام مکش را این گونه بیان می‌کند که: «مصالح زیر دال بتنی باید اشباع شده، بارهای متناوب و سنگین ترافیکی وجود داشته و مصالح زیر روسازی باید قابل فرسایش باشد. اگر بار چرخ‌ها سبک و سرعت عبور و مرور آهسته باشد ممکن است پدیده مکش با وجود مصالح مرطوب و قابل فرسایش، هیچگاه مشکل‌ساز نشود. در مقابل برای راه‌های اصلی و سایر روسازی‌های با حجم ترافیک بالا و سرعت زیاد، باید زهکش مناسب فراهم شده باشد. ممکن است که تثبیت خاک یا لایه زیراساس واقع در زیر دال ضرورت یابد».

شکل ۳-۱۱: مکش و رو زدگی آب (Miller & Bellinger, 2003: 58)

۳-٤-۷- سوراخ‌شدگی

سوراخ‌شدگی تنها در روسازی بتنی مسلح یکپارچه اتفاق می‌افتد و عبارتست از قطعات مستطیل شکلی از بتن که شکسته و لق شده و زیر سطح روسازی‌های مجاور فرو رفته‌اند. راهنمای خرابی عملکرد بلندمدت روسازی، سوراخ‌شدگی را به صورت قسمت محصور توسط دو ترک بسیار نزدیک (معمولاً کم‌تر از ۰/٦ متر) عرضی و یک ترک کوتاه طولی و لبه روسازی یا درز طولی، در نظر می‌گیرد. همچنین ترک‌های «Y» به صورت جداشدگی مصالح، خردشدگی یا پلکانی شدن است. به طور کلی سوراخ‌شدگی در لبه‌های روسازی اتفاق می‌افتد. شکل ۳-۱۲ خرابی سوراخ‌شدگی با شدت زیاد را نشان می‌دهد. سوراخ‌شدگی، اصلی‌ترین خرابی برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه محسوب می‌شود. این خرابی با از بین رفتن قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها در ترک‌های عرضی با فاصله کم آغاز می‌شود. سپس قسمتی از دال واقع بین دو درز، مانند یک تیر طرّه شروع به خم شدن می‌کند تا ترک‌های خستگی تشکیل شود. در اثر تکرار بارگذاری ترک‌ها از هم جدا می‌شوند، آرماتورها گسیخته شده و تکه‌های بتن در زیراساس و خاک بستر فرو می‌روند. روسازی بتنی مسلح یکپارچه به طور کلی سابقه عملکردی بسیار خوبی دارند، به شرط آن که از سوراخ‌شدگی آن جلوگیری به عمل آید. در مقابل در صورت بروز سوراخ‌شدگی

تعمیر کامل آن دشوار خواهد بود. تعمیر تمام عمق سوراخ‌شدگی در فصل ۱۷ بحث شده است. اگر آرماتورها به طرز مناسبی طراحی شوند، به طوری که ترک‌های عرضی بسیار کوچک با فواصل دور از هم تشکیل شد و امکان زوال قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها از بین برود، می‌توان امیدوار بود که از سوراخ‌شدگی جلوگیری به عمل خواهد آمد. خازانویچ و همکارانش دریافتند که میزان خرابی ناشی از سوراخ‌شدگی با افزایش درصد فولاد در بتن و زیراساس تثبیت شده با سیمان، برخلاف زیراساس تثبیت شده با قیر یا زیراساس سنگدانه‌ای، کاهش می‌یابد.

شکل ۳-۱۲: سوراخ‌شدگی با شدت زیاد (Miller & Bellinger, 2003: 79)

۳-٤-۸- خرابی درز عرضی اجرایی

خرابی درز عرضی اجرایی عبارتست از یک سری ترک‌های عرضی نزدیک به هم یا تعداد زیادی از ترک‌های مرتبط به هم که در نزدیکی درز عرضی اجرایی روسازی به وجود آمده‌اند. این خرابی، شکست و گسیختگی بتن یا فولاد در درز اجرایی روسازی بتنی مسلح یکپارچه می‌باشد. از جمله دلایل اصلی می‌توان به ضعف در یکپارچگی بتن، درصد ناکافی فولاد و اجرای ضعیف آرماتورها اشاره کرد.

۳-۵- مشخصات رویه

بیشترین توجه به وضعیت رویه روسازی از سوی کاربران راه انجام می‌شود. شرایط رویه در ابتدا به روسازی اجراء شده بستگی دارد که با گذشت زمان رو به زوال می‌رود. خرابی‌های مختلفی که در قسمت‌های قبل راجع بدان‌ها بحث شد اغلب موجب کاهش کیفیت سطح روسازی می‌شوند. همچنین بحث درباره نقش بافت‌های ریز[1] و بافت‌های درشت[2] در مشخصات رویه روسازی خالی از فایده نخواهد بود.

۳-۵-۱- هموارى

معمولاً، هموارى با عبارت خدمت‌دهی همراه است که همان قابلیت یک قطعه مشخص از روسازی برای خدمت‌دهی به ترافیک در شرایط موجود می‌باشد. مفهوم قابلیت خدمت‌دهی توسط کری[3] و اریک[4] در آزمایش جاده‌ای آشتو به وجود آمد. در ابتدا پنج سطح خدمت، صفر تا پنج (خیلی ضعیف تا خیلی خوب) برای تعیین میزان خدمت‌دهی در نظر گرفته شد. این کار به وسیله مجموعه‌ای از وسایل اندازه‌گیری مستقر در یک وسیله نقلیه، صورت پذیرفت. درجه‌بندی‌های انجام شده با اندازه‌گیری‌های عینی از وضعیت روسازی همبسته شدند که نتیجه آن، رابطه رگرسیون شاخص خدمت‌دهی کنونی است. در روسازی‌های صلب، رابطه رگرسیون، از تغییرات شیب (خلاصه آمار و ارقام برای ناهمواری مسیر چرخ) و مجموع ترک‌ها و وصله‌ها استفاده کرد. مشخص شد که تغییرات شیب متغیر اصلی می‌باشد.

بانک جهانی، شاخص ناهمواری جهانی را به عنوان معیار کمی برای اندازه‌گیری همواری تهیه کرد. به گفته هوانگ:

«شاخص ناهمواری جهانی (IRI) مشخصات پروفیل طولی سطح روسازی را در مسیر حرکت چرخ خلاصه می‌کند و اطلاعات رقوم ارتفاعی رویه را با توجه به نقشه‌های توپوگرافی و یا دستگاه مکانیکی پروفیل‌متر، محاسبه می‌کند. این شاخص شیب میانگین اصلاح شده که نسبتی از حرکت شناور تجمعی بر فاصله پیموده شده حاصل از مدل ریاضی ٤ خودرویی است که یک پروفیل اندازه‌گیری شده را با سرعت ۵۰ مایل در ساعت (۸۰ کیلومتر در ساعت) می‌پیماید. این شاخص با واحد اینچ بر مایل یا متر بر

1- Microtexture
2- Macrotexture
3- Carey
4- Irick

کیلومتر نشان داده می‌شود».
به عبارت دیگر، شاخص ناهمواری جهانی روشی برای اندازه‌گیری مستقیم ناهمواری جاده نیست، بلکه واکنش خودروها به آن، اندازه‌گیری می‌کند. روش‌های متداول اندازه‌گیری شاخص ناهمواری جهانی در (ASTM E1110 2001) ASTM E1170 مشخص شده است.
ادارات راه‌وترابری مختلف از چندین نوع دستگاه برای اندازه‌گیری میزان همواری جاده استفاده می‌کنند. دستگاه‌های ساده تا دستگاه‌های سرعت بالا، مجهز به پروفیل‌سنج‌های ثابت با حس‌گرهای لیزری برای ثبت داده‌های قابل اندازه‌گیری، از جمله این ابزارها می‌باشد. اندازه‌گیری میزان همواری، معمولاً بلافاصله بعد از اجرای روسازی صورت می‌گیرد تا مشخص شود که آیا جاده، شرایط لازم را احراز می‌کند و آیا پیمانکار باید جریمه شود یا این که مستحق پاداش است. اقتضای مدیریت مالی ایجاب می‌کند که کنترل وضعیت ناهمواری شبکه توسط دستگاه‌های پرسرعت انجام شود.
پروفیل‌سنج متشکل از یک تیر یا قاب صلب به همراه سامانه تکیه‌گاهی چرخ‌دار است و با استفاده از چرخ «پروفیل» که در وسط دستگاه تعبیه شده است، می‌تواند داده‌های مورد نیاز را برای تغییرات ارتفاعی در سطح اندازه‌گیری نماید. دو مدل اصلی مورد استفاده، پروفیل‌سنج‌های کالیفرنیا و راین‌هارت هستند. پروفیل‌سنج‌ها منحصراً برای کنترل کیفیت ساخت استفاده می‌شوند. با توجه به وزن سبک، می‌توان روز بعد از اجرای روسازی، پروفیل‌سنج را برای ارزیابی جاده استفاده کرد.
سامانه‌های اندازه‌گیری ناهمواری جاده از نوع واکنشی، پاسخ‌های دینامیکی دستگاه‌های مکانیکی را اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه‌های رایج شامل Mays ridemeter، BPR roughometer و PCA ridemeter می‌باشند، که اساساً برای ارزیابی جاده‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد.
سیستم‌های پروفیل‌سنج خودکار دستگاه‌هایی با سرعت بالا هستند که از حسگرهای غیرتماسی (اولتراسونیک، لیزر، اینفرارد یا نوری) برای اندازه‌گیری تغییرمکان نسبی بین قاب دستگاه و سطح جاده، استفاده می‌کنند. سیستم‌های پروفیل‌سنج خودکار، به علت دقت و سرعتی که دارند به طور گسترده جایگزین سیستم سنجش ناهمواری راه در شبکه ارزیابی براساس پاسخ شده‌اند. به طور معمول این وسیله نقلیه برای رانندگی در جاده‌هایی که رویه بتنی آن‌ها تازه است، خیلی سنگین می‌باشد. اخیراً پروفیل‌سنج‌های سبک‌وزنی رواج یافته‌اند که قادر هستند بر روی روسازی‌های بتنی که یک روز از عمرشان می‌گذرد با سرعت ۳۲ کیلومتر بر ساعت حرکت کنند.

شاخص پروفیل یا PI عمدتاً، برای کنترل کیفیت جاده‌های جدید استفاده می‌شود، در حالی که شاخص ناهمواری جهانی برای نظارت شبکه کاربرد دارد. مقدار شاخص پروفیل نتیجه انجام محاسبات رایانه‌ای یا تکنیک‌های موجود در دستورالعمل‌های اجرایی بر روی اطلاعات حاصل از پروفیل‌سنج در مورد سطح جاده می‌باشد. مقدار محاسبه شده حاصل جمع ارقام بالا و پایین مقادیر از پیش تعیین شده می‌باشد. رقم از پیش‌تعیین شده، blanking band نام‌گذاری شده است و به طور معمول برای پروفیل‌سنج کالیفرنیا به اندازه ۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود (هرچند تعدادی از ادارت راه این رقم را در نظر نمی‌گیرند). به علت دهنه محدود پروفیل‌سنج‌ها و طول موج‌های بالای ۱۵ متر در کیفیت رانندگی تأثیرگذار نیستند، در محدوده برداشت قرار نمی‌گیرد. به دلیل ارتباط ضعیف بین شاخص ناهمواری جهانی و شاخص پروفیل، برخی از ادارات راهسازی، شاخص ناهمواری جهانی را به عنوان آزمایش پذیرش روسازی، قبول دارند. پژوهش‌نامه تخصصی انجمن روسازی بتنی آمریکا ((ACPA 1990 a) TB-006. OC) مثالی از محاسبه شاخص پروفیل با استفاده از داده‌های ضبط شده یک پروفیل‌سنج را ارائه کرده است.

یکی از بهترین راه‌های ایجاد یک جاده بدون نقص و با طول عمر زیاد، اجرای آن به صورت سطح کاملاً هموار در همان ابتدای کار می‌باشد. در سال ۱۹۹۸ خازانویچ و همکارانش رابطه‌ای مستدل بین شاخص ناهمواری جهانی اولیه و شاخص ناهمواری جهانی در طول زمان پیدا کردند. کارکرد خوب یک تکیه‌گاه مناسب، مثلاً زیراساس تثبیت شده، ساخت یک روسازی هموار را راحت‌تر می‌کند. برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، یکی از علل مهم ایجاد ناهمواری، درزهای پلکانی است. کم اتفاق می‌افتد تا درزهای با میلگرد اتصال به قطر ۳۸ میلی‌متر پلکانی شوند. برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه، استفاده از فولاد با درصد بالا، شاخص ناهمواری جهانی را کاهش می‌دهد و از خرابی‌های موضعی جلوگیری می‌کند.

۳-۵-۲- مقاومت لغزشی

مقاومت لغزشی، عامل مهمی در ایمنی جاده محسوب می‌شود. مقاومت لغزشی لازمه یک روسازی بتنی است. چرا که به ماشین‌ها اجازه می‌دهد تا به صورت ایمن توقف کرده و از تصادفات احتمالی در آب‌وهوای بارانی و زمین خیس جلوگیری کند. مقاومت لغزشی به بافت ایجاد شده در زمان ساخت روسازی و نیز به اصطکاک لاستیک اتومبیل‌ها بستگی دارد. دو ویژگی تولید صدا و اصطکاک تحت تأثیر بافت رویه روسازی قرار دارد. این دو

مشخصه باید همزمان مورد توجه قرار گیرند. بدون شک، جهت کاهش تلفات سالیانه (۴۳۰۰۰ نفر کشته و ۳ میلیون نفر زخمی) در تصادفات بزرگراهی و متعاقب آن به حداقل رساندن تأخیر ناشی از همین تصادفات در سفرهای انجام شده، دو پارامتر مهم بافت و اصطکاک باید مورد بحث و بررسی قرار بگیرد. تخمین زده شده است که وضعیت نامناسب جاده‌ها عامل مرگ ۱۳۰۰۰ نفر در سال می‌باشد. درصد کم اما قابل تأمل از وضعیت نامناسب جاده‌ها، به بافت رویه و پارامترهای اصطکاکی مربوط است.

یک مسئله مهم که در سال ۲۰۰۵ توسط لارسن و همکارانش[1] مطرح شد، بحث مقدار دوام سطح جاده (قابلیت حفظ پارامترهای اصطکاکی مطلوب با گذشت زمان) می‌باشد. اگر سطح جاده صیقلی شود و مقاومت لغزشی خود را از دست بدهد، با تراشیدن رویه توسط تیغه‌های الماسی به حالت اول بازگردانده می‌شود که این مسئله در فصل ۱۷ توضیح داده شده است.

در صورت لزوم، برای بدست آوردن خصوصیات همواری در جاده‌های بتنی تازه می‌توان نقاط پست و بلند را توسط تیغه‌های الماسی صاف کرد. با توجه به این که فقط نقاط بلند هموار می‌شوند، بنابراین سطح جاده ترکیبی از سطح تراشیده شده و سطح معمولی خواهد بود. تراشیدن موضعی برای از بین بردن دست‌اندازها نه تنها موجب غیریکنواختی در ظاهر رویه شده بلکه باعث ایجاد ضرایب مختلف اصطکاک در سطح جاده می‌شود.

براساس نظر کوهن و تیابجی[2] دو وظیفه عمده به عهده بافت سطحی جاده است. اولین وظیفه آماده کردن جاده برای فراری دادن آب‌های سطحی از زیر لاستیک‌های هواپیما و دیگر وسایل نقلیه می‌باشد. دومین وظیفه مهیا کردن سطح تیز و غیرلغزنده برای تایرها، در زمانیست که عمل ترمز گرفتن بعد از بارندگی (پراکنده کردن حجم زیاد آب‌های سطحی) و وجود لایه نازکی از آب بر روی سطح جاده، انجام می‌شود. هوانگ فاکتورهای اثرگذار ناشی از لغزش بر روی تصادفات را دسته‌بندی کرد. صیقلی بودن رویه و جمع‌شدگی آب بر سطح جاده به دلیل نامناسب بودن شیب عرضی زهکش، از جمله موارد این دسته‌بندی می‌باشد.

مقاومت لغزشی با مقدار عددی SK یا SN تعریف می‌شود که مخفف عدد لغزش است. ضرایب اصطکاک لغزشی از مقایسه ۱۰۰ اصطکاک اندازه گرفته شده با استفاده از تریلر چرخ قفل شونده با وزن و نیروی مشخص و تایرهای استاندارد بر روی جاده‌های خیس، بدست می‌آید. دستگاه‌هایی که برای اندازه‌گیری عدد لغزش استفاده می‌شوند، عبارت از

1- Larson et al
2- Kohn & Tayabji

تریلر با چرخ قفل شونده، تریلر منحرف شده از مسیر حرکت و دستگاه پاندول انگلیسی می‌باشد. در این میان تریلر با چرخ قفل شونده مرسوم‌ترین دستگاه مورد استفاده است.
نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که با اصلاح و بهبود اصطکاک بافت سطحی جاده، می‌توان از حدود ۷۰ درصد تصادفات به وقوع پیوسته در شرایط جوی خیس و مرطوب، پیشگیری کرد. با توجه به این که ١٤ درصد از کل تصادفات منجر به فوت، مربوط به شرایط آب‌وهوایی خیس و مرطوب است، این عامل بالقوه در کاهش ۱۰ درصدی میزان فوتی‌ها و مجروحان شدید، موثر بوده‌است و می‌تواند به طور چشمگیری تأخیر سفرها را کاهش دهد. با این حال بهتر است بدانیم که ۸۰ تا ٨٦ درصد از کل تصادفات منجر به فوت در جاده‌های خشک اتفاق می‌افتد. در گذشته بیشترین توجه بر روی تصادفات و اصطکاک در آب‌وهوای خیس بود و برای جاده‌های خشک میزان اصطکاک، کافی فرض می‌شد. فراهم ساختن جاده‌های ایمن‌تر به منظور کاهش تصادفات، تنها با توجه به افزایش بافت و اصطکاک در هر دو مسیر خشک و خیس حاصل می‌شود.
آزمایش تریلر با چرخ قفل شونده براساس (ASTM E274 2006) ASTM E274، در سرعت ٦٤ کیلومتر بر ساعت و با به کار بردن آب در جلوی چرخ، انجام می‌شود. سپس چرخ‌های تریلر قفل شده و شدت نیروی اصطکاک به وجود آمده توسط تریلر، اندازه‌گیری می‌شود. با افزایش سرعت وسیله نقلیه، میزان SN کاهش پیدا می‌کند.
کارامیهاس و کیبل[1] خاطر نشان کرده‌اند که ASTM E724 ممکن است با دو نوع تایر استاندارد آزمایشی آجدار یا بدون آج (صاف) انجام شود. این دو نوع تایر ممکن است مقاومت لغزشی جاده‌ها را به طور متفاوتی رتبه‌بندی کنند. زیرا تایرهای آجدار مجراهایی (شیارهای لاستیک) را برای پراکنده کردن آب فراهم می‌کنند. بنابراین استفاده از تایرهای آجدار در جاده‌هایی که شرایط زهکشی سطحی خوبی دارند، ممکن است بی‌فایده باشد.
با کشیدن ابزارها و مواد بر روی بتن تازه در زمان ساخت، بافت سطحی بدست می‌آید. این فرآیند، بتن را قبل از این‌که سفت و سخت شود، زبر یا شیاردار می‌کند. فاصله و پهنای این شیارها در سطح جاده، بر روی اصطکاک رویه، مقاومت لغزشی سطح جاده و صدای تولید شده لاستیک و جاده، تأثیر می‌گذارد. هدف بافت سطحی، کاهش تصادفات در آب‌وهوای مرطوب و خیس است که ناشی از لغزش و هیدروپلانینگ می‌باشد.
انواع سطوحی که در حین ساخت ایجاد می‌شوند، درگ و تاینینگ نام دارد. بافت سطحی درگ با جاروب کردن یا گونی‌کشی بر روی سطح بتن تازه بدست می‌آید. سطوح تاینینگ توسط شن‌کش آهنی به وجود می‌آید که به شکل طولی یا عرضی است. بافت سطحی

1- Karamihas & Cable

روسازی بتنی در فصل ۱۵ مورد بحث قرار داده می‌شود.
شن و ماسه بدون پوشش بیشتر در اروپا استفاده می‌شود به طوری که از یک ملات دیرگیر در سطح بتن جدید استفاده شده و سپس برای آشکار کردن لایه بادوام سنگدانه‌ای، ملات سطحی شستشو می‌شود. بهتر این روش برای زیباسازی معابر شهری استفاده شود.
بر روی بتن سخت شده نیز ممکن است عملیات اصلاح بافت انجام شود. این کار معمولاً برای اصلاح روسازی جدیدالاحداث که شرایط بهره‌برداری را احراز نکرده و یا روسازی موجود با مشخصات نامناسب رویه انجام می‌شود. رویه ممکن است با الماسه دنده‌دار و یا با ساچمه فولادی ساب زده شود. این تکنیک‌ها در فصل ۱۷ مورد بحث قرار می‌گیرند.

۳-۵-۳- سروصدا

تماس بین بافت سطحی رویه و لاستیک وسایل نقلیه، هم در فضای داخلی و هم در خارج وسیله نقلیه سبب تولید صدا می‌شود. اگر شدت صدای ایجاد شده فراتر از حد تحمل باشد، موجب نارضایتی رانندگان و ساکنین حاشیه بزرگراه خواهد شد. امروزه صدای ناشی از عبور وسیله نقلیه، به مسئله‌ای مهم در مهندسی روسازی بتنی تبدیل شده است. در تعریفی که از هانسون و والر[1] در مورد سروصدا آمده است می‌خوانیم: «سروصدا، تولید صداهایی است که مطلوب ما نمی‌باشد».
دو مطالعه مهم در زمینه بافت سطح روسازی و سروصدا انجام گرفته است. مطالعه نخست، گزارش NCHRP268 در سال ۱۹۹۸ توسط ویسون[2] و دومین مورد، مطالعه جامع در سال ۲۰۰۰ بر روی چندین راه توسط کومل و همکارانش[3] می‌باشد.
مقاله‌های فنی را در این زمینه می‌توان در وب‌سایت انجمن بین‌المللی شیارزنی و تراش، به آدرس http://www.ogga.net/down1ods/noise.html یافت.
NCHRP268 در مورد روسازی بتنی به نتایج زیر دست یافت:
دندانه‌های عرضی بیشترین حجم سروصدا را در خطوط کنار جاده تولید می‌کنند که ممکن است سبب آزردگی شود. با ایجاد فواصل تصادفی و تغییر عرض دندانه‌ها می‌توان به کاهش سروصدای تولید شده کمک کرد. عمق دندانه‌های عرضی نیز نقش مهمی در میزان صدای تولیدی دارند. همچنین:

- روسازی بتن سیمانی نسبت به روسازی آسفالتی سروصدای بیشتری تولید

1- Hanson and Waller
2- Wayson
3- Kuemmel et al

می‌کند.

- تحقیقات نشان می‌دهد میزان تولید صدا با تغییر سرعت تغییر می‌کند. روسازی مناسب از لحاظ تولید صدا ممکن است در سرعت‌های مختلف عملکردهای متفاوتی داشته باشد. علاوه بر آن، حتی کم سروصداترین سطح روسازی، عملکرد متفاوتی در تردد خودروها نسبت به کامیون‌ها از خود نشان داد.
- فارغ از نوع بافت سطحی روسازی، اجرای با کیفیت بالا موضوع مهمی در میزان تولید صدا است.
- مشخص شد که عمق دندانه‌های عرضی نیز نقش اساسی در میزان سروصدای ایجاد شده ایفاء می‌کند.
- همچنین استفاده از روسازی بتنی متخلخل سبب کاهش سروصدا در راه‌ها می‌شود. این سطح می‌تواند علاوه بر این که باعث کاهش سروصدا شود، روسازی بادوام‌تری را نسبت به روسازی آسفالتی به وجود آورد.

ویسون[1] نتیجه‌گیری کرد که روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی بادوام‌تر هستند و مقاومت لغزشی بیشتری دارند، در مقابل سروصدای بیشتری نیز تولید می‌کنند. در سال ۲۰۰۰ کومل و همکارانش مطالعه گسترده‌ای در ۵۷ سایت آزمایش، در شش ایالت مختلف آمریکا انجام دادند. نتایج این مطالعه عبارتند از:

- عمق دندانه‌ها در روسازی‌های ساخته شده حتی در یک قطعه مورد آزمایش نیز، نسبت به هم اختلاف زیادی دارند. در اکثر موارد هم، عمق مورد انتظار شرکت‌های راهسازی، برآورده نمی‌شود.
- روسازی با دندانه‌های یکنواخت، فرکانس‌های گسسته‌ای از خود نشان می‌دهند و نباید مورد استفاده قرار گیرند.
- در همه روسازی‌های با دندانه‌های عرضی، آن‌هایی که دندانه‌های عمیق‌تر و گسترده‌تر داشتند، اغلب سروصدای بیشتری ایجاد می‌کردند.
- روسازی‌های آسفالتی و روسازی‌های بتنی با دندانه‌های طولی، کم‌ترین سروصدای خارجی را تولید می‌کنند و در عین حال بافت کافی و مناسبی را نیز در اختیار قرار می‌دهند. تاکنون عملکرد دندانه‌های (شیارشدگی) طولی در آب‌وهوای مرطوب، در هیچ یک از گزارش‌های تصادفات ارائه نشده است.
- یک روسازی آسفالتی، با دندانه‌های طولی و یک روسازی بتنی با دندانه‌های اریب، کم‌ترین سروصدای داخلی را تولید می‌کنند.

1- Wayson

- دندانه‌های تصادفی عرضی، فرکانس‌های گسسته را به سادگی کاهش می‌دهند، با این حال همچنان مقداری فرکانس گسسته باقی می‌ماند که در صورت طرح و اجرای صحیح تخفیف یافته ولی به طور کلی از بین نخواهد رفت.
- روسازی‌های خراشیده شده توسط تیغه‌های الماسی هیچ سروصدایی با فرکانس گسسته تولید نکرده و سطح صدای خارجی را نیز تا ۳ دسی‌بل کاهش می‌دهند.

این محققین با ایجاد دندانه‌های یکنواخت در انواع روسازی‌های بتنی، روش‌های کاهش صدا را مستندسازی کردند. آن‌ها همچنین بهبود کیفیت سطح درشت بافت رویه و انجام مطالعات لازم برای مستندسازی و عملکرد مناسب در آب‌وهوای مرطوب را توصیه کردند.

اگر مهم‌ترین مسئله مورد نظر، کاهش سروصدا باشد، دندانه‌های طولی با فاصله ۱۹ میلی‌متر (۳/٤ اینچ) باعث کاهش و در عین حال ایمنی کافی می‌شود. از روش‌های دیگر ترمیم روسازی می‌توان به دندانه‌های اریب به صورت ٦:۱ مایل، یا دندانه‌های عرضی تصادفی و یا شیاردار کردن روسازی توسط الماسه اشاره کرد.

کارامیهاس و کیبل بیان می‌کنند که هیچگاه نباید به قیمت از دست رفتن ایمنی، روسازی بی‌صدا اجراء شود. چالش پیش رو، اجرای روسازی بی‌صدا با زهکشی کافی و بدون هیچ‌گونه اثر کاهنده در اصطکاکَ می‌باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که دندانه‌های عرضی معمولاً باعث ایجاد سروصدای بیشتری نسبت به بافت‌های سطحی تصادفی می‌شوند. دندانه‌های عرضی با فواصل مساوی سروصدای زیادی تولید می‌کنند. نبود استانداردهای اندازه‌گیری صدای روسازی همچنان یک نقص محسوب می‌شود.

هانسون و والر گزارش می‌دهند که در میان روسازی‌های بتنی، روسازی‌های زبر شده توسط تیغه‌های الماسی کم‌صداترین نوع می‌باشند و روسازی با دندانه‌های طولی، شیارهای طولی و دندانه‌های عرضی، در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. این مطلب براساس آزمایش‌های انجام شده در ۳۰۰ قطعه مختلف در سراسر آمریکا بدست آمده است. اگرچه روسازی‌های زبر شده توسط تیغه‌های الماسی کم‌ترین صدا را تولید می‌کنند ولی بیشترین تفاوت در نوسان صدای تولید شده را به خود اختصاص می‌دهند. شاید دلیل این موضوع این باشد که تیغه‌های الماسی بر نقاط کم‌ارتفاع روسازی اثر ندارد. در مینسوتا، با استفاده از جاروب‌های ویژه چمن بر روی سطح بتن تازه توانستند میزان صدای تولیدی را به اندازه صدای ناشی از روسازی آسفالتی کاهش دهند. با وجود اذعان تمامی منابع فوق به این که روسازی بتنی دوام و مقاومت لغزشی بهتری نسبت به روسازی آسفالتی دارد ولی صدای ایجاد شده در آن، چالشی است که صنعت تولید روسازی بتنی همچنان با آن

دست به گریبان است. در حالی که تقریباً تمامی رانندگان و مسافرین فقط به تفاوت صدای تولید شده در روسازی دقت می‌کنند، در کنار این موضوع توجه برخی نیز به میزان مقاومت لغزشی روسازی‌های مختلف معطوف می‌شود. به‌علاوه رانندگانی که میزان مقاومت لغزشی را ناکافی می‌بینند، برای تصدیق این مسئله در دسترس نخواهند بود. بنابراین برای بررسی روش‌های کاهش سروصدا در روسازی بتنی نیاز به تحقیقات بیشتری می‌باشد.

فصل چهارم

بستر، زیراساس و زهکش

عملکرد روسازی مخصوصاً با توجه به پایداری، توان باربری، تحکیم در طول زمان و قرار گرفتن در معرض رطوبت، شدیداً تحت تأثیر خاک زیر آن قرار دارد. اغلب بین بستر زمین و لایه رویه یک یا چند لایه قرار می‌گیرد.

در روسازی انعطاف پذیر (آسفالتی)، لایه‌ای که مستقیماً زیر لایه آسفالت قرار می‌گیرد، اساس نامیده می‌شود و بین اساس و بستر زمین، لایه زیراساس قرار می‌گیرد. مصالح اساس، نسبت به مصالح زیراساس مشخصات کیفی بالاتری دارند. از آنجایی که مصالحی با مشخصات زیراساس در زیر رویه بتنی قرار می‌گیرد، آن را در این نوع روسازی زیراساس می‌خوانند. این اصطلاح در سال ۱۹۹۳ توسط راهنمای طرح روسازی آشتو استفاده شد.

روسازی بتنی نسبت به روسازی آسفالتی توزیع تنش بیشتری انجام می‌دهد و در آن تنش روی زیراساس و بستر کم می‌باشد. در نتیجه برای لایه‌های زیرین نیازی به استفاده از مصالح با توان باربری خیلی زیاد نمی‌باشد.

به هر حال در ادبیات، هر دو اصطلاح اساس و زیراساس برای توضیح لایه زیرین روسازی بتنی استفاده می‌شوند. به ندرت در راه‌های اصلی روسازی بتنی هر دو لایه اساس و زیراساس را دارد. در مقابل، با توجه به این که روسازی فرودگاه باید بدنه عظیم‌الجثه هواپیماها را تحمل کند، اغلب هر دو لایه اساس و زیراساس در آن اجراء می‌شود.

این لایه‌ها ممکن است به وسیله سیمان پرتلند یا آسفالت، تثبیت‌شده یا نشده باشند. همچنین ممکن است با دانه‌بندی فشرده و نسبتاً نفوذ ناپذیر باشند و یا از دانه‌بندی باز

استفاده شود که امکان زهکشی را فراهم می‌کند. نشریه PCA/ACPA با عنوان زیراساس و اساس برای روسازی بتنی (PCA/APCA, ۱۹۹۱)، درباره انتخاب و اجرای این دو لایه صحبت کرده است. نشریه دیگری که درباره این دو لایه، به ویژه فرودگاه‌ها بحث می‌کند، راهنمای طرح و اجرای اساس تثبیت شده و زهکش می‌باشد.

توجه دقیق به طرح و ساخت لایه‌های بستر و زیراساس به منظور تأمین ظرفیت سازه‌ای و کیفیت رانندگی در انواع روسازی ضروری است. برای روسازی بتنی، شرایط لازم ممکن است بسته به نوع خاک بستر به طور قابل ملاحظه‌ای، شرایط محیطی و میزان سنگینی بار ترافیک تغییر کند. در هر حال، هدف فراهم آوردن تکیه‌گاهی یکنواخت برای لایه بتنی است تا بر روی آن اجراء شود.

به عنوان مثال، محوطه پارکینگ که فقط بار ترافیکی سبک را تحمل می‌کند، عمدتاً به طور مستقیم بر روی بستر متراکم ساخته می‌شود. در این حالت، زیراساس تنها زمانی که بستر خاک نامناسب است مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای خیابان‌ها و جاده‌های محلی، معمولاً زیراساس استفاده نمی‌شود، اما برای جلوگیری از مکش در خیابان‌های جمع کننده، شریانی و جاده‌های محلی کاربرد دارد. آشتو برای راه‌های اصلی استفاده از لایه زیراساس را توصیه می‌کند، مگر این که خاک بستر، هم‌کیفیت با مصالح زیراساس و یا ترافیک محور کم‌تر از یک میلیون محور هم‌ارز در سال باشد. بار معادل محور ۸۰ کیلونیوتنی (۸/۲ تنی) در فصل ۸ بررسی شده است.

ضوابط طراحی فرودگاه‌ها به استثناء برخی از انواع خاص خاک بستر، زهکشی و ترکیبات در معرض یخبندان، مشابه هم بوده و ممکن است برای روسازی با کاربری عمومی، نیازی به زیراساس نباشد. سازمان هوانوردی فدرال برای فرودگاه با ترافیک سنگین‌تر استفاده از یک لایه زیراساس تثبیت شده مانند اساس را در زیر رویه بتنی لازم می‌داند.

٤-١- لایه بستر

لایه بستر همان مصالح موجود در محل اجرای راه می‌باشد و مهندس عموماً باید از همین مصالح در لایه بستر متراکم شده استفاده نماید. در صورت لزوم خاک بستر باید با مصالح مرغوب‌تر جایگزین و یا تثبیت شود، اما این امر سبب افزایش هزینه‌های ساخت می‌شود. سیستم‌های رایج طبقه‌بندی خاک عبارت از ASTM، سامانه طبقه‌بندی متحد خاک و سامانه طبقه‌بندی آشتو است. سامانه آشتو برای راه‌های اصلی در آمریکا و سامانه ASTM/USCS برای سایر روسازی‌ها استفاده می‌شود. خاک‌ها براساس درصد سنگدانه‌های درشت (شن و ماسه) و درصد سنگدانه‌های ریز (سیلیت و خاک رس) و

نیز خواص خمیری خود طبقه‌بندی می‌شوند. طبقه‌بندی خاک در بسیاری از کتاب‌های استاندارد مهندسی ژئوتکنیک یا مهندسی روسازی مانند گاربر و هُول[1] توضیح داده شده است.

برای مهندسین طراح روسازی‌های بتنی، پارامترهای مهم شامل کیفیت تکیه‌گاه رویه بتنی، واکنش در برابر رطوبت و واکنش در برابر یخزدگی می‌باشد. کیفیت تکیه‌گاه با ضریب واکنش لایه بستر k، مشخص شده است که واحد آن MPa/m یا psi/inch می‌باشد. این ضریب معادل ثابت فنر فرضی یا مایع متراکمی است که مانند تکیه‌گاه رویه بتنی عمل می‌کند. واکنش بستر به صورت خطی است و با تغییر شکل دال افزایش می‌یابد. این مقدار در عمل با استفاده از آزمایش باربری صفحه، پیش‌بینی طبقه‌بندی خاک بستر و یا نسبت باربری کالیفرنیا بدست می‌آید.

یک جدول مرسوم برای پیش‌بینی مقدار k به وسیله انجمن سیمان پرتلند در ۱۹٦٦ تهیه شد. این جدول به وسیله مدل PCA ۱۹۸٤ استفاده می‌شد و به وسیله گاربر و هُول و هوانگ توسعه یافت. این جدول روابط تقریبی تعیین k را براساس طبقه‌بندی خاک طبق ASTM/USCS، طبقه‌بندی آشتو، طبقه‌بندی سازمان هواپیمایی فدرال، ارزش مقاومت (R)، ارزش باربری و نسبت باربری کالیفرنیا ارائه می‌دهد.

هال و همکارانش[2] برای تکمیل فرآیند طرح آشتو ۱۹۹۸ تجدید نظری در جدول ارزش k ارائه دادند. مقدار k برای انواع مختلف خاک در جدول ٤-۱ نشان داده شده است. همچنین راهنمای آشتو ۱۹۹۸ روندی برای ارتباط بین ارزش k با نسبت باربری کالیفرنیا و اطلاعات بدست آمده از نفوذسنج مخروطی متحرک تهیه کرده است. جداول مربوطه برای خاک‌های ریزدانه براساس درصد رطوبت تهیه شده‌اند. بین مقادیر حداقل ارائه شده در جدول ٤-۱ در ۱۰۰ درصد اشباع و مقادیر حداکثر در ۵۰ درصد اشباع، رابطه خطی وجود دارد. فرآیندهایی نیز برای یافتن k از طریق یک محاسبه بازگشتی با استفاده از نتایج آزمایش خیزسنج وزنه‌ای تهیه شده است.

در عمل، ضخامت طرح برای رویه بتنی چندان متأثر از مقدار k نمی‌باشد. قابلیت رطوبت‌پذیری خاک تأثیر بیشتری بر عملکرد روسازی دارد. همچنین پدیده یخبندان ممکن بسیار مخرب باشد.

برای روسازی راه اصلی با ترافیک سنگین یا باند پرواز فرودگاه‌ها، مصالح نامرغوب بستر باید تعویض شود. مصالح نامرغوب بستر عبارت از خاک پیت، لای آلی، سیلت و خاک

1- Garber & Hoel
2- Hall et al

با درصد بالای مواد آلی هستند.

لایه بستر ممکن به منظور بهبود مقاومت کم خاک، افت پتانسیل بر اثر تورم ناشی از رطوبت یا بهبود شرایط ساخت، نیازمند تثبیت باشد. اگر زمان‌بندی اجرای پروژه محدود باشد، تثبیت بستر می‌تواند ریسک تأخیر ناشی از شرایط آب‌وهوایی پربارش را کاهش دهد. لایه بستر ممکن است با آهک یا سیمان تثبیت شود. تثبیت آهکی برای خاک رسی با درصد رطوبت بالا مناسب است. تثبیت سیمانی برای خاک‌های درشت‌دانه یا خاک‌های با درصد زیاد لای (سیلت) استفاده می‌شود. جزئیات تثبیت آهکی و سیمانی به وسیله کهن و تایابجی[1] بررسی شده‌اند.

جدول ٤-١: مقدار k پیشنهادی برای انواع مختلف خاک

(برگرفته از هال و همکارانش. AASHTO, 1998:6, 1997:80)

طبقه‌بندی AASHTO	توضیحات	طبقه‌بندی ASTM/USCS	چگالی خشک Kg/m^3	CBR (درصد)	k-value MPa/m
		خاک‌های درشت‌دانه			
A-1-a خوب دانه‌بندی شده	شن	GW, GP	۲۰۰۰–۲۲٤۰	٦۰–۸۰	۸۱–۱۲۲
A-1-a بد دانه‌بندی شده			۱۹۲۰–۲۰۸۰	۳٥–٦۰	۸۱–۱۰۸
A-1-b	ماسه درشت	SW	۱۷٦۰–۲۰۸۰	۲۰–٤۰	٥٤–۱۰۸
A-3	ماسه نرم	SP	۱٦۸۰–۱۹۲۰	۱٥–۲٥	٤۱–۸۱

1- Kohn & Tayabji

جدول ٤-١: ادامه

k-value *MPa/m*	CBR (درصد)	چگالی خشک *Kg/m³*	طبقه‌بندی ASTM/USCS	توضیحات	طبقه‌بندی AASHTO
			خاک‌های A-2 (مصالح دانه‌ای با ریزدانه بالا)		
۸۱-۱۳٦	٤۰-۸۰	۲۰۸۰-۲۳۲۰	GM	شن سیلت‌دار	شنی، A-2-4
				شن به همراه سیلت و ماسه	شنی، A-2-5
۸۱-۱۰۸	۲۰-٤۰	۱۹۲۰-۲۱٦۰	SM	ماسه سیلتی	ماسه‌ای، A-2-4
				ماسه به همراه شن و سیلت	ماسه‌ای، A-2-5
٥٤-۱۲۲	۲۰-٤۰	۱۹۲۰-۲۲٤۰	GC	شن رس‌دار	شنی، A-2-6
				شن به همراه رس و ماسه	شنی، A-2-7
٤۱-۹٥	۱۰-۲۰	۱٦۸۰-۲۰۸۰	SC	ماسه سیلتی	ماسه‌ای، A-2-6
				ماسه به همراه شن و رس	ماسه‌ای، A-2-7
					*خاک‌های ریزدانه
۷-٤٥	٤-۸	۱٤٤۰-۱٦۸۰	ML, OL	سیلت	A- 4
۱۱-٦۰	٥-۱٥	۱٦۰۰-۲۰۰۰		مخلوط سیلت/ ماسه/ شن	
۷-٥۱	٤-۸	۱۲۸۰-۱٦۰۰	MH	سیلت با دانه‌بندی ضعیف	A-5
۷-٦۹	٥-۱٥	۱٦۰۰-۲۰۰۰	CL	رس پلاستیک	A-6
۷-٥۸	٤-۱٥	۱٤٤۰-۲۰۰۰	CL, OL	رس با حالت الاستو پلاستیک متوسط	A-7-5
۱۱-٦۰	۳-٥	۱۲۸۰-۱۷٦۰	CH, OH	رس با حالت الاستو پلاستیک بالا	A-7-6

* ارزش k در خاک ریزدانه به شدت به درجه اشباع وابسته است.

٤-۱-۱- خاک بستر متورم شونده

تفاوت زیاد در برآمدگی و تورم خاک‌ها باعث غیریکنواخت شدن تکیه‌گاه زیراساس می‌شود. در نتیجه روسازی بتنی ممکن است به اندازه‌ای کج شود که عملاً کیفیت رانندگی از بین برود. شرایط مختلفی می‌تواند سبب تخریب و تاب برداشتن روسازی بتنی شود:
۱- اگر خاک‌های متورم شونده در حالت خشک متراکم شوند یا قبل از اجرای دال بتنی

به آن‌ها اجازه خشک شدن داده شود، ممکن است بر اثر انبساط سبب بالا رفتن درزها و از بین رفتن تحدب شود.
۲- وقتی روسازی بتنی بر روی خاک‌های متورم شونده با درصد رطوبت‌های متفاوت اجراء می‌شود، افت و تورم بعدی ممکن است باعث دست‌اندازها، گودی و ایجاد موج در روسازی شود.
۳- موج‌های یکسان ممکن است در جایی که قابلیت تغییرات ناگهانی در تغییر حجم خاک‌های زیراساس وجود دارد، اتفاق بیفتند.
بدیهی است قبل از اجرای راه شناخت خاک‌های با پتانسیل تورم مهم است. طبق یک قاعده کلی، انتظار می‌رود خاک‌های با درصد کلوئید بالا (درصد سنگدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ میلی‌متر یا ۰/۰۰۰٤ اینچ)، خواص خمیری بالا و حد انقباض پایین، بیشترین پتانسیل تورم را داشته باشند. این خاک‌ها براساس طبقه‌بندی ASTM عموماً عبارت از CH، MH و OH یا A-6 یا A-7 هستند. در روش طبقه‌بندی آشتو روسازی بتنی اغلب می‌تواند رس‌های با درجه تورم پایین یا متوسط را تحمل کند. مقدار دقیق تورم به آب‌وهوا، شرایط بارگذاری لایه‌های بالای بستر، رطوبت و شرایط چگالی در زمان اجرای روسازی بستگی دارد. بنابراین دقت در اجراء برای کنترل خاک‌های متورم شونده مهم است. ملاحظات اجرایی در فصل ۱۳ توضیح داده می‌شود.

٤-۱-۲- خاک بستر آسیب‌پذیر در برابر یخبندان

برای طراحی روسازی، عمل یخ‌زدگی را می‌توان به وسیله اثرات تورم ناشی از یخبندان و نرمی خاک بستر بر اثر ذوب شدن یخ در بهار ارزیابی کرد. ملاحظات طراحی که برای کنترل تورم ناشی از یخبندان در نظر گرفته می‌شود، الزاماً با ملاحظات مربوط به کنترل نرمی خاک بستر یکسان نمی‌باشد. نرمی خاک بستر معمولاً برای روسازی آسفالتی خیلی مخرب است ولی برای روسازی بتنی تخفیف پیدا می‌کند. زیرا در بهار که بستر بر اثر ذوب یخ نرم می‌شود، روسازی بتنی همانند پلی بر روی آن عمل می‌کند. مصالح مصرفی برگرفته از PCA\ACPA، زیراساسی و بستری برای روسازی‌های بتنی می‌باشد.
تورم ناشی از یخ‌زدگی به دلیل رشد کریستال‌های یخ در خاک اتفاق می‌افتد. آب براساس خاصیت مویینگی به سمت کریستال‌های یخی که قبلاً تشکیل شده‌اند حرکت کرده و با یخ‌زدن، کریستال‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. شرایط لازم برای پدیده یخبندان عبارت از خاک حساس در برابر یخبندان، دمای زیر صفر در عمق بستر و سفره آب زیرزمینی در عمق کم‌تر از ۳ متر (۱۰ فوت) از سطح زمین می‌باشد. تمام سه عامل فوق

باید همزمان وجود داشته باشد تا پدیده یخبندان اتفاق بیفتد.
خاک‌های حساس در برابر یخبندان معمولاً به صورت خاک‌هایی که بیش از ۳ درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر (۰/۰۰۰۸ اینچ) دارند، تعریف می‌شود. خاک‌های ریزدانه با حالت خمیری پایین و درصد سلیت بالا (۰/۰۰۰۲- ۰/۰۰۲ اینچ، ۰/۰۰۵- ۰/۰۵ میلی‌متر) دارای قابلیت یخ‌زدگی می‌باشند. اندازه منفذهای خاک باید آن قدر کوچک باشد که خاصیت موئینگی را ایجاد کند، در عین حال باید آن قدر بزرگ باشد که آب بتواند در آن‌ها جریان یابد و کریستال‌های یخ را تشکیل بدهد. سیلت‌های با خاصیت خمیری پایین، بیشترین حساسیت را در برابر یخبندان دارند و پس از آن به ترتیب خاک نباتی و ماسه بسیار ریز، ماسه نباتی، خاک رس نباتی و خاک‌های رسی قرار دارند.
روش طراحی سازمان هواپیمایی فدرال جزئیات طراحی روسازی در یخبندان را در فصل‌های ۲ و ۳ از نشریه طراحی روسازی (AC)150/6320-6D توضیح داده است. این موضوع در فصل ۱۰ این کتاب بیشتر توضیح داده خواهد شد. روش‌های مقابله با پدیده یخبندان در فصل ۱۳ توضیح داده شده است.
علاوه بر اثر چشمگیر رطوبت در مقدار k خاک‌های ریزدانه، خود رطوبت خاک منجر به مکش و شکل‌گیری کریستال‌های یخ می‌شود. احتمال وقوع این خطرات را می‌توان با اجرای زیراساس کاهش داد.

٤-۲- زیراساس و اساس

راهنمای طرح روسازی آشتو زیراساس را یک لایه متراکم یا متشکل از مصالح سنگدانه‌ای یا تثبیت‌شده بین بستر و رویه بتنی تعریف می‌کند. این راهنما دلایل استفاده از زیراساس را به این صورت بیان می‌کند:

- فراهم کردن یک تکیه‌گاه دائمی، پایدار و یکنواخت؛
- افزایش مدول عکس‌العمل بستر k؛
- به حداقل رساندن اثرات تخریبی پدیده یخ‌زدگی؛
- جلوگیری از مکش خاک‌های ریزدانه در محل درزها، ترک‌ها و لبه دال‌های صلب؛ و
- فراهم کردن یک سطح کار برای تجهیزات اجرای روسازی.

همان طور که قبلاً براساس راهنمای طراحی بیان شد، در حالت‌هایی که ترافیک نسبتاً سبک (کم‌تر از یک میلیون محور هم‌ارز در سال) و کیفیت خاک بستر جاده برابر با کیفیت زیراساس است، به این لایه نیازی نخواهیم داشت. استفاده از زیراساس فقط با هدف

افزایش مقدار k اقتصادی نیست. از لحاظ اجرایی، آخرین دلیل عنوان شده در لیست قبلی از همه مهم‌تر است، چرا که از تأخیر ناشی از بارندگی در زمان اجراء، جلوگیری و به پیمانکار کمک می‌کند تا یک روسازی صاف و هموار ایجاد کند.

موردی که به ذهن خطور می‌کند اینست که آیا از زیراساس می‌توان انتظار داشت که عملکردی مانند زهکش داشته باشد. زیراساس‌های متداول عبارت از مصالح سنگدانه‌ای توپر متراکم شده و مصالح تثبیت‌شده با افزودنی‌های مناسب است. در طبقه‌بندی آشتو خاک‌های A-2-5، A-2-4، A-1 و A-3 برای این که بتوانند در زیراساس به کار برده شوند نیازمند تثبیت با سیمان پرتلند هستند.

مقدار k که توسط بستر فراهم می‌شود با استفاده از زیراساس، افزایش پیدا می‌کند. انجمن سیمان پرتلند میزان افزایش مقدار k ناشی از اجرای زیراساس سنگدانه‌ای (جدول ٤-٢) و زیراساس تثبیت‌شده با سیمان (جدول ٤-٣) را نشان می‌دهد. سازمان هواپیمایی فدرال نیز جداول مشابهی تهیه کرده است. برای مصالح خوب دانه‌بندی شده، نتایج مطابق جدول ٤-٢ می‌باشد. مقادیر k برای شن و ماسه رودخانه‌ای کم‌تر بوده و مطابق جدول ٤-٤ می‌باشد. مقادیر k برای انواع زیراساس تثبیت‌شده در جدول ٤-٥ ارائه شده است. راهنمای طرح روسازی آشتو از یک روند دقیق برای اصلاح مقادیر k، براساس مدول و ضخامت زیراساس و احتمالا بر روی فنداسیون‌های سخت یا تخته سنگ که تا ۳ متر زیر سطح ادامه دارند و اصلاح اثرات فصلی و کاهشی براساس تخریب تکیه‌گاهی ناشی از فرسایش فنداسیون یا حرکات متغیر خاک، استفاده می‌کند. اما به دلیل تأثیر بسیار کم مقدار k در طراحی و صعوبت در پیش‌بینی پتانسیل فرسایش، تا این اندازه اصلاحات و دقت غیرضروری می‌باشد. جداول ٤-٢ و ٤-٣ به احتمال زیاد مؤثر و کافی هستند.

نظریه دیگری در مورد مقدار k وجود دارد که صحبت راجع به آن به ویژه وقتی زیراساس تثبیت‌شده با سیمان یا قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مفید خواهد بود. عموماً، تفکر مهندسی این گونه است که استحکام و سفتی بیشتر بهتر بوده و چشم‌پوشی از اثر آن در طراحی، محافظه‌کارانه باشد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که طراحی مبتنی بر مقدار نسبتاً کم k، صرف‌نظر از این که مصالح مرغوب‌تری مورد استفاده قرار گرفته است و یا این که تراکم بهتری در این زمینه حاصل شده است، محافظه کارانه می‌باشد.

این نظریه برای طراحی ضخامت دال مناسب است اما برای طراحی فاصله بین درزها کاربردی ندارد. در فصل ۷ تنش‌های تابیدگی با افزایش مقادیر k افزایش پیدا می‌کند، بنابراین باید فاصله بین درزها برای جلوگیری از ترک‌های وسط دال کاهش یابد. در نتیجه برای تعیین حداکثر فاصله بین درزها، مقدار k باید به دقت محاسبه شده یا دست

بالا تخمین زده شود تا طراحی محافظه‌کارانه‌ای بدست آید.
در روسازی فرودگاه، زیراساس از مصالح طبیعی یا سنگدانه‌های شکسته با CBR ۲۰ تا ۱۰۰ ساخته می‌شود. برای جلوگیری از یخ‌زدگی یا به منظور تأمین زهکشی از این مصالح استفاده می‌شود. مصالح مشابه نیز برای بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و جاده‌ها به کار می‌رود.

جدول ٤-۲: اثر زیراساس تثبیت نشده بر مقدار k (PCA1984:6)

مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)	مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)			
	۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)	۲۲۵ میلی‌متر (۹ اینچ)	۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ)	۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ)
۱۳/٥ (٥۰)	۳۰ (۱۱۰)	۲۳ (۸٥)	۲۰ (۷٥)	۱۷/٥ (٦٥)
۲۷ (۱۰۰)	٥۱ (۱۹۰)	٤۳ (۱٦۰)	۳۸ (۱٤۰)	۳٥ (۱۳۰)
٥٤ (۲۰۰)	۸۷ (۳۲۰)	۷۳ (۲۷۰)	٦۲ (۲۳۰)	٦۰ (۲۲۰)
۸۱ (۳۰۰)	۱۱۷ (٤۳۰)	۱۰۰ (۳۷۰)	۸۹ (۳۳۰)	۸۷ (۳۲۰)

جدول ٤-۳: اثر زیراساس تثبیت شده با سیمان بر مقدار k (PCA1984:6)

مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)	مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)			
	۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)	۲۲۵ میلی‌متر (۹ اینچ)	۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ)	۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ)
۱۳/٥ (٥۰)	۱۰۷ (۳۹۰)	۸٤ (۳۱۰)	٦۲ (۲۳۰)	٤٦ (۱۷۰)
۲۷ (۱۰۰)	۱۷۳ (٦٤۰)	۱٤۱ (٥۲۰)	۱۰۸ (٤۰۰)	۷٦ (۲۸۰)
٥٤ (۲۰۰)	–	۲۱۸ (۸۳۰)	۱۷۳ (٦٤۰)	۱۲۷ (٤۷۰)

جدول ٤-٤: اثر زیراساس تثبیت نشده بر مقدار k (FAA 2004:15)

مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)				مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)
۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)	۲۲۵ میلی‌متر (۹ اینچ)	۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ)	۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ)	
۲۸ (۱۰۵)	۲۳ (۸۵)	۱۹ (۷۰)	۱٦/۲ (٦۰)	۱۳/۵ (۵۰)
۵۱ (۱۹۰)	٤۳ (۱٦۰)	۳۸ (۱٤۰)	۳٤ (۱۲۵)	۲۷ (۱۰۰)
۸۱ (۳۰۰)	۷۳ (۲۷۰)	٦۸ (۲۵۰)	٦۲ (۲۳۰)	۵٤ (۲۰۰)
۹۵ (۳۵۰)	۹۲ (۳٤۰)	۸۷ (۳۲۰)	۸٤ (۳۱۰)	۸۱ (۳۰۰)

جدول ٤-۵: اثر زیراساس تثبیت شده بر مقدار k (FAA 2004:57)

مقدار k زیر اساس، *Mpa/m* (*psi/in*)				مقدار k زیراساس، *Mpa/m* (*psi/in*)
۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)	۲۲۵ میلی‌متر (۹ اینچ)	۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ)	۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ)	
٦۰ (۲۲۰)	٤٦ (۱۷۰)	۳۰ (۱۱۰)	۲۳ (۸۵)	۱۳/۵ (۵۰)
۸۷ (۳۲۰)	۷۳ (۲۷۰)	٦۲ (۲۳۰)	٤٦ (۱۷۰)	۲۷ (۱۰۰)
۱۰۷ (۳۹۰)	۱۰۰ (۳۷۰)	۸٤ (۳۱۰)	۷٦ (۲۸۰)	۵٤ (۲۰۰)
۱۱٦ (٤۳۰)	۱۱۳ (٤۲۰)	۱۰۳ (۳۸۰)	۹۵ (۳۵۰)	۸۱ (۳۰۰)

طبق اظهارات نشریه مشاوره‌ای سازمان هواپیمایی فدرال با عنوان «طراحی و ارزیابی روسازی فرودگاه (۲۰۰٤)»، هدف از اجرای زیراساس در روسازی صلب، فراهم آوردن یک سطح یکنواخت به عنوان تکیه‌گاه دال‌های صلب می‌باشد. کم‌ترین ضخامت زیراساس مورد نیاز به جز موارد نشان داده شده در جدول ٦-٤، در روسازی صلب برابر با ٤ اینچ (۱۰۰ میلی‌متر) می‌باشد.

٤-۲-۱- اساس تثبیت شده

روسازی‌های جدید فرودگاه، به ویژه آن‌هایی که بار هواپیماهای سنگین با وزن ناخالص ٤۵۲۵۰ کیلوگرم یا بیشتر را تحمل می‌کنند، عموماً نیازمند اساس تثبیت‌شده هستند. لایه اساس زیر روسازی فرودگاه به صورت مکانیکی یا شیمیایی تثبیت می‌شود. برای تثبیت مکانیکی اساس در مقایسه با زیراساس، مواد با کیفیت بالاتری مورد نیاز است که باید از

لحاظ درصد شکستگی مصالح، مواد زیان‌آور و دانه‌بندی مورد توجه قرار بگیرند. در سایر موارد کنترل کیفی مواد، اساس و زیراساس شبیه به هم هستند.
انواع اساس تثبیت‌شده شیمیایی شامل سیمان خاکی، اساس تثبیت شده با سیمان (CBT)، بتن اقتصادی (بتن مگر) و اساس تثبیت شده با قیر(ATB) است.
سیمان خاکی و اساس تثبیت شده با سیمان شبیه به هم هستند، اما در سیمان خاکی از مصالح موجود در بستر استفاده می‌شود، در حالی که در اساس تثبیت شده با سیمان عموماً از مصالح پردازش شده استفاده می‌شود که کیفیت بالاتری دارد. توصیه می‌شود که این مصالح از یک حداکثر مقاومت مشخص تجاوز نکند، یا این که راهکارهایی به کار گرفته شود تا پتانسیل ترک‌خوردگی کاهش یابد.

جدول ٤-٦: شرایطی که نیازی به زیراساس نمی‌باشد (Table 3.10،FAA 2004:55)

طبقه‌بندی خاک	زهکشی مناسب		زهکشی ضعیف	
	بدون یخبندان	با یخبندان	بدون یخبندان	با یخبندان
GW	X	X	X	X
GP	X	X	X	
GM	X			
GC	X			
SW	X			

X = نیازی به زیراساس نیست.

نسبت مخلوط و روش‌های آزمایش سیمان خاکی به طور مفصل در نشریه انجمن سیمان پرتلند، تحت عنوان کتابچه آزمایش‌های سیمان خاکی، پژوهش‌نامه مهندسی EBO52.07S آمده است. این کتاب تعیین درصد مناسب سیمان و آزمایش انجماد- ذوب و حساسیت در برابر رطوبت را پوشش می‌دهد.
CTB مقاومت فشاری هفت روزه ۵/۳ مگاپاسکال (۷۵۰ psi) دارد. از BCT در مستندات سازمان هواپیمایی فدرال تحت عنوان «استانداردهایی برای مشخص کردن ساخت فرودگاه» به عنوان Item p-304 (لایه اساس تثبیت‌شده با سیمان) یاد شده است.
لایه اساس تثبیت‌شده با سیمان، Item p-304 از سازمان هواپیمایی فدرال برای مقاومت فشاری هفت روزه ۵،۱۷۱ کیلوپاسکال (۷۵۰ psi) طراحی می‌شود. در مواقعی که تعداد زیادی از چرخه‌های انجماد- ذوب وجود دارد، یک معیار دوام نیز در نظر گرفته می‌شود. اجرای یک لایه جدا کننده بین اساس تثبیت شده با سیمان و رویه بتنی توصیه می‌شود. معیار پذیرش اساس تثبیت شده با سیمان چگالی و همواری است.
بتن اقتصادی شبیه به بتن است اما از مصالح با کیفیت پایین ساخته می‌شود. حداقل

مقاومت فشاری هفت روزه آن ۵/۳ مگاپاسکال (۷۰۰ psi) و حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن ۸/۳ مگاپاسکال (۱۲۰۰ psi) است. حداکثر مقاومت مورد نیاز برای بتن اقتصادی به منظور کاهش خطر ترک‌خوردگی و نیز خطر ایجاد ترک‌های انعکاسی در رویه بتنی، تعیین می‌شود. مصالح اساس به وسیله قیر نیز تثبیت می‌شوند. مقدار k و تنش‌های تابشی در اساس با سختی بالا، به ویژه در حالت بتن اقتصادی، افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش فاصله بین درزها باید در دستور کار قرار بگیرد.

اساس بتنی کم سیمان یا بتن اقتصادی، Item P-306، ضعیف‌تر از اساس تثبیت شده با سیمان است و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه آن باید بهخ ترتیب ۳،٤٤۸ و ۵،۱۷۱ کیلوپاسکال (۵۰۰ psi و ۷۵۰) باشد. برای کاهش خطر ترک‌خوردگی روسازی بتنی، حد بالای مقاومت فشاری به ۸،۲۷٤ کیلوپاسکال (۱۲۰۰ psi) محدود می‌شود. اگر یک لایه جدا کننده بین اساس بتنی کم سیمان و روسازی بتنی به کار رود، می‌توان از این محدودیت چشم‌پوشی کرد. حداقل عیار سیمان ۱۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب است که بسیار پایین‌تر از بتن معمولی می‌باشد. معیار پذیرش اساس بتنی کم سیمان براساس مقدار اسلامپ، درصد هوا، ضخامت، مقاومت و شیب است.

اساس تثبیت‌شده با قیر شبیه به آسفالت گرم می‌باشد و همان مشخصات ارائه شده در سازمان هواپیمایی فدرال در مورد آن صادق است. اساس تثبیت‌شده با قیر ممکن است از Item P-401، که مانند لایه‌های آسفالت گرم متداول می‌باشد، یا از Item P-403 که جدیدتر است استفاده کند. P-403 به طور خاص برای اساس تثبیت شده با قیر و لایه‌های آسفالتی تسطیح شده تهیه شده است. طرح مخلوط، اجراء و نظارت بر آن شبیه به روسازی‌های آسفالتی متداول است.

جزئیات انتخاب مصالح و طرح اختلاط اساس تثبیت شده با سیمان، اساس بتنی کم سیمان و اساس تثبیت‌شده با قیر توسط هال و همکارانش تهیه شد. در صورتی که بتن بازیافت شده، خرد شده و دانه‌بندی شده مشخصات لازم را داشته باشد، به عنوان مصالح سنگی در اساس تثبیت‌شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. همین طور، روسازی آسفالتی بازیافت شده می‌تواند به عنوان بخشی از اساس تثبیت‌شده با قیر به کار رود.

زیراساس تثبیت‌شده با سیمان و بتن کم‌عیار در زیر روسازی راه‌های اصلی همچنان کاربرد دارند. امروزه در اکثر نقاط جهان، مصالحی که مشخصات لازم برای زیراساس تثبیت‌نشده را داشته باشند، رو به اتمام هستند. با اجرای زیراساس تثبیت‌شده با سیمان و بتن کم‌عیار، از مصالح محلی، مصالح زیر حد استاندارد و بازیافت شده می‌توان استفاده

بیشتری برد که در مجموع با این کار در هزینه مربوط به مصالح و حمل‌ونقل صرفه جویی می‌شود. از نظر وزنی زیراساس تثبیت‌شده با سیمان عموماً شامل ٤ تا ٥ درصد سیمان است. سمیان استفاده شده در بتن کم‌عیار نسبت به زیراساس تثبیت‌شده با سیمان، از مقدار بیشتری برخوردار است، اما نسبت به بتن متداول سیمان کم‌تری در آن به کار رفته است.

هال و همکارانش عنوان می‌کنند که در سیستم روسازی صلب، یک اساس یکنواخت و غیرفرسایشی به اساسی با مقاومت بالا ترجیح دارد. اساس، بستر تکیه‌گاهی روسازی را بهبود و تنش‌ها و تغییر شکل‌ها را کاهش می‌دهد و در نهایت انتقال بار را در درزها بهبود می‌بخشد. بنابراین پتانسیل ترک‌خوردگی و پلکانی شدن کاهش می‌یابد.

٤-۲-۲- انتخاب نوع اساس یا زیراساس تثبیت‌شده

از آنجا که اساس تثبیت‌شده با سیمان، اساس بتنی کم سیمان و اساس تثبیت شده با قیر ممکن است به عنوان زیراساس یا اساس تثبیت‌شده در روسازی بتنی استفاده شوند، دانستن مزایا و معایب این مصالح مفید می‌باشد. هال و همکارانش فواید و نقاط مثبت این نوع لایه‌ها را شرح می‌دهند.

اساس تثبیت‌شده با سیمان معمولاً انتخاب مناسبی برای اساس روسازی‌های صلب فرودگاه است. مزایای آن شامل مقاومت در برابر فرسایش، مکش، توان انتقال مطلوب بار و بهبود عملکرد تکیه‌گاهی (افزایش مقدار k) است.

قابلیت اجرای سریع از ویژگی‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان است. البته در زمان اجراء کنترل حداکثر مقاومت و سختی حائز اهمیت بوده و باید از مصالح جدا کننده استفاده شود. فاصله درزها نیز باید کاهش یابد.

زیراساس و اساس بتنی کم‌سیمان مزیت‌های مشابه به CTB دارند، ولیکن به دلیل نیاز به زمان نگهداری و مراقبت طولانی‌تر، اجرای آن‌ها پیچیده‌تر می‌باشد. سطح اساس بتنی کم سیمان نسبت به اساس تثبیت‌شده با سیمان خشن‌تر است، در نتیجه استفاده از مصالح جدا کننده در آن اهمیت پیدا می‌کند. باید ضخامت و سختی لایه کاهش یابد تا خطر ترک‌خوردگی کم شود. در اساس بتنی کم سیمان نیز مانند آنچه که در درز دال بتنی انجام می‌شود، لازم است برای کنترل ترک‌خوردگی شکاف ایجاد شود.

اساس تثبیت‌شده با قیر معمولاً، مشابه اساس تثبیت‌شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان عمل می‌کند، ولیکن دارای سختی بسیار کم‌تری می‌باشد. بنابراین، اصطکاک و گیرداری آن کم‌تر است و استفاده از مصالح جدا کننده ضرورت ندارد. سختی کم‌تر اساس

تثبیت‌شده با قیر، این امکان را فراهم می‌آورد که همراه با دال تغییرشکل پیدا کرده و تکیه‌گاه یکنواخت‌تری را فراهم می‌کند. لایه‌های اساس تثبیت‌شده با قیر به سادگی اجراء می‌شوند. به نظر می‌رسد که با اجرای اساس تثبیت‌شده با قیر خطر ترک‌خوردگی دال نسبت به اساس تثبیت شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان خطر ترک‌خوردگی دال کاهش یابد.

در ارتباط با استفاده از اساس تثبیت‌شده با قیر معایبی وجود دارد، اما مهم‌ترین موضوع اینست که در هوای داغ باید سطح کار شستشو داده شود تا قبل از بتن‌ریزی، دمای آن کاهش یابد. بکارگیری اساس تثبیت‌شده با قیر و یا اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر نیازمند بکارگیری تجهیزات متحرک اجرای رویه آسفالتی است.

٤-۲-۳- اصطکاک و مواد جدا کننده

دال‌های بتنی با تغییر دما و رطوبت منقبض و منبسط می‌شوند. برخی از لایه‌های اساس تثبیت‌شده دارای سطح خشنی است و مقاومت اصطکاکی قابل توجهی ارائه می‌دهد. این مقاومت، به ویژه در مراحل اولیه که بتن ضعیف است، باعث ترک‌خوردگی می‌شود.

سختی بالا و بافت خشن اساس‌های پرمقاومت، مانند اساس تثبیت شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان، پایداری قابل توجهی را در سطح مشترک دال ساده بتنی و اساس ایجاد می‌کند. اساس‌های نفوذپذیر، مانند اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی نیز سبب ایجاد سطح گیردار می‌شود. چرا که در زمان اجراء، بتن به درون منافذ باز آن نفوذ می‌کند. این عوامل، خطر ترک‌خوردگی اولیه را در رویه‌های بتنی ساخته شده بر روی این اساس‌ها افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، پیوند بین یک اساس سخت و رویه بتنی باعث به وجود آمدن دال مرکب و مشکلات مربوط به برش درز به وسیله اره می‌شود. یک برش معمولی ناشی از اره به عمق ۱/۳ تا ۱/٤ ضخامت دال، به اندازه‌ای نیست که از ترک‌خوردگی دال در محل درز اطمینان حاصل شود.

برای جلوگیری از مشکلات مربوط به اصطکاک و پیوند، لازمست که مصالح جدا کننده (پیوندزدا) بین اساس یا زیراساس و رویه بتنی قرار داده شود. مؤثرترین ماده پیوندزدا برای اساس تثبیت شده با سیمان، اساس بتنی کم سیمان و اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی، یک لایه نازک با دانه‌بندی یکنواخت[1] است که قبل از قرار دادن بتن در سطح راه اجراء می‌شود. همان طور که گفته شد دانه‌بندی این مصالح یکنواخت است و اندازه‌ای در محدوده ۲۵-۱۳ میلی‌متر دارند. این لایه باعث شکست پیوند بین اساس و دال می‌شود

1- Choke Stone

و از نفوذ بتن به اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی و ایجاد قفل‌وبست بین آن‌ها جلوگیری می‌کند. مدول الاستیک پایین‌تر آسفالت نسبت به لایه‌های تثبیت‌شده با سیمان عموماً قفل‌وبست کم‌تری ایجاد می‌کند؛ بنابراین، تا زمانی که سطح هموار باشد، نیازی به اجرای هیچ ماده پیوندزدا نیست. سطوح ناهموار را می‌توان با یک لایه قیر امولسیون اصلاح کرد تا اصطکاک کاهش یابد. مصالح عمل‌آوری لایه اساس یا زیراساس تثبیت‌شده با سیمان، از جنس موم است که خود مانند یک قشر پیوندزدا عمل می‌کند. با این حال این مصالح همیشه خاصیت پیوندزدایی مؤثر ندارد و مصالح با دانه‌بندی یکنواخت به آن‌ها ترجیح داده می‌شود.

هم در اساس تثبیت شده با قیر و هم اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر، رنگ تیره سطح باعث جذب مقدار قابل توجهی گرما می‌شود که خطر ترک‌خوردگی دال بتنی را افزایش می‌دهد. برای مقابله با این مسئله از محلول سفید آب آهک استفاده می‌شود تا با شستشوی سطح دمای رویه تقلیل پیدا کند.

کنترل مقاومت و سختی لایه‌های اساس تثبیت شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان نیز مؤثر است. مقاومت فشاری ۲/٤ مگاپاسکال (۳۵۰ psi) برای مقاومت در برابر تردد وسایل نقلیه، حین اجرای روسازی کافی است. حداقل مقاومت فشاری ۳/٤ مگاپاسکال (۵۰۰ psi) و حداکثر ٦/۸ مگاپاسکال (۱۰۰۰ psi) محدوده رضایت بخشی محسوب می‌شود. مقاومت بیشتر باعث افزایش خطر ترک‌خوردگی دال می‌شود. اگرچه مقاومت بیشتر، دوام در برابر ذوب و یخ زدن را افزایش می‌دهد ولیکن این مسئله حائز اهمیت نیست.

هنگامی‌که سیمان به کار رفته در لایه‌های اساس تثبیت شده با سیمان از مقدار بالایی برخوردار باشد و فرآیند عمل‌آوری نیز به درستی انجام نشوند، ترک‌های انقباضی پلاستیک توسعه پیدا می‌کند. این ترک‌ها ممکن است گسترش یافته و در لایه تازه روسازی بتنی، به سمت بالا ادامه یابد. اگر ترک‌خوردگی ناشی از انقباض مشاهده شود، الیاف ژئوتکستایل با تراکم متوسط تا زیاد را می‌توان به عنوان لایه نگهدارنده ترک بر روی اساس تثبیت شده با سیمان قرار داد.

٤-۳- زهکش سطحی

تشخیص اهمیت زهکشی روسازی در طی سال‌ها افزایش یافته است. در سال ۱۹۷۵، یودر و وتیزاک تنها در چند صفحه از کتاب خود راجع به این مطلب بحث کردند. در کتاب‌های بعدی، یک فصل کامل به این موضوع اختصاص یافت. به گفته ماللا و

همکارانش[1]، این کتاب‌ها به مراجع مشابهی ارجاع داده شده‌اند و روش‌های مشابهی را بررسی کرده‌اند.
گاربر و هول برای اهمیت زهکشی دو دلیل را عنوان می‌کنند. اولین دلیل اینست که زهکش نامناسب عموماً منجر به وارد آمدن خسارت شدید به روسازی می‌شود و دلیل دوم اینست که آب ساکن با کاهش دید و افزایش خطر هیدروپلنینگ، باعث کاهش ایمنی و کارآیی روسازی می‌شود. آن‌ها متوجه شدند که دو منبع برای آب وجود دارد: الف) آب سطحی ناشی از بارندگی برف و باران و ب) آب زیرزمینی جریان یافته در خاک زیر روسازی. سامانه زهکش سطحی شامل تجهیزات و وسایلی می‌شود که آب را از روی روسازی و حریم راه کنار می‌زند. در این بین، شیب عرضی روسازی نیز برای راه‌های اصلی عموماً ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.
معمولاً شیب طولی حداقل ۰/۲ درصد در نظر گرفته می‌شود و کانال‌ها و مجاری طولی واقع در امتداد مسیر، آبی را که از سطح روسازی جریان می‌یابد، به کنار هدایت می‌کنند. در مناطق شهری، جوی‌های فاضلاب و جدول‌های حاشیه‌ای آب سطحی را کنترل می‌کنند.

٤-٤- زهکشی زیرسطحی

صرف‌نظر از کارآیی سامانه زهکشی سطحی، مقداری آب به داخل روسازی وارد می‌شود. در همه سطوح روسازی، هر قدر هم که نفوذ ناپذیر باشند، مقداری آب وارد ترک‌ها و اتصالات می‌شود، علی‌الخصوص با افزایش عمر روسازی این مسئله شدت می‌یابد. اگر آب نتواند به سرعت راهی برای خروج پیدا کند، باعث ضعیف‌تر شدن ساختار روسازی می‌شود و خسارت و خرابی را سرعت می‌بخشد.
برخی از روسازی‌ها لایه اساس نفوذپذیر با قابلیت زهکشی دارند که عموماً از لایه‌های متداول زیراساس گران‌تر است و مصالح به کار رفته در آن‌ها نسبت به مصالح متراکم، ناپایدارتر است، چرا که برای ایجاد نفوذپذیری مورد نظر، باید بخش ریزدانه مخلوط برداشته شود. بنابراین استفاده از اساس تثبیت نشده سنگدانه‌ای که عملکرد زهکش به خود گرفته است، یک هزینه سازه‌ای در پی خواهد داشت. یک اساس سنگ آهکی با دانه‌بندی پیوسته، خوب متراکم شده و شکسته علاوه بر نفوذپذیری مناسب، بسیار پایدار می‌باشد. در مقابل، مصالح با دانه‌بندی یکنواخت و گردگوشه، مانند شن نخودی بسیار

1- Mallela et al

نفوذپذیر و ناپایدار می‌باشد.
کوهن و تیابجی اشاره می‌کنند که:
«با وجود آن که پایداری در اولویت طراحی قرار دارد ولی تعادل بین پایداری و تخلخل نیز باید در نظر گرفته شود. ضخامت لایه زهکش معموماً ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در روسازی‌هایی که مورد استفاده هواپیماهای پهن‌پیکر است، استفاده از لایه زهکش با دانه‌بندی تثبیت نشده باز توصیه نمی‌شود. این لایه‌ها پایداری لازم را برآورده نکرده و مشکلات رایج اجرایی (شیارشدگی مسیر ناشی از تردد ماشین‌آلات ساخت و غیره) در مورد آن‌ها وجود دارد. اگر لایه‌ای با دانه‌بندی باز مورد نیاز باشد، باید عمق بیشتری در سازه روسازی منظور شود تا تنش وارد بر لایه کاهش پیدا کند».
طبق نظر هال و همکارانش (۲۰۰۵)، لایه اساسی که به خوبی طراحی شود و نفوذپذیر نیز باشد، می‌تواند آب را به سرعت از سازه روسازی جمع‌آوری و به بیرون هدایت کند. این عمل خرابی‌های مربوط به دوام بتن سیمانی ساده (مثلاً ترک D) را کاسته و مقاومت آن را در برابر پلکانی شدن افزایش می‌دهد. با این حال موارد فوق به طور مستقیم به عنوان فرآیند طراحی روسازی در سازمان هواپیمایی فدرال آورده نشده‌اند. به دلیل ضعف عمومی لایه‌های نفوذپذیر، از تأثیر سازه‌ای آن‌ها در روند طراحی صرف‌نظر می‌شود.
لایه‌های زهکش می‌توانند نفوذپذیری ۱۵۰۰-۳۰۰ متر بر روز (۵۰۰۰-۱۰۰۰ ft/day) را فراهم کنند که عموماً برای راه‌های اصلی مهم، نظیر بزرگراه‌ها، نفوذپذیری ۳۰۰ متر بر روز توصیه می‌شود. بدین منظور می‌توان از دانه‌بندی شماره ۵۷ یا ٦٧ آشتو یا ASTM استفاده کرد.
برای جبران ضعف پایداری مصالح با دانه‌بندی باز، می‌توان مقدار کمی آسفالت یا سیمان پرتلند اضافه کرد. با وجود هزینه بالاتر، نفوذپذیری اساس تثبیت شده با آسفالت یا سیمان کمی پایین‌تر از اساس تثبیت نشده می‌باشد.
هال و همکارانش، استفاده از لایه‌های نفوذپذیر تثبیت شده برای روسازی بتنی مورد استفاده در فرودگاه را مورد بحث قرار داده‌اند:
مشخصات اجرایی این لایه‌ها معمولاً با اصلاح مشخصات دستورالعمل‌های موجود، مانند Item P-401 و Item P-402 برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر و Item P-304 برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی و غیره، تهیه شده‌اند. با این وجود، دانه‌بندی باز این مصالح مانعی برای بکارگیری روش‌های متداول طرح اختلاط و اجرای این لایه‌ها محسوب می‌شود. به عنوان مثال طرح اختلاط اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر، براساس دانه‌بندی و درصد قیر به کار رفته درآن تعیین می‌شود. نفوذپذیری از جمله ملاحظات

مهم در این نوع اساس است که کم‌تر مورد توجه قرار گرفته یا به آن اشاره می‌شود. علاوه بر آن تراکم زمین با استفاده از روش‌های مشخص و پذیرش مخلوط براساس میزان ضخامت انجام می‌شود. انجام سعی‌وخطا و تجربه کافی، برای طراحی و اجرای این مخلوط‌ها لازم است و در برخی موارد، تا زمانی که تحقیقات بیشتری انجام پذیرد، ناگزیر به کسب تجربه خواهیم بود.

به دلیل عرض زیاد و شیب کم، عمل زهکشی روسازی فرودگاه‌ها با دشواری همراه است. بنابراین در اکثر موارد نفوذپذیری لایه‌های زهکش در محدوده ۱۵۰–۴۵ متر بر روز (۱۵۰۰–۵۰۰ ft/day) کافی خواهد بود. این امر را می‌توان با حداقل عیار سیمان بدست آورد که برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی برابر ۱۴۸ kg/m^3 ($۲۵۰ lb/yd^3$) و درصد وزنی آسفالت برابر ۳/۵–۲ برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر است.

اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی دارای دانه‌بندی باز است و از اساس تثبیت شده ضعیف‌تر می‌باشد. این لایه باید به اندازه کافی مقاوم باشد تا در اثر ترافیک زمان ساخت تغییر شکل ندهد. این لایه به علت این که ذاتاً ضعیف می‌باشد، تنها در صورت نیاز به زهکشی، استفاده می‌شود. اگر لایه اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی به طور صحیح طراحی و اجراء شود، با کاهش خرابی‌های ناشی از رطوبت، عملکرد بلندمدت روسازی بهبود می‌یابد. لایه اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی نیز برخی از مشکلات اساس تثبیت شده با سیمان و اساس بتنی کم سیمان را دارد و نفوذ بتن به درون منافذ این قشر می‌تواند باعث ایجاد گیرداری شود. همچنین در زمان اجرای بتن، ممکن است جداشدگی مصالح اتفاق افتد.

لایه اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر برخی مزایای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی را دارد، اما به طور کلی ضعیف‌تر (دارای سختی کم‌تر) است. به دلیل سختی کم‌تر، قفل‌وبست بین دو لایه کم‌تر از آن است که مشکل‌ساز شود و در نتیجه نیازی به لایه جدا کننده نیست. نگرانی‌هایی راجع به استفاده از اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر وجود دارد که از جمله آن حرارت شدید اساس تحت شرایط آب‌وهوایی گرم و همچنین مشکلات مربوط به پایداری و لخت شدگی سطح است.

جزئیات بیشتر در مورد انتخاب مصالح و طرح اختلاط برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی و اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر توسط هال و همکارانش[1] ارائه شده است. به دلیل آن که مقدار ماده چسباننده کم است، دوام درازمدت مخلوط به ساختار مصالح سنگی بستگی دارد. بنابراین توجه به کیفیت مصالح سنگی از اهمیت زیادی برخوردار

1- Hall et al

است و این موضوع در اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر نسبت به اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی بیشتر نمود پیدا می‌کند.
اگر بستر زیر اساس نفوذپذیر حاوی ریزدانه باشد و احتمال انسداد منافذ اساس توسط آن‌ها برود، باید از مصالح جدا کننده استفاده شود. جدا کننده می‌تواند یک لایه ماده سنگدانه‌ای یا ژئوتکستایل باشد.

غرایبه و دارتر[1] عنوان می‌کنند که اساس تثبیت شده با قیر و اساس‌های نفوذپذیر تثبیت شده با سیمان، در روسازی بتنی مسلح یکپارچه کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. چرا که بافت خشن سطحی آن‌ها سبب قفل‌وبست شدن این قشر با رویه بتنی می‌شود و روسازی مرکب را تشکیل می‌دهد. در نتیجه این امر اثر درصد مؤثر فولاد را کاهش می‌دهد. می‌توان برای جلوگیری از قفل‌وبست دو لایه از ژئوتکستایل استفاده کرد.

خازانویچ و همکارانش[2] دریافتند که زهکشی زیرسطحی مناسب در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، احتمال خرابی پلکانی را در محل درز کاهش می‌دهد و زبری کلی سطح را متعادل‌تر می‌کند. این تأثیر بر روی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار بدون میلگردهای اتصال بیشتر است.

٤-٤-١- نرم‌افزار طراحی زهکش زیرسطحی

US FHWA برنامه رایانه‌ای را با نام DRIP2.0 تهیه کرده است، که می‌توان از آن برای طراحی زهکش‌های زیرسطحی و زهکش‌های کناری روسازی استفاده کرد. DRIP مخفف «زهکش مورد نیاز در روسازی» است. این برنامه را می‌توان همراه با کتابچه راهنمای آن از وب‌سایت FHWA به صورت رایگان دریافت کرد و با سیستم SI یا واحدهای متداول آمریکا مورد استفاده قرار داد. موضوع فصل ٤ این کتابچه راهنما، یک پیش‌زمینه فنی در ارتباط با این برنامه، به همراه بررسی مفید و کامل طراحی زهکشی زیرسطحی می‌باشد.
در این برنامه مراحل طراحی زهکش زیرسطحی و زهکش‌های جانبی به شرح زیر می‌باشد:

۱- تعیین مقدار جریان آب درونی.
۲- طراحی اساس نفوذپذیر.
۳- طراحی لایه‌های جدا کننده.

1- Gharaibe & Darter
2- Khazanovich et al

٤- تعیین مقدار آب جریان یافته به سوی زهکش‌های جانبی.
٥- محاسبه فاصله خروجی.
٦- چک کردن جریان خروجی.
سه مورد اول مربوط به طراحی اساس نفوذپذیر و سه مورد دوم مربوط به طراحی زهکش‌های جانبی می‌باشد.

٤-٤-٢- تعیین مقدار جریان آب درونی

جریان آب در داخل زهکش‌های زیرسطحی ناشی از نفوذ آب سطحی، جریان آب از نقاط با ارتفاع بیشتر، نشت آب زیرزمینی و ذوب کریستال‌های یخ می‌باشد. به طور کلی، تنها منشاء نفوذ جریان آب به داخل روسازی، نشت آب است. جریان آب از نقاط مرتفع را می‌توان با استفاده از زهکش‌های جذبی جمع‌آوری و منتقل کرد. ممکن است یک سیستم زهکشی زیرسطحی برای مقابله با آب‌های زیرزمینی مؤثر نباشد و ضرورت پیدا کند تا طراح از متخصصین ژئوتکنیک کمک بگیرد. روند تخمین آب ذوب شده توسط مولتون[1] تهیه و توسط مالا و همکارانش بازنگری شده است. مقادیر نفوذ آب ذوب شده را می‌توان با استفاده از برنامه رایانه‌ای DRIP 2.0 محاسبه کرد.
نشت آب از طریق ترک‌ها و درزهای سطح روسازی رخ اتفاق می‌افتد و عملاً بتن بدون ترک غیرقابل نفوذ محسوب می‌شود. برای تخمین میزان نفوذ آب دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد: روش اول نسبت تراوش، توسط سدرگرن و همکارانش[2] و روش دوم تراوش از ترک توسط ریج‌وی ارائه شده است. هرچند با نرم‌افزار DRIP 2.0 می‌توان از هر دو روش استفاده کرد ولی روش تراوش از ترک توصیه می‌شود.
سرعت نفوذ (تراوش) طرح برحسب مترمکعب آب بر روز بر مترمربع روسازی (فوت‌مکعب بر روز بر فوت‌مربع) به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$q_i = I_c\left(\frac{N_c}{W} + \frac{W_c}{WC_s}\right) + K_p$$ رابطه ٤-١

که در آن:

I_c= سرعت تراوش از ترک، یا ظرفیت انتقال آب یک ترک یا درز، پیشنهاد شده توسط ریج‌وی برابر ۰/۲۲۳ مترمکعب در روز در مترمربع (۲/٤ فوت‌مکعب در روز در فوت‌مربع)؛

1- Moulton
2- Cedergren et al

N_c= تعداد ترک‌ها یا درزهای طولی مؤثر؛
W= عرض اساس قابل نفوذ به متر (فوت)؛
W_c= طول ترک‌های عرضی مؤثر به متر (فوت)، معمولاً برابر با عرض سطح روسازی شده؛
C_s= فاصله بین ترک‌ها یا درزهای عرضی به متر (فوت)؛ و
K_p= سرعت نفوذ به داخل رویه بدون ترک برحسب مترمکعب در روز در مترمربع (فوت‌مکعب در روز در فوت‌مربع) که معمولاً خیلی ناچیز است و می‌توان مقدار آن را برابر صفر در نظر گرفت و مقدار دقیق آن را در آزمایشگاه محاسبه کرد.
دال‌های روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، باید طوری طراحی شوند که همواره در آن‌ها ترکی ایجاد نشود. بنابراین C_s را برابر فاصله بین درزها قرار می‌دهیم. در روسازی بتنی مسلح درزدار ترک‌خوردگی بین درزها محتمل است. بنابراین اندازه‌ای برابر با ٤/٥ الی ٦ متر (١٥ الی ٢٠ فوت) برای C_s اندازه‌ای معقول است. برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه، فاصله استاندارد ٠/٦ الی ٢ متر (٢ الی ٦ فوت) برای ترک‌های عرضی مقداری محافظه کارانه است، اما به دلیل عرض کوچک‌تر ترک، معقول به نظر می‌رسد که سرعت ترواش (I_c) را کاهش دهیم.

٤-٤-٣- طراحی اساس قابل نفوذ

سرعت خروج آب از یک اساس قابل نفوذ به طول مسیر عبوری آب و میزان نفوذپذیری اساس بستگی دارد. مالا و همکارانش[1] رابطه‌ای را برای محاسبه شیب برآیند، SR، از شیب طولی و شیب عرضی ارئه کرده‌اند.

رابطه ٤-٢
$$S_R = \sqrt{S^2 + {S_x}^2}$$

که در آن،S و S_x به ترتیب، شیب طولی و عرضی برحسب متر بر متر (فوت بر فوت) هستند. آنگاه شیب برآیند، SR، بدست آمده از رابطه ٤-٢ برای محاسبه برآیند طول مسیر جریان عبوری از شیب برآیند اساس قابل نفوذ به کار می‌رود، L_R برحسب متر (فوت):

رابطه ٤-٣
$$L_R = W\sqrt{1 + \left(\frac{S}{S_x}\right)^2}$$

نفوذپذیری مصالح تشکیل دهندهٔ اساس، نشان داده شده با ضریب نفوذپذیری K، بستگی

1- Mallela et al

به نوع مصالح و درجه تراکم آن دارد. معمولاًاز k کوچک به عنوان نماد نفوذپذیری استفاده می‌شود ولی در این کتاب برای جلوگیری از اشتباه گرفتن با مدول عکس‌العمل بستر، از K بزرگ استفاده می‌شود. مشخصات اصلی مصالح عبارت از اندازه مؤثر دانه‌ها D_{10} (برابر با اندازه ۱۰ درصد اندازه دانه‌های عبوری)، تخلخل (n) و درصد ریزدانه‌های عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر (# ۲۰۰ یا ۲۰۰ سوراخ در هر اینچ) است.

روش‌های محاسبه نفوذپذیری توسط مالا و همکارانش بازنگری شد: به وسیله نرم‌افزار DRIP 2.0 می‌توان ضریب K را براساس توزیع اندازه دانه‌های مصالح، چگالی برجا یا وزن واحد حجم برحسب kg/m^3 (lb/ft^3)، وزن مخصوص قسمت جامد و تخلخل مؤثر محاسبه نمود. تخلخل مؤثر را می‌توان از یک آزمایش ساده بدست آورد تا بتوان حجم آب زهکشی شده از مقدار مشخص مصالح را بدست آورد، یا این که می‌توان مقدار آن را براساس درصد و نوع ریزدانه‌ها (پرکننده‌های معدنی، لای یا رس) تخمین زد. نرم‌افزار DRIP 2.0 آزمایشگاه مصالح با دانه‌بندی‌های شماره ۵۷ یا ٦٧ آشتو و ASTM را در اختیار قرار می‌دهد که همان خصوصیات اساس سنگدانه‌ای نفوذپذیر را دارد و در برخی از ایالت‌های آمریکا از آن استفاده می‌شود.

هنگامی که برآیند طول مسیر جریان و نفوذپذیری مصالح اساس در دست باشد، لازم است ضخامت مورد نیاز اساس نفوذپذیر نیز تعیین شود. دو روش عمق جریان و روش زمان زهکشی برای این طراحی وجود دارد. می‌توان نرم‌افزار DRIP 2.0 را براساس هر دو روش برای طراحی لایه به کار برد.

روش عمق جریان توسط مولتن[1] در سال ۱۹۸۰ ارائه شد و از آن برای تعیین حداقل ضخامت لایه زهکشی برای نرخ نفوذ، نفوذپذیری، طول و شیب مسیر جریان و نیز برای یافتن ضریب نفوذپذیری مورد نیاز استفاده می‌شود. معادلات و جداول مولتن توسط مالا و همکارانش بازنویسی شده است.

روش زمان زهکشی در سال ۱۹۵۲ توسط کاساگرانده و شانون[2] بسط داده شد که بر پایه یک زمان مشخص (۲ ساعت تا یک ماه) و ۵۰ درصد زهکشی یا ۸۵ درصد اشباع بود. نرم‌افزار DRIP 2.0 زمان زهکشی را با هر دو رابطه کاساگرانده و شانون یا باربر و ساویر[3] محاسبه می‌کند. مالا و همکارانش متذکر می‌شوند که زمان زهکشی متأثر از ضخامت نیست، بنابراین این معادلات بیشتر برای تعیین k مورد نظر، استفاده می‌شوند.

1- Moulton
2- Shannon & Casagrande
3- Barber & Sawyer

٤-٤-٤- طراحی لایه جدا کننده

مالا و همکارانش بیان می‌کنند:
«مصالح اساس سنگدانه‌ای یا ژئوتکستایل به عنوان لایه جدا کننده مناسب به نظر می‌رسد. لایه جدا کننده باید الف) از مکش ریزدانه‌ها از بستر به سمت بالا و به داخل اساس نفوذپذیر جلوگیری کند؛ ب) سطح پایداری را برای تسهیل در ساخت اساس نفوذپذیر و سایر لایه‌های فوقانی فراهم کند؛ پ) پوششی محافظ را برای منحرف کردن مسیر آب نفوذی به زهکش‌های کناری فراهم نماید و نیز محافظی برای بستر باشد؛ ت) بارهای زنده را بدون تغییر شکل قابل توجه در بستر توزیع کند. تنها یک لایه جدا کننده سنگدانه‌ای می‌تواند به طور رضایت‌بخش موارد (ب) و (ت) را محقق کند. از آنجا که لایه جدا کننده سنگدانه‌ای، سطحی پایدار را برای انجام عملیات ساخت تأمین و بارهای وارده را در بستر توزیع می‌کند، به الیاف ترجیح داده می‌شود. ژئوتکستایل‌ها به عنوان لایه‌های جدا کننده، بیشتر در ارتباط با بسترهای تثبیت‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند که خود سطح ساخت‌وساز و توزیع بار را تأمین می‌کند. در صورت برآورده ساختن الزامات عملکرد فیلتری، هر دو نوع مصالح سنگدانه‌ای و ژئوتکستایل می‌توانند از مکش ریزدانه‌ها جلوگیری نمایند. ضخامت جدا کننده سنگدانه‌ای که با توجه به ملاحظات اجرایی از ۱۰۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر (٤ الی ۱۲ اینچ) متغیر است.
در روسازی‌های بتنی توزیع بارهای زنده (ت) دارای اهمیت زیادی نیست، چرا که دال‌های بتنی صلب، فشار روی بستر را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. در این میان جلوگیری از حرکت ریزدانه‌های بستر به سمت بالا و مسدود کردن اساس نفوذپذیر حائز اهمیت است».
جلوگیری از مسدود شدن اساس نفوذپذیر مستلزم این است که یک لایه از مصالح، هر دو معیار ذیل را در سطح مشترک برآورده کند:

رابطه ٤-٤ D_{15} (اساس نفوذپذیر) $\leq 5\, D_{85}$(بستر)

رابطه ٤-٥ D_{50} (اساس نفوذپذیر) $\leq 25\, D_{50}$(بستر)

که در آن D_{15}، D_{50} و D_{85} نشان دهندهٔ اندازه به ترتیب ۱۵، ۵۰ و ۸۵ درصد ضخامت ذرات در منحنی دانه‌بندی است. اگر معادلات ٤-٤ و ٤-٥ در سطح مشترک اساس نفوذپذیر و بستر باهم تلاقی پیدا کنند، دیگر نیازی به لایه جدا کننده نیست. در غیر این صورت باید از یک لایه جدا کننده استفاده کنیم. دو معیار مشابه نیز در لایه جدا کننده و فصل مشترک اساس نفوذپذیر باید رعایت شود. الزامات دیگر برای لایه جدا کننده توسط

مالالا و همکارانش تهیه شده است.
از ژئوتکستایل نیز ممکن است به عنوان جدا کننده اساس زهکش و بستر استفاده شود. اندازه منافذ ژئوتکستایل نیز باید طبق معیارهای زهکشی و عدم انسداد منافذ اساس نفوذپذیر باشد. این مورد برای ژئوتکستایل بافته شده و بافته نشده و برای انواع خاک‌ها متفاوت می‌باشد.

٤-٤-٥- مثال طراحی

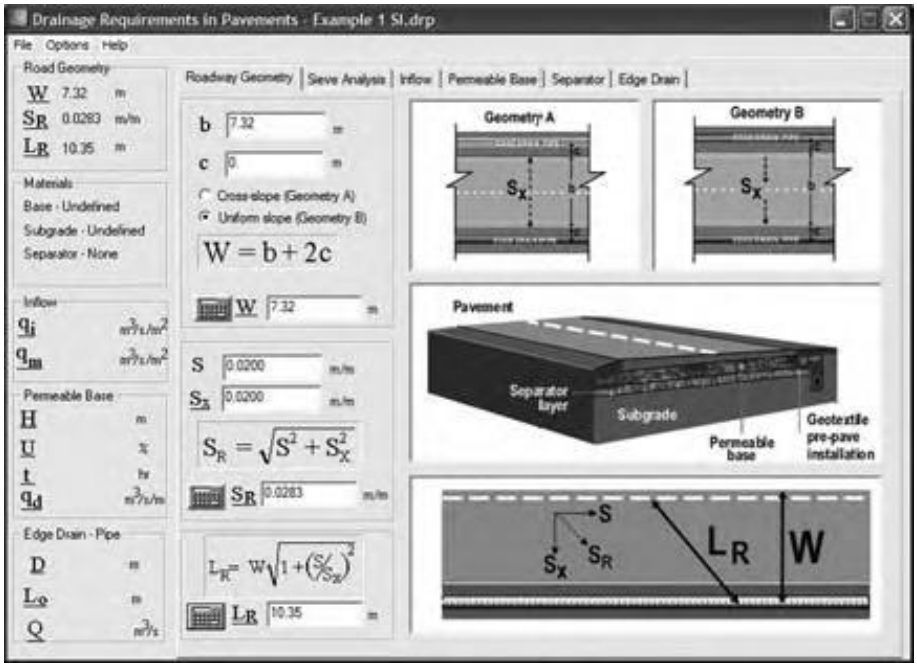
مالالا و همکارانش یک مثال طراحی برای اساس زهکش در زیر روسازی بتنی تهیه کرده‌اند. پارامترهای طراحی زیر در این مثال استفاده می‌شود.

- عرض روسازی و ضخامت: دو خط عبور ۳/٦٦ متر (۱۲ فوت) و ۲۲۵ میلی‌متر (۹ اینچ) ضخامت با ۳/۰۵ متر (۱۰ فوت) شانه در هر طرف. فاصله درزهای عرضی ٦/۱ متر (۲۰ فوت).
- شیب عرضی: یکنواخت بدون تحدب برابر ۲ درصد هر دو سمت طولی و عرضی.
- اساس نفوذپذیر: برابر عرض رویه روسازی بتنی مواد، مصالح شماره ۵۷ آشتو با چگالی یا وزن واحد حجم ۲،۰۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۳۰ pcf)، ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) براساس ملاحظات اجرایی.
- مصالح بستر: رس قرمز جورجیا، لای رس‌دار خوب دانه‌بندی شده، با مقدار K= ۰/۰۰۱ متر در روز (فوت در روز K=۰/۰۰۳۳). آزمایش دانه‌بندی برای مصالح بستر روسازی عبارتست از درصد سنگدانه‌های عبوری از الک شماره ٤ (٤/۷۵ میلی‌متر) برابر ۹۲ درصد، ٦۷ درصد از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر)، ۵۵ درصد از الک شماره ۲۰ (۸۵۰ میکرومتر)، ٤۲ درصد از الک شماره ۵۰ (۳۰۰ نانومتر)، و ۳۱ درصد از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر).

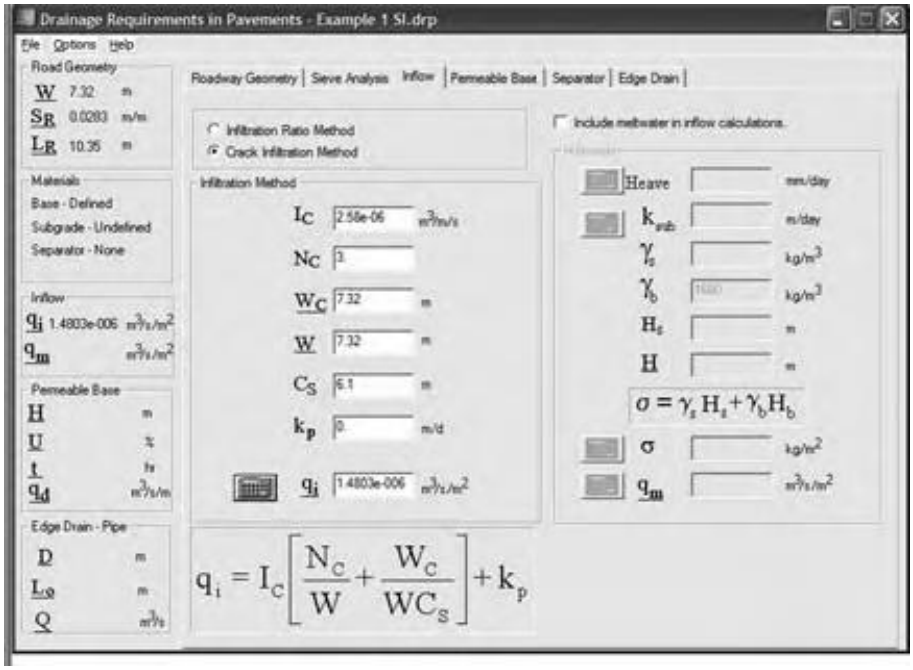
طبق نتیجه محاسبات هندسی مسیر، شکل ٤-۱، S_R=۰/۰۲۸۳ و L_R=۱۰/۳۵ m (۳۳/۹٤ فوت).
سپس میزان تراوش آب محاسبه می‌شود. محاسبه میزان تراوش به وسیله روش تراوش از ترک (رابطه ٤-۱) مطابق شکل ٤-۲ انجام می‌شود: $1/48\times10^{-6}$ $m^3/s/m^2$. اگر شامل آب ناشی از ذوب یخ باشد، ۱۰ درصد به آن اضافه می‌شود.
بعد از آن، اساس نفوذپذیر به وسیله روش عمق جریان طراحی می‌شود. ابتدا با استفاده از دانه‌بندی، وزن مخصوص و وزن واحد حجم که در شکل ٤-۳ نشان داده شده است،

باید نفوذپذیری اساس تعیین شود. براساس نفوذپذیری بستر که برابر با ۱۲۲ متر در روز (٤۰۰ فوت در روز) است، ضخامت مورد نیاز برای اساس ۱۹٤ میلی‌متر (۷/٦ اینچ) تعیین می‌شود که بیشتر از ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) موجود می‌باشد (شکل ٤-٤). در نتیجه باید ضخامت به ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) افزایش یابد. در مقابل اگر تراکم اساس کاهش یابد، به طوری که چگالی آن ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع (۱۲۵ pcf) شود، ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) برای اساس کافی خواهد بود. در این مثال با پرهیز از تراکم بیش از اندازه زیراساس نفوذپذیر، ارتباط بین پایداری و نفوذپذیری نیز نشان داده شده است. همان طوری که در شکل ٤-۵ نشان داده شده است، زمان زهکشی برای اساس را نیز می‌توان چک کرد. در نفوذپذیری کم ۱۲۲ متر در روز (٤۰۰ فوت در روز)، اساس در طی ٤ تا ۵ ساعت می‌تواند ۵۰ درصد زهکشی را با استفاده از رابطه باربر و ساویر یا کاساگرانده و شانون انجام دهد.

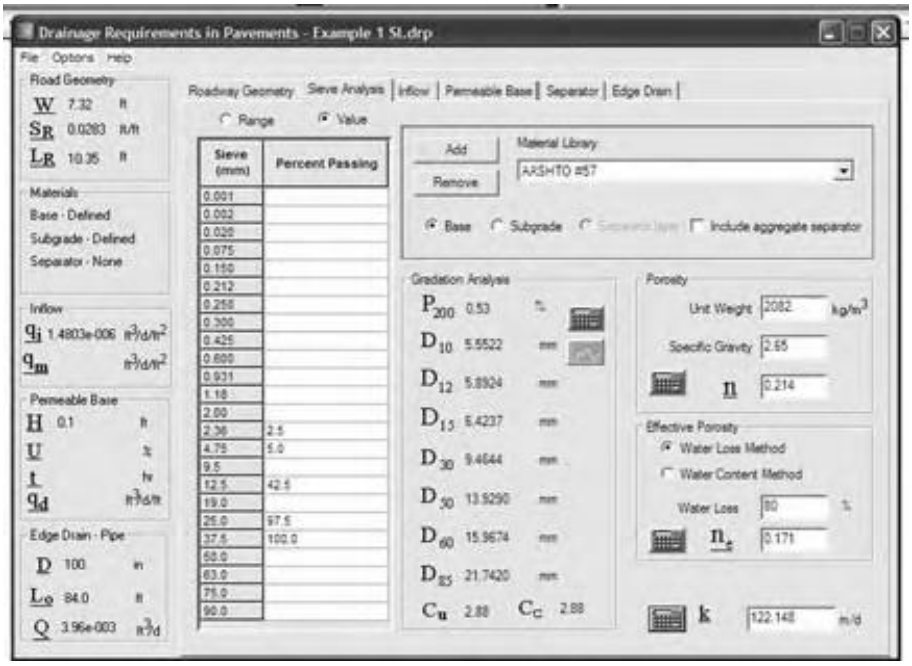
قدم بعدی این است که با استفاده از روابط ٤-٤ و ٤-۵ مشخص شود که آیا به لایه جدا کننده نیاز است. منحنی‌های دانه‌بندی، هم برای اساس نفوذپذیر و هم برای مصالح بستر تهیه شده است. با توجه به استاندارد بودن مصالح اساس زهکش (دانه‌بندی شماره ۵۷ آشتو)، این دانه‌بندی در نرم‌افزار DRIP 2.0 وجود دارد. اما دانه‌بندی مصالح بستر باید وارد نرم‌افزار شود. منحنی دانه‌بندی توسط نرم‌افزار درونیابی می‌شود تا مقادیر D_{10}، D_{50} و D_{85} را برای هر دو مصالح بدست آورد. شکل ٤-٦ تحلیل دانه‌بندی بستر که توسط کاربر تعریف شده را نشان می‌دهد.



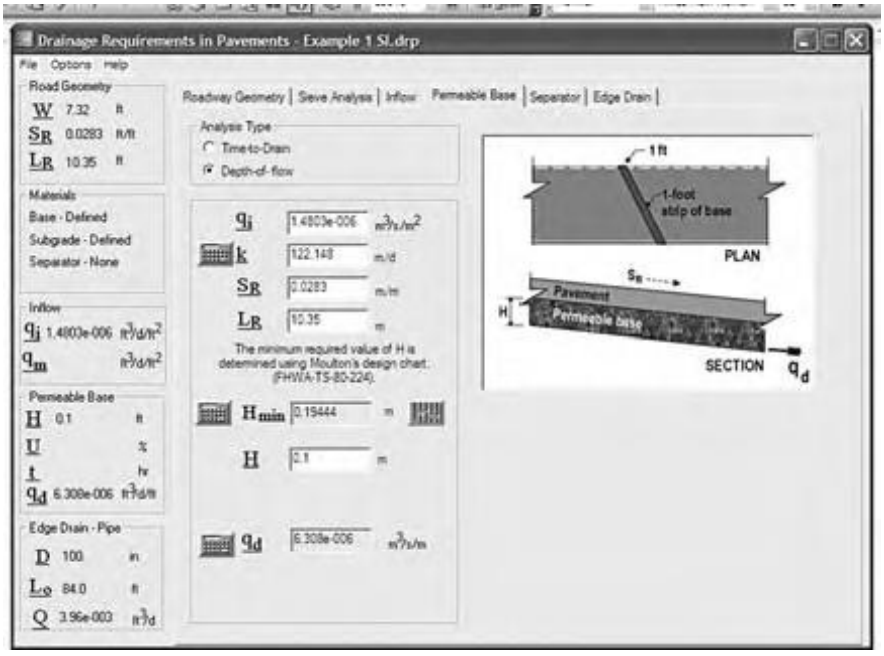
شکل ٤-١: داده‌های ورودی مربوط به هندسه مسیر برای طراحی زهکش روسازی



شکل ٤-٢: محاسبه میزان تراوش

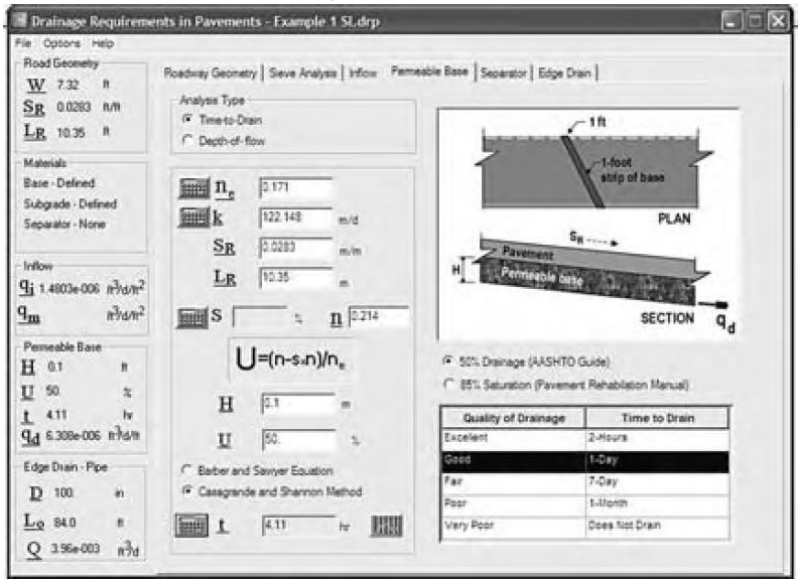


شکل ٤-٣: تعیین نفوذپذیری اساس

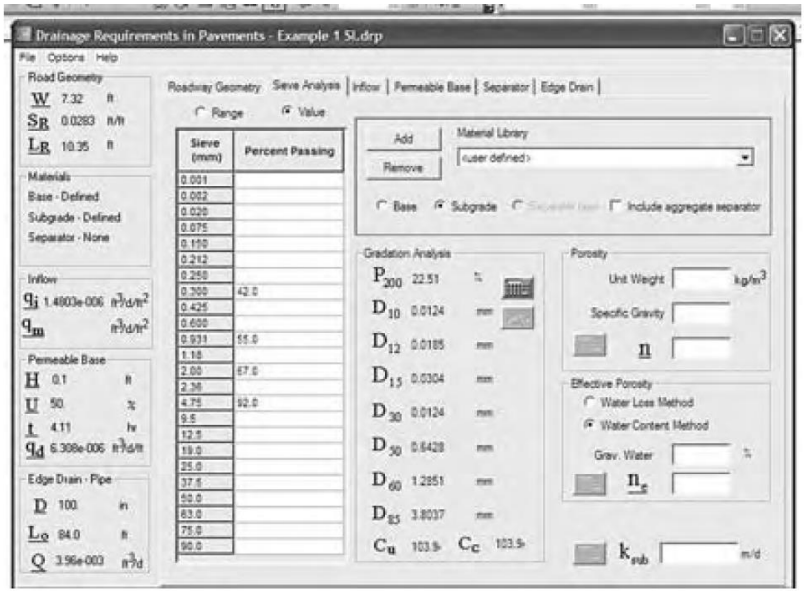


شکل ٤-٤: طراحی اساس به وسیله روش عمق جریان

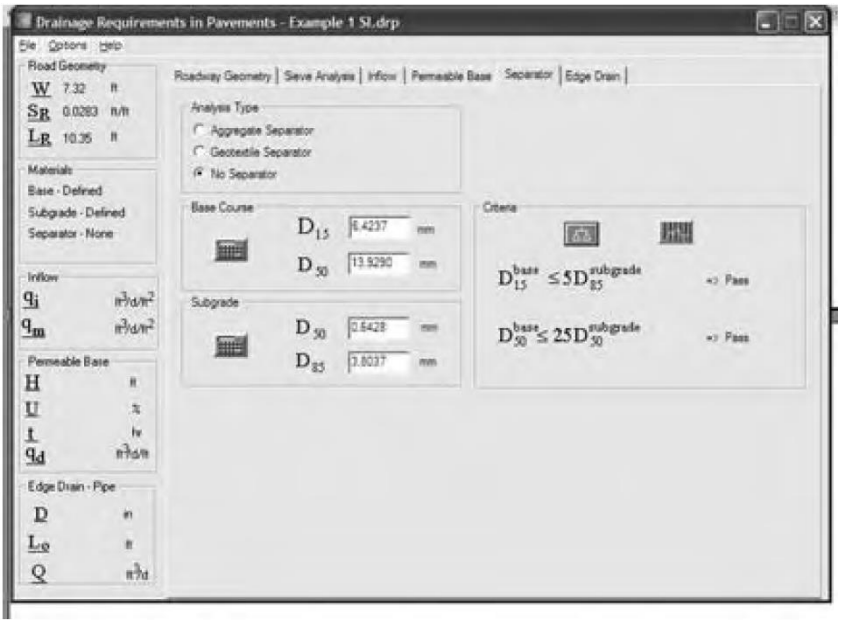
سپس، کلید جدا کننده در DRIP 2.0 مورد استفاده قرار می‌گیرد تا مشخص شود که آیا معیارهای لازم رعایت شده است. شکل ٤-٧ نشان می‌دهد که برای این دو مصالح معیارهای لازم رعایت شده است، پس نیاز به مصالح جدا کننده یا ژئوتکستایل نمی‌باشد.



شکل ٤-٥: کنترل طرح اساس به وسیله روش زمان زهکشی



شکل ٤-٦: تعیین مصالح بستر به وسیله کاربر



شکل ٤-٧: کنترل ملزومات لایه جدا کننده

٤-٥- زهکش جانبی

آبی که به اساس قابل نفوذ و تراوا وارد شود، باید از جایی به بیرون راه یابد. مقداری آب از طریق بستر خاک دفع خواهد شد و اگر خروج آب کافی باشد، از همان ابتدا نیاز به لایه زهکش وجود ندارد. بنابراین لایه نفوذپذیر برای زهکشی را به دو طرف مسیر منحرف خواهد کرد.

لایه زهکش می‌تواند محدود به کانال‌های طولی باشد و یا همراه با شیب کناری مسیر امتداد یابد (زهکش نفوذی). کانال‌های طولی قابل اطمینان‌ترند، چون که لایه‌های زهکش نفوذی مستعد آلودگی و گرفتگی هستند. کانال‌های طولی ممکن است ساختار لوله‌ایی داشته باشد و یا ممکن است از نوع کانال سنگدانه‌ای فرنچ (French) و بدون لوله‌کشی باشند. نرم‌افزار DRIP 2.0 طراحی لوله‌های جمع کننده طولی را نیز انجام می‌دهد. زهکش‌های لبه ممکن است برای میزان جریان نفوذی در روسازی، جریان اوج در اساس نفوذپذیر و یا میزان متوسط جریان در زمان زهکشی اساس نفوذپذیر طراحی شده باشد. توصیه می‌شود که حداقل ظرفیت موجود، برابر حداکثر ظرفیت اساس نفوذپذیر باشد. معمولاً به طور محافظه‌کارانه فرض می‌شود که تمام این جریان بدون دفع از طریق خاک، توسط سیستم لوله‌کشی اداره می‌شود. ظرفیت جریان لوله، با استفاده از رابطه مانینگ،

مطابق توضیحات و جزئیات دقیق متون مربوط به علم هیدرولیک یا مکانیک سیالات، محاسبه می‌شود. ظرفیت لوله‌های خروجی نیز باید با استفاده از رابطه مانینگ کنترل شود. شیب کانال خروجی باید حداقل ۳ درصد باشد.

عموماً متغیرهای طراحی برای زهکش‌های طولی لبه عبارت از نوع لوله، قطر لوله و فواصل خروجی است. نوع لوله و فواصل خروجی اصولاً بسته به خط‌مشی سازمان‌های حمل‌ونقل و حداقل الزامات، براساس ضوابط نگهداری مشخص می‌شوند. حداقل قطر متداول و معمول لوله ۱۰۰–۷۵ میلی‌متر (٤–۳ اینچ) با فواصل خروجی ۱۰۰– ۷۵ متر (۳۰۰–۲۵۰ فوت) است.

زهکش‌های لبه نیز ممکن است به جدا کننده نیاز داشته باشد. مصالح به کار رفته در فیلتر باید به قدر کافی ریز باشد تا از ورود خاک در لوله‌ها جلوگیری کند. از طرفی به قدری درشت باشد که آب را بدون مقاومت از خود عبور دهد. این نقش‌ها را می‌توان توسط مصالح، که پیاده کردن آن‌ها بدون آلودگی دشوار است یا از طریق ژئوتکستایل عملی کرد. زهکش‌های لبه با ژئوکامپوزیت‌های پیش‌ساخته نیز قابل استفاده می‌باشد.

٤–۵–۱– مثال طراحی

در ادامه مثال قبل، لوله‌های موج‌دار با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) با روش جریان اوج در اساس نفوذپذیر به کار گرفته می‌شود. نتایج حاصل از DRIP 2.0 در شکل ٤–۸ با حداقل فاصله خروجی ٦۲۸ متر، نشان داده شده است. معیار زمان زهکشی ممکن است مورد بررسی قرار گیرد، اما این کار باعث افزایش فواصل خروجی می‌شود.

٤–۵–۲– بهبود زهکش‌های لبه

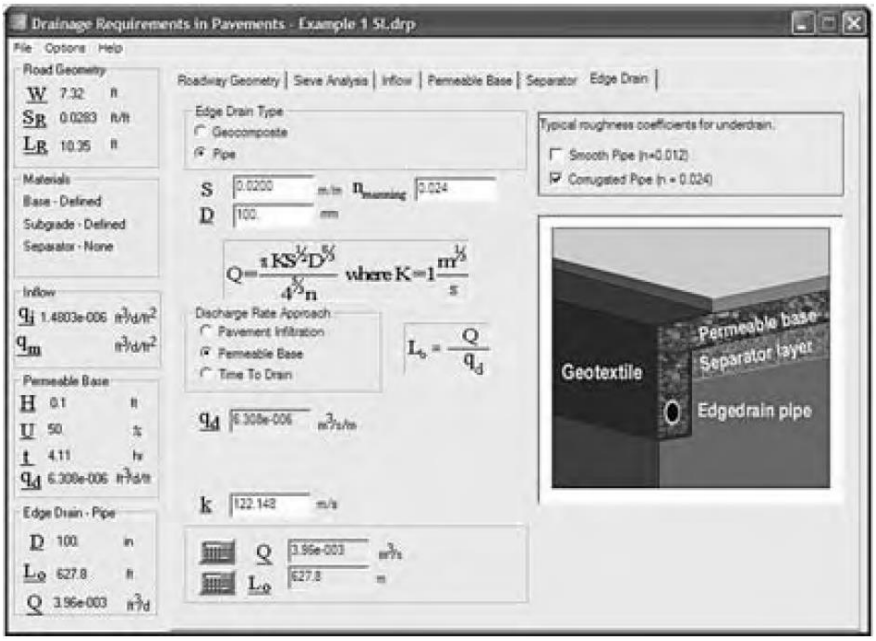
کاملاً مشخص است که برای روسازی موجود، بهسازی اساس نفوذپذیر غیرممکن است. اما زهکش‌های لبه را می‌توان در طول روسازی موجود ساخت. این امر سبب کاهش سطح آب زیرزمینی در مجاورت روسازی و کاهش میزان رطوبت قشر بستر و اساس می‌شود.

طبق گزارش مالِلا و همکارانش، نتیجه یکی از مطالعات FHWA در زمنیه بهبود زهکش‌های جانبی برای بهسازی روسازی موجود در سال ۱۹۸۹ به شرح زیر است:

- زهکش لبه باید بلافاصله در زیر شانه و در مجاورت درز شانه یا روسازی واقع شود.

- با حذف بافت فیلتر در سطح مشترک زیراساس یا زهکش لبه، ذرات فرسایش یافته نمی‌توانند بافت فیلتر را مسدود نمایند.
- خاکریز ترانشه باید آن قدر قابل نفوذ باشد که آب را به لوله‌های زهکش طولی منتقل کند. خاکریزهای تثبیت‌شده با قیر یا سیمان، باعث افزایش پایداری بدون تأثیر منفی در میزان نفوذپذیری می‌شود.
- عرض متداول ترانشه‌ها ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ) می‌باشد. قرار دادن قسمت فوقانی لوله در پایین لایه‌های زهکشی توصیه می‌شود.
- فواصل خروجی‌ها نباید بیش از ۱۵۰ متر (۵۰۰ متر) باشد. فواصل خروجی اضافی باید در انتهای رأس منحنی‌های قائم ایجاد شده باشند.
- دیواره‌های هدایت کننده از آسیب دیدگی لوله‌های خروجی در برابر صدمات وارده محافظت کرده و از فرسایش شیب‌ها جلوگیری می‌کنند و در ضمن استقرار لوله‌های خروجی را نیز آسان می‌کنند.

بهسازی زهکش‌های لبه، به عنوان یک استراتژی بهسازی در فصل ۱۷ مورد بحث قرار گرفته است. تعمیر و نگهداری زهکش‌های لبه، در فصل ۱۶ مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ٤-٨: طراحی زهکش لبه

٤-٥-٣- زهکشی فرودگاه

زهکشی روسازی فرودگاه در مستند سازمان هواپیمایی فدرال، تحت عنوان زهکشی فرودگاه مورد بحث قرار گرفته است. زهکشی سطحی یا روسازی فرودگاه کم‌اثرتر از روسازی راه‌های اصلی هستند، چرا که روسازی فرودگاه عریض‌تر بوده و به خاطر نکات ایمنی شیب‌های طولی و عرضی ملایم‌تری دارند. در نتیجه اساس نفوذپذیر خیلی مفید و حائز اهمیت می‌شود.

فصل پنجم

انتخاب مصالح بتن

استفاده از بتن به عنوان مصالح ساختمانی در دو هزار سال قبل و به دوران امپراطوری روم باز می‌گردد. یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های آن زمان یعنی پانتئون[1] هنوز قابل استفاده است. در مقابل، برخی از سازه‌های بتنی بعد از آن به نسبت عمر خدمت‌دهی کوتاه‌تری داشته‌اند. دقت در انتخاب مصالح بتن و دقت در طرح اختلاط و تعیین نسبت مصالح، به همراه طراحی و اجرای مناسب و صحیح، از عوامل موفقیت می‌باشند. دوام بتن در نشریه راهنمای بتن بادوام از انجمن بتن آمریکا مورد بحث قرار گرفته است.

باسکو[2] بیان می‌کند که:

یک طراح خوب روسازی باید یک کارشناس بتن نیز باشد. نکاتی که باید به آن‌ها توجه کرد عبارتند از:

- در ایالت متحده ۱۱۸ کارخانه سیمان وجود دارد، که هر یک چندین محصول منحصربه‌فرد تولید می‌کنند. از تجربیات شخصی بدست آمده در یک پروژه تحقیقاتی، پنج مدل سیمان تیپ I از کارخانه‌های مختلف دارای مقاومت ۲۸ روزه از ۱۹ تا ۳٤ مگاپاسکال (۴۹۷۵–۲۷۳۸ psi) بودند.
- در آمریکا ٤۲۰ کارخانه ذغال‌سنگ وجود دارد و ۲۸ درصد از خاکستر بادی آن‌ها طبق ضوابط ASTM C618 برای استفاده در بتن قابل قبول هستند. این محصولات واکنش‌های مختلفی با سیمان‌های گوناگون نشان می‌دهند که میزان آن به درصد خاکستر بادی استفاده شده بستگی دارد. این امر با توجه به واکنش

1- Pantheon
2- Basko

بازها با سنگدانه‌ها و مقاومت سولفاتی حائز اهمیت می‌باشد.

- هزاران معدن مصالح سنگی برای استفاده در دسترس هستند. متأسفانه سنگدانه، بی‌اثر و خنثی نیست. علاوه بر واکنش سنگدانه‌ها با مصالح سیمانی، مشخصات دیگری نیز وجود دارد که سبب بروز مشکلاتی می‌شود.

بتن در ساده‌ترین شکل خود متشکل از سیمان، آب و سنگدانه است. در روش‌های نوین اجرایی به ویژه در روسازی، از مواد افزودنی می‌توان استفاده نمود. همچنین استفاده از مواد سیمانی مکمل، که به نام افزودنی‌های معدنی نیز خوانده می‌شوند، بسیار رایج است. این مواد از هزینه‌ها کاسته و عملکرد و دوام بتن را بهبود می‌بخشند. سه مرجع عالی در ارتباط با بتن عبارت از کسماتکا و همکارانش[1] میندس و همکارانش[2] و نویل[3] است.

۵-۱- سیمان

سیمان چسبی هیدرولیکی است که بتن را نگه می‌دارد. در سیستم آمریکا، سیمان پرتلند با اعداد رومی I تا V طبقه‌بندی و شناخته می‌شود. سیمان تیپ I برای مقاصد عمومی است و در تمام کارهایی که مشخصات خاصی از سیمان انتظار نمی‌رود، مناسب می‌باشد. تاکنون در بیشتر ایالات آمریکا این نوع سیمان بیشترین کاربرد را داشته است. سیمان تیپ II در جایی که محافظت از بتن در برابر حملات سولفاتی با شدت متوسط مهم است استفاده می‌شود. سولفات‌ها در خاک و آب‌های زیرزمینی، مخصوصاً در ایالات غربی آمریکا یافت می‌شود و ممکن است به بتن ساخته شده از سیمان تیپ I حمله کنند. برخی از سیمان‌ها هم مشخصات تیپ I و هم مشخصات تیپ II را دارند که با تیپ II/I مشخص می‌شوند. سیمان تیپ III به ذرات ریزتری خرد شده است تا سریع‌تر به مقاومت اولیه خود برسد. سیمان تیپ IV سیمانی است که به کندی به مقاومت خود می‌رسد و از آن در جاهایی که باید حرارت هیدراتاسیون به حداقل برسد مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه به دلیل این که با مواد مکمل سیمانی و صرف هزینه کم‌تری می‌توان به همین مقصود دست پیدا کرد، سیمان تیپ IV کم‌تر موجود است. سیمان تیپ V نسبت به سیمان تیپ II در برابر حمله سولفات‌ها مقاومت بیشتری دارد و برای محیط‌های سولفاتی شدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیمان پرتلند باید به گونه‌ای تهیه شود تا مشخصات ASTM C150 با عنوان «مشخصات فنی سیمان پرتلند» برآورده شود.

1- Kosmatka et al
2- Mindess et al
3- Neville

در کانادا تیپ‌های I تا V با تیپ‌های ۱۰ تا ۵۰ شناخته می‌شوند. سیمان هیدرولیکی مخلوط نیز با مشخصات مختلف، بسته به این که به آن سرباره کوره آهن‌گدازی یا پوزولان افزوده شده باشد، موجود است. همچنین سیمان هیدرولیکی و سیمان هیدرولیکی سرباره‌ای نیز در دسترس است.

۵-۲- مواد مکمل سیمانی

مواد مکمل سیمانی یا افزودنی‌های معدنی، شامل خاکستر بادی، سرباره، دوده سیلیسی و غیره می‌باشد. با استفاده از این مواد مقاومت اولیه بتن به تأخیر می‌افتد ولی در مقابل دوام و مقاومت نهایی بتن بهبود یافته و حرارت ناشی از هیدراتاسیون و روند افزایش آن کاهش می‌یابد، همچنین کارایی بتن بهتر شده و پرداخت سطح بتن آسان‌تر انجام می‌شود. با توجه به کاهش تخلخل بتن و در نتیجه حساسیت آن در برابر حملات سولفاتی و واکنش قلیایی سیلیسی، دوام کلی بتن بهبود می‌یابد.
این امکان وجود دارد که مواد سیمانی مکمل، ویژگی‌های پوزولانی، سیمانی یا هر دوی آن‌ها را باهم داشته باشند. واکنش پوزولانی با محصولات حاصل از واکنش هیدراتاسیون سیمان وارد عمل می‌شود تا بدین طریق مقاومت بتن سخت شده را افزایش و میزان تخلخل آن را کاهش دهد.

۵-۲-۱- خاکستر بادی

خاکستر بادی، یکی از پرمصرف‌ترین مواد مکمل سیمان در بتن است و محصول جانبی احتراق خاک ذغال، در کارخانه‌های تولید برق می‌باشد. شکل این محصول به صورت ذرات کروی کریستالی کوچک‌تر از ذرات سیمان است. با توجه به ذغالی که خاکستر از سوزاندن آن بدست می‌آید، دو نوع خاکستر بادی وجود دارد. خاکستر بادی کلاس F دارای مشخصات پوزولانی و خاکستر بادی کلاس C دارای هر دو ویژگی پوزولانی و سیمانی است. خاکستر بادی کلاس F معمولاً به اندازه ۲۵-۱۵ درصد وزنی مصالح سیمانی و خاکستر بادی کلاس C معمولاً به اندازه ٤٠-۱۵ درصد وزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
مشخصات لازم برای خاکستر بادی کلاس F و C در ASTM C618 ارائه شده است.
به گفته کهن و تایابجی[1] خاکستر بادی کلاس C ممکن است برای عملکرد بتن زیان‌آور

1- Kohn & Tayabji

باشد و باعث سختی زودرس بتن تازه، ترک‌خوردگی حرارتی و یا کاهش مقاومت در برابر سولفات‌ها شود. این افزودنی عموماً برای کنترل انبساط‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی مؤثر نمی‌باشد. احتمال سختی زودرس معمولاً در آب‌وهوای گرم و در اثر استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب وجود دارد. پتانسیل سختی زودرس را می‌توان با ساخت نمونه‌های آزمایشی در بالاترین دمای پیش‌بینی شده پروژه، اندازه‌گیری اسلامپ و زمان گیرش بتن ارزیابی کرد.

۵-۲-۲- سرباره

سرباره کوره آهن‌گدازی که سرباره یا سیمان سرباره‌ای نیز نامیده می‌شود، یک محصول جانبی از فرآیند متالورژی است که غالباً در تولید آهن از سنگ آهن حاصل می‌شود. سرباره‌ها براساس ۸۰، ۱۰۰ یا ۱۲۰ درصد از ۲۸ روز مقاومت ملات ساخته شده با سیمان خالص درجه‌بندی شده‌اند. مشخصات لازم برای سرباره در ASTM C989 ارائه شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی را باید از شن و ماسه سرباره‌ای فاقد خصوصیات سیمانی تمیز داد. مخلوط‌های سه‌جزئی که از سیمان پرتلند، خاکستر بادی و سرباره استفاده می‌کنند، می‌توانند بتنی بسیار با دوام و نفوذپذیر تولید کنند. دپارتمان هوانوردی شهر بوستون تگزاس، در استفاده از بتن با مقاومت اولیه بالا دچار مشکلات دوام شد. برای تعریض باند پرواز در فرودگاه بین‌المللی جورج بوش (IAH) در سال ۲۰۰۲، سیمان تیپ I (۵۰ درصد)، خاکستربادی کلاس F (۲۵ درصد) و سرباره درجه ۱۲۰ (۲۵ درصد) تهیه شد و به طور همه جانبه مورد آزمایش قرار گرفت و پیش‌بینی شد که عمر خدمت‌دهی آن به ۱۲۰ سال برسد.

۵-۲-۳- سایر مواد سیمانی مکمل

ماده دیگر، دوده سیلیسی یا میکروسیلیکا است که اغلب در سازه‌های بتنی با عملکرد بالا و نفوذپذیری کم استفاده می‌شود و به ندرت در روسازی بتنی به کار می‌رود. دوده سیلیسی یکی از محصولات جانبی فرآیند ساخت فلز سیلیکونی و آلیاژهای آن می‌باشد. این محصول نسبت به خاکستر بادی و سرباره گران‌تر است و کم‌تر در دسترس می‌باشد و کاربرد آن در روسازی به عنوان مصالح تعمیری یا روکش‌های نازک بتنی می‌باشد.
مواد دیگر که قابلیت استفاده در بتن روسازی را دارند عبارت از خاکستر سبوس برنج، متاکائولین، پوزولان طبیعی و فیلر (پرکننده) آهکی هستند. خاکستر سبوس برنج تاکنون در مقیاس تجاری در دسترس نبوده است، اما پتانسیل تبدیل شدن به یکی دیگر از

مهم‌ترین مواد تشکیل دهندهٔ بتن را دارد. سه ماده دیگر جزء محصولات جانبی نمی‌باشند و قابلیت کم‌تری برای استفاده در بتن روسازی دارد.

۵-۳- مصالح سنگی و آب

مصالح سنگی به طور کلی ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهد، بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که تأثیر مهمی بر روی مشخصات آن دارند. مصالح سنگدانه‌ای، صرفاً عامل بی‌اثر پرکننده در بتن نبوده و باید مشخصات آن‌ها با دقت مورد بررسی قرار گیرد.
سنگدانه‌ها، مواد دانه‌ای هستند که معمولاً به صورت شن (قلوه‌سنگ خرد شده و شن طبیعی) و ماسه وجود دارند. سنگدانه‌ها براساس وزن مخصوصی که دارند به میان‌وزن، سنگین‌وزن و سبک‌وزن طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به دسترسی بیشتر، برای روسازی بتنی سنگدانه‌های با وزن میانه استفاده می‌شود. سنگدانه‌های بتنی باید با استاندارد ASTM C33 مطابقت داشته باشند. مشخصه سنگدانه‌ها که بر روی عملکرد بتن روسازی تأثیر می‌گذارد شامل شکل، بافت، اندازه، دانه‌بندی، جذب آب و رطوبت سطحی، وزن مخصوص، وزن واحد حجم، دوام فیزیکی، دوام شیمیایی و استحکام است. استحکام اجزای سنگدانه‌ای به ندرت استحکام بتن را کنترل می‌کند. علت آن است که استحکام جزئی چسب سیمانی و پیوند بین مصالح و چسب، عامل کنترل کننده استحکام بتن می‌باشد.
سنگدانه‌ها ممکن است به شکل گردگوشه یا تیزگوشه باشد. در این بین سنگدانه‌های گردگوشه به طور طبیعی وجود دارند، ولی سنگدانه‌های تیزگوشه توسط سنگ‌شکن‌ها تولید می‌شوند. در بین این دو نوع تقسیم‌بندی اصلی، شکل سنگدانه‌ها ممکن است به طور جزئی‌تر به صورت کروی‌شکل، نامنظم، بسیار نامنظم، پولکی و سوزنی تقسیم‌بندی شود. بافت سنگدانه‌ها ممکن است شیشه‌ای، صیقلی، دانه‌ای، زبر و ناصاف، بلورین یا بافت کندویی باشند. در این میان مصالح گردگوشه دارای کارایی بیشتری است. اما مصالح تیزگوشه مقاومت خمشی بیشتری را ایجاد می‌کند که برای روسازی بتنی بسیار مهم است.
دانه‌بندی سنگدانه‌ها با آنالیز الک صورت می‌گیرد که در آن جرم سنگدانه‌های مانده بر هر یک از الک‌های استاندارد، مورد نظر است. حداکثر اندازه سنگدانه‌ها و شکل منحنی دانه‌بندی دو پارامتر کلیدی به حساب می‌آیند.
میزان جذب آب و رطوبت سطحی برای محاسبه مقدار آبی که مصالح به خمیر سیمان می‌افزایند یا از آن می‌کاهند، بسیار مهم است. وزن مخصوص برای تعیین رابطه وزن با حجم و تعیین نسبت مصالح، مورد استفاده قرار می‌گیرد. وزن واحد حجم جدا از وزن

مخصوص می‌باشد، چرا که نه‌تنها شامل حجم ذرات بوده، بلکه حجم فضای خالی بین آن‌ها در حالت متراکم را نیز شامل می‌شود. زمانی که طرح اختلاط بتن توسط شیوه‌های ACI 211.1 یا ACI 211.3 انجام می‌شود، محاسبه این خصوصیات ضروری خواهد بود. مقاومت فیزیکی سنگدانه‌ها مستقیماً به مقاومت سایشی و سلامت دانه‌بندی مربوط می‌شود. سنگدانه‌هایی غیرسالم محسوب می‌شوند که بر اثر تغییرات حجمی ناشی از سیکل انجماد و ذوب و یا خیس شدن و خشک شدن تخریب شوند. سنگدانه‌های ناسالم منجر به بیرون پریدگی سطح و ترک‌خوردگی از نوع D می‌شوند که در فصل ۳ توضیح داده شده است. مقاومت سایشی سنگدانه‌ها، به ویژه در مناطقی که استفاده از لاستیک‌های آجدار مجاز می‌باشد، نقش مهمی در مقاومت سایشی بتن تحت جریان ترافیک خواهد داشت.

برای حفظ مقاومت لغزشی ایجاد شده در طول زمان، مقاومت سایشی سنگدانه‌های ریز نسبت به سنگدانه‌های درشت مهم‌تر است. سنگدانه‌ها با مقاومت سایشی ضعیف به صیقلی شدن سطح روسازی منتهی می‌شوند. همچنین منطقی به نظر می‌رسد که مقاومت سایشی مصالح درشت‌دانه می‌تواند فاکتور مهمی در عملکرد قفل‌وبست درزها باشد.

بیشتر مشکلات، به مقاومت شیمیایی ناشی از واکنش بین سیلیس در سنگدانه‌ها و مواد قلیایی موجود در سیمان مربوط است. این امر شامل واکنش قلیایی- سیلیس و واکنش کربنات- قلیایی بوده و همان طور که در فصل ۳ عنوان شد، منجر به ترک‌خوردگی سطحی می‌شود. خاکستر بادی نوع F و سرباره برای کنترل واکنش قلیایی- سیلیس استفاده می‌شوند. سایر راهکارها استفاده از سیمان با میزان قلیایی کم و اجتناب از مصالح سنگی آسیب‌پذیر است.

ضریب خطی انبساط حرارتی بتن یک پارامتر کاربردی است. این ضریب مقدار باز و بسته شدن درزها و ترک‌ها و تاب دال‌های بتنی را بر اثر تغییرات دمایی تعیین می‌کند. ضریب حرارتی بتن ممکن است از ۷/٤ με/°C تا ۱۳ باشد. چون سنگدانه‌ها قسمت اعظم بتن را تشکیل می‌دهند بنابراین در تعیین ضریب حرارتی بتن نقش مهمی ایفاء می‌کنند. در این بین سنگ آهک دارای ضریب حرارتی پایینی برابر با ٦ με/°C و ماسه‌سنگ دارای ضریب حرارتی بالاتری بین με/°C ۱۱ تا ۱۲ می‌باشد.

بنابراین در اختلاف دمای مورد نظر، بتن ساخته شده از ماسه‌سنگ دو برابر بتن ساخته شده از سنگ آهک تغییر مکان خواهد داشت و در صورتی که تغییر مکان آن گیردار باشد، دو برابر تنش در آن به وجود خواهد آمد. باید درزها مطابق با بیشترین میزان جابه‌جایی طراحی شوند. به‌علاوه، میزان تاب‌خوردگی دال ناشی از دما دو برابر خواهد

بود.
برای کاهش ضریب خطی انبساط حرارتی بتن، در یک پروژه روسازی تغییر محل استخراج سنگدانه‌ها به لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. اما کم کردن فضای بین درزها باعث کاهش تنش‌های پیچشی و کاهش خطر ترک‌خوردگی می‌شود.

۵-۳-۱- مصالح درشت‌دانه

به طور کلی در روسازی استفاده از بزرگ‌ترین سنگدانه که اندازه آن به ۱/۳ ضخامت دال محدود می‌شود، اولویت دارد. چرا که استفاده از بزرگ‌ترین مصالح دانه‌ای نسبت ماده چسبنده را و در نتیجه میزان افت بتن را کاهش می‌دهد. اکثر تجهیزات و ماشین‌آلات بتن آماده می‌توانند با سنگدانه‌های تا۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) کار کنند. اگر سنگدانه‌ها در معرض تخریب ناشی از انجماد و ذوب و یا ترک‌خوردگی از نوع D قرار بگیرند، کاهش اندازه سنگدانه‌ها می‌تواند دوام را بهبود می‌بخشد. استفاده از سنگدانه‌های با قطر حداکثر، در درزهایی که به صورت قفل‌وبست دانه‌ای عمل می‌کند، انتقال بار بهتر انجام می‌شود.

با توجه به این که سنگدانه‌های کوچک‌تر فضای موجود بین سنگدانه‌های درشت‌تر را پر می‌کند، استفاده از سنگدانه‌های با دانه‌بندی پیوسته و متراکم می‌تواند از نسبت ماده چسبنده در مخلوط بتن بکاهد. سنگدانه‌های با دانه‌بندی یکنواخت یا باز نیازمند ماده خمیری چسبنده (ملات سیمانی) بیشتری هستند. بتن‌های نفوذپذیر برخلاف بتن‌های متداول از سنگدانه‌های درشت‌دانه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده می‌کنند.

۵-۳-۲- مصالح ریزدانه

بند ASTM C33 به طور اختصاصی برای مصالح درشت‌دانه و ریزدانه محدوده‌ایی را در نظر می‌گیرد. برای ریزدانه‌ها توزیع ذرات توسط مدول نرمی، ارائه شده است که مقدار آن برابر با جمع درصدهای باقی‌مانده بر هفت الک استاندارد (۱۵۰ نانومتر- ۹/۵ میلی‌متر یا الک نمره ۱۰۰-۳/۸ اینچ) تقسیم بر ۱۰۰ می‌باشد. مدول نرمی نوعاً بین ۲/۳ و ۳/۱ می‌باشد که در آن عدد کوچک‌تر ماسه‌های ریزتر را نشان می‌دهد. مدول نرمی تأثیر مصالح ریزدانه را بر کارایی بتن تعیین می‌کند که در طرح اختلاط بتن بسیار دارد. به طور سنتی از ماسه طبیعی برای ساخت بتن استفاده می‌شود، اما اگر این ماده به اندازه کافی در دسترس نباشد می‌توان از ماسه‌های ساخته شده از سنگ شکسته نیز استفاده کرد.

هال و همکارانش[1] پیشنهاد دادند که از ماسه‌های دانه‌درشت خوب دانه‌بندی شده با مدول نرمی واقع در محدوده ۳/۱ تا ۳/٤، به ویژه با نسبت سیمان بالا که اغلب در ساخت روسازی‌های فرودگاه به کار می‌روند، استفاده شود. ماسه‌های دانه‌درشت‌تر از افت حجمی بتن می‌کاهند.

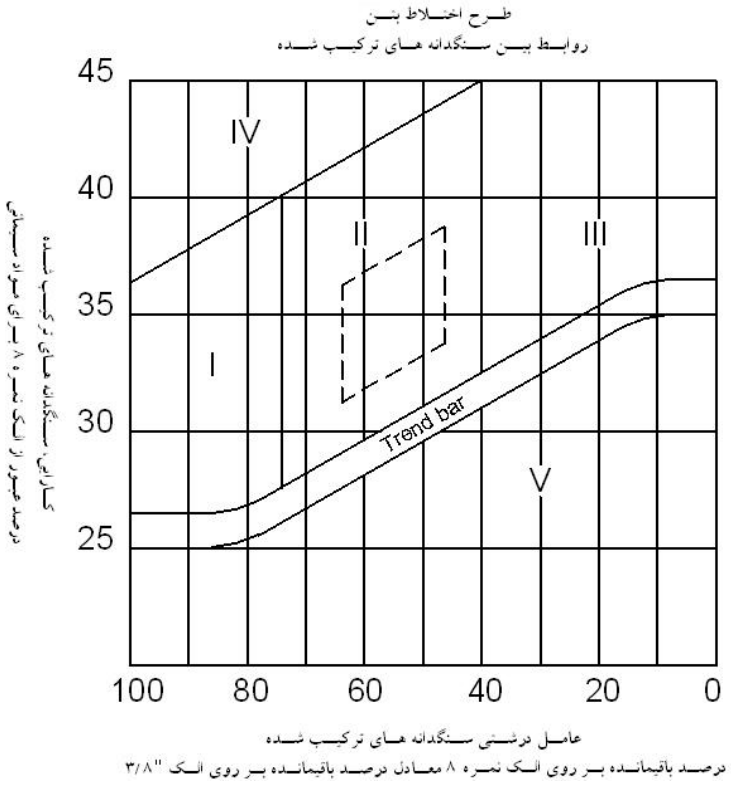
۵-۳-۳- دانه‌بندی بهینه شده مخلوط سنگدانه‌ها

تحقیقات انجام شده در زمینه دانه‌بندی مصالح شامل خاک‌ها، اساس و آسفالت نشان داده است که مخلوط تشکیل یافته از ذرات با بعد مساوی و دانه‌بندی پیوسته بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. بهینه بودن دانه‌بندی سنگدانه‌ها در بتن سیمانی بسیار حائز اهمیت است، چرا که نیاز به دومین مؤلفه مهم بتن، یعنی سیمان را به حداقل می‌رساند و تأثیر بسزایی را بر درصد تخلخل بتن دارد. برای افزایش کارایی بتن، چسبندگی و مقاومت بین سنگدانه‌ها در برابر نیروهای مؤثر در طول عمر بتن، حجم خمیر سیمانی نباید بیش از حد لازم باشد. دانه‌بندی باز (به ویژه در الک‌های شماره ٤ و ۸) و زیاده‌روی در ماسه ریزدانه و مواد سیمانی، سبب بروز مشکلاتی می‌شود. اصلاحات انجام شده در دانه‌بندی مصالح سنگی سبب کاهش قابل ملاحظه مقدار آب در مخلوط بتن، بهبود حمل، پرداخت نهایی و افزایش مقاومت بتن می‌شود.

الک‌های شماره ٤ و ۸ به ترتیب ۲/۳٦ و ٤/۷۵ میلی‌متر و الک‌های شماره ١٦ و ۳۰ به ترتیب ۱/١٦ میلی‌متر و ٦۰۰ نانومتر قطر دارند و از انواع الک‌های پرکاربرد می‌باشند.

مشخصات استاندارد دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه مانند آنچه در ASTM در مورد آن صحبت شده است، به ندرت به تعیین دانه‌بندی مناسب برای سنگدانه‌های محلوط می‌پردازد. ASTM C–33–03 در پاراگراف ۱–۳ استانداردی را برای کمیت مصالح سنگی، بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها و دیگر الزامات دانه‌بندی ذکر می‌کند. این امر به طراح اجازه می‌دهد که از نمودار درشتی (شکل ۵–۱) و محدوده ناحیه II متوازی‌الاضلاع برای دانه‌بندی مصالح مخلوط استفاده کند. فردی که نسبت مصالح را مشخص می‌کند، می‌تواند از دانه‌بندی‌های غیراستاندارد محلی موجود یا دانه‌بندی استاندارد برای پرکردن فضای خالی آسفالت استفاده کند.

1- Hall et al



شکل ۵-۱: نمودار رابطه مصالح ترکیبی (عامل درشتی)

شیلستون[1] جزئیات دانه‌بندی مصالح سنگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ویژگی اصلی و کلیدی روش شیلستون، استفاده از نوموگراف رابطه سنگدانه‌های مخلوط می‌باشد، که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

محور x نمودار، عامل درشتی سنگدانه‌های مخلوط را نشان می‌دهد که برابر است با درصد مصالح مانده بر الک ۲/۳۶ میلی‌متری (الک شماره ۸) که بر روی الک ۹/۷۵ میلی‌متری (الک ۳/۸ اینچ) نیز باقی مانده‌اند.

محور y نمودار، عامل کارآیی سنگدانه‌های مخلوط را نشان می‌دهد. این محور درصد سنگدانه‌های عبوری از الک شماره ۸ که با بکارگیری مواد سیمانی تنظیم و اصلاح شده‌اند را نشان می‌دهد. برای اصلاح درصد مواد سیمانی، به ازای هر ٤٣ کیلوگرم بر مترمکعب (۹٤ پوند بر یاردمکعب) مواد سیمانی بیشتر یا کم‌تر از ۳۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب، از

1- Shilstone

مقادیر واقع در محور y به اندازه ۲/۵ درصد اضافه یا کم می‌شود.
این نمودار یک نوار مایل و پنج ناحیه را شامل می‌شود. نوار قطری نمودار یک نوار مایل است که مخلوط ماسه‌ای را از مخلوط شنی جدا می‌کند. مخلوط‌های ناحیه I، در حین اجراء از هم جدا می‌شوند. ناحیه II یک ناحیه مطلوب است. ناحیه III تعمیم‌یافته ناحیه II برای مصالح ۰/۵ اینچی (۱۳ میلی‌متر) و ریزتر می‌باشد. ناحیه IV ملات ریزدانه بیشتری دارد که سبب ترک‌خوردگی، مقاومت کم و جداشدگی سنگدانه‌ها در زمان ویبره کردن بتن می‌شود. ناحیهV از شن بیشتری برخوردار است. از آنجا که مصالح درشت‌دانه در روسازی بتنی غالباً از ۱۳ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) بزرگ‌تر است، ناحیه II برای آن مناسب به نظر می‌رسد.
شرکت‌های شیلستون مشخصات زیر را به عنوان راهنما برای بتن روسازی راه‌های اصلی پیشنهاد می‌دهند:
این راهنما با هدف تهیه روسازی بتنی از مصالح محلی موجود تهیه شده است. اساس آن بهینه کردن دانه‌بندی مخلوط مصالح ترکیب شده و به حداقل رساندن میزان چسب خمیری مخلوط (آب، مواد سیمانی و حفرات هوای بتن) است.
الف) حداقل مقاومت (فشاری یا خمشی) بتن باید ــــــــ[MPa] psi باشد.
ب) مواد سیمانی باید شامل سیمان پرتلند و با توجه به شرایط محلی می‌تواند شامل خاکستر بادی، یا سرباره کوره آهن‌گدازی باشد.
پ) اگر از افزودنی‌ها استفاده می‌شود، باید شرایط ASTM C-494 و ASTM C260 برآورده شده و با مواد سیمانی سازگاری و تناسب داشته باشد. درصد هوای تولید شده در مخلوط ــــــــ ٪۱۱/۲± ٪ باشد.
ت) شن و سنگدانه باید با مشخصات تعریف شده از سوی مهندس مشاور یا ASTM C-33-04 منطبق باشد که معیارهای زیر را برآورده می‌سازد:

- مصالح سنگی باید الزامات کیفی ــــــ را برآورده سازد (مهندس مشاور یا ASTM C33).
- بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها باید ۱/۵ اینچ (۳۸ میلی‌متر) باشد.
- دانه‌بندی مصالح مخلوط باید در ناحیه II نمودار عامل درشتی (شکل ۵-۱) قرار بگیرد. تهیه کننده مصالح باید طرح اختلاط خود را در متوازی‌الاضلاعی که محدوده تغییرات مجاز را نشان می‌دهد، پیاده کند. در صورتی که براساس آزمایش مصالح، دانه‌بندی مخلوط خارج از متوازی‌الاضلاع واقع شود، باید نسبت‌های ترکیبی اصلاح شده و دانه‌بندی در محدوده مورد نظر قرار گیرد.

- دانه‌بندی مصالح باید چنان باشد که مجموع درصدهای مانده بر روی دو الک پشت سر هم کم‌تر از ۱۳ درصد نباشد.
- در صورتی که آزمایش مصالح نشان دهد که دانه‌بندی مخلوط خارج از محدوده متوازی‌الاضلاع است، باید نسبت‌های مخلوط مصالح اصلاح شود تا دانه‌بندی در محدوده مورد نظر طرح قرار گیرد.
- در صورت انجام آزمایش طبق ASTM C642، حفره‌های نفوذپذیر باید ۱۳ درصد و یا کم‌تر از آن باشند.

کهن و تایابجی[1] عنوان می‌کنند که بتن تهیه شده از مصالح خوب دانه‌بندی شده به آب کم‌تری نیاز دارد، کارآیی کافی و مناسب و نیاز به پرداخت نهایی کم‌تری دارد. بدون جداشدگی سنگدانه‌ها، فرآیند تحکیم انجام می‌شود و مقاومت و عملکرد بلندمدت بهبود می‌یابد. در مقابل، مخلوط مصالح با دانه‌بندی باز دچار معایبی از قبیل جداشدگی سنگدانه‌ها، درصد بالای ریزدانه، نیاز به آب بیشتر، افت بیشتر، مخدوش شدن عملکرد بلندمدت هستند.

شیلستون نمودار عامل درشتی را به عنوان یک راهنما معرفی می‌کنند. دو نمودار دیگر، یعنی «درصد مانده بر روی الک» و «نمودار دانه‌بندی با توان ۰/٤٥»، جزئیاتی را معرفی می‌کنند که در نموگراف سه سایز دانه‌بندی منظور نشده است. فاصله دانه‌بندی می‌تواند بین الک‌هایی در اندازه‌های ۱/۱۸ میلی‌متر و ٦۰۰ نانومتر (شماره‌های ١٦ و ۳۰) اتفاق بیفتد. مخلوط‌های بهینه، نتایج خیلی خوبی در اجرای ساختمان‌ها، راه‌های اصلی و محوطه فرودگاه‌ها داشته‌است.

دانه‌بندی با چگالی حداکثر یا نمودار توان ۰/٤٥ در روسازی آسفالتی، نسبت به روسازی بتنی استفاده گسترده‌تری دارد. این رابطه را می‌توان بدین صورت نشان داد:

$$P = 100(d/D)^{0.45}$$ رابطه ۵-۱

که در آن d، اندازه الک مورد نظر، P، درصد رد شده از الک با اندازه d و D، حداکثر اندازه سنگدانه‌های موجود است. این رابطه ممکن است برای تیزگوشه بودن، شکل، زبری سطحی و اندازه سنگدانه‌ها و نیز روش تراکم، به اصلاح نیاز داشته باشد. دانه‌بندی بدست آمده از رابطه ۵-۱، به کم‌ترین ماده چسباننده (سیمان) نیاز دارد، اما برای کارآیی بیشتر نیازمند تمهیداتی است.

1- Kohn & Tayabji

۵-۳-٤- سنگدانه‌های سبک

سنگدانه‌های سبک و کم‌وزن برای کاهش بار مرده در ساختمان‌ها و پل‌ها استفاده می‌شوند. از آنجا که این بار برای روسازی چندان قابل‌توجه نیست، استفاده از این مصالح در روسازی از مزیتی برخوردار نیست. هرچند مزایای بالقوه‌ای وجود دارد که به طور کلی مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

برخی منابع کلیدی و اصلی بتن با مصالح سبک به وسیله انجمن بتن آمریکا تهیه شده است که روش‌های اجرایی استاندارد برای انتخاب مشخصات بتن با مصالح سبک (ACI 211.2-98) و راهنمای بتن با مصالح سبک (ACI 213R-03) از جمله این منابع هستند. این آیین‌نامه‌ها بیشتر بر بتن سازه‌ای تمرکز دارند، اما در این میان برخی از مشخصات مناسب برای ساخت بتن سبک را می‌توان به کار برد:

- مدول الاستیسیته کم‌تر که در روسازی به منزله تنش کششی (خطر ترک‌خوردگی) کم‌تر در تغییر شکل یا کرنش مشابه می‌باشد.
- مقاومت خمشی و کششی قابل مقایسه با بتن‌های متداول.
- دوام در برابر فرآیند ذوب و انجماد که احتمالاً بزرگ‌تر یا مساوی بتن‌های متداول است.
- کاهش خطر واکنش قلیایی- سنگدانه‌ای.
- برخی انواع بتن سبک مقاومت سایشی بیشتری دارند.

در سال‌های ۱۹٦۳ و ۱۹٦٤، برای مقایسه در مسیری واقع در هوستن تگزاس یک قطعه آزمایشی روسازی بتنی مسلح یکپارچه با مصالح سبک، در مجاورت قطعه دیگری از روسازی بتنی مسلح یکپارچه با مصالح استاندارد احداث شد. این قطعات در سال‌های ۱۹۷٤، ۱۹۸٤ و ۱۹۸۸ مورد ارزیابی قرار گرفتند. یک مطالعه ۲٤ ساله در تگزاس نشان داد که روسازی بتنی مسلح یکپارچه با مصالح سبک نسبت به قطعه ساخته شده با مصالح استاندارد خرابی‌های سطحی کم‌تری داشت. در سال ۳٤اُم، تحقیقات تکمیلی و جامعی انجام شد که حاصل آن بیان‌گر دوام زیاد، نفوذپذیری کم و ترک‌خوردگی و خردشدگی کم‌تر در قطعه بتن سبک بود.

۵-۳-۵- استفاده از مصالح زائد به عنوان مصالح سنگی

با کاهش منابع طبیعی و پرشدن خاک‌چال‌ها، تمایل برای استفاده از مصالح زائد بازیافت شده به عنوان مصالح سنگدانه‌ای افزایش می‌یابد. مصالح زائدی که به عنوان جایگزین مصالح سنگی در بتن در نظر گرفته می‌شوند شامل مصالح زائد معدنی، سرباره کوره بلند، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی که مشخصات کلاس C و F را نداشته باشد. زباله‌های شهری (شامل زباله‌های صنعتی و خانگی)، پسماندهای کوره‌های سوخت زباله و خرابه‌های ساختمانی (شامل بتن‌های خرد شده) می‌باشد. عواملی که درباره استفاده یا عدم‌استفاده از این مصالح باید مدنظر قرار داد، ملاحظات اقتصادی، سازگاری آن با سایر مواد و مشخصات بتن است. با این وجود، برخی از مواد زائد سخت معدنی و سرباره‌ها در صورتی که به عنوان مصالح ریزدانه مورد استفاده قرار گیرند، قابلیت بهبود اصطکاک سطحی را دارند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که گسترده‌ترین و متداول‌ترین کاربرد مواد زائد به جای مصالح سنگی، بتن بازیافتی خردشده می‌باشد. این مصالح عموماً وزن مخصوص کم‌تر و نسبت به مصالح سنگی طبیعی میزان جذب آب بیشتری دارند. بتن ساخته شده از این طریق نوعاً کارآیی و دوام خوبی داشته و مقاومت آن در برابر عمل ذوب و انجماد مناسب است. باید توجه داشت که بتن بازیافتی باید عاری از مواد شیمیایی، رس و سایر مواد ریزدانه باشد.

۵-۳-٦- آب

طبق دیدگاه سنتی آب آشامیدنی برای تهیه بتن مناسب می‌باشد. البته این بدان معنا نیست که از آب غیرشرب نمی‌توان برای تهیه بتن استفاده کرد، هرچند محدودیت‌هایی نیز در استفاده از آن وجود دارد. آب دریا را هیچگاه نباید در بتن مسلح استفاده کرد.

۵-٤- افزودنی‌ها

افزودنی‌های شیمیایی در بتن برای اثرگذاری بر خواص بتن تازه و سفت‌شده استفاده می‌شوند. در حالی که انواع مختلف افزودنی در مقیاس صنعتی وجود دارد، ولی همواره در روسازی بتنی و در شرایط خاص از افزودنی‌های هواساز، افزودنی‌های کنترل گیرش، افزودنی‌های کاهنده آب و فوق روان‌کننده‌ها استفاده می‌شود. تکنولوژی مواد افزودنی با سرعت بالایی در حال پیشرفت است و همواره افزودنی‌های جدیدی در حال تولید هستند

که می‌توانند در روسازی بتنی مورد استفاده واقع شوند.

۵-٤-۱- افزودنی‌های هواساز

برای محافظت از تخریب بتن طی فرآیند ذوب و انجماد از افزودنی‌های هواساز استفاده می‌شود. هدف اصلی آن‌ها ایجاد یک سیستم با فضای خالی متشکل از حباب‌های ریز کروی به قطر ۰/۰۵ تا ۱/۲۵ میلی‌متر در بتن با فاصله متوسط کم‌تر از ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. هوا باید ۹ درصد از سهم ملات یا ۷/۵ درصد حجم کل مخلوط بتن برای بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه برابر با ۹/۵ میلی‌متر و تا ٤ درصد برای بزرگ‌ترین اندازه مخلوط برابر با ٦٤/۵ میلی‌متر را در بر بگیرد. این امر به این دلیل است که سیستم حفره‌های هوا از ملات مخلوط محافظت می‌کند و ملات کم‌تری در مخلوط درشت‌دانه وجود دارد. هوای محبوس در بتن کارآیی آن را نیز افزایش می‌دهد.
روسازی بتنی در معرض محیط قرار دارد و به جز حالتی که به دلیل شرایط آب‌وهوایی فرآیند ذوب و انجماد وجود ندارد، از افزودنی‌های هواساز باید استفاده می‌شود. برخی از تولیدکنندگان مواد افزودنی، محصولات ویژه روسازی بتنی را تولید می‌کنند.

۵-٤-۲- افزودنی‌های تسریع‌کننده

افزودنی‌های تسریع‌کننده فرآیند عادی گیرش بتن را سرعت می‌بخشد. کلرید کلسیم به دلیل هزینه پایین از جمله سرعت‌دهنده‌های مشهور محسوب می‌شود ولی بزرگ‌ترین عیب آن افزایش نرخ خوردگی آرماتور، میلگردهای اتصال و میل‌مهارها می‌باشد. در این میان سرعت‌دهنده‌های بدون کلرید نیز برای استفاده در بتن مسلح، وجود دارد. در هوای سرد، برای تعمیر روسازی و یا زمانی که لازم است روسازی به سرعت به روی جریان ترافیک باز شود، استفاده از مواد افزودنی سرعت‌دهنده می‌تواند مفید باشد.

۵-٤-۳- افزودنی‌های کندگیرکننده

افزودنی‌های کندگیرکننده باعث تأخیر در گیرش و در نتیجه افزایش زمان بتن‌ریزی، تحکیم و پرداخت نهایی سطح بتن می‌شود. مقاومت ثانویه بتن چندان تحت تأثیر این افزودنی قرار نمی‌گیرد. کندگیرکننده‌ها معمولاً در هوای گرم و یا زمانی که فاصله بین محل تولید و اجرای بتن خیلی زیاد باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-٤-٤- افزودنی‌های کاهنده آب

در حال حاضر سه نوع افزودنی کاهنده آب با دامنه کم (عادی)، متوسط و زیاد (فوق روان‌کننده‌ها) وجود دارد. کاهنده‌های با دامنه کم اجازه کاهش ۵ تا ۱۰ درصد، با دامنه متوسط کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصد و با دامنه زیاد کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصد آب را می‌دهند. این مواد، ممکن است برای تولید بتن روان با اسلامپ زیاد مورد استفاده قرار بگیرد.
در روسازی‌های بتنی، به خصوص زمانی که قالب لغزنده مورد استفاده قرار می‌گیرد بتن‌ریزی با اسلامپ کم اولویت پیدا می‌کند و نیازی به بتن روان نیست. برای رسیدن به نسبت آب به سیمان مشخص، کاهش درصد آب مخلوط و همین طور کاهش مقدار سیمان لازم ممکن است از افزودنی‌های کاهنده آب استفاده شود. برخی از افزودنی‌های کاهنده آب، مانند کندگیرکننده‌ها عمل می‌کنند. برای اجرای روسازی با قالب ثابت یا سطوح کم در کارهای دستی می‌توان از افزودنی‌های کاهنده آب استفاده کرد.

۵-۵- سازگاری مواد

هرچه در بتن از مواد مختلف بیشتری استفاده شود، موضوع سازگاری آن مواد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. میندس و همکارانش عنوان می‌کنند آثاری که ممکن است افزودنی‌ها بر سایر خصوصیات بتن داشته باشند نیز باید در نظر گرفته شود. برخی از افزودنی‌ها مانند خاکستر بادی ممکن است تأثیر افزودنی‌های هوا دهنده را تغییر دهند. معمولاً افزودنی‌هایی که توسط یک تولید کننده خاص تولید می‌شود، از لحاظ سازگاری با یکدیگر مورد آزمایش قرار می‌گیرند که بدین وسیله وقوع مشکلات احتمالی کم‌تر خواهد شد.
طبق گزارش کهن و تایابجی به علت ناسازگاری میان مواد مختلف، در برخی از انواع بتن مشخصات نامطلوبی از خود به جا می‌گذارد. این مشخصات نامطلوب عبارتند از:
۱- از دست دادن سریع کارایی (زودگیری).
۲- گیرش همراه با تأخیر (دیرگیری).
۳- ترک‌خوردگی زودرس به دلیل تولید بیش از اندازه، افت خودبه‌خود و افت بتن در اثر خشک شدن.
٤- نبود سیستم فضای خالی مناسب.
مشکلات گیرش زودرس ممکن است به مواد سیمانی خاص، واکنش بین مواد سیمانی، افزودنی‌ها و اثرات حرارتی مربوط باشد. عوامل ناسازگاری، به سختی قابل‌درک هستند

و تشخیص آن‌ها به وسیله آزمایش دشوار می‌باشد به طوری که بسیاری از مشکلات احتمالی در دماهای بالا یا پایین خود را نشان می‌دهد.
کهن و تایابجی پیشنهاد می‌کنند برای به حداقل رساندن مشکلات ناسازگاری، تنها از افزودنی‌های یک تولیدکننده استفاده شود و مقادیر مصرفی آن کم‌تر از مقدار حداکثر بیان‌شده توسط کارخانه لحاظ شود. همچنین تنها مواد سیمانی مشروح در مشخصات پروژه و یا براساس استانداردهای ASTM به کار برده شود. در اختلافات دمایی قابل‌توجه، توصیه می‌شود که از طرح‌های اختلاط جداگانه‌ای برای آب‌وهوای سرد و گرم استفاده شود. همان طور که قبلاً بیان شد، کهن و تایابجی عنوان کردند که خاکستر بادی کلاس C ممکن است باعث مشکلات سازگاری با برخی از افزودنی‌های کاهنده آب در هوای گرم شود.
متن خلاصه فنی FHWA، تحت عنوان قراردادهایی برای شناسایی ترکیبات نامناسب مواد بتنی، ناسازگاری را «واکنش بین مواد قابل قبول که عملکرد غیرقابل قبول دارند» تعریف کرده است. برخی از یافته‌ها درباره ناسازگاری عبارتند از:

- تعدادی آزمایش نسبتاً ساده کارگاهی برای تشخیص قابلیت ناسازگاری وجود دارد.
- استفاده از خاکستر بادی حاوی تری‌کلسیم‌آلومینات ممکن است به دلیل کافی نبودن سولفات برای کنترل عمل هیدراتاسیون منجر به سخت شدن سریع شود.
- برخی افزودنی‌های کاهنده نوع A به هیدراتاسیون تری‌کلسیم‌آلومینات سرعت می‌بخشد.
- افزایش حرارت، میزان فعل‌وانفعالات شیمیایی را افزایش می‌دهد و ممکن است موادی را که در حاشیه سازگاری قرار دارند، به ترکیبات ناسازگار تبدیل کند.
- استفاده از انتقال بدون اختلاط در روسازی بتنی ممکن است سبب تشدید مشکلات مربوط به گیرش بتن شود.
- برعکس، گیرش همراه با تأخیر ممکن است خطر ترک‌های ناشی از افت خمیری را افزایش دهد.
- خصوصیات شیمیایی مواد نشانه‌هایی را در بر دارد، من‌جمله این که، مواد ریز سیمانی با مقدار بالای تری‌کلسیم‌آلومینات یا مقدار کم سولفات یا خاکستر بادی با درصد بالای اکسیدکلسیم از جمله مواد شیمیایی است که می‌توانند مشکل‌ساز شوند.
- اصلاحات احتمالی کارگاهی برای تصحیح مشکلاتی از قبیل اصلاح نوع

مکمل‌های سیمانی، منبع تأمین و کمیت آن، اصلاح نوع یا مقدار افزودنی‌های شیمیایی و یا تغییر در توالی و حرارت اختلاط می‌باشد.

دو گزارش FHWA اطلاعات بیشتری را درباره این موضوع ارائه کرده‌اند.

ون دام و همکارانش[1] دوام روسازی بتنی که زودتر از موعد به روی ترافیک باز شدند را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به این که مقاومت خمشی این بتن‌ها باید در مدت ۸-٦ یا ٢٤-٢٠ ساعت احراز شود، نیازمند سیمان و افزودنی‌های با کمیت و تنوع بیشتری است. بنابراین، برای واکنش‌های بین سیمان و ماده افزودنی قابلیت بیشتری وجود دارد که ممکن است در آینده باعث بروز مشکلات مربوط به دوام شود.

٥-٦- تسلیح با الیاف

تاکنون استفاده از بتن مسلح با الیاف در روسازی‌های بتنی، به جز در روکش‌های بتنی پیوسته و روکش‌های فوق نازک که در ساخت آن‌ها هم از الیاف فلزی و هم از الیاف مصنوعی استفاده می‌شود، متداول نشده است. برای بهبود مقاومت خمشی و عملکرد خستگی بتن از الیاف استفاده می‌شود. تعیین فواید استفاده از الیاف در روکش‌های بتنی، امری دشوار است. کاربرد الیاف در گزارش شماره ٥٤٤ کمیته ACI با عنوان «گزارشی بر بتن مسلح به الیاف» مورد بحث قرار گرفته است.

بتن مسلح به الیاف فلزی برای طراحی روسازی‌های نازک‌تر با فاصله بیشتر درزها به کار برده می‌شوند که این امر با مشکلاتی همراه است. در دهه ۱۹۸۰ چند مورد روسازی بتنی با استفاده از الیاف فلزی در فرودگاه‌های نظامی و غیرنظامی ساخته شد. این روسازی‌ها عموماً نازک و بزرگ بودند. گاهی اوقات تنها ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر (٤ تا ٦ اینچ) ضخامت داشتند و ۱۵ تا ۳۰ متر (۵۰ تا حتی ۱۰۰ فوت) بین درزهای انقباضی فاصله وجود داشت. در مدت زمانی کوتاه گزارش‌هایی مبنی بر وجود ترک‌های گوشه گسترده‌ای در این فرودگاه‌ها ارائه شد. بُعد بزرگ دال‌ها به نسبت سطح مقطع نازک‌تر، تنها به افت خیلی کمی بین بالا و پایین دال نیاز داشت تا در زمین تاب بردارد. زمانی که ترافیک بروی آن باز شد، شکستگی‌های گوشه گسترده‌ای در این دال‌ها گسترش پیدا کرد.

1- Van Dam et al

فصل ششم

طرح اختلاط و تعیین نسبت‌ها

پس از انتخاب مواد با کیفیت مناسب مطابق با فصل پنجم، لازم است برای پروژه موردنظر براساس ملاحظات اقتصادی، طرح اختلاطی ارائه شود که مشخصات لازم برای بتن تازه و بتن سخت‌شده را داشته باشد. اصلی‌ترین ویژگی بتن تازه، کارآیی است. مشخصات مربوط به استحکام و دوام در حالت تازه و سخت‌شده باید برآورده شود. اگر مشخصات بتن تازه مناسب نباشد، تحکیم و پرداخت نهایی بتن به صورت مطلوبی انجام نخواهد شد و مشخصات بتن سخت شده، بی‌ارزش خواهد بود. متداول‌ترین روش برای تعیین نسبت اختلاط، مطابق با استاندارد شماره ۲۱۱ کمیته ACI تحت عنوان روش استاندارد انتخاب نسبت‌ها برای بتن معمولی، بتن سنگین و بتن حجیم و روش حجم مطلق می‌باشد. این روش در بخش ۱۰ از کتاب میندس و همکارانش و بخش ۹ کتاب کوسماتکا و همکارانش مورد بحث قرار گرفت. این دستورالعمل از مراحل زیر استفاده می‌کند:

- جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، شامل:

✓ تجزیه‌وتحلیل الک (توزیع دانه‌بندی) مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه؛
✓ وزن واحد حجم خشک میله خورده مصالح سنگی درشت‌دانه؛
✓ وزن‌مخصوص حجمی و ظرفیت جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه؛
✓ ضخامت دال (از آنجایی که حداکثر اندازه مصالح سنگی درشت‌دانه باید کم‌تر یا برابر یک‌سوم حداقل بعد دال باشد)؛
✓ استحکام مورد نیاز؛ و
✓ شرایط محیطی.

- انتخاب اسلامپ- معمولاً مقدار اسلامپ برای قالب ثابت ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر (۳-۱ اینچ) به بالا در نظر گرفته می‌شود و در صورت استفاده از قالب متحرک، اسلامپ پایین‌تری مورد نیاز است.
- انتخاب بزرگ‌ترین اندازه مصالح سنگی- اندازه آن یک‌سوم ضخامت روسازی در نظر گرفته می‌شود، اگرچه مصالح موجود یا نگرانی از ترک‌خوردگی نوع D ممکن است شرایطی را ایجاد کنند که انتخاب سنگدانه‌های کوچک‌تر اجتناب‌ناپذیر باشد. ممکن است در بسیاری از نواحی ۱۹ یا ۲۵ میلی‌متر (۳/٤-۱ اینچ) بالاترین اندازه موجود باشد. با این حال هر قدر اندازه مصالح درشت‌دانه‌تر باشد، عملکرد روسازی بهبود پیدا می‌کند.
- تخمین مقدار آب‌وهوا- معمولاً در ساخت بتن روسازی نسبت به بتن ساختمانی، آب کم‌تری استفاده می‌شود. دلیل این کار نیاز اسلامپ کم‌تر برای بتن روسازی است. این مقدار می‌تواند با افزودنی‌های کاهنده آب، به مقدار بیشتری کاهش یابد. همان‌طور که در فصل پنجم بحث شد، استفاده از یک دانه‌بندی بهینه مقدار آب لازم برای اختلاط را کاهش می‌دهد. مقدار هوا براساس حداکثر اندازه سنگدانه (و در نتیجه براساس نسبت چسب خمیری) و شرایط محیطی (ملایم، معتدل، یا سخت) تعیین می‌شود. ACI 211.1، برای مصالح درشت‌دانه با حداکثر اندازه ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ)، جداولی را تهیه کرده است. اغلب روسازی‌ها در معرض شرایط سخت محیطی قرار می‌گیرند.
- تعیین نسبت آب به سیمان یا w/c (w/cm)- این نسبت براساس استحکام و دوام، هرکدام که کم‌تر باشد، ملاک عمل قرار می‌گیرد.
- محاسبه مقدار سیمان یا مواد سیمانی- این مقدار با تقسیم آب به سیمان تعیین می‌شود. مقدار کل سیمان و یا سایر مواد سیمانی در صورت استفاده مانند خاکستر بادی و یا سرباره از این طریق تعیین خواهد شد. اگر از خاکستر بادی یا سرباره استفاده شود، به صورت حجمی یا وزنی جانشین سیمان خواهد شد. این مقادیر با هم برابر نیستند، چرا که وزن مخصوص این مواد برابر وزن مخصوص سیمان نیست. با کاهش مقدار آب با استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب، مقدار سیمان موردنیاز متناظر با نسبت w/c نیز کاهش می‌یابد.
- تخمین مقدار مصالح سنگی درشت‌دانه- این کار به حداکثر اندازه مصالح سنگی درشت‌دانه و مدول نرمی (یا خاصیت روغن‌کاری) ماسه بستگی دارد. با مصالح سنگی درشت‌تر، حجم بالاتری از مصالح سنگی درشت‌دانه استفاده خواهد شد،

چرا که ذرات درشت‌تر جایگزین درشت‌دانه‌های ریزتر، ریزدانه‌ها و خمیر سیمانی می‌شوند. با استفاده از مصالح ریزدانه با مدول نرمی پایین‌تر، به خاطر این که مصالح ریزدانه کم‌تری برای کارآیی و روانی مخلوط موردنیاز است، می‌توان از مصالح درشت‌دانه بیشتری استفاده کرد.

- تخمین مقدار مصالح سنگی ریزدانه- در این مرحله، جرم آب، سیمان، سایر مواد سیمانی و مصالح سنگی درشت‌دانه مشخص می‌شود. با استفاده از وزن‌مخصوص، حجم این مواد به ازای هر مترمربع یا یاردمربع به اضافه درصد هوا مشخص می‌شوند. آنچه از حجم بتن باقی می‌ماند باید ماسه ریزدانه باشد. حجم مصالح سنگی ریزدانه و وزن مخصوص آن برای تعیین جرم این مصالح استفاده می‌شوند.
- اصلاح رطوبت مصالح- مقدار آب مخلوط که قبلاً تخمین زده می‌شود، براساس مصالح خشک با سطح اشباع است. اگر مصالح دارای رطوبت سطحی باشد، به آب مخلوط افزوده می‌شود و مقدار بیشتری از مصالح خیس مورد نیاز خواهد بود. اگر مصالح خشک باشد از مقدار آب مخلوط کم خواهد شد.
- تهیه مجموعه آزمایشی- وزن مخلوط‌هایی که تا بدین‌جا اندازه‌گیری شده‌اند، به صورت تخمینی است و باید صحت آن در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد. افزودنی‌های کاهنده آب و هواساز باید به گونه‌ای تنظیم شوند تا میزان اسلامپ صحیح و مقدار هوا بدست آید. با تأیید وزن واحد حجم، راندمان مخلوط تعیین می‌شود. مخلوط‌های آزمایشی حائز اهمیت است و مراحل سپری‌شده تا بدین‌جا، نقطه شروعی برای طرح یک مخلوط مناسب به حساب می‌آیند.

اخیراً، کمیته ACI 211 نشریه‌ای با عنوان «راهنمای انتخاب نسبت‌ها برای بتن بدون اسلامپ» را منتشر کرده است. این آیین‌نامه مخلوط‌های با اسلامپ کم‌تر از ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) را پوشش می‌دهد که شامل بتن متراکم شده با غلطک (پیوست ۳) و بتن متخلخل (پیوست ٦) می‌باشد. جداول ارائه شده در این آیین‌نامه به مصالح با حداکثر اندازه ۳۸ میلی‌متر (۱۱/۲ اینچ) محدود می‌شوند. بتن متداول روسازی که براساس تعیین نسبت‌ها به روش قبل محاسبه می‌شوند، در این راهنما مورد توجه قرار نمی‌گیرند.

برای کاهش افت بتن در روسازی، مقدار آب و خمیر سیمانی باید به حداقل برسد. مجموع مقدار آب کم‌تر از ۱٤٥ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۵۰ پوند بر یاردمکعب) و مجموع حجم خمیر کم‌تر از ٦۰ درصد ترجیح داده می‌شود. به همین دلیل افزودنی‌های کاهنده آب مورد نیاز خواهد بود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دانه‌بندی بهینه مصالح نیز آب

مورد نیاز را کاهش می‌دهد.

٦-١- کارآیی

کارآیی، به سهولت بتن‌ریزی، تحکیم و پرداخت سطح بتن تازه ریخته شده باز می‌گردد که بدون جدا شدن سنگدانه‌ها باشد. با این که معمولاً این مسئله با آزمایش سریع، ساده و ارزان اسلامپ انجام می‌شود، اما همه فاکتورهای لازم برای کارآیی مطلوب را اندازه‌گیری نمی‌کند. در روسازی بتنی با قالب متحرک، عوامل تأثیرگذار بر کارآیی عبارتنداز:

- جداشدن سنگدانه‌ها حین انتقال و بتن‌ریزی؛
- سهولت گیرش؛
- لبه‌های خوش فرم با اندازه اسلامپ لبه کم یا بدون اسلامپ؛ و
- پرداخت نهایی ناچیز یا بدون نیاز به پرداخت نهایی.

طبق دستورالعمل بالا، اندازه اسلامپ مناسب برای تعیین مقدار آب مخلوط‌های آزمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم است بتن با قالب متحرک (لغزشی) به اندازه کافی سخت باشد تا از جای خود حرکت نکند و با جدا شدن از قالب نیز نباید افت زیادی داشته باشد. در نتیجه به طور معمول مقدار اسلامپ ۲۵-۵ میلی‌متر (۲-۱ اینچ) یا کم‌تر، مناسب می‌باشد. همچنین افت در لبه اغلب نشان‌دهنده آب زیاد در مخلوط می‌باشد. می‌توان در قالب‌های ثابت از اسلامپ بالاتری استفاده کرد.

با این که تصور می‌شود عامل اصلی کارآیی میزان آب است ولی فاکتورهای زیر نیز می‌تواند بر آن تأثیر بگذارند:

- مصالح سنگی- اندازه، دانه‌بندی، شکل ذره، آب مورد نیاز و تغییر پذیری؛
- سیمان- مقدار سیمان و آب مورد نیاز سیمان؛
- خاکستر بادی (در صورت استفاده)- بر روی گیرش اولیه، آب مورد نیاز و پرداخت نهایی تأثیر دارد؛
- سیمان سرباره‌ای و سرباره کوره آهن‌گدازی- بر روی پرداخت نهایی و برش روسازی تأثیر دارد؛
- آب- مجموع آب مورد نیاز؛ و
- افزودنی‌ها- بتن اسفنجی کارآیی بهتری از خود نشان می‌دهد، افزودنی‌های کاهنده آب مقدار آب مورد نیاز را کاهش می‌دهد و در عین حال کارآیی را بهبود می‌بخشد.

٦-٢- مقاومت

هر دو آیین‌نامه ACI 211.1 و ACI 211.3 از مقدار مقاومت فشاری لازم برای تعیین نسبت w/c استفاده می‌کنند. ACI211.3 بیان می‌کند که اگر مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری ارجح باشد، رابطه بین w/c و مقاومت خمشی باید از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و با استفاده از مصالح مصرفی مشخص شود.

به عنوان یک قانون کلی، مقاومت خمشی بتن، ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن است. این نسبت در سنگدانه شکسته بالاتر است که باعث خمش بهتر می‌شود. این نسبت در سنگدانه گردگوشه مانند شن پایین‌تر است.

طبق تجربیات گذشته، برای رسیدن به عملکردی مناسب در روسازی، مقاومت ضروری نیست. همان طور که هاردی کراس[1] بیان کرده است: «مقاوت ضروریست اما از اهمیت کم‌تری برخوردار است». اگرچه پورفسور کراس به احتمال زیاد در خصوص بتن سازه‌ای صحبت می‌کند، ولی مطلب وی در خصوص بتن روسازی بیشتر صحت دارد. می‌توان با اطمینان بیان کرد که هیچ روسازی بتنی در اثر فشار خراب نشده است، ولی این امکان وجود دارد که روسازی‌های نازک در مقابل بار اضافی در خمشی یا برش پانچ خراب شوند. در حقیقت، بسیاری از مشکلات، ناشی از افزودن بیش از اندازه سیمان به بتن روسازی با هدف واهی افزایش مقاومت می‌باشد.

روسازی‌های بتنی برای مقابله با خستگی طراحی می‌شوند. خستگی همان فرسودگی و کاهش مقاومت مصالح است و علت آن اعمال بار کششی دوره‌ای است که معمولاً کم‌تر از مقاومت حد کسیختگی مصالح می‌باشد. خستگی موضوع مهمی است. مصالحی که برای تحمل یک بار به طور ایمن طراحی شده‌اند، ممکن است تحت اعمال همان بار به طور متناوب خراب شوند. بارهای متناوب باعث ایجاد ترک می‌شود و به مرور زمان به دلیل تمرکز فشارهای بالاتر به سایر نواحی گسترش می‌یابند. در نهایت هنگامی که ترک ایجاد شده در امتداد طول به اندازه‌ای توسعه پیدا کند که اعمال بار سبب ایجاد تنشی فراتر از حد مقاومت نهایی شود، مصالح مصرفی دچار گسیختگی خواهد شد.

طراحی بتن برای مقابله با خستگی مبتنی بر نسبت تنش میان تنش ناشی از ترافیک و مقاومت خمشی بتن است.

$$SR = \left(\frac{\sigma}{MOR}\right)$$ رابطه ٦-١

1- Hardy Cross

که در آن σ= تنش کششی ناشی از بار وارده به بتن، MOR= مدول گسیختگی یا مقاوت خمشی بتن می‌باشد. اگر نسبت تنش یک یا نزدیک به یک باشد، بتن بعد از یک دوره کوتاه دچار گسیختگی می‌شود. اگر این نسبت خیلی پایین باشد، دوره‌های بارگذاری بیشتری قابل تحمل خواهد بود.

مقاومت خمشی بتن یا مدول گسیختگی، با استفاده از آزمایش خمش یک‌سوم نقطه (ASTMC78 2002) و یا آزمایش خمش مرکزی (ASTM C293 2002) تعیین می‌شود. تیر مورد آزمایش دارای ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۵۰۰mm (۶×۶×۲۰ in) می‌باشد. آزمایش یک‌سوم نقطه (ASTMC78 2002) بهتر است، زیرا یک‌سوم مرکزی تیر بدون هیچ برشی در معرض خمش خالص قرار می‌گیرد. برخی از مراکز آزمایشگاهی از آزمایش نقطه مرکزی استفاده می‌کنند. آزمایش یک‌سوم نقطه اطلاعات کم‌تری را می‌دهد ولی از نظر مقاومت خمشی سازگاری بیشتری نسبت به آزمایش نقطه مرکزی دارد. آزمایش‌های دیگری را هم می‌توان مورد استفاده قرار داد که شامل مقاومت کششی مجزا و مقاومت فشاری می‌شود.

آزمایش مورد استفاده بتن در مراکز و سازمان‌های آزمایشگاهی متفاوت است. براساس بانک اطلاعاتی انجمن روسازی بتنی آمریکا که مشتمل بر داده‌های ایالتی در سال ۱۹۹۹ بود، ۱۲ ایالت برای بررسی بتن از مقاومت خمشی استفاده کردند که از میان آن‌ها ۹ ایالت از آزمایش نقطه یک‌سوم و سه ایالت هم از آزمایش نقطه مرکزی استفاده کرده‌اند. یک ایالت هم به صورت همزمان از آزمایش یک‌سوم نقطه و مقاومت فشاری استفاده کرده است. از طرف دیگر، ۲۱ ایالت هم از آزمایش مقاومت فشاری بهره جست و یک ایالت هم از آزمایش مقاومت کششی مجزا استفاده کرد. برای ایالت‌های آمریکا که از آزمایش مقاومت خمشی استفاده می‌کنند، بازه مدول گسیختگی مورد نیاز بین ۳۱۰۰ و ۴۵۰۰ کیلوپاسکال (۴۵۰ psi و ۶۵۰) است که در روز ۷، ۱۴ و یا ۲۱اُم اندازه‌گیری می‌شود.

سازمان هواپیمایی فدرال برای تأیید بتن روسازی فرودگاه‌ها به حداقل مقاومت خمشی ۴۱۳۶ کیلوپاسکال (۶۰۰ psi) ۲۸ روزه نیاز دارد. در برخی از پروژه‌های خاص ممکن است این مقدار بیشتر در نظر گرفته شود. برای روسازی‌هایی که محل رفت‌وآمد هواپیماهای سبک با وزن ۱۳۵۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰ pounds) هستند، حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۰/۷ مگاپاسکال (۴۴۰۰ psi) مورد قبول است. الزامات مربوط به بتن در بخش P-150 نشریه روسازی‌های بتنی با سیمان پرتلند با عنوان «استانداردهای اجرایی ویژه فرودگاه‌ها»، AC 150/5370-10B ارائه شده است.

باید به یاد داشت مدول گسیختگی که برای پذیرش و تأیید مورد استفاده قرار می‌گیرد و

مدول گسیختگی که برای طراحی استفاده می‌شود باهم تفاوت دارند. به دلیل این که ممکن است برای هر بتن که مدول گسیختگی کم‌تر از مقدار حداقل دارد دستور تخریب صادر شود، پیمانکاران با بتن مقاوم‌تر از مقدار مورد نیاز، روسازی را اجراء می‌کنند. با وجود آن که عملکرد اولیه پیمانکاران یا مهندسین با آزمایش هفت روزه بتن تعیین می‌شود اما تعیین عمر خستگی ممکن است چند دهه به طول بیانجامد. بنابراین در طراحی روسازی نسبت به حداقل استاندارد مورد پذیرش، باید از میزان مدول گسیختگی بالاتری استفاده کرد.

برای نسبت تنش مورد نظر، تا قبل از خرابی روسازی براثر خستگی خمشی، بار متناوب مشخصی پیش‌بینی شده است. رابطه خستگی پیش رو توسط پاکارد و تایابجی در سال ۱۹۸۵ برای روش طراحی انجمن سیمان پرتلند ارائه شد:

رابطه ٦-٢ $\text{For SR} \geq 0.55, \log N_f = 11.737 - 12.077(\text{SR})$

رابطه ٦-٣ $\text{For } 0.45 < SR < 0.55, N_f = \left(\frac{4.2577}{\text{SR} - 0.4325}\right)^{3.268}$

$\text{And for SR} \leq 0.45,$. تکرار نامحدود است

برای دستیابی به عمر بیشتر روسازی در مقابل خستگی، نسبت تنش باید کاهش یابد. برای این کار می‌توان تنش خمشی وارد به روسازی را برای بار داده شده کاهش داد (با زیاد کردن ضخامت آن) و یا این که مدول گسیختگی را افزایش داد.

برای ترکیب آثار خستگی ناشی از بزرگی و شکل بارهای مختلف، نسبت تنش ناشی از هر وسیله باید مشخص شود؛ سپس، برای محاسبه تعداد تکرار قابل پذیرش N_f در هر نسبت تنش از معادلات خستگی مانند رابطه ٦-٢ استفاده می‌شود. برای محاسبه تابع توزیع تجمعی خرابی (CDF) براساس فرضیه خستگی ماینر[1] خواهیم داشت:

رابطه ٦-٤ $$\text{CDF} = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}}$$

که در آن i= تعداد گروه‌های بار یا اشکال بار، n_i= تعداد واقعی تکرار گروه بارi، N_{fi}= تعداد تکرار مجاز گروه بار i، نسبت n_i/N_{fi} بیانگر بخشی از عمر خستگی روسازی، مصرف شده توسط گروه بار i است. کسر CDF ممکن است بیانگر یک نسبت باشد که در این صورت باید کم‌تر یا مساوی ۱ یا در ۱۰۰ ضرب شود که بیانگر درصد است.

مدل جدید خستگی روسازی بتنی برای برنامه رایانه‌ای طراحی روسازی بتنی راه انجمن

1- Miner

روسازی بتنی آمریکا، تهیه شده است. ارتقاء اصلی سیستم، استفاده از اطلاعات خستگی اضافی است که بعد از ارائه رابطه ٦-۲ به کار گرفته می‌شود. نسبت تنش و کل تخریب تجمعی از رابطه ٦-۱ و ٦-٤ قابل محاسبه است. فرمول تجدیدنظر شده خستگی به شرح ذیل است:

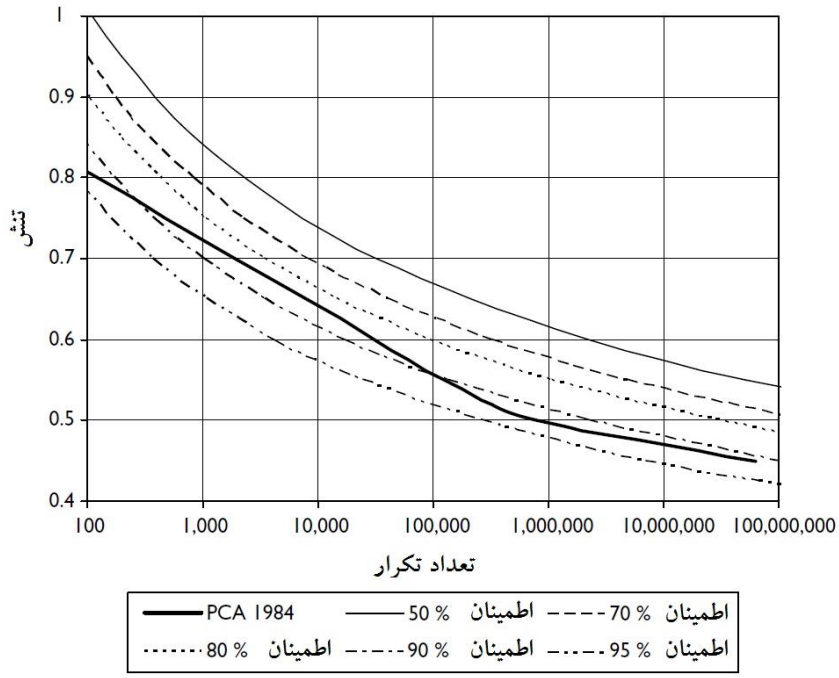
$$\log N_f = \left[\frac{-SR^{-10.24}\log(1-P)}{0.0112}\right]^{0.217}$$ رابطه ٦-٥

P= احتمال تخریب و بنابراین (1-P)= احتمال سالم ماندن و سایر متغیرها هم قبلاً تعریف شده‌اند. روابط خستگی که با معادلات ٦-۲ و ٦-٥ مشخص شدند با شکل ٦-۱ قابل مقایسه هستند.

مشخص شد که رابطه ٦-۲ خستگی انجمن سیمان پرتلند، تقریباً تا ۹۰ درصد قابلیت‌اطمینان دارد و بیانگر این موضوع است که فقط ۱۰ درصد روسازی‌ها قبل از پایان عمر طراحی از بین می‌روند. برنامه روسازی راه StreetPave در فصل ۹ با جزئیات کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

٦-۳- دوام

مسلماً دوام در مورد روسازی نسبت به مقاومت از اهمیت بیشتری برخوردار است. معمولاً روسازی در معرض محیط خشنی قرار دارد. در مناطقی مانند محل زندگی نویسنده در شمال شرقی اوهایو، روسازی‌ها، پل‌ها و سایر زیرساخت‌ها در زمستان به طور مداوم در معرض مصالح ضدیخ قرار می‌گیرند. مصالح عمرانی اندکی وجود دارد که خصوصیات آن‌ها به واسطه اثرات مکرر آب شور به ویژه در طول سیکل‌های مربوط به ذوب و انجماد، بهبود یافته باشد. دوره‌های ذوب و انجماد و کلریدها چالش‌های مهمی را برای دوام روسازی ایجاد می‌کنند. در کنار استفاده از مصالح سنگی با دوام، یک نسبت پایین آب به سیمان نیز باید به کار رود. این نسبت ممکن است کم‌تر از مقدار مورد نیاز برای مقاومت بتن باشد.



شکل ٦-١: مقایسه روابط خستگی PCA ١٩٨٤ و برنامه StreetPave

٦-٣-١- دوام ذوب- انجماد

دوره‌های تکراری ذوب و انجماد می‌تواند به مرور زمان به بتن آسیب وارد کند، مگر این که فضاهای خالی مناسبی در آن تعبیه شده باشد. همان طور که در فصل ۵ بحث شد، هوا با استفاده از افزودنی‌های هواساز، وارد بتن می‌شود. اگرچه درصد فضای خالی برای بتن سخت شده مهم است ولی این مقدار برای بتن تازه اندازه‌گیری می‌شود. درصد فضای خالی مناسب با استفاده از جداول ارائه شده در ACI 211.1 مشخص می‌شود. امکان ارزیابی سیستم فضای خالی بتن سخت شده با استفاده از تحلیل سنگ‌نگاری وجود دارد اما این روند هزینه‌بر است و تنها برای پروژه‌های بزرگ یا بخشی از بررسی‌های کلی یا قانونی می‌تواند لحاظ شود.

کوهن و تایابجی بیان می‌کنند که:

- مخلوط‌های آزمایشی برای تعیین مقدار مناسب افزودنی‌های هواساز لازم می‌باشد.
- نمونه آزمایشی باید به اندازه زمان حمل از محل تولید تا محل اجراء نگه داشته

شود، زیرا ۱ یا ۲ درصد هوا در طول این مدت از بین برود.

- در نمونه‌های مشابه، افزایش میزان هوا مقاومت بتن را کاهش می‌دهد.
- قالب لغزنده (متحرک) در حین استحکام بتن می‌تواند میزان هوا را یک تا دو درصد کاهش دهد.

در بتن غلطکی و بتن متخلخل، دوام در برابر ذوب و انجماد حائز اهمیت است. ACI 211.3 در این مورد بیان می‌کند: اگرچه مقاومت بتن غلطکی متراکم در برابر سیکل‌های مخرب ذوب و انجماد در برخی از روسازی‌ها و سازه‌ها مناسب بوده است، اما بتن غلطکی متراکم را نباید در برابر پدیده ذوب و انجماد مقاوم دانست، مگر در شرایطی که هوادهی شده باشد و یا در حالت اشباع بحرانی از آن محافظت شود. اگر بتن غلطکی متراکم فاقد چسب سیمانی کافی باشد، فراهم کردن هوای کافی می‌تواند با مشکلاتی همراه شود که عملاً در مواردی دستیابی به آن نیز غیرممکن است. علاوه بر این هنوز روش آزمایش استانداردی برای اندازه‌گیری میزان هوای بتن غلطکی متراکم تازه تهیه نشده است.

این روند با مشاهدات پیگوت[1] در عملکرد بلندمدت بتن غلطکی متراکم در نواحی سرد در تضاد می‌باشد.

ACI 211.3 درباره بتن نفوذپذیر بیان می‌دارد، آزمایش‌های ذوب و انجماد بتن نشان‌دهنده دوام کم آن می‌باشد. زمانی که فضای خالی قادر به زهکشی بوده و خمیر سیمان هوادهی شده باشد، دوام بتن بهبود خواهد یافت. هیچ فعالیت تحقیقاتی در مورد مقاومت بتن متخلخل در برابر حملات شدید سولفات‌ها یا آب اسیدی نفوذی به درون بتن انجام نشده است. بنابراین در استفاده از این نوع بتن در شرایط محیطی شدید، احتیاط لازم باید صورت بگیرد.

بنابراین راه‌حل اصلی این است که از اشباع بتن متخلخل در طول دوره ذوب و انجماد جلوگیری شود. گزارش انجمن ملی بتن آماده با عنوان «مقاومت بتن متخلخل در برابر پدیده ذوب و انجماد»، سه مشخصه محیطی را تعریف می‌کند که عبارتند از: یخبندان خشک و یخبندان سخت خشک، یخبندان مرطوب و یخبندان سخت مرطوب. در نواحی یخبندان خشک و سخت خشک، مانند نواحی مرتفع غرب آمریکا باید لایه ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متری از مصالح تمیز در زیر بتن متخلخل تعبیه شود. بنابر احتیاط، در نواحی یخبندان مرطوب، مانند قسمت‌های میانی آمریکای شرقی نیز از این روند پیروی می‌کنند. اقدامات محافظتی ممکن در نواحی یخبندان سخت مرطوب شامل ۱۰۰ تا ٦۰۰ میلی‌متر لایه

1- Piggott

اساس، خمیر سیمانی هوادهی شده و لوله‌های سوراخ‌دار PVC برای زهکشی می‌باشد. یک روسازی بتنی متخلخل در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا در ناحیه یخبندان سخت مرطوب در طول پنج زمستان عملکرد خوبی از خود نشان داده است.

٦-٣-٢- پوسته‌شدگی

میندس و همکاران[1] بیان می‌کنند استفاده از بتنی که به اندازه کافی فضای خالی دارد، با نسبت w/c و قابلیت نفوذپذیری پایین، بهترین ساختار حفاظتی را در برابر پوسته‌شدگی ناشی از نمک خواهد داشت. این موارد همان ملاحظاتی است که برای فراهم کردن دوام مخلوط در برابر پدیده ذوب و انجماد مطرح شدند. همان طور که قبلاً بیان شد، روش‌های اجرایی تأثیر مهمی بر پوسته‌شدگی دارند.

در صورتی که اصول زیر رعایت شود مقاومت پوسته‌شدگی بتن در برابر مواد یخزدا به میزان زیادی افزایش می‌یابد:

١- حداقل میزان سیمان- ٣٣٥ کیلوگرم در هر مترمکعب.

٢- حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی- ٠/٤٥.

٣- اسلامپ کم- نباید بیشتر از ١٠٠ میلی‌متر (٤ اینچ) باشد، مگر این که از افزودنی‌های کاهنده آب استفاده شود.

٤- مصالح سنگی سالم، تمیز، بادوام و خوب دانه‌بندی شده.

٥- سامانه فضای خالی مناسب.

٦- نسبت دانه‌بندی، اختلاط، بتن‌ریزی و پرداخت مناسب.

مؤلفه مهم دیگر، عمل‌آوری در دوره خشک شدن در معرض هوا است. عمل‌آوری بتن در فصل ١٥ مورد بحث قرار می‌گیرد. دوره خشک شدن توسط هوا مقاومت در برابر پوسته‌شدگی را بهبود می‌بخشد- روسازی باید برای سی روز پیش از استفاده از مواد یخزدا بر روی آن، به منظور خشک شدن رها شود. اگرچه این مقدار برای بتن با نسبت آب به سیمان ٠/٤٠ و کم‌تر، پایین‌تر می‌باشد.

٦-٣-٣- حمله سولفاتی

کوهن و تایباجی در این مورد بیان می‌کنند اگر خاک یا آب زیرزمینی دارای سولفات باشد، لازم است مواد سیمانی در برابر حمله سولفاتی محافظت شود و نسبت آب به مواد

1- Mindess et al

سیمانی باید به طور مناسب کاهش یابد. مواد سیمانی مناسب شامل پوزولان‌ها، سرباره‌ها و سیمان با مقدار کم C_3A می‌باشد. سیمان تیپ V، بعد از تیپ II پایین‌ترین حد C_3A را دارد.

٦-٣-٤- خوردگی آرماتورها و میلگردهای اتصال

به طور معمول آرماتورها و میلگردهای اتصال در روسازی بتنی از فولاد نورد شده ساخته می‌شوند که به مرور زمان دچار خوردگی می‌شوند. امروزه در مناطقی که روسازی در معرض ذوب و انجماد قرار می‌گیرد، از آرماتورها و میلگردهای اتصال با پوشش اپوکسی استفاده می‌کنند. میل‌مهارها و میلگردهای اتصال با پوشش اپوکسی در شکل ٢-٤ و ٢-٦ نشان داده شده‌اند.

اشنایدر[1] در سال ۲۰۰۵ استفاده از حفاظت کاتودی را در مورد میلگردهای اتصال مورد بررسی قرار داد و گزارش جامعی را ارائه کرد. این سیستم از یک لایه روی به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر استفاده می‌کند که به طور مکانیکی با میلگردهای اتصال از جنس فولاد کربنی مرتبط می‌شود. لایه زیرین روی برای حفاظت کاتودی در برابر خوردگی به عنوان یک آنود عمل می‌کند. این میلگردهای اتصال با چهار میلیون سیکل بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفتند و انتقال بار مناسبی در مقایسه با میلگردهای اتصال متداول از خود نشان دادند. خوردگی میلگردهای اتصال بدون پوشش حفاظتی ساخته شده از فولاد، عامل مهمی برای عملکرد ضعیف درز می‌باشد. این موضوع در زمان قفل شدن درزها، گسیختگی درزهای مجاور و ترک‌های میانی دال بیشتر مشخص می‌شود. روش‌های حفاظتی دیگر مانند ایجاد مانع و میلگردهای اتصال مقاوم در برابر خوردگی، یا مؤثر نمی‌باشند یا دارای صرفه اقتصادی نیستند. اگرچه میلگردهای اتصال مرسوم، کارکرد مطلوبی را در روسازی با عمر خدمت‌دهی ۲۰ ساله دارند اما میلگردهای اتصال با پوشش روی می‌توانند عمر خدمت‌دهی بلندمدت روسازی را تا ۵۰ سال افزایش دهند.

٦-٤- افت و تغییر شکل حرارتی

انبساط و انقباض دال‌های روسازی بتنی در اثر افت بتن و تأثیرات حرارتی اهمیت خاصی در عملکرد روسازی دارند. همچنین تغییر شکل مطلق و نسبی بین قسمت فوقانی و انتهایی دال حائز اهمیت است. تغییر شکل مطلق دال که به دلیل کرنش یکنواخت در

1- Snyder

ضخامت دال اتفاق می‌افتد و انقباض محدود که به دلیل قفل‌وبست بین دال بتنی، اساس و زیراساس است، تنش‌های کششی را در دال ایجاد می‌کند.
گرادیان کرنش ناشی از اختلاف دما، پیچش و ناشی از رطوبت، تاب‌خوردگی نامیده می‌شود. این روند در واقع باعث بالا آمدگی یا فرورفتگی دال بتنی می‌شود. در جایی که دال از روی زیراساس بلند شود، نتیجه ضعف تکیه‌گاهی است. این روند همان طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، به ویژه در روسازی‌های بدون اتصال، موجب شکستگی گوشه می‌شود.
در طول روز قسمت فوقانی دال گرم‌تر از قسمت پایین آن است و دال به پایین تاب برمی‌دارد. اما در شب دال رو به بالا تاب برمی‌دارد. اگر دال از روی زیراساس بلند شود خطر شکستگی گوشه افزایش پیدا خواهد کرد. در هر ۲٤ ساعت یک سیکل کامل اتفاق می‌افتد و تغییرات رطوبت در دال بتنی باعث اعوجاج می‌شود. در زمان عمل‌آوری بتن، عموماً خروج رطوبت از بالای دال بیشتر از پایین آن است و اختلاف در افت بتن منجر به تاب دائمی به سمت بالا می‌شود که بعضاً به آن موج داخلی و یا اعوجاج داخلی می‌گویند.
افت ناشی از خشک شدن بتن و تغییر شکل حرارتی باید به حداقل برسد. از آنجایی که افت ناشی از خشک شدن بتن در چسب سیمانی رخ می‌دهد، مقدار چسب باید به وسیله درشت‌دانه‌هایی با حداکثر اندازه (اگر موجود باشد و به ترک‌خوردگی نوع D شکل منجر نشود) کاهش پیدا کند و همچنین تهیه مخلوط مصالح با دانه‌بندی متراکم، صورت گیرد. انقباض ناشی از خشک شدن چسب، با استفاده از مقدار کم آب و احتمالاً با استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب حاصل می‌شود. تغییر شکل حرارتی با استفاده از سنگدانه‌های با ضریب انبساط حرارتی کم، کاهش می‌یابد.
برخی از عواملی که بر افت و ترک‌خوردگی زودرس بتن تأثیر می‌گذارند عبارتند از نیاز به آب زیاد، دانه‌بندی مصالح مخلوط و نوع مصالح درشت‌دانه. مقدار زیاد سیمان، از ۲۹۵ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه ریزدانه (مدول نرمی کم‌تر از ۳/۱) ممکن است نیاز به آب را افزایش دهد. دانه‌بندی مصالح سنگی مقدار چسب و کارآیی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مصالح درشت‌دانه متفاوت دارای ضریب حرارتی متفاوتی هستند که تغییر شکل و حساسیت حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر این برخی از افزودنی‌ها مانند کلرید کلسیم به عنوان یک تسریع کننده و کاهنده آب ممکن است باعث افزایش میزان افت بتن شوند.

٦-٥- مثال تعیین نسبت‌های مخلوط

دو نمونه طرح اختلاط در زیر نشان داده شده‌اند. در اولی بیشینه اندازه درشت‌دانه برابر ۳۸ میلی‌متر (۱ ۱/۲ اینچ) و در دومی برابر ۱۹ میلی‌متر (۳/٤ اینچ)، می‌باشد. اندازه بزرگ‌تر درشت‌دانه افت را کاهش خواهد داد.

٦-٥-١- درشت‌دانه‌ها با اندازه بزرگ

۱- داده‌های مورد نیاز: سیمان تیپ I با وزن مخصوص ۳/۱۵؛ وزن مخصوص حجمی ریزدانه (SSD) ۲/٦۳ مدول نرمی ۲/۷۰؛ درشت‌دانه با اندازه حداکثر ۳۸ میلی‌متر (۱ ۱/۲اینچ)، وزن مخصوص حجمی (SSD) ۲/٦۸، وزن واحد حجم خشک میله خورده ۱٦۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب. ضخامت روسازی ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ). مقاومت خمشی لازم ۲۸ روزه برابر ٤/۱ مگاپاسکال (٦۰۰ psi) تقریباً متناسب با مقاومت فشاری ۳۱ مگاپاسکال (٤۵۰۰ psi) بر پایه آزمایش‌های انجام شده بر مصالح محلی می‌باشد. روسازی در معرض ذوب و انجماد قرار دارد.

۲- اسلامپ مورد نظر: برای قالب لغزنده، اسلامپ بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر (۱-۲ اینچ).

۳- حداکثر اندازه سنگدانه مورد نظر: ۳۸ میلی‌متر (۱ ۱/۲ اینچ) کم‌تر از یک‌سوم ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) می‌باشد.

٤- تخمین مقدار آب‌وهوای بتن: از جداول کمیته ACI 211 (۱۹۹۱)، مقدار آب مخلوط ۱٤۵ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۵۰ پوند بر یاردمکعب) می‌باشد. مقدار آب مخلوط ممکن است با استفاده از کاهنده‌های آب، کاهش یابد. مقدار هوا برای شرایط محیطی شدید برابر ۵/۵ درصد می‌باشد.

۵- نسبت w/c: جداول کمیته ACI 211 (۱۹۹۱)، برای رسیدن به مقاومت مورد نظر ضروری است تا برابر با ۰/٤٤ باشد. با توجه به مسئله دوام نسبت مجاز w/c حداکثر برابر با ۰/۵ است. بنابراین باید از نسبت ۰/٤٤ استفاده شود.

٦- محاسبه مقدار سیمان: با تقسیم مقدار آب بر نسبت w/c، مقدار سیمان ۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۵۵٦ پوند بر یاردمکعب) بدست می‌آید.

۷- تخمین مقدار درشت‌دانه: براساس جداول کمیته ACI 211 (۱۹۹۱)، حداکثر اندازه درشت‌دانه و مدول نرمی ماسه را متقابلاً مورد بررسی قرار می‌دهیم تا حجم خشک میله خورده درشت‌دانه‌ها برابر ۰/۷۳ بدست آید. این عدد را با وزن واحد حجم خشک میله خورده درشت‌دانه‌ها ضرب می‌کنیم تا رقم ۱۱٦۸ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۹۷۱ پوند بر

یاردمکعب) را بدست آوریم.
۸- تخمین مقدار ریزدانه: حجم هر یک از مواد تشکیل دهندهٔ مخلوط را با تقسیم کردن آن بر وزن واحد حجم خودش بدست آورید. مواد تشکیل دهندهٔ تا اینجا ۰/۷٤ مترمکعب (۲۰/۱ فوت‌مکعب) می‌باشند. بنابراین مقدار باقی‌مانده یا ۰/۲٦ مترمکعب (٦/۹ فوت‌مکعب) مقدار ریزدانه‌ها می‌باشد. این عدد را در وزن واحد حجم ریزدانه‌ها ضرب کنید تا ٦۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۱۳۱ پوند بر یاردمکعب) بدست آید.
۹- اصلاح رطوبت سنگدانه‌ها: اگر دانه‌ها در حالت مصالح خشک با سطح اشباع نباشند، آب، درشت‌دانه و وزن دانه خوب، باید در شرایط متعادلی قرار داشته باشد.
۱۰- تهیه و انجام آزمایش بر روی مخلوط‌های آزمایشی لازم است.

٦-۵-۲- درشت‌دانه‌ها با اندازه نرمال

طراحی برای مصالح ۱۹ میلی‌متری مطابق روش میندس و همکارانش می‌باشد.
۱- داده‌های مورد نیاز به جز در بیشینه اندازه سنگدانه مشابه قبل می‌باشد.
۲- اسلامپ مشابه قبل است.
۳- بیشینه اندازه سنگدانه کم‌تر از یک‌سوم ضخامت روسازی است.
٤- تخمین مقدار آب‌وهوای وارد شده به بتن، براساس جداول کمیته ACI 211 (۱۹۹۱)، آب مخلوط ۱٦۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. مقدار آب مخلوط ممکن است با استفاده از کاهنده آب، کاهش یابد. مقدار هوا برای شرایط محیطی شدید برابر ٦ درصد است. با بزرگ‌ترین اندازه درشت‌دانه کم‌تر، آب بیشتری نیاز است.
۵- نسبت w/c مشابه قبل است.
٦- محاسبه مقدار سیمان: با آب بیشتر و نسبت w/c مشابه، سیمان بیشتری نیاز است. مقدار سیمان ۳۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب (٦۳٦ پوند بر یاردمکعب) برای افزایش ٤۵ کیلوگرم بر مترمکعب (۸۰ پوند بر یاردمکعب) است.
۷- تخمین مقدار درشت‌دانه: براساس جداول کمیته ACI 211 (۱۹۹۱)، حداکثر اندازه درشت‌دانه و مدول نرمی ماسه را متقابلاً مورد بررسی قرار می‌دهیم تا حجم خشک میله خورده درشت‌دانه‌ها برابر ۰/٦۳ بدست آید. این عدد را با وزن واحد حجم خشک میله خورده درشت‌دانه‌ها ضرب می‌کنیم تا رقم ۱۰۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۰۷۱ پوند بر یاردمکعب) را بدست آوریم.
۸- تخمین مقدار ریزدانه: مواد تشکیل‌دهنده تا اینجا ۰/۷۲ مترمکعب (۱۹ فوت‌مکعب) است. بنابراین مقدار باقی‌مانده یا همان ۰/۲۸ مترمکعب (۸ فوت‌مکعب)، ریزدانه را

تشکیل می‌دهد. این عدد را در وزن واحد حجم ریزدانه‌ها ضرب کنید تا ۷۳٦ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۳۰۷ پوند بر یاردمکعب) بدست آید.
۹- تنظیم رطوبت دانه: وزن آب، درشت‌دانه و ریزدانه- اگر سنگدانه‌ها در شرایط مصالح خشک با سطح اشباع نباشد، باید اصلاح شود.
۱۰- تهیه مخلوط‌های آزمایشی و انجام آزمایش بر روی آن‌ها.
مقایسه دو حالت در نظر گرفته شده در این مثال نشان می‌دهد که در صورت استفاده از مصالح سنگی ریزدانه‌تر، آب و سیمان بیشتری مورد نیاز خواهد بود که این باعث بالا رفتن هزینه‌های مخلوط و افزایش میزان افت می‌شود.

٦-٥-٣- اصلاح مخلوط در صورت مرطوب بودن مصالح سنگی

پیرو مثال قبلی، فرض می‌شود که درشت‌دانه‌ها رطوبت سطحی ۰/۵ درصد و ریزدانه‌ها رطوبت سطحی ٤/۲ درصدی دارند. مخلوط بتنی با رطوبت زیاد اسلامپ بیشتری دارد که در این حالت، مقاومت و دوام آن کاهش می‌یابد، مگر این که آب مورد نیاز آن اصلاح شود. بنابراین وزن درشت‌دانه‌ها باید در [۱۰۰/ (رطوبت سحطی + ۱)] یا ۱/۰۰۵ ضرب شود تا به رقم ۱۰۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۷۱۰ پوند بر یاردمکعب) برای درشت‌دانه‌های مرطوب برسیم. به طور مشابه، وزن ریزدانه‌ها باید در ۱/۰٤۲ ضرب شود تا به مقدار ۷۷٦ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۲٦۳ پوند بر یاردمکعب) از ریزدانه‌های مرطوب برسیم. از آنجا در واقع که ۵ کیلوگرم بر مترمکعب (۹ پوند بر یاردمکعب) از درشت‌دانه‌های مرطوب و ۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب (۵۵ پوند بر یاردمکعب) از ریزدانه‌های مرطوب را آب تشکیل داده است، این مقدار باید از آب کل مخلوط کم شود. بنابراین مقدار آب مخلوط برابر ۱۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۱۷ پوند بر یاردمکعب) خواهد شد. وضعیت رطوبت سنگدانه‌ها باید بررسی و در صورت تغییر نسبت‌ها باید دوباره اصلاح شوند.

٦-٥-٤- اصلاحات مخلوط برای مواد سیمانی مکمل

اگر بخش سیمانی به وسیله مواد سیمانی مکمل جایگزین شود، این کار بنا به شرایط و براساس مقیاس وزنی یا حجمی انجام خواهد شد، هرچند که این کار معمولاً به صورت وزنی انجام می‌شود. از آنجا که مواد سیمانی مکمل دارای وزن مخصوص متفاوت و غالباً کم‌تر از سیمان هستند، مقدار سنگدانه‌های ریز را نیز باید اصلاح کرد.
برای مثال، فرض کنید که ۳۰ درصد از سیمان مخلوط سنگدانه‌ای ۱۹ میلی‌متر (٤/٣ اینچ)

بحث شده در بالا را با خاکستر بادی با وزن مخصوص ۲/٤ جایگزین نماییم. مقدار جدید سیمان در مخلوط ۲٦۲ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود. وزن خاکستر بادی ۳۰ درصد کل مصالح یا ۱۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود. در واقع با یک وزن مخصوص کم‌تر، حجم بیشتری را اشغال می‌کند. حجم جدید سیمان برابر ۰/۰۸۳ مترمکعب و حجم خاکستر بادی برابر ۰/۰٤۷ مترمکعب می‌باشد.
حجم مصالح درشت‌دانه ثابت می‌ماند. این امر سبب افزایش حجم کل تمام مصالح تشکیل دهنده به جز ریزدانه‌ها به اندازه ۰/۷۳ می‌شود و در نتیجه مقدار ماسه به ۰/۲۷ مترمکعب کاهش می‌یابد. در نتیجه وزن اصلاح شده ماسه برابر ۷۰٦ کیلوگرم بر مترمربع خواهد بود.

٦-۵-۵- اصلاحات مخلوط برای افزودنی‌های کاهنده آب

انجام اصلاحات افزودنی‌های کاهنده آب در مخلوط بتنی تا حدی ساده‌تر است. مثلاً اصلاح مخلوط اصلی ۱۹ میلی‌متری (فقط با سیمان) با ۱۰ درصد کاهش آب مورد نیاز در اثر استفاده از این افزودنی‌ها را در نظر بگیرید. مقدار آب به میزان ۱٤۹ کیلوگرم بر مترمکعب کاسته می‌شود. در این حالت مقدار سیمان به ۳۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب کاسته خواهدشد.
مقدار مصالح درشت‌دانه مانند مواد مکمل سیمانی تغییری نخواهد داشت. این امر سبب کاهش حجم کلی تمام مصالح تشکیل دهنده به جز ریزدانه‌ها به ۰/٦۹ می‌شود و در نتیجه مقدار ماسه به ۰/۳۱ مترمکعب کاهش می‌یابد. در نتیجه وزن اصلاح شده ماسه برابر ۸۰۸ کیلوگرم بر مترمربع خواهد بود. به منظور ارزیابی مشخصات مخلوط اصلاح شده مجدداً نمونه‌های آزمایشی مورد نیاز است.

٦-٦- سرعت عمل در اجراء

اغلب این موضوع حائز اهمیت است که بازسازی و مرمت روسازی بتنی در مدت خیلی کوتاه و در زمان محدودی انجام شود. در بسیاری از حالات، مدت زمان بستن مسیر به طول شب یا تعطیلات آخر هفته محدود می‌شود. ون‌دام و همکارانش روسازی بتنی را که بعد از مدت کوتاهی به روی ترافیک باز می‌شود، بتن EOT می‌خوانند. ACI 325.11R یک مرجع مهم در خصوص سرعت عمل اجرای روسازی بتنی است. مرجع مهم دیگر «پژوهشنامه فنی اجرای سریع روسازی بتنی» TB004.02 است.
برای روسازی فرودگاه‌ها براساس استاندارد شماره P-501-4.18 از FAA، روسازی بتنی

با سیمان پرتلند، استاندارد شماره AC150/5370-10B (FAA 2005P-501-25)، مقاومت حداقل خمشی ۳۷۹۲ کیلوپاسگال (۵۵۰ psi) یا رها کردن روسازی اجراء شده به مدت ۱٤ روز پیش از بازگشایی آن به روی ترافیک الزامی است. برای باندهای پرواز با ترافیک سبک‌تر مقاومت فشاری ۲٤/۱۳ مگاپاسگال (۳۵۰۰ psi) لازم است. در روسازی فرودگاه‌ها برای باندهای خزش و فضاهای پرتردد مانند محوطه‌های بارگیری، بتن با مقاومت اولیه بالا بسیار ضروری است.

اگر این امکان وجود داشته باشد که سه یا چهار روز از روسازی استفاده نشود، حتی بتن معمولی به مقاومت کافی دست پیدا خواهد کرد و نیازی به افزودنی یا مواد خاص نیست. در یک پروژه مربوط به ساخت باند پرواز در فرودگاه بین‌المللی کلویلند اوهایو دو نوع مخلوط بتنی تهیه شد. برای قسمت‌های بحرانی باند پرواز، بتن با مقاومت اولیه بالا پیشنهاد شد. در همان اوایل، پروژه در اجرای این نوع بتن با مشکلاتی مواجه شد. در نهایت مشخص گردید که در صورت وجود یک برنامه زمان‌بندی مناسب، امکان استفاده از بتن معمولی را در تمام نقاط فرودگاه فراهم می‌کرد که اجرای آن به مراتب ساده‌تر بوده و مشکلات مذکور را نیز به همراه نداشت.

٦-٦-۱- عملیات اجرایی شبانه

در مدت بسته شدن مسیر از ابتدای غروب تا صبح زود روز بعد، باید بتن ظرف مدت ٦ الی ۸ ساعت مقاومت خمشی کافی را برای حمل ترافیک بدست آورد. این زمان محدود به برداشتن روسازی قدیمی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن جدید اختصاص دارد. عموماً مشخصات مورد نیاز عبارت از مقاومت فشاری ۲٤-۸/۳ مگاپاسگال (۱۲۰۰-۳۵۰۰ psi) یا مقاومت خمشی ۲/۸-۱/۸ مگاپاسگال (٤۰۰-۲٦۰ psi) است. در فرودگاه‌ها ممکن است برای عملیات اجرایی شبانه نیازمند مقاومت فشاری ۷-۵ مگاپاسگال (۱۰۰۰-۷۵۰ psi) در مدت ٦-٤ ساعت وجود داشته باشد.

با توجه به این که عملیات شبانه معمولاً در مورد روسازی‌هایی انجام می‌شود که ترافیک سنگینی دارند و تأخیر ناشی از ساخت‌وساز، هزینه‌های بالایی را به استفاده کنندگان تحمیل و شرایط را دشوارتر می‌کند. برای آزادراه‌ها و راه‌هایی که در آن‌ها عوارض دریافت می‌شود، معمولاً فقط اجازه عملیات اجرای شبانه صادر می‌شود.

گاهی اوقات، بازسازی روسازی فرودگاه‌ها نیز به عملیات شبانه محدود می‌شود. مثلاً فرودگاه‌های چارلستون در کارولینای جنوبی و ساوانا در جورجیا دو باند پرواز متقاطع دارد. وقتی محل تقاطع دوباند نیازمند به تعمیر و نوسازی دارد، باند پرواز جایگزینی برای

انجام پروازها وجود نخواهد داشت. پروژه فرودگاه چارلستون در سال ۱۹۹۰ و فرودگاه ساوانا در ۱۹۹٦ از روش مشابهی استفاده کرده‌اند. در طول شب دال‌های مستقل برداشته شده و بتن با مقاومت اولیه بالا جایگزین آن شد. اگر در طول بسته بودن مسیر امکان بتن‌ریزی و عمل‌آوری وجود نداشت، پانل‌های بتنی پیش‌ساخته موقت نصب می‌شد و برای بتن‌ریزی و عمل‌آوری در دوره بعد جمع‌آوری می‌شدند. تمام دال‌های روسازی محل تقاطع در انسدادهای متوالی شبانه جایگذاری می‌شدند تا در طول روز ترافیک هوایی بدون وقفه ادامه یابد. جزئیات کامل مطالعاتی توسط پشکین و همکارانش[1] انجام گرفته است.

ون‌دم و همکارانش (2005: A-1-A-2) مثال‌هایی را از سه ترکیب طراحی ارائه می‌دهند که عملکرد مناسبی را برای بتن با مقاومت اولیه بالا (EOT) در طول ۸-٦ ساعت به‌خوبی نمونه‌های طرح شده برای ۲۰-۲٤، نشان می‌دهد (جدول ٦-۱). در گذشته در بسیاری از مخلوط‌های بتنی با مقاومت اولیه بالا، سیمان مخصوص به کار می‌رفت، ولی امروزه مخلوط‌های قابل قبول ممکن است توسط سیمان‌های معمولی ساخته شوند.

٦-٦-۲- عملیات اجرایی آخر هفته

در عملیات اجرایی آخر هفته، دستیابی به مقاومت خمشی لازم ظرف مدت ۲۰-۲٤ ساعت مورد نظر است. معمولاً پروژه‌های بزرگ‌تر، تخریب و بازسازی‌های وسیع‌تری را به دنبال دارند. نمونه‌هایی از طرح اختلاط این گونه عملیات اجرایی که یک کار برجسته و رضایت‌بخش محسوب می‌شود، در جدول شماره ٦-۱ نشان داده شده است. مقاومت لازم پیش از گشودن مسیر به روی ترافیک مشابه عملیات اجرایی شبانه است با این تفاوت که حداقل زمان ممکن برای رسیدن به این مقاومت بیشتر خواهد بود. ممکن است در فرودگاه‌ها به مقاومت فشاری ۲۱-۱٤ مگاپاسگال در ۲٤ ساعت نیاز باشد.

٦-٦-۳- دوام بتن با مقاومت اولیه بالا

موضوع دوام مقوله بسیار مهمی است. روسازی‌هایی که ترافیک سنگین و محدودیت زمان اجرایی دارند، باید از دوام زیادی نیز برخوردار باشند. به گفته ون‌دام و همکارانش (Van Dam et al.) بتن با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ۸ ساعته در مقایسه با بتن با مقاومت اولیه بالا ۲۰ تا ۲٤ ساعته مقدار سیمان بیشتر و نسبت آب به سیمان کم‌تری دارند. سیمان

1- Peshkin et al

تیپ III، تسریع کننده‌ها و افزودنی‌های کاهنده آب اغلب برای ساخت بتن با مقاومت اولیه بالا در مدت زمان ٦ تا ٨ ساعت به کار می‌روند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی واضح است که بتن‌های با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ٨ ساعته نسبت به بتن با مقاومت اولیه بالا ٢٤-٢٠ ساعته دوام نامطلوب‌تری دارند. با مشاهده عملکرد ضعیف‌تر این بتن در پوسته‌شدگی ناشی از ذوب و انجماد، افزایش افت، افزایش مشکلات در دستیابی به درصد فضای خالی بتن، افزایش ترک‌های ریز در چسب سیمانی مخلوط، کاهش همگنی چسب سیمانی و افزایش میزان جذب آب مشخص این موضوع شد. البته این بدان معنی نیست که مخلوط‌های بتن با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ٨ ساعته را نمی‌توان ساخت، بلکه منظور این است که دستیابی به مشخصات مطلوب یک مخلوط با دوام در این نوع بتن دشوارتر است. بنابراین، استفاده از بتن با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ٨ ساعته نسبت به استفاده از بتن با مقاومت اولیه بالا ٢٠ تا ٢٤ ساعته ریسک بالاتری دارد و باید از زمانی که یک مخلوط خاص انتخاب می‌شود تا پایان بسته شدن یک خط عبور، مدنظر قرار بگیرد. این گفته‌ها بیانگر این است که اگر قرار باشد بتن با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ٨ ساعته استفاده شود، باید تست‌های اولیه گسترده‌ای صورت گیرد تا بتوان از دوام بتن اطمینان حاصل کرد.

یک مثال از دوام ضعیف بتن با مقاومت اولیه بالا در فرودگاه هوستون هابی، تگزاس است. تقاطع باندهای پرواز 4-22 و 12R-30L در فرودگاه هوستون هابی، مورد استفاده زیادی قرار دارد و با توجه به تأثیر زیاد این تقاطع بر مسائل اقتصادی، بسته شدن آن برای امر تعمیرات باید محدود باشد. این تقاطع ۹۵ درصد از کل ترافیک هوایی فرودگاه را در بر می‌گیرد. هنگامی که این تقاطع بسته می‌شود، فرودگاه تنها یک باند پرواز بصری، (پرواز با استفاده از ناوبری به کمک عوارض زمین (VFR)) دارد که می‌تواند عملیات پرواز را به عهده بگیرد و حتی مدت زمان کوتاه بارندگی یا مه نیز کار فرودگاه را متوقف می‌کند.

این تقاطع در سال ١٩٩٦ در عرض ١٦ روز با استفاده از بتن با مقاومت اولیه بسیار زیاد، تعمیر شد. روسازی اولیه باند پرواز با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) در زمان این تعمیر بیش از ۵۰ سال قدمت داشت و چندین بار روی آن روکش کشیده شده بود که ضخامت این قطعه به اندازه ٤٥٠ میلی‌متر (١٨ اینچ) افزایش پیدا کرد. بتن استفاده شده متشکل از مقدار قابل توجهی سیمان تیپ III، خاکستر بادی و یک فوق روان‌کننده با افزودنی تسریع کننده بود. مقاومت ٢٤ ساعته خمشی بتن، ۵/۲ مگاپاسکال (۷۵۰ psi) و مقاومت ۲۸ روزه آن ۵/۹ مگاپاسکال (۸۵۰ psi) بود. مقاومت ٢٤ ساعته، خیلی بیشتر از مقادیر معمول

برای بتن ۲۸ روزه است. از آنجایی که میزان ماده تسریع کننده خیلی زیاد بوده و قبل از پرداخت نهایی بتن کارآیی خود را از دست می‌داد، میزان استفاده از تسریع کننده را کاهش دادند که منجر به کاهش مقاومت ۲٤ ساعته بتن شد. تا اواخر دهه ۱۹۹۰، این ناحیه تعمیر شده دچار خرابی‌های قابل توجهی شد که منجر به خطای عملیاتی خلبان‌ها و انسدادهای بحرانی برای تعمیر گردید. این مسئله از طریق شکایت خلبان‌ها در مورد مشکلات مربوط به حرکت هواپیما بر روی باند پرواز 12R-30L تشخیص داده شد. اگرچه مقطع باند در خط مرکزی هموار بود ولی در مسیر چرخ‌های اصلی، تغییر شکل ناگهانی با شیب‌های یک درصدی به وجود آمده بود. مشکلات مشاهده شده شامل ترک‌خوردگی سطحی، حرکت پیش‌روند درزها، انبساط بتن و ترک‌های عمیق و کناری بود. یک بررسی قانونی مشخص کرد که بتن مورد استفاده در این پروژه تشکیل کریستال‌های همراه با تأخیر اترینگیت[1] داده است که باعث افزایش حجم بتن روسازی شده است. این حرکت آن قدر قابل توجه بود که چند تیر روشنایی در تقاطع به وسیله نیروی برشی آسیب دیدند. دلیل این امر انبساط جاده و لغزش نسبت به اساس بود. در نهایت رویه آسفالتی در مجاورت تقاطع ترک برداشته و به دلیل فشار بتن دچار انبساط و برآمدگی شده بود.

جدول ٦-۱: نمونه طرح اختلاط بتن با بازگشایی زودهنگام ترافیک (EOT) (ون‌دام و همکارانش، ۲۰۰۵)

مخلوط‌های ۱ و ۲ و ۳ که با استفاده از عامل هواساز رزین وینسول ساخته شده‌اند، عملکرد خوبی را برای بتن با مقاومت اولیه بالا ٦ تا ۸ ساعته فراهم می‌کنند.			
سازنده/ ویژگی	**مخلوط ۱**	**مخلوط ۲**	**مخلوط ۳**
سیمان تیپ ۱	۵۲۵ kg/m^3 (۸۸۵ lb/yd^3)	۵۲۵ kg/m^3 (۸۸۵ lb/yd^3)	٤۲۵ kg/m^3 (۷۱٦ lb/yd^3)
نسبت w/c	۰/٤۰	۰/۳٦	۰/٤۰
نوع تسریع کننده	غیرکلرید	غیرکلرید	کلسیم‌کلرید
کاهنده آب	–	–	–
مصالح درشت (سنگ آهک خرد شده)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)
مصالح ریز (شن طبیعی)	٤۲۷ kg/m^3 (۷۲۰ lb/yd^3)	٤۸۲ kg/m^3 (۸۱۲ lb/yd^3)	٤۲۵ kg/m^3 (۷۱٦ lb/yd^3)

1- Ettringate

اسلامپ متوسط	۱۴۰ میلی‌متر (۵/۵ اینچ)	۷۰ میلی‌متر (۲/۷۵ اینچ)	۶۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ)

جدول ٦-١: ادامه

مخلوط‌های ۵، ٤ و ٦ که تمام آن‌ها با استفاده از عامل هواساز رزین وینسول ساخته شده‌اند، عملکرد خوبی را برای بتن با مقاومت اولیه بالا ۲۰ تا ۲٤ ساعته فراهم می‌کنند.

اجزاء/ ویژگی	مخلوط ۱	مخلوط ۲	مخلوط ۳
متوسط مقدار هوای مخلوط	٪۵	٪۵	٪۵/٦
مقاومت فشاری ۸ ساعته	۱٦/٤ مگاپاسکال (۲۳۷۵ psi)	۲۰/٤ مگاپاسکال (۳۰۰۰ psi)	۱۷/۰ مگاپاسکال (۲٤٦۵ psi)
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	٤٤/۰ مگاپاسکال (٦٤۰۰ psi)	۵٦/۳ مگاپاسکال (۸۱۵۰ psi)	۵۳/۸ مگاپاسکال (۷۸۰۰ psi)
مقاومت خمشی ۸ ساعته	۲/٤ مگاپاسکال (۳۵۰ psi)	۳/۰ مگاپاسکال (٤۳۵ psi)	۲/٤ مگاپاسکال (۳۵۰ psi)
سیمان تیپ ۱	٤۰۰ kg/m^3 (٦۷۸ lb/yd^3)	٤۰۰ kg/m^3 (٦۷۸ lb/yd^3)	٤۷۵ kg/m^3 (۸۰۵ lb/yd^3)
نسبت w/c	۰/٤۳	۰/٤۰	۰/٤۳
نوع تسریع کننده	کلرید کلسیم	غیرکلرید	–
کاهنده آب	–	–	–
مصالح درشت (سنگ آهک خرد شده)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)	۱۰۳۰ kg/m^3 (۱۷۳٦ lb/yd^3)
مصالح ریز (ماسه طبیعی)	٦۲۸ kg/m^3 (۱۰٦۰ lb/yd^3)	٦۵۹ kg/m^3 (۱۰۱۰ lb/yd^3)	٦۵۹ kg/m^3 (۱۱۱۰ lb/yd^3)
اسلامپ متوسط	۸۵ میلی‌متر (۳/۳۵ اینچ)	۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ)	۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ)
متوسط مقدار هوای مخلوط	٪٦/٦	٪۵/۷	٪۵/۹
مقاومت فشاری ۲۰ ساعته	۲٤/۵ مگاپاسکال (۳۵۵۰ psi)	۱۹/۹ مگاپاسکال (۲۸۹۰ psi)	۱۷/۸ مگاپاسکال (۲۵۸۰ psi)
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	٤٦/۰ مگاپاسکال (٦٦۷۰ psi)	٤۰/٦ مگاپاسکال (۵۸۹۰ psi)	۳۹/۳ مگاپاسکال (۵۷۰۰ psi)
مقاومت خمشی ۲۰ ساعته	۳/٤ مگاپاسکال (٤۹۰ psi)	۳/۸ مگاپاسکال (۵۵۰ psi)	۳/٦ مگاپاسکال (۵۲۰ psi)

فصل هفتم

اصول طراحی

اغلب تصور می‌شود که طراحی روسازی بتنی تنها مربوط به تعیین ضخامت می‌شود، در حالی که پارامترها و عناصر مهم دیگری نیز در این طراحی دخیل هستند که از آن جمله می‌توان به نوع و فاصله درزها (در صورت وجود) مانند درزهای عرضی برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و درزهای طولی برای انواع روسازی اشاره کرد. طراحی سامانه زهکشی نیز پیشتر در فصل چهارم مورد بحث قرار گرفت.

تحلیل تئوری روسازی بتنی فوق‌العاده پیچیده است. این پیچیدگی مسائل هندسی و مربوط به درزها، افت مصالح، اثرات محیطی بر روی ساختار، مشخصات و مقاومت غیرقطعی مصالح پای کار، واکنش پیچیده غیرخطی مصالح، رفتار پیچیده خستگی، بارهای متحرک و ... را شامل می‌شود. در نتیجه، طراحی روسازی به صورت محاسبات نسبتاً ساده و مدل‌های مصالح و همچنین تعدادی از دستورالعمل‌های تجربی در مورد درزها، مراحل و ... شکل گرفته است که موجب سهولت کار و دوری از مشکلات می‌باشد. هر کدام از طرح‌های اصلی (بتن غیرمسلح، بتن مسلح، بتن مسلح پیوسته و بتن پیش‌تنیده) در صورتی که خاک بستر، زیراساس، درزها و بکارگیری آرماتورها (در صورت وجود) به درستی بررسی و طراحی و عبور و مرور به طور منطقی پیش‌بینی شود، کارآیی خوبی خواهند داشت.

تعیین موارد مورد نیاز در ضخامت روسازی یکی از مسائل پیچیده مهندسی است. روسازی در معرض انواع بارگذاری و اثرات محیطی قرار دارد. فرآیند طراحی شامل تعداد زیادی از متغیرهای به هم وابسته می‌باشد که اغلب به سادگی نمی‌توان اندازه و بزرگی آن‌ها را مشخص کرد. علی‌رغم تحقیقات انجام شده درباره این موضوع، تاکنون

رسیدن به یک راه‌حل مستقیم ریاضی برای محاسبه ضخامت امکان پذیر نبوده است. به همین دلیل مهندسین می‌بایست ضخامت روسازی را براساس تحلیل تئوری توزیع بار بر روی روسازی و خاک، تحلیل داده‌های تجربی روسازی و همچنین مطالعه عملکرد روسازی‌ها تحت شرایط خدمت واقعی تعیین کنند.
هرگونه انتقال بین مقاطع روسازی بتنی و روسازی آسفالتی مجاور و یا پل‌ها نیز باید به صورت دقیق طراحی شود. طراحی روسازی بتنی مسلح یکپارچه شامل انتخاب درصد فولاد به صورت حجمی می‌باشد. آرماتور روسازی بتنی مسلح یکپارچه، محل انتقال و سایر جزئیات در فصل ۱۲ مورد بحث قرار گرفته است.

۷-۱- بستر روسازی

عموماً براساس نوع خاک، بستر روسازی تا مقدار ضریب عکس‌العمل بستر (k) کاهش می‌یابد. برای انتخاب مقدار k برای خاک بستر می‌توان از جدول شماره ٤-۱ و همچنین برای اصلاح این مقدار در مصالح تثبیت نشده یا زیراساس تثبیت شده می‌توان از جداول ٤-۲ تا ٤-۵ استفاده نمود. اگرچه استفاده از از مقادیر پایین k برای طراحی ضخامت کاملاً محافظه کارانه است، اما به کار بردن مقادیر کم برای تعیین فاصله درزها چندان محافظه کارانه محسوب نمی‌شود. بنابراین در صورتی که یک لایه سخت تثبیت شده زیر روسازی استفاده شود (اساس تثبیت شده با سیمان، اساس تثبیت شده با قیر و ...)، مقادیر بزرگ‌تری از k برای تعیین فاصله درزها باید مورد استفاده قرار گیرد.

در فرآیند طراحی اکثر روسازی‌های بتنی معمولاً ضخامت، حساسیت چندانی به مقدار k ندارد. این موضوع با روسازی‌های انعطاف پذیر و آسفالتی که ضخامت آن‌ها کاملاً به سختی خاک وابسته است، در مغایرت کامل می‌باشد. بنابراین مصالح خاک بستر و زیراساس برای تعیین ضخامت روسازی بتنی اهمیت ویژه‌ای ندارد اما در مورد امکان اجراء، مکش، حساسیت و آسیب‌پذیری در برابر یخبندان از اهمیت بالایی برخوردار است. این موارد در فصل‌های ٤ و ۱۳ بیان شده‌اند.

۷-۲- ترافیک

در حال حاضر سه راه‌حل برای بررسی موضوع ترافیک در طراحی روسازی وجود دارد که ساده‌ترین آن فقط به بررسی یک نوع وسیله نقلیه نیاز دارد. چنانچه لازم باشد یک جریان ترافیکی مختلط مورد بررسی قرار بگیرد، بایستی اثر هر یک از گروه‌های محوری

مختلف به طور جداگانه بررسی و یا تمام گروه‌های محوری به بار محورهای منفرد (تک) هم‌ارز ۸۰ کیلونیوتنی تبدیل شود.

۷-۲-۱- وسیله نقلیه واحد

در برخی از انواع روسازی مانند مراکز صنعتی و یا روسازی به کار رفته در فرودگاه‌های اولیه امکان استفاده از این روش وجود دارد. این روش در صورتی معتبر است که یک نوع خودروی سنگین یا یک نوع هواپیما در جریان ترافیک غالب باشد و سایر بارها بر روی روسازی به قدری کم باشد که اثر تخریبی حداقلی برای آن قائل شد؛ بدین معنا که بارهای سبک‌تر نباید از ۸۰ درصد وزن خودروی طرح بیشتر باشد.
برای طراحی ضخامت ویژه یک نوع وسیله نقلیه، تنش خمشی روسازی نمونه آزمایشی تعیین می‌شود. در ادامه، برای بدست آوردن نسبت تنش خمشی به ضرایب گسیختگی تقسیم می‌شود. همچنین برای دستیابی به تعداد تکرارهای مجاز، مدل‌های خستگی مانند معادلات ٦-٢ یا ٦-٥ مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا زمانی که نمونه آزمایشی مقاومت لازم در برابر بار متناوب را احراز کند، ضخامت روسازی تغییر می‌کند.

۷-۳- جریان ترافیکی مختلط

اکثر بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها دربرگیرنده جریان‌های ترافیکی مختلط است و در این موارد فرضیه خودروی واحد نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. در این حالت از روش طراحی PCA ١٩٨٤ استفاده می‌شود. این روش طراحی، خسارتی که در اثر تردد هر نوع وسیله نقلیه در جریان ترافیک به روسازی وارد می‌شود را محاسبه می‌کند. سپس برای اطمینان از عدم تجاوز از مقدار مجاز، مجموع خسارات وارده در طول عمر روسازی را بدست می‌آورد.
در ابتدا، یک ضخامت فرضی برای روسازی مورد آزمایش در نظر گرفته می‌شود. سپس براساس تعداد دفعات پیش‌بینی شده در طول عمر روسازی خسارت وارده از طریق هر وسیله نقلیه در جریان ترافیک مختلط محاسبه می‌شود. وسایل نقلیه در بزرگراه‌ها، معمولاً براساس نوع (تک محوری، دو محوری و یا سه محوری) با افزایش وزنی ۸/۹ و ۱۷/۸ کیلونیوتن (۲۰۰۰ و ٤٠٠٠ پوند) گروه‌بندی می‌شوند.
سپس مجموع خسارات ناشی از تردد گروه‌های مختلف وسیله نقلیه با حداکثر مقدار مجاز مقایسه می‌شود. برای روش PCA ١٩٨٤، محدودیت‌ها عبارتند از ۱۰۰ درصد خرابی خستگی و ۱۰۰ درصد خرابی فرسایشی که با استفاده از رابطه ٦-٤ قابل محاسبه

است. هر یک از عوامل خستگی و یا فرسایش می‌تواند میزان ضخامت طراحی را تعیین کند.

روش طراحی روسازی مکانیستیک NCHRP/AASHTO (M-EPDG)، روشی مشابه ولی پیچیده‌تر را به کار می‌برد. خسارت هر یک از گروه‌های محور برای هر فصل محاسبه و سپس مجموع خسارات وارده در طول عمر روسازی برای ترک‌خوردگی عرضی، پلکانی شدن در محل درزها و ... با حداکثر مقدار مجاز مقایسه و در صورت لزوم طراحی فوق اصلاح می‌شود (مؤسسه تحقیقات کاربردی ۲۰۰۶). برای روسازی‌های فرودگاه، تنها تعداد محدودی از انواع هواپیما نیاز به بررسی دارند. تعداد تکرارها یا پوشش هر یک به درستی قابل پیش‌بینی است. پیش‌بینی ترافیک هوایی به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند، مگر آن که تغییری در سامانه اجرایی سیستم هواپیمایی ایجاد شود.

نشریه مشاوره‌ای سازمان هواپیمایی فدرال با عنوان «طراحی روسازی فرودگاه» بیان می‌کند که روش طراحی روسازی براساس وزن ناخالص هواپیما می‌باشد. برای طراحی روسازی باید حداکثر وزن پیش‌بینی شده هواپیما را به هنگام برخاستن از زمین در نظر گرفت. فرآیند طراحی فرض می‌کند که ۹۵ درصد وزن ناخالص هواپیما توسط چرخ‌های اصلی فرود هواپیما و ۵ درصد نیز توسط چرخ‌های دماغه هواپیما تحمل می‌شود. نشریه مشاوره‌ای سازمان هواپیمایی فدرال با عنوان «طراحی فرودگاه» وزن تعداد زیادی از هواپیماهای غیرنظامی را در لیستی آورده است. سازمان هواپیمایی فدرال استفاده از حداکثر وزن پیش‌بینی شده به هنگام برخاستن را مقداری محافظه کارانه تلقی می‌کند. این موضوع امکان ایجاد تغییر در استفاده عملی و پیش‌بینی ترافیک را در بهترین حالت تقریبی میسر می‌سازد. این محافظه کاری به نوعی با در نظر نگرفتن ترافیک ورودی به فرودگاه جبران می‌شود.

۷-۳-۱- مفهوم محور معادل

ویرایش‌های مختلف راهنمای طراحی روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر آشتو، به ویژه راهنمای سال ۱۹۹۳ (آشتو ۱۹۹۳) و ضمیمه ۱۹۹۸ (آشتو ۱۹۹۸) طرح روسازی ترافیک مختلط را با مفهوم محور معادل انجام می‌دهند. ضرایب هم‌ارز بار محورها برای انواع محور منفرد، زوج (تاندم) یا سه‌گانه (ترایدم) با تعیین نسبت خرابی ناشی از هر یک از این محورها به خرابی ناشی از محور منفرد ۸۰ کیلونیوتنی، تعیین می‌شود.

این ضرایب در تعداد محورهای هر گروه ضرب می‌شود تا تعداد محور هم‌ارز ۸۰ کیلونیوتن یا محور معادل بدست آید. سپس روسازی برای تحمل تعداد مشخصی محور

معادل طراحی می‌شود.
ضرایب بار هم‌ارز تقریباً متناسب با توان چهارم بزرگی بار محور است. بنابراین دو برابر کردن بار محوری موجب می‌شود که روسازی حدوداً ۱۶ بار بیشتر خسارت ببیند. این نسبت، دقیق نیست و متناسب با نوع روسازی تغییر می‌کند، اما به عنوان یک برآورد اولیه مفید است.
در استفاده از محور معادل برای طرح روسازی دو مشکل مهم وجود دارد. اول این که آشتو ضرایب هم‌ارز مختلف را برای روسازی انعطاف‌پذیر و صلب تهیه کرده است، ولی این ارقام برای ضخامت‌های مختلف روسازی متفاوت می‌باشد. این باعث می‌شود که مقایسه طرح‌های همسان برای روسازی آسفالتی و بتنی دشوار شود. چرا که حتی اگر آن‌ها برای ترافیک یکسان طراحی شده باشند، برای تعداد مشابه محور معادل قابل طراحی نیستند. دومین مشکل این است که برخی از محورها در واقع هیچ خسارتی را به روسازی وارد نمی‌کنند، بنابراین باید ضریب هم‌ارز برابر با صفر داشته باشند. با استفاده از معادلات خستگی انجمن سیمان پرتلند، بارهایی که درآن SR≤۰/٤٥ شود خسارتی ایجاد نمی‌کنند، بنابراین تکرارهای نامحدود برای آن‌ها مجاز است. با این وجود، جداول محور معادل آشتو، ضرایب هم‌ارز را برای آن در نظر می‌گیرند.

۷-۳-۲- تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی

تنش‌های ایجاد شده در روسازی‌های صلب ناشی از اثرات محیطی و بارهای ترافیکی است. تنش‌های ناشی از بارهای ترافیکی عمر خستگی روسازی را تعیین می‌کند، در حالی که اثرات محیطی ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی و اعوجاج، حداکثر فاصله بین درزها را برای روسازی تعیین می‌کند. همان‌گونه که در بخش ۲ خاطرنشان شد، تنها مقاومت خمشی روسازی بتنی در برابر تنش‌ها مقاومت می‌کند و آرماتورها از این لحاظ نقشی ندارند. استفاده از آرماتور فقط برای نگه داشتن ترک‌ها و جلوگیری از گسترش بیشتر آن‌ها در روسازی بتنی مسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح یکپارچه است.
تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی به نسبت بین طول دال، L و شعاع سختی نسبی، l بستگی دارد. شعاع سختی نسبی، l به‌وسیله رابطه ۷-۱ تعیین می‌شود.

$$l = \sqrt[4]{\frac{ED^3}{12(1-v^2)k}}$$ رابطه ۷-۱

که در آن E= مدول ارتجاعی بتن، D= ضخامت روسازی، k= مدول واکنش بستر، و ν= ضریب پواسون بتن است، که عموماً ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

چون l دارای واحد طول است نسبت L/l بدون بعد می‌باشد. هوانگ (Huang) مثالی از محاسبه شعاع سختی نسبی را برای یک دال با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و E = 27.6 GPa و k = 54.2 MPa/m تهیه کرده است. از رابطه ۷–۱ داریم: l = 776mm. تنش لبه دال ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی در اثر حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

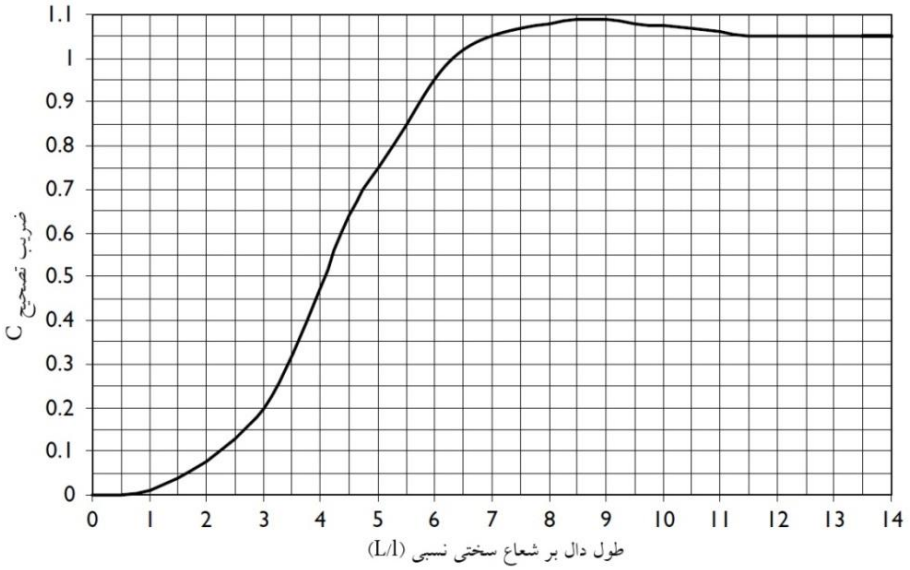
رابطه ۷–۲

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta t}{2(1-v^2)}$$

که در آن tα= ضریب حرارتی انبساط بتن، که در بخش ۵ توضیح داده شد، tΔ= اختلاف درجه حرارت بالا و پایین دال، C یک ضریب تصحیح برای دال محدود، که با استفاده از L/l و نمودار تهیه شده توسط برَدبِری (Bradbury) در سال ۱۹۳۸ (شکل ۷–۱) بدست می‌آید.

توجه کنید که اساس و زیراساس سخت‌تر (k بزرگ‌تر) منجر به کوچک‌تر شدن l و بنابراین بزرگ‌تر شدن ضریب L/l برای همان فاصله درز، ضریب C بزرگ‌تر و تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی بیشتری می‌شود. همچنین اغلب با k سخت‌تر، ضخامت لازم برای روسازی (D) کاهش می‌یابد که باعث کاهش هرچه بیشتر l می‌شود. استفاده از لایه‌های اساس و زیراساس سخت‌تر و ضخامت کم‌تر برای روسازی، بدون کاهش متناسب فاصله بین درزها، منجر به افزایش احتمال وقوع ترک‌های وسط دال، ناشی از تاب برداشتن و اعوجاج می‌شود. تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی را می‌توان با استفاده از مثال ارائه شده توسط هوانگ برای یک دال به طول ۷/٦ متر و عرض ۳/٦٦ متر، محاسبه کرد. $\frac{L_x}{l} = 9.81$ و $\frac{L_y}{l} = 4.71$، بنابراین $C_x = 1.07$ و $C_y = 0.63$.

اگر تفاوت درجه حرارت بین بالا و پایین دال برابر ۱۱/۱ درجه سیلسیوس و ضریب حرارتی بتن برابر αt=9×1-6/oC باشد، تنش لبه دال ناشی از پیچ‌وتاب برابر ۱/٤۸ مگاپاسکال در جهت طولی بدست می‌آید. اگر طول دال به ٤/٦ متر کاهش یابد، $\frac{L_x}{l} =$ 5.89 و $C_x = 0.93$ می‌شود. طول دال کوتاه‌تر، تنش لبه دال را به ۱/۲۸ مگاپاسکال کاهش می‌دهد.



شکل ۷-۱: ضرایب تصحیح تنش ناشی از پیچ‌وتاب در دال محدود (Bradbury, 1938)

از آنجایی که کرنش حرارتی برابر با $\varepsilon_t = \alpha_t \Delta_t$ می‌باشد، رابطه ارائه شده را می‌توان برای افت غیر یکنواخت، $\Delta\varepsilon_{sh}$ بین بالا و پایین دال اصلاح کرد:

رابطه ۷-۳

$$\sigma = \frac{CE\Delta\varepsilon_{sh}}{2(1-v^2)}$$

خمیدگی و تاب برداشتن در یک چرخه ۲٤ ساعته اتفاق می‌افتد که در طول روز با گرم شدن، خمیدگی رو به پایین ایجاد می‌شود (شیب درجه حرارت مثبت) و با سرد شدن در شب خمیدگی رو به بالا ایجاد می‌شود (شیب درجه حرارت منفی). درجه حرارت قسمت پایین دال که با زمین در تماس است، درجه حرارت یکنواخت‌تری خواهد داشت. تنش‌های کششی در طول روز به بالای دال و در طول شب به پایین دال القاء می‌شوند. برعکس، اعوجاج در زمان عمل‌آوری و خشک شدن بتن اتفاق می‌افتد. به طور کلی خروج رطوبت از بالای دال آسان‌تر است، مخصوصاً اگر عملیات اجرایی مربوط به عمل‌آوری کافی نباشد یا در زیراساس زهکشی انجام نشود. بنابراین بین بالا و پایین صفحه تفاوت در میزان افت وجود خواهد داشت که در دال یک خمیدگی دائمی رو به بالا ایجاد می‌کند.

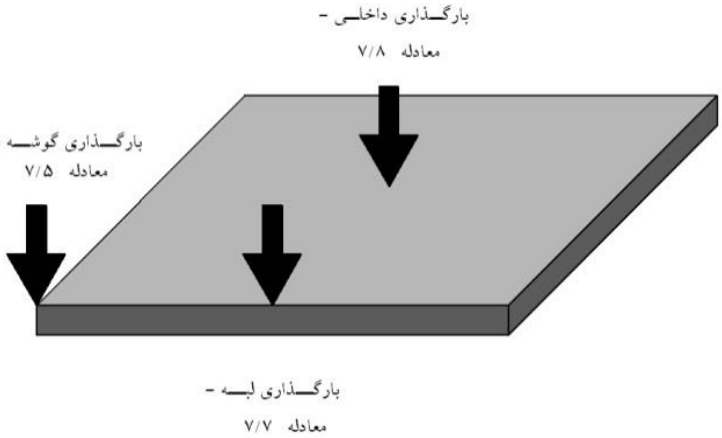
برای بررسی خمیدگی‌های درونی، بیش از ۱۱۰۰ روسازی بتنی غیرمسلح درزدار در قطعات ۱۵۲ متری از ۱۱۷ سایت مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در بدترین قطعات

اختلاف ارتفاع بین وسط دال و محل درز در حدود ۱۰ میلی‌متر تشخیص داده شد. شدیدترین خمیدگی‌ها در روسازی‌های متکی بر رسِ حاوی شن و ماسه با حد خمیری پایین یا شن و ماسه رس‌دار اتفاق می‌افتد. در دال‌هاییَ که رو به بالا خمیده شده‌اند خطر خیز بیش از حد در محل درز، پلکانی شدن و خرد شدگی زودرس، مکش و ترک‌خوردگی وسط دال وجود دارد. میزان پیچ‌وتاب روسازی‌های بدون میلگرد اتصال در محل درز شدیدتر است.

به طور قطع، این اندازه اختلاف ارتفاع در سطح روسازی می‌تواند بر کیفیت سواری تأثیر بگذارد. عملیات اجرایی روسازی، به ویژه عمل‌آوری بتن، تأثیر مهمی بر شدت و اندازه خمیدگی درونی دارند. در روسازی خوب عمل‌آوری شده با میلگردهای اتصال، اعوجاج کم‌تری ایجاد می‌شود.

۷-٤- تنش‌های ناشی از بار ترافیک

علاوه بر عوامل دیگر تنش‌های ناشی از بارگذاری ترافیکی در دال روسازی بتنی به محل بار نیز بستگی دارد. اگر بارگذاری در داخل دال و به دور از لبه و گوشه‌ها انجام شود، اندازه تنش به طور کلی کم خواهد بود. بنابراین، راه‌حل‌های تحلیلی برای بارهای اعمال شده در گوشه، لبه و داخل دال روسازی بتنی مطابق شکل ۷-۲ تهیه شد.



شکل ۷-۲: بارگذاری گوشه، لبه و داخلی

۷-٤-۱- تنش‌های ناشی از بارگذاری گوشه

تنش‌های گوشه موجب شکستگی گوشه و تنش‌های لبه موجب ترک‌خوردگی عرضی در وسط دال می‌شوند. تنش‌ها به نوع بار، ضخامت دال، مدول واکنش بستر (k) و شعاع سختی نسبی (l) بستگی دارند.

ساده‌ترین و قدیمی‌ترین رابطه تنش گوشه را می‌توان مستقیماً از موازنه بدست آورد. این فرمول توسط گلدبک[1] در سال ۱۹۱۹ و اُلدِر[2] در سال ۱۹۲٤ تهیه شد و توسط هوانگ در سال ۲۰۰٤ مورد بَحث قرار گرفت. این رابطه براساس برخی از فرضیات محافظه کارانه بدست آمده است. در این حالت بار در گوشه دال وارد می‌شود و هیچ حمایتی از جانب بستر برای آن وجود ندارد (k=۰). این حالت مشابه موقعیتی است که پدیده مکش در گوشه دال رخ دهد و یا پیچش و تاب‌خوردگی در دال سبب شود تا گوشه دال به سمت بالا حرکت کند.

این رابطه از رابطه استاندارد تنش خمشی، $\sigma = Mc/I$ بدست آمده است. فرض می‌شود که صفحه گسیختگی در فاصله x از گوشه دال و به طول 2x تشکیل می‌شود. از این‌رو، در صورتی که D ضخامت دال باشد، c=D/2 و $I = bh^3/12 = (2x)D^3/12$ است. گشتاور خمشی برای تیر کنسولی برابر با Px است. بنابراین تنش گوشه به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_c = \frac{Mc}{I} = \frac{Px(D/2)}{(2x)D^3/12} = \frac{3P}{D^2}$$ رابطه ۷-٤

این رابطه محافظه‌کارانه است، زیرا توزیع بار در کل سطح تماس تایر یا لاستیک اتفاق می‌افتد، از این‌رو گشتاور کم‌تری ایجاد می‌شود. علاوه بر آن احتمال این که هیچ اتکایی از سوی زیراساس در زیر گوشه دال وجود نداشته باشد، بسیار کم است. توجه به این نکته مفید به نظر می‌رسد که مقدار تنش با مربع ضخامت روسازی (D) کاهش می‌یابد.

این رابطه توسط وسترگارد[3] در سال ۱۹۲٦ و نهایتاً در سال ۱۹۸۵ توسط یوآنیدس و همکارانش[4] تجدید نظر شد و توسط هوانگ در سال ۲۰۰٤ مورد بحث قرار گرفت.

$$\sigma_c = \frac{3P}{D^2}\left[1 - \left(\frac{c}{l}\right)^{0.72}\right] = \frac{3P}{D^2}\left[1 - \left(\frac{1.772a}{l}\right)^{0.72}\right]$$ رابطه ۷-۵

1- Goldbeck
2- Older
3- Westergaard
4- Ioannides et al

که در آن c= طول ضلع سطح تماس مربع شکل، a= شعاع دایره با سطح تماس مشابه است. وسترگارد، یوآنیدس و همکارانش برای ضخامت صفحه به جای D از b استفاده کردند. اما برای هماهنگی با سایر مطالب، در این کتاب از همان D در رابطه ۷-۵ استفاده شده است.

تنش گوشه محاسبه شده با استفاده از رابطه ۷-۵ به علت عبارت داخل براکِت ([])، همیشه کم‌تر از مقداری است که با استفاده از رابطه ۷-٤ محاسبه می‌شود. در محاسبات مربوط به تنش روسازی، ممکن است بار به صورت یکنواخت (p) در سطح دایره‌ای به شعاع a توزیع شود، از این‌رو:

رابطه ۷-٦ $$P = \rho\pi a^2 \text{ or } a = \sqrt{\frac{P}{\rho\pi}}$$

رابطه ۷-٤ برای دال به ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و بار یک محور منفرد با نیم محور معادل یا ٤۰ کیلونیوتن تنش خمشی گوشه مقدار ۳ مگاپاسکال را می‌دهد. اگر بتن دارای مدول ارتجاعی برابر با E=۲۷/٦Gpa و برای بستر، k= ٥٤/۲Mpa/m باشد و L=۷۷٦mm همان طور که قبلاً در این فصل محاسبه شده است و در صورتی که فشار تایر ٦۲۰ کیلوپاسکال باشد، شعاع a برابر با ۱٤۳ میلی‌متر خواهد بود. در نتیجه تنش گوشه در ۰/٥٥٦ ضرب می‌شود که این مقدار همان عبارت داخل براکت در رابطه ۷-٥ است. از این‌رو فشار برابر با ۱/٦۷ مگاپاسکال خواهد شد.

۷-٤-۲- تنش ناشی از بارگذاری لبه

تنش حاصل از بارگذاری لبه بیشتر از تنش بارگذاری داخلی باعث ترک‌خوردگی وسط دال می‌شود. وسترگارد، چند رابطه تنش ارائه کرد. در سال ۱۹۸٥ یوآنیدس و همکارانش رابطه نهایی بارگذاری دایراه‌ای را ارائه کردند که در سال ۲۰۰٤ توسط هوانگ مورد بحث قرار گرفت:

رابطه ۷-۷ $$\sigma_e = \frac{0.803P}{D^2}\left[4\log\left(\frac{l}{a}\right) + 0.666\left(\frac{a}{l}\right) - 0.034\right]$$

فرض می‌شود که نسبت پواسون بتن، v=۰/۱٥ باشد. پیرو مثال قبلی (D=200mm, P=40kN, E=27.6Gpa, k=54.2Mpa/m, l=776mm, a=143mm) تنش لبه برابر با eσ=۲/۳٦ Mpa بدست می‌آید. این تنش، ٤۲ درصد بیشتر از تنش ناشی از بار گوشه است که با استفاده از رابطه ۷-٥ محاسبه شده است. به نظر می‌رسد که به عنوان یک قانون کلی، تنش لبه بیشتر از تنش ایجاد شده در گوشه باشد و ترک‌خوردگی وسط دال

احتمالاً بیشتر از خردشدگی گوشه رخ می‌دهد، مگر این که گوشه‌ها تحت یک بارگذاری سنگین قرار بگیرد و یا فاقد تکیه‌گاه باشد. همچنین، وجود میلگردهای اتصال از خردشدگی گوشه جلوگیری می‌کند.

۷-٤-۳- تنش‌های ناشی از بارگذاری داخلی

رابطه مربوط به تنش ناشی از بارگذاری داخلی (interior loading stress) وسترگارد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{D^2}\left[4\log\left(\frac{l}{b}\right) + 1.069\right]$$ رابطه ۷-۸

در صورتی که $a \leq 1.724D$ باشد، b=a خواهد بود، در غیر این صورت:

$$b = \sqrt{1.6a^2 + D^2} - 0.675D$$ رابطه ۷-۹

این رابطه در سال ۲۰۰٤ توسط هوانگ مورد بحث قرار گرفت. این رابطه همانند رابطه ۷-۷، نسبت پوواسن بتن v=۰/۱۵ را فرض می‌کند. رابطه ۷-۹، برای پارامترهای مربوط به بارگذاری دال در مثال فوق، به کار گرفته می‌شود زیرا a=۱٤۳ mm است و بزرگ‌تر یا مساوی D ۱/۷۲٤ یا ۳٤۵ میلی‌متر نیست. بنابراین b=۱۳٤ mm و تنش ناشی از بارگذاری داخلی eσ=۱/۲٦ Mpa خواهد بود. این مقدار بسیار کم‌تر از تنش لبه است، بنابراین برای تحلیل خطر ترک‌خوردگی وسط دال تنش ناشی از بارگذاری لبه به کار گرفته می‌شود.

۷-٤-٤- ترکیب تنش‌های ناشی از پیچش، تاب‌خوردگی و بارگذاری ترافیک

بدیهی است که تنش‌های ناشی از پیچش، تاب‌خوردگی و بارگذاری ترافیک همزمان اتفاق می‌افتد و بر عملکرد روسازی تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که طول عمر خدمت‌دهی دال براساس خستگی پیش‌بینی می‌شود، تعداد چرخه‌ها و معکوس هر نوع تنش مهم خواهد بود.

در طول عمر روسازی چرخه‌های تنش ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی، کم‌تر از تنش ناشی از بارگذاری است. اثرات دمایی یک بار در روز رخ می‌دهد به طوری که در آن قسمت تحتانی دال دمای یکنواخت‌تری دارد و قسمت فوقانی آن در طول روز گرم و

سرد می‌شود. بنابراین در طول ۲۰ سال، در حدود ۷۳۰۰ چرخه خستگی به علت تغییر دما، اتفاق می‌افتد. تاب‌خوردگی ناشی از رطوبت تنها یکبار رخ می‌دهد و آن هم زمانی است که روسازی در حال عمل‌آوری و خشک شدن است. اگر تغییرات رطوبتی فصلی چشمگیر باشد، این تاب‌خوردگی در سراسر دال به صورت یکنواخت اتفاق نمی‌افتد.
در این میان، بار ترافیک روسازی می‌تواند در فرودگاه تنش‌های خستگی تا ده‌ها یا صدها هزار بار تکرار و در بزرگراه‌های شلوغ بیش از ده یا صد میلیون بار تکرار ایجاد کند. بنابراین تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی در تحلیل خستگی به طور کلی نادیده گرفته می‌شود. در کتاب یودر و ویتزاک[1] گفته شده است که: «توجه به این نکته مهم به نظر می‌رسد که تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی برای تعیین ضخامت روسازی در نظر گرفته نمی‌شود». فلسفه حاکم بر طراحی بدین ترتیب است که آرماتورها و درزها برای آزادسازی و مقابله با تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی به کار برده می‌شوند. از این‌رو، برای طراحی ضخامت تنها بار ترافیکی در نظر گرفته می‌شود. این اصل مهمی است که باید به طور کامل توسط طراحان درک شود. توجه شود که درز چیزی جز یک ترک طراحی‌شده نیست. در این قسمت از کتاب، «تاب‌خوردگی» هر دو مفهوم «پیچش» و «تاب‌خوردگی» را در بر می‌گیرد.
زمانی که پاراگراف فوق نوشته شد، اغلب دال‌ها با مقدار فولاد کم، تنها به عنوان آرماتور حرارتی به کار گرفته می‌شدند. امروزه فلسفه روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، این است که فاصله درزها را به اندازه کافی کم کند تا تنش‌های ناشی از پیچش کاهش یابد. از این‌رو با فاصله مناسب درزها، نیازی به در نظر گرفتن تنش‌های ناشی از پیچش و تاب‌خوردگی در طراحی دیده نمی‌شود. در روسازی بتنی مسلح یکپارچه درزها با فواصل کم، روسازی را به قطعات کوچکی تقسیم می‌کند، به طوری که تاب‌خوردگی مسئله مهمی به حساب نمی‌آید.

۷-٤-٥- افت‌وخیز دال

وسترگارد (۱۹۲٦)، یوآنیدس و همکارانش (۱۹۸۵) معادلاتی برای افت و خیز ناشی از بارگذاری گوشه، لبه و داخل دال ارائه کردند (به‌ترتیب$c\Delta$ ، $e\Delta$ و $i\Delta$). این معادلات توسط هوانگ نیز مطرح شده است.

رابطه ۷-۱۰ $$\Delta_c = \frac{P}{kl^2}\left[1.205 - 0.69\left(\frac{c}{l}\right)\right] = \frac{P}{kl^2}\left[1.25 - 0.69\left(\frac{1.772a}{l}\right)\right]$$

1- Witzak & Yoder

$$\Delta_e = \frac{0.431P}{kl^2}\left[1 - 0.82\left(\frac{a}{l}\right)\right]$$ رابطه ۷-۱۱

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2}\left\{1 + \frac{1}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673\right]\left(\frac{a}{l}\right)^2\right\}$$ رابطه ۷-۱۲

افت‌وخیزها، به ویژه در گوشه‌های دال بتنی از نظر مکش بسیار مهم هستند. دال‌های بتنی که افت و خیز بیشتری دارند، فشار و انرژی بیشتری به بستر وارد می‌کنند، در نتیجه احتمال وقوع پدیده مکش در آن بیشتر است. این موضوع اساس طراحی فرسایشی به روش انجمن سیمان پرتلند است.

از طرف دیگر برای حل مشکل مکش، افزایش ضخامت دال بتنی یک طراحی کارآمد محسوب نمی‌شود. بهتر است در محل درزها میلگردهای اتصال تعبیه و یا از لایه زیراساس استفاده شود. درزهای دارای میلگرد اتصال با انتقال بار به دال‌های مجاور از طریق برش ایجاد شده، لبه و گوشه‌های دال را تقویت می‌کنند که احتمالاً شیوه‌ای مطمئن‌تر و اقتصادی‌تر باشد.

۷-٤-٦- محاسبات کلی تنش و تغییر شکل از طریق برنامه‌های اجزای محدود

راه‌حل‌های تحلیلی که توسط وسترگارد مطرح و توسط یوآنیدس و همکارانش اصلاح شد، موقعیت‌های ایده‌آلی را ارائه می‌کند که در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد. راه‌حل‌های مربوط به گوشه و لبه بسیار محافظه‌کارانه است. نه‌تنها استفاده از روش‌های قدیمی بکارگیری خطوط عبور با عرض ۳-۲/۷ متر (۹ تا ۱۰ فوت) واقع‌بینانه نیست، بلکه انتظار تردد در لبه روسازی، ایمن نمی‌باشد.

نوعاً عرض راه‌های اصلی امروزی را به اندازه ۳/۷ متر (۱۲ فوت) طراحی می‌کنند. بنابراین، در روسازی راه‌های اصلی، هیچ‌یک از بارگذاری‌های لبه یا داخلی به طور کامل اتفاق نمی‌افتد، بلکه حالت واقعی مابین این دو بارگذاری قرار دارد. همیشه محافظه‌کارانه است که روسازی را براساس تنش‌های ناشی از بارگذاری لبه طراحی کنیم. در برخی از روسازی راه‌های اصلی، برای خط عبور کناری از دال‌های بتنی عریض استفاده می‌کنند که بیشتر، توانایی تحمل بار کامیون‌ها را دارد و عرض معمول آن‌ها برابر با ٤/۳ متر است. دال بتنی عریض این گونه تعریف می‌شود: «دالی که حداقل ۱۸ اینچ (٤٥۰ میلی‌متر) پهن‌تر از دال‌های متداول به عرض ۱۲ فوت (۳/۷ متر) است، تا فاصله میان تایرهای کامیون و لبه دال بتنی افزایش یابد و به این‌ترتیب تنش‌های لبه ناشی از بار کاهش یابد».

شانه‌های بتنی که با میل‌مهارها به خطوط عبوری وصل شده‌اند نیز تنش‌های لبه را کاهش می‌دهند. درزهای طولی و عرضی با میلگردهای اتصال نیز تنش‌های لبه را کاهش می‌دهند. به دلیل صعوبت محاسبه تنش در انواع روسازی با حالات مختلف بارگذاری، برنامه‌های تحلیل تنش به روش اجزای محدود طراحی شدند. نسخه‌های اولیه برای ارتقای جداول طراحی و چارت‌های مربوط به روش PCA ۱۹۸٤ به کار گرفته می‌شدند. برنامه‌های اجزای محدود پس از آن شامل KENSLABS، ILLI-SLAB،JSLAB و EVERFE می‌شد.

برنامه KENSLABS که در کتاب طراحی روسازی نوشته هوانگ ارائه شد، ویژگی‌های مشترک بسیاری با برنامه‌های دیگر دارد. ویژگی‌های کلیدی این برنامه در فصل پنجم این کتاب به طور خلاصه آورده شده است. ذیلاً به آن‌ها اشاره می‌نماییم:

- هر دال بتنی به دو اِلمان صفحه‌ای مستطیل شکل تقسیم می‌شود. تعداد این المان‌ها در هر دال بتنی متناسب با هندسه شبکه‌ای است که توسط کاربر برنامه تعریف می‌شود. هرچه تعداد المان‌ها بیشتر باشد، دقت جواب افزایش می‌یابد، اما در مقابل نیازمند زمان محاسبه بیشتری است که معمولاً با کامپیوترهای جدید مشکلی محسوب نمی‌شود.
- ممکن است دال بتنی یک یا دو لایه داشته باشد. اگر دال در دو لایه باشد، می‌تواند چسبیده و یا مجزا انتخاب شود. از این فرض می‌توان برای مدل کردن روکش‌های چسبیده و مجزا، رویه بتنی متصل به اساس با مصالح متفاوت نظیر اساس تثبیت شده با سیمان یا آسفالت، استفاده کرد. برای هر یک از دو لایه باید مدول ارتجاعی و نسبت پواسون متناظرشان را اعمال کرد.
- سه مدل مختلف می‌تواند به عنوان تکیه‌گاه به کار گرفته شود. ساده‌ترین تکیه‌گاه به صورت مایع و یا فنری با مقدار k مشخص است. یک مدل پیچیده‌تر و واقعی‌تر، تکیه‌گاه جامد است. بستر و زیراساس به صورت یک فضای نیمه بینهایت ارتجاعی یا مدل بوزینسک می‌باشد. پیچیده‌ترین نوع تکیه‌گاه مدل لایه‌ای است که تکیه‌گاه بارمیستر نیز نامیده می‌شود. در این مدل، مدول ارتجاعی و نسبت پواسون هر یک از لایه‌ها (بستر، زیراساس و اساس در صورت وجود) مستقیماً مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکیه‌گاه مانند یک روسازی انعطاف‌پذیر چندلایه در زیر دال بتنی عمل می‌کند. اکثر مسائل را می‌توان با تکیه‌گاه مایع با مقدار k مشخص و با دقت کافی حل کرد. فاصله میان دال بتنی و تکیه‌گاه ناشی از مکش و یا نشست را نیز می‌توان مدنظر قرار

داد.

- با در نظر گرفتن انتقال برش و خمش بین دال‌ها، میلگردهای اتصال مدل می‌شوند. در این روش، ثابت فنر مربوط به برش، قطر و فاصله میلگردهای اتصال به همراه مشخصات آن‌ها باید مشخص شود. همچنین می‌توان میلگردهای اتصال لَق را با یک فاصله مشخص بین میلگرد و بتن مدل کرد.
- چند دال بتنی را می‌توان همزمان مدل کرد، در نتیجه انتقال بار در طول درزها را نیز می‌توان در زمان حل مسئله در نظر گرفت. حداکثر شش دال بتنی می‌تواند تحلیل شود.
- بارهای ترافیکی به صورت سطوح مستطیل شکل با فشار یکنواخت تایر ارائه می‌شوند. می‌توان مقادیر مختلف فشار را برای سطوح متفاوت به کار برد و بارهای نقطه‌ای را در گره‌ها اعمال کرد.
- پیچش حرارتی نیز می‌تواند در صورت مسئله گنجانده شود. همچنین این ویژگی می‌تواند به طور غیرمستقیم برای مدل کردن اعوجاج ناشی از رطوبت استفاده شود.
- خروجی این برنامه شامل تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییرشکل‌ها می‌شود. این خروجی‌ها می‌تواند در تمامی گره‌ها و یا تنها در گره‌هایی که مقادیر آن‌ها زیاد است، گزارش شوند. تنش‌های به وجود آمده در میلگردهای اتصال را نیز می‌توان محاسبه کرد.

برنامه‌های اجزای محدود دقت قابل قبول داشته و با راه‌حل‌های تحلیلی مطابقت دارند. هرچند در استفاده از آن‌ها محدودیت‌هایی نیز وجود دارد و این محدودیت‌ها برای برنامه KENSLABS توسط هوانگ توضیح داده شده‌اند.

برنامه اجزای محدود برای روسازی صلب به نام، EVERFE، وجود دارد. این برنامه به طور رایگان در سایت http:/www.civil.unmuine. edu/EverFE/ قابل بارگیری است.

۷-۵- طراحی ضخامت

روسازی ضخیم‌تر می‌تواند بار بیشتری را تحمل کند، چرا که تنش‌های خمشی در آن کاهش یافته و عمر خستگی آن افزایش یافته است. دو رویکرد اصلی برای تعیین ضخامت مناسب روسازی بتنی وجود دارد که عبارت از طراحی به روش تجربی و مکانیستیک است. طراحی تجربی براساس مشاهده عملکرد روسازی زیر بارگذاری ترافیکی موجود و یا به صورت تسریع شده در آزمایشگاه می‌باشد. طرح مکانیکی بر محاسبه تنش‌ها و

کرنش‌ها تکیه می‌کند. در واقع همه روش‌های طراحی، این دو رویکرد را باهم تلفیق می‌کند.

دستورالعمل طراحی آشتو که در راهنمای سال ۱۹۹۳ ارائه شده است، مبتنی بر مشاهده و تجربه می‌باشد. معادلات طراحی براساس رگرسیون نتایج بدست آمده از آزمایش دوساله جاده‌ای بوده که در اواخر دهه ۹۰ میلادی به وسیله آشتو در اوتاوا از ایالت ایلینوی انجام شد.

آزمایش جاده‌ای آشتو در فصل ۱ مورد بحث قرار گرفت. حلقه‌هایی با طرح‌های متفاوت روسازی مشتمل بر کامیون‌ها با بار محوری و اشکال گوناگون بارگذاری و میزان خرابی و خدمت‌دهی آن‌ها در طول زمان اندازه‌گیری شد. این آزمایش یک آزمایش تسریع شده به حساب می‌آید، چرا که تقریباً ترافیک ۲۰ ساله در مدت ۲ سال به این حلقه‌ها اعمال گردید. معادله اولیه در نسخه‌های بعدی راهنمای طرح آشتو اصلاح و اغلب براساس اصول مکانیستیک ضرایب اصلاحی به آن اضافه می‌شود.

مشکلات روش طراحی تجربی زمانی آشکار می‌شود که لازم باشد آن‌ها را به شرایط جدید، چه شرایط محیطی با طرح‌های روسازی جدید و چه وسایل نقلیه جدید تعمیم دهیم. البته به دستورالعمل طراحی آشتو، شرایط محیطی غیر از اُتاوای ایلینوی، روسازی بتنی مسلح یکپارچه و محورهای سه‌گانه اضافه شد. هرچند این مورد در آزمایش جاده‌ای در اصل قرار نداشتند. به‌علاوه، روسازی‌های استفاده شده در آزمایش جاده‌ای آشتو در مقایسه با روسازی‌های اخیر که با جزئیات تازه و روش‌های اجرایی امروزی ساخته می‌شوند، نسبت به مکش آسیب پذیرتر هستند. جزئیات دستورالعمل طراحی آشتو ۱۹۹۳ و ضمیمه سال ۱۹۹۸ در فصل ۸ ارائه شده است.

دستورالعمل PCA ۱۹۸٤ مکانیستیک می‌باشد. دو مکانیسم خرابی شناخته شده وجود دارد: ترک‌خوردگی خستگی و فرسایش (مکش). ضخامت روسازی به گونه‌ای تعیین می‌شود که هیچ کدام از این خرابی‌ها پیش از پایان عمر خدمت‌هی روسازی رخ ندهد. این رویکرد اساس روش‌های سیمان پرتلند آمریکا و انجمن روسازی بتنی آمریکا برای طرح روسازی فرودگاه‌ها و کف‌های صنعتی نیز می‌باشد.

آخرین دستورالعمل آشتو تحت عنوان طراحی روسازی به روش تجربی- مکانیستیک (AASHTO M-EPDG) همان طور که از اسم آن مشخص است، دو رویکرد را باهم تلفیق می‌کند. در آن از نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود برای تعیین تنش‌ها استفاده شده است.

توجه به این نکته ضروری است که ضخامت زیاد دال نمی‌تواند مشکلات مربوط به مصالح نامرغوب و روش‌های اجرایی ضعیف را جبران کند. ضخامت مناسب دال لازم است، اما برای دوام روسازی در طول عمر طراحی کافی نیست.

۷-٦- طرح درزهای عرضی و فاصله درزها

تخریب دال‌های بتنی در اثر پیچش و تاب‌خوردگی و اعوجاج قبلاً مورد بحث قرار گرفت. با فاصله بیش‌تر درز و دال‌های طویل‌تر، گوشه‌های دال خیز برداشته و تنش خمشی در میانه دال افزایش می‌یابد. مسائل مربوط به طراحی درزها مطابق زیر می‌باشند:

- انتخاب فاصله مناسب بین درزها.
- تعیین این که از درزهای دارای میلگرد اتصال یا درزهای با قفل‌وبست استفاده شود.
- در صورت استفاده از درز دارای میلگرد اتصال، چه قطری برای میلگرد انتخاب شود.
- تعیین این که آیا درزها عمود بر مسیر حرکت اجراء شوند یا به طور مایل نسبت به آن.

در گذشته از درزهای قفل شده[1] که در فصل ۲ مورد بررسی قرار گرفتند، استفاده می‌شد. یودر و ویتزاک گزارش کردند که این نوع درزها نباید برای دال‌های با ضخامت کم‌تر از ۲۲۵ میلی‌متر یا در فرودگاه‌ها با ترافیک سنگین مورد استفاده قرار گیرند. اخیراً از درزهای دارای میلگرد اتصال بیشتر استفاده می‌شود.

۷-۷- فاصله بین درزها

در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار فاصله بین درزها باید به قدر کافی کم باشد تا از تنش‌های ناشی از پیچ‌وتاب جلوگیری کند. اسمیت و همکارانش[2] دریافتند که با افزایش فاصله درزها، پلکانی شدن محل درز و ترک‌خوردگی عرضی افزایش می‌یابد. در صورتی که فاصله درزها بیش از ۵/۵ متر باشد، ترک‌خوردگی در روسازی بتنی با فواصل تصادفی درز افزایش پیدا می‌کند. این روند را نیز می‌توان برای روسازی‌های با فاصله یکسان درز تعمیم داد. ناسبام و لوکِن[3] حداکثر فاصله درزهای دارای میلگرد اتصال را ٦/۱ متر و

1- keyed Joints
2- Smith et al
3- Nussbaum & Lokken

درزهای فاقد این میلگردها را ٤/٦ متر توصیه کرده‌اند.
راهنمای طرح روسازی آشتو عنوان می‌کند که:
«به طور کلی طراحی فاصله بین درزهای اجرایی عرضی و طولی به شرایط محلی و محیطی بستگی دارد. فاصله درزی که از ترک‌خوردگی‌های متوسط جلوگیری می‌کند با افزایش ضریب انبساط حرارتی، تغییرات دما و مقاومت اصطکاکی زیراساس کاهش می‌یابد. این فاصله با افزایش مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. همچنین فاصله درزها به ضخامت دال و مشخصات مواد آب‌بند درز بستگی دارد. به عنوان یک راهنمای تخمینی، فاصله بین درزها به فوت، نباید بیشتر از دو برابر ضخامت دال به اینچ شود. برای مثال بیشترین فاصله برای یک دال به ضخامت ۸ اینچ (۲۰۰ میلی‌متر) برابر ١٦ فوت (٤/٨ متر) است».
این رابطه را می‌توان این گونه بیان کرد:

رابطه ۷-۱۳ $S= 0.024D$

که در آن S= فاصله بین درزها به متر و D= ضخامت دال به میلی‌متر، یا:

رابطه ۷-١٤ $S= 2D$

که در آن S= فاصله بین درزها به فوت و D= ضخامت دال به اینچ می‌باشد.
کمیته ACI 325 برای حداکثر فاصله درزها براساس ضخامت روسازی، بیشترین نسبت L/l برابر با ٤/٤٤ و مقدار k جدولی تهیه کرده است. برای مثال یک دال به ضخامت ۲۸۰ میلی‌متر (۱۱ اینچ) با مقدار k برابر ۱۲ مگاپاسکال بر متر (٤٤ Psi/in)، فاصله حداکثر بین درزها باید ٦/٢ متر (۲۰ فوت) باشد. در مقابل یک دال به ضخامت ۱۳۰ میلی‌متر (٥/١ اینچ) که بر روی تکیه‌گاه سخت با مقدار k برابر ۱۱۰ مگاپاسکال بر متر (٤۰۰ Psi/in) قرار دارد، نباید حداکثر فاصله بین درزهایش بیشتر از ۲ متر (٦/٦ فوت) باشد. این حداکثر فاصله بین درزها محافظه‌کارانه است. اسمیت و همکاران عنوان می‌کنند که حداکثر مقدار L/l برای روکش‌های جدا از هم برابر ٤/٥ تا ٥/٥ توصیه می‌شود. همان طور که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است، ضریب تنش C برای L/l= ٤/٥ برابر با ۰/٦٤ و برای L/l ٥/٥ = برابر با ۰/۸٥ می‌باشد.
طبق گزارش FHWA به دلیل ملاحظات مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نوع دال (مسلح و غیرمسلح)، نوع انتقال بار و شرایط محلی، فاصله درزها برای راه‌های اصلی کشور متفاوت می‌باشد. ملاحظات طراحی باید شامل اثر حرکات طولی دال بر مواد درزگیر و عملکرد انتقال بار، حداکثر طول دال که ترک‌های عرضی در بتن غیرمسلح ایجاد نکند، مقدار ترک‌خوردگی قابل‌تحمل برای یک روسازی بتنی مسلح درزدار و

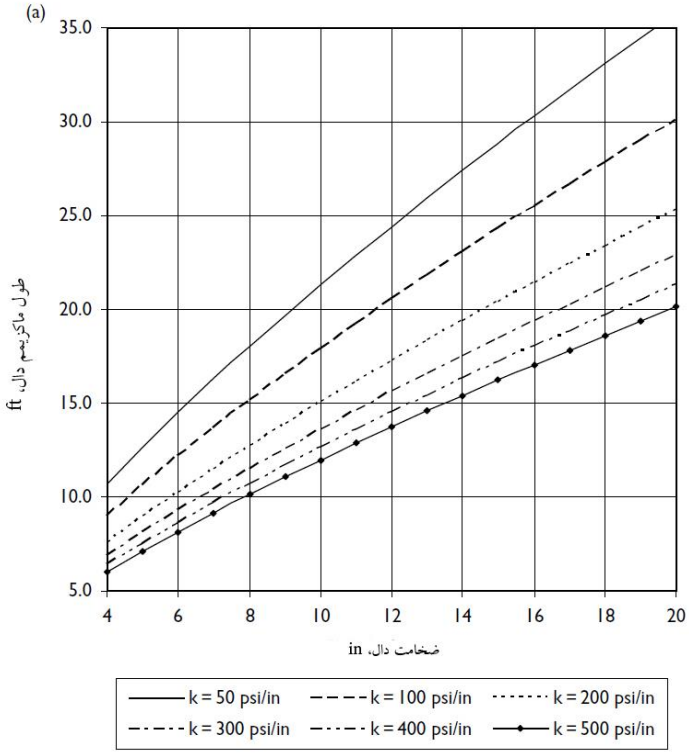
استفاده از فواصل تصادفی برای درزها باشد.
با این حال، برای دال‌های بتنی غیرمسلح حداکثر فاصله درزها برابر ٤/٦ متر (۱۵ فوت) توصیه می‌شود. در دال‌های طولانی‌تر ترک‌های عرضی بیشتری ایجاد می‌شود. اهمیت بکارگیری تجربه‌های محلی در تعیین فواصل بین درزها نباید نادیده گرفته شود. مطالعات نشان می‌دهد که ضخامت روسازی، سختی اساس و آب‌وهوای منطقه نیز بر حداکثر فاصله دال در ممانعت از ترک‌های عرضی اثر دارد. تحقیقات نشان می‌دهد وقتی که نسبت L/l از ۵/۰ تجاوز کند، ترک‌خوردگی عرضی افزایش می‌یابد.
همان طور که شکل ۷-۱ نشان می‌دهد، ضریب تنش C برای L/l=۵/۵ برابر با ۰/۷۵ است. شکل ۷-۳ بیشترین طول دال را براساس ضخامت روسازی، D و مدول واکنش بستر، k، در صورتی که L/l≤۵/۰ باشد نشان می‌دهد. مدول ارتجاعی بتن برابر ۲۷/٦ گیگاپاسکال (٤۰۰۰۰۰۰ psi) فرض می‌شود.
برای مثال یک روسازی ضخیم ۵۰۰ میلی‌متری (۲۰ اینچی) با تکیه‌گاه ٥٤ مگاپاسکال بر متر (۲۰۰ psi/in) می‌تواند فاصله درزی تا ٦/۱ متر (۲۰ فوت) داشته باشد. اگر مقدار k به ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (۵۰۰ psi/in) افزایش یابد، آنگاه حداکثر فاصله بین درزها باید به ٦/۱ متر (۲۰ فوت) کاهش می‌یابد.
روسازی‌های ضخیم در فرودگاه‌ها (بیش از ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)) اغلب به صورت مربع‌های ۷/٦ در ۷/٦ متر (۲۵ در ۲۵ فوت‌مربع) ساخته می‌شوند. راهکار دیگر قطعات روسازی ۱۱/٤ متری (۳۷/۵ فوت) و ایجاد یک درز طولی با برش اره‌ای است که تعداد دفعات عبور اجرای روسازی را تا یک‌سوم کاهش می‌دهد و بدین ترتیب دال‌های بتنی به ابعاد ۵/۷ در ٦/۱متر (۱۸/۷۵ در ۲۰ فوت) ایجاد می‌شود.
برای فرودگاه‌ها استفاده از مواد سخت‌تر به عنوان اساس، مانند بتن اقتصادی یا اساس قیری متداول است. با استفاده از مواد سخت‌تر به عنوان اساس، خطر ترک‌خوردگی در وسط دال بیشتر می‌شود، مگر این که فاصله بین درزها نیز کاهش یابد. بنابراین امکان دارد فاصله درز ۷/٦ در ۷/٦ متر (۲۵ در ۲۵ فوت) با اساس تثبیت شده بیش از اندازه زیاد باشد.
نشریه مشاوره‌ای سازمان هواپیمایی فدرال با عنوان «طرح روسازی فرودگاه»، جدولی را برای حداکثر فاصله بین درزها برای اساس‌های تثبیت نشده ارائه می‌کند، که در جدول ۱۰-۳ فصل دهم نشان داده شده است.
برای اساس‌های تثبیت شده، فاصله بین درزها به پنج برابر شعاع سختی نسبی، رابطه ۷-۱ محدود می‌شود. علی‌رغم این که سازمان هواپیمایی فدرال حداکثر مقدار

ضریب عکس‌العمل بستر را برای طرح ضخامت روسازی به ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (۵۰۰ psi/in) محدود کرده است، اما برای محاسبه شعاع سختی نسبی باید از مقدار حقیقی آن استفاده نمود. هال و همکارانش حداکثر فاصله بین درزها را ٦/١ متر (۲۰ فوت) برای روسازی‌های با ضخامت بیشتر از ۳۰۵ میلی‌متر (۱۲ اینچ) پیشنهاد می‌کنند. برای روسازی‌های نازک‌تر باید از فواصل کم‌تری استفاده کرد.

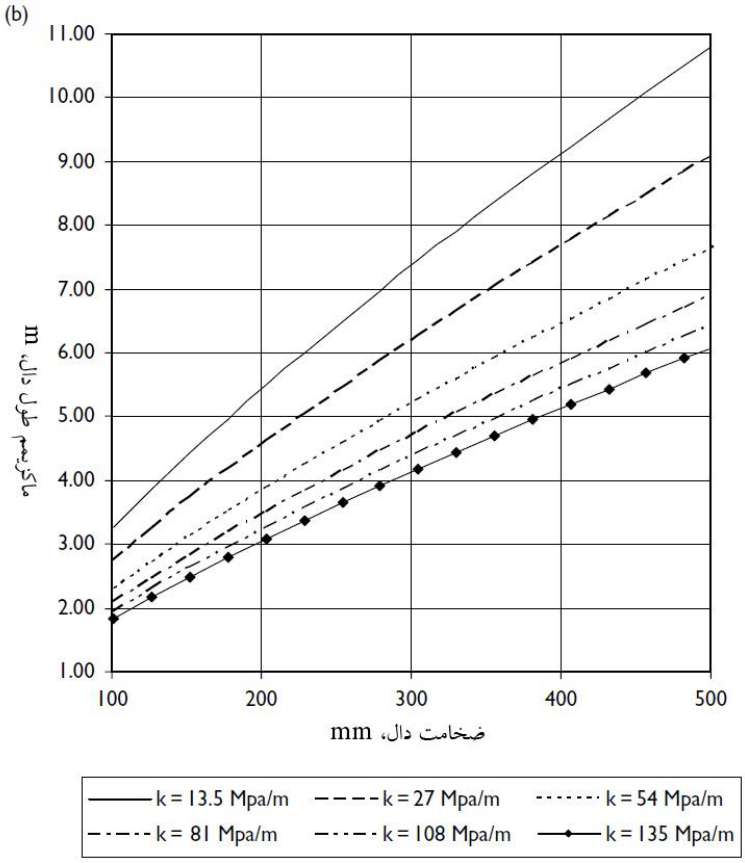
اگر فاصله بین درزها از مقدار حداکثر آن تجاوز نماید، باعث می‌شود دال‌های بتنی در بین درزها دچار ترک‌خوردگی شوند. در یک باند پرواز واقع در تگزاس روسازی بتنی با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) به صورت دال‌هایی به ابعاد ٤/٦ در ۵/۷ متر (۱۵ در ۱۸/۷۵ فوت) اجراء شد. برای دال‌های با ضخامت مذکور فاصله بین درزها به روش نیروی هوایی به ٤/٦ متر (۱۵ فوت) محدود می‌شود. تقریباً تمام دال‌ها به طول ۵/۷ متر (۱۸/۷۵ فوت) در زمانی کوتاه به دو نیم تقسیم شدند.

برای روسازی‌های محدب، باید همیشه از یک درز در رأس استفاده کرد. دال‌های محدبی که در رأس بدون درز هستند در این نقطه دچار ترک‌خوردگی می‌شوند. در دهه ۹۰ یک سازمان دولتی سه باند پرواز نیروی هوایی را با استفاده از دال‌های محدب بدون درز طراحی و اجرا کرد. در هر سه مورد این باندها دچار ترک‌خوردگی شدند.

باند بتنی اجرا شده به طول ۳۰٤۸ متر (۱۰۰۰۰ فوت) یکی از نمونه‌هایی است که ناراحتی اصحاب نیروی هوایی را فراهم کرده بود. به طوری که در قسمت میانی این باند بتنی یک ترک پیوسته ایجاد شده بود. این طور به نظر می‌رسید که خود دال بتنی می‌داند که میزان مناسب فاصله بین درزها باید چقدر باشد و اگر طراح این فاصله را در نظر نگیرد، دال ترک خواهد خورد.



شکل ۷-۳: حداکثر فاصله بین درز براساس ضخامت دال، D و مدول عکس‌العمل زیراساس k برای $L/l \leq 0.5$ در (a) واحد رایج ایالات متحده (b) واحد متریک



شکل ۷-۳: ادامه

به طور معمول در روسازی بتنی مسلح درزدار، از فاصله بیشتری بین درزها استفاده شده و چنین فرض می‌شود که دال‌ها ترک می‌خورند و ترک‌ها توسط آرماتورهای حرارتی به هم متصل نگه داشته می‌شوند. در عمل این نوع روسازی، به خصوص با فاصله بیشتر بین درزها، عملکرد خوبی ازخود نشان نمی‌دهد.

۷-۷-۱- درز با فواصل متغیر

با پلکانی شدن درزهای مساوی، لرزش‌های هماهنگ در وسایل نقلیه‌ای که با سرعتی معین در حرکت هستند، ایجاد می‌شود. به همین دلیل برخی از شرکت‌های طراحی، از فاصله متغیر برای جاگذاری درز استفاده می‌کنند. انجمن روسازی بتن آمریکا خاطرنشان می‌سازد که این مشکل ابتدا در خودروهای بزرگ در حال تردد در آزادراه‌های کالیفرنیا

با ٤/٦ متر (۱۵ فوت) بین درزهای بدون میلگرد اتصال ظاهر شده است. در سال‌های ۱۹٦۰ و ۱۹۷۰ در کالیفرنیا فاصله‌های ٤، ۵/۸، ۵/۵ و ۳/۷ متر (۱۳، ۱۹، ۱۸ و ۱۲ فوت)، به صورت فاصله‌های استاندارد درز در نظر گرفته شدند. چون دال‌های بتنی ۵/۵ و ۵/۸ متری (۱۸ و ۱۹ فوتی) بیش از حد بزرگ بودند و زودتر در معرض ترک‌خوردگی قرار می‌گرفتند به همین خاطر فاصله درزها را به ۳/۷، ٤/٦، ٤ و ٤/۳ متر (۱۲، ۱۵، ۱۳ و ۱٤ فوت) تغییر دادند. راهنمای طراحی آشتو نیز در مورد الگوهای فاصله تصادفی پیشنهاد می‌دهد از مضارب ۲/۳ متر (۷/۵ فوتی) استفاده نشود.

برای کاهش نوسان خودرو در روسازی‌های غیرمسلح فاقد میلگردهای اتصال از فواصل تصادفی استفاده می‌شود. برای کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی عرضی در هنگام استفاده از درز تصادفی، طول بزرگ‌ترین دال نباید از ٤/٦ متر (۱۵ فوت) بیشتر باشد. در برخی از ایالات فاصله ۳/۷، ٤/٦، ٤ و ٤/۳ متر (۱۲، ۱۵، ۱۳ و ۱٤ فوت) به خوبی پاسخ‌گو بوده‌است. باید به یاد داشت که از ایجاد فواصل زیاد در طول دال‌ها پرهیز شود.

در صورت استفاده از درزهای مسلح (برای جلوگیری از پلکانی شدن) و اجرای پیوسته روسازی‌ها، ممکن است در استفاده از درز تصادفی مزیت کم‌تری احساس شود.

۷-۷-۲- درزهای با قفل‌وبست سنگدانه‌ای

بار وارده بر اثر وجود ترافیک وسایل نقلیه می‌بایست به طور مؤثر از یک دال به دال مجاور انتقال یابد تا کم‌ترین تغییر شکل را در درزها ایجاد کند. کاهش خیز دال می‌تواند باعث کاهش مکش در مصالح اساس و زیراساس و نیز کاهش خطر پلکانی شود. دو روش عمده برای انتقال بار در طول درز وجود دارد. یکی قفل‌وبست سنگدانه‌ها و دیگری استفاده از ابزار انتقال بار، مانند میلگردهای اتصال است. قفل‌وبست سنگدانه‌ها در اثر اصطکاک سایشی موجود در وجوه نامنظم ترک که در زیر برش اره‌ای قرار دارند، به وجود می‌آید و با استفاده از سنگدانه‌های درشت‌تر، شکسته، زاویه‌دار و بادوام افزایش می‌یابد. همچنین تثبیت لایه اساس نحوه انتقال بار را بهبود می‌بخشد. به هر حال بازدهی قفل‌وبست سنگدانه‌ها با افزایش عرض ترک و تکرار زیاد بارگذاری سنگین به سرعت کاهش می‌یابد تا جایی که بر عملکرد روسازی نیز تأثیر می‌گذارد. بنابراین توصیه می‌شود فقط در راه‌های محلی و خیابان‌هایی که تردد کامیون‌ها در آن‌ها کم‌تر است، انتقال بار از طریق قفل‌وبست سنگدانه‌ها انجام شود.

در ابتدا تمام روسازی‌های بتنی با درزهای دارای قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها ساخته می‌شد. پس از مشکل‌ساز شدن پدیده مکش و پلکانی شدن درزها در مسیرهای پرتردد،

میلگردهای اتصال معرفی شدند.

به هر حال نقش قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها در رویه بتنی همچنان وجود دارد. این نوع درزها در ترافیک با سرعت پایین، ضخامت و فاصله کم درزها به خوبی عمل می‌کند. مطابق پیشنهاد کمیته ACI 325، در رویه‌های بتنی با ضخامت کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر، نیازی به استفاده از میلگردهای اتصال نیست. اگرچه برای روسازی‌های مسلح نازک‌تر با فاصله بیشتر درزها نیاز به میلگردهای اتصال است ولی این مسئله از سوی انجمن روسازی بتنی آمریکا برای رویه‌های بتنی غیرمسلح مورد تأیید قرار گرفته است. به دلیل صعوبت در اجرای صحیح میلگردهای اتصال در رویه بتنی نازک، باید تمهیدات لازم اتخاذ شود.

درزهایی که قفل‌وبست بین سنگدانه‌ای دارند، بار را از طریق برش ایجاد شده بین وجوه نامنظم دال‌های مجاور خود انتقال می‌دهند. عموماً درزها به اندازه ۱/۳ تا ۱/٤ ضخامت دال برش اره‌ای می‌خورند و رها می‌شوند تا در آن‌ها به طور طبیعی ترک‌خوردگی ایجاد شود. لایه‌های سخت تکیه‌گاهی، مانند لایه زیراساس و اساس تثبیت‌شده می‌توانند در انتقال بار کمک کنند.

کارایی درزهای دارای قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها به موارد زیر بستگی دارد:

- عرض درز یا ترک: این عامل مستقیماً به طول دال مربوط می‌شود. کمیته ACI 325 بیشترین طول دال را برای درزهای بدون میلگرد اتصال ۵/۵ متر پیشنهاد می‌دهد.
- عرض درز: همچنین به میزان افت ناشی از خزش بتن و ضریب انبساط حرارتی بتن بستگی دارد. افت و ضریب حرارتی کم‌تر برای این منظور بهتر است.
- بزرگ‌ترین اندازه مصالح درشت‌دانه: در زمان شکل‌گیری ترک‌ها، مصالح درشت‌دانه‌تر سطحی خشن‌تر را به وجود می‌آورند. همچنین استفاده از مصالح درشت‌دانه‌تر باعث استفاده کم‌تر از سیمان و افت کم‌تر در بتن می‌شود.
- سختی مصالح درشت‌دانه: سنگدانه‌های سخت در زیر فشار ترافیک شکسته نمی‌شوند.

یکی از مزایای این درز، در زمان استفاده از مواد یخ‌زدا برای حذف یخ و برف از روی جاده است که باعث خوردگی آرماتورها می‌شود. درزهای دارای قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها در این مناطق علاوه بر ارزان‌تر بودن، سبب افزایش دوام بتن می‌شود.

۷-۷-۳- درزهای دارای میلگردهای اتصال

میلگردهای اتصال در درزهای عرضی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از پدیده مکش و پلکانی شدن جلوگیری کنند. میلگردهای اتصال با میل‌مهارها تفاوت دارند، زیرا بدون ایجاد تنش، اجازه باز و بسته شدن درز را می‌دهند. این در حالیست که با محدود کردن حرکات قائم، از ایجاد اختلاف ارتفاع بین دو دال مجاور نیز جلوگیری می‌کند. میلگردهای اتصال عموماً برای روکش‌های با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر و یا بیشتر استفاده می‌شوند. برای یک خط عبور در راه اصلی به عرض ۳/٦٦ متر، ۱۱ عدد میلگرد اتصال به طول ٤٦۰ میلی‌متر و به فاصله تقریبی ۳۰۰ میلی‌متر از هم (مرکز به مرکز) استفاده می‌شود. در صورت استفاده از میل مهار، تنها سه عدد در مسیر هر چرخ و در مجموع شش عدد در عرض ۳/٦٦ متری خط عبور تعبیه می‌شود. میلگردهای اتصال در فصل ۱۷ مورد بحث قرار می‌گیرند.

FHWA توصیه می‌کند میلگردهای اتصال در روسازی همه راه‌های اصلی مورد استفاده قرار بگیرد. میلگردهای اتصال می‌بایست در مسیرهایی که ترافیک آن‌ها بیشتر از تردد کامیون‌ها تشکیل شده است، مورد استفاده قرار بگیرد. هدف از میلگردهای اتصال این است که بدون محدود کردن حرکت دال‌ها در اثر انبساط و انقباض بتن در محل درز، بارها را انتقال دهد. مطالعات نشان می‌دهد که میلگردهای اتصال بزرگ‌تر در انتقال بار و کاهش خطر پلکانی‌شدن تاثیر بیشتری دارند.

۷-۷-٤- قطر میلگردهای اتصال

کم‌ترین اندازه میلگردهای اتصال برای مقابله با نیروهای خمشی و برشی وارد از یک دال به دال دیگر و کاهش تنش تکیه‌گاهی وارده از طرف میلگرد فولادی بر بتن، براساس قطر مناسب تعیین می‌شود. عموماً تنش تکیه‌گاهی در بتن یک پارامتر مهم طراحی است. اگر این تنش خیلی بالا باشد میلگرد اتصال سبب تخریب و نهایتاً لق شدن در بتن می‌شود.

از لحاظ تئوری، مقدار تنش مجاز تکیه‌گاهی میلگرد اتصال باید تابعی از مقاومت فشاری بتن باشد و این امکان وجود دارد که در بتن با مقاومت بیشتر، از میلگرد اتصال با قطر کم‌تری استفاده شود. در عمل ضخامت لایه رویه حائز اهمیت است، چرا که رویه‌های ضخیم‌تر بار بیشتر و بزرگ‌تری را تحمل می‌کنند. تحمل بار و سنگینی وسایل نقلیه بیشتر به عهده لایه رویه است. در گذشته قطر میلگرد اتصال در رویه‌های کم‌ضخامت حدود ۱۹ و ۲۵ میلی‌متر توصیه می‌شد، اما امروزه کم‌ترین قطر توصیه شده حدود ۳۲ میلی‌متر

و ضخامت لایه رویه ۲۰۰ میلی‌متر است.

برای روسازی راه‌های اصلی براساس FHWA توصیه می‌شود که کم‌ترین قطر میلگردهای اتصال می‌بایست D/8 باشد که در آن D برابر با مقدار ضخامت لایه رویه در نظر گرفته می‌شود. در این میان قطر میلگرد اتصال نباید از ۳۲ میلی‌متر یا ۱/۲۵ اینچ کم‌تر باشد. همچنین توصیه می‌شود که میلگردهای اتصال با طول ٤٥٠ میلی‌متر یا ۱۸ اینچ در فاصله ۳۰۰ میلی‌متری یا ۱۲ اینچ از هم استفاده شوند. میلگردهای اتصال باید در میانه ضخامت دال نصب و در برابر خوردگی مقاوم‌سازی شوند تا از قفل شدن درزها جلوگیری شود. لایه اپوکسی و فولاد ضدزنگ، میلگردهای اتصال را به خوبی در برابر خوردگی محافظت می‌کند.

جدول شماره ۷-۱ قطر، طول و فاصله مورد نیاز میلگردهای اتصال را برای ضخامت دال از ۲۰۰ میلی‌متر تا ٤۰۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. اسمیت و هال براساس میزان ترافیک رویکرد متفاوتی را برای انتخاب قطر میلگردهای اتصال پیشنهاد می‌دهند. اگر طراحی لایه رویه براساس۳۰ میلیون محور معادل یا کم‌تر از آن باشد، میلگردهای اتصال با قطر ۳۰ میلی‌متر کفایت می‌کند. میلگردهای اتصال با قطر ۳۸ میلی‌متر برای دال با ترافیک ۳۰ تا ۹۰ میلیون محور معادل مناسب است. برای ترافیک بالای ۹۰ میلیون محور معادل، قطر مناسب برای میلگردهای اتصال ٤۱ میلی‌متر است. از آنجایی که روسازی ضخیم‌تر برای ترافیک سنگین‌تر استفاده می‌شود، هر دو توصیه فوق به میلگردهای اتصال با قطر مشابه منتهی می‌شوند.

جدول ۷-۱: قطر توصیه شده برای میلگردهای اتصال (ACPA و ACI 325)

فاصله بین میلگردهای اتصال	طول میلگردهای اتصال	قطر میلگردهای اتصال	ضخامت دال
mm (in)	*mm (in)*	*mm (in)*	*mm (in)*
میل‌مهار نیاز نمی‌باشد.			<۲۰۰ (<۸)
۳۰۰ (۱۲)	٤٥۰ (۱۸)	۳۲ (۱/۲٥)	۲۰۰ (۸)
۳۰۰ (۱۲)	٤٥۰(۱۸)	۳۲ (۱/۲٥)	۲٥۰ (۱۰)
۳۰۰ (۱۲)	٤٥۰(۱۸)	۳۸ (۱/٥)	۲۸۰ (۱۱)
۳۰۰ (۱۲)	٤٥۰(۱۸)	۳۸ (۱/٥)	۳۰۰ (۱۲)
۳۰۰ (۱۲)	٥۰۰ (۲۰)	٤٤ (۱/۷٥)	۳٥۰ (۱٤)
٤٥۰ (۱۸)	٦۰۰ (۲٤)	٥۰ (۲)	٤۰۰ (۱٦) و بالاتر

۷-۷-۵- درزهای مورب

درزهای مورب راهکار دیگری برای برطرف کردن مشکل پلکانی شدن می‌باشد. پشتوانه این روش بر این اساس است که با مورب کردن درزها در هر زمان فقط یک چرخ از درز عبور می‌کند و خطر پلکانی شدن آن را کاهش می‌دهد.

درزهای مورب را می‌توان با فاصله متغیر ترکیب کرد. به گفته هوانگ، درزهای مورب با فاصله متغیر، مثل ۱۲–۱۸–۱۹–۱۳ فوت (۳/۷–۵/۵–۵/۸–٤/۰ متر) نیز استفاده شده است. رأس زاویه منفرجه در لبه بیرونی روسازی، برای جریان ترافیک، باید جلوتر از سایر نقاط قرار گیرد، چرا که گوشه‌های دال بیشترین تأثیر را از ضربه ناگهانی چرخ‌های خارجی دریافت نماید. مزیت درزهای مورب این است که چرخ‌های راست و چپ همزمان از روی درز عبور نمی‌کنند، بنابراین آزردگی ناشی از درزهای پلکانی کاهش می‌یابد. استفاده همزمان از فاصله متغیر درزها نیز می‌تواند باعث افزایش راحتی رانندگان شود.

راهنمای طرح آشتو نیز راجع به درزهای مورب عنوان می‌کند که: «سبب کاهش خیز و تنش در درز می‌شود و سطحی هموارتر برای وسایل نقلیه فراهم می‌کند».

در حالی که این روش در فاصله بین درزها تأثیرگذار نیست ولی در روسازی بتنی غیرمسلح از درزهای مورب برای فراهم کردن یک حرکت نرم و راحت استفاده می‌شود. برای این منظور اختلافی به اندازه ۰/٦ متر (۲ فوت) در ۳/۷ متر (۱۲ فوت) پیشنهاد می‌شود تا چرخ درونی پیش از چرخ بیرونی از درز عبور کند. در هر زمان فقط یک چرخ از درز عبور می‌کند که با کاهش عکس‌العمل وسایل نقلیه، تنش ایجاد شده در دال‌های بتنی را نیز کم می‌کند. درزهای مورب معمولاً زمانی استفاده می‌شوند که تجهیزات انتقال بار موجود نباشد، در حالی که درزهای مورب ممکن است به همراه تجهیزات انتقال بار نیز استفاده شود. مطالعات انجام شده دلیلی بر بهبود عملکرد روسازی در درزهای مورب مسلح با میلگردهای اتصال نمی‌بیند و انجام این کار را نیز توصیه نمی‌کند. میلگردهای اتصال باید موازی بر مسیر عبوری نصب شود و بر درزهای مورب عمود نباشد.

در روسازی‌های جدید بتنی غیرمسلح درزدار، درزهای مورب بدون میلگرد اتصال می‌تواند در کاهش اثر پلکانی مؤثر باشد، اما در صورتی که میلگردهای اتصال به طور مناسب اجراء شوند درزهای مورب تأثیری نخواهد داشت. از این گذشته در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار با درزهای مورب که بر روی اساس سخت اجراء می‌شوند خطر شکستگی گوشه دال افزایش می‌یابد.

قابل ذکر است که درزهای مورب مانع از پلکانی شدن درزها نمی‌شوند، بلکه فقط تأثیر آن را کاهش می‌دهند. روش اجرایی مطمئن‌تر استفاده از همان درزهای عرضی قائم بر

مسیر، با میلگردهای اتصال است.

۷-۸- درزهای طولی و طراحی میل‌مهار[1]

همان طور که در فصل ۲ عنوان شد، درزهای طولی معمولاً بین خطوط عبوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. میل‌مهارها معمولاً در طول درزهای طولی، بین خطوط عبوری و یا بین خطوط عبور شانه بتنی راه قرار می‌گیرند. تفاوت آن‌ها با میلگردهای اتصال در آن است که اجازه حرکت به روسازی را نمی‌دهند. همچنین ترافیک جز در زمان تغییر خط از روی این درزها عبور نمی‌کند. در نتیجه انتقال بار در آن‌ها اهمیت چندانی ندارد. طراحی معمول میل‌مهار، میلگرد ۱۳ میلی‌متری (٤#) به طول ۹۱۰ میلی‌متر (۳٦ اینچ) و در فواصل ۱۰۲۰–۷٦۰ میلی‌متر (۳۰ تا ٤۰ اینچ) می‌باشد. طول میل‌مهار با توجه به تنش پیوستگی تعیین می‌شود.

امروزه بیشتر فولاد موجود برای میل‌مهار از فولاد درجه ٦۰ با تنش گسیختگی ٤۱۳ مگاپاسکال (٦۰۰۰ psi) می‌باشد. در صورت استفاده از فولاد درجه ٦۰، باید از میلگردهای با قطر ۱٦ میلی‌متر به طول ۱ متر یا میلگردهای با قطر ۱۳ میلی‌متر به طول ۰/۸ متر به عنوان میل‌مهار استفاده شود. برای این که میل‌مهار کارایی قابل قبولی داشته باشد، اندازه آن‌ها مهم خواهد بود. فاصله بین میل‌مهارها با ضخامت روسازی، فاصله میان درز و نزدیک‌ترین لبه آزاد تغییر می‌کند.

هوانگ رابطه‌ای برای محاسبه سطح مورد نیاز فولاد بر واحد طول (A_s) از دال بتنی روسازی تهیه کرده است:

رابطه ۷–۱۵

$$A_s = \frac{\gamma_c DL' f_a}{f_s} = 0.13DL'mm^2/m = 469 \times 10^{-6} DL'\ in^2/ft$$

که در آن γ_c= واحد وزن بتن ($2.36\times106\ N/mm^3$ یا $0.0868\ lb/in^3$)، D= ضخامت دال بتنی (میلی‌متر یا اینچ)، L'= فاصله بین درز طولی تا لبه آزاد (متر یافوت)، f_a= میانگین ضریب اصطکاک بین دال بتنی و بستر، که معمولاً ۱/۵ گرفته می‌شود و f_s= تنش مجاز در فولاد (دو سوم تنش گسیختگی فولاد، یا به طور محافظه‌کارانه ۲۷٦ مگاپاسکال یا ٤۰۰۰۰ psi در فولادهای جدید). برای محاسبه فاصله بین میلگردها سطح فولاد مورد نیاز در واحد طول دال بتنی بر سطح مقطع یک میلگرد تقسیم می‌شود.

برای مثال، فاصله بین میلگردهای ۱۳ میلی‌متری (٤#) را برای روسازی به ضخامت ۲۵۰

1- Tie Bar

میلی‌متر با دوخط عبور با مجموع عرض ۷/۳۲ متر (۲٤ فوت) نسبت به لبه بیرونی تعیین کنید. As مورد نیاز ۲۳۸ میلی‌مترمربع بر متر (۰/۱۱۳ اینچ‌مربع بر فوت) و هر میلگرد دارای سطح مقطع برابر ۱۲۷ میلی‌مترمربع (۰/۲۰ اینچ‌مربع) می‌باشد، پس فضای مورد نیاز ۵۳۳ میلی‌متر (۲۱ اینچ) است.

شکل ۱۳-۳ از راهنمای طرح روسازی آشتو با توجه به ضخامت روسازی، فاصله بین درز و نزدیک‌ترین لبه آزاد دو جدول را برای تخمین فاصله بین میل‌مهارها فراهم کرده است. برای میلگردهای ۱۳ میلی‌متری (٤#) و ۱٦ میلی‌متری (۵#) جداولی تهیه شده است. فواصل بیش از ۱/۲ متر (٤۸ اینچ) برای میل‌مهارها توصیه نمی‌شود. برای مثال بالا، فاصله پیشنهادی برای میل‌مهارها ٤۰۰ میلی‌متر (۱٦ اینچ) است. از جدول۷-۲ نیز می‌توان برای انتخاب فاصله بین میل‌مهارها استفاده کرد.

فواصل توصیه شده میل‌مهارها، ۸۰۰ میلی‌متر (۳۲ اینچ) برای میلگرد ٤# (۱۳ میلی‌متر) و ۱ متر (۳۹ اینچ) برای میلگرد ۵# (۱٦ میلی‌متر) و ۱/۱۸ متر (٤٦ اینچ) برای میلگرد ٦# (۱۹ میلی‌متر) میلگرد و ۱/۳۵ متر (۵۳ اینچ) برای میلگرد ۷# (۲۲ میلی‌متر) است.

میل‌مهارها نباید در فاصله کم‌تر از ۳۸۰ میلی‌متر (۱۵ اینچ) از درزهای عرضی اجراء شوند. در صورت استفاده از میل‌مهارهای با طول بیش از ۸۱۰ میلی‌متر (۳۲ اینچ)، فاصله اجرایی نباید در حد فاصل٤۵۰ میلی‌متری (۱۸ اینچ) از درز عرضی باشد. با توجه به مسئله خوردگی و اثر سوء آن بر توان سازه‌ای سیستم، استفاده از میل‌مهارهای مقاوم در برابر خوردگی توصیه می‌شود. پیشنهاد می‌شود که درزهای طولی برش اره‌ای خورده و آب‌بندی شوند تا از ورود آب‌های سطحی به سازه روسازی جلوگیری شود. یک ماده درزگیر به عرض ۹/۵ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر برای این امر کافی می‌باشد.

جدول ۷-۲: فواصل توصیه شده میل‌مهارها به میلی‌متر (اینچ)

ضخامت دال	فاصله تا لبه آزاد یا درز مهارنشده، متر (فوت)							
میلی‌متر (اینچ)								
	۱/۲ (٤)	۳/۰ (۱۰)	۳/٦ (۱۲)	٤/۳ (۱٤)	۵/۰ (۱٦)	٦/۰ (۲۰)	۷/۰ (۲۳)	۸/۰ (۲٦)
13M#4 Bars (ACPA 1998: 29-30)								
۱۰۰ (٤)	۱،۲۰۰ (٤۸)	ناسازگار-فاصله زیاد از لبه آزاد						
۱۲۵ (۵)	۱،۲۰۰ (٤۸)	ناسازگار-فاصله زیاد از لبه آزاد						

جدول ۷-۲: ادامه

ضخامت دال	فاصله تا لبه آزاد یا درز مهارنشده، متر (فوت)							
میلی‌متر (اینچ)	(٤) ۱/۲	(۱۰) ۳/۰	(۱۲) ۳/٦	(۱٤) ٤/۳	(۱٦) ٥/۰	(۲۰) ٦/۰	(۲۳) ۷/۰	(۲٦) ۸/۰
۱٥۰ (٦)	۱،۲۰۰ (٤۸)							ناسازگار–فاصله زیاد از لبه آزاد
۱۷٥ (۷)	۱،۲۰۰ (٤۸)				۱،۱۳۰ (٤٥)			
۲۰۰ (۸)	۱،۲۰۰ (٤۸)			۱،۱٥۰ (٤٥)	۹۹۰ (۳۹)	۸۲۰ (۳۹)		ناسازگار
۲۲٥ (۹)				۱،۰۲۰ (٤۰)	۸۸۰ (۳٥)	**۷۳۰** (۲۹)	**٦۲۰** (۲٤)	ناسازگار
۲٥۰ (۱۰)	۱،۲۰۰ (٤۸)		۱،۱۰۰ (٤۳)	۹۲۰ (۳٦)	**۷۹۰** (۳۱)	**٦٦۰** (۲٦)	**٥٦۰** (۲۲)	٤۹۰ (۱۹)
۲۷٥ (۱۱)			۱،۰۰۰ (۳۹)	۸۳۰ (۳۲)	۷۱۰ (۲۸)	٦۰۰ (۲٤)	٥۱۰ (۲۰)	بزرگ‌تر
۳۰۰ (۱۲)	۱،۲۰۰ (٤۸)	۱،۱۰۰ (٤۳)	۹۱۰ (۳٦)	۷٦۰ (۳۰)	٦٥۰ (۲٦)	٥٥۰ (۲۲)	٤۷۰ (۱۸)	بزرگ‌تر
۳٥۰ (۱٤)		۹٤۰ (۳۷)	۷۸۰ (۳۱)	٦٥۰ (۲٦)	٥٦۰ (۲۲)	٤۷۰ (۱۸)		بزرگ‌تر
٤۰۰ (۱٦)		۸۲۰ (۳۲)	٦۸۰ (۲۷)	٥۷۰ (۲۲)	٤۹۰ (۱۹)			بزرگ‌تر
٤٥۰ (۱۸)		۷۳۰ (۲۹)	٦۱۰ (۲٤)	٥۱۰ (۲۰)				بزرگ‌تر
16M#5 Bars (ACPA 1998: 29-30)								
۲۲٥ (۹)	از نمره کوچک‌تر استفاده شود					(٤٥) ۱،۱٤۰	(۳۹) ۹۸۰	ناسازگار
۲٥۰ (۱۰)						(٤۰) ۱،۰۳۰	(۳٥) ۸۸۰	۷۷۰ (۳۰)
۲۷٥ (۱۱)						(۳٦) ۹۳۰	(۳۱) ۸۰۰	۷۰۰ (۲۷)
۳۰۰ (۱۲)	از نمره کوچک‌تر استفاده شود			(٤۸) ۱،۲۰۰	(٤۰) ۱،۰۳۰	(۳۳) ۸۸۰	(۲۹) ۷۳۰	٦٤۰ (۲٥)
۳٥۰ (۱٤)				(٤۸) ۱،۰۲۰	(۳۳) ۸۸۰	(۲۹) ۷۳۰	(۲٤) ٦۳۰	٥٥۰ (۲۲)
٤۰۰ (۱٦)	از نمره کوچک‌تر استفاده شود		(٤۲) ۱،۰۷۰	(۳٥) ۹۰۰	(۳۱) ۷۷۰	(۲٥) ٦٤۰	(۲۲) ٥٥۰	٤۸۰ (۱۸)
٤٥۰ (۱۸)	نمره کوچک‌تر (٤٥) ۱،۱٤۰		(۳۷) ۹٥۰	(۳۱) ۸۰۰	(۲٦) ٦۸۰	(۲۲) ٥۷۰	(۱۹) ٤۹۰	بزرگ‌تر
19M#6 Bars (ACPA 1998: 29-30)								
۲۷٥ (۱۱)				از نمره کوچک‌تر استفاده شود				(۳۹) ۱،۰۱۰
۳۰۰ (۱۲)								۹۲۰ (۲٤)
۳٥۰ (۱٤)				از نمره کوچک‌تر استفاده شود			(۳٥) ۹۱۰	۷۹۰ (۳۱)
٤۰۰ (۱٦)				از نمره کوچک‌تر استفاده شود		(۳٦) ۹۲۰	(۳۱) ۷۹۰	٦۹۰ (۲٦)
٤٥۰ (۱۸)				از نمره کوچک‌تر استفاده شود	(۳۹) ۹۹۰	(۳۲) ۸۲۰	(۲۷) ۷۰۰	19M/#6 @ 610 (24) or 22M/#7 @ 840 (33)

فصل هشتم

طراحی روسازی بزرگراه‌ها

یکی از کاربردهای مهم روسازی بتنی در راه‌های اصلی با تردد وسایل نقلیه پرسرعت و ترافیک سنگین است. روسازی بتنی، از اجزای اساسی بزرگراه‌های بین ایالتی در آمریکا و سایر نقاط جهان محسوب می‌شود.
طی سالیان متمادی در ایالت متحده راهنمای طراحی روسازی آشتو ۱۹۹۳ و نسخه‌های قبلی آن برای روسازی آسفالتی و روسازی بتنی مورد استفاده قرار می‌گرفت. سایر روش‌های موجود طراحی روسازی بتنی شامل روش PCA ۱۹۸٤ و روش الحاقی آشتو ۱۹۹۸ است. انتظار می‌رود که روش M-EPDG جایگزین این روش‌ها شود، اما بکارگیری کامل از روش جدید بستگی به مطالعات و تنظیمات محلی خواهد داشت و ممکن است سال‌های زیادی به طول بیانجامد.

۸-۱- راهنمای طراحی آشتو (آشتو ۱۹۹۳)

براساس نتایج حاصل از آزمایش جاده‌ای آشتو، در سال‌های ۱۹۷۲، ۱۹۸٦ و ۱۹۹۳ راهنمای طراحی آشتو منتشر شد. این نشریات از لحاظ مفهوم کلی همگی مشابه بودند اما با گذشت زمان و با توجه به شرایط محیطی مختلف و تکنولوژی‌های جدید اصلاحاتی در آن‌ها اعمال شد. رابطه طراحی توسط هوانگ[1] مورد بحث قرار گرفت. رابطه اصلی طراحی روسازی صلب براساس آشتو در سیستم واحد آمریکا به قرار زیر است:

1- Huang

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_O + 7.35 \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}}$$

$$+(4.22-0.32P_t)\left[\frac{\acute{S}cC_d\left[D^{0.75}-1.132\right]}{215.63J\left[D^{0.75}-\frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

رابطه ۸-۱

که در آن W_{18}= ترافیک محور معادل، Z_R= انحراف معیار نرمال، S_O= انحراف معیار کل، D= ضخامت دال بتنی به اینچ، ΔPSI= تغییرات شاخص خدمت‌دهی=P_0-P_t، P_0= شاخص خدمت‌دهی اولیه، P_t= شاخص خدمت‌دهی نهایی، S'c= مقاومت خمشی بتن (psi)، C_d= ضریب زهکشی، J= ضریب انتقال بار، E_c= مدول الاستیسیته (ارتجاعی) بتن به psi و k= مدول عکس‌العمل (واکنش) بستر به psi/in.

این رابطه برای ضخامت دال بتنی به اینچ حل می‌شود. بخش‌های پیشِ رو، داده‌های ورودی رابطه طراحی و روش حل رابطه را مورد بحث قرار می‌دهد.

آسان‌ترین روش برای استفاده این رابطه در واحد SI اینست که $S'c$ و Ec/k را تبدیل واحد کنیم، رابطه را حل و سپس ضخامت بدست آمده را در ۲۵/٤ ضرب کنیم تا ضخامت مورد نیاز برحسب میلی‌متر بدست آید. برای تبدیل S'c از KPa به psi باید آن را در ۰/۱٤٥ ضرب کنیم و برای تبدیل نسبت Ec/k از ((Mpa/(Mpa/M)) به ((psi/(psi/in)) باید آن را در ۳۹/۳ ضرب کنیم.

۸-۱-۱- داده‌های طراحی

راهنمای طرح روسازی آشتو (۱۹۹۳) دستورالعمل‌های مفصلی را برای تعیین داده‌های ورودی رابطه ۸-۱ ارائه می‌کند.

ترافیک در محور معادل W_{18}:

ضرایب بار هم‌ارز برای تبدیل محورهای منفرد، محورهای مرکب دوگانه و محورهای مرکب سه‌گانه به محور معادل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ضرایب در جداول D.10 تا D.18 از پیوست D راهنمای طرح روسازی آشتو ارائه شده است. ضرایب هم‌ارز به نوع محور (منفرد، دوگانه، سه‌گانه)، اندازه بار محور (با افزایش ۸/۹ کیلونیوتن یا kips ۲)، ضخامت دال به اینچ (با افزایش ۱ اینچ از ٦ تا ١٤) و شاخص خدمت‌دهی نهایی

(P_t) (۳/۰ یا ۲/۵، ۲/۰) بستگی دارد.

از لحاظ نظری، این یک عمل تکراری است. زیرا ضخامت طرح D به W_{18} وابسته است که خود به ضرایب بار هم‌ارز وابسته بوده و این ضرایب به ضخامت طراحی یعنی D وابسته است. در عمل قبل از این که مقدار تخمینی جدول مورد نظر مشخص شود، می‌توان ضخامت را براساس میزان ترافیک سال‌های عمر روسازی تعیین کرد.

ضرایب تقریبی هم‌ارز بار را با استفاده از قانون توان چهارم می‌توان محاسبه کرد. بررسی جداول ضرایب هم‌ارز بار نشان می‌دهد که محور دوگانه ۱۲۹ کیلونیوتن(kips ۲۹) و محور سه‌گانه ۱۷۳ کیلونیوتن (kips ۳۹) به طور تقریبی معادل محور منفرد ۸۰ کیلونیوتن (kips ۱۸) هستند. مقدار تقریبی ضریب هم‌ارز (EF) در سیستم SI به این صورت محاسبه خواهد شد:

رابطه ۸-۲
$$EF = \left(P_1/80\right)^4 \text{ یا } \left(P_2/129\right)^4 \text{ یا } \left(P_3/173\right)^4$$

که در آن P_1، P_2 و P_3= بار به کیلونیوتن به ترتیب بر روی محور منفرد، دوگانه و سه‌گانه است. این رابطه در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا به صورت زیر است:

رابطه ۸-۳
$$EF = \left(P_1/18\right)^4 \text{ یا } \left(P_2/29\right)^4 \text{ یا } \left(P_3/39\right)^4$$

که در آن P_1، P_2 و P_3= بار به kip

اگر ترافیک طرح به طور دقیق مشخص نشده باشد، می‌توان به سادگی تعداد $ESAL_s$ را تخمین زد. از آنجایی که رابطه ۸-۱ یک رابطه لگاریتمی است، خطاهای کوچک در محاسبه $ESAL_s$ تفاوت چندانی در ضخامت مورد نیاز روسازی ایجاد نمی‌کند.

قابلیت اطمینان Z_RS_O:

عملکرد روسازی در طول زمان متغیر است. اگر این امکان وجود داشت که طراحی براساس متوسط عمر روسازی پیش‌بینی شده انجام شود، پنجاه درصد روسازی‌ها قبل از پایان عمر پیش‌بینی شده دچار شکست و خرابی می‌شدند. راه‌های اصلی شلوغ و پرسرعت که ترافیک سنگین را از خود عبور می‌دهند به نسبت خیابان‌های شهر و جاده‌های محلی، نیازمند سطح بالاتری از قابلیت اطمینان هستند.

در رابطه ۸-۱ قابلیت‌اطمینان در عبارت Z_RS_O دیده شده است. انحراف‌معیار کلی S_O باید براساس شرایط محیطی انتخاب شود. می‌توان براساس آزمایش جاده‌ای آشتو این مقدار را در روسازی انعطاف پذیر بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ و برای روسازی صلب بین ۰/۳۰ تا ۰/۴۰ در نظر گرفت. در صورت در نظر گرفتن تغییرات ترافیک لازم است از ۰/۳۹ و در غیر

این صورت از ۰/۳٤ استفاده می‌شود. بهترین حالت همان مقدار ۰/۳۹ برای طراحی است. قابلیت اطمینان مطلوب و انحراف معیار نرمال متناظر با آن، Z_R برای مسیرهای محلی از ۵۰ تا ۸۰ درصد با Z_R برابر صفر تا ۰/۸٤۱- و برای آزادراه‌های بین‌ایالتی و دیگر آزادراه‌ها از ۸۵ تا ۹۹/۹ درصد با Z_R بین ۱/۰۳۷- تا ۳/۷۵۰- می‌باشد. مقادیر پیشنهادی قابلیت اطمینان و انحراف معیار نرمال متناظر با آن Z_R در جدول ۸-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۸-۱: مقادیر قابلیت اطمینان و انحراف معیار نرمان Z_R (آشتو ۹-۱۱ و ٦۲-۱ ,۱۹۹۳)

طبقه‌بندی براساس عملکرد	سطوح قابلیت اطمینان توصیه شده			
	درون‌شهری		برون‌شهری	
	درصد	Z_R	درصد	Z_R
آزادراه‌های بین ایالتی و دیگر آزادراه‌ها	۸۵-۹۹/۹	-۱/۰۳۷	۸۰-۹۹/۹	-۰/۸٤۱
		-۳/۷۵		-۳/۷۵
شریان‌های اصلی	۸۰-۹۹	-۰/۸٤۱	۷۵-۹۵	-۰/٦۷٤
		-۲/۳۲۷		-۱/٦٤۵
جمع کننده‌ها	۸۰-۹۵	-۰/۸٤۱	۷۵-۹۵	-۰/٦۷٤
		-۱/٦٤۵		-۰/٦٤۵
محلی	۵۰-۸۰	۰	۵۰-۸۰	۰
		-۰/۸٤۱		-۰/۸٤۱

قابلیت خدمت‌دهی اولیه و نهایی P_0، P_t و ΔPSI:

خدمت‌دهی اولیه P_0 به همواری روسازی ساخته شده وابسته است و خدمت‌دهی نهایی P_t به این موضوع بستگی دارد که قبل از این که عملیات نوسازی لازم شود، ادارات راه و ترابری چه اندازه‌ای از ناهمواری سطح روسازی را مجاز بدانند.

برمبنای نتایج آزمایش جاده‌ای آشتو، مشخص گردید که روسازی صلب می‌تواند دارای خدمت‌دهی اولیه (P_0) ٤/۵ باشد که این مقدار ۰/۳ از روسازی انعطاف پذیر بیشتر است. طبق برآورد آشتو، اگر مقدار خدمت‌دهی نهایی P_t برابر ۲، ۲/۵ و ۳ باشد، به ترتیب ۸۵، ۵۵ و ۱۲ درصد مردم به وضعیت روسازی اعتراض خواهند نمود.

مقاومت خمشی بتن $S'c$:

مقاومت خمشی بتن $S'c$ که در رابطه ۸-۱ مورد استفاده قرار گرفته است، متوسط مقدار مقاومت خمشی ۲۸ روزه حاصل از آزمایش خمش نقطه یک‌سوم را بدست می‌دهد.

بسیاری از ادارات راه‌وترابری حداقل مشخصات مقاومت خمشی ۷، ١٤ یا ۲۸ روزه قابل قبول را مشخص کرده‌اند. به دلیل استفاده از ضرایب اطمینان، مقاومت واقعی روسازی همواره بیشتر است. بهتر آن است که از حداقل مقاومت خمشی مورد پذیرش در طراحی استفاده شود. S´c در رابطه طرح روسازی همان مقاومت خمشی واقعی بتن حاصل از آزمایش است و یا این که با در نظر گرفتن یک حاشیه اطمینان تخمین زده می‌شود (AASHTO 1993: II-16 – II-17).

ضریب زهکشی C_d:

همان طور که قبلاً بیان شد، زهکشی روسازی بتنی مسئله مهمی است. محدوده ضریب زهکشی C_d بین ۰/۷ تا ۱/۲۵ است که براساس کیفیت زهکشی (خیلی ضعیف تا عالی) و درصد رطوبت سطح روسازی نزدیک به حالت اشباع در محدوده بین ۱ تا ۲۵ درصد تعیین می‌شود. ضرایب زهکشی در جدول ۸–۲ ارائه شده است.

جدول ۸–۲: ضریب زهکشی C_d (آشتو ۲٦–II :۱۹۹۳)

کیفیت زهکشی	درصد زمانی که سطح رطوبت به حالت اشباع نزدیک می‌شود			
	<٪۱	٪۱–۵	٪۵–۲۵	>٪۲۵
عالی	۱/۲۵ –۱/۲۰	۱/۲۰–۱/۱۵	۱/۱۵–۱/۱۰	۱/۱۰
خوب	۱/۲۰–۱/۱۵	۱/۱۵–۱/۱۰	۱/۱۰–۱/۰۰	۱/۰۰
نسبتاً خوب	۱/۱۵–۱/۱۰	۱/۱۰–۱/۰۰	۱/۰۰–۰/۹۰	۰/۹۰
ضعیف	۱/۱۰–۱/۰۰	۱/۰۰–۰/۹۰	۰/۹۰–۰/۸۰	۰/۸۰
بسیار ضعیف	۱/۰۰–۰/۹۰	۰/۹۰–۰/۸۰	۰/۸۰–۰/۷۰	۰/۷۰

تأثیر ضریب زهکشی به منظور جبران زهکشی ضعیف و نامناسب به صورت افزایش ضخامت روسازی آشکار می‌شود. بدیهی است که این کار همیشه اثربخش نیست. اگر واقعاً زهکشی دارای مشکل است، به جای اجرای یک روسازی ضخیم بهتر است درصدد حل این مشکل برآییم.

ضریب انتقال بار J:

ضریب انتقال بار J شامل سه عنصر مختلف طراحی است: آیا از تجهیزات انتقال بار (میلگرد اتصال) استفاده می‌شود؟ شانه روسازی آسفالتی است یا بتنی متصل و نوع روسازی کدام یک از انواع JPCP/JRCP یا روسازی بتنی مسلح یکپارچه است؟ محدوده‌ها در هر دسته‌بندی ارائه شده است، به طوری که محدوده کلی از ۲/۳ تا ٤/٤

قرار می‌گیرد. ضرایب انتقال بار در جدول ۸–۳ ارائه شده است.

جدول ۸–۳: ضریب انتقال بار J براساس نوع روسازی (آشتو ۲۶–II :۱۹۹۳)

نوع روسازی	شانه راه			
	آسفالتی		بتنی متصل	
	تجهیزات انتقال بار			
	بله	خیر	بله	خیر
JPCP, JRCP	۳/۲	۳/۸–٤/٤	۲/٥–۳/۱	۳/٦–٤/۲
CRCP	۲/۹–۳/۲	N/A	۲/۳–۲/۹	N/A

ضریب انتقال بار J تأثیر بسزایی بر روی ضخامت طرح دارد. متداول‌ترین نوع روسازی بتنی، روسازی غیرمسلح درزدار با میلگرد اتصال و شانه آسفالتی است که در آن J=۳/۲ است. برای روسازی راه‌های اصلی که تعداد قابل‌توجهی کامیون سنگین وزن را با سرعت‌های بالا از خود عبور می‌دهند، استفاده از تجهیزات انتقال بار نسبت به افزایش ضخامت روسازی منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

مدول الاستیسیته بتن E_c:

آشتو توصیه کرده است که از رابطه انجمن بتن آمریکا بین مدول الاستیسیته E_c و مقاومت فشاری بتن استفاده شود:

رابطه ٤–۸

$$E_C = 4.73\sqrt{f'_c}\ \text{Mpa} = 57000\sqrt{f'_c}\ \text{psi}$$

مدول الاستیسیته بتن E_c با تغییرات جزئی مقاومت بتن چندان تغییر نمی‌کند، بنابراین تأثیر مهمی بر روی ضخامت روسازی نخواهد داشت.

مدول عکس‌العمل بستر k:

روش آشتو برای تعیین مدول عکس‌العمل بستر k پیچیده و شامل مراحل زیر است:

۱– مدول عکس‌العمل بستر k در سیستم مرسوم آمریکا با تقسیم مدول برجهندگی MR بر ۱۹/٤ تخمین زده می‌شود.

۲– اگر مدول عکس‌العمل بستر به دلیل یخبندان و یا اثرات رطوبت، در فصول مختلف تغییرات اساسی داشته باشد، می‌بایست یک میانگین وزنی فصلی برای k تعیین نمود.

۳– مقدار k برحسب نوع بستر و ضخامت به مقادیر بالا تعدیل می‌شود.

٤– به دلیل احتمال از بین رفتن تکیه‌گاه در اثر فرسایش زیراساس، مقدار k به مقادیر

پایین تعدیل می‌شود.
۵- نهایتاً اگر بستر سنگی در فاصله کم‌تر از ۳/۰۵ متر (۱۰ فوت) از سطح باشد، مقدارk مجدداً به پایین تعدیل می‌شود.
با اعمال گام‌های فوق، مقدار k بدست می‌آید که نسبتاً به تخمین اولیه نزدیک است. ضعف تکیه‌گاهی در برابر مکش را باید با استفاده از مصالح مقاوم برطرف کرد و افزایش ضخامت روسازی برای جبران این نقیصه مجاز نیست. گذشته از این، ضخامت دال نسبت به مقدار k چندان حساس نیست. روش‌های ساده‌تر تعیین مقدار k در جداول ٤-١ تا ٤-٥ آورده شده است.

۸-۱-۲- روش‌های حمل

محاسبه مستقیم D از رابطه ۸-۱ دشوار است. راهنمای طراحی آشتو برای بدست آوردن پاسخ، یک نمودار محاسباتی طراحی کرده است. با یک مداد تیز و دقت کافی، می‌توان یک جواب نسبتاً دقیق بدست آورد. همچنین این رابطه را می‌توان به یک صفحه گسترده یا یک ماشین‌حساب قابل برنامه‌ریزی وارد کرد. برای این منظور دو بسته نرم‌افزاری DarWIN از آشتو و WinPAS از انجمن روسازی بتنی آمریکا وجود دارد. هر دو بسته امکان طراحی را هم برای روسازی آسفالتی و هم برای روسازی بتنی فراهم می‌کنند. WinPAS ارزان‌تر است و به قیمت ٤٩٥ دلار آمریکا از کتاب فروشی انجمن روسازی بتنی آمریکا قابل خریداری است (www.pavement.com). از WinPAS می‌توان برای بدست آوردن ضخامت D در روسازی یا هر متغیر دیگری استفاده کرد. برای مثال می‌توان قابلیت‌اطمینان را در یک ضخامت روسازی طرح شده و یک ترافیک پیش‌بینی شده محاسبه کرد.

۸-۱-۳- مثال طراحی

برای چگونگی استفاده از نمودار محاسباتی، مثالی در راهنمای طرح آشتو ارائه شده است. در این مثال انحراف معیار S_O=۰/۲۹ که از مقدار توصیه شده کم‌تر است و WinPAS این مقدار را قبول نخواهد کرد. در نتیجه به جای آن از S_O=۰/۳۰ استفاده می‌شود. مقادیر ورودی در جدول ۸-٤ و حل مسئله در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. از WinPAS ضخامت طراحی برابر با ۹/۷۷ اینچ یا ۲٤۸ میلی‌متر بدست می‌آید که اگر آن را به ۱۰ اینچ یا ۲٥٤ میلی‌متر گرد کنیم با مقدار بدست آمده از راهنمایی طرح آشتو مغایرتی نخواهد داشت.

در این میان می‌توان توضیحاتی را مبنی بر این که مقدار k بستر کم است و احتمالاً با سطح‌اطمینان بالا در راه اصلی بین‌ایالتی سازگار نخواهد بود ارائه کرد. برای افزایش مقدار k در این نوع روسازی وجود زیراساس ضروری خواهد بود. ضریب انتقال بار J با روسازی (JPCP یا JRCP) دارای میلگرد اتصال با شانه‌های آسفالتی مطابقت می‌کند. جدول ۸-۵ یک تحلیل حساسیت ارائه می‌کند و تأثیر تغییر متغیرهای مختلف را بر روی ضخامت مورد نیاز نشان می‌دهد.

تأثیر ترافیک زمانی قابل ملاحظه است که با مضربی از ۱۰ کاهش یا افزایش یابد اما این اثر در تغییرات بین مثبت و منفی ۲۰ درصد کم‌تر خود را نشان می‌دهد. قابلیت اطمینان کل، ضریب انتقال بار و ضریب زهکشی از عوامل نسبتاً مهم هستند. انحراف معیار کل So، مقاومت و سختی بتن، مدول عکس‌العمل بستر k و خدمت‌دهی نهایی بر روی ضخامت طرح تأثیر بسزایی ندارند.

۸-۲- ضمیمه آشتو ۱۹۹۸

در سال ۱۹۹۸ آشتو ضمیمه جدیدی برای راهنمای طرح سازه‌های روسازی آشتو با عنوان «قسمت دوم- طراحی روسازی‌های صلب و طراحی درز روسازی صلب» منتشر کرد (Part II–Rigid Pavement Design and Rigid Pavement Joint Design). استفاده از این روش در اشکال ۸-۲ و ۸-۳ نشـان داده شده است. این ضمیمه جایگزین روش طرح ۱۹۹۳ است و برخلاف نسخه‌های قبل، براساس نتایج آزمایش جاده‌ای آشتو نیست. در عوض روش کار ضمیمه ۱۹۹۸ براساس پایگاه اطلاعاتی عملکرد بلندمدت روسازی و پروژه ۱-۳۰ از NCHRP است. مقادیر ورودی با اضافه کردن فاصله درزها، بدون تغییر و برابر با همان مقادیر روش ۱۹۹۳ باقی می‌ماند. طراحی با استفاده از نرم‌افزار صفحه گسترده‌ای اجراء شد که می‌توان آن را از آدرس زیر بارگیری کرد:
http://www.fhwa.dot.gov/pav/pavement/ltpp/rigid.cfm

جدول ۸-٤: مقادیر ورودی برای مثال طراحی

ورودی	مقدار	
	واحد SI	واحد مرسوم آمریکا
مدول عکس‌العمل بستر k	۱۹ *MPa/m*	۷۲ *pci* (*psi/in*)
مدول الاستیسیته بتن E_c	۳٤/٥ *GPa*	٥،۰۰۰،۰۰۰ *psi*
مقاومت خمشی بتن S'_c	٤/٥ *GPa*	٦٥۰ *psi*
ضریب انتقال بار J	۳/۲	
ضریب زهکشی C_d	۱/۰	
انحراف‌معیار S_0	۰/۲۹ (افزایش یافته به ۰/۳۰)	
قابلیت‌اطمینان و انحراف‌معیار نرمال Z_R	٪۹٥، — ۱/٦٤٥	
خدمت‌دهی اولیه	٤/۲	
خدمت‌دهی نهایی	۲/٥	
ترافیک به ESALs W_{18}	٥،۱۰۰،۰۰۰	

شکل ۸-۱: حل WinPAS برای مثال طراحی

جدول ۸-۵: آنالیز حساسیت- تأثیر پارامترهای طراحی بر ضخامت D

مقدار ورودی	ضخامت **D** اینچ	*mm*	درصد تغییر
حالت اساسی (جدول ۸-٤)	۹/۷۷	۲٤۸	N/A
ترافیک ESALs ٥۱۰،۰۰۰	٦/٦۹	۱۷۰	-۳۱/٥
ترافیک ESALs ٤،۰۸۰،۰۰۰ (-٪۲۰)	۹/٤٥	۲٤۰	-۳/۲
ترافیک ESALs ٦،۱۲۰،۰۰۰ (+٪۲۰)	۱۰/۰٥	۲٥٥	+۲/۹
ترافیک ESAL ٥۱،۱۰۰،۰۰۰	۱۳/۷۷	۳٥۰	+٤۰/۹
قابلیت اطمینان ٪۸۰	۸/۹۷	۲۲۸	-۸/۲
قابلیت اطمینان ٪۹۹,۹	۱۲	۳۰٥	+۲۲/۸
انحراف کل ۰/٤۹	۱۰/۹	۲۷۷	+۱۱/٦
S = 550 psi, - بتن با مقاومت کم *E = ۳،۷۰۰،۰۰۰ psi*	۱۰/٥٦	۲٦۸	+۸/۱
S = 750psi, - بتن با مقاومت بالا *E = ٥،۰٦۲،٥۰۰ psi*	۹/۰۷	۲۳۰	-۷/۱
CRCP, J=۲/٦ بار انتقال یافته با شانه‌های مهار شده	۸/۷٦	۲۲	-۱۰/۳
انتقال بار *J* = ٤/۱ بدون میلگرد اتصال	۱۱/۱۱	۲۸۲	+۱۳/۷
زیراساس *K*= ٥۰ *psi/in*	۹/۸۹	۲٥۱	+۱/۲
زیراساس *K*= ۲۰۰ *psi/in*	۹/۳۷	۲۳۸	-٤/۱
اشباع‌شده> ۲٥٪ با زهکشی بسیار کم، C_d= ۰/۷۰	۱۱/۷٤	۲۸۹	+۲۰/۱
اشباع‌شده < ۱٪ با زهکشی عالی، C_d= ۱/۲٥	۸/۹۸	۲۲۰	-۸/۱
خدمت‌دهی نهایی زیاد ۳/۰	۱۰/۲۸	۲٦۱	+٥/۲
خدمت‌دهی نهایی کم ۲/۰	۹/٤۲	۲۳۹	-۳/٦

۸-۲-۱- ورودی‌های طراحی

روش طراحی این ضمیمه ضخامت طرح را برای روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار (JPCP)، روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP) و یا CRCP ارائه کرد. مقادیر k ارائه شده در جدول ٤-۱ مربوط به این مرجع است. اطلاعات لازم برای بدست آوردن مقدار k خصوصاً خاک‌های حساس به رطوبت ارائه شده است.

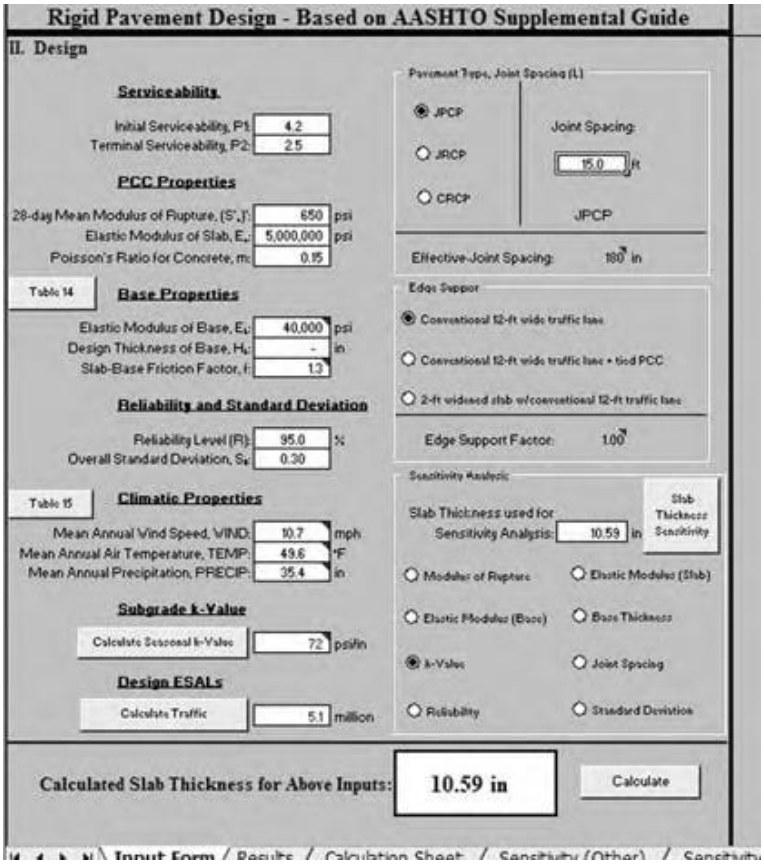
از سایر ورودی‌های کلیدی مورد نیاز، سرعت متوسط سالیانه باد، متوسط دمای هوا و متوسط بارش سالانه است. برای مثال، در کلیولندِ اوهایو سرعت متوسط باد سالانه kmph

۱۷/۲ (۱۰/۷ mph)، متوسط دمای هوای سالانه ۹/۹ درجه سانتی‌گراد (٤٩/٦ درجه فارنهایت) و متوسط بارش سالانه ۹۰۰ میلی‌متر (۳۵/٤ اینچ) است.
از سایر ورودی‌های مورد نیاز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فاصله بین درزها (به فوت) برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار از فاصله واقعی استفاده می‌شود. فاصله درز در روسازی بتنی مسلح حداکثر برابر با ۹/۱ متر (۳۰ فوت) و برای CRCP از فاصله قراردادی ٤/٦ متر(۱۵ فوت) استفاده می‌شود (فقط برای محاسبه ضخامت دال).
- آیا عرض خط عبور به اندازه متداول آن، یعنی ۳/٦٦ متر (۱۲ فوت) است یا عرض متداول به‌علاوه خط عبور بتنی متصل و یا تا ٤/۲۷ متر (١٤ فوت) تعریض شده باشد.
- مدول الاستیسیته، ضخامت و ضریب اصطکاک برای اساس.

۸-۲-۲- مثال‌های طراحی

با توجه به مثال طراحی ذکر شده در بالا و مکان پروژه که کلیولند می‌باشد، ضخامت روسازی با فاصله درز برابر با ٤/٦ متر، ۲٦۷ میلی‌متر بدست خواهد آمد. بنابراین ضخامت بدست آمده از پیوست آشتو ۱۹۹۸، کمی بزرگ‌تر از مقداری است که در راهنمای آشتو ۱۹۹۳ محاسبه می‌شود. تغییر طراحی به روسازی بتنی مسلح یکپارچه به تغییر ضخامت روسازی منجر نمی‌شود. طراحی ضخامت در شکل ۸-۲ آمده است.



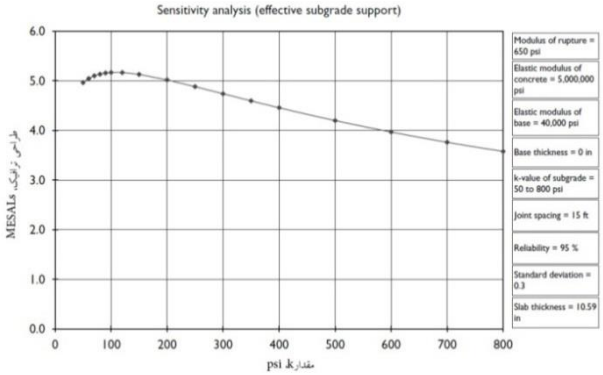
شکل ۸-۲: حل صفحه گسترده برای مثال طراحی آشتو ۱۹۹۸

گام بعدی در فرآیند طراحی، محاسبه قطر مورد نیاز برای میلگردهای اتصال می‌باشد. در دال‌هایی با طول کم‌تر از ۷/٦ متر (۲/۵ فوت)، اندازه بحرانی پلکانی شدن درز به طور میانگین برابر ۱/۵ میلی‌متر (۱۰/۰٦ اینچ) است. همچنین نیاز به دمای متوسط سالیانه برحسب درجه و میانگین شاخص یخبندان[1] برحسب روز- درجه فارنهایت است. برای کلیولند این مقادیر به ترتیب برابر ۹۰ درجه و ٦۵٦ روز- درجه فارنهایت می‌باشد. با داشتن ضریب زهکشی برابر ۱ و عمر روسازی ۲۵ سال، قطر میلگرد اتصال ۲۵ میلی‌متری (۱ اینچ) پاسخ‌گو نیست. اگر قطر میلگرد برابر با ۳۲ میلی‌متر (۱/۲۵ اینچ) انتخاب شود، شرایط مربوطه را احراز خواهد کرد. کنترل پلکانی شدن درز در شکل ۸-۳ آمده است. حساسیت ضخامت دال نسبت به مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته (ارتجاعی) دال،

1- Freezing Index

مدول الاستیسیته اساس، ضخامت اساس، مقدار k، فاصله بین درزها، ضریب‌اطمینان و انحراف‌معیار، به طور خودکار توسط صفحه گسترده اعمال می‌شود. در شکل ۸-٤ حساسیت نسبت به مقدار k نشان داده شده است.

ضمیمه آشتو برای مثال طراحی، سه راه‌حل مختلف ارائه می‌کند که این طرح‌ها برای یک روسازی بتنی غیرمسلح درزدار بدون میلگرد اتصال به همراه یک اساس سنگدانه‌ای، روسازی بتنی غیرمسلح درزدار بدون میلگرد اتصال با اساس تثبیت شده با قیر و همچنین یک روسازی بتنی غیرمسلح درزدار با میلگرد اتصال و با اساس سنگدانه‌ای است.



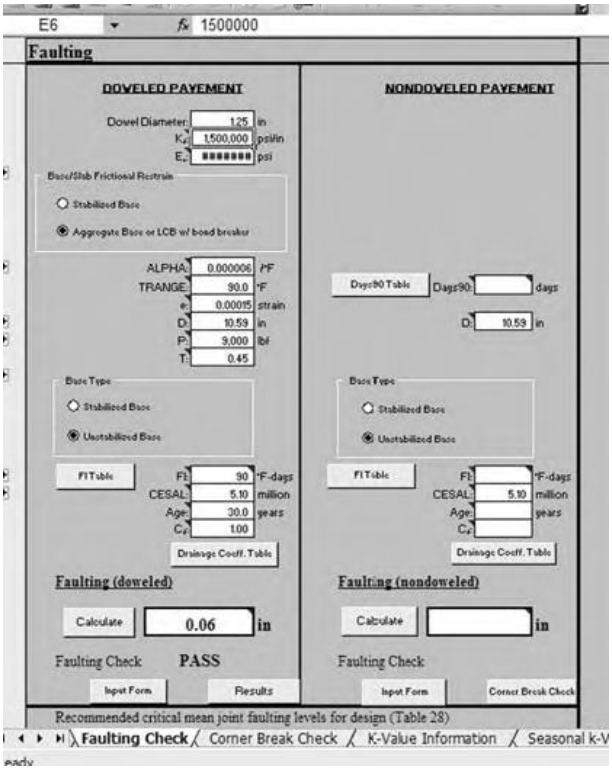
شکل ۸-۳: آنالیز حساسیت برای طراحی منطبق با AASHTO 1998

۸-۳- طراحی به روش PCA ۱۹۸٤

برخلاف روش‌های آشتو ۱۹۹۳ و ۱۹۹۸، روش انجمن سیمان پرتلند بر پایه روش مکانیستیک طراحی شده است که در آن برای بدست آوردن تنش‌ها و میزان خیز(تغییرشکل) روسازی از جدول و نمودارهای حاصل از روش اجزای محدود استفاده شده است.

راهنمای اصلی برای محاسبات دستی تنظیم شده است. جزئیات مربوط به روش محاسبات دستی در متن کتاب‌های استاندارد روسازی، نظیر فصل ۱۲ از کتاب هوانگ و فصل ۲۱ از کتاب گاربر و هول[1] ارائه شده است. روش ساده‌تر، استفاده از نرم‌افزار روسازی PCAPAV یا StreetPave است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

1- Garber & Hoel



شکل ۸-٤: صفحه گسترده کنترل پلکانی شدن درز، منطبق با طراحی آشتو ۱۹۹۸

چون این روش مبتنی بر یک روند تکراری است، انجام چندین چرخه سعی و خطا در طراحی دستی منجر به خستگی و کسل شدن فرد می‌شود. یک روش حل دستی در زیر ذکر شده است اما این روش بسیار شبیه به محاسبات نرم‌افزار StreetPave است که در فصل ۹ بیان می‌شود. روش طراحی PCA ۱۹۸٤ به عنوان یک روش جایگزین در راهنمای طراحی روسازی آشتو ۱۹۹۳ مطرح شده است. اگرچه از روش PCA ۱۹۸٤ در طراحی روسازی راه‌های اصلی به طور گسترده استفاده نمی‌شود اما این روش همچنان کاربردی است. یکی از نقاط قوت این روش آن است که یک دید عمیق از متغیرهای متنوعی که در عملکرد روسازی نقش دارند ارائه می‌کند. این روش برای طراحی روسازی‌های کم‌تردد مفید است و در تهیه جداول طراحی پارکینگ، خیابان و جاده محلی از آن استفاده می‌شود. نسخه SI این راهنمای طراحی توسط انجمن سیمان پرتلند کانادا منتشر شده است.

۸-۳-۱- معیار طراحی

طراحی روسازی با هدف جلوگیری از گسیختگی و نابودی راه‌ها بر اثر خستگی یا فرسایش است. در ابتدا ضخامت روسازی به همراه جزئیات مربوط به شانه و درزها تخمین زده می‌شود. سپس خستگی و فرسایش ناشی از عبور و مرور با استفاده از رابطه ٦-٤، محاسبه می‌شود. اگر مقدار هر دو آسیب از ۱۰۰ درصد کم‌تر شود طراحی قابل‌قبول است اما ممکن است ضخامت تخمینی به گونه‌ای باشد که نتیجه طراحی را محافظه‌کارانه کند. بنابراین در آغاز سعی و خطا ضخامت‌های پایینی در نظر گرفته می‌شود. اگر خستگی یا فرسایش از ۱۰۰ درصد تجاوز کند، ضخامت بیشتری را در نظر می‌گیریم.

۸-۳-۲- ورودی‌های طراحی

ورودی‌های روش طراحی PCA ۱۹۸٤ همانند سایر روش‌های طراحی است. شامل:

- مقاومت خمشی بتن که از طریق آزمایش یک‌سوم دهانه بدست می‌آید.
- سختی زیراساس و بستر (مقدار k)- راهنمای انجمن سیمان پرتلند دارای نمودارهای مرتبط ساده‌ای، نظیر جدول ٤-۱ برای اندازه‌گیری مقدار k، براساس طبقه‌بندی خاک طبق استاندارد ASTM، طبقه‌بندی خاک براساس استاندارد آشتو و میزان مقاومت، ظرفیت باربری کالیفرنیا می‌باشد. سپس مقدار k برای زیراساس تثبیت‌نشده یا زیراساس تثبیت‌شده با سیمان با استفاده از جداول ٤-۲ و ٤-۳ اصلاح می‌شود.
- انتخاب نوع درز اتصال از لحاظ وجود میلگرد اتصال.
- استفاده و یا عدم‌استفاده از شانه بتنی متصل یا شانه آسفالتی.
- مقدار ترافیک در طول عمر روسازی به صورت محور منفرد و مرکب دوگانه و سه‌گانه تفکیک می‌شود و با افزایش ۸/۹ کیلونیوتن (۲۰۰۰ پاوند) برای محورهای منفرد و ۱۷/۸ کیلونیوتن (٤۰۰۰ پاوند) برای محورهای مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند.
- ضریب‌اطمینان بار، در روش PCA ۱۹۸٤- مستقیماً به این ضریب اشاره نشده است. اما در عوض بار محورها در یک ضریب‌اطمینان ضرب می‌شود که مقدار آن برای راه‌های اصلی بین‌ایالتی و بزرگراه‌های چندخطه برابر ۱/۲ است و در راه‌های اصلی دوخطه و راه‌های شریانی که دارای حجم متوسطی از عبور و مرور کامیون می‌باشد برابر ۱/۱ است.

۸-۳-۳- حل دستی

در ابتدا یک ضخامت اولیه برای روسازی فرض می‌شود. سپس میزان خستگی و فرسایش تحلیل می‌شود تا درصد آسیب محاسبه شود.

تحلیل خستگی

بسته به استفاده و یا عدم‌استفاده از شانه بتنی متصل، یکی از دو نمودار را برای اندازه‌گیری تنش معادل محور منفرد یا محور مرکب انتخاب می‌نماییم. چون شانه بتنی متصل شرایط بارگذاری در لبه روسازی را به شرایط بارگذاری در ناحیه داخلی روسازی تبدیل می‌کند، بنابراین میزان تنش به وجود آمده به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.
مثالی در راهنمای ۱۹۸٤ PCA مطرح شده است. برای یک روسازی دارای میلگرد اتصال ۲٤۱ میلی‌متری (۹/۵ اینچ)، دارای بستری با مدول ۳۵ مگاپاسکال بر متر، تنش‌های معادل برای محور منفرد برابر ۱/٤۲ مگاپاسکال و برای محور مرکب برابر با ۱/۳۲ مگاپاسکال است.
تنش‌های معادل به مقدار مقاومت خمشی بتن تقسیم می‌شوند تا ضرایب نسبت تنش بدست آید. در این مثال مقاومت خمشی بتن برابر با ٤/٤۸ مگاپاسکال و ضرایب محورهای منفرد و مرکب به ترتیب برابر با ۰/۳۱۷ و ۰/۲۹۵ است. سپس از نسبت تنش بدست آمده برای هر نوع بارگذاری (تک محور و مرکب) در بدست آوردن تعداد تکرار مجاز هر محور استفاده می‌شود.
در این مثال، روسازی تحت ٦۳۲۰ بار ۱۳۳کیلونیوتنی حاصل از بار منفرد محوری قرار دارد. برای یک راه اصلی، این مقدار در ضریب‌اطمینان ۱/۲ ضرب می‌شود تا بار ۱٦۰ کیلونیوتن بدست آید. با استفاده از نموگرام تعداد تکرار بارهای مجاز برای این محور ۲۷۰۰۰ بدست می‌آید. بنابراین این محورها به اندازه ٦۳۲۰ بخش بر ۲۷۰۰۰ یا ۲۳/۳ درصد از عمر خستگی روسازی را مصرف می‌کنند.
این روند برای هر یک از محورهای منفرد و مرکب تکرار می‌شود. تعداد تکرارهای مجاز در برخی از حالات به حد نهایی می‌رسد، در نتیجه نیازی به در نظر گرفتن این محور و یا هر محور سبک دیگری نیست. این مثال در طراحی روسازی، به تعداد بی‌نهایت از محورهای منفرد و مرکب به ترتیب با بار ۹۸ و ۲۱٤ کیلونیوتن از روسازی قابل عبور هستند. با جمع‌بندی آسیبی که بر اثر کل حجم عبور و مرور بر پروژه وارد می‌شود، مشخص شد که ٦۲/۸ درصد از کل خسارت ممکن بر اثر خستگی به روسازی وارد می‌شود که این مقدار کم‌تر از ۱۰۰ درصد است. در نتیجه روسازی از لحاظ خستگی

مطلوب است.

تحلیل فرسایش

تحلیل فرسایش روسازی نیز روش مشابهی دارد. چهار جدول برای درز دارای میلگرد اتصال، درز با قفل و بست سنگدانه‌ها و همچنین داشتن یا نداشتن شانه بتنی تهیه شده است. در مثالی که در راهنمای طراحی به روش انجمن سیمان پرتلند آمده است، روسازی دارای میلگرد اتصال، اما بدون شانه بتنی می‌باشد. فاکتورهای فرسایش محورهای منفرد و مرکب به ترتیب برابر ۲/۵۹ و ۲/۷۹ هستند.

با استفاده از نموگراف، تعداد تکرار مجاز برای یک محور منفرد ۱٦۰ کیلونیوتن (۳٦ kips) ۱۵۰۰۰۰۰ است. بنابراین ٦۳۲۰ تکرار برای محور با بار فوق، ۰/٤ درصد از عمر فرسایش روسازی را مصرف می‌کند. با جمع آسیبی که بر اثر عبور و مرور کل حجم ترافیک بر پروژه وارد می‌شود، مشخص شد که ۳۸/۹ درصد از کل خسارت روسازی، ناشی از فرسایش است که این میزان کم‌تر از ۱۰۰ درصد می‌باشد. در نتیجه روسازی، هم از لحاظ فرسایش و هم از لحاظ خستگی مطلوب است.

۸-۳-٤- نرم‌افزارهای PCAPAV و StreetPave

اگر ضخامت مفروض اولیه رضایت‌بخش نباشد، این روند باید تکرار شود که نتیجه آن خستگی محاسبات دستی است. انجمن سیمان پرتلند یک برنامه تحت Dos به نام PCAPAV برای طرح روسازی تهیه کرده است. PCAPAV دقیقاً همان روش PCA۱۹۸٤ را دنبال می‌کند. این برنامه به صورت خودکار عمل سعی و خطا را تکرار می‌کند تا آن که یک طرح مطلوب بدست آید. اخیراً انجمن روسازی بتنی آمریکا برنامه تحت ویندوز StreetPave را تهیه کرده است. این برنامه در فصل ۹ مورد بحث قرار می‌گیرد.

۸-٤- مقدمه‌ای بر راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک- تجربی (M-E)

تحقیقاتی در قالب پروژه NCHRP 1-37A انجام شد تا دستورالعمل طراحی روسازی جدیدی را با راهنمای ۱۹۹۳ جایگزین کند. در حال حاضر این دستورالعمل تکمیل شده است و نسخه تحقیقاتی آن در آدرس www.trb.org/mepdg/guide.htm موجود

می‌باشد.

راهنمای جدید طراحی براساس اصول مکانیستیک- تجربی پایه‌گذاری شده است. با بکارگیری مدل‌های عددی و کالیبراسیون داده‌های مربوط به عملکرد روسازی و نرم‌افزار عملکرد بلندمدت روسازی، تحلیل انجام می‌شود. در واقع، برنامه عملکرد بلندمدت روسازی یک آزمایش جاده‌ای است که راهنمای جدید طراحی براساس آن پایه‌ریزی شده است. فرآیند این روند به صورت کاملاً نرم‌افزاری است و نمی‌توان آن را به صورت دستی انجام داد.

برخی نکته‌های خاص در مورد این راهنما توسط آشتو در نشریه‌ای غیررسمی عنوان شد که چگونگی تهیه آن را مورد بررسی قرار می‌دهد.

چند گزیده مهم از این نشریه سه صفحه‌ای در زیر نقل شده است:

- راهنمای طراحی روسازی M-E از مدل‌های عددی مکانیستیک- تجربی برای آنالیز داده‌های ترافیک، آب‌وهوا، مصالح، سازه و همچنین تخمین مجموع خسارات مربوط به عمر خدمت‌دهی استفاده می‌کند. این روش برای طراحی روسازی جدید، بازسازی و نوسازی روسازی انعطاف‌پذیر، صلب و نیمه‌صلب قابل‌استفاده است. پیش‌بینی عملکرد روسازی در قالب خرابی‌ها و همواری مسیر انجام می‌شود. خرابی‌های پیش‌بینی شده برای طراحی روسازی صلب عبارت از پلکانی شدن، ترک‌خوردگی و سوراخ‌شدگی روسازی بتنی مسلح یکپارچه است. مقادیر عملکرد طراحی را می‌توان با مقادیر حدی مقایسه کرد و یا می‌توان مقایسه عملکرد را با طراحی‌های جایگزین مرتبط با ترافیک، سازه و مصالح متغیر انجام داد.
- باید متذکر شد که این نرم‌افزار برای تحلیل روسازی استفاده می‌شود و برای تعیین ضخامت سازه‌ای در نظر گرفته نشده است. از این نرم‌افزار به عنوان یک ابزار معمول در کارهای روزانه استفاده می‌شود.

این راهنمای طراحی تنها در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا موجود است و روسازی بتنی مسلح درزدار را شامل نمی‌شود. از دومین نکته این گونه برداشت می‌شود که کاربرد اولیه این نرم‌افزار برای تهیه کاتالوگ‌ها و جداول طراحی روسازی است. بنابراین از آن فقط برای روسازی راه‌های اصلی با ترافیک سنگین و یا به عنوان ابزاری برای تجزیه‌وتحلیل مشکلات عملکرد روسازی استفاده می‌شود.

برخی از ویژگی‌های کلیدی عبارتند از:

- این فرآیند ارزشیابی اگرچه بسیار پیشرفته است ولی مشابه روش PCA ۱۹۸٤

می‌باشد. در آن یک سازه روسازی پیشنهاد و سپس در طول عمر خدمت‌دهی خرابی و عملکرد آن تحت ترافیک پیش‌بینی شده و شرایط محیطی مدل‌سازی می‌شود. در صورت لزوم، طراحی پیشنهادی تا حصول یک طرح قابل‌قبول، اصلاح می‌شود.

- در این روش اطلاعات ورودی بیشتری نسبت به روش‌های طراحی قبل لازم است. مدول‌های ورودی جداگانه‌ای برای ترافیک و مصالح مصرفی به کار برده می‌شود. نرم‌افزار براساس موقعیت پروژه شامل یک مدل آب‌وهوایی درونی نیز هست.

هوانگ جزئیات بیشتری را در مورد روش پیشنهاد شده، در پیوست F کتاب خود تحت عنوان «مروری بر راهنمای طرح روسازی ۲۰۰۲»، ارائه کرده است:

- مدل اصلی تحلیل طراحی روسازی بتنی، برنامه اجزای محدود ISLAB2000، یک جایگزین برای ILLI–SLAB است.
- در صورت امکان، ورودی‌ها برای روسازی‌های انعطاف پذیر و صلب مشابه هم انتخاب می‌شوند تا امکان مقایسه انواع روسازی فراهم شود.
- یک رویکرد اولویت‌بندی شده برای تعیین ورودی طراحی استفاده می‌شود. ورودی‌های سطح ۱ با جزئیات کامل و خیلی دقیق‌تر است، در حالی که ورودی‌های سطح ۳ اغلب مقادیر پیش‌فرض هستند. بنابراین طراح تلاش می‌کند که مقادیر زیادی از اطلاعات مختلف را بر پایه اهمیت پروژه جمع‌آوری کند.
- این راهنما رویکرد محور معادل را حذف کرده است و محاسبه خرابی، مستقیماً از طریق طیف محور مشابه روش PCA۱۹۸٤ و نرم‌افزار StreetPave انجام می‌شود.
- مدل پیشرفته شرایط آب‌وهوایی یکپارچه توسط FHWA تهیه شده است و برای شبیه‌سازی شرایط زیست محیطی قالب در پروژه استفاده می‌شود.
- ناهمواری روسازی در شاخص ناهمواری جهانی براساس خرابی‌های روسازی در طول زمان مثل ترک‌خوردگی، ورقه‌ورقه شدن، پلکانی شدن محل درزها و عوامل دیگر پایه‌گذاری شده است.

اجرای M–EPDG توسط ادارات راه ایالتی و FHWA نیاز به تلاش‌های گسترده خواهد داشت. در زمان نوشتن این کتاب، FHWA کارگاه‌های آموزشی یک روزه را، در تمام آمریکا برای ادارات راه ایالتی حمایت می‌کند. این کارگاه‌های آموزشی در سایت

www.fhwa.dot.gov/pavement/dgit/index.cfm. توضیح داده شد.

موضوعات کارگاه‌های آموزشی عبارتند از:

- ملاحظات آب‌وهوایی؛
- ورودی ترافیکی؛
- کالیبراسیون محلی مدل‌های عملکردی؛ و
- مشخصات مصالح.

علاوه بر آن، از آنجایی که این مدل‌ها بر پایه داده‌های ملی عملکرد بلندمدت روسازی تهیه شده است، بسیاری از ادارات راه ایالتی براساس شرایط محلی خود، تحقیقاتی را برای اصلاح هرچه بیشتر این مدل‌ها طرح‌ریزی کردند. در نتیجه، پیاده‌سازی کامل روش M–EPDG نیازمند صرف زمان زیادی است و روش‌های طراحی قبل، به احتمال زیاد مانند روش آشتو ۱۹۹۳ همچنان تا مدتی مورد استفاده عموم خواهد بود.

فصل نهم

طراحی روسازی با ترافیک سبک

روسازی بتنی عمدتاً برای راه‌های اصلی مهم با ترافیک سنگین و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود. اما در کاربردهای سبک‌تر مانند خیابان‌های شهری، جاده‌های محلی و محوطه پارکینگ نیز جایگاه مهمی دارند. در این خصوص دوام زیاد، هزینه پایین نگهداری، نیاز کم‌تر به تجهیزات نوردهی در شب و کاهش میزان تولید گرما در آب‌وهوای گرم، سبب محبوبیت این نوع روسازی شده است. با توجه به علم معماری و مناظر شهری می‌توان روسازی‌های بتنی دارای بافت و الگوی بصری رنگی مشخصی را طراحی نمود و به منظور بهبود جنبه زیباشناسی به کار برد.

با این وجود، روش‌های مورد استفاده در طرح روسازی راه‌های اصلی و فرودگاه‌ها برای روسازی‌های با ترافیک سبک دست بالا است. به‌علاوه، اگرچه دستورالعمل آشتو ۱۹۹۳ می‌تواند برای طراحی این روسازی به کار برده شود ولی روسازی‌های سبک در نتایج حاصل از آزمایش جاده‌ای آشتو به خوبی مورد بررسی واقع نشده‌اند. هوانگ به این نکته اشاره می‌کند که استفاده از روش آشتو ۱۹۹۳ ممکن است نتایج غیر محافظه‌کارانه و پرخطری را برای روسازی‌های سبک به دنبال داشته باشد.

به منظور تهیه روش‌های مناسب برای طراحی روسازی سبک، کمیته‌های ۳۲۵ و ۳۳۰ از انجمن بتن آمریکا، از روش PCA ۱۹۸٤ برای تهیه جداول ساده طراحی استفاده کردند. همچنین انجمن روسازی بتنی آمریکا نرم‌افزار StreetPave را برای طراحی این گونه روسازی‌ها ایجاد کرد. انجمن روسازی بتنی آمریکا طراحی روسازی‌های بتنی خیابان‌های شهری را از مجموعه اطلاعاتی IS 184 P ایجاد کرد.

این فصل شامل جداول طراحی روسازی برای محوطه‌های پارکینگ، خیابان‌ها و جاده‌های

محلی است که با استفاده از StreetPave به وجود آمده‌اند. این جداول تقریباً مشابه 325.12R-02 و 330R-01 انجمن بتن آمریکا هستند. از آنجایی که روسازی بتنی متخلخل یکی از گزینه‌های مناسب روسازی‌های با ترافیک سبک محسوب می‌شود، جداول طراحی مربوط به آن نیز ارائه شده است.

در این میان تقاطع بتنی نیز مورد بحث قرار خواهد گرفت. معمولاً برای تعویض روسازی آسفالتی در تقاطع‌هایی که شیارشدگی و سایر خرابی‌ها بروز می‌کند، از روسازی بتنی استفاده می‌شود. وسایل نقلیه سنگین که توقف کرده و یا به آرامی حرکت می‌کنند، باعث ایجاد پدیده شیارشدگی می‌شوند. برای این منظور در ایستگاه‌های اتوبوس از روسازی بتنی استفاده می‌شود.

هرچند که روسازی بتنی براساس مقاومت خمشی طراحی می‌شود با این حال کنترل کیفیت پروژه و بازکردن روسازی به روی ترافیک، براساس مقاومت فشاری صورت می‌گیرد. چند رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری توسط کمیته‌های ۳۲۵ و ۳۳۰ از انجمن بتن آمریکا و انجمن روسازی بتنی آمریکا (۱۹۹۷) پیشنهاد شده است. عموماً روسازی بتنی تقاطع‌ها زمانی به روی ترافیک باز می‌شود که بتن به مقاومت خمشی ۳ مگاپاسکال (٤٥٠psi) یا مقاومت فشاری ۱۷ مگاپاسکال (۲۵۰۰ psi) رسیده باشد.

۹-۱- راهنمای طراحی ACI 325.12R و ACI 330

کمیته ACI 325 در سال ۲۰۰۲ نشریه‌ای با عنوان «راهنمای طراحی روسازی‌های بتنی درزدار برای خیابان‌های شهری و جاده‌های محلی» و کمیته ACI 330 در سال ۲۰۰۱ نشریه‌ای تحت عنوان «راهنمای طراحی و ساخت پارکینگ‌های بتنی» منتشر کردند. هر دو نشریه هم در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا و هم در سیستم واحد SI نوشته شد. حداکثر متوسط ترافیک روزانه وسایل نقلیه سنگین (ADTT) در دو جهت برای پارکینگ ۷۰۰ و برای خیابان‌ها و جاده‌های محلی ۱۵۰۰ می‌باشد. علاوه بر آن، کمیته ACI 330 نشریه‌ای تحت عنوان «مشخصات پارکینگ‌های بتنی غیرمسلح» را منتشر کرده است که شامل ملزومات مربوط به مصالح، بتن‌ریزی، بافت سطحی، عمل‌آوری، ایجاد درز و گشودن روسازی به روی ترافیک می‌باشد.

به دلیل بارهای ترافیکی سبک‌تر معمولاً روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار بدون میلگردهای اتصال استفاده می‌شود. روسازی‌های غیرمسلح و بدون میلگردهای اتصال از زنگ‌زدگی آرماتور در مواجهه با نمک‌های ضدیخ و سایر مواد یخ‌زدا مصون می‌باشند. زیرا فولادی برای زنگ زدن و خوردگی وجود ندارد.

به طور کلی مسلح کردن بتن تنها برای پانل‌های نامنظم با نسبت طول به عرض ۱/۷ به ۱ یا بیشتر لازم می‌باشد. هرچند در گذشته آرماتوربندی با فواصل طولانی درزها صورت می‌گرفت. در عمل بهتر است فاصله درزها کاهش یابد. ACI 330 R-01 اظهار می‌کند: «استفاده از آرماتورهای توزیع شده در بتن، ظرفیت باربری روسازی را افزایش نخواهد داد و در صورت استفاده از روش‌های اجرایی ضعیف، نباید به کار برده شود».

۹-۱-۱- نمونه مشخصات طراحی

حداقل ضخامت روسازی عموماً ۱۰۰میلی‌متر (٤ اینچ) است. ضخامت روسازی برای خیابان‌های شهری و جاده‌های محلی ممکن است بین ۲۰۰ تا ۲۲۵ میلی‌متر (۸ یا ۹ اینچ) باشد. میلگردهای اتصال اغلب برای روسازی‌های با ضخامت بیشتر از ۲۰۰میلی‌متر (۸ اینچ) استفاده می‌شود. ممکن است مطابق با جدول ۷-۱ میلگردهای اتصال با قطر ۳۲ میلی‌متر (۱/۲۵ اینچ) برای روسازی‌های تا ضخامت ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) استفاده شود. خیابان‌های شهری معمولاً دارای آبروها و جداولی هستند که به لبه روسازی متصل بوده و یا به طور پیوسته با روسازی اجرا شوند. این امر باعث می‌شود تنش‌های لبه کاهش پیدا کند و در نتیجه اجرای روسازی‌های کم‌ضخامت‌تر را امکان پذیر می‌نماید. همچنین جداول و آبروها را می‌توان در ابتدا اجراء کرد و در زمان بتن‌ریزی به عنوان قالب‌های کناری برای ساخت خیابان‌های شهری یا روسازی محوطه پارکینگ‌ها مورد استفاده قرار داد.

ACI 325.12R استفاده از میلگردهای اتصال یا اساس تثبیت شده را در حالت عادی برای روسازی با ترافیک سبک توصیه نمی‌کند. در نظر گرفتن مشخصات طراحی مانند اساس غیرمتصل، لبه‌های ضخیم، خط عبور کناری تعریض شده یا جدول‌ها و آبروهای متصل به روسازی می‌تواند به شدت باعث اقتصادی شدن طرح شود.

با توجه به وزن، حجم و سرعت ترافیک عبوری از روسازی‌های با ترافیک سبک، در صورتی که موضوع مکش سامانه زهکشی به اندازه کافی مناسب باشد، مشکلی ایجاد نمی‌کند. زهکشی سطحی مناسب با شیب ۲ یا ۲/۵ درصد نیز می‌تواند از مشکلات مربوط به رطوبت پیشگیری کند. در مناطق شهری، زهکشی خیابان‌ها و محوطه‌های پارکینگ توسط مجاری زیرزمینی فاضلاب تأمین می‌شود.

۹-۱-۲- مشخصات ترافیک

در تمام روسازی‌های بتنی، بیشترین بار محوری در طراحی و عملکرد روسازی تعیین‌کننده می‌باشد. لذا تخمین دقیق تعداد کامیون‌های سنگین‌وزن که از روسازی عبور می‌کنند به خصوص زمانی که بار آن‌ها از حد مجاز بیشتر باشد، مهم خواهد بود. این امر به ویژه در نزدیکی مراکز صنعتی مهم است. کمیته ACI 325 و کمیته ACI 330 دسته‌بندی این مراکز را ارائه کرده‌اند (جدول ۱-۹).
جدول‌های طراحی برای این سطوح ترافیک متعاقباً در همین فصل ارائه می‌شوند.

۹-۱-۳- نحوه آرایش درزها

برای پارکینگ‌ها، خیابان‌های شهری و راه‌های محلی، اجرای درزها اهمیت ویژه‌ای دارد. بر خلاف روسازی راه‌های اصلی که برای مسیرهای طولانی و مستقیم ساخته شده‌اند، روسازی مسیرهای کم‌تردد شامل تقاطع‌ها، راه‌های دسترسی، تأسیسات زهکشی و سایر تأسیسات شهری است. بیشتر درزها از نوع انقباضی هستند، اما به منظور حفظ زیرساخت‌های مجاور، درزهای اجرایی و جدا کننده و انبساطی نیز ضروری هستند. بنابراین نحوه آرایش درزها برای این دسته از روسازی به برنامه‌ریزی‌های قابل توجهی نیاز دارد.

جدول ۹-۱: طبقه‌بندی ترافیک خیابان و محوطه پارکینگ از ACI 325.12R-11 و ACI 330R-6

طبقه‌بندی خیابان/ پارکینگ	VPD یا ADT دوطرفه[1]	وسایل نقلیه تجاری (دومحور، شش چرخ و سنگین‌تر)		دسته‌بندی برای جدول‌های ۹-۳ تا ۹-۵ از StreetPave
		درصد کامیون درروز		
فقط پارکینگ خودرو		۰	۰	مناطق مسکونی
راه‌های دسترسی کامیون			۱-۱۰	مناطق مسکونی
منطقه مسکونی کم‌جمعیت	۲۰۰	۱-۲	۲-٤	مناطق مسکونی
منطقه مسکونی	۲۰۰-۱۰۰۰	۱-۲	۲-٤	مناطق مسکونی
ورودی مرکز خرید و راه‌های خدماتی و پارکینگ اتوبوس و کامیون			۲۵-۳۰۰	راه‌های جمع کننده
راه‌های جمع کننده	۱۰۰۰-۸۰۰۰	۳-۵	۵۰-۵۰۰	راه‌های جمع کننده
پارکینگ اتوبوس و کامیون			۱۰۰-۷۰۰	شریانی کوچک
شریانی کوچک	٤۰۰۰-۱۵،۰۰۰	۱۰	۳۰۰-٦۰۰	شریانی کوچک
شریانی بزرگ	٤۰۰۰-۳۰،۰۰۰	۱۵-۲۰	۷۰۰-۱،۵۰۰	شریانی بزرگ
تجاری	۱۱،۰۰۰-۱۷،۰۰۰	٤-۷	٤۰۰-۷۰۰	شریانی بزرگ
صنعتی	۲۰۰۰-٤۰۰۰	۱۵-۲۰	۳۰۰-۸۰۰	شریانی بزرگ
پارکینگ کامیون سنگین			۷۰۰	شریانی بزرگ

[1] وسیله نقلیه در روز(VDT) یا متوسط ترافیک روزانه (ADT)

پیوست C از ACI 325.12R-02 و پیوست C از ACI 330R-01 مثال‌هایی را از نحوه آرایش درزها برای سازه‌های مختلف ارائه کرده‌اند. همچنین در مجموعه اطلاعات ISO61P بنام «طراحی و اجرای درزها برای خیابان‌های بتنی» در مورد نحوه آرایش درزها بحث شده است. باید دقت شود که آب زهکشی‌شده از بام ساختمان‌ها مستقیماً وارد درزهای موجود در روسازی پارکینگ‌ها نشود، چرا که عبور جریان آب با حجم زیاد و سرعت بالا، می‌تواند فرسایش سریع را در محل درز لایه‌های تکیه‌گاهی رویه به دنبال داشته باشد.

عموماً فاصله درزها با این محدوده ضخامت، ۳ تا ۵ متر (۱۲ تا ۱۵ فوت) است. فاصله درزها نباید از محدوده ذکر شده در جدول ۷-۳ تجاوز کند.

یکی‌از مزایای روسازی بتنی برای خیابان‌های شهری و پارکینگ‌ها ترکیب این شیارها با

خطوط علامت‌گذاری شده برای فضای پارک و علامت‌های جدا کننده مسیر خیابان است که این موضوع پیروی از علائم را برای راننده آسان‌تر می‌کند.
برای مکان‌هایی مثل پارکینگ که سرعت حرکت در آن‌ها کم است، زمانی‌که بتن همچنان حالت خمیری دارد، این درزها توسط ابزار شیارزن ایجاد می‌شود. این تکنیک با ایجاد لبه‌های محکم، شرایط نگهداری را آسان‌تر می‌کند و ضربات ناشی از عبور کم‌سرعت را بر روی درزها نامحسوس خواهد کرد. همچنین ممکن است این درزها به روش اره‌کردن ایجاد شود که از این روش در روسازی راه‌های اصلی با سرعت بالا استفاده می‌شود.

۹-۲- نرم‌افزار طراحی StreetPave از انجمن روسازی بتنی آمریکا

نرم‌افزار طراحی StreetPave به مهندس طراح اجازه می‌دهد تا روسازی بتنی را برای مسیرهای کم‌تردد و در سیستم واحدهای مرسوم آمریکایی و SI طراحی کنند. برنامه فوق از طریق (www.pavement.com) انجمن روسازی بتنی آمریکا به ارزش ۱۰۰ دلار آمریکا قابل تهیه است.
در این نرم‌افزار محاسبات از روش PCA ۱۹۸٤ استفاده می‌کند. احتمالاً مهم‌ترین حالت استفاده از یک منحنی خستگی متغیر است که براساس مطلوبیت اطمینان و درصد مجاز ترک‌خوردگی دال بتنی در نظر گرفته می‌شود. رابطه خستگی در رابطه ٦-۵ و شکل ٦-۱ نشان داده شده است.
دو تغییر مهم دیگر، اضافه‌کردن طراحی روسازی آسفالتی قابل مقایسه با روسازی بتنی و اضافه‌کردن مدول هزینه‌های چرخه عمر می‌باشد. برخی دیگر از ویژگی‌ها و مدول‌ها در ذیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. مدول‌های راهنما پارامترهای ورودی را با جزئیات کامل مورد بحث قرار می‌دهند.

۹-۲-۱- تنظیمات کلی

قسمت تنظیمات کلی برنامه به طور کلی به گونه‌ای طراحی شده است که به ندرت تغییر کند. یکی از این تنظیمات، مربوط به سیستم واحدهای مورد استفاده یعنی سیستم SI یا سیستم مرسوم آمریکایی است. یکی دیگر از این تنظیمات مربوط به میانگین درجه حرارت سالیانه (MAAT) است که براساس موقعیت مکانی پروژه تغییر می‌کند و فقط برای طراحی روسازی آسفالتی به روش طراحی مؤسسه آسفالت (AI) مورد استفاده قرار

می‌گیرد. روش طراحی مؤسسه آسفالت به تفصیل در کتب حمل‌ونقل و طراحی روسازی مورد بحث قرار گرفته است که از آن‌ها می‌توان به فصل ۲۰ از کتاب گاربر و هُول و فصل ۱۱ از کتاب هوانگ اشاره کرد و توضیح این روش به صورت مفصل در این کَتاب مطرح نخواهد شد. شاخص خدمت‌دهی نهایی، ورودی دیگری است که برگرفته از روش طراحی آشتو می‌باشد و تنها برای تخمین مقدار محور معادل برای طراحی به روش انسیتو آسفالت به کار می‌رود. مقدار این پارامتر به طور پیش‌فرض برابر با ۲/۰ بوده است و اثر کمی در طراحی روسازی دارد.

یک پارامتر ورودی مهم درصد ترک‌خوردگی دال بتنی روسازی بعد از عمر خدمت آن است که مقدار آن ۵ درصد برای راه‌های اصلی بین‌ایالتی، ۱۵ درصد برای راه‌های ایالتی، شریانی، جمع کننده و راه‌های روستایی و ۲۵ درصد برای خیابان‌های مناطق مسکونی است. مقدار پیش‌فرض این پارامتر در برنامه ۱۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

درصد مجاز ترک‌خوردگی دال بتنی و قابلیت‌اطمینان دو مقوله متفاوت هستند. به عنوان مثال اگر درصد ترک‌خوردگی ۲۵ درصد و درصد اطمینان ۸۵ درصد باشد، احتمال این که درصد ترک‌خوردگی مسیر بعد از عمر بهره‌برداری آن بیشتر از ۲۵ درصد باشد بیش از ۱۵ درصد نیست. تخصیص درصد کم پارامتر ترک‌خوردگی دال بتنی یا درصد بالا به عنوان یک پارامتر اعتمادپذیر، باعث طراحی دست بالا و غیراقتصادی می‌شود. این پارامترها روی طراحی آسفالتی اثری ندارند، بنابراین اگر درصد بالای قابلیت‌اطمینان و درصد پایین ترک‌خوردگی انتخاب شوند، طراحی روسازی بتنی و آسفالتی قابل مقایسه نخواهد بود.

۹-۲-۲- ورودی سطح پروژه

ورودی‌های سطح پروژه مشخصه‌هایی هستند که به یک پروژه اختصاص داده می‌شوند. این مشخصه‌ها عبارتنداز اطلاعات پروژه شامل: نام پروژه، توضیحات پروژه، مسیر، مالک/ کارفرما، موقعیت مکانی و مهندس طراح. ممکن است دو نوع پروژه، یکی طراحی یک روسازی جدید و دیگری آنالیز روسازی موجود انتخاب شود. علاوه بر تعیین و ارزیابی ضخامت بتن برای یک طراحی جدید، ممکن است طراح ضخامت روسازی آسفالتی معادل را نیز تعیین کند و هزینه‌های چرخه عمر روسازی را برای این دو نوع مقایسه کند.

دو پارامتر ورودی دیگر، یکی عمر طرح روسازی و دیگری حد مطلوب قابلیت اطمینان است. عمر طرح روسازی دارای محدوده‌ای از ۱۰ تا ٤۰ سال است که مقدار پیش‌فرض آن در برنامه ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. مقدار قابلیت اطمینان طبق

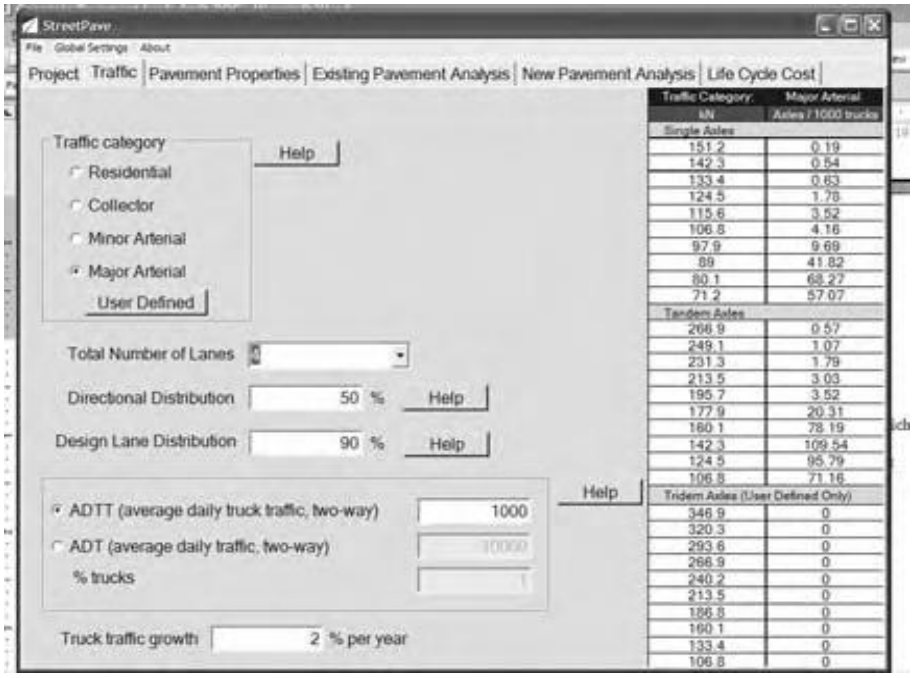
توصیه نرم‌افزار StreetPave مستقیماً از روش طراحی آشتو استخراج می‌شود که در جدول ۸-۱ نشان داده شده است.

۹-۲-۳- ورودی‌های ترافیکی

احتمالاً تنها و در عین حال مهم‌ترین ورودی ترافیکی، طبقه‌بندی ترافیک است که شامل مسیرهای محلی، جمع کننده، شریان‌های فرعی و شریان‌های اصلی است.
برای هر دسته ترافیکی مقدار بیشینه وزن برای خودروهای تک محوره و دو محوره متفاوت است. متوسط ترافیک روزانه (ADT)، متوسط ترافیک روزانه وسایل نقلیه سنگین (ADTT) و بیشینه مقدار بار خودروهای تک محوره و دو محوره فرضی در هر دسته در جدول ۹-۲ نشان داده شده است.
شکل ۹-۱ و جدول ۹-۳ بیان‌گر تعداد خودروهای تک محوره و دو محوره در وزن‌های مختلف (برحسب کیلونیوتن) به‌ازای ۱۰۰۰ خودروی سنگین است. همچنین طراحان می‌توانند طیف‌های ترافیکی اختصاصی خودشان را تعریف کنند که ممکن است شامل خودروهای با محور مرکب سه‌گانه هم باشد.
از سایر ورودی‌های ترافیکی می‌توان به تعداد خطوط عبور مسیر (در هر دو جهت)، سهم ترافیکی هر جهت، سهم ترافیکی خط طراحی، پارامترهای ADTT یا ADT، درصد وسایل نقلیه سنگین و نرخ رشد سالیانه وسایل نقلیه سنگین اشاره کرد. توزیع جهتی ترافیک به طور پیش‌فرض ۵۰ درصد برای هر طرف در نظر گرفته می‌شود، مگر این که تردد وسایل نقلیه سنگین در یک جهت بیشتر از جهت دیگر باشد.
سهم بار ترافیکی خط طراحی عبارت است از درصدی از وسایل نقلیه سنگین که در خط عبور خارجی حرکت می‌کنند. توصیه‌هایی در یک فایل راهنما در نظر گرفته شده است که در صورت انتخاب تعداد خطوط، به طور خودکار ظاهر می‌شوند. به عنوان مثال برای یک مسیر چهارخطه، به طور پیش‌فرض ۹۰ درصد از وسایل نقلیه سنگین از خط خارجی و ۱۰ درصد از خط داخلی یا خط سبقت استفاده می‌کنند.
پارامترهای ADTT یا ADT، درصد وسایل نقلیه سنگین و نرخ رشد آن‌ها معمولاً توسط طراح تخمین زده می‌شود. البته محدوده‌ای به صورت پیش‌فرض برای ADTT یا ADT و درصد وسایل نقلیه سنگین براساس دسته‌بندی ترافیکی تهیه شده است. به عنوان مثال در شکل ۹-۱ مقدار پیش‌فرض برای ADTT برای یک شریان اصلی ترافیکی برابر ۱۰۰۰، نشان داده شده است. مقدار پیش‌فرض نرخ رشد ترافیکی وسایل نقلیه سنگین ۲ درصد است که این نرخ به طور معمول در محدوده ۱ تا ۳ درصد قرار دارد.

جدول ۹-۲: دسته‌بندی‌های ترافیکی برگرفته از فایل راهنمای نرم‌افزار StreetPave

دسته‌بندی	ADT		ADTT	حداکثر بارمحوری- kN (kip)	
	ترافیک	درصد	روزانه	محور منفرد	محور مرکب
محلی	۲۰۰-۸۰۰	۱-۳	تا ۲۵	۹۸ (۲۲)	۱۶۰ (۳۶)
جمع کننده	۷۰۰-۵۰۰۰	۵-۱۸	۴۰-۱۰۰۰	۱۱۶ (۲۶)	۱۹۶ (۴۴)
شریان فرعی	۳۰۰۰-۱۲۰۰۰ خط	۲۸-۳۰	۵۰۰-۵۰۰۰+	۱۳۳ (۳۰)	۲۳۱ (۵۲)
	۳۰۰۰-۵۰۰۰۰ ۴+ خط				
شریان اصلی	۳۰۰۰-۲۰۰۰۰ خط	۲۸-۳۰	۸۰۰۰+-	۱۵۱ (۳۴)	۲۶۷ (۶۰)
	۳۰۰۰-۱۵۰۰۰۰ ۴+ خط		۱۵۰۰		



شکل ۹-۱: طبقه‌بندی ترافیک راه شریانی اصلی StreetPave

۹-۲-۴- مشخصات روسازی

وارد کردن مشخصات روسازی برای روسازی بتنی اجباری است. همچنین اگر مقایسه روسازی بتنی و آسفالتی مطلوب باشد آنگاه برای روسازی آسفالتی نیز باید این مشخصات وارد شود. یک مدول فرعی می‌تواند برای محاسبه مدول عکس‌العمل بستر

مورد استفاده قرار بگیرد. سایر مشخصه‌های روسازی بتنی عبارتند از:

- متوسط مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن که می‌تواند از روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بدست آید.
- مدول الاستیسیته بتن که به صورت خودکار از پارامتر MOR بدست می‌آید.
- آیا میلگرد اتصال انتقال بار وجود دارد؟ (بله/ خیر).
- آیا حفاظت از گوشه‌ها توسط شانه بتن مسلح متصل به خط عبور، جداول یا کانال‌ها کناری و یا خط عریض‌شده وجود دارد؟ (بله/ خیر).

مدول عکس‌العمل بستر (مقدار k) می‌تواند به صورت مستقیم وارد شود. البته به جای آن می‌توان از مدول برجهندگی بستر استفاده کرد و یا می‌توان این پارامتر را از روی نسبت باربری کالیفرنیا یا مقدار R تخمین زد.

حداکثر تا سه لایه اساس و زیراساس می‌تواند بین دال بتنی و بستر قرار گیرد. این لایه‌ها ممکن است اساس تثبیت‌شده با سیمان، اساس آسفالتی گرم، مخلوط تثبیت‌شده قیری، اساس یا زیراساس تثبیت‌شده با آهک، مصالح سنگدانه‌ای متراکم شده بدون ماده چسباننده (ماسه، شن، سنگ شکسته)، زیراساس خوب دانه‌بندی شده و یا زیراساس طبیعی باشند. مدول برجهندگی و ضخامت هر لایه باید وارد شود، البته توصیه‌هایی در مورد مدول برجهندگی وجود دارد. مقدار پارامتر k برای این لایه‌ها تنظیم شده است.

اگر طرح روسازی آسفالتی نیز مدنظر باشد ورودی‌های لازم عبارتند از:

- مدول برجهندگی بستر روسازی که به صورت خودکار از طریق مدول‌های مرکب واکنش خاک بستر محاسبه می‌شوند.
- ضرایب مختلف مدول‌های بستر روسازی که بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۸ برای پروژه‌های با خاک‌های همگن و با کنترل کیفیت خوب، ۰/۵۹ تا ۰/٦ برای پروژه‌های با کنترل کیفیت پایین مانند روسازی مناطق شهری و صنعتی می‌باشد. مقدار پیش‌فرض ۰/۳۸ از تست جاده‌ای آشتو گرفته شده است.

۹-۲-۵- آنالیز روسازی موجود و روسازی جدید

زمانی که تمامی ورودی‌ها کامل شدند، آنالیز روسازی موجود و یا آنالیز روسازی جدید انجام می‌شود. برای آنالیز روسازی موجود، ضخامت بتن یک داده ورودی است و فرسایش کلی، خرابی خستگی و زمان تخریب تئوری روسازی محاسبه می‌شود.

آنالیز یک روسازی جدید، حداقل ضخامت بتن لازم برای روسازی را محاسبه می‌کند و آن را به نزدیک‌ترین ۱۳ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) گرد می‌کند. همچنین حداکثر فاصله بین

درزهای عرضی به متر (فوت) محاسبه می‌شود. اگر استفاده از میلگردهای اتصال انتخاب شده باشد، قطر لازم برای میلگرد نیز ارائه می‌شود. اگر مقایسه روسازی آسفالتی نیز مدنظر باشد، ضخامت روسازی آسفالتی نیز محاسبه می‌شود.

جدول ۹-۳: دسته‌بندی‌های ترافیکی- محورها به ازای ۱۰۰۰ وسیله نقلیه سنگین

محورهای منفرد					
شریان اصلی	شریان فرعی	جمع کننده	مسکونی	بار محور ***kip***	بار محور ***kN***
۰/۱۹				۳٤	۱۵۱
۰/۵٤				۳۲	۱٤۲
۰/٦۳	۰/٤۵			۳۰	۱۳۳
۱/۷۸	۰/۸۵			۲۸	۱۲۵
۳/۵۲	۱/۷۸	۰/۰۷		۲٦	۱۱٦
٤/۱٦	۵/۲۱	۱/٦		۲٤	۱۰۷
۹/٦۹	۷/۸۵	۲/٦	۰/۹٦	۲۲	۹۸
٤/٤۸۲	۱٦/۳۳	٦/٦۳	٤/۲۳	۲۰	۸۹
٦۸/۲۷	۲۵/۱۵	۱٦/٦۱	۱۵/۸۱	۱۸	۸۰
۵۷/۰۷	۳۱/۲	۲۳/۸۸	۳۸/۰۲	۱٦	۷۱
	٤۷/۷۳	٤۷/۷٦	۵٦/۱۱	۱٤	٦۲
	۱۸۲/۰۲	۱۱٦/۷٦	۱۲٤	۱۲	۵۳
		۱٤۲/۷	۲۰٤/۹٦	۱۰	٤٤
		۲۳۳/٦	٤۸۳/۱	۸	۳٦
			۷۳۲/۲۸	٦	۲۷
			۱٦۹۳/۳۱	٤	۱۸
۰/۵۷				٦۰	۲٦۷
۱/۰۷				۵٦	۲٤۹
۱/۷۹	۱/۱۹			۵۲	۲۳۱
۳/۰۳	۲/۹۱			٤۸	۲۱٤
۳/۵۲	۸/۰۱	۱/۱٦		٤٤	۱۹٦
۲۰/۳۱	۲۱/۳۱	۷/۷٦		٤۰	۱۷۸
۷۸/۱۹	۵٦/۲۵	۳۸/۷۹	٤/۱۹	۳٦	۱٦۰
۱۰۹/۵٤	۱۰۳/٦۳	۵٤/۷٦	٦۹/۵۹	۳۲	۱٤۲
۹۵/۷۹	۱۲۱/۲۲	٤٤/٤۳	٦۸/٤۸	۲۸	۱۲۵

جدول ۹-۳: ادامه

محورهای منفرد					
شریان اصلی	شریان فرعی	جمع کننده	مسکونی	بار محور ***kip***	بار محور ***kN***
۷۱/۱٦	۷۲/٥٤	۳۰/۷٤	۳۹/۱۸	۲٤	۱۰۷
	۸٥/۹٤	٤٥	٥۷/۱	۲۰	۸۹
	۹۹/۳٤	٥۹/۲٥	۷٥/۰۲	۱٦	۷۱
		۹۱/۱٥	۱۳۹/۳	۱۲	٥۳
		٤۷/۰۱	۸٥/٥۹	۸	۳٦
			۳۱/۹	٤	۱۸

همچنین مدول آنالیز روسازی جدید میزان حساسیت آنالیز را نسبت به اثرات مقدار k، قابلیت‌اطمینان، مقاومت بتن، درصد دال‌های ترک‌خورده و یا طراحی ضخامت لازم روسازی را فراهم می‌کند. خلاصه گزارش شش صفحه‌ای برای هر طراحی ارائه می‌شود.

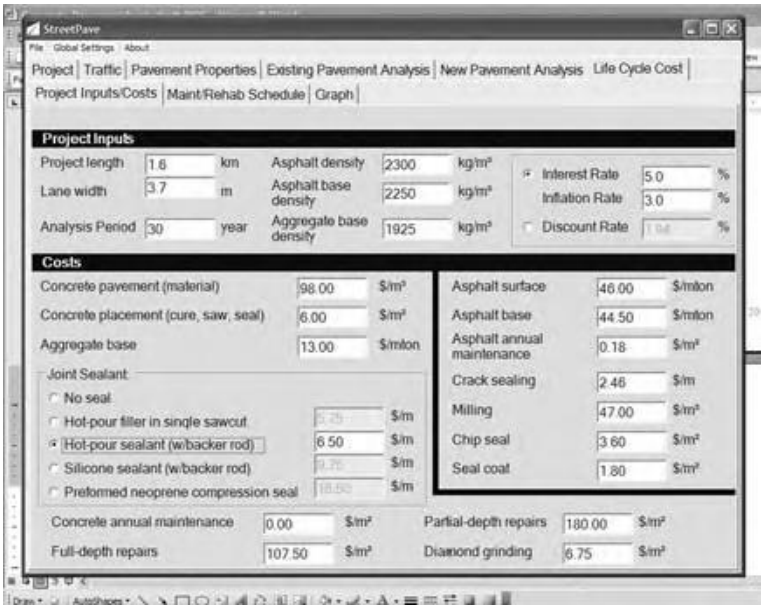
۹-۲-٦- هزینه‌های چرخه عمر

مدول آنالیز هزینه چرخه عمر، امکان مقایسه ارزش کنونی هزینه نگهداری و هزینه‌های اولیه احداث بین روسازی بتنی و آسفالتی را فراهم می‌کند. البته این مقایسه زمانی قابل قبول است که هر دو طراحی به یک میزان محافظه‌کارانه باشند.

مدول هزینه چرخه عمر نیازمند ورودی‌های خاصی به شرح زیر است:

- اطلاعات پروژه: زمان پروژه، عرض خط عبور، دوره آنالیز و میزان رشد تورم یا سود.
- چگالی رویه آسفالتی، اساس آسفالتی و اساس سنگدانه‌ای.
- هزینه اولیه مصالح برای بتن و بتن‌ریزی، شن و ماسه اساس و لایه‌های روسازی آسفالتی.
- هزینه نگهداری و نوسازی روسازی بتنی شامل: نگهداری سالانه، آب‌بندی درزها، وصله‌کاری عمیق و سطحی و سمباده‌زنی الماسه‌ای.
- هزینه‌های نگهداری و نوسازی روسازی آسفالتی شامل: نگهداری سالانه، درزگیری ترک‌ها و اجرای چیپ سیل (chip seal) و سیل‌کت (seal coat).
- برنامه زمان‌بندی نگهداری و نوسازی در تمام موارد نگهداری، محافظت و نوسازی برای یک سال انتخاب شده است.

ورودی‌ها و هزینه‌های پروژه در شکل ۹-۲ نشان داده شده‌اند. با مشخص شدن ورودی‌ها، جدول زمان‌بندی ارائه می‌شود؛ سپس برنامه نمودار هزینه چرخه عمر را ارائه می‌کند.



شکل ۹-۲: پنجره مربوط به ورودی‌های هزینه چرخه عمر در نرم‌افزار StreetPave

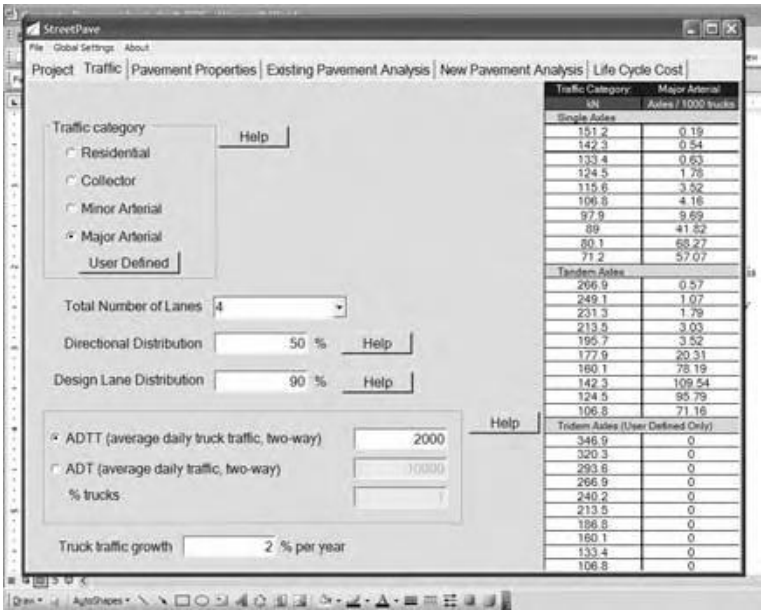
۹-۳- مثال‌های طراحی

این مثال طراحی که با استفاده از نرم‌افزار Street Pave انجام می‌شود، عموماً از آیین‌نامه طراحی PCA ۱۹۸٤ پیروی می‌کند. طول عمر طرح ۲۰ سال است و قابلیت اطمینان آن ۸۵ درصد و درصد دال‌های ترک‌خورده آن ۱۵ درصد است.

ورودی‌های ترافیکی در شکل ۹-۳ نشان داده شده است. روسازی چهارخطه است و کامیون‌ها با توزیع جهتی ۵۰ درصد و ۹۰ درصد، در خط طراحی تردد می‌نمایند. مقدار ADTT برابر با ۲۰۰۰ است. بیشینه بارگذاری محور منفرد ۱۵۱/۲ کیلونیوتن (۳٤ kip) و بیشینه بارگذاری محور مرکب دوگانه ۲٦٦/۹ کیلونیوتن (٦۰ kip) است. این مقادیر بیشتر از بارگذاری بدون ضریب اطمینان بار در مثال انجمن سیمان پرتلند و کم‌تر از ضریب اطمینان بار برابر ۱/۲ است. پس این دو مثال تا حدودی قابل مقایسه هستند.

مشخصات روسازی در شکل ۹-٤ نشان داده شده‌اند. به منظور هماهنگی با مثال طراحی PCA ۱۹۸٤، مقدار k برای اساس و زیراساس ۳۵/۱ مگاپاسکال بر متر (۱۳۰ psi) انتخاب می‌شود. مقاومت خمشی بتن ٤/۵ مگاپاسکال (٦۵۰ psi) و مدول ارتجاعی بتن ۳۰/٤

گیگاپاسکال (٤/٤ million psi) است. از میلگردهای اتصال استفاده شده است، اما در آن شانه‌های بتنی متصل نداریم. در این مثال برای مقایسه طراحی، روسازی آسفالتی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۹-۳: ورودی‌های ترافیکی مثال طراحی

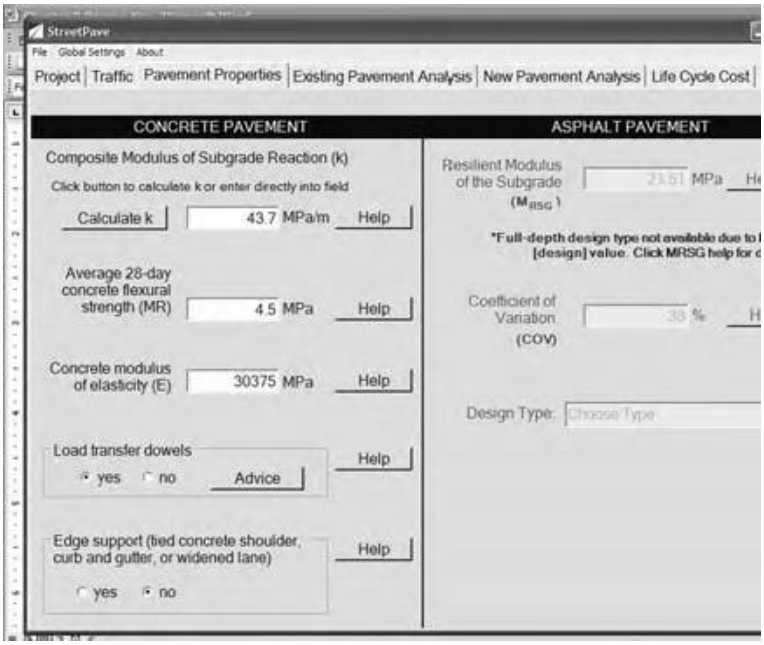
طراحی روسازی در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. ضخامت بتن طراحی ۲۲۳/۸ میلی‌متر (۸/۸ اینچ) است که به ۲۲۹ میلی‌متر (۹ اینچ) گرد می‌شود و تقریباً به مقدار ۲٤۱ میلی‌متر (۹/۵ اینچ) ضخامت مثال طراحی ۱۹۸٤ PCA نزدیک است. از تعداد بیشینه حداکثر فاصله توصیه شده درزهای عرضی ٤/۵۷ متر (۱۵ فوت) است و قطر میلگردهای استفاده شده باید ۳۲ میلی‌متر (۱ ۱/٤ اینچ) باشد.

شکل ۹-٦ جدول خستگی و فرسایش را نشان می‌دهد. روسازی ۹۸/۹ درصد عمر خستگی و تنها ۱۱/۷٦ درصد عمر فرسایش خود را استفاده می‌کند. میلگردهای اتصال را می‌توان از این روسازی حذف کرد که در این حالت عمر خستگی به ۹۹/۸۱ درصد می‌رسد. اگرچه با توجه به اندازه و بزرگی بارهای ترافیکی بهتر است از میلگرد استفاده شود.

بیشتر خستگی روسازی ناشی از سنگین‌ترین محور منفرد می‌باشد. ۱۵۱۷ محور ۱۵۱/۲ کیلونیوتن و ٤۳۱۰ محور ۱٤۲/۳ کیلونیوتن باهم ۷۸ درصد خستگی را تشکیل می‌دهند، در حالی که محورهای منفرد سبک‌تر و محورهای مرکب سهم کم‌تری دارند. پس برای

روسازی با میلگرد اتصال، سنگین‌ترین محور منفرد از اهمیت زیادی برخوردار است. تعداد تکرار مجاز محورهای منفرد برابر یا سبک‌تر از ۸۹ کیلونیوتن (۱۸ kips) و محورهای مرکب برابر یا سبک‌تر از ۱۹۵/۷ کیلونیوتن (٤٤ kips)، نامحدود می‌باشد. در مقابل، تمام محورها در فرسایش روسازی نقش دارند و بیشتر فرسایش ناشی از محورهای مرکب است.

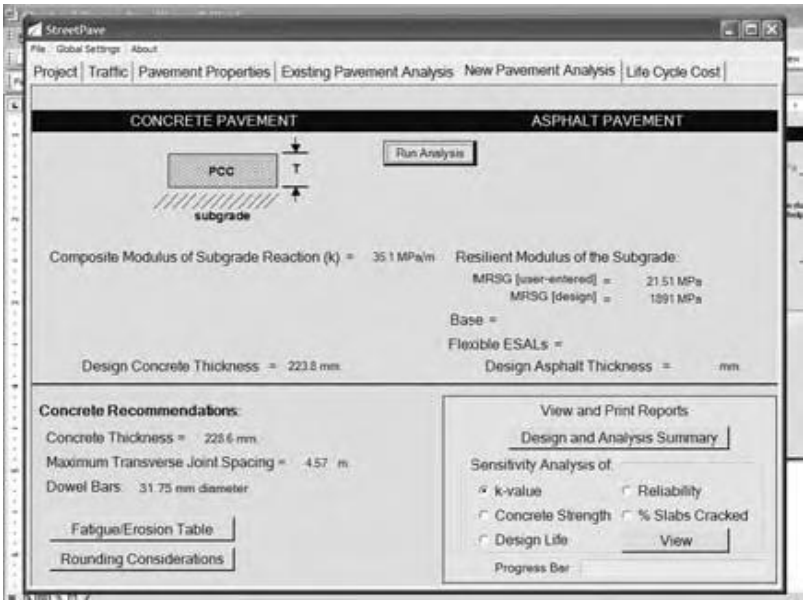
نتایج طراحی نیز باعث بازشدن بحثی درباره ملاحظات مربوط به گرد کردن می‌شود، که در شکل ۹-۷ نشان داده شده است. به بالا گرد کردن ضخامت طراحی طول عمر پروژه را به ۳۳ سال افزایش می‌دهد و به عبارت دیگر قابلیت اطمینان را برای ۲۰ سال تا ۸۸/۹ درصد افزایش می‌دهد. از طرفی به پایین گرد کردن ضخامت طراحی، باعث کاهش عمر پروژه تا ۸ سال و یا به عبارت دیگر قابلیت اطمینان را برای ۲۰ سال به ۷۵/٤ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۹-٤: ورودی‌های روسازی مثال طراحی

نرم‌افزار Stree pave می‌تواند آنالیز حساسیت را نسبت به مقدار k، قابلیت اطمینان، مقاومت بتن، درصد دال‌های ترک‌خورده و یا عمر طراحی انجام دهد. شکل ۹-۸ آنالیز حساسیت را نسبت به مقدار k نشان می‌دهد. کاهش در مقدار k تقریباً تا ۲۷مگاپاسکال بر متر (۱۰۰ psi/in) نیازمند یک روسازی ضخیم‌تر و افزایش تا ٤۷/۵ مگاپاسکال بر متر

(۱۷۵ psi/in) یا بیشتر منجر به کاهش ضخامت می‌شود.
برای یک خیابان شهری، جدول و جوی خیابان تکیه‌گاه لبه را تأمین می‌کنند. تکرار این مثال طراحی همراه با تکیه‌گاه لبه، ضخامت روسازی را از ۲۲۹ میلی‌متر (۹ اینچ) به ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) کاهش می‌دهد. فاصله بین درزها و قطر میلگرد اتصال یکسان است. اگر یک روسازی چهارخطه را با عرض ۷/۳ متر (۲٤ فوت) تا ۷/۹ متر (۲٦ فوت) تعریض کنیم تا خط عبور کامیون ۰/٦ متر (۲ فوت) عریض‌تر شود و لبه تکیه‌گاهی ایجاد کند، عریض کردن و کاهش ضخامت روسازی همدیگر را خنثی می‌کنند. در نتیجه، احتیاجی به مصرف بتن بیشتر نخواهد بود.



شکل ۹-۵: طراحی روسازی بتنی

۹-٤- جداول طراحی روسازی با ترافیک سبک

جداول طراحی ذیل با استفاده از نرم‌افزار StreetPave به پیروی از ACI 330R-01 و ACI 325.12R-02 فراهم شده است. این جداول بر پایه ضریب اطمینان ۸۵ درصد و مقدار مجاز ترک‌خوردگی دال بتنی برابر ۱۵ درصد هستند. این جداول در طراحی محوطه‌های پارکینگ، خیابان‌های شهری و جاده‌های محلی به کار برده می‌شوند. این جداول باید ضخامت‌های طراحی را نزدیک به ضخامت‌های موجود در ACI 330R-01 و ACI 325.12R-02 ایجاد کنند.

جدول ۹-٤ ضخامت‌های طراحی را برای روسازی‌های با درزهای دارای قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها و بدون تکیه‌گاه لبه و با مقاومت بتن ۳/٤٥ تا ٤/٥ مگاپاسکال (psi ۵۰۰-٦۵۰) و مقادیر k از ۱۳/۵ تا ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (psi/in ۵۰۰-۵۰) را فراهم می‌کند. جاده‌های محلی معمولاً فاقد تکیه‌گاه لبه هستند.

Fatigue and Erosion Analysis

Traffic Category: Major Arterial

Axle Load, kips	Axles per 1000 Trucks	Expected Repetitions	Fatigue Analysis: Stress Ratio	Fatigue Analysis: Allowable Repetitions	Fatigue Analysis: Fatigue Consumed	Erosion Analysis: Power	Erosion Analysis: Allowable Repetitions	Erosion Analysis: Erosion Consumed
Single Axles								
153.5	0.19	1517	0.647	3753	40.4	39.695	1271063	0.12
142.3	0.54	4310	0.611	11410	37.77	35.16	1826789	0.24
133.4	0.63	5028	0.575	43979	11.43	30.899	2715220	0.19
124.5	1.78	14207	0.539	230978	6.15	26.914	4212679	0.34
115.6	3.52	28096	0.503	1829339	1.54	23.204	6919975	0.41
106.8	4.16	33204	0.467	24461940	0.14	19.806	12234190	0.27
97.8	9.69	77343	0.43	726127261	0.01	16.642	24618442	0.31
89	41.82	333794	0.393	unlimited	0	13.754	61717535	0.54
80.1	68.27	544910	0.356	unlimited	0	11.141	262692430	0.21
71.2	57.07	455515	0.319	unlimited	0	8.803	unlimited	0
Tandem Axles								
266.9	0.57	4550	0.528	404290	1.13	47.033	774268	0.59
249.1	1.07	8540	0.495	2953295	0.29	40.969	1157982	0.74
231.3	1.79	14287	0.462	36379192	0.04	35.323	1801382	0.79
213.5	3.03	24185	0.428	865838808	0	30.095	2948617	0.82
195.7	3.52	28096	0.395	unlimited	0	25.286	5171864	0.54
177.9	20.31	162108	0.361	unlimited	0	20.896	10031761	1.62
160.1	78.19	624088	0.327	unlimited	0	16.923	22913049	2.72
142.3	109.54	874314	0.293	unlimited	0	13.369	72334824	1.21
124.5	95.79	764566	0.258	unlimited	0	10.234	669213478	0.11
106.8	71.16	567977	0.223	unlimited	0	7.531	unlimited	0
Tridem Axles								
346.9	0	0	0.34	unlimited	0	54.83	498524	0
320.3	0	0	0.315	unlimited	0	46.744	788181	0
293.6	0	0	0.291	unlimited	0	39.276	1311650	0
266.9	0	0	0.266	unlimited	0	32.457	2331506	0
240.2	0	0	0.241	unlimited	0	26.288	4549033	0
213.5	0	0	0.215	unlimited	0	20.769	10257526	0
186.8	0	0	0.19	unlimited	0	15.899	30126311	0
160.1	0	0	0.164	unlimited	0	11.679	176931115	0
133.4	0	0	0.138	unlimited	0	8.108	unlimited	0
106.8	0	0	0.112	unlimited	0	5.187	unlimited	0
				Total Fatigue Used:	98.9		Total Erosion Used:	11.76

شکل ۹-٦: جدول خستگی و فرسایش مثال طراحی

Rounding Considerations

Specified Design Life	20	Recommended Thickness	228.6
Specified Reliability	85	Rounded-Down Thickness	215.9
Design Thickness	223.8		

Theoretical Life of Recommended Concrete Design

33 years @ 85 % reliability

Reliability of Recommended Concrete Design

88.9 % reliability for 20 -year design

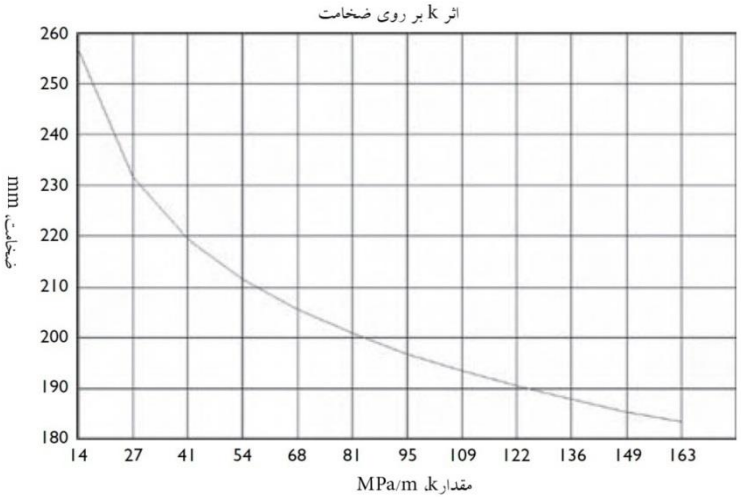
Theoretical Life of Rounded-Down Concrete Design

8 years @ 85 % reliability

Reliability of Rounded-Down Concrete Design

75.4 % reliability for 20 -year design

شکل ۹-۷: ملاحظات مربوط به گرد کردن



شکل ۹-۸: حساسیت ضخامت دال به مقدار k

جدول ۹-۵ مشابه جدول ۹-٤ است با این تفاوت که برای روسازی‌هایی به کار می‌رود که در آن‌ها لبه نگهدارنده تأمین شده باشد. این وضعیت معمولاً در محوطه پارکینگ‌ها و خیابان‌های شهری با جدول و جوی بتنی و روسازی‌هایی با لبه‌های پهن‌تر اتفاق می‌افتد. در این حالت تنش‌های لبه کاهش و در نتیجه ضخامت‌های طراحی کاهش می‌یابند.

استفاده از میلگردهای اتصال برای همه روسازی‌ها در این جداول مورد بررسی قرار گرفت. به علت ضعف در تکیه‌گاه بستر فقط در دو مورد نشان داده شده در جدول ۹-۵ (افزایش مقاومت بتن و کاهش حجم عبوری وسایل نقلیه سنگین) ممکن شد تا ضخامت روسازی را کاهش دهیم. در سایر موارد ضخامت مورد نیاز روسازی تغییری نکرد.

در طراحی این گونه روسازی‌ها که دارای ترافیک وسایل نقلیه سنگین کم‌سرعت و حجم عبوری به نسبت کم هستند، پلکانی شدن درزها و مکش مطرح نیست. بنابراین لزومی بر اجرای میلگردهای اتصال نیست. معمولاً برای روسازی‌های با ضخامت بیشتر از ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) به کار می‌روند تا احتمال پلکانی شدن درزها را کاهش دهند. در شرایط محیطی شدید که برای یخ‌زدایی از سطح روسازی از مواد خورنده استفاده می‌شود، حذف این میلگردها و تلاش در جهت کاهش احتمال پلکانی شدن با استفاده از یک لایه اساس تثبیت شده، امری منطقی است.

در مثال طراحی که پیش‌از این مورد بحث قرار گرفت، مقدار ADTT برابر با ۲۰۰۰، بیشتر از بار ترافیکی در نظر گرفته شده در جداول است و مقدار k برابر با ۳۵/۱ مگاپاسکال بر متر (۱۳۰ psi/in) نیز در جداول موجود نیست. با این وجود می‌توان

مقایسه‌ای با مقدار ADTT برابر با ۱۵۰۰ و k برابر با ۲۷ مگاپاسکال بر متر (۱۳۰ psi/in) انجام داد. جدول ۹-٤ برای بتن با مقاومت ٤/۵ مگاپاسکال (٦۵۰ psi)، ضخامت طراحی را در حالت نبود تکیه‌گاه لبه برابر با ۲٤۱ میلی‌متر (۹/۵ اینچ) نشان می‌دهد و جدول ۹-۵ ضخامت طراحی را برابر ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) نشان می‌دهد که این مقادیر نیز به مقادیر پیشین نزدیک هستند.

جدول ۹-٤: جداول ضخامت طراحی، درزهای دارای قفل و بست بین سنگدانه‌ها، بدون تکیه‌گاه لبه

CBR=۲ ۱۳/۵ *MPa*		مقاومت خمشی بتن							
	۵۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤۵۰۰	٦۵۰	٤۱۵۰	٦۰۰	۳۸۰۰	۵۵۰	۳٤۵۰	۵۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۵۲	٦	۱۵۲	٦	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷
	۱۰	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵	۱۹۱	۷/۵
جمع کننده	۲۵	۱۹۱	۷/۵	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵
	۳۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵
شریان اصلی	۱۰۰	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰
	۳۰۰	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/۵
	۷۰۰	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/۵	۲۸۰	۱۱
شریان فرعی	۷۰۰	۲۵٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/۵	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/۵
	۱۵۰۰	۲٦۷	۱۰/۵	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/۵	۳۰۵	۱۲
مسکونی	۱	۱٤۰	۵/۵	۱٤۰	۵/۵	۱۵۲	٦	۱٦۵	٦/۵
	۱۰	۱۵۲	٦	۱٦۵	٦/۵	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷
جمع کننده	۲۵	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸
	۳۰۰	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵
شریان اصلی	۱۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹
	۳۰۰	۲۱٦	۸/۵	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵
	۷۰۰	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰
شریان فرعی	۷۰۰	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/۵
	۱۵۰۰	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/۵	۲۸۰	۱۱

جدول ۹-٤: ادامه

CBR=۱۰	٥٤ ***MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۲۰۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤٥۰۰	**٦٥۰**	**٤١٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	١٤۰	٥/٥	١٥۲	٦
	۱۰	١٤۰	٥/٥	١٥۲	٦	١٥۲	٦	١٦٥	٦/٥
جمع کننده	۲٥	١٥۲	٦	١٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷
	۳۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
شریان اصلی	۱۰۰	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
	۳۰۰	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
	۷۰۰	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
شریان فرعی	۷۰۰	۲۱٦	۸/٥	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥
	۱٥۰۰	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰
CBR=۲٦	۸۱***MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۳۰۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤٥۰۰	**٦٥۰**	**٤١٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	١١٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	١٤۰	٥/٥
	۱۰	١٤۰	٥/٥	١٤۰	٥/٥	١٥۲	٦	١٥۲	٦
جمع کننده	۲٥	١٥۲	٦	١٥۲	٦	١٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
	۳۰۰	١٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
شریان اصلی	۱۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
	۳۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
	۷۰۰	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
شریان فرعی	۷۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
	۱٥۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥

جدول ۹-٤: ادامه

CBR=۳۸	**۱۰۸ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	٤۰۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤٥۰۰	**٦٥۰**	**٤۱٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥
	۱۰	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦
جمع کننده	۲٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥
	۳۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
شریان	۱۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥
اصلی	۳۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
شریان	۷۰۰	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
فرعی	۱٥۰۰	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
CBR=٥۰	**۱۳٥ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	٥۰۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤٥۰۰	**٦٥۰**	**٤۱٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥
	۱۰	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥
جمع کننده	۲٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥
	۳۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
شریان	۱۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
اصلی	۳۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
شریان	۷۰۰	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
فرعی	۱٥۰۰	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹

۹-٤-۱- روسازی بتنی نفوذپذیر

جداول طراحی آیین‌نامه‌های ACI-325-12R-02 & ACIA330R-01 همانند جداول ۹-٤ و ۹-۵، بتن را تا مقاومت حداقل ۳/٤ مگاپاسگال (psi ۵۰۰) محدود می‌کند. بتن نفوذپذیر (متخلخل) اغلب کم‌تر از این مقدار مقاومت دارد. بنابراین، جداول طراحی ذیل به منظور طراحی روسازی بتنی نفوذپذیر ارائه شده است. مقاومت خمشی بین ۲/۱ تا ۳/۱ مگاپاسگال (psi ۳۰۰ تا ۵۰۰) به کار برده می‌شود (جدول ۹-٦).

در جداول قبل، برای وسایل نقلیه سنگین رشد ترافیکی ۲ درصد در سال در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته بتن (E)، ٦۷۵۰ برابر مقاومت خمشی بتن یا مدول گسیختگی در نظر گرفته شده است. روسازی بتن نفوذپذیر میلگرد اتصال ندارد و برای آن تکیه‌گاه جانبی در نظر گرفته نشده است. اگر تکیه‌گاه جانبی در نظر گرفته شود، می‌توان ضخامت روسازی را کم‌تر نمود.

تاکنون، روابط خستگی برای بتن نفوذپذیر شناخته نشده است. در نتیجه تا زمانی که اطلاعات جامع‌تری از عملکرد فرسایش بتن نفوذپذیر در دسترس قرار گیرد، به منظور افزایش درجه اطمینان طراحی، به جای درجه اطمینان ۸۵ درصد، جداول با درجه اطمینان ۹۰ درصد به وجود آمده‌اند.

طراحی انجام شده در این حالت محافظه کارانه‌تر خواهد شد. زیرا برای سهولت در اجراء، ضخامت دال به نزدیک‌ترین ۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) به بالا گرد می‌شوند.

مفهوم یک طراحی کارآمد اینست که بتن معمولی و بتن نفوذپذیر را به صورت همزمان استفاده کرد. به عنوان مثال، یک خیابان چهارخطه همراه با جدول کناری را در نظر بگیرید که دو خط عبور میانی خیابان که ترافیک بیشتری را عبور می‌دهد، از بتن معمولی ساخته شده‌اند و خطوط عبور کناری از بتن نفوذپذیر ساخته شده‌اند. خطوط کناری قادر هستند که هم آب جاری روی بتن معمولی و هم آب بارانی که بر سطح راه می‌بارد را کنترل و هدایت کنند و نسبت به خطوط عبور میانی ترافیک کم‌تری را عبور می‌دهند. این رویکرد، دوام بتن معمولی را با ظرفیت زهکشی بتن نفوذپذیر ترکیب می‌کند.

جدول ۹-۵: جداول ضخامت طراحی، درزهای دارای قفل و بست بین سنگدانه‌ها، با لبه تکیه‌گاهی

CBR=۲	**۱۳/۵ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۵۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		٤٥٠٠	٦٥٠	٤١٥٠	٦٠٠	٣٨٠٠	٥٥٠	٣٤٥٠	٥٠٠
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۲۷	۵	۱٤۰	۵/۵	۱٤۰	۵/۵	۱۵۲	٦
	۱۰	۱٤۰	۵/۵	۱۵۲	٦	۱٦۵	٦/۵	۱٦۵	٦/۵
جمع کننده	۲۵	۱٦۵	٦/۵	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵
	۳۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸
شریان	۱۰۰	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵
اصلی	۳۰۰	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹
	۷۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵
شریان	۷۰۰	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵	۲۵٤	۱۰
فرعی	۱۵۰۰	۲٤۱[۱]	۹/۵[۱]	۲٤۱[۱]	۹/۵[۱]	۲٤۱	۹/۵	۲٦۷	۱۰/۵
CBR=۳	**۲۷ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۱۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	٤٥٠٠	٦٥٠	٤١٥٠	٦٠٠	٣٨٠٠	٥٥٠	٣٤٥٠	٥٠٠
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۱٤	٤/۵	۱۲۷	۵	۱۲۷	۵	۱٤۰	۵/۵
	۱۰	۱۲۷	۵	۱٤۰	۵/۵	۱٤۰	۵/۵	۱۵۲	٦
جمع کننده	۲۵	۱۵۲	٦	۱۵۲	٦	۱٦۵	٦/۵	۱٦۵	٦/۵
	۳۰۰	۱٦۵	٦/۵	۱٦۵	٦/۵	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵
شریان	۱۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸
اصلی	۳۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵
	۷۰۰	۱۹۱	۷/۵	۱۹۱	۷/۵	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵
شریان	۷۰۰	۲۰۳	۸	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹
فرعی	۱۵۰۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/۵	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/۵

جدول ۹-۵: ادامه

CBR=۱۰	**٥٤ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۲۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	٤٥۰۰	٦٥۰	٤١٥۰	٦۰۰	۳۸۰۰	٥٥۰	۳٤٥۰	٥۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۰۲	٤	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥
	۱۰	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥
جمع کننده	۲٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦
	۳۰۰	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
شریان	۱۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
اصلی	۳۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
شریان	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
فرعی	۱٥۰۰	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
CBR=۲٦	**۸۱ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۳۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	٤٥۰۰	٦٥۰	٤١٥۰	٦۰۰	۳۸۰۰	٥٥۰	۳٤٥۰	٥۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۰۲	٤	۱۰۲	٤	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥
	۱۰	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥
جمع کننده	۲٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦
	۳۰۰	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥
شریان	۱۰۰	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
اصلی	۳۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷
	۷۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
شریان	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
فرعی	۱٥۰۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸

جدول ۹-۵: ادامه

CBR=۳۸	**۱۰۸ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	٤۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	**٤٥۰۰**	**٦٥۰**	**٤۱٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۰۲	٤	۱۰۲	٤	۱۰۲	٤	۱۱٤	٤/٥
	۱۰	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥
جمع کننده	۲٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥
	۳۰۰	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦
شریان	۱۰۰	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥
اصلی	۳۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
	۷۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷
شریان	۷۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥
فرعی	۱٥۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
CBR=٥۰	**۱۳٥ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	٥۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	**٤٥۰۰**	**٦٥۰**	**٤۱٥۰**	**٦۰۰**	**۳۸۰۰**	**٥٥۰**	**۳٤٥۰**	**٥۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۰۲	٤	۱۰۲	٤	۱۰۲	٤	۱۱٤	٤/٥
	۱۰	۱۰۲	٤	۱۱٤	٤/٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥
جمع کننده	۲٥	۱۱٤	٤/٥	۱۲۷	٥	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥
	۳۰۰	۱۲۷	٥	۱٤۰	٥/٥	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦
شریان	۱۰۰	۱٤۰	٥/٥	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥
اصلی	۳۰۰	۱٥۲	٦	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
	۷۰۰	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷
شریان	۷۰۰	۱٦٥	٦/٥	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥
فرعی	۱٥۰۰	۱۷۸	۷	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۱۹۱	۷/٥

[۱] اگر بتن دارای میلگرد اتصال باشد، ضخامت روسازی را به اندازه ۱۲/٥ میلی‌متر(۱/۲ اینچ) کم کنید.

جدول ۹-٦: جدول طراحی ضخامت روسازی برای بتن نفوذپذیر

CBR=۲	**۱۳/٥ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	٥۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		۳۱۰۰	**٤٥۰**	**۲۷٥۰**	**٤۰۰**	**۲٤۰۰**	**۳٥۰**	**۲۱۰۰**	**۳۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲٤۱	۹/٥
	۱۰	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰	۲۷٦	۱۰/٥
جمع کننده	۲٥	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲
	۳۰۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳
شریان اصلی	۱۰۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤
	۳۰۰	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٤۳	۱۳/٥	۳۸۱	۱٥
	۷۰۰	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤	۳۸۱	۱٥
شریان فرعی	۷۰۰	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤	۳۸۱	۱٥	٤۱۹	۱٦/٥
	۱٥۰۰	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤	۳۹٤	٥/۱٥	٤۳۲	۱۷
CBR=۲/٥	**۲۰/۳ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۷٥ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		۳۱۰۰	**٤٥۰**	**۲۷٥۰**	**٤۰۰**	**۲٤۰۰**	**۳٥۰**	**۲۱۰۰**	**۳۰۰**
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۲۹	۹
	۱۰	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰
جمع کننده	۲٥	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱
	۳۰۰	۲٥٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥
شریان اصلی	۱۰۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳
	۳۰۰	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٥٦	۱٤
	۷۰۰	۲۹۲	۱۱/٥	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤
شریان فرعی	۷۰۰	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤	۳۸۱	۱٥
	۱٥۰۰	۳۱۸	۱۲/٥	۳۳۰	۱۳	۳٦۸	۱٤/٥	۳۹٤	۱٥/٥

جدول ۹-٦: ادامه

CBR=۳	**۲۷ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۱۰۰ *psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		۳۱۰۰	٤٥۰	۲۷٥۰	٤۰۰	۲٤۰۰	۳٥۰	۲۱۰۰	۳۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥
	۱۰	۱۹۱	۷/٥	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥
جمع کننده	۲٥	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱
	۳۰۰	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲
شریان	۱۰۰	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥
اصلی	۳۰۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳٤۳	۱۳/٥
	۷۰۰	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٤۳	۱۳/٥
شریان	۷۰۰	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٤۳	۱۳/٥	۳٦۸	۱٤/٥
فرعی	۱٥۰۰	۳۰٥	۱۲	۳۱۸	۱۲/٥	۳٤۳	۱۳/٥	۳۸۱	۱٥
CBR=٦	**٤۰/٥ *MPa***	**مقاومت خمشی بتن**							
	۱٥۰*psi/in*	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
		۳۱۰۰	٤٥۰	۲۷٥۰	٤۰۰	۲٤۰۰	۳٥۰	۲۱۰۰	۳۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸
	۱۰	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹
جمع کننده	۲٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰
	۳۰۰	۲۲۹	۹	۲٤۱	۹/٥	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥
شریان	۱۰۰	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲
اصلی	۳۰۰	۲٥٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥
	۷۰۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳
شریان	۷۰۰	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٥٦	۱٤
فرعی	۱٥۰۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳	۳٥٦	۱٤

جدول ۹-٦: ادامه

CBR=۱۰	٥٤ *MPa*	مقاومت خمشی بتن							
	۲۰۰	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***	***kPa***	***psi***
	psi/in	۳۱۰۰	٤٥۰	۲۷٥۰	٤۰۰	۲٤۰۰	۳٥۰	۲۱۰۰	۳۰۰
ترافیک	**ADTT**	**ضخامت مورد نیاز روسازی**							
		mm	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***	***mm***	***in***
مسکونی	۱	۱٥۲	٦	۱٦٥	٦/٥	۱۷۸	۷	۲۰۳	۸
	۱۰	۱۷۸	۷	۱۹۱	۷/٥	۲۰۳	۸	۲۲۹	۹
جمع کننده	۲٥	۲۰۳	۸	۲۱٦	۸/٥	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰
	۳۰۰	۲۱٦	۸/٥	۲٤۱	۹/٥	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱
شریان	۱۰۰	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥
اصلی	۳۰۰	۲٤۱	۹/٥	۲٦۷	۱۰/٥	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲
	۷۰۰	۲٥٤	۱۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥
شریان	۷۰۰	۲٦۷	۱۰/٥	۲۹۲	۱۱/٥	۳۰٥	۱۲	۳٤۳	۱۳/٥
فرعی	۱٥۰۰	۲۸۰	۱۱	۲۹۲	۱۱/٥	۳۱۸	۱۲/٥	۳٤۳	۱۳/٥

۹-٥- تقاطع‌های بتنی

در خیابان‌های آسفالتی شهر، تقاطع‌ها عمدتاً در اثر فشارهای ناشی از شروع حرکت، توقف و دور زدن‌های وسایل نقلیه سنگین، در معرض خرابی‌های ناشی از شیارشدگی و کناررفتگی قرار دارند.

در تقاطع‌های شلوغ، بار و تنش اضافه شده از طرف وسایل نقلیه سنگین اغلب باعث خرابی زودتر از موعد مقرر رویه آسفالتی خیابان‌ها می‌شود. سطوح آسفالتی با بار ناشی از اتوبوس‌ها و کامیون‌های در حال توقف و گردش دچار شیارشدگی و کناررفتگی می‌شوند. این سطوح تغییر شکل یافته، برای رانندگان به مسئله ایمنی و برای ادارات متصدی راه‌ها به مشکلی پرهزینه تبدیل می‌شود.

آسفالت یک ماده ویسکوالاستیک است، بنابراین شدت شیارشدگی ایجادشده توسط وسایل نقلیه سنگین در حال توقف و یا حرکت آهسته نسبت به حرکت سریع‌تر بیشتر است.

ایستگاه‌های اتوبوس نیز اغلب دچار خرابی‌های مشابه می‌شوند. همچنین چون تقاطع‌ها از چهار جهت تحت ترافیک قرار دارند، دو برابر خیابان‌های متصل کننده متحمل ترافیک

می‌شوند. تعویض رویه آسفالتی آسیب دیده در محل تقاطع‌ها با بتن می‌تواند به طور قابل توجهی هزینه‌های نگهداری را کاهش بدهد. در این زمینه یک راهنمای ۲۸ صفحه‌ای با جزئیات کامل توسط انجمن روسازی بتنی آمریکا (TB019P) و تحت عنوان «تقاطع‌های بتنی: راهنمای طراح و اجراء» منتشر شده است.

در اجرای روسازی محل تقاطع، به طور کلی تمامی ناحیه عملکرد تقاطع که وسایل نقلیه در آن آهسته حرکت می‌کنند، توقف می‌کنند و شتاب می‌گیرند نیز باید مدنظر قرار بگیرد. این مسئله می‌تواند شامل ۳۰–۶۰ متر (۲۰۰–۱۰۰ فوت) در هر یک از شاخه‌های تقاطع و با جابه‌جایی این ناحیه، در جهت ورودی تقاطع ۱۲۰–۶۰ متر (۴۰۰–۲۰۰ فوت) و تنها ۱۵ متر (۵۰ فوت) بعد از تقاطع باشد. با حجم ترافیک متوسط و درصد پایین وسایل نقلیه سنگین، در هر جهت تقاطع ممکن است ۳۰–۱۵ متر (۱۰۰–۵۰ فوت) کافی باشد.

ضخامت روسازی تقاطع در حدود ۱۲۵–۱۰۰ میلی‌متر (۵–۴ اینچ) برای مناطق مسکونی کم‌جمعیت، بیش از ۲۲۵–۱۵۰ میلی‌متر (۹–۶ اینچ) برای خیابان‌های شریانی فرعی و ۲۷۵–۱۷۲ میلی‌متر (۱۱–۷ اینچ) برای خیابان‌های شریانی اصلی است. برای طراحی روسازی تقاطع باید ترافیکی که از تمامی جهت‌ها وارد آن می‌شود در نظر گرفته شود که این امر ممکن است باعث افزایش ضخامت روسازی به اندازه ۲۵–۱۳ میلی‌متر (۰/۵ تا ۱ اینچ) شود. ضخامت روسازی را می‌توان با استفاده از جداول طراحی بالا یا با استفاده از نرم‌افزار StreetPave تعیین کرد.

ملاحظات مربوط به درزها نیز حائز اهمیت است و با در نظرگیری چند مورد دیگر در سایر موارد همانند روسازی خیابان‌های شهری می‌باشد. درزهای جدا کننده عموماً برای تقاطع‌های غیرعمود برهم و تقاطع‌های سه‌راهی T شکل ضروری است. همچنین این درزها در محل دریچه‌های آدم‌رو، تجهیزات زهکشی، پیاده‌روها، سکوها و سازه‌ها مورد نیاز است. تهیه نقشه‌های اجرایی مناسب برای نقاط اتصال و انجام اصلاحات اجرایی مورد نیاز، امری مهم است. تفاوت اجرای نهایی با آنچه که در طرح‌ها نشان داده شده است، امری معمول محسوب می‌شود. یک درز جدا کننده در شکل ۲–۴ نشان داده شده است.

نمونه طرح درز مورد استفاده در تقاطع‌های رایج، در صفحه ۱۰ از TB019P (تقاطع‌های بتنی: راهنمای طراحی و اجراء) نشان داده شده است. جزئیات و پیکربندی‌های بیشتر در نحوه آرایش درزهای تقاطع، IS006.01P، به همراه یک مثال ده مرحله‌ای تهیه شده است.

حفظ جریان ترافیک عبوری در تقاطع‌ها در طول ساخت ضروری است، بنابراین انجام زمان‌بندی پروژه از اهمیت خاصی برخوردار است. بهتر است مسیر تردد را از تقاطع

منحرف کرد تا عملیات اجرایی ساده‌تر و سریع‌تر انجام شود. این مسئله برای انتقال ترافیک به وجود مسیرهای جایگزین بستگی دارد. با توجه به خطوط عبور و برای حفظ جریان ترافیک در تقاطع، ممکن است عملیات اجرایی به چهار مرحله تقسیم شود. شکل ۹-۹ یک عملیات اجرایی چهار مرحله‌ای را در مرکز شهر کلیولند از ایالت اوهایو نشان می‌دهد.

شکل ۹-۹: اجرای چهار مرحله‌ای تقاطع شهری در مرکز شهر کلیولند (عکس از نویسنده)

اغلب لازم است تقاطع‌ها دارای حلقه‌های تشخیص وسایل نقلیه باشند. برای مشخص کردن وجود وسایل نقلیه در تقاطع، به منظور شروع و یا افزایش زمان چراغ سبز ترافیکی از این حلقه‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. برای قرار دادن سیم‌ها، برش‌های اره‌ای به عرض ٦ میلی‌متر (¼ اینچ) و عمق ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) در بتن ایجاد می‌شود و لازم است پس از آن آب‌بندی انجام شود. این حلقه‌ها را می‌توان در زمان بتن‌ریزی در داخل روسازی جاسازی کرد ولی رعایت این نکته که حلقه‌ها حداقل ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) بالاتر از هرگونه آرماتور قرار بگیرد، حائز اهمیت است.

۹-٦- روسازی مرکب با بتن غلطکی متراکم

در برخی مناطق مانند کلومبوس (Columbus)، اوهایو و کِبک (Quebec) کانادا، از روسازی‌های مرکب که از یک اساس بتن غلطکی متراکم و یک روکش نازک آسفالتی تشکیل شده است، استفاده می‌شود. یک اساس روسازی مرکب بتن غلطکی در حال ساخت در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. در نهایت مشخص شد که این نوع روسازی نسبت به بتن معمولی یا روسازی آسفالتی اقتصادی‌تر است.

یک روش طراحی نسبتاً ساده برای طراحی این نوع روسازی وجود دارد. اگرچه روکش آسفالتی تا حدودی نقش باربری دارد ولی طرح‌های ارائه شده در این فصل در جدول ۹-٤ بسیار محافظه کارانه عمل کرده‌اند.

۹-۷- روسازی با دال‌های کوتاه و نازک

اخیراً کوواروبیاس (Covarrubias) یک سامانه انحصاری روسازی با دال‌های کوتاه و نازک را ایجاد کرده است که قادر به حمل بار کامیون‌های سنگین می‌باشد. در این سامانه تکه‌های مربعی کوچک، با بعدی کم‌تر از نصف عرض مسیر، استفاده می‌شوند. این ابعاد مشابه موارد استفاده شده در روکش‌های بتنی استفاده شده بر روی آسفالت است که در فصل ۱۸ مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مشخصه‌های کلیدی سامانه کوواروبیاس عبارتند از:

- ابعاد کوچک‌تر دال، مربع‌هایی به ضلع تقریبی ۱/۸ متر (٦ فوت).
- به دلیل اندازه کوچک دال‌ها، تنش‌های ناشی از پیچ‌وتاب و اعوجاج کم‌تر است. بنابراین دال‌ها کاملاً بر روی اساس قرار می‌گیرند و خطر خردشدگی گوشه‌ها در آن وجود دارد.
- به دلیل اندازه کوچک دال، تنها یک چرخ و در یک زمان بر روی آن وجود دارد. بنابراین تنش‌های خمشی منفی ناشی از چندین بارگذاری همزمان وجود نخواهد داشت. اندازه این دال‌ها بایدکم‌تر از فاصله بین محور جلوی کامیون و محورهای عقب آن باشد.
- درزها با استفاده از یک اره با تیغ اره‌ای ۲ میلی‌متری (۰/۰۸ اینچ) باریک، ایجاد می‌شوند.
- به دلیل اندازه کوچک دال و درزهای باریک از میلگردهای اتصال استفاده نمی‌شود.

- برای محکم نگه داشتن درزهای عرضی در امتداد لبه‌های روسازی از میخ استفاده می‌شود.
- برای ممانعت از خرابی ایجاد شده ناشی از نفوذ آب از اساس با خاصیت زهکشی استفاده می‌شود. می‌توان از اساس تثبیت شده با قیر و اساس تثبیت شده با سیمان یا مصالح سنگدانه‌ای با درصد ریزدانه کم‌تر از ٦ درصد استفاده کرد.

با این سامانه، روسازی با دال‌های کوتاه و با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) نسبت به روسازی بتنی معمولی با ضخامت ۲۳۰ میلی‌متر (۹ اینچ)، تنش و عمر خستگی یکسانی دارد. این تکنولوژی با قطعات آزمایشی در پورتو مونت (Puetro Montt) و تموکو (Temuco) در شیلی، به ترتیب در ژانویه سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰٦ ارائه شد. در این پروژه‌ها، دال‌های نازک ۸۰ میلی‌متری (۳/۱ اینچ) متکی براساس سنگدانه‌ای تا به حال ۷۰۰۰۰ محور استاندارد را از خود عبور داده‌اند. در این قطعات آزمایشی مقاومت خمشی بتن ٤/۸ مگاپاسکال (۷۰۰ psi) است.

فصل دهم

طراحی روسازی فرودگاه

بین روسازی راه‌های اصلی و فرودگاه تفاوت‌های اساسی وجود دارد. یودر و ویتزاک[1] عنوان می‌کنند که تکرار بار در روسازی باند فرودگاه نسبت به راه‌های اصلی به طور قابل توجهی کم‌تر است ولی از طرف دیگر، مقدار بار ناخالص وارده بسیار بیشتر از راه‌های اصلی است. یک مشکل اساسی در راه‌های اصلی وجود پدیده مکش است ولی در مورد روسازی‌های صلب باند فرودگاه از اهمیت کم‌تری برخوردار است. به‌علاوه، در راه‌های اصلی بخش عمده‌ای از بار در نقاطی وارد می‌شود که فقط چند فوت از لبه‌های روسازی صلب فاصله دارد ولی در باند فرودگاه عمدتاً بارگذاری در وسط دال قرار دارد.

سازمان هواپیمایی فدرال خاطرنشان می‌سازد که:

«طراحی روسازی فرودگاه یک مسئله پیچیده مهندسی است که تعداد زیادی از متغیرهای وابسته به هم در آن تأثیر دارند. روسازی باند فرودگاه و هواپیمایی که بر روی آن حرکت می‌کند، تشکیل یک سیستم اندرکنشی را می‌دهد که باید در روش طراحی روسازی مورد بحث قرار بگیرد. برای نیل به یک طرح رضایت‌بخش، باید ملاحظات مرتبط با هواپیما و روسازی در طراحی در نظر گرفته شود. رسیدن به عمر مطلوب روسازی نیازمند کنترل دقیق اجراء و نگهداری مناسب است. به طور معمول روسازی‌ها برای یک عمر محدود و حد خستگی مشخص طراحی می‌شوند. اجرای ضعیف و فقدان مراقبت پیشگیرانه، حتی در روسازی‌هایی که بهترین طراحی را دارند، باعث کاهش عمر خدمت‌دهی روسازی می‌شود».

در گذشته، برخی از روسازی‌های باند پرواز با مقاطع جناغی ساخته می‌شدند. مقاطع

1- Witzak & Yoder

جناغی در نزدیکی خط میانی دارای روسازی ضخیم‌تر و در نزدیکی لبه‌ها نازک‌تر بود، زیرا انتظار می‌رفت کم‌تر هواپیمایی در نزدیکی لبه تردد کند. برای جلوگیری از تغییرات ناگهانی در سطح مقطع و تمرکز تنش، اغلب ضخامت روسازی به صورت پخ‌دار تغییر می‌کند (Packard 1973: 20-21). به پیشنهاد یودر و ویتزاک، ضخامت در لبه‌های بیرون می‌تواند ۳۰ درصد کاهش داشته باشد.

در حال حاضر مقاطع عرضی با ضخامت متغیر یا جناغی کم‌تر استفاده می‌شود. سازمان هواپیمایی فدرال بیان می‌کند که:

«عموماً مقاطع روسازی فرودگاه‌ها با ضخامت کامل و یکنواخت ساخته می‌شوند. در صورت عملی بودن، باندهای پرواز می‌تواند با مقطع عرضی متغیر ساخته شود. یک مقطع متغیر اجازه می‌دهد که مقدار مصالح مورد نیاز برای لایه‌های فوقانی باند، کم‌تر باشد؛ ولی در مقابل، استفاده از مقاطع متغیر باعث پیچیدگی و پرهزینه‌تر شدن عملیات اجرایی می‌شود. هزینه‌های اجرایی اضافه شده ممکن است با کم شدن هزینه حاصل از کاهش مقدار مصالح برابر شود».

روش‌های طراحی روسازی فرودگاه‌ها در آمریکا، برای فرودگاه‌های غیرنظامی به وسیله سازمان هواپیمایی فدرال و برای فرودگاه‌های نظامی به وسیله USACE تهیه شده است. نشریه‌های مشاوره‌ای سازمان هواپیمایی فدرال که مربوط به طراحی و اجراء هستند را می‌توان به صورت رایگان از آدرس ذیل بارگیری کرد:

www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/resources/advisorg_circular

انجمن سیمان پرتلند نیز طبق آخرین چشم‌انداز انجمن روسازی بتنی آمریکا روش‌هایی را تدوین کرده است. پاکارد (Pakard) در سال ۱۹۷۳ کتاب «طراحی روسازی بتنی» را تألیف کرد که شامل جداول طراحی روسازی برای انواع هواپیماها بود. سازمان هواپیمایی فدرال استفاده از روش‌های انجمن سیمان پرتلند که اکنون به وسیله انجمن روسازی بتنی آمریکا و با نرم‌افزار AirPave به‌روزرسانی شده است را مجاز می‌داند.

در این کتاب در مورد فرودگاه‌های نظامی بحث نشده است. در آمریکا، فرودگاه‌های نظامی با استفاده از UFC-3-250-02 تحت عنوان «دستورات اجرایی استاندارد برای روسازی‌های صلب» و UFC-3-260-02 با عنوان «طراحی روسازی برای فرودگاه‌ها» طراحی و ساخته می‌شوند. نشریات فوق در آدرس اینترنتی زیر موجود هستند:

http://65.204.17.188/report/doc_ufc.html

مهم است بدانید روش‌های طراحی فرودگاه‌های غیرنظامی و نظامی هر دو یک وضعیت بارگذاری میانی را در نظر می‌گیرند. در حالت‌های خاص، مانند وقتی چرخ‌های هواپیما در نزدیکی لبه آزاد قرار بگیرد، این روش‌ها پاسخگو نخواهد بود. برای مثال، یک محوطه

دایره‌ای کنترل قدرت به قطر ۳۰ متر (۱۰۰ فوت) در یک فرودگاه نظامی در نظر گرفته شد. این محوطه برای آزمایش مهار هواپیماهای جت با قدرت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که هواپیما در حال خروج از محوطه است، چرخ‌دنده اصلی از لبه بیرونی دال عبور می‌کند. بنابراین فرض طراحی براساس وضعیت بارگذاری میانی نقض می‌شود و دال‌های لبه به راحتی با خطر ترک‌خوردگی‌های وسیع مواجه می‌شوند.

۱۰-۱- اساس و زیراساس روسازی فرودگاه‌ها

لایه‌های اساس و زیراساس که شامل لایه‌های زهکش هستند، به طور گسترده در روسازی فرودگاه‌ها به کار می‌روند. هال و همکارانش عنوان می‌کنند که:

«وقتی اساس‌های تثبیت‌شده یا نفوذپذیر، طراحی و به خوبی اجراء شوند، بر روی عملکرد روسازی اثر مثبت دارند. در هر صورت، برای تضمین موفقیت، انتخاب و مشخص کردن این لایه‌ها باید در قالب کلی طراحی و روش ساخت روسازی صلب در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر برای تضمین عملکرد روسازی، استفاده صِرف از اساس در مقاطع معمولی الزاماً پاسخ‌گو نیست. در مقابل اگر به این موضوع که این لایه‌ها چگونه می‌توانند عملکرد اولیه و بلندمدت روسازی را تغییر دهد توجه کافی نشود، سودمندی آن‌ها به اندازه‌ای که مورد انتظار بوده است، زیر سؤال می‌رود. جزئیات اجرایی لایه‌های روسازی بتنی با سیمان پرتلند (ضخامت، فاصله درزها و ...)، خصوصیات مخلوط روسازی بتنی با سیمان پرتلند، شرایط محیطی در زمان اجرای روسازی، عمل‌آوری و اجرای درز در روسازی بتنی با سیمان پرتلند، به همراه سختی، ضخامت و خصوصیات اصطکاکی لایه اساس پس از اجراء، مجموعه منحصر به فردی را برای هر پروژه ایجاد می‌کند که لازم است هر کدام به طور دقیق مورد توجه قرار بگیرند تا موفقیت طرح تضمین شود.

گزارش مؤسسه تحقیقات مبتکرانه روسازی[1] تحت عنوان «اساس تثبیت‌شده و زهکش برای روسازی صلب: راهنمای طراحی و اجراء» با شماره IPRF-01-G-002-021(G) در مورد خطرات ترک‌خوردگی زودهنگام کنترل نشده در برخی از انواع اساس و چگونگی کاهش این خطرات بحث می‌کند. برخی از این عوامل باید در زمان طراحی و برخی دیگر در هنگام اجراء مورد توجه قرار بگیرند. جنبه‌های اجرایی این موضوع در فصل ۱۳ مورد بحث قرار گرفته‌اند.

هال و همکارانش ضخامت ۲۰۳-۱۵۲ میلی‌متر (۸-۶ اینچ) را برای لایه‌های اساس

1- The Innovation Pavement Research Foundation

تثبیت‌شده و ضخامت ۱۵۲-۱۰۲ میلی‌متر (٦-٤ اینچ) را برای اساس نفوذپذیر در روسازی فرودگاه توصیه می‌کنند. در این محدوده ضخامت، احتمالاً اساس بدون جدا شدن سنگدانه‌ها اجراء می‌شود و اساس نفوذپذیر دارای نفوذپذیری کافی خواهد بود.
معمولاً لایه‌های تثبیت‌شده روسازی صلب در فرودگاه‌ها، شامل آیتم P-304 و آیتم P-306 زیراساس ساخته شده از بتن کم‌عیار یا اساس بتنی کم سیمان و آیتم P-401 یاP-403 برای اساس تثبیت شده با قیر هستند. در فصل‌های ٤ و ۱۳ این کتاب به ترتیب در مورد این مصالح و اجرای آن‌ها بحث شده است.

۱۰-۲- ملاحظات طراحی

روش‌های استاندارد طراحی سازمان هواپیمایی فدرال در فصل سوم نشریه مشاوره‌ای AC 150/5320-6 از سازمان هواپیمایی فدرال تشریح شده است. این روش‌ها برای فرودگاه‌هایی مناسب است که وزن ناخالص هواپیما در آن‌ها ۱۳۰۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰ پوند) یا بیشتر باشد. روش‌ها و ملاحظات عمومی برای روسازی‌های صلب و انعطاف پذیر یکسان است ولی در روش‌های خاص طراحی باهم تفاوت دارند. برای فرودگاه‌هایی که دارای هواپیماهای سبک‌تر هستند یک روش طراحی جداگانه و ساده‌تر تهیه شده است که در قسمت بعدی توضیح داده می‌شود.
هدف از روش‌های استاندارد طراحی سازمان هواپیمایی فدرال ایجاد روسازی‌هایی با عمر مفید ۲۰ سال است. اگرچه در طی این مدت ممکن است نیاز به بهسازی و تجدید مقاومت لغزشی وجود داشته باشد.

۱۰-۳- تعیین حرکت معادل سالیانه هواپیمای طرح

ساختار استاندارد چرخ‌ها به صورت چرخ تک، چرخ زوج، چرخ زوج مرکب دوگانه و هواپیمای عریض فرض شده است. هواپیمای دارای چرخ زوج مرکب سه‌گانه به صورت مبحثی جداگانه با عنوان «روش‌های لایه‌ای الاستیک طراحی» در فصل ۷ آورده شده است. فشار تایرها بین ۵۱۵ تا ۱۳۸۰ کیلوپاسکال (۲۰۰ psi-۷۵) متغیر می‌باشد.
در طی مراحل طراحی یک نوع هواپیما در نظر گرفته می‌شود. به گفته سازمان هواپیمایی فدرال، پیش‌بینی حرکت سالیانه با توجه به تفکیک نوع هواپیما به صورت لیستی از چندین هواپیما در می‌آید. با استفاده از منحنی طراحی مناسب و با در نظر گرفتن تعداد رفت‌وآمدهای پیش‌بینی شده سالیانه، باید ضخامت مورد نیاز روسازی برای هر هواپیما

کنترل شود. هواپیمای طرح، هواپیمایی است که بیشترین ضخامت روسازی را نیاز دارد. این هواپیما لزوماً سنگین‌ترین هواپیمای پیش‌بینی شده نیست. از آنجایی که پیش‌بینی ترافیک، ترکیبی از انواع هواپیما با چرخ‌های مختف و وزن‌های متفاوت می‌باشد، از این‌رو باید اثر تمام ترافیک عبوری برحسب هواپیمای طرح لحاظ شود. در ابتدا باید تمام هواپیماها از نظر نوع چرخ فرود به هواپیمای طراحی تبدیل شوند. سازمان هواپیمایی فدرال ضرایبی را به وجود آورده که این تبدیل را انجام می‌دهند. این ضرایب ثابت هستند و برای هر دو روسازی انعطاف پذیر و صلب کاربرد دارد و بیانگر مقدار تقریبی نسبت اثر خستگی در انواع مختلف چرخ می‌باشد.

ضرایب تبدیل استفاده‌شده برای تبدیل یک نوع چرخ به نوع دیگر در جدول ۰-۱ نمایش داده شده است.

بعد از تبدیل هواپیما به یک هواپیمای طرح، لازم است حرکت معادل سالیانه هواپیمای طرح را نیز بدست آوریم:

$$\log R_1 = \log R_2 \times \sqrt{\frac{W_2}{W_1}}$$ رابطه ۱۰-۱

که در آن:

R_1= حرکت معادل سالیانه هواپیمای طرح.

R_2= حرکت سالیانه هواپیمای مورد نظر.

W_1= بار چرخ هواپیمای طرح.

W_2= بار چرخ هواپیمای مورد نظر.

هواپیمای پهن‌پیکر در محور فرود تفاوت قابل توجهی دارد. بنابراین در محاسبه حرکت معادل سالیانه، حتی زمانی که خودش هواپیمای طراحی باشد، مانند یک هواپیما با چرخ زوج مرکب دوگانه با وزن ۱۳٦۱۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰۰ پوند) به حساب می‌آید.

برای مثال، در جدول ۱۰-۲ حرکت سالیانه برای ۸ نوع مختلف از هواپیما نشان داده شده است. هواپیمای B727-200 به عنوان هواپیمای طرح انتخاب می‌شود، زیرا ۹۰۸۰ حرکت سالیانه دارد و نیازمند بیشترین ضخامت باند است. بنابراین تمام هواپیماها با ضرایب مناسبی که با استفاده از جدول ۱۰-۱ بدست می‌آید، به چرخ‌های زوج دوگانه تبدیل و سپس با استفاده از رابطه ۱۰-۱ حرکت معادل سالیانه هواپیمای طرح تعیین می‌شود. پرواز معادل سالیانه هواپیمای B727-200 در جدول ۱۰-۲ برابر عدد ۱٦۲٤۱ نشان داده شده است.

برای مثال، هواپیمای B707-320B با چرخ‌های زوج مرکب دوگانه که به طور میانگین

سالیانه ۳۰۵۰ پرواز دارد، در ۱/۷ ضرب می‌شود تا عدد ۵۱۸۵ را نتیجه بدهد که معادل پروازهای هواپیمای دارای چرخ‌های زوج است. بعد از آن با استفاده از رابطه ۱۰-۱ با W1=۲۰۵۲۰ کیلوگرم و W2=۱۷۶۱۰ کیلوگرم داریم:

$$\mathrm{LogR_1} = \mathrm{Log}(5{,}185) \times \sqrt{\frac{17{,}610}{20{,}520}} = 3.44$$

جدول ۱۰-۱: ضرایب تبدیل نوع چرخ فرود (FAA 2004:25)

برای تبدیل از	به	تعداد پروازها ضرب شود در ضریب
چرخ تک	چرخ زوج	۰/۸
چرخ تک	چرخ زوج مرکب	۰/۵
چرخ زوج	چرخ تک	۱/۳
چرخ زوج	چرخ زوج مرکب	۰/٦
چرخ زوج مرکب	چرخ تک	۲/۰
چرخ زوج مرکب	چرخ زوج	۱/۷
دو چرخ زوج مرکب	چرخ زوج مرکب	۱/۰
دو چرخ زوج مرکب	چرخ زوج	۱/۷

جدول ۱۰-۲: پیش‌بینی ترافیک و حرکت‌های معادل سالیانه

(الف) حرکت‌های پیش‌بینی شده

هواپیما	نوع چرخ	میانگین سالیانه پرواز	حداکثر وزن در هنگام بلند شدن	
			kg	*lb*
100-727	زوج	۳۷٦۰	۷۲،۵۸۰	۱٦۰،۰۰۰
727-200	زوج	۹۰۸۰	۸٦،٤۱۰	۱۹۰،۵۰۰
707-320B	زوج مرکب	۳۰۵۰	۱٤۸،۳۳۰	۳۲۷،۰۰۰
DC-9-30	زوج	۵۸۰۰	٤۹،۰۰۰	۱۰۸،۰۰۰
CV-880	زوج مرکب	٤۰۰	۸۳،٦۹۰	۱۸٤،۵۰۰
737-200	زوج	۲٦۵۰	۵۲،۳۹۰	۱۱۵،۵۰۰
L-1011-100	زوج مرکب	۱۷۱۰	۲۰٤،۱۰۲	٤۵۰،۰۰۰
747-100	دوزوج مرکب	۸۵	۳۱۷،۵۲۰	۷۰۰،۰۰۰

جدول ۱۰-۲: ادامه

(ب) حرکت‌های معادل سالانه						
هواپیما	حرکت‌های معادل چرخ زوج	بار چرخ		بار چرخ هواپیمای طرح		حرکت‌های معادل سالانه هواپیمای طرح
		kg	*lb*	*kg*	*lb*	
100-727	۳۷۶۰	۱۷،۲۴۰	۳۸،۰۰۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۱۸۹۱
727-200	۹۰۸۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۹۰۸۰
707-320B	۵۱۸۵	۱۷،۶۱۰	۳۸،۸۳۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۲۷۶۴
DC-9-30	۵۸۰۰	۱۱،۶۳۰	۲۵،۶۵۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۶۸۲
CV-880	۶۸۰	۹،۹۴۰	۲۱،۹۱۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۹۴
737-200	۲۶۵۰	۱۲،۴۴۰	۲۷،۴۳۰	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۴۶۳
L-1011-100	۲۹۰۷	۱۶،۱۶۰[1]	۳۵،۶۲۵[1]	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۱۱۸۴
747-100	۱۴۵	۱۶،۱۶۰[1]	۳۵،۶۲۵[1]	۲۰،۵۲۰	۴۵،۲۴۰	۸۳
				مجموع:		۱۶،۲۴۱

[1] بار چرخ‌ها برای هواپیماهای پهن‌پیکر، مانند یک هواپیمای دارای چرخ زوج مرکب دوگانه با وزن ۱۳۶۱۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰۰ پوند) در نظر گرفته شده و محاسبه می‌شود.

برای هواپیمای طرح (B727-100)، تعداد $۱۰^{۳/۴۴}$=۲،۷۶۴ پرواز سالیانه بدست می‌آید. همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، در جدول هواپیماهای پهن‌پیکر (B747-100 و L-1011-100) مانند یک هواپیمای با چرخ زوج مرکب دوگانه و وزن ۱۳۶۱۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰۰ پوند) در نظر گرفته می‌شود.

این محاسبات را می‌توان به سادگی با تهیه یک صفحه گسترده انجام داد. وزن تعداد زیادی از هواپیماها در فهرست نشریه سازمان هواپیمایی فدرال، به شماره 150-5300-13، تحت عنوان طراحی فرودگاه ارائه شده است. این اطلاعات را همچنین می‌توان از پایگاه اطلاعات آنلاین خصوصیات هواپیما به آدرس زیر پیدا کرد:
http://www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/construction/aircraft_char_database/.

۱۰-۴- طراحی برای یخبندان و یخبندان دائمی

در طراحی روسازی فرودگاه باید شرایط آب‌وهوایی در نظر گرفته شود. به ویژه آن که

اثرات زیان‌آور یخبندان فصلی و دائمی باید اعمال شود. برای یخبندان فصلی دو رویکرد طراحی وجود دارد. راه اول حصول اطمینان از این که مجموع ضخامت روسازی و مصالح غیرحساس در برابر یخبندان به قدر کافی از نفوذ یخ‌زدگی به بستر جلوگیری می‌کند. راه دوم این است که روسازی به قدر کافی مستحکم باشد که بتواند بارها را در دوره بحرانی ذوب یخ تحمل کند. سه روش طراحی وجود دارد:

۱- حفاظت کامل در برابر یخبندان: عمق نفوذ یخ‌زدگی (عمق یخبندان) با استفاده از روش ارائه شده در فصل ۲ نشریه AC 150/5320-6D از سازمان هواپیمایی فدرال محاسبه شده است و ضخامت طرح روسازی با این عمق مقایسه می‌شود. اگر یخ‌زدگی به لایه‌های عمیق‌تر از ضخامت روسازی نفوذ کند، باید مصالح بستر برداشته و مصالح غیرحساس در برابر یخبندان جایگزین شود. این روش از جمله بهترین و پرهزینه‌ترین روش‌های مقابله با یخبندان است. در هر حال محافظت از یخ‌زدگی حداکثر تا ۱/۸ متر انجام می‌شود.

۲- محافظت محدود از بستر در برابر یخبندان: این روش شبیه روش یک است، اما محافظت از یخ‌زدگی فقط به ٦٥ درصد عمق نفوذ یخ محدود می‌شود. این روش اثرات ناشی از یخ‌زدگی مانند تورم را حذف نمی‌کند، ولی به طور کلی آن را در حد قابل قبولی نگه می‌دارد.

۳- کاهش مقاومت بستر: براساس طبقه‌بندی یخبندان خاک که در فصل ۲ نشریه AC 150/5320-6D از سازمان هواپیمایی فدرال تعریف شده است، مدول بستر به ٦/۸ تا ۱۳/۵ مگاپاسکال بر متر کاهش می‌یابد. سپس از این مقدار برای تعیین ضخامت باند استفاده می‌شود. این روش اثرات یخبندان را نادیده می‌گیرد.

نه تنها باید اثرات فصلی ذوب و انجماد دوباره را در طراحی روسازی مناطق با یخبندان دائمی در نظر گرفت، بلکه اثرات ساخت‌وساز بر تعادل حرارتی در وضع موجود نیز باید در نظر گرفته شود. تغییرات حرارتی زیرسطحی ممکن است سبب کاهش سطح لایه‌ها با یخ‌زدگی دائمی شود که این امر باعث اختلاف نشست‌های شدید در منطقه و کاهش ظرفیت باربری روسازی می‌شود.

رویکردهای طراحی برای مناطق با یخبندان دائمی، شامل روش حفاظت کامل در برابر یخبندان، کاهش مقاومت بستر و روش پانل‌های عایق می‌باشد.

دو روش اول برای محافظت از یخ‌زدگی‌های مشروح در پاراگراف قبل هستند. در روش طراحی سازمان هواپیمایی فدرال برای یخ‌زدگی بین روسازی صلب و انعطاف پذیر هیچ تفاوتی وجود ندارد.

۱۰-۵- طراحی روسازی صلب به روش سازمان هواپیمایی فدرال

فرآیند طراحی روسازی در سازمان هواپیمایی فدرال را می‌توان با استفاده از نمودارهایی انجام داد. این نمودارها برای بارگذاری لبه و بر پایه آنالیز دال به روش وسترگارد (Westergaard) می‌باشد. اصلاح آنالیز بارگذاری لبه با این هدف انجام می‌شود که شرایط لبه دال در درزها قابلیت شبیه‌سازی را داشته باشد. اندازه تنش در لبه درزها بیشتر از قسمت‌های داخلی است. عملاً تجربه نشان داده است که ترک‌های ناشی از بارگذاری از لبه دال در محل درز آغاز می‌شود و سپس به قسمت میانی دال گسترش پیدا می‌کند. برای حالتی که ترافیک عبوری به موازات یا عمود بر درزها می‌باشد و یا حالتی که ترافیک با یک زاویه حاده از درز عبور می‌کند نیز منحنی‌های طراحی تهیه شده است. ضخامت روسازی که با استفاده از منحنی‌های طراحی بدست می‌آید، صرفاً به ضخامت دال مربوط است و ضخامت زیراساس به صورت جداگانه تعیین می‌شود.

۱۰-۵-۱- تعیین مدول فنداسیون (مقدار k)

نخست مقدار k برای بستر زمین تعیین و سپس برای زیراساس به عدد بالاتر اصلاح می‌شود. ترجیح دارد که برای تعیین مقدار k از آزمایش صفحه استفاده شود، اما می‌توان در عوض از روابط ارائه شده در فصل ٤ نیز استفاده کرد. سازمان هواپیمایی فدرال یادآور شده است که خوشبختانه، روسازی‌های صلب نسبت به مقدار k حساسیت چندانی ندارد و خطا در تخمین مقدار k تأثیر زیادی بر ضخامت روسازی صلب نمی‌گذارد.
برای تعیین k مرکب براساس بستر، ضخامت و نوع زیراساس، در هر دو نوع سنگدانه‌ای و تثبیت شده، می‌توان از جداول مختلف استفاده کرد. جداول ٤-۲ تا ٤-۵ از فصل ٤ مقادیر مناسبی را در اختیار قرار می‌دهد.

۱۰-۵-۲- تعیین ضخامت دال بتنی

پس از مشخص شدن مقدار k مرکب، ضخامت دال بتنی با استفاده از مقاومت خمشی بتن برای انواع هواپیما، وزن ناخالص هواپیمای طرح و تعداد پروازهای سالیانه مورد نظر بدست می‌آید. مقاومت خمشی بتن، همان مقاومتی است که در زمان بازگشایی به روی ترافیک به آن رسیده و با استفاده از روش ASTM C78 بدست می‌آید. به عبارت دیگر اگر از عمر روسازی مدت سه ماه سپری شده باشد، مقاومت بتن بر پایه مقاومت ۲۸

روزه تایید می‌شود و فرض طراحی نیز باید بر پایه مقاومت ۹۰ روزه باشد.
نمودارها و نموگراف‌های طراحی برای هر نوع هواپیما در صفحات ۵۹ تا ۸۳ از FAA AC 150/5320-6D ارائه شده است. برای استفاده از هر نمودار مقاومت خمشی بتن را به عنوان اولین ورودی در نظر می‌گیریم. یک خط افقی ترسیم می‌کنیم تا خط مربوط به مقدار k مناسب بستر را قطع کند. از نقطه تقاطع، یک خط عمودی رو به پایین به خط نماینده وزن ناخالص هواپیما ترسیم می‌نماییم. در نهایت، از نقطه تقاطع یک خط افقی به سمت راست ترسیم می‌کنیم تا تعداد پروازهای سالیانه را قطع کند و بدین ترتیب ضخامت دال تعیین می‌شود. یک خط‌چین به عنوان راهنما در همه این نمودارها وجود دارد، که این روند را نشان می‌دهد.
این فرآیند برای هشت هواپیمای مختلف در ترافیک پیش‌بینی شده، باید هشت بار تکرار شود (برای هر هواپیما، با نمودار مناسب خودش). بنابراین هشت مقدار مختلف برای ضخامت دال بدست می‌آید. ضخیم‌ترین مقدار، هواپیمای طرح را تعیین می‌کند. براساس روند گذشته از هواپیمای طرح برای تعیین تعداد پرواز معادل سالیانه هفت نوع هواپیمای دیگر استفاده می‌شود.
از آنجایی که این روند طراحی به صورت دستی خسته کننده است، برنامه اکسل R805 faa xls تهیه شده است و می‌توان آن را به طور رایگان از وب‌سایت سازمان هواپیمایی فدرال به آدرس زیر دریافت کرد.
www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/construction/design_software/
استفاده از این صفحه گسترده در مثال طراحی زیر نشان داده شده است.

۱۰-۵-۳- نواحی بحرانی و غیربحرانی

سازمان هواپیمایی فدرال نواحی بحرانی و غیربحرانی را برای روسازی باند فرودگاه تعیین می‌کند. نواحی بحرانی شامل تاکسی‌وی و قسمت مرکزی باند پرواز می‌باشد که در شکل ۳-۱ از FAA AC 150/5320-6D نشان داده شده است و نواحی غیربحرانی شامل لبه‌های بیرونی باند فرودگاه است. در نواحی غیربحرانی، ضخامت روسازی را می‌توان تا ۱۰ درصد کاهش داد.

۱۰-۵-٤- حجم بالای ترافیک

نمودارهای طراحی تا ۲۵,۰۰۰ پرواز سالیانه را در بر می‌گیرند. چرا که برخی از فرودگاه‌ها، ترافیک هوایی بیشتری دارند. با حجم ترافیک بالا، باید از زیراساس اصلاح شده استفاده

کرد و ممکن است لازم باشد که ضخامت روسازی کمی افزایش یابد. همچنین بهتر است برای به حداقل رساندن حرکت درزها و بهبود انتقال بار، فاصله بین درزها کاهش بیابد. برای این منظور باید از مواد درزگیر با کیفیت بالا استفاده شود.

۱۰-۵-۵- درزها

فاصله بین درزها و آرایش آن‌ها از مهم‌ترین ارکان روش طراحی سازمان هواپیمایی فدرال می‌باشد. همان طور که در فصل ۲ بحث شد، درزها به انواع انبساطی، انقباضی و اجرایی طبقه‌بندی می‌شوند. اگر از یک زیراساس تثبیت نشده در زیر روسازی استفاده شود، مقادیر بیشینه فواصل ارائه شده در جدول ۱۰-۳ را می‌توان به کار برد. روسازی‌هایی که در زمان بتن‌ریزی یا خدمت‌دهی با تغییرات شدید دمایی مواجه هستند، باید دارای فاصله درز کم‌تری باشند.

در صورت استفاده از یک زیراساس تثبیت شده، هرچه مقدار k بیشتر باشد، تنش‌های ناشی از پیچ‌وتاب و اعوجاج افزایش می‌یابد. بنابراین، فاصله درزها باید به پنج برابر شعاع سختی نسبی دال محدود شود. با استفاده از رابطه ۷-۱ شعاع سختی نسبی و با استفاده از شکل ۷-۳ مقدار حداکثر طول دال بتنی محاسبه می‌شود.

درزها معمولاً مسلح هستند و FAA AC A50/5320-6D اجازه می‌دهد تا درزهای قفل‌وبست شده برای دال‌های بتنی به ضخامت ۲۳۰ میلی‌متر (۹ اینچ) یا بیشتر استفاده شود. زمانی که هواپیمای پهن‌پیکر از روسازی استفاده می‌کند و مدول فنداسیون ٥٤ مگاپاسکال‌برمتر (۲۰۰ psi/in) یا کم‌تر است، استفاده از درزهای قفل‌وبست شده توصیه نمی‌شود.

جدول ۱۰-۳: حداکثر فاصله درزها برای اساس تثبیت نشده (FAA 2004:87)

فاصله درزهای عرضی و طولی		ضخامت دال بتنی	
ft	***m***	***in***	***mm***
۱۲/۵	۳/۸	٦	۱۵۰
۱۵	٤/٦	۷-۹	۱۷۵ -۲۳۰
۲۰	٦/۱	۹-۱۲	۲۳۰ -۳۰۵
۲۵	۷/٦	>۱۲	>۳۰۵

جدول ۱۰-٤: توصیه‌های FAA برای میلگردهای اتصال (FAA 2004:88)

فاصله میلگردهای اتصال		طول میلگرد اتصال		قطر میلگرد اتصال		ضخامت دال بتنی	
in	*mm*	*in*	*mm*	*in*	*mm*	*in*	*mm*
۱۲	۳۰۵	۱۸	٤٦۰	۰/۷۵	۲۰	٦-۷	۱۸۰- ۱۵۰
۱۲	۳۰۵	۱۹	٤۸۰	۱	۲۵	۸-۱۲	۳۰۵- ۲۱۰
۱۵	۳۸۰	۲۰	۵۱۰	۱/۲۵	۳۰	۱۳ -۱٦	٤۰۵- ۳۳۰
۱۸	٤٦۰	۲۰	۵۱۰	۱/۵	٤۰	۱۷ -۲۰	۵۱۰ – ٤۳۰
۱۸	٤٦۰	۲٤	٦۱۰	۲	۵۰	۲۱ -۲٤	٦۱۰- ۵۳۵

توصیه‌های سازمان هواپیمایی فدرال برای قطر، طول و فاصله میلگردهای اتصال بر پایه ضخامت دال بتنی است. این توصیه‌ها در جدول ۱۰-٤ نشان داده شده است. این قطرها از اندازه ارائه شده در جدول ۷-۱ کوچک‌تر هستند، بنابراین به جای آن می‌توان از توصیه‌های محافظه‌کارانه‌تر جدول ۷-۱ نیز استفاده کرد.

میلگردهای اتصال عموماً میلگردهای فولادی هستند، اما ممکن است از لوله‌های با مقاومت بالا استفاده شود که دو انتهای آن با درپوش مناسب و یا با یک مخلوط قیری بسته شده است. برای میل‌مهارها باید از میلگرد ۱٦ میلی‌متری (۰/٦۲۵ اینچ) و به فاصله مرکز تا مرکز ۷٦۰ میلی‌متر (۳۰ اینچ) استفاده شود.

۱۰-۵-٦- روسازی‌های مسلح و CRC

براساس FAA AC 150/5320-6D علاوه بر JPC، استفاده از روسازی‌های JRCP و CRCP برای فرودگاه مجاز هستند. آرماتورگذاری اجازه می‌دهد فاصله درزها تا ۲۳ متر (۷۵ فوت) افزایش یابد. طبیعتاً عرض درزها بزرگ‌تر شده و برای آب‌بندی و نگهداری نیازمند توجه بیشتری خواهد بود. طرح فولاد CRC برای روسازی فرودگاه‌ها در بخش ۱۲ آورده شده است.

۱۰-٦- طراحی روسازی الاستیک لایه‌ای

در سال ۲۰۰٤ روش طراحی روسازی فرودگاه سازمان هواپیمایی فدرال به طور اساسی مورد بازنگری قرار گرفت تا برای هواپیماهای جدید و بزرگ‌تر، مخصوصاً بوئینگ 777 و ایرباس A-380 قابل استفاده باشد. در گذشته، طراحی براساس نمودارهای بدست آمده

از رابطه تنش وسترگارد[1] صورت می‌گرفت که برای مدل کردن شرایط لبه در محل درز اصلاح شده بود.

در گزارش تجدید نظر FAA AC 150/5320-6D آورده شده است که:

«فرآیند طراحی ارائه شده در این فصل، برای محاسبه ضخامت طرح روسازی فرودگاه یک روش طراحی مبتنی‌بر یک تحلیل الاستیک لایه‌ای است. به منظور بررسی اثرات چرخ و ساختارهای جدید، در این تئوری مانند چرخ‌های زوج مرکب سه‌گانه (TDT) در نظر گرفته شد».

هواپیماهای بوئینگ 777 و ایرباس A-380 نمونه‌ای از هواپیمایی هستند که چرخ‌هایی با این هندسه دارند. چرخ TDT ترکیب بارگذاری جدیدی را به وجود می‌آورد که از توان باربری روسازی طراحی شده با استفاده از روش‌های پیشین فراتر می‌رود. این روش طراحی از نظر محاسباتی بسیار پیچیده است و درنهایت به شکل برنامه رایانه‌ای LEDFAA درآمده است.

LEDFAA را می‌توان از وب‌سایت سازمان هواپیمایی فدرال، به آدرس:
www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/construction/design_software/

بارگیری کرد. برخی خصوصیات LEDFAA عبارتند از:

- طراحی را می‌توان براساس واحدهای مرسوم آمریکا یا SI انجام داد.
- این برنامه شامل اطلاعات وسیعی از انواع هواپیما است و طراحان می‌توانند پارامترهای مربوط به هر هواپیما را تنظیم کنند.
- طراحی براساس تئوری الاستیک لایه‌ای انجام می‌شود که نسبت به تئوری وسترگارد ارجحیت دارد.
- عمر طراحی روسازی می‌تواند به غیر از ۲۰ سال نیز در نظر گرفته شود. اگرچه این امر با استانداردهای سازمان هواپیمایی فدرال مغایرت دارد.
- ترکیب ترافیک هواپیما، به سفرهای معادل هواپیمای طرح تبدیل نمی‌شود. در عوض خرابی خستگی ناشی از هر هواپیما برای روسازی صلب محاسبه می‌شود. این امر مشابه روش PCA/ACPA1984 و StreetPave در روسازی راه‌های اصلی است.
- مصالح روسازی با ضخامت، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون مشخص می‌شود. مشخصات مصالح را می‌توان با استفاده از خصوصیات ارائه شده در سازمان هواپیمایی فدرال، نظیر P-209 برای اساس با سنگ شکسته، تعیین کرد.

1- Westergaard

- برنامه به طور خودکار ملزومات لایه‌ها را بررسی نمی‌کند. به عنوان مثال، موارد لازم زیراساس تثبیت‌شده برای هواپیماهای پهن‌پیکر مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و به عهده طراح واگذار شده است.

به دلیل تئوری متفاوت میان روش طراحی الاستیک لایه‌ای و روش قدیمی طراحی سازمان هواپیمایی فدرال، محدودیت‌هایی در استفاده از LEDFF قرار داده شده است:

- اگر ترافیک شامل هواپیمای با چرخ TDT نباشد، روش قبل (یعنی فصل ۳ از سازمان هواپیمایی فدرال سال ۲۰۰٤) می‌بایست استفاده شود و حداقل ضخامت روسازی تعیین شده اعمال شود.
- این فرآیند نباید برای تعیین ضخامت لازم یک هواپیما استفاده شود، بلکه باید کل ترکیب ترافیک مورد استفاده قرار بگیرد.
- این برنامه نباید برای ارزیابی روسازی‌های موجود که با استفاده از روش پیشین سازمان هواپیمایی فدرال طراحی شده‌اند، مورد استفاده قرار بگیرد.

بتن روسازی می‌بایست حداقل ۱۵۲ میلی‌متر (٦ اینچ) ضخامت داشته باشد. باید لایه زیراساس تثبیت‌شده با حداقل ضخامت ۱۰۲ میلی‌متر (٤ اینچ)، در زیر روسازی‌های صلب تحت بارگذاری چرخ TDT اجراء شود. فرض می‌شود که بستر، الاستیک است، ضخامت آن بی‌نهایت است و با مدول الاستیک یا مقدار k مشخص می‌شود. برنامه یک مقدار k را به مدول الاستیک تبدیل می‌کند. در واحدهای مرسوم US برای بستر راه E=26 k1.284 می‌باشد. از آنجایی که طراحی به روش الاستیک لایه‌ای به نرم‌افزار نیاز دارد، شرح این روش در بخش بعدی آمده است.

۱۰-۷- نرم‌افزارهای طراحی روسازی فرودگاه

سازمان هواپیمایی فدرال نرم‌افزاری را برای فرآیند طراحی الاستیک لایه‌ای استاندارد فراهم کرده است. همچنین انجمن روسازی بتنی آمریکا یک نرم رایانه‌ای را با نام ACPA AIRPave و براساس روش انجمن سیمان پرتلند تهیه کرده است.

AIRPave در یک زمان می‌تواند فقط برای یک ترکیب از چرخ هواپیما، تنش‌ها و تکرارهای مجاز را تعیین کند. با این وجود، تعداد تکرارهای مجاز در جریان ترافیک برای هر هواپیما را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار AIRPave تعیین کرد و سپس با استفاده از رابطه ٦-٤ مجموع خرابی روسازی را محاسبه نمود. بعد از طراحی امکان اصلاح وجود خواهد داشت. بنابراین اگر طراحی روسازی فرودگاه برای یک نوع هواپیما باشد، استفاده از AIRPave راحت‌تر خواهد بود در غیر این صورت روش سازمان هواپیمایی فدرال

برای ترافیک‌های مخلوط مناسب‌تر است. استفاده از AIRPave بسیار شبیه RCCPave است که در فصل ۱۱ به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱۰-۷-۱- روش طراحی سازمان هواپیمایی فدرال استاندارد (فصل سوم)

همان طور که در بالا بیان شد، سازمان هواپیمایی فدرال نرم‌افزار فایل اکسل طراحی را تهیه کرده است، که این برنامه را با نام R805faa.xls می‌توان به صورت رایگان از آدرس زیر بارگیری کرد.

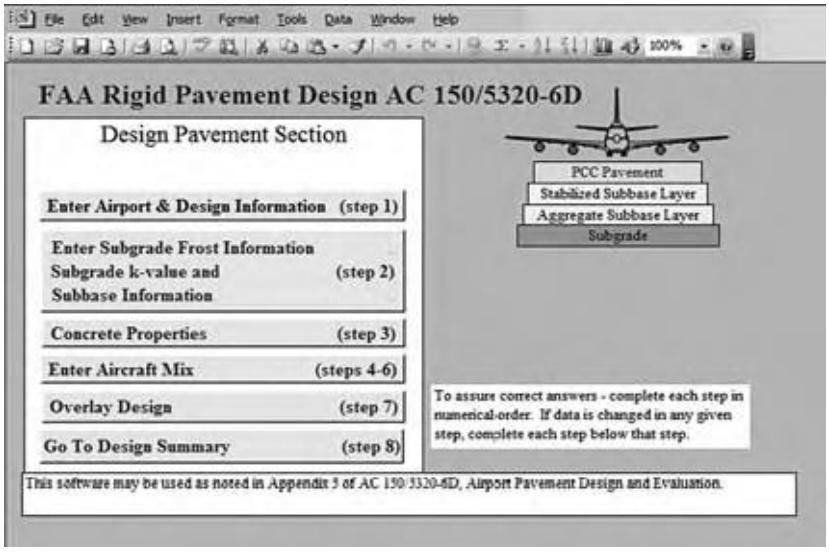
http://www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/construction/design_software/

فایل دستورالعمل اکسل نیز می‌تواند از همان آدرس بارگیری شود.

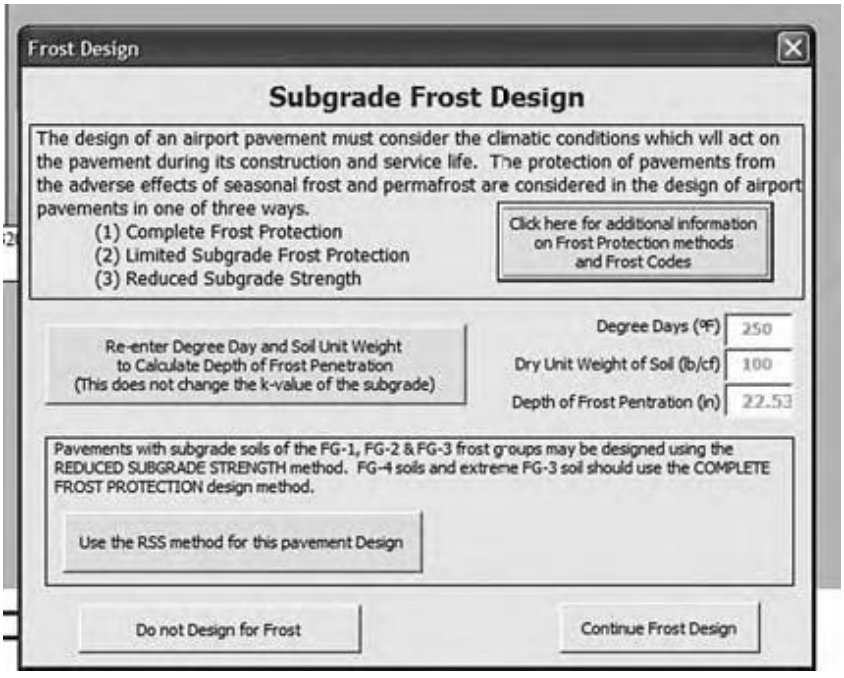
صفحه اصلی برنامه در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است. با فعال کردن ورودی‌های مختلف، به ترتیب هشت مرحله طراحی قابل انجام است. قدم اول مربوط به اطلاعات پایه فرودگاه و داده‌های طراحی است که تأثیری بر محاسبات ندارد.

در قدم دوم مقدار k بستر، نوع و ضخامت زیراساس و اطلاعات لازم برای طراحی یخبندان بستر راه، مورد نیاز خواهد بود. هر کدام از روش‌های طراحی یخبندان مورد بحث می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. در شکل ۱۰-۲، پنجره ورودی طراحی برای یخبندان نمایش داده شده است.

چنانچه لازم باشد روسازی برای یخبندان نیز طراحی شود، به تعدادی داده ورودی اضافی نیاز است که شاخص یخ‌زدگی هوا به روز- درجه، وزن واحد خشک خاک و کد یخبندان خاک بستر (غیریخبندان یا F-1 تا F-4) را در بر داشته باشد. این مقادیر برای محاسبه عمق نفوذ یخبندان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این میان به طور خودکار، مقاومت کاهش یافته بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



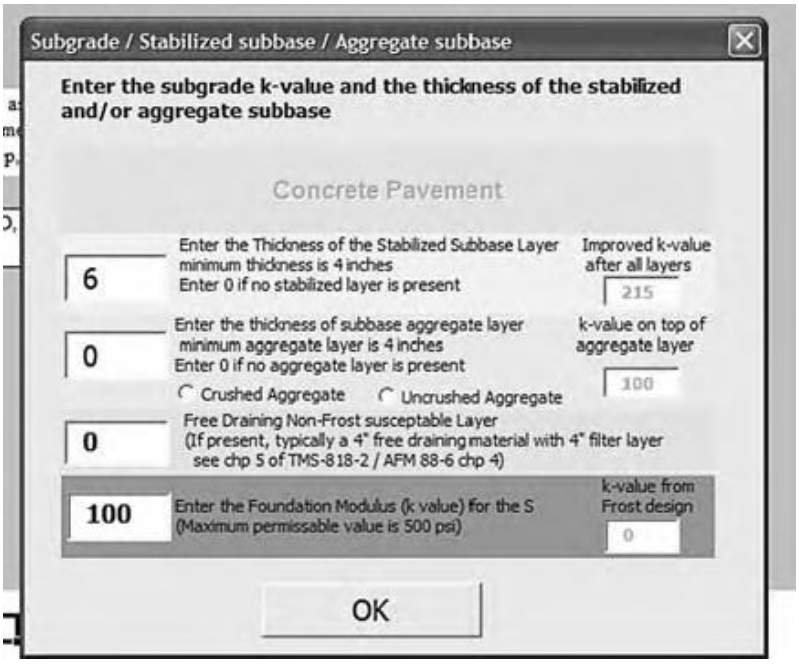
شکل ۱۰-۱: صفحه گسترده FAA R805FAA.xls برای طراحی روسازی صلب فرودگاه



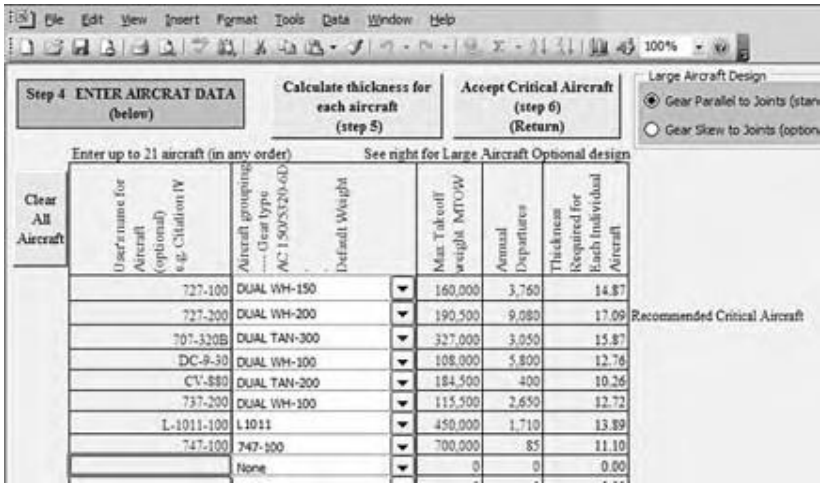
شکل ۱۰-۲: صفحه گسترده FAA R805FAA.xls برای طراحی روسازی صلب در نواحی یخبندان

با ادامه قدم دوم، مقادیر K بستر، ضخامت زیراساس تثبیت‌شده و یا ضخامت مصالح سنگی به عنوان داده‌های ورودی خواهد بود. این مقادیر در شکل ۱۰-۳ نمایش داده شده است. مقدار ورودی k به طور خودکار برای بستر از ۲۷ مگاپاسکال بر متر (۱۰۰ psi/in) به ۵۷ مگاپاسکال بر متر (۲۱۵ psi/in) و ضخامت اساس تثبیت‌شده به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) اصلاح می‌شود.

مشخصات بتن، ورودی‌های قدم سوم هستند. مهم‌ترین ورودی مقاومت خمشی بتن است. اگرچه مقادیر پیش‌فرض ممکن است تغییر نماید ولی ضریب پواسون برابر ۰/۱۵ و مدول الاستیسیته بتن برابر ۲۷/٦ گیگاپاسکال (٤،۰۰۰،۰۰۰ psi) فرض شده است. پیش‌بینی تردد هواپیما در قدم‌های چهارم تا ششم وارد می‌شود. این ورودی‌ها می‌تواند تا ۲۱ نوع هواپیما را شامل شود. همان طور که در شکل ۱۰-٤ نشان داده شده است، انواع هواپیما به صورت جداگانه وارد شده است و محاسبات جدول ۱۰-۲ را تکرار می‌نماید.



شکل ۱۰-۳: صفحه گسترده FAA R805FAA.xls برای محاسبه مقدار k مرکب برای طراحی روسازی صلب فرودگاه



شکل ۱۰-٤: تعیین هواپیمای بحرانی

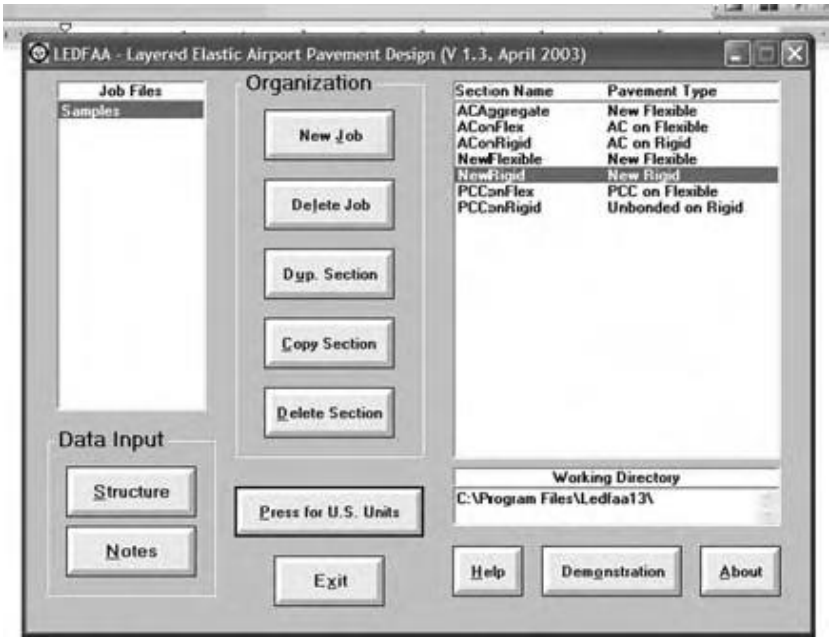
ورودی‌های لازم برای هر هواپیما، شامل آرایش چرخ‌ها، حداکثر وزن برخاستن و تعداد پروازهای سالانه است (ستون‌های ۲ تا ٤). نام هر هواپیما به صورت اختیاری می‌باشد (ستون ۱). لیست برخی از هواپیماها در نرم‌افزار گنجانده شده است و بقیه هواپیماها را با آرایش چرخ و وزن ناخالص برحسب هزار پوند می‌توان دسته‌بندی کرد، مانند مشخصه DUAL TAN-300 که به معنای هواپیمایی با محور زوج مرکب با وزن تقریبی ۱۳٦۰۰۰ کیلوگرم (۳۰۰۰۰۰ پوند) است.

هنگامی که تمام اطلاعات مربوط به هواپیما وارد شد، می‌توان با کلیک بر روی کلید Step5 (دکمه انجام محاسبات ضخامت)، ضخامت روسازی مورد نیاز برای هر هواپیما را محاسبه کرد. با این عمل می‌توان بحرانی‌ترین هواپیما را تعیین کرد. در این مثال همان طور که در جدول ۱۰-۲ و شکل ۱۰-٤ مشاهده می‌شود، B 727-200 بحرانی‌ترین هواپیما شناخته شده است. پس از این مرحله با کلیک برروی کلید Step 6 محاسبات بحرانی‌ترین هواپیما را تأیید و مابقی محاسبات را تکمیل کنید.

همچنین امکاناتی برای محاسبه ضخامت پوشش بتنی (که در بخش ۱۸ مورد بررسی قرار خواهد گرفت) در اختیار کاربر قرار می‌دهد. دکمه Step 8 امکان چاپ خلاصه طراحی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. به عنوان قسمتی از خلاصه گزارش طراحی، نمودارهای چاپ شده نشان دهنده نحوه تغییر ضخامت روسازی برحسب تعداد پرواز سالانه یا میزان مقاومت خمشی هستند. متأسفانه برای کاربران بین‌المللی، این صفحه‌گسترده تنها برحسب سیستم واحدهای مرسوم آمریکا تهیه شده است، اگرچه جداول طراحی سازمان هواپیمایی فدرال هم برحسب واحدهای SI و هم برحسب واحدهای مرسوم آمریکا موجود هستند.

۱۰-۷-۲- طراحی الاستیک لایه‌ای (فصل ۷)

برنامه LEDFAA را می‌توان از وب‌سایت سازمان هواپیمایی فدرال به نشانی
www.faa.gov/airports_airtraffic/airports/construction/design_software
بارگیری کرد. صفحه ورود اطلاعات اولیه این برنامه در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۵: صفحه ورودی اطلاعات اولیه LEDFAA

کاربر توسط این برنامه می‌تواند روسازی صلب، انعطاف پذیر و یا حتی چهار لایه مختلف روکش را طراحی کند. در این برنامه مثال‌های طراحی برای هر نوع روسازی ارائه شده است. در صفحه ورود اطلاعات اولیه می‌توان نوع روسازی و همچنین واحدهای مورد نظر خود را برحسب واحدهای SI یا US تنظیم کرد. برای این برنامه یک رهنمای جامع و براساس روش کار در نرم‌افزار در نظر گرفته شده است.

نوع سازه روسازی اولین ورودی اطلاعات محسوب می‌شود. فایل جدید طراحی روسازی صلب در فایلی که مثال‌های طراحی در آن قرار دارد ذخیره می‌شود. در شکل ۱۰-٦ نمونه یک مقطع روسازی صلب نشان داده شده است.

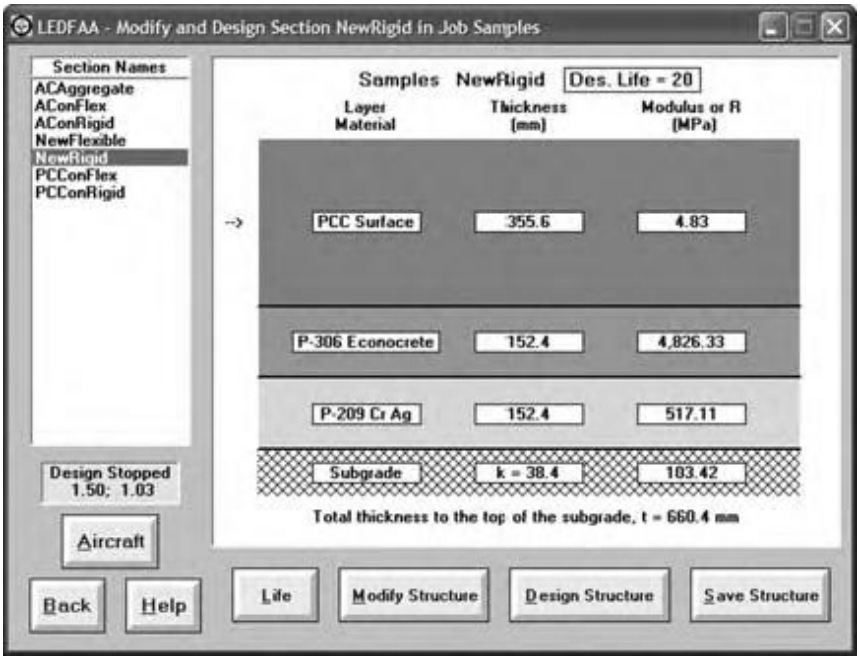
اگر از واحد SI استفاده شود ضخامت لایه‌ها به میلی‌متر نشان داده خواهد شد. مقاومت خمشی بتن و مدول الاستیسیته لایه‌های زیرین روسازی نیز به «مگاپاسکال» داده می‌شود. یکی از قسمت‌های غیرعادی برنامه در خصوص مدول واکنش بستر k می‌باشد که واحد

آن به جای MPa/m به صورت Kg/cm^3 آمده است، اما از آنجایی که این مقدار با هر دو واحد تقریباً یکسان است، می‌توان آن را با واحد MPa/m وارد کرد.

سازه روسازی پیش‌فرضی که در برنامه LEDFAA گنجانده شده است، شامل ۳۵۵/٦ میلی‌متر (١٤ اینچ) روسازی بتنی P-501، ١٥٢/٤ میلی‌متر (٦ اینچ) P-306 روسازی بتنی اقتصادی[1]، ١٥٢/٤ میلی‌متر (٦ اینچ) سنگدانه شکسته شده با مدول الاستیسیته ٤/٨ گیگاپاسکال (٧٠٠،٠٠٠ psi) و ٥١٧ مگاپاسکال (٧٥،٠٠٠ psi) و مدول واکنش بستر برابر ٣٨/٤ Kg/cm^3 (١٤١ psi/in) و مدول الاستیسیته بستر برابر ١٠٣ مگاپاسکال (١٥،٠٠٠ psi) است.

هنگامی که سازه روسازی انتخاب شد، لایه‌ها را می‌توان با تغییر ضخامت یا مدول الاستیسیته و یا با انتخاب مصالحی دیگر نظیر بتن با عیار کم (econocrete) با اساس تثبیت شده با سیمان نوع P-304 تعیین کرد.

هنگامی‌که سازه روسازی تعیین شد، طراح می‌بایست با کلیک بر روی دکمه Aircraft ترکیب ترافیک هواپیماهای عبوری را وارد کند. مثالی از این ورودی ترافیک در شکل ۱۰–۷ نشان داده شده است.

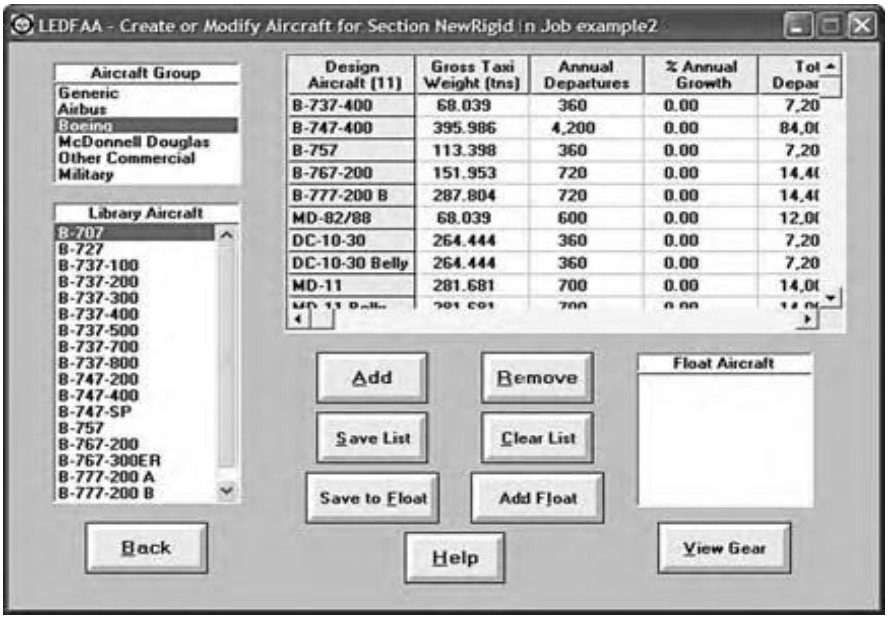


شکل ۱۰–٦: نمونه مقطع روسازی صلب از فایل‌های نمونه LEDFAA

1- Econocrete

در این قسمت ٦ گروه مختلف هواپیما تعریف شده است که شامل هواپیمای عمومی، ایرباس، بویینگ، مک دانِل- داگلاس، سایر هواپیماهای تجاری و هواپیمای نظامی می‌شود. در هر گروه هواپیماهای مربوطه تعریف شده است. هنگامی که یک هواپیما به ترافیک افزوده می‌شود، نوع هواپیما، وزن هنگام خزش در باند (برحسب پوند یا تن) و تعداد رفت‌وآمد سالانه برابر ۱۲۰۰ پرواز به ترافیک اضافه می‌شود. اگر در هنگام انتخاب نوع ترافیک فقط یک هواپیما را در لیست اضافه کنید، برنامه پیغام «ترافیک غیراستاندارد» را نمایش می‌دهد. وزن خزش هواپیما در باند با توجه به نوع هواپیما دارای محدودیت است و تعداد رفت‌وآمد سالانه تا مقدار ۱۰۰،۰۰۰ محدود شده است. برای برخی از هواپیماهای خاص نظیر DC-10-30 و MD-11 چرخ‌های زیر بال و چرخ‌های زیر بدنه هواپیما در جدولی جداگانه در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت هنگامی که ترافیک سالانه تعریف و ذخیره شد، کاربر با کلیک کردن بر روی دکمه Back به صفحه اصلی باز می‌شود.

برای کامل کردن طراحی می‌بایست در صفحه اصلی بر روی Design Structure کلیک کرد. ضخامت لایه فوقانی تا زمانی که CDF برای تنش کششی در زیر رویه بتنی برابر ۱ شود، تغییر می‌کند. این تغییر براساس خستگی ناشی از بار هر هواپیما است که از رابطه ٦-٤ محاسبه شده است.



شکل ۱۰-۷: ترکیب ترافیک هواپیما

۱۰-۸- مثال‌های طراحی

FAA AC 150/5320-6D با استفاده از منحنی‌های طراحی یک مثال طراحی روسازی صلب ارائه داده است. هواپیمای طرح دارای دو محور مرکب زوج با وزن ناخالص ۱۶۰۰۰۰ کیلوگرم (۳۵۰۰۰۰ پوند) است. ترافیک معادل سالیانه در هواپیمای طرح برابر ۶۰۰۰ است که شامل ۱۲۰۰ سفر برای هواپیمای پهن‌پیکر بوئینگ ۷۴۷ با وزن ناخالص ۳۵۰۰۰۰ کیلوگرم (۷۸۰۰۰۰ پوند) است.

مقاومت خمشی بتن ۴/۵ مگاپاسکال (۶۵۰ psi) است و خاک بستر آن رس با حد خمیری کم و با مدول عکس‌العمل ۲۷ مگاپاسکال بر متر (۱۰۰ psi/in) است. یک لایه زیراساس تثبیت‌شده به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (۶ اینچ) نیز وجود دارد که مدول عکس‌العمل را تا ۵۷ مگاپاسکال بر متر (۲۱۰ psi/in) افزایش می‌دهد. با استفاده از نمودار شکل ۳-۱۹ ضخامت لایه مورد نظر ۴۲۲ میلی‌متر (۱۶/۶ اینچ) بدست می‌آید که به ۴۶۰ میلی‌متر (۱۷ اینچ) گرد می‌شود.

همچنین می‌توان طراحی را با استفاده از صفحه گسترده R805faa.xls انجام داد. هواپیماهای طرح را می‌توان DUAL TAN-300 یا DUAL TAN-400 با وزن ناحالص مناسب انتخاب کرد. ضخامت لازم برای روسازی اندکی کم‌تر و برابر ۴۰۴ میلی‌متر (۱۵/۹ اینچ) است که با گرد کردن این مقدار ۲۵ میلی‌متر یا ۱ اینچ در ضخامت نهایی روسازی صرفه جویی می‌شود. قطر، طول و فاصله لازم برای میلگردهای اتصال از جدول ۱۰-۴ به ترتیب ۳۰ میلی‌متر (۱/۲۵ اینچ)، ۵۱۰ میلی‌متر (۲۰ اینچ) و ۳۸۰ میلی‌متر (۱۵ اینچ) است. چون زیراساس تثبیت شده است، فاصله درزها به ۵ برابر شعاع سختی نسبی روسازی محدود می‌شود.

اگر روسازی صلب با مقاومت خمشی یکسان، تکیه‌گاه و لایه زیراساس تثبیت‌شده باشد، همان طور که در جدول ۱۰-۲ و شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است، ضخامت لازم برای روسازی ۴۵۰ میلی‌متر (۱۷/۷ اینچ) بدست خواهد آمد. با استفاده از جدول ۱۰-۴، قطر، طول و فاصله لازم میلگردهای اتصال به ترتیب به ۴۰ میلی‌متر (۱/۵ اینچ) و ۵۱۰ میلی‌متر (۲۰ اینچ) و ۴۶۰ میلی‌متر (۱۸ اینچ) افزایش می‌یابد.

LEDFAA یک مثال طراحی روسازی صلب را در فایل راهنمای خود قرار داده است. ساختار نشان داده شده در شکل ۱۰-۶، بتن با مقاومت خمشی ۵ مگاپاسکال یا ۷۲۵ psi، بتن با عیار پایین P-306 با P-304 اساس تثبیت شده با سیمان با مدول الاستیک ۳/۴۵ گیگاپاسکال (۵۰۰۰۰۰ psi) تعویض و مدول واکنش بستر به ۳۲/۶ مگاپاسکال بر متر (۱۲۰ psi/in) اصلاح شده است. ضخامت لایه زیراساس تغییر نمی‌کند.

ترکیب ترافیک هواپیماها در جدول ۱۰-۵ و شکل ۱۰-۷ ارائه شده است. با وجود هواپیمای B-777-200B با چرخ TDT در ترکیب ترافیک، روسازی را نمی‌توان به وسیله R805faa-xls طراحی کرد.

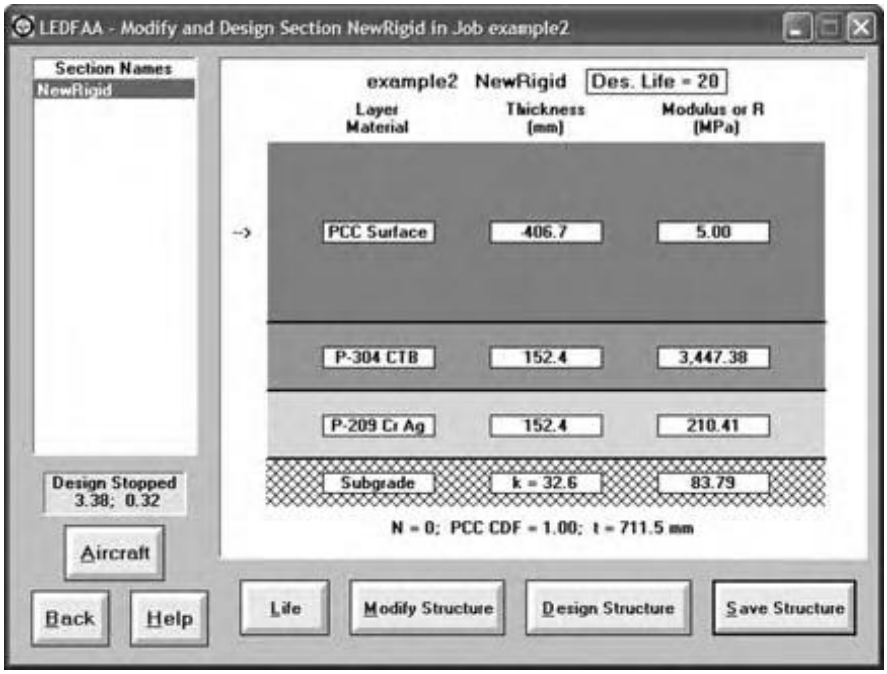
برای کامل شدن طراحی، روند تکرار طراحی یک روسازی جدید بتنی آن قدر ادامه می‌یابد تا به ضخامت ٤٠٦/٧ میلی‌متر (١٦ اینچ) برسد. دو لایه زیراساس قابل اصلاح نیستند. نتیجه طراحی در شکل ۱۰-۸ نشان داده شده است.

برای مقایسه دو روش طراحی مرسوم و R805faa-xls، می‌توان مثال فوق را با استفاده از LEDFAA کنترل کرد. یک نمونه از ساختار روسازی صلب از شکل ۱۰-٦ با تغییر مقاومت خمشی بتن به ٤/٥ مگاپاسکال (٦٥٠ Psi)، حذف لایه مصالح شکسته از نوع P-209، اصلاح مدول واکنش زیراساس به ۲۷ مگاپاسکال بر متر (۱۰۰ Psi/in)، اصلاح شده است. ترکیب ترافیک از نیمه بالایی جدول ۱۰-۲ وارد شده است.

جدول ۱۰-۵: ترکیب ترافیک برای مثال طراحی LEDFAA

شماره	نام	وزن ناخالص		تعداد پرواز سالیانه
		kg	*lb*	
۱	B-737-400	٦٨٠٠٠	١٥٠٠٠٠	٣٦٠
۲	B-747-400	٣٩٦٠٠٠	٨٧٣٠٠٠	٤٢٠٠
۳	B-757	١١٣٠٠٠	٢٥٠٠٠٠	٣٦٠
٤	B-767-200	١٥٢٠٠٠	٣٣٥٠٠٠	٧٢٠
٥	B-777-200 B	٢٨٨٠٠٠	٦٣٤٥٠٠	٧٢٠
٦	MD-82/88	٦٨٠٠٠	١٥٠٠٠٠	٦٠٠
٧	DC-10-30	٢٦٤٠٠٠	٥٨٣٠٠٠	٣٦٠
٨	DC-10-30- Belly	٢٦٤٠٠٠	٥٨٣٠٠٠	٣٦٠
٩	MD-11	٢٨٢٠٠٠	٦٢١٠٠٠	٧٠٠
١٠	MD-11- Belly	٢٨٢٠٠٠	٦٢١٠٠٠	٧٠٠
١١	l-1011	٢٢٥٠٠٠	٤٩٦٠٠٠	٣٢٠

LEDFAA ضخامت لازم برای روسازی را برابر با ٤٦١ میلی‌متر (۱۸ اینچ) محاسبه می‌کند که این مقدار از ضخامت طراحی رایج بیشتر است. این ترکیب ترافیک هواپیمای با چرخ TDT را ندارد، بنابراین بهتر است نتیجه روش R805faa-xle به کار رود.



شکل ۱۰-۸: مثال مقطع رویه صلب به عنوان نمونه طراحی

۱۰-۹- روسازی فرودگاه برای هواپیماهای سبک

FAA انواعی از روسازی را برای هواپیماهای سبک تعریف می‌کند. این روسازی برای هواپیماهایی است که وزن آن‌ها کم‌تر از ۱۳۰۰۰ کیلوگرم (۳۰،۰۰۰ پوند) می‌باشد. هواپیماهای با این اندازه معمولاً در کارهای برنامه‌ریزی نشده مثل پروازهای مورد استفاده در کارهای کشاورزی، آموزشی و تفریحی به کار گرفته می‌شوند.

نیاز و عدم نیاز زیراساس به وزن ناخالص هواپیما بستگی دارد. روسازی‌های صلب طراحی شده برای هواپیماهایی که وزن آن‌ها بین ۵۷۰۰ تا ۱۳۰۰۰ کیلوگرم (۱۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰۰ پوند) قرار دارد، حداقل ضخامتی برابر با ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) برای زیراساس نیاز دارند (به جز مواردی که در جدول ۳-٤، فصل ۳ آمده است). برای هواپیماهایی که وزنشان کم‌تر از ۵۷۰۰ کیلوگرم (۱۲۵۰۰ پوند) می‌باشد، به جز در خاک‌های OL، MH، CH و یا OH، نیازی به زیراساس نیست. در مواجهه با خاک‌های فوق، ضخامت زیراساس باید حداقل برابر با ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) اعمال شود.

طراحی ضخامت روسازی برای هواپیماهای سبک آسان است. به منظور استفاده هواپیماهایی که وزن آن‌ها ۵۷۰۰ کیلوگرم (۱۲۵۰۰ پوند) یا کم‌تر است، ضخامت

زیراساس باید ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) لحاظ شود. این ضخامت برای روسازی‌های مورد استفاده در هواپیماهای با وزن بین ۵۷۰۰ تا ۱۳۰۰۰ کیلوگرم (۱۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰۰ پوند)، ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) در نظر گرفته شود. گرچه در نگاه اول این امر غیرعادی به نظر می‌رسد که مدول واکنش بستر به حساب آورده نشود، اما ملزومات اجرایی بستر و زیراساس تکیه‌گاه روسازی کاملاً تأمین می‌شود. اجرای درز برای روسازی صلب با بارگذاری سبک ساده‌تر است.

بیشترین فاصله درز برای روسازی صلب با بارگذاری سبک، برای درزهای طولی باید ۳/۸ متر (۱۲/۵ فوت) و برای درزهای عرضی ٤/٦ متر (۱۵ فوت) باشد. توجه داشته باشید که بین درزهای روسازی با بارگذاری سبک و سنگین تفاوت‌هایی وجود دارد. به عنوان مثال استفاده از درزهای انبساط تنها وقتی مجاز است که زیراساس تثبیت شده با قیر یا سیمان موجود باشد. همچنین استفاده از درزهای قفل‌وبست شده، وقتی‌که ضخامت قطعه کم‌تر از ۲۳۰ میلی‌متر (۹ اینچ) باشد مجاز است. دال‌های دارای شکل غیراستاندارد باید با ۰/۰۵ درصد آرماتور از هر طرف مسلح شوند. دال‌های دارای شکل غیراستاندارد دال‌هایی هستند که شکل مستطیلی نداشته و یا نسبت طول به عرض بیشتر از ۱/۲۵ است. برای یک روسازی که عرض آن بیشتر از ۱۸/۳ متر (١٦ فوت) نیست و ترافیک عبوری آن سبک محسوب می‌شود، سازمان هواپیمایی فدرال اجازه می‌دهد تا حلقه کششی خاصی۱ برای آن طراحی شود.

مفهوم اصلی الگوهای اجرای درز، ایجاد یک حلقه کششی۲ است که به منظور بسته نگه داشتن درزهای داخلی در محیط روسازی ایجاد می‌شود. درزی که محکم بسته شده باشد نسبت به یک درز باز بهتر عمل خواهد کرد. سه درز انقباض انتهایی و نزدیک‌ترین درز طولی به لبه خارجی روسازی با میلگردهای آجدار ٤# (۱۳ میلی‌متر)، با طول ۲۰ اینچ (۵۱۰ میلی‌متر) و فاصله مرکز به مرکز ۳٦ اینچ (۱ متر) مهار شده‌اند.

در انتهای روسازی و در محل‌هایی که ترافیک هواپیما یا وسایل نقلیه بر روی روسازی اعمال و یا از روی آن برداشته می‌شود، ضخامت لبه‌ها باید افزایش یابد. این لبه‌ها باید ضخامتی برابر با ۱/۲۵ برابر ضخامت دال داشته باشند و تغییر ضخامت در طولی بیش از ۱متر (۳ فوت) انجام شود.

1- Tension Ring Design
2- Tension Ring

فصل یازدهم

طراحی روسازی صنعتی

تسهیلات روسازی صنعتی شامل پایانه‌های ریلی و کامیون، انبارهای صنعتی، امکانات چند منظوره و محوطه‌های نگهداری مصالح و بنادر است. طراحی روسازی‌های صنعتی مشابه سایر انواع روسازی است ولی در آن تفاوت‌های مهمی وجود دارد.
برای مثال بار ناشی از چرخ دستگاه‌های کانتینر و تریلرها ممکن است فراتر از بار کامیون‌های عبوری در راه‌های اصلی و حتی سنگین‌ترین هواپیماهای امروزی باشد. طول عمر خدمت‌دهی مورد نیاز در این نوع روسازی ممکن است کوتاه‌تر از روسازی راه‌های اصلی و فرودگاه‌ها باشد و ضوابط خدمت‌دهی این نوع روسازی، به صعوبت روسازی راه‌های اصلی و فرودگاه‌ها با رفت‌وآمد و سرعت بالا نباشد.
ممکن است روسازی‌های صنعتی از روسازی متداول بتنی ساخته شود، ولی ظرفیت باربری بالا و اقتصادی بودن روسازی بتن غلطکی متراکم، این نوع روسازی را برای این کار مناسب ساخته است. در این نوع روسازی سرعت وسایل نقلیه عموماً پایین است. بنابراین هموارى آن‌ها نسبت به روسازی راه‌های اصلی یا باند فرود فرودگاه‌ها از اهمیت کم‌تری برخوردار است. عموماً مالکین علاقه‌مند هستند تا هزینه ساخت، تعمیر و نگهداری را پایین نگه دارند، بنابراین دوام و مقرون به صرفه بودن روسازی در اولویت قرار دارد. تمام این محاسن دلیل افزایش محبوبیت روسازی‌های بتن غلطکی متراکم است.
انجمن سیمان پرتلند نشریه IS234.01P را تحت عنوان «طراحی روسازی‌های بتنی سنگین صنعتی» منتشر کرده است. ضوابط این نشریه مطابق فرآیند طراحی روسازی‌های بتنی فرودگاه است. همچنین انجمن سیمان پرتلند، IS233.01 را با عنوان «طرح سازه‌ای بتن غلطکی متراکم برای روسازی‌های صنعتی» منتشر کرده است.

روسازی صنعتی همانند روسازی فرودگاه، برای تحمل تعداد بارگذاری وسایل سنگین قابل پیش‌بینی طراحی می‌شود. وسیله نقلیه طرح ممکن است کامیون‌های سنگین پارک شده در یک جا، تجهیزات حمل مواد سنگین که به وسیله کانتینرهای حمل بار جابه‌جا می‌شوند و یا سایر اقلام عظیم باشند. بارگذاری شامل لیفتراک‌های عظیم، استرادِل کَرییر[1] و ماشین‌های جمع‌آوری الوار، با بار چرخ تا ۵۷۸ کیلونیوتن (۱۳۰ kips) می‌باشد.

هرچند بارهای متمرکز سنگین شرایط طراحی غیر معمولی را به وجود می‌آورند ولی جنبه‌های دیگر روسازی بتنی مانند طراحی درزها، آماده‌سازی بستر، زیراساس و کیفیت بتن همانند دیگر روسازی‌ها خواهد بود.

تخمین ترافیک مورد انتظار مسئله مهمی است. اطلاعات لازم شامل بزرگی بار محوری و چرخ، ترکیب چرخ‌ها براساس تعداد و فاصله بین آن‌ها و تعداد تکرار می‌باشد. همچنین هدایت و توزیع ترافیک در یک مسیر مسئله‌ای قابل توجه است.

معمولاً طراحی براساس وسایل نقلیه با سنگین‌ترین بارگذاری چرخ انجام می‌شود و باید بررسی شود که آیا بار چرخ سایر وسایل نقلیه به همان اندازه سنگین هست و این که آیا به طور متناوب از روسازی عبور می‌شود. بیشترین بار چرخ برابر با نصف سنگین‌ترین بار محور وسیله در سنگین‌ترین حالت خود است. این اطلاعات معمولاً از طریق کارخانه‌های خودروسازی قابل دسترس هستند.

اگر ضخامت مورد نیاز برای سنگین‌ترین بار به بالا گرد شود، روسازی برای تحمل بارهای سبک‌تر از نظر ظرفیت خستگی مناسب خواهد بود. مجموع خستگی به وجود آمده بر اثر بارهای سبک و سنگین را می‌توان از طریق مدول ارزیابی هر وسیله بررسی کرد و با جمع کردن درصد خرابی ناشی از خستگی هر وسیله با استفاده از رابطه ٦-٤، شاخص تجمعی خرابی (CDF) بدست خواهد آمد. این مسئله در فایل راهنما (help) از نرم‌افزار RCCPave و نیز در راهنمای انجمن سیمان پرتلند بیان شده است.

در برخی موارد لازم است وزن خود کانتینرهای بارگیری شده نیز مورد توجه قرار بگیرد. برخی کانتینرها به تنهایی ممکن است بیشتر از ۲۸۹ کیلونیوتن (٦٥٠٠٠ Kips) وزن داشته باشند و ممکن است تا چهار عدد روی هم انباشته شوند. از لحاظ تئوری این حالت احتیاج به روسازی با ضخامت ٦١٠-٤٥٧ میلی‌متر (٢٤-١٨ اینچ) دارد. هرچند روسازی‌های موجود در ترمینال‌های شهرهای هالیفاکس، وینیپگ و واندو و چارلستون می‌توانند این چهار کانتینر را با ضخامت روسازی ٤٠٠-٢٧٥ میلی‌متر (١٦-١١ اینچ) تحمل کنند. بعید به نظر می‌رسد که هر چهار کانتینر بیشترین وزن خود را داشته باشند.

1- Straddle Carrier

همچنین این احتمال وجود دارد که بر اثر خزش، در بارهای کانتینر مقداری کاهش تنش ایجاد شود. بنابراین ضخامت طراحی شده براساس ماشین‌آلات حمل کانتینرها عموماً کفایت می‌کند.
بارهای متمرکز نیز حائز اهمیت هستند. اگر تریلرها در هنگام پارک به پشتگیر[1] متصل باشند، بارها را به خوبیِ دو چرخ عقب پخش نخواهند کرد. در این حالت به کنترل طراحی بارهای سبک درِ روسازی صنعتی نیاز خواهد بود. در برخی موارد، استفاده از لایه ضخیم‌تر مسلح یا غیرمسلح، برای سطوح کوچک‌تر تحت بار نقطه‌ای مطلوب‌تر است.

۱۱-۱- روسازی‌های صنعتی متداول

به دلیل شباهت‌هایی که با طراحی روسازی فرودگاه وجود دارد، می‌توان برای طراحی روسازی‌های بتنی از برنامه رایانه‌ای انجمن روسازی بتنی آمریکا یعنی AIRPave استفاده کرد. متأسفانه در این برنامه مشخصات وسایل نقلیه صنعتی گنجانده نشده است، بنابراین باید یک سری وسایل نقلیه توسط کاربر تعریف شوند. لازم است که ترکیب چرخ‌ها، سطح تماس، فشار چرخ، تعداد چرخ‌ها و وزن ناخالص این وسایل تعریف شود. ویژگی‌های وسایل نقلیه را می‌توان از برنامه رایانه‌ای RCCPave بدست آورد که در بخش بعدی درباره آن بحث خواهد شد.
اگر طراحی صرفاً برای یک نوع وسیله نقلیه انجام شود، فرآیند طراحی نسبتاً آسانی خواهد داشت. می‌توان کنترل لازم را برای اطمینان از ایجاد خرابی خستگی ناشی از وسایل نقلیه سبک‌تر انجام داد. براساس رابطه خستگی پاکارد و تایابجی[2] که در رابطه ٦-٢ آمده است، وسایل نقلیه‌ای که نسبت تنش کم‌تر از ۰/٤٥ دارند هیچ آسیب خستگی را بر روسازی وارد نمی‌کنند.

۱۱-۲- روسازی‌های صنعتی بتن غلطکی متراکم

محبوبیت روسازی‌های بتن غلطکی متراکم برای کاربردهای صنعتی رو به افزایش است. زیرا این روسازی‌ها هزینه ساخت اولیه و نگهداری کمی دارند. در جنوب شرقی آمریکا،

1- Dolly
2- Pakard & Tayabji

کارخانه‌های اتومبیل‌سازی شامل، سترن[1] در تنسی[2] و هوندا[3] و مرسدس[4] در آلاباما[5] است. یک روسازی بتنی غلطکی متراکم، در دو لایه به ضخامت ٤٠٠ میلی‌متر (١٦ اینچ) در بندر نورفولک[6] در ویرجینیا در سال ٢٠٠٦ ساخته شده است.

به دلیل قابلیت ساخت روسازی‌های بتن غلطکی در سطحی وسیع با صرف هزینه پایین و انعطاف پذیری مناسب، برای کاربردهای صنعتی مانند بنادر، فرودگاه و پایانه‌های چند منظوره حمل و جابه‌جایی کانتینر، بسیار مناسب است. دو روش طراحی روسازی بتن غلطکی متراکم وجود دارد. روش اول، بدون لایه رویه که از بتن با مقاومت بالا استفاده می‌شود و روش دوم استفاده از رویه آسفالتی به عنوان سطح نهایی است که از بتن با مقاومت پایین‌تری استفاده شده است.

ضخامت یک لایه از روسازی‌های بتن غلطکی متراکم به ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر محدود می‌شود. روسازی‌های ضخیم‌تر بتن غلطکی متراکم باید در دو لایه اجراء شوند و بهتر است که لایه دوم ظرف کم‌تر از یک ساعت از ساخت لایه اول اجراء شود. این کار به اتصال تازه و یا اجرای مرطوب بر روی مرطوب معروف است. آزمایش نمونه‌های مغزه‌گیری شده از پروژه‌های روسازی بتن غلطکی متراکم نشان می‌دهد که روسازی چند لایه بتن غلطکی متراکم، پیوستگی و اتصال کافی را در سطح مشترک ایجاد می‌کند تا بتوان آن را به صورت یکپارچه در نظر گرفت. امتداد لبه‌ها که در هنگام تراکم فاقد تکیه‌گاه هستند از این امر مستثنی است.

روش اصلی طراحی روسازی‌های بتن غلطکی متراکم تا حد زیادی از روش طراحی روسازی‌های بتنی متداول پیروی می‌کند. انجمن سیمان پرتلند و USACE جداول طرح روسازی بتن غلطکی متراکم را تهیه کردند که در ACI 325.10R ارائه شده است.

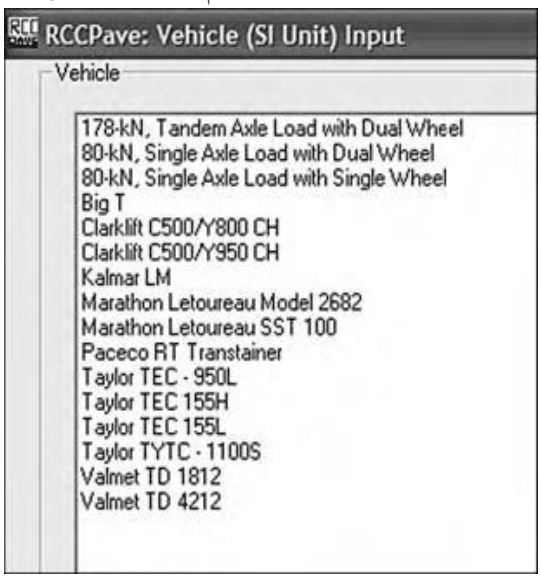
درزهای روسازی بتن غلتکی با قفل‌وبست سنگدانه‌ای نیازمند میلگرد اتصال نیستند. تحت این شرایط درزهای عرضی با فواصل ۹/۱ تا ۲۱/۳ متر (۷۰-۳۰ فوت) ایجاد می‌شود. غالباً درزها با برش اره‌ای ایجاد نمی‌شود تا به طور طبیعی فرآیند ترک‌خوردکی انجام شود. درزها و ترک‌ها تمایل دارند که باریک و محکم باقی بمانند. در مجموع هزینه‌های نگهداری در روسازی بتن غلطکی متراکم پایین است.

انجمن روسازی بتنی آمریکا یک برنامه رایانه‌ای به نام RCCPave را برای طراحی

1- Saturn
2- Tennesee
3- Honda
4- Mercedes
5- Alabama
6- Norfolk

روسازی‌های صنعتی بتن غلطکی متراکم تهیه کرده است. این برنامه از نظر محاسباتی شبیه به AIRPave است ولی از روابط خستگی متفاوت و مختص بتن غلطکی متراکم استفاده می‌نماید. همچنین این برنامه دارای یک پایگاه اطلاعاتی وسایل نقلیه صنعتی است که شامل محورهای منفرد ۸۰ نیوتنی (۱۸ kips) با چرخ‌های تک و زوج، محورهای ۱۷۸ نیوتنی (۴۰ kips) زوج مرکب دوگانه و انواع ماشین‌آلات حمل مصالح، مطابق با شکل ۱۱-۱ می‌باشد. قابلیت تعریف وسایل نقلیه نیز توسط کاربر وجود دارد. همچنین این بانک اطلاعاتی می‌تواند برای تعیین ویژگی‌های وسایل نقلیه توسط برنامه AIRPave، در طراحی روسازی بتنی مرسوم مورد استفاده قرار بگیرد.

از برنامه RCCPave در طراحی ضخامت یک روسازی جدید و یا ارزیابی ضخامت روسازی موجود استفاده می‌شود. یک داده ورودی مهم، تصمیم‌گیری در مورد استفاده از شرایط بارگذاری میانی یا لبه است. در اغلب موارد سعی برآنست که ترافیک عبوری از لبه روسازی دور بماند تا شرایط محافظه کارانه کم‌تری در طراحی لحاظ شود.



شکل ۱۱-۱: بانک اطلاعاتی وسایل نقلیه RCCPave

یک چنین فرضیه‌ای برای طراحی روسازی فرودگاه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجمن سیمان پرتلند افزایش ۲۰ درصدی ضخامت روسازی را در صورت حرکت وسایل نقلیه در نزدیکی یا روی لبه روسازی پیشنهاد می‌کند. به‌نظر می‌رسد اگر ضخامت قسمتی از لبه را به عرض ۰/۶ متر (۲ فوت) افزایش دهیم از این که ضخامت کل عرض روسازی را افزایش دهیم مناسب‌تر است.

طراح بایدعمر مطلوب روسازی و تعداد دفعات بارگذاری را توسط MOR، مدول الاستیسیته بتن غلطکی متراکم و مدول عکس‌العمل بستر را تعیین نماید. در صورتی که مدول گسیختگی و یا مدول الاستیسیته بتن مشخص نباشد، این مقادیر را باید از طریق مقاومت فشاری و یا کششی تخمین زد. مدول عکس‌العمل بستر را می‌توان به صورت مستقیم وارد کرد و یا این که مقدار آن را براساس خاک با دانه‌بندی درشت یا ریز، با و بدون زیراساس تخمین زد. به دلیل این که تکرار بارگذاری در ۳ ماه اول کم‌تر به نظر می‌رسد، انجمن سیمان پرتلند توصیه می‌کند که مقاومت خمشی ۹۰ روزه بتن برای طراحی لحاظ شود.

۱۱-۳- مثال طراحی روسازی صنعتی

مثال‌های طراحی توسط انتشارات انجمن سیمان پرتلند درباره طراحی روسازی سنگین صنعتی بتنی انتخاب و توسط نرم‌افزار RCCPave مجدداً طراحی شده است.

۱۱-۳-۱- مثال طراحی ۱- ماشین حمل کانتینر

ماشین حمل کانتینر دارای ٤ چرخ با بیشینه بار ۱۲۵ کیلونیوتن (۲۸۰۰۰ پوند) برای تک چرخ است. تکرار بارگذاری ٤۰ بار در روز و مجموع ۲۹۲۰۰۰ بار تکرار بارگذاری در طول ۲۰ سال عمر روسازی است. مقاومت خمشی روسازی برابر ٤/٦ مگاپاسکال (٦٦ psi) و مدول واکنش عکس‌العمل بستر برابر ۲۷ مگاپاسکال بر متر (۱۰۰ psi/in) است. همچنین این طراحی دارای مدول الاستیسیته با پیش‌فرض ۲۷/٦ گیگاپاسکال (٤ million psi) است. مدول الاستیسیته تأثیر کمی بر طراحی دارد، بنابراین منطقی است که از این مقدار پیش‌فرض استفاده شود.

این طراحی نیاز به وارد کردن مشخصات وسیله نقلیه توسط کاربر دارد، به این ترتیب که فشار تایر برابر با ۷۵۸ کیلوپاسکال (۱۱۰ psi) و فاصله بین تایرها برابر ۳۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌متر (۱۲ و ٤۸ اینچ) است. با توجه به شرایط بارگذاری درونی، ضخامت لازم برای روسازی برابر با ۲۰۰ میلی‌متر(۸ اینچ) در مقابل ۲۵۰ میلی‌متر(۹/۹ اینچ) بدست آمده از نسخه ۱۹۸۸ روش انجمن سیمان پرتلند است.

اگر بارگذاری لبه مدنظر باشد، ضخامت روسازی ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ) خواهد بود. بنابراین نتایج انجمن سیمان پرتلند مابین دو حالت بدست آمده خواهد بود. اگر بتن غلطکی متراکم با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) مورد استفاده قرار بگیرد، می‌توان آن را در یک لایه اجراء کرد.

AIRPave برای این مثال طرحی با محافظه‌کاری کم‌تری ارائه می‌دهد. برنامه ضخامت خاصی را برای روسازی طراحی نمی‌کند و در عوض به کاربر این اختیار را می‌دهد تا ضخامت‌های مختلفی را کنترل می‌کند. برنامه برای هر ضخامتی تعداد دفعات بارگذاری را معین و کاربر مقدار محاسبه شده توسط نرم‌افزار را با دفعات بارگذاری مورد نظر مقایسه می‌کند. براساس بارگذاری درونی AIRPave ضخامتی برابر با ۱۷۸ میلی‌متر (۷ اینچ) را برای این مثال طراحی تعیین می‌کند.

۱۱-۳-۲- مثال طراحی ۲- جرثقیل دروازه‌ای متحرک

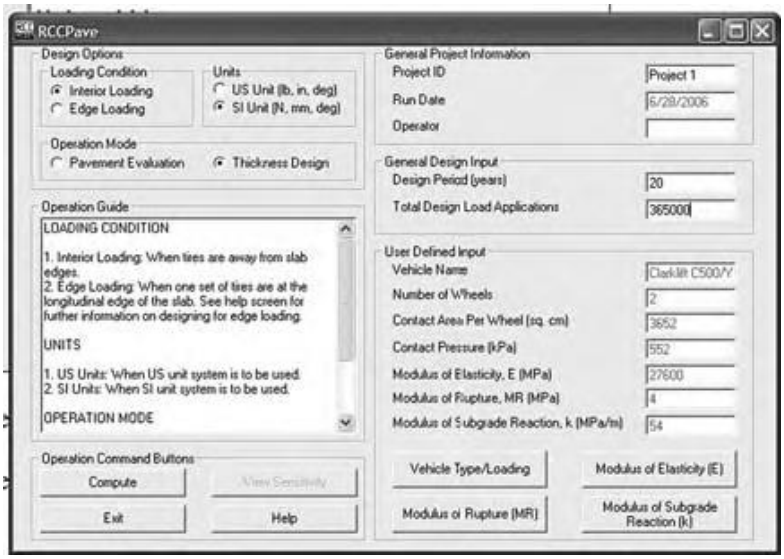
مثال ۲ از یک جرثقیل دروازه‌ای متحرک[1] با ظرفیت باربرداری ٤٠ تن استفاده می‌کند. این ماشین دارای ۸ چرخ (٤ جفت چرخ) و بیشینه بار چرخ زوج برابر ٤٠٠ کیلونیوتن (۹۰۰۰۰ پوند) است که به یکی از وسایل تعریف شده در بانک اطلاعاتی RCCPave شباهت دارد، در نتیجه دستگاه C500/Y800 CH انتخاب می‌شود.

تکرار دفعات بارگذاری این ماشین ۵۰ بار در روز است و مجموع بارگذاری آن در طول ۲۰ سال عمر روسازی برابر ۳٦۵۰۰۰ بار تکرار می‌باشد. مقاومت خمشی روسازی برابر ٤/٤ مگاپاسکال (٦٤٠ psi) است و مدول واکنش بستر برابر با ٥٤ مگاپاسکال بر متر (۲۰۰ psi/in) می‌باشد. مدول الاستیسیته طرح برابر با مقدار پیش‌فرض ۲۷/٦ گیگاپاسکال (٤۰۰۰۰۰۰ psi) در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات طراحی در شکل ۱۱-۳ آمده است.

ضخامت لازم برای طراحی روسازی براساس بارگذاری درونی، برابر با ٤٥۷ میلی‌متر (۱۸ اینچ) می‌باشد که تا حد زیادی به ضخامت بدست آمده از روش انجمن سیمان پرتلند یعنی ٤۳۱ میلی‌متر (۱۷ اینچ) نزدیک است. روسازی برای هر دو ضخامت بدست آمده باید در ۲ لایه اجراء شود.

اگر این روسازی با استفاده از AIRPave طراحی شود، برای مدل کردن لازم است کاربر مشخصات دستگاه C500/Y800 CH را به صورت دستی وارد نماید. نتایج AIRPave محافظه‌کارانه‌تر از RCCPave است. براساس بارگذاری درونی، ضخامت لازم برای روسازی برابر با ٤۰٦ میلی‌متر (١٦ اینچ) بدست خواهد آمد. صفحه مربوط به داده‌های ورودی برای AIRPave مشابه شکل ۱۱-۲ است ولی در این میان تنها منوی ارزیابی روسازی در دسترس است و ضخامت طرح در اختیار قرار نمی‌گیرد.

1- Gantry Mobile Crane



شکل ۱۱-۲: اطلاعات ورودی طراحی توسط RCCPave برای مثال طراحی ۲

۱۱-٤- مطالعات موردی روسازی صنعتی

دو مورد مطالعات موردی در ادامه ارائه شده است، که طراحی و اجرای بتن معمولی و RCC را در بر می‌گیرند.

۱۱-٤-۱- روسازی صنعتی متداول با سیمان بدون افت

در سال ۲۰۰٦، کیث و همکارانش[1] یک مطالعه موردی از روسازی مرکز پخش صنعتی انجام دادند که در آن از بتن بدون افت، با فاصله درزهای زیاد و صفحات اتصال لوزوی[2] استفاده کرده بود. سیمان بدون افت[3] در طول ۱ تا ۷ روز عمل‌آوری بتن، اندکی منبسط می‌شود تا افت‌های بعدی را جبران کند. این روسازی را می‌توان با سیمان مخصوصی از نوع K، یا تیپ I، II و یا V به همراه افزودنی منبسط کننده نیز تهیه کرد که اثر مشابهی دارد.

در سال ۱۹۹۳ فاز اول اجرای روسازی با بتن بدون افت در شرکت ABW در کِنساو[4] از

1- Keith et al
2- Diamond Plate Dowels
3- Shrinkage Compensating Concrete
4- Kennesaw

ایالت جورجیا آغاز شد. ۱۲ سال پس از احداث، همچنان عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. با وجود فاصله ۳۲ متری بین درزها، ترک‌های تصادفی اندکی به وجود آمد و تاکنون اعوجاجی در لبه‌ها مشاهده نشده است. گرچه هزینه اولیه احداث نسبت به روسازی بتنی معمولی بیشتر است ولی هزینه‌های نگهداری بلندمدت آن بسیار کم‌تر خواهد بود.

در نتیجه، فاز دوم ۷ سال بعد با تخمین روسازی جدید در سطح ۲۷ هزار مترمربع (۳۰۰۰۰۰ فوت‌مربع) اجراء شد. در یکی از بتن‌ریزی‌ها رکوردی جهانی ثبت شد که بیش از ۳۹۰۰ مترمربع روسازی بتنی بدون اجرای درزهای درونی احداث شد. فاصله درزهای روسازی جدیدالاحداث بین ۲۶ تا ۱۰۴ متر بود.

سایر مشخصات غیرعادی طرح به شرح زیر می‌باشد:

صفحات اتصال لوزوی در ابعاد ۱۱۵ در ۱۱۵ در ٦ میلی‌متر (٤/٥ در ٤/٥ در ۰/۲۵ اینچ) برای انتقال بار استفاده شدند. این میلگردها با غلاف پلاستیکی پوشانده می‌شوند که می‌توان آن‌ها را به قالب بتن متصل کرد تا از قرارگیری صحیح آن‌ها اطمینان حاصل شود. این درزها به وسیله تخته‌های پلی‌اتیلن ایجاد و سپس توسط سیلکون درزگیری می‌شوند.

- این درزها برای جلوگیری از تو رفتگی گوشه دال هستند. برای کاهش گیرداری در مقابل حرکات احتمالی، دریچه‌های زهکشی و دریچه‌های آدم‌رو تا حد امکان در نزدیکی مرکز دال اجراء و یا با استفاده از پرکننده‌های تراکم پذیر آب‌بندی می‌شوند.
- از آنجا که عمل‌آوری بتن بدون افت عملی بسیار حساس است، یک پوشش پلاستیکی محافظ برای مرطوب نگه‌داشتن بتن استفاده می‌شود.
- روسازی برای تحمل بارهای تراکتور و تریلی طراحی شد و ضخامت دال برابر با ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) بدست آمد.
- دو لایه از مواد خمیری بر روی اساس قرار می‌گیرد تا از اصطکاک بین دال و اساس کاسته شود.
- مصالح سنگی با دانه‌بندی متراکم استفاده می‌شود تا میزان افت را کاهش دهد.

مزیت استفاده از صفحات اتصال لوزوی نسبت به میلگردهای اتصال متداول آزادی حرکت صفحات نسبت به هم در محل درز است. بنابراین علاوه بر این که وظیفه انتقال بار را برعهده دارد، اجازه لغزش دال‌ها را نسبت به یکدیگر می‌دهند. این امر زمانی حائز اهمیت است که بتن جدید در مجاورت بتن قدیمی اجراء می‌شود. زیرا میلگردهای اتصال با تثبیت افت بتن، ممکن است سبب تشکیل ترک‌هایی شوند. اگرچه صفحات اتصال

لوزوی در دال‌های کف و روسازی صنعتی استفاده می‌شود، ولی همچنان در روسازی فرودگاه و راه‌های اصلی اتخاذ نشده‌اند.

۱۱-٤-۲- توسعه پایانه بندر بین‌المللی نورفولک با بتن غلطکی متراکم

مقامات بندر ویکتوریا برای روسازی یک مخزن عظیم نگهداری و حمل کانتینر در پایانه بین‌المللی نورفولک[1] در نورفولک از ایالت ویرجینیا از بتن غلطکی متراکم استفاده کردند. جزئیات این پروژه در نشریه‌ای تحت عنوان پایانه بین‌المللی نورفولک به چاپ رسید که برای توسعه تسهیلات بندر از بتن غلطکی متراکم استفاده کرده است و اطلاعاتی را برای این مطالعه موردی فراهم کرد. این بندر، از لحاظ میزان بارگیری در ساحل شرقی آمریکا بزرگ‌ترین بندر می‌باشد که همواره به توسعه و نگهداری نیاز دارد. نخستین توسعه بندر شامل ۱۰/۵ هکتار روسازی با ضخامت ٤۲۰ میلی‌متر با ٤۳۸۰۰ مترمکعب بتن غلطکی متراکم بود. برآوردهای اولیه نشان داد که روسازی بتن غلطکی نسبت به آسفالت، بتن معمولی یا بلوک‌های بتنی مقرون به صرفه‌تر است.

ماشین‌های سنگین حمل کانتینر، به ازای هر چرخ ۱۳۳ تا ۲٦٦ کیلونیوتن بار وارد می‌کنند. بارگذاری سنگین این چرخ‌ها که به طور پیوسته در یک مسیر حرکت می‌کنند سبب ایجاد شیارشدگی در روسازی آسفالتی می‌شود. برای مقاومت در برابر بارهای ترافیکی، بتن غلطکی متراکم با مقاومت خمشی ۳/۱ مگاپاسکال (٤۵۰ psi) و مقاومت فشاری ۷ روزه ۱۷/۲ مگاپاسکال (۲۵۰۰ psi) طراحی شده است.

به دلیل ضخامت زیاد روسازی نیاز به اجرا در دو لایه می‌باشد. به منظور اطمینان از پیوستگی و اتصال دولایه، بتن‌ریزی لایه دوم کم‌تر از یک ساعت پس از بتن‌ریزی لایه اول انجام شد. مغزه‌گیری انجام شده در روز هفتم نشان داد که پیوستگی دولایه به خوبی تأمین شده است. سطح نهایی توسط آب عمل‌آوری شد، سپس با اندود سطحی[2] قبل از اجرای یک لایه ۷۵ میلی‌متری از روکش آسفالتی آب‌بندی می‌شود تا در آینده امکان اصلاح نشست‌های نامتناجس خاک زیر روسازی وجود داشته باشد.

هزینه نهایی پروژه ۵۰ دلار آمریکا در هر مترمربع (٤۲ دلار در هر یاردمربع) و نرخ تولید ٤/۵ روز برای هر هکتار (۲/۲ روز برای هر اِیکِر) بود. یک دستگاه اجرای روسازی توانایی اجرای بتن غلطکی را با عرض ۹/۱ متر در هر عبور داشت. مقامات بندر از این عملیات رضایت کامل داشتند و برای یک توسعه ۸/۱ هکتاری دیگر برنامه‌ریزی کردند.

1- Norfolk
2- Tack Coat

فصل دوازدهم

نواحی انتقالی، جزئیات خاص و طراحی آرماتور روسازی بتنی مسلح یکپارچه

نواحی انتقالی بین روسازی‌های بتنی و پل‌ها و سازه‌های دیگر و روسازی‌های بتنی مسلح یکپارچه نیاز به طراحی و جزئیات ویژه‌ای دارد. جزئیات طراحی به کنترل تغییر مکان و یا امکان آزادی در لغزش دال وابسته است. اگر تغییر مکان مقید باشد، لازم است شرایط اتصال به نحوی فراهم شود تا در برابر نیروهای موجود توان مقاومت داشته باشد. طراحی و نگهداری درزها در صورت مجاز بودن تغییر مکان، باید با جزئیات مخصوصی لحاظ شود که به راحتی باز و بسته شوند.

۱۲-۱- نواحی انتقالی

تعبیه نواحی انتقالی در روسازی‌های بتنی در مجاورت پل‌ها یا روسازی‌های آسفالتی ضروری است. در صورتی که جداسازی مناسبی انجام نشود، انبساط و انقباض روسازی‌های بتنی می‌تواند باعث به وجود آمدن نیروهای قابل توجهی شود.
روسازی‌های درزدار (JPCP و JRCP) در نواحی انتقال، جزئیات نسبتاً ساده‌تری دارند. روسازی بتنی مسلح یکپارچه نیازمند جزئیات ویژه‌ای است، زیرا باید بخش‌های انتهایی روسازی مهار شوند تا ترک‌خوردگی طبق یک الگوی مناسبی ایجاد شود. برخی از جزئیات نواحی انتقالی روکش‌ها نیز تهیه شده است که در فصل ۱۸ در مورد آن‌ها بحث شده است.

در سال ۲۰۰٤ بورک[1] مبحث مفصلی را در رابطه با اهمیت تأمین درزهای انبساطی بین روسازی‌های بتنی درزدار و پل‌ها تهیه کرده است. پدیده‌ای به نام «رشد و فشار» در روسازی این گونه تعریف می‌شود که با گذشت زمان، مصالح تراکم ناپذیر با انبساط و انقباض در داخل درزها نفوذ می‌کند و مانع از بسته شدن کامل درزها می‌شود. بنابراین روسازی متحمل افزایش طول می‌شود که این امر منجر به آسیب دیدگی پایه‌های پل و یا ترکیدگی روسازی بتنی شود. این خرابی ممکن است ۱۰ تا ۲۰ سال پس از احداث روسازی به وجود آید.

سه مطالعه موردی کامل درباره پل صورت گرفت که در هر سه مورد، روسازی انبساط یافته باعث بسته شدن درزهای انبساطی و حرکتی متوسط در داخل سازه پل شد. برای یک روسازی به ابعاد ۸/۲ متر در ۲۳۰ میلی‌متر (۲٤ فوت در ۹ اینچ) این فشار مانند نیروی محوری حدود ۱۳۰۰ تن و یا بیش از ۲۵ برابر نیروی معمولی طراحی پایه‌های پل است.

معمولاً مهندسان پل و روسازی توجه مناسبی به این پدیده نمی‌کنند. برای جلوگیری از این آسیب، بورک یک بند الحاقی به مشخصات پل در آیین‌نامه آشتو پیشنهاد داد. بدین ترتیب هنگامی‌که نیروهای روسازی، در روسازی‌های صلب درزدار به پل‌ها می‌رسند، بایددارای درزهای مؤثر و با دوام آزاد کننده فشار باشند. در غیر این صورت پل‌هایی که بدون درزهای آزاد کننده فشار در مجاورت این نوع روسازی‌ها ساخته می‌شوند، بایدقادر به تحمل نیروی محوری ایجاد شده در اثر افزایش طول این نوع روسازی باشند. اما اگر پل پیش از آن ساخته شده باشد و یا مهندس پل، درز انبساطی مناسبی را طراحی نکرده باشد، مهندس روسازی بایدمشکل را حل کرده و درز را تعبیه نماید.

۱۲-۱-۱- نواحی انتقالی بین روسازی‌های بتنی و پل‌ها

مادامی‌که درز انبساط تعبیه نشده باشد، نیروهای فشاری قابل توجهی به پل وارد خواهد شد. این نیروها در طراحی پل در نظر گرفته نمی‌شود و پتانسیل آسیب‌های شدید را فراهم می‌کند.

دال‌های دسترسی[2] را می‌توان در محل اتصال روسازی به پل مورد استفاده قرار داد. یودر و ویتزاک یک دال مسلح ٦/۱ متری (۲۰ فوت) را به عنوان دال دسترسی پیشنهاد دادند. یک طرف دال دسترسی بر روی پایه‌های پل قرار می‌گیرد و طرف دیگر بر روی زیراساس

1- Burke
2- Approach Slab

واقع می‌شود. مسلح کردن معمولاً با میلگردهایی به قطر ۱۶ میلی‌متر (۰/۶۲۵ اینچ یا ۵#) انجام می‌شود که فاصله مرکز به مرکز آن‌ها ۱۵۰ میلی‌متر (۶ اینچ) در جهت طولی و ۶۱۰ میلی‌متر (۲ فوت) در جهت عرضی است. در جایی که دال دسترسی به روسازی بتنی متصل می‌شود، باید یک یا چند درز انبساطی دارای میلگردهای اتصال وجود داشته باشد. میلگرد اتصال درزهای انبساطی شبیه به درزهای انقباضی است، با این تفاوت که عرض بیشتری دارند. برای درز عرضی باید حداقل عرض برابر با ۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) در نظر گرفت به طوری که ماده پرکننده آن بیرون نزند. جزئیات درز انبساط در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. یک سرپوش انبساطی در انتهای هر یک از میلگردهای اتصال نصب می‌شود تا اجازه حرکت داخلی را در درون دال بدهد. در گذشته به منظور جلوگیری از ترکیدگی روسازی از درزهای انبساطی استفاده می‌شد اما به مرور مشخص شد که نگهداری از آن‌ها با مشکلاتی همراه است. به‌علاوه این که خرابی‌ها ارتباط مستقیمی با معادن خاص تأمین مصالح و برخی از انواع درشت‌دانه دارند. نتیجه آن که استفاده نکردن از این مصالح برای جلوگیری از خرابی روش آسان‌تری است.

۱۲-۱-۲- نواحی انتقالی بین روسازی‌های بتنی و آسفالتی

در فصل مشترک روسازی‌های بتنی و آسفالتی امکان وقوع دو مشکل وجود دارد. مشکل اول آن که انبساط روسازی بتنی می‌تواند آسفالت را رانده و باعث ایجاد برآمدگی در روسازی شود. مشکل دوم این‌که آسفالت مجاور بتن ممکن است دچار شیارافتادگی شود که در اثر عبور وسایل نقلیه، بارهای ضربه‌ای ایجاد می‌کند.

شاید بتوان این مسائل را با درزهای انبساطی حل کرد، ولی نگهداری از این گونه درزها دشوارتر از حل مسائل طراحی است. به طور معمول در محل اتصال روسازی‌های بتنی و آسفالتی راه‌های اصلی، از درزهای ساده لب‌به‌لب استفاده می‌شود. همان طور که در شکل ۱۸-۹ نشان داده شده است، برای کنترل بارهای ضربه‌ای وسایل نقلیه در روسازی‌های بتنی نازک واقع در مجاورت آسفالت، از یک دال با لبه ضخیم استفاده می‌شود.

یودر و ویتزاک عنوان می‌کنند که در انتهای باند پرواز در برخی از فرودگاه‌ها از روسازی بتنی و برای باقی‌مانده باند از روسازی آسفالتی استفاده می‌شود. جزئیات یک دال بتنی تکیه‌گاهی به همراه یک پَخ در لایه آسفالتی پیشنهاد داده شد. قسمت بالای دال تکیه‌گاهی بایددارای سطحی زبر و خشن باشد تا قفل‌وبست آن با آسفالت افزایش بیابد و از لغزش آن جلوگیری کند. این جزئیات را می‌توان با تغییراتی در روسازی راه‌های اصلی نیز مورد

استفاده قرار داد.
درزهای لب به لبی که به دقت اجراء شده باشند نیز عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند. در درزهای لب‌به‌لب توجه به این نکته ضروری است که مطمئن شویم لایه‌های اساس و زیراساس و بستر زیر روسازی آسفالتی پایدار و به خوبی متراکم شده باشند.
کوهن و تایابجی[1] اجرای درزهای لب‌به‌لب را این گونه بیان می‌کنند:
روسازی آسفالتی بایددر تمام عمق به طور عمودی برش اره‌ای بخورد تا مشکلات احتمالی لایه اساس را به حداقل برساند.
اساسی که در مجاورت آسفالت بریده شده قرار دارد، بایدبا استفاده از تخماق‌های میله‌ای و متراکم کننده‌های صفحه‌ای به خوبی متراکم شوند تا در آینده از پلکانی‌شدن آن جلوگیری شود.
بهتر است برای کاهش کار دستی در سطح مشترک، اجرای روسازی از درزهای لب‌به‌لب شروع شود و ادامه یابد.
اگر اجرای روسازی به موازات آسفالت بریده شده باشد، دستگاه اجرای روسازی نباید به طور مستقیم بر روی لبه‌های آسفالت بدون تکیه‌گاه قرار گیرد و نیز بین روسازی جدید و قدیم نباید اختلاف ارتفاع باشد.

۱۲-۲- طراحی ضخامت برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه

در فرودگاه‌ها و راه‌های اصلی طراحی ضخامت برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه همانند طراحی ضخامت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار می‌باشد. علت آنست که آرماتور هیچ باری را تحمل نمی‌کند و فقط ترک‌ها را نزدیک یکدیگر نگه می‌دارد. بنابراین تنش‌های خمشی بتن که اساس طراحی ضخامت است، با مسلح کردن کاهش نمی‌یابد.
در دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰، طراحی ضخامت براساس روسازی بتنی مسلح یکپارچه تقریباً ۸۰ درصد روسازی‌های متداول بتنی درزدار را شامل می‌شد. در این بین تعداد قابل توجهی از روسازی‌های نازک‌تر، زودتر از موعد دچار خرابی شدند.
توجه به کنترل کیفیت طراحی و ساخت روسازی بتنی مسلح یکپارچه بسیار مهم است. عدم توجه کافی در طراحی و جزئیات اجرایی روسازی بتنی مسلح یکپارچه به خرابی‌های زودرس منجر می‌شود. خرابی‌های زودرس معمولاً ناشی از: ۱- عملیات اجرایی که ملزومات طراحی را برآورده نمی‌کند؛ ۲- طرحی که بر اثر بارهای سنگین منجر به تغییر شکل بیش از حد شده است؛ ۳- اساس با کیفیت نامرغوب؛ و ٤- ترکیب این موارد با

1- Kohn & Tayabji

عوامل نامطلوب دیگر.

همان طور که در جدول ۸-۳ نشان داده شده است، به دلیل پایین‌تر بودن ضریب انتقال بار J در روش طراحی آشتو، ضخامت روسازی بتنی مسلح یکپارچه از ضخامت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار کم‌تر است. هرچند این کاهش، کم‌تر از ۲۰ درصد است ولی به نظر نمی‌رسد اثر نامطلوبی در عملکرد روسازی بگذارد. براساس FHWA طراحی اساس، زیراساس و اصطکاک اهمیت دارد. طرح اساس باید یک فنداسیون مقاوم را در زیر رویه فراهم آورد، زیرا این امر برای عملکرد روسازی بتنی مسلح یکپارچه مهم است. همچنین اساس نباید رطوبت را در زیر روسازی نگه دارد. از این‌رو انجام زهکشی کامل توصیه می‌شود. رطوبت آزاد در لایه اساس یا بستر می‌تواند در لبه دال باعث مکش شود که به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب روسازی یا تسریع در آن شناخته می‌شود. لایه‌های اساسی که در برابر فرسایش ناشی از فشار زیاد آب، تحت اثر تغییر شکل روسازی در بارهای ترافیکی مقاومت نشان می‌دهد یا با عمل زهکشی مانع از ورود آب آزاد به زیر روسازی می‌شوند، دچار مکش نخواهند شد. برای مسیرهای با تردد زیاد لازم است لایه‌های اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده در نظر گرفته شود. در مقایسه با روسازی‌هایی که با شنِ تثبیت نشده ساخته می‌شود، معمولاً روسازی‌های قرار گرفته بر روی اساس تثبیت‌شده و یا سنگ شکسته، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

اصطکاک بین روسازی و اساس در گسترش فاصله ترک‌ها نقش مهمی در روسازی بتنی مسلح یکپارچه ایفاء می‌کند. اکثر روش‌های طراحی روسازی بتنی مسلح یکپارچه یک سطح متوسط و معقول اصطکاک را بین اساس و روسازی در نظر می‌گیرند. در این میان نباید از صفحه پلی‌اتیلن به عنوان یک عامل جدا کننده اتصال استفاده شود، مگر این که اصطکاک کم روسازی با اساس، در طراحی لحاظ شود. ایالات مختلف نیز پس از اجرای روسازی بتنی با سیمان پرتلند بر روی صفحه پلی‌اتیلن، مشکلات اجرایی و ترافیکی مختلفی را گزارش کردند.

در مناطقی که به خاطر خاک‌های انبساط‌پذیر احتمال تغییرشکل بستر یا تورم ناشی از یخبندان وجود داشته و نیز مناطقی که مستعد نشست هستند، استفاده از روسازی بتنی مسلح پیوسته توصیه نمی‌شود. باید توجه شود که یک بستر متراکم، مناسب و یکنواخت فراهم شود و برای خاک‌های سست می‌توان عملیات تثبیت خاک را انجام داد.

۱۲-۳- طراحی آرماتور روسازی بتنی مسلح یکپارچه برای راه‌های اصلی- آشتو

مسلح کردن CRCP با فولاد براساس سه معیار مختلف انجام می‌شود:
۱- محدود کردن فاصله ترک‌ها به ۱/۱ و ۲/٤ متر (۳/۵ و ۸ فوت) به منظور کاهش خطر سوراخ‌شدگی.
۲- محدود کردن عرض ترک‌ها به ۱ میلی‌متر (۰/۰٤ اینچ) به منظور کاهش خطر نفوذ آب یا پوسته‌شدگی.
۳- محدود کردن تنش فولاد تا از ۷۵ درصد تنش جاری شدن بیشتر نشود. اگرچه تجربه نشان داده است که روسازی بتنی مسلح یکپارچه حتی زمانی که تنش فولاد از این محدوده فراتر برود، عملکرد رضایت بخشی دارد.
این روش طراحی توسط مک‌کالو و الکینز[1] و مک‌کالو و کاولی[2] تهیه شده است. معادلات و نمودارهای طراحی از بخش ۳-٤-۲ راهنمای طراحی آشتو اقتباس شده است. باید تمام سه معیار بررسی و درصد فولاد مورد نیاز انتخاب شود. گرچه نمودارهای لازم در دسترس هستند ولی این معادلات را به راحتی می‌توان به صورت برنامه‌ای در یک صفحه Excel و یا در سایر نرم‌افزارهای مختص این کار وارد کرد. در ابتدا ضخامت روسازی مشخص و در نهایت آرماتورها طراحی می‌شود.

۱۲-۳-۱- درصد فولاد بر پایه فاصله ترک‌ها

هوانگ براساس فاصله ترک، مدلی از رابطه آشتو بدست آورده است که براساس آن درصد فولاد P، در سیستم واحد مرسوم آمریکا محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{1.062\left(1+\frac{f_t}{1000}\right)^{1.457}\left(1+\frac{\alpha_s}{2\alpha_c}\right)^{0.25}(1+\varphi)^{0.476}}{(\bar{X})\left(1+\frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.13}(1+1000Z)^{0.389}} - 1$$

رابطه ۱۲-۱

که در آن، f_t= مقاومت کششی غیرمستقیم بتن (psi)، α_s/α_c= نسبت ضریب حرارتی فولاد و بتن، φ= قطر میلگرد (in)، X= فاصله ترک‌ها (ft)، σ_w= تنش کششی ناشی از بار چرخ (psi)، Z= افت ۲۸ روزه بتن (in/in).
به جز تنش کششی ناشی از بار چرخ، این پارامترها به آسانی بدست می‌آیند. راهنمای

1- McCullough & Elkins
2- McCullough & Cawley

طراحی آشتو به جای رابطه یک، نموداری ارائه کرده است. برای مثال داده شده در راهنمای طراحی، نسبت تنش ۰/٤۲، تنش ناشی از بار چرخ ۲۳۰ psi و مقاومت کششی ترک‌خوردگی بتن ۵۵۰ psi داده شده است. از آنجایی که ضخامت طرح برای روسازی، معمولاً نسبت تنش را در این محدوده نگه می‌دارد، بنابراین تنش قابل قبول ناشی از بار چرخ، ۰/٤۲ برابر مقاومت کششی ترک‌خوردگی بتن ۲۸ روزه خواهد بود.
رابطه مطرح شده درسیستم SI به صورت زیر است:

$$P = \frac{1.062\left(1+\frac{f_t}{6894}\right)^{1.457}\left(1+\frac{\alpha_s}{2\alpha_c}\right)^{0.25}(1+0.04\varphi)^{0.476}}{(0.328\bar{X})\left(1+\frac{\sigma_w}{6894}\right)^{1.13}(1+1000Z)^{0.389}} - 1$$

رابطه ۱۲-۲

که در آن: ft= مقاومت کششی غیرمستقیم بتن (kPa)، α_s/α_c= نسبت ضریب حرارتی فولاد و بتن، φ= قطر میلگرد (mm)، X= فاصله ترک‌ها (m)، σ_w= تنش کششی ناشی از بار چرخ (kPa)، Z= افت بتن ۲۸ روزه(mm/mm).
این رابطه باید دوبار حل شود، یکبار برای حد پایین فاصله ۱/۱ متر (۳/۵ فوت) ترک‌ها و بار دیگر برای حد بالای فاصله ۲/٤ متر (۸ فوت)، تا حد بالا و پایین درصد فولاد مورد نیاز بدست آید. این مقادیر تخمینی از متوسط فاصله ترک‌ها است و نسبت به فاصله واقعی مقداری متفاوت خواهد بود. به دلیل این که متوسط فاصله ترک‌ها در مخرج کسر قرار دارد، افزایش درصد فولاد موجب کاهش فاصله ترک‌ها می‌شود. بنابراین حداکثر فاصله ترک در کم‌ترین درصد فولاد و حداقل فاصله ترک در بیشترین درصد فولاد بدست می‌آید.

۱۲-۳-۲- درصد فولاد بر پایه عرض ترک

هوانگ برای بدست آوردن درصد فولاد P یک مدل از رابطه آشتو را بر پایه عرض ترک، در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا بدست آورد:

$$P = \frac{0.358\left(1+\frac{f_t}{1000}\right)^{1.435}(1+\varphi)^{0.484}}{(CW)^{0.220}\left(1+\frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.079}} - 1$$

$$= \frac{0.727\left(1+\frac{f_t}{1000}\right)^{1.435}(1+\varphi)^{0.484}}{\left(1+\frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.079}} - 1$$

رابطه ۱۲-۳

که در آن: CW= عرض ترک به اینچ، و بقیه متغیرها همانند قبل تعریف می‌شوند. این رابطه در سیستم SI نیز مطرح شده است. در این حالت CW به میلی‌متر می‌باشد.

$$P = \frac{0.358\left(1+\frac{f_t}{6894}\right)^{1.435}(1+0.04\varphi)^{0.484}}{(0.04\times CW)^{0.220}\left(1+\frac{\sigma_w}{6894}\right)^{1.079}} - 1$$

$$= \frac{0.727\left(1+\frac{f_t}{6894}\right)^{1.435}(1+0.04\varphi)^{0.484}}{\left(1+\frac{\sigma_w}{6894}\right)^{1.079}} - 1$$

رابطه ۱۲-٤

همان طور که در بالا عنوان شد، عرض ترک CW باید ۱ میلی‌متر (۰/۰٤ اینچ) قرار داده شود، تا فرم دوم هر رابطه بدست آید.

۱۲-٤- درصد فولاد براساس تنش فولاد

هوانگ براساس تنش فولاد، مدلی را از رابطه آشتو اقتباس کرد که از آن برای محاسبه درصد فولاد P در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا استفاده می‌شود:

$$P = \frac{50.834\left(1+\frac{DT_D}{100}\right)^{0.155}\left(1+\frac{f_t}{1000}\right)^{1.493}}{\sigma_s^{0.365}\left(1+\frac{\sigma_w}{1000}\right)(1+1000Z)^{0.180}} - 1$$

رابطه ۱۲-٥

که در آن: DTD= کاهش دمای طراحی برحسب درجه فارنهایت، σ_s= تنش مجاز فولاد برحسب psi و تمامی متغیرهای دیگر نیز در بخش‌های گذشته تعریف شده‌اند. این رابطه برحسب واحدهای SI، همراه با DTD به درجه سانتی‌گراد و σ_s به مگاپاسکال بیان شده است:

$$P = \frac{50.834\left(1+\frac{DT_D}{55.6}\right)^{0.155}\left(1+\frac{f_t}{6894}\right)^{1.493}}{(145\,\sigma_s)^{0.365}\left(1+\frac{\sigma_w}{3894}\right)(1+1000Z)^{0.180}} - 1$$

رابطه ۱۲-٦

۱۲-٤-۱- آرماتورهای عرضی روسازی بتنی مسلح یکپارچه

معادلات فوق، آرماتورهای طولی مورد نیاز را برای روسازی تعیین می‌کنند. برای جلوگیری از جداشدگی آرماتورهای طولی، باید آرماتور عرضی نیز اجراء شود. راهنمای طرح آشتو آرماتورهای عرضی را مورد بررسی قرار نمی‌دهد، اما کاملاً منطقی به نظر می‌رسد که آرماتور حرارتی برای این کار کافی باشد. آرماتور عرضی، برای خاک‌های حساس در برابر یخبندان یا خاک‌های انبساط پذیر اهمیت ویژه‌ای دارد.

هوانگ برای محاسبه آرماتور حرارتی رابطه‌ای را ارائه کرد که برابر نصف مقدار فولاد مورد نیاز برای میل‌مهارهایی است که از رابطه ۷-۱۵ بدست می‌آید:

$$A_s = \frac{\gamma_c D L' f_a}{2 f_s} = 0.065\ DL'mm^2/m = 235 \times 10^{-6} DL'in^2/f$$ رابطه ۷-۱۲

که در آن y_c= وزن واحد بتن (۰/۰۸٦۸ lb/in^3 یا ۲۳/٦×۱۰$^{-٦}$ N/mm^3)، D= ضخامت دال (mm,in)، L'= فاصله از درز طولی به لبه آزاد (m,ft)، f_a= میانگین ضریب اصطکاک بین دال و بستر که معمولاً برابر با ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود. f_s= تنش مجاز فولاد (دوسوم تنش تسلیم فولاد) که به طور محافظه‌کارانه برابر با ۲۷٦ مگاپاسکال یا ٤۰۰۰۰ psi در فولادهای مدرن در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه فاصله بین میلگردها، باید سطح مقطع فولاد مورد نیاز را بر سطح مقطع یک میلگرد، در واحد طول دال تقسیم کرد.

۱۲-٤-۲- مثال طراحی

راهنمای طراحی آشتو مثالی را با استفاده از مقادیر ورودی و نتایج نشان داده شده در جدول ۱۲-۱ ارائه داده است. براساس استانداردهای امروزی می‌توان گفت که درصد فولاد بدست آمده تا حدودی کم است.

جدول ۱۲-۱: مثال طراحی آشتو برای تعیین درصد فولاد روسازی بتنی مسلح یکپارچه (آشتو ۱۹۹۳)

ورودی طرح	*SI*	واحد آمریکایی مرسوم
مقاومت کششی بتن f_t	۳/۸ *MPa*	۵۵۰*psi*
افت بتن Z	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۰٤
تنش ناشی از بار چرخ σ_w	۱/٦ *MPa*	۲۳۰ *psi*
ضریب حرارتی بتن α_C	$۲/۱\times۱۰^{-٦}/^\circ C$	$۳/۸\times۱۰^{-٦}/^\circ F$
ضریب حرارتی فولاد α_S	$۲/۸\times۱۰^{-٦}/^\circ C$	$۵\times۱۰^{-٦}/^\circ F$
افت دمای طرح DT_D	$۳۰/٦^\circ F$	$۵۵^\circ F$
عرض مجاز ترک	۱*mm*	۰/۰٤*in*
تنش مجاز در فولاد σ_s	٤۲۷*MPa*	٦۲ *ksi*
تعداد میلگرد فولادی (قطر)	۱٦M (۱٦*mm*)	#۵ (۵/۸*in*)
نتایج		

جدول ۱۲-۱: ادامه

ورودی طرح	*SI*	واحد آمریکایی مرسوم
درصد بر پایه ۱/۱ متر (۳/۵ فوت) فاصله ترک‌ها	۰/۵۱	
درصد بر پایه ۲/٤ متر (۸ فوت) فاصله ترک‌ها	<۰/٤	
درصد بر اساس عرض مجاز ترک‌ها	<۰/٤	
درصد بر اساس تنش مجاز فولاد	۰/٤۳	
درصد نهایی فولاد طرح	۰/٤۳ – ۰/۵۱	

۱۲-٤-۳- نرم‌افزار

مؤسسه فولاد مسلح کننده بتن (www.crsi.org) امکاناتی را برای سهولت طراحی روسازی بتنی مسلح یکپارچه به فروش می‌رساند که عبارتند از برنامه‌های PowerPave، CRC-HIGHWAY PAVE و CRC-AIRPAVE، که دو برنامه اخیر تحت سیستم عامل داس می‌باشد.

۱۲-٤-٤- عملکرد میدانی روسازی بتنی مسلح یکپارچه در راه‌های اصلی

برخی از مشکلات به طرح‌های اولیه روسازی بتنی مسلح یکپارچه مربوط می‌شود. متأسفانه مطلوبیت اقتصادی و اطمینان بیش از اندازه به روسازی بدون درز از این جهت که به نگهداری نیاز ندارد، منجر به ارائه طرح‌های دسته پایین بر روی بسترهای نامطمئن شده و با لحاظ کم‌ترین ملاحظات آیین‌نامه‌ای اجراء می‌شود. در اکثر روسازی‌های بتنی مسلح یکپارچه ترک‌های طولی، پوسته‌شدگی و سوراخ‌شدگی مشاهده می‌شود. ایالت‌های مختلف، اداره بزرگراه‌های فدرال و آشتو در حال حاضر توصیه می‌کنند که ضخامت روسازی بتنی مسلح یکپارچه با ضخامت طرح‌های متداول برابر باشد. تایابجی و همکارانش در زمینه عملکرد میدانی روسازی بتنی مسلح یکپارچه یک ارزیابی ملی انجام دادند. برخی از اصلی‌ترین یافته‌های آن‌ها بدین شرح است:

- درصد فولاد بین مقادیر ۰/٦ تا ۰/۷ در بتن با مقاومت معمولی بهترین فاصله‌گذاری را ایجاد خواهد کرد که حداقل درصد فولاد در این مورد برابر با ۰/٦٥ درصد پیشنهاد می‌شود. در صورتی که فولاد مصرفی کم‌تر از ۰/٦ درصد باشد، ترک‌های طولی موجود با ترک‌های مجاورتی و افزایش خطر سوراخ‌شدگی همراه خواهد شد.
- اگرچه در ظاهر شانه‌های بتنی متصل هیچ کمکی به افزایش عملکرد روسازی بتنی مسلح یکپارچه نمی‌کنند، ولی خطوط عبور تعریض شده بسیار مؤثر بوده و باید مدنظر قرار گیرند.
- نوع زیراساس بر روی عملکرد روسازی بتنی مسلح یکپارچه چندان تأثیرگذار نیست. به طوری که در یکی از قطعات آزمایشی روسازی بتنی مسلح یکپارچه که بر روی اساس تثبیت شده با سیمان نفوذپذیر قرار گرفته بود، ترک‌های با فاصله مناسب ایجاد شد.
- به کار بردن آرماتور با پوشش اپوکسی مشکلی در ترک‌خوردگی ایجاد نمی‌کند. بنابراین در صورت استفاده از میلگردهای پوشش داده شده با اپوکسی هیچ نیازی به اصلاح درصد فولاد نیست.
- برخی از قطعات آزمایشی نسبت به سایر قطعات الگوی ترک‌خوردگی متفاوتی داشتند که هیچ علت مشخصی برای این امر جز اختلاف احتمالی دمای محیط و عملیات عمل‌آوری بتن پیدا نشد.
- کیفیت انتقال بار در ترک‌های روسازی بتنی مسلح یکپارچه همواره در حد بالا

و حتی پس از چندین سال خدمت‌دهی، معمولاً بالاتر از ۹۰ درصد است.

- فاصله‌گذاری ترک‌ها در روسازی بتنی مسلح یکپارچه یک مشکل پیچیده است که نمی‌توان آن را به طور کامل با انتخاب درصد مناسب فولاد برطرف کرد. نوع مصالح سنگی، روش‌های عمل‌آوری، افت بتن، ضخامت پوشش فولاد و میزان افزایش اولیه مقاومت، همه‌وهمه از جمله عواملی هستند که بر روی الگوی ترک‌خوردگی بتن تأثیر می‌گذارند، این در حالیست که این موارد اغلب در فرآیند طراحی نادیده گرفته می‌شود.

دارتر[1] عملکرد روسازی بتنی مسلح یکپارچه را در ایالت ایلینوی مورد بررسی قرار داد. مطالعه موردی مربوط به بزرگراه دَن ریَن[2] بود که ترافیک بسیار سنگین شیکاگو (٦٦ میلیون محور معادل یا ۸۰۰۰ کامیون چند واحده در روز) در طول ۱۹ سال پیش از بازسازی از آن عبور می‌کرد. برخی از یافته‌های کلیدی در این زمینه عبارتند از:

- ترک‌خوردگی نوع D شایع‌ترین خرابی در روسازی‌های بتنی مسلح یکپارچه ایلینوی بوده و پس از آن سوراخ‌شدگی، ترک‌های عرضی با دهانه عریض ناشی از گسیختگی آرماتورهای طولی، تخریب درزهای طولی و اجرایی و خرابی نقاط انتهایی از جمله خرابی‌های رایج در این نوع از روسازی می‌باشد.
- حتی تحت شرایط ترافیک بسیار سنگین نیز، این نوع روسازی بدون آن که نیازی به ایجاد روکش جدید باشد، ۱۷ تا ۲۲ سال نیاز ترافیکی را برآورده می‌کنند. روسازی‌های فاقد ترک‌خوردگی نوع D، به طور متوسط در حدود ۵ سال بیشتر از روسازی‌های دارای این نوع خرابی عمر می‌کنند.
- قرار دادن فولاد در نزدیکی سطح فوقانی دال موجب کاهش عرض ترک و سوراخ‌شدگی می‌شود.
- با افزایش درصد آرماتورهای عرضی از ۰/٦ به ۰/۸ درصد، میزان خرابی‌ها کاهش یافت.

1- Darter
2- Dan Ryan

۱۲-۵- طراحی آرماتورهای روسازی بتنی مسلح یکپارچه برای فرودگاه‌ها

برای روسازی فرودگاه ملزومات مربوط به تکیه‌گاه و ضخامت طراحی با روسازی بتنی غیرمسلح، مانند آنچه در فصل ۱۰ بحث شد، یکسان می‌باشد. درصد فولاد انتخابی برای تأمین مقدار بهینه فاصله و عرض ترک‌ها انتخاب می‌شود.
برای این امر بالاترین درصد آرماتور را از بین مقادیر درصد فولاد برای مقاومت در برابر گیرداری بستر، درصد فولاد برای مقاومت در برابر اثرات حرارتی و نسبت مناسب مقاومت بتن به فولاد در نظر می‌گیریم. تحت هر شرایطی فولاد محاسبه شده نباید کم‌تر از ۰/۵ درصد باشد. سازمان هواپیمایی فدرال نموگراف‌هایی را برای طراحی تهیه کرده است، اما معادلات آن به راحتی با ماشین حساب یا صفحه گسترده قابل حل می‌باشند.

۱۲-۵-۱- فولاد لازم برای مقاومت در برابر گیرداری بستر

درصد مورد نیاز فولاد برای مقاومت در برابر گیرداری بستر (P)، برابر است با:

$$P = 100(1.3 - 0.2F)(f_t/f_s)$$ رابطه ۱۲-۸

که در آن، F= ضریب اصطکاک بین ۱ و ۲، و f_t وf_s به ترتیب عبارت از مقاومت کششی بتن و تنش مجاز فولاد است. که هر کدام باید در سیستم واحدهای یکسان، یا مگاپاسکال و یا psi به کار برده شوند.
مقاومت کششی بتن (f_t) را می‌توان ٦٧ درصد کل مقاومت خمشی آن و تنش مجاز فولاد (f_s) را می‌توان ۷۵ درصد از مقاومت گسیختگی آن در نظر گرفت.

۱۲-۵-۲- فولاد برای مقاومت در برابر اثرات حرارتی

درصد فولاد مورد نیاز برای مقاومت در برابر اثرات حرارتی، P، برابر است با:

$$P = \frac{50\, f_t}{f_s - 2.42T_C} = \frac{50\, f_t}{f_s - 2.42T_F}$$ رابطه ۱۲-۹

که در آن، T_C و T_F بیشترین اختلاف دمای فصلی، به ترتیب به درجه سلسیوس و فارنهایت می‌باشد. برای رابطه ۱۲-۹ هر دو تنش باید برحسب مگاپاسکال و یا psi باشد.

۱۲-۵-۳- نسبت بتن به فولاد

درصد مورد نیاز فولاد براساس نسبت مقاومت بتن به فولاد (P) برابر است با:

رابطه ۱۲-۱۰ $$P = 100(f_t/f_y)$$

که در آن f_t مقاومت کششی بتن و f_y مقاومت گسیختگی فولاد است.

۱۲-۵-٤- آرماتورهای عرضی

روسازی بتنی مسلح یکپارچه به فولاد عرضی نیز نیاز دارد. مقدار مورد نیاز فولاد عرضی (P_t) برابر است با:

رابطه ۱۲-۱۱ $$P_t = 2.27\frac{W_S F}{2f_s}(SI) = 100\frac{W_S F}{2f_s}(US)$$

که در آن، W_s= عرض دال برحسب متر در سیستم SI و برحسب فوت در سیستم مرسوم آمریکا است. عموماً عرض دال به ۲۳ متر (۷۵ فوت) محدود و از درزهای اعوجاجی (warping joints) برای تقسیم روسازی به نوارهایی استفاده می‌شود. درزهای اعوجاجی شبیه به درزهای انقباضی با میلگردهای اتصال است ولی در آن‌ها از میلگرد اتصال استفاده نمی‌شود، درعوض آرماتورهای عرضی در طول درز به کار می‌رود.

۱۲-۵-۵- مثال طراحی

برای خدمت‌دهی به هواپیمای DC-1010 با وزن ناخالص ۱۸۲۰۰۰ کیلوگرم (٤۰۰۰۰۰ پوند) و ۳۰۰۰ پرواز در سال یک روسازی بتنی مسلح یکپارچه طراحی شده است. مقاومت خمشی بتن ٤/۲ مگاپاسکال (٦۰۰ psi)، مدول فنداسیون برابر ۱۰۹ مگاپاسکال بر متر (٤۰۰ psi/in) و زیراساس تثبیت‌شده با سیمان است. براساس روش طراحی که در فصل ۱۰ بحث شد، ضخامت مورد نیاز روسازی ۳۰۵ میلی‌متر (۱۲ اینچ) لحاظ می‌شود. گام بعدی، طراحی فولاد است.

حداکثر مقاومت گسیختگی مشخصه فولاد ٤۱٤ مگاپاسکال (٦۰۰۰۰ psi) و اختلاف دمای فصلی ٥٦°C (۱۰۰°F) است. فاکتور اصطکاک بستر برابر F در نظر گرفته می‌شود. عرض روسازی ۷/٦ متر (۲٥ فوت) است. درصد آرماتور طولی براساس معادلات ۱۲-۸، ۱۲-۹ و ۱۲-۱۰ تعیین می‌شود. تنش ایجاد شده در فولاد ۳۱۰ مگاپاسکال (٤٥۰۰۰ psi) و مقاومت کششی بتن ۲/۸ مگاپاسکال (٤۰۰ psi) است.

درصد فولاد مورد نیاز برای مقاومت در برابر گیرداری بستر برابر است با:

$$P = 100(1.3 - 0.2F)(f_t/f_y) = 100\ (1.3 - 0.2 \times 1.8)\left(\frac{2.8}{310}\right) = 0.85\ \%$$

درصد فولاد مورد نیاز برای مقاومت در برابر تأثیرات حرارتی برابر است با:

$$P = \frac{50\ f_t}{f_s - 2.42T_C} = \frac{50 \times 2.8}{310 - 2.42 \times 56} = 0.80\ \%$$

درصد فولاد مورد نیاز براساس نسبت مقاومت فولاد و بتن برابر است با:

$$P = 100/(f_t/f_y) = 100(1.3 - 0.2 \times 1.8)(2.8/310) = 0.85\ \%$$

درصد فولاد مورد نیاز براساس گیرداری بستر راه بیش از ۰/۵ درصد است. بنابراین مقدار P برابر ۰/۸۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. سپس آرماتور عرضی با استفاده از رابطه ۱۲-۱۱ تعیین خواهد شد. مقدار مورد نیاز فولاد عرضی برابر است با:

$$P_t = 2.27 \times \frac{W_s F}{2f_s} = 2.27 \times \frac{7.6 \times 1.8}{2 \times 310} = 0.05\ \%$$

۱۲-٦- آرماتوربندی روسازی بتنی مسلح یکپارچه و مهاربندی انتهایی

در روسازی بتن مسلح یکپارچه علاوه بر آرماتورهای طولی، اغلب آرماتورهای عرضی نیز به کار برده می‌شود. در این میان توجه به جزئیات انتهایی نیز ضروری است.

۱۲-٦-۱- جزئیات آرماتوربندی

درصد تقریبی آرماتورهای طولی به طور معمول بین ۰/۵ تا ۰/۷ درصد است که برای اقلیم‌های شمالی درصد بیشتری استفاده می‌شود. اندازه قطر میلگردها اغلب ١٦ میلی‌متر و یا ۱۹ میلی‌متر (٥/٨ اینچ #٥ و یا ٣/٤ اینچ #٦) است. برای تحکیم مناسب بتن، حداقل ۱۰۰ میلی‌متر (٦ اینچ) به عنوان فضای بین میلگردها در نظر گرفته می‌شود و این مقدار نباید از ۲۲۹ میلی‌متر (۹ اینچ) تجاوز کند. برای محافظت در برابر خوردگی در نزدیکی میانه دال، پوشش حداقل ٦٦ میلی‌متر (٢١/٢ اینچ) در نظر گرفته می‌شود. پوشش بالای ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ)، اختیاری است. برخی از ادارات راه در آمریکا برای ضخامت‌های بیشتر از ۲۷۹ میلی‌متر (۱۱ اینچ) از دو لایه طولی فولادی استفاده می‌کنند. مقادیر حداقل و حداکثر توصیه شده برای اندازه میلگرد در جدول ۱۲-۲ ارائه شده است.

کافی بودن طول وصله‌های پوششی[1] حائز اهمیت است و اگر کافی نباشد امکان افزایش عرض ترک‌ها وجود خواهد داشت. طول وصله‌های پوششی باید بیشترین مقدار ۲۵ برابر قطر میلگرد و ٤۰٦ میلی‌متر (١٦ اینچ) باشد. همچنین باید وصله‌ها در روسازی به صورت یک‌درمیان به کار برده شود تا از تمرکز موضعی تنش یا کرنش جلوگیری شود. چند الگوی وصله پوششی وجود دارد که عبارت از الگوی چِورون[2] یا الگوی اُریب، هم‌پوشانی یک‌درمیان[3] و هم‌پوشانی سه‌درمیان هستند.

اگر الگوی وصله یک‌درمیان استفاده شود، نباید بیش از یک‌سوم میلگردها در یک صفحه عرضی قطع شوند و حداقل فاصله بین میلگردهای یک‌درمیان باید ۱/۲ متر (٤ فوت) باشد. اگر از الگوی وصله اُریب استفاده شود، مقدار زاویه آن باید حداقل ۳۰ درجه از خط قائم نسبت به خط مرکزی انحراف داشته باشد. در صورت استفاده از فولاد با پوشش اپوکسی، لازم است طول همپوشانی حداقل به میزان ۱۵ درصد افزایش یابد تا از کافی‌بودن مقاومت پیوستگی[4] اطمینان حاصل شود.

جدول ۱۲-۲: اندازه پیشنهادی آرماتور طولی (FHWA 1990b)

درصد فولاد	ضخامت روسازی											
	mm	*in*	*mm*	*in*	*mm*	*in*	*mm*	*in*	*mm*	*in*	*mm*	*In*
	۲۰۳	۸	۲۲۹	۹	۲٥٤	۱۰	۲۸۰	۱۱	۳۰٥	۱۲	۳۳۰	۱۳
۰/٦۰	۱۳, ۱٦	٤, ٥	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱۹	٦
۰/٦۲	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱۹	٦
۰/٦٤	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٦, ۷
۰/٦٦	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٦, ۷
۰/٦۸	۱٦, ۱۹	٥, ٦	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱٦, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٦, ۷	۱۹, ۲۲	٥, ۷	۱۹, ۲۲	٦, ۷

تذکر : میلگردها آجدار و بدون پوشش بوده، که در جدول به صورت حداکثر، حداقل ارائه شده‌اند.

برای تقویت و شکل دادن به آرایش میلگردهای طولی، مقاومت در برابر ترک‌های طولی پیش‌بینی نشده و میل‌مهار بین خطوط عبوری از میلگردهای عرضی استفاده می‌شود. آرماتوربندی مناسب عرضی شامل میلگردهایی به قطر ۱۳ یا ١٦ میلی‌متر (١/٢ اینچ #٤ یا ٥/٨ اینچ #٥) به فاصله مرکز به مرکز ۱/۲ متر (٤٨ اینچ) می‌باشد. اجرای میل‌مهارها زمانی مورد نیاز خواهد بود که آرماتورهای عرضی در طول درزهای اجرایی طولی وجود نداشته باشد. فاصله بین میلگردهای عرضی نباید از ۰/۹ متر (٣٦ اینچ) کم‌تر و از ۱/۵ متر

1- Lap Splice
2- Chevron
3- Staggering Laps
4- Bond Strength

(۶۰ اینچ) بیشتر باشد. جزئیات خرک و آرماتور عرضی در شکل ۱۲-۱ نشان داده شده است.

میلگردهای فولادی را می‌توان به دو روش جایگذاری کرد. می‌توان میلگردها را قبل از اجرای روسازی بر روی خَرَک[1] قرار داد، به طوری که میلگردهای طولی و عرضی به وسیله کلاف‌هایی در محل محکم نگه داشته شوند. اجرای آرماتورها به این روش این امکان را فراهم می‌کند تا کنترل جایگذاری صحیح و ایمن آرماتورها قبل از اجرای روسازی ساده‌تر باشد. روش دیگر استفاده از روش‌های مکانیکی مانند تغذیه کننده‌های لوله‌ای[2] است. ابتدا آرماتورها بر روی زیراساس قرار داده و سپس توسط غلطک‌هایی به داخل لوله‌ها هدایت می‌شوند. گاهی اوقات استفاده از روش‌های مکانیکی باعث حذف آرماتورهای عرضی می‌شود.

بسیاری از مشکلات عملکرد روسازی بتنی مسلح پیوسته، به چگونگی روش‌های اجرایی باز می‌گردد که در اغلب آن‌ها توصیه‌های طراحی فوق رعایت نشده است. به این دلیل که روسازی بتنی مسلح یکپارچه پرخرج‌تر و بهسازی آن بسیار دشوارتر از روسازی‌های درزدار است، توجه و مراقبت حین ساخت اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. هم پیمانکار و هم ناظران بایداز اهمیت این موضوع آگاهی کافی داشته باشند و نظارت خود را بر ساخت‌وساز روسازی بتنی مسلح یکپارچه با دقت بیش‌تری لحاظ کنند.

قرار دادن فولاد، تأثیر مستقیمی بر عملکرد روسازی‌های مسلح بتنی پیوسته دارد. تعدادی از ایالت‌ها متوجه شدند که استفاده از تغذیه کننده‌های لوله‌ای برای جایگذاری فولاد، باعث انحراف میلگردهای طولی تا ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) در جهت قائم می‌شود. برای قرار گرفتن فولاد در محل مناسب، استفاده از خرک توصیه شده است. فاصله خرک‌ها باید به گونه‌ای باشد که خیز حداکثر میلگردها بیش از نصف ضخامت دال نشود.

۱۲-۶-۲- مهاربندهای انتهایی و درزهای پایانی

روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته در ابتدا و انتهای روسازی مثل محل تقاطع روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا پل‌ها، نیازمند جزئیات اجرایی ویژه‌ای هستند. سازمان هواپیمایی فدرال خاطرنشان می‌کند: از آنجایی که دال‌های مسلح یکپارچه بزرگ فاقد درز عرضی هستند، در نقاطی که روسازی بتنی مسلح یکپارچه در مجاورت سایر روسازی‌ها یا سازه‌ها قرار دارند، باید تمهیداتی برای کنترل یا جلوگیری از تغییرمکان‌های انتهایی اندیشیده

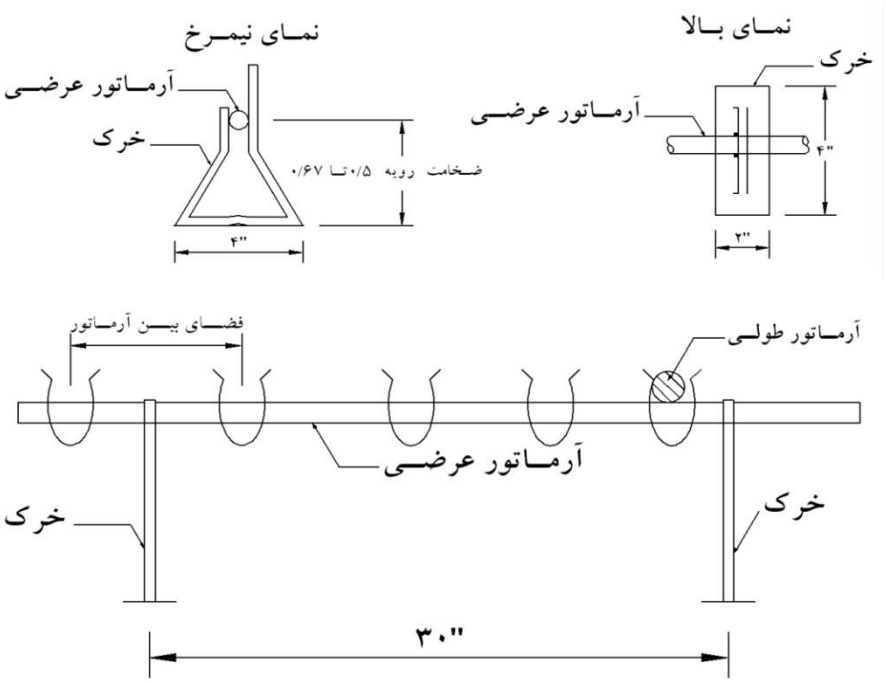
1- Chair
2- Tube Feeders

شود. تجربه نشان داده است که در اثر انبساط و انقباض حرارتی تغییرمکان انتهایی نسبتاً بزرگی تا ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ)، در روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته رخ می‌دهد. تغییر مکان انتهایی جز در مجاورت سایر روسازی‌ها و سازه‌ها مشکل‌ساز نمی‌باشد. آزمایش‌های به عمل آمده در روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته در راه‌های اصلی، حاکی از آن است که تلاش‌های صورت گرفته برای جلوگیری از تغییرمکان‌های انتهایی، چندان موفقیت‌آمیز نبوده است. در جاهایی که فضای کافی برای این تغییر مکان وجود داشته باشد نتایج مطلوب‌تری بدست می‌آید. در نقاطی که روسازی بتنی مسلح پیوسته، سایر روسازی‌ها را قطع می‌کند و یا در مجاورت سازه‌های دیگر قرار می‌گیرد، به طراحی درزهایی نیاز است تا به نحوی تغییر مکان انتهایی را هدایت کنند. کوتاهی در این امر موجب خرابی روسازی بتنی مسلح یکپارچه، سایر روسازی‌ها و سازه‌های مجاور آن می‌شود. درزهایی از نوع تیر بال‌پهن[1] یا درزهای انبساطی از نوع انگشتی می‌توانند این تغییر مکان‌ها را هدایت کنند. به دلیل هزینه‌های کم‌تر، درزهای تیر بال‌پهن، این نوع درزها توصیه می‌شود.

گسترده‌ترین سامانه استفاده شده برای جلوگیری از تغییر مکان‌های انتهایی روسازی بتنی مسلح پیوسته، مهاربندهای انتهایی می‌باشد. این نوع از درزها تیرهای تقویتی هستند که در بستر و به صورت عمود بر خط مرکزی روسازی جاسازی می‌شوند. شکل ۱۲-۲ یک قلاب مهاری معمولی را نشان می‌دهد.

دو هدف از اجرای مهار انتهایی، یکی کمک به شکل‌دهی الگوی مناسب ترک در روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته و دیگری جلوگیری از تغییر مکان انتهای روسازی است. با توجه به یکپارچگی دال روسازی بتنی مسلح یکپارچه، تغییر مکان انتهایی این دال می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. در صورت عدم وجود مهار، میزان جابه‌جایی تا ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) پیش‌بینی می‌شود. مک‌کالو و کاولی[2] خاطرنشان کردند که مهار انتهایی تنها ۵۰ درصد تغییر مکان را کاهش می‌دهد، بنابراین وجود درزهای انبساطی همواره لازم و ضروری است.

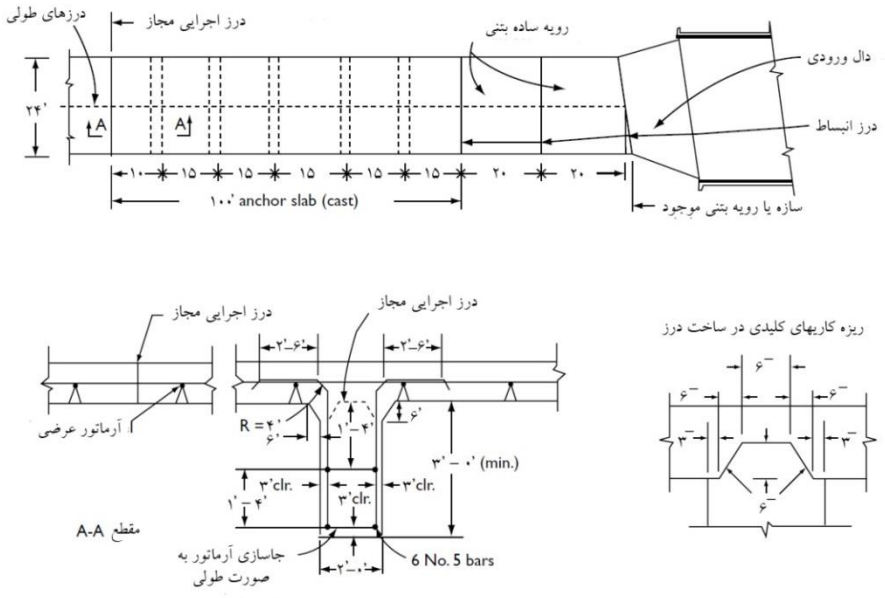
1- Wide Flange Beam Joint
2 -McCullough & Caweley



شکل ۱۲-۱: جزئیات خرک و آرماتورهای عرضی (FHWA 1990b)

عملیات اجرای مهار انتهایی عموماً شامل سه تا پنج قلاب بتنی مستطیل شکل پرفولاد است که قبل از اجرای روسازی، در عمقی کم‌تر از عمق یخبندان در زیر بستر جایگذاری می‌شوند. این مهارها توسط میلگرد به روسازی متصل می‌شود. از آنجایی که مهار انتهایی تغییر مکان روسازی را تا ۵۰ درصد محدود می‌کند، پس در مجاورت سازه پل‌ها همواره به درزهای انبساطی نیاز است. گاهی اوقات موج‌های جزئی توسط نیروی پیچشی در سطح روسازی رخ می‌دهد. با توجه به این که این فرآیند بر مقاومت غیرفعال خاک تکیه دارد، در خاک‌های فاقد چسبندگی، این نیروها تأثیرگذار نخواهد بود.

روش جایگزین برای رفع مشکل تغییر مکان انتهای روسازی بتنی مسلح پیوسته این است که اجازه دهد جابه‌جایی در درزهای انبساطی ویژه اتفاق بیفتد. تجربه نشان داده است که این روش ارزان‌تر است و روسازی سطح مناسب‌تری را برای استفاده فراهم می‌آورد.

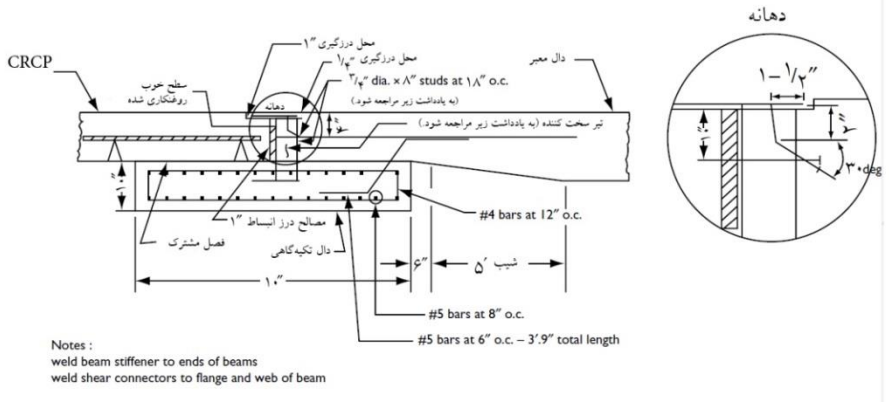


شکل ۱۲-۲: اجرای قلاب مهاری (FHWA 1990b)

از متداول‌ترین عملیات اجرایی انجام شده در انتهای دال روسازی بتنی مسلح یکپارچه، تیر فولادی بال‌پهن است که تغییر مکان را هدایت می‌کند و مهار ایجاد شده مانع از جابه‌جایی و حرکت می‌شود.

جدول ۱۲-۳: ابعاد پیشنهادی تیر WF

ضخامت جان	بال		اندازه تیر	جاسازی در دال تکیه‌گاهی	ضخامت CRCP
	ضخامت	عرض	WF در US		
mm (in)	mm (in)	mm (in)		mm (in)	mm (in)
۹/۵ (۰/۳۷۵)	۱٦ (۰/٦۲۵)	۲٥٤ (۱۰)	W 14×61	۱٥۲ (٦)	۲۰۳ (۸)
				۱۲٥ (٥)	۲۲۹ (۹)
۱۱ (۰/٤۳۸)	۱٦ (۰/٦۲۵)	۲۱٦ (۸/٥)	W 15×58	۱٥۲ (٦)	۲٥٤ (۱۰)
				۱۲٥ (۲)	۲۸۰ (۱۱)



شکل ۱۲-۳: طرح توصیه شده برای اتصال انتهایی تیر فولادی WF (FHWA 1990b)

اتصال تیر فولادی بال‌پهن شامل یک تیر بال‌پهن است که تا اندازه‌ای در داخل یک دال بتنی مسلح تکیه‌گاهی به طول تقریبی ۱۰ فوت (۳/۰۵ متر) و ضخامت ۲۵٤ میلی‌متر (۱۰ اینچ) قرار گرفته است. بال فوقانی تیر هم‌تراز سطح روسازی است. ماده انبساطی که اندازه آن مطابق با تغییر مکان انتهایی است، بر روی یک طرف تیر جا داده می‌شود. تیر بال‌پهن در مناطق با خورندگی شدید، باید با یک محافظ مناسب پوشیده شود. در جایی که بال فوقانی از جان تیر جدا می‌شود، ایالت‌های مختلف گسیختگی‌های زودهنگام تیرهای فولادی بال‌پهن را گزارش کردند. برای جلوگیری از این نوع گسیختگی باید گل‌میخ‌های مناسب به بال فوقانی تیر جوش داده شود.

۱۲-٦-۳- درزهای عرضی اجرایی

با قرار دادن یک تخته شکافدار در انتهای روسازی می‌توان به درز اجرایی مورد نظر دست یافت که این امر اجازه عبور آرماتور طولی را نیز از داخل درز می‌دهد. در محل درز اجرایی، میلگردهای برشی به طول ۳ فوت (۰/۹ متر) و به اندازه اسمی مشابه بین هر زوج آرماتور طولی جاسازی می‌شود و مقدار آن را حداقل به اندازه یک‌سوم افزایش می‌دهد. نباید هیچ وصله فولادی در فاصله ۳ فوتی (۰/۹ متر) از انتهای روسازی یا نزدیک‌تر از ۸ فوت (۲/٤ متر) از درز اجرایی قرار بگیرد. چنانچه لازم باشد آرماتور طولی خارج از محدوده فوق وصله شود، برای انجام تقویت از یک میلگرد به طول ٦ فوت (۱/۸ متر) با همان نمره آرماتور استفاده می‌شود. دقت و توجه مضاعف برای تضمین کیفیت بتن و تراکم این درزها لازم است. چنانچه بیش از پنج روز از بتن‌ریزی گذشته

باشد، باید با قرار دادن یک ماده عایق تا فاصله ۲۰۰ فوتی (٦١ متر) از انتهای آزاد آن، دمای روسازی مجاور را حداقل ۷۲ ساعت قبل از بتن‌ریزی جدید تثبیت کرد. این روند تنش‌های کششی احتمالی زیاد را در آرماتور طولی کاهش می‌دهد. ممکن است تمهیدات ویژه‌ای نیز برای حفاظت تخته انتهایی و شبکه آرماتور مجاور در حین اجراء ضروری باشد.

۱۲-٦-٤- روسازی بدون درز- مطالعه موردی

یک راهکار جالب که اولین‌بار در استرالیا امتحان شد، روسازی یکپارچه و بدون درز است که روسازی بتنی مسلح یکپارچه و پل‌های بتنی را بدون درزهای انبساطی به‌هم متصل می‌کند. این روش تحت پروژه آزمایشی WestlinkM7 در سیدنی انجام شد.
روسازی بدون درز، یک پیشرفت در زمینه روسازی است که درزهای عرضی را حذف می‌کند و یک اتصال مسلح بین روسازی بتنی مسلح یکپارچه و عرشه پل ایجاد می‌کند. این امر کیفیت سواری را برای استفاده کنندگان از راه‌های اصلی افزایش و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش می‌دهد. به‌علاوه، نیاز به مهار روسازی در پشت هر پایه پل را مرتفع می‌کند که به موجب آن، هزینه روسازی کاهش می‌یابد و عملیات اجرایی را در نقاط بحرانی مسیر به حداقل می‌رساند. اتصال بدون درز بین روسازی بتنی مسلح یکپارچه و عرشه پل باید با تنش‌های القایی ناشی از افت بتن، خزش، کرنش حرارتی، نشست خاکریز و بارهای ترافیکی مطابقت داشته باشد.
پروژه آزمایشی در استرالیا به طول ٤٠ کیلومتر (۲۵ مایل) و ۱۰/۵ متر (٣٤ فوت) عرض است و در طول خود از ٦٨ پل عبور می‌کند. تعداد درزهایی که حفاظت و نگهداری از آن‌ها دشوار است، توسط یک انتقال بلندمدت برای پل‌های چنددهانه و پل‌های تکیه‌گاهی کاهش می‌یابد. با ایده روسازی بدون درز، روسازی بتنی مسلح یکپارچه و پل‌ها توسط مقاطع انتقالی مسلح به هم متصل می‌شوند. این امر فشار موجود در محل برخورد روسازی به پل را حذف می‌کند. برای عبور ترافیک به هنگام نشست فنداسیون در مجاورت پایه پل، مقاطع انتقال بدون هرگونه بستر تکیه‌گاهی طراحی می‌شوند. تشریح کامل جزئیات و مشاهدات اجرایی توسط گریفیتس و همکارانش[1] تهیه شده است.

1- Griffiths et al

فصل سیزدهم

اجرای بستر و زیراساس

به طور کلی عملکرد سیستم روسازی وابستگی زیادی به ساختار لایه‌های بستر، زیراساس و اساس (در صورت وجود) دارد. ضرب‌المثلی در مورد اجرای ساختمان است که می‌گوید: «هیچ چیزی گرانتر از یک شالوده ارزان وجود ندارد». این سخن در مورد روسازی نیز صادق است. کیفیت اجرای این لایه‌ها متضمن یک زهکشی خوب، بستر یکنواخت روسازی و راحتی بیشتر در اجرای یک روسازی هموار است. در مقابل، یک بستر ضعیف عموماً به صرف وقت و هزینه بسیار زیادی برای بازسازی نیاز دارد.

۱۳-۱- آماده‌سازی زمین

عملیات اجرایی با آماده‌سازی بستر آغاز می‌شود. آماده‌سازی بستر شامل:

۱- متراکم کردن خاک‌ها در درصد رطوبت و درصد تراکمی که تضمین کننده یک بستر یکنواخت و پایدار برای روسازی باشد.

۲- هر جا که امکان داشته باشد، باید ارتفاع روسازی را زیاد و ارتفاع کانال‌های زهکشی کناری را کم اجراء کرد تا فاصله بین روسازی و سطح آب زیاد شود.

۳- در محل‌هایی که تغییرات ناگهانی در جنس خاک بستر در طول مسیر رخ می‌دهد، می‌توان با مخلوط کردن خاک‌های موجود، برای بستر مخلوطی یکنواخت ایجاد کرد.

٤- به هنگام تسطیح در زمان خاکریزی و خاکبرداری باید سعی شود خاک‌های مرغوب‌تر به لایه‌های فوقانی بستر نزدیک‌تر باشد.

۵- بهبود خاک‌های به شدت نامرغوب و تثبیت آن‌ها با سیمان یا آهک و یا در صورت اقتصادی بودن، تعویض خاک‌های ضعیف با خاک مرغوب ضروری است.

بخش چهارم گزارش کوهن و تایابجی درباره آماده‌سازی بستر اطلاعات قابل توجهی برای روسازی فرودگاه ارائه کرده است، اما اکثر توصیه‌های آن‌ها همه روسازی‌های بتنی را در بر می‌گیرد.
کوهن و تایابجی عنوان می‌کنند جنبه‌های مهمی از بستر که نیاز به آماده‌سازی دارند عبارتند از:
۱- ارزیابی خاک بستر؛
۲- اصلاح بستر برای افزایش پایداری؛ و
۳- ارزیابی رواداری‌های سطحی.
همچنین توصیه شده است برای کارهای وسیع مانند فرودگاه، در صورت وجود خاک متغیر با مقاومت باربری پایین (کم‌تر از ۹۶ کیلوپاسکال یا ۱ تن بر فوت‌مربع)، وجود خاک آلی، حساس در برابر تورم و یا آسیب پذیر در برابر یخبندان، حتماً با یک مهندس ژئوتکنیک مشاوره شود.
نقشه‌برداری، خاک‌برداری و خاک‌ریزی مراحلی هستند که در اجرای تمام روسازی‌ها وجود دارد و به خوبی در داخل کتاب‌های مهندسی حمل‌ونقل مثل فصول ۱۵ و ۱۸ کتاب گاربر و هوئل[1] پوشش داده شده‌اند. این کتاب، عملیات برش قسمت‌های مرتفع و پرکردن قسمت‌های کم‌ارتفاع را نیز برای دستیابی به ارتفاع نهایی بستر در بر می‌گیرند.

۱۳-۱-۱- تسطیح و تراکم بستر

خاک‌ریزی باید در لایه‌های یکنواخت انجام شود و به خوبی متراکم شوند تا به چگالی (چگالی) بالایی برسند. مقاومت خاک متراکم شده بستگی به چگالی خشکی دارد که در اثر تراکم به آن می‌رسد. درصد رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک تراکم مطابق با آزمایش استاندارد پراکتور (AASHTO T99 2005، ASTM D698 2000) و آزمایش پراکتور اصلاح شده (AASHTO 2005، ASTM D1557 2002) تعیین می‌شوند.
آزمایش پراکتور استاندارد و اصلاح شده، از لحاظ مقدار انرژی تراکم که به خاک اعمال می‌شود با یکدیگر تفاوت دارند. در آزمایش استاندارد از یک وزنه ۲/۵ گیلوگرم (۵/۵ پوند) با ارتفاع سقوط ۳۰ سانتی‌متر (۱۲ اینچ) استفاده می‌شود، در صورتی که در آزمایش پراکتور اصلاح شده از یک وزنه ٤/٥٤ کیلوگرم (۱۰ پوند) با ارتفاع سقوط ٤٥ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) استفاده می‌شود. در کتاب گاربر و هوئل (سال ۲۰۰۲: صفحات ۸۵۸ تا ۸۵۹) ذکر شده است که میزان رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر به انرژی تراکم بستگی

1- Garber & Hoel

دارد. براساس مثال این کتاب، میزان رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش استاندارد پراکتور ۱۶/۵ درصد با چگالی خشک حداکثر ۱۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۲۰ pcf) است، در حالی که در آزمایش پراکتور اصلاح شده، برای یک خاک مشخص میزان رطوبت بهینه ۱۵ درصد و چگالی خشک حداکثر ۲۱۸۰kg/m^3 (۱۳۶ pcf) می‌باشد. بنابراین با کم شدن میزان رطوبت بهینه، انرژی تراکم بیشتری برای رسیدن به چگالی مورد نظر نیاز است.

سازمان حمل‌ونقل آمریکا برای ساخت راه‌های اصلی معمولاًاز آزمایش پراکتور استاندارد استفاده می‌کند. برای روسازی فرودگاه تحت بارگذاری هواپیماهای سنگین‌تر از ۲۷۰۰۰ کیلوگرم (۶۰۰۰۰ پوند) از پراکتور اصلاح شده و برای روسازی‌های تحت بارگذاری هواپیماهای سبکتر از پراکتور استاندارد استفاده می‌شود.

کوهن و تایابجی ضوابط تراکم خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده را برای ساخت روسازی فرودگاه این طور بیان کرده‌اند:

- برای خاک‌های چسبنده در مقاطع خاکریزی، باید کل خاک مورد نظر تا ۹۰ درصد چگالی حداکثر متراکم شود.
- برای خاک‌های چسبنده در مقاطع خاکبرداری، باید ۱۵ سانتی‌متر (۶ اینچ) بالای مقطع تا ۹۰ درصد چگالی حداکثر متراکم شود.
- برای خاک‌های غیرچسبنده در مقاطع خاکریزی، باید ۱۵ سانتی‌متر (۶ اینچ) بالای مقطع تا ۱۰۰ درصد چگالی حداکثر و مابقی خاکریزی تا ۹۵ درصد چگالی حداکثر متراکم شود.
- برای خاک‌های غیرچسبنده در مقاطع خاکبرداری، باید ۱۵ سانتی‌متر (۶ اینچ) بالای مقطع تا ۱۰۰ درصد چگالی حداکثر و ۴۵ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) بعدی تا ۹۵ درصد چگالی حداکثر متراکم شود.
- تمام الزامات قبلی براساس ملاحظات سازه‌ای هستند. برای فراهم کردن سطحی پایدار به منظور کار کردن با ماشین‌آلات سنگین روسازی در فرودگاه، بهتر است تمام مصالح لایه بستر تا رسیدن به درصد تراکم ۹۵ درصد به روش پراکتور اصلاح شده متراکم شود.

همچنین کوهن و تایابجی برای دستیابی به یک بستر پایدار در مورد رطوبت بهینه قبل از تراکم، این چنین بیان می‌کنند:

- مقدار رطوبت مورد نیاز عموماً براساس مشخصات لازم مشخص می‌شود و می‌تواند تا ۲± درصد با رطوبت بهینه اختلاف داشته باشد.

- برای خاک‌های قابل تورم، رطوبت باید ۱ تا ۳ درصد بالاتر از رطوبت بهینه باشد تا قابلیت تورم را کاهش دهد.
- در خاک‌های ریزدانه و غیرقابل تورم، رطوبت باید ۲ـ۱ درصد کم‌تر از حالت بهینه باشد.
- اگر خاک‌های چسبنده با رطوبتی بیش از مقدار بهینه متراکم شوند، حتی اگر به چگالی مورد نظر رسیده باشند، ممکن است بر اثر ترافیک ماشین‌آلات اجرایی ناپایدار شوند.
- خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار نسبت به رطوبت خیلی حساس‌تر از خاک‌های رس لای‌دار هستند و تغییر اندکی در میزان رطوبت آن‌ها می‌تواند موجب صعوبت عملیات تراکم شود.

انتخاب تجهیزات تراکم و کنترل رطوبت نیز از اهمیت بالایی برخوردار است:

- خاک‌های چسبنده عموماً با غلطک‌های پاچه‌بزی با نفوذ ۷۰ درصد در هر عبور غلطک، متراکم می‌شوند.
- شخم زدن برای کنترل رطوبت در خاک‌های چسبنده ضروری است.
- غلطک‌های فولادی سنگین بعد از تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرند تا سطح مورد نظر را صاف کنند.
- در خاک‌های غیرچسبنده از غلطک‌های چرخ فولادی لرزاننده استفاده می‌شود. اگر تراز آب زیرزمینی به سطح نزدیک و یا بستر اشباع باشد عمل ویبره را باید با احتیاط انجام داد.

آزمایش تراکم در محل، معمولاً به همراه دستگاه چگالی‌سنج هسته‌ای انجام می‌شود. حالت ایده‌آل این است که به منظور کنترل کیفیت چگالی و انجام به موقع اصلاحات ضروری، در مدت اجرای بستر روسازی تجهیزات و کارکنان همواره در محل حضور داشته باشند.

عملیات غلطک‌زنی تأییدی برای سطح بستر آماده است. یک غلطک چرخ لاستیکی و یا یک کامیون پر از بار را از روی سطح آماده، عبور می‌دهند تا مشاهده کنند که آیا در سطح آماده شده تغییر شکل یا شیارافتادگی رخ می‌دهد. برای روسازی فرودگاه‌ها و سایر روسازی‌های ویژه بارهای سنگین برای تایید سطح آماده شده راهنمای زیر پیشنهاد می‌شود:

- اگر شیارافتادگی کم‌تر از ٦ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ) باشد، سطح قابل قبول است.
- اگر شیارافتادگی بین ٦ تا ٤٠ میلی‌متر (۰/۲۵ تا ۱/۵ اینچ) باشد، سطح باید تیغ

زده شده و دوباره متراکم شود.

- اگر شیارافتادگی از ٤٠ میلی‌متر (۱/۵ اینچ) تجاوز کرد، توصیه می‌شود سطح برداشته شده و مجدداً اجراء شود.
- تغییر شکل بالای ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) که به جای اول خود باز می‌گردد نشان دهندهٔ یک لایه نرم در نزدیکی سطح می‌باشد که در این صورت نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

اگر پذیرش سطح، به عنوان بخشی از مشخصات پروژه محسوب شود، رواداری مسیر در هر ۵ متر (١٦ فوت)، معمولاً به ۱۳ تا ۲۵ میلی‌متر (۰/۵ تا ۱ اینچ) و رواداری ارتفاعی سطح به ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر (۰/۰۵ تا ۰/۱ فوت) محدود می‌شود. برای تسطیح بستر می‌توان از گریدرهای خودکار یا دستگاه‌های تراش روسازی استفاده کرد.

بهتر است یک طرح کنترل ترافیک برای دور کردن ماشین‌آلات سنگین از سطح کار به اجراء درآید. برای جلوگیری از جمع شدن آب در سطح و اشباع شدن بستر، زهکشی سطح لازم است. اگر احتمال بارش باران وجود داشته باشد باید از یک غلطک چرخ لاستیکی یا غلطک چرخ فولادی برای آب‌بندی سطح استفاده کرد. اگر بستر یخ بزند باید سطح به اندازه ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) شخم زده و دوباره متراکم شود.

۱۳-۱-۲- کنترل خاک‌های منبسط شونده

برخی از تکنیک‌های ساخت و روش‌های کنترل خاک‌های منبسط شونده (متورم شونده) در نشریه PCA/ACPA تحت عنوان «بستر و زیراساس روسازی بتنی» شرح داده شده است که در ادامه به صورت خلاصه به آن‌ها اشاره می‌شود.

با استفاده از بارهای سربار می‌توان تورم خاک را کنترل کرد. بدین صورت که خاک متورم شونده را در پایین‌ترین قسمت خاکریزی قرار دهیم. انتخاب دانه‌بندی و مخلوط کردن خاک نیز مؤثر است. در اثر عملیات اجرایی در مقاطع خاکبرداری عمیق، سربار از روی خاک حذف می‌شود و به خاک اجازه تورم داده می‌شود. بنابراین توصیه شده است خاکبرداری‌های عمیق را پیش از کارهای دیگر انجام دهیم تا به خاک اجازه تورم و تثبیت داده شود.

همچنین در طی انجام عملیات ساخت رطوبت مناسب و نظارت بر چگالی نقش قابل توجهی را در کنترل تغییرات حجمی خاک ایفاء می‌کند. خاک با تورم بالا را باید ۱ تا ۳ درصد بالاتر از رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش پراکتور استاندارد متراکم کرد. قبل از اجرای روسازی بتنی نباید به خاک این اجازه داده شود که بیش از اندازه خشک شود.

در مناطق با دوره خشکسالی طولانی، ممکن است لازم باشد تمام خاک‌های با تورم بالا با یک لایه خاک بدون پتانسیل تورم پوشش داده شود. این لایه باید از خاکی تهیه شود که مستعد پدیده مکش نباشد.
اگر خاک‌های بدون پتانسیل تورم به سهولت در دسترس نباشد، ممکن است تثبیت خاک‌های موجود به وسیله سیمان یا آهک اقتصادی‌تر باشد. باید برای مشخص کردن مقدار سیمان و یا آهک مناسب از تست‌های آزمایشگاهی استفاده کرد که عموماً این مقدار در بازه ۳ تا ۵ درصد وزنی قرار دارد.
روش‌های دیگری مثل غرقاب و پیش‌متورم کردن خاک وجود دارد تا به خاک این اجازه را بدهند که قبل از آسیب دیدگی روسازی متورم شود. همچنین انجام تثبیت شیمیایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۳-۱-۳- کنترل تراکم ناشی از یخبندان

عملکرد روسازی‌های قدیمی در مناطق متأثر از یخبندان در مقابل ترافیک شدید امروزی، بیانگر این موضوع است که برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از یخبندان نیازی به کنترل همه جانبه و پرخرج نیست. مطالعات انجام شده بر روی این روسازی‌ها نشان می‌دهد که برای کاهش تورم حجم خاک به منظور فراهم کردن سطحی یکنواخت در طول مسیر بستر، به این گونه کنترل‌ها نیاز است. در خاک‌های متورم شونده، کنترل پدیده یخبندان را از طریق روش‌های اقتصادی‌تری مانند عملیات تسطیح مناسب، کنترل تراکم و رطوبت بستر می‌توان به انجام رسانید.
اگر در منطقه‌ای، خاکی مستعد یخبندان وجود داشته و حذف آن صرفه اقتصادی نداشته باشد، زهکشی، کنترل تراکم و کنترل رطوبت می‌تواند از اثرات مضر احتمالی بکاهد.
برخی از روش‌های اجرایی و روش‌های کنترل پدیده یخبندان در نشریه PCA/ACPA تحت عنوان «بستر و زیراساس برای روسازی بتنی» شرح داده شده است که در ادامه به صورت خلاصه به آن اشاره می‌شود.
یک روش این است که سطح روسازی را به اندازه کافی بالا بیاوریم و آبراهه‌های کناره راه را به اندازه کافی عمیق حفر کنیم که سطح آب تا حد مطلوب پایین‌تر از روسازی قرار بگیرد. سطح بستر در صورت امکان باید در حدود ۱/۲ تا ۱/۵ متر (٤ تا ۵ فوت) بالاتر از کف آبراهه‌های کناری قرار بگیرد. متعاقباً، برای پایین آوردن سطح آب زیرزمینی ممکن است از زهکش‌های لبه نیز استفاده شود.
در زمان انجام عملیات خاکی، بهتر است خاک‌هایی که احتمال یخزدگی آن‌ها می‌رود در

پایین‌ترین نقطه و خاک‌هایی که استعداد کم‌تری به یخ‌زدگی دارند در لایه بالاتر قرار بگیرند. مخلوط کردن خاک‌ها می‌تواند از تفاوت یخ‌زدگی در بین خاک‌ها جلوگیری کند. اگر توده‌های سیلت (لای) در میان خاک‌های با حساسیت کم در برابر یخبندان توزیع شده باشد، می‌توان این توده‌ها را خارج و با مصالح بهتری جایگزین کرد.
تسطیح باعث ایجاد یکنواختی مناسبی می‌شود و تراکم مناسب در درصد رطوبت بهینه این یکنواختی را بهبود می‌بخشد. متراکم کردن خاک در رطوبتی کمی بیشتر از درصد رطوبت بهینه حاصل از آزمایش پراکتور استاندارد، باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود. این کار مشابه عملیاتی است که برای خاک‌های متورم شونده انجام می‌شود.

۱۳-۱-٤- تثبیت بستر

تثبیت بستر به همان اندازه که به نوع خاک بستگی دارد، به بزرگی بارهای ترافیکی که باید توسط روسازی راه تحمل شود نیز وابسته است. بعید به نظر می‌رسد که بستر پارکینگ‌ها، خیابان‌ها و جاده‌های محلی به تثبیت نیاز داشته باشند. در مقابل ممکن است بستر روسازی فرودگاه‌ها و روسازی‌های صنعتی سنگین نیازمند تثبیت باشند، مخصوصاً زمین‌های وسیعی که برای این گونه تسهیلات در نظر گرفته می‌شود دارای خاکی با کیفیت پایین هستند. دلایل تثبیت بستر عبارت از ارتقای خاک‌های کم‌مقاومت، کاهش پتانسیل تورم خاک و بهبود شرایط ساخت است. از جمله مزیت تثبیت خاک، فراهم کردن سطحی مناسب برای انجام عملیات اجرایی است که باید با دقت انجام شود.
اگر یک یا چند مورد از موارد زیر وجود داشته باشد، باید تثبیت بستر را در دستور کار خود قرار داد:
زهکشی ضعیف، زهکشی معکوس سطحی، یخبندان و یا نیاز به سطحی پایدار برای انجام عملیات اجرایی از جمله موارد قابل توجه است. عملیات تثبیت بستر را می‌توان با اضافه کردن برخی عناصر شیمیایی و یا از طریق روش‌های مکانیکی انجام داد. در برخی موارد بستر را نمی‌توان به وسیله مواد افزودنی شیمیایی به طور مناسب تثبیت کرد. خاک‌های موجود ممکن است خیلی نرم باشند. به طوری که ماده تثبیت کننده نتواند با آن‌ها مخلوط و متراکم شود. امکان دارد برای ساخت مقاطع روسازی برای خاک‌هایی که بیش از اندازه نرم هستند نیاز به اساس باشد. برای این کار می‌توان از لایه‌های ضخیم لاشه‌سنگ و قلوه‌سنگ استفاده کرد. همچنین می‌توان برای اساس از خاک‌های بسیار نرم از یک لایه ضخیم بتن متخلخل استفاده کرد. ژئوتکستایل‌ها نیز می‌توانند به عنوان تثبیت مکانیکی برای خاک‌های نرم مورد توجه قرار بگیرند. ژئوتکستایل‌ها دسترسی بر روی

خاک‌های نرم را آسان کرده و به کاهش اختلال ترافیکی حین عملیات اجرایی کمک می‌کنند.
متداول‌ترین مصالحی که برای انجام عملیات تثبیت بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد، آهک و سیمان می‌باشد. آهک برای خاک‌های چسبنده و رسی با درجه رطوبت بالا استفاده می‌شود. خاک‌ها با شاخص خمیری بالاتر از ۱۰، برای تثبیت بین ۳ تا ۵ درصد آهک نیاز دارند. ممکن است آهک به صورت خشک و یا دوغابی مورد استفاده قرار گیرد. عموماً از سیمان برای تثبیت سایر خاک‌های درشت‌دانه و خاک‌های دارای سیلتِ زیاد استفاده می‌شود. میزان سیمان مصرفی طی یک فرآیند طراحی مخلوط آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. تثبیت خاک با آهک و سیمان با جزئیات کامل توسط کوهن و تایابجی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۳-۱-۵- سایر ملاحظات مربوط به بستر

گاهی اوقات حین خاکبرداری ممکن است با خاک‌های نامناسب مواجه شویم، بنابراین داشتن یک طرح عملیات برای رویارویی با این توده خاک، مناسب است. راهکارهای ممکن عبارتند از:

- برداشتن (خاکبرداری) مصالح نرم و جایگزینی آن با مصالحی که در نزدیکی آن محل قرار دارد و عموماً برای لایه‌های سطحی به کار می‌روند.
- برداشتن خاک نرم و جایگزینی آن با سنگ شکسته و در صورت نیاز برای جلوگیری از آلوده شدن استفاده از ژئوتکستایل بین لایه سنگی و مصالح بستر.
- استفاده از ژئوگرید و یک لایه ۲۵۰ میلی‌متری (۱۰ اینچ) از سنگ شکسته برروی سطح نرم.

ملاحظات زیست محیطی بسیار حائز اهمیت است. کوهن و تایابجی اشاره می‌کنند که مطابق نقشه و یا نیاز محیط، راهکارهایی برای کنترل آلودگی آب، فرسایش خاک و رسوب‌گذاری (لجن‌زایی) فراهم شود.

۱۳-۲- اجرای زیراساس و اساس

کوهن و تایابجی در فصل پنجم کتاب «بهترین روش‌های اجرایی روسازی بتنی با سیمان پرتلند برای فرودگاه (روسازی صلب فرودگاه)» درباره ساخت اساس و زیراساس بحث می‌کنند. اگرچه این راهنما بر روسازی فرودگاه‌ها تمرکز دارد، اما اکثر توصیه‌های آن را می‌توان برای راه‌های اصلی و سایر روسازی‌های بتنی اعمال‌کرد.

ممکن است واژگان و اصطلاحات به کار رفته در این زمینه گیج کننده باشند. راهنمای کوهن و تایابجی به یک لایه اساس که بر روی زیراساس قرار می‌گیرد اشاره دارد. این در حالیست که راهنمای طراحی روسازی سازمان هواپیمایی فدرال دو لایه زیراساس را مدنظر دارد که لایه فوقانی آن دارای مشخصات لایه اساس است. راه‌های اصلی عموماً یک لایه زیراساس در زیر روسازی بتنی دارند، در حالی که فرودگاه‌ها دارای دولایه بین بستر و رویه بتنی هستند. این مسئله زمانی اتفاق می‌افتد که لازم باشد تا روسازی وزن زیاد ناشی از هواپیماهای پهن‌پیکر را تحمل کند.

۱۳-۲-۱- زیراساس تثبیت نشده

ادارات مختلف راه به طور موفقیت‌آمیزی مصالح و دانه‌بندی‌های متنوعی را برای زیراساس و بدون انجام عملیات تثبیت مورد استفاده قرار داده‌اند. این مصالح شامل سنگ شکسته، مصالح شنی و ماسه‌ای رودخانه‌ای، ماسه، شن تثبیت‌شده با خاک و مصالح محلی مانند مصالح دورریز شکسته معادن و سرباره می‌باشد.

موارد مهم عبارتند از:

- کنترل صحیح دانه‌بندی- اگرچه دانه‌بندی‌های متفاوت بسیاری قابل قبول بوده‌اند، اما ثابت نگه داشتن دانه‌بندی برای یک پروژه حائز اهمیت است.
- محدود کردن میزان مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ به قطر ۰/۰۷۵ میلی‌متر.
- حتی‌الامکان از سنگدانه‌های نرم و سست که تحت فشار غلطک می‌شکنند استفاده نشود.
- کوبیدن زیراساس تا رسیدن به چگالی خیلی زیاد، با حداقل ۱۰۰ درصد پراکتور استاندارد، به منظور جلوگیری از تحکیم آتی.
- تنها یک زیراساس به ضخامت ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) برای جلوگیری از مکش لازم است.

موارد مهم در اجرای زیراساس تثبیت نشده برای فرودگاه‌ها که توسط کوهن و تایابجی به آن‌ها اشاره شده است عبارتند از:

- زهکشی را از وسط یا بالاترین نقطه روسازی انجام دهید.
- تجهیزات خودکار و یا یک جعبه سنگی را بر روی بولدوزر قرار دهید.
- رطوبت را کنترل کنید تا بیش از ۱ درصد با OMC تفاوت نداشته باشد.
- حداقل ضخامت لایه‌ها باید سه تا چهار برابر اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه باشد.
- هرگونه ناحیه سست و غیرمستحکم موجود بر روی بستر را قبل از اجرای

زیراساس تعمیر کنید.

- اختلاف ارتفاع زیراساس تمام شده بیش از ۱۲ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) در ۵ متر (۱۶ فوت) طول نباشد. در پروژه‌های بزرگ‌تر، برای سطح نهایی از لیزر یا اتوتریمر (autotrimmer) استفاده می‌شود.
- به محض اتمام کار از زیراساس تمام‌شده نگهداری کنید. با فراهم کردن زهکش از جمع شدن آب بر روی سطح آن جلوگیری نمایید. اگر هوا به شدت خشک باشد ممکن است زیراساس به آب نیاز داشته باشد.

البته خیلی از این موارد بر روی روسازی‌های غیرفرودگاهی انجام می‌شوند.

لایه‌های اساس که به صورت مکانیکی تثبیت می‌شوند، شبیه به زیراساس تثبیت نشده هستند با این تفاوت که استانداردهای کنترل کیفیت، از جمله میزان مصالح سنگی شکسته، مواد مضر و دانه‌بندی باید لحاظ شود. در کل اجرای آن‌ها مشابه زیراساس‌های تثبیت نشده است، به اضافه ملاحظاتی به شرح ذیل:

- قبل از اجرای لایه اساس، بستر یا زیراساس زیرین باید چک شود تا نواحی دارای مصالح نرم یا نامرغوب اصلاح شوند.
- لایه اساس نباید بر روی لایه زیرین که خیس، گلی و یا یخ زده است، قرار بگیرد.
- در شرایط یخبندان نباید کاری انجام داد.
- لایه اساس باید توسط غلطک‌های لرزاننده چرخ لاستیکی و یا غلطک‌های با چرخ ثابت متراکم شود.
- اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط شاخص ۵ متری (۱۶ فوت) باید حداکثر ۱۰ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ) باشد که احتمالاً این امر نیازمند تجهیزات اجرای خودکار است.

۱۳-۲-۲- اساس و زیراساس تثبیت‌شده توسط سیمان

مصالح سنگدانه‌ای در طبقه‌بندی خاک آشتو در گروه A-1، A-3، A-2-4، A-2-5، برای زیراساس‌های تثبیت‌شده با سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیش از ۳۵ درصد از این نوع خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور نمی‌کند. شاخص PI برابر ۱۰ و یا کم‌تر بوده و ممکن است به صورت طبیعی در معادن مصالح سنگی موجود و یا با مخلوط شن و ماسه تولید شوند. زیراساس‌های تثبیت‌شده با سیمان با استفاده از خاک‌های A-4 و A-5 در مناطق بدون یخبندان تولید می‌شوند که عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند. ولی این گونه

خاک‌ها برای مناطق دارای یخبندان و یا مناطقی که بار ترافیکی سنگینی دارند، توصیه نمی‌شوند. استفاده از خاک‌های A-6 و A-7 توصیه نمی‌شود. به منظور انجام تسطیح مناسب و صحیح زیراساس، حداکثر اندازه مصالح به ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) محدود می‌شود و در بهترین حالت این اندازه برابر ۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) است.

در طبقه‌بندی ASTM خاک‌های A-1 عبارتند از GW، GP، GM، SW، SP یا SM، خاک‌های A-2-5 و A-2-6 نوعاً عبارتند از Gm، GC، SM یا SC، و خاک A-3 با SP متناظر است. همچنین خاک‌های A-4 و A-5 عموماً ML، OL، MH و OH و نهایتاً A-6 و A-7 متناظر با CL، MS، CH و OH است.

موارد مهم عبارتند از:

- می‌توان مصالح دانه‌ای را که تمیز نبوده و دارای مشخصات مورد نیاز زیراساس نیستند، مورد استفاده قرار داد این مصالح نسبت به سنگدانه‌های تمیز به سیمان کم‌تری نیاز دارند.
- اساس و زیراساس تثبیت‌شده با سیمان به شدت در مقابل فرسایش مقاوم هستند و برای جلوگیری از مکش مناسب می‌باشند.
- مصالح تثبیت‌شده امکان دارد توسط مخلوط‌کن جاده‌ای و یا در یک کارخانه مرکزی ساخته شوند. در حالت مخلوط کردن در محل، مصالح باید بر یک لایه محافظ بر روی بستر تهیه شوند.
- آخرین گام برای اتمام زیراساس تثبیت‌شده با سیمان، پرداخت نهایی سطح برای دستیابی به یک سطح صاف، سپس انجام یک لایه آب‌پاشی و پس از آن اجرای یک لایه مصالح نگهدارنده قیری است.

موارد اجرایی اساس و زیراساس‌های تثبیت‌شده با سیمان برای فرودگاه‌ها عبارتند از:

- زمانی که از مخلوط‌کن مرکزی استفاده می‌کنید، آب و سیمان را با نسبت‌های صحیح در دستگاه مخلوط‌کن بریزید و اطمینان بیابید که سیمان در مخلوط‌کن دانه دانه نمی‌شود.
- انتقال مصالح و عملیات اجرایی در کم‌تر از ٦٠ دقیقه پس از مخلوط اولیه انجام شود.
- تسطیح نهایی و تراکم در کم‌تر از ۲ ساعت پس از اختلاط انجام شود.
- با استفاده از دستگاه چگالی‌سنج هسته‌ای از چگالی لایه‌ها بازرسی به عمل آید. هر لایه باید تا ۹۷ یا ۹۸ درصد تراکم حداکثر متراکم شود.
- درصد رطوبت خاک می‌بایست حداکثر ۲ درصد بیشتر یا کم‌تر از رطوبت بهینه

و در هوای گرم ۲ درصد بیش از آن باشد.

- به کمک پخش‌کن مکانیکی یا بلدوزر مجهز به تیغه اتوماتیک، مصالح برروی مسیر پخش می‌شوند.
- درزهای عرضی و طولی به حداقل برسد.
- در انتهای کار یک سرصفحه[1] عرضی قرار دهید و یا اگر قرار است عملیات اجرایی بیش از ٦٠ دقیقه متوقف شود، از برش اره‌ای عمیق‌تر استفاده کنید.
- درزهای طولی را به کمک برش اره‌ای لبه آزاد اجراء نمایید.
- اطمینان حاصل نمایید که دما در لحظه اجراء حداقل ٤°C (٤٠°F) باشد و اگر دما تا مدت ٤ ساعت به زیر ٢°C (٣٥°F) می‌رسد عملیات اجرایی را متوقف نمایید.
- ضخامت لایه را برای انجام تراکم به ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) محدود می‌نماییم. هرچند برخی از انواع ماشین‌آلات قادر هستند تا ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ) را به طور مؤثر بکوبند.
- عملیات تراکم را به وسیله ترکیبی از غلطک‌های لرزاننده و چرخ لاستیکی انجام دهید.
- اگر اجرای چندلایه‌ای ضروری باشد، در زمان اجرای لایه دوم، لایه زیرین را مرطوب نگه دارید.
- اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط شاخص ۵ متری (١٦ فوت) باید حداکثر ۱۰ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ) باشد. اساس تثبیت‌شده با سیمان در رده مصالح صلب قرار دارد و نمی‌توان پس از تراکم آن را مجدداً تسطیح کرد.

البته بسیاری از این موارد، برای روسازی غیر فرودگاهی نیز قابل قبول هستند. برای اطمینان از یکنواختی در پروژه‌های بزرگ‌تر، لازم است به طور پیوسته اساس تثبیت شده با سیمان در کارخانه مرکزی مخلوط دورانی تولید شود. در زمان انتقال توسط کامیون نیز، باید از پوششی استفاده شود که مخلوط را در برابر بارندگی محافظت نماید. توجه به شرایط آب‌وهوایی نامساعد برای اساس تثبیت شده با سیمان دارای اهمیت می‌باشد.

زمانی که دمای محیط پایین‌تر از ٤٠°F (٤°C) باشد یا این که وقتی شرایط دمایی در طی ٢٤ ساعت زیر ٣٥°F (٢°C) پیش‌بینی شده باشد، باید از اختلاط مصالح اساس تثبیت شده با سیمان خودداری شود. اساس تثبیت شده با سیمان نباید بر روی زمین یخ‌زده اجراء شود. علاوه بر این، اساس تثبیت‌شده با سیمان نباید در زمان بارندگی اجراء شود.

1- Header

اما اگر یک باران غیرمنتظره در حین اجراء رخ دهد، باید سریعاً لایه اجراء شده را متراکم کرد و سطح آن را پوشانید. مصالح اساس تثبیت شده با سیمان که در حین اجراء یا انتقال به محل در اثر باران مرطوب شده‌اند باید آزمایش شوند و اگر آب اضافی باعث تغییر در یکنواختی و غلظت مخلوط شده باشد، باید از استفاده آن‌ها خودداری کرد.
اساس تثبیت شده با سیمان در لایه‌های ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متری (۸-٤ اینچ) اجراء و با غلطک متراکم می‌شود. لایه متراکم شده باید تا زمان اجرای لایه بعدی مرطوب نگه داشته شود. تمامی لایه‌ها باید ظرف مدت ۱۲ ساعت پیاده‌سازی و متراکم شوند. اساس تثبیت شده با سیمان تا زمان اجرای روسازی بتنی، باید توسط یک غشای مایع که یک ترکیب عمل آورنده است، مورد نگهداری و محافظت قرار بگیرد. همچنین قبل از اجرای روسازی بتنی یک لایه از مصالح سنگی با دانه‌بندی باز[1] بر روی اساس تثبیت شده با سیمان قرار می‌گیرد تا از قفل و بست رویه بتنی و لایه اساس جلوگیری نماید.

۱۳-۲-۳- اساس و زیراساس بتنی کم سیمان

مخلوط زیراساس بتنی کم سیمان نسبت به زیراساس تثبیت‌شده با سیمان، از مصالح سیمانی و آب بیشتری تهیه می‌شود، اما نسبت به بتن‌های متداول سیمان کم‌تری دارد. بتن کم سیمان با داشتن ضخامت و ظاهری مشابه بتن معمولی، صرفاً با انجام ویبره متراکم می‌شود. این مخلوط اغلب بتن اقتصادی[2] نامیده می‌شود زیرا در تهیه آن از مصالح محلی و کم‌هزینه موجود استفاده شده است.
موارد مهم در این زمینه عبارتند از:

- مصالح سنگی غیراستاندارد می‌تواند در بتن کم سیمان استفاده شود و ممکن است سیمان کم‌تری نسبت به سنگدانه‌های تمیز نیاز داشته باشد.
- مصالح روسازی بازیافتی می‌تواند به عنوان مصالح سنگی، مورد استفاده قرار گیرد.
- عیار متداول سیمان به کار رفته ۲۰۸-۱۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۰۰-۳۵۰ib/cuyd) و اسلامپ ۷۵-۲۵ میلی‌متر (۱ تا ۳ اینچ) است.

تولید اساس و زیراساس بتنی کم سیمان بسیار شبیه به بتن معمولی است و ممکن است در یک مخلوط‌کن ثابت یا در کارخانه مرکزی تولید بتن و یا با کامیون مخلوط‌کن تولید شود. حمل از کارگاه تا محل به وسیله کامیون همزن، کامیون مخلوط‌کن با همزن، یا

1- Choke Stone
2- Econocrete

کامیون بدون هم‌زن انجام می‌شود.
موارد اجرایی اساس و زیراساس بتنی کم سیمان برای فرودگاه‌ها که توسط کوهن و تایابجی ارائه شده‌اند، عبارتند از:

- بتن‌ریزی بتن اقتصادی همانند بتن معمولی است.
- به منظور جلوگیری از ترک‌خوردگی انعکاسی، مقاومت ۷ روزه بتن به ۵۲۰۰ کیلوپاسکال و مقاومت ۲۸ روزه آن به ۸۳۰۰ کیلوپاسکال محدود می‌شود.
- برش درزها در بتن اقتصادی با درزهای اجرایی سازگار باشد.
- عمل‌آوری بتن اقتصادی با دو بار استفاده از ترکیب عمل‌آوری مومی انجام شود. این فرآیند، بتن اقتصادی را عمل‌آوری می‌کند و از قفل‌وبست و انعکاس ترک‌ها به روسازی‌های بتنی جلوگیری می‌نماید.

اقدامات احتیاطی در مورد دما و بارندگی همانند بحث اساس تثبیت شده با سیمان است. جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها در اساس و زیراساس بتنی کم سیمان اهمیت زیادی دارد. برای اجرای اساس و زیراساس بتنی کم سیمان می‌توان از هر دو نوع قالب ثابت و لغزنده استفاده کرد. نیازی به پرداخت نهایی سطحی نیست، اما اساس بتنی کم سیمان باید توسط یک غشای مایع عمل‌آوری شود. اگر مقاومت ۷ روزه کم‌تر از ۵/۵ مگاپاسکال (۸۰۰ psi) باشد، یک لایه دیگر از ترکیب عمل آورنده به عنوان لایه جدا کننده به کار می‌رود. اگر مقاومت بالاتر برود، مصالح سنگی با دانه‌بندی باز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۳-۲-٤- زیراساس و اساس تثبیت‌شده با قیر

تولید، اجراء، کنترل و تأیید اساس تثبیت‌شده با قیر مشابه لایه روسازی آسفالتی با کیفیت بالا است. کوهن و تایابجی درباره اجرای اساس تثبیت شده با قیر این گونه بیان می‌کنند:

- اگرچه برخی از ماشین‌آلات می‌توانند لایه‌ها را تا ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) متراکم کنند اما ضخامت لایه‌ها معمولاً به ۱۲۵-۱۰۰ میلی‌متر (٤-۵ اینچ) محدود می‌شود.
- میزان تراکم را با دستگاه چگالی‌سنج هسته‌ای کنترل نمایید.
- با مغزه‌گیری، ضخامت و درصد فضای خالی لایه را تعیین نمایید.
- اگر دما زیر ٤°C (٤۰°F) باشد اجراء را متوقف نمایید.
- در شرایط تابستانی، دمای سطح اساس قیری می‌تواند از ٦۰°C (۱٤۰°F) فراتر رود که امر موجب ترک‌های زودرس و افت زیاد در روسازی بتنی می‌شود. این لایه‌ها باید قبل از اجرای روسازی بتنی با محلول آب آهک شستشو داده شوند

تا دمای آن‌ها کاهش یابد.

- هرگز با ماشین فِرز سطح را تراش ندهید چرا که بین بتن و آن سطح قفل‌وبست ایجاد می‌شود و خطر ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد.

۱۳-۲-۵- اساس نفوذپذیر

اساس نفوذپذیر از سنگدانه‌های شکسته با کاهش مقدار مصالح ریزدانه تهیه می‌شود. مصالح در دو دسته قرار می‌گیرند: تثبیت‌شده و تثبیت نشده. زیراساس تثبیت شده که برای عملیات اجرایی، سطحی مستحکم را فراهم می‌کند، از سیمان (با عیار ۱۱۸-۱۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب) و یا با آسفالت (۲ تا ۲/۵ درصد وزنی) تهیه می‌شوند.

موارد مهم در این زمینه عبارتنداز:

- مصالح زیراساس نفوذپذیر معمولاً توسط دستگاه اجرای روسازی و یا کامیون پخش می‌شوند.
- لایه‌ها به صورت ملایم غلطک زده می‌شوند و معمولاً یک تا سه دور با غلطک چرخ آهنی ٤ تا ۱۰ تنی در حالت استاتیکی غلطک زده می‌شوند.
- زیراساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با سیمان را با آب‌پاشی یا صفحات پلی‌اتیلن برای ۳ تا ۵ روز عمل‌آوری نمایید.

همان طور که در فصل ٤ ذکر شد، لایه‌های زهکشی ممکن است به صورت تثبیت‌شده یا تثبیت‌نشده باشند. برای انجام عملیات اجرایی، لایه زهکشی به وسیله سیمان یا قیر تثبیت می‌شود تا ثبات بیش‌تری را حین ساخت فراهم آورد. ضخامت این لایه‌ها معمولاً ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر است. استفاده از لایه زهکش تثبیت نشده برای هواپیماهای پهن‌پیکر توصیه نمی‌شود. اجرای لایه زهکش عمیق میزان تنش را در لایه‌های موجود کاهش می‌دهد.

اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با سیمان مشابه بتن معمولی در کارخانه مرکزی یا در مخلوط‌کن ثابت تولید می‌شود. به دلیل فقدان ریزدانه و جلوگیری از جدا شدن سنگدانه‌ها، کاهش میزان حمل و محدود کردن ارتفاع بتن‌ریزی دارای اهمیت است. مصالح را می‌توان با ماشین‌های پخش‌کن و یا ماشین اجرای روسازی آسفالتی با میله‌های کوبنده زوج (اگر سنگدانه‌ها نشکنند) در سطح مسیر اجراء کرد. برای اطمینان از تراکم مناسب، ضخامت لایه باید ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر باشد. اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی معمولاً با غلطک استاتیکی متراکم می‌شود، به طوری که پس از ۳۰ دقیقه، اختلاط مصالح آغاز می‌شود و پس از اتمام اختلاط نیز تا ٦۰ دقیقه عملیات تراکم انجام می‌شود. مصالح

سنگی با دانه‌بندی باز باید به عنوان لایه جدا کننده اجراء شود و با دو بار رفت و برگشت غلطک لرزاننده متراکم شود. قطعات آزمایشی هم برای اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده سیمانی و هم اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر مورد نیاز است تا مصالح، روش‌های اجرایی و مشخصات لازم بررسی شوند. اجراء و حمل مصالح مانند آسفالت معمولی است ولی برای جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها یک سیستم مخلوط مجدد توصیه می‌شود. اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر را با غلطک‌های چرخ لاستیکی متراکم می‌کنند که در آن نیازی به عمل‌آوری و اجرای لایه جدا کننده نیست. در تابستان، اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر می‌بایست قبل از اجرای روسازی بتنی با دوغاب آهک شسته شود. این اساس توسط کارخانه‌های اختلاط پیوسته یا منقطع تولید می‌شود.

۱۳-۲-۶- مسائل مرتبط با اساس تثبیت‌شده

اساس تثبیت‌شده تکیه‌گاه مستحکمی زیر روسازی بتنی فراهم می‌کند و تنش‌های خمشی ناشی از بارگذاری را کاهش می‌دهد. هرچند تنش‌های ناشی از پیچ‌وتاب و اعوجاج افزایش می‌یابد ولی می‌توان با کاهش فاصله بین درزها میزان آن را تقلیل داد. برش اره‌ای درز نیز می‌بایست کوتاه‌تر شده تا خطر ترک‌خوردگی تصادفی کاهش پیدا کند. حل مشکلات مربوط به اساس و زیراساس توسط کوهن و تایابجی مورد بحث قرار گرفته است.

فصل چهاردهم

اجرای روسازی

کیفیت عملیات اجرایی در روسازی مهم است. اگر یک روسازی با طرحی ضعیف خوب اجراء شده باشد، نسبت به همان روسازی که طراحی خوبی داشته ولی به طرز نامناسبی اجراء شود، احتمالاً عملکرد بهتری خواهد داشت. بنابرین به منظور فراهم کردن یک روسازی خوب نقش یک پیمانکار توانا به همراه ناظران و کارگران ماهر و با تجربه را نمی‌توان نادیده گرفت.

دو نوع اصلی از روسازی بتنی عبارت از روسازی با قالب لغزنده و روسازی با قالب ثابت است. هر دو روش مزایا و معایبی دارد و بسته به نوع پروژه می‌توان هر یک از آن‌ها را انتخاب کرد. هرچند در بسیاری از روسازی‌های با قالب لغزنده، انجام برخی از کارهای دستی ضروری است.

آیین‌نامه‌های مورد قبول ادارات راه، مانند FAA P-501 که بخشی از نشریه «استانداردهای لازم برای ساخت فرودگاه‌ها» است، AC 150/5370-10B و مشخصات اداره حمل‌ونقل اوهایو، بسیاری از جنبه‌های اجرای روسازی را مورد بحث قرار می‌دهند.

جزئیات اجرایی روسازی بتنی به همراه تصاویر بسیار توسط آشتو و FHWA، در قالب یک کتابچه راهنما تهیه شده است. می‌توان به صورت جداگانه یک لوح فشرده حاوی فایل پاورپوینت راهنما را از انجمن روسازی بتنی آمریکا خریداری کرد. عملیات انجام شده در کارخانه بتن در فصل پنجم آن مورد بحث قرار گرفته است. همچنین در مورد قالب‌های لغزنده در فصل ششم اشاره شده است.

۱٤-۱- ملاحظات مربوط به تولید بتن

تولید بتن و عملکرد کارخانه تولید کننده خارج از حوصله این کتاب است، ولی به هر حال برای داشتن کیفیت مناسب روسازی حائز اهمیت می‌باشد. شاید از جمله مهم‌ترین موارد، مصالح پای کار باشد که باید از لحاظ کیفی با پروژه سازگار بوده و نرخ تحویل آن ثابت باشد. این امر در قالب‌های لغزنده اهمیت ویژه‌ای دارد. چرا که حرکت مداوم دستگاه برای ایجاد یک روسازی هموار بسیار اهمیت دارد. همواری سطح روسازی دستخوش زمان انتقال بتن و سرعت کارکرد دستگاه اجرای روسازی است و در صورتی که کامیون‌های حمل بتن بر اثر سرعت زیاد انتقال در صف قرار بگیرند، کیفیت بتن کاهش خواهد یافت. می‌توان این گونه نتیجه گرفت که اجرای یک روسازی بتنی هموار و با دوام از کارخانه تولید بتن آغاز می‌شود.

یکی از کاربردی‌ترین مراجع ساخت بتن، راهنمای کمیته ACI 304 تحت عنوان «راهنمایی برای اندازه‌گیری، اختلاط، انتقال و بتن‌ریزی» است. هرچند این مرجع بتن ویژه روسازی نیست. اغلب کارخانه‌های تولید بتن آماده بازرسی و مورد تأیید قرار می‌گیرند تا بتوانند نیازهای آیین‌نامه‌ای بتن روسازی را پاسخگو باشند.

در بیشتر پروژه‌ها از کامیون و بتن آماده استفاده می‌شود. به طور مفصل در کتابچه انجمن روسازی بتنی آمریکا اختلاط بتن توسط کامیون مورد بحث قرار گرفته است. در پروژه‌های بزرگ ممکن است یک کارخانه مرکزی اختلاط بتن در نظر گرفته شود. کارخانه مرکزی تولید بتن توان تولید ۳۰۰۰ مترمکعب (۳۹۰۰ یاردمکعب) را در یک روز کاری ده ساعته دارد. عملکرد کارخانه مرکزی اختلاط بتن به همراه ملاحظات مربوط به محل استقرار آن‌ها در کتابچه انجمن روسازی بتنی آمریکا مورد بحث قرار گرفته است.

صرف‌نظر از ماشین‌آلات و روش‌های تولید مورد استفاده، کتابچه راهنمای آموزشی انجمن روسازی بتنی آمریکا بر اهمیت ارتباطات بین دستگاه‌ها، شامل اداره راه (کارفرما)، پیمانکار (خریدار)، کارخانه بتن آماده (تولید کننده بتن) و تیم آزمایش تأکید می‌کند. بتن مورد استفاده باید مناسب کار باشد و کیفیت آن به وضوح مشخص شود. پیمانکار باید به طور واقع‌گرایانه مقدار و سرعت انتقال بتن به پای کار را مشخص کند. تولید کننده باید کیفیت و سرعت تولید بتن را تضمین کند. این موارد باید توسط بخش‌های ذکر شده، در جلسه‌ای قبل از شروع عملیات اجرایی مورد بحث قرار گیرد.

در پروژه‌های بزرگ مانند احداث یک بزرگراه اصلی و یا باند فرودگاه که بیشتر از ۷ ماه به طول می‌انجامد، ممکن است توجه به ملاحظات فصلی و طرح اختلاط‌های مختلف بتن نیاز باشد. به منظور کاهش حرارت هیدراتاسیون در هوای گرم می‌توان از خاکستر

بادی یا سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده کرد. در صورت ادامه عملیات اجرایی در فصل پاییز، می‌توان از میزان مواد مذکور کاست و به منظور دستیابی به مقاومت مشخصه بتن و عدم تأخیر در پروژه میزان سیمان را افزایش داد.
جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها در هنگام حمل مصالح سنگی و بتن نیز حائز اهمیت است. جداشدگی به معنای تفاوت در میزان مصالح تشکیل دهندهٔ بتن از جمله مصالح سنگی است که باعث عدم یکنواختی بتن در قسمت‌های مختلف آن می‌شود. با کنترل و بازرسی توده مصالح سنگی و دقت در تولید، انتقال و بتن‌ریزی می‌توان از جداشدگی جلوگیری کرد.
مطابق فصل ٦، نسبت اختلاط بتن براساس شرایط اشباع با سطح خشک انجام می‌شود و باید با توجه به رطوبت حقیقی سنگدانه‌ها آن را تعدیل کرد. در صورت تغییر رطوبت سنگدانه‌ها حین تولید بتن، میزان رطوبت باید به گونه‌ای جبران شود تا اسلامپ تغییر نکند. برای نظارت بر رطوبت مصالح سنگی درون مخازن از رطوبت‌سنج استفاده می‌شود. معمولاً میزان رطوبت ریزدانه‌ها بحرانی‌تر از رطوبت سنگ‌های درشت‌دانه‌ها است.

١٤-٢- اجرای روسازی با قالب لغزنده

به گفته انجمن روسازی بتنی آمریکا، اجرای روسازی با قالب لغزنده عبارت از متراکم‌شدن، به صورت یک شکل هندسی درآمدن و پرداخت نهایی سطوح افقی و قائم بتن با لغزاندن یا کشیدن مداوم قالب و احاطه حجم مشخصی از بتن تازه در آن است. اجرای روسازی بتنی در یک راه با استفاده از قالب لغزنده، ابزار شکل دهنده، تحکیم و هموار کننده انجام می‌شود که بر روی یک ماشین خود جلو رونده تعبیه شده است.
در اجرای روسازی با قالب لغزنده از بتن با اسلامپ پایین استفاده می‌شود. این روش امکان تولید روسازی را با حجم بالا و یک سطح بسیار هموار فراهم می‌کند. اجرای روسازی با قالب لغزنده یک عملیات اجرایی فشرده بوده و با آن می‌توان تا ١/٦ کیلومتر (١ مایل) از مسیر را در یک روز به پیش برد. شکل ١٤-١ یک ماشین اجرای روسازی با قالب لغزنده و شکل ١٤-٢ یک روسازی اجراء شده با قالب لغزنده را نشان می‌دهد. شکل‌های ١-٢ و ١-٣ نیز این نوع روسازی بتنی را نشان می‌دهند.

شکل ١٤-١: ماشین اجرای روسازی با قالب لغزنده (ACPA 1996a: VI-6)

کوهن و تایابجی برخی از ویژگی‌های معمول ماشین‌آلات اجرای روسازی با قالب لغزنده را بیان کرده‌اند:

- به صورت خود جلو رونده با دو یا چهار کامیون هستند.
- وزن معمول آن‌ها در محدوده ۳۰۰۰ کیلوگرم بر متر در عرض خط عبور است.
- عموماً عرض آن‌ها ۱۱-۸ متر (۳۷/۵-۲۵ فوت) است، اگرچه بعضی از آن‌ها می‌توانند تا عرض ۱۵-١٤ متر (٤٥ تا ۵۰ فوت) روسازی اجراء کنند.
- برای تحکیم روسازی دارای یک ردیف از لرزاننده با سرعت متغیر و کنترل هیدرولیکی هستند.
- توانایی حمل بتن را تا جلوی شمشه تراز دارند.
- استفاده از پره‌های پیوسته یا وسایل مشابه دیگر برای توزیع و پخش یکنواخت بتن در جلوی شمشه تراز.
- دارای ملحقات ویژه پرداخت نهایی هستند.

شکل ١٤-٢: روسازی بتنی تولید شده با استفاده از قالب لغزنده (ACPA 1996a: VI-6)

برش طولی بستر روسازی باید در محدوده قابل قبولی باشد. حتی اگر تثبیت بستر روسازی برای تقویت ساختار روسازی لازم نباشد، یک بستر روسازی تثبیت‌شده عملیات حمل مصالح را آسان‌تر می‌نماید و به تراکم لایه‌های اساس و زیراساس (در صورت وجود) کمک می‌کند. گاهی ممکن است تیغ‌زنی بستر روسازی برای رسیدن به حدود رواداری قابل قبول لازم باشد.

تعبیه زهکشی کافی و مناسب در طول عملیات ساخت بسیار اهمیت دارد. مصالح لایه‌های اساس و زیراساس نیز باید به دقت پخش، متراکم و هموار شوند. لایه‌های اساس و زیراساس تثبیت‌شده را می‌توان با استفاده از دستگاه‌های اجرای روسازی پیاده کرد.

به طور کلی تراز نهایی رویه روسازی با استفاده از ریسمان کار تنظیم می‌شود. برای رسیدن به تراز نهایی روسازی، حس‌گرهای موجود بر روی دستگاه روسازی در امتداد این ریسمان کار حرکت می‌کند. ریسمان کار می‌تواند از جنس سیم، کابل، نایلون تنیده، طناب پلی‌اتیلنی و یا هر ماده مشابه دیگری باشد. ریسمان کار به میله‌های چوبی سخت متصل می‌شود و باید به اندازه کافی محکم کشیده شود تا احتمال منحنی‌شدن آن‌ها از بین برود. به طور کلی، میله‌های چوبی نباید با فاصله بیش از ۸ متر (۲۵ فوت) از یکدیگر قرار بگیرند و این فاصله در قوس‌های افقی و قائم باید کم‌تر باشد. در شرایط مشابه، افزایش فاصله تیرهای چوبی تا ١٦ متر (۵۰ فوت) نیز مجاز است. ممکن است از یک ریسمان کار تک در هر طرف دستگاه روسازی و یا از یک ریسمان کار دوتایی در دو

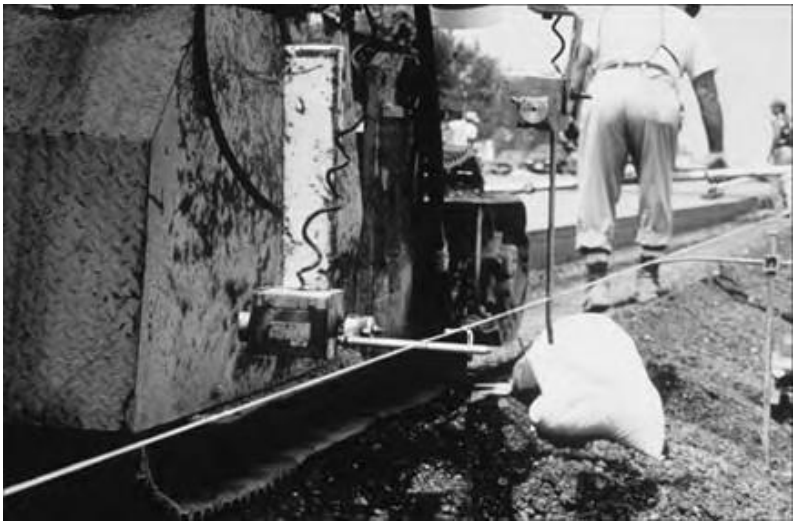
طرف استفاده شود. ریسمان کار قبل از انجام عملیات روسازی باید به دقت بازرسی شود تا از عدم جابه‌جایی آن اطمینان حاصل شود. تغییرات دما و رطوبت ممکن است باعث ایجاد خیز در ریسمان کار شود. شکل ١٤-٣ ریسمان کار و میله حسگر دستگاه روسازی را نشان می‌دهد.

اخیراً، دستگاه‌های روسازی فاقد ریسمان کار تولید شده است که برای حفظ هندسه مناسب روسازی، از مطالعات کلی روسازی استفاده می‌کنند.

دستگاه اجرای روسازی بر روی خط بیرونی از لبه تمام شده روسازی حرکت می‌کند، که این مسیر عموماً خط حرکت[1]، خط سیر[2] و یا خط قالب[3] نامیده می‌شود. خط حرکت در شکل ١٤-٤ نشان داده شده است.

به منظور فراهم آوردن تکیه‌گاه مناسب برای دستگاه اجرای روسازی، مصالح خوب متراکم شده اساس، باید به اندازه ۱ متر (۳/۳ فوت) از کنار لبه خارجی روسازی امتداد پیدا کنند. این مسیر باید به اندازه کافی بادوام باشد تا امکان عبور و مرور آسان را برای ماشین‌آلات اجرای روسازی، از جمله تجهیزات ایجاد بافت سطحی و دستگاه‌های عمل‌آورنده بتن را فراهم کند. اگر قرار باشد از زهکش‌های کناری استفاده شود، باید آن‌ها را بعد از انجام عملیات روسازی اجراء کرد تا این که ماشین‌آلات اجرای روسازی به آن‌ها صدمه‌ای وارد نکند. خط حرکت باید به دقت نگهداری شده و عاری از هرگونه مواد زاید نگه داشته شود. لازم است تا قبل از انجام عملیات روسازی، تجهیزات اجرایی به دقت تنظیم شده و تراز قسمت‌های الحاقی دستگاه بررسی شود. معمولاً یک دستگاه پخش کننده پیشرفته، دارای یک تسمه تخلیه، تعدادی پروانه و یک سامانه شخم‌زن[4] است. حصول اطمینان از عملکرد درست حسگرها و نبود نشت روغن هیدرولیکی حائز اهمیت است. محل قرارگیری چرخ ماشین‌آلات روسازی باید به طور منظم تنظیم شود تا از حرکات مورب جلوگیری به عمل آید. حالت یا زاویه قرارگرفتن دستگاه اجرای روسازی، می‌تواند تأثیر بسزایی در همواری سطح روسازی داشته باشد.

1- Pad Line
2- Track Line
3- Form Line
4- Plow System



شکل ١٤-٣: ریسمان کار و میله حسگر دستگاه اجرای روسازی (ACPA 1996a: VI-15)

شکل ١٤-٤: خط مسیر (ACPA 1996a: VI-20)

همان طور که در شکل ١٤-٥ نشان داده شده است، برای تحکیم بتن در قالب‌های لغزنده از ویبراتورهای داخلی استفاده می‌شود. این ویبراتورها به منظور خروج فضای خالی نامطلوب، توده بتن را تحکیم و با روان‌سازی، به شکل‌گیری نهایی روسازی کمک می‌کند. نحوه قرارگیری و تعداد مناسب ویبراتورها از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً

ویبراتورها برای ۹۰۰۰–۷۰۰۰ لرزش در دقیقه تنظیم می‌شوند. فاصله افقی ویبراتورها باید به گونه‌ای باشد تا ناحیه تأثیر ویبراتورهای مجاور به میزان ۷۵–۵۰ میلی‌متر (۳–۲ اینچ) هم‌پوشانی داشته باشد. جزئیات لازم برای تنظیم صحیح و نگهداری از ویبراتورها در کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا ارائه شده است.

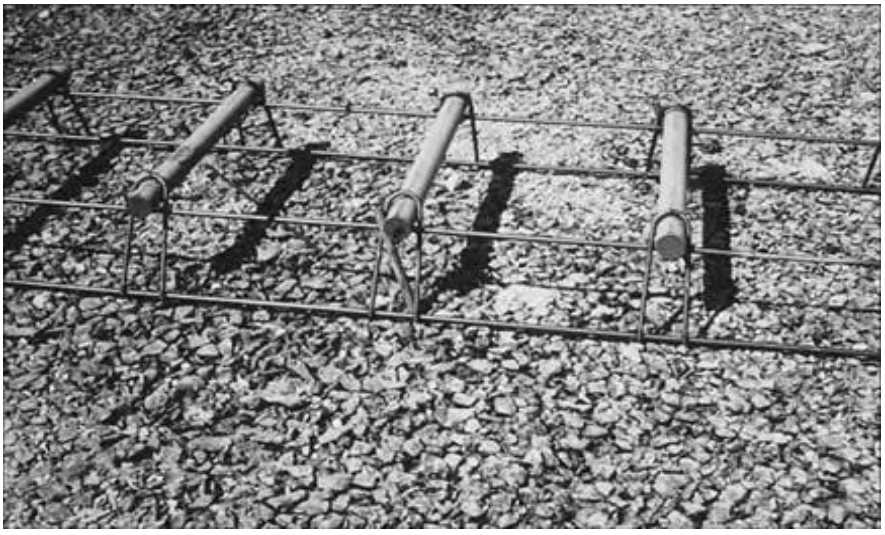
در روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، میلگردهای اتصال را با بافتن سبد و یا جایگذاری میلگردهای اتصال جاسازی می‌کنند. سبد میلگردهای اتصال، بافته‌های سیمی سنگینی هستند که قبل از اجرای روسازی بتنی در زیراساس و یا بستر، محکم بسته می‌شوند. استحکام این شبکه‌ها باید به قدری باشد که در طی عملیات اجرای روسازی حرکت نکنند. شکل ١٤–٦ یک سبد میلگرد اتصال را نشان می‌دهد. میلگردهای اتصال بایدبا لایه نازکی از روغن چرب شوند تا دال‌های بتنی بتوانند در زمان انبساط و انقباض به راحتی حرکت کنند.

شکل ١٤–٥: ویبراتور (ACPA 1996a: VI-26)

باید هنگام استفاده از این سبدها قبل از بتن‌ریزی به بررسی میل‌مهارها پرداخت تا از تراز بودن آن‌ها و مهارشدن سبدها در بستر، اطمینان حاصل شود. توصیه می‌شود سبدها توسط میله‌های فولادی که دارای حداقل ۷/۵ میلی‌متر (۰/۳ اینچ) قطر هستند، در لایه اساس مهار شوند. برای این منظور، بایدمیله‌ها در عمق حداقل ۱۰۰ میلی‌متری (٤ اینچ) در اساس تثبیت شده و ٦ اینچ (۱۵۰ میلی‌متر) در اساس نفوذپذیر تثبیت شده و ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) در اساس نفوذپذیر تثبیت نشده، اساس سنگدانه‌ای و بستر طبیعی زمین فرو

روند. حداقل ۸ میله فولادی برای هر سبد توصیه شده است. بایدسیم‌های موقت کشیده شده در طول درزها برداشته شوند. بستن این میله‌ها به بالای سبد میلگرد اتصال و امتداد آن‌ها به پایین باید باعث ثابت شدن سبد در جای خود، پس از برداشتن سیم‌های موقت شود.

باید میلگردهای اتصال را در تمام طولشان با کمی روغن یا ماده مشابه دیگر روغن‌کاری کرد تا از چسبیدن آن‌ها به بتن جلوگیری شود. لایه چربی به دلیل مجاورت با جوشکاری در محل اتصال از بین می‌رود. پوشانیدن نصف میل‌مهار با روغن غالباً مشکلاتی به همراه دارد که در درجه اول، مشکلات ناشی از روغن ناکافی و یا تراز نبودن میلگردهای اتصال است.



شکل ١٤-٦: سبد میلگردهای اتصال (ACPA 1996a: VI88)

میلگردهای اتصال باید بتوانند آزادانه در داخل بتن بلغزند تا امکان حرکت مستقل دو دال فراهم و در نتیجه از ایجاد تنش‌های اضافی در روسازی جلوگیری شود. تنها یک لایه نازک از پوشش روغنی باید استفاده شود، زیرا ممکن است پوشش‌های ضخیم سبب ایجاد فضای خالی زیاد در اطراف میلگردهای اتصال شود.

جایگذاری میلگردهای اتصال، نیاز به سبدهای بافته شده را برطرف می‌کند. همان طور که در شکل ١٤-٧ نشان داده شده است، میلگردهای اتصال بلافاصله بعد از بتن‌ریزی در داخل بتن‌های تازه فرو برده می‌شوند. در این میان علامت‌گذاری دقیق درزها برای برش اره‌ای حائز اهمیت است.

جایگذاری میلگردهای اتصال باید بلافاصله پس از شروع روسازی با دقت مدنظر قرار بگیرد. اگر رواداری‌های تعیین‌شده برآورده نشد، باید یک ارزیابی از نصب میلگردهای اتصال، طرح اختلاط بتن و روش‌های جایگذاری صورت گیرد. برای اطمینان از تراز بودن تجهیزات انتقال بار در روند اجرای روسازی اصلاحات لازم باید انجام گیرد.

میل‌مهارها در طول درزهای طولی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این میلگردها را می‌توان قبل از اجرای روسازی بر روی خَرَک‌هایی قرار داد و یا در داخل بتن‌های آماده فرو کرد. میلگردها یا شبکه‌های تقویتی برای روسازی بتنی مسلح درزدار را می‌توان با اجرای دولایه بتن جایگذاری کرد، به طوری که میلگردها بر روی اولین لایه جایگذاری می‌شوند. متناوباً، ممکن است این میله‌ها با یک دستگاه فروبرنده شبکه به داخل بتن تازه فرو روند. همان طور که در فصل ۲ بیان شد، امروزه روسازی بتنی مسلح درزدار کم‌آرماتور چندان کاربرد ندارد.

شکل ١٤–٧: جایگذار میلگردهای اتصال (ACPA 1996a:VI-32)

آرماتورهای روسازی بتنی مسلح یکپارچه را می‌توان بر روی خرک‌ها سوار یا از تغذیه کننده لوله‌ای استفاده کرد. خرک‌ها محل مناسب آرماتورها را تضمین کرده و خود مانند آرماتور عرضی عمل می‌کنند. تغذیه کننده لوله‌ای در شکل ١٤–٨ نشان داده شده است. باید اطمینان حاصل کرد که ویبراتورهای دستگاه اجرای روسازی با آرماتورها برخوردی نداشته باشد.

شکل ١٤-٨: نصب آرماتور CRCP به وسیله تغذیه کننده لوله‌ای (ACPA 1996a:VI-37)

عامل بسیار مهم در اجرای یک روسازی بتنی با سطح هموار، حرکت ثابت ماشین‌آلات اجرای روسازی است. به‌علاوه، یکنواختی درصد مصالح، آب، فشار ثابت و ویبره بتن بسیار اهمیت دارد. به طور خلاصه، ویژگی‌های اساسی برای اجرای یک سطح بتنی هموار با قالب لغزنده عبارت از یکنواختی در پخش، کمیت، کیفیت و حرکت می‌باشد. سرعت طبیعی اجرای روسازی، ۱ تا ۲/۵ متر (۳/۳ تا ۸/۲ فوت) در هر دقیقه است. برای تحکیم بتن در برخی از دستگاه‌های روسازی از کوبنده‌های میله‌ای استفاده می‌شود.

در پایان روز کاری، درزهای اجرایی به سرصفحه نیاز پیدا می‌کنند و باید روسازی را کمی جلوتر از درز اجرایی به پایان رسانید. در روسازی بتنی مسلح یکپارچه باید سرصفحه مورد بازرسی قرار بگیرند تا از پیوستگی آرماتورها اطمینان حاصل شود.

لیستی از ملاحظات مهم اجرایی روسازی بتنی با قالب لغزنده در کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا ارائه شده است. همچنین نکات مربوط به رفع اشکال این نوع روسازی در فصل چهارم همان کتابچه در صفحات ٦٢ تا ٦٤ ذکر شده است.

١٤-٣- اجرای روسازی با قالب ثابت

در این روش از قالب‌های تثبیت شده در بستر یا اساس استفاده می‌شود تا بتن‌ریزی در آن‌ها صورت بگیرد. علاوه بر این که لبه بالایی قالب شیب و تراز روسازی را شکل می‌دهد، به عنوان مسیر ماشین‌آلات اجرای روسازی نیز به کار گرفته می‌شود. اجرای

روسازی با قالب ثابت در شکل ١٤-٩ نشان داده شده است. اجرای روسازی با قالب ثابت برای خیابان‌ها، جاده‌های محلی، فرودگاه‌ها و روسازی‌هایی که دارای هندسه پیچیده‌ای هستند، طول کوتاه و یا عرض متغیر دارند، انجام می‌شود.
شکل ١٤-٩ سبد میلگردهای اتصال و میل‌مهارهای نصب شده را به همراه قالب‌ها و ماشین‌آلات اجرای روسازی نشان می‌دهد.

مزایای قالب ثابت روسازی عبارتند از:

- توانایی اجرای روسازی با رواداری محدود و پاکسازی جانبی.
- سهولت در تغییر عرض روسازی.
- محفظه‌های تأسیسات درون روسازی بتنی را می‌توان به آسانی اداره کرد.

در محل تقاطع در حالی که بخشی از ترافیک جریان و یا سایر موقعیت‌های دشوار ترافیکی وجود دارد، می‌توان به اجرای روسازی پرداخت.

- زمانی که پخش بتن متغیر است، می‌توان کمیت را حفظ کرد.
- این نوع روسازی را می‌توان با تجهیزات کوچک و کم هزینه اجراء کرد.

مهم‌ترین و اساسی‌ترین عیب قالب‌های ثابت روسازی این است که میزان تولید آن‌ها در شرایط ایده‌آل خیلی کم‌تر از روسازی با قالب‌های لغزنده است. البته تمام پروژه‌ها شرایط ایده‌آل اجرای روسازی با قالب‌های لغزنده را ندارند.
قالب، کلید موفقیت اجرای روسازی با قالب ثابت می‌باشد. قالب متداول روسازی، یک مقطع پیچیده فولادی است که ارتفاعی برابر با ضخامت روسازی دارد. برای حفظ پایداری قالب از پایه‌ای مسطح و عریض استفاده می‌شود که ریل فوقانی محکمی به عنوان تکیه‌گاه تجهیزات اجرای روسازی در آن تعبیه شده است. حفره‌های موجود نیز برای اتصال قالب به بستر یا زیراساس است. این قالب‌ها در شکل ١٤-١٠ نشان داده شده‌اند.
کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا خصوصیات و مشخصات معینی را برای قالب‌های روسازی مقرر کرده است:

- فولاد با حداقل قطر ۵/٦ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ) و طول ۳ متر (۱۰ فوت) استفاده می‌شود.
- عمق قالب برابر با ضخامت روسازی است.
- عمق قالب ممکن است با ساخت کف قالب تا ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) افزایش پیدا کند.
- وجوه فوقانی قالب‌ها نباید در طول ۳ متر (۱۰ فوت) بیش از ۳ میلی‌متر (۰/۱۲۵ اینچ) در جهت قائم اختلاف داشته باشد.

- وجوه قالب نباید بیش از ٦ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ) در ۳ متر (۱۰ فوت) در جهت افقی از سطح ثابت اختلاف داشته باشد.
- قالب‌ها باید به صورت محکم به هم قفل شده و پس از جایگذاری تراز شوند.
- پایه قالب باید دارای عرض کافی برای تأمین پایداری آن باشد.
- مهارهای بال قالب باید به اندازه دوسوم عمق قالب در اساس فرو برود.

شکل ١٤-٩: اجرای روسازی با قالب‌های ثابت (ACPA 1996a:VI-68)

شکل ١٤-١٠: قالب‌های فولادی به منظور اجرای روسازی با قالب ثابت (ACPA 1996a: VI-72)

قالب‌ها باید قبل از استفاده تمیز و روغنکاری شوند و از قالب‌های خم شده، تابدار و شکسته شده نباید استفاده کرد. هر ۳ متر (۱۰ فوت) قالب باید به وسیله حداقل دومیخ آهنی محکم شده باشد. تنظیمات جزئی را می‌توان با گوه‌هایی در محل میخ‌های آهنی انجام داد. در قوس‌های تیز از قالب‌های انعطاف پذیر فولادی یا چوبی مشابه مشخصات قالب‌های فولادی استفاده می‌شود.

با وجود این که اساس با قالب ثابت نسبت به قالب لغزنده کم‌اهمیت‌تر و غیرحیاتی‌تر است ولی یک اساس خوب، عملکرد روسازی را بهبود خواهد بخشید. معمولاً برای کار گذاشتن قالب‌ها از ریسمان کار استفاده می‌شود. قبل از اجرای روسازی باید قالب‌ها را از نظر تراز بودن کنترل کرد و از استحکام و هموار بودن اتصالات آن مطمئن شد.

جزئیات روسازی با قالب ثابت شامل میل‌مهارها، قوس‌ها، جدول‌های کناری و محفظه تأسیسات می‌باشد. میل‌مهارها را می‌توان مستقیماً توسط اتصالات طولی محکم کرد. در قوس‌ها می‌توان از قالب‌های فولادی مستقیم استفاده کرد مگر این که شعاع قوس کم‌تر از ۳۰ متر (۱۰۰ فوت) باشد. در غیر این صورت، باید از قالب‌های فولادی منحنی مخصوص یا قالب‌های چوبی استفاده کرد. جدول‌ها را می‌توان با دست یا وسایل مخصوص ساخت جدول تولید کرد. سازه‌های تأسیساتی (دریچه آب، برق، گاز و ...) و سازه‌های فاضلاب معمولاً قبل از اجرای روسازی، به یک محفظه نیاز دارند. به منظور جلوگیری از ترک‌خوردگی‌های تصادفی، در صورت استفاده از محفظه‌های مزبور در روسازی بکارگیری درزهای مخصوص ضرورت پیدا می‌کند.

محفظه تأسیساتی متداول در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده است. در صورتی که در زمان افت بتن این محفظه‌ها باعث گیرداری درونی شوند، ترک‌هایی از گوشه‌های آن ایجاد می‌شود و گسترش پیدا می‌کند. بنابراین، اجرای درزهایی برای کنترل ترک در این نقاط لازم است. یکنواختی بتن یکی از نکات کلیدی در بتن‌ریزی، تحکیم و پرداخت نهایی است. دستگاه تحکیم بتن شامل یک پخش کننده با ویبراتورهای نصب شده و تجهیزات پرداخت نهایی است. در پروژه‌های کوچک‌تر تنها از دستگاه پرداخت نهایی استفاده می‌شود، اما در پروژه‌های بزرگ دستگاه‌های پخش یا پرداخت نهایی چندگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای بتن‌ریزی سطوح کوچک و مجزا، از ماشین‌آلات کوچک استفاده می‌شود و یا این که بتن‌ریزی را با دست انجام می‌دهند. در این صورت برای یکنواختی در بتن‌ریزی، دقت کافی در پخش و ویبره کردن ضروری است. استفاده از جداول هدایت آب نیز لازم است. عمل‌آوری، اجرای درزها و آب‌بندی روسازی بتنی با قالب ثابت، مشابه روسازی بتنی با

قالب لغزنده است. پس از برداشتن قالب‌ها، باید با ماده شیمیایی عمل آورنده، کناره روسازی را اسپری کرد. اگر دقت کافی به کار رفته باشد، قالب‌ها را می‌توان ٦ تا ٨ ساعت بعد از اجرای روسازی برداشت. پس از قالب‌برداری، باید بلافاصله قالب را تمیز و با دقت نگهداری کرد.

براساس کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا عوامل زیر در کیفیت سواری روسازی اجراء شده با قالب ثابت دارای اهمیت هستند:

شکل ١٤-١١: محفظه برای تأسیسات، زهکشی و سازه‌های مشابه (ASPA 1996a: VI-91)

- قبل از بتن‌ریزی، بستر یکنواخت، متراکم و مرطوب شده باشد.
- مشخصات لازم قالب‌ها می‌بایست برآورده شده و خوب روغنکاری و کاملاً تراز شوند.
- اجرای روسازی در محل محفظه‌ها و لوازم تأسیساتی می‌بایست به دقت انجام شود.
- سبد میلگردهای اتصال و آرماتورها (در صورت وجود) باید به درستی اجراء شوند.
- بتن باید دارای کیفیت مناسب باشد و با سرعت مناسبی به پای کار انتقال داده شود.
- برای رسیدن به تحکیم کافی در اطراف سبدهای میلگرد اتصال و محفظه‌های

درون روسازی بتنی باید دقت دقت زیادی شود.
- پرداخت و عمل‌آوری روسازی می‌بایست به درستی انجام شود.

۱۴-۴- دستگاه‌های اجرای روسازی عرشه پل

برخی از روسازی‌های فرودگاه با استفاده از دستگاه‌های اجرای روسازی عرشه پل ساخته می‌شوند. کوهن و تایابجی برخی از خصوصیات این دستگاه‌ها را به صورت زیر مطرح می‌کنند:
- برای پخش بتن دارای سیستم خرپایی با یک پره مارپیچ معلق و به منظور تحکیم و پرداخت سطح دارای یک ویبراتور نوسانی و یک غلطک می‌باشد.
- می‌توان یک وسیله فرم دهندهٔ سطح بتن در ادامه سیستم غلطک اضافه کرد.
- بر روی قالب‌ها یا چرخ‌های خود حرکت می‌کند.
- دارای ویبراتورهایی در جلوی شمشه تراز است که می‌تواند به طور عرضی حرکت کند و یا ویبراتورهای ثابتی در مجاورت لبه قالب وجود داشته باشد.
- وزن آن‌ها معمولاً کم‌تر از ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر (۱۰۰۰ lb/ft) است.
- نسبت به دستگاه روسازی با قالب لغزنده ظرفیت تولید خیلی کم‌تری دارد.
- در روسازی‌های با عرض ۱۲ تا ۱۵ متر (۴۰ تا ۵۰ فوت) خیلی مقرون به صرفه هستند.

۱۴-۵- برنامه‌ریزی و رفع عیوب

آماده‌سازی مناسب تدارکات و تجهیزات کار در روسازی راه، بهترین روش اجرای هموار و به دور از عیب و نقص روسازی است. برخی از این موارد به شرح زیر است:
- تمام تجهیزات دستگاه اجرای روسازی قادر به خدمت‌دهی هستند.
- سطح کار برای آغاز روسازی مناسب باشد.
- تمام گزارش‌های لازم برای پذیرش مصالح به کار رفته در پروژه در دست باشد.
- تجهیزات پشتیبانی لازم برای انجام آزمایش‌ها فراهم باشد.
- تمام تجهیزات لازم برای بتن‌ریزی موجود باشد.
- امکان ارتباطات لازم میان کارکنان بخش بتن‌ریزی و کارخانه تولید بتن موجود باشد.
- در صورت لزوم ماشین‌آلات مرطوب کننده بالای کار موجود باشد.

- ریسمان کار به هنگام ساخت بررسی شود تا کاملاً مستقیم و کشیده باشد.
- در پایان روز کاری سرصفحه‌ها در پایان کار قرار گیرند.
- پیش‌بینی‌های لازم در مورد آب‌وهوا انجام شده باشد.
- در صورت ریزش باران‌های غیرمنتظره و ناگهانی پوشش پلاستیکی برای حفاظت از روسازی موجود باشد.

وضعیت ماشین‌آلات نیز دارای اهمیت است:

- با توجه به اثرگذاری بر نرخ تولید روسازی بتنی با قالب لغزنده، کامیون‌های حمل بتن باید به اندازه کافی موجود باشد. اگر به دلیل نرسیدن به موقع بتن سرعت دستگاه اجرای روسازی کم یا متوقف شود، سطح تمام شده ناهموار خواهد شد.
- اره‌های برش بتن باید به تعداد کافی موجود باشد. زیرا در صورت شکستن پنجره‌های برش درز[1] باید جایگزینی برای آن‌ها در نظر گرفت. همچنین تیغه‌های اره باید برای مصالح سنگی بتن مناسب باشند.
- ویبراتورهای دستگاه اجرای روسازی با قالب لغزنده زمانی که تحت بار نیستند، باید دارای فرکانس ٦۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه و دامنه ۰/٦ تا ۱/۳ میلی‌متر (۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ اینچ) باشند. این ویبراتورها باید به اندازه کافی بالا نگه داشته شوند تا با آرماتورها یا سبدهای میلگردهای اتصال تماس نداشته باشند.
- تجهیزات عمل‌آوری بتن باید بازرسی شوند تا ترکیبات عمل آورنده را به طور یکنواخت و با نرخ مناسب بر روی بتن اجراء کنند.

١٤-٦- اجرای روسازی بتنی زودگیر

در برخی پروژه‌ها، اجرای روسازی راه باید با سرعت بیشتری انجام شود. اجرای تسریع شده مستلزم ایجاد تغییراتی در برنامه‌ریزی، طراحی و مصالح استفاده شده می‌باشد.
راهنمای ACI 325.11R دستورالعمل‌های لازم در این رابطه را ارائه داده است. موارد مربوط به کنترل ترافیک در نشریه «مدیریت ترافیک- کتابچه بهسازی و بازسازی روسازی بتنی، ابلاغیه مهندسی EB213P» ارائه شده است.
برای فرودگاه‌ها، دو مطالعه موردی در دو جلد توسط IPRF چاپ شده است.
ملاحظات مخلوط بتن برای اجرای روسازی بتنی زودگیر در فصل ٦ مورد بحث قرار

1- Joint Sawing Windows

گرفته و در جدول ٦-١ نشان داده شده است. در بسیاری از موارد، روسازی بتنی معمولی ظرف مدت چند روز استحکام لازم را برای بازگشایی به روی ترافیک بدست می‌آورد.

١٤-٦-١- آزمایش رسیدن بتن

زمانی که بتن تندگیر یا بتن با مقاومت اولیه بالا در ساخت روسازی راه مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید به سرعت به روی ترافیک باز شود، حتماً باید مقاومت آن به تأیید برسد. نرخ افزایش مقاومت بتن تا حد زیادی به نرخ هیدراتاسیون بتن و متعاقب آن به شرایط دمایی بستگی دارد. بتن در هوای گرم به سرعت خود را می‌گیرد و در هوای سرد سرعت گیرش آن کم‌تر است. زمانی‌که مقدار سیمان بتن زیاد باشد و از افزودنی‌های زودگیر نیز استفاده شود و سطح بتن با پوشش‌های عمل آورنده پوشانیده شود، انتظار می‌رود تا نرخ افزایش مقاومت بتن بیشتر باشد. نِویل بیان می‌کند: «از آنجایی که مقاومت بتن به زمان و دما بستگی دارد، می‌توان مقاومت را به صورت تابعی مانند (بازه زمانی×دما)$\sum$ دانست که به آن رسیدن بتن می‌گویند». دما با مبنای ١٠- درجه سانتی‌گراد یا ١٤ درجه فارنهایت اندازه‌گیری می‌شود که در دماهای پایین‌تر بتن مقاومت لازم را احراز نخواهد کرد. روش اندازه‌گیری رسیدن بتن این امکان را در اختیار قرار می‌دهد تا براساس تاریخچه دمای واقعی بتن بتوان مقاومت پیش‌بینی شده بتن را تنظیم کرد که این امر مستلزم دستیابی به یک رابطه «مقاومت- رسیدن بتن» برای یک مخلوط مشخص است. روند تهیه رابطه مقاومت- رسیدن بتن، در ASTM C1074 ارائه شده است. بنابراین برای ثبت دمای بتن به صورت تابعی از زمان دستگاهی لازم است. کلیات روند مذکور در ادامه ارائه شده است.

- حداقل ١٥ نمونه بتنی را با نسبت‌ها و مصالح مشابه بتن مورد استفاده در پروژه واقعی آماده کنید.
- سنسورهای حرارتی را حداقل در وسط دو نمونه قرار دهید و آن‌ها را به دستگاه ثبت رسیدن بتن وصل کنید.
- نمونه‌ها را برای عمل‌آوری در آب یا فضای مرطوب قرار دهید.
- بر روی نمونه‌های ١، ٣، ٧، ١٤ و ٢٨ روزه آزمایش مقاومت فشاری انجام دهید. در هر مرحله دو نمونه را آزمایش کرده و از دو مقدار بدست آمده میانگین‌گیری نمایید. اگر مقدار هر نمونه بیش از ١٠ واحد از میانگین محاسبه شده فاصله داشت، نمونه دیگری را آزمایش و میانگین سه آزمایش را اعلام کنید. اگر نتیجه آزمایش یکی از نمونه‌ها اختلاف زیادی داشته باشد، احتمالاً نمونه ناسالم بوده

است و باید نتیجه آن آزمایش را نادیده گرفت.

- شاخص استحکام هر نمونه را ثبت کنید.
- در هر سن، میانگین شاخص رسیدن بتن را برای نمونه‌ها ثبت کنید.
- بر روی یک نمودار، مقاومت متوسط را در مقابل مقدار میانگین شاخص رسیدن بتن ترسیم نمایید. بهترین منحنی ممکن را با توجه به داده‌های روی نمودار ترسیم کنید و از آن رابطه مقاومت- رسیدن بتن را بدست آورید.

دستورالعمل ASTM در رابطه با مقاومت فشاری در دسترس است اما برای روسازی، آزمایش تیر خمشی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. به منظور دستیابی به یک مقاومت مشخص برای مخلوط‌های مشخصی از بتن، شاخص رسیدن تعیین شود. به منظور ثبت تاریخچه دمای بتن و تعیین زمان لازم برای شاخص رسیدن، دماسنج‌های مختلفی به کار گرفته شود. بهتر است که آزمایش‌های تکمیلی رسیدن بتن به طور مجزا با یک دستگاه فیزیکی، مانند آزمایش سرعت پالس فراصوت نیز اندازه‌گیری شود تا از صحت مقدار آن اطمینان حاصل شود.

فصل پانزدهم

پرداخت نهایی، ایجاد بافت سطحی، عمل‌آوری، برش و آب‌بندی درزها

عملیات پایانی در اجرای روسازی بتنی عبارت از پرداخت نهایی، ایجاد بافت سطحی، عمل‌آوری و برای روسازی‌های بتنی درزدار، اجراء و آب‌بندی درزها است. برنامه‌ریزی و اجرای مناسب این مراحل اثرات مهمی در عملکرد روسازی خواهد داشت.

۱۵-۱- پرداخت نهایی و ایجاد بافت سطحی

با کشیدن یک گونی کرباسی دندانه‌دار که در پشت دستگاه اجرای روسازی قرار دارد، بافت سطحی ایجاد می‌شود. ممکن است برای انجام اصلاحات جزئی و رفع نواقص کوچک در سطح تمام شده بتن از یک لوله شناور استفاده شود. یک نکته کلیدی برای پرداخت نهایی سطح بتن، مدیریت آب است. عملیات پرداخت نهایی نباید تا زمان برطرف شدن آب انداختگی سطح بتن انجام شود. می‌توان از شناورهای طولی و عرضی نیز استفاده کرد. نواقص سطحی باقی‌مانده از ماله‌کشی دستی، توسط یک شاخص میله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در عملیات پرداخت نهایی نباید از آبی بیشتر از افشانه پخش‌شده بر روی بتن کمک گرفت.

نشست‌های لبه زمانی اتفاق می‌افتد که بتن برای نگه داشتن لبه خودش به اندازه کافی سختی نداشته باشد. هرچند می‌توان برخی از نشست‌های لبه‌ای را تا حدی با انجام عملیات دستی اصلاح کرد، اما بهتر آن است که مخلوط بتنی طوری تنظیم شود که از

همان ابتدا نشستی اتفاق نیفتد.
به منظور افزایش اصطلاک، اجرای بافت سطحی بتن با دندانه‌هایی انجام می‌شود. این دندانه‌ها ممکن است به صورت طولی یا عرضی باشد و شیارهایی به عمق ۵–۳ میلی‌متر (۰/۲–۰/۱۲۵ اینچ)، عرض ۳ میلی‌متر (۰/۱۲۵ اینچ) و فواصل ۲۰–۱۲ میلی‌متر (۰/۷۵–۰/۵ اینچ) ایجاد می‌کنند. بافت سطحی درشت با این دندانه‌ها و بافت سطحی ریز با کشیدن گونی‌های کرباسی و یا محصول دیگری به‌نام Astroturf ایجاد می‌شود. این دو مورد در شکل‌های ۱۵–۱ و ۱۵–۲ نشان داده شده است.

شکل ۱۵–۱: دندانه‌های عرضی برای ایجاد بافت سطحی درشت (ACPA 1996a: VI-53)

۱۵–۲– عمل‌آوری

روسازی‌های بتنی عموماً با اسپری کردن ترکیبات عمل آورنده حاوی رنگدانه‌های سفید یا بی‌رنگ عمل‌آوری می‌شوند. زمانی که بافت سطحی درشت ایجاد شد، باید ترکیبات عمل آورنده در دولایه رفت‌وبرگشتی بر روی سطح پیاده شود. در صورت بارندگی برای ممانعت از آسیب به سطح روسازی بتنی جدید، باید صفحات پلاستیکی تمیز در دسترس باشند.
FHWA اخیراً «راهنمای عمل‌آوری روسازی بتنی با سیمان پرتلند– جلد ۱» را منتشر کرده است. این راهنما مهم‌ترین عوامل مربوط به عمل‌آوری روسازی‌های بتنی را مورد بحث قرار می‌دهد که عبارت از عمل‌آوری بلافاصله پس از بتن‌ریزی یا عمل‌آوری اولیه،

عمل‌آوری پس از پرداخت نهایی یا عمل‌آوری نهایی و به عملیات عمل‌آوری پایانی و ارزیابی میزان اثرمندی است. طبق تعریف پول (Poole)، عمل‌آوری فرآیند دقیق کنترل رطوبت و شرایط دمایی در محدوده توصیه شده است. این فرآیند، تغییرات دمایی و مشخصات بتن را حین خشک شدن در ابتدای شکل‌گیری بتن بهبود می‌بخشد.

شکل ۱۵-۲: کشیدن گونی کرباسی برای ایجاد بافت سطحی ریز (ACPA 1996a: VI-53)

۱۵-۲-۱- عوامل تأثیرگذار بر ضوابط عمل‌آوری

فرآیند عمل‌آوری در روسازی به دلیل نسبت بالای سطح به حجم، حائز اهمیت است. عمل‌آوری ضعیف می‌تواند منجر به خرابی‌های قابل‌توجهی در روسازی‌های بتنی شود. ترک‌خوردگی ناشی از افت خمیری بتن، تنش‌های حرارتی و یا ترک‌خوردگی ناشی از افت بتن حین خشک شدن اتفاق می‌افتد. روسازی‌هایی که فرآیند عمل‌آوری آن‌ها ضعیف باشد، مقاومت سایشی ضعیفی نیز دارند و ممکن است نتوانند در برابر نمک‌های یخ‌زدا و سایر عوامل آسیب‌رسان مقاومت کنند.

در عمل‌آوری ضعیف، اثرات ناشی از افت بتن، پیچ‌وتاب و اعوجاج در رویه‌های بتنی با اساس تثبیت‌شده یا نفوذپذیر دوچندان خواهد شد. بنابراین برای اطمینان از عمل‌آوری مناسب رویه‌های بتنی با اساس تثبیت‌شده یا نفوذپذیر، باید توجه خاصی صورت پذیرد. مصالح بتن، نسبت اختلاط، مشخصات اولیه بتن تازه و شرایط آب‌وهوایی در طی چند روز پس از عملیات بتن‌ریزی، برنامه‌ریزی و انجام تدارکات مورد نیاز برای عمل‌آوری بتن دارای اهمیت است. این موارد به طور مفصل در فصل ۲ از کتاب پول (Poole) مورد

بحث قرار گرفته است.

نوع سیمان استفاده شده، از نقطه نظر گیرش بتن اهمیت دارد. عمل‌آوری برای مدت زمان مشخص (مثلاً چند روز)، یا تا زمانی‌که بتن به مقاومت مشخصی برسد ادامه می‌یابد. سرعت گیرش بتن تا رسیدن به مقاومت دلخواه در سیمان‌های نوع I، II و I/II مشابه هم و این مقدار در سیمان تیپ V کم‌تر و در نوع III بیشتر است. نرمی سیمان بر آب‌آفتادگی و میزان از دست دادن آب داخلی با نسبت آب به سیمان پایین تأثیر می‌گذارد. در آب‌وهوای خشک یا نسبت آب به سیمان (w/c) کم‌تر از ۰/٤، سیمان‌های بسیار نرم، با سطح مخصوص بیش از ٤۰۰ مترمربع بر کیلوگرم آب‌آفتادگی بسیار کمی دارند. نرمی پوزولان‌ها، به ویژه دوده سیلیسی نیز ممکن است در این مسئله دخالت داشته باشد.

پوزولان‌ها، به ویژه خاکستر بادی کلاس F، باعث تأخیر در زمان گیرش و رسیدن به مقاومت مشخص می‌شود. بنابراین زمان بهینه عمل‌آوری نهایی به تأخیر می‌افتد و امکان پیدایش ترک‌های ناشی از افت خمیری بتن افزایش می‌یابد. نرخ پایین افزایش مقاومت، باعث افزایش زمان عمل‌آوری نیز می‌شود. خاکستر بادی کلاس C نیز باعث تأخیر در زمان گیرش می‌شود، اما نرخ افزایش مقاومت را به اندازه کلاس F کاهش نمی‌دهد.

میزان آب‌آفتادگی بتن به نسبت w/c بستگی دارد. اگر نرخ تبخیر سطحی بتن از نرخ آب‌آفتادگی آن تجاوز کند، در این صورت ترک‌خوردگی ناشی از افت خمیری بتن اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، نرخ بیش از حد آب‌آفتادگی منجر به نسبت پایین w/c در لایه سطحی روسازی می‌شود که باعث ایجاد سطحی ضعیف با مقاومت کم در برابر سایش می‌شود. نرخ آب‌آفتادگی (BR) به کیلوگرم آب بر ساعت بر مترمکعب را می‌توان از طریق رابطه تجربی زیر محاسبه کرد:

$$BR = (0.51^{*}w/c - 0.15)^{*}D$$ رابطه ۱-۱۵

که در آن w/c= نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۸ و ۰/٤۸ و D= ضخامت روسازی به میلی‌متر (یا ۲۵/٤ اینچ) می‌باشد. همچنین می‌توان آب‌آفتادگی را برای یک بتن خاص به طور تجربی محاسبه کرد.

پول[1] عنوان می‌کند که: نسبت w/c برای بتن روسازی معمولاً بین ۰/۳۸ و ۰/٤۸ است. بنابراین برای روسازی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر (یا ۱۲ اینچ) میزان آب‌آفتادگی بین ۰/۱۳ $kg/m^2/hr$ تا ۰/۲۸ ($lb/ft^2/hr$ ۰/۰۲۷ و ۰/۰۵۷) است. این مقادیر پایین‌تر از مقدار میانگین نرخ آب‌آفتادگی نسبت به بتن‌های معمولی با نرخ آب‌آفتادگی بین ۰/۵ $kg/m^2/hr$ تا ۱/۵ ($lb/ft^2/hr$ ۰/۱ تا ۰/۳) می‌باشد. نتیجه آن که بتن روسازی برای از دست دادن

1- Poole

بیش از اندازه آب بر اثر تبخیر مستعدتر است. ACI 308 خاطرنشان می‌کند که شرایط خشک شدن کم‌تر از ۰/۵ $kg/m^2/hr$ (۰/۱ $lb/ft^2/hr$) برای اکثر بتن‌ها خطرناک است. حد بالا برای روسازی در حدود ۰/۳ $kg/m^2/hr$ (۰/۰٦ $lb/ft^2/hr$) در نظر گرفته شده است.
درصد مواد سیمانی بالا، به ویژه مواد سیمانی نرم مانند سیمان تیپ III یا پوزولان‌ها سبب کاهش آب‌آفتادگی بتن می‌شود. درصد بالای مواد سیمانی افت ناشی از خشکی بلندمدت را افزایش می‌دهد.
در سیستم رایج اجرای بتن، پرداخت نهایی به طور معمول تا زمان گیرش اولیه انجام نمی‌شود. در روسازی با قالب لغزنده پرداخت نهایی معمولاً چند دقیقه پس از بتن‌ریزی، یعنی قبل از گیرش اولیه و پس از دوره آب‌آفتادگی بتن انجام می‌شود. اگر نرخ آب‌آفتادگی بتن نسبت به نرخ تبخیر کم باشد، بعد از بتن‌ریزی درخشندگی سطح به سرعت از بین می‌رود که در این صورت توصیه می‌شود با وجود ادامه آب‌آفتادگی، عمل‌آوری نهایی شروع شود.
متأسفانه در صورتی که عمل‌آوری نهایی بتن قبل از گیرش اولیه آغاز شود، ممکن است مشکلاتی رخ دهد. زیرا در این حالت آب‌آفتادگی در سطح ادامه دارد. این امر ممکن است باعث شستگی ریزدانه‌ها، تجمع آب و تخریب غشای عمل‌آوری پاشیده شده بر روی سطح بتن شود.
تبخیر آب پس داده شده از سطح بتن به عواملی مثل سرعت باد، دمای بتن، دمای هوا و رطوبت نسبی بستگی دارد. معمولاً نرخ تبخیر با استفاده از نموگراف‌های چاپ شده در ACI 308 شامل ACI 308-R01 تحت عنوان راهنمای عمل‌آوری بتن و ACI 306R تحت عنوان بتن‌ریزی در هوای گرم و ACI 305R-99 تعیین می‌شود.
پول رابطه‌ای را ارایه داده است که می‌توان آن را توسط ماشین حساب یا صفحه گسترده حل کرد و به نتایج مشابه نموگراف‌ها رسید.

$$ER = 4.88\left[0.1113 + 0.04224\frac{WS}{0.447}\right](0.0443)\left(e^{0.0302(CT.1.8)+32}\right) - \left[\left(\frac{RH}{100}\right)\left(e^{0.0302(AT.1.8)+32}\right)\right]$$

رابطه ۱۵-۲

که در آن:
ER= نرخ تبخیر برحسب ($kg/m^2/h$)، که با ضرب کردن در ۰/۲۰٤۸ می‌توان آن را برحسب ($lb/ft^2/h$) بدست آورد.
WS= سرعت باد برحسب (m/s)، با ضرب آن در ۰/٤٤۷ به مایل بر ساعت تبدیل می‌شود.
CT= دمای بتن برحسب درجه سانتی‌گراد که برای تبدیل آن به فارنهایت عدد ۳۲ را از

آن کم و سپس بر ۱/۸ تقسیم می‌نماییم، AT= دمای هوا (برحسب درجه سانتی‌گراد)، RH= رطوبت نسبی (برحسب درصد).
با افزایش سرعت باد و دمای هوا و بتن، نرخ تبخیر افزایش و با افزایش درصد رطوبت نسبی، نرخ تبخیر کاهش می‌یابد. برای روسازی بتنی تنها می‌توان دما را به آسانی و به درستی کنترل کرد. توصیه می‌شود که با توجه به شرایط محیطی، قبل از اجرای روسازی نرخ تبخیر پیش‌بینی شود.
با افزایش ارتفاع، سرعت باد افزایش می‌یابد. از این‌رو برای پیش‌بینی دقیق نرخ تبخیر، باید در ارتفاع ۰/۵ متر (۲۰ اینچ) در بالای سطح بتن سرعت باد اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع بالاتر سبب تخمین دست بالای نرخ تبخیر می‌شود.
راهنمای استاندارد توصیه می‌کند که اگر نرخ تبخیر از نرخ آب‌آفتادگی بتن تجاوز کند، آن وقت باید نرخ تبخیر را کاهش داد.
سه راهکار عملی برای سطوح وسیع روسازی وجود دارد. یک روش آن که انجام عملیات روسازی به زمانی از روز موکول شود که شرایط خشک شدن بتن شدت کم‌تری دارد. به دلیل این که درصد رطوبت نسبی در شب نسبت به روز بالاتر است، اغلب این زمان برای بتن‌ریزی مناسب به نظر می‌رسد.
دو روش دیگر عبارت از کاهش دمای بتن در زمان بتن‌ریزی و استفاده از کاهنده‌های تبخیر هستند. کاهنده‌های تبخیر می‌توانند نرخ تبخیر را تا حدود ٦٥ درصد کاهش دهند.

۱۵-۲-۲- عمل‌آوری اولیه

عمل‌آوری اولیه بتن در زمانی بین بتن‌ریزی و عملیات عمل‌آوری نهایی بتن انجام می‌شود. عمل‌آوری اولیه بتن به طور مفصل در بخش سوم کتاب پول مورد بحث قرار گرفته است. مهم‌ترین مسئله در عمل‌آوری اولیه بتن، تعیین شرایط محیطی پروژه و انجام اصلاحات مربوط به پای کار می‌باشد. زمان مناسب برای انجام عمل‌آوری نهایی بتن، در زمان گیرش اولیه است.
همان طور که در رابطه ۱۵-۲ نشان داده شده است، شرایط محیطی محل اجرای کار که بر نرخ تبخیر تأثیر دارد، با استفاده از لوازم ارزان قیمت در محل کارگاه قابل محاسبه می‌باشد. در آب‌وهوای گرم دمای بتن باید مرتباً اندازه‌گیری شود.
دو نکته مهم که ممکن است در پروژه نیاز به اصلاح داشته باشند عبارت از کاهش دمای بتن و استفاده از کاهنده‌های نرخ تبخیر است. دمای بتن را می‌توان با خنک‌سازی توده‌های شن و ماسه، استفاده از آب خنک و یا اضافه کردن یخ به آب مخلوط بتن کاهش داد.

طبق ACI 305R با عنوان «بتن‌ریزی در هوای گرم»، برای تعیین دمای مخلوط روابطی را براساس دمای مصالح تشکیل دهنده، شامل یخ (اگر استفاده شود) ارائه کرده است. تجربه نشان داده است که در آب‌وهوای گرم، تزریق مستقیم نیتروژن مایع به کامیون‌های تولید بتن آماده در کاهش دمای بتن خیلی مؤثر می‌باشد.

کاهنده‌های نرخ تبخیر برای حل مشکل تبخیر بیش از اندازه آب بتن، محصولات نسبتاً جدیدی محسوب می‌شوند. رویکرد اصلی استفاده به اندازه و به موقع از کاهنده‌های نرخ تبخیر است تا بتن هیچ‌گاه آب خود را تا حد بحرانی از دست ندهد. برای این کار از همان تجهیزاتی استفاده می‌شود که در عمل‌آوری بتن کاربرد دارد.

کاهنده‌های نرخ تبخیر، امولسیون‌هایی هستند که یک قشر نازک را بر روی بتن تشکیل می‌دهند. ترکیبات این یک قشر نازک، مواد فعالی هستند که نرخ تبخیر آب بتن را کاهش می‌دهند. همچنین به کمک آب موجود در امولسیون کاهنده نرخ تبخیر، مقدار جزیی آب تبخیر شده مخلوط جبران می‌شود.

بسته به شرایط محیطی، ترکیبات کاهنده شدت تبخیر، ممکن است چند بار مورد استفاده قرار بگیرد. تعداد دفعات مورد نیاز برای استفاده از این ترکیبات را می‌توان با رابطه زیر تعیین کرد:

رابطه ۱۵-۳

$$F = \frac{AR}{ER(1-0.4) - BR}$$

که در آن:

F= دوره تکرار استفاده از این مواد (hr).

AR= نرخ استفاده (kg/m^2).

ER= نرخ تبخیر آب بتن ($kg/m^2/h$).

BR= نرخ آب افتادگی بتن($kg/m^2/h$).

در این رابطه فرض بر این است که کاهنده، نرخ تبخیر را تا ٤٠ درصد کاهش می‌دهد، که این میزان کم‌تر از مقداری است که بیشتر تولید کنندگان ادعا می‌کنند. این رابطه را می‌توان در سیستم واحدهای مرسوم آمریکا بدون تبدیل واحد به کار برد.

بخشی از ترکیبات عمل‌آوری بتن را می‌توان در ابتدا به عنوان کاهنده تبخیر به کار گرفت. هرچند ممکن است این امر در عمل‌آوری نهایی بتن خلل وارد کند.

۱۵-۲-۳- عمل‌آوری نهایی بتن

عمل‌آوری نهایی بتن در فصل ٤ از کتاب پول به طور مفصل بحث شده است. عمل‌آوری نهایی بتن شامل روش‌های استفاده از ترکیبات عمل‌آوری بتن، روش عمل‌آوری با آب و

روش حفظ آب[1] است. معمولاً برای پروژه‌های روسازی بزرگ روش استفاده از ترکیبات عمل‌آوری بتن، به عنوان روشی عملی و اقتصادی مطرح می‌شود. روش عمل‌آوری با آب (غرقاب کردن سطح بتن در آب) و روش حفظ آب (صفحات ضدآب) را می‌توان برای پروژه‌های بسیار کوچک و یا تعمیرات در نظر گرفت.

به دلیل هزینه نسبتاً پایین نیروی کار، عموماً استفاده از ترکیبات عمل‌آوری بتن از نظر اقتصادی به صرفه‌ترین روش عمل‌آوری بتن در سطوح وسیع روسازی محسوب می‌شود. در صورت استفاده از مواد مذکور دیگر نیازی به نگهداری و عملیات اضافی دیگری نیست. جنبه منفی استفاده از ترکیبات عمل‌آوری پیچیدگی در مشخصات، انتخاب ترکیب مناسب و نیاز به مهارت بالا در استفاده صحیح از آن‌ها می‌باشد.

موضوعات مهم در ارتباط با استفاده از ترکیبات عمل‌آوری بتن در ادامه آورده شده است:

- انتخاب ترکیب عمل‌آوری بتن، معمولاً بر پایه حفظ آب استوار است. عوامل مؤثر در انتخاب این ترکیبات عبارت از رنگدانه، مدت خشک شدن، نوع و مقدار مواد جامد، مواد آلی فرار (برای ملاحظات زیست محیطی و ایمنی)، سازگاری با اندودها و گرانروی هستند. آیین‌نامه‌های بسیاری درباره مشخصات این ترکیبات بحث کرده‌اند.
- زمان استفاده از این ترکیبات.
- نرخ استفاده از این ترکیبات.
- نظارت بر نحوه استفاده.

بهترین زمان برای عمل‌آوری پس از گیرش اولیه است. عموماً توصیه می‌شود زمانی که درخشنگی سطح ناپدید شد، از این ترکیبات استفاده شود. این عمل ممکن است موجب تضعیف عملکرد روسازی شود. معمولاً بتن روسازی با نسبت آب به سیمان پایین تهیه می‌شود، بنابراین حتی در شرایط نسبتاً خشک، ولو این که آب‌آفتادگی سطح بتن ادامه داشته باشد، درخشندگی سطح پس از بتن‌ریزی بلافاصله ناپدید می‌شود. استفاده از این ترکیبات باعث کند یا توقف تبخیر ناشی از آب‌آفتادگی می‌شود که نهایتاً منجر به جمع شدن آب در زیر غشای موجود و یا رقیق شدن عمل‌آور می‌شود. در هر یک از این دو حالت، غشای به وجود آمده آسیب می‌بیند و عملکرد آن در طول دوره عمل‌آوری نهایی دچار مشکل می‌شود. این آسیب به وسیله ترک‌ها یا شکاف‌هایی که در غشای سطحی پدیدار می‌شود، قابل تشخیص است. در سایر حالات این پدیده را فقط می‌توان با شدت متوسط مشاهده کرد. اگر شدت تبخیر مقدار متوسطی داشته باشد (کم‌تر از $kg/m^2/hr$

1- Retentive Water

۰/۵)، تأثیر زیان‌آوری بر بتن نخواهد گذاشت.
اغلب با استفاده از تجهیزات خودکاری که به دنبال دستگاه اجرای روسازی با قالب لغزنده قرار دارد، بلافاصله پس از بتن‌ریزی از ترکیبات عمل‌آوری استفاده می‌شود.
مشکل استفاده از این ترکیبات آن است که در زمان عمل‌آوری نهایی این مواد آب را به مقدار لازم نگه نمی‌دارد. با این وجود، یک روش اجرایی مناسب وجود دارد. به این ترتیب که بخشی از ترکیب عمل‌آوری در زمان گیرش اولیه (به منظور کاهش میزان تبخیر اولیه) مورد استفاده قرار بگیرد، سپس بخش باقی‌مانده پس از این زمان به کار رود تا پیوستگی غشای ایجاد شده از هرگونه آسیب ناشی از استفاده زودهنگام محفوظ بماند.
نرخ استفاده از این ترکیبات باید به اندازه‌ای باشد که یک غشای پیوسته برای کاهش مقدار رطوبت از دست رفته ایجاد شود.
طبق توصیه آشتو باید نرخ پوشش بیش از ۵m2/L (۸/۳ ft2/gal) نباشد. اکثر تولیدکنندگان نیز همین مقدار را توصیه می‌کنند.
برای روسازی بتن غلطکی متراکم روش عمل‌اوری با آب نظیر آب‌فشانی به کار گرفته می‌شود. مسلماً روسازی بتنی نفوذپذیر را نمی‌توان به طور مطلوبی با استفاده از ترکیبات عمل‌آوری یا آب افزوده عمل‌آوری کرد. این گونه روسازی‌ها را با قراردادن در زیر صفحات پلاستیکی به مدت ۷ روز عمل‌آوری می‌کنند.

۱۵-۲-٤- مدیریت دما

همان‌گونه که کنترل رطوبت در روسازی بتنی حائز اهمیت است، کنترل تغییرات دما نیز مهم خواهد بود. همان طور که در فصل‌های گذشته توضیح داده شد، تغییرات دما موجب انقباض و انبساط بتن می‌شود.
بر اثر هیدراتاسیون مواد سیمانی بلافاصله بعد از بتن‌ریزی، تولید حرارت آغاز می‌شود. بیشترین مقدار این حرارت در ۲٤ ساعت اول رخ می‌دهد و بسته به خواص شیمیایی سیمان به کار رفته در عرض ٦ تا ۸ ساعت پس از بتن‌ریزی به اوج می‌رسد. در روسازی‌های کم‌ضخامت این حرارت به سرعت در محیط اطراف پخش شده و در نتیجه به طور قابل توجهی از گرمایش روسازی جلوگیری می‌شود. در روسازی ضخیم مورد استفاده در راه‌های اصلی، گاهی این حرارت به صورت موضعی افزایش می‌یابد.
در صورتی که دمای هوا بیشتر از دمای زمان بتن‌ریزی باشد و یا نور خورشید به طور مستقیم بتابد، می‌توان انتظار داشت که گرمای بتن شدت پیدا کند. خنکی هوای محیط و تبخیر آب از سطح بتن به کاهش دمای بتن کمک می‌کند.

بتن‌ریزی در هوای گرم موجب می‌شود تا حرارت بتن کمی بیشتر از حد معمول باشد. اگر حرارت هیدراتاسیون سیمان، دمای هوای اوج و تابش نور خورشید به طور همزمان اتفاق بیفتد و تمهیدات لازم نیز اتخاذ نشود، دمای بتن می‌تواند به بیش از ٦۰ درجه سانتی‌گراد (۱٤۰ درجه فارنهایت) برسد.
اگر بتن به صورت گیردار اجراء شده باشد همزمان با انقباض، سخت و شکننده شدن، احتمال ترک‌خوردگی در آن افزایش پیدا می‌کند. جزئیات و اجرای مناسب درزها، روش‌هایی برای کنترل ترک‌های احتمالی هستند اما با این وجود بعد از اجرای روسازی، تغییرات شدید دمایی می‌تواند باعث ترک‌خوردگی شود. نرم‌افزار HIPEREPAV برای ارزیابی این ترک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هوای سرد، لازم است که روسازی بتنی را با لایه‌های محافظ بپوشانیم تا گرمای بتن حفظ شود.

۱۵-۲-۵- پایان عملیات عمل‌آوری و ارزیابی اثربخشی

زمان پایان عمل‌آوری بتن و ارزیابی این که آیا این عملکرد اثربخش بوده است یا خیر، در فصل ۵ کتاب پول ارائه شده است. اصلی‌ترین اقدامات در این زمینه، تعیین زمان مناسب عمل‌آوری بتن و انجام روش‌های آیین‌نامه‌ای یا اجرایی است.
از آنجایی که ترکیبات عمل‌آوری بتن از روسازی برداشته نمی‌شوند، در واقع هیچگاه عمل‌آوری به پایان نمی‌رسد. در عوض ملاحظات مربوط به روش عمل‌آوری با آب و حفظ آب بتن به کار گرفته می‌شود.
روش معمول تعیین مدت عمل‌آوری، دوره‌های ثابتی دارد. معمولاً ضوابط اجرایی همراه با تعیین حداقل دمای هوا (کم‌تر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد) در بازه زمانی مشخصی قرار دارد. بیش از نیمی از ایالت‌ها مدت زمان لازم را سه روز، برخی از آن‌ها ٤ روز و ۲۵ درصد آن‌ها ۷ تا ۱٤ روز اعلام می‌کنند. در مستندات ACI مدت زمان‌های مختلفی ارائه شده است، اما به طور معمول این مدت ۷ روز در نظر گرفته می‌شود.
زمان خاتمه عمل‌آوری بتن براساس مقاومت مشخصی از بتن (به طور معمول ۷۰ درصد) تعیین می‌شود. مقاومت بتن به ویژه در هوای سرد، باید با استفاده از نمونه آزمایشی عمل‌آوری شده در پای کار سنجیده شود. این در حالی است که با نگهداری نمونه‌ها در گرمای آزمایشگاه می‌توان سریع‌تر به مقاومت دلخواه دست یافت.
به منظور در نظر گرفتن اثر زمان و دما می‌توان روش رسیدن بتن[1] را به کار برد. این روش در فصل ۱٤ توضیح داده شده است. روش رسیدن بتن، با ثبت دمای اندازه‌گیری

1- Maturity Method

شده توسط حرارت‌سنج‌های موجود در نقاط حساس روسازی انجام می‌شود. مشخص کردن نقاط بحرانی از مهم‌ترین بخش‌های این روش است. زوایای روسازی، مقاطع مرتفع و نقاطی که اخیراً در آن‌ها بتن‌ریزی انجام شده است، از جمله نقاط حساس به کاهش دما محسوب می‌شوند.

تعیین میزان اثربخشی روند عمل‌آوری بتن نیازمند تجهیزاتی است که مقاومت بتن را به صورت درجا اندازه‌گیری کند. این روش‌ها شامل کُرگیری، روش چکش برگشتی، سرعت پالس مافوق صوت و مقاومت سایشی هستند.

به عنوان بخش تکمیلی روش‌های عمل‌آوری بتن ACI 308R-01، دستورالعمل ACI308.1-98 تحت عنوان «مشخصات استاندارد برای عمل‌آوری بتن» منتشر شد. این دستورالعمل یک استاندارد مرجع است و می‌تواند در مشخصات هر پروژه‌ای لحاظ شود.

۱۵-۲-٦- ملاحظات مربوط به روکش‌های کم‌ضخامت

روکش‌های بتنی کم‌ضخامت، چه از نوع متصل، روکش بتنی روی آسفالت یا روکش‌های بتنی فوق نازک، نسبت به عمل‌آوری بسیار حساس هستند. از جمله این دلایل می‌توان به بالا بودن نسبت سطح به حجم، پایین بودن نسبت آب به سیمان، عیار بالای سیمان، حرارت تولید شده بتن و حرارت باقی‌مانده در لایه‌های روسازی اشاره کرد. عمل‌آوری نامناسب روکش‌های کم‌ضخامت منجر به افت و خیز زیادی می‌شود. از جمله شرایط نامناسب اجرایی روسازی بسیار سرد یا گرم، رطوبت پایین و سرعت بالای باد است. در روکش‌های کم‌ضخامت، ترکیبات عمل‌آوری بتن دو برابر مقدار توصیه شده تولید کننده اعمال می‌شود.

به علت مشکلات موجود در عمل‌آوری روکش‌های کم‌ضخامت، باید بخشی از ریزدانه با مصالح سنگی سبک اشباع (۱۵ تا ۲۰ درصد) تعویض شود.

۱۵-۳- برش و آب‌بندی درزها

در واقع درز نوعی ترک است که به صورت حساب شده طراحی می‌شود. روسازی بتنی بر اثر افت و تغییرات دما ترک می‌خورد. هدف از برش و آب‌بندی درز، ایجاد ترک در محل مناسب است تا نگهداری از آن راحت‌تر باشد. عموماً، درزهای عرضی با انجام برش اره‌ای در سطح روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا روسازی بتنی مسلح درزدار و ایجاد یک سطح ضعیف در مقطع بتن ایجاد می‌شود.

علت آب‌بندی درز، کاهش نفوذ آب به روسازی و ممانعت از ورود مواد تراکم ناپذیر

مانند سنگریزه به درون آن است. با افزایش دما درزها به هم نزدیک شده و مواد تراکم ناپذیر می‌توانند باعث پوسته‌شدگی و خردشدن دال در محل درز روسازی شوند. برش اره‌ای اولیه توسط یک تیغه اره‌ای انجام می‌شود. پس از آن به منظور فراهم کردن فضای لازم برای جاسازی مواد درزگیر در محل درز اولیه، برشی عریض‌تر و کم‌عمق‌تر ایجاد می‌شود. تیغه‌های اره‌ای مخصوص می‌توانند هر دو برش را همزمان باهم اجراء کنند. شکل ۱۵-۳ برش اولیه و برش عریض کننده[1] را به همراه انتشار ترک از برش اولیه در طول دال نشان می‌دهد. همچنین این شکل یک میل‌مهار را در درز عرضی نشان می‌دهد که به علت ضعف قفل‌وبست بین میل‌مهار و بتن، کارایی چندانی ندارد.

دو روش برای برش می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد که عبارت از برش مرطوب توسط تیغه‌های الماسی و برش خشک توسط مواد ساینده یا تیغه‌های الماسی است. برای روان‌سازی و خنک کردن تیغه می‌توان از روش مرطوب استفاده کرد. همچنین استفاده از برش مرطوب در کنترل گرد و غبار ناشی از برش بتن مؤثر واقع می‌شود. برش خشک برای مصالح سنگی نرم‌تر مانند سنگ آهک استفاده می‌شود. با توجه به اندازه پروژه و میزان تولید، تیغه‌های کوچک، متوسط، بزرگ و تیغه‌های با نرخ تولید بالا وجود دارند.

تعیین محل دقیق ایجاد درز قبل از برش حائز اهمیت است تا میلگردهای اتصال بتوانند به درستی به وظیفه خود عمل کنند.

برای انجام برش یک چارچوب زمانی وجود دارد. اگر این کار پیش از موعد انجام شود، روسازی قادر به تحمل وزن تجهیزات اره نخواهد بود و ممکن است موجب آسیب دیدگی و جدا شدن دو طرف درز از هم شود. در مقابل اگر اجرای درز به تعویق بیفتد موجب ترک‌خوردگی خواهد شد. آب‌وهوای گرم، سیمان مازاد بر طرح اختلاط و استفاده از زودگیرکننده‌ها می‌تواند این مدت زمانی را سریع‌تر و کوتاه‌تر کند. همچنین اگر اساس سخت‌تر و دانه‌بندی بازتر داشته باشد، محدوده زمانی سریع‌تر و کوتاه‌تر خواهد بود. در اساس سنگدانه‌ای این مدت، طولانی‌تر است. آماده بودن روسازی برای برش را می‌توان به طور تجربی با ایجاد خراش به کمک یک کارد یا میخ آهنی برروی سطح بتنی مشخص کرد. علاوه بر دمای محیط، بازه زمانی مذکور به عواملی چون باد، رطوبت، وضعیت هوا و دمای اساس بستگی دارد.

1- Widening Cut

شکل ۱۵-۳: برش اولیه و برش تعریض کننده در درز عرضی (ACPA 1996a: VII-11)

به دلیل دشواری‌هایی که در پیش‌بینی زمان برش درز وجود دارد، پیمانکار باید به محض آماده شدن بتن، چه در روز و چه در شب، اقدام به برش آن نماید. اگر برش با تأخیر انجام شود، ترک‌های تصادفی رخ می‌دهد. اگر در حین برش‌زدن دال دچار پوسته‌شدگی شود، نشان دهندهٔ آنست که بتن هنوز آماده برش نیست. باید توجه داشت که برش دال باید قبل از افت شدید دمای سطح بتن انجام شود.

در سال ۱۹۹۳، محوطه بارگیری یک پایگاه هوایی واقع در تگزاس با استفاده از قالب لغزنده و در شرایط آب‌وهوایی گرم‌وخشک تابستان ساخته شد. رویه بتنی به مدت یک روز با گونی مرطوب و سپس توسط یک غشا عمل‌آوری شد. پیمانکار پس از برداشتن گونی‌های محافظ مبادرت به برش درزهای انقباضی عرضی کرد. این کار باعث شد تا بیش‌از ۲۵ درصد دال‌ها دچار ترک‌خوردگی شود. بنابراین باید در همان روز بتن‌ریزی عمل برش را انجام داد. به تعویق انداختن برش تا روز بعد موجب گسترش ترک‌خوردگی تصادفی و عدم کارایی برش‌های ایجاد شده در سطح روسازی می‌شود.

هدف از مواد آب‌بند[1] جلوگیری از ورود آب و مواد تراکم ناپذیر به درون درز است. مسلماً ایجاد درزی که از ورود کامل آب ممانعت به عمل آورد غیرممکن است. اما در این میان باید مواد آب‌بند بتواند مقدار آب ورودی به سازه روسازی و در نتیجه آسیب‌های

1- Sealant

ناشی از رطوبت مانند مکش و پلکانی شدن را به حداقل برساند. باید از ورود مواد تراکم ناپذیر به داخل درز جلوگیری کرد، چرا این مواد به هنگام انبساط در برابر بسته شدن دال مقاومت می‌کند و منجر به پوسته شدن یا خردشدگی در محل درز می‌شود.
به محض این که درزها بریده و تعریض شدند، از انواع مختلف مواد آب‌بند می‌توان برای پرکردن درزها استفاده کرد. انواع مواد پرکننده در جدول ۱۵–۱ ارائه شده است.
رفتار مواد درزگیر تأثیر زیادی بر عملکرد درز می‌گذارد. مواد درزگیر با کیفیت، مانند سیلیکون و درزگیرهای پیش‌متراکم برای آب‌بندی تمام درزهای انقباضی، طولی و اجرایی پیشنهاد می‌شود. با وجود آن که این مصالح بسیار گران‌قیمت هستند، ولی آب‌بندی بهتر و در نتیجه عمر خدمت‌دهی بیشتری را فراهم می‌کنند. در حین اجراء باید به دستورالعمل ارائه شده توسط تولید کننده توجه شود. آماده‌سازی درز و نصب درزگیرها در آن برای عملکرد موفقیت‌آمیز بسیار مهم هستند. بنابراین اکیداً توصیه شده است که در انجام هر دو مورد دقت زیادی به کار برده شود.
تمیز کردن درز از اهمیت بسیاری برخوردار است. شکل‌دهی درزگیر ممکن است درجا و یا از قبل انجام شده باشد. اجرای درزگیرهایی که در محل صورت می‌گیرد، به صورت گرم و سرد است. قبل از اجراء یک میله پشت‌بند در داخل درز فرو برده می‌شود. جنس این میله‌ها پلی‌اتیلن است و علاوه بر جلوگیری از خروج مواد آب‌بند از قسمت تحتانی درز، شکل این مواد را نیز کنترل می‌کند. آب‌بندهای پیش‌ساخته، با فشار در درز فرو برده می‌شود و اجرای آن‌ها نیازی به میله پشت‌بند ندارد.
وقتی که درزگیر سیلیکونی به کار می‌رود، ضریب شکلی (نسبت عمق به عرض درزگیر) حداقل به اندازه ۱ به ۲ پیشنهاد می‌شود. ضریب شکل حداکثر نباید بیش از ۱ به ۱ باشد. برای دستیابی به بهترین نتیجه، حداقل عرض درزگیر باید (۹/۵ میلی‌متر) ۰/۳۷۵ اینچ باشد. سطح درزگیر باید (٦/۵ تا ۹/۵ میلی‌متر) ۰/۲۵ تا ۰/۳۷۵ اینچ پایین‌تر از سطح روسازی قرار بگیرد تا در اثر تردد وسایل نقلیه دچار ساییدگی نشود. کاربرد میله پشت‌بند برای ایجاد ضریب شکل مناسب و جلوگیری از اتصال درزگیر به ته حفره درز ضروری است. باید این میله پشت‌بند یک میله اسفنجی از جنس پلی‌اورتان باشد و قطری در حدود ۲۵ درصد بزرگ‌تر از عرض درز داشته باشد تا در داخل درز تحت فشار قرار بگیرد. در صورت استفاده از مواد درزگیر فشاری، به گونه‌ای باید درز را طراحی کرد تا مواد آب‌بند همواره بین ۲۰ تا ۵۰ درصدِ حجم خود فشرده شوند. سطح این نوع درزگیر باید ۳ تا ۹/۵ میلی‌متر (۰/۱۲۵ تا ۰/۳۷۵ اینچ) پایین‌تر از سطح روسازی باشد تا در اثر تردد وسایل نقلیه دچار ساییدگی نشود.

کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا، موارد مهم برش و آب‌بندی درزهای روسازی جدیدالاحداث را به شرح زیر عنوان می‌کند:

- انتخاب ابزار و تجهیزات برش.
- تعیین محل درز.
- زمان انجام برش اره‌ای، با در نظر داشتن شرایط آب‌وهوایی بر بازه زمانی.
- برش مستقیم با عرض و عمق مناسب.
- انتخاب مواد درزگیر متناسب با مشخصات و ملزومات پروژه.
- آب‌بندی درزهای طولی قبل از تعریض درزهای عرضی.

آماده‌سازی حفره درز، یکی از مهم‌ترین موارد اجرایی است. جزئیات مفصل‌تر، به همراه تصاویر کاربردی در مورد برش و آب‌بندی درزها در کتابچه راهنمای آشتو، FHWA و اعضای آموزش درزهای صنعتی، تحت عنوان «اجرای روسازی بتنی با سیمان پرتلند» گردآوری شده است. یک حلقه CD محتوی فایل پاورپوینت نیز تهیه شده است که می‌توان آن را به صورت جداگانه از انجمن روسازی بتنی آمریکا خریداری کرد.

انجمن روسازی بتنی آمریکای «راهنمای آب‌بندی درزها و ترک‌ها و ترمیم روسازی بتنی» را به چاپ رسانده است. این راهنما عنوان می‌کند که آب‌بندی درزها زمانی بسیار حائز اهمیت است که روسازی دارای زهکشی مناسب نباشد. در صورت وجود اساس زهکش، آب‌بندی درزها از آسیب ناشی از رطوبت می‌کاهد.

جدول ۱۵-۱: مواد آب‌بندی درزها (ACPA 1996a)

نوع مصالح	انواع ماده و خواص آن‌ها	مشخصات عمومی
آسفالت پلیمری	شکل‌دهی در محل (کاربرد به صورت گرم)	AASHTO MO173,ASTM D3405, SS-S-1401 C, ASTM D1190
درزگیر پلیمری	خود تراز	ASTM D3405
مدول یا ضریب پایین	خود تراز	
درزگیر ارتجاعی (الاستومری)	خود تراز	SS-S-1614
ذغال‌سنگ، PVC	خود تراز	ASTMD 3406
درزگیر سیلیکونی	شکل‌دهی در محل (اجرای سرد) بدون خم‌شدگی (قابلیت شکل‌دهی) یا خود تراز (مدول‌های پایین یا فوق پایین)	
درزگیر لاستیک نتیریلی	خودتراز (بدون شکل‌دهی)، بدون خمیدگی، قابلیت شکل‌دهی	
درزگیر پلی سولفید	خودتراز (بدون شکل‌دهی)، مدول‌های پایین	SS-S-200A
درزگیر پیش‌ساخته فشاری با چسبندگی	درزبندهای فشاری با تغییر شکل‌های مجاز بین ۲۰-۵۰٪	با ASTM D2628 ASTM D2835

کتاب راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا جزئیات بیشتری را در مورد انتخاب مواد درزگیر تهیه کرده است. مشخصات مهم شامل خاصیت ارتجاعی، سختی (مدول)، چسبندگی، پیوستگی، سازگاری با سایر مواد، مقاومت در برابر شرایط آب‌وهوایی و مقاومت در برابر سوخت جت برای روسازی فرودگاه است. مشخصات لازم برای بسیاری از انواع این موارد توسط ASTM، آشتو یا آیین‌نامه‌های نظامی تدوین می‌شود. اندازه درز باید به گونه‌ای انتخاب شود که امکان تغییر مکان پیش‌بینی شده را فراهم کند. تغییر مکان پیش‌بینی شده درز برحسب میلی‌متر یا اینچ از رابطه زیر بدست می‌آید:

رابطه ۱۵-٤ $\Delta L = CL(\alpha\Delta T + E)$

که در آن:

C= ضریب اصطکاک بین زیراساس و دال، ۰/٦۵ برای مصالح تثبیت‌شده و ۰/۸۰ برای مصالح سنگدانه‌ای.

L= طول دال برحسب میلی‌متر یا اینچ.

α= ضریب انبساط حرارتی، به میکروسترین در هر درجه سانتی‌گراد یا فارنهایت.
$T\Delta$= تغییر دمای مورد انتظار به سانتی‌گراد یا فارنهایت (در شکل ۳ از کتاب «انجمن روسازی بتنی آمریکا» سال ۱۹۹۳ نشان داده شده است) که معمولاً برابر با دمای بتن در زمان بتن‌ریزی منهای حداقل میانگین گرمای روزانه در ماه ژانویه است. دامنه حرارتی آن از ۵۹°C (۱۰۶°F) در جنوب شرقی آمریکا تا ۷۱°C (۱۲۸°F) در غرب و شمال غرب میانه متغیر می‌باشد.
ε= ضریب افت بتن به میکروسترین.
ضرایب هدایت حرارتی (α) براساس نوع درشت‌دانه در جدول ۵-۲ و ضریب افت بتن (ε) براساس مقاومت بتن در جدول ۱۵-۳ نشان داده شده است.
برای مثال، یک دال ۶/۱ متری (۲۰ فوت) با مقاومت کششی غیرمستقیم ۳/۴۵ مگاپاسکال (۵۰۰ psi) و با استفاده از ماسه‌سنگ بر روی اساس سنگدانه‌ای در کالیفرنیا ساخته شده است (ΔT = ۹۹°C یا ۱۷۹°F) که تغییر مکانی به اندازه زیر خواهد داشت.

$$\Delta l = CL\ (\alpha\Delta T+\varepsilon)=۰/۸۰(۶۱۰۰)\ (۱۱/۷\times۱۰^{-۶}\times۹۹-۰/۰۰۰۴۵) = ۷/۹mm$$

یا

$$\Delta l = CL\ (\alpha\Delta T+\varepsilon)=۰/۸۰(۲۴۰)\ (۶/۵\times۱۰^{-۶}\times۱۷۹+۰/۰۰۰۴۵)=۰/۳۱\ in$$

بنابراین اگر مواد درزگیر، قابلیت کرنش ۱۰۰ درصدی داشته باشد، بایستی عرض درز را برابر با ۱۵/۸ میلی‌متر (۰/۶۲ اینچ) انتخاب نمود. در دال‌های طولانی‌تر تغییر مکان درز بیشتر است که این مشکل از جمله ضعف‌های عملکردی روسازی بتنی مسلح درزدار محسوب می‌شود. استفاده از مواد درزگیر با قابلیت تغییر شکل کم‌تر، نیازمند درزهای عریض‌تر است که نگهداری از آن را دشوار می‌کند. درزهای اتصالی با میل‌مهار، مانند درز بین دو خط عبور یا بین خط عبور و شانه بتنی، تغییر مکان کم‌تری دارد.
یک چک‌لیست ۲۰ صفحه‌ای از FHWA برای کنترل حفاظت از روسازی (۲۰۰۲) وجود دارد. در این چک‌لیست موارد کلی آماده‌سازی درزها به همراه حالات خاص مربوط به انواع درزگیرها مورد بحث قرار گرفته است و می‌توان آن را از آدرس اینترنتی http://www.fhwa.dot.gov/paverment/pub_listing.cfm بارگیری کرد.

جدول ۱۵-۲: مقادیر رایج برای ضریب هدایت حرارتی روسازی بتنی با سیمان پرتلند (α) (برگرفته از AASHTO 1993:11-29)

نوع مصالح درشت‌دانه	PCC CTE α(10^{-6}/degree)	
	هر درجه سانتی‌گراد	هر درجه فارنهایت
کوارتز	۳/۷	٦/٦
سنگ ماسه‌ای	۳/٦	٦/٥
شن	۳/۳	٦/۰
گرانیت	۲/۹	٥/۳
بازالت	۲/۷	٤/۸
سنگ آهک	۲/۱	۳/۸

۱۵-٤- اقدامات اجرایی و عمل‌آوری روسازی در آب‌وهوای سرد و گرم

به طور کلی اقدامات احتیاطی خاصی برای اجرای روسازی در آب‌وهوای سرد و گرم لازم است. شرایط آب‌وهوایی نامساعد امری اجتناب ناپذیر است. پیشنهاد می‌شود برای برنامه‌ریزی و بحث درباره شرایط احتمالی آب‌وهوا در طول اجرای روسازی و تمهیدات لازم برای حفاظت از بتن تازه جلساتی برگزار شود. به عنوان مثال لازم است در آب‌وهوای گرم از جریان ترافیک مطلع بود تا کامیون‌های حاوی بتن در پای کار معطل نشوند. در شرایط آب‌وهوایی سرد، اگر درجه حرارت به زیر صفر برسد، برای حفاظت از بتن، باید مصالح لازم در دسترس باشد و ترجیحاً در مجاورت کارگاه انبار شود.

جدول ۱۵-۳: مقادیر رایج برای ضریب افت روسازی بتنی با سیمان پرتلند (ε)
(برگرفته از AASHTO 1993:11-29)

ضریب افت PCC (*mm/mm* یا *in/in*)	مقاومت کششی غیر مستقیم بتن	
	Psi	***Mpa***
۰/۰۰۰۸	۳۰۰ (یا کم‌تر)	۲/۱ (یا کم‌تر)
۰/۰۰۰۶	٤۰۰	۲/۸
۰/۰۰۰٤٥	٥۰۰	۳/٤
۰/۰۰۰۳	٦۰۰	٤/۱
۰/۰۰۰۲	۷۰۰ (یا بیشتر)	٤/۸

۱۵-٤-۱- اقدامات احتیاطی در شرایط آب‌وهوایی گرم

شرایط آب‌وهوایی گرم خطر ترک‌خوردگی زودرس را در بتن روسازی افزایش می‌دهد. هال و همکارانش به این نکته اشاره می‌کنند، هنگامی که درجه حرارت محیط به بیش از ۳۲°C (۹۰°F) می‌رسد، خطر ترک‌خوردگی زودرس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. فعالیت‌های بتنی در شرایط آب‌وهوایی گرم تحت این شرایط صورت می‌گیرد. به‌علاوه اگر قرار باشد بتن بر روی اساس تیره‌رنگی مانند اساس تثبیت شده با قیر یا اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر قرار بگیرد، پیش از اجرای روسازی بتنی با سیمان پرتلند انجام تمهیداتی برای خنک‌سازی اساس لازم است. اگر احتیاط لازم برای شرایط آب‌وهوایی گرم نادیده گرفته شود، بتن بر اثر از دست رفتن آب دچار افت شدید می‌شود، در نتیجه اعوجاج و تغییر شکل‌های محوری رخ می‌دهد. تأثیر اعوجاج شبیه به گرادیان حرارتی منفی است. تغییر شکل‌های محوری در نقاط گیرداری مانند سطح تماس دال و زیراساس، باعث ایجاد تنش در میل‌مهارها و غیره می‌شود.

بنابراین لازم است تمهیدات لازم برای شرایط آب‌وهوایی گرم در مشخصات پروژه گنجانده شود و در صورت بروز این شرایط به آن‌ها مراجعه شود.

یکی از منابع مفید در اجرای روسازی بتنی در شرایط آب‌وهوایی گرم ACI 305 R-99 تحت عنوان «اجرای بتن در شرایط آب‌وهوایی گرم» است. این دستورالعمل، اثر آب‌وهوای گرم را بر مشخصات بتن و عملیات اجرایی تحت این شرایط مورد بحث قرار می‌دهد. اقدامات لازم برای کاهش اثر شرایط آب‌وهوایی گرم عبارتنداز:

- انتخاب مصالح و نسبت‌ها؛

- مواد پیش خنک کننده؛
- تولید خاص بتن؛
- فاصله حمل؛
- توجه به دمای بتن در زمان بتن‌ریزی؛ و
- تجهیزات و روش‌های بتن‌ریزی و عمل‌آوری.

آب‌وهوای گرم ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در اختلاط، بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن شود. اکثر این مشکلات مربوط به افزایش شدت هیدراسیون سیمان، بالا رفتن درجه حرارت و در نتیجه افزایش تبخیر آب از سطح بتن تازه می‌شود. بنابراین اتخاذ تمهیدات لازم برای مدیریت اثر درجه حرارت در از دست رفتن رطوبت ضروری به نظر می‌رسد. گزارش ACI 305R-99، شرایط آب‌وهوایی گرم را به صورت ترکیبی از آب‌وهوای گرم، درجه حرارت بالا در بتن، رطوبت نسبی کم، سرعت باد و اشعه خورشید تعریف می‌کند که به کیفیت بتن تازه یا سخت شده آسیب می‌رساند. این مشکلات ممکن است در آب‌وهوای استوایی در تمام طول سال و در فصل تابستان مناطقی با آب‌وهوای معتدل رخ دهد. با توجه به کاهش دما و شدت وزش باد در هنگام شب، موارد فوق برطرف می‌شود. اما در طول شب لازم است مسائل مربوط به ایمنی و کنترل کیفیت مورد توجه قرار بگیرد.

مشکلات مربوط به بتن تازه شامل افزایش در:

- آب مورد نیاز؛
- نرخ از دست دادن اسلامپ؛
- نرخ گیرش؛
- تمایل ترک‌خوردگی ناشی از افت خمیری؛ و
- مشکلات مربوط به کنترل درصد هوای مخلوط می‌شود.

مشکلات احتمالی مربوط به بتن سخت شده عبارتنداز:

- مقاومت ۲۸- روزه و مقاومت کل کم‌تر؛
- افزایش افت ناشی از از دست دادن آب؛
- دوام کاهش یافته (بر اثر ترک‌خوردگی)؛ و
- افزایش میزان نفوذپذیری.

برخی از ملاحظات مربوط به انتخاب مصالح و نسبت‌های اختلاط در فصل ۲ کتاب پول (Poole) و بخش‌های ۲-٤ تا ۲-۹ از ACI 305R-99 مورد بحث قرار گرفته است. در آب‌وهوای گرم بایستی از به کار بردن سیمان تیپ III خودداری کرد، تا حد ممکن درصد

سیمان مخلوط را کاهش داد و از خاکستر بادی و سرباره بیش‌تری در مخلوط استفاده کرد. در صورتی که یک پروژه چندین ماه به طول انجامد، فصل کاری از بهار به تابستان و از تابستان به پاییز تبدیل خواهد شد. در این میان اگر اقدامات اصلاحی لازم برای شرایط محیطی مختلف در نظر گرفته نشود، مشکلاتی به وجود خواهد آمد. اگر طبق شرایط قرارداد برای افزایش مقاومت بتن پاداش درنظر گرفته شده باشد، این امر پیمان‌کاران را برای استفاده بیش‌تر سیمان تشویق خواهد کرد که این مسئله به مشکلات مربوط به شرایط آب‌وهوایی گرم می‌افزاید.

کوهن و تایابجی عنوان می‌کنند که در شرایط آب‌وهوایی گرم علاوه بر استفاده از سیمان کم‌تر، باید از خاکستر بادی نوع F و رس خشک استفاده شود. برخی از خاکسترهای بادی نوع C را نیز می‌توان استفاده کرد، اما انواع دیگر باعث ایجاد مشکلاتی در شرایط آب‌وهوایی گرم می‌شود. برای اطمینان از میزان مصرف و زمان گیرش، نمونه‌های آزمایشی بتن در شرایط آب‌وهوایی گرم باید حاوی مواد افزودنی کندگیر باشد. به دلیل اسلامپ کم و افت اسلامپ در شرایط آب‌وهوایی گرم، اغلب این تمایل وجود دارد که آب را بدون اصلاح نمودن سایر نسبت‌ها به مخلوط اضافه کنند. البته این امر به شدت بر مقاومت و دوام بتن تأثیر می‌گذارد. در عوض استفاده از مواد افزودنی شیمیایی کاهنده آب توصیه می‌شود.

استفاده از آب سرد، روشی مؤثر برای خنک کردن مخلوط بتن است. با توجه به این که گرمای ویژه آب ٤ تا ٥ برابر مواد سیمانی و مصالح سنگی است، خنک کردن آب برای تولید بتن مؤثرتر خواهد بود. ACI 305R-99 رابطه‌ای را براساس درجه حرارت مواد تشکیل دهندهٔ آن برای محاسبه درجه حرارت بتن ارائه داده است. می‌توان به مخلوط بتن یخ نیز اضافه کرد. اگرچه خنک‌کردن مصالح سنگی مثل آب سرد در کاهش دمای بتن مؤثر نیست، ولی می‌توان آن را توسط آب یا دمیدن هوا خنک کرد.

نیتروژن مایع را نیز می‌توان هم برای خنک‌کردن آب مخلوط و هم بتن مورد استفاده قرار داد. می‌توان آب را در یک مخزن عایق با نیتروژن مایع خنک کرد و با کاهش دما تا ۱۱°C (۲۰°F) آن را به حالت یخ‌آب تبدیل کرد. با وارد کردن نازل تزریق نیتروژن مایع به داخل مخزن کامیون حمل بتن می‌توان به طور مستقیم مبادرت به خنک کردن مخلوط نمود. در حالت کلی، نازل تزریق نمی‌تواند درجه حرارت را به کم‌تر از ۱۰°C برساند، چون در این صورت مخلوط مجاور نازل یخ می‌زند. نازل تزریق نیتروژن را می‌توان در پای کار نیز مورد استفاده قرار داد که اثربخشی بیش‌تری دارد. باید توجه داشت که کلیه این روش‌ها هزینه‌بر هستند.

افزودنی‌های شیمیایی نقش مؤثری در اجرای بتن تحت شرایط آب‌وهوایی گرم دارند. این مواد مقدار آب مورد نیاز مخلوط را کم می‌کنند و فرصت بیشتری را برای بتن‌ریزی در اختیار قرار می‌دهند. برخی از افزودنی‌های کاهنده و فوق کاهنده آب، مانند نوع D و G از گروه ASTM C 494، خاصیت کندگیر نیز دارند. افزودنی‌های کاهنده آب با شدت متوسط در مشخصات ASTM طبقه‌بندی نشده‌اند، اما نوع A و در برخی حالات، نوع F از ASTM C494 سازگاری دارند. افزودنی‌های کنترل گیرش بتن، هیدراسیون را متوقف می‌کند. این خاصیت در حمل طولانی و یا تأخیرهای رخ داده در بتن‌ریزی مفید است.
در بیشتر پروژه‌های روسازی، عمل‌آوری مرطوب قابل اجراء نیست. ترکیبات عمل‌آوری با رنگدانه‌های سفید می‌تواند باعث بازتاب نور خورشید شود که این فرآیند به عمل‌آوری بتن کمک می‌کند.

۱۵-٤-۲- اقدامات احتیاطی در شرایط آب‌وهوایی سرد

ملاحظات مربوط به بتن‌ریزی در هوای سرد در دو مبحث از کمیته ۳۰٦ از ACI مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین هدف جلوگیری از آسیب دیدگی بتن براثر یخزدگی زود هنگام می‌باشد. در هوای سرد، رویه بتنی نسبت به رویه آسفالتی گرم این برتری را دارد که در دمای پایین، به تراکم مناسب خود می‌رسد.
هوای سرد به این صورت تعریف می‌شود که در سه روز متوالی، شرایط زیر وجود داشته‌باشد:
۱- متوسط دمای هوای روزانه کم‌تر از ٥oC (٤۰oF) باشد. ۲- دمای هوا در نصف هیچ دوره ۲٤ ساعته فراتر از ۱۰oC (٥۰oF) نرود. معمولاً در آب‌وهوای معتدل این شرایط در پاییز آغاز می‌شود و تا بخشی از بهار ادامه پیدا می‌کند. افت شدید دما که ممکن است در این فصول اتفاق بیفتد در قسمت بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.
به عنوان یک قانون کلی، بتن باید در مقابل یخزدگی حفاظت شود تا زمانی که به حداقل مقاومت فشاری ۳/٥ مگاپاسکال (٥۰۰ psi) برسد. باید توجه داشت که گوشه و لبه بتن برای یخزدگی مستعدتر است. حداقل دمای لازم برای اختلاط بتن در مقاطع با ضخامت کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر (۱۲ اینچ)، ۱٦oC (٦۰oF) برای دمای هوای بالای ۱oC- (۳۰oF)، ۱۸oC (٦۰oF) برای دمای هوای بین ۱۸oC- و ۱- (۳۰oF و ۰) و۲۱ oC (۷۰oF) برای دمای زیر ۱۸oC- (۰oF) است.
دمای بتن را می‌توان با گرم کردن آب مخلوط، گرم کردن و یا بخار دادن سنگدانه‌ها افزایش داد. اما در این میان آب خیلی داغ، دمای بالای ۸۰°C (۱٤۰°F)، می‌تواند باعث

گیرش ناگهانی، ایجاد حالت ورقه‌ای و گلوله‌های سیمانی در مخلوط‌کن شود. همچنین لازم است تمام بستر و یا زیراساس از وجود برف و یخ پاک شود. بتن‌ریزی هرگز نباید بر روی سطح یخ‌زده انجام شود. بستر و یا زیراساس یخ‌زده را چند روز قبل از بتن‌ریزی با پوشاندن توسط مصالح عایق می‌توان آماده کرد.

انواع پوشش‌های عایق، برای محافظت از محل بتن‌ریزی عبارت از ورق‌های فوم پلی‌استایرن، فوم اورتان، پوشش فوم وینیل (با یا بدون سیم الکتریکی)، پشم معدنی یا فیبر سلولزی، پوشال و عایق چوبی است. مهار پوشش‌های عایق لازم است تا توسط باد برداشته و جابه‌جا نشود. در لبه‌ها و گوشه‌های نمایان، جدا کننده‌ها باید با ۳ برابر ضخامت مورد استفاده قرار بگیرند.

در هوای سرد، نرخ افزایش مقاومت رویه بتنی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این موضوع سه پیامد دارد. اول آن که ممکن است زمان لازم برای برش درز به تأخیر بیفتد. هرچند ممکن است هزینه‌های بیش‌تری برای اضافه‌کاری به پروژه تحمیل شود، ولی این کار باعث آسودگی خیال خواهد شد. دوم آن که، زمان لازم برای عمل‌آوری بتن طولانی‌تر می‌شود. هرچند ممکن است این پیامد در روش عمل‌آوری با آب و حفظ آب بتن مسئله‌ساز شود. درنهایت زمان بازگشایی روسازی به روی ترافیک به تأخیر می‌افتد که در پروژه‌های با محدودیت زمانی مشکل‌آفرین خواهد بود. به منظور حفظ گرمای هیدراتاسیون می‌توان میزان مقاومت بتن را با اصلاح نسبت‌های اختلاط (زیاد کردن نسبت سیمان و یا استفاده از سیمان تیپ III)، استفاده از افزودنی‌های تندگیر و یا پوشش‌های عمل‌آوری سرعت بخشید.

۱۵-٤-۳- افت شدید دمای محیط

افت دمای شدید محیطی حین اجرای روسازی به واسطه جبهه هوای سرد و بارش برف و باران در اواخر پاییز و اوایل بهار در آب‌وهوای شمالی رخ می‌دهد. طبق اظهارات هال و همکارانش اگر کمی بعد از گیرش اولیه بتن، دما به اندازه ١٤°C (٢٥°F) یا بیشتر کاهش پیدا کند، همین مقدار کافی است تا خطر ترک‌های اولیه را به طور قابل ملاحظه‌ای بالا ببرد. این موضوع به ویژه زمانی اهیمت پیدا می‌کند که دما، مقاومت روسازی بتنی با سیمان پرتلند را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای مثال، افت دمایی از ٢١°C به ٧°C (٧٠°F به °F٤٥) ریسک ایجاد ترک‌های اولیه را نسبت به افت دمایی ١٠٠°C به ٧٥°C (٣٨°F به ٢٤°F) بیشتر می‌کند.

بر اثر افت شدید دمایی، یک گرادیان دمایی منفی به دال تحمیل می‌شود (به طوری که

دمای لایه فوقانی دال بسیار کم‌تر از لایه تحتانی آن است). پس از سخت شدن رویه، این امر موجب ترک‌های کششی فوقانی و متعاقب آن ظرفیت ایجاد ترک‌های بالا به پایین[1] می‌شود. نوسانات شدید دمایی معمولاً در اواخر پاییز و اوایل بهار در آب‌وهوای شمالی و شمال شرقی رخ می‌دهد. برف و باران ناگهانی کمی بعد از بتن‌ریزی نیز می‌تواند موجب این نوسانات شود.

در صورت استفاده از لایه محافظ باید از روی بتن با دقت و به آرامی برداشته شود. در پایان دوره نگهداری، بتن باید به آرامی سرد شود تا ترک‌های احتمالی ناشی از اختلاف کرنش لایه فوقانی و تحتانی رویه کاهش یابد.

۱۵-۵- نرم‌افزار HIPERPAV

FHWA بسته نرم‌افزاری HIPERPAV را به عنوان دستورالعمل طراحی و ساخت رویه بتنی تهیه کرده است. در سال ۲۰۰۵، نسخه ارتقاء یافته این نرم‌افزار، به نام HIPERPAV II تهیه شد. این برنامه را می‌توان به صورت رایگان همراه با دستورالعمل‌های فنی آن از وب‌سایت FHWA به آدرس:

http:www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/hipemain.cfm

بارگیری کرد. همچنین طراحان نرم‌افزار، اطلاعات اضافی را بر روی وب‌سایت www.hiperpav.com قرار داده‌اند. در نرم‌افزار HIPERPAV می‌توان از دو سیستم SI و سیستم واحدهای مرسوم آمریکا استفاده کرد.

نسخه اصلی HIPERPAV طراحی رویه بتنی، مصالح و طرح اختلاط و شرایط محیطی و اجرایی را برای پیش‌بینی احتمال ترک‌خوردگی زودرس و زمان بهینه برای برش درزها مورد استفاده قرار می‌دهد. این برنامه فقط برای عملکرد اولیه روسازی بتنی غیرمسلح درزدار کاربرد دارد. در HIPERPAV II عملکرد بلندمدت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و رفتارهای اولیه و عملکرد روسازی بتنی مسلح یکپارچه نیز افزوده شده است. یک راهنمای استفاده نیز توسط FHWA منتشر شده است.

می‌توان با یک مثال استفاده از نرم‌افزار را توضیح داد که در آن برای آنالیز کوتاه‌مدت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار از مقادیر پیش‌فرض بسته نرم‌افزاری استفاده می‌شود. اطلاعات و خط‌مشی پروژه در قالب دو واحد ورودی ارائه شده است. اطلاعات مکان پروژه را مشخص و آن را با یک پایگاه اطلاعاتی آب‌وهوایی مرتبط می‌کند.

برای هر خط‌مشی، قسمت‌های مربوط به طراحی، مصالح و طرح اختلاط و شرایط اجرایی

1- Top-Down Cracking

و محیطی فراهم شده است. قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی است که مقدار پیش‌فرض آن ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است.
در قسمت طراحی، هندسه طرح، میلگردهای اتصال و نوع تکیه‌گاه دال مورد نیاز است. هندسه طرح شامل ضخامت، عرض و فاصله درزهای عرضی روسازی می‌باشد. مقادیر پیش‌فرض، دال به ضخامت ۲۵٤ میلی‌متر (۱۰ اینچ)، ۳/٦٦ متر (۱۲ فوت) عرض و فاصله بین درز (۱۵ فوت) ٤/۵۷ متر است.
اگر لازم باشد میلگردهای اتصال در آنالیز کوتاه‌مدت مورد بررسی قرار بگیرند، لازم است قطر آرماتورها را نیز وارد کرد. ممکن است مقادیر پیش‌فرض برای حالات مختلف انتخاب شود. برای حالت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، مقدار پیش‌فرض انتخابی برای قطر میلگردهای اتصال، ۳۸ میلی‌متر (۱/۵ اینچ) است.
هشت نوع بستر و زیراساس مختلف را می‌توان در بخش نوع تکیه‌گاه تعریف کرد که شامل بتن آسفالتی یا زیراساس آسفالتی تثبیت‌شده (هر دو می‌تواند هموار یا غیرهموار تعریف شود)، زیراساس تثبیت شده با سیمان، بستر رسی تثبیت شده با آهک، بستر رسی، و زیراساس شنی و ماسه‌ای تثبیت نشده است. سختی و اصطکاک هر بستر و زیراساس را نیز می‌توان بنا به نیاز تعریف کرد. شکل ۱۵-٤ ویژگی زیراساس آسفالتی با سطح خشن را نشان می‌دهد. زیراساس سخت با اصطکاک بالا، خطر ترک‌خوردگی میان دال را به ویژه در هوای گرم افزایش می‌دهد.
در قسمت طرح اختلاط و مصالح، نوع سیمان، اختلاط روسازی بتنی با سیمان پرتلند، مشخصات روسازی بتنی با سیمان پرتلند و اطلاعات مربوط به رسیدن بتن مورد نیاز است. به طور پیش‌فرض از سیمان تیپ III استفاده می‌شود. مثالی از نسبت‌های اختلاط بتن در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است. علاوه بر مواد تشکیل دهندهٔ بتن، ویژگی مصالح سنگی، افزودنی‌های مورد استفاده و نوع خاکستر بادی (در صورت استفاده) نیز باید مشخص شود. مشخصات روسازی بتنی با سیمان پرتلند شامل مقاومت، مدول الاستیسیته، افت و ضریب انبساط حرارتی است. می‌توان از روی نسبت اختلاط، ضریب هدایت حرارتی و نوع مصالح سنگی میزان افت را تخمین زد. اطلاعات مربوط به رسیدن بتن، براساس مقاومت موجود یا از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید.
یک مثال از داده‌های اجرایی در شکل ۱۵-٦ نشان داده شده است که شامل دمای بتن و لایه زیر رویه، نوع و زمان عمل‌آوری و نحوه برش درزها می‌باشد.
نمونه‌ای از داده‌های ورودی مربوط به شرایط محیطی در شکل ۱۵-۷ نشان داده شده است. دما، رطوبت، سرعت باد و هوای ابری از جمله این داده‌های ورودی هستند که

برمبنای محل و زمان اجرای پروژه تعیین می‌شوند. در این مثال محل پروژه راند راک[1] در تگزاس، در نزدیکی آستین قرار دارد. در هشتم جولای، حداکثر دما نزدیک به ۳۳oC (۹۱oF) و دمای حداقل درحدود ۲۳oC (۷۳oF) است.

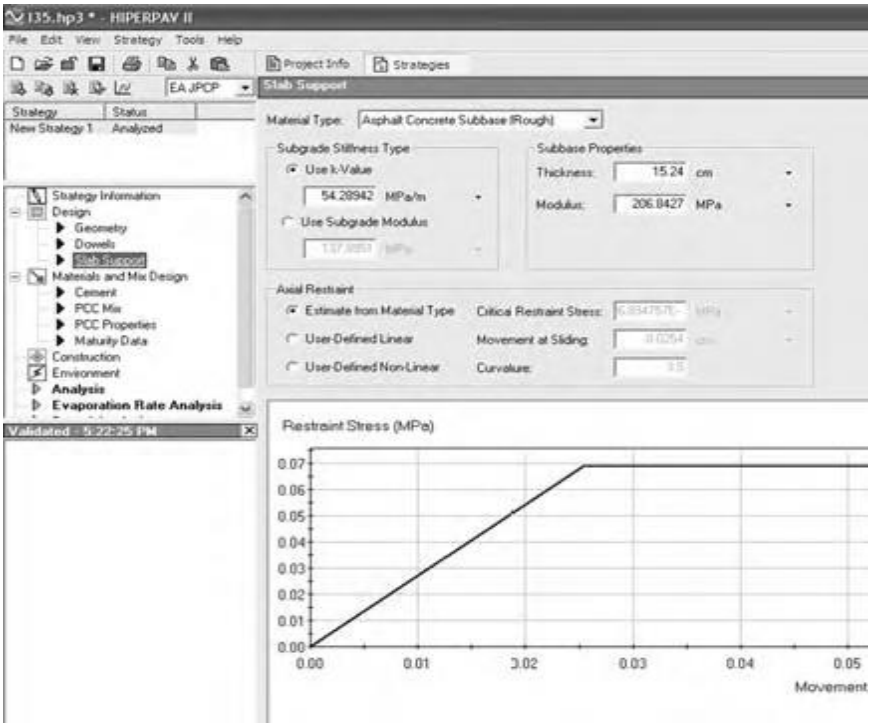
زمان ساخت از داده‌های مهمی است که باید به نرم‌افزار معرفی شود. در این مثال این زمان، مرز بین ترک‌خوردگی و عدم‌ترک‌خوردگی روسازی را رقم می‌زند. در این پروژه ۸ صبح زمان شروع عملیات ساخت روسازی در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه این تحلیل‌ها در شکل ۱۵–۸ نشان داده شده است. خط فوقانی نشان دهندهٔ افزایش مقاوت بتن می‌باشد، در حالی که خط پایینی بیان‌گر تجمع تنش در بتن است. پس از چهار ساعت از اجرای روسازی در ظهر، مقدار تنش از مقاومت بیشتر می‌شود. این امر حاکی از وقوع ترک زودرس می‌باشد. علت این امر آنست که در ظهر، گرمای محیط و هیدراتاسیون با یکدیگر ترکیب می‌شود. این در حالیست که اگر اجرای روسازی تا ساعت ۲ بعد از ظهر به تأخیر بیفتد، تنش از مقاومت روسازی تجاوز نمی‌کند و اگر سایر شرایط ثابت باقی بماند، احتمال ترک‌خوردگی کم‌تر می‌شود.

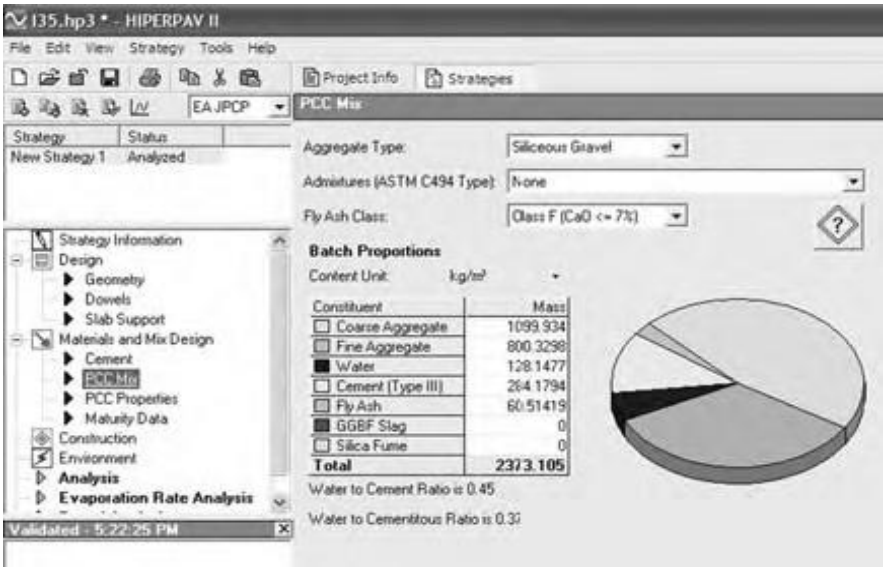
نرم‌افزار HIPERPAV باید با تجربه و قضاوت مهندسی مورد استفاده قرار بگیرد، زیرا ممکن است در ساعت ۲ بعد از ظهر بتن و زیراساس هر دو گرم‌تر باشند. بنابراین لازم است تأثیر متغیرهای مختلف را بر هم بدانیم. یک راه برای اجتناب از ترک‌خوردگی استفاده از زیراساس با صلبیت و اصطکاک کم‌تر می‌باشد.

همچنین این نرم‌افزار نرخ تبخیر و احتمال ترک‌خوردگی ناشی از افت خمیری بتن را پیش‌بینی می‌کند. در شکل ۱۵–۹ این مسئله برای اجرای روسازی در ساعت ۸ صبح نشان داده شده است که مقدار آن‌ها قبل از ساعت ۹ صبح، باد با سرعت ٤٨ کیلومتر بر ساعت (۳۰ mph) و در ساعت ۹:۳۰ باد با سرعت ٢٤ کیلومتر بر ساعت (۱۵ mph)، از مقدار مجاز خود بیشتر می‌شود. خوشبختانه پیش‌بینی انجام شده برای سرعت باد کم‌تر از ۸ کیلومتر بر ساعت (۵ mph) است.

1- Round Rock

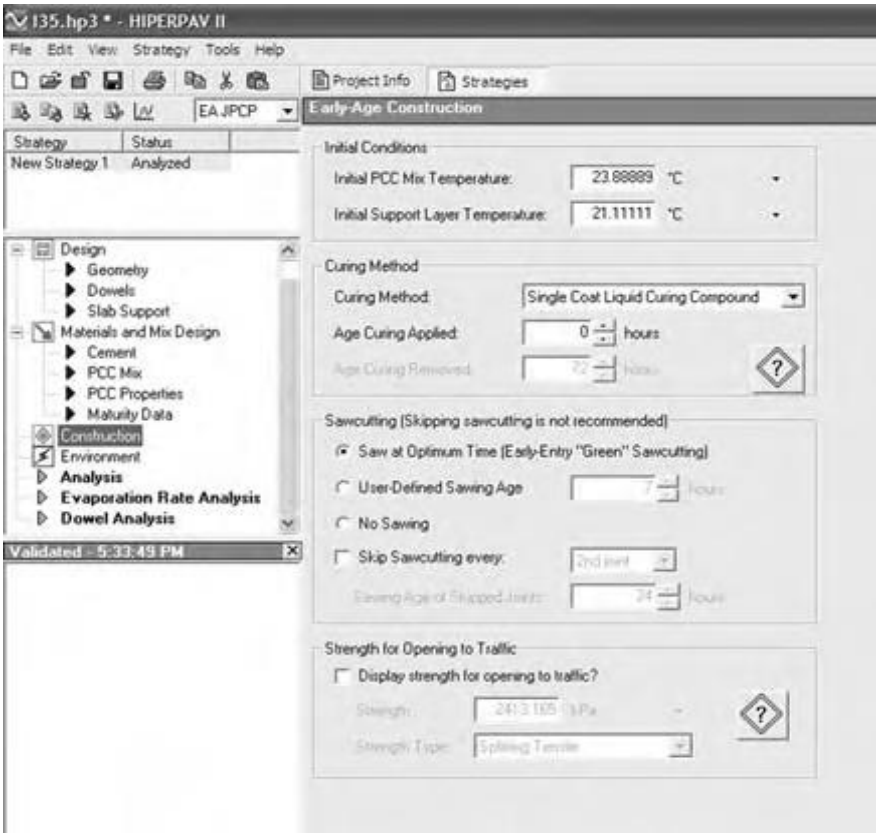


شکل ۱۵-٤: مشخصات زیراساس آسفالتی با سطح خشن



شکل ۱۵-۵: مشخصات مخلوط بتن

HIPERPAV وسیله مفیدی برای اجرای روسازی بتنی است و برای مهندسین و پیمانکاران این امکان را فراهم می‌کند تا به طور واقع‌بینانه خطر ترک‌خوردگی روسازی بتنی را تحت شرایط خاصی ارزیابی کنند. اداره حمل‌ونقل اوهایو کتابچه راهنمایی با عنوان «موارد مورد نیاز HIPERPAV برای روسازی بتنی» منتشر کرده است که نحوه استفاده از این نرم‌افزار را شرح می‌دهد. یک نسخه از این کتابچه را می‌توان از آدرس http://www.hiperpav.com بارگیری کرد. اگر استفاده از آن اجباری باشد، پیمانکار باید نتایج آنالیز HIPERPAV را حداقل ۲٤ ساعت قبل از بتن‌ریزی به مهندس پروژه ارائه دهد. HIPERPAV برای اجرای روسازی در فرودگاه Airborne Airpark واقع در اوهایو و فرودگاه Cincinnati-Northern Kentucky استفاده شده است.



شکل ۱۵-٦: داده‌های اجرایی

به همین شکل، هال و همکارانش اهمیت عوامل گوناگون بر ترک‌خوردگی زودهنگام بتن را مورد بحث قرار داده‌اند و مقادیر حدی که تجاوز از آن‌ها خطر ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد، تعیین کرده‌اند.

این عوامل براساس اولویت عبارتند از:

۱- مقاومت و سختی اساس.

۲- برش درزها.

۳- اندازه و نسبت طول به عرض دال‌ها.

٤- اصطکاک سطح مشترک رویه بتنی و اساس.

۵- درصد سیمان بتن.

٦- وجود یا عدم وجود جدا کننده.

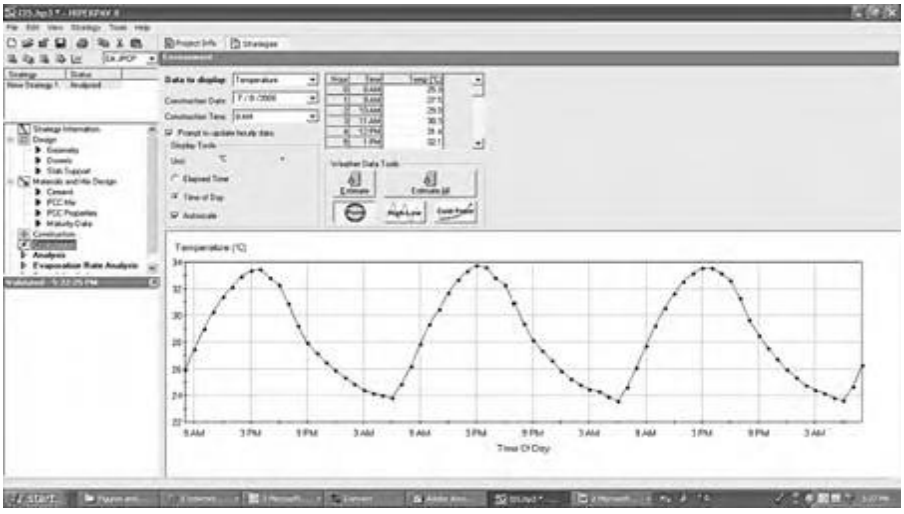
۷- عمل‌آوری بتن.

۸- قابلیت افت مخلوط بتن.

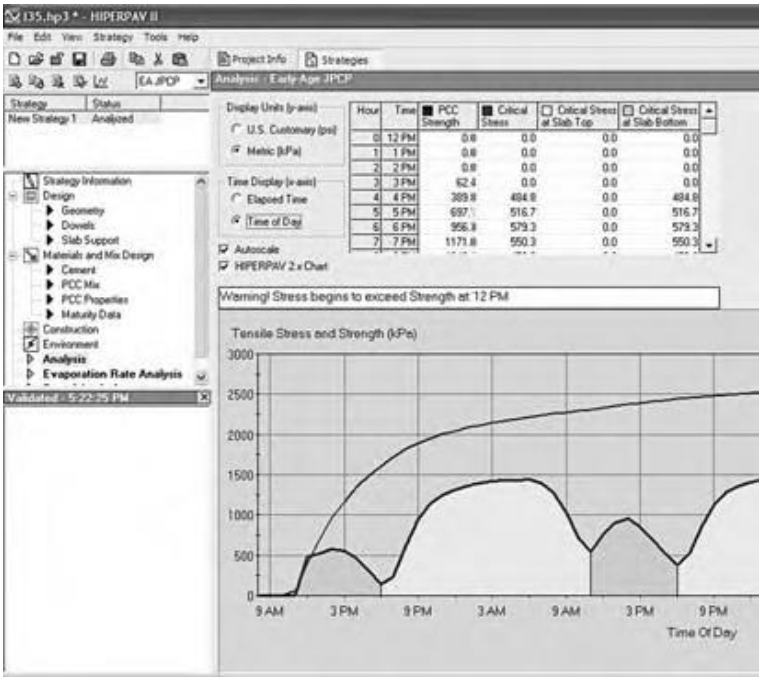
۹- ضخامت اساس.

۱۰- وجود ترک ناشی از افت در اساس.

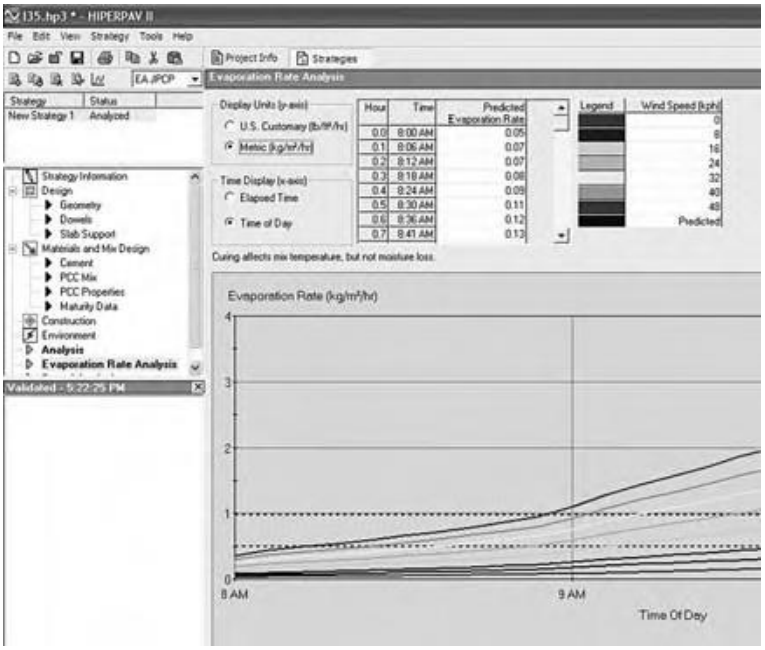
۱۱- گیرداری درونی دال (میلگردهای اتصال، میل‌مهارها و ...).



شکل ۱۵-۷: اطلاعات مربوط به شرایط محیطی



شکل ۱۵-۸: نتایج تحلیل



شکل ۱۵-۹: پیش‌بینی نرخ تبخیر

فصل شانزدهم

نگهداری روسازی بتنی

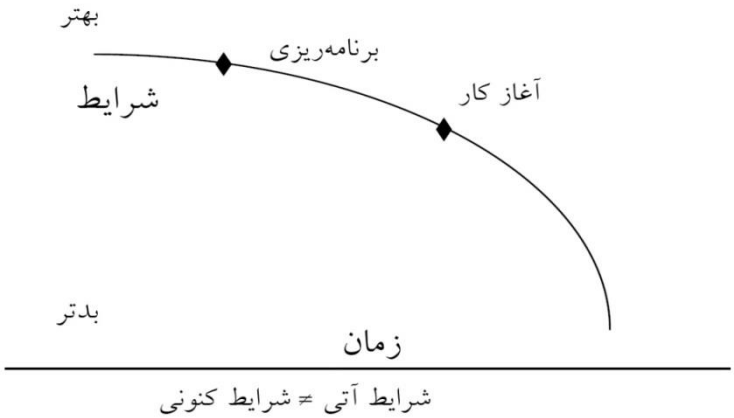
به طور کلی یک روسازی بتنی خوب نسبت به روسازی آسفالتی در شرایط ترافیکی و محیطی یکسان نیازمند نگهداری کم‌تری است، اما به ندرت اتفاق می‌افتد که روسازی بتنی نیاز به نگهداری نداشته باشد. نگهداری دوره‌ای هزینه احداث روسازی را حفظ می‌کند و هزینه‌های پیش از موعد مانند بهسازی و یا بازسازی مجدد را کاهش و در نهایت عمر خدمت‌دهی را افزایش می‌دهد. یکی از مسائل مهم شدت آسیب روسازی در فاصله زمان تصمیم‌گیری تا آغاز عملیات نگهداری است. این موضوع در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.

بسیاری از آسیب‌های روسازی و روش‌های ترمیم و نگهداری در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفت. ممکن است درزها و ترک‌های موجود نیاز به ترمیم آب‌بندی پیدا کنند. نگهداری مناسب و دور نگه داشتن مواد تراکم ناپذیر از درزها مانع از خردشدگی دال در این نقاط می‌شود. درزهای انبساطی باید بتوانند بدون ایجاد تنش تغییر طول بدهند. در ضمن سطوح پوسته شده و سایر خرابی‌های کوچک نیازمند وصله هستند.

معمولاً افتادگی یا جداشدگی شانه نسبت به خط عبور، در شانه‌های آسفالتی و سنگدانه‌ای رخ می‌دهد. پس از ترمیم و تعویض شانه، درز بین شانه و خط عبور را باید آب‌بندی کرد. برای جایگزینی شانه تخریب شده آسفالتی در بزرگراه پرتردد بین‌ایالتی ۲۸۵ واقع در جورجیا، از بتن غلطکی متراکم استفاده شد. این روش نشان داد در جایی که به دلیل ترافیک سنگین نگهداری شانه راه پرهزینه است، استفاده از بتن غلطکی متراکم مناسب می‌باشد.

ادارات راه براساس شرایط و تجربه، روش‌های مختلفی را برای نگهداری و بهسازی

تعریف کرده‌اند. وصله نیمه عمیق را نیز که در فصل ۱۷ مورد بحث قرار خواهد گرفت، می‌توان جزو روش‌های ترمیم و نگهداری به حساب آورد. باید آماده‌سازی محل اجرای وصله به دقت انجام شود تا بین وصله و روسازی موجود اتصال مناسبی برقرار و وصله‌ای بادوام حاصل شود. برخی از ادارات راه برای انجام وصله روسازی بتنی از وصله آسفالتی استفاده می‌کنند. اجرای وصله آسفالتی سریع و ارزان است اما دوام این وصله‌ها زیاد نبوده و هرچه زودتر باید با مصالح مناسب جایگزین شوند.



شکل ١٦-١: تأثیر تأخیر بر اجرای عملیات نگهداری

خرابی وصله‌ها خود یک مسئله مهم است. یکی از مهندسین ارتش آمریکا می‌گوید: «ما وقت زیادی را برای تعمیرکردن تعمیراتمان می‌گذرانیم». اجرای اغلب وصله‌ها با شرایطی مانند محدودیت زمانی و اجرای شبانه همراه است که این امر باعث می‌شود تا وصله‌ها به خوبی عمل‌آوری نشود. سهل‌انگاری در برطرف کردن خرابی روسازی و قفل‌وبست نامناسب وصله و روسازی موجود بر اثر عدم آماده‌سازی چاله، از جمله عواملی است که منجر به خرابی زودرس وصله‌ها می‌شود. با انجام روش‌های مناسب اجرای وصله می‌توان از خرابی‌های زودرس آن جلوگیری کرد.

روش‌های ترمیم اصطکاک سطحی روسازی را نیز می‌توان از موارد نگهداری به حساب آورد. این روش‌ها شامل خراش الماسی و روکش‌های نازک می‌شود. روکش‌های نازک می‌توانند توسط مصالح سنگی، قیر یا اپوکسی ساخته شوند.

نگهداری از روسازی فرودگاه‌ها به ویژه جلوگیری از صدمات ناشی از اجسام خارجی (FOD) بسیار مهم است. ماده‌ای که وجود آن باعث آسیب‌رسانی به هواپیما یا تجهیزات نگهداری شود، جسم خارجی به حساب می‌آید. در حالی که تکه‌های جدا شده از سطح

روسازی، در اثر پوسته‌شدگی، به ندرت در راه‌های اصلی مشکل‌ساز می‌شود، این اجسام خارجی در فرودگاه ممکن است وارد موتور هواپیما شده و خسارت‌های سنگینی را وارد کند. حتی ممکن است باعث از دست رفتن هواپیما و یا کارکنان فرودگاه شود.
بیرون‌پریدگی مصالح سنگی ناسالم، یکی از عوامل خطرناک مربوط به اجسام خارجی است که از سال ۱۹۵۹ در باند فرودگاه‌های نظامی مشاهده می‌شود. در نتیجه، مهندسین نظامی محدودیت‌های سرسختانه‌ای را در ارتباط با مواد زیان‌آور مخلوط بتن در نظر گرفتند. مشکلات اجرایی مربوط به پوسته‌شدگی بتن و FOD مانند اشکالات رایج در نسبت‌های اختلاط و عمل‌آوری بتن توسط رولینگز[1] مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۶-۱- مدیریت روسازی

نگهداری، بهسازی، اجرای روکش و رویه نهایی که در این فصل و دو فصل آینده مورد بحث قرار خواهند گرفت، همگی زیرمجموعه بحث مدیریت روسازی هستند. گاربر و هول[2] عنوان می‌کنند که مشکل اساسی پیش‌رو در راه‌های اصلی و ادارات راه، بودجه محدود تخصیص یافته برای تعمیر و بازسازی تمام محورهایی است که دچار خرابی شده‌اند. در راه‌های قابل استفاده با شرایط نامناسب، به تعویق انداختن تعمیرات کار ساده‌ایست ولی انجام این کار مشکلات موجود را پیچیده‌تر می‌کند. معمولاً خرابی راه‌ها به دلیل طراحی و اجرای ضعیف نیست، بلکه ناشی از فرسودگی و ساییدگی است که در طی سال‌ها رخ می‌دهد. تخریب تدریجی روسازی به عوامل بسیاری از جمله تغییرات آب‌وهوا، زهکشی، شرایط خاک و میزان تردد کامیون‌ها بستگی دارد.
مدیریت روسازی برای تعیین اولویت‌های پروژه، گزینه‌های ممکن و پیش‌بینی عملکرد روسازی، به جمع‌آوری و آنالیز داده‌های وضعیت روسازی نیازمند است. وضعیت روسازی با عواملی مانند ناهمواری، خرابی‌ها، وضعیت سازه‌ای و مقاومت لغزشی سنجیده می‌شود.
روش‌های سنجش وضعیت روسازی به نقل از گاربر و هول عبارتند از:

- همان طور که در فصل ۳ توضیح داده شد، سیستم سنجش ناهمواری راه براساس پاسخ انجام می‌شود. این روش همواری مسیر را اندازه‌گیری می‌کند.
- سیستم اینرسیایی پروفیل‌یاب راه، که در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفت. این ابزار نیز همواری مسیر را اندازه‌گیری می‌کند.

1- Rollings
2- Garber & Hoel

- یدک‌کش با چرخ قفل شونده با تایر آجدار و یا صاف، مقاومت لغزشی را اندازه‌گیری می‌کند و عموماً نتیجه آن را به صورت یک عدد لغزش نشان می‌دهد. این وسایل نیز در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفتند.
- روش‌های دستی ارزیابی خرابی روسازی اغلب کند هستند و باعث قطع جریان ترافیک می‌شوند. همچنین این روش برای افراد برداشت کننده، خطرات جانی به همراه دارد. در کل استفاده از روش‌های دستی، دقیق می‌باشد ولی امکان دارد افراد مختلف از یک نوع خرابی طبقه‌بندی‌های متفاوتی ارائه کنند. در نتیجه، اگر از گزارشی به گزارش دیگر شدت خرابی افزایش پیدا کند، بدین معنا است که روسازی مضمحل شده است و یا این که دو کارشناس برداشت‌های متفاوتی از شدت آسیب ارائه کرده‌اند. برای کاهش این تفاوت‌ها، مجموعه‌ای از استانداردها در قالب کتابچه‌های راهنمایی نظیر «کتابچه راهنمای تشخیص خرابی برای برنامه‌های عملکرد بلندمدت روسازی» به چاپ رسیده است.
- برای تسریع در جمع‌آوری اطلاعات مربوط به خرابی‌ها، از خودروهایی مانند سیستم پاسکو رُد ریکان[1] استفاده می‌کنند. این خودروها برای تحلیل دستی و خودکار وضعیت روسازی، از ابزار برداشت عکس و فیلم تا سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت (۵۰ مایل بر ساعت) استفاده می‌نمایند.
- دستگاه خیزسنج وزنه‌ای بر روی یدک، سوار می‌شود. این دستگاه پس از وارد کردن ضربه‌ای به روسازی، خیز ایجاد شده را با بازویی که شش حسگر به فاصله ۳۰۰ میلی‌متری (۱۲ اینچ) از یکدیگر اندازه‌گیری می‌کند.

نمونه‌ای از یک برنامه آزمایشی اداره نگهداری روسازی که برای برداشت خرابی‌ها از یک وَن، یک یدک‌کش با چرخ قفل شونده و یک دستگاه خیزسنج وزنه‌ای استفاده می‌کند، در وب‌سایت اداره حمل‌ونقل ایالت واشنگتون ارائه شده است.

اتومبیل وَن جمع کننده اطلاعات وضعیت روسازی، هر ساله میزان خرابی، گودی مسیر چرخ‌ها و ناهمواری‌ها را در سیستم راه‌های ایالتی برداشت می‌کند. ارزیابی وضعیت روسازی، به ارزیابی عملکرد روسازی شامل PSC (وضعیت سازه‌ای روسازی)، PRC (وضعیت شیارشدگی روسازی) و PPC (وضعیت پروفیل روسازی) تبدیل می‌شوند.

اطلاعات مربوط به پروفیل روسازی و تصاویر ویدئویی سطح روسازی از نمای روبه‌رو و شانه توسط این ون ضبط و ثبت می‌شود. می‌توان اطلاعات مزبور را در سرعت طرح راه‌های اصلی جمع‌آوری کرد و دقت برداشت اطلاعات را بهبود بخشید. بدین طریق

1- Pasco Road Recon

می‌توان امکان انجام تحقیقات و تحلیل‌های متنوعی را درباره عملکرد روسازی فراهم نمود. قبل از سال ۱۹۹۹ این اطلاعات از پشت شیشه جلوی خودو برداشت می‌شد. کارشناسان ارزیابی مسیر، از درون وَن‌هایی که با سرعت ١٦ کیلومتر در ساعت (۱۰ مایل بر ساعت) حرکت می‌کردند، با توجه به آنچه مشاهده می‌شد به ارزیابی مسیر می‌پرداختند. ون‌های پیشرفته گردآورنده اطلاعات امروزی، سرعت و دقت این فرآیند را بهبود بخشیده‌اند.

هر دو سال یکبار اصطکاک سطح رویه در تمام شبکه راه‌های اداره حمل‌ونقل ویسکانسین[1] اندازه‌گیری می‌شود. در واقع با کشیدن یدک‌کش با چرخ فقل شونده، ضریب اصطکاک بین تایر و روسازی اندازه‌گیری می‌شود (که به مقدار حقیقی آن عدد، عدد اصطکاک می‌گویند). همزمان با ثابت نگه داشتن سرعت وسیله نقلیه، در جلوی چرخ آن آب ریخته می‌شود و برای آزمایش چرخ، ترمز گرفته می‌شود. زمانی که چرخ از ایستادن باز می‌ایستد (حالت چرخ قفل شونده)، کشیده شدن بر روی سطح و نیروی (افقی و قائم) وارده اندازه‌گیری می‌شود.

اصطکاک در اکثر روسازی‌های خشک زیاد است. معمولاً مشکل اصطکاک به روسازی خیس مربوط می‌شود. بنابراین پیش از اندازه‌گیری، آزمایش عدد اصطکاک را با ریختن آب در سطح روسازی، انجام می‌دهند.

برای شبیه‌سازی چرخ در حال حرکت، دستگاه خیزسنج وزنه‌ای بار ضربه‌ای دینامیکی را به جای بار استاتیکی، شبه استاتیکی و یا لرزه‌ای، به روسازی وارد می‌کند. نوعی از دستگاه خیزسنج وزنه‌ای در شکل ١٦-٢ نشان داده شده است.

1- WSDOT

شکل ١٦-٢: دستگاه خیزسنج وزنه‌ای (عکس از نویسنده)

در محل درزها می‌توان از دستگاه خیزسنج وزنه‌ای برای اندازه‌گیری سختی و یکپارچگی سازه روسازی و انتقال بار استفاده کرد. ارزیابی سختی و اعمال بارهای مختلف را می‌توان با استفاده از تغییر وزنه و ارتفاع سقوط اعمال کرد. اوج خیز قائم در مرکز صفحه بارگذاری دستگاه خیزسنج وزنه‌ای و در فواصل مختلف از مرکز آن برداشت می‌شود و با استفاده از آن نموداری به نام حوزه خیز[1] ترسیم می‌شود.

برای اندازه‌گیری انتقال بار در محل درز، حسگرهایی در دو لبه آن تعبیه شده است که میزان خیز را اندازه‌گیری می‌کنند. اگر میزان خیز دو طرف درز به یک اندازه باشد، بیان‌گر آنست که انتقال بار توسط درز به طور ۱۰۰ درصد انجام می‌شود. اگر خیز دال از روسازی مجاور بدون بارگذاری بیشتر باشد، نشان دهندهٔ ضعف انتقال بار است.

برای ارزیابی ظرفیت روسازی فرودگاه، بار وارده توسط دستگاه خیزسنج وزنه‌ای با ظرفیت بارگذاری ۷ تا ۱۲۰ کیلونیوتن (۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰۰ پوند) کافی نیست. بنابراین افت‌وخیز سنج‌های سنگین‌وزن (HWD) با قابلیت بارگذاری از ۳۰ تا ۲٤۰ کیلونیوتن (٦۵۰۰ تا ۵٤۰۰۰ پوند) تولید شدند. با این دامنه بارگذاری، می‌توان هواپیماهای سنگینی مانند بوئینگ ۷٤۷ را نیز شبیه‌سازی کرد.

سایر عوامل ارزیابی روسازی بتنی در فصل ششم از نشریهFAA AC 150/5320-D ارائه شده است. ارزیابی روسازی فرودگاه از لحاظ نوع، برای تعیین میزان تحمل روسازی،

1- Deflection Basin

وزن و تعداد پروازهای مختلف ضروری است. در این ارزیابی ظرفیت باربری پل‌ها، آبروها، زهکش‌ها و سایر ابنیه روسازی موجود نیز در نظر گرفته می‌شود.
در فصول ۱۶، ۱۷ و ۱۸ روش‌های مختلف نگهداری، بهسازی، اجرای روکش و رویه داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی این روش‌ها برای سطوح مختلف خرابی مناسب است. در صورتی که روسازی در وضعیت خوبی قرار داشته باشد، روش‌های نگهداری برای رفع خرابی‌های جزیی، کفایت می‌کند. اگر وضعیت روسازی نامناسب‌تر باشد، انواع روش‌های بهسازی به کار گرفته می‌شود. در صورتی که روسازی موجود رو به اضمحلال برود، از روکش‌های مختلفی که برای شرایط موجود مناسب هستند استفاده می‌شود. همان طور که در فصل ۱۸ بیان خواهد شد، در روسازی‌هایی که وضعیت بهتری دارند روکش متصل و برای آن‌هایی که وضعیت نامساعدتری دارند، روکش غیرمتصل اجراء می‌شود. اگر وضعیت روسازی خیلی نامساعد باشد، لازمست کاملاً بازسازی شود. این روش از سایر روش‌ها گران‌تر و زمان‌برتر است.
یکی از چالش‌های موجود، انتخاب روش مناسب نگهداری و بهسازی است. یکی از راهکارهای موجود استفاده از سامانه‌های خبره است.
سامانه‌های خبره، مدل‌های رایانه‌ای هستند که در یک محدوده مشخص، در ارائه راه‌حل برای مشکلات مربوط به روسازی مهارتی در حد انسان دارند. دانش لازم برای ساخت سامانه خبره از طریق مصاحبه با مهندسین با تجربه در زمینه روسازی بدست می‌آید که تجربیات و دانش زیادی در مدیریت روسازی دارند. اطلاعات بدست آمده در این سامانه ذخیره می‌شود تا برای انتخاب مناسب‌ترین روش نگهداری و بهسازی روسازی به کار گرفته شود. از آنجایی که این اطلاعات به صورت یک بانک اطلاعاتی رایانه‌ای ذخیره می‌شود، دستیابی به تشخیص‌های مناسب برای کاربرانی که تجربه کافی ندارند، امکان پذیر می‌شود.
در بسیاری از ادارات راه، مشکلات و محدودیت‌های نگهداری روسازی با افزایش طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. این در حالیست که مهندسین سازنده این شبکه در شرف بازنشستگی هستند و مهندسین کم‌تجربه‌تر جایگزین آن‌ها می‌شوند. سامانه‌های خبره این امکان را فراهم می‌کند تا دانش مهندسین باتجربه را قبل از بازنشستگی در اختیار بگیریم. اطلاعات مربوط به وضعیت روسازی و انتخاب روش‌های نگهداری و بهسازی، داده‌های لازم برای برنامه‌ریزی عملیات بهسازی را فراهم می‌کند. برخی از روش‌های به کار گرفته شده شامل ارزیابی وضعیت، مدل‌های تعیین اولویت و بهینه‌سازی هستند:

- ارزیابی وضعیت در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، در طول یک سال به کار می‌رود.

برای این منظور یک معیار اولیه برای بهسازی روسازی، مثلاً psi برابر ۲/۵، در نظر گرفته می‌شود و محورهایی که بعد از این معیار مورد سنجش قرار می‌گیرند، برای عملیات بهسازی انتخاب می‌شوند. اگر نیازها از میزان بودجه فراتر رود، می‌بایست به اولویت‌بندی نیز اقدام کرد.

- مدل‌های بهینه‌سازی مثل برنامه‌ریزی خطی یا برنامه‌ریزی دینامیکی و برنامه‌ریزی عددی قادر هستند تا همزمان تمام شبکه را بررسی و ارزیابی کنند. هدف این مدل‌ها این است در محدوده بودجه تعیین شده و استانداردهای عملکردی، کل فواید شبکه را به حداکثر و یا کل مخارج شبکه را به حداقل برسانند.
- مدل‌های تعیین اولویت، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت را به برنامه‌ریزی چندساله تبدیل می‌کنند.

برای روسازی فرودگاه‌ها، سازمان هواپیمایی فدرال از یک شاخص وضعیت روسازی (PCI) استفاده می‌کند تا به طور عددی وضعیت روسازی را درجه‌بندی کند. مقادیر PCI برای روسازی که هیچ نوع خرابی ندارد برابر ۱۰۰ و برای خیابانی که عمر خدمت‌دهی آن به پایان رسیده است برابر صفر منظور می‌شود. سایر حالات در این محدوده جای می‌گیرد.

۱۶-۲- آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها

یک اقدام مهم در نگهداری روسازی، آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها است. گرچه برخی از انواع درزگیر، مانند قیر ذغالی PVC، می‌توانند تا ۸ سال دوام داشته باشند اما معمولاً درزگیرهایی که به صورت داغ ریخته می‌شوند می‌بایست در طول ۳ الی ۵ سال جایگزین شوند. درزگیرهای سیلیکونی می‌توانند ۸ تا ۱۰ سال دوام داشته باشند. درزگیرهای فشاری نیز بین ۱۵ تا ۲۰ سال عمر خدمت‌دهی دارند. ترک‌های مویی نازک با عرض کم‌تر از ۳ میلی‌متر ($^1/_8$ اینچ) احتیاج به درزگیری ندارند. ترک‌های با عرض ۳ تا ۱۲ میلی‌متر ($^1/_2$ تا $^1/_8$ اینچ) باید درزگیری و ترک‌های عریض‌تر می‌بایست وصله شوند. آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها را به عنوان بخشی از یک روش بهسازی می‌توان به همراه وصله و خراشیدن سطح انجام داد. همان طور که در فصل ۳ بحث شد، درزهایی که به طور نامناسب نگهداری می‌شوند، دچار ترکیدگی خواهند شد.

به عنوان یک قانون کلی، تقریباً تمام مواد آب‌بند قبل از تخریب بتن خراب می‌شوند. بنابراین همواره احیای آب‌بندی درزها ضروری است. همان طور که در فصل ۱۷ صحبت

خواهد شد، لازمست پس از جایگذاری و تقویت میلگردهای اتصال، ترک‌های ایجاد شده در دال نیز آب‌بندی شود.
نشریه انجمن روسازی بتنی آمریکا ابلاغیه فنی TB-012.P را تحت عنوان «آب‌بندی و تعمیر درز و ترک روسازی بتنی» تهیه کرد که در آن نحوه ارزیابی درزگیر موجود را به لحاظ نیاز به درزگیری مجدد مورد بحث قرار می‌دهد. خرابی‌ها شامل عدم‌چسبندگی (نچسبیدن درزگیر به بتن)، عدم‌پیوستگی (از هم گسیختگی داخلی) و اکسیده شدن یا سخت شدن می‌باشد. یک تیغه نازک فلزی را می‌توان در درز فرو کرد تا بتوان چسبندگی درزگیر را ارزیابی کرد. پوسته‌شدگی در محل درز نیز می‌تواند ناشی از گسیختگی مواد آب‌بند باشد.

۱۶-۲-۱- آب‌بندی مجدد درز

عملیات آب‌بندی مجدد درز عموماً باید در فصل بهار یا پاییز که درجه حرارت متعادل است انجام گیرد تا درزها کاملاً باز یا کاملاً بسته نباشند. پنج مرحله عملیات آب‌بندی مجدد درز عبارتنداز:
۱- برداشتن درزگیرهای قدیمی.
۲- شکل دادن به حفره درز.
۳- تمیز کردن حفره درز.
٤- نصب میله پشت کار.
۵- قرار دادن درزگیر.
درزگیرهای فشاری را می‌توان به کمک دست از درز خارج کرد. ولی برای خروج سایر درزگیرها از اره‌های الماسی و یا تیغه‌های متصل به ماشین‌آلات ساختمانی استفاده می‌شود. وقتی درزگیرهای قدیمی برداشته شد، می‌بایست حفره درز را با اره‌کاری تمیز و تعریض کرد. برای این کار همان دستگاه‌ها و تیغه‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای برش اره‌ای حفره استفاده شد. برای درزگیرهای فشاری که با دست برداشته می‌شوند و درزهایی که پس از اره کردن و پاک‌کردن درزگیر قدیمی در وضع مناسبی قرار دارند، ممکن است انجام این مرحله ضروری نباشد. هرگونه پوسته‌شدگی در مجاورت درزها که نیاز به وصله کردن داشته باشد، باید قبل از تعویض مواد آب‌بندی صورت پذیرد. تمیز بودن درز به منظور چسبندگی مواد آب‌بند با حفره ایجاد شده ضرورت دارد. پس از این مرحله، نصب میله پشت‌بند و اجرای درزگیر جدید مطابق اصول اجرایی ارائه شده در فصل چهاردهم انجام می‌شود.

در درزهای انبساطی و جدا کننده تراکم مواد درزگیر و جایگذاری ماده درزگیر جدید کفایت می‌کند. کنترل درزهای اجرایی با فاصله کم‌تر از ۳۰ متر (۱۰۰ فوت) از درزهای انبساطی ضروریست تا تغییر مکان اضافی اتفاق نیفتد. درزهای بین خط عبور و شانه راه، حداقل بایستی به عرض ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) برش خورده و سپس به وسیله درزگیر پر شود. در این میان شانه‌های آسفالتی با مشکل نشست مواجه هستند و اجرای درز بین خط عبور بتنی و شانه آسفالتی همواره با چالش مواجه بوده است. برای خشک و تمیز کردن درزها نباید از مشعل پروپان استفاده کرد. زیرا این امر ممکن است باعث پوسته‌شدگی و هوازدگی بتن شود.

۱۶-۲-۲- آب‌بندی مجدد ترک

درزگیری ترک‌ها به مراتب دشوارتر است. زیرا ترک‌ها برخلاف درزها، مستقیم نیستند و عرض یکنواختی نیز ندارند. بنابراین تمیز کردن، شکل دادن و پرکردن آن‌ها مشکل‌تر است. اولین قدم استفاده از یک تیغه با قطر کم (۱۷۵-۲۰۰ میلی‌متر یا ۸-۷ اینچ) است که به اندازه کافی انعطاف پذیر باشد و بتواند در پیچ‌وخم ترک حرکت کند. تیغه‌های با قطر زیاد ممکن است گرمای زیاد تولید کند و با جدا شدن تکه‌هایی از آن برای کاربر خطرآفرین شود. دستگاه فرز دستی هم نتایج خوبی به دنبال نخواهد داشت. پس از اتمام برش اره‌ای، اقدامات بعدی مانند مراحل آب‌بندی مجدد دنبال خواهد شد.

نشریه انجمن روسازی بتنی آمریکا ابلاغیه فنی TB-012.P را تحت عنوان «آب‌بندی، تعمیر درز و ترک روسازی‌های بتنی» تهیه کرده است که در آن خلاصه‌ای از آب‌بندی و آب‌بندی مجدد ترک‌ها ارائه شده است. این نشریه اشاره می‌کند که ترک‌های مویی نیازی به ترمیم و درزگیری ندارند.

جزئیات کامل عملیات آب‌بندی مجدد ترک‌ها و درزها همراه با تصاویر اجرایی در کتابچه راهنمای آشتو، FHWA، اعضای آموزش درزهای صنعتی، تحت عنوان «اجرای روسازی بتنی با استفاده از سیمان پرتلند» ارائه شده است. یک حلقه CD با فایل‌های پاورپوینت به همراه این راهنما وجود دارد که می‌توان آن را جداگانه از انجمن روسازی بتنی آمریکا خریداری کرد.

۱۶-۲-۳- نگهداری سامانه‌های زهکشی

نگهداری از زهکش‌های سطحی و زیرسطحی امری مهم و ضروری است. زیرا در غیر این صورت فواید این سامانه از بین می‌رود. مراقبت از زهکش‌های سطحی نسبتاً آسان‌تر است. زیرا کافیست آبروهای حاشیه را از علف‌ها و گیاهان پاکسازی کرد، موانع سطحی را برطرف نمود و مسیر را تمیز نگه داشت.

با توجه به این که دسترسی به سامانه زهکش‌های زیرسطحی غیرممکن است، مراقبت از آن‌ها با دشواری همراه خواهد بود. به همین دلیل، همان طور که در فصل چهارم بحث شد، این زهکش‌ها باید طوری طراحی شوند که از مسدود شدن آن‌ها جلوگیری به عمل آید. اگر لوله‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌توان آن‌ها را تمیز کرد. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که لوله‌هایی بزرگ‌تر از آنچه در طراحی هیدرولیکی محاسبه شده است به کار گرفته شود تا بازدید و تمیز کردن آن‌ها آسان‌تر شود. اصلاح زهکش‌های لبه‌ای در دسته‌بندی بهسازی قرار می‌گیرد.

فصل هفدهم

ترمیم

زمانی که برای بازیابی خدمت‌دهی نتوان از روش‌های نگهداری استفاده کرد، ترمیم روسازی ضرورت پیدا می‌کند. یکی از طبقه‌بندی‌های ترمیم روسازی، عملیات احیای روسازی بتنی است که شامل تثبیت دال، وصله‌کاری عمیق و نیمه عمیق، اصلاح میلگرد اتصال[1]، ایجاد خراش با تیغه الماسی[2] و آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها است. همان طور که در فصل ۱۶ بیان شد، آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها، جزء روش‌های نگهداری روسازی نیز محسوب می‌شود. در برخی از حالات، مانند اصلاح میلگرد اتصال و ایجاد خراش با تیغه الماسی، راهکارهای عملیات احیای روسازی بتنی موجب می‌شود تا انتقال بار و ناهمواری‌های روسازی اصلی اصلاح شود و حتی آن را نسبت به روسازی جدید مناسب‌تر نماید.

یک بحث مفصل درباره عملیات احیای روسازی بتنی، به همراه عکس در کتابچه راهنمای آشتو، FHWA، اعضای آموزش درزهای صنعتی، با عنوان «اجرای روسازی بتنی با سیمان پرتلند» ارائه شده است. یک حلقه CD همراه با فایل‌های پاورپوینت نیز وجود دارد که می‌توان آن را جداگانه از انجمن روسازی بتنی آمریکا خریداری کرد. بخش‌های این کتابچه راهنما عبارتند از:

- کلیات عملیات احیای روسازی بتنی؛
- عملیات تثبیت دال؛
- عملیات وصله‌کاری کلی (عمیق)؛

1- Dowel Bar retrofit
2- Diamond Grinding

- عملیات وصله‌کاری جزیی (نیمه عمیق)؛
- اصلاح میلگرد اتصال؛
- عملیات ایجاد خراش با تیغه الماسی؛ و
- آب‌بندی مجدد درزها و ترک‌ها.

یکی دیگر از کلمات مخفف در مدیریت روسازی CPR می‌باشد، که مخفف احیاء[1]، بازسازی رویه[2]، و بازسازی[3] روسازی بتنی است. عملیات ترمیم مجموعه روش‌هایی است که در بالا مورد بحث قرار گرفت. بازسازی رویه به روش‌های اجرایی روکش اشاره دارد که به منظور بهبود مشخصات سازه‌ای یا عملکردی روسازی از آن‌ها استفاده می‌شود. این روش‌ها در فصل ۱۸ مورد بحث قرار می‌گیرند. در اکثر به منظور جلوگیری از انعکاس و انتقال خرابی به روکش جدید موارد پیش از اجرای برخی از روش‌های آماده‌سازی ضرورت پیدا می‌کند. روش سوم یعنی بازسازی، گران‌ترین و وقت‌گیرترین روش است که در آن سازه روسازی به طور کامل برداشته می‌شود. روسازی را بدون هیچ‌گونه تغییری در ارتفاع می‌توان با استفاده از رویه میانی[4] نیز بازسازی کرد. بازیافت مصالح قدیمی باید مدنظر قرار بگیرد. این کار باعث حفظ منابع طبیعی کمیاب و صرفه جویی در زمان و انرژی می‌شود، زیرا نیازی به حمل مصالح قدیمی به بیرون از فضای کار و مصالح جدید به پای کار نیست.

یکی از راهکارهای مفید ترمیم انواع روسازی، اصلاح زهکش‌های لبه است که در فصل چهارم در مورد آن بحث شد. اگرچه اصلاح زیراساس نفوذپذیر امکان پذیر نیست ولی زهکش‌های لبه به زهکشی زیراساس و بستر کمک می‌کند و سطح آب را در مجاورت روسازی پایین می‌آورند که این امر موجب بهبود عملکرد آن می‌شود.

۱۷-۱- انتخاب روش‌های نگهداری و روکش

انتخاب راهکار مناسب برای ترمیم روسازی موضوع پیچیده‌ای است. رفع نیازهای گسترده ترمیم روسازی با منابع محدود کار دشواری است. به منظور رفع مشکلات مربوط به تخریب زیرساخت‌ها، تکنولوژی ترمیم روسازی به سرعت در حال تغییر است. یکی از منابع مفید در این زمینه نشریه انجمن روسازی بتنی آمریکا با عنوان «انتخاب راهکار

1- Restoration
2- Resurfacing
3- Reconstruction
4- Inlay

مناسب برای ترمیم روسازی» است. عوامل زیادی در انتخاب روش‌های ترمیم روسازی مؤثر هستند که از جمله این موارد:

- سطح خرابی روسازی؛
- هندسه؛
- ترافیک؛
- قابلیت اجراء؛ و
- ضوابط خدمت‌دهی پروژه در آینده.

اطلاعات مورد نیاز پروژه به پنج گروه اطلاعات طراحی روسازی موجود، اطلاعات اجرایی، اطلاعات ترافیکی، اطلاعات اقلیمی (بارش، دما، شرایط یخبندان و ذوب) و وضعیت خرابی روسازی تقسیم می‌شود. نوع و مقدار اطلاعاتی که می‌بایست جمع‌آوری شود، اغلب به مقیاس و پیچیدگی فعالیت‌های ترمیم بستگی دارد.

در ترمیم روسازی نه تنها علائم خرابی، بلکه دلایل آن را هم باید مورد بررسی قرار داد. مهندس باید وضعیت سازه‌ای و عملکردی روسازی را تعیین کند. مشکلات سازه‌ای در روسازی بتنی به اشکال مختلفی از قبیل شکستگی‌های گوشه، مکش، پلکانی‌شدن درزها و خرد شدن دال بروز می‌کند. آسیب‌های عملکردی (همواری و مقاومت لغزشی) بر کیفیت سواری و ایمنی تأثیرگذار است و دخالتی بر سازه روسازی ندارد. ارزیابی روسازی شامل نمونه‌گیری و انجام آزمایش برای تعیین واکنش قلیایی- سیلیس و یا ترک‌خوردگی نوع D است. مشکلات ناشی از نقص زهکشی کاملاً مشخص می‌شود. اغلب خطوط بیرونی خرابی بیشتری دارد و سایر خطوط به این اندازه مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

زمان‌بندی عملیات ترمیم نیز حائز اهمیت است. با توجه به نحوه فرسایش روسازی، ترمیم متناسب با آن نیز تغییر می‌کند. انجام ترمیم به موقع میزان هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در مقابل با به تعویق افتادن ترمیم متحمل هزینه بیشتری خواهیم شد که ممکن است اثربخشی کم‌تری نیز داشته باشد. مفهوم حفظ روسازی، نگهداری به موقع (مانند آب‌بندی ترک‌ها و درزها) است که فرسایش بعدی روسازی (مانند خرابی‌های ناشی از رطوبت) را به تعویق می‌اندازد. گذشته از این موارد، از آن جایی که بین جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت روسازی، برنامه‌ریزی ترمیمی و اجرای آن یک وقفه زمانی وجود دارد، فرسایش صورت گرفته در طول این مراحل نیز باید مدنظر قرار بگیرد. این فاصله زمانی در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.

۱۷-۲- تعمیرات عمیق و نیمه عمیق

وصله عمیق و نیمه عمیق شامل برداشتن و تعویض قسمتی از دال است که دچار آسیب دیدگی شده باشد. وصله عمیق تا زیر بتن ادامه می‌یابد و اغلب برای رفع مشکلاتی نظیر خرابی‌های درز، شکست‌های گوشه و ترک‌های چندگانه به کار می‌رود. وصله عمیق در شکل ۱۷-۱ نشان داده شده است. سوراخ‌شدگی در روسازی بتنی مسلح یکپارچه را نیز می‌توان به کمک وصله عمیق برطرف کرد. وصله نیمه عمیق در سطحی کم‌تر از یک مترمربع (۱۱ فوت‌مربع) و عمق ۵۰ تا ۷۵ میلی‌متر (۲ تا ۳ اینچ) اجراء و معمولاً برای رفع پوسته‌شدگی و سطوح آسیب داده کوچک به کار برده می‌شود. وصله نیمه عمیق در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است.

یکی از مسایل مهم این است که بدانیم چه زمانی از وصله عمیق و چه زمانی از وصله نیمه عمیق استفاده کنیم. در وصله نیمه عمیق تمهیدات بیشتری لازم است و گاهی خطر عدم تعویض تمام قسمت خراب شده وجود دارد. اگر قرار باشد اجرای وصله نیمه عمیق در مقیاس وسیعی صورت بگیرد، می‌توان به جای آن از وصله عمیق با تعداد کم‌تر استفاده کرد که اجرای آن سریع‌تر و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. هرچند که در وصله عمیق هزینه مصالح به کار رفته بیشتر است، اما هزینه‌های مربوط به نیروی کار کاهش می‌یابد و در نهایت روسازی عملکرد بهتری از خود نشان خواهد داد.

شکل ۱۷-۱: گودال آماده‌شده به منظور وصله عمیق در محل درز (ACPA 1996a: VIII-28)

شکل ۱۷-۲: تعمیر نیمه عمیق (ACPA 1996a: VIII-57)

در بسیاری از موارد، یک خرابیِ سطحیِ کوچک، ناشی از یک آسیب داخلی قابل توجه است. گاهی وسعت خرابی را می‌توان با استفاده از مغزه‌گیری مشخص کرد. در این صورت وصله نیمه عمیق چاره‌ساز نبوده و استفاده از وصله عمیق مورد نیاز خواهد بود.

۱۷-۲-۱- وصله عمیق

در صورت طراحی و اجرای صحیح وصله‌های عمیق، انتظار می‌رود که به اندازه رویه اطراف خود دوام داشته باشد. وسعت محل وصله باید از مساحت محل خرابی بیشتر باشد و تمام پوسته‌شدگی‌ها را در زیر سطح خود بپوشاند. حداقل طول وصله برابر با ۲ متر (٦ فوت) در نظر گرفته می‌شود و باید وصله‌های نزدیک به یکدیگر در هم ادغام شوند. در درزهای عرضی با میلگرد اتصال، حداقل برابر با ۰/۳ متر (۱ t,j) و در ترک‌های روسازی بتنی مسلح یکپارچه حداقل به‌اندازه ۱۵ سانتی‌متر (٦ اینچ)، باید وصله را از محل خرابی جلوتر اجراء کرد. عموماً وصله‌های عمیق تمام عرض روسازی را در بر می‌گیرند.

یک نمودار برای هندسه متداول وصله در روسازی بتنی مسلح درزدار، روسازی بتنی غیرمسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح یکپارچه در صفحه VIII-27 از کتابچه راهنمای انجمن روسازی بتنی آمریکا در صفحه (VIII-27) و در صفحه چهارم راهنمای تعمیر

عمیق ابلاغیه فنی TB002.02P، ارائه شده است. بازسازی روسازی و اجرای یک روکش غیرمتصل ممکن است ارزان‌تر و سریع‌تر از اجرای وصله در سطح وسیع باشد. علت آنست که اجرای پیوسته روسازی نسبت به اجرای وصله‌های گسسته راحت‌تر بوده و ممکن است روسازی باقی‌مانده عمر محدودی داشته باشد. نکته مهم دیگر این است که وصله‌ها باید تا حد امکان مربع شکل بوده و نسبت طول به عرض آن بیشتر از ۱ به ۱/۵ نباشند.

قبل از برداشتن قسمت آسیب دیده در روسازی بتنی باید برش‌های عمیقی توسط اره اجراء شود. توجه داشته باشید که بتن تخریب شده بدون آسیب به روسازی مجاور، بیرون آورده شود. برای این منظور از اره‌های تیغه الماسی استفاده می‌شود. ممکن است تیغه اره به دلیل انبساط حرارتی به دیواره روسازی بچسبد. این مشکل را با برش‌کاری در شب یا اجرای برش‌های آزاد کننده در هر ۳۶۰–۱۸۰ متر (۱۲۰۰–۶۰۰ فوت) پیش از برش وصله، می‌توان برطرف کرد. دستگاه‌های برش کاربیدی و سنگی را می‌توان برای انجام برش‌های داخلی به کار برد. برش محیطی در روسازی بتنی مسلح یکپارچه باید ۰/۳۳–۰/۲۵ برابر عمق دال انجام شود. همچنین برش‌های عمیق را نیز می‌توان بعداً اجراء کرد تا به میلگردها آسیبی نرسد.

بتن موجود را با بلند کردن یا شکستن در محل، بیرون می‌آورند. به خاطر آسیب کم‌تر به زیراساس بلند کردن ترجیح داده می‌شود. برای این منظور میله‌های بالابرنده در بتن جاسازی و به ابزار بالابر وصل می‌شود. اگر خرابی روسازی پیشرفته باشد، باید آن را در قطعه‌های کوچک بیرون آورد. گودال وصله باید خشک و خوب متراکم شده باشد. لازم است برای فراهم کردن انتقال بار بین وصله و روسازی موجود به غیر از روسازی‌هایی که ترافیک سبک را تحمل می‌کنند، از میلگردهای اتصال استفاده شود. نصب میلگردهای اتصال توسط دریل‌های خودکار، سریع‌تر و دقیق‌تر انجام می‌شود. برای این کار سوراخ ایجاد شده را تمیز و سپس میلگردهای اتصال را به وسیله دوغاب و صفحه نگهدارنده جایگذاری می‌کنند. برای جایگذاری درزهای طولی از میلگردهای آجدار استفاده می‌شود. همان طور که در شکل ۱۷–۳ نشان داده شده است، در امتداد لبه وصله عمیق، یک صفحه جدا کننده نصب می‌شود.

بتن‌ریزی با کامیون مخلوط بتن و یا سایر وسایل بتن‌ساز انجام می‌شود. باید بتن را به طور یکنواخت توزیع و ویبره کرد. از شمشه‌های لرزشی یا مستقیم ۳ متری (۱۰ فوت) برای ماله‌کشی و پرداخت نهایی استفاده می‌شود. باید بافت سطح وصله اجراء شده مشابه

روسازی موجود باشد و با یک ترکیب عمل‌آوری سنگین غشایی، عمل‌آوری شود. می‌توان برای تسریع در روند دستیابی به مقاومت قابل قبول و بازگشایی سریع‌تر روسازی به روی جریان ترافیک، از تشک‌های جدا کننده استفاده کرد. سرانجام لازم است درزهای موجود آب‌بندی شود.

اطلاعات بیشتر درباره تعمیرات عمیق با عنوان «راهنمای تعمیرات عمقی، ابلاغیه فنی TB002.02P» در نشریه انجمن روسازی بتنی آمریکا، ارائه شده است. این کتابچه ۲۰ صفحه‌ای جزئیات بیشتری درباره روش‌های ترمیم عمیق، مانند حداقل مقاومت لازم برای بازگشایی وصله‌ها به روی جریان ترافیک در اختیار قرار می‌دهد.

شکل ۱۷-۳: تعمیر عمقی با میلگردهای اتصال و صفحه الیافی به منظور جداسازی (ACPA:1996a)

FHWA یک چک‌لیست ۱۶ صفحه‌ای با عنوان «تعمیرات عمقی روسازی بتنی با سیمان پرتلند» منتشر کرده است. این چک‌لیست روش‌های آماده‌سازی و اجرای تعمیرات عمقی روسازی بتنی را پوشش می‌دهد که می‌توان آن را از وب‌سایت زیر بارگیری کرد:
http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_listing.cfm.

انجمن روسازی بتنی آمریکا نشریه‌ای با عنوان «برش‌های تأسیساتی و تعمیرات عمقی در خیابان‌ها» منتشر کرده است. روش‌های کلی مشابه روش‌های معمول اجرای وصله‌های عمقی است.

در کل برای اجرای برش‌های تأسیساتی نیازی به استفاده از میلگردهای اتصال نیست، اما

امتداد این برش‌ها باید تا حد امکان در درزها و لبه‌های دال ادامه پیدا کند. این کار از گسترش ترک در تعمیرات انجام شده در محل درز جلوگیری می‌کند. برای پرکردن ترانشه‌های تأسیساتی می‌توان از پرکننده تراکم پذیر و پرکننده دوغابی استفاده کرد. پرکننده دوغابی، مخلوطی از سیمان پرتلند، خاکستر بادی، آب و مصالح ریزدانه است که به تفصیل در گزارش انجمن بتن آمریکا با عنوان «مصالح کم‌مقاومت کنترل‌شده (CLSM)»، مورد بحث قرار گرفته است. پرکننده دوغابی نیازی به تراکم دستی ندارد و با گذشت زمان متراکم می‌شود. این مصالح عموماً به وسیله کامیون‌های بتن آماده حمل می‌شود.

نوع متفاوتی از تعمیرات عمیق، به جای پانل‌های مخصوص روکش‌های بتنی فوق نازک استفاده می‌شود. جایگزینی این پانل‌ها یک روش ترمیمی مناسب برای روکش‌های بتنی فوق نازک محسوب می‌شود. توضیحات این روش با عنوان «تعمیر پوشش‌های سفید فوق نازک»، در نشریه انجمن روسازی بتنی آمریکا ارائه شده است.

۱۷-۲-۲- وصله نیمه عمیق

وصله‌های نیمه عمیق برای رفع پوسته‌شدگی و لایه‌لایه شدگی‌های کم‌عمق اجراء می‌شوند. تشخیص لایه‌لایه شدگی و ناسالم بودن بتن از روی سطح امکان پذیر نیست. بنابراین یکی از گام‌های اولیه، تعیین موقعیت دقیق آسیب‌های وارده و لایه‌لایه شدن بتن است که این کار را می‌توان با ضربه چکش، میلگرد و یا زنجیرهای فولادی انجام داد. تعمیرات انجام شده باید حداقل سطحی برابر با ۳۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر (۱۲ در ٤ اینچ) داشته و در حدود ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر (۳ تا ٤ اینچ) پس از ناحیه خرابی امتداد یابد. اگر فاصله وصله‌ها کم‌تر از ۰/٦ سانتی‌متر (۲ فوت) باشد، باید آن‌ها را در هم ادغام کرد. همچنین وصله‌ها باید شکل مربعی یا مستطیلی داشته باشند.

دو شیوه معمول برای زدودن بتن قبل از ترمیم، روش برش اره‌ای و تراش توسط کاربید است. برای برش اره‌ای، ابتدا باید با یک تیغه الماسی تا عمق ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) محیط تکه آسیب دیده را برش داد. در محدوده برش‌خورده تکه‌های بتن باید حداقل تا عمق ۳۸ میلی‌متری (۱/۵ اینچ) برداشته شود. برای انجام این کار چکش‌های بادی سبک کنترل راحت‌تری دارد و تیغه‌های بیلی به تیغه‌های منقاری شکل ترجیح داده می‌شود. برداشتن تکه‌های آسیب دیده بتنی، به وسیله تراش کاربید مؤثرتر است.

پس از زدودن بتن، باید ناحیه آسیب دیده را در مواضع و نقاط ضعیف کنترل و محل وصله را کاملاً تمیز کرد تا اتصال وصله ایجاد شده به روسازی موجود به خوبی انجام

شود. اگر آسیب وارده به لایه‌های عمیق دال بتنی نفوذ کرده باشد، انجام تعمیرات عمیق‌تر ضرورت پیدا خواهد کرد. برای تمیز کردن گودال وصله می‌توان از ماسه‌پاشی، جت آب و در ادامه آن دمیدن هوای پرفشار استفاده کرد. با تزریق پرفشار موادی چون استریفوم (Styrofoam) و استفاده از صفحات الیافی آسفالتی، وصله‌های ایجاد شده در مجاورت درزها و ترک‌ها ترمیم می‌شود. برای بهبود چسبندگی و پیوند بین وصله و بتن موجود می‌توان از مواد چسبنده سیمانی به صورت روکش نازکی استفاده کرد.

مصالح وصله‌کاری ممکن است درون یک بتن‌ساز کوچک، درام سیار با مخلوط‌کن‌های پارویی و یا در صورت وجود نقاط ترمیم قابل توجه، به وسیله کامیون‌های بتن آماده مخلوط شوند. گودال وصله باید کمی بیشتر از حجم خود پر شود. برای تحکیم بتن وصله، انجام ویبره با استفاده از ویبراتورهای بیلچه‌ای‌شکل اهمیت دارد. در نهایت وصله‌ها باید به دقت پرداخت شده و ارتفاع وصله با روسازی اطراف یکی شود. سپس با استفاده از ترکیبات عمل آورنده یک غشای پوششی بر روی سطح وصله ایجاد می‌کنند. برای تولید مصالح وصله در دمای کم‌تر از ٤ درجه سانتی‌گراد (٤٠ درجه فارنهایت) نباید از سیمان پرتلند معمولی استفاده کرد. حداقل دمای سایر مصالح وصله متفاوت است.

انجمن روسازی بتنی آمریکا در ابلاغیه فنی TB003P، کتابچه راهنمای «ترمیم نیمه عمیق» را منتشر کرده است. این منبع اطلاعات بیشتری را درباره روش‌ها، بازبینی‌های اولیه و تعیین دقیق محل وصله بیان کرده است. به وسیله ضربه چکش و یا میلگردهای فولادی می‌توان وضعیت روسازی را بررسی کرد. به طوری که روسازی بتنی سالم با صدای توپر فلزی و بتن ناسالم و لایه‌لایه شده با صدای توخالی مشخص می‌شود.

FHWA یک چک‌لیست ١٦ صفحه‌ای با عنوان «ترمیم نیمه عمیق روسازی بتنی با سیمان پرتلند» منتشر کرده است. این چک‌لیست روش‌های آماده‌سازی و اجرای ترمیم روسازی بتنی را پوشش می‌دهد و آن را می‌توان از و آدرس زیر بارگیری کرد:

http ://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_listing.cfm

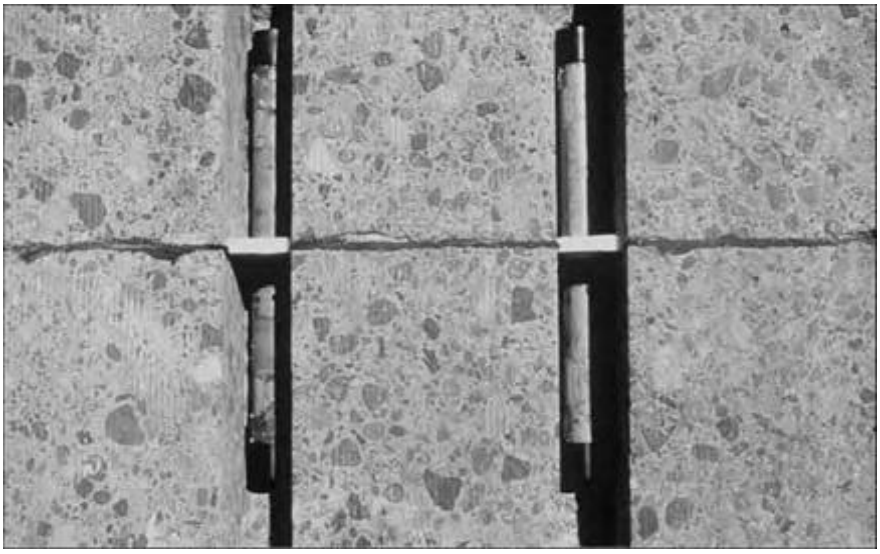
۱۷-۲-۳- تقویت با میلگردهای اتصال و میل‌دوخت‌گذاری متقاطع

تقویت با میلگردهای اتصال و میل‌دوخت‌گذاری عرضی انتقال بار را در سرتاسر اتصالات و ترک‌های خراب شده برقرار می‌کند. تفاوت کلیدی این دو در این است که تقویت با میلگردهای اتصال، به درزها اجازه باز و بسته شدن را می‌دهد، در حالی که میل‌دوخت‌گذاری عرضی، درزها و ترک‌ها را با یکدیگر قفل می‌کند. در نتیجه میل‌دوخت‌ها مانند میل‌مهارها در روسازی جدید عمل می‌کنند.

در روش تقویت با میلگردهای اتصال، شیارهایی در سرتاسر درز ایجاد می‌شود تا میلگردهای اتصال در آن جای بگیرند. اگر در محل درزها ترک‌خوردگی یا پوسته‌شدگی رخ داده باشد، باید وصله عمیق یا نمیه عمیق جایگزین این روش شود. تقویت با میلگردهای اتصال در شکل ۱۷-٤ نمایش داده شده است.
نصب میلگردهای اتصال در روسازی جدید مطابق شکل ۱٤-٦، با فواصل یکنواخت ۳۰۰ میلی‌متری (۱۲ اینچ) انجام می‌شود. در مقابل، میلگردهای اتصال فقط در مسیر چرخ وسایل نقلیه نصب می‌شوند. به طوری که به ازای هر مسیر چرخ ۳ میلگرد در نظر گرفته می‌شود. این امر تعداد میلگردها را محدود و نحوه جایگذاری آن‌ها را با توجه به نیاز هر قسمت به انتقال بار، تعیین می‌کند.

۱۷-۲-٤- میلگردهای اتصال تقویتی

تقویت با میلگردهای اتصال ممکن است در محل‌هایی مانند روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا ترک‌های میانی دال انجام شود که فاقد میلگرد اتصال هستند. همچنین از این روش در محل‌هایی استفاده می‌شود که به دلیل قطر کم میلگردهای اتصال و تنش‌های موجود، گسیخته شده و لق می‌شوند. گسیختگی میلگردهای اتصال می‌تواند در اثر خوردگی نیز اتفاق بیفتد.
چهار مرحله تقویت به وسیله میلگردهای اتصال عبارتست از:
۱- ایجاد شیار برای میلگردهای اتصال.
۲- تمیزکردن و آماده‌سازی شیارها برای حصول اطمینان از اتصال و پیوستگی.
۳- جایگذاری میلگردهای اتصال.
٤- پرکردن شیارها با مصالح تعمیر.



شکل ۱۷-٤: تقویت با میلگرد اتصال (ACPA 1996a: VIII-66)

می‌توان برای ایجاد شیار از اره‌های استاندارد یا ماشین‌های ویژه که همزمان ۳ تا ٦ شیار ایجاد می‌کند، استفاده کرد. کنترل اره‌های استاندارد مشکل‌تر است و توانایی تولید انبوه را ندارد. در این میان شیار زدن حفره‌ها در موازات محور تقارن روسازی حائز اهمیت است، زیرا تحت این شرایط استفاده از ماشین اره‌ای حفر شیار مطلوب‌تر خواهد بود. در ماشین‌های حفر شیار تیغه‌های الماسی متعددی به کار رفته است که همواره قسمتی از بتن بین برش‌های اره‌ای باقی می‌ماند. شیارهای ایجاد شده به عرض ٦۰ تا ٦۵ میلی‌متر (۲/٤ تا ۲/٦ اینچ) هستند که در حدود ۲۰ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) از قطر میلگردهای اتصال عریض‌تر می‌باشند. باید فضای کافی برای جایگذاری دوغاب و مصالح وصله در شیارها منظور شود.

قدم بعدی پس از ایجاد حفره، آماده‌سازی شیار است. برای زدودن بتن بین شیارها از چکش‌های بادی سبک استفاده می‌شود. سپس سنگ‌ها و تراش‌های ناشی از مته‌کاری در قسمت تحتانی شیار توسط سرچکش‌های کوچک ضربه می‌خورند. فراهم کردن سطحی تمیز برای اتصال مناسب وصله به روسازی، ضروری است. عموماً ماسه‌پاشی و به دنبال آن دمیدن هوای پرفشار برای تمیز کردن دیواره‌ها و کف شیارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با کشیدن دستکش تیره‌رنگ پوشیده شده بدست تمیزی شیار را بررسی می‌کنند. در آخر برای جلوگیری از ورود مصالح وصله به داخل درز یا ترک، آب‌بندی انجام می‌شود.

میلگردهای اتصال با دقت و حساسیت آماده‌سازی می‌شوند. با توجه به این که عملیات تقویت با میلگردهای اتصال پرهزینه می‌باشد، منطقی است تا با صرف هزینه اندکی از میلگردهای اندود شده با اپوکسی مقاوم در برابر خوردگی استفاده شود. هر میلگرد دارای یک کلاهک انبساطی غیرفلزی، دو خَرَک غیرفلزی و یک ترمیم کننده درز متراکم شونده است. همچنین میلگردهای اتصال باید روغن‌کاری شوند. خَرَک‌ها باید ۱۲ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) فضای باز در اطراف میلگردهای اتصال فراهم کنند. برای این منظور آن‌ها را با دقت و نرمی به موازات محور تقارن روسازی در درون شیار قرار می‌دهند.

برای پر کردن شیار اغلب از مصالح مشابه وصله‌های نیمه عمیق استفاده می‌شود. اندازه مصالح سنگی باید به گونه‌ای انتخاب شود تا شیار را به طور کامل پر کند. برای این کار باید شیار را کمی بیشتر پُر و سپس ویبره کرد. در نهایت مواد پرکننده با مایع، عمل‌آوری می‌شود و ترک یا درز، برش اره‌ای می‌خورد.

FHWA یک چک‌لیست ١٦ صفحه‌ای با عنوان «تعمیرات نیمه عمیق روسازی بتنی با سیمان پرتلند» منتشر کرده است. این چک‌لیست در مورد روش‌های آماده‌سازی و اجرای میگردهای تقویتی اتصال بحث کرده است که می‌توان آن را از وب‌سایت زیر بارگیری کرد:

http ://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_listing.cfm

۱۷-۲-۵- میل‌دوخت‌گذاری متقاطع

برای اصلاح انتقال بار در درزهای طولی از میل‌دوخت‌گذاری متقاطع[1]، مشابه تقویت میگردهای اتصال در درزهای عرضی استفاده می‌شود. میل‌دوخت‌گذاری متقاطع، جایگزین میل‌مهارهای از بین رفته یا خراب شده می‌شود.

از هر طرف، سوراخ‌هایی با زاویه کم (۳۵-٤٥ درجه) به شکل X با مته ایجاد می‌شود. سپس میلگردهای تقویتی درون سوراخ‌ها قرار می‌گیرد و با اپوکسی پوشانیده می‌شود. سپس درزها را به هم قفل می‌کنند. میلگردهایی به قطر ۲۰ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) با فاصله‌گذاری ٦۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر (٢٤ تا ٣٦ اینچ) کافی است.

در میل‌دوخت‌گذاری شیاری نیز به طور مشابه عمل می‌نماییم با این تفاوت که شیارها و میل‌مهارهای درون آن با اپوکسی پوشیده می‌شود. این کار مانند تقویت میگردهای اتصال است، اما با توجه به این که این میلگردها نیازی به لغزش ندارند، هم‌راستا کردن آن‌ها نیز از اهمیت کم‌تری برخوردار خواهد بود. هزینه میل‌دوخت‌گذاری شیاری بیش‌تر از

1- Cross-Stitching

میل‌دوخت‌گذاری متقاطع است، در عوض احتمال آسیب دیدگی دال بتنی در این روش کم‌تر است.

کاربردهای مشخص میلگردگذاری متقاطع و شیاری عبارتند از:

- فراهم کردن میل‌مهارها: در صورتی که به موجب اشتباهات محاسباتی یا اجرایی از ساخت اولیه روسازی حذف شده باشد.
- تقویت درزهای طولی: جلوگیری از حرکت دال و حفظ قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها.
- اتصال خطوط عبوری و شانه‌هایی که از هم جدا شده‌اند.
- متصل کردن خطوط مرکزی طولی و جلوگیری از پلکانی‌شدن.
- تقویت درزهای اصلی.

مطلب مهمی که باید بدان توجه شود اینست که آیا ترک میل‌دوخت‌گذاری شده، باعث آزادسازی تنش در دال خواهد شد؟ در این صورت، دوختن آن باعث تولید تنش و شکل‌گیری یک ترک جدید در نزدیکی ترک میل‌دوخت‌شده می‌شود.

۱۷-۳- ساییدن و شیارزدن

ساییدگی الماسی[1]، برآمدگی‌ها را برطرف و سطح روسازی را ترمیم می‌نماید. همچنین این عمل می‌تواند ناهمواری‌های ناشی از پیچ‌وتاب و اعوجاج دال‌های بتنی و نیز شیارشدگی را برطرف نماید. برای سایش الماسی از یک دسته تیغه اره‌ای الماسی مخصوص این کار استفاده می‌شود. گاهی اوقات بر روی روسازی‌های جدید نیز سایش الماسی انجام می‌شود تا کیفیت رانندگی اولیه بهبود یابد. سایش الماسی در شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است.

1- Diamond Grinding

شکل ۱۷-۵: سایش الماسی (ACPA 1996a: VIII-11)

معمولاً، میانگین عمق سایش الماسی حدود ۵ میلی‌متر (۰/۲ اینچ) است. چهار عامل اصلی برای موفقیت عبارتند از:

۱- درک نوع و وضعیت روسازی.

۲- تنظیم مناسب سر ساینده.

۳- استفاده مناسب از ماشین سایش الماسی.

٤- نظارت بر عملیات.

هنگام برنامه‌ریزی عملیات برش الماسی پارامترهای مهمی درباره روسازی وجود دارد که باید مورد بررسی قرار بگیرد. سال اجرای روسازی، نوع روسازی (CRCP، JRCP یا JPCP)، فاصله درزهای عرضی، سختی و معدن مصالح سنگی، اندازه مصالح سنگی، عمق شیارشدگی (در صورت وجود)، عمق متوسطی که قرار است برداشته شود، پروفیل روسازی موجود، میزان پلکانی شدن درز و میزان وصله‌کاری از جمله این موارد هستند. سختی مصالح از نرم گرفته (آهکی، دولومیتی، مرجانی، و شن رودخانه‌ای) تا متوسط (شن رودخانه‌ای، قلوه سنگ و گرانیت) و سخت (گرانیت، سنگ چخماخ، کوارتز و شن و ماسه رودخانه‌ای) متغیر است.

برخی از انواع مصالح از جمله شن و ماسه رودخانه‌ای و گرانیت، از لحاظ سختی، طبقه‌بندی چندگانه‌ای دارند که ممکن است نیازمند انجام بررسی بیشتری باشد.

سرمته متشکل از چندین تیغه اره‌ای الماسی است که محوری به عرض تقریبی ۱ یا ۱/۲۵ متر (۳/۳ تا ٤/۱ فوت) به آن‌ها متصل شده است. پارامترهای مهم تنظیم دستگاه عبارت از عمق شیار، ارتفاع شیار و عرض بین شیارها و سطح زمین است. این پارامترها مطابق با سختی مصالح سنگی تغییر می‌کند به طوری که مصالح سخت‌تر به یک فاصله تنگ‌تر نیاز دارند. تیغه‌های اره‌ای بایستی با سختی و درصد الماس مناسب انتخاب شود تا طول عمر برش، بهینه شده و سطح نهایی یکنواختی بدست آید. تولیدکنندگان این تیغه‌ها اطلاعات لازم را در اختیار کاربران قرار می‌دهند تا براساس آن برای انواع مصالح و با سختی خاص تیغه صحیح را انتخاب کنند.

سه مشخصه مهم، عملیات ماشین ساینده، وزن ماشین و قدرت اسب بخار سرمته و تنظیمات تیغه است. عملیات دستگاه بر روی یک صفحه چوبی شبیه‌سازی شده است، به طوری که قاب ماشین ساینده بین بوژی‌های جلو و عقب حرکت می‌کند و سرمته در وسط قرار می‌گیرد. وزن ماشین از بالا رفتن سرمته در برآمدگی‌های سطح جلوگیری و کاربر سرعت ماشین، عمق سرمته و فشار پایین‌برنده را در طول برآمدگی کنترل می‌کند.

همپوشانی بین وصله‌های لب‌به‌لب در راستای عمودی بایستی کم‌تر از ۳ میلی‌متر در طول ۳ متر (کم‌تر از ۰/۱۲۵ اینچ در ۱۰ فوت) باشد. در عبورهای متوالی بایستی ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر (۱ تا ۲ اینچ) همپوشانی در نظر گرفت تا سطوح ساییده و یا به اصطلاح منجر به «dogtails» نشود. سطوح ساییده نشده یا «holidays» که ناشی از نقاط کم‌ارتفاع هستند، باید در سطحی کم‌تر از ۰/۲۵ مترمربع (۲/۷ فوت‌مربع) نگه داشته شود و بیشتر از ۵ درصد کل سطح را شامل نشود. اگر وسعت ناحیه ساییده نشده زیاد باشد، باید سرمته پایین‌تر آورده شده و سطح مزبور دوباره ساییده شود. احتمال دارد بوژی‌های راهنما در درزهای انبساطی عریض با عرض ۷۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر (۵-۳ اینچ) فرو رفته و منجر به پایین رفتن سرمته شود. یک مشکل بالقوه، خرابی بیش از اندازه دال تحت بار ماشین ساینده است که اجازه برداشت لایه سطحی را نمی‌دهد. در این صورت به طور حتم تثبیت دال لازم خواهد بود.

لازم است تا با اندازه‌گیری قابلیت سواری روسازی به وسیله ابزاری مثل پروفیل‌نگار کالیفرنیا، پیشرفت پروژه سایش الماسی را ارزیابی کرد. دستگاه‌های اندازه‌گیری همواری سطح و قابلیت سواری در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفتند. در مجموع، سایش می‌تواند شاخص پروفیل قبلی را حداقل ٦٥ درصد بهبود بخشد. پس از انجام سایش در نقاط بین تیغه‌های اره‌ای، پَرَک‌های نازک بتنی ایجاد می‌شود که عموماً بلافاصله تحت تأثیر جریان ترافیک از بین خواهند رفت.

FHWA یک چک‌لیست ۱۲ صفحه‌ای با عنوان «سایش الماسی روسازی بتنی با سیمان پرتلند» منتشر کرده است. این چک‌لیست روش‌های آماده‌سازی و اجرای سایش الماسی را توضیح می‌دهد و آن را می‌توان از وب‌سایت زیر بارگیری کرد:
http ://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_listing.cfm

اطلاعات بیشتر درباره سایش الماسی و شیار زدن را می‌توان از وب‌سایت انجمن شیار زدن و ساییدن به آدرس اینترنتی http://www.igga.net/ بدست آورد. همچنین این وب‌سایت پیوندهایی از آیین‌نامه‌های ایالتی مرتبط با سایش الماسی و عملیات نگهداری و احیای روسازی بتنی را در اختیار قرار می‌دهد.

۱۷-٤- تثبیت دال

برای تثبیت دال، دوغاب از میان سوراخ‌هایی که در دال ایجاد شده است به درون روسازی پمپ می‌شود تا حفره‌های کوچک موجود در زیر روسازی را پر کند. این حفره‌ها ممکن است در اثر بار سنگین کامیون‌ها، مکش و یا نشست مصالح زیراساس و بستر ایجاد شده باشد که معمولاً عمقی کم‌تر از ۳ میلی‌متر (۰/۱۲۵ اینچ) دارند. نباید پایدارسازی را با بالا کشیدن دال‌های نشست کرده، اشتباه گرفت. تثبیت دال در مجاورت درز در شکل ۱۷-٦ نشان داده شده است.

انجمن روسازی بتنی آمریکا در ابلاغیه فنی TB018P کتابچه راهنمایی تحت عنوان «راهنمای پایدارسازی دال برای روسازی‌های بتنی» منتشر کرده است. این منبع، اطلاعات بیشتری را درباره روش عملیات احیای روسازی بتنی بیان می‌نماید. بر این اساس حفره‌ها ممکن است توسط این عوامل ایجاد شوند:

- مکش آب و خاک در محل درزهای روسازی تحت ترافیک سنگین و سریع.
- نشست مصالح در زیر دال.
- تخریب بستر روسازی بر اثر شکست باربری بستر اشباع‌شده.
- شکست در مجاورت پل، به‌علت نشست و آب شستگی مواد پرکننده.
- همزمان با گسترش حفره‌ها، در بیشتر سطح دال تکیه‌گاه‌ها به حالت غیریکنواخت در آمده و به تنش‌های خمشی بیشتری منجر می‌شود. این امر باعث ترک‌خوردگی‌های گوشه، وسط دال و تخریب تدریجی سازه دال می‌شود.

موفقیت در پایدارسازی دال در گرو پیدا کردن دقیق حفره‌ها، طرح اختلاط مناسب دوغاب، بکارگیری روش‌های اجرایی مته‌کاری، تزریق قابل قبول و آزمایش نهایی در پایان کار است. حفره‌ها را می‌توان از طریق بازرسی چشمی، با جستجوی درزهای پلکانی،

لکه‌های حاصل از مکش، حفره‌های شانه، شکستگی‌های گوشه، افتادگی‌های بزرگ شانه و نقاط دچار نشست پیدا کرد. همچنین از تست افت استاتیک یا دینامیک می‌توان برای یافتن حفره‌ها استفاده کرد. افت استاتیک و دینامیک نشان دهندهٔ یک حفره احتمالی است که اگر مقدار آن با عبور کامیون، بیشتر از ۰/۵ تا ۰/٦ میلی‌متر (۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ اینچ) باشد، پایدارسازی دال ضرورت پیدا می‌کند.

همچنین می‌توان حفره‌ها را با استفاده از رادار نفوذی زمینی (GPR) یا تکنولوژی موج الکترومغناطیسی ضربه‌ای (PEW) شناسایی کرد. روش دیگر برای تشخیص میزان پیشروی حفره، ایجاد سوراخ و ریختن ملات رنگی در داخل آن است. به طوری که با سوراخ کردن نقطه دیگر و مشاهده سرمته، می‌توان نفوذ ملات رنگی را در آن منطقه تشخیص داد.

شکل ۱۷-٦: تزریق دوغاب به منظور پایدارسازی دال (ACPA 1996a: VIII-23)

دوغاب سیمان- پوزولانی رایج‌ترین ماده تثبیت دال است. این دوغاب باید به اندازه کافی متراکم و روان باشد تا جایگزین آب آزاد شود. حفر سوراخ‌ها باید به دقت انجام شده و فشار مته کنترل شود تا قسمت تحتانی دال دچار پوسته‌شدگی نشود. مواد دیگر مورد استفاده شامل پلی‌اورتان، سیمان گرد آهک، سیمان تنها، قیر تنها و ماسه- سیمان می‌باشد. آزمایش مواد برای این دوغاب عمدتاً در ارتباط با روانی آن است.

در طول مدت تزریق، میزان بالاآمدگی دال باید اندازه‌گیری شود تا از حد متعارف بیشتر نشود. برای تزریق دوغاب از یک پمپ تزریق سیار یا یک پمپ غیرضربه‌ای پیش‌رونده با سرعت حدود ۰/۵ لیتر (۱ گالن) در هر دقیقه استفاده می‌شود. فشار حین تزریق، باید

بین ۰/۱۵ تا ۱/٤ مگاپاسکال (۲۰۰ psi–۲۰) باشد. پس از بالا آمدن دال یا عدم‌امکان تزریق دوغاب تحت فشار مجاز حداکثر و یا بیرون‌زدگی دوغاب از سوراخ‌های مجاور، بایستی عملیات تزریق متوقف شود. بعد از تزریق می‌توان حفره‌ها را با استفاده از درپوش‌های چوبی بست.

بسته به سرعت تولید مورد نیاز، مته‌ها و ابزارهای تزریق متنوعی وجود دارند. محل حفره‌ها و نحوه تزریق دوغاب برای یکنواختی در ارتفاع دال مهم است.

با استفاده از روش افت، دال‌های تثبیت‌شده را باید ۲٤ تا ۲۸ ساعت بعداز اتمام عملیات تزریق تست کرد. اگر میزان افت در منطقه‌ای همچنان بالا بود، باید برای بار دیگر عملیات تزریق را تکرار کرد. باید در دمای پایین‌تر از ٤°C (٤۰°F) و بستر یخ‌زده، از عملیات تثبیت دال خودداری نمود.

فصل هجدهم

روکش‌ها و رویه‌های میانی

روکش‌های بتنی به طور مفصل در ACI 325.13R-06، با عنوان «روکش‌های بتنی برای ترمیم روسازی» و همچنین گزارش اسمیت و همکارانش مورد بحث قرار گرفته است. ACI 325.13R-06 براساس گزارش اسمیت و همکارانش تهیه شده است. روکش‌های بتنی را می‌توان هم بر روی روسازی آسفالتی و هم بر روی روسازی بتنی اجراء کرد.

اطلاعات لازم در مورد روکش‌های بتنی و انتخاب راهکار مناسب برای اجرای روکش، در فصل سوم کمیته ACI 325، گزارش 325.13R-06 ارائه شده است. عواملی که باید مورد توجه قرار بگیرند عبارت از هزینه مصرف کنندگان، ملزومات مربوط به بستن مسیر، ملاحظات کنترل ترافیک، عمر خدمت‌دهی، مدت زمان اجرایی و تجربیات محلی در ارتباط با راهکارهای ترمیم می‌باشد. برای مثال ایالت‌های آیوآ و تگزاس در ارتباط با روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل (bonded overlay) تجربیات قابل ملاحظه‌ای دارند و عمدتاً در شرایط مناسب از این نوع روکش استفاده می‌نمایند. با این وجود، بسیاری از ادارات راه تمایلی به استفاده از این روکش‌ها ندارند.

همواره لازم است روکش‌های آسفالتی نیز به عنوان گزینه انتخابی در نظر گرفته شود. مزایا و معایب انواع مختلف روکش و عمر تخمینی هر یک در ACI 325.13R-06 مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل مشابه روکش‌های آسفالتی است، ولی دارای طول عمر بیشتری هستند (۱۵ تا ۲۵ سال در مقابل ۱۰ تا ۱۵ سال). واضح است که روکش‌های بتنی نسبت به روکش‌های آسفالتی فرسایش کم‌تری داشته و به طور قابل توجهی عمر طولانی‌تری دارند.

۱۸-۱- روکش‌های بتنی برای روسازی بتنی

روکش‌های بتنی را می‌توان به دو دسته روکش با پیوستگی کامل و بدون پیوستگی طبقه‌بندی کرد. دسته سوم با عنوان روکش با پیوستگی نیمه‌کامل نیز وجود دارد، که امروزه به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۸-۱-۱- روکش‌های بدون پیوستگی

روکش‌های بدون پیوستگی در فصل پنجم از ACI 325.13R-06 و همچنین فصل چهارم از گزارش اسمیت و همکارانش مورد بحث قرار گرفته است. با اتخاذ تمهیداتی روکش‌های بدون پیوستگی را از روکش‌های با پیوستگی کامل جدا می‌کنند که با انجام این کار آسیب روسازی موجود به روکش جدید منتقل نخواهد شد. انجمن روسازی بتنی آمریکا کتابچه «راهنمای روکش‌های بتنی بدون پیوستگی» را در ابلاغیه فنیTB-005P منتشر کرده است. این راهنما حداقل ضخامت روکش‌های بدون پیوستگی را برای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار ۱۲۵ میلی‌متر (۵ اینچ) و برای روسازی بتنی مسلح یکپارچه ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) توصیه می‌کند.

از آنجایی که روکش و روسازی موجود از لحاظ سازه‌ای از هم مجزا هستند، آسیب موجود (ترک‌خوردگی و مشکلات درز) به ندرت در روکش جدید منعکس می‌شود. بنابراین می‌توان این نوع روکش‌ها را در روسازی‌های بتنی با خرابی‌های گسترده، مانند آسیب‌های مربوط به مصالح، ترک‌خوردگی نوع D و یا مصالح واکنش‌زا مورد استفاده قرار داد. به هر حال برای طراحی روکش و تعیین ضخامت مؤثر (Deff)، باید وضعیت روسازی موجود ارزیابی شود و نقاطی که باعث آسیب موضعی می‌شوند، مورد تعمیر قرار بگیرند. مناطق ضعیف شامل دال‌های لایه‌لایه شده روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا روسازی بتنی مسلح درزدار و سوراخ‌شدگی در روسازی بتنی مسلح یکپارچه است. یک مسئله بسیار مهم، حصول اطمینان از یکنواختی و مقاومت کافی بستر روکش می‌باشد. روسازی بتنی غیرمسلح درزدار رایج‌ترین نوع روکش بدون پیوستگی است، هرچند تعداد قابل ملاحظه‌ای روکش بتنی مسلح یکپارچه نیز ساخته شده است.

لیستی از آسیب‌ها و روش‌های پیشنهادی برای تعمیر در ACI 325.13R-06 ارائه شده است. روسازی‌های موجود ممکن است به قطعات کوچک‌تری شکسته شود تا تغییر مکان ترک‌های جدا از هم کم‌تر شود. از این روش در اروپا استفاده شده است. به عنوان مثال، روش مورد استفاده در آلمان عبارت از شکستن و نشاندن (متراکم کردن) روسازی

موجود، اجرای ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) بتن کم‌عیار جدا کننده، ایجاد شیارهایی در لایه جدا کننده برای جلوگیری از ترک‌خوردگی تصادفی و سپس اجرای روکش است.

اولین شیوه‌های طرح روکش‌های بتنی، مربوط به تحقیقاتی است که توسط مهندسین ارتش آمریکا برای روکش‌های بدون پیوستگی، با پیوستگی کامل و با پیوستگی نیمه‌کامل انجام شد که نتیجه آن در کمیته ACI 325 ارائه شده است. برنامه تحقیقاتی تعاونی ملی بزرگراه‌ها (NCHRP)، شماره‌های ۹۹ و ۲۰٤ نیز روکش‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. در روسازی فرودگاه‌ها و راه‌های اصلی، به طور گسترده‌تر استفاده از روکش‌های بدون پیوستگی نسبت به دو نوع دیگر رواج دارد.

ضخامت معمول برای روکش بدون پیوستگی در راه صلی ۳۰۰-۱۵۰ میلی‌متر (۱۲-٦ اینچ) است. عموماً به جز مصالحی که برای اجرای بتن معمولی روسازی به کار برده می‌شود و شرح آن در فصول ۵ و ٦ آمده است، برای روکش‌ها مصالح خاص دیگری وجود ندارد. یک لایه جدا کننده از جنس آسفالت گرم به ضخامت حداقل ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ)، برای از بین بردن پیوستگی روسازی موجود و روکش اجراء می‌شود. هدف از انجام این کار جلوگیری از انعکاس ترک‌خوردگی موجود به روکش است.

برای طراحی روکش‌های بتنی بدون پیوستگی از روش نقص سازه‌ای(structural deficiency) مندرج در راهنمای طراحی روسازی آشتو استفاده می‌شود. ضخامت روکش، D_{OL}، به میلی‌متر یا اینچ از رابطه زیر بدست می‌آید:

رابطه ۱-۱۸

$$D_{OL} = \sqrt{D_f^2 - D_{eff}^2}$$

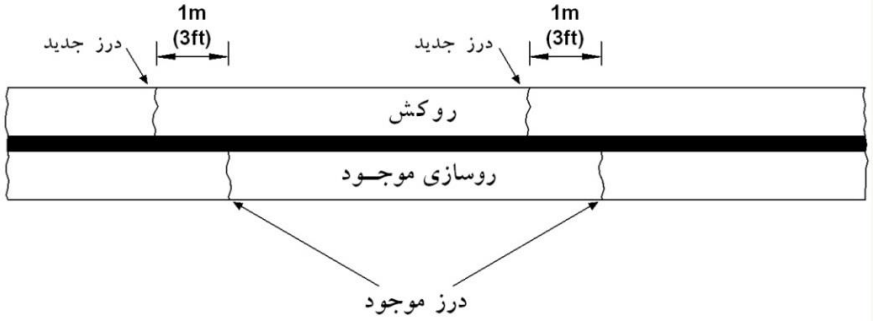
ضخامت لازم برای روسازی بتنی جدید برای تحمل بار جریان ترافیک، D_f، با استفاده از روش‌های طراحی، مانند آشتو یا انجمن سیمان پرتلند بدست می‌آید. D_{eff} ضخامت مؤثر روسازی که از حاصل ضرب ضخامت واقعی در یک ضریب وضعیت CF (≤ 1) بدست می‌آید. ضریب وضعیت ممکن است براساس ضرایب اصلاح وضعیت درزها، دوام و خستگی و یا براساس پیش‌بینی عمر باقی‌مانده روسازی تخمین زده شود. جداول و نمودار لازم برای تعین ضریب وضعیت در بند ۵-۹-۵ راهنمای طراحی آشتو ارائه شده است.

برای مثال، روکش بتنی بدون پیوستگی را در جایی در نظر بگیرید که ضخامتی برابر با ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) برای جریان ترافیک لازم و ضخامت موجود ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) باشد. اگر ضریب وضعیت برابر با ۰/۸ انتخاب شود، ضخامت روسازی موجود معادل ۱٦۳ میلی‌متر (٦/٤ اینچ) و ضخامت لازم برای روکش برابر ۱۹٦ میلی‌متر (۷/۷

اینچ) محاسبه خواهد شد. در نتیجه، با در نظر گرفتن ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) لایه جدا کننده آسفالتی، ضخامت نهایی این روسازی مرکب ٤٢٤ میلی‌متر (١٦/٧ اینچ) خواهد شد. سطح نهایی روسازی ۲۲۵ میلی‌متر (۸/۹ اینچ) افزایش می‌یابد که این مطلب همان طور که در زیر بیان خواهد شد، ممکن است اجرای پروژه را تحت تأثیر قرار دهد.

طراحی روکش بتنی بدون پیوستگی در شیوه سازمان هواپیمایی فدرال نیز روش نقص سازه‌ای ارائه شده در رابطه ۱۸-۱ را مورد استفاده قرار می‌دهد. ضریب وضعیت روسازی با ترک‌خوردگی اولیه گوشه ناشی از بارگذاری، بدون گسترش ترک یا پلکانی شدن محل درزها برابر ۰/۷۵ است. برای روسازی که در وضعیت سازه‌ای ضعیفی قرار دارد و به ترک‌خوردگی، شکستگی یا درزهای پلکانی دچار شده است، ضریب وضعیت را برابر با ۰/۳۵ در نظر می‌گیرند. اشکالی که این دو ضریب وضعیت را نشان می‌دهند، در روش طراحی روسازی سازمان هواپیمایی فدرال ارائه شده است. ضخامت روکش بتنی بدون پیوستگی برای فرودگاه‌ها حداقل می‌بایست برابر با ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) اختیار شود. برای حالتی که اختلاف مقاومت خمشی روکش و روسازی موجود بیش از ۷۰۰ کیلوپاسکال (۱۰۰ psi) است، یک رابطه اصلاح شده در نظر گرفته می‌شود. لایه جدا کننده می‌بایست یک بتن آسفالتی گرم با استحکام زیاد باشد.

بسته‌های نرم‌افزاری سازمان هواپیمایی فدرال امکان طراحی روکش را نیز دارند. در LEDFAA، برای مدل کردن برهم‌کنش بین روسازی موجود و روکش از یک ضریب اصطکاک داخلی استفاده می‌شود. این ضریب، پارامتر ثابتی است که طراح نمی‌تواند آن را اصلاح کند. شاخص وضعیت سازه‌ای (SCI) برای مشخص کردن روسازی موجود به کار برده می‌شود.

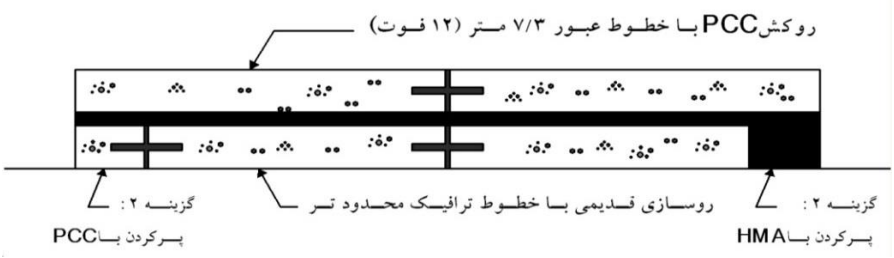


شکل ۱۸-۱: عدم تطبیق درزها (Smith et al. 2202: 4-9)

ملاحظات اجرایی و طراحی، مرهون جداسازی دو لایه روسازی بتنی و عدم انطباق درزها است که عمدتاً در زمان اجرای روکش بتنی غیرمسلح درزدار بر روی روسازی

بتنی غیرمسلح درزدار یا روسازی بتنی مسلح درزدار انجام می‌شود. عدم تطبیق درزها در شکل ۱۸-۱ نشان داده شده است. هدف از عدم انطباق درزها، انتقال مناسب بارها می‌باشد. برای این منظور به جای قرار دادن درز بر روی یک درز پلکانی و تخریب شده، درز جدید را در روسازی سالم‌تر ایجاد می‌کنند، بنابراین روسازی موجود در زیر درز تشکیل یک دال تکیه‌گاهی می‌دهد. اگرچه به دلیل تکیه‌گاهی که روسازی موجود در زیر روکش فراهم می‌نماید انتقال بار در روکش‌های بدون پیوستگی بسیار بیشتر از روسازی بتنی غیرمسلح درزدار است، ولی توصیه می‌شود از درزهای با میلگرد اتصال استفاده شود.
در روکش‌های بدون پیوستگی، ملزومات مربوط به لایه جدا کننده باید مورد توجه قرار بگیرد. علی‌رغم این که باید از عملکرد مستقل روسازی قدیم و جدید اطمینان حاصل کرد، ولی لایه بتنی نیز سطحی هموار و مناسب را برای عملیات ساخت روکش فراهم می‌کند. در گذشته ورقه‌های پلی‌اتیلن، ترکیبات مومی عمل آورنده بتن، قیرهای مایع و لایه‌های نازک درزگیر و دوغاب به عنوان لایه جدا کننده مورد استفاده قرار می‌گرفتند. اما استفاده از این جدا کننده‌ها، دیگر توصیه نمی‌شود. زیرا این درزگیرها لایه‌های بتنی را به طور کامل جدا نمی‌کند. به طور کلی، یک لایه نازک از آسفالت گرم متراکم برای این منظور بهترین نتیجه را بدست می‌دهد. درعوض لایه جدا کننده با دانه‌بندی باز باعث جذب رطوبت و کنده شدن لایه آسفالتی می‌شود.
در آب‌وهوای گرم لایه جدا کننده سیاه‌رنگ آسفالتی گرم می‌شود و احتمال ترک‌خوردگی حرارتی بتن را افزایش می‌دهد. اگر دما از ٤٣ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰ درجه فارنهایت) تجاوز کند، در هنگام اجرای روکش، می‌توان با شستن لایه آسفالت توسط دوغاب آهک یا ترکیبات سفید رنگ عمل آورنده بتن، دمای سطح را کاهش داد.
عواملی که بر امکان اجرای روکش بتنی بدون پیوستگی تأثیر دارند عبارت از کنترل ترافیک، شانه‌ها و ارتفاع آزاد مسیر است. از منظر یک کارگاه آموزشی هیأت تحقیقاتی حمل‌ونقل، مدیریت ترافیک مسیر انحرافی در طول عملیات اجرایی در مناطق شهری یک مسئله بحرانی تلقی می‌شود. در این مواقع روش‌های اجرایی تسریع شده که در فصل ٦ و ١٤ این کتاب و ACI 325.11R-01 بیان شده است، می‌تواند مفید واقع شود.
اجرای روکش‌های بدون پیوستگی نیازمند شانه جدید است. زیرا با اجرای روکش، سطح روسازی به اندازه ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر (۱۲-۱۰ اینچ) بالا می‌رود. در این میان اصلاح رمپ‌های دسترسی و ارتفاع آزاد زیر پل‌های عبوری ضروری است. اگر لازم باشد، می‌توان ارتفاع پل‌ها را با استفاده از فاصله دهنده‌های بتنی یا فولادی افزایش داد.
همان طور که در بالا اشاره شد، تغییر سطح با اجرای روکش بدون پیوستگی نیاز به شانه

جدید دارد. کاهش تنش در لبه‌های روکش با تعریض روسازی موجود یا اجرای شانه‌های متصل (tied) فراهم می‌شود. از آنجا که قسمت تعریض شده دال احتمالاً بر روی شانه موجود قرار می‌گیرد خطر ترک‌خوردگی طولی در این نواحی وجود خواهد داشت. به همین دلیل، اجرای شانه‌های متصل ترجیح داده می‌شود. اگر نیاز باشد خط عبوری برای بهبود جریان ترافیک تعریض شود، باید تا حد امکان قسمت تعریض شده با روسازی زیر آن سازگار باشد. گزینه‌های تعریض خط عبور در شکل ۱۸–۲ نشان داده شده است. سه خط عبور از یک بزرگراه بین‌ایالتی که به طور همزمان روکش می‌شوند در شکل ۱۸–۳ را نشان داده شده است. دو خط عبوری به صورت روکش بتنی بدون پیوستگی بر روی روسازی بتنی موجود، با یک لایه آسفالتی به عنوان جدا کننده اجراء می‌شود. خط عبور سوم یک روسازی عمیق بتنی است.



شکل ۱۸–۲: گزینه‌های تعریض خط عبور (Smith et al. 2002: 4-12)

جزئیات نواحی انتقال در محل دسترسی پل و روگذر در شکل ۱۸–٤ نشان داده شده است. طول توصیه شده برای نواحی انتقال ۹۰ تا ۱۵۰ متر (۳۰۰ تا ۵۰۰ فوت) می‌باشد. برخی از محدودیت‌های قابل توجه و روش‌های اخیر طراحی روکش‌های بدون پیوستگی در ACI 325.13R-06 عنوان شده‌اند، که عبارتند از:

- در نظر نگرفتن برهم‌کنش بین لایه‌ها– لایه جدا کننده روکش نقش سازه‌ای ایفاء می‌کند که از آن صرف‌نظر می‌شود.
- قائل شدن ارزش سازه‌ای بیش از حد به روسازی موجود و بروز نتایج غیرمحافظه‌کارانه در صورتی که روسازی موجود ضخیم باشد.
- در نظر نگرفتن تأثیر پیچ‌وتاب و اعوجاج بر تنش‌های درز– همان طور که در فصل ۷ بحث شد، فاصله درزها به خصوص برای روکش‌های نازک، با افزایش مقدار k کاهش می‌یابد. این ممکن است برای روکش‌های بدون پیوستگی با فواصل درز بیشتر از ٤/٦ متر (۱۵ فوت) مشکل‌ساز شود.

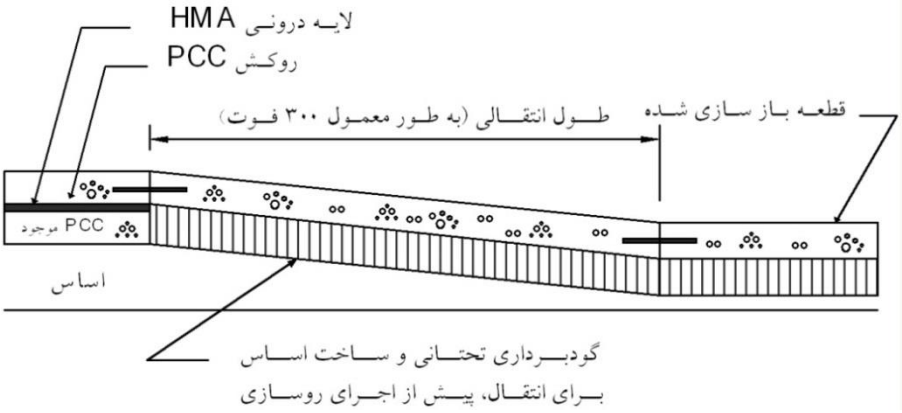
شکل ۱۸-۳: اجرای روکش بدون پیوستگی در دو خط عبور و اجرای همزمان روسازی در خط عبور سوم (Dale Crowl)

دو مورد اول اثر همدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین اگر فاصله بین درزها از حد مجاز تجاوز نکند، روکش‌های بتنی بدون پیوستگی عملکرد خوبی از خود نشان خواهند داد.

اگرچه فاصله بین درزها برای روکش‌های بدون پیوستگی با ضخامت تا ۲۳۰ میلی‌متر (۹ اینچ)، نباید کم‌تر از عرض عبور روسازی شود ولی فاصله بین درزها به اندازه کم‌تر از ۲۱ برابر ضخامت دال مناسب به نظر می‌رسد. برای روسازی‌های ضخیم‌تر، حداکثر نسبت L/l از ٤/٥ تا ٥/٥ مناسب است و حداکثر فاصله ٤/٦ متر (۱۵ فوت)، به مقدار زیادی خطر ترک‌خوردگی زودرس را کاهش می‌دهد. شکل ۷-۳ را می‌توان با مقدار k برابر با ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (500 psi/in) مورد استفاده قرار داد تا یک بستر با مقاومت بالا (روسازی موجود) بدست آید.

اسمیت و همکارانش درباره عمکرد روکش‌های بدون پیوستگی، به همراه جزئیات مربوط به چند پروژه خاص را به طور مفصل ارائه کردند. عملکرد روکش‌های بدون پیوستگی، به استثنای برخی از روکش‌های نازک به ضخامت ۱۷۵-۱۵۰ میلی‌متر (۷-٦ اینچ)، روی هم رفته خیلی خوب است. همچنین عملکرد این روکش‌ها در ACI 325.13R-06 مورد

بحث قرار گرفت. انجمن روسازی بتنی آمریکا در نشریه فنی TB-005P با عنوان «راهنمای روکش‌های بتنی بدون پیوستگی»، عملکرد موفق بسیاری از این روکش‌ها را مستندسازی کرده است.



شکل ۱۸-٤: جزئیات نواحی انتقال در محل دسترسی پل و روگذر در روکش‌های بدون پیوستگی (Smith et al. 2002: 4-13)

۱۸-۱-۲- روکش‌های با پیوستگی کامل

روکش‌های با پیوستگی کامل در فصل چهارم از ACI 325.13R-06 و همچنین فصل سوم از گزارش اسمیت و همکارانش مورد بحث قرارگرفته است. برخلاف روکش‌های بدون پیوستگی، زمانی این روکش‌ها مناسب خواهند بود که روسازی موجود در وضعیت خوبی قرار داشته باشد. در این راستا انجمن روسازی بتنی آمریکا نشریه فنیTB-007P را با عنوان «راهنمای روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل» تدوین کرده است.

طراحی روکش بتنی با پیوستگی کامل، موجب می‌شود تا روکش و روسازی موجود به طور یکپارچه عمل کند. ضخامت معمول این روکش‌ها ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر (۳ تا ٤ اینچ) برای راه‌های اصلی و ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) برای روسازی فرودگاه‌ها است. با این وجود در سال ۱۹۹٦، با استفاده از روکشی به ضخامت ۱٦۵ میلی‌متر (٦/۵ اینچ)، یک راه اصلی در تگزاس به اجراء درآمد. حداقل ضخامت برای قالب‌های لغزنده ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) می‌باشد.

در صورتی که روسازی شرایط نسبتاً مطلوبی داشته باشد، برای رفع مشکلات سازه‌ای روسازی بتنی از روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل استفاده می‌شود. همچنین این روکش‌ها برای رفع نواقص عملکرد روسازی، از جمله موارد زیر کاربرد دارند:

- اصطکاک سطحی ضعیف؛
- ناهمواری سطح که در اثر پلکانی شدن نباشد؛
- شیارشدگی سطحی در اثر عبور تایرهای آجدار؛ و
- سروصدای بیش از حد.

اکثر روکش‌های بتنی با پیوستگی و انطباق کامل به صورت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار بر روی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار اجراء می‌شود. در صورتی که درزها بر هم منطبق نباشند، درز قدیمی موجب ترک انعکاسی در روکش می‌شود. از آنجایی که ضخامت روکش با پیوستگی کامل کم است و در محل درزهای موجود از میلگردهای اتصال استفاده نشده است، از این‌رو وظیفه انتقال بار برعهده میلگردهای اتصال روسازی خواهد بود. گاهی نیز روکش‌های بتنی مسلح پیوسته بر روی روسازی بتنی مسلح یکپارچه اجراء می‌شود که در ابتدا این روش در تگزاس مورد استفاده قرار گرفت.

کمیته ACI 325 عنوان می‌کند:

هنگامی‌که از روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل استفاده می‌شود، لازم است که روسازی موجود ظرفیت باربری خود را از دست نداده باشد. در جایی که آسیب‌های سازه‌ای نظیر مکش، پلکانی شدن، ترک‌خوردگی وسط دال، شکستگی‌های گوشه و ظرفیت باربری اتفاق بیفتد، روسازی موجود در معرض خطر قرار می‌گیرد و اجرای روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل روش ترمیمی مناسبی محسوب نخواهد شد. علاوه بر آن، وجود آسیب‌هایی مانند ترک‌خوردگی نوع D و سایر خرابی‌های مربوط به مصالح، کارآیی این روکش‌ها را بسیار محدود می‌کند.

بنابراین ارزیابی روسازی موجود، برای تشخیص این که آیا از روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل به عنوان راهکار ترمیمی استفاده شود یا خیر، گامی اساسی محسوب خواهد شد. این ارزیابی ممکن است شامل بازدید چشمی، آزمایش افت با دستگاه خیزسنج وزنه‌ای و مغزه‌گیری باشد. مثال‌هایی از خرابی‌های سازه‌ای به شرح زیر معرفی می‌شود:

- ترک‌های عرضی تخریب شده؛
- شکستگی‌های گوشه؛
- پلکانی شدن درزها؛ و
- سوراخ‌شدگی در روسازی بتنی مسلح یکپارچه.

در صورت وجود موارد فوق، باید شدت و دامنه این خرابی‌ها ارزیابی شود. اگر سطح آسیب زیاد نباشد، قبل از اجرای روکش باید برای این سطوح تعمیرات عمیق انجام شود،

در غیر این صورت روکش با پیوستگی کامل راهکار مناسبی نخواهد بود.
سایر تعمیرات پیش از اجرای روکش عبارت از تعمیرات نیمه عمیق پوسته‌شدگی درزها، پایدارسازی دال برای جلوگیری از مکش احتمالی و احیای انتقال بار در طول ترک‌ها و درزهای فاقد میلگرد اتصال (همان طور که در فصل ۱۶ عنوان شد) است. جزئیات این روش‌ها توسط هُرنر و همکارانش[1] ارائه شده است.
کمیته ACI 325 پیشنهاد می‌کند که در روند طراحی روکش با پیوستگی کامل، اجرای زهکش نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد. در صورت وجود مکش، درزهای پلکانی یا شکستگی‌های گوشه، باید زهکشی را بهبود بخشید.
در طراحی روکش راه‌های اصلی با پیوستگی کامل از راهنمای طرح روسازی آشتو استفاده می‌شود. ضخامت روکش، D_{ol}، برحسب میلی‌متر یا اینچ با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D_{OL} = D_f - D_{eff}$$ رابطه ۱۸-۲

ضخامت لازم برای روسازی جدید برای تحمل ترافیک پیش‌بینی شده (D_f) از روش آشتو ۱۹۹۳ یا انجمن سیمان پرتلند بدست می‌آید. D_{eff} ضخامت مؤثر روسازی موجود است، که از حاصل ضرب ضخامت واقعی در یک ضریب وضعیت CF (≤ 1) بدست می‌آید. ضریب وضعیت براساس ضرایب اصلاحی برای وضعیت درزها، دوام، خستگی و یا براساس عمر باقی‌مانده روسازی تخمین زده شود. جداول و نمودار لازم برای تعیین ضریب وضعیت در بند ۵-۸-۵ راهنمای طراحی آشتو ارائه شده است.
برای مثال، روکش بتنی با پیوستگی کامل را در نظر بگیرید که ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) روسازی برای ترافیک آن لازم باشد و ضخامت روسازی موجود ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) باشد. اگر ضریب وضعیت ۰/۸ در نظر گرفته شود، ضخامت روسازی موجود معادل ۱۶۳ میلی‌متر (۶/۴ اینچ) و ضخامت لازم برای روکش برابر ۸۷ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) خواهد بود. در نتیجه، ضخامت نهایی روسازی مرکب ۲۸۷ میلی‌متر (۱۱/۴ اینچ) محاسبه می‌شود. سطح نهایی روسازی، تنها ۸۷ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) افزایش می‌یابد، در حالی که با روکش بدون پیوستگی این مقدار برابر ۲۲۵ میلی‌متر (۸/۹ اینچ) بدست می‌آید. البته شرایط موجود کاملاً شبیه به هم نیست، زیرا اگر یک روسازی برای اجرای روکش بدون پیوستگی بسیار مناسب باشد، ولی امکان دارد همان روسازی برای اجرای روکش با پیوستگی کامل مناسب به نظر نرسد.
روکش‌های با پیوستگی کامل بر روی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار فاقد آرماتور هستند.

1- Hoerner et al

روکش‌های بتنی مسلح یکپارچه که بر روی روسازی بتنی مسلح یکپارچه قرار می‌گیرند، دارای آرماتوری به اندازه ٤٠ درصد روسازی زیر خود هستند.

به گفته سازمان هواپیمایی فدرال حداقل ضخامت روکش با پیوستگی کامل ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) است. در FAA AC 150/5320-D عنوان می‌شود که روکش‌های بتنی پیوسته تحت شرایط مشخصی همراه با روسازی صلب موجود اجراء می‌شوند. با اتصال روکش به روسازی صلب، مقطع جدید مانند یک دال یکپارچه عمل می‌کند. با کم کردن ضخامت روسازی موجود از ضخامت لازم برای دال که از نمودارها بدست می‌آید، می‌توان ضخامت روکش را محاسبه کرد. احتمال خرابی روسازی موجود در روکش‌های با پیوستگی کامل بیش از سایر انواع روکش‌ها می‌باشد. مشکل اصلی در این روکش‌ها، چگونگی دستیابی به قفل‌وبست و پیوستگی کافی است. آماده‌سازی سطح و روش‌های مناسب اجرایی برای برقراری این پیوستگی لازم است.

در روش سازمان هواپیمایی فدرال، برای تعیین ضخامت روکش، بدون هیچ ضریب وضعیتی از رابطه ۱۸-۲ استفاده می‌شود. سازمان هواپیمایی فدرال با استفاده از صفحه گسترده R805faa.xls و نرم‌افزار LEDFAA امکان طراحی روکش‌های بدون پیوستگی و با پیوستگی نیمه‌کامل را فراهم می‌آورد، اما با این نرم‌افزارها نمی‌توان روکش‌های با پیوستگی کامل را طراحی کرد. می‌توان به طور محافظه‌کارانه، روش طراحی روکش‌های با پیوستگی نیمه‌کامل یا به اصطلاح سازمان هواپیمایی فدرال، روکش بتنی فاقد لایه تراز کننده را برای روکش‌های با پیوستگی کامل به کار برد. USACE اخیراً برای به‌روزرسانی روش طراحی روکش‌های با پیوستگی کامل، در روسازی فرودگاه‌های نظامی فعالیت می‌کند. تحقیقات جدید بر روی مکانیزم‌های خرابی، آماده‌سازی سطح، بکارگیری عامل قفل‌وبست و بافت سطح مشترک دولایه، افق تازه‌ای را در این زمینه فراهم آورده‌است. بکارگیری این یافته‌ها در روش‌های اجرایی می‌تواند سبب بهبود عملکرد بلندمدت روکش‌های با پیوستگی کامل شود.

در حال حاضر از روکش‌های با پیوستگی کامل برای رفع آسیب‌های عملکرد سطحی در روسازی فرودگاه‌های نظامی که از لحاظ سازه‌ای سالم هستند، به صورت محدود استفاده می‌شود.

برای دستیابی سریع به مقاومت، انقباض و انبساط حرارتی حداقل و افت کم‌تر، نسبت اختلاط روکش‌های با پیوستگی کامل تعیین می‌شود. هرچند در بسیاری از موارد مخلوط‌های روسازی بتنی رایج عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند ولی در جاهایی که نیاز به بازگشایی سریع ترافیک است، مخلوط‌های پرمقاومت عملکرد بهتری از خود نشان

می‌دهند. اغلب از افزودنی‌های کاهنده آب برای کاهش نسبت w/c استفاده می‌شود. باید از مصالح با پایین‌ترین ضریب انبساط حرارتی استفاده شود تا از تنش‌های حرارتی ایجاد شده بین روکش و اساس بتنی کاسته شود. مثال‌های مشخصی از طرح اختلاط روکش با پیوستگی کامل توسط اسمیت و همکارانش ارائه شده است. برای روسازی‌هایی که باید به سرعت به روی جریان ترافیک باز شوند، طرح اختلاطی نظیر آنچه در جدول ۶-۱ ارائه شد، مناسب است.

پس از ارزیابی وضعیت روسازی موجود و تعمیرات پیش از اجرای روکش، آماده‌سازی سطح موجود برای دستیابی به قفل‌وبست قابل قبول، از جمله مهم‌ترین مراحل محسوب می‌شود. بتن لق شده، رنگ و مواد دیگری که مانع از پیوستگی هستند باید برطرف شده و یک سطح زبر و دارای بافت سطحی درشت برای پیوستگی مکانیکی تأمین شود. بسیاری از روش‌های آماده‌سازی سطح مانند ماسه پاشی، پاشیدن ساچمه‌های فولادی، آب پاشی با فشار بالا و روش‌های دیگر می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. امروزه متداول‌ترین و مؤثرترین روش، پاشیدن ساچمه‌های فولادی کمی قبل از اجرای روکش و دمیدن هوای فشرده می‌باشد. در صورتی که قبل از اجرای روکش آب پاشیده شده تبخیر شده باشد، پاشیدن آب پرفشار نیز روشی مناسب خواهد بود.

وارنر و همکارانش[1] عنوان می‌کنند که به هنگام پاشیدن ساچمه‌های فولادی و آب پرفشار باید از ضربه‌زدن به سطح موجود خودداری کرد. در غیر این صورت یک لایه ضعیف در سطح مشترک روکش جدید و روسازی موجود ایجاد می‌شود، که منجر به لایه‌لایه شدن روسازی می‌شود. ACI 546R تحت عنوان «راهنمای تعمیرات بتن» اطلاعات بیشتری را در ارتباط با آماده‌سازی سطح روسازی موجود در اختیار قرار می‌دهد. عمق بافت سطحی ایجاد شده پس از انجام عملیات آماده سازی سطح را می‌توان با استفاده از ASTM E695 تعیین کرد.

دو مسئله مهم دیگر، وضعیت رطوبت سطح در اجرای روکش و نیاز یا عدم نیاز به عامل پیوند دهنده است. اگرچه آب جمع شده بر روی سطح روسازی زیان‌آور است ولی سطحی که خیلی خشک باشد نیز می‌تواند آب بتن روکش را در سطح مشترک روکش و روسازی به خود جذب کند. بنابراین برای این منظور وضعیتی نزدیک به شرایط SSD توصیه می‌شود. در حقیقت برخی از مواد پیوند در صورتی که قبل از اجرای روکش خشک شود یا خود را بگیرد، مانند یک لایه جدا کننده عمل می‌کند. از آنجایی که روغن، سطح آماده‌سازی شده را خراب می‌کند، نباید به ماشین‌آلات اجازه داد تا روغن‌ریزی

1- Warner et al

داشته باشند.
همان طور که قبلاً بیان شد، عمل‌آوری لایه‌های نازک بتنی دارای اهمیت بوده و با دشواری همراه است. در روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل، افت بالای ناشی از عمل‌آوری ضعیف باعث از بین رفتن پیوستگی می‌شود. گونی‌های مرطوب یا پوشاندن رویه برای عمل‌آوری مناسب است، اما اگر از ترکیبات عمل‌آوری استفاده می‌شود باید حداقل دو برابر میزان توصیه شده توسط تولید کننده، استفاده شود.
برای روکش‌های بتنی غیرمسلح درزدار که بر روی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار اجراء می‌شوند، مکان، زمان‌بندی اجراء و عمق برش درز حائز اهمیت است. اجرای درزهای جدید در محل درزهای قدیم بسیار اهمیت دارد. برای این منظور برش اره‌ای تا عمق ۱۲ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) بیشتر از ضخامت روکش ضروری است. در غیر این صورت خطر از بین رفتن پیوستگی و پوسته‌شدگی در اثر تمرکز تنش در روکش برش‌نخورده وجود دارد. به محض آن که درزهای روسازی بتواند وزن تجهیزات برش را تحمل کند و اجرای درز سبب پوسته‌شدگی و جدایی سنگدانه‌ها نشود، عملیات اجرای برش روسازی آغاز می‌شود که زمان آن معمولاً بین ٤ تا ۱۲ ساعت بعد از اجرای روسازی است. باید توجه داشت که نشریه فنی انجمن روسازی بتنی آمریکا، تحت عنوان «راهنمای روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل»، در ارتباط با برش اره‌ای روکش‌های به ضخامت بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) توصیه اشتباهی دارد. برخلاف توصیه این نشریه، روکش باید در تمام ضخامت خود، صرف‌نظر از ضخامت آن برش بخورد. زیرا در غیر این صورت سبب خرابی می‌شود.
روکش‌های بتنی با پیوستگی کامل تاریخچه عملکردی متغیری دارند. این روکش‌ها در برخی از پروژه‌ها، به ویژه در تگزاس و آیوآ، عملکرد خوبی از خود نشان دادند و در برخی دیگر دچار ترک‌خوردگی انعکاسی و از بین رفتن زودرس پیوستگی شده است. برخی از مشکلات موجود مربوط به اجرای روکش بر روی روسازی‌هایی است که به شدت دچار ترک‌خوردگی هستند و یا تعمیرات پیش از اجرای روکش بر روی آن‌ها انجام نشده است. چند مطالعه موردی با جزئیات کامل توسط اسمیت و همکارانش ارائه شده است.

۱۸-۲- روکش‌های بتنی روسازی‌های آسفالتی

روکش‌های بتنی اجرا شده بر روی روسازی آسفالتی براساس ضخامت، به روکش‌های بتنی فوق نازک با ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر (۲ تا ٤ اینچ)، روکش‌های بتنی نازک بر

روی آسفالت با ضخامت ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر (٤ تا ۸ اینچ) و روکش‌های بتنی با ضخامت برابر یا بیشتر از ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) بر روی آسفالت تقسیم می‌شود.

۱۸-۲-۱- روکش‌های بتنی بر روی آسفالت

همان طور که در فصل ۲ بیان شد، قدیمی‌ترین نوع روکش بتنی بر روی روسازی آسفالتی، whitetopping نامیده می‌شود. این روکش‌ها مستقیماً بر روی روسازی آسفالتی موجود قرار داده شده و هیچ تمهید خاصی برای پیوستگی یا عدم‌پیوستگی روکش و روسازی موجود انجام نمی‌شود. به منظور متمایز کردن این نوع روکش از روکش‌های بتنی فوق نازک و نازک برروی آسفالت، آن‌ها را بنام روکش بتنی متداول روی آسفالت نیز می‌شناسند.

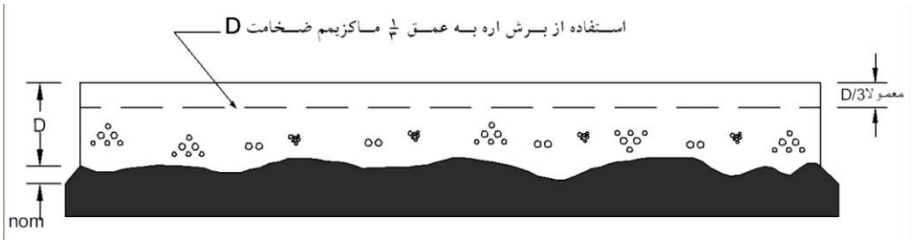
روکش‌ها را می‌توان به منظور ترمیم روسازی‌های آسفالتی، که دچار آسیب‌های سازه‌ای، مانند شیارشدگی، کنار رفتگی و ترک‌خوردگی پوست سوسماری شده‌اند، مورد استفاده قرار داد. در کل نیازی به تعمیر روسازی آسفالتی موجود قبل از اجرای روکش نیست ولی برای اصلاح شیارشدگی‌های شدید لازم است سطح رویه کمی تراشیده شود. اگرچه پوشش‌های سفید به هر سه شکل روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار و روسازی بتنی مسلح یکپارچه اجراء می‌شوند اما متداول‌ترین آن‌ها حالت روسازی بتنی غیرمسلح درزدار است. انجمن روسازی بتنی آمریکا در این ارتباط دو نشریه فنی TB009P و EB210.02P را چاپ کرده است.

طراحی ضخامت این روکش‌ها مانند طراحی روسازی معمول بتنی با مقدار k به نسبت بالا برای آسفالت موجود است که در فصول پیش مورد بحث قرار گرفت. ضخامت معمول این روکش‌ها بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر (۸ تا ۱۲ اینچ) برای بزرگراه‌های بین ایالتی درجه یک و بین ۱۲۵ تا ۱۷۵ میلی‌متر (۵ تا ۷ اینچ) برای راه‌های اصلی درجه دو است. سازمان هواپیمایی فدرال روکش‌های بتنی روی آسفالت را یک روسازی جدید بتنی محسوب می‌کند و برای ارزیابی نقش سازه‌ای روسازی آسفالتی موجود، قضاوت مهندسی را لازم می‌داند. مقدار k در نظر گرفته شده برای روسازی انعطاف پذیر موجود را می‌توان از آزمایش صفحه یا آزمایش‌های غیرمخرب بدست آورد، اما مقدار آن نباید از ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (۵۰۰ psi/in) تجاوز کند. طراحی پوشش‌های سفید بتنی برای روسازی فرودگاه‌ها را می‌توان توسط برنامه رایانه‌ای R805faa.xls انجام داد.

به دلیل مقدار بالای k احتمال تنش‌های ناشی از پیچ‌وتاب و اعوجاج زیاد است و باید فاصله کم‌تری را برای درزها در نظر گرفت. طبق یک قاعده کلی مناسب، فاصله بین

درزها را ۲۱ برابر ضخامت روسازی در نظر می‌گیرند. مثلاً برای روسازی با ۲۰۰ میلی‌متر (۸ اینچ) ضخامت، فاصله درزها برابر ۴/۳ متر (۱۴ فوت) می‌شود. اما برای روسازی‌های با ضخامت ۲۴۰ میلی‌متر (۹/۵ اینچ) و بیشتر، قانون ۲۱ برابر، باعث فاصله بیش از حد درزها می‌شود. در نتیجه فاصله‌گذاری بین درزها باید مستقیماً از روند طراحی بدست آید. با فرض این که مقدار k برابر ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (۵۰ psi/in) باشد می‌توان از شکل ۷-۳ استفاده کرد.

برای جلوگیری از پلکانی شدن درزها، باید از میلگردهای اتصال استفاده کرد تا لایه آسفالتی به انتقال بار کمک کند. در ایالت‌های ویومینگ و یوتا برخی از روکش‌های بتنی روی آسفالت بدون میلگردهای اتصال اجراء شدند. این کار باعث شد تا در زمان کوتاهی در محل درز حالت پلکانی ایجاد شود. با این وجود در کالیفرنیا پس از گذشت ۲۰ سال از عمر روکش‌های بدون میلگرد اتصال، همچنان عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهند. در کل پیش از اجرای روکش نیازی به هیچ‌گونه تعمیری برای ترک‌خوردگی، شن‌زدگی و قیرزدگی‌های روسازی آسفالتی نیست. شیارشدگی‌های بیش از ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) را می‌توان هم با تراش و هم با یک لایه آسفالت اصلاح‌کننده برطرف کرد. شیارشدگی‌های کم‌عمق‌تر را می‌توان نادیده گرفت. کنار رفتگی‌ها را نیز می‌توان به وسیله تراشیدن اصلاح کرد. چاله‌ها را باید با یک مخلوط سرد سنگ شکسته یا آسفالت گرم پر کرد. در این میان مهم‌ترین مسئله فراهم کردن یک سطح هموار و یکنواخت برای اجرای روکش است. آماده‌سازی سطح برای روکش‌های بتنی روی آسفالت موضوع مهمی نیست، زیرا حصول اطمینان از پیوستگی روکش و روسازی موجود اهمیتی ندارد. بنابراین پس از تمیز کردن سطح، اگر عمق شیارشدگی از ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) تجاوز نکند، مستقیماً روکش روی سطح آسفالت اجراء می‌شود. برای شیارشدگی‌های عمیق‌تر و جلوگیری از افزایش بی‌رویه سطح روسازی، ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر (۱ تا ۳ اینچ) از سطح آسفالت باید تراشیده شود. در عوض یک لایه آسفالت اصلاحی به ضخامت ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر (۱ تا۲ اینچ) اجراء می‌شود.

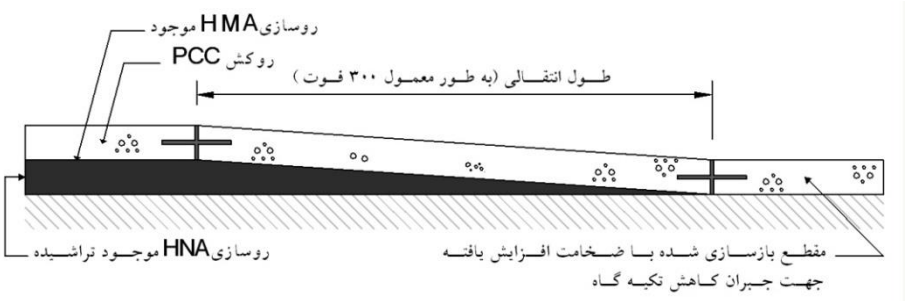


شکل ۱۸-۵: برش اره‌ای برای روکش‌های بتنی اجراء شده بر روسازی آسفالتی دارای شیارشدگی

همان طور که در شکل ۱۸-۵ مشخص شده است، زمانی که روکش مستقیماً بر روی روسازی آسفالتی موجود قرار می‌گیرد، قسمت‌های واقع بر روی عمیق‌ترین بخش گودی مسیر ضخیم‌تر در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این کار تخمین میزان بتن مورد نیاز برای پروژه را مشکل می‌کند ولی باعث افزایش سطح مقطع روکش در قسمت‌های ضعیف روسازی می‌شود و عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. همچنین عمق برش باید حداقل ۱/۳ بیشینه ضخامت روکش باشد.

در روکش‌های بتنی بر روی آسفالت نیز همانند روکش‌های بتنی ناپیوسته از مصالح مربوط به روسازی‌های بتنی مطرح در فصل‌های ۵ و ٦ استفاده می‌شود. در مناطقی که تراکم ترافیک یا محدودیت‌های سنگین ترافیک وجود دارد، روش‌های اجرای تسریع شده روسازی در فصول ٦ و ١٤ و ACI 325.11R را می‌توان به کار برد.

همانند روکش بتنی ناپیوسته، عوامل تأثیرگذار در امکان اجرای روکش‌های بتنی روی آسفالت عبارت از کنترل ترافیک، شانه‌ها و ارتفاع آزاد مجاز هستند. در اجرای این روکش‌ها کاهش تنش در لبه‌های روکش را می‌توان با اجرای شانه‌های متصل فراهم کرد. جزئیات نواحی انتقال در محل دسترسی پل و روگذر در شکل ۱۸-٦ نشان داده شده است. طول توصیه شده برای این نواحی انتقال ۹۰ تا ۱۵۰ متر (۳۰۰ تا ۵۰۰ فوت) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸-٦: جزئیات نواحی انتقال در محل دسترسی پل و روگذر برای روکش بتنی (ACPA, Smith et al. 2002: 5-9)

در آب‌وهوای گرم، روسازی آسفالتی موجود ممکن است داغ شود که این موضوع خطر ترک‌خوردگی حرارتی بتن را افزایش می‌دهد. اگر دمای هوا در زمان اجرای روکش از ۳۲ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند، می‌توان با استفاده از پودر آب، مخلوط دوغاب آهکی و یا ماده سفید عمل‌آوری بتن دمای سطح روسازی را کم کرد.

در آمریکا عملکرد این نوع روکش‌ها عموماً خوب بوده است. احتمالاً دلیل آن این است

که به طور محافظه‌کارانه‌ای از قفل‌وبست بین روسازی موجود و لایه روکش صرف‌نظر می‌شود. عملکرد روکش‌های بتنی روی آسفالت به طور مفصل درACI 325.13R-06 و توسط اسمیت و همکارانش مورد بحث قرار گرفته است. آسفالت موجود نیز مانند یک بستر یکنواخت و پرمقاومت در زیر روکش عمل می‌کند. طبق گزارش‌های انجمن روسازی بتنی آمریکا، این نوع روکش‌ها در راه‌های آیواَ از خود عملکردی عالی نشان داده‌اند. این روکش‌ها تحدب روسازی را کاهش می‌دهند بدین صورت که ضخامت در مرکز راه از ۱۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر (۵ تا ٦ اینچ) و در لبه از ۱۵۰ تا ۱۷۰ میلی‌متر (٦ تا ۷ اینچ) و فاصله درز ٤/٦ متر (۱۵ فوت) است.

۱۸-۲-۲- روکش‌های بتنی فوق نازک بر روی آسفالت

روکش‌های بتنی فوق نازک بر روی آسفالت، در راه‌های فرعی و تقاطع‌هایی که دچار شیارشدگی شدید، کنار رفتگی و چاله شده‌اند، کاربرد دارد. در اوایل دهه ۱۹۹۰ استفاده از روکش‌های بتنی فوق نازک در چندین ایالت آمریکا آغاز شد و پارکینگ‌ها، خیابان‌های مسکونی، جاده‌های کم‌ترافیک، فرودگاه‌های عمومی و تقاطع‌ها و در نهایت با گسترش به سوی راه‌های اصلی، فراگیر شد. انجمن روسازی بتنی آمریکا در ارتباط با روکش‌های بتنی فوق نازک دو نشریه فنی IS120T و IS100.02 را چاپ کرده است.

روکش‌های بتنی فوق نازک معمولاً دارای ضخامت ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر (۲ تا ٤ اینچ) با فاصله‌گذاری درز برابر با ۰/٦ تا ۱/۸ متر (۲ تا ٦ فوت) است. یک مسئله مهم، نوع و مقدار آسفالت روسازی موجود است. کم‌ترین ضخامت پیشنهاد شده برای آسفالت موجود، ۷۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر (۳ تا ٦ اینچ) می‌باشد. وضعیت آسفالت نیز مهم است، زیرا روکش‌های بتنی فوق نازک برای مقاومت در برابر تنش‌های خمشی بر قفل‌وبستی که با روسازی موجود دارد تکیه می‌کند. به طور ویژه، روسازی‌های دارای خرابی شدید یا عریان شدگی سنگدانه‌ها، برای روکش‌های بتنی فوق نازک مناسب نیستند. یک ارزیابی کامل از روسازی آسفالتی موجود و ضرورت تعمیر آن پیش از اجرای روکش بسیار اهمیت دارد. اگر عملکرد روسازی آسفالتی موجود به دلیل زهکشی نامناسب آن ضعیف باشد، نمی‌توان از روکش‌های بتنی فوق نازک به عنوان یک راهکار طولانی‌مدت یاد کرد، مگر این که پیش از اجرای روکش مبادرت به اصلاح زهکش ورزید.

طراحی ضخامت روکش‌های بتنی فوق نازک به مقاومت بتن، ضخامت باقی‌مانده آسفالت موجود پس از آماده‌سازی، مقدار k مربوط به لایه زیر آسفالت و ترافیک وسایل نقلیه بستگی دارد.

انجمن روسازی بتنی آمریکا چارت طراحی و همچنین یک ماشین حساب اینترنتی را برای طراحی روکش‌های بتنی فوق نازک به آدرس زیر فراهم کرده است:
www.pavement.com/concrete_pavement/technical/UTW_calculator/index.asp
وب‌سایت انجمن روسازی بتنی آمریکا همچنین مستندات مربوط به تئوری و فرضیات این ماشین‌حساب آنلاین را ارائه می‌کند.

به منظور طراحی، ترافیک را به دو دسته کامیون با حجم سبک و متوسط طبقه‌بندی می‌کنند. در حجم سبک یا بار محوری گروه A، فرض می‌شود که بار محوری منفرد حداکثر به مقدار ۸۰ کیلونیوتن (۱۸۰۰۰ پوند) و بار محور مرکب، حداکثر به مقدار ۱۶۰ کیلونیوتن (۳۶۰۰۰ پوند) توزیع می‌شود. در گروه محوری B یا حجم متوسط، توزیع بار محوری منفرد حداکثر به میزان ۱۱۶ کیلونیوتن (۲۶۰۰۰ پوند) و بار محور مرکب حداکثر به میزان ۱۹۶ کیلونیوتن (۴۴۰۰۰ پوند) توزیع می‌شود.

به عنوان یک مثال طراحی، روکش‌های بتنی فوق نازک برای حمل ۷۵ کامیون در روز در گروه B، با عمر طراحی ۱۵ سال را در نظر بگیرید. مجموع تعداد کامیون‌ها در این زمان حدوداً ۴۱۱۰۰۰ عدد است. ضخامت روسازی موجود بعد از تراش، ۱۰۰ میلی‌متر (۴ اینچ) بدست می‌آید و مقدار k لایه زیر آسفالت به میزان ۵۴ مگاپاسکال بر متر (psi/in ۲۰۰) است. اگر مقاومت خمشی بتن ۴/۸ مگاپاسکال (۷۰۰ psi) و فاصله بین درزها ۰/۹ متر (۳ فوت) باشد، یک روکش ۷۵ میلی‌متری (۳ اینچ)، ۲۸۴۰۰۰ کامیون را از خود عبور می‌دهد که ناکافی است. خروجی این محاسبه در شکل ۱۸-۷ نشان داده شده است. با افزایش ضخامت روکش به ۱۰۰ میلی‌متر (۴ اینچ) و افزایش فاصله بین درزها به ۱/۲ متر (۴ فوت) تعداد کامیون‌ها را می‌توان به ۵۷۸۰۰۰ افزایش داد که این میزان قابل قبول است.

یک مزیت استفاده از ماشین‌حساب روکش‌های بتنی فوق نازک پذیرش ورودی‌هایی غیر از جداول طراحی است. هرچند محدودیت‌هایی در دامنه داده‌های ورودی وجود دارد که عبارتند از:

- ضخامت روکش‌های بتنی فوق نازک بین ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر (۲ تا ۴ اینچ).
- مقاومت خمشی بتن روکش‌های بتنی فوق نازک بین ۴/۸ و ۵/۶ مگاپاسکال.
- فاصله بین درزها بین ۰/۶ و ۱/۹ متر (۲ و ۶/۲ فوت).
- ضخامت آسفالت بین ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌متر (۳ تا ۶ اینچ)- اگر آسفالت باقی‌مانده ضخیم‌تر باشد، قطر آن ۱۵۰ میلی‌متر فرض می‌شود.
- مدول عکس‌العمل بستر بین ۲۴ و ۵۷ مگاپاسکال بر متر (psi/in ۹۰ و ۲۱۰).

فاصله بین درزها عمدتاً ۱۸-۱۲ برابر ضخامت روسازی است و روسازی به شکل مربع،

برش اره‌ای می‌خورد. برش درزهای بدون آب‌بندی معمولاً ۳ تا ٦ ساعت بعد از بتن‌ریزی، توسط اره‌های نازک انجام می‌شود. روکش بتنی فوق نازک، نازک‌تر از آن است که بتوان در آن میلگرد اتصال یا سایر آرماتورها را قرار داد. بنابراین درزها بر پایه قفل‌وبست بین سنگدانه‌ای استوار هستند.

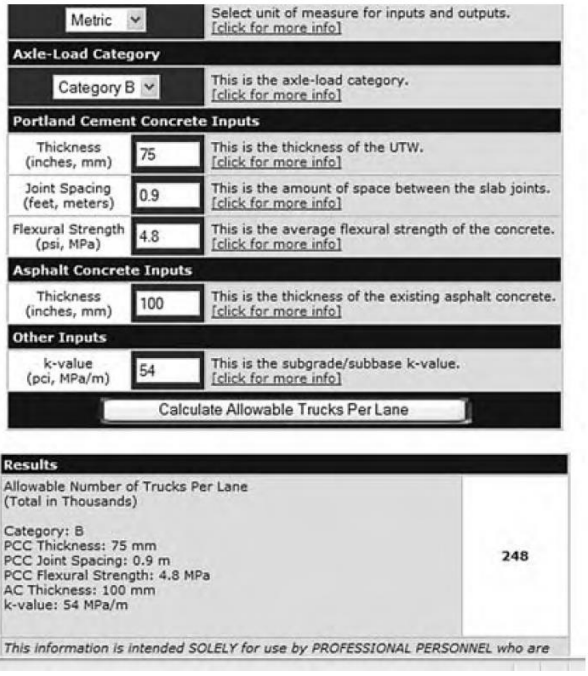
از آنجا که قفل‌وبست بین روکش‌های بتنی فوق نازک و آسفالت موجود در عملکرد روکش بسیار مؤثر است، عموماً نیاز به عملیات گسترده‌ای برای آماده‌سازی سطح روسازی مورد نیاز خواهد بود. رایج‌ترین روش، تراش سطح آسفالت و تمیزکاری نهایی قبل از اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک است. می‌توان سطح را با دمیدن هوای فشرده، جارو کردن قوی و یا آب‌پاشی با فشار تمیز کرد. اگر از آب استفاده می‌شود، قبل از اجرای روکش بتنی باید به خشک کردن سطح مبادرت ورزید. زیرا رطوبت، مانع از پیوستگی دو لایه روسازی می‌شود.

شکل ۱۸–۸ اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک را به عنوان یک لایه پوششی در خط عبور کامیون‌رو در یک تقاطع واقع در راه اصلی ایالات متحده نشان می‌دهد. تراشیدن یک لایه سطحی از روسازی موجود برای اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک، باعث می‌شود تا روسازی آسفالتی مانند یک قالب عمل کند و اجرای یک روسازی هموار را آسان‌تر نماید. پس از تراشِ لایه سطحی لازم است به مقدار کافی از آسفالت در مکان مورد نظر وجود داشته باشدَ تا مشکلات زهکشی ایجاد نشود.

فاصله کم‌تر از ۱/۸ متر (٦ فوت) بین درزها می‌تواند مشکل‌ساز شود. زیرا با این هندسه، درزها در مسیر عبوری چرخ‌های وسایل نقلیه و یا در مجاورت آن قرار می‌گیرد. بار چرخ‌های کامیون‌های سنگین در نزدیکی درزها می‌تواند باعث از بین بردن قفل‌وبست سنگدانه‌ها و ایجاد خرابی شود. شکل ۱۸–۹ روکشی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر (٤ اینچ) و فاصله بین درزها برابر با ۱/۲ متر (٤ فوت) را نشان می‌دهد که هر خط عبور آن به سه قسمت تقسیم شده است. این عکس تقریباً سه سال و نیم بعد از اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک گرفته شده است و نشان دهندهٔ خرابی‌های زودرس می‌باشد. تعداد زیادی از پانل‌های بیرونی در اثر ترمز کامیون‌ها در محل تقاطع جابه‌جا شده و چند مورد از درزهای پلکانی شده نیز مشاهده می‌شود. عریان شدگی روسازی آسفالتی در زیر روکش بتنی از عوامل خرابی‌های زودرس محسوب می‌شود که در محل این خرابی نشانه‌هایی از آن مشاهده شده است.

بنابراین برای مثال طراحی قبل، مطلوبست که فاصله درزها به ۱/۸ متر (٦ فوت) افزایش یابد. بتن با مقاومت خمشی ٤/۸ مگاپاسکال (۷۰۰ psi) برای تعداد کامیون‌های مورد نظر

کافی نیست. بنابراین باید مقاومت به میزان ۵/۵ مگاپاسکال (۸۰۰ psi) افزایش پیدا کند. یک روکش ۱۰۰ میلی‌متری (٤ اینچ) با بتن پرمقاومت‌تر و با فاصله‌گذاری درز برابر با ۱/۸ متر (٦ فوت)، می‌تواند ۵۰۲۰۰۰ کامیون در گروه B، را تحمل کند.



شکل ۱۸-۷: خروجی ماشین حساب ACPA UTW

در روکش‌های بتنی فوق نازک از بتن مسلح به الیاف با مقاومت اولیه بالا استفاده می‌شود. معمولاً مقاومت خمشی در دامنه ۵/۵-٤/۸ مگاپاسکال (۸۰۰-۷۰۰ psi) قرار می‌گیرد که بالاتر از روسازی بتنی رایج است. اغلب برای کنترل ترک‌خوردگی ناشی از افت پلاستیک از الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن (polypropylene) یا پلی‌الفین (polyolefin) استفاده می‌شود.

ACI 544.1R-96 استفاده از الیاف در بتن را مورد بحث قرار داده است. ACI 325.13R-06 و اسمیت و همکارانش، نمونه‌هایی را از طرح اختلاط بتن برای روکش‌های بتنی فوق نازک تهیه کرده‌اند.

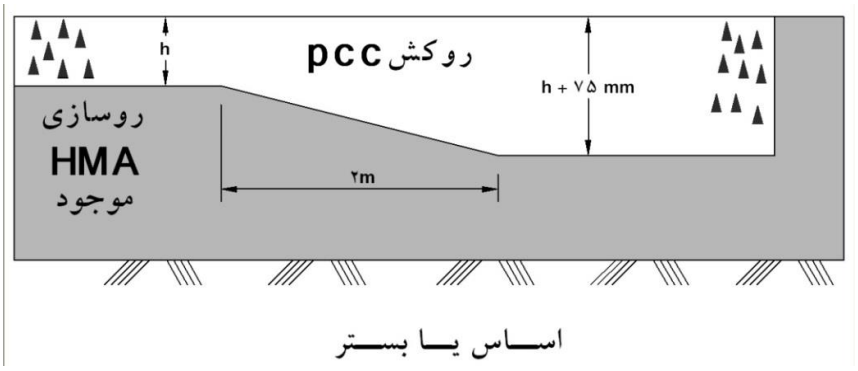
در سلما (Selma) و جسپر (Jasper) واقع در ایالت آلاباما، اغلب در زمان اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک از بتن با مقاومت اولیه بالا استفاده می‌شود. عموماً بتن باید در مدت ٢٤ ساعت به مقاومت فشاری مگاپاسکال ۲۱ (۳۰۰۰ psi) برسد. روش‌های

اجرای تسریع روسازی در فصل ٦، ١٤ و در ACI 325.11R-01 ارائه شده است و دوام این مخلوط‌ها توسط ون‌دام و همکارانش (Van Dam et al.) مورد بحث قرار گرفته است.

با توجه به نسبت بالای سطح به حجم روکش‌های بتنی فوق نازک، عمل‌آوری این نوع روکش‌ها حائز اهمیت خواهد بود. روکش‌های بتنی فوق نازک با مقاومت اولیه بالا، نسبت به بتن‌های معمولی حرارت هیدراتاسیون بیشتری تولید و مشکل را تشدید می‌نماید. هرچند این مسئله به دلیل نازک بودن روکش بتنی تا حدی تخفیف پیدا می‌کند. همچنین زمان کوتاه بستن جریان ترافیک در بسیاری از پروژه‌ها، مانع از استفاده پوشش‌های مرطوب برای عمل‌آوری بتن فوق نازک می‌شود. معمولاً از ترکیبات عمل آورنده، به اندازه ۲ برابر مقدار متداول استفاده می‌شود. در این میان بایستی به ملاحظات مربوط به بتن‌ریزی در هوای گرم توجه شود.

شکل ۱۸-۸: اجرای روکش‌های بتنی فوق نازک به عنوان رویه میانی (عکس از نویسنده)

شکل ۱۸-۹: خرابی روکش‌های بتنی فوق نازک در اثر لغزش پانل‌ها (عکس از نویسنده)



شکل ۱۸-۱۰: جزئیات نواحی انتقالی برای روکش‌های بتنی فوق نازک با انتهای ضخیم شده

(Smith et al. 2002: 6-7 ،ACPA)

جزئیات نواحی انتقالی برای اتصال به روسازی آسفالتی در ابتدا و انتهای پروژه روکش‌های بتنی فوق نازک در شکل ۱۸-۱۰ نشان داده شده است. در ناحیه انتقالی، روکش‌های بتنی فوق نازک تا ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ)، در مجاورت آسفالت دچار افزایش ضخامت می‌شود. طول ناحیه انتقالی معمولاً به اندازه طول یک دال به‌علاوه ۱/۸ متر (٦ فوت) است. نواحی انتقالی، تأثیر بارهای ضربه‌ای ناشی از وسایل نقلیه در حال تردد

از روسازی، مخصوصاً شیارشدگی آسفالت نزدیک به روکش‌های بتنی فوق نازک را کاهش می‌دهد. همچنین این جزئیات مشکلات ناشی از لغزش پانل‌های روسازی، شکل ۱۸-۹، را مورد بحث قرار می‌دهند.

چون روکش‌های بتنی فوق نازک یک روش نسبتاً جدید ترمیم روسازی است، معمولاً اطلاعات کمی از عملکرد آن در دراز مدت وجود دارد. به‌علاوه چون ترجیح داده می‌شود که روکش‌های بتنی فوق نازک در راه‌های با حجم ترافیک کم اجراء شود، ادارات راه عملکرد آن‌ها را به طور دقیق مورد بررسی قرار نمی‌دهند. کول (Cole) تعدادی از روکش‌های بتنی فوق نازک ٤ تا ٥ ساله را بررسی کرد. گرچه مشاهدات او از قطعه‌های ابتدایی و انتهایی منجر به تهیه جزئیات نشان داده شده در شکل ۱۸-۱۰ شد ولی عموماً شاهد عملکرد مناسبی از آن‌ها بود. فاصله کوتاه‌تر درزها و لایه‌های آسفالتی ضخیم‌تر موجب بهبود عملکرد می‌شود. عملکرد روکش‌های بتنی فوق نازک به طور مفصل در CI 325.13R-O6 و توسط اسمیت و همکارانش مورد بحث قرار گرفته است.

۱۸-۲-۳- روکش‌های بتنی روی آسفالت

روکش‌های نازک بتنی روی آسفالت فاصله بین روکش‌های بتنی فوق نازک و روکش‌های معمولی را پر می‌کند و دارای ضخامتی برابر با ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر (٤ تا ٨ اینچ) و ۱/۸ تا ۳/۷ متر (٦ تا ۱۲ فوت) فاصله بین درزها است. روکش‌های نازک مانند روکش‌های بتنی فوق نازک با تکیه بر قفل‌وبست با لایه آسفالتی عمل می‌کند. مثالی از این نوع روکش، لایه‌ای به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر (٦ اینچ) است که در اکتبر ۲۰۰۱ در راه اصلی ۷۸ ایالات متحده در جسپر (Jasper) در ایالت آلاباما اجراء شد. این روسازی شاهد عبور تعداد قابل توجهی از کامیون‌های صنعتی و حمل الوار است. این پروژه پس از گذشت دو سال از زمان اجراء مورد بازرسی قرار گرفت و تا آن زمان هیچ‌گونه خرابی در آن مشاهده نشد.

در حال حاضر هیچ توصیه طراحی برای روکش‌های بتنی نازک وجود ندارد. البته توصیه‌هایی که توسط انجمن روسازی بتنی آمریکا در مورد محدوده ضخامت‌های روکش‌های بتنی معمولی ارائه شده است، به صورت محافظه کارانه قابل استفاده هستند. جداول ۹-٤ و ۹-٥ با مقدار k برابر با ۱۳۵ مگاپاسکال بر متر (٥۰۰ psi/in) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای اجرای این روکش‌ها از راهنمای روکش‌های بتنی فوق نازک و معمولاً با ۱/۸ متر (٦ فوت) به عنوان فاصله بین درزها استفاده می‌شود.

۱۸-۲-٤- رویه‌های میانی بتنی

رویه‌های میانی (inlays) یک گزینه ترمیم روسازی، بین اجرای روکش و بازسازی کامل روسازی است. این روش برای تعویض یک یا چند خط عبور در روسازی بتنی یا آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک مزیت مهم این روش آن است که ارتفاع سطح نهایی روسازی تغییر نمی‌کند. به طور کلی، رویه‌های میانی به صورت روسازی بتنی متداول، روکش‌های بتنی فوق نازک و یا رویه‌های بتنی نازک طراحی می‌شوند.

نشریه انجمن آمریکایی روسازی بتنی، تحت عنوان «بهینه‌سازی عملیات بازسازی با استفاده از لایه‌های داخلی»، به طور مفصل درباره این نوع لایه‌ها بحث می‌کند و در آن سه صفحه به سطح مقطع‌های نمونه اختصاص داده شده است. برای جاده‌ها و خیابان‌ها، لایه‌های داخلی تک‌خطه یا چندخطه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاطع جناغی (keel section) باند پرواز را نیز می‌توان با لایه‌های داخلی جایگزین کرد. اجرای لایه‌های داخلی به صورت نیمه عمیق یعنی روکش بتنی با پیوستگی کامل بر روی بخشی از روسازی موجود، نیز امکان پذیر است. به منظور جلوگیری از ایجاد اثر وان حمام (bathtub effect) که رطوبت را درخود نگه می‌دارد، باید حین اجرای لایه‌های داخلی پروژه، زهکشی روسازی مورد ارزیابی قرار بگیرد و در صورت نیاز اصلاح شود. برای این منظور اصلاح زهکش‌های لبه راه‌حل مناسبی است.

واژه‌نامه

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Admixture	مواد افزودنی
Agitating Speed	با سرعت هم زدن
Alkali-Silica Reaction	واکنش قلیایی- سیلیسی
Approach Slab	دال دسترسی
Asphalt Surfaced	رویه آسفالتی
Axle Equivalency Factors	ضرایب بار هم‌ارز
Bar Inserter	دستگاه نصب میلگرد
Bleed Water	آب انداختگی سطح بتن
Bleeding	پدیده قیرزدگی
Blockout	محفظه تأسیسات درون روسازی بتنی
Blowup	ترکیدگی
Bond Breaker	جدا کننده
Bond Strength	مقاومت پیوستگی
Bonded	چسبیده، متصل
Bonded Overlay	روکش بتنی با اتصال کامل
Built-In Curl	موج داخلی
Built-In Warp	اعوجاج داخلی
Bulk Specific Gravity	وزن مخصوص حجمی
Burlap	گونی‌های کرباسی
Butt Joint	درز ساده لب‌به‌لب
Chair	خرک
Choke Stone	مصالح سنگی با دانه‌بندی باز

Construction Joint	درز اجرایی
Container Handler	حمل‌کننده کانتینر
Corrugation	موج زدگی
Cross Stitching	میل‌دوخت‌گذاری عرضی
Curb Mule	ابزار مخصوص ساخت جدول
Curling	موج
Curling Stress	تنش‌های تابیدگی
Deformed Bar	میلگرد آجدار
Delamination	لایه‌لایه شدگی
Diamond Grinding	تیغه الماسی
Diamond Plate Dowels	صفحات اتصال لوزوی
Dowel	میلگرد اتصال
Dowel Bar Retrofit	اصلاح میلگرد اتصال
Dowel Basket	سبد میلگردهای اتصال
Dual Tandem Gear	چرخ زوج مرکب دوگانه
Durability	دوام
Econocrete	بتن اقتصادی
Excel Spreadsheet	صفحه گسترده
Faulting	پلکانی شدن
Finger Expansion Joint	درزهای انبساطی انگشتی
Fixed Form Paving	اجرای روسازی با قالب ثابت
Fly Ash	خاکستر بادی
Freezing Index	شاخص یخبندان
Full Depth Patching	وصله عمیق

Gantry Mobile Crane	جرثقیل دروازه‌ای متحرک
Inlay	رویه میانی
Isolation Joints	درزهای جدا کننده
Keel Section	مقاطع جناغی
Landfill	خاک‌چال
Lane-To-Shoulder Drop-Off	افتادگی شانه نسبت به خط عبور
Lap Splice	وصله پوششی
Lean Concrete	بتن کم سیمان
Locked-Wheel Trailer	یدک‌کش با چرخ قفل شونده
Macrotexture	بافت‌های درشت
Maintenance	نگهداری
Map Cracking	ترک‌خوردگی سطحی
Maturity Test	آزمایش رسیدن بتن
Mesh Depressor	دستگاه فروبرنده شبکه
Microtexture	بافت‌های ریز
Multiple Unit Track	کامیون چند واحده
Partial Patching	وصله نیمه عمیق
Pervious	نفوذپذیر
Plate Compactor	متراکم کننده صفحه‌ای
Pole Tamper	تخماق میله‌ای
Ponding	غرقاب
Porous	متخلخل
Preswelling	پیش‌متورم کردن
Pullout Test	تست کشش

Pumping	مکش
Punchout	سوراخ‌شدگی
Quality Assurance	اطمینان از کیفیت
Ravelling	هوازدگی
Reconstruction	بازسازی
Recycling	بازیافت
Reflective Cracking	ترک‌خوردگی انعکاسی
Rehabilitation	بهسازی
Repair Method	روش مرمت
Resistance To Wear	مقاومت سایشی
Resurfacing	بازسازی رویه
Rice Husk Ash	خاکستر سبوس برنج
Risk Analysis	تحلیل خطر
Risk Management	مدیریت خطر
Rodded	میله خورده
Rolling Resistance	مقاومت غلطشی
Rubber	لاستیک
Rubber Tyres	تایر لاستیکی
Rumble Strip	شیارهای لرزاننده
Run-Off	رواناب، جریان سطحی
Scaling	پوسته‌شدگی
Sealant	مواد آب‌بند
Segregation (Aggregates)	جداشدگی (سنگدانه‌ها)
Self Propelled	ماشین خود جلوروونده

Shoving	کنار رفتگی
Shrinkage Compensating Concrete	سیمان بدون افت
Sieve Analysis	آنالیز الک
Silica Fume	دوده سیلیسی
Skewed Joint	درز مورب
Skid Resistance	مقاومت لغزشی
Slag	سرباره
Sleeper Slab	دال بتنی تکیه‌گاهی
Slipform Paver	دستگاه روساز متحرک
Slurry Seals	دوغاب اسلاری
Staggering Laps	هم‌پوشانی یک‌درمیان
Standardisation	استانداردسازی
Stiffness	سختی
Strategic Highway Research Program	برنامه استراتژیک تحقیقاتی بزرگراه‌ها
Stripping	عریان شدگی
Structural Fatigue	خستگی سازه‌ای
Structural Strength	مقاومت سازه‌ای
Studded Tires	تایر یخ شکن
Sub-Bituminous Coal	ذغال‌سنگ قیردار
Surcharge Load	بارهای سربار
Surface Texture	بافت سطحی
Tack Coat	اندود سطحی
Tandem	محور مرکب دوگانه
Thermal Cracking	ترک‌خوردگی حرارتی

Tie Bar	میل‌مهار
Tire/Road Noise	سروصدای جاده/ تایر
Transition	انتقال
Tridem	محور مرکب سه‌گانه
Trimmers	دستگاه‌های تراش روسازی
Triple Axle	سه محوره
Triple Dual Tandem Gear	چرخ زوج مرکب سه‌گانه
Tube Feeders	تغذیه کننده‌های لوله‌ای
Ultra Thin Asphalt Layers	لایه‌های آسفالتی فوق نازک
Ultrasonic	فراصوت
Unbonded	غیرمتصل، مجزاء
Urban Application	کاربری شهری
Voids	فضای خالی
Warping	اعوجاج
Waterproofing	ضدآب کردن
Wet-On-Wet Construction	اجرای مرطوب بر روی مرطوب
Whitetopping	روکش بتنی بر روی آسفالت
Wide Flange Beam Joint	درزهای از نوع تیر بال‌پهن
Window For Joint Sawing	پنجره برش اره‌ای
Winter Maintenance	نگهداری زمستانی
Workability	کارآیی

اختصارات
انگلیسی به فارسی

Alkali Silica Reaction (ASR)	واکنش قلیایی ـ سیلیسی
Asphalt Treated Permeable Base (ATPB)	اساس نفوذپذیر تثبیت‌شده با قیر
Asphalt Treated Base (ATB)	اساس تثبیت شده با قیر
Average daily traffic (ADT)	ترافیک روزانه
Average Daily Truch Traffic (ADTT)	متوسط ترافیک روزانه وسایل نقلیه سنگین
Average Rectified Slope (ARS)	شیب میانگین اصلاح شده
Bonded Concrete Overlays (BCO)	روکش‌های با پیوستگی کامل
California Bearing Ratio (CBR)	نسبت باربری کالیفرنیا
Cement Treated Base (CTB)	اساس تثبیت شده با سیمان
Coefficient of Thermal Expansion (CTE)	ضریب انبساط حرارتی
Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)	روسازی بتنی مسلح پیوسته
Cumulative Damage Function (CDF)	تابع تجمعی خرابی
Early Opening to Traffic (EOT)	بتن با مقاومت اولیه بالا
Energy And Environmental Design (LEED)	طراحی منطبق با انرژی و محیط‌زیست
Environmental Protection Agency (EPA)	آژانس حفاظت از محیط‌زیست
Falling Weight Deflectometer (FWD)	دستگاه افت‌وخیز سنج
Federal Aviation Administration (FAA)	اداره فدرال هوایی
Federal Highway Adminstration (FHWA)	اداره فدرال بزرگراهی
Fineness Modulus (FM)	مدول نرمی
General Pavement Studies (GPS)	مطالعات کلی روسازی
Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)	سرباره کوره آهن‌گدازی خرد شده
Ground Penetrating Radar (GPR)	رادار نفوذی زمینی
Heavy Weight Deflectometer (HWD)	افت‌وخیز سنج سنگین

خاکستر بادی حجیم	High Volume Fly Ash (HVFA)
سیستم پروفیل‌سنج خودکار	Inertial Road Profiling System (IRPS)
شاخص ناهمواری جهانی	International Roughness Index (IRI)
انجمن بین‌المللی روسازی بتنی	International Society for Concrete Pavements (ISCP)
روسازی بتنی غیرمسلح درزدار	Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)
روسازی بتنی مسلح درزدار	Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)
اساس بتنی کم سیمان	Lean Concrete Base (LCB)
عملکرد بلندمدت روسازی	Long Term Pavement Performance (LTPP)
مدول گسیختگی	Modulus of Rupture (MOR)
برنامه تحقیقاتی تعاونی ملی راه‌ها	National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)
شاخص وضعیت روسازی	Pavement Condition Index (PCI)
وضعیت پروفیل روسازی	Pavement Profile Condition (PPC)
وضعیت شیارشدگی روسازی	Pavement Rutting Condition (PRC)
وضعیت سازه‌ای روسازی	Pavement Structural Condition (PSC)
روسازی بتنی با سیمان پرتلند	Portland Cement Concrete (PCC)
موج الکترومغناطیس ضربه‌ای	Pulsed Electromagnetic Wave (PEW)
روسازی آسفالتی بازیافت شده	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
سنگدانه بتنی بازیافتی	Recycled Concrete Aggregate (RCA)
بتن غلطکی متراکم	Roller Compacted Concrete (RCC)
برنامه نظارت فصلی	Seasonal Monitoring Program (SMP)
عدد لغزش	Skid Number (SN/SK)
مطالعات ویژه روسازی	Specific Pavement Studies (SPS)
نسبت تنش	Stress Ratio (SR)

The American Concrete Pavement Association (ACPA)	انجمن روسازی بتنی آمریکا
The National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)	انجمن ملی بتن آماده
The Portland Cement Association (PCA)	انجمن سیمان پرتلند
Transportation Research Board (TRB)	هیئت تحقیقات حمل‌ونقل
Ultra Thin Whitetopping (UTW)	روکش‌های بتنی فوق نازک
United States Army Crops of Engineering (USACE)	گروه مهندسان ارتش آمریکا
Visual Flight Rules (VFR)	قوانین بصری پرواز

Road, Housing & Urban Development Research Center

Concrete Pavement Design, Construction & Performance

2nd Revision

Edited By: Norbert Delatte

Translated by:

Mohammad Reza Ahadi

Research Report

BHRC Publication No: T- 845

2019