

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن

## مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم

### در خطوط ریلی بالاستی

تألیف:

دکتر مرتضی اسماعیلی

« عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران »

مهندس سید علی قهاری

دانشجوی دکترای مهندسی و مدیریت ساخت

دانشگاه پردو آمریکا

مهندس کاوه مهرزاد

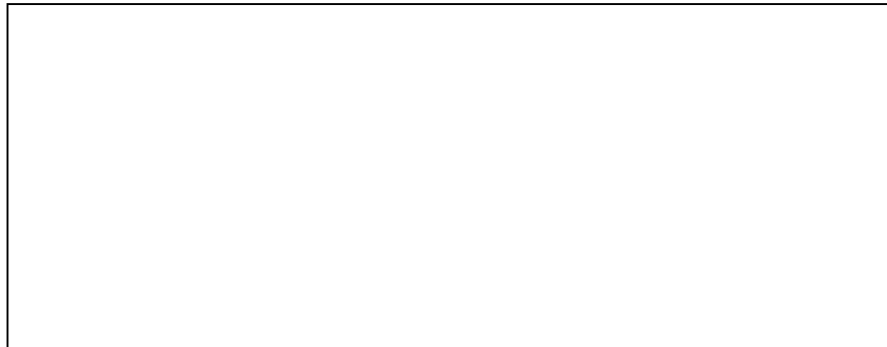
دانشجوی دکترای مهندسی راه آهن

دانشگاه علم و صنعت ایران

گروه آموزشی تأسیسات فنی و زیر بنایی

مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن جمهوری اسلامی ایران

فروردین ۱۳۹۵



مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن

آدرس: میدان راه آهن، خیابان دشت آزادگان، در غربی حوزه شش راه آهن،  
ساختمان مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن - تلفن: ۵۵۱۲۴۱۲۹-۳۰

انتشارات مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی

تألیف: دکتر مرتضی اسماعیلی - مهندس کاوه مهرزاد - مهندس سید علی قهاری  
ناشر:

ویرایش ادبی و آماده سازی نهایی: ناصر مجیدی فرد

صفحه‌آرایی: فریبا نظری

طراحی روی جلد: غلامحسن رکنی

چاپ اول: ۱۳۹۵

بها:

شابک:

«کلیه حقوق این اثر برای مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن محفوظ می‌باشد.»

پست الکترونیکی: [Rwamaouzesh@Rai.ir](mailto:Rwamaouzesh@Rai.ir) سایت مرکز آموزش: <http://www.Ratic.Rai.ir>



## «فهرست مطالب»

صفحه	عنوان
۱۱.....	پیشگفتار.....
۱۳.....	پیشگفتار مؤلفان.....
۱۵.....	فصل ۱: آسفالت و مخلوط آسفالتی گرم.....
۱۶.....	۱-۱- مقدمه.....
۱۶.....	۲-۱- ساختار و مصالح روسازی.....
۱۸.....	۱-۲-۱- لایه رویه.....
۱۸.....	۱-۲-۱-۱- آندود نفوذی.....
۱۸.....	۱-۲-۱-۲- آندود سطحی.....
۱۹.....	۲-۲-۱- لایه اساس.....
۲۰.....	۳-۲-۱- لایه زیر اساس.....
۲۰.....	۴-۲-۱- بستر روسازی.....
۲۰.....	۵-۲-۱- مصالح سنگی.....
۲۱.....	۶-۲-۱- قیر و انواع آن.....
۲۲.....	۱-۶-۲-۱- قیرهای طبیعی.....
۲۳.....	۲-۶-۲-۱- قیرهای نفتی.....
۲۳.....	۷-۲-۱- پخش قیر.....
۲۶.....	۳-۱- مخلوط آسفالت گرم HMA.....
۲۸.....	۱-۳-۱- مخلوط آسفالت گرم با دانه‌بندی متراکم.....
۲۹.....	۲-۳-۱- مخلوط‌های دانه‌بندی باز.....
۲۹.....	۳-۳-۱- مخلوط‌های دارای دانه‌بندی گسسته.....
۳۰.....	۴-۳-۱- مهارت در اجراء.....
۳۰.....	۴-۱- طرح اختلاط روش‌های کارگاهی.....

- ۳۲-۱-۴-۱- سیستم دسته‌بندی و ویژگی‌های سیمان آسفالتی .....
- ۳۴-۱-۴-۲- ویژگی‌ها و خصوصیات مصالح سنگی .....
- ۳۴-۲-۴-۱- بافت و شکل سطح .....
- ۳۵-۱-۴-۲- توزیع اندازه ذره .....
- ۴۰-۱-۴-۲-۳- درصد جذب قیر .....
- ۴۰-۱-۴-۲-۴- درصد رس .....
- ۴۱-۱-۴-۲-۵- دیگر فاکتورهای مؤثر بر دوام .....
- ۴۱-۱-۴-۳- فرآیندهای طرح اختلاط .....
- ۴۱-۱-۴-۳-۱- روش مارشال .....
- ۴۶-۱-۴-۳-۲- روش ویم .....
- ۴۷-۱-۴-۳-۳- روش سوپریپو .....
- ۴۹-۱-۴-۴- مخلوط تولید شده آزمایشگاهی و کارخانه‌ای .....
- ۵۰-۱-۴-۴-۱- میزان قیردر آسفالت .....
- ۵۰-۱-۴-۴-۲- سنگدانه .....
- ۵۳-۱-۴-۴-۳- فرایند اختلاط .....
- ۵۴-۱-۴-۴-۴- تراکم .....
- ۵۵-۱-۵- حمل آسفالت به محل اجراء .....
- ۵۶-۱-۶- پخش آسفالت .....
- ۵۷-۱-۶-۱- ضخامت آسفالت .....
- ۵۸-۱-۶-۲- نکات اجرایی پخش آسفالت .....
- ۵۹-۱-۶-۳- شرایط جوی هنگام پخش آسفالت گرم .....
- ۵۹-۱-۷- تراکم آسفالت .....
- ۶۱-۱-۸- کنترل یکنواختی رقوم و سطح آسفالت کوبیده شده .....
- ۶۲-۱-۹- مشخصات و آزمایش‌های استاندارد برای بتن آسفالتی گرم .....
- ۶۵-۱-۱۰- مراجع و منابع .....

## فصل دوم : کاربرد مخلوط آسفالت گرم در خطوط ریلی. ....۶۷

- ۶۸-۱-۲- مقدمه .....
- ۶۸-۲-۲- طراحی ساخت و اجرای HMA در خطوط بتن آسفالتی .....
- ۶۹-۱-۲-۲- توسعه و تنوع اجرای خطوط بتن آسفالتی .....
- ۷۱-۲-۲- نمونه‌ای از ساخت خطوط بتن آسفالتی با اهداف پژوهشی .....
- ۷۴-۳-۲- طراحی ضخامت برای زیرسازی آسفالتی.....
- ۷۷-۴-۲- اندازه‌گیری تنش، تغییر شکل و مدول بستر در خطوط آسفالتی .....
- ۷۸-۵-۲- اجرای خطوط آسفالتی در کشورهای مختلف .....
- ۷۸-۱-۵-۲- کارکرد خطوط آسفالتی در ایتالیا.....
- ۸۲-۲-۵-۲- کارکردهای خطوط آسفالتی در ژاپن .....
- ۸۶-۳-۵-۲- کارکردهای خطوط آسفالتی در آلمان .....
- ۸۸-۴-۵-۲- کارکردهای بتن آسفالتی در فرانسه .....
- ۸۹-۵-۵-۲- کارکردهای بتن آسفالتی در اسپانیا .....
- ۹۰-۲-۶- ارزیابی خطوط آسفالتی در مقایسه با خطوط بالاستی سنتی .....
- ۹۰-۱-۶-۲- ارزیابی عملکرد خطوط آسفالتی .....
- ۹۱-۲-۶-۲- ارزیابی اجرای خطوط آسفالتی از نظر اقتصادی .....
- ۹۲-۷-۲- جمع بندی نکات حائز اهمیت .....
- ۹۴-۸-۲- منابع و مراجع .....

## فصل سوم : تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی.....۹۵

- ۹۶-۱-۳- مقدمه .....
- ۹۸-۲-۳- مدل ایلی ترک .....
- ۹۹-۳-۳- مدل ژئوترک .....
- ۱۰۰-۴-۳- مقایسه کنترک با ژئوترک .....
- ۱۰۱-۵-۳- مبانی تئوریک برنامه کنترک .....
- ۱۰۱-۱-۵-۳- روش به‌کارگیری اصل بر هم نهی نیروها .....
- ۱۰۳-۲-۵-۳- تفاوت نسبت به اجزای محدود .....
- ۱۰۶-۳-۵-۳- ماتریس سختی اساس .....
- ۱۰۷-۶-۳- تحلیل سیستم چند لایه‌ای در نرم‌افزار کنترک .....
- ۱۱۱-۷-۳- مدول الاستیک مواد .....

۱۱۲.....	۱-۷-۳- مدول دینامیکی
۱۱۳.....	۲-۷-۳- مدل انستیتو آسفالت
۱۱۵.....	۳-۷-۳- مدل Witzcak برای پیش بینی E
۱۱۷.....	۴-۷-۳- روش حساسیت ویسکوزیته دما (VTS)
۱۱۸.....	۸-۳- تحلیل خرابی
۱۲۲.....	۹-۳- ترک ناشی از خستگی لایه HMA
۱۲۳.....	۱۰-۳- تغییر شکل‌های دائمی بر اساس کرنش فشاری
۱۲۴.....	۱۱-۳- تبدیل کرنش فشاری به تنش فشاری
۱۲۸.....	۱۲-۳- تغییر شکل دائمی بر اساس تنش فشاری
۱۳۰.....	۱۳-۳- روند توسعه نرم‌افزار کنترک
۱۳۱.....	۱۴-۳- کارایی نرم افزار
۱۳۳.....	۱۵-۳- منابع و مراجع

### ۱۳۵..... فصل چهارم : آشنایی با محیط نرم‌افزار.....

۱۳۶.....	۱-۴- مقدمه
۱۳۶.....	۲-۴- روند کار با برنامه و معرفی پارامترهای ورودی
۱۳۸.....	۱-۲-۴- خطوط بالاستی
۱۵۶.....	۲-۲-۴- خطوط آسفالتی
۱۶۳.....	۳-۲-۴- خطوط با زیرسازی ترکیبی
۱۶۴.....	۳-۴- مراجع و منابع

### ۱۶۵..... فصل پنجم : بررسی نتایج عددی.....

۱۶۶.....	۱-۵- مقدمه
۱۶۶.....	۲-۵- اعتبارسنجی نرم‌افزار
۱۶۹.....	۱-۲-۵- آزمایش میدانی
۱۷۳.....	۲-۲-۵- سیستم پیش‌بینی‌کننده نتایج
۱۷۳.....	۳-۲-۵- مشخصات محل‌های تست میدانی
۱۷۶.....	۴-۲-۵- ارائه اطلاعات خروجی و تحلیل آن‌ها
۱۸۳.....	۳-۵- تحلیل حساسیت
۱۸۶.....	۱-۳-۵- تأثیر تغییر مدول بستر
۱۸۹.....	۲-۳-۵- تأثیر تغییر بار محوری
۱۹۳.....	۴-۵- مثال‌هایی عددی از تحلیل خطوط ریلی

- ۱۹۳..... ۱-۴-۵- خطوط بالاستی مرسوم
- ۱۹۵..... ۲-۴-۵- خطوط آسفالتی
- ۱۹۷..... ۳-۴-۵- خطوط ترکیبی
- ۱۹۹..... ۵-۵- نتایج عددی
- ۲۰۰..... ۱-۵-۵- مقایسه با تحلیل‌های بوسینسک
- ۲۰۱..... ۲-۵-۵- مقایسه با ژئوترک
- ۲۰۳..... ۳-۵-۵- اثر تعداد تراورس‌ها
- ۲۰۴..... ۴-۵-۵- اثر ضخامت لایه‌ها
- ۲۱۰..... ۶-۵- مراجع و منابع
- ۲۱۱..... کتابهای منتشر شده مرکز آموزش و تحقیقات راه‌آهن



« باسمه تعالی »

## پیشگفتار

در راستای ارتقای سطح دانش علمی و تخصصی کارکنان و پژوهشگران عرصه حمل و نقل ریلی، مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن ج.ا.ا بر اساس رسالت خویش وظیفه خود می‌داند تلاش‌های مجدانه‌ای در جهت غنی‌سازی منابع علمی و فنی در حوزه‌های مختلف صنعت حمل و نقل ریلی به‌عمل آورد.

تدوین و تألیف کتب مرجع با رویکرد آموزشی – کاربردی در زمینه‌های فن‌آوری‌های رایج در راه‌آهن‌های ایران و جهان به‌عنوان یک راهکار اصولی در انتقال دانش برای اجرای سیاست‌های دانش‌محوری راه‌آهن کشور در دستور کار مرکز آموزش و تحقیقات راه‌آهن قرار دارد.

با توجه به روند رو به رشد راه‌آهن ایران، اثر حاضر تحت عنوان "مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالت گرم در خطوط ریلی بالاستی" و مباحث مطروحه در آن می‌تواند راهنمای ارزشمندی در جهت نیل به اهداف مترقی راه‌آهن ج.ا.ا باشد.

تألیف و تدوین این اثر ارزشمند توسط جناب آقای دکتر مرتضی اسماعیلی عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران با همکاری آقایان کاوه مهرزاد دانشجوی دکترای مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران و سید علی قهاری دانشجوی دکترای مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه پردو آمریکا صورت پذیرفته که پس از تاییدیه کمیته تخصصی و مصوبه هیئت تحریریه این مرکز، چاپ و به جامعه بزرگ راه‌آهن هدیه می‌گردد.

در پایان ضمن تشکر از پدیدآورندگان این اثر ارزشمند، شایسته است از سایر عزیزانی که ایشان را یاری نموده‌اند به‌ویژه آقایان مهندس فریدون ساکی رئیس گروه آموزش تأسیسات فنی و امور زیربنایی در معرفی و فراهم‌آوری شرایط چاپ و ناصر مجیدی فرد کارشناس ارشد حوزه مطالعات و برنامه‌ریزی این مرکز در ویرایش ادبی و رعایت استانداردهای مورد نیاز کیفی چاپ و انتشار کتاب تشکر و قدردانی گردد.

امید است تدوین و نشر این‌گونه کتب بتواند بسترهای مورد نیاز برای شکوفایی صنعت حمل و نقل ریلی را فراهم آورد.

مرکز آموزش و تحقیقات راه‌آهن

جمهوری اسلامی ایران





## پیشگفتار مؤلفان

قریب به دو صده است که به شکل وسیع از خطوط ریلی برای حمل و نقل استفاده می‌شود و در طول این مدت، ساختار خط، سرعت قطار، تناژ عبوری سالیانه و بار قطارها به شکل مهمی دستخوش تغییر شده‌اند؛ به عنوان مثال، امروزه در برخی نقاط دنیا به طور متداول از لکوموتیوهای محور سنگین استفاده می‌شود که در این قطارها بار محوری بیشینه تا ۳۶ تن افزایش یافته است. همچنین، هر سال رکورد بیشتری برای تناژ عبوری ثبت می‌شود. تمامی این تحولات، به منظور افزایش سوددهی و مستلزم خطوط کارآمد و اجزای سالم است. به دلیل نارسایی‌های ساختار خطوط بالاستی، مشکلات عدیده‌ای در این خطوط گسترش یافته‌اند. این مشکلات را می‌توان در دو گروه، دسته‌بندی نمود.

گروه اول، مربوط به گسیختگی بستر است. این گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که فشار موجود روی سطح فوقانی بستر، از حد قابل تحمل فشار بستر بزرگتر باشد. در شرایط وقوع گسیختگی بستر در خطوط ریلی اثرات آن بر هندسه مسیر نامطلوب و اصلاح آن مشکل و پرهزینه خواهد بود. لذا جلوگیری از آن، یکی از اهداف اصلی طراحی، ساخت و نگهداری زیرسازای خطوط ریلی است.

گروه دیگر ناشی از گسیختگی در اجزای سازه‌ای خط می‌باشد. به طور متداول این نوع خرابی‌ها در اجزایی مانند ریل، صفحه زیر تراورس، پابند، تراورس، بالاست و زیربالاست در دوره زمانی بهره‌برداری رخ می‌دهند. کاملاً روشن است که شکست اجزای سازه‌ای خط نیز بر هندسه خط تأثیرگذار است و این امر رابطه تنگاتنگی با مباحث ایمنی دارد.

راه حل جلوگیری از گسیختگی بستر، شامل ترکیبی از کاهش فشار روی لایه بستر، بهبود وضعیت سیستم زهکشی، افزایش ضخامت مصالح دانه‌ای و یا استفاده از اجزای خط با کیفیت و باربری بیشتر است. از این رو ضرورت مطالعه روش‌های نوین ساخت خطوط ریلی از جمله استفاده از لایه آسفالت به منظور برطرف نمودن این معضل اهمیت به‌سزایی خواهد داشت. کاربردهای عمده این سیستم روسازی ریلی را می‌توان در خطوط سنگین دارای یک یا چند شرط زیر جستجو نمود. خطوط متکی بر بسترهای ضعیف با باربری کم و نشست‌پذیری بالا، خطوط در معرض بارندگی‌های قابل توجه و شرایط زهکشی نامناسب، خطوط بنا شده بر سفره آب زیرزمینی بالا و خطوط در معرض اضافه تنش‌های ناگهانی همانند نواحی انتقال خطوط بالاستی به پل‌ها و تونل‌ها را می‌توان به‌عنوان برخی از این شرایط نام برد.

طی دو دهه گذشته تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از خطوط آسفالتی انجام شده است. نتیجه این تحقیقات مؤید آن است که وجود لایه آسفالت به‌عنوان یکی از اجزای زیرسازای خطوط ریلی، مزایای

متعددی را فراهم می‌کند که در نهایت، منجر به افزایش ظرفیت خط و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن می‌گردد. از جمله مزایای عمده به‌کارگیری این سیستم می‌توان به مواردی همچون جداسازی بستر از لایه بالاست، کاهش توزیع تنش روی بستر، آب‌بندی و نفوذناپذیری بستر و تسهیل در توزیع یکنواخت تنش ناشی از بار زنده روی بستر اشاره نمود.

با عنایت به نکات مطرح شده در خصوص مزایا و کاربردهای خطوط آسفالتی در شبکه ریلی کشور و همچنین عدم وجود منابع مدون در خصوص طراحی و اجرای این خطوط، کتاب حاضر سعی دارد تا مجموعه‌ای از مطالب کاربردی را در این خصوص ارائه نماید. این مجموعه در پنج فصل تنظیم شده است. فصل اول با عنوان آسفالت و مخلوط آسفالت گرم به معرفی آسفالت و اجزای آن پرداخته و با تمرکز بر مخلوط آسفالت گرم به بررسی نقش لایه آسفالت در روسازی اشاره دارد. در فصل دوم با عنوان کاربرد مخلوط آسفالت در خطوط ریلی، آسفالت به‌عنوان یک لایه زیرسازی در خطوط ریلی مورد بررسی قرار گرفته و تجارب موجود در این زمینه در نقاط مختلف دنیا ارائه گردیده است. در فصل سوم کتاب با عنوان تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی، به تحلیل زیرسازی خطوط بالاستی و آسفالتی از لحاظ تئوری اشاره شده است. فصل چهارم با عنوان آشنایی با محیط نرم‌افزار KENTRACK، به معرفی این نرم‌افزار به‌عنوان یک برنامه تحلیل زیرسازی در خطوط بالاستی و انواع خطوط آسفالتی پرداخته است. حل مثال‌های متنوع از تحلیل خطوط ریلی و انواع کارهای عددی انجام شده در این زمینه توسط نرم‌افزار کن‌ترک از جمله تحلیل‌های حساسیت صورت گرفته بر پارامترهای مؤثر بر تحلیل، در فصل پنجم کتاب با عنوان بررسی نتایج عددی، ارائه شده است. ارائه کار علمی حاضر با توجه به حجم بالای مطالب ارائه شده، یقیناً عاری از نارسایی‌ها و نواقص احتمالی نخواهد بود و لذا امید است خوانندگان محترم، نویسندگان را از نظرات ارزشمند خود آگاه سازند.

**دکتر مرتضی اسماعیلی**

**مهندس کاوه مهرزاد - مهندس سید علی قهاری**

**تهران - فروردین ۱۳۹۵**

## «فصل اول»

### آسفالت و مخلوط گرم آسفالتی



زمین طبیعی و یا بستر خاکریزی‌های آماده شده حتی در شرایط کاملاً متراکم و خوب دانه‌بندی‌شده، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده ناشی از ترافیک عبوری در شرایط متغیر جوی را ندارند. روسازی آسفالتی از بروز این آسیب‌دیدگی‌ها جلوگیری کرده و سطحی صاف و هموار را فراهم

می‌آورد. با توجه به استفاده از مخلوط آسفالتی گرم به‌عنوان لایه زیربلاست در خطوط ریلی، محورهای اصلی این فصل بر پایه آشنایی بیشتر با مفاهیم و ادبیات فنی روسازی آسفالتی و به‌طور خاص چگونگی طراحی و اجرای مخلوط آسفالتی گرم بنا شده است. هدف این فصل، ارائه راهنمای روسازی مخلوط آسفالتی گرم، شرح تولید و اجرای آن از دیدگاهی کاربردی است. به‌طور کلی در این بخش، آسفالت به‌عنوان مصالح روسازی راه بررسی می‌گردد.

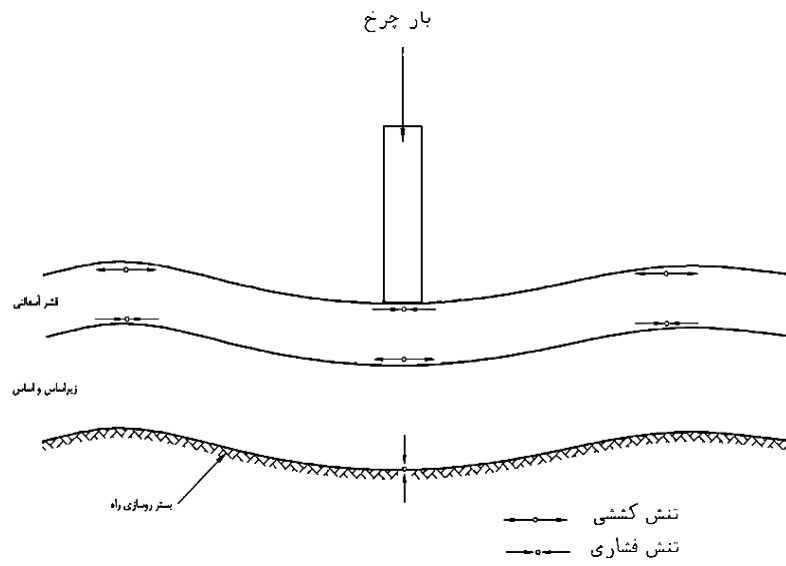
### ۱-۱- مقدمه

به‌منظور جلوگیری از شکست برشی خاک بستر و به‌وجود آمدن تغییر شکل‌های دائمی بیش از اندازه در آن، باید از شدت تنش‌های فشاری قائم بر روی آن کاسته شود که این عمل با قرار دادن لایه‌ای از مصالح مرغوب و با مقاومت زیاد بر روی خاک انجام می‌شود. بستر خطوط ریلی نیز از این امر مستثنی نیستند و لذا به‌کارگیری لایه‌ای از بتن آسفالتی روی بستر خطوط ریلی می‌تواند بر کاهش تنش‌ها بر بستر تأثیرگذار باشد و همچنین مقدار نشست‌های قائم را کم کند. در این فصل با پرداختن به مشخصات بتن آسفالتی، ساختار و شاکله آن به‌طور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به امکان استفاده از آسفالت و مخلوط آسفالتی گرم به‌عنوان یک لایه زیرسازی در خطوط ریلی، در این فصل به بررسی آسفالت، ترکیبات سازنده آن شامل قیر و سنگدانه و مختصری از نحوه اجرای آن پرداخته می‌شود. در این راستا و در ابتدا لایه‌های روسازی آسفالتی معرفی شده و در ادامه مخلوط آسفالتی گرم، طرح اختلاط، حمل، پخش و تراکم آن بررسی شده است. در انتها نیز به آزمایش‌های متداول در خصوص کنترل کیفیت آسفالت اشاره می‌شود.

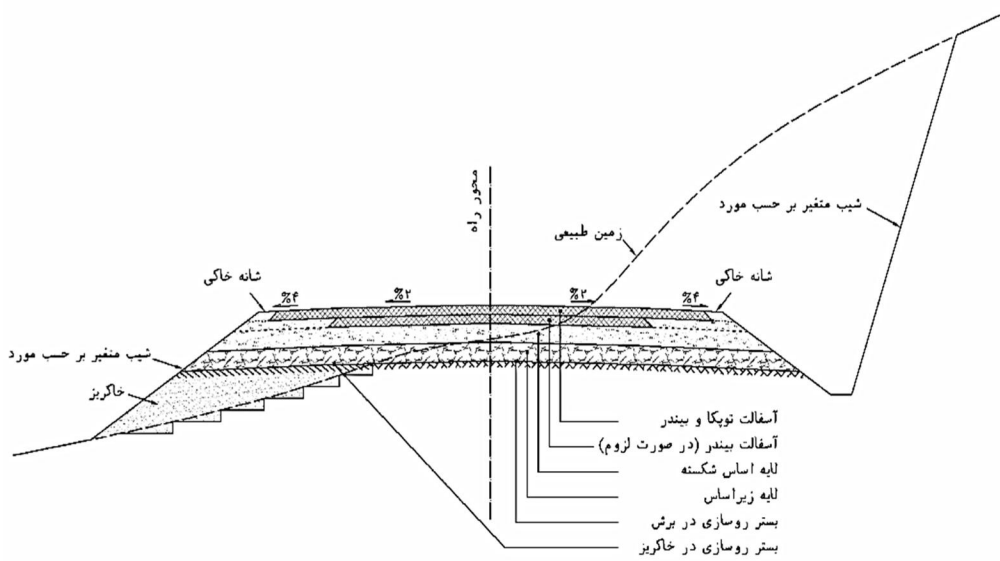
قبل از پرداختن به مشخصات مخلوط آسفالتی گرم، به‌منظور آشنایی بیشتر با ادبیات فنی موضوع، چند تعریف مقدماتی در ارتباط با روسازی آسفالتی و اجزای آن ارائه می‌گردد.

### ۱-۲- ساختار و مصالح روسازی آسفالتی

قشرهای آسفالتی در مقایسه با دیگر لایه‌های روسازی می‌بایست از مقاوم‌ترین و مرغوب‌ترین مصالح انتخاب شوند. در راه‌های با حجم ترافیک بالا و سنگین که در آن‌ها لایه‌های بالای روسازی از مصالح آسفالتی تشکیل شده‌اند، به‌طور معمول این لایه‌ها در اثر بارگذاری مطابق شکل (۱-۱) تغییر شکل داده و در آنها تنش‌های کششی و فشاری افقی به‌وجود می‌آید. هرگاه شدت تنش‌های کششی افقی در زیر لایه‌های آسفالتی از مقاومت کششی آن بیشتر شود، در این نقاط ترک ایجاد می‌گردد که به‌تدریج به سمت رویه راه گسترش یافته و موجب آسیب دیدگی‌هایی می‌شود که در نهایت کاهش عمر مفید روسازی را در بر خواهد داشت. بنابراین جنس و ضخامت لایه‌های آسفالتی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که در برابر تنش‌های کششی افقی به‌وجود آمده، مقاومت نموده و ترک نخورد. نیم‌رخ کلی یک روسازی آسفالتی راه و اجزای تشکیل دهنده آن در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) افت و خیز ناشی از تنش‌های فشاری و کششی در روسازی



شکل (۲-۱) نمونه‌ای از نیم‌برخ عرضی روسازی آسفالت

### ۱-۲-۱- لایه رویه

جنس این لایه بسیار مرغوب و مقاومت آن نسبتاً زیاد است. رویه، بالاترین لایهٔ روسازی است که در تماس مستقیم با چرخ وسایل نقلیه قرار دارد و در راه‌های با ترافیک زیاد از مصالح مرغوب نظیر بتن آسفالتی یا بتن سیمانی و در راه‌های با ترافیک کم مانند راه‌های روستایی نیز از رویهٔ شنی ساخته می‌شود. لایهٔ زیرین که آستر<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود دارای درصد قیر کمتری نسبت به لایهٔ رویه یا توپکا است. به‌طور معمول رویه‌های آسفالتی با ضخامت بیش از ۵ سانتیمتر در دو لایه ساخته می‌شوند. پخش یک لایهٔ قیر با کندروانی کم و یا متوسط روی سطح شنی راه، اندود نفوذی و روی سطح آسفالتی یا بتنی راه، اندود سطحی نامیده می‌شود.

در ادامه عملکرد اندودهای نفوذی و سطحی تشریح می‌گردد.

### ۱-۲-۱-۱- اندود نفوذی

اندود نفوذی به‌منظور آماده کردن سطح شنی راه جهت پخش لایهٔ آسفالتی اعم از آسفالت سطحی، آسفالت سرد یا آسفالت گرم اجرا می‌شود. این اندود علاوه بر کمک به آب‌بندی راه و چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر و نفوذ در خلل و فرج سطح قیرپاشی شده، موجب چسبندگی قشر آسفالت به سطح راه می‌شود.

برای سطوح آماده شدهٔ راه بر حسب آن‌که بافت ریزدانه و متراکم و یا بافت درشت‌دانه و باز داشته باشد، مقدار قیر محلول به ترتیب می‌تواند از ۱ تا ۲ کیلوگرم بر متر مربع تغییر کند. در صورتی که از قیرابه برای سطوح آماده شدهٔ راه با دانه‌بندی باز و تخلخل زیاد استفاده شود، میزان مصرف آن برحسب مورد، بین ۱/۵ تا ۲/۵ لیتر بر متر مربع خواهد بود.

### ۱-۲-۱-۲- اندود سطحی

اندود سطحی جهت آغشته کردن سطح آسفالتی یا بتنی موجود و ایجاد چسبندگی با لایهٔ آسفالتی که روی آن پخش می‌گردد، اجرا می‌شود. برای اندودهای سطحی، مقدار قیر محلول حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم در متر مربع و برای قیرابه ۲۵۰ تا ۵۰۰ گرم در مترمربع می‌باشد. میزان اندود سطحی که باید روی سطوح آسفالتی قدیمی، هوازده و آسیب دیده پخش شود، برحسب مورد و با توجه به شدت میزان فرسودگی رویه موجود توسط دستگاه نظارت تعیین می‌شود. برای انتخاب نوع و درجهٔ قیر مناسب برای

اندوذهای نفوذی و سطحی، علاوه بر استفاده از جداول مربوطه در آیین‌نامه‌هایی مانند منبع [۱۰]، متغیرهای زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- الف - دمای محیط
- ب - رطوبت نسبی و باد
- پ - درجه حرارت سطحی که قیرپاشی می‌شود.
- ت - بافت سطحی بستری که قیرپاشی می‌شود.
- ث - طول زمان عمل آمدن قیر

برای اجرای اندوذهای ماشین‌آلات زیر مورد نیاز است:

- جاروی مکانیکی
- سیستم هوای فشرده یا کمپرسور
- جاروی مکانیکی و کمپرسور برای پاک کردن و آماده کردن سطح نهایی راه و یا رویه‌های آسفالتی موجود قبل از قیرپاشی به کار می‌رود.
- قیرپاش
- قیرهای محلول و یا قیرابه‌ها باید با قیرپاش پخش شوند.

### ۱-۲-۲- لایه اساس<sup>۱</sup>

لایه اساس، معمولاً بلافاصله در زیر لایه آسفالت و روی قشر زیراساس قرار می‌گیرد. مصالح این قشر باید متشکل از سنگ کوهی شکسته، یا شن و ماسه رودخانه‌ای شکسته، یا سرباره کوره‌های آهن‌گدازی و یا ماکادام باشد.

لایه اساس در راه‌هایی که آمد و شد وسایل نقلیه در آن‌ها زیاد بوده و یا مقاومت خاک بستر روسازی کم است با استفاده از بتن آسفالتی کم قیر ساخته می‌شود. این لایه در صورت وجود بارهای اضافی باید در لایه‌هایی به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر اجرا شود.

### ۱-۲-۳- لایه زیر اساس<sup>۱</sup>

زیراساس معمولاً نخستین قشر از لایه روسازی است که بر روی بستر روسازی قرار می‌گیرد. این لایه از مصالح نسبتاً مرغوب و در راه‌هایی که آمد و شد وسایل نقلیه در آن‌ها زیاد بوده و یا مقاومت خاک بستر روسازی کم است، به کار می‌رود و معمولاً از مصالح سنگ شکسته و یا شن و ماسه ساخته می‌شود. کار زیراساس هموار کردن بستر راه و ایجاد سطحی مناسب برای اجرای لایه اساس است. در مواردی که از طرفی تنش‌های وارده از لایه‌های روسازی زیاد و از طرف دیگر تنش مجاز بستر کم باشند و یا در مواردی که نفوذ یخبندان زیاد باشد، زیراساس باید در چندین لایه به ضخامت‌های ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر اجرا شود تا نیروهای وارده در سطح بزرگتری از بستر راه توزیع شود و همچنین از بستر راه در برابر یخبندان محافظت شود.

با در نظر گرفتن شرایط جوی، نوع زمین طبیعی، مصالح موجود در محل، میزان ترافیک عبوری و شرایط اقتصادی پروژه می‌توان دو نوع زیراساس زیر را استفاده کرد:

- زیراساس شنی و یا سنگی

- زیراساس آهکی

### ۱-۲-۴- بستر روسازی<sup>۲</sup>

بستر، لایه‌ای از خاک زمین طبیعی است که عاری از مواد آلی و مواد مضر بوده و به نحو مناسبی کوبیده شده باشد. کیفیت خاک بستر، میزان ظرفیت باربری و حساسیت و آسیب‌پذیری آن در برابر عوامل جوی، در انتخاب لایه‌های روسازی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. در خاکریزها این لایه آخرین لایه خاک کوبیده شده است و در برش‌ها این لایه، لایه کوبیده شده و آماده شده خاک زمین طبیعی است. در شرایطی که بستر راه سست بوده و امکان عملیات و اجرای لایه‌های روسازی میسر نباشد باید با تثبیت بستر یا با ایجاد یک لایه تقویتی، بستر راه را برای اجرای لایه‌های روسازی آماده کرد.

### ۱-۲-۵- مصالح سنگی

مصالح سنگی بتن آسفالتی شامل مصالح درشت‌دانه، ریزدانه (ماسه) و گردسنگ فیلر<sup>۳</sup> می‌باشد. مصالح سنگی بتن آسفالتی باید محکم، بادوام، سخت، تمیز، مکعبی‌شکل و عاری از هرگونه مواد آلی و رسی

1. Subbase  
2. Subgrade  
3. Filler



باشد. مصالح سنگی که روی الک شماره ۸ باقی می‌ماند، مصالح درشت دانه به‌شمار رفته و این مصالح باید از سنگ یا شن شکسته و یا از مخلوط هر دو تهیه شود. همچنین مصالح سنگی ریزدانه به مصالح سنگی که از الک نمره ۸ عبور می‌کنند، اطلاق می‌شود. این مصالح باید تمیز، سخت و با دوام بوده و از شکستن سنگ یا شن و ماسه طبیعی و یا مخلوط آن دو تهیه گردد.

گردسنگ یا فیلر، مصالح عبوری از الک نمره ۲۰۰ است و باید عاری از مواد رسی و آلی باشد. مهم‌ترین نقش فیلر در بتن آسفالتی افزایش عمر روسازی و بالا بردن مقاومت آن در برابر تأثیر آب است. به‌طور خلاصه این مصالح باعث افزایش قدرت باربری، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت برشی و فشاری و کاهش تغییر شکل نسبی و شکنندگی بتن آسفالتی می‌شوند. اگر فیلر حاصل از شکستن سنگ و شن برای تأمین مقدار فیلر مورد نیاز بتن آسفالتی کافی نباشد و یا این که فیلر حاصله مرغوب نباشد، می‌توان از گردسنگ آهک، آهک شکفته و یا سیمان پرتلند به‌جای آن استفاده کرد. مقدار فیلر مورد استفاده نیز باید متناسب و به‌اندازه باشد؛ چرا که مصرف مقدار زیاد آن در بتن آسفالتی معایبی از قبیل افزایش مقاومت در برابر تراکم، کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش استقامت مصالح ناشی از کاهش اصطکاک داخلی را به همراه دارد. جدول (۱-۱) دانه‌بندی مناسب برای فیلر را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱. دانه‌بندی فیلر

درصد وزنی رد شده از هر الک		اندازه الک
آستر و رویه	اساس آسفالتی	
۱۰۰	۱۰۰	الک نمره ۳۰
۹۵-۱۰۰	۹۵-۱۰۰	الک نمره ۵۰
۷۰-۱۰۰	۷۰-۱۰۰	الک نمره ۲۰۰

### ۱-۲-۶- قیر و انواع آن

چسباننده‌های مصرفی در راه سازی شامل مواد قیری و قطرانی می‌باشند و وظیفه چسباندن دانه‌های سنگی به یکدیگر را بر عهده داشته و آن‌ها را به جسمی یکپارچه تبدیل می‌کنند. قیر جسمی سیاه‌رنگ است که از شمار زیادی هیدروکربور ساخته شده است. قیر را از عهد باستان در ایران می‌شناختند و واژه آن ممکن است ایلامی یا بابلی باشد.

قیر در دمای محیط، جامد و یا نیمه‌جامد بوده و بر اثر حرارت روان می‌شود. این ماده در روغن‌های معدنی و حلال‌هایی نظیر سولفید کربن، تتراکلرید کربن و تری‌کلریداتیلن حل می‌شود. قطران که رنگی سیاه متمایل به قهوه‌ای دارد از تقطیر گازهای حاصل از حرارت دادن زغال سنگ، چوب و سنگ‌های شیشستی به دست می‌آید. این ماده قطران خام نامیده می‌شود که از تصفیه آن قطران راه‌سازی حاصل می‌گردد. قطران در ایران به میزان بسیار کم تولید شده و استفاده از آن در کارهای راه‌سازی کشور معمول نیست.

قیر مصرفی در آسفالت گرم از نوع قیرهای خالص<sup>۱</sup> با درجه نفوذ ۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰، ۱۰۰-۸۵، ۱۵۰-۱۲۰ و ۳۰۰-۲۰۰ و قیرهای گروه کندروانی<sup>۲</sup> شامل AC-2.5، AC-5، AC-10، AC-20 و AC-40 می‌باشند که درجه نفوذ مناسب برای هر مورد، بر اساس شرایط جوی منطقه و ترافیک وسایل نقلیه سنگین انتخاب می‌شود. درجه نفوذ کمتر نشان‌دهنده قیر سخت‌تر و درجه نفوذ بیشتر نشانه قیر نرم‌تر است. به‌عنوان مثال، هر اندازه آب و هوای منطقه‌ای گرم‌تر و یا میزان آمد و شد بیشتر و ترافیک سنگین‌تر باشد، قیر با درجه نفوذ کمتر مناسب است. مقدار قیر بتن آسفالتی گرم تابع خصوصیات و دانه‌بندی مصالح سنگی انتخابی می‌باشد. مصرف قیر بیش از حد، علاوه بر کاهش استقامت باعث کاهش مقاومت برشی آن نیز می‌شود. به‌همین دلیل در ادبیات فنی، طرح اختلاط‌هایی برای تعیین مقدار مناسب قیر در آسفالت ارائه شده است.

قیرهای مصرفی در راه‌سازی، چنانچه از معدن به دست آید "قیر طبیعی یا معدنی" و هرگاه از پالایش نفت خام حاصل شود، "قیر نفتی یا پالایشگاهی" نامیده می‌شود.

### ۱-۶-۲-۱- قیرهای طبیعی

وقتی که مواد فرار نفت خام موجود در اعماق زمین به مرور زمان و در برابر عوامل جوی تبخیر شود، ماده‌سپاهی از آن برجای می‌ماند که قیر طبیعی نام دارد. قیرهای طبیعی شامل قیر سنگ‌ها و قیرهای دریاچه‌ای به‌شرح زیر می‌باشند:

۱. قیرهایی که مستقیماً در برج تقطیر بدون پالایشگاه به‌دست می‌آیند. در طول تقطیر نفت خام، روغن‌های سبک‌تر در درجه حرارت پایین‌تر تبخیر شده و با بالا رفتن درجه حرارت روغن‌های سنگین‌تر جدا می‌شوند و در نهایت آنچه باقی می‌ماند قیر خالص است.

### ■ قیرسنگ‌ها

قیرسنگ‌ها عمدتاً شامل سنگ‌های آهکی و مارن‌هایی است که نفت خام در آنها نفوذ کرده و با گذشت زمان مواد فرار آن تبخیر شده و قیر در این سنگ‌ها باقی‌مانده است. قیرسنگ‌ها را پس از خرد و نرم کردن حرارت داده و در سطح راه پخش می‌کنند. مقدار قیر موجود در قیرسنگ‌ها از ۷ تا حدود ۸۰ درصد تغییر می‌کند.

استفاده از قیرسنگ‌ها در راه‌سازی به دلیل هزینه‌های زیاد استخراج و حمل، عدم یکنواختی مواد تشکیل‌دهنده و متغیر بودن میزان قیر موجود در آنها، در مقایسه با قیرهای نفتی مقرون به صرفه نیست. البته تحقیقات آینده می‌تواند به بهره‌برداری و مصرف آن‌ها در صنعت راه‌سازی کمک کند.

### ■ قیرهای دریاچه‌ای

وقتی که نفت خام به‌طور طبیعی از بین لایه‌های شکست خورده زمین به سطح زمین صعود می‌کند و مواد فرار آن تبخیر می‌شود، قیرهای طبیعی به‌صورت دریاچه در روی زمین ظاهر می‌شوند. منابعی از قیر دریاچه‌ای در اغلب نقاط جهان و از جمله در ایران یافت می‌شود.

### ۱-۲-۶-۲- قیرهای نفتی

قیرهای نفتی یا پالایشگاهی از پالایش نفت خام در برج‌های تقطیر به‌دست می‌آید و نهایتاً آنچه که در ته برج تقطیر باقی می‌ماند، "قیر خالص نفتی" است. قیرهای با درجه سختی متفاوت برای مصارف مختلف راه‌سازی را می‌توان با تنظیم درجه حرارت و فشار داخل برج‌های تقطیر و نیز هوادهی تولید نمود.

### ۱-۲-۷- پخش قیر

قبل از پخش قیر، سطح آماده شده راه اعم از سطح شنی یا رویه آسفالتی را باید از مواد زاید و گرد و غبار با جاروی مکانیکی و هوای فشرده تمیز کرد. تمیزکردن سطح راه باید به‌گونه‌ای انجام شود که بافت سطحی مصالح کاملاً مشخص شده و کلیه مواد ریزدانه‌ای که روی این بافت را پوشانده است با جاروی سیمی- مکانیکی و هوای فشرده، پاک شود. در صورت لزوم روی راه‌های آسفالتی موجود را قبل از قیرپاشی باید با شستشو، تمیز کرد.

در صورت استفاده از قیرابه‌ها، هنگامی که دمای محیط در حال افزایش است می‌توان سطح راه را قبل از اندود نفوذی با آب مرطوب کرد تا قبل از شکستن قیرابه، فرصتی برای نفوذ آن در خلل و فرج سطح راه فراهم شود.

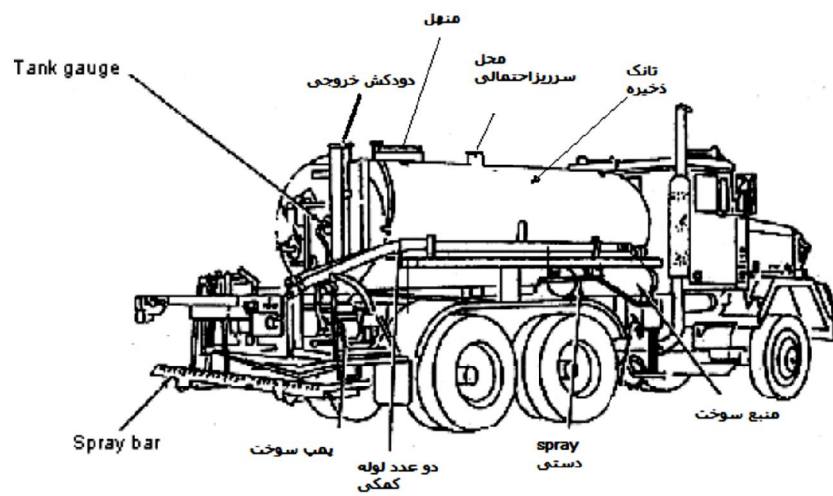
به هنگام اجرا نیز باید قیر را به‌طور یکنواخت پخش کرد تا از ایجاد سطوح کم قیر و پر قیر در سطح راه جلوگیری شود. برای تعیین مقدار قیر پخش شده در سطح راه از آزمایش سینی استفاده می‌شود. قیرپاشی در سطوح محدود و قسمتهایی که پخش با قیرپاش امکان‌پذیر نیست با قیرپاش دستی انجام می‌گیرد.

در صورتی که پخش قیر در دو خط عبور یا بیشتر انجام می‌شود باید لبه طولی خطوط در تمام طول یکدیگر را بپوشانند و در نقاط شروع و پایان قیرپاشی، بهتر است سطح راه در عرض کافی با صفحات کاغذی و یا فلزی پوشیده شده و بلافاصله پس از اجرای اندودها برداشته شوند. قیری که برای اندود نفوذی به کار می‌رود باید دارای کندروانی کمی بوده تا به‌آسانی در سطح قیرپاشی نفوذ کند. به این منظور، قیر توسط ماشین قیرپاش که به گرم‌کن مجهز است، گرم شده و کاملاً رقیق می‌شود و با فشار روی سطح آماده راه پاشیده می‌شود.

شکل‌های (۱-۳) و (۱-۴) به ترتیب، ماشین قیرپاش و اجزای آن را نمایش می‌دهد. در مناطقی که در آن‌ها احتمال وقوع بارندگی، هوای بارانی یا هوای سرد با درجه حرارت زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد، نباید اقدام به اجرای اندود نفوذی کرد. در کل در شرایط جوی نامناسب باید از عملیات قیرپاشی اجتناب نمود. همچنین سطح قیرپاشی شده نباید در معرض آمد و شد وسایل نقلیه قرار گیرد.



شکل ۱-۳) ماشین قیرپاش



شکل ۱-۴) اجزای ماشین قیرپاش

### ۱-۳- مخلوط آسفالت گرم (HMA)<sup>۱</sup>

مخلوط آسفالت گرم، بسته به شرایط مختلف ساخت و نحوه اجرا، ممکن است در ادبیات فنی با نام‌های متعددی از جمله بتن قیری<sup>۲</sup>، بتن آسفالتی<sup>۳</sup>، آسفالت گرم پیش‌ساخته و سوپریو<sup>۴</sup> نیز معرفی شود؛ اما در اینجا بیشتر مفهوم مخلوط آسفالتی گرم و به‌طور دقیق‌تر بتن آسفالتی، مد نظر است. مخلوط آسفالت گرم از سنگدانه‌های احاطه شده مانند یک ماده پیوسته که با آسفالت به هم چسبیده شده‌اند، تشکیل می‌شود. سنگدانه‌ها حدود ۹۳ تا ۹۷ درصد و قیر آسفالت ۳ تا ۷ درصد وزن کل مخلوط را تشکیل می‌دهد. این مخلوط در کارگاه اختلاط بر حسب نوع دانه‌بندی و قیر مصرفی با دمای بین ۸۰ الی ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور متناسب و یکنواخت مخلوط می‌شود. مخلوط تهیه شده با ماشین‌آلات حمل به پخش‌کننده‌های مکانیکی منتقل می‌شوند. نهایتاً اچ.ام.ای<sup>۵</sup> در لایه‌های هموار پخش و با غلتک به‌خوبی متراکم می‌شود. لازم به ذکر است که مخلوط یاد شده، هنگام پخش و تراکم نیز همچنان می‌بایست گرم باشد و به همین دلیل است که نام مخلوط گرم به آن اطلاق می‌شود. روسازی آسفالتی در روسازی راه از اجرای یک یا چند لایه از اچ.ام.ای مستقیماً روی بستر و یا روی مصالح زیرسازی تشکیل می‌شود. انواع مخلوط‌های آسفالت گرم در قشرهای روسازی عبارتند از رویه آسفالتی<sup>۶</sup>، آستر آسفالتی<sup>۷</sup> و اساس قیری<sup>۸</sup>.

بتن آسفالتی از مقاوم‌ترین و با دوام‌ترین انواع موجود در گروه مخلوط‌های آسفالتی گرم به‌شمار می‌رود که از اختلاط مصالح سنگی مرغوب و شکسته با دانه‌بندی منظم و پیوسته با قیر خالص به‌دست می‌آید. مزایای عمده استفاده از این مخلوط در روسازی راه به شرح ذیل است [۲]:

- تطبیق‌پذیری از نظر اجراء
- مخلوط‌های آسفالتی گرم را می‌توان برای هر ترافیک و بارگذاری، و بر روی انواع خاک و زیرسازی و با اهداف بهسازی و بازسازی، طراحی و اجرا نمود.
- صرفه اقتصادی
- مخلوط آسفالت گرم از نظر اجرایی اقتصادی است و قابلیت اجرا و بهره‌برداری سریع را داراست.

---

1. Hot Mix Asphalt (HMA)  
 2. Bituminous concrete  
 3. Asphalt concrete  
 4. Superpave  
 5. HMA  
 6. Topeka  
 7. Binder  
 8. Black Base

فصل اول: آسفالت و مخلوط آسفالتی گرم ۳۷

این ماده قابلیت بازیافت داشته و به حداقل نگهداری ممکن پس از احداث، احتیاج دارد و همچنین کارایی آن قابل توجه است.

- کاهش سروصدای ناشی از ترافیک عبوری
- مقاومت در برابر مواد شیمیایی (ضد یخ، مواد ناشی از واکنش‌های باری و ...)
- انعطاف‌پذیری مناسب روسازی HMA

به‌طور متداول HMA مطابق درجه‌بندی مصالح به کار رفته در مخلوط، به سه نوع مخلوط مختلف با دانه‌بندی متراکم، دانه‌بندی باز و دانه‌بندی گسسته<sup>۱</sup> تقسیم می‌شود (جدول ۱-۲). همچنین نوع دانه‌بندی متراکم به زیرمجموعه‌هایی با دانه‌بندی پیوسته یا HMA متداول، مخلوط سنگ بزرگ، و مخلوط ماسه آسفالت طبقه‌بندی می‌شود. نوع دانه‌بندی باز دربرگیرنده زیرمجموعه‌های مصالح اصطکاکی با دانه‌بندی باز و اساس نفوذپذیر آسفالتی می‌شود. نوع دانه‌بندی گسسته نیز، مخلوط‌های بتنی آسفالت با دانه‌بندی گسسته و همچنین مخلوط‌های آسفالت زمینه سنگی را در بر می‌گیرد. طراحان بستر راه، انواع متفاوتی از مخلوط‌های آسفالتی را متناسب با تغییرپذیری در طبیعت، هزینه مصالح موجود و تجهیزات سیمان آسفالتی برای اجرای بستر تعریف می‌کنند، تا نیازهای متفاوت اجرایی روسازی را برآورده سازند [۳].

جدول ۱-۲. انواع مخلوط آسفالتی گرم HMA

دانه بندی گسسته	دانه بندی باز	دانه بندی متراکم
متداول		
متداول با دانه‌بندی گسسته	سنگدانه اصطکاکی متخلخل	حداکثر اندازه سنگدانه بین ۱۲/۵ تا ۱۹ میلی‌متر
با سنگدانه درشت		
آسفالت ماستیک SMA	آسفالت نفوذپذیر	حداکثر اندازه سنگدانه بین ۲۵ تا ۳۷/۵ میلی‌متر
آسفالت ماسه‌ای		
		حداکثر اندازه سنگدانه کمتر از ۹/۵ میلی‌متر

1. Gap graded

### ۱-۳-۱- مخلوط آسفالت گرم با دانه‌بندی متراکم

HMA با دانه‌بندی متراکم متشکل از سیمان آسفالتی آستر (بیندر) و مصالح دارای دانه‌بندی خوب یا پیوسته است.

HMA متداول از مخلوط‌هایی با یک اندازه مصالح ظاهری حداکثر در بازه ۱۲/۵ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) تا ۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) تشکیل شده است. مخلوط‌های سنگی بزرگ شامل مصالح درشت با حداکثر اندازه ظاهری بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۱-۵ الف) مشاهده می‌شود، این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های متداول (بزرگ‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر، الک شماره ۴) دارای درصد بیشتری از مصالح درشت دانه‌اند. در روند تولید مخلوط‌های با سنگ‌دانه‌های بزرگ در کارخانه، در مقایسه با HMA متداول، ممکن است به علت استفاده از مصالح بزرگ‌تر مقداری فرسایش اضافی در قسمت خشک‌کننده کارخانه و در استوانه‌های اختلاط جریان معکوس و جریان موازی ایجاد گردد. در عین حال امکان ایجاد فرسایش اضافی روی انتقال‌دهنده‌ها و مته‌های کوبه نیز وجود دارد. به علت اندازه بزرگ مصالح باید میزان فشار اعمالی برای اختلاط پایش شود تا از شکستگی اضافی اجزای مصالح بزرگ‌تر طی فرایند تراکم جلوگیری شود.

آسفالت ماسه‌ای (که گاه‌آ آسفالت ورقه‌ای نیز نامیده می‌شود) متشکل از مصالحی است که از الک ۹/۵ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ) عبور می‌کنند. میزان ماده چسباننده مورد استفاده در این مصالح به علت افزایش منافذ در مصالح کانی مخلوط، به‌طور معمول از HMA متداول بیشتر است. در صورتی که از ماسه شکسته یا ماسه طبیعی با بافت زبر در مخلوط آسفالت استفاده نشود، مقاومت شیاری این نوع مخلوط عمدتاً پایین خواهد بود.

مخلوط ماسه را می‌توان با استفاده از تجهیزات استوانه‌ای بدون ایجاد تغییر قابل توجه در روند عملیات، در کارخانه تولید نمود. انتقال و تخلیه مخلوط نیز می‌بایست به روش‌های استاندارد انجام شود. در شرایط اعمال تراکم بر آسفالت دارای مخلوط ماسه مشکلاتی همچون پرش ماسه در تراکم با غلتک‌های دارم آهنی وجود دارد. این موضوع در شرایطی که آسفالت در لایه‌های نسبتاً ضخیم (بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر « ۲ اینچ») اجراء می‌شود، بیشتر مشهود است.

### ۱-۳-۲- مخلوط‌های دانه‌بندی باز

مخلوط‌های دارای دانه‌بندی باز شامل مصالحی با دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت و سیمان آسفالت یا آستر اصلاح شده هستند. هدف اولیه از به‌کارگیری این مخلوط‌ها استفاده از عملکرد آن‌ها به صورت یک لایه زهکش، چه در سطح راه و چه در ساختار روسازی است.



همان‌طور که اشاره شد، دو نوع مخلوط با دانه‌بندی باز وجود دارد. نوع اول شامل مخلوط‌های به‌کاررفته به‌عنوان سطح آزاد زهکشی به منظور جلوگیری از حرکت لاستیک روی لایه‌ای از آب و همچنین کاهش سر و صدای آن است. این مخلوط معمولاً به‌عنوان یک رویه اصطکاکی با دانه‌بندی باز نامیده می‌شود. نوع دوم که آسفالت عمل آمده با کف نفوذپذیر نامیده می‌شود شامل مصالح با دانه‌بندی یکنواخت بزرگتر از حداکثر اندازه ظاهری مصالح دانه‌بندی باز سایشی است که اندازه ذرات سنگدانه‌های آن در محدوده ۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) تا ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) قرار دارد. این مخلوط آسفالتی برای زهکشی آب ورودی از سطح و یا آب زیر سطحی به کار می‌رود.

تولید مخلوط‌های دارای دانه‌بندی باز، مشابه مخلوط‌های دارای دانه‌بندی متراکم است ولیکن اختلاف اصلی آن‌ها در دمای اختلاط است. دماهای اختلاط پایین‌تر برای مواد با دانه‌بندی باز به کار می‌رود. اخیراً پلیمرها و فیبرها در مصالح درشت‌دانه زبر با دانه‌بندی باز برای کاهش زهکشی به سمت پایین و بهبود دوام مخلوط‌ها به کار گرفته می‌شوند. بکارگیری مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی باز نسبت به سایر مخلوط‌ها متداول‌تر است و عموماً میزان انرژی تراکمی لازم جهت اجرای این مخلوط نسبت به مخلوط‌های دارای دانه‌بندی متراکم کمتر است.

### ۱-۳-۳- مخلوط‌های دارای دانه‌بندی گسسته

مخلوط‌های دارای دانه‌بندی گسسته از نظر کارکرد، مشابه مخلوط‌های دارای دانه‌بندی متراکم هستند. این مخلوط‌ها در شرایطی که به خوبی متراکم می‌شوند، لایه‌هایی نفوذناپذیر و متراکم به وجود می‌آورند. استفاده از این نوع مخلوط‌های آسفالتی برای سالیان متمادی رواج داشته است. اندازه مصالح آنها از درشت تا ریز متغیر است، لیکن برخی اندازه‌های میانی ذرات یا وجود نداشته یا به مقدار کمی موجود است. نوع دوم مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی میان‌تهی، مخلوط آسفالت با ملات سنگی یا SMA<sup>۱</sup> است. برای تولید مخلوط SMA، به منظور دستیابی به ۸ تا ۱۰ درصد مصالح عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)، نیاز به افزودن مقدار قابل توجهی فیلر به مصالح طبیعی است. با توجه به حجم بالای فیلر مورد نیاز، نصب یک سیستم مستقل برای تزریق فیلر به درون تأسیسات تولید آسفالت مورد نیاز خواهد بود. همانند مخلوط‌های با دانه‌بندی باز، به‌منظور جلوگیری از زهکشی آستر، لازم است در زمان ذخیره موقت مخلوط در سیلو و در روند انتقال به محل اجراء، دمای تخلیه مخلوط در کارخانه به‌خوبی کنترل شود. به‌طور طبیعی از فیبرها یا پلیمرها (و یا هر دو) برای کنترل زهکشی SMA استفاده می‌شود.

1. Stone-matrix asphalt

### ۱-۳-۴- مهارت در اجراء

چندین فاکتور عمده اجرایی مستقیماً بر عملکرد نهایی روسازی HMA تأثیر می‌گذارند؛ این موارد عبارتند از: طرح ساختاری لایه‌های زیرسازی، طراحی مخلوط مصالح آسفالت، فرایندهای ساخت به کار رفته برای تولید، جاگذاری و تراکم مخلوط و مهارت در ساخت و کیفیت اجراء. مهارت پایین می‌تواند یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی باشد که به خرابی زودرس یک روسازی آسفالتی منجر می‌شود.

دلایل ضعف مهارت عمدتاً شامل عدم توانایی در تولید آسفالت مطابق مشخصات درخواستی و بی‌اطلاعی یا ناتوانی در اتخاذ تکنیک‌های ساخت مناسب و عملیات تجهیز می‌باشد. آموزش مناسب پرسنل اجرایی نیز برای ایجاد مهارت لازم، یک مسئله کلیدی است. از سوی دیگر به‌منظور تولید و اجرای HMA، بررسی گلوگاه‌های مربوط به تأسیسات اختلاط و اجرای روسازی و همچنین خرابی آن‌ها و روش‌های اصلاحی نیز مسأله‌ای حیاتی است. به‌طور مثال، عدم نظارت بر غلتک‌زنی صحیح و روش‌های حصول تراکم کافی در روسازی آسفالتی می‌تواند به ایجاد شیارهای زودرس در آن منجر شود. تصمیمات مدیریتی نادرست در پروژه نیز می‌تواند به کارایی ضعیف منجر شود. مثلاً اگر اجرای آسفالت در شرایط آب و هوایی نامناسب ادامه یابد، علیرغم فعالیت مناسب اپراتورهای تجهیزات، این موضوع می‌تواند باعث حصول تراکم ناکافی گردد. به‌طور مشابه اگر اجرای روسازی با سرعت بالا صورت گیرد، این موضوع سبب نیاز به افزایش نرخ مصالح آسفالت تحویلی گردیده و می‌تواند به توقف‌های متعدد درحین اجراء منتهی شود که این مسأله نیز در جای خود باعث بروز ناهمواری در سطح روسازی می‌شود.

### ۱-۴- طرح اختلاط، روش‌های کارگاهی

HMA دارای دو بخش اصلی است: مادهٔ چسباننده و مصالح سنگی. چسب آسفالت معمولاً سیمان آسفالت است که از پالایش نفت خام به‌دست می‌آید. سیمان‌های آسفالت توسط یکی از سه روش موجود دانه‌بندی می‌شوند. دو روشی که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: سیستم دانه‌بندی نفوذی و سیستم دانه‌بندی کندروانی. اخیراً یک سیستم دانه‌بندی اجرایی تحت برنامهٔ تحقیقات استراتژیک بزرگراه<sup>۱</sup> (SHRP) توسعه یافته است. سیستم طراحی مخلوط، درصد مناسب سیمان آسفالت و مصالح مورد نیاز برای تولید مخلوط آسفالت با ویژگی‌ها و خصوصیات مورد نیاز برای تأمین مقاومت در برابر تأثیرات ترافیک و محیط زیست برای سال‌های متمادی را تعیین می‌کند. طراحی اختلاط عموماً با

1. Strategic Highway Research Program

استفاده از یکی از سه روش متداول در آزمایشگاه انجام می‌شود. تا اواخر دهه ۱۹۸۰، متداول‌ترین روش طرح اختلاط روش مارشال<sup>۱</sup> بود، که توسط حدود ۷۵ درصد از اداره‌های بزرگراه‌های آمریکا به کار گرفته می‌شد. روش دوم، که توسط بسیاری از سازمان‌های دولتی در غرب ایالات متحده به کار برده می‌شد روش ویم<sup>۲</sup> است. در اواسط دهه ۱۹۹۰ گروه‌های ایالتی حمل و نقل استفاده از روش Superpave<sup>۳</sup> طراحی مخلوط را آغاز کردند، به طوری که این روش تحت نظر SHRP توسعه یافت. در این روش، نمونه‌ها با یک متراکم‌کننده دوار متراکم شده و برای تعیین ویژگی‌های حجمی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در این روش آزمون‌های پیشرفته و فرایندهای تحلیل در حال توسعه‌اند تا بتوانند به پیش‌بینی مناسب عملکرد HMA تحت بار ترافیک کمک کنند. به طور معمول نتایج این آزمون‌ها برای تخمین مقاومت مخلوط HMA در برابر گسیختگی ناشی از خستگی، تغییر شکل دائمی (شیار افتادگی)، حساسیت رطوبتی و ترک‌خوردگی حرارتی (دمای پایین) تحلیل می‌شوند.

در یک پروژه روسازی آسفالتی، طرح اختلاط توسط سازمان‌های دولتی، پیمان کار یا یک مشاور بسته به نیاز ویژگی‌های پروژه ارائه می‌گردد. صرف‌نظر از این که چه کسی فاز طرح اختلاط آزمایشگاهی را کامل می‌کند، نتیجه آن ارائه یک فرمول اجرایی برای اختلاط مصالح با یکدیگر خواهد بود. عملاً با داشتن فرمول اجرایی، کار طرح اختلاط برای پیمان کار تولید مخلوط آسفالت پروژه آغاز می‌گردد. در این بخش، به طور خلاصه ویژگی‌های سیمان آسفالتی و مصالح به کار رفته برای تولید یک مخلوط آسفالتی، مرور می‌شوند. همچنین برخی تفاوت‌های ممکن میان مخلوط‌های تولید شده در آزمایشگاه و کارخانه و اختلاف‌های موجود بین مقادیر فرمول طرح اختلاط کارگاهی و نتایج آزمون کارخانه مورد بحث قرار داده می‌شوند.

---

1. Marshall  
2. hveem

۳. روسازی آسفالت با عملکرد عالی

#### ۱-۴-۱- سیستم دسته‌بندی و ویژگی‌های سیمان آسفالتی

##### ▪ سیستم‌های نفوذ و دسته‌بندی کندروانی

معمولاً ضریب نفوذ سیمان آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد (۷۷ درجه فارنهایت) محاسبه می‌شود. هر چقدر آسفالت سفت‌تر باشد (یعنی نفوذ آن کمتر باشد) مخلوط در یک دمای مشخص سفت‌تر خواهد بود. مثلاً در یک دمای معین مخلوط با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ نسبت به مخلوط سیمان آسفالتی با نفوذ ۱۵۰-۱۲۰، سفت‌تر بوده و برای دستیابی به چگالی مورد نظر، نیازمند اعمال انرژی تراکمی بیشتری توسط غلتک‌ها است.

دسته‌بندی سیمان‌های آسفالتی از نظر کندروانی با اندازه‌گیری کندروانی در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  ( $140^{\circ}\text{F}$ ) انجام می‌شود. اندازه‌گیری روی این مواد در شرایط اصلی (یعنی در شرایطی که از پالایشگاه دریافت می‌شوند- که AC نامیده می‌شود) و یا روی مخلوط آسفالتی گرم (که AR نامیده می‌شود) صورت می‌گیرد. در سیستم دسته‌بندی AC یک مخلوط دارای AC-20 نسبت به یک مخلوط دارای AC-10 در دمای مشابه سفت‌تر خواهد بود. به طور مشابه، یک مخلوط دارای AR-4000 نسبت به یک مخلوط دارای AR-2000 در دمای مشابه سفت‌تر است.

##### ▪ سیستم دسته‌بندی عملکرد Superpave

اگرچه سیستم‌های دسته‌بندی بر اساس نفوذ و کندروانی به طور رضایت‌بخشی برای سال‌های متمادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما اساس آنها اندازه‌گیری در شرایط بارگذاری و دمای استاندارد است که لزوماً بر شرایط بهره‌برداری منطبق نیست. در عین حال نمونه‌های مورد استفاده نیز محدود می‌باشند. به‌منظور تعیین دقیق ویژگی‌های آسفالت، SHRP<sup>۱</sup> سیستم PG<sup>۲</sup> را توسعه داده است. در این مجموعه جدید، آزمون‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که از منظر مهندسی به‌طور مستقیم با اجرای میدانی مرتبط می‌باشند. به علاوه آزمون‌ها در شرایط بارگذاری و دمایی مرتبط با شرایط واقعی بهره‌برداری روسازی انجام می‌شوند. ویژگی‌های PG به انتخاب درجه‌ای از آستر منجر می‌شود که سهم آستر را در شکل‌گیری ترک محدود می‌سازد. از جمله این ترک‌ها می‌توان به ترک‌های ناشی از دمای پایین، تغییر شکل دائمی (شیاردار شدن<sup>۳</sup>) و ترک‌های خستگی روسازی آسفالت در دامنه‌ای از شرایط جوی و بارگذاری ترافیکی محل پروژه، اشاره نمود.

---

1. Strategic Highway Research Program  
2. performance grading  
3. rutting

یک اختلاف مهم بین ویژگی‌های PG و روش مبتنی بر نفوذ یا کندروانی، اطلاعات ورودی مورد نیاز است. برای رویه‌های PG، ویژگی‌های فیزیکی ثابت باقی می‌ماند؛ اگرچه دماهایی که در آن ویژگی‌های مورد نیاز تعیین می‌شوند، وابسته به شرایط آب و هوایی مورد انتظار متغیر است. به‌طور مثال رویه PG64-22 برای مقاومت در شرایط دمای طراحی ۷ روزه حداکثر ۶۴ درجه سانتیگراد یا کمتر و حداقل دمای ۲۲- درجه سانتیگراد یا بیشتر طراحی می‌شود.

### ■ ویژگی‌های کندروانی بر حسب دما

دانستن تغییر ویژگی‌های کندروانی چسب آسفالت در برابر دما در روند تولید و اجرای لایه HMA مهم است. برای تولید مخلوط آسفالتی گرم در دماهای بالا لازم است میزان کارایی سیستم جهت پمپاژ این مخلوط در کارخانه تولید مورد بررسی قرار داده شود (این ویژگی توسط کندروانی قابل اندازه‌گیری است). به‌طور مشابه در اجرای مخلوط آسفالت گرم، تراکم مخلوط تحت تأثیر سختی آستر است. وقتی آستر سفت‌تر می‌شود یا کندروانی آن افزایش می‌یابد، برای متراکم نمودن آن تا رسیدن به یک چگالی معین انرژی تراکمی بیشتری نیاز است. در نتیجه در دامنه دمای ۸۵ درجه سانتیگراد تا حدود ۱۶۳ درجه سانتیگراد، دانستن رابطه میان دما و کندروانی بسیار سودمند خواهد بود.

تغییر در کندروانی با تغییر در دمای یک رویه به ظرفیت گرمایی آن مرتبط می‌شود. در یک ماده شدیداً حساس نسبت به دما برای یک تغییر دمایی کوچک، تغییر زیادی در کندروانی رخ می‌دهد. آسفالت‌هایی که در دمای ۲۵ درجه نفوذ مشابهی دارند لزوماً در دمای ۱۳۵ درجه کندروانی مشابهی از خود نشان نمی‌دهند؛ چراکه ظرفیت گرمایی آنها قابل تغییر است. در نتیجه برای یک پیمان کار مجری HMA ضروری است که رابطه دما در برابر کندروانی قیر موجود را در اختیار داشته باشد. در عین حال به‌منظور تولید آسفالت، اطلاع از طرح اختلاط ضروری است؛ چرا که دمای تراکم مخلوط در آزمایشگاه بر اساس درجه کندروانی تعریف شده است.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، ویژگی حساسیت دمایی قیر می‌تواند بر فرایند تراکم تأثیرگذار باشد. این بدان معنی است که یک مخلوط آسفالتی محتوی یک قیر با حساسیت دمایی بالا، در اثر افت دما نسبت به یک مخلوط دارای قیر حساسیت دمایی پایین‌تر، خیلی سریع‌تر سفت خواهد شد. در نتیجه، اگر ویژگی حساسیت دمایی قیر در مخلوط حین تولید تغییر کند - مثلاً اگر قیرهای متفاوت در یک دمای مشابه به کار رود - احتمالاً لازم است فرایندهای تراکم برای دستیابی به سطح چگالی تعریف شده، تغییر داده شود.

### ۱-۴-۲- ویژگی‌ها و خصوصیات مصالح سنگی

ویژگی‌های مصالح سنگی بر خصوصیات آن‌ها تأثیرگذار بوده و در نتیجه بر عملکرد HMA نیز تأثیر خواهند گذاشت. این ویژگی‌ها بر مقدار قیر مورد نیاز و بر اجرای HMA نیز مؤثرند. ویژگی‌های مصالح مورد نظر در این بخش شامل بافت و شکل سطح، درجه بندی، جذب آب، درصد رس و دوام است. برای Superpave، تیزگوشه‌گی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه، درصد رس، و ذرات مسطح و طولیل، ویژگی‌های مناسب محسوب شده و در دنیا معیارهایی برای این ویژگی‌ها وضع شده‌اند. معیارهای لازم برای سایر ویژگی‌های مصالح سنگی بر اساس مصالح موجود در منطقه و تجربه کاربران تبیین می‌گردد.

### ۱-۴-۲-۱- بافت و شکل سطح

بافت سطح مصالح مهم‌ترین فاکتور کنترل‌کننده مقاومت اصطکاکی آن است. همچنین این ویژگی شدیداً بر مقاومت مخلوط در برابر شیاردار شدن تأثیر می‌گذارد. هر چقدر بافت مصالح زبرتر باشد، مقاومت شیارگیری مخلوط بهتر خواهد بود. هرچند در روند اجراء، تولید یک HMA حاوی مصالح با بافت زبر برای دستیابی به چگالی معین نسبت به یک HMA دارای مصالح با بافت نرم به انرژی تراکمی بیشتری نیاز خواهد بود.

شکل مصالح نیز بر مقاومت مخلوط در برابر شیارافتادگی تأثیر می‌گذارد، مصالح تیزگوشه مقاومت بیشتری را نسبت به مصالح گردگوشه در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌کنند. افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی در مصالح تیزگوشه احتمالاً ناشی از افزایش زبری سطح می‌باشد که به دلیل شکستگی و چسبندگی ذرات به یکدیگر ایجاد می‌شود. همانند بافت سطح، هر چقدر گوشه‌داری مصالح بیشتر باشد، میزان انرژی تراکمی یک مخلوط آسفالتی برای رسیدن به میزان مشخصی از چگالی بیشتر خواهد بود.

در سیستم سوپریپو دو آزمون برای تعریف عینی ویژگی‌های بالا معرفی گردیده است که یکی آزمون گوشه‌داری مصالح درشت‌دانه و دیگری آزمایش گوشه‌داری مصالح ریزدانه است. عموماً آستانه پذیرش معرفی شده برای این پارامترها، با افزایش ترافیک عبوری و همچنین برای ترازهای بالای قرارگیری مخلوط آسفالتی در روسازی افزایش می‌یابد. پارامتر دیگر مرتبط با شکل، به نسبت ابعاد حداکثر به حداقل ذره وابسته است. اگر این نسبت بزرگتر از ۵ باشد ذره مسطح و طولیل در نظر گرفته می‌شود. ذرات مسطح و طولیل معمولاً در روند اختلاط شکسته شده و ویژگی‌های ساختاری مخلوط آسفالتی را تغییر می‌دهند. با محدود کردن این پارامترها در مصالح سنگی، پتانسیل شکستگی مصالح در طی روند ساخت محدود می‌گردد.

## ۱-۴-۲-۲- توزیع اندازه ذره (دانه بندی)

یکی از ویژگی‌های مهم مصالح مورد استفاده در روسازی، توزیع اندازه‌های ذرات یا دانه بندی است. مصالح با حداکثر اندازه‌های مختلف ذره، درجات کارایی مختلفی را از خود نشان می‌دهند. عمدتاً هرچه قدر حداکثر اندازه ذرات مصالح در یک مخلوط معین بزرگتر باشد اجراء و تراکم لایه‌ای با ضخامت زیاد از این مصالح مشکل خواهد بود.

به علاوه اگر حداکثر اندازه ظاهری سنگدانه بیشتر از یک سوم ضخامت متراکم شده لایه روسازی باشد، این موضوع بر بافت سطحی مخلوط تأثیرگذار بوده و می‌تواند موجب کاهش تراکم مخلوط کوبیده شده گردد. برای بهبود مقاومت HMA در برابر شیارزدگی می‌بایست درصد مصالح درشت (باقی مانده روی الک ۴/۷۵ میلیمتر «الک شماره ۴») و هم حداکثر اندازه ذره را افزایش داد.

گرچه اندازه دانه‌های مصالح سنگی در مقایسه با سایر ویژگی‌های مصالح تأثیر کمتری بر رفتار مخلوط آسفالتی می‌گذارد، لیکن وجود سنگدانه با اندازه بزرگتر از ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) می‌تواند تأثیر مهمی بر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی گرم HMA داشته باشد.

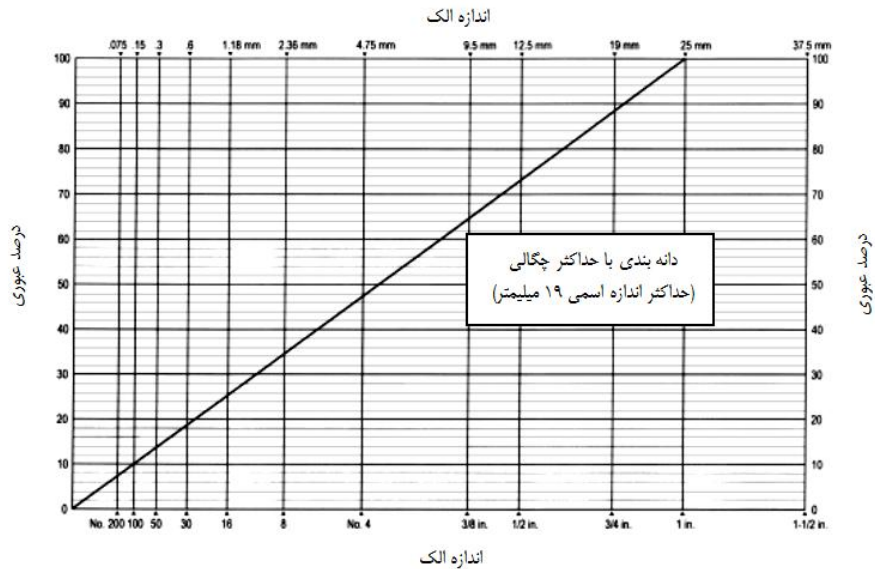
دانه بندی عموماً توسط ویژگی‌هایی که توزیع اندازه‌های ذره را تعریف می‌کنند، کنترل می‌شود. در نمودارهای دانه بندی، محور طولی اندازه ذره و محور قائم درصد وزنی عبوری ذرات از روی الک‌ها را نشان می‌دهد.

نمونه‌ای از این نوع نمودار دانه بندی، که توسط اداره سابق جاده‌های عمومی (BPR)<sup>۱</sup> در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسعه یافته، در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. این نمودار بر اساس کار انجام شده در مرجع [۱] ترسیم و توسط پرسنل BPR تأیید شده است. در این نمودار حداکثر چگالی دانه بندی برای یک حداکثر اندازه دانه مشخص، از طریق رسم یک خط مستقیم از مبدأ به اندازه ذره حداکثر انتخابی تعیین می‌گردد. خط نشان داده شده در شکل (۱-۵) حداکثر چگالی دانه بندی برای مصالح با ماکزیمم اندازه ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که خط حداکثر چگالی تقریبی است اما می‌تواند به عنوان یک مرجع مفید در تقسیم بندی مصالح مورد استفاده قرار گیرد. روش Superpave به منظور اجتناب از پیچیدگی موضوع، تعاریف زیر را برای اندازه مصالح به کار می‌برد:

- اندازه حداکثر - اندازه الک بزرگتر از اندازه ماکزیمم ظاهری ذره
- اندازه حداکثر ظاهری - اندازه الک بزرگتر از اولین الکی که بیش از ۱۰ درصد وزنی روی آن باقی می‌ماند.

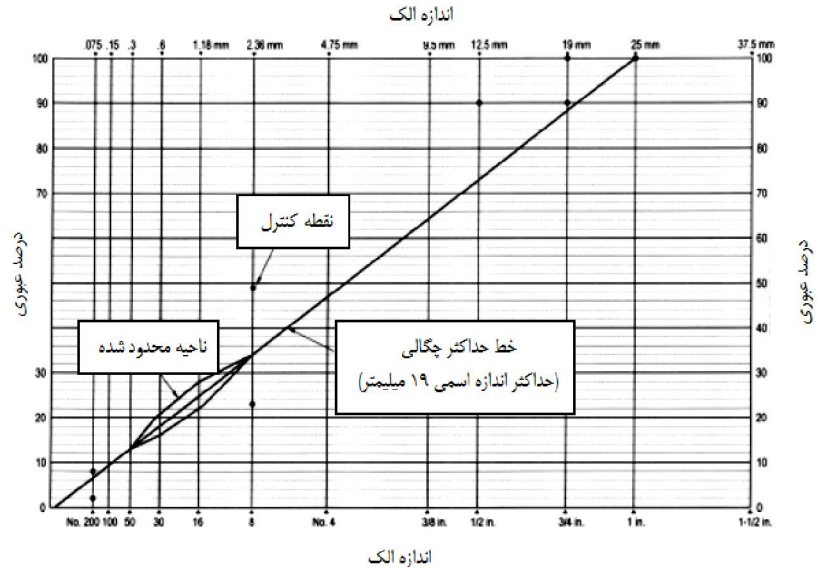
در روش Superpave، دانه‌بندی مصالح با افزودن دو ویژگی شامل نقاط کنترلی و ناحیه محدود شده، به نمودار شکل (۵-۱) تعریف می‌شود. نقاط کنترلی، نقاطی هستند که دانه‌بندی از آنها عبور می‌کند و ناحیه محدود شده در امتداد ماکزیمم تراکم دانه‌بندی رخ می‌دهد. شکل (۶-۱) این ویژگی‌ها را برای یک دانه‌بندی با اندازه ظاهری حداکثر ۱۹ میلی‌متر نشان می‌دهد.

شکل (۷-۱) یک نمونه دانه‌بندی مصالح را نشان می‌دهد که ملزومات Superpave را برآورده می‌سازد و از زیر ناحیه محدود شده عبور می‌کند. وجود ناحیه محدود شده برای تضمین وجود منافذ کافی در مصالح معدنی<sup>۱</sup> VMA ضروری است. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که در برخی موارد دانه‌بندی‌هایی که خط حداکثر چگالی را دنبال می‌کنند گاهی VMA آنها کمتر از مقدار مطلوب است.

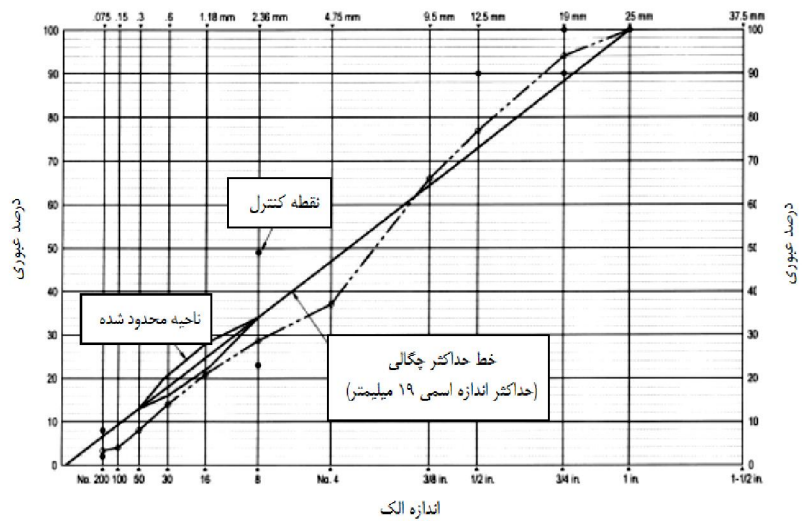


شکل ۵-۱) نمودار دانه‌بندی

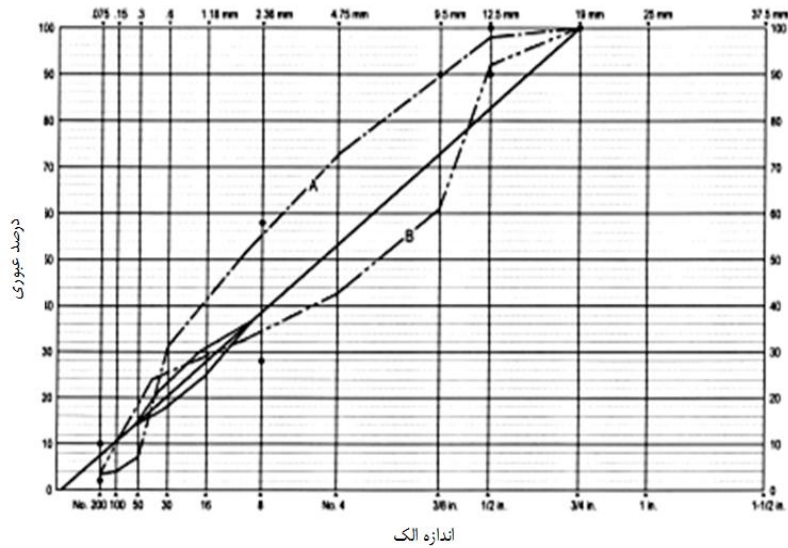




شکل ۱-۶) نقاط کنترل و ناحیه محدود شده برای دانه بندی مصالح با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر



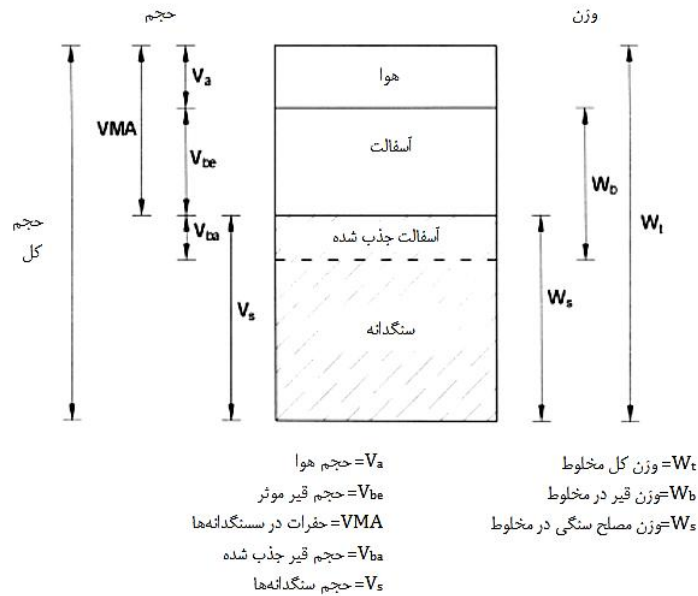
شکل ۱-۷) نمونه دانه بندی مصالح تأمین کننده معیار superpave



شکل ۱-۸) دانه‌بندی‌های سنگدانه نامناسب برای تراکم در مخلوط

کم بودن مقدار VMA باعث می‌شود که در یک لایه مخلوط آسفالتی ضخیم میزان منافذ کاهش یافته و دوام آن افزایش یابد. هدف دیگر از تعریف ناحیه محدود شده، محدود کردن میزان ماسه طبیعی در مخلوط آسفالتی است. مصالح سنگی با مقادیر اضافی ماسه طبیعی منجر به تولید مخلوط‌های HMA حساس می‌شوند.

گرچه دانه‌بندی‌هایی که از ناحیه محدود شده عبور می‌کنند مخلوط‌هایی را ایجاد می‌کنند که الکت کردن آنها ساده‌تر است با این وجود، شدیداً توصیه می‌شود که از به‌کارگیری دانه‌بندی‌هایی همچون شکل (۱-۸) که با شیب‌های تند از میان ناحیه محدود شده می‌گذرند، اجتناب شود. این نوع دانه‌بندی‌ها معمولاً مخلوط‌هایی را تولید می‌کنند که ریزدانه بوده و تراکم آنها دشوار است. شکل (۱-۹) شماتیکی از اجزای HMA و میزان تأثیر VMA بر آن‌ها را مشخص می‌نماید.



شکل ۱-۹ اجزای HMA

مخلوط‌هایی که خط حداکثر دانسیته را دنبال می‌کنند ممکن است برخی ملزومات ویژه VMA را به‌میزانی کمتر از حد مطلوب در خود داشته باشند. وجود VMA کوچکتر در مقایسه با درصد قیر می‌تواند باعث شرایط بحرانی شود و اندکی افزایش در میزان قیر نسبت به مقدار طراحی، کاهش مقاومت آسفالت در برابر شیارافتادگی را موجب می‌شود. در شرایطی که از این نوع سنگدانه‌ها در اجراء استفاده شود، کنترل دقیق میزان قیر بسیار ضروری است.

مقدار و اندازه مصالح عبوری از الک نمره ۲۰۰ که نشان‌دهنده درصد ریزدانه مصالح است به‌طور مشخص بر قابلیت تراکم مخلوط آسفالتی تأثیرگذار است. مخلوط آسفالتی با درصد پایین ذرات ریزدانه معمولاً به سختی متراکم می‌شود. افزایش درصد ذرات ریزدانه نیز موجب افزایش سختی مخلوط شده و تراکم آن تحت عبور غلتک را افزایش می‌دهد؛ گرچه به‌کارگیری مصالح متنوعی با این محدوده دانه‌بندی نیز می‌تواند بر قابلیت تراکم مخلوط تأثیرگذار باشد. در نتیجه روش سوپریپو، نسبت درصد عبوری مصالح از الک نمره ۲۰۰ به میزان مؤثر قیر (که به‌صورت درصد وزنی کل مخلوط بیان می‌شود) را محدود می‌نماید. [درصد مؤثر قیر عبارت است درصد قیر کل منهای درصد قیر جذب شده توسط مصالح].

توزیع اندازه مواد عبوری از الک نمره ۲۰۰ بر سختی مخلوط قیر و ذرات ریز نیز تأثیر می‌گذارد و در نتیجه ممکن است بر قابلیت تراکم مخلوط تأثیرگذار باشد. برای چنین آسفالتی اگر عمده ذرات کوچکتر از  $0.075/0.075$  میلی‌متر باشند، نسبت به حالتی که عمده ذرات بین بازه  $0.075/0.075$  تا  $0.075/0.075$  میلی‌متر باشند، مقدار سختی بزرگتر خواهد بود. دانه‌بندی مواد کوچکتر از  $0.075/0.075$  میلی‌متر به تنهایی ممکن است نشان‌دهنده تأثیر سفت‌کنندگی ذرات ریز نباشد.

#### ۱-۴-۲-۳- درصد جذب قیر

مقدار قیر جذب شده توسط مصالح سنگی می‌تواند تأثیرات عمده‌ای بر خصوصیات مخلوط آسفالتی داشته باشد. اگر درصد جذب قیر مصالح بالا باشد می‌بایست میزان قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی را نیز افزایش داد. عدم تنظیم میزان قیر در آسفالت می‌تواند موجب خشک و سفت شدن مخلوط گردد. در عین حال این مسأله می‌تواند مقدار انرژی لازم برای تراکم در یک دانسیته مشخص را افزایش داده و موجب جداشدگی مخلوط تحت بار ترافیک گردد. اگر قیرابه در مصالح با جذب قیر بالا استفاده شود، به‌منظور اطمینان از تبخیر آب در مصالح، لازم است زمان بیشتری به اجرای HMA اختصاص یابد. از سوی دیگر ممکن است جذب آسفالت مختل شود که این موضوع می‌تواند مشکلاتی در تراکم مخلوط آسفالتی ایجاد نماید.

#### ۱-۴-۲-۴- درصد رس

حضور رس در مصالح عبوری از الک نمره ۴ می‌تواند تأثیر زیان‌آوری بر مخلوط آسفالتی داشته باشد؛ برای مثال کانی‌های رسی پوشاننده مصالح می‌توانند از پیوند کامل قیر آسفالت به ذرات مصالح سطحی جلوگیری کنند، که این موضوع پتانسیل خرابی ناشی از حضور آب را برای مخلوط آسفالت افزایش می‌دهد. آزمایش ستون ماسه<sup>۱</sup> برای محدود کردن میزان رس در مصالح به‌کار می‌رود.

## ۱-۴-۲-۵- دیگر فاکتورهای مؤثر بر دوام

به منظور کاهش مصالح ریزدانه در روند تولید مصالح سنگی برای استفاده در HMA، به طور معمول از آزمایش سایش لس آنجلس استفاده می‌شود. با محدود نمودن حداکثر افت سایش در این آزمون، عملاً می‌توان فرض کرد که سایش مصالح و تولید ریزدانه نیز محدود گردیده است.

در مناطق مستعد یخبندان و ذوب، آزمون سلامت سدیم یا منیزیم به کار می‌رود. با محدود کردن درصد خردشدگی مصالح به مقداری مشخص در این آزمایش می‌توان از مقاومت مصالح در چرخه‌های یخبندان - ذوب اطمینان حاصل نمود. ذکر این نکته ضروری است که محدود نمودن جذب آب در مصالح سنگی به کاهش خرابی آن‌ها در مراحل یخبندان و ذوب کمک می‌کند.

علاوه بر موارد یاد شده، لازم است میزان آلاینده‌ها و مواد زیان‌آوری همچون توده‌های رسی، شیل نرم، زغال، چوب یا میکا نیز در مصالح سنگی محدود شوند.

## ۱-۴-۳- فرایندهای طرح اختلاط

به منظور طرح اختلاط مصالح آسفالت، قیر و مصالح سنگی با نسبت‌های مختلف در آزمایشگاه با همدیگر ترکیب می‌شوند. مخلوط‌های حاصل با استفاده از مجموعه‌ای از معیارهای استاندارد ارزیابی شده و درصد قیر مناسب تعیین می‌شود. نوع و دانه‌بندی مصالح، سختی و مقدار قیر درون آسفالت بر ویژگی‌های فیزیکی مخلوط تأثیرگذارند. درصد قیر بهینه می‌بایست برای تضمین تعادل بین دوام بلندمدت مخلوط آسفالتی و مقاومت آن در برابر شیارافتادگی انتخاب شود [۳]. این بخش، خلاصه‌ای را برای هر یک از سه فرایند معمول طراحی مخلوط ارائه می‌کند.

۱-۴-۳-۱- روش مارشال<sup>۱</sup>

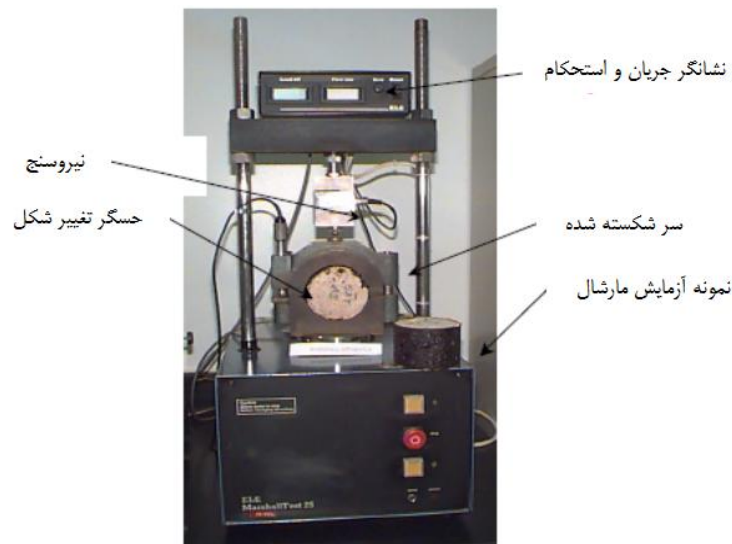
روش مارشال مبتنی بر توسعه‌های صورت گرفته توسط USACE<sup>۲</sup> در فرایند طراحی مخلوط برای روسازی فرودگاه‌ها طی جنگ جهانی دوم و اصلاحات متعاقب آن، حاصل شده است [۵ و ۶].

فرم اصلاح شده این روش توسط مؤسسه آسفالت برای طراحی مخلوط‌ها برای روسازی بزرگراه‌ها پذیرفته شده و طی دهه ۱۹۹۰ توسط بسیاری از سازمان‌های بزرگراه‌ها، هم در ایالات متحده و هم در

1. Marshall Method  
2. U.S. Army Corps of Engineers

سایر کشورها به کار برده شده است. برخی از سازمان‌ها تغییراتی جزئی در این روش اعمال نموده و آن را مبتنی بر معیارهای خود توسعه داده‌اند.

در این روش فرایند طراحی شامل تحلیل دانسیته برحسب منافذ نمونه‌های متراکم جهت تعیین درصد منافذ هوا و درصد منافذ پر شده با آسفالت (VFA) است. بعد از این اندازه‌گیری‌ها، نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد آزمایش شده و پایداری مارشال (حداکثر بار مشاهده شده در آزمون) و مقدار جریان (تغییر شکل مرتبط با حداکثر بارگذاری) تعیین می‌شوند. دستگاه این آزمایش در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۰) آزمایش مارشال

این روش به اختصار موارد زیر را شامل می‌شود:

- انتخاب دانه‌بندی کارگاهی
- تعیین چگالی مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه و فیلر
- تهیه نمونه‌های بتن آسفالتی توسط مصالح سنگی و درصد‌های مختلف قیر
- تعیین چگالی نمونه‌های بتن آسفالتی تهیه شده

- انجام آزمایش استقامت مارشال
- تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای نمونه‌های بتن آسفالتی
- ترسیم منحنی‌های آزمایش مارشال
- و در نهایت تعیین درصد قیر بهینه

### تعیین چگالی مصالح سنگی

مصالح سنگی بتن آسفالتی از اختلاط چند نوع مصالح سنگی با چگالی‌های مختلف به دست می‌آید. چگالی کلی مصالح سنگی از رابطه (۱-۱) بدست می‌آید:

$$G_s = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

که در این رابطه:

$G_s$  = چگالی مصالح سنگی با دانه‌بندی مطلوب

$G_1$  و  $P_1$  = چگالی مصالح سنگی درشت‌دانه و درصد مصالح سنگی درشت‌دانه

$G_2$  و  $P_2$  = چگالی مصالح سنگی ریزدانه و درصد مصالح سنگی ریزدانه

$G_3$  و  $P_3$  = چگالی فیلر و درصد آن

### آزمایش استحکام مارشال

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای طرح بتن آسفالتی گرم استفاده از آزمایش مارشال است. قابل ذکر است که آزمایش مارشال تنها در مورد بتن‌های آسفالتی با اندازه بزرگ‌ترین دانه کوچک‌تر از ۲/۵ سانتی‌متر، قابل استفاده است.

در روش مارشال درصد فضای خالی بتن آسفالتی از رابطه (۲-۱) قابل محاسبه است:

$$\text{رابطه (۲-۱)} \quad (G_{mm} - G_{mb}) / G_{mm} \times 100 = \text{درصد فضای خالی بتن آسفالتی}$$

$G_{mm}$  = حداکثر چگالی نظری بتن آسفالتی

$G_{mb}$  = حداکثر چگالی واقعی بتن آسفالتی

مشخصات فنی بتن آسفالتی بر اساس آزمایش‌های مربوطه در جدول (۳-۱) ارائه شده است.

جدول ۱-۳. مشخصات فنی بتن آسفالتی

بیندر	توپکا	آزمایش
۷۰۰	۷۰۰	استحکام مارشال (Kg)
۲-۳/۵	۲-۳/۵	روانی (mm)
۳-۵	۳-۵	درصد فضای خالی بتن آسفالتی
۶۵-۷۵	۷۵-۸۵	درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر

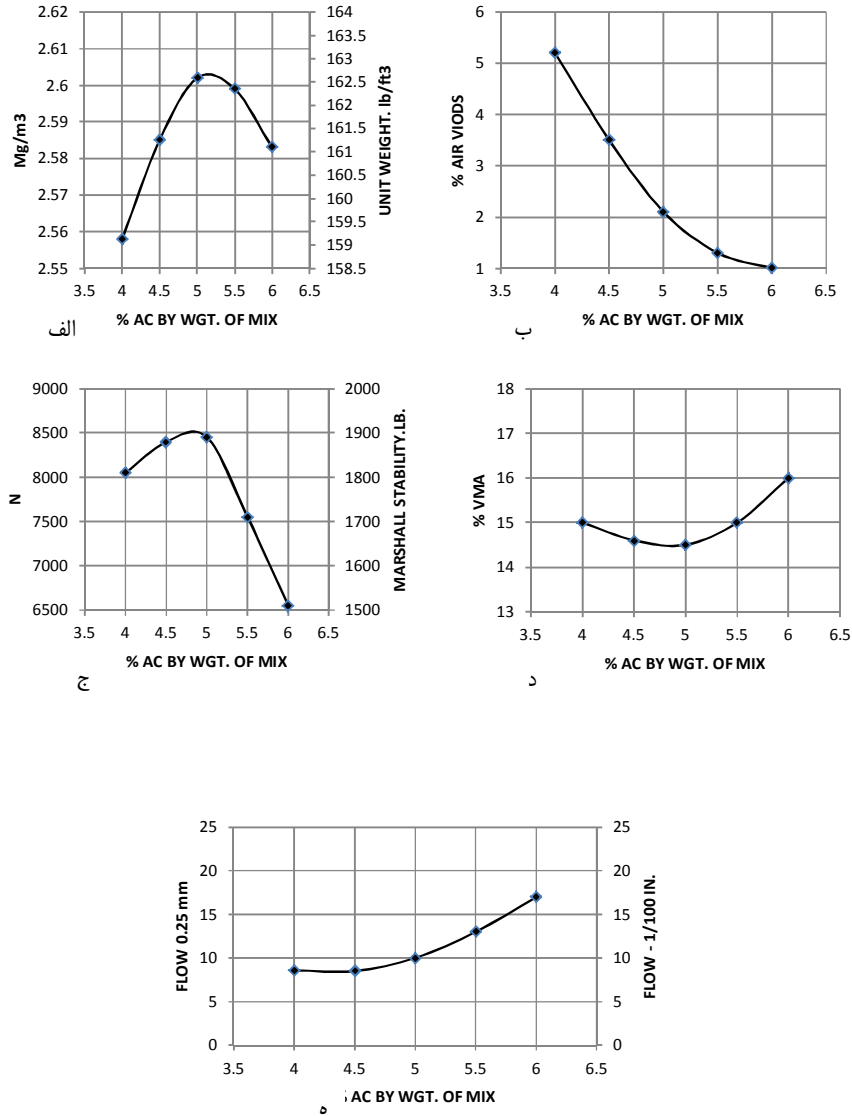
### منحنی‌های آزمایش مارشال

برای ترسیم منحنی‌های آزمایش مارشال بعد از ساخت نمونه‌های بتن آسفالتی با درصدهای مختلف قیر، آن‌ها را تحت آزمایش مارشال قرار داده و درصد فضای خالی آن‌ها تعیین می‌کنند شکل (۱-۱۱).

داده‌های حاصل از این ارزیابی‌ها به‌صورت منحنی‌هایی رسم می‌شوند که شامل موارد زیر می‌شوند:

- الف) دانسیته در برابر محتوی آسفالت
- ب) درصد منافذ هوا در برابر درصد قیر
- ج) درصد VFA در برابر درصد قیر
- د) استحکام مارشال در برابر درصد قیر
- ه) مقدار جریان در برابر درصد قیر





شکل (۱۱-۱) منحنی‌های آزمایش مارشال - تغییر مشخصات مهم بتن آسفالتی در برابر تغییر درصد قیر (الف)وزن مخصوص، ب) درصد هوا، ج) استحکام، د) درصد فضای خالی مصالح سنگی، ه) نرمی

درصد قیر طرح از متوسط چهار درصد قیر نظیر دانسیته حداکثر، منافذ هوای ۴ درصد، ۷۵ درصد VFA، و پایداری مارشال حداکثر تعیین می‌شود. سپس این درصد قیر به منظور اطمینان از قرار گرفتن درصد

فضای منفذی حاصل و درصد VFA درون محدوده‌های تعریف شده، کنترل می‌شود. معیارهای انتخابی پیشنهاد شده در این روش نتیجه اعمال بارهای کنترل شده بر مسیرهای آزمون و مشاهدات عملکرد بهره‌برداری مخلوط‌ها برای دامنه‌ای از بارهای هوایی و شرایط زیست محیطی است.

برای روسازی‌های بزرگراه، روش توسعه یافته USACE به کار برده می‌شود. مثلاً در فرایند موسسه آسفالت [۷]، درصد قیر نظیر ۴ درصد منافذ هوا انتخاب می‌شود (بر اساس یک انرژی تراکمی نماینده ترافیک به کار رفته). فشارهای تراکمی از ۳۵ تا ۷۵ ضربه برای ترافیک سبک تا سنگین متغیر است. سپس سایر ویژگی‌های مخلوط شامل استقامت مارشال، مقدار جریان و VMA برای تعیین میزان رضایت بخشی مخلوط آسفالتی بررسی می‌شوند.

#### ۱-۴-۳-۲-روش ویم<sup>۱</sup>

این روش از اوایل دهه ۱۹۴۰ توسط سازمان بزرگراه‌های کالیفرنیا<sup>۲</sup> به کار برده شده است. همانند روش مارشال، استفاده از این روش در سازمان‌های مختلف با رویکردها و معیارهای متغیر صورت می‌گیرد، گرچه تجهیزات مورد استفاده برای ارزیابی مخلوط، الزاماً مشابه است. فلسفه طراحی در این روش به صورت زیر است:

الف) پایداری اساساً تابعی از بافت سطحی مصالح است،

ب) درصد قیر بهینه در آسفالت به مساحت سطحی، بافت سطحی و تخلخل مصالح و سختی آسفالت بستگی دارد،

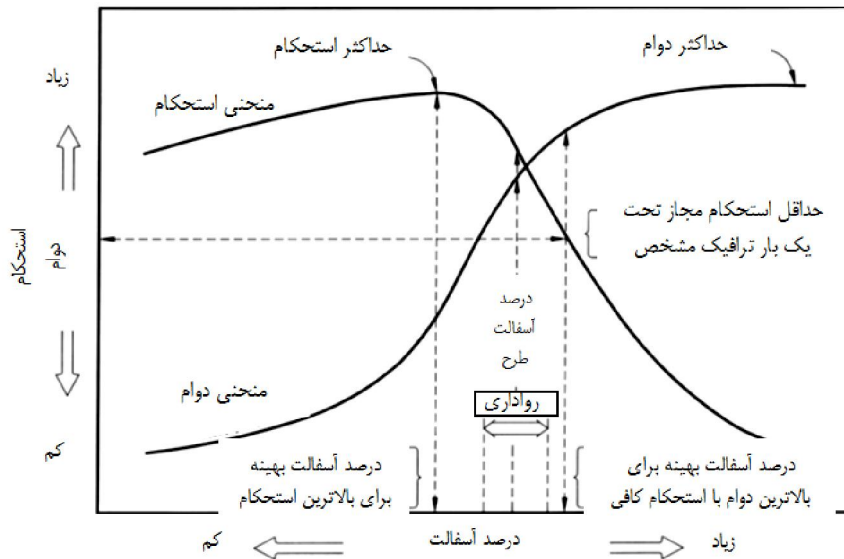
ج) در صورت لزوم می‌توان درصد قیر طراحی برای آسفالت راه سازی را حداقل برابر ۴ درصد فضای هوای محاسبه شده به منظور اجتناب از تعریق یا کاهش احتمالی پایداری منظور نمود.

آزمایش تراکم استاندارد ASTM D1561 را می‌توان به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی در دامنه‌ای از درصد قیرهای مختلف به کار گرفت. میزان انرژی تراکم اعمالی، برای حصول دانسیته‌های مورد نظر و متناظر با ترافیک بهره‌برداری معین می‌شود.

پایدارسنج ویم، یک آزمایش فشاری سه محوره با سیستم بسته است که معیار عملکرد کلیدی در این روش را فراهم می‌آورد. نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این دستگاه، در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برای مقادیر مختلف درصد قیر آزمایش شده و در نتیجه یک نمودار پایداری به‌عنوان تابعی از درصد قیر مشابه

1. Hveem Method  
2. California Division of Highways

شکل (۱۲-۱) حاصل می‌گردد. با انتخاب یک سطح کمیته استحکام که سازگار با ترافیک عبوری است، درصد قیر طراحی به طریقی مشابه آنچه در شکل (۱۲-۱) نشان داده شده، انتخاب می‌شود.



شکل (۱۲-۱) شماتیک ارتباط استحکام - دوام در HMA، برای انتخاب درصد آسفالت

#### ۱-۴-۳-۳-روش سوپریپو<sup>۱</sup>

برای آشنایی با این روش می‌توان از مراجع معتبری همچون [۸] و [۹] استفاده نمود. عموماً این روش شامل فرایند طرح اختلاط حجمی و آزمون‌های عملکرد روی مخلوط حاصل یا مخلوط‌های به دست آمده از طراحی حجمی است.

طرح اختلاط حجمی در چهار مرحله انجام می‌شود:

- ۱) انتخاب مواد سازنده
- ۲) انتخاب ساختار طراحی مصالح
- ۳) انتخاب درصد قیر طرح
- ۴) ارزیابی حساسیت نسبت به رطوبت

1. Superpave

انتخاب مواد سازنده، شامل انتخاب رتبه‌بندی عملکرد آستر مناسب و مصالح با ویژگی‌های مورد نیاز برای ترافیک مورد نظر است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دمای بالا و پایین در محل روسازی، عامل تعیین‌کننده دانه‌بندی مورد استفاده برای بتن آسفالتی است.

ویژگی‌های عمده مصالح مورد استفاده عبارتند از: گوشه‌داری مصالح درشت‌دانه و ریزدانه، وجود ذرات مسطح و طولیل، و درصد رس. نیازهای طراحی مصالح با افزایش ترافیک (که به صورت معادل بارهای تک محوره ۸۰ kN بیان می‌شود)، افزایش می‌یابد.

مثالی از دانه‌بندی معتبری که معیارهای لایه روسازی را برآورده می‌سازد قبلاً در شکل (۱-۷) نشان داده شده است. در روند طراحی، ترکیب‌های آزمایشی به‌طور معمول ارزیابی می‌شوند و در مکان‌های با تجربه قبلی، ممکن است بیش از سه ترکیب آزمایشی مورد نیاز باشد. در مکان‌های با تاریخچه طولانی، تنها یک ترکیب آزمایشی برای بررسی مورد نیاز است. گام دوم در فرایند طرح اختلاط، یعنی انتخاب ساختار مصالح طراحی، بر اساس ویژگی‌های نمونه‌های متراکم شده، با متراکم‌کننده گردان سوپریو انجام می‌شود.

برای هر یک از ترکیب‌ها، یک درصد قیر آزمایشی به کار برده می‌شود که این درصد قیر یا بر مبنای تجربه و یا بر اساس درصد قیر برای تولید ۴ درصد هوای منفذی تعدادی طرح دانه‌بندی سوپریو، انتخاب می‌شود. تعداد دور گردش طراحی،  $N_{design}$ ، به عنوان تابعی از ترافیک و شرایط آب و هوا (دمای هوا) انتخاب می‌شود. برای روسازی‌هایی که در معرض ترافیک سنگین قرار دارند  $N_{design}$  نسبتاً بالا، و برای روسازی‌هایی با حجم پایین ترافیک،  $N_{design}$  پایین در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که درصد قیر به کار رفته در طول این مرحله صرفاً یک مقدار آزمایشی است، به ندرت می‌توان درصد هوای ۴ درصد را در  $N_{design}$  به دست آورد. در نتیجه، هر ترکیب آزمایشی در شرایط متراکم شده، برای تخمین درصد قیر با ۴ درصد، منفذ هوای تولیدی ارزیابی می‌شود. سپس پارامترهای زیر برای هر یک از ترکیب‌های آزمایشی تخمین زده می‌شوند:

▪  $N_{design}$  در VMA

▪  $N_{design}$  در VFA

▪ درصد دانسیته تئوری ماکزیمم در  $N_{initial}$

▪ درصد دانسیته تئوری ماکزیمم در  $N_{maximum}$  و

▪ سهم گرد و غبار

پارامتر  $N_{initial}$  از  $N_{design}$  محاسبه می‌شود.  $N$  اولیه، بیانگر پاسخ مخلوط طی تراکم اولیه یا همان شکستگی ذرات در اثر عبور غلتک است. حصول دانسیته بالا در  $N_{initial}$ ، مطلوب نیست؛ چراکه در این شرایط مخلوط آسفالتی به راحتی متراکم شده و مستعد شیارافتادگی خواهد بود. گرچه این موضوع در برخی گزارشات مورد اشاره قرار گرفته است و لیکن همیشه درست به نظر نمی‌رسد. دانسیته بالا در  $N_{maximum}$  نیز مطلوب نیست؛ چراکه  $N_{maximum}$  بیانگر سطح ترافیک بالاتری به نسبت هر ترافیک طراحی است. با محدود کردن دانسیته در  $N_{maximum}$ ، انتظار می‌رود مخلوط تحت ترافیک عبوری بسیار بالا، به علت وجود منافذ هوای فوق‌العاده پایین، متراکم نشود.

به طور معمول ترکیبات آزمایشی با معیارهای مشخص مقایسه شده و ترکیبی که برآورده‌کننده تمامی معیارها باشد، انتخاب می‌شود. ساختار این ترکیب، مصالح طرح اختلاط را مشخص می‌کند. برای تعیین درصد قیر طراحی، نمونه‌های آزمایشی در  $N_{design}$  با استفاده از مصالح سنگی طرح در چهار درصد قیر مختلف ساخته و متراکم می‌شوند (معمولاً در هر ترکیب درصد قیر دو برابر ترکیب قبلی است).

در ادامه ویژگی‌های حجمی مخلوط متراکم شده (یعنی منافذ هوا، VMA) برای چهار نمونه آسفالت با درصد قیرهای مختلف تعیین می‌شوند. در نهایت درصد قیر مناسب برای دستیابی به درصد هوای برابر ۴ نظیر  $N_{design}$  انتخاب می‌شود. معمولاً درصد قیر آسفالت طرح بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد از مقدار قیر تخمینی از گام قبلی است. بعد از این که ساختار مصالح طراحی و درصد قیر در آسفالت طرح تثبیت شدند، حساسیت رطوبت مخلوط طرح با استفاده از آیین‌نامه AASHTO T283 ارزیابی می‌شود.

در روش اصلی سوپریو برای بارهای ترافیکی بالا طرح اختلاط منتخب تحت آزمایشات عملکردی همانند تست‌های برشی ساده و غیرمستقیم کششی قرار داده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نتایج این بخش از روش، کماکان تحت ارزیابی بوده و در قالب دستورالعمل ارائه نشده است.

#### ۱-۴-۴- مخلوط‌های تولید شده آزمایشگاهی و کارخانه‌ای

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ممکن است بین ویژگی‌های یک مخلوط آسفالت طراحی شده در آزمایشگاه و طرح اختلاطی که عملاً در یک کارخانه به کار برده می‌شود، اختلاف‌هایی وجود داشته باشد. بررسی این اختلاف‌ها بسیار مهم است؛ چراکه ممکن است در عمل تغییراتی در پیش‌بینی‌های صورت گرفته بر مبنای نمونه‌های آزمایشگاهی صورت پذیرد.

#### ۱-۴-۴-۱- میزان قیر در آسفالت

در یک مخزن ذخیره قیر، این مصالح همواره توسط یک پمپ در حال جریان قرار داده می‌شوند تا از کهنگی و سخت شدن آن جلوگیری شود. در آزمایشگاه، قیر را می‌توان برای دوره‌های زمانی مختلف در یک کوره گرم نمود. ممکن است نمونه‌های آزمایشگاهی در معرض کهنگی بیشتری قرار داشته باشند؛ چراکه این مصالح به میزان کم و در ظرف‌های روباز نگهداری می‌شوند. گاهی در شرایط میدانی افزودنی‌هایی به قیر اضافه می‌شود که این مواد در روند طرح اختلاط مد نظر قرار نمی‌گیرند. در این موارد، ویژگی‌های مخلوط تولید شده آزمایشگاهی و کارخانه‌ای می‌تواند متفاوت باشد. در نتیجه، توصیه می‌شود همهٔ موادی که در شرایط میدانی مورد استفاده قرار می‌گیرند در طرح اختلاط آزمایشگاهی نیز مورد استفاده قرار داده شوند.

برای ساخت آسفالت در آزمایشگاه معمولاً مصالح با استفاده از دست یا با استفاده از ماشین مخلوط‌کن با یکدیگر مخلوط می‌شوند. بعد از اختلاط، مخلوط در حالت سست نگه داشته شده و اجازه جذب قیر داده می‌شود و احتمالاً مقداری سفت‌شدگی نیز رخ می‌دهد. روش سوپریو یک زمان کهنگی (که ماندگی کوتاه‌مدت کوره نامیده می‌شود) را برای تولید مخلوطی با یک سختی قابل مقایسه با سختی زمان اجراء (معمولاً کمتر از یک سال) وارد روند طراحی می‌نماید.

#### ۱-۴-۴-۲- سنگدانه

در روش سوپریو لازم است نتایج آزمایش دانه‌بندی به روش شستشویی برای همهٔ مصالح سنگی مشخص شده باشد. زمانی که مصالح سنگی از میان یک ماشین خشک‌کننده یا مخلوط‌کنندهٔ استوانه‌ای عبور می‌کند، معمولاً دانه‌بندی آن تا حدی تغییر می‌کند. مقدار تغییر (افزایش در مقدار ذرات ریزدانه مخلوط) تابعی از متغیرهای بسیاری است، اما اساساً به سختی مصالح مرتبط می‌شود. وقتی مقاومت سایشی مصالح کاهش می‌یابد، مقدار ذرات ریز تولید شده درون خشک‌کننده یا استوانه به‌طور معمول افزایش می‌یابد. برای مصالح سخت بادوام، افزایش درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۰/۲ درصد است؛ اما اگر از مصالح سنگی نرم استفاده شود، مقدار مصالح عبوری از الک نمره ۲۰۰ می‌تواند ۱ تا ۲ درصد افزایش یابد.

در تمامی مصالح سنگی میزان متوسط درصد عبوری از هر الک، متغیر است. در روند اجراء، معمولاً میزان رواداری مشخصی برای اندازهٔ عبوری از هر الک مشخص می‌شود. و لذا به‌طور معمول دانه‌بندی مصالح در مخازن تغذیه سرد به‌جای انطباق با یک دانه‌بندی دقیق، درون دامنه‌ای از منحنی‌های

دانه‌بندی قرار می‌گیرد. در آزمایشگاه، مصالح به نسبت‌های مختلفی الک شده و سپس به‌طور مجدد در یک منحنی دانه‌بندی دقیق ترکیب می‌شوند. دقت دانه‌بندی در آزمایشگاه عمدتاً از آنچه که در یک دستگاه مخلوط آسفالت وجود دارد، بیشتر است.

مصالح به‌کار رفته برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی کاملاً خشک بوده و لزوماً هیچ رطوبتی در آن‌ها وجود ندارد. برای مصالح گرم شده در یک دستگاه خشک‌کن یا در یک خشک‌کننده روی دستگاه استوانه مخلوط با گردش معکوس می‌توان درصد رطوبت را تا حدود ۰/۱ درصد وزنی مصالح کاهش داد، اما در بیشتر مواقع درصد رطوبت در مصالح بسته به مقدار رطوبت در مصالح ورودی، نرخ تولید خشک‌کننده و دمای تخلیه مصالح تا ۰/۵ درصد متغیر است. مصالح تخلیه شده از یک خشک‌کن متداول هیچ رطوبت باقی‌مانده‌ای ندارد. برای مصالح عبوری از میان یک دستگاه مخلوط‌کن استوانه‌ای با جریان موازی، درصد رطوبت مخلوط هنگام تخلیه معمولاً کمتر از ۰/۲ درصد است، اما می‌تواند بسته به متغیرهای مشابه برای مجموعه دستگاه‌ها بیشتر هم باشد.

گرچه در مخلوط تولیدی در کارخانه نباید رطوبت بیشتر از ۰/۵ درصد باقی‌مانده باشد، اما تفاوت‌هایی در مقدار رطوبت مخلوط‌های آزمایشگاهی و کارخانه‌ای وجود دارد. مقدار رطوبت حفظ شده در مخلوط کارخانه‌ای می‌تواند تأثیر مهمی بر حساسیت مخلوط و قابلیت تراکم HMA با تجهیزات تراکم داشته باشد.

در آزمایشگاه، حرارت کوره معمولاً بخش‌های درشت و ریزدانه مصالح را به‌طور یکنواخت خشک می‌کند؛ در صورتی که در خشک‌کننده یا استوانه مخلوط‌کن کارخانه، مصالح درشت‌دانه معمولاً در دمای پایین‌تری نسبت به مصالح ریزدانه حرارت داده می‌شوند و اغلب اختلاف دمایی مشخصی بین دو جزء مصالح وجود دارد. در یک مجموعه کارخانه‌ای، در روند اختلاط دما عموماً یکسان می‌شود. معمولاً این توازن دمایی با نگهداری مواد در سیلوی جریان سریع برای یک دوره زمانی میسر می‌شود.

اگر یک تصفیه‌کننده مرطوب در یک دستگاه مخلوط‌کن استوانه‌ای یا ارتعاشی به‌کار برده شود، تمامی ذرات ریزدانه گیر افتاده به بیرون خشک‌کن منتقل و شسته می‌شوند. این ذرات ریز از دانه‌بندی مصالح حذف می‌شوند. اگر یک فیلتر به‌عنوان ابزار کنترل روی دستگاه نصب شود، برخی یا همه ذرات ریزدانه جمع شده را می‌توان به مخلوط برگرداند. اگر ذرات ریزدانه از فیلتر هدر بروند، دانه‌بندی مصالح مخلوط با مصالح در کارخانه مجهز به سیستم تصفیه مرطوب اندکی متفاوت خواهد بود. اگر همه ذرات ریزدانه به مخلوط برگردند، دانه‌بندی مصالح کماکان می‌تواند به علت خردشدگی مصالح در تأسیسات، با آنچه در آزمایشگاه تست شده، متفاوت باشد. در نتیجه، نوع تجهیزات کنترل‌کننده میزان خردشدگی که

در تأسیسات استوانه‌ای یا مجموعه به کار می‌رود، عمدتاً می‌تواند بر ویژگی‌های مخلوط آسفالت تأثیرگذار باشند. مقدار ذرات ریز می‌تواند نسبت گرد و غبار به قیر را تغییر داده و در نتیجه سختی مخلوط آسفالت را عوض کند. تغییر در نوع و مقدار ذرات به‌طور معمول در فرایند طرح اختلاط آزمایشگاهی در نظر گرفته نمی‌شود. با این حال برخی طراحان، مخلوط ذرات فیلتر شده را برای شبیه‌سازی دانه‌بندی مخلوط بعد از شکسته شدن مواد در کارخانه طی فرایند طرح اختلاط، به مخلوط اضافه می‌کنند.

اگر تأسیسات فقط به یک جمع‌کننده خشک مجهز شود، بیشتر ذراتی که به مخلوط برمی‌گردند بزرگتر از الک ۳/۰ میلی‌متر (نمره ۵۰) خواهند بود. با استفاده از یک فیلتر فابریک، ذرات به اندازه ۵ میکرون (کوچکتر از ضخامت سیمان آسفالت روی مصالح) می‌توانند مجدداً در مخلوط ترکیب شوند. این ذرات فوق‌العاده ریز می‌توانند تأثیری بر پاسخ مخلوط طی فرایند ساخت داشته باشند. به علاوه ذرات فیلتری باید برای پیوستن به درون مخلوط به طور پایدار و یکنواخت به تأسیسات برگردند.

اگر روسازی آسفالت بازیافتی (RAP) به درون مخلوط وارد شود، طبعاً تا زمانی که به‌طور کامل گرما داده شده و با مصالح جدید ترکیب شود، در آزمایشگاه مخلوط می‌شود. گرچه در کارخانه، درجه اختلاط و انتقال گرما از مصالح جدید به مواد بازیابی شده تابعی از متغیرهایی مانند مقدار RAP مخلوط، نقطه ورود RAP، دمای مصالح جدید، و مقدار زمان مناسب برای اختلاط می‌باشد. ترکیب RAP با مصالح جدید برای یک کارخانه مخلوط استوانه‌ای با جریان موازی با یک کارخانه مخلوط استوانه‌ای با جریان معکوس متفاوت است. علاوه بر این، ترکیب RAP با مصالح جدید در آزمایشگاه، صرف‌نظر از نوع کارخانه‌ای که برای تولید مخلوط اچ.ام.ای استفاده می‌شود، همواره مشابه است.

در آزمایشگاه، RAP استفاده شده در فرایند طرح اختلاط می‌تواند نمونه‌ای از مواد بازیافتی پروژه روسازی باشد. هرچند در بیشتر موارد، دانه‌بندی مصالح و درصد قیر RAP ورودی با مقادیر به‌دست آمده از نمونه متفاوت است. آسیاب کردن و فراوری برای بازیابی مواد نیز ممکن است مقدار قابل توجهی از ذرات (درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ - ۰/۰۷۵ میلی‌متر) را به مخلوط اضافه کند. لازم است دامنه تغییرات مورد انتظار طی فرایند طرح اختلاط آزمایشگاهی در نظر گرفته شود.



## ۱-۴-۳- فرایند اختلاط

وقتی زمان اختلاط در یک کارخانه افزایش می‌یابد، درجهٔ کهنگی قیر در آسفالت نیز افزایش می‌یابد. برای زمان‌های نسبتاً کوتاه اختلاط مرطوب (۲۸ تا ۳۵ ثانیه)، متوسط ضریب نفوذ قیر آسفالت، ۳۰ تا ۴۵ درصد کاهش خواهد یافت و در چنین مخلوطی، تقریباً با درصدی مشابه، کندروانی افزایش می‌یابد. برای زمان‌های طولانی‌تر اختلاط مرطوب (تا ۴۵ ثانیه)، نفوذ قیر آسفالت می‌تواند تا بیش از ۶۰ درصد نسبت به مقدار اصلی کاهش داشته باشد، در حالی که کندروانی قیر ممکن است تا ۴ برابر مقدار اصلی افزایش یابد. دماهای اختلاط بالاتر ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای درجهٔ سخت‌شدگی قیر در آسفالت را افزایش دهد. برای روش طراحی مخلوط سوپریو درجهٔ سخت‌شدگی در کارخانه، از طریق قراردادن مخلوط در معرض کهنگی کوتاه‌مدت قبل از تراکم، شبیه‌سازی می‌شود.

مقدار سخت‌شدگی قیر آسفالت که در یک تأسیسات مخلوط استوانه‌ای رخ می‌دهد ممکن است کمتر، بیشتر یا مشابه شرایط اجرایی باشد. درجهٔ سخت‌شدگی کاملاً متغیر بوده و تابعی از ترکیب و ضخامت لایهٔ قیر پوشانندهٔ ذرات مصالح سنگی و بسیاری فاکتورهای دیگر است. زمانی که درصد رطوبت مصالح ورودی تازه و بازیافتی افزایش می‌یابد، حجم مصالح ورودی به مخلوط اضافه شده و دمای تخلیهٔ مصالح افزایش می‌یابد. در این شرایط همچنین نرخ تولید کارخانه افزایش یافته و سخت‌شدگی کمتری در حین فرایند پوشش‌دهی مصالح سنگی با قیر رخ می‌دهد. به علاوه در مخلوط‌کن استوانه‌ای با جریان معکوس نسبت به یک مخلوط‌کن استوانه‌ای با جریان موازی، سخت‌شدگی قیر بسیار کمتر رخ می‌دهد.

با لحاظ زمان لازم برای ترکیب قیر و مصالح، بسته به کارایی فرایند اختلاط، فرایند اختلاط آزمایشگاهی با دست یا ماشین انجام می‌شود. معمولاً چندین دقیقه زمان برای دستیابی به پوشش کامل مصالح نیاز است. در طول این دوره، قیر در معرض هوا قرار گرفته و مقداری سخت می‌شود. درجهٔ سخت‌شدگی تابعی از دمای مصالح و زمان اختلاط است. تغییر در ویژگی‌های قیر با آنچه که در طول تولید مخلوط در مجموعه تأسیسات یا مخلوط استوانه‌ای رخ می‌دهد، متفاوت خواهد بود.

نمونه‌های مخلوط آسفالت که قبل از تراکم از کارخانه یا از محل اجرای روسازی به دست آمده‌اند را می‌توان برای آزمایش بیشتر در حالت شل به آزمایشگاه فرستاد. مقدار سخت‌شدگی قیر به زمان بین تولید و آزمایش و همچنین به شرایط ذخیره‌سازی بستگی دارد (دما و میزان اکسیژن). فرایند گرم کردن دوبارهٔ نمونه، شامل زمان و دمای گرم کردن و هرگونه اختلاط مجدد نمونه نیز می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مخلوط داشته باشد. در نتیجه، فرایند طی شده در آزمایشگاه می‌تواند بر اختلاف‌های موجود بین نمونه‌های آماده شده در کارخانه و آزمایشگاه تأثیرگذار باشد.

#### ۱-۴-۴-۴- تراکم

معمولاً روش‌هایی مانند تراکم (چکش مارشال)، تراکم خمیری و تراکم چرخشی سوپرپیو، به‌منظور متراکم نمودن نمونه‌های HMA آزمایشگاهی به‌کار برده می‌شوند. هدف فرایند تراکم آزمایشگاهی ارائه تقریبی رفتار میدانی مصالح تحت تأثیر عبور غلتک و بار ترافیک است. نتایج آزمون‌های صورت گرفته در داخل و خارج از آزمایشگاه نشان می‌دهند که درجه تراکم به دست آمده در آزمایشگاه می‌تواند بسته به روش مورد استفاده، شدیداً متغیر باشد.

فرایند تراکم در آزمایشگاه خیلی سریع بوده و معمولاً در زمان نسبتاً کوتاهی (کمتر از ۵ دقیقه) تکمیل می‌شود. این فرایند از شرایط غلتک‌زنی میدانی متمایز است؛ چرا که در شرایط اجرایی از غلتک‌های متنوع، تعداد دفعات عبور مختلف و همچنین از الگوهای مختلف غلتک‌زنی استفاده می‌شود و لذا برای نیل به دانسیته مطلوب معمولاً زمانی در حدود ۳۰ دقیقه نیاز خواهد بود.

از طرفی در فرایند تراکم آزمایشگاهی، دمای مخلوط نسبتاً ثابت است؛ در صورتی که در حین اجرای روسازی، دمای مواد به‌طور پیوسته با زمان کاهش می‌یابد. در آزمایشگاه، معمولاً کل انرژی تراکم مورد نظر قبل از این که دمای مخلوط تا ۱۱۵ درجه سانتیگراد در روش‌های مارشال و سوپرپیو (بسته به ویژگی‌های کندروانی مواد آستر) یا ۱۰۵ درجه سانتیگراد برای روش ویم کاهش یابد، بر مصالح اعمال می‌شود؛ در صورتی که در شرایط اجرایی قبل از این که فرایند تراکم کامل شود، ممکن است دمای مخلوط تا ۸۰ درجه سانتیگراد کاهش پیدا کرده باشد.

در آزمایشگاه مخلوط آسفالت روی یک پی صلب متراکم می‌شود؛ در حالی که در صحرا با تنوع بسیاری از انواع پی و سختی بستر مواجه هستیم. یک مخلوط آسفالتی می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک کف جدیداً ساخته شده، به‌عنوان لایه اول روی خاک نرم قشر بستر جاده یا به‌عنوان مسیر سطحی روی ساختار روسازی آسفالت تمام عمق<sup>۱</sup> قرار گیرد. این مواد می‌توانند به‌عنوان لایه رویی آسفالت پیش‌ساخته به‌کار برده شوند. دستیابی به یک سطح ویژه چگالی در یک مخلوط آسفالتی تا حدی به سختی پی زیرین و به نوع تجهیزات تراکم مورد استفاده بستگی دارد. در این راستا تفاوت میان شرایط روسازی و پی در آزمایشگاه نیز می‌تواند مسأله مهمی تلقی شود. در شرایط میدانی معمولاً اجرای یک قطعه

1. Full depth

آزمایشی برای تعیین ارتباط میدانی میان فشار تراکم و الگوی غلتک‌زنی به منظور دستیابی به یک دانسیته معین در مخلوط آسفالتی، ضروری است.

هدف از آزمایش مخلوط‌های آسفالت تولید شده در کارخانه مقایسه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با فرمول درجای طرح اختلاط مخلوط آسفالتی است. تلاش‌هایی برای معادل قرار دادن مخلوط تولید شده توسط کارخانه با فرمول طرح اختلاط آزمایشگاهی صورت گرفته است؛ اما با توجه به متغیرهای موجود برای تولید مصالح در شرایط کارخانه‌ای، معمولاً دستیابی به این امر دشوار است. اغلب اختلاف‌های عمده‌ای بین مخلوط‌های آزمایشگاهی و کارخانه‌ای وجود دارد که این اختلافات در مواردی همچون دانه‌بندی مصالح، گردگوشه‌گی مصالح به‌هنگام عبور از تجهیزات اختلاط، درجه سخت‌شدگی قیر و هدرفت مصالح ریزدانه در سیستم کنترل توزیع ذرات، ملاحظه می‌شود. دلایل اولیه این اختلاف‌ها به روش اختلاط، درصد رطوبت و افزایش درصد مصالح ریزدانه مربوط است. به علاوه، به طور قابل توجهی شرایط تراکم آزمایشگاهی مخلوط و تراکم واقعی تحت غلتک‌های مختلف در اجراء، متفاوت است.

در نتیجه، فرمول طرح اختلاط مصالح پیشنهاد شده در آزمایشگاه باید به‌عنوان طرح اختلاط اولیه در نظر گرفته شود. در این راستا می‌بایست ویژگی‌های مخلوط آسفالتی تولیدی در کارخانه کنترل شده و بر اساس آن، مخلوط آسفالتی متراکم شده در آزمایشگاه بازبینی شود. آزمایش‌های روزانه باید برای تعیین ویژگی‌های مخلوط تولیدی واقعی انجام شوند (صحت‌سنجی مخلوط). همه مقادیر مخلوط باید درون دامنه تعیین شده در فرایند طرح اختلاط قرار گیرند. اگر نتایج آزمون روی مخلوط تولید شده توسط کارخانه به‌طور مطلوب نیازهای آیین‌نامه‌ای مخلوط درجا را تأمین کرد، تجهیزات تولید آسفالت باید به فعالیت خود ادامه دهند. اگر یک یا تعداد بیشتری از ویژگی‌های مخلوط، خارج از دامنه مورد نیاز باشند، باید دلیل و دامنه نقص به سرعت ارزیابی گردد. در مجموع باید تا حد ممکن از بسته‌شدن کارخانه اجتناب کرده و تغییرات لازم را در طرح اختلاط بتن آسفالتی براساس نتایج آزمون‌های صورت گرفته، انجام داد. به علاوه، اگر اختلاف‌های عمده‌ای در دانه‌بندی مصالح به‌کار رفته در فرایند مخلوط آزمایشگاه و مصالح به‌کار رفته در کارخانه وجود دارد، طرح اختلاط درجا باید تعدیل شده و یا یک طرح اختلاط جدید توسعه داده شود.

### ۱-۵- حمل آسفالت به محل اجراء

حمل آسفالت از محل کارخانه تا محل اجراء توسط کامیون انجام می‌شود. جدار داخلی کامیون و سطوحی که با آسفالت تماس دارد باید کاملاً تمیز و عاری از هرگونه مواد خارجی باشد. به‌منظور پیشگیری از

چسبیدن آسفالت به کف و دیواره‌های اطاق کامیون باید قبل از بارگیری آسفالت، اطاق کامیون با آب آهک (یک حجم آهک و سه حجم آب) شستشو داده شده و تمیز شود. همچنین باید از شستشوی دیواره‌ها با هر نوع روغن و گازوئیل اجتناب نمود. در صورت افت دمای بیش از ۱۰ درجه حین حمل آسفالت، کامیون‌های حمل آسفالت باید به عایق‌بندی حرارتی مجهز شوند تا از سرد شدن و غیر یکنواختی آسفالت جلوگیری شود. مطابق آیین‌نامه روسازی آسفالتی [۱۰] حداکثر زمان حمل آسفالت، ۴۵ دقیقه و حداکثر فاصله حمل با کامیون ۷۰ کیلومتر می‌باشد. افزایش زمان حمل مستلزم تأمین درجه حرارت زیاد آسفالت در جریان حمل است، که این موضوع موجب تجمع قیر مخلوط آسفالتی در کف کامیون و کم قیر شدن قسمت فوقانی آسفالت داخل کامیون می‌گردد. این پدیده باعث کاهش عمر آسفالت در قسمت کم قیر، و قیرزدگی در قسمت پر قیر می‌گردد.

### ۱-۶- پخش آسفالت

بتن آسفالتی تولید شده در کارخانه که هنوز گرمای خود را از دست نداده، در سطح آماده شده راه، پخش می‌شود. آسفالت حمل شده از کارخانه در محل اجراء در فینیشر<sup>۱</sup> تخلیه می‌شود. فینیشر از یک بخش تأمین‌کننده نیرو محرکه و یک قسمت پخش‌کننده تشکیل شده است. قسمت پخش‌کننده وظیفه پخش آسفالت و تنظیم ضخامت را بر عهده دارد. شکل (۱-۱۳) تصویر این دستگاه را نشان می‌دهد. این مصالح باید قبل از این که درجه حرارتشان از حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد کمتر شود غلتک زده و کاملاً متراکم شوند. به منظور جلوگیری از چسبیدن بتن آسفالتی به کف و دیواره‌های اتاق کامیون، از محلول آب آهک استفاده می‌شود. پخش مخلوط‌های آسفالتی مستلزم آماده‌سازی سطح راه است. پخش آسفالت در سطح راه به وسیله دستگاه خودکار و مکانیکی فینیشر انجام گیرد. هنگام اجرای خط عبور دوم، فینیشر باید حداقل ۱۵ سانتی‌متر همپوشانی عرضی با خط اول داشته باشد و سپس بلافاصله پس از گذر دستگاه پخش‌کننده، عرض اضافی با عبور غلتک کوبیده و متراکم گردد. حداقل درجه حرارت پخش مخلوط آسفالتی به عواملی مانند نوع قیر مصرفی و دانه‌بندی مصالح سنگی، فصل اجرای کار، حرارت محیط، نوع و تعداد غلتک بستگی دارد. در هر صورت درجه حرارت باید برای دستیابی به تراکم لازم، مناسب باشد.



شکل ۱-۱۳) ماشین پخش کننده آسفالت (فینیشر)

فینیشر باید عاری از هرگونه نقص در قسمت‌های مختلف مانند اتو و یا دستگاه گرم‌کن و یا دستگاه ارتعاش‌دهنده یا دستگاه‌های تنظیم ضخامت باشد تا آسفالت به‌طور کاملاً یکنواخت و با سطحی کاملاً هموار و یکسان پخش گردد. در صورت وجود مشکل در هر بخش از فینیشر، دستگاه نظارت دستور اصلاح و یا تعویض فینیشر را صادر می‌کند.

#### ۱-۶-۱- ضخامت آسفالت

مخلوط آسفالتی در عرض و ضخامتی که در مشخصات تعیین شده است و با شیب عرضی معین توسط فینیشر پخش می‌شود. ضخامت آسفالت پخش شده توسط فینیشر با توجه به وضع دانه‌بندی و میزان کوبیدگی محاسبه می‌شود. این ضخامت معمولاً بین  $\frac{1}{2}$  تا  $\frac{1}{25}$  برابر ضخامت آسفالت کوبیده شده، می‌باشد.

ضخامت آسفالت پخش شده به‌طور مرتب توسط تکنسین‌های ناظر محل پخش، اندازه‌گیری و در فرم‌های مخصوص ثبت می‌گردد. ضخامت آسفالت کوبیده شده نیز اندازه‌گیری و با مشخصات، تطبیق داده می‌شود. ضخامت هر لایه کوبیده شده آسفالت، ۲ تا ۳ برابر حداکثر اندازه سنگدانه می‌باشد و ضخامت بیش از آن، با توجه به شرایط اجرایی و نوع غلتک‌ها تعیین می‌شود [۱۰].

## ۱-۶-۲- نکات اجرایی پخش آسفالت

در صورتی که آسفالت در بیش از یک خط و بیش از یک قشر پخش شود، رعایت موارد زیر لازم است [۱۰]:

- در طول یک‌روز، خطوط آسفالت مجاور هم، به‌طور هم‌زمان پخش و تکمیل شوند تا درز طولی آسفالت به‌خوبی متصل شود. در همین راستا باید از پخش آسفالت در یک خط عبور و در طول زیاد، به‌طوری که ادامه عملیات به روز یا روزهای بعد موقوف گردد، اجتناب شود.
- هنگام پخش لایه، از آنجا که معمولاً تراکم مناسب در حاشیه طولی لایه با غلتک‌زنی معمولی به‌دست نمی‌آید، لازم است تمهیداتی اعمال شود تا به ایجاد درز طولی در آینده منجر نشود. مطابق آیین‌نامه روسازی آسفالتی، برخی اقدامات مؤثر به‌شرح زیر می‌باشند که برحسب نظر دستگاه نظارت، حداقل یکی از این روش‌ها باید اعمال شود:
- الف- بلافاصله پس از پخش و کوبیدگی اولیه آسفالت و هنگامی که هنوز آسفالت گرم است، قسمت کناری آن که خوب متراکم نشده به‌وسیله یک چرخ برش (حتی‌المقدور ماشینی) در حدود ۲ تا ۳ سانتیمتر در طول راه بریده و برداشته شده و محل آن جاروب شود.
- ب- چنانچه عملیات بند فوق هنگامی که آسفالت گرم است اجرا نشد، می‌توان این کار را در روزهای بعد و قبل از اجرای لایه مجاور انجام داد. اجرای کار می‌تواند توسط یک چرخ برش که روی غلتک نصب می‌شود توسط یک راننده مسلط صورت گیرد. شکل (۱-۱۴) نمونه‌ای از یک چرخ برش در حال بردن حاشیه طولی آسفالت را نشان می‌دهد.

عدم رعایت حداقل یکی از روش‌های فوق، سبب بروز ترک طولی دو بندی<sup>۱</sup> در آسفالت در زمان بهره‌برداری خواهد شد. موارد فوق برای جلوگیری از بروز درزهای دو بندی عرضی و پله شدن آسفالت نیز صادق است که در این خصوص نیز باید تمهیدات لازم صورت گیرد.

پ- در صورت پخش آسفالت روی قشرهای قبلی، عرض پخش آسفالت در فینیش باید متفاوت با عرض لایه زیرین باشد؛ به‌طوری که درز اتصال طولی هر قشر با قشر پایینی حداقل ۱۵ سانتی‌متر فاصله داشته باشد تا درزهای طولی روی هم قرار نگیرد.

۱. در هنگام پخش آسفالت، فینیش به دلایل اجرایی آسفالت را در چند باند با ضخامت محدود اجرا می‌کند. محل تماس این باندها دوبرندی نام دارد. در صورت اجرای نامناسب آسفالت، این محل‌ها برای به‌وجود آمدن ترک مستعد هستند.

ت- برای پخش آخرین قشر رویه باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که محل درز طولی یا دوپندی، دقیقاً در مجاور امتداد خط کشی جاده در زمان بهره‌برداری قرار گیرد تا عبور چرخ وسایل نقلیه از محل دوپندی‌ها به حداقل برسد.



شکل ۱-۱۴) چرخ برش متصل به غلتک

#### ۱-۶-۳- شرایط جوی هنگام پخش آسفالت گرم

پخش مخلوط‌های آسفالتی هنگامی مجاز است که شرایط جوی، دمای محیط و آمادگی سطح راه از هر نظر برای عملیات مناسب باشد. در مواقع بارندگی، روی سطوح یخ‌زده و مرطوب و دمای محیط کمتر از ده درجه سانتیگراد باید از پخش آسفالت خودداری شود. به‌طور کلی اجرای عملیات آسفالتی باید به‌نحوی برنامه‌ریزی شود که آسفالت در فصول مناسب اجرا شود. پخش آسفالت رویه یا هر قشر نهایی دیگر باید منحصراً در فصول مناسب و گرم سال که درجه حرارت سطح راه از ۲۵ درجه سانتیگراد کمتر نباشد، اجرا گردد.

#### ۱-۷- تراکم آسفالت

اتوی اولیه قشر پخش‌شده، توسط فینیشر و اتوی ثانویه، توسط غلتک چرخ فلزی (ترجیحاً دو چرخ دو محور) پس از پخش آسفالت انجام می‌شود. چرخ یا محور دارای نیروی محرکه غلتک اتو بایستی به سمت فینیشر باشد تا از جمع شدن آسفالت کوبیده نشده جلوی غلتک در موقع حرکت به‌طرف فینیشر،

جلوگیری گردد. کوبیدن نهایی قشر آسفالتی توسط دو غلتک چرخ لاستیکی با وزن مناسب (بسته به نوع دانه‌بندی و ضخامت قشر پخش شده آسفالت) تا دستیابی به تراکم لازم انجام می‌شود. میزان تراکم برای قشرهای اساس آسفالتی، آستر و رویه (توپکا) حداقل ۹۷ درصد وزن مخصوص نمونه‌های آزمایشگاهی مارشال، یا ۹۲ درصد وزن مخصوص نظری آسفالت (که با روش T-209 تعیین می‌گردد) می‌باشد. برای سهولت تراکم، وزن غلتک‌ها بایستی قابل تنظیم باشد. غلتک‌های چرخ لاستیکی برای حصول

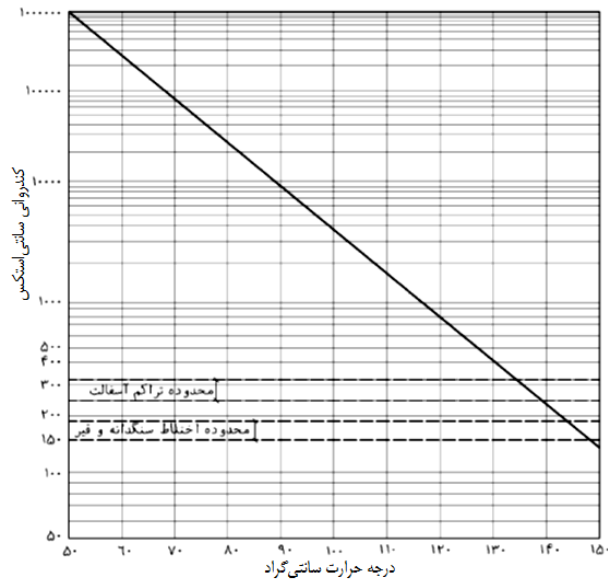
تراکم کافی و تنظیم بافت سطحی آسفالت، مناسب‌تر از غلتک‌های چرخ فلزی می‌باشد.

مطابق آیین‌نامه روسازی آسفالتی، غلتک‌های مورد استفاده برای کوبیدن آسفالت باید مجهز به لوله‌های آب‌پاش برای تمیز نگهداشتن چرخ‌ها با مواد صابونی باشد و استفاده از روغن سوخته و یا گازوئیل برای تمیز کردن چرخ‌ها، به هیچ وجه مجاز نمی‌باشد.

همچنین وجود و آماده به کار بودن یک غلتک چرخ فلزی و یک غلتک چرخ لاستیکی به‌عنوان ذخیره برای جایگزینی غلتک‌های معیوب احتمالی ضروری است تا آسفالت در اثر کمبود غلتک معیوب نشود. دمای محیط و شدت کاهش دمای مخلوط در انتخاب تعداد غلتک‌ها مؤثر است. تعیین تعداد غلتک‌ها با نظر دستگاه نظارت انجام می‌شود. هنگام متراکم کردن آسفالت، چنانچه کندروانی قیر بیش از اندازه باشد، حصول تراکم لازم در کل ضخامت لایه پخش‌شده ممکن نخواهد شد و در صورتی که کمتر از اندازه باشد، آسفالت حالت روان پیدا کرده و جلوی غلتک فشرده شده و پس از اجرا، موج‌های متوالی ریز در راه ایجاد خواهد شد. محدوده دمای مناسب آسفالت هنگام تراکم در سطح راه، باتوجه به کندروانی بهینه قیر مصرفی، در شکل شماره (۱-۱۵) نشان داده شده است. کندروانی بهینه برای قیر هنگام تراکم آسفالت  $280 \pm 30$  سانتی‌استکس می‌باشد.

سرعت غلتک‌های چرخ فلزی باید یکنواخت و حدود ۴ کیلومتر در ساعت و سرعت غلتک‌های چرخ لاستیکی، حداکثر ۸ کیلومتر در ساعت باشد.





شکل ۱-۱۵) محدوده دمای مناسب آسفالت هنگام تراکم، با توجه به کندروانی بهینه قیر مصرفی [۱۰]

### ۱-۸- کنترل یکنواختی رقوم و سطح آسفالت کوبیده شده

اختلاف رقوم سطح تمام شده آسفالت قشرهای آستر و رویه با رقوم مندرج در نقشه‌های طولی و عرضی، حداکثر تا ۵ میلی‌متر مجاز می‌باشد.

یکنواختی سطح آسفالت تمام شده با شمشه ۳ متری انجام می‌شود که در طول و عرض آسفالت قرار می‌گیرد. رقوم اندازه‌گیری شده برای اساس آسفالتی، قشر آستر و قشر رویه به ترتیب نباید از  $\pm 6$ ،  $\pm 7$  و  $\pm 5$  میلی‌متر تجاوز نماید.

برای کنترل همواری سطح روسازی می‌توان از شاخص بین‌المللی ناهمواری،  $RIR^1$  نیز استفاده نمود. نمود. مقادیر قابل پذیرش این شاخص باید با توجه به شرایط هر پروژه و با استناد به یکی از آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی در مشخصات فنی خصوصی مشخص شود.

## ۹-۱- مشخصات و آزمایش‌های استاندارد برای بتن آسفالتی گرم

آزمایش‌ها و مشخصات استاندارد مورد نیاز برای آسفالت به شرح جدول (۹-۱) می‌باشد [۱۰].

جدول ۹-۱۰. آزمایش‌ها و مشخصات استاندارد آسفالت

ردیف	شرح آزمایش با مشخصات	AASHTO	ASTM
۱	نمونه‌گیری مخلوط‌های آسفالتی	T 168	D 979
۲	مقدار قیر مخلوط‌های آسفالتی	T 164	D 2172
۳	بازیابی قیر از مخلوط‌های آسفالتی	-	D 1856
۴	دانه‌بندی مخلوط آسفالتی	T 30	-
۵	نمونه‌گیری مخلوط‌های آسفالتی کوبیده شده	-	D 5361
۶	وزن مخصوص حقیقی آسفالت کوبیده شده	T 166	D 2726 و D 1188
۷	حداکثر وزن مخصوص تئوریک مخلوط آسفالتی (آزمایش رایس)	T 209	D 2041
۸	وزن مخصوص حقیقی مخلوط‌های آسفالتی کوبیده شده با نمونه‌های اندود شده با پارافین	T275	D 1188
۹	درصد کوبیدگی مخلوط‌های آسفالتی	T 230	-
۱۰	تعیین میزان پوشش سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی در کارخانه آسفالت	T 195	D 2489
۱۱	تعیین درصد قیر مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال	T 270	D 5148
۱۲	تعیین درصد قیر مخلوط‌های آسفالتی با روش سانتریفوژ	T 245	-
۱۳	آزمایش مارشال اصلاح شده	-	D 5581
۱۴	اثر آب جوش روی مخلوط‌های آسفالتی	-	D3625

## ادامه جدول ۱-۴

D 1075	T 165	تأثیر آب روی چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی متراکم	۱۵
D 1074	T167	تعیین مقاومت فشاری مخلوط‌های آسفالتی	۱۶
D 486	T 283	ارزیابی دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب	۱۷
D 3203	T 269	تعیین درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی متراکم با دانه‌بندی پیوسته و باز	۱۸
-	T 305	تعیین ویژگی‌های ریزش قیر از مخلوط‌های آسفالتی غیرمتراکم	۱۹
D 3515	-	مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم	۲۰
-	T 324	تعیین میزان شیار افتادگی چرخ با دستگاه هامبورگ	۲۱
-	PP و MP 8 41	مشخصات آسفالت ماستیک درشت‌دانه (SMA)	۲۲
D 4123	-	تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی متراکم	۲۳
D 1461	T 110	اندازه‌گیری آب با مواد فرار مخلوط‌های آسفالتی	۲۴
D 1856	-	بازیابی قیر از مخلوط‌های آسفالتی به روش آیسون	۲۵
D 6433	-	شاخص وضعیت روسازی آسفالتی راه و پارکینگ	۲۶
E 274	-	تعیین تاب لغزشی سطح روسازی آسفالتی	۲۷
E 303	-	اندازه‌گیری خصوصیات اصطکاک سطح روسازی آسفالتی با استفاده از دستگاه پاندول انگلیسی	۲۸
D 4694	-	روش اندازه‌گیری افت و خیز روسازی با دستگاه FWD	۲۹
E 1926	-	تعیین شاخص زبری جاده‌ها با اندازه‌گیری پروفیل طولی	۳۰

ادامه جدول ۱-۴

D 4469	-	تعیین درصد قیر جذب شده توسط سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی	۳۱
D 3387	-	خواص کوبیدگی و برشی مخلوط‌های آسفالتی با روش GTM	۳۲
D 3496	-	روش تهیه نمونه‌های آسفالتی برای آزمایش تعیین مدول دینامیکی	۳۳
D 3497	-	تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی	۳۴
D 3637	-	اندازه نفوذپذیری آسفالت در برابر آب	۳۵
D 995	M 156	مشخصات کارخانه آسفالت برای تولید آسفالت گرم	۳۶
D 290	T 172	روش کنترل کارخانه آسفالت	۳۷
D 3407	-	مشخصات مواد درزگیر و پرکننده ترک‌های رویه آسفالتی (روش گرم)	۳۸
D 5078	-	مشخصات مواد درزگیر و پرکننده ترک‌های رویه آسفالتی (روش گرم)	۳۹
D 5329	-	مشخصات مواد درزگیر و پرکننده ترک‌های رویه آسفالتی (روش گرم)	۴۰
D 1190	-	مشخصات مواد درزگیر و پرکننده ترک‌های رویه آسفالتی (روش گرم)	۴۱
D 6690	-	مشخصات مواد درزگیر و پرکننده ترک‌های رویه آسفالتی (روش گرم)	۴۲
E 1926	-	شاخص بین‌المللی ناهمواری‌های سطح آسفالت IRI	۴۳

## ۱-۱-۱- منابع

- [1] Nijboer, L. W. *Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Carpets*. Elsevier Publishing Co., New York, 1948.
- [2] Hot mix asphalt pavement design guide, tenth Edition 2008, The Maryland Asphalt Association, Inc.
- [3] Hot mix asphalt paving handbook, U.S department of transportation, Federal aviation administration, 150/5370-14A, 2001
- [4] Superpave Series No. 1 (SP-1), Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Asphalt Institute publication.
- [5] Highway Research Board Research Report No. 7-B: Symposium on Asphalt Paving Mixtures. Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1949.
- [6] Flexible Airfield Pavements. TM5-824-2. Department of the Army, 1969.
- [7] Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix *Types*, 6th ed. MS-2. The Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1994.
- [8] Superpave Mix Design. SP-2. The Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1996
- [9] Cominsky, R. J., G. A. Huber, T. W. Kennedy, and R. M. Anderson. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. SHRP-A-407. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994.
- [۱۰] آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه شماره ۲۴۳، تجدید نظر اول، معاونت نظارت راهبردی، ۱۳۹۰.
- [۱۱] دکتر امیرمحمد طباطبائی، روسازی راه و فرودگاه، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم ۱۳۸۰.
- [۱۲] دکتر امیرمحمد طباطبائی، روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ چهارم ۱۳۸۷.



## «فصل دوم»

### کاربرد مخلوط آسفالت گرم در خطوط ریلی



امروزه، یکی از راه‌های مؤثر بهبود عملکرد خط در مناطق مسئله‌دار، استفاده از لایه آسفالتی به‌عنوان زیربالاست است. لایه آسفالتی با فراهم نمودن بستری مستحکم در برابر ترافیک عبوری، باعث افزایش ظرفیت و عمر مفید خط می‌شود. از این‌رو در این فصل ابتدا به کاربرد این لایه در راه‌آهن

و مسائل اجرایی مربوطه پرداخته می‌شود و سپس تجارب موجود در ارتباط با اجرای آسفالت در زیرسازی خطوط در کشورهای مختلف دنیا مرور می‌شوند. در پایان این فصل، با توجه به موضوعات اشاره شده، به جمع‌بندی در مورد این لایه و بایدها و نبایدهای مرتبط با استفاده از آن در خطوط ریلی اشاره می‌شود.

## ۲-۱- مقدمه

به‌موازات افزایش فزاینده هزینه‌های نگهداری و تعمیر خطوط ریلی در دهه‌های اخیر، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در زیر ساخت‌های حمل و نقل ریلی ایجاد شده است. در بسیاری از کشورها، صدها کیلومتر از شبکه خطوط ریلی، نیازمند تقویت و یا بازسازی هستند. این تقویت و بهبود، فناوری‌های جدید برای ارائه سازه‌های بادوام و مقاوم‌تر با توانایی تحمل سرعت بیشتر و بار محوری سنگین‌تر را طلب می‌کند، که در عین حال دارای کمترین هزینه نگهداری باشد. همچنین خطوط متداول بالاستی در بیشتر بسترهای سست و مسئله‌دار با مشکل مواجه می‌شود. برای این شرایط، مخلوط بتن آسفالتی (HMA) به‌عنوان یک لایه زیرسازی یک راه حل آزموده و مؤثر می‌باشد. اهمیت بتن آسفالتی به‌طور خاص در خطوط ریلی با هر یک از شرایط زیر بیشتر مشخص می‌شود:

- ✓ بسترهای سست و فاقد باربری لازم برای تأمین تکیه‌گاه بالاست و خط
  - ✓ خطوط با بستر دارای زهکش‌های نامناسب و یا ناکافی
  - ✓ بسترهای در معرض سطح آب زیرزمینی
  - ✓ بسترهای متحمل فشار زیاد و یا تمرکز تنش بالا، خطوط با کارکرد خاص و در آستانه پل یا تونل یا هر جا که سختی خط به سرعت تغییر کند.
- هدف این فصل بررسی کارکرد بتن آسفالتی به‌طور خاص در مهندسی راه‌آهن و شیوه‌های اجرایی آن در کشورهای مختلف است.

## ۲-۲- طراحی، ساخت و اجرای HMA در خطوط بتن آسفالتی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بتن آسفالتی مخلوط چسبنده‌ای از قیر و سنگ خرد شده است. مخلوط پیشنهادی راه‌آهن در مقایسه با شرایط استفاده آن در جاده‌ها و بزرگراه‌ها، شامل خرده‌سنگ‌های درشت لایه اساس راه با دانه‌بندی گسترده است که در آن مقدار بیشتری از قیر و مصالح سنگی ریزدانه معدنی وجود دارد. همچنین درصد حباب هوا در مخلوط متراکم شده نهایی بین ۱ تا ۳ متغیر است. معمولاً حداکثر اندازه مصالح دانه‌ای ۲۵ تا ۳۷ میلی‌متر (۱ تا ۱/۵ اینچ) است [۱]. روش‌های متنوعی برای اجرای لایه آسفالت در خطوط بتن آسفالتی وجود دارد. در ادامه سه نوع زیرسازی آسفالتی متداول، معرفی می‌گردند.



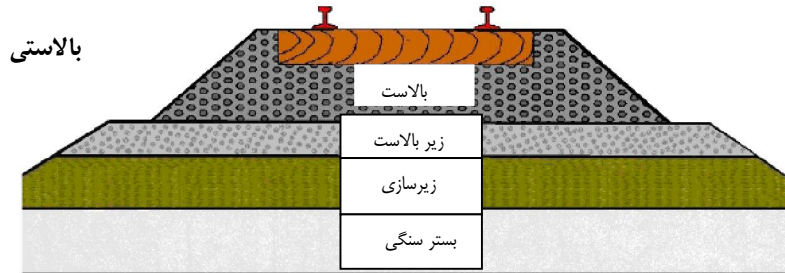
## ۲-۲-۱- توسعه و تنوع اجرای خطوط بتن آسفالتی

از سال ۱۹۸۰ استفاده از HMA در ساختار خط به صورت یک گزینه اجرایی و به عنوان یک لایه زیرسازی در ایالات متحده توسعه یافت. همزمان در سایر کشورها، کارکردهای آن مورد بررسی قرار گرفت. در این میان سه نوع متداول از خطوط آسفالتی بیشتر مورد توجه قرار گرفت [۲]. دو نوع از این خطوط، وجود بالاست در ساختار خط را به عنوان یک جزء ثابت زیرسازی در نظر می‌گیرد. نوع اول، خطوط موسوم به زیرلایه<sup>۱</sup> شباهت زیادی به خطوط بالاستی شکل (۲-۱) دارد، با این تفاوت که لایه زیربالات با لایه آسفالتی جایگزین شده است (شکل ۲-۲). اجرای آسفالت در مقاطع ریلی به این روش، در واقع استفاده از آسفالت به عنوان زیربالات است.

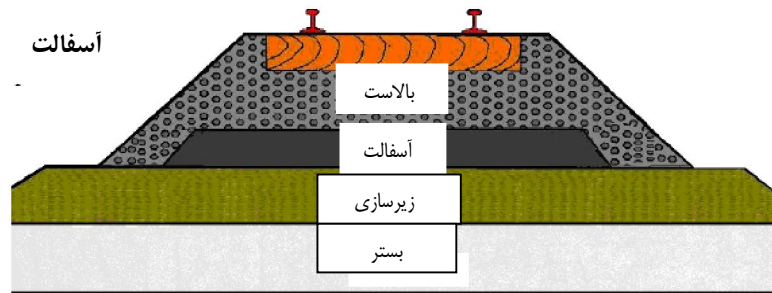
نوع دیگر از این خطوط که بالاست در آن‌ها حذف نشده، با عنوان خطوط ترکیبی<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند که شامل هر دو لایه آسفالت و زیربالات می‌باشند. در مقایسه با سایر مقاطع آسفالتی، در این خطوط به دلیل وجود لایه زیربالات می‌توان ضخامت به مراتب کمتری برای لایه آسفالت متصور بود (شکل ۲-۳).

نوع سوم از زیرسازی‌های آسفالتی، خطوط آسفالتی بدون بالاست هستند که تراورس یا دال خط<sup>۳</sup> به طور مستقیم روی لایه آسفالتی قرار می‌گیرد. در این روش نیز لایه آسفالت بر روی یک لایه دانه‌ای یا همان زیربالات اجرا می‌شود (شکل ۲-۴). در صورتی که از لایه زیربالات به دلیل بالا بودن کیفیت وضعیت بستر صرف نظر شود این خطوط با عنوان خطوط تمام عمق<sup>۴</sup> و یا رولایه<sup>۵</sup> آسفالتی شناخته می‌شوند. در این حالت، وجود مصالح دانه‌ای در اطراف و بین تراورس‌ها از نقطه نظر افزایش مقاومت تراورس‌ها در برابر حرکات طولی و جانبی حائز اهمیت است.

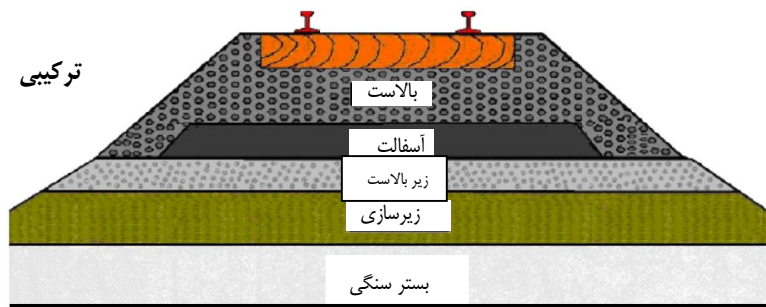
- 
1. underlayment
  2. Combination
  3. Slabtrack
  4. Full depth
  5. Overlayment



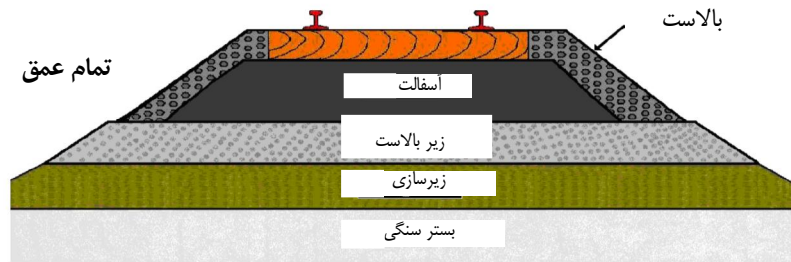
شکل ۱-۲ خطوط بالاستی



شکل ۲-۲ خطوط آسفالتی



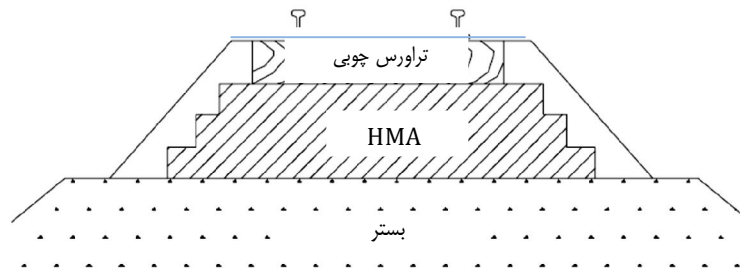
شکل ۳-۲ خطوط ترکیبی



شکل ۲-۴) خطوط تمام عمق با رویه آسفالتی<sup>۱</sup>

### ۲-۲-۲- نمونه‌ای از ساخت خطوط بتن آسفالتی با اهداف پژوهشی

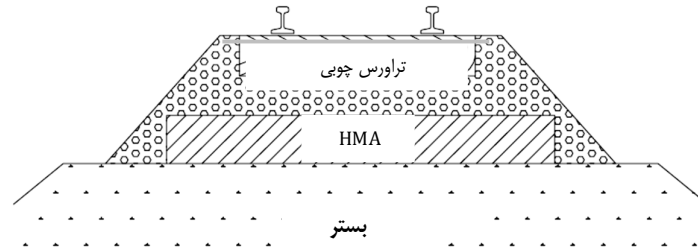
بررسی‌ها و آزمایش‌های میدانی وسیع، با هدف اجرای خطوط آسفالتی و ارزیابی و پایش عملکرد آن‌ها بر روی دو مقطع رولایه (شکل ۲-۵) و زیرلایه (شکل ۲-۶) توسط انجمن آسفالت و با همکاری دو نهاد دیگر<sup>۲</sup> انجام شده است [۳].



شکل ۲-۵) خطوط HMA از نوع رولایه

۱. لایه زیربلاست معمولاً در این خطوط اجرا نمی‌شود.

2. Asphalt Institute (AI), National Asphalt Pavement Association (NAPA) and University of Kentucky (UK)



شکل ۲-۶) خطوط HMA از نوع زیرلایه

دو مقطع نشان داده شده، طراحی و بر روی انواع بسترها با وضعیت‌های متفاوت ساخته شده و تحت شرایط ترافیکی مختلف قرار گرفتند. معیار طرح اختلاط مارشال مورد استفاده (بر اساس ۵۰ ضربه)، در جدول (۱-۲) آورده شده است. این طرح شبیه به مخلوط متداول بزرگراه و با حفرات بسیار کم و دانه‌بندی گسترده می‌باشد. همچنین حدود دانه‌بندی در تحقیقات، همان دانه‌بندی درشت‌دانه متراکم متداول برای HMA در بزرگراه‌ها، انتخاب شده است. این دانه‌بندی در جدول (۲-۲) ارائه شده است. مخلوط دانه‌بندی درشت‌دانه با هدف دستیابی به مخلوط نسبتاً پایدار خمیری و تقریباً نفوذناپذیر در برابر آب و هوا انتخاب شده است. حفرات این مخلوط در حد بسیار پایین نگه داشته شده‌اند. در این حالت، مخلوط به حجم زیاد قیر برای دستیابی به حفرات اندک نیاز ندارد. زمانی که میزان حفرات اندک است (حدود ۱ تا ۳ درصد) تراکم با غلتک‌های کوچک و کمترین تعداد عبور قابل دستیابی است. تراکمی بالغ بر ۹۵ درصد به‌منظور دستیابی به خواص مطلوب طولانی مدت، امری مهم و ضروری است. حفرات هوای پوشش HMA در محل احداث، یک پارامتر مؤثر در فرسایش خواص آسفالت به‌شمار می‌رود. اگر مخلوط آسفالتی بتواند در مقابل آب و هوا مقاومت کند، فرسایش آن تا حد چشمگیری کاهش می‌یابد. وجود لایه دانه‌ای بالاست، مانند یک لایه محافظ، باعث مقاومت افزوده‌ای در برابر فرسایش آسفالت می‌شود.

جدول ۲-۱. طرح اختلاط مارشال ASTM-1559 [۳]

مشخصات	بازه
تراکم (تکرار)	۱۵۰
پایداری	۳۳۷۵ kN
روانی (میلی متر)	۳/۸ تا ۶/۴
درصد حفرات هوا	۱ تا ۳
درصد حفرات پرشده	۸۰ تا ۹۰
تراکم در محل	٪۹۲ تا ٪۹۸

جدول ۲-۲. حدود دانه‌بندی برای مخلوط‌های آسفالتی در راه‌آهن [۳]

اندازه الک		درصد عبوری
۳۷/۵ mm		۱۰۰
۲۵ mm		۹۰-۱۰۰
۱۲/۵ mm		۷۰-۹۰
۴/۷۵mm	no. 4	۴۰-۶۵
۲ mm	no. 10	۲۵-۴۵
۰/۴۲ mm	no. 40	۱۰-۲۶
۰/۱۸ mm	no. 80	۶-۱۸
۰/۰۷۵ mm	no. 200	۳-۸
درصد قیر خالص <sup>۲</sup>		۴-۷

۱. متراکم‌کننده برشی غلظتی از ۵۰ گردش استفاده می‌کند.

۲. درصد قیر خالص از وزن کل مخلوط (AC-10,20 or 30)

### ۲-۳- طراحی ضخامت برای زیرسازی آسفالتی

روند طراحی ضخامت لایه‌ها در خطوط آسفالتی در دو نوع رولایه و زیرلایه، توسط دانشگاه کنتاکی توسعه پیدا کرده است. برنامه کامپیوتری کنتراک<sup>۱</sup> به‌همین منظور قابل استفاده می‌باشد. درباره این نرم‌افزار، نحوه عملکرد و سایر جزئیات مربوط به آن به تفصیل در فصل‌های بعد، اشاره شده است. در این قسمت به مطالعات میدانی و اجرایی در مورد تعیین ضخامت، که عمدتاً توسط انجمن آسفالت و دانشگاه کنتاکی صورت گرفته، پرداخته شده است. طرح زیرلایه در این مطالعات مطابق شکل (۲-۶) از سه لایه الاستیک شامل بالاست، HMA و بستر تشکیل می‌شود. در مورد اجرای لایه آسفالت توصیه می‌شود، پوشش آسفالتی نزدیک به ۰/۴۵ تا ۰/۶۱ متر از انتهای دو سمت تراورس، ادامه پیدا کند که در این صورت، طبیعتاً برای احداث یک راه‌آهن یک خطه پهنایی به میزان ۳/۳ تا ۳/۷ متر مورد نیاز است. این پهنای در موارد خاص ریلی مانند سوزن‌ها و تقاطع‌ها افزایش می‌یابد [۳].

عمدتاً در ساخت خطوط آسفالتی ضخامت لایه‌ها، بر اساس حجم ترافیک و وضعیت بستر که به نسبت پارامترهای با اهمیت‌تری هستند، طراحی می‌شود. در این بررسی‌ها ضخامت‌ها به‌منظور تعیین حداقل ضخامت مورد نیاز در حالت زیرلایه در خطوط تست ابزاربندی شده، عمداً تغییر داده شده‌اند. اگرچه این روش نسبتاً محافظه‌کارانه است، اما در صورت استفاده از نتایج آن و کسب تجارب بیشتر، قابل اصلاح و بهبود است. ضخامت‌های مختلف HMA و بالاست مورد استفاده در خطوط آسفالتی زیرلایه در گروه‌های مختلف ترافیک و وضعیت بستر در جدول (۲-۳) ارائه شده است. برای طراحی خطوط آسفالتی زیرلایه، یک مقدار حداقل برای ضخامت آسفالت توصیه می‌شود؛ چراکه به نظر عملی و اقتصادی نیست لایه HMA با ضخامت کمتر از ۷۵ میلی‌متر اجرا شود. حداقل ضخامت لایه آسفالت با ضعیف‌تر شدن بستر از نظر سختی، به منظور جبران ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. ضخامت‌های حداقل ۷۵ میلی‌متر برای بسترهای بسیار خوب، ۱۰۰ میلی‌متر برای بسترهای خوب تا نسبتاً خوب و ۱۵۰ میلی‌متر برای بسترهای ضعیف صرف‌نظر از میزان ترافیک انتخاب شده‌اند.

مقدار حداقل ضخامت بالاست به‌منظور حفظ کارایی تجهیزات نگه‌داری برای تنظیم هندسه خط، ۱۲۵ میلی‌متر توصیه می‌شود. ضخامت بالاست با افزایش سطح ترافیک عبوری، افزایش می‌یابد. جدول (۲-۴) برای ترکیب بستر ضعیف و ترافیک متوسط بیشترین ضخامت بالاست را نشان می‌دهد. این جدول ضخامت لایه HMA در خطوط آسفالتی رولایه برای گروه‌های مختلف ترافیک و وضعیت بستر را

نشان می‌دهد. حداکثر ضخامت آسفالت در این خطوط به ۴۵۷ میلی متر (۱۸ اینچ) محدود شده است. مطابق جدول (۲-۴) ساخت این خطوط بر روی بسترهای با وضعیت ضعیف مناسب نیست. دلیل این امر، محدود کردن ضخامت لایه آسفالتی در حد معقول و اجرایی است. طرح‌های ارائه شده در جداول بر اساس تعداد کل تکرار بار در طول عمر طرح تعیین شده‌اند.

جدول ۲-۳. ضخامت‌های طرح شده برای خطوط HMA زیرلایه [۱]

وضعیت بستر	ترافیک بر حسب میلیون تناژ عبوری سالیانه قطار (MGT)				
	سبک ۸ MGT	متوسط-سبک ۱۶ MGT	متوسط-سنگین ۳۲ MGT	سنگین ۴۸ MGT	
عالی CBR=20	TB	(۵) ۱۲۵	(۵) ۱۲۵	(۶) ۱۵۰	(۷) ۱۷۵
	TA	(۳) ۷۵	(۳) ۷۵	(۳) ۷۵	(۳) ۷۵
خوب CBR=10	TB	(۵) ۱۲۵	(۵) ۱۲۵	(۷) ۱۷۵	(۹) ۲۲۵
	TA	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰
متوسط CBR=5	TB	(۵) ۱۲۵	(۸) ۲۰۰	(۱۴) ۳۵۵	(۱۸) ۴۴۰
	TA	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰	(۴) ۱۰۰
ضعیف CBR=2	TB	(۱۷) ۴۳۲	(۲۴) ۶۱۰	۱-	-
	TA	(۶) ۱۵۰	(۶) ۱۵۰	-	-

ضخامت بالاست (TB) ضخامت HMA (TA) بر حسب mm و (in)

۱. به دلیل ضعف بودن بستر طراحی مناسب تحت بارگذاری وجود ندارد.

جدول ۲-۴. طرح‌های ضخامت برای خطوط HMA رولایه [۱]

وضعیت بستر	ترافیک بر حسب میلیون تناژ عبوری سالیانه قطار (MGT)			
	سبک ۸ MGT	متوسط - سبک ۱۶ MGT	متوسط - سنگین ۳۲ MGT	سنگین ۴۸ MGT
عالی CBR=20	(۶)۱۵۰	(۱۰)۲۵۰	(۱۳)۳۳۰	(۱۴)۳۵۵
خوب CBR=10	(۱۰)۲۵۰	(۱۳)۳۳۰	(۱۶)۴۰۱	(۱۸)۴۵۷
متوسط CBR=5	(۱۳)۳۳۰	(۱۷)۴۳۲	-	-
ضعیف CBR=2	-	-	-	-

## ضخامت HMA بر حسب mm و (in)

در خطوط زیرلایه، با توجه به گسیختگی ناشی از ترک کششی لایه آسفالتی، عمر طرح ۳۰ سال توصیه شده است. با این حال برای بستر تنها ۱۰ سال برای عمر طرح گسیختگی ناشی از تغییر شکل دائمی در نظر گرفته می‌شود؛ چراکه استفاده از عمر طراحی کوتاه‌تر در تغییر شکل‌های دائمی به دلیل تصحیح آن با اضافه کردن بالاست در طول فعالیت‌های نگهداری، به نظر منطقی‌تر می‌آید.

با توجه به عدم وجود بالاست در خطوط آسفالتی رولایه، عمر طرح ۳۰ سال، هم برای گسیختگی ناشی از ترک و هم برای گسیختگی ناشی از تغییر شکل دائمی توصیه می‌شود. خطوط مذکور از نظر تنش‌های موجود و کارکردشان تحت ترافیک و بارهای محوری سنگین به کمک اندازه‌گیری، بررسی شده‌اند. همچنین پروژه‌های متعددی در مورد طراحی، ساخت و اجرای این خطوط با توجه به افزایش نیاز در زمینه ارتقای خطوط موجود، در حال انجام است. نمونه‌ای از این اندازه‌گیری‌ها در خطوط آسفالتی، شامل اندازه‌گیری‌های تنش، تغییر شکل و مدول خط در این جا آورده شده است.



## ۲-۴- اندازه‌گیری تنش، تغییر شکل و مدول بستر در خطوط آسفالتی

اندازه‌گیری‌های تنش در سرعت‌های متداول و زیر بارگذاری سنگین و با تناژ عبوری بالا روی خطوط از نوع آسفالتی زیرلایه انجام شده است. برای این کار، فشارسنج‌های متعددی در قسمت‌های بالا و پایین لایه آسفالت نصب می‌شود. در این مطالعات فشار حداکثر در راستای زیر ریل، بر روی لایه آسفالت مشاهده شده است [۳]. بیشترین فشار دینامیکی روی پوشش آسفالتی، زیر بار لکوموتیو ۱۳۰ تنی (۱۲۷۰ kN) در بازه ۹۰ تا ۱۲۰ kPa اندازه‌گیری شد. بار چرخ این لکوموتیوها به‌طور میانگین ۱۶ تن است. در مورد واگن‌های خالی با وزن تقریبی ۲۸ تن، فشار وارده به پوشش آسفالتی به ۱۵ تا ۳۰ kPa کاهش یافت. عملکرد تیری خط، که باعث توزیع بار چرخ متمرکز بین تراورس‌های متعدد می‌شود و لایه بالاست با مدول بالا، به‌طور مؤثر به کاهش بار سنگین چرخ کمک می‌کنند.

برای مقایسه، اگر فردی با وزن ۸۲ کیلوگرم روی یک سطح بایستد، فشاری در حدود ۴۰ kPa ایجاد می‌کند. همچنین روی سطح آسفالت تحت بار چرخ یک کامیون با بار، به‌طور میانگین فشاری در بازه ۷۰۰ تا بیش از ۱۴۰۰ kPa بر اساس شرایط بارگذاری و وضعیت لاستیک‌ها ایجاد می‌شود. در بستر خطوط ریلی و سطح تماس آن با لایه آسفالتی فشار وارده به ۳۵ تا ۵۰ kPa کاهش می‌یابد [۴]. تغییر شکل‌های دینامیکی ریل زیر لکوموتیو ۱۳۰ تنی (۱۲۷۰ kN) و واگن‌های بارگذاری شده، به‌طور میانگین ۶ میلی‌متر برای خطوط با تراورس چوبی و ۱ میلی‌متر برای خطوط با تراورس بتنی اندازه‌گیری شدند که این مقادیر برای هر دو نوع روسازی مقادیر بهینه و قابل قبولی هستند.

مقادیر مدول دینامیکی محاسبه شده خط به‌طور میانگین ۱۷ MPa برای خطوط با تراورس چوبی و ۵۲ MPa برای خطوط با تراورس بتنی است که مقادیر بهینه‌ای هستند. تغییر شکل خط با تراورس بتنی به مراتب کمتر است و به‌همین دلیل سختی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این مسئله باعث افزایش فشار داخلی بالاست می‌شود. بالاست موجود در این نوع از خطوط باید از نظر مقاومت برشی تقویت شود تا قابلیت کاهش فشارهای وارده را دارا باشد. بنابراین بالاست موجود در خط باید به‌طور مناسب از پخش‌شدگی محافظت شود. مدول بالای لایه آسفالت در خطوط با تراورس بتنی، شرایط تکیه‌گاهی و محصورشدگی بیشتری را برای بالاست فراهم می‌کند.

## ۲-۵- اجرای خطوط آسفالتی در کشورهای مختلف

خطوط بتن آسفالتی به صورت کاربردی و به عنوان یک لایه زیرسازی خطوط ریلی برای اولین بار در اوایل سال ۱۹۸۰ در راه آهن ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از HMA در راه آهن، با توجه به رشد روزافزون حجم ترافیک و بار محوری خطوط جدید، تحول بزرگی در کیفیت خطوط ریلی و عمر بهره‌برداری آن‌ها ایجاد کرده است. این لایه بیشتر برای تقویت خطوط باری سنگین<sup>۱</sup> در ایالات متحده و برای خطوط پرسرعت در سایر کشورها مورد توجه قرار گرفته است. خطوط آسفالتی توسعه یافته در ایالات متحده به سه بخش کلی زیرلایه، ترکیبی و ترکیبی بدون بالاست تقسیم می‌شوند [۲]. توضیحات و تصاویر مربوط به این خطوط در بخش قبل ارائه گردید.

## ۲-۵-۱- کارکردهای خطوط آسفالتی در ایتالیا

کشور ایتالیا از خطوط آسفالتی در مسیرهای پرسرعت بهره برده است. شبکه ریلی پرسرعت ایتالیا شامل دو مسیر شرق به غرب و شمال به جنوب است که مسیری با طول بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر را شامل می‌شود. شکل (۲-۷) نقشه این خطوط ریلی را نشان می‌دهد. در این میان، مسیر اصلی و پرسرعت رم-فلورنس<sup>۲</sup> که در شکل (۲-۷) با خط چین مشخص شده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ساخت این خط در سال ۱۹۷۰ شروع شد. در طول ساخت، شرکت متصدی احداث خط، حداقل ظرفیت باربری مورد نیاز برای پشتیبانی بالاست در سراسر خطوط پرسرعت را ۱۸۰MPa محاسبه نمود. برای دستیابی به این مهم، دو نوع مصالح شامل دال خط بتنی و خطوط بتن آسفالتی پیشنهاد شدند. با مقایسه مصالح دو گزینه اجرایی و با توجه به حفظ پارامترهای مربوط به سنگدانه‌ها در خطوط بتن آسفالتی، عملکرد بهتر خطوط آسفالتی نسبت به گزینه دال خط مشاهده شد. این شرکت به دلیل برآورده شدن کارکردهای زیر توسط زیرلایه آسفالت، گزینه زیرسازی آسفالتی را برای تمام طول این مسیر انتخاب کرد [۵]:

-جلوگیری از نفوذ آب باران به لایه‌های زیرین خاک

-حذف تمرکز تنش و گسیختگی ناشی از آن در خاکریزها

-محافظت از قسمت فوقانی خاکریز در برابر چرخه‌های ذوب و یخ زدگی آب یا رطوبت موجود

-توزیع تدریجی تنش‌های استاتیکی و دینامیکی ناشی از بار قطار

1. Heavy tonnage freight

۲. موسوم به Direttissima

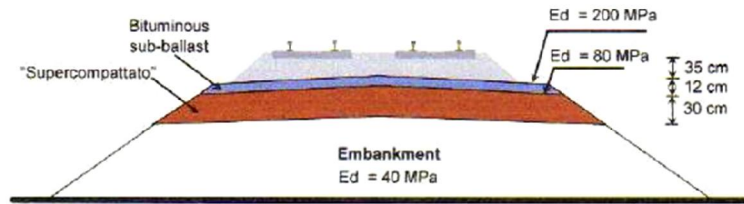
- حذف آلودگی بالاست با حذف سایش دانه‌های بالاست به وسیله بستر و یا نفوذ ریزدانه‌های بستر به بالاست



شکل ۲-۷) نقشه خطوط ریلی ایتالیا

شکل (۲-۸) مقطع عرضی خطوط پرسرعت ایتالیا را نشان می‌دهد که یک سیستم چند لایه شامل خاکریز، زیرلایه فوق متراکم<sup>۱</sup>، آسفالت به‌عنوان زیربلاست، تراورس و ریل است. قسمت زیرین خاکریز مقطع، از مصالح با ضخامت کمتر از ۰/۵ متر و با حداقل ظرفیت باربری<sup>۲</sup> ۴۰ مگاپاسکال تشکیل شده است. این مصالح به‌وسیله روش‌های تراکم ایستایی و لرزشی، متراکم می‌شوند. به منظور اطمینان از تراکم مناسب، مطابق نظر نهاد کنترل کیفیت ایتالیا، تست‌هایی روی هر ۲۰۰۰ متر مربع از خاکریز انجام می‌شود.

1. Supercompattato  
2. EV2



شکل ۲-۸) مقطع عرضی خطوط پر سرعت ایتالیا

سپس لایه فوق متراکم با ضخامت محدود ۳۰ cm با حداقل مدول بستر ۸۰ MPa مطابق شکل (۹-۲) بر روی خاکریز اجرا می‌شود. لایه فوق متراکم، لایه‌ای مستحکم با قابلیت مقاومت در برابر بارهای تکراری وارده از سوی قطارهای پرسرعت است، که به منظور کمک به انحراف و جلوگیری از آب‌های سطحی، نشست‌ناپذیر می‌باشد. این لایه شامل مخلوطی از شن و ماسه بوده و با شیب ۳/۵ درصد اجرا می‌شود.



شکل ۲-۹) بستر فوق متراکم در کنار لایه آسفالتی

لایه زیربالات آسفالتی بالای لایه فوق متراکم، از مخلوط آسفالت با حداکثر اندازه سنگدانه ۰/۲۵cm و ضخامت تمام شده ۱۲cm تشکیل می‌شود. عرض این لایه در یک مسیر دوخطه، در سراسر

خط حدود ۱۴ متر است [۶]. لایه زیربالاست آسفالتی به منظور مقاومت در برابر بارگذاری تکراری ترافیک عبوری و کاهش تنش‌ها روی خاکریز، باید دارای حداقل مدول ۲۰۰ MPa باشد. لایه آسفالتی با کارکرد زیربالاست دارای قابلیت توزیع نیرو بوده و یک لایه نفوذناپذیر را تشکیل می‌دهد که باعث کاهش اثرات چرخه ذوب و انجماد می‌شود. این لایه مزایای متعددی را فراهم می‌کند که راه‌آهن ایتالیا از آن به عنوان برتری‌های خطوط آسفالتی در مقابل خطوط بالاستی یاد می‌کند که بخشی از آن‌ها در اینجا اشاره شده است:

- افزایش ایمنی و قابلیت اعتماد با توجه به افزایش سختی و یکنواختی در طول خط
- کاهش هزینه چرخه عمر<sup>۱</sup> در زیرساخت خطوط با توجه به کاهش خستگی بستر
- محصورشدگی مناسب بالاست
- کاهش آلودگی بالاست به دلیل تقویت زهکش
- کاهش ضخامت کل خط در مقایسه با خطوط بالاستی مرسوم

مطابق شکل (۲-۱۰) لایه زیربالاست آسفالتی توسط ماشین‌های استاندارد پخش آسفالت، اجرا و سپس با غلتک‌های لرزشی تا ۹۸٪ متراکم می‌شوند. مخلوط‌های آسفالتی در این خطوط، با استانداردهای طراحی مارشال تهیه می‌شوند. تست‌های مربوط به ارزیابی صحت مشخصات مخلوط آسفالتی در هر ۱۰۰۰۰ متر مربع به منظور کنترل کیفیت، انجام می‌شوند. همچنین پاسخ دینامیکی خط با استفاده از تجهیزات کرنش‌سنج با بار افتان، با ۳ تست در هر ۱۰۰ متر، مطابق (شکل ۲-۱۱) بررسی می‌شود. در پایان این مطالعات، راه‌آهن ایتالیا استفاده از این خطوط را برای تمام مسیرهای ریلی پرسرعت انتخاب نمود. با تکمیل خطوط پرسرعت شمال-جنوب و شرقی-غربی شبکه خطوط پرسرعت ایتالیا در دسامبر ۲۰۰۹، این کشور در حال حاضر دارای بیش از ۱۲۰۰ کیلومتر از خطوط آسفالتی از نوع زیرلایه می‌باشد.



شکل ۲-۱) پخش لایه آسفالت توسط ماشین‌های استاندارد پخش آسفالت و تراکم آن



شکل ۲-۱۱) بررسی پاسخ دینامیکی خط

## ۲-۵-۲- کاربرد های خطوط آسفالتی در ژاپن

راه‌آهن ملی ژاپن به‌طور گسترده از زیرسازی آسفالتی در خطوط پرسرعت و عادی بهره می‌برد. توجه عمده در استفاده از آسفالت، روی فراهم نمودن یک اساس مستحکم برای بالاست و کاهش نامنظمی‌های خط معطوف شده است که این مسئله منجر به کاهش سطح بار اعمالی روی بستر به‌منظور

جلوگیری از تغییر شکل آن می‌شود. به این منظور در این کشور یک طرح استاندارد بر اساس عملکرد، توسعه پیدا کرده است. این استاندارد عمر خستگی را به صورت تابعی از تعداد عبور قطار در نظر می‌گیرد. بنابراین روش مذکور، به طراحان این امکان را می‌دهد تا بر اساس تأمین شرایط اجرایی مورد نیاز، ضخامت خطوط آسفالتی را طراحی کنند [۷].

روند طراحی بر اساس اجرا، سه نوع طرح استاندارد خط به شرح ذیل را ارائه می‌کند:

- اجرای نوع (۱): زیرسازی‌های بتنی یا آسفالتی برای خطوط بدون بالاست
  - اجرای نوع (۲): زیرسازی آسفالتی برای خطوط بالاستی
  - اجرای نوع (۳): زیرسازی با مصالح دانه ای برای خطوط بالاستی
- خطوط با اجرای نوع (۱) خطوط دال خط بتنی، شامل یک لایهٔ اساس آسفالتی یا بتنی هستند که در آن‌ها تراورس‌های بتنی مستقیماً روی دال بتنی نصب می‌شوند. این نوع خطوط به عنوان خط با بالاترین کیفیت در نظر گرفته می‌شوند که از نظر نشست خط، گسیختگی دال آرما توری بندگی شده، گسیختگی ناشی از خستگی، افت و تنش‌های حرارتی کنترل می‌شوند. ابعاد متداول برای خطوط آسفالتی بدون بالاست با اجرای نوع (۱) شامل موارد زیر است:

- عرض دال خط ۲۲۲۰ میلی‌متر
- ضخامت دال بتنی ۱۹۰ میلی‌متر
- ضخامت اساس آسفالتی یا بتنی ۱۵۰ میلی‌متر
- ضخامت لایه با مصالح دانه‌ای سنگ شکسته با دانه‌بندی مناسب ۱۵۰ میلی‌متر

طرح خطوط با عملکرد نوع (۲)، خطوط بالاستی با آسفالت به ضخامت ۵۰mm هستند. این طراحی به دلیل توانایی آسفالت در توزیع نیرو و تسهیل زهکشی، در طی ۳۰ سال اخیر در کشور ژاپن استفاده می‌شود. از ملاحظات عمده در طراحی بر اساس عملکرد، نشست خط و آسیب ناشی از خستگی آسفالت می‌باشند.

- ضخامت بالاست از زیر تراورس ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر
  - ضخامت لایهٔ بتن آسفالتی ۵۰ میلی‌متر
  - مصالح سنگ شکسته با دانه بندی خوب ۶۰۰-۱۵۰ میلی‌متر
- خطوط با عملکرد نوع (۳) شبیه به خطوط بالاستی متداول در سراسر دنیا هستند.

## ۲-۵-۳- کارکردهای بتن آسفالتی در آلمان

راه‌آهن آلمان در طول ۳۰ سال گذشته به‌منظور حفظ و بهبود عملکرد خطوط به‌طور مداوم در حال توسعه و پیشرفت بوده است. در خطوط پرسرعتی که اخیراً ساخته شده‌اند، سرعت بهره‌برداری معادل ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت راه‌اندازی شده است. به دنبال پیشرفت‌های بوجود آمده در زیرساخت‌های خطوط ریلی، راه‌آهن آلمان (DB) سیاست جایگزینی خطوط بالاستی با گزینه‌هایی با هزینه نگهداری کمتر و حفظ منابع طبیعی را اتخاذ نمود. سرانجام دال خط بدون بالاست به‌عنوان گزینه معقول در خصوص خطوط جدید پرسرعت انتخاب شد. هدف در ساخت دال خط بدون بالاست، حفظ ساختار خط با خاصیت ارتجاعی مستقل از سختی ساختار خط است. در کشور آلمان در حال حاضر خطوط آسفالتی بدون بالاست موسوم به گترک<sup>۲</sup> متداول‌ترین نوع خطوط آسفالتی مورد استفاده هستند.

سیستم گترک آلمان، از لایه آسفالتی و تراورس‌های قفل شده به آسفالت تشکیل می‌شود. این سیستم شامل دو نوع طرح متفاوت A1 و A3 است. شکل (۲-۱۲) نشان‌دهنده مقطع متداول گترک A1 روی خاکریز با حداقل مدول ارتجاعی ۱۲۰ MPa است.

هر دو نوع گترک به استثنای مقطع تراورس و ضخامت آسفالت ابعاد یکسانی دارند. مقطع گترک A1 از تراورس‌های استاندارد بتنی پیش‌تنیده با طول ۲/۶ متر استفاده می‌کند؛ در حالی که نوع A3 از تراورس‌های پیش‌تنیده ۲/۴ متری که تا حدودی دارای پهنای بیشتری هم هستند، استفاده می‌کند. شکل (۲-۱۲) مقطع گترک A1 و ابعاد مربوطه را نشان می‌دهد.

گترک نوع A1 در شرایط عدم وجود محدودیت از نظر فضا می‌تواند استفاده شود، در حالی که طرح گترک A3 بیشتر برای فضاهای تنگ مانند تونل‌ها استفاده می‌شود. به‌علاوه تراورس‌های مورد استفاده در خطوط A3 از سطح باربری بالاتری برخوردارند که فشار واحد تماسی بین تراورس و آسفالت را کاهش می‌دهد. به‌همین دلیل ضخامت آسفالت در این خطوط ۵ cm کاهش داده شده است. این کاهش در ارتفاع تمام شده مقطع، قابلیت بهبود خطوط در تونل‌های موجود توسط گترک A3 را افزایش می‌دهد [۸].

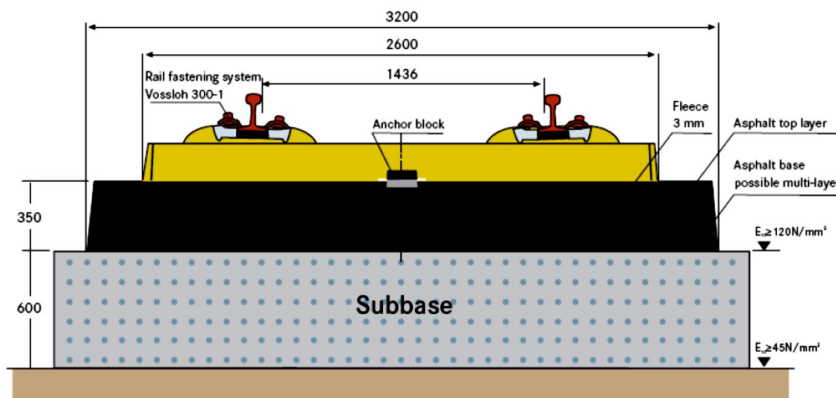
لایه زیرسازی آسفالتی می‌تواند بر روی یک زیرلایه زهکش HBL<sup>۳</sup> قرار گیرد که در این صورت مطابق شکل (۲-۱۳) ضخامت مقطع تمام شده ۵ cm افزایش پیدا می‌کند. این لایه در صورت در

1. Deutsche Bundesbahn  
2. Getrac  
3. Hydraulically Bound Layer

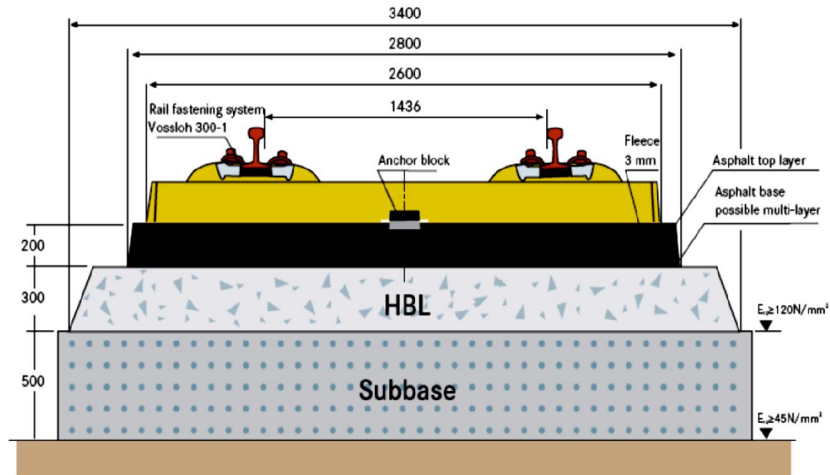


دسترس بودن مصالح آن می‌تواند با کاهش ضخامت لایه آسفالتی، در مجموع، هزینه ساخت خط را کاهش دهد. اهمیت طرح گترک، توانایی ساختار خط در حفظ مناسب راستا، به ویژه در خطوط پرسرعت مسافری می‌باشد. سیستم گترک به کمک بست‌های بتنی<sup>۱</sup> با مقاومت بالا که تراورس‌های بتنی را به صورت ارتجاعی به لایه آسفالتی متصل می‌کند، می‌تواند به طور مناسب راستای خط را حفظ کند. این بست‌ها مطابق شکل (۲-۱۴) به نحوی طراحی می‌شوند تا بدون نیاز به بالاست، نیروهای طولی و جانبی را به لایه آسفالتی منتقل کنند. از مزایای سیستم گترک می‌توان به نصب سریع و آسان آن، پایداری طولانی مدت هندسه خط، چرخه عمر طولانی به همراه کاهش نگهداری و بازسازی سریع بعد از سانحه اشاره کرد [۹].

با توجه به مزایای مذکور، به طور گسترده از گترک برای بهبود تونل‌های موجود در خطوط پرسرعت استفاده می‌شود. برای ارتقای کیفیت تونل‌های موجود، ابتدا خط قدیمی به کلی برداشته شده و بستر خاکریز با مصالح پر می‌شود و سپس مطابق شکل (۲-۱۵) آسفالت بر روی آن پخش می‌شود. بعد از سوراخ‌کاری لایه آسفالتی برای نصب بست‌ها، نصب تراورس‌های بتنی و بست‌ها مطابق شکل (۲-۱۶) انجام می‌شود. شکل (۲-۱۷) نمایی از ساختار نهایی خط پس از احداث را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۲) مقطع متداول خطوط گترک A1



شکل ۲-۱۳) مقطع ژنترک A1 با لایه HBL



شکل ۲-۱۴) بست بتنی قطعات



شکل ۲-۱۵) پخش پوشش آسفالتی در تونل



شکل ۲-۱۶) نصب تراورس‌های بتنی



شکل ۲-۱۷) نمایی از ساختار نهایی خط گترک پس از تکمیل مراحل احداث<sup>۱</sup>

#### ۲-۵-۴- کاربرد بتن آسفالتی در فرانسه

شبکه ریلی پرسرعت فرانسه در حال حاضر دارای بیش از ۱۸۰۰ کیلومتر راه‌آهن دو خطه با حداکثر سرعت بهره برداری ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. این خطوط که به خطوط پرسرعت TGV معروفند به رکورد جدیدی از سرعت قطار با ثبت ۵۷۴ کیلومتر بر ساعت دست یافتند. راه‌آهن ملی فرانسه (SNCF) بر روی همین خطوط خط تست ۳ کیلومتری شامل لایه زیربلاست آسفالتی را با اهداف تحقیقاتی، احداث نموده است. راه‌آهن فرانسه با انجام بررسی‌های فنی و تست‌های میدانی و آزمایشگاهی فراوان در حال ارزیابی این خطوط و ایجاد زمینه برای استفاده از این خطوط در راه‌آهن پرسرعت فرانسه در آینده نزدیک است.

مقطع خطوط سنتی شامل ۳۰cm بالاست روی ۲۰cm زیربلاست است که روی ۵۰cm سنگدانه آهکی قرار گرفته‌اند. در مقابل مقطع زیرسازی آسفالتی، زیربلاست دانه‌ای و لایه سنگدانه آهکی با ضخامت ۵۰cm را حذف نموده و زیربلاست آسفالتی با ضخامت ۱۴cm و یک لایه اصلاحی ۲۰cm را با آن جایگزین نموده است. به این ترتیب ضخامت کلی مقطع ۳۶cm کاهش می‌یابد که باعث کاهش مصالح مصرفی در حدود ۵۰۰۰ مترمکعب در هر کیلومتر از خط می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای است [۱۰].

1. Brandleite Tunnel

مقطع آزمایشی ابتدا با تراکم لایه اصلاحی ۲۰cm به همراه پوشش سطحی قیر به نسبت ۱/۵ کیلوگرم بر متر مربع و با عرض ۱۴/۵ متر که با مصالح ریزدانه پوشانده شده، ساخته می‌شود. هدف از پوشاندن سطح، در امان ماندن لایه اصلاحی از ماشین‌آلات ساخت و تقویت زهکشی خط در برابر ناملايمات جوی است.

سپس لایه آسفالتی با پهنایی بیش از ۱۰/۷ متر در دو بخش ۵/۳۵ متری با تراکم ۹۶ درصد، مطابق شکل (۲-۱۸) اجرا می‌شود. لایه آسفالتی با یک لایه قیر مایع با نرخ ۰/۸ کیلوگرم بر متر مربع و با سنگدانه‌های ریزدانه و ماسه پوشانده می‌شود [۱۰].



شکل ۲-۱۸) اجراء و تراکم لایه آسفالتی

## ۲-۵-۵- کارکرد بتن آسفالتی در اسپانیا

شبکه ریلی پرسرعت اسپانیا در حال حاضر ۱۶۰۰ کیلومتر راه‌آهن دو خطه با حداکثر سرعت بهره‌برداری ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و ۲۰۰۰ کیلومتر خط در حال احداث و ۲۰۰۰ کیلومتر دیگر در مرحله طراحی را شامل می‌شود. راه‌آهن اسپانیا در حال انجام مطالعات گسترده در خطوط تحقیقاتی به‌منظور استفاده از گزینه آسفالتی زیرلایه در خطوط جدید پرسرعت می‌باشد. طرح ساختاری که به ساخت این خطوط در مرحله مطالعات کمک کرد شامل لایه زیربالاست آسفالتی به ضخامت ۱۲ تا ۱۴ سانتی‌متر روی یک لایه سخت با حداقل ضخامت ۳۰cm می‌باشد که بر روی بستری با حداقل مدول ۸۰ مگاپاسکال قرار گرفته است.

## ۲-۶- ارزیابی خطوط آسفالتی در مقایسه با خطوط بالاستی سنتی

در طی حدود چهار دهه از شروع کاربرد لایه آسفالت در خطوط ریلی، تست‌های عمدتاً میدانی متعددی در ارتباط با استفاده از این ماده، ارزیابی خصوصیات و مقایسه آن با روش‌های زیرسازی سنتی انجام گرفته است. نتایج این بررسی‌ها تا حد زیادی به انتخاب سیستم‌های نوین و کارآمدتر در زمینه زیرساخت‌های خطوط ریلی به‌منظور ارتقای سطح کیفی خطوط ریلی کمک می‌کند. در ادامه نتایج این تحقیقات در دو زمینه ارزیابی عملکرد و برآورد هزینه بررسی شده‌اند. همچنین بر اساس تحقیقات مربوطه و اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دانشگاه کنتاکی و انجمن آسفالت مزایای متعددی در کوتاه مدت و درازمدت معرفی شده است.

## ۲-۶-۱- ارزیابی عملکرد خطوط آسفالتی

این بررسی‌ها در دو زمینه هندسه خط و سایش سازه خط به‌منظور ارزیابی عملکرد کلی خط، انجام شده‌اند. مشاهدات حاصل شامل موارد زیر هستند [۱]:

- آلودگی بالاست به نسبت از سمت بالا نشأت می‌گیرد و به سمت پایین گسترش می‌یابد.
  - آلودگی بالاست در هنگامی که میزان بارندگی کافی باشد، خود به خود کاهش می‌یابد.
  - بالاست قفل شده به لایه آسفالتی یک راستای پایدار در قوس‌های افقی فراهم می‌کند.
- طرح زیرلایه HMA یک مدول خط یکنواخت برای خط ریلی فراهم کرده و بستر را در برابر نفوذ آب مقاوم می‌کند. همچنین نگهداری به حداقل رسیده و در هر دو نوع خط زیرلایه و رولایه مسئله تقلیل سرعت حذف می‌شود.
- ارزیابی‌های مکرر روی هندسه خط، شامل راستای افقی و عمودی، نشانگر نتایج بسیار مناسبی از این خطوط هستند. در نمونه‌برداری‌های خطوط زیرلایه ملاحظه شده که بالاست در بارگذاری‌های اولیه ترافیک، به‌خوبی با مخلوط آسفالتی درگیر می‌شود. این موضوع اگرچه یک یافته مهم تلقی می‌شود، اما در مراحل اولیه طراحی خطوط زیرلایه پیش‌بینی نشده بود. همچنین ارزیابی‌های وسیعی در زمینه درصد رطوبت و وضعیت تراکم صورت گرفته است. نتایج دو دهه تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهد در طرح آسفالتی زیرلایه، درصد رطوبت در بازه  $\pm 2$  درصد رطوبت بهینه، باقی می‌ماند.
- با توجه به این درصد رطوبت نسبتاً ثابت، ملاحظات باید به طراحی با CBR در رطوبت بهینه به جای اشباع معطوف شود. این موضوع مطابق جدول (۲-۳) و جدول (۲-۴) به‌طور مؤثر باعث کاهش ضخامت خط می‌شود.

افزایش عمر خط به‌ویژه در نواحی با عملیات نگهداری بالا و بارهای سنگین، مانند تقاطعات همسطح دوخطه قابل ملاحظه بوده و خطوط زیرلایه عمر ساختار خط را بیش از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهند. در این خطوط، در طول مدت بهره‌برداری تمام مصالحی که باید تصحیح یا تعویض شود به ۲۰ سانتی‌متر بالاتر فوقانی محدود می‌شود.

در حال حاضر خطوط سنگین، پرسرعت، تقاطعات همسطح دو خطه و نواحی انتقال متعددی در نقاط مختلف دنیا، به این روش ساخته و یا در دست ساخت هستند.

### ۲-۶-۲- ارزیابی اجرای خطوط آسفالتی از نظر اقتصادی

در جدول (۲-۵) برآورد هزینه دو طرح خطوط بالاستی و آسفالتی زیرلایه، در شرایط یکسان مقایسه شده است. مقادیر ارائه شده بیشتر نشانگر تمایز هزینه مصالح مصرفی هستند؛ بنابراین موارد مطرح شده با توجه به محل پروژه و منابع موجود برای تأمین مصالح متغیر هستند. هزینه اضافه بر ساخت خطوط بالاستی، در صورت اجرای صحیح خطوط آسفالتی حداکثر ظرف مدت ۷ سال و در اکثر موارد کمتر از ۶ ماه جبران می‌شود. تخمین هزینه ساخت و بازسازی در نواحی مختلف امری دشوار است. هزینه مصالح ممکن است با توجه به دسترسی محلی و میزان فراهم بودن مصالح متفاوت باشد. به‌عنوان مثال راه دسترسی ماشین‌آلات باری سنگین با توجه به کاهش دمای مخلوط آسفالتی، امری حیاتی به‌منظور اجرای HMA روی یک خط موجود محسوب می‌شود. بالاست باید همراه با تجهیزات مربوط به ساخت، به‌طور مداوم به محل ساخت منتقل شود. در مقایسه با هزینه‌های تغییرات، هزینه اولیه عامل عمده و تعیین‌کننده به حساب نمی‌آید، بلکه این هزینه تعمیرات و نگهداری است که طرح زیرلایه را به یک طرح مورد قبول و مطلوب مبدل می‌سازد. با توجه به این واقعیت که عمدتاً لایه آسفالت در بسترهای مسئله‌دار کاربرد دارد، روی بستر خطوط تست بالاستی، لایه ژئوتکستایل اجرا شده است. این لایه برای تقویت بستر و زیرسازی کاربرد دارد و در خطوط آسفالتی استفاده نمی‌شود.

جدول ۲-۵. مقایسه هزینه ساخت خطوط جدید و خطوط بالاستی به دلار [۱]

روش/مصالح	بالاستی	آسفالتی زیرلایه
ریل	۱۳۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰
تراورس	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
سایر تجهیزات روسازی	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰
تنظیم سطح و راستا، ۲ طرف	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
زیربالاست-۱۵۰mm	۳۴۰۰۰	-
۱۰۰mm-HMA	-	۵۹۲۰۰
بالاست-۲۰۰mm	۲۴۰۰۰	۲۴۰۰۰
ژئوتکستایل- $۶۱۲\text{g}/\text{m}^2$	۱۵۸۰۰	-
جمع کل (\$)	۳۶۳۰۰۰	۳۷۲۷۰۰

## ۲-۷- جمع‌بندی و نکات حائز اهمیت

بر اساس مطالعات و تحقیقات گسترده میدانی بر روی خطوط آسفالتی، فارغ از کیفیت روسازه و یا هزینه‌های نگهداری خاص یک نقطه، مزایای کوتاه‌مدت استفاده از خطوط زیرلایه موارد زیر را شامل می‌شود:

- کاهش فعالیت‌های مرتبط با بالاست و چرخه‌های تصحیح هندسه خط
- کاهش استهلاک تراورس و صفحه تراورس
- کاهش بازسازی‌های ویژه خطوط بالاستی، جایگزینی بالاست و سرند آن به‌منظور کاهش آلودگی
- در مورد هزینه‌های بهره‌برداری طولانی‌مدت، نگهداری ساختار بستر خطوط ریلی با توجه به بهبود ظرفیت عملیاتی حرکت قطارها، باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. داده‌ها و نتایج بدست آمده از ارزیابی عملکرد خطوط آسفالتی نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های نگهداری در این خطوط است. مزایای خطوط آسفالتی با توجه به این موضوع، شامل موارد زیر است:
- افزایش سرعت و امنیت بهره‌برداری با توجه به وضعیت مناسب هندسه خط
- افزایش مرتبه تناژ برای یک قدرت کشش مشخص
- کاهش تداخلات مربوط به نگهداری با بهره‌برداری



- کاهش تقلیل سرعت‌ها و سایر محدودیت‌ها

از مزایای اولیه وجود لایه HMA، می‌توان به تقویت توزیع بار روی بستر، بستر محصور و مقاوم در برابر آب، محصورشدگی بالاست و فراهم شدن یک ظرفیت باربری پایدار و یکنواخت اشاره نمود. اثرات ضد آب بودن بستر به‌طور خاص از اهمیت بالایی برخوردار است. لایه HMA به‌دلیل نفوذناپذیری اساساً از نوسانات رطوبت بستر جلوگیری می‌کند، که به‌طور مؤثر زیرسازی خط را بهبود می‌بخشد. به‌علاوه ماده HMA بدون افزایش چشمگیر سختی در زیرساخت خط، باعث جداشدن لایه بستر از بالاست می‌شود که این مسئله از سایش دانه‌های بالاست توسط بستر، نفوذ آلودگی و پدیده پمپ‌شدگی جلوگیری می‌کند.

سازه خط به‌دست آمده، دارای قابلیت افزایش ظرفیت بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های نگهداری است که باید در منافع درازمدت راه‌آهن و شرکت‌های حمل و نقل ریلی در نظر گرفته شود. در نهایت اجرای خطوط آسفالتی مستلزم توجه به دو نکته مهم می‌باشد که لازم است برای افزایش بازدهی عملکرد و کارامدی این خطوط، رعایت شوند [۱۱].

۱- این خطوط باید با کیفیتی اجرا شوند که نیاز به بازسازی و اصلاح هندسه خط را برطرف نمایند؛ چراکه هزینه این عملیات در صورت نیاز، در خطوط آسفالتی به‌خصوص خطوط آسفالتی فاقد بالاست، به نسبت بیشتر است.

۲- ضخامت لایه‌ها و اجرای این خطوط باید به‌نحوی باشد که میزان کاهش مقاومت جانبی و طولی به‌خصوص در خطوط رولایه در محدوده مجاز باشد.

۲-۸- منابع و مراجع

- [1] Design, construction and performance of Hot Mix Asphalt For Railway Trackbeds, 1<sup>st</sup> world conference of asphalt pavements-Sydney, Australia, Jerry G.Rose, M.J.Hensley.
- [2] Utilization of asphalt/bituminous layers and coatings in railway Trackbeds – a compendium of international applications, Jerry G. Rose Paulo Fonseca Teixeira, Nathan E. Ridgway, proceedings of the 2010 Joint Rail Conference JCR2010 April 27-29, 2010, Urbana, Illinois, USA
- [3] Rose, J., Li, D., and Walker, L. (2002) Tests and Evaluations of In-Service Asphalt Trackbeds. Proceedings of the American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2002 Annual Conference & Exposition, September, 30 pp.
- [4] Li, D., Rose, J.G., and LoPresti, J. (2001) Test of Hot-Mix Asphalt Trackbed over Soft Subgrade under Heavy Axle Loads. Technology Digest-01-009, Assoc. of American Railroads, April, 4 pp.
- [5] Buonnano, A. (2000) The Use of Bituminous Mix Subballast in the Italian State Railways. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona.
- [6] Teixeira, P.F., P. A. Ferreira, A. López Pita, C. Casas, A. Bachiller (2009). The Use of Bituminous Subballast on Future High-Speed Lines in Spain: Structural Design and Economical Impact. International Journal of Railway, vol. 2, no. 1, pp.1-7, 2009. ISSN 1976-9067
- [7] Momoya, Y. (2007) New Railway Roadbed Design. Railway Technology Avalanche, December, pp. 118.
- [8] Freudenstein, S. (2005) Modifications to Getrac Ballastless Track Approved. IRJ March, 2005.
- [9] Freudenstein, S. (2007) Renewal of Brandeite Tunnel with Getrac Ballastless Track System on Asphalt. RTR Special, 2007.
- [10] Bitume Info (2005) Sous Les Rails, le Bitume. No 10, October, 2005.

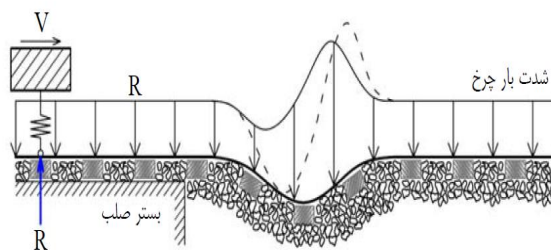
[۱۱] ژئوتکنیک راه‌آهن و مدیریت زیرسازی، سلیگ، واتر. ترجمه دکتر مرتضی اسماعیلی، مهندس نیما بلوکیان،

انتشارات دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۹.

## « فصل سوم »

### تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی

عملکرد بهینه خط با ایجاد تعادل بین هزینه مصالح اجرایی در کوتاه‌مدت و هزینه ناشی از تعمیر و



نگهداری در درازمدت قابل ارزیابی

است. بنابراین طراحی ضخامت

لایه‌ها باید به نحوی انجام شود تا

در وهله اول، اجزای خط از

فشارهای ناشی از بار محوری در

امان مانده و در ادامه با توجه به

ترافیک عبوری و گسیختگی ناشی از تکرار بارگذاری تا مدت زمان قابل قبولی دچار گسیختگی ناشی از

خستگی نشوند. بدین منظور، نیاز به تحلیل سازه خط تحت فشارهای ناشی از بارگذاری، از دیرباز یکی از

مسائل مهم در تحلیل و طراحی سازه‌های ریلی به‌شمار می‌رود. در این فصل سعی شده تا با ارائه شرح

مختصری بر انواع روش‌ها و مدل‌های تحلیل زیرسازی خطوط در ابتدا و تمرکز بیشتر به روش

مدل‌سازی کنتراک در ادامه، آشنایی با تئوری‌های مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها و نقش لایه آسفالتی در

تغییر معیارهای طراحی حاصل شود.

## ۳-۱- مقدمه

قریب به دو دهه است که به‌طور وسیع از خطوط ریلی برای حمل و نقل استفاده می‌شود و در طول این مدت، ساختار خط، سرعت قطار، تناژ عبوری سالیانه و بارها به‌طور چشمگیری دستخوش تغییر شده‌اند؛ به‌عنوان مثال در راه‌آهن ایالات‌متحده به‌صورت متداول از لکوموتیوهای محور سنگین استفاده می‌شود که در این قطارها بار محوری بیشینه تا ۳۶ تن افزایش یافته است؛ ضمن آن‌که هر سال رکورد بیشتری برای تناژ عبوری ثبت می‌شود. تمامی این تحولات که به‌منظور افزایش سوددهی انجام شده، مستلزم خطوط کارآمد و اجزای سالم است. به دلیل نارسایی‌های ساختار خطوط سستی، مشکلات عدیده‌ای در این خطوط گسترش یافته‌اند. این مشکلات را می‌توان در دو گروه کلی نارسایی‌ها، دسته‌بندی نمود.

گروه اول، مشکلات مربوط به گسیختگی بستر است. این گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که فشار موجود روی سطح فوقانی بستر، از حد فشار قابل تحمل بستر بیشتر باشد. اگرچه در بسیاری از مواقع، فشار بیشینه قابل تحمل بستر، بر اساس آزمایش‌های میدانی یا آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های گرفته شده به دست می‌آید، اما از نظر محاسباتی، ظرفیت باربری حداکثر فشاری بستر را می‌توان به‌عنوان تابعی از خواص خاک مانند مدول برشی، نسبت پواسون، چگالی، رطوبت، نرمی و ... بیان نمود. زمانی که گسیختگی بستر رخ می‌دهد، این مسئله روی هندسه مسیر اثرات نامطلوبی ایجاد می‌کند که اصلاح آن مشکل و پرهزینه است و لذا جلوگیری از آن یکی از اهداف اصلی طراحی، ساخت و نگهداری زیرسازای خطوط ریلی است.

گروه دیگر، شکست در اجزای سازه‌ای خط می‌باشد. به‌طور متداول، این نوع خرابی در اجزایی مانند ریل، صفحه زیر تراورس، پابند، تراورس، بالاست و زیربلاست در دوره زمانی بهره‌برداری اتفاق می‌افتد. کاملاً واضح است که شکست اجزای سازه‌ای خط بر هندسه خط تأثیرگذار است و این امر رابطه تنگاتنگی با مباحث ایمنی دارد. اگرچه افزایش عمر بهره‌برداری می‌تواند به‌عنوان یک راه مؤثر کاهش هزینه‌های نگهداری مد نظر قرار گیرد لیکن تعویض دوره‌ای اجزای سازه‌ای خط، امری غیر قابل اجتناب است.

راه حل جلوگیری از گسیختگی بستر، شامل ترکیبی از راهکارها مانند کاهش فشار روی لایه بستر، بهبود وضعیت سیستم زهکشی، افزایش ضخامت مصالح دانه‌ای یا استفاده از اجزای خط با کیفیت و باربری بیشتر است. راهکار مناسب برای به حداقل رساندن گسیختگی سازه‌ای، طراحی و انتخاب معقول اجزای خط است؛ به‌طوری‌که بتوان به‌سختی تکیه‌گاهی بهینه سازه دست یافت. محاسبه فشار در لایه‌های مختلف خط مانند سطوح تماس بین پایه ریل و صفحه تراورس، صفحه تراورس و تراورس،

تراورس و بالاست، بالاست-زیربالاست و زیربالاست-بستر، به منظور دستیابی به سختی تکیه‌گاهی بهینه‌سازی خط، ضروری است. علاوه بر این، برای طراحی اجزای سازه‌ای خط می‌توان فشار در سطوح مختلف سازه خط را محاسبه نمود.

به‌طور معمول دو روش عمده برای تحلیل بستر خطوط مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اول بر اساس تئوری الاستیک بوسینسک<sup>۱</sup>، معروف به نظریه تک لایه‌ای بنا شده است. در این روش فرض می‌شود که لایه بستر، الاستیک، کاملاً همسان و ایزوتروپ است. البته در عمل، این موضوع همیشه صادق نیست؛ چراکه بستر زیرسازی شامل دو بخش بالاست و بستر است. روش دوم بر پایه روابط تجربی است. برای نمونه دو رابطه تجربی ارائه شده ذیل (رابطه ۳-۱ و رابطه ۳-۲)، معمولاً برای طراحی و تحلیل ساختار خطوط ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

الف) رابطه مربوط به راه‌آهن ملی ژاپن (JNR)<sup>۲</sup>

$$P_c = \frac{50P_m}{10 + h^{1.35}} \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

که در این رابطه :

$P_c$  (فشار وارد بر بستر، kPa)

$P_m$  (تنش رسیده به بالاست، kPa)

$h$  (عمق مصالح دانه‌ای، cm)

رابطه JNR بر اساس تست‌هایی روی خطوط با عرض باریک، به دست آمده است. یکی از نقاط ضعف این روش عدم اطمینان از حصول نتیجه مشابه در خطوط با عرض استاندارد است.

ب) رابطه تالبوت<sup>۳</sup>

$$P_c = \frac{16.8p_m}{h^{1.25}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

که در این رابطه :

$P_c$  (فشار وارد بر بستر، psi)

$P_m$  (تنش رسیده به بالاست، psi)

$h$  (عمق مصالح دانه‌ای، in)

---

1. Boussinesq  
2. Japanese National Railways  
3. Talbot

رابطه تالبوت بر اساس تست‌های آزمایشگاهی بر روی بالاست و اندازه‌گیری فشار در سطوح مختلف لایه بالاست توسعه یافته است. در نتیجه این روش برای خطوط دارای لایه HMA مناسب نیست. هرچند برای خطوط بالاستی نیز رابطه دقیقی به‌شمار نمی‌رود؛ چراکه در شرایط واقعی، بالاست بر روی لایه بستر قرار گرفته، اما در تست‌های انجام شده، بالاست بر روی کف بتنی قرار دارد. در واقع رابطه تالبوت تأثیر مدول بستر و خاصیت برچهندگی این لایه را نادیده می‌گیرد که این موضوع تأثیر به‌سزایی در شکل توزیع تنش‌ها دارد، در نتیجه این روش برای بسترهای سست، ناکافی و برای بسترهای سخت بسیار محافظه‌کارانه عمل می‌کند [۲].

این دو روش اساساً برای طراحی زیرسازی‌های با مصالح دانه‌ای یا اصطلاحاً بالاستی توسعه یافته‌اند. برنامه‌های کامپیوتری تحلیل و طراحی زیرسازی خطوط به منظور برطرف شدن محدودیت‌ها و نقایص روش‌های بوسینسک، راه‌آهن ملی ژاپن و روش تالبوت، توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزارهای ایلی‌ترک<sup>۱</sup>، ژئوترک<sup>۲</sup> و کنتراک<sup>۳</sup> اشاره نمود.

### ۳-۲- مدل ایلی‌ترک

این مدل اولین بار در دانشگاه ایلینویز و اساساً برای خطوط ریلی سنتی، متشکل از بالاست، زیربلاست و بستر طراحی شده است. به‌دلیل وابسته بودن خواص مصالح دانه‌ای به حالت تنش، ویژگی‌های غیرخطی هر ماده در این برنامه لحاظ شده است. روند تحلیل برنامه از دو مرحله، تشکیل می‌شود. خط ریلی ابتدا در جهت طولی مانند یک مدل کرنش صفحه‌ای دو بعدی با ۲۶ تراورس روی هر سمت از صفحه تقارن و سپس به‌صورت متقاطع مانند یک مدل کرنش صفحه‌ای دوبعدی مدل می‌شود. این مدل در صورت جایگزینی خواص لایه آسفالتی به‌جای بالاست، قابلیت استفاده در خطوط HMA را هم داراست؛ اما کرنش کششی تحتانی لایه HMA که به این روش تعیین شده، به دقت روش اجزاء محدود نیست. مشکل اصلی در استفاده از ایلی‌ترک، مسئله اختصاص طول برابر تراورس زیر هر ریل برای تحلیل عرضی و یک زاویه توزیع برای تحلیل کرنش صفحه‌ای طولی است.

اغلب طول باربری تراورس ۱۸ (۴۵/۷ سانتی‌متر) و زاویه توزیع ۱۰° برای استفاده در تحلیل‌های متداول توصیه می‌شود؛ اما زمانی که به جای بالاست از HMA استفاده شود باید هر دو مقدار فوق افزایش یابند. درک صحیح از میزان افزایش این مقادیر یکی از نقاط ضعف این مدل می‌باشد. متأسفانه اختصاص مقادیر مختلف،

1. ILLITRACK  
2. GEOTRACK  
3. KENTRACK

اثرات قابل توجهی روی نتایج نهایی دارد. مزیت اصلی این مدل، توانایی آن در تغییر خواص مصالح بستر در جهت طولی و عرضی است و اشکال عمده آن، ارائه یک تقریب دوبعدی از مسئله سه بعدی واقعی است.

### ۳-۳- مدل ژئوترک

این مدل اولین بار در دانشگاه ماساچوست برای خطوط ریلی بالاستی سنتی طراحی شده است و با جایگزینی خواص مصالح مربوطه می‌تواند برای خطوط HMA نیز به کار رود. این مدل بالاست، زیربالاست و بستر را مانند یک سیستم لایه‌ای در نظر می‌گیرد و در آن از تئوری لایه‌ای بورمیستر<sup>۱</sup> استفاده شده است. این تئوری در طراحی بزرگراه و باند فرودگاه شناخته شده و معتبر است. ژئوترک، خواص غیرخطی مصالح را لحاظ نموده و دارای تخمین کمتری در مقایسه با ایلی‌ترک می‌باشد. همچنین پاسخ‌های مورد نیاز را یک‌جا و در یک مرحله فراهم می‌کند. مدل ژئوترک از اصل جمع آثار<sup>۲</sup> برای محاسبه پاسخ تحت تأثیر چرخ‌های متعدد استفاده می‌کند. استفاده از این اصل زمان محاسبات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

اگرچه این مدل، جدایی تراورس با بالاست را در نظر می‌گیرد، اما در خصوص درستی این روش نمی‌توان اطمینان داشت؛ چراکه در این مورد اصل جمع آثار نمی‌تواند به تنهایی به کار رود. برای مثال، بار یک چرخ تنها روی تراورس مرکزی ممکن است نشان‌گر این واقعیت باشد که تراورس پانزدهم از بالاست جدا شده، اما بار قرار داده شده در همسایگی تراورس پانزدهم مطمئناً آن را در تماس با بالاست نگه خواهد داشت. از این رو، فرض در تماس نبودن تراورس پانزدهم، نادرست است و نمی‌تواند در جمع آثار استفاده شود. اصل جمع آثار تنها برای یک سیستم خطی معتبر است. از آنجا که در مورد جدایی تراورس و بالاست، سیستم غیر خطی می‌شود، این اصل کاربرد ندارد.

این مدل امکان محاسبه تغییر مکان و مدول خط را به صورت تابعی از:

(۱) بار محوری

(۲) خواص ریل و تراورس‌ها

(۳) خواص بالاست و لایه‌های زیرین

(۴) هندسه خط شامل فاصله تراورس‌ها و ضخامت لایه‌ها میسر می‌سازد. همچنین برآوردی از تنش‌ها و تغییر مکان‌های موجود در بالاست، زیربالاست و لایه‌های بستر به صورت تابعی از متغیرهای

---

1. Burmister's layered theory  
2. Superposition Principle

مشابه فراهم می‌سازد. مقادیر این پارامترها جهت مطالعه رفتار بالاست و بستر در خط و برای پیش‌بینی تغییر مکان دائمی خط استفاده می‌شود. همچنین ژئوترک مانند برنامه ایل‌تریکن تنها برای خطوط با مصالح دانه‌ای طراحی شده است.

### ۳-۴- مقایسه کنترک با ژئوترک

مروری بر مبانی تئوری ژئوترک به‌طور واضح مشخص می‌کند که ژئوترک یک مدل خوب برای شبیه‌سازی خط است و می‌تواند به‌عنوان یک مبنای مناسب برای پایه‌ریزی کنترک به‌کار رود. محدودیت‌های ژئوترک و اصلاحاتی که در کنترک ایجاد شده به شرح زیر می‌باشد [۱]:

- با توجه به استفاده از تئوری لایه‌ای برای محاسبه ضرایب ارتجاعی پی لایه‌بندی شده، ژئوترک عملاً بسیار زمان‌بر است. برای ۱۱ تراورس، هرکدام با ۱۰ نقطه عکس‌العمل روی پی، به‌طور کلی باید ۱۱۰ ضریب تنش (نرمی) تعیین شود که تعیین هرکدام زمان محاسبه زیادی را می‌طلبد. این در حالی است که کنترک تعداد ضرایب محاسباتی را به حداکثر ۲۶ عدد، کاهش داده و بقیه ضرایب را از روش درون‌یابی به‌دست می‌آورد.

- یک محاسبه زمان‌بر دیگر در ژئوترک بازخوانی تکراری عملگر بسل در تئوری لایه‌بندی و به‌طور خاص در تحلیل غیرخطی می‌باشد. کنترک عملگرهای بسل را ذخیره کرده و در صورت نیاز آن‌ها را به‌طور مکرر و بدون فراخوانی استفاده می‌کند.

- در ژئوترک بار ریل به‌صورت مستقیم بالای یکی از نقاط تکیه‌گاهی بین تراورس و سیستم لایه‌ای وارد نمی‌شود؛ به‌طوری‌که در پاسخ‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های محاسبه شده در سیستم لایه‌ای به‌جای آن که زیر بار ریل محاسبه شوند، زیر نقاط تکیه‌گاهی تعیین می‌گردند. لذا این امکان وجود دارد که ژئوترک مقادیر بیشینه را از دست داده و به‌جای آن یک تنش یا کرنش بحرانی ناچیز را نتیجه دهد. در کنترک این عدم دقت با در نظر گرفتن محل ریل به‌عنوان یک نقطه تکیه‌گاهی اصلاح گردیده است.

- ژئوترک یک برنامه کامپیوتری اجزای محدود نیست؛ چراکه در آن ریل‌ها و تراورس‌ها مانند تیرهای یک‌تکه و بدون تقسیم به المان‌های کوچک در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه در این مدل ریل‌ها در محل تقاطع باید همگن و یکنواخت بوده و همچنین مفصل نداشته باشند؛ اما در کنترک ریل‌ها و تراورس‌ها به اجزای محدود تقسیم شده و بنابراین تراورس‌های بتنی با مقطع متغیر نیز قابل مدل‌سازی هستند.



### فصل سوم: تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی ————— ۱۰۱

ژئوتراک اساساً برای خطوط سنتی طراحی شده است و معیار گسیختگی خطوط HMA را لحاظ نمی‌کند؛ درحالی‌که کنترک محاسبات گسیختگی بر اساس ترافیک ماهیانه، فصلی یا سالیانه جمع‌شونده را در خود جای داده است.

#### ۳-۵- مبانی تئوریک برنامه کنترک

در این بخش به تفصیل در مورد تئوری‌های حاکم بر نرم‌افزار کنترک از جمله تئوری لایه‌ای مصالح، جمع آثار بار چرخ‌ها، تشکیل ماتریس‌های سختی اجزای خط و ارتباط مدل کنترک با روش اجزای محدود پرداخته می‌شود. همچنین نحوه تحلیل و طراحی خطوط مدل‌سازی شده و انواع معیارهای مورد استفاده توسط کنترک در ادامه این فصل معرفی و تشریح شده‌اند. ساختار خط در کنترک مطابق شکل (۳-۱) از بالا به پایین شامل ریل‌ها، فترها، تراورس‌ها و سیستم لایه‌ای می‌شود. تنش قائم بین تراورس و سیستم لایه‌ای، روی نواحی دایره‌ای هم قطر توزیع شده است. بنابراین تئوری لایه‌ای بورمیستر برای تعیین ماتریس نرمی سیستم قابل استفاده است.

#### ۳-۵-۱- روش به‌کارگیری اصل برهم‌نهی نیروها

تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییرشکل‌های منطبق با بار چرخ‌های متعدد در سیستم خط، با قرار دادن بار یک چرخ به‌دست می‌آیند. زمانی که بار یک چرخ تنها به تراورس مرکزی می‌رسد، باید تعداد تراورس‌های تحت تأثیر بار، مشخص شوند. این تعداد را به اختصار  $NTA^1$  می‌نامند. هر تراورس خارج از این ناحیه بارگذاری، در نظر گرفته نمی‌شود و در واقع انتظار نمی‌رود باری متحمل شود. با توجه به تقارن خط، لحاظ بار چرخ تنها در یک سمت، کفایت می‌کند. برنامه ژئوتراک NTA بار یک سمت را به عدد ۶ محدود می‌کند؛ به عبارت دیگر بار وارده، روی حدود ۱۱ تراورس توزیع می‌شود. در کنترک پارامتر NTA برای هر تحلیل قابل تغییر است؛ با این حال تعداد ۶ تراورس برای این پارامتر، مقدار قابل قبول و معتبری می‌باشد.

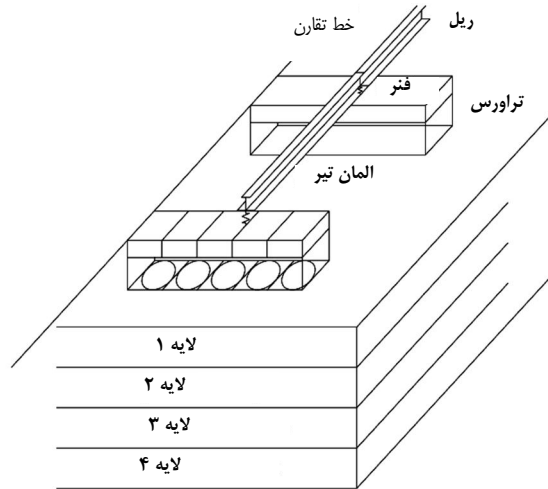
شکل (۳-۲) روش جمع آثار با NTA برابر ۴ را نشان می‌دهد. در این جا تنها برای واضح بودن روش از عدد ۴ استفاده شده است و همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، NTA برابر ۶ در تحلیل‌های واقعی به کار می‌رود. اگر  $S_i$  تنش، کرنش یا تغییر شکل تراورس  $i$  ام تحت اثر بار  $p$  قبل از برهم‌نهی و  $S_i'$  در اثر

---

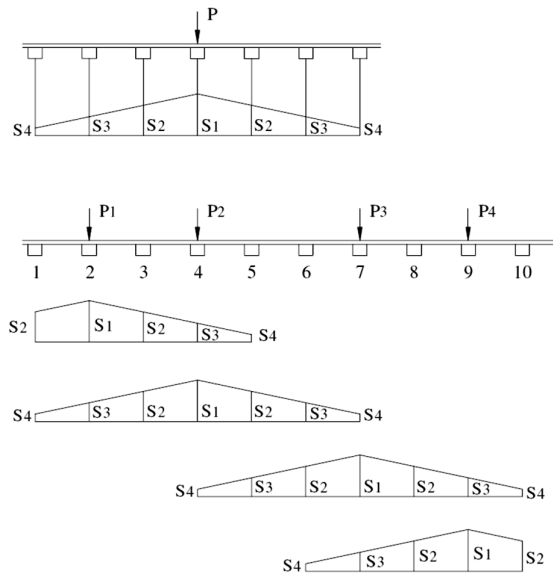
1. Number of Ties used for Analysis

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی

چهار بار  $p_1$  تا  $p_4$  بعد از برهم نهی باشد، رابطه (۳-۳) تا رابطه (۶-۳) با توجه به شکل (۲-۳) صادق می‌باشد.



شکل ۳-۱) سیستم لایه‌ای مورد استفاده برای مدل‌سازی خط ریلی



شکل ۳-۲) جمع آثار نیروها برای بارهای متعدد

فصل سوم: تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی ۱۰۳

در این روش یک بار تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌ها زیر یک چرخ تنها محاسبه شده و نتایج برای چند چرخ، با استفاده از جمع آثار محاسبه می‌شود. در صورتی که بار در حد فاصل دو تراورس به ریل وارد شود، باید با در نظر گرفتن ریل مانند یک تیر دوسر ساده، به تراورس‌ها توزیع شود.

$$S'_1 = S_2 \frac{P_1}{P} + S_4 \frac{P_2}{P} \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

$$S'_2 = S_1 \frac{P_1}{P} + S_3 \frac{P_2}{P} \quad \text{رابطه (۴-۳)}$$

$$S'_4 = S_3 \frac{P_1}{P} + S_1 \frac{P_2}{P} + S_4 \frac{P_3}{P} \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

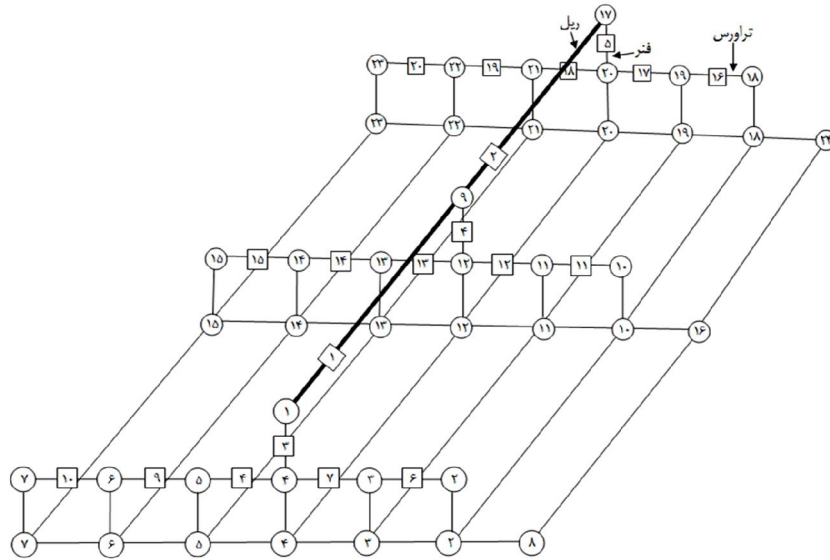
$$S'_9 = S_3 \frac{P_1}{P} + S_1 \frac{P_4}{P} \quad \text{رابطه (۶-۳)}$$

### ۳-۵-۲- تفاوت نسبت به اجزای محدود

از آن‌جا که در هر دو جهت طولی (X) و متقاطع (Y) در زیر بار یک چرخ تنها، تقارن وجود دارد، در نظر گرفتن یک چهارم سیستم کفایت می‌کند. شکل (۳-۳) شماره‌گذاری نقاط و اجزاء را نشان می‌دهد. همه نقاط در جهت متقاطع از یک مقطع به مقطع دیگر، شماره‌گذاری شده‌اند. همچنین هر کدام از آن‌ها، از بالا تا پایین و از لبه خارجی به مرکز خط دارای شماره هستند. برای ریل و فنرهای بین ریل و تراورس در جهت طولی و برای تراورس در جهت متقاطع همه اجزاء دارای شماره هستند. نقاط روی سیستم لایه‌ای شبیه به نقاط در عرض تراورس در فواصل مشابه هستند و مطابق شکل با شماره‌های گره‌ای یکسان نشان داده شده‌اند. همچنین برای تعیین تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های خارج تراورس، شماره‌هایی برای نقاط در طول لبه لایه بالایی (نقاط ۸، ۱۶، ۲۴ در شکل «۳-۳») اختصاص یافته‌اند. این نقاط می‌توانند هر نقطه‌ای از خارج تراورس باشند؛ چراکه جای این نقاط اثری روی تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌ها ندارد. همچنین این مسئله تأثیری روی مقدار تنش‌ها در سایر نقاط ندارد. دو نوع المان در این مدل وجود دارد:

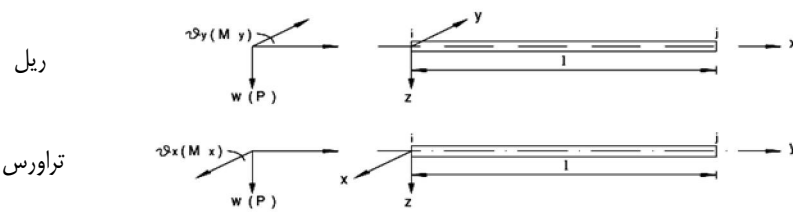
- المان‌های تیر برای ریل و تراورس‌ها

- المان‌های یک بعدی برای فنرها



شکل ۳-۳ شماره‌گذاری گره‌ها و اجزاء

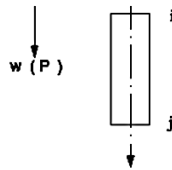
شکل (۳-۴) اجزای تیر برای ریل و تراورس را نشان می‌دهد. بنابراین ماتریس سختی المان برای ریل می‌تواند به صورت رابطه (۷-۳) ارائه شود.



شکل ۳-۴ نیرو و تغییر شکل در اجزای تیر برای ریل و تراورس

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ SYM & & & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{yi} \\ w_j \\ \theta_{yj} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i \\ M_{yi} \\ P_j \\ M_{yj} \end{Bmatrix} \quad \text{رابطه (۷-۳)}$$

که در آن  $E$  مدول یانگ،  $I$  ممان اینرسی ریل،  $L$  فاصله بین نقاط  $i$  و  $j$ ،  $W_i$  جابجایی عمودی در نقطه  $i$ ،  $\theta_{yi}$  چرخش حول محور  $y$  در نقطه  $i$ ،  $p_i$  نیروی عمودی در نقطه  $i$  و  $M_{yi}$  لنگر حول محور  $y$  در نقطه  $i$  می باشد. شکل (۵-۳) المان یک بعدی را برای فنر نشان می‌دهد.



شکل (۵-۳) نیرو و تغییر شکل در جزء فنر

ماتریس سختی این المان به صورت رابطه (۸-۳) است:

$$\begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_i \\ w_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i \\ P_j \end{Bmatrix} \quad \text{رابطه (۸-۳)}$$

که در آن  $C_s$ ، ثابت فنر می باشد.

پس از محاسبه ماتریس سختی المان، برای هر جزء در هر قسمت از ساختار خط، سختی خط به وسیله برهم نهی این ماتریس‌های سختی، قابل تشکیل است.

## ۳-۵-۳- ماتریس سختی اساس

نیروهای تکیه‌گاهی اساس به قسمت زیرین تراورس‌ها وارد می‌شود. از این‌رو، معادله‌های تعادل به‌طور کلی می‌تواند به صورت رابطه (۹-۳) بیان شود:

$$[K] \begin{Bmatrix} \delta_{rail} \\ \delta_{tie} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{rail} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{tie} \end{Bmatrix} \quad \text{رابطه (۹-۳)}$$

که در این رابطه  $K$ : ماتریس سختی خط بدون اساس،  $\delta_{rail}$ : جابجایی تمام گره‌ها در ریل شامل جابجایی قائم و چرخش حول محور  $y$  و  $\delta_{tie}$ : جابجایی تمام گره‌ها در تراورس، شامل یک جابجایی عمودی و یک چرخش حول محور  $x$  می‌باشد. برای محاسبه نیروهای تکیه‌گاهی تراورس،  $F_{tie}$ ، خیز قائم متناظر با یک بار واحد روی یک ناحیه دایره‌ای در یک نقطه روی سطح سیستم لایه‌ای، در یک فاصله مشخص ( $r$ ) از آن نقطه، به‌وسیله تئوری لایه‌ای بورمیستر محاسبه می‌شود و ماتریس نرمی اساس به‌صورت رابطه (۱۰-۳) تشکیل می‌شود.

$$[G] \begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_n \end{Bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۰-۳)}$$

که در آن  $[G]$ : ماتریس نرمی اساس،  $p_i$ : نیروی عمودی در نقطه  $i$  و  $w_i$ : انحراف قائم در نقطه  $i$  می‌باشد. مؤلفه  $g_{ij}$  در ماتریس  $G$  انحراف در نقطه  $i$  متناظر با بار واحد در نقطه  $j$  است. رابطه (۱۰-۳) می‌تواند با استفاده از تعریف ماتریس معکوس به رابطه زیر تبدیل شود.

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} = [H] \begin{Bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_n \end{Bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱-۳)}$$

فصل سوم: تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی ۱۰۷

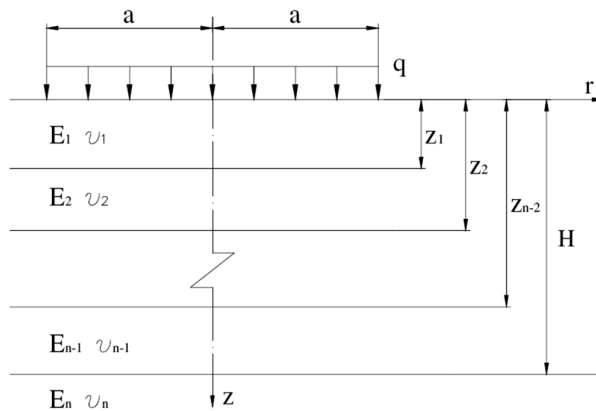
با جای‌گذاری رابطه (۱۱-۳) و رابطه (۹-۳) و جابجایی انحراف قائم (w) به سمت چپ تساوی داریم:

$$[k]\{\delta\} = \{F\} \quad \text{رابطه (۱۲-۳)}$$

که در آن  $[k]$ : سختی کلی ساختار خط می‌باشد. رابطه (۱۲-۳) می‌تواند برای محاسبه جابجایی‌های نقاط استفاده شود. بعد از پیدا شدن جابجایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها قابل محاسبه‌اند. به دلیل آن‌که تنش‌های محاسبه شده در المان‌های مجاور یک گره یکسان نیستند، مقدار میانگین آن‌ها به عنوان تنش غالب یک گره، در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۶- تحلیل سیستم چند لایه‌ای در نرم‌افزار کنترک

تئوری الاستیک چندلایه‌ای در تشکیل ماتریس نرمی اساس و محاسبه تنش‌ها و کرنش‌ها در سیستم لایه‌ای کاربرد دارد. شکل (۳-۶) یک سیستم n لایه‌ای را نشان می‌دهد که لایه n ام آن دارای ضخامت نامحدود است. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون لایه z ام به ترتیب  $E_z$  و  $\nu_z$  می‌باشد. یک بارگذاری دایره‌ای به شدت q و شعاع a به سطح آن وارد شده است. در این‌جا محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌ها در هر نقطه در سیستم لایه‌ای با مختصات (r,z) اهمیت دارد. شعاع (a) ناحیه بارگذاری با توجه به ناحیه تماس (A) بین تراورس و سیستم لایه‌ای محاسبه می‌شود. اگر تراورس به m المان محدود تقسیم شود، مساحت هر دایره برابر A/m است. برای اطمینان از یکنواخت بودن دایره‌ها در طول تراورس باید طول المان‌های محدود یکسان باشد. در این‌جا هدف، تشریح همراه با جزئیات روابط مورد استفاده برای محاسبه تنش و تغییرشکل در سیستم لایه‌ای نیست. بنابراین به ذکر نتایج در شکل نهایی آن‌ها اکتفا شده است. جزئیات استخراج این روابط در منابع دیگر از جمله [۳] قابل مشاهده است.



شکل ۳-۶) سیستم چند لایه‌ای در ناحیه بارهای تکراری

با فرض:

$$\alpha = \frac{a}{H} \quad \text{رابطه (۳-۱۳)}$$

$$\rho = \frac{r}{H} \quad \text{رابطه (۳-۱۴)}$$

$$\lambda = \frac{z}{H} \quad \text{رابطه (۳-۱۵)}$$

که در آن  $r$  و  $z$  به ترتیب شعاع و مختصات قائم نقطه موردنظر برای بررسی تنش‌ها و جابجایی‌ها و  $H$  مطابق شکل (۳-۶) فاصله از سطح بالایی تا پایین شامل همه لایه‌ها است. چهار المان تنش و جابجایی قائم و افقی در لایه  $j$ م می‌تواند به صورت زیر تعیین شود [۱]:

$$(\sigma_z)_j = q\alpha \int_0^\infty J_0(m\rho) \left\{ [A_j - C_j(1 - 2\nu_j - m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} + [B_j + D_j(1 - 2\nu_j + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \right\} dm$$

رابطه (۳-۱۶)



$$\begin{aligned}
 (\sigma_r)_j = & -q\alpha \int_0^\infty J_1(m\alpha) \left( \left[ J_0(m\rho) \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{J_1(m\rho)}{m\rho} \right] \{ [A_j + C_j(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} \right. \\
 & \left. + [B_j - D_j(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \right\} \\
 & \left. + 2\nu_j J_0(m\rho) [C_j e^{-m(\lambda_j - \lambda)} - D_j e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})}] \right) dm \\
 & \text{رابطه (۱۷-۳)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\sigma_t)_j = & -q\alpha \int_0^\infty J_1(m\alpha) \left( \frac{J_1(m\rho)}{m\rho} \{ [A_j + C_j(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} \right. \\
 & \left. + [B_j - D_j(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \right\} \\
 & \left. + 2\nu_j J_0(m\rho) [C_j e^{-m(\lambda_j - \lambda)} - D_j e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})}] \right) dm \\
 & \text{رابطه (۱۸-۳)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\tau_{rz})_j = & -q\alpha \int_0^\infty J_1(m\rho) J_1(m\alpha) \{ [A_j + C_j(2\nu_j + m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} \\
 & - [B_j - D_j(2\nu_j - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \} dm \\
 & \text{رابطه (۱۹-۳)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (w)_j = & \frac{(1 + \nu_j)qa}{E_j} \int_0^\infty \frac{J_0(m\rho)J_1(m\alpha)}{m} \{ [A_j - C_j(2 - 4\nu_j - m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} \\
 & - [B_j + D_j(2 - 4\nu_j + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \} dm \\
 & \text{رابطه (۲۰-۳)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (u)_j = & \frac{-(1 + \nu_j)qa}{E_j} \int_0^\infty \frac{J_0(m\rho)J_1(m\alpha)}{m} \{ [A_j + C_j(1 + m\lambda)] e^{-m(\lambda_j - \lambda)} \\
 & - [B_j + D_j(1 - m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{j-1})} \} dm \\
 & \text{رابطه (۲۱-۳)}
 \end{aligned}$$

در این روابط  $\sigma_z$ : تنش قائم (جهت z)،  $\sigma_r$ : تنش شعاعی (جهت r)،  $\sigma_t$ : تنش مماسی (جهت t)،  $\tau_{rz}$ : تنش برشی، W: جابجایی قائم، u: جابجایی شعاعی،  $\rho$ : تابع بسل نوع اول از مرتبه صفر،  $J_1$ : تابع بسل نوع اول از مرتبه یک، m: یک پارامتر و A, B, C, D: ثابت‌های انتگرال‌گیری هستند. اندیس j نمایانگر لایه زام و  $\lambda_j$  فاصله بدون بعد از سطح تا زیر لایه زام مطابق رابطه (۱۸-۳) است. برای یک سیستم n لایه‌ای، تعداد 4n (۴ ثابت در هر لایه) ثابت انتگرال وجود دارد. همچنین  $A_n$  و

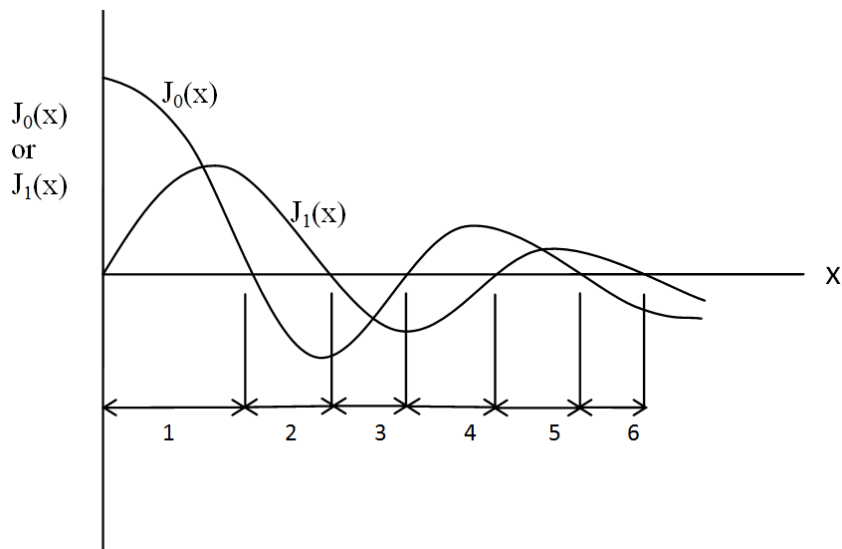
$C_n$  برای پایین‌ترین لایه صفر است؛ چراکه تنها در این حالت (زمانی که  $\lambda$  بی‌نهایت است)، تنش‌ها برابر صفر می‌شوند. بنابراین تعداد ثابت‌ها به  $4(n-2)$  کاهش می‌یابد، که به وسیله شرایط مرزی و  $4(n-1)$  شرط پیوستگی قابل حل است.

تنش قائم در داخل ناحیه بارگذاری، برابر  $q$  و در خارج ناحیه بارگذاری برابر صفر، دو شرط مرزی روی سطح سیستم می‌باشد. چهار شرط پیوستگی در هر کدام از  $(n-1)$  سطح تماس بین هر دو لایه، شامل پیوستگی تنش برشی، جابجایی قائم و جابجایی شعاعی در سطح تماس لایه‌ها می‌باشد. ماتریس نرمی اساس از رابطه  $(3-20)$ ، با جای‌گذاری  $\lambda$  برابر صفر و  $]$  برابر یک، تعیین می‌شود. نیروی کلی وارده به هر دایره، واحد است. بنابراین  $q$  به منزله معکوس مساحت هر دایره است. بعد از این که تغییرشکل‌های تراورس ( $w$ ) از رابطه  $(3-12)$  محاسبه شدند، با به‌کارگیری آن‌ها در رابطه  $(3-11)$ ، نیروی عمودی ( $p$ ) روی هر دایره به دست می‌آید. با تعویض  $q$  با  $P/\pi a^2$ ، یک ماتریس تنش، نظیر نیروی  $p$  به تنش‌ها و جابجایی‌ها در هر نقطه معین، مطابق رابطه  $(3-22)$  به دست می‌آید:

$$\{\varphi\} = [S]\{P\} \quad \text{رابطه (3-22)}$$

که در آن  $\{\varphi\}$ : تنش‌ها و جابجایی‌ها و  $[S]$ : ماتریس تنش‌ها و جابجایی‌ها است. قبل از برهم نهی ضروری است که  $\sigma_r$  و  $\sigma_t$  به  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  و  $\tau_{xy}$  تبدیل شوند؛ چرا که جهت‌های  $\sigma_r$  و  $\sigma_t$  در یک نقطه مشخص، بسته به مکان ناحیه بارگذاری متغیر هستند.

به دلیل تغییر ضرایب در ماتریس  $[S]$  با تغییر شعاع ( $r$ )، ضرایب برای همه نقاط به جز آن‌ها که داخل دو تراورس اول قرار دارند، به وسیله درونیابی و با در نظر گرفتن  $r$  به دست می‌آیند. همان‌طور که در شکل  $(3-7)$  نشان داده شده است، نقاط پایان هر چرخه انتگرال‌گیری، نقاط صفر توابع بسل هستند. چهار نقطه گوسین برای هر چرخه، به جز دو چرخه اول، استفاده شده است. تنش بیشینه کششی در قسمت زیرین لایه HMA، به تعداد نقاط گوسین در دو سیکل اول، بسیار حساس است. به دلیل اهمیت فراوان شاخص تنش (یا کرنش کششی) در طراحی، به ترتیب ۲۴ و ۸ نقطه برای چرخه‌های ۱ و ۲ استفاده شده است. برای جلوگیری از ارزیابی تکراری توابع بسل، به‌ویژه در تحلیل غیرخطی، مقادیر توابع بسل در زمان محاسبه، ذخیره می‌شوند و در ادامه به‌طور تکراری استفاده می‌شوند. بعد از معین شدن تنش‌ها، کرنش‌ها به وسیله تئوری الاستیک قابل تعیین‌اند.



شکل ۳-۷) صفرهای عملگر بسمل

### ۳-۷-مدول الاستیک مواد

هر لایه از خط به جز بستر (که همواره خطی الاستیک فرض می‌شود)، می‌تواند الاستیک خطی و یا الاستیک غیرخطی در نظر گرفته شود. مدول الاستیک مصالح غیرخطی با رابطه (۳-۲۳) بیان می‌شود:

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad \text{رابطه (۳-۲۳)}$$

که در آن،  $E$ : مدول ارتجایی،  $\theta$ : تنش توده‌ای یا جمع ۳ تنش اصلی شامل تنش‌های ثقی است و  $K_1$  و  $K_2$  ثابت‌های رگرسیون و نمایانگر ویژگی‌های مواد هستند. برای محاسبه تنش توده‌ای ژئواستاتیک باید یک نسبت تنش جانبی تعیین شود، که مقدار آن  $(1+2K_0)$  برابر تنش قائم ثقی می‌باشد. زمانی که  $K_2$  برابر صفر است، در واقع با یک ماده الاستیک خطی مواجه هستیم. به دلیل اثر کوچک نسبت پواسون روی تنش و کرنش، یک نسبت پواسون ثابت، مستقل از کیفیت تنش‌ها، برای هر لایه فرض می‌شود. زمانی که یک یا چند لایه الاستیک غیرخطی فرض شوند ( $K_2 \neq 0$ )، یک روند تکراری مورد نیاز است. ابتدا، یک مجموعه از ضرایب برای لایه‌های غیرخطی فرض می‌شود و تنش‌های ثقی زیر سه تراورس با بار چرخ بیشینه، در وسط هر لایه غیرخطی تعیین و سپس میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. بر اساس

رابطه (۳-۲۳) یک مجموعه جدید از ضرایب برای لایه‌های غیرخطی محاسبه می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که ضریب در یک دامنه مشخص میانگین شود.

در این جا سه نوع مصالح شامل خاک بستر، مصالح دانه‌ای و HMA، مورد بررسی قرار می‌گیرد. خاک بستر خطی الاستیک فرض می‌شود ( $E=k_1$  و  $k_2=0$ ). مصالح دانه‌ای می‌تواند الاستیک خطی و یا الاستیک غیرخطی در نظر گرفته شود ( $k_2 \neq 0$  یا  $k_2=0$ ). زیر بالاست و بستر همیشه به‌عنوان مصالح الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شوند. بستر سنگی در زیر بستر، غیر قابل تراکم و با نسبت پواسون  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل خرابی، مقادیر مختلف  $k_1$  می‌تواند برای هر ماه یا هر فصل اختصاص یابد. در نسخه ۴،۰ از نرم‌افزار کنترک که اخیراً در دسترس قرار گرفته، مدلی به‌کار برده شده است که قیر آسفالت، خواص مخلوط، کندروانی و نرخ بارگذاری را لحاظ می‌کند. از روش حساسیت دما-کندروانی برای تخمین کندروانی قیرها (یا مخلوط‌های آسفالتی) استفاده شده است. در ادامه مباحث مربوطه همراه با جزئیات تشریح شده است.

### ۳-۷-۱-مدول دینامیکی

مدول دینامیکی مختلط یک عدد مختلط است که به کرنش مواد ویسکوالاستیک خطی تحت بارگذاری سینوسی پیوسته در حوزه فرکانس مرتبط می‌شود. اندازه مطلق مدول مختلط،  $|E|$ ، به‌طور معمول همان مدول دینامیکی است [۵].

مخلوط‌های HMA مانند مواد ویسکوالاستیک خطی تحت سطوح کرنش کوچک هستند (حدود  $10^{-4}$ ). بنابراین ارتباط تنش-کرنش HMA تحت بارگذاری سینوسی پیوسته در ناحیه ویسکوالاستیک خطی، توسط مدول دینامیکی مختلط قابل تعریف است.

مدول دینامیکی مختلط به صورت نسبت مقدار تنش سینوسی (در هر زمان و فرکانس بار) به کرنش سینوسی (در زمان و فرکانس مشابه) تعریف می‌شود که در حالت پاسخ پایا رابطه (۳-۲۴) را نتیجه می‌دهد.

رابطه (۳-۲۴)

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta)}$$

که در آن:

$E^*$  = مدول مختلط

$\sigma_0$  = بیشینه تنش

$\epsilon_0$  = بیشینه کرنش

$\delta$  = زاویه فاز، درجه

$\omega$  = سرعت زاویه‌ای

$t$  = زمان، ثانیه

$i$  = جزء موهومی مدول مختلط

مدول دینامیکی طبق رابطه (۳-۲۵) تعریف می‌شود.

رابطه (۳-۲۵)

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

برای مواد الاستیک خالص،  $\delta=0$ ؛ و برای مواد کاملاً ویسکوز،  $\delta$  برابر  $90^\circ$  است.

### ۳-۷-۲- مدل انسیتیتو آسفالت

رفتار مکانیکی یک مخلوط آسفالت، که یک مصالح ترکیبی است، در وهله اول تحت اثر طبیعت ویسکوالاستیک قیر آسفالت و خواص حجمی مخلوط است. در طی چند دهه گذشته، محققان برای تبدیل پارامترهای سازگاری مانند نفوذ و کندروانی روابط تجربی را ارائه نموده‌اند. همچنین مدل‌هایی برای تبدیل داده‌های کندروانی به داده‌های مدول فراهم شده است.

انسیتیتو آسفالت یک فرمول تجربی برای پیش‌بینی مدول دینامیکی HMA بر اساس خواص مخلوط، دما و شرایط بارگذاری ارائه کرده است. این فرمول که در نسخه ۳ از برنامه کنتراک استفاده شده است در رابطه (۳-۲۶) ارائه شده است. مطابق این فرمول، مدول دینامیکی HMA وابسته به دما می‌باشد و در طول سال تغییر می‌کند.

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی

$$E = 10^5 \times 10^{\beta_1} \quad \text{رابطه (۲۶-۳)}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005 \beta_2 - 0.00189 \beta_2 f^{-1.1} \quad \text{رابطه (۲۷-۳)}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5} \quad \text{رابطه (۲۸-۳)}$$

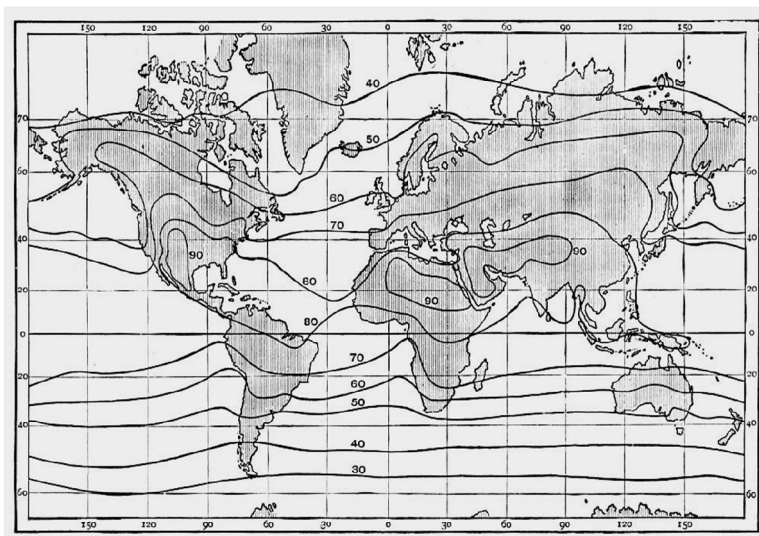
$$\begin{aligned} \beta_3 = & 0.553833 + 0.028829 P_{200} f^{-0.1703} \\ & - 0.03476 V_b + 0.070377 \eta \quad \text{رابطه (۲۹-۳)} \\ & + 0.931757 f^{-0.02774} \end{aligned}$$

$$\beta_4 = 0.483 V_b \quad \text{رابطه (۳۰-۳)}$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f \quad \text{رابطه (۳۱-۳)}$$

که در آن  $\beta_1$  تا  $\beta_5$ : ثابت‌های آبی،  $E$ : مدول دینامیکی HMA به (psi)،  $T$ : دما به  $(F^\circ)$ ،  $f$ : فرکانس بار به (Hz)،  $P_{200}$ : درصد سنگدانه‌های گذرنده از الک نمره ۲۰۰،  $V_b$ : درصد حجم قیر طبیعی،  $V_V$ : درصد مقدار حفرات هوا و  $\eta$ : ویسکوزیته آسفالت در دمای  $70 F^\circ$  و با لزجت  $10^6$  پویز<sup>۱</sup> می‌باشد. دما در رابطه (۲۸-۳) دمای لایه آسفالت است. اساساً دمای آسفالت شبیه به دمای زمین است؛ چرا که آسفالت در خط ریلی، اغلب در معرض هوا نیست و توسط بالاست یا مصالح دیگر پوشیده شده است. شکل (۸-۳) میانگین دمای خاک  $(F^\circ)$  در عمق ۱۲ اینچ (۳۰ سانتی‌متر) از سطح زمین را در سراسر دنیا به نشان می‌دهد که به‌عنوان یک راهنمای تقریبی قابل استفاده است.

1. poise=0.1N.s/m<sup>2</sup>



شکل ۳-۸) میانگین دما در مناطق مختلف در ۳۰ سانتی‌متر زیر سطح زمین<sup>۱</sup>

با این حال مدل انستیتو آسفالت کاستی‌هایی دارد که به خاطر وابستگی شدید کندروانی آسفالت به دما در این مدل است. کندروانی با کاهش دما، افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از مقدار ثابت برای کندروانی می‌تواند منجر به برآورد کمتر از مدول دینامیکی آسفالت شود؛ اما به دلیل بهبود عملکرد آسفالت توسط روش Superpave با طرح آسفالت جدید و استفاده از سیستم PG برای قیرها، مدل قدیمی تخمین مدول دینامیکی آسفالت موجود در کنترک ۳۰، به اندازه کافی برای پیش‌بینی مدول دینامیکی قیرهای آسفالت PG دقیق نیست.

### ۳-۷-۳ مدل Witzak برای پیش‌بینی E\*

مدل Witzak برای پیش‌بینی E\* یک مدل تجربی بر اساس خواص مخلوط حجمی و مشخصه‌های قیر است. مدل اولیه پیش‌بینی Witzak در سال ۱۹۷۲ توسعه یافت. این مدل بر اساس رگرسیون چند جمله‌ای غیرخطی از مقادیر E\* آزمایشگاهی توسعه یافت. در طول ۲۰ سال اخیر اصلاحات متعددی روی

۱. با توجه به حساسیت آسفالت به دما و تغییر دما در طول سال، برای فصل‌ها یا ماه‌های مختلف از میانگین دماهای مختلف استفاده می‌شود.

این مدل انجام شده است. روش متداول MEPDG<sup>۱</sup> از مدل Witzczak 1999 استفاده می‌کند که برای تخمین  $E^*$  توسعه یافته است. این مدل قادر به پیش‌بینی سختی مخلوط در سراسر بازه دمایی، نرخ بارگذاری، و شرایط فرسایش از روی اطلاعاتی است که به راحتی از مشخصات مواد و یا طرح حجمی مخلوط مطابق رابطه (۳-۳۲) در دسترس می‌باشد. این مدل می‌تواند مدول دینامیکی مخلوط را با توجه به هر دو حالت اصلاح شده و سنتی آسفالت پیش‌بینی نماید [۶]. جدول (۳-۱) خلاصه موارد آماری برای این رابطه را نشان می‌دهد.

رابطه (۳-۳۲)

$$\log E^* = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.00167(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.971977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.31335\log(f) - 0.393532\log(\eta)}}$$

که در آن،

$|E^*|$  = مدول دینامیکی،  $10^5$  psi

$\eta$  = ویسکوزیته قیر در دما و عمر مورد نظر،  $10^6$  poise

$f$  = فرکانس بارگذاری، Hz

$V_a$  = درصد هوای منفذی

$V_{beff}$  = درصد موثر قیر، %حجمی

$\rho_{34}$  = درصد تجمعی مانده روی الک  $3/4$  اینچ (۱۹ میلی‌متر)

$\rho_{38}$  = درصد تجمعی مانده روی الک  $3/8$  اینچ (۹/۵ میلی‌متر)

$\rho_4$  = درصد تجمعی مانده روی الک نمره ۴ (۴/۷۶ میلی‌متر)

$\rho_{200}$  = درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر)



جدول ۳-۱. خلاصه موارد آماری برای معادله تخمین‌گر مدول دینامیکی [۵]

اطلاعات آماری	مقدار
برازش	$R_2=0.96$ $S_e/S_y=0.24$
تعداد نقاط داده	۲۷۵۰
بازه دما	۰ تا ۱۳۰
نرخ بارگذاری	۰/۱ تا ۲۵ Hz
مخلوط	جمعاً ۲۰۵ قیرهای اصلاح نشده ۱۷۱ مورد قیرهای اصلاح شده ۳۴ مورد
قیر	جمعاً ۲۳ (۹ مورد اصلاح نشده، ۱۴ مورد اصلاح شده)
سنگدانه	۳۹
روش‌های تراکم	ژیراتوری
اندازه نمونه	استوانه‌ای ۴ اینچ در ۸ اینچ یا ۲/۷۵ اینچ در ۵/۵ اینچ

### ۳-۷-۴- روش حساسیت ویسکوزیته-دما (VTS<sup>۱</sup>)

ویسکوزیته برای توصیف اثرات دما و تشریح ضرایب اصلاح، در معادله تخمینی استفاده می‌شود. برای قیرهای تازه، ویسکوزیته در دمای دلخواه، از رابطه ویسکوزیته-دما ASTM<sup>۲</sup> (رابطه ۳-۳۳) قابل محاسبه است.

رابطه (۳-۳۳)

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R$$

که در آن،

1. Viscosity Temperature Susceptibility Method  
2. ASTM D 2493-01, 2009

$$\eta = \text{ویسکوزیته قیر، } cP^1$$

$$A \text{ و } VTS = \text{پارامترهای رگرسیون}$$

$$T_R = \text{دما رانکین}$$

این رابطه خطی، با پارامترهای رگرسیون منحصر به فرد خود برای شرایط اصلی سیمان آسفالت/قیر مشخص می‌شود. این موضوع امکان توصیف پیوسته کندروانی قیر در سراسر یک بازه وسیع از دما را فراهم می‌آورد [۵].

انواع متداول سیمان‌های متداول و قیرها که در زیرسازی خطوط ریلی کاربرد دارند، شامل AC-10، AC-20، AC-40، PG 64-22، PG 70-28 و PG 76-34 می‌شوند. برای هر نوع از سیمان آسفالت/قیر، مقادیر A و VTS در جدول (۳-۲) نشان داده شده است.

جدول ۳-۲. ارتباط بین درجه قیر آسفالت و پارامترهای کندروانی [۵]

درجه	AC-10	AC-20	AC-40	PG 64-22	PG 70-28	PG 76-34
A	۱۱/۰۱	۱۰/۷۷	۱۰/۵۳	۱۰/۹۸	۹/۷۱	۸/۵۳
VTS	-۳/۶۹	-۳/۶۰	-۳/۵۰	-۳/۶۸	-۳/۲۲	-۲/۷۸

### ۳-۸- تحلیل خرابی

دو نوع تحلیل خرابی<sup>۲</sup> شامل کرنش کششی در قسمت زیرین لایه HMA و تنش یا کرنش فشاری بر روی بستر قابل تحلیل است. اجزای تشکیل دهنده باید از ترک‌های ناشی از خستگی و همچنین تغییر شکل‌های دائمی مفراط، در امان باشند. ترک خستگی در لایه HMA توسط کرنش کششی افقی، در زیر لایه آسفالتی به وجود می‌آید. رابطه بین کرنش کششی و تعداد مجاز تکرار کرنش، به وسیله رابطه (۳-۳۴) بیان می‌شود.

$$N_a = f_4 \varepsilon_t^{-f_5} E^{-f_6} \quad \text{رابطه (۳-۳۴)}$$

$N_a$ : تعداد مجاز تکرار تا گسیختگی،  $\varepsilon_t$ : کرنش کششی و  $f_4$ ،  $f_5$ ،  $f_6$ : ثابت‌های این رابطه‌اند.

زمانی که تنش فشاری قائم روی بستر به‌عنوان یک معیار طراحی استفاده می‌شود، تعداد مجاز تکرار تنش به‌وسیله رابطه (۳-۳۵) بیان می‌شود.

$$N_a = f_1 \sigma_c^{-f_2} E f_3 \quad \text{رابطه (۳-۳۵)}$$

$\sigma_c$ : تنش فشاری و  $f_1$ ،  $f_2$ ،  $f_3$ : ثابت‌های این رابطه‌اند. اگر به جای تنش از کرنش فشاری استفاده شود رابطه زیر صادق است:

$$N_a = f_1 \varepsilon_c^{-f_2} \quad \text{رابطه (۳-۳۶)}$$

که در آن  $\varepsilon_c$ : کرنش فشاری و  $f_1$  و  $f_2$ : ثابت‌های این رابطه‌اند. با توجه به این واقعیت که شرایط بارگذاری و ویژگی‌های مواد در طول سال تغییر می‌کند، برای تعیین عمر طراحی، تحلیل خرابی، ماهانه یا به‌صورت فصلی برای یک سال انجام می‌شود. نسبت تکرار که نسبت بین تعداد تکرار مجاز و تعداد تکرار پیش‌بینی شده است، برای هر دوره محاسبه و جمع می‌شود تا نسبت تکرار برای تمام سال به‌دست آید. عمر طراحی عکس نسبت تکرار است. اگر یک سال در طول ۱۲ ماه بررسی شود، عمر طرح برای هر حالت مطابق رابطه (۳-۳۷) قابل محاسبه است.

$$L = \frac{1}{\sum_1^{12} \frac{N_p}{N_a}} \quad \text{رابطه (۳-۳۷)}$$

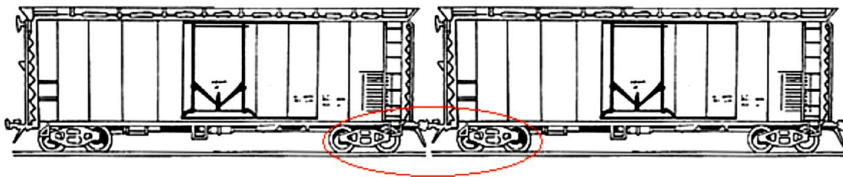
که در آن  $L$ : عمر طرح به سال و  $N_p$ : تعداد تکرار پیش‌بینی شده در طول هر ماه است. عبور یک واگن قطار معادل با عبور یک بار در نظر گرفته می‌شود. این موضوع بر اساس اندازه‌گیری‌های پیوسته میدانی که با هدف اندازه‌گیری تغییر شکل خط به‌وسیله کرنش‌سنج‌ها<sup>۱</sup> و اندازه‌گیری فشار لایه‌های داخلی به‌وسیله فشارسنج‌های زمین‌انجام شده، مورد تحقیق قرار گرفته است. بخش میانی واگن نماینده قسمت بدون بار است. تعداد تکرار پیش‌بینی شده متناسب با ترافیکی که خط در معرض آن است تغییر می‌کند. مثال پیش‌رو به درک برخی از مفاهیم یاد شده و همچنین مفهوم تناژ عبوری سالانه کمک می‌کند.

---

1. Extensimeters  
2. Earth Pressure Cell

## • نمونه‌ای از محاسبه تناژ عبور سالیانه

با  $N_p$  مفروض ۲۰۰۰۰۰ و بار چرخ ۳۶۰۰۰ پوند، ترافیک ۲۸/۶ میلیون تناژ عبوری در سال<sup>۱</sup> را می‌توان انتظار داشت. به‌جهت درک بهتر موضوع، این مثال به‌همراه تصویر و محاسبات مربوطه در شکل (۹-۳) آورده شده است.



شکل ۹-۳) شماتیک بار تکراری عبوری

محاسبات زیر برای میلیون تناژ عبوری انجام شده است [۴]:

وزن کل یک واگن = $۳۶۰۰۰ \times ۸ = ۲۸۶۰۰۰$ (پوند)	بار چرخ = $۳۶۰۰۰$ (پوند بر هر چرخ)
بر هر تکرار) که معادل است با ۱۴۳ (تن بر هر تکرار)	
تعداد تکرار مفروض در سال = ۲۰۰۰۰۰	
(تکرار بر سال)	
ترافیک عبوری در هر سال = ۲۸۶۰۰۰۰۰	
که معادل است با: ۲۸/۶ (میلیون تناژ عبوری در سال)	$۲۰۰۰۰۰ \times ۱۴۳$ (تناژ عبوری در سال)

بنابراین به‌طور بالعکس، با در اختیار داشتن تناژ عبوری سالانه می‌توان تعداد تکرار بار عبوری را محاسبه نمود. محاسبه تعداد تکرار بار عبوری از این منظر حائز اهمیت است که به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی در تحلیل خستگی و عمر سازه خط، در محاسبات برنامه کنترل وارد می‌شود. اگر زیرسازی خط آهن با چند لایه از مصالح دانه‌ای تشکیل شود، ممکن است تعیین تنش (یا کرنش) فشاری قائم روی هر لایه برای استفاده در تحلیل خرابی، ضروری باشد. لایه‌ای که کمترین عمر بهره‌برداری را داراست، طراحی را کنترل می‌کند. زمانی که تنش قائم فشاری به‌عنوان معیار استفاده می‌شود، مدول الاستیک (E) در رابطه (۳-۳۶)، ضریب لایه‌ای است که تنش در آن محاسبه می‌شود. در تحلیل خرابی،

1. MGT: Million Gross Tons

عبور ۴ محور در ناحیه جداشدگی دو واگن، به‌عنوان یک تکرار لحاظ شده است. تنها در نظر گرفتن دو محور در تحلیل ضروری است؛ چراکه تنش (یا کرنش) بحرانی زیر دو محور در یک واگن، بزرگتر از تنش بحرانی زیر ۴ محور در محدوده جداشدگی دو واگن است.

در نبود اطلاعات معتبر بیشتر، مانند مثال، فرض می‌شود که عبور یک واگن در یک قطار معادل تکرار یک بار است. این فرض به‌طور مناسبی محافظه‌کارانه است؛ چون زمانی که یک قطار با سرعت بالا حرکت می‌کند، تنش (یا کرنش) زیر بار یک واگن ممکن است به‌طور کامل قبل از عملکرد واگن بعدی، آزاد نشود. این مسئله نه تنها به سرعت قطار بلکه به خواص و ناهمواری خط نیز وابسته است. بنابراین یک مسئله نسبتاً پیچیده است و نیاز به کسب تجربه بیشتر در این زمینه وجود دارد.

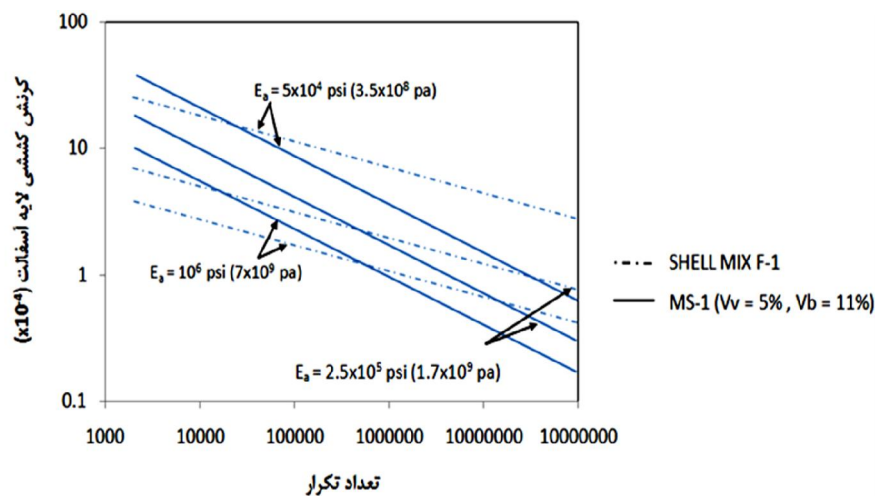
یکی از تردیدها در طراحی زیرسازی‌های دارای HMA، انتخاب معیار شکست مناسب است. با توجه به فقدان تجربه کافی درباره استفاده از بسترهای HMA در راه‌آهن، بهترین گزینه، مطالعه معیار شکست در آسفالت روسازی بزرگراهها و لحاظ نمودن تمهیدات مورد نیاز است. استفاده از معیار بزرگراهها برای طراحی راه‌آهن مقداری محافظه‌کارانه است. دلایل این موضوع به شرح زیر می‌باشد [۱]:

- مصالح در زیرسازی خطوط ریلی، در فضای محصورتری هستند و در نتیجه باید مقاومت بیشتری در برابر ترک‌های خستگی و تغییر شکل‌های پایدار از خود نشان دهند.
- بارگذاری راه‌آهن به‌طور پیوسته و یکی پس از دیگری، بدون زمان کافی برای آزاد شدن کامل تنش و کرنش وارد می‌شود و باید اثر مخرب کمتری را نتیجه دهد.
- با توجه به اثر پلی<sup>۱</sup> ریل‌ها و تراورس‌ها، الزامات اجرایی برای بسترهای ریلی می‌تواند به‌دقت و حساسیت روسازی بزرگراهها نباشد.

از این‌رو، معیار بزرگراه به‌طور محافظه‌کارانه می‌تواند به‌عنوان یک نقطه شروع برای طراحی راه‌آهن استفاده شود. در طول زمان و با کسب تجربه بیشتر، معیار مذکور قابلیت اصلاح و بهینه‌سازی برای شرایط ریلی را داراست.

## ۳-۹- ترک‌های ناشی از خستگی در لایه HMA

کرنش کششی افقی در قسمت زیرین لایه آسفالت، برای تخمین عمر خستگی HMA استفاده می‌شود. شکل (۳-۱۰) معیار کرنش کششی استفاده شده در راهنمای طراحی ضخامت انجمن آسفالت<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. MS-1 (روش انجمن آسفالت) و روش شل پترولیوم<sup>۲</sup> به ترتیب با خطوط ممتد و خط چین از یکدیگر متمایز شده‌اند.



شکل ۳-۱۰) معیار کرنش کششی برای ترک ناشی از خستگی (نمودار لگاریتمی است)

مطابق شکل، تحت کرنش‌های بزرگ معیار انجمن آسفالت نسبت به معیار دیگر، تعداد تکرار بزرگتری را مجاز می‌داند؛ در حالی که در کرنش‌های کوچک شرایط بالعکس می‌شود. معیار انجمن آسفالت که با خطوط ممتد نشان داده شده است می‌تواند با رابطه (۳-۳۸) ارائه شود.

فصل سوم: تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی ۱۳۳

$$N_f = 0.0795 \varepsilon_t^{-3.291} E^{-0.853} \quad \text{رابطه (۳۸-۳)}$$

که در آن  $N_f$ : تعداد تکرار برای شکست و  $\varepsilon_t$ : کرنش کششی در زیرلایه آسفالت می‌باشد. همچنین معیار شل با رابطه (۳۹-۳) مشخص شده است.

$$N_f = 0.0685 \varepsilon_t^{-5.671} E^{-2.363} \quad \text{رابطه (۳۹-۳)}$$

### ۳-۱۰- تغییر شکل‌های دائمی بر اساس کرنش فشاری

برای تخمین تغییر شکل دائمی آسفالت روسازی بزرگراه از کرنش فشاری قائم روی بستر استفاده می‌شود. شکل (۳-۱۱) ارتباط بین کرنش و تعداد تکرار برای شکست را نشان می‌دهد که توسط انجمن تحقیقات چورن<sup>۱</sup> و انجمن بین‌المللی شیل پترولیوم ارائه شده است. همچنین معیار چورن<sup>۱</sup> و روش انجمن آسفالت یکی شده‌اند. دواپر کوچک و خط عبور داده شده از آن‌ها از روش آشتو<sup>۲</sup> به دست آمده‌اند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

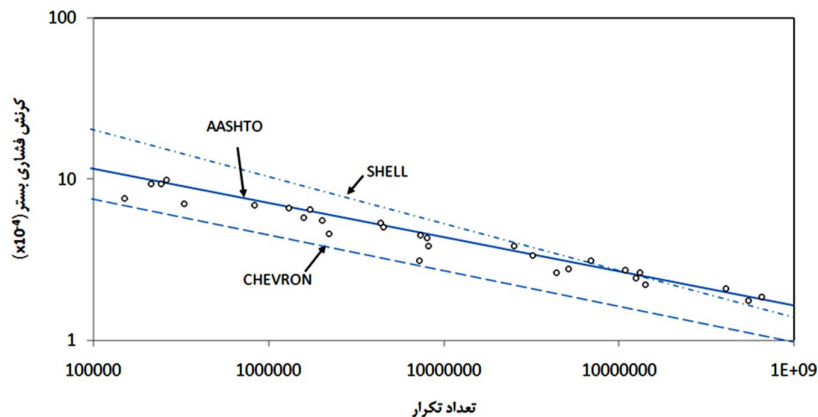
می‌توان ملاحظه نمود که برای یک کرنش فشاری معین، تعداد تکرار مجاز بر اساس معیار شل حدود ده برابر بزرگ‌تر از تعداد تکرار مجاز بر اساس معیار چورن<sup>۱</sup> است. در حقیقت معیار بزرگراه، زمانی که برای بارگذاری راه‌آهن استفاده می‌شود محافظه‌کارانه است. برای تغییر شکل دائمی زیرسازی‌های راه‌آهن معیار شل توصیه می‌شود. این معیار با رابطه (۳-۴۰) قابل توصیف است:

$$N_a = 6.15 \times 10^{-7} \varepsilon_c^{-4} \quad \text{رابطه (۳-۴۰)}$$

که در مقایسه با رابطه (۳-۴۰)،  $f_1 = 6.15 \times 10^{-7}$ ،  $f_2 = 4$  و  $f_3 = 0$  می‌باشند. توجه نمایید که رابطه (۳-۴۰) بر اساس کرنش فشاری است و به همین دلیل برای استفاده در خطوط ریلی توصیه نمی‌شود [۱].

---

1. Chevron Criterion  
2. American Association of State Highway and Transportation Officials



شکل ۳-۱۱) معیار کرنش بستری برای تغییرشکل ماندگار (نمودار لگاریتمی است)

### ۳-۱۱- تبدیل کرنش فشاری به تنش فشاری

به دلیل تفاوت در ماهیت بارگذاری بین بزرگراه و راه‌آهن، قابل درک است که تنش فشاری قائم روی بستر نسبت به کرنش فشاری، معیار بهتری برای طراحی خطوط راه‌آهن است [۱]. به منظور تبدیل رابطه (۳-۴۰) به یک معیار تنش، باید رابطه بین کرنش فشاری قائم ( $\epsilon_t$ ) و تنش فشاری قائم ( $\sigma_c$ ) مورد بررسی قرار گیرد. این ارتباط از رابطه آشتو قابل تعیین است.

روند طراحی توصیه شده توسط آشتو بر اساس یک تست جاده جامع است که در اوتواوا انجام شده است. روش طراحی به جای اصول سخت‌گیرانه شکست سازه‌ای، از یک تعریف کاربردی گسیختگی روسازی راه استفاده می‌کند. برای بار استاندارد تک محوری ۸ kip (۸۰ kN) تکرار مجاز بار می‌تواند از رابطه (۳-۴۱) تعیین شود.

$$\log W_{18} = 9.36 \log (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[(4.2 - P_t)/(4.2 - 1.5)]}{0.40 + [1094/(SN + 1)^{5.19}]} + \log \frac{1}{R} + 0.372(S_i - 3.0)$$

رابطه (۲-۴۱)



## فصل سوم: تئوری حاکم در مدل‌سازی و تحلیل خطوط بالاستی و آسفالتی ۱۲۵

که در این رابطه  $w_{18}$ : تکرار مجاز برای بار تک محوری  $18 \text{ Kip}$ ، SN: عدد سازه‌ای،  $P_1$ : اندیس قابلیت بهره‌برداری نهایی، R: ضریب منطقه ای و  $S_i$ : ارزش تکیه‌گاهی خاک<sup>۲</sup> می‌باشد. در این تحلیل به منظور آسان‌تر شدن تبدیل ضخامت لایه به عدد سازه‌ای یک لایه تمام آسفالتی انتخاب شده است. HMA دارای مدول الاستیک برابر  $60000 \text{ psi}$  ( $4/1 \text{ GN/m}^2$ ) فرض شده است، که طبق متون تخصصی ون‌تیل<sup>۳</sup> دارای ضریب لایه‌ای  $0/5$  می‌باشد. بنابراین ضخامت HMA به وسیله رابطه (۳-۴۲) با عدد سازه‌ای مرتبط می‌شود:

$$SN = 0.5 h_1 \quad \text{رابطه (۳-۴۲)}$$

که در آن  $h_1$ : ضخامت لایه HMA می‌باشد. او همچنین مطابق جدول (۳-۳) مدول الاستیک بستر را به مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر ارتباط می‌دهد. بر اساس مفروضات  $P_1$  برابر ۲ و R برابر ۱ و روابط (۳-۴۱ و ۳-۴۲) و جدول (۳-۳)، تعداد مجاز تکرار بار برای هفت ضخامت HMA و شش مدول الاستیک بستر متفاوت یا به‌طور کلی ۴۲ ترکیب مختلف، در جدول (۳-۴) نشان داده شده است. با فرض نسبت پواسون  $0/35$  برای HMA و  $0/4$  برای بستر، تنش و کرنش فشاری قائم زیر یک بار تک محوری  $18 \text{ Kip}$  به وسیله تئوری لایه‌ای بورمیستر<sup>۴</sup> برای هر ترکیب محاسبه و در جدول (۳-۴) آورده شده است. یک بار محوری روی یک مجموعه از چرخ‌های دوتایی توزیع شده است، که هر کدام دارای یک شعاع تماس  $4/5$  اینچی ( $11/4 \text{ cm}$ ) و فشار تماسی  $70 \text{ psi}$  ( $483 \text{ kN/m}^2$ ) هستند. ارتباط بین تعداد تکرار بار در جدول (۳-۴) و کرنش فشاری جدول (۳-۵)، در شکل (۳-۱۲) ترسیم شده است، که با دوایر کوچک متمایز شده است. قابل مشاهده است که اکثر این دوایر بین معیارهای شیل و چورن قرار گرفته‌اند که این مسئله بیانگر نتایج منطقی در هنگام استفاده از روسازی آسفالتی در تحلیل است. جدول (۳-۵) برای تبدیل رابطه (۳-۴۲) به یک معیار تنشی استفاده می‌شود.

---

1. 80 KN  
2. Soil support value  
3. Van Till et al. 1972  
4. Burmister's layer theory

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی

جدول ۳-۳. رابطه بین مدول الاستیسیته بستر و ضرایب عکس‌العمل بستر خاکی [۱]

مدول الاستیسیته بستر psi	۳۰۰۰	۶۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۴۰۰۰۰
مقادیر تکیه گاهی خاک psi	۳	۴/۸۲	۶/۲۱	۸/۱۴	۹/۲۸	۱۰

$$1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2$$

جدول ۳-۴. تعداد تکرار بار بر اساس فرمول AASHTO [۱]

مدول بستر (E)	ضخامت HMA (in.)						
	۲	۳	۴	۶	۸	۱۰	۱۲
(psi)							
۳۰۰۰	۳۹۸	۳۰۷۰	۱۶۳۰۰	۲۱۳۰۰۰	۱۰۴۸۰۰۰۰	۷۰۳۶۰۰۰۰	۲۹۵۰۰۰۰۰۰
۶۰۰۰	۱۸۵۰	۱۴۶۰۰	۷۷۵۰۰	۱۰۰۱۰۰۰۰	۷۰۴۰۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰۰۰۰۰
۱۰۰۰۰	۶۰۹۰	۴۷۹۰۰	۲۲۵۰۰۰	۳۰۳۳۰۰۰۰	۲۳۰۲۰۰۰۰۰	۱۱۵۰۰۰۰۰۰۰	۴۶۱۰۰۰۰۰۰۰۰
۲۰۰۰۰	۳۱۸۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۰۳۳۰۰۰۰	۱۷۰۴۰۰۰۰۰	۱۳۱۰۰۰۰۰۰۰	۶۰۱۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۴۱۰۰۰۰۰۰۰۰
۳۰۰۰۰	۸۴۰۴۰۰	۶۶۵۰۰۰۰	۳۵۳۰۰۰۰۰	۴۶۱۰۰۰۰۰۰۰	۳۳۱۰۰۰۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۶۰۳۹۰۰۰۰۰۰۰۰
۴۰۰۰۰	۱۵۶۰۰۰۰	۱۰۲۳۰۰۰۰۰	۶۵۵۰۰۰۰۰	۸۵۵۰۰۰۰۰۰۰	۵۹۵۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۹۶۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۱۰۸۰۰۰۰۰۰۰۰۰

$$1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm} ; 1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2$$

جدول ۳-۵. تنش و کرنش فشاری بحرانی بر اساس تئوری لایه‌ای [۱]

مدرول بستر	ضخامت (in)HMA	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	۳	۲	E	مدول بستر										
										$\epsilon_c$	$\sigma_c$	$\epsilon_c$	$\sigma_c$	$\epsilon_c$	$\sigma_c$	$\epsilon_c$	$\sigma_c$	$\epsilon_c$	$\sigma_c$	
		$\epsilon_c$	۲/۹۱	۲/۲۶	۲/۰	۱/۵۶	۱/۳۴	۱/۱۹												
		$\sigma_c$	۱/۱۶	۱/۸۰	۲/۴۶	۳/۶۹	۴/۶۲	۵/۳۹												
		$\epsilon_c$	۳/۹۴	۳/۱۶	۲/۶۶	۲/۰۶	۱/۷۵	۱/۵۵												
		$\sigma_c$	۱/۶۰	۲/۴۴	۳/۳۰	۴/۸۷	۶/۰۳	۷/۰۰												
		$\epsilon_c$	۵/۶۹	۴/۵	۳/۷۴	۲/۸۵	۲/۴۰	۲/۱۰												
		$\sigma_c$	۲/۳۳	۳/۵۰	۴/۶۸	۶/۸۲	۸/۴۰	۹/۶۸												
		$\epsilon_c$	۸/۹۵	۶/۹۱	۵/۶۴	۴/۱۹	۳/۶۷	۳/۰۱												
		$\sigma_c$	۲/۷۴	۵/۵۱	۷/۲۴	۱۰/۲۹	۱۲/۴۸	۱۴/۲۴												
		$\epsilon_c$	۱۶/۱۱	۱۱/۹	۹/۴۳	۶/۷۱	۵/۴۲	۴/۶۳												
		$\sigma_c$	۶/۹۸	۹/۹۱	۱۲/۶۵	۱۷/۲۸	۲۰/۴۹	۰۲/۲۳												
		$\epsilon_c$	۲۳/۵	۱۶/۹	۱۳/۰	۸/۹۹	۷/۱۳	۶/۰۲												
		$\sigma_c$	۱۰/۵۰	۴۰/۴۸	۱۸/۰۹	۳۴/۰۴	۲۸/۰۸	۳۱/۱۹												
		$\epsilon_c$	۳۸/۳	۲۶/۳	۱۹/۷	۱۳/۰	۹/۹۸	۸/۱۹												
		$\sigma_c$	۱۷/۷۶	۲۳/۶۰	۲۸/۷۵	۳۶/۸۵	۴۱/۹۹	۴۵/۶۶												
		(psi)	۳/۰۰۰	۶/۰۰۰	۱۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۳۰/۰۰۰	۴۰/۰۰۰												

$$\sigma_c = \text{تنش بحرانی (psi)}; \epsilon_c = \text{کرنش بحرانی} (x 10^{-3}) \text{ kN/m}^2, 1 \text{ psi} = 6.9$$

## ۳-۱۲- تغییر شکل دائمی بر اساس تنش فشاری

با جای‌گذاری کرنش‌های بحرانی جدول (۳-۵)، در رابطه (۳-۳۹) تعداد تکرار مجاز برای ۴۲ ترکیب مذکور به‌دست می‌آید که نتایج آن در جدول (۳-۶) ارائه شده است. در صورتی که تعداد تکرار بار در جدول (۳-۶) در برابر تنش‌های بحرانی جدول (۳-۵) ترسیم شود، مطابق شکل (۳-۱۲) یک مجموعه از خطوط مستقیم به‌دست می‌آید. ارتباط این خطوط مستقیم در مقیاس لگاریتمی تعداد مجاز تکرار بار ( $N_a$ ) را مشخص می‌کند.

رابطه  $N_a$  با تنش فشاری به‌صورت رابطه (۳-۴۳) ارائه شده است:

$$N_a = F(E)\sigma_c^{-f_2} \quad \text{رابطه (۳-۴۳)}$$

که در آن  $F(E)$  یک تابع از مدول الاستیک بستر و  $f_2$  یک ثابت است که نمایان‌گر شیب معکوس این خطوط مستقیم می‌باشد. معکوس شیب هر خط مستقیم از شکل (۳-۱۲) تعیین شده و میانگین این شش مقدار  $3/734$  بدست آمده که به‌عنوان  $f_2$  در نظر گرفته شده است. تابع  $F(E)$  تعداد تکرار مجاز (زمانی که  $\sigma_c$  برابر  $1 \text{ psi}$  ( $6/9 \text{ kN/mm}^2$ ) می‌باشد) است. برون‌یابی خطوط مستقیم به  $1 \text{ psi}$  در شکل (۳-۱۳) مقدار  $F(E)$  به ازای هر  $E$  را نتیجه می‌دهد. رابطه خطوط مستقیم با استفاده از  $E$  و  $F(E)$  به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$F(E) = 4.837 \times 10^{-5} (E)^{3.583} \quad \text{رابطه (۳-۴۴)}$$

با ترکیب رابطه (۳-۴۳) و رابطه (۳-۴۴) معیار تنش برای تغییر شکل دائمی به‌صورت رابطه (۳-۴۵) بدست می‌آید:

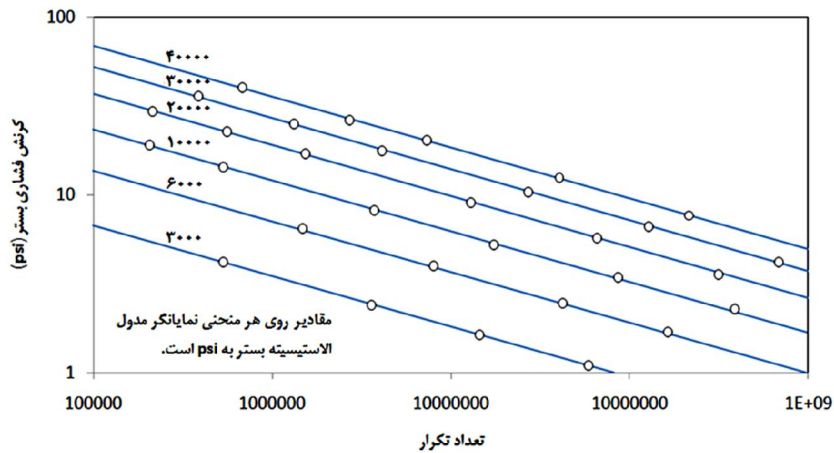
$$N_a = 4.837 \times 10^{-5} \sigma_c^{-3.734} E^{3.583} \quad \text{رابطه (۳-۴۵)}$$

که در مقایسه با رابطه (۳-۳۵)،  $f_1 = 4.837 \times 10^{-5}$  و  $f_2 = 3.374$  و  $f_3 = 3.583$  می‌باشد.

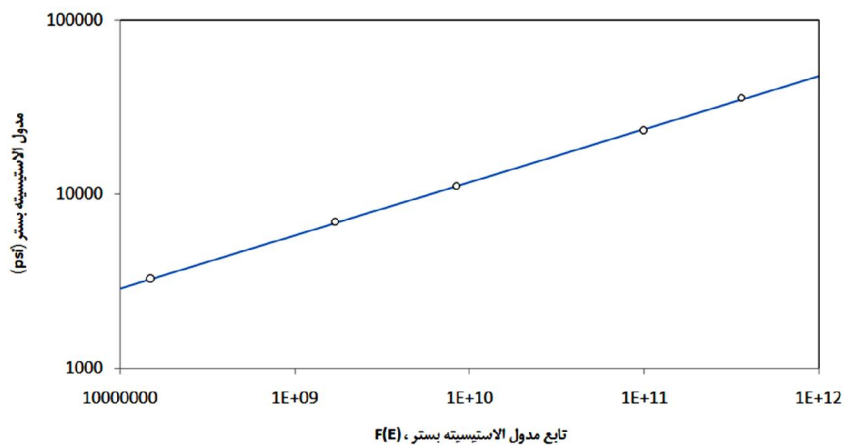
جدول ۳-۶. تعداد تکرارهای بدست آمده از معیار کرنش شیل [۱]

معمول بستر (E)	(psi)						
ضخامت HMMN (in)	۲۱	۸۵۷۱۵۶۵۹	۱۹۸۱۴۵۴۵۰	۲۸۴۱۶۰۰۰۰	۱۰۳۷۸۴۷۹۰۰	۱۹۰۶۳۹۵۲۰۰	۳۰۵۵۰۹۷۴۰۰
	۱۰	۲۵۵۰۶۳۸۷	۶۱۶۴۳۰۰۰۴	۱۲۲۷۷۳۷۰	۲۴۱۳۳۱۸۰	۶۵۵۲۶۰۰۰۰	۱۰۶۴۸۹۱۴۰۰
	۷	۵۸۶۳۸۵۳	۱۴۹۸۹۱۳۷۵	۳۱۴۱۵۶۶	۹۳۱۶۴۹۷۸	۱۸۵۲۶۳۵۰	۳۱۶۰۴۹۳۸۰
	۵	۹۵۷۹۴۴	۲۶۶۶۰۰۰۰	۶۰۷۴۵۷۲	۱۹۹۴۳۳۶	۴۲۳۹۴۹۶۰	۷۴۸۸۰۰۵۳
	۴	۹۱۴۸۰	۳۰۶۵۱۰	۷۷۷۲۹۴	۳۰۳۲۰۹۰	۷۱۲۲۵۴۱	۱۳۳۷۵۴۴۳
	۳	۲۰۱۵۴	۷۵۳۵۰	۲۱۵۲۰۸	۹۴۱۰۰۸	۲۳۷۸۳۴۰	۴۶۸۰۰۰۳
	۲	۲۸۵۶	۱۲۸۳۷	۴۰۸۱۰	۲۱۵۲۰۸	۶۱۹۵۹۸	۱۳۶۶۱۴۴
		۳/۰۰	۶/۰۰۰۰	۱۰/۰۰۰۰	۲۰/۰۰۰۰	۳۰/۰۰۰۰	۴۰/۰۰۰۰

1 in. = 2.54 cm ; 1 psi = 6.9 kN/m<sup>2</sup>



شکل ۳-۱۲) گرنش فشاری بستر در برابر تعداد تکرار بار (  $1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2$  )



شکل ۳-۱۳) گرنش فشاری بستر در برابر تعداد تکرار بار (  $1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2$  )

### ۳-۱۳- روند توسعه نرم‌افزار کنترک

کنترک که یک برنامه کامپیوتری بر مبنای لایه الاستیک و اجزای محدود است، برای اولین بار در دانشگاه کنتاکی توسعه یافت. این برنامه برای طراحی و تحلیل عملکرد محور زیرسازی خطوط قابل کاربرد است [۳]. کنترک در ابتدا برای تحلیل زیرسازی‌های بالاستی سنتی و زیرسازی‌های لایه‌ای آسفالتی و پیش‌بینی عمر بهره‌برداری لایه‌های مربوطه طراحی شد. نسخه اولیه کنترک توسط

FORTAN و تحت DOS نوشته شد و بعدها با GeneralUser و Windows Interface بهینه شد. این نسخه اولیه به عنوان KENTRACK2.0.1 شناخته شد.

این برنامه به کاربران این امکان را می‌داد که مشخصات مختلف خط را تغییر دهند؛ در حالی که در نسخه قبلی تغییر قابل ملاحظه‌ای میسر نبود. میزان اعتبار و صحت نتایج KENTRACK2.0.1، با استفاده از مقایسه مقادیر تنش پیش‌بینی شده از برنامه با تنش میدانی بدست آمده از ادوات اندازه‌گیری، سنجیده و تصدیق شده و برای اندازه‌گیری تنش‌ها در لایه‌های مختلف خط، از ادوات اندازه‌گیری فشار زمین<sup>۱</sup> و حسگرهای پیزوالکتریک<sup>۲</sup> همراه با شبکه‌ای از نیروسنج‌ها، در نقاط مختلفی از خطوط ریلی استفاده شده است.

اگرچه KENTRACK2.0.1 به کاربران اجازه ورود داده‌ها را می‌داد و از این نظر کار را برای کاربران راحت‌تر می‌کرد، اما محدودیت‌هایی هم داشت؛ از جمله این که مقادیر پیش‌زمینه نداشت. همچنین برنامه‌نویسی آن، در فرترن بود و این مسئله پیشرفت‌های بعدی را با مشکل مواجه می‌کرد. همچنین محدودیتی برای مقادیر ورودی قائل نبود و با وارد کردن اطلاعات نادرست، برنامه قبل از رسیدن به نتیجه متوقف می‌شد.

بستر نرم‌افزاری Visual Studio، که برای نسخه ۳.۰ این برنامه استفاده شده، بسیار مناسب‌تر و کارآمدتر از موارد قبلی است. از نرم‌افزار MATLAB، برای ارزیابی محاسبات فرترن استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نسخه ۳.۰ بسیار دقیق‌تر و مناسب‌تر از نسخه ۲.۰، ۱ است [۴]. اخیراً نسخه ۴ این برنامه نیز به‌روز شده است که در آن اصلاحاتی از جمله لحاظ نمودن مدول مختلط دینامیکی مصالح ویسکوالاستیک صورت گرفته است. در این برنامه علاوه بر اضافه شدن راهنمای استفاده کاربران در هر مرحله می‌توان از واحدهای SI در روند تحلیل و طراحی خطوط ریلی استفاده نمود. از مهم‌ترین مزایای نسخه جدید کنتراک می‌توان به قابلیت انتخاب قیر آسفالت بر اساس سیستم دسته‌بندی عملکرد (PG)<sup>۳</sup> اشاره کرد [۵].

### ۳-۱۴- کارایی نرم‌افزار

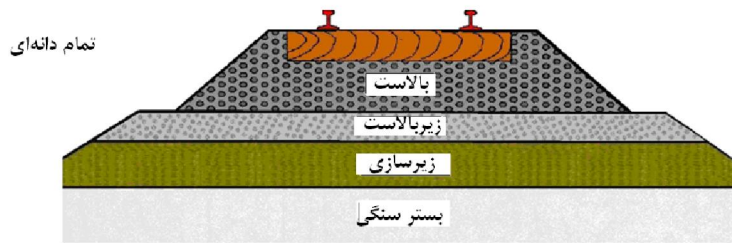
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بر اساس تنش بحرانی و کرنش بستر خط، طراحی برای ترکیبی از زیرسازی‌های مختلف، توسط راهکار خرابی تجمعی، قابل پیش‌بینی است. این طراحی بر اساس خرابی

---

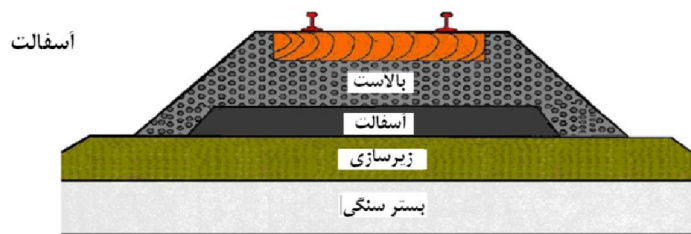
1. Geokon  
2. Tekscan  
3. Performance Grading

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی

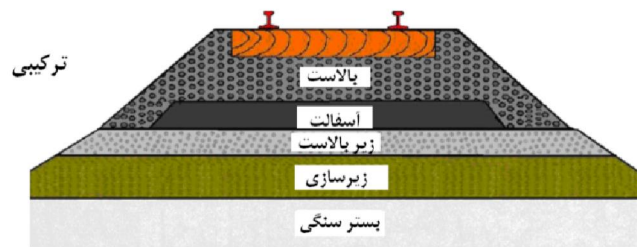
مؤثر بارهای تکراری بر مصالح موجود در بستر خط آهن و در لایه‌های مختلف آن انجام می‌شود. علاوه بر تحلیل بستر خط آهن بالاستی، کنتراک ۴۰، قابلیت تحلیل زیرسازی‌های دارای لایه آسفالتی را دارد. این نرم‌افزار برای تحلیل سه نوع کلی از زیرسازی خط آهن مناسب است. مطابق شکل (۳-۱۴) زیرسازی با مصالح دانه‌ای شامل چهار لایه بالاست، زیربلاست، بستر و بستر سنگی است. در شکل‌های (۳-۱۴) تا (۳-۱۶) انواع مقاطع خطوط ریلی ارائه شده است که قابلیت تحلیل آن‌ها در برنامه وجود دارد. در ادامه روند مورد نیاز برای تحلیل و طراحی خطوط ریلی با استفاده از این نرم‌افزار تشریح شده است.



شکل ۳-۱۴ ساختار بستر با مصالح دانه‌ای (بالاستی)



شکل ۳-۱۵ ساختار بستر آسفالتی



شکل ۳-۱۶ ساختار بستر ترکیبی

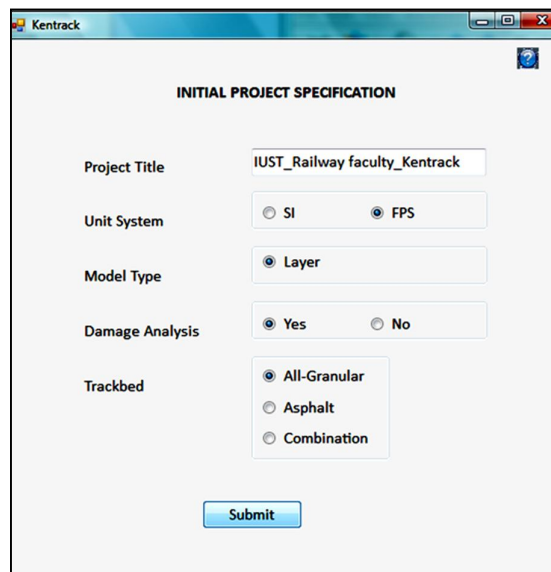


۳-۱۵- منابع و مراجع

- [1] Kentrack: A Coputer Program for Hot-Mix Asphalt and Conventional Ballast Railway Trackbeds. Yang H. Huang, Chiang Lin, Xuejun Deng, Jerry Rose, Asphalt Institute, (Publication RR-84-1) and National Asphalt Pavement Association (Publication QIP-105), 164 pages
- [2] Kentrack: A Railway Trackbed Structural Design and Analysis Program, Jerry G. Rose, Bei Su, William B. Long, Proceedings of the 2003 AREMA Annual Conference ,25 pages
- [3] Pavement analysis and design, Yang H.Huang, second edition.
- [4] Kentrack, A Performance-Based Layered Elastic Railway Trackbed Structural Design And Analysis Procedure – A Tutorial, Jerry G. Rose, Nithin K. Agarwal, Justin D. Brown, Neeharika Ilavala, Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference JRC2010 April 27-29, 2010, Urbana, Illinois, USA
- [5] KENTRACK 4.0: A RAILWAY TRACKBED STRUCTURAL DESIGN PROGRAM, (2013). Theses and Dissertations-Civil Engineering
- [6] Advanced Research Associates. (2004). 2002 Design Guide: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A Project, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.



## « فصل چهارم » آشنایی با محیط نرم افزار



The screenshot shows a window titled 'Kentrack' with a form titled 'INITIAL PROJECT SPECIFICATION'. The form contains the following fields and options:

- Project Title:** IUST\_Railway faculty\_Kentrack
- Unit System:**  SI  FPS
- Model Type:**  Layer
- Damage Analysis:**  Yes  No
- Trackbed:**  All-Granular  Asphalt  Combination

A 'Submit' button is located at the bottom of the form.

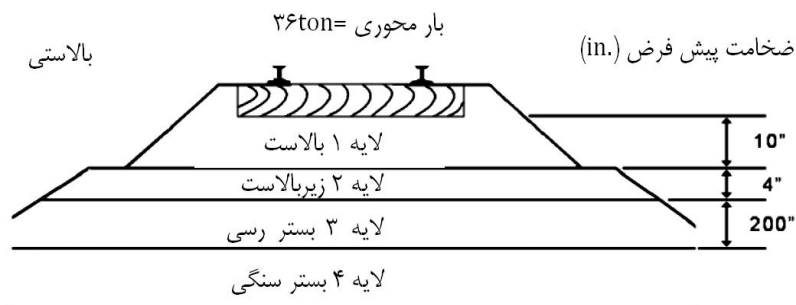
در این فصل به معرفی محیط نرم افزار پرداخته می شود. به منظور آشنایی با برنامه کنتراک، روند مرحله به مرحله کار با نرم افزار به همراه داده های ورودی و دامنه مقادیر مجاز به طور کامل در این فصل ارائه شده است. به منظور آشنایی بیشتر با پارامترهای ورودی، در هر قسمت به اختصار در مورد هر یک از مجموعه داده های مربوط به خط بحث شده است.

## ۴-۱- مقدمه

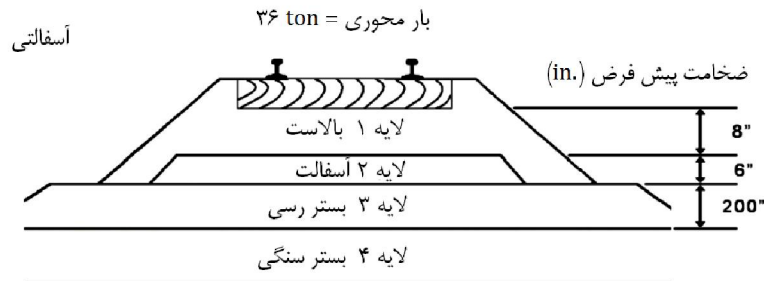
مقداردهی اولیه به برنامه، قسمت عمده کار با نرم‌افزار کنترک را تشکیل می‌دهد. بدین منظور با توجه به مشخصات خط ریلی مورد نظر، باید اطلاعات مصالح خط، جمع‌آوری شده و در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این اطلاعات در برنامه به پنج زیرمجموعه تقسیم‌بندی شده است، که داده‌های مربوط به ریل، تراورس، بار، لایه‌ها و تحلیل خرابی را شامل می‌شود. همچنین دستورات مهم برنامه، دربردارنده مراحل ورود اطلاعات، انتخاب وضعیت‌های مورد نظر از بین گزینه‌های مختلف پیش‌زمینه و دریافت نتایج تحلیل‌هاست.

## ۴-۲- روند کار با برنامه و معرفی پارامترهای ورودی

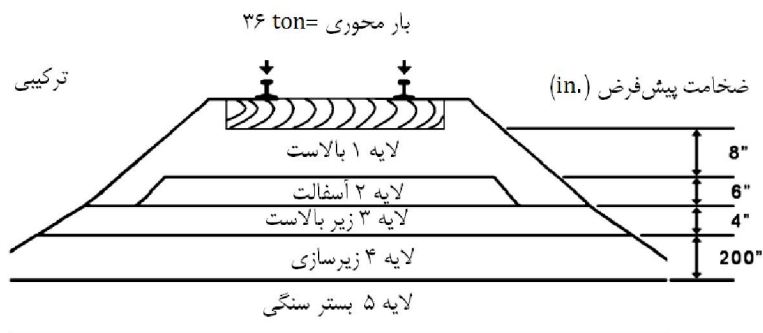
مراحل کار با برنامه به صورت قدم به قدم، به همراه تصاویری از فضای اجرای برنامه در هر مرحله ارائه شده است که در سه بخش زیرسازی‌های بالاستی، آسفالتی و ترکیبی به آن پرداخته می‌شود. در ابتدا آشنایی با ضخامت‌های پیش‌زمینه برنامه برای لایه‌های مختلف زیرسازی ضروری است. شکل (۴-۱) تا (۴-۳) به ترتیب، مقدار این ضخامت‌ها برای سه نوع زیرسازی بالاستی، آسفالتی و ترکیبی را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این تصاویر نحوه شماره‌گذاری لایه‌هاست. آگاهی از این موضوع در هنگام کار با برنامه، برای اختصاص مشخصات به لایه‌های مورد نظر، ضرورت دارد [۱].



شکل ۴-۱) ضخامت مصالح در بستر بالاستی



شکل ۴-۲) ضخامت مصالح در بستر آسفالتی



شکل ۴-۳) ضخامت مصالح در بستر ترکیبی

مطابق شکل (۴-۱)، در مقطع بالاستی ضخامت مصالح دانه‌ای ۱۴ اینچ است که نرم‌افزار در مورد زیرسازی آسفالتی نیز همین ضخامت را متصور است؛ با این تفاوت که این بار عمق لایه بالاست ۸ اینچ است و همچنین لایه زیربالات با لایه آسفالت جایگزین شده است. بیشترین ضخامت مصالح ۱۸ اینچ و مربوط به خطوط با زیرسازی ترکیبی است. این اطلاعات به‌عنوان داده‌های استاندارد و متداول، در برنامه گنجانده شده است. به بیان دیگر، این مقادیر برای ضخامت لایه‌ها توصیه می‌شوند. در ادامه برای هر سه نوع زیرسازی، مراحل کار با برنامه تشریح شده است.

#### ۴-۲-۱- خطوط بالاستی

شکل (۴-۴) نمایان‌گر صفحه نخست پس از اجرای کنترک است. به دلیل تعداد زیاد جعبه‌های مربوط به ورودی داده‌ها، تمامی قسمت‌ها به‌طور جداگانه، شماره‌گذاری و توضیح داده شده است. در این مرحله با توجه به شکل (۴-۴) باید مطابق گام‌های ذیل عمل شود:

#### گام اول: تعیین مشخصات پروژه

- (۱) نام پروژه
- (۲) واحد کمیت‌های موجود در پروژه می‌تواند با یکی از دو سیستم FPS<sup>۱</sup> و یا SI<sup>۲</sup> تعریف شود.
- (۳) نوع مدل‌سازی لایه‌ای کنترک را یادآوری می‌کند، که باید توسط کاربر تأیید شود.
- (۴) در این قسمت کاربر مشخص می‌کند که آیا تحلیل خرابی و محاسبات مربوط به عمر سازه انجام شود یا خیر؟
- (۵) انتخاب نوع زیرسازی (کاربر با توجه به تصاویر (۴-۱) تا (۴-۳) یکی از مقاطع مورد نظر را انتخاب می‌کند).
- (۶) تأیید اطلاعات ورودی

---

1. Foot-Pound-Second system  
2. Systeme International of units

**INITIAL PROJECT SPECIFICATION**

① Project Title

② Unit System  SI  FPS

③ Model Type  Layer

④ Damage Analysis  Yes  No

⑤ Trackbed  All-Granular  
 Asphalt  
 Combination

⑥

شکل ۴-۴) صفحه اول نرم افزار پس از اجرای برنامه

### گام دوم : انتخاب نوع ریل

شکل (۴-۵) چگونگی انتخاب نوع و مشخصات ریل در نرم افزار را نشان می‌دهد. می‌توان نوع ریل مورد نظر را از میان گزینه‌های موجود انتخاب کرد. در صورتی که ریل مورد نظر کاربر در میان گزینه‌های پیشنهادی نباشد، کاربر باید مشخصات ریل شامل مدول مقطع، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و ثابت فنر (پابند) بین ریل و تراورس را در سطرهای مربوطه وارد کند. جداول (۴-۱) و (۴-۲) به ترتیب مشخصات ریل‌های پیش‌فرض مورد استفاده در امریکای شمالی و مشخصات ریل‌های متداول شامل UIC-60 را نشان می‌دهند.

Select Rail type	RE 136	
Rail Section Modulus	RE 100 RE 115 RE 119 RE 132 RE 136 RE 140	(in <sup>3</sup> )
Rail Youngs Modulus		(psi)
Rail Moment of Inertia	94.9	(in <sup>4</sup> )
Rail Tie Spring Constant	7000000	(lb/in)
Next >>		

شکل ۴-۵) تصویر صفحه مربوط به مشخصات ریل در برنامه

جدول ۴-۱. مشخصات ریل‌های مورد استفاده امریکای شمالی [۲]

مدل ریل	جرم واحد طول		مساحت سطح مقطع		ممان اینرسی	
	lb/yd	Kg/m	in <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	in <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>
RE100	۱۰۱/۵	۵۰/۴	۹/۹۵	۶۴/۱۹	۴۹	۲۰۳۹
RE115	۱۱۴/۷	۵۶/۹	۱۱/۲۵	۷۲/۵۸	۶۵/۶	۲۷۳۰
RE132	۱۳۲/۱	۶۵/۵	۱۲/۹۵	۸۳/۵۵	۸۸/۲	۳۶۷۱
RE136	۱۳۶/۲	۶۷/۶	۱۳/۳۵	۸۶/۱۳	۹۴/۹	۳۹۵۰
RE140	۱۴۰/۶	۶۹/۸	۱۳/۸	۸۹/۰۳	۹۶/۸	۴۰۲۹



جدول ۴-۳. مشخصات هندسی ریل‌های متداول [۳]

مشخصات شناسایی مقطع ریل	نام تجاری		U-33	R-50	UIC-60	PH-37	HI-54	جرتیل سفتی
	شکل هندسی	پاشنه دار						
جرم واحد طول (kg/m)		پاشنه دار	۴۶/۳	۵۰/۹۰	۶۰/۳۴	۵۶/۶۴	۵۶/۰۴	۶۱/۱۱
مساحت سطح مقطع ریل (mm <sup>2</sup> )		پاشنه دار	۵۹۰۶	۶۶۸۲	۷۵۸۷	۷۲۱۵	۶۸۸۴	۷۷۸۵
ارتفاع کل (mm)		پاشنه دار	۱۴۵	۱۵۳	۱۷۲	۱۸۲	۱۳۳/۲۵	۱۴۲
عرض پاشنه (mm <sup>4</sup> )		پاشنه دار	۱۳۴	۱۴۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۲۹/۷	۱۵۰
عرض کلاهک (mm <sup>4</sup> )		پاشنه دار	۶۲	۶۵	۷۰/۶	***	***	۷۲
ممان اینرسی حول محور خستگی (mm <sup>4</sup> )		پاشنه دار	۱۵/۸	۲۰/۱۶	۳۰/۵۵	۳۰/۷۷	۱۳/۸	۱۸/۶۶
مدول مقطع فوقانی (حول پاشنه) (mm <sup>4</sup> )		پاشنه دار	۲۳۶	۲۸۱,۱	۳۳۵	۳۱۱	۱۹۵	۲۳۳/۸
مدول مقطع تحتانی (حول کلاهک) (mm <sup>4</sup> )		پاشنه دار	۲۰۴	۲۳۷/۹	۳۷۷	۳۷۰	۲۲۰/۹	۲۸۵/۳

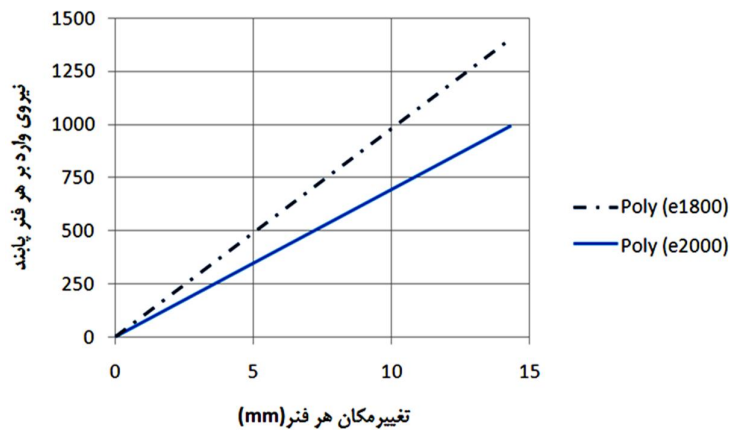
داده‌های ورودی استاندارد به همراه محدوده مجاز آن‌ها برای گام‌های اول و دوم در جدول (۴-۳) ارائه شده است. همچنین در این جدول توضیحات تکمیلی در مورد برخی از پارامترها آورده شده است.

جدول ۴-۳. داده‌های ورودی استاندارد و دامنه منطقی مقادیر پارامترهای ورودی (گام‌های اول و دوم)

نام پارامتر	واحد	ورودی‌های استاندارد	دامنه منطقی مقادیر	توضیحات
نام پروژه	-	TEST	-	دلخواه
سیستم واحد کمیت‌ها	-	FPS	(FPS/SI)	با توجه به واحد داده‌های پیش‌فرض سیستم FPS مناسب‌تر است. (فوت پوند ثانیه)
نوع مدل‌سازی	-	لایه‌ای	-	رجوع به بخش ۳
آنالیز خرابی	-	بله	(بله / خیر)	رجوع به بخش ۳
زیرسازی	-	بالاستی(دانه‌ای)	(بالاستی/آسفالتی/ترکیبی)	رجوع به بخش ۳
نوع ریل	-	RE-136	۶ نوع ریل RE	
مدول مقطع ریل	in <sup>3</sup>	۲۳/۹	۱۵-۲۵	وابسته به شکل هندسی مقطع ریل
مدول یانگ ریل	psi	۳۰۰۰۰۰۰	-	وابسته به جنس ریل
ممان اینرسی ریل	in <sup>4</sup>	۹۴/۹	۵۰-۱۰۰	وابسته به شکل هندسی مقطع ریل
ثابت فنر	lb/in	۷۰۰۰۰۰۰	-	وابسته به مشخصات سیستم پابند(سختی فنر)

ثابت فنر آخرین پارامتر جدول (۴-۳) است. به منظور کنترل تغییر مکان قائم سیستم اتصالات ریل به تراورس، از یک منحنی موسوم به «منحنی مشخصه» استفاده می‌شود که توسط کارخانه سازنده پابند

فنر) ارائه می‌شود. این منحنی در واقع یک نمودار بار-تغییر مکان است که در آن محور قائم نشان‌دهنده نیروی وارد بر فنر و محور افقی، نشان‌دهنده تغییر مکان قائم به وجود آمده در آن است. شیب منحنی‌های مشخصه، مقدار سختی فنر سیستم اتصالات ریل به تراورس را نتیجه می‌دهد. شکل (۴-۶) منحنی مشخصه سیستم فنرهای پاندرول را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۴-۶) منحنی مشخصه پاندهای پاندرول (mm و kN)

### گام سوم : انتخاب مشخصات مرتبط با تراورس

شکل (۴-۷) صفحه مربوط به این مرحله را نشان می‌دهد. توضیحات تکمیلی به همراه ورودی‌های استاندارد و دامنه منطقی داده‌ها در جدول (۴-۴) آورده شده است. جدول (۴-۵) دربردارنده مشخصات تراورس‌های متداول در نقاط مختلف جهان است. مراحل مورد نیاز این گام، به شرح زیر است.

- ۱) انتخاب نوع تراورس؛ که شامل دو نوع تراورس چوبی و بتنی است.
- ۲) تعداد خطوط متقاطع روی تراورس با توجه به شکل (۴-۸)؛ در حقیقت این قسمت تعداد تقسیم‌بندی‌های روی تراورس بر اساس روش اجزای محدود را نشان می‌دهد<sup>۱</sup>.
- ۳) ضخامت تراورس
- ۴) عرض تراورس

۱. رجوع به فصل سوم

۵) ممان اینرسی تراورس

۶) مدول ینگ تراورس

۷) فاصله بین دو تراورس متوالی

۸) تعداد دوره‌ها؛ این قسمت بیان‌گر تعداد فصل‌های مختلف سال است و تأثیری در خروجی

مربوط به زیرسازی بالاستی ندارد. این موضوع در تحلیل زیرسازی‌های آسفالتی، به دلیل بحث

اثر دما اهمیت دارد.

شکل ۴-۷) صفحه مربوط به مشخصات تراورس

۹) انتخاب فصلی که خروجی‌ها با توجه به آن محاسبه می‌شوند.

۱۰) شماره محل قرارگیری ریل روی تراورس. با توجه به شکل (۴-۸) محل قرارگیری ریل

روی تراورس، المان شماره ۴ است.

۱۱) طول تراورس

۱۲) فاصله مرکز به مرکز بین ریل‌ها

۱۳) فاصله بین نقاط ۱ و ۲ در جهت تقاطع با توجه به شکل (۴-۸)

(۱۴) شماره تراورس ابتدایی به منظور جمع آثار نیروها  
 (۱۵) شماره تراورس انتهایی به منظور جمع آثار نیروها  
 شکل (۹-۴) به فهم موضوع یاد شده، کمک می‌کند. همچنین بحث جمع آثار نیروهای چرخ در فصل گذشته تبیین شده است.  
 (۱۶) انتخاب مقاطعی که خروجی بر مبنای آن‌ها محاسبه می‌شود.  
 با توجه به شکل (۹-۴) تراورس‌های شماره ۳ و ۶ زیر بار مستقیم چرخ هستند و به همین دلیل بهتر است نتایج زیر این تراورس‌ها که وضعیت بحرانی‌تری دارند، بررسی شود.  
 (۱۷) تراورس در مقطع، یکنواخت فرض شده است. در واقع این قسمت تنها یکی از مفروضات برنامه را به کاربر یادآور می‌شود.

جدول ۴-۴. داده‌های ورودی استاندارد و دامنه منطقی مقادیر پارامترهای ورودی (کام سوم)

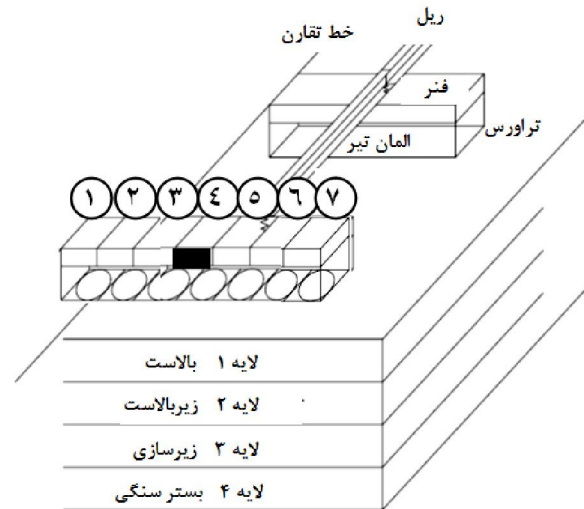
توضیحات	دامنه منطقی مقادیر	ورودی‌های استاندارد	واحد	نام پارامتر
	(چوبی / بتنی)	چوبی		نوع تراورس
رجوع به بخش (۱)، طراحی اجزا محدود	بدون محدودیت	۷		تعداد نقاط در جهت مقاطع
ابعاد تراورس	بدون محدودیت	۷	in	ضخامت تراورس
ابعاد تراورس	۷/۵-۱۲	۹	in	عرض تراورس
وابسته به ابعاد تراورس		۲۵۷/۲۵	in <sup>4</sup>	ممان اینرسی تراورس
وابسته به جنس تراورس	$\times (۴ تا ۱/۵)$ ۱۰۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰	psi	مدول یانگ
وابسته به نوع تراورس	۱۹-۲۷	۲۰	in	فاصله تراورس‌ها

ادامه جدول ۴-۴

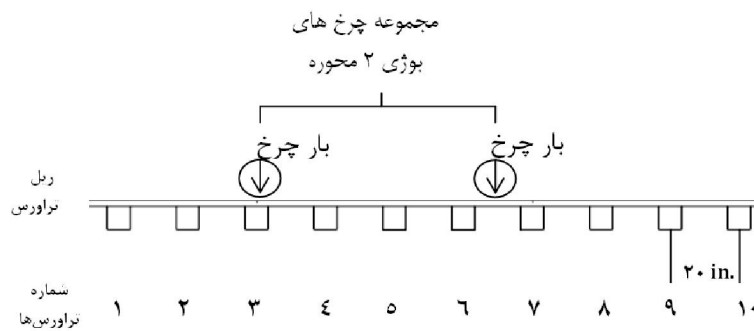
تعداد دوره‌ها		۴	۱-۴	(بهار، تابستان، پاییز، زمستان)
فصل مربوط به خروجی		دوره ۱	۱-۴	
شماره ایمن محل قرارگیری ریل روی تراورس		۴		شکل (۴-۸)
طول تراورس	in	۱۰۸	۷۸-۱۰۸	جدول (۴-۵)
فاصله مرکز به مرکز ریل	in	۵۹/۵	۳۹-۷۸/۷	با توجه به سیستم خط هر کشور
فاصله بین نقاط ۱ و ۲	in	۱۵		شکل (۴-۸)
شماره تراورس اول		۳		رجوع به فصل سوم، (جمع اثر نیروها)
شماره تراورس آخر		۶		رجوع به فصل سوم، (جمع اثر نیروها)
مقطع تراورس		یکنواخت		رجوع به بخش اول

جدول ۴-۵. مشخصات تراورس‌های متداول در دنیا (میلی‌متر)

محل استفاده	جنس	عرض	طول	فاصله تراورس‌ها
استرالیا	چوبی	۲۱۰-۲۶۰	۲۰۰۰-۲۷۴۳	۶۱۰-۷۶۰
	بتنی			۶۰۰-۶۸۵
چین	چوبی	۱۹۰-۲۲۰	۲۵۰۰	۵۴۳-۵۶۸
	بتنی	۲۴۰-۲۹۰	۲۵۰۰	۵۶۸
اروپا	چوبی	۲۵۰	۲۶۰۰	۶۳۰-۷۰۰
	بتنی	۲۵۰-۳۰۰	۲۳۰۰-۲۶۰۰	۶۹۲
آمریکای شمالی	چوبی	۲۲۹	۲۵۹۰	۴۹۵
	بتنی	۲۸۶	۲۶۲۹	۶۱۰
آفریقای جنوبی	چوبی	۲۵۰	۲۱۰۰	۷۰۰
	بتنی	۲۰۳-۲۵۴	۲۰۵۷	۷۰۰
	بتنی	۲۳۰-۳۰۰	۲۲۰۰	۶۰۰



شکل ۴-۸) موقعیت قرارگیری ریل روی تراورس و شماره‌گذاری نقاط در جهت متقاطع تراورس



شکل ۴-۹) موقعیت چرخ‌های یک بوژی دو محوره نسبت به تراورس‌ها

شکل (۴-۹) موقعیت چرخ‌های یک بوژی دو محوره وسیله ریلی را نسبت به تراورس‌ها مشخص می‌کند. برای مرحله ۱۴ از گام پنجم، یک حالت مطمئن برای جمع اثر نیروها، انتخاب تراورس شماره ۳ به‌عنوان تراورس ابتدایی و تراورس شماره ۶ به‌عنوان تراورس انتهایی می‌باشد.



**گام چهارم: مشخصات مربوط به بار**

شکل (۴-۱۰) صفحه برنامه در این گام را نشان می‌دهد. برای گام چهارم مراحل زیر قابل ذکر است:

۱) تعداد بارهای محوری؛ با انتخاب گزینه ۲، در واقع بار عبوری ما تبدیل به یک بوژی دو محوره، مطابق شکل (۴-۹) می‌شود. باید توجه کرد که تعداد تکرار بار در این حالت با تعداد تکرار بار یک واگن متفاوت است<sup>۱</sup>. در صورتی که تکرار بار سالیانه برای یک بار محوری محاسبه شده باشد، کاربر باید تعداد تکرار بار محوری قطار را به تعداد بارهای محوری انتخاب شده در برنامه، تقسیم و سپس در محاسبات لحاظ کند.

۲) انتخاب تعداد تراورس‌ها در تحلیل یک بار محوری تنها<sup>۲</sup>؛ تعداد ۶ تراورس در حالت پیش‌زمینه نرم‌افزار ثبت شده است.

۳) پر کردن جدول مربوط به مدل‌سازی بار با توجه به شکل (۴-۹)؛ در این مرحله می‌توان تعداد بار انتخابی مرحله ۱ را با توجه به موقعیت چرخ‌ها در وسیله ریلی، به‌عنوان بار عبوری مدل نمود. در شکل (۴-۹) حالت پیش‌زمینه نرم‌افزار، در مدل کردن دو بار متمرکز چرخ و نحوه شماره‌گذاری تراورس‌ها آورده شده است. جدول (۴-۶) مربوط به اطلاعات مربوط به گام چهارم را نشان می‌دهد.

۱. رجوع به شکل (۳-۹) و محاسبات مربوطه

۲. رجوع به شکل (۳-۲)

① Number of Axle Loads

② Number of ties for Single Axle Analysis

③

Load Number	Distance form Tie Centerline (in)	Wheel Load (lbs)
1	40	36000
2	110	36000

شکل ۴-۱۰) صفحه‌ی مربوط به اطلاعات بار

جدول ۴-۶. داده‌های ورودی استاندارد و دامنه منطقی مقادیر پارامترهای ورودی (گام سوم)

نام پارامتر	واحد	ورودی‌های استاندارد	دامنه منطقی مقادیر	توضیحات
تعداد بارهای محوری	-	۲	۱ تا ۲۵	دلخواه
تعداد تراورس‌های تحت تاثیر یک بار محوری تنها	-	۶	۶ تا ۱۰	شکل (۱-۳)
فاصله بار شماره ۱ از مرکز تراورس شماره ۱	in	۴۰	-	شکل (۹-۴)
فاصله بار شماره ۲ از مرکز تراورس شماره ۱	in	۱۱۰	-	شکل (۹-۴)
مقدار بار چرخ‌های ۱ و ۲	lb	۳۶۰۰۰	۱۲ تا ۱۷ (ton)	وابسته به نوع ناوگان

## گام پنجم: داده‌های مربوط به لایه‌های زیرسازی؛

شکل (۴-۱۱) نمایان‌گر صفحه‌ی مربوط به لایه‌های زیرسازی در برنامه است.

The screenshot shows the 'Damage Analysis' window with several input fields and tables. The fields are numbered 1 through 8:

- 1: Number of Track Layers including subgrade: 4
- 2: Select Asphalt Layers: Layer 1, Layer 2, Layer 3 (all selected)
- 3: Tolerance for Vertical Deflections: 0.00001 (in)
- 4: Tolerance for Tensile Stress: 0.010000 (psi)
- 5: Number of layers for Vertical compression at top: 2
- 6: Select Layers to compute Compression at the top: Layer 1, Layer 2, Layer 3 (all selected)
- 7: Number of layers for Horizontal tension at bottom: 1
- 8: Select Layers to compute Tension at the bottom: (empty)

Table 5: Layer Properties

Layer	Poisson's Ratio	Coefficient K2	Assumed Youngs (psi)	Period 1
Layer 1	0.35	0.5	18000	18000
Layer 2	0.35	0.5	20000	20000

Table 6: Layer Properties

Layer	Layer Thickness (in)	Minimum Youngs (psi)	Unit Weight (lb/in <sup>3</sup> )	L E P
Layer 1	10	18000	0.064	0.
Layer 2	4	20000	0.064	0.

Table 9: Asphalt Temperature for the layers over different Months (°F)

Layer	Period 1	Period 2

Table 10: Asphalt Properties for the layers over different Months

Layer	% Passing Number	% of Air Voids	% Volume of Bit
*			

شکل (۴-۱۱) صفحه‌ی مربوط به لایه‌های زیرسازی

جدول (۴-۷) شامل مقادیر داده‌های ورودی استاندارد به‌همراه دامنه‌ی مقادیر منطقی برای گام پنجم است. برای این گام مراحل ذیل قابل ذکر است:

- (۱) تعداد لایه‌های زیرسازی با احتساب بستر با توجه به لایه‌های مفروض برای خطوط با مصالح دانه‌ای، عدد ۴ انتخاب شده است.<sup>۱</sup>
- (۲) انتخاب لایه‌ی آسفالتی با توجه به دانه‌ای بودن تمامی مصالح در زیرسازی بالاستی، این قسمت قابل تغییر و انتخاب نیست.
- (۳) بازه‌ی رواداری تغییر شکل عمودی
- (۴) بازه‌ی تغییر در تنش کششی
- (۵) در این جدول پارامترهای نسبت پواسون، ضریب  $K_2$  مربوط به مدول برجهندگی، مدول

۱. رجوع به شکل (۴-۱)

یانگ و مقادیر آن‌ها در دوره‌های مختلف، در مقابل هر لایه، شامل بالاست، زیربالاست، بستر و بستر سخت وارد می‌شود. داده‌های استاندارد مربوط به این مرحله در جدول شماره (۴-۸) آورده شده است.

۶) تعداد لایه‌هایی که در سطح فوقانی خود متحمل فشار عمودی از بالا هستند؛ در اینجا عدد ۲ انتخاب شده است؛ به این معنا که دو لایه از مصالح تحت فشار از بالا قرار دارند. در مرحله ۷ موقعیت این لایه‌ها مشخص می‌شود.

۷) انتخاب لایه‌هایی که فشار سطح روی آن‌ها در طراحی اهمیت دارد؛ لایه‌های زیربالاست و بستر انتخاب شده‌اند.

۸) این دو قسمت مربوط به زیرسازی آسفالتی و غیر قابل تغییر است.

۹) در این جدول اطلاعات نظیر لایه‌ها از جمله ضخامت، کمترین مقدار مدول یانگ، وزن واحد حجم و ضریب فشار زمین وارد می‌شود. ضریب فشار زمین، با توجه به خاک اطراف خط ریلی محاسبه می‌شود. جدول شماره (۴-۹) حاوی اطلاعات مربوط به این مرحله است.

۱۰) دو جدول دیگر، مربوط به خطوط آسفالتی هستند.

جدول ۴-۷. اطلاعات داده‌های ورودی استاندارد برای گام پنجم

نام پارامتر	واحد	ورودی های استاندارد	دامنه منطقی مقادیر	توضیحات
تعداد لایه‌ها با احتساب بستر	-	۴	۳ یا ۴	(شکل ۴-۱)
تفرانس تغییر شکل‌های عمودی	in	۰/۰۰۰۰۱	-	
تفرانس تنش کششی	psi	۰/۱۰	-	
تعداد لایه‌ها برای فشار عمودی فوقانی	-	۲	۱ تا ۳	(شکل ۴-۱)
انتخاب لایه‌ها برای محاسبه فشار در سطح فوقانی	-	۲ و ۳	۱ تا ۴	(شکل ۴-۱)

جدول ۴-۸. داده‌های ورودی مربوط به مشخصات لایه‌های خطوط بالاستی

لایه	نسبت پواسون	ضریب $K_2$	مدول یانگ psi	برای دوره‌های (فصول) مختلف
(۱) بالاست	۰/۳۵	۰/۵	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰۰
(۲) زیربالات	۰/۳۵	۰/۵	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
(۳) بستر	۰/۴	۰	۱۲۰۰۰	۱۲۰۰۰
(۴) بستر سنگی	۰/۵	۰	$۱۰^{۱۹}$	$۱۰^{۱۹}$

## جدول ۴-۹. سایر داده‌های ورودی مربوط به مشخصات لایه‌های خطوط بالاستی

لایه	ضخامت لایه (in)	کمترین مدول یانگ (psi)	وزن واحد حجم ( $lb/in^3$ )	ضریب فشار زمین <sup>۱</sup>
(۱) بالاست	۱۰	۱۸۰۰۰	۰/۰۶۴	۰/۸
(۲) زیربلاست	۴	۲۰۰۰۰	۰/۰۶۴	۰/۸
(۳) بستر	۲۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۰۷۸	۰/۵

## گام ششم: ورود داده‌های مورد نیاز برای آنالیز خرابی

مراحل گام ششم (شکل ۴-۱۲)

(۱) وزن واحد طول ریل

(۲) وزن واحد حجم تراورس

(۳) وزن واحد حجم بالاست ناحیه آخوری<sup>۲</sup>

(۴) رواداری آنالیز غیرخطی

(۵) تعداد تکرار بار در هر دوره با توجه به ترافیک عبوری سالیانه؛ توجه به این نکته که تعداد بار عبوری برای چند بار محوری تعریف شده، حائز اهمیت است؛ چراکه کاربر باید تعداد تکرار بار را برای باری که قبلاً در گام چهارم تعریف نموده، در نظر بگیرد.

(۶) پارامترهای خستگی

(۷) پارامترهای تغییرشکل

## 1. Earth pressure COEF

ضریب فشار زمین معمولاً با  $K_0$  معرفی می‌شود. توده خاکی را در نظر بگیرید. برای یک جزء کوچک در عمق  $Z$  که در معرض تنش‌های افقی و عمودی قرار دارد، با فرض تعادل الاستیک توده خاک، نسبت تنش افقی به تنش قائم، ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون تعریف می‌شود [۴].

۲. بالاست بین دو تراورس

The screenshot displays the software's parameter configuration interface. It is divided into several sections:

- Layer System:** Contains input fields for:
  - Rail Weight per Unit Length: 3.7800 (lb/in) (labeled ۱)
  - Tie Unit Weight: 0.029000 (lb/in) (labeled ۲)
  - Cribbing Material Unit Weight: 0.064000 (lb/in<sup>3</sup>) (labeled ۳)
  - Nonlinear Analysis Tolerance: 0.010000 (labeled ۴)
- Damage Analysis Parameters:**
  - Fatigue Parameters:** A table with columns for Layer, Fatigue Parameter 1, Fatigue Parameter 2, and Fatigue Parameter 3. (labeled ۶)
  - Deformation Parameters:** A table with columns for Layer, Deformation Parameter 1, Deformation Parameter 2, and Deformation Parameter 3. (labeled ۷)
- Load Repetition:** A table showing a constant load repetition of 50000 for four consecutive months. (labeled ۵)

شکل ۴-۱۲ صفحه مربوط به آنالیز خرابی

۸) و در نهایت دریافت نتایج تحلیل

داده‌های ورودی استاندارد، در جدول (۴-۱۰) قابل مشاهده است.

جدول ۴-۱۰. مقادیر استاندارد ورودی گام هشتم

نام پارامتر	واحد	ورودی‌های استاندارد	توضیحات
وزن واحد طول ریل	lb/in	۳/۷۸	جدول (۴-۱)
وزن واحد حجم تراورس	lb/in <sup>3</sup>	۰/۰۲۹	مشخصات تراورس
وزن واحد حجم مصالح ناحیه آخوری	in	۰/۶۴	وابسته به بالاست
تلرانس آنالیز غیرخطی	in	۰/۰۱	-
تکرار بار	-	۵۰۰۰۰	وابسته به ترافیک عبوری
پارامتر تغییر شکل ۱	-	۰/۰۰۰۰۴۸۳۷	
پارامتر تغییر شکل ۲	-	۳/۷۳۴	
پارامتر تغییر شکل ۳	-	۳/۵۸۳	

#### ۲-۲-۴- خطوط آسفالتی

با توجه به تکرار قسمت عمده‌ای از مراحل، از ذکر توضیحات اضافی در این بخش و بخش (۳-۲-۴) اجتناب شده است. پارامترهای جدید به همراه دامنه مقادیر مجاز در جداولی مشابه موارد قبلی، آورده شده است. به طور خلاصه مواردی که باید توسط کاربر علاوه بر موارد یاد شده در بخش قبل، مورد توجه قرار گیرد، به شرح ذیل است:

۱. اضافه شدن لایه آسفالت به لایه‌های زیرسازی

۲. آشنایی با زیرسازی آسفالتی به همراه ترتیب، ضخامت و جنس لایه‌ها در این نوع زیرسازی

۳. وارد شدن اثر دما در محاسبات نرم‌افزار

۴. اثر ویژگی‌های ماده آسفالت

گام‌های لازم جهت استفاده از نرم‌افزار به شرح زیر است:

#### گام (۱) وارد کردن مشخصات پروژه

در قسمت مربوط به نوع زیرسازی، گزینه آسفالتی انتخاب می‌شود (شکل ۴-۱۳)

**INITIAL PROJECT SPECIFICATION**

<b>Project Title</b>	<input type="text" value="IUST_Railway faculty_Kentrack"/>
<b>Unit System</b>	<input type="radio"/> SI <input checked="" type="radio"/> FPS
<b>Model Type</b>	<input checked="" type="radio"/> Layer
<b>Damage Analysis</b>	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
<b>Trackbed</b>	<input type="radio"/> All-Granular <input checked="" type="radio"/> Asphalt <input type="radio"/> Combination

شکل ۴-۱۳) صفحه اول پس از اجرای برنامه



گام دوم: انتخاب نوع و مشخصات ریل

Select Rail type	RE 136	
Rail Section Modulus	23.9	(in <sup>3</sup> )
Rail Youngs Modulus	30000000	(psi)
Rail Moment of Inertia	94.9	(in <sup>4</sup> )
Rail Tie Spring Constant	7000000	(lb/in)

شکل ۴-۱۴) تصویر صفحهٔ مربوط به مشخصات ریل

گام سوم: انتخاب مشخصات و داده‌های مرتبط با تراورس

Type of Tie	Wood	Location Number of Rail on Tie	4
Number of Transverse Points	7	Length of Tie	108 (in)
Thickness	7.0000 (in)	Center to Center Distance between Rails	59.5 (in)
Width	9.0000 (in)	Distance between Point 1 and 2 in transverse direction	15 (in)
Moment of Inertia	257.25 (in <sup>4</sup> )	First Tie Number for Superposition	3
Youngs Modulus	1500000 (psi)	Last Tie Number for Superposition	6
Spacing	20 (in)	Cross Section for output	<input checked="" type="checkbox"/> Cross_Section 3 <input type="checkbox"/> Cross_Section 4 <input type="checkbox"/> Cross_Section 5 <input checked="" type="checkbox"/> Cross_Section 6
Number of Periods	4	Cross Section	<input checked="" type="radio"/> Uniform
Select Period for Output	<input type="checkbox"/> Period 1 <input checked="" type="checkbox"/> Period 2 <input type="checkbox"/> Period 3		

شکل ۴-۱۵) صفحهٔ مربوط به مشخصات تراورس

## گام چهارم: وارد کردن مشخصات بار

Number of Axle Loads

Number of ties for Single Axle Analysis

	Load Number	Distance form Tie Centerline (in)	Wheel Load (lbs)
▶	1	40	36000
	2	110	36000

شکل ۴-۱۶ صفحه مربوط به اطلاعات بار

## گام پنجم: وارد کردن مشخصات لایه‌ها

شکل (۴-۱۷) نمایان‌گر صفحه مربوط به لایه‌های زیرسازی در برنامه است. قسمت‌های شماره‌گذاری شده در شکل، به ترتیب توضیح داده شده است.

۱) تعداد لایه‌های زیرسازی با احتساب بستر؛ با توجه به لایه‌های مفروض برای خطوط با زیرسازی آسفالتی، عدد ۴ انتخاب شده است.

۲) انتخاب لایه آسفالتی

۳) انتخاب نوع قیر آسفالت؛ برای مثال در اینجا قیر نوع AC-10 انتخاب شده است.<sup>۱</sup>

۴) تعداد لایه‌هایی که در سطح بالایی خود متحمل فشار عمودی از بالا هستند. منظور همان لایه‌های با مصالح دانه‌ای است؛ چون این لایه‌ها تنش عمودی را تحمل می‌کنند. در این جا عدد ۱ انتخاب شده است که مربوط به لایه بستر می‌باشد.

۵) مشخص کردن موقعیت لایه‌ای که در مرحله قبل انتخاب شد. در ضمن برنامه، تنش قائم روی این لایه را به‌عنوان معیاری برای طراحی محاسبه می‌کند.

۶) تعداد لایه‌هایی که تنش کششی زیر آن‌ها برای طراحی، حائز اهمیت است. عدد ۱ به خاطر

۱. رجوع به فصل ۳ جدول ۳-۲

وجود یک لایه آسفاتی انتخاب شده است.

۷) مشخص کردن موقعیت لایه‌ای که در مرحله قبل انتخاب شد.

۸) دو جدول بالایی مربوط به مشخصات لایه‌ها و جداول پایینی مرتبط با دمای آسفالت در

فصل‌های مختلف و خواص آسفالت مورد استفاده است. مشخصات لایه آسفالتی در جداول

(۴-۱۱) تا (۴-۱۴) آورده شده است.

The screenshot displays a software interface for configuring asphalt layers. It includes several sections:

- 1** Number of Track Layers including subgrade: 4
- 2** Select Asphalt Layers: Layer 1 (unchecked), Layer 2 (checked), Layer 3 (unchecked)
- 3** Asphalt Binder Grade: AC-10
- 4** Viscosity (1e6 Pa.S) table:
 

Layer	Season 1	Season 2
Layer 2	17.0667029512767	1.11
- 5** Tolerance for Vertical Deflections: 2.54E-07 (m)
- 6** Tolerance for Tensile Stress: 6.89475729E- (MPa)
- 7** Number of layers for Vertical compression at top: 1
- 8** Select Layers to compute Compression at the top: Layer 1 (unchecked), Layer 3 (checked), Layer 4 (unchecked)
- 9** Number of layers for Horizontal tension at bottom: 1
- 10** Select Layers to compute Tension at the bottom: Layer 2 (checked)
- 11** Layer Properties table:
 

Layer	Poisson's Ratio	Coefficient K2	Assumed Youngs (MPa)	Season 1
Layer 1	0.35	0.5	124.10...	124.10...
Layer 2	0.45	0	26889....	8914.9...
- 12** Layer Properties table:
 

Layer	Layer Thickness (m)	Minimum Youngs Modulus (MPa)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )
Layer 1	0.2032	124.1056...	1771.512...
- 13** Asphalt Layer Temperature through seasons table:
 

Layer	Season 1	Season 2
Layer 2	10	19.4444444...
- 14** Asphalt Layer Properties table:
 

Layer	% Passing 200	% Retained No.4	% Retained No.3/8
Layer 2	4	56	40

شکل ۴-۱۷) صفحه مربوط به مشخصات لایه‌های زیرسازی

جدول ۴-۱۱. داده‌های مربوط به مشخصات لایه‌ها برای زیرسازی آسفالتی

لایه	نسبت پواسیون	ضریب $K_2$	مدول یانگ (psi)	برای دوره‌های مختلف (فصول)	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴
(۱) بالاست	۰/۳۵	۰/۵	۷۰۰۰		۷۰۰۰		
(۲) آسفالت	۰/۴۵	۰	۶۰۰۰۰۰	۶۹۸۰۰۰	۳۷۲۰۰۰	۱۲۵۰۰۰۰	۲۲۶۰۰۰۰
(۳) بستر	۰/۴	۰	۱۲۰۰۰		۱۲۰۰۰		
(۴) بستر سنگی	۰/۵	۰	$۱۰^{۱۹}$		$۱۰^{۱۹}$		

جدول ۴-۱۲. داده‌های مربوط به مشخصات لایه‌ها برای زیرسازی آسفالتی

لایه	ضخامت لایه in	کمترین مدول یانگ (psi)	وزن واحد حجم lb/in <sup>3</sup>	ضریب فشار زمین
(۱) بالاست	۸	۷۰۰۰	۰/۰۶۴	۰/۸
(۲) آسفالت	۶	۶۰۰۰۰۰	۰/۰۸۷	۰/۸
(۳) زیربالاست	۲۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۰۷۸	۰/۵

جدول ۴-۱۳. دمای لایه آسفالتی در شرایط دمایی مختلف

فصول مختلف	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
دمای آسفالت (F°)	۵۰	۶۷	۳۳	۲۰

جدول ۴-۱۴. داده‌های استاندارد مربوط به لایه آسفالت

لایه	درصد عبور	درصد هوای حفرات	درصد ریزدانه	ویسکوزیته	فرکانس بار
آسفالت	۵/۵	۵/۷	۱۳/۵	۲/۵	۱

#### گام ششم: وارد کردن اطلاعات مربوط به تحلیل خرابی

شکل (۴-۱۸) صفحه مربوط به اطلاعات تحلیل خرابی را نشان می‌دهد. داده‌های استاندارد مربوط به پارامترهای خستگی در جدول (۴-۱۵) آورده شده است.

جدول ۴-۱۵. داده‌های مربوط به پارامترهای خستگی

لایه	شماره لایه	پارامتر خستگی ۱	پارامتر خستگی ۲	پارامتر خستگی ۳
آسفالت	۲	۰/۰۷۹۵	۳/۲۹۱	۰/۸۵۴

Layer System		
Rail Weight per Unit Length	3.7800	(lb/in)
Tie Unit Weight	0.029000	(lb/in <sup>3</sup> )
Cribbing Material Unit Weight	0.064000	(lb/in <sup>3</sup> )
Nonlinear Analysis Tolerance	0.010000	

Month	Load Repetition
Month 1	50000
Month 2	50000
Month 3	50000
Month 4	50000

## Damage Analysis Parameters

Fatigue Parameters			
Layer	Fatigue Parameter 1	Fatigue Parameter 2	Fatigue Parameter 3
Layer 2	0.0795	3.291	0.854

Deformation Parameters			
Layer	Deformation Parameter 1	Deformation Parameter 2	Deformation Parameter 3
Layer 3	4.837E-05	3.734	3.583

شکل (۴-۱۸) صفحه مربوط به آنالیز خرابی

### ۴-۲-۳- خطوط با زیرسازی ترکیبی

همان‌طور که از شکل (۴-۳) مشخص است، بر خلاف دو نوع زیرسازی بالاستی و آسفالتی، خطوط ترکیبی از ۵ لایه مختلف تشکیل شده است. در مورد زیرسازی آسفالتی، تعداد لایه‌ها، ضخامت آن‌ها و موقعیت لایه آسفالتی، حائز اهمیت است. از آن‌جا که تمامی مراحل کار در این قسمت مشابه زیرسازی آسفالتی است، تفاوت اساسی مراحل کار در این نوع زیرسازی را می‌توان در گام پنجم خلاصه نمود. شکل (۴-۱۹) صفحه نشان‌دهنده این مرحله در برنامه است.

### گام پنجم: وارد کردن اطلاعات مربوط به لایه‌های زیرسازی

- ۱) تعداد لایه‌ها؛ با توجه به شکل (۴-۳) عدد ۵ انتخاب شده است.
- ۲) تعیین موقعیت لایه آسفالتی
- ۳) انتخاب نوع قیر آسفالت
- ۴) تعداد لایه‌هایی که دارای تنش عمودی هستند؛ عدد ۲ نشان‌دهنده دو لایه زیربلاست و بستر می‌باشد.
- ۵) تعیین موقعیت لایه‌های انتخاب شده در مرحله قبل
- ۶) تعداد لایه‌هایی که دارای تنش کششی تحتانی هستند (آسفالت)
- ۷) تعیین موقعیت لایه آسفالتی

1 Number of Track Layers including subgrade 5

2 Select Asphalt Layers  Layer 1  Layer 2  Layer 3

3 Asphalt Binder Grade AC-10

Viscosity (1e6 Pa.S) 

Layer	Season 1	Season 2
Layer 2	17.0667029512767	1.11

Tolerance for Vertical Deflections 2.54E-07 (m)

Tolerance for Tensile Stress 6.89475729E (MPa)

4 Number of layers for Vertical compression at top 2

5 Select Layers to compute Compression at the top  Layer 1  Layer 3  Layer 4

6 Number of layers for Horizontal tension at bottom 1

7 Select Layers to compute Tension at the bottom  Layer 2

Layer	Poisson's Ratio	Coefficient K2	Assumed Youngs (MPa)	Season 1
Layer 1	0.35	0.5	124.10...	124.10...
Layer 2	0.45	0	26889...	8914.9...

Layer	Layer Thickness (m)	Minimum Youngs Modulus (MPa)	Unit Weight (kg/m³)
Layer 1	0.2032	124.1056...	1771.512...

Asphalt Layer Temperature through seasons

Layer	Season 1	Season 2	Season 3
Layer 2	10	19.4444444...	0.55555555..

Asphalt Layer Properties

Layer	% Passing 200	% Retained No.4	% Retained No.3/8
Layer 2	4	56	40

شکل ۴-۱۹ صفحه مربوط به مشخصات لایه ها

۴-۳- منابع و مراجع

[1] Kentrack, A Performance-Based Layered Elastic Railway Trackbed Structural Design And Analysis Procedure – A Tutorial. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference JRC2010 April 27-29, 2010, Urbana, Illinois, USA

[2] Kentrack: A Coputer Program for Hot-Mix Asphalt and Conventional Ballast Railway Trackbeds. Yang H. Huang, Chiang Lin, Xuejun Deng, Jerry Rose, Asphalt Institute, (Publication RR-84-1) and National Asphalt Pavement Association, 164 pages

[۳] اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن-تألیف میرمحمد صادقی-

چاپ اول-۱۳۸۷

[۴]- اصول مهندسی ژئوتکنیک، بر اجا.ام.داس. ترجمه شاپور طاحونی، چاپ دوم ۱۳۸۷



## « فصل پنجم »

### بررسی نتایج عددی



این فصل در چهار بخش با هدف بررسی نتایج کارهای عددی انجام شده و با محوریت حل مثال عددی برای ایجاد دید مناسب برای تحلیل و طراحی خطوط ریلی ارائه شده است. در بخش اول به منظور اعتبارسنجی نرم افزار کنترک، نتایج یک اندازه گیری میدانی با نتایج حاصل از تحلیل برنامه مقایسه می شود. در بخش دوم نمونه ای از تحلیل حساسیت به همراه نتایج عددی مورد بررسی قرار گرفته است. قسمت سوم شامل سه مثال عددی از تحلیل خطوط

با زیرساخت های متفاوت به همراه نتایج تحلیل برنامه است. در قسمت چهارم به مقایسه نتایج عددی حاصل از کنترک با چند روش دیگر از جمله ژئوترک پرداخته شده است. همچنین تأثیر دو پارامتر دیگر از جمله اثر ضخامت لایه ها روی نتایج عددی بررسی می شود.

### ۵-۱- مقدمه

بخش اول از این فصل به مقایسه تراز تنش در لایه‌های مختلف عمقی در ساختار خطوط ریلی می‌پردازد. در مطالعه‌ای که ارائه شده، طراحی‌های سازه‌ای مختلف خط و بارهای محوری متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، از برنامه کنتراک به عنوان یک مدل تحلیلی تخمین‌گر، استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های میدانی فشار (تنش فشاری عمودی)، تحت کنترل سرویس خطوط سنگین CSX و خطوط تست مرکز تکنولوژی حمل و نقل راه‌آهن ایالات متحده انجام گرفته است.<sup>۱</sup>

طی این مطالعات، اندازه‌گیری‌های فشار در سطوح بین پایه ریل - صفحه تراورس و صفحه تراورس - تراورس، با استفاده از حسگرهای حساس به نیرو موسوم به تک‌اسکن<sup>۲</sup> به دست آمدند. مقادیر فشار در سطوح تماس بین تراورس - بالاست، و زیربلاست - بستر، با استفاده از فشارسنج‌های زمین ژئوکن<sup>۳</sup>، اندازه‌گیری شدند [۱]. در ادامه سعی شده تا بیشتر با یکی از کارایی‌های برنامه، یعنی بررسی تأثیر پارامترها یا همان آنالیز حساسیت آشنا شوید. در واقع کنتراک قابلیت بررسی تأثیر هر پارامتر به‌طور جداگانه را میسر می‌کند؛ به این ترتیب که می‌توان هر بار با ثابت نگه داشتن همه پارامترها به جز پارامتر مورد بررسی و بعد از چند بار اجرای برنامه، به میزان تأثیر آن متغیر پی برد.

### ۵-۲- اعتبارسنجی نرم‌افزار

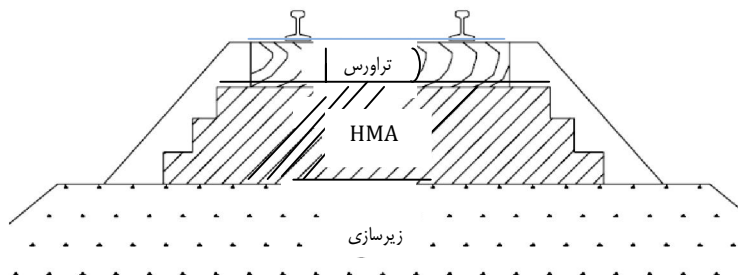
با توجه به انجام این مطالعات در آمریکا، ابتدا لازم است مختصری درباره انواع متداول زیرسازی خطوط ریلی در این کشور اشاره شود. دو نوع زیرسازی خطوط ریلی، در ایالات متحده مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرسازی‌های تمام دانه‌ای (بالاستی) مرسوم، متعارف‌ترین نوع آن‌هاست. خطوط HMA حدود دو دهه است که در این کشور توسعه یافته است و در برابر خطوط بالاستی، توانسته آزمون‌های متعددی را پشت سر گذارد.

دو نوع زیرسازی HMA مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از آن‌ها به زیرلایه<sup>۴</sup> موسوم است که در این نوع سیستم زیرسازی، لایه‌ای از بالاست بین آسفالت و روسازی خط، اجرا می‌شود و نوع دیگر رولایه<sup>۵</sup> نام دارد، که در آن کوپلاژها مستقیماً با سطح بالایی آسفالت در تماس هستند. در عمل نوع

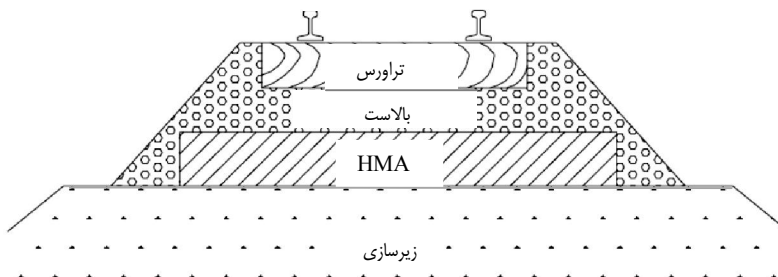
---

1. Association of American Railroads Transportation Technology Institute  
 2. Tekscan  
 3. Geokon  
 4. underlayment  
 5. overlayment

زیرلایه، که در آن از لایه بالاست بین تراورس و آسفالت بهره برده، از مقبولیت بیشتری برخوردار است. این لایه بالاست مانند یک پوشش محافظ در برابر تابش خورشید و بارش باران برای آسفالت عمل می‌کند و یک ثبات نسبی دائمی در دما و محیط اطراف آسفالت فراهم می‌کند. همچنین موجب تسهیل در امر تنظیم و اصلاح هندسه و ارتفاع خط می‌گردد. بنابراین مطالعه پیش رو، تنها شامل نوع زیرلایه است. شکل (۵-۱) مقاطع این دو نوع زیرسازی را نشان می‌دهد. شکل (۵-۲) اجرای یک لایه HMA روی بستر، در مجاورت یک خط بالاستی را نشان می‌دهد. شکل (۵-۳) نمایانگر جزئیات اجزای به‌کار رفته در یک زیرسازی HMA از نوع زیرلایه است.



خطوط HMA از نوع رولایه



خطوط HMA از نوع زیر لایه  
شکل (۵-۱) مقاطع خطوط آسفالتی



شکل ۵-۲) اجرای یک زیرلایه از HMA روی بستر در پروسه ساخت خط دوم

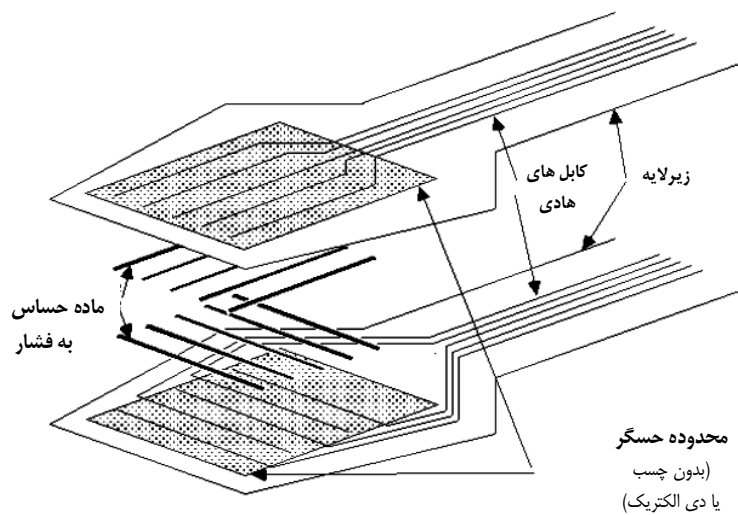


شکل ۵-۳) HMA زیرلایه در زیرسازی خط با بالاست و تراورس چوبی

## ۵-۲-۱- آزمایش میدانی

دو نوع دستگاه اندازه‌گیری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های فشار در سطوح بین پایه ریل به صفحه تراورس و صفحه تراورس به تراورس، با استفاده از حسگرهای حساس به نیرو موسوم به تک‌اسکن<sup>۱</sup> به دست آمدند. مقادیر فشار در سطوح تماس بین تراورس به بالاست، و زیربالاست به بستر، با استفاده از فشارسنج‌های زمین ژئوکن<sup>۲</sup>، اندازه‌گیری شدند. جزئیات این دو سیستم در ادامه بررسی می‌شود.

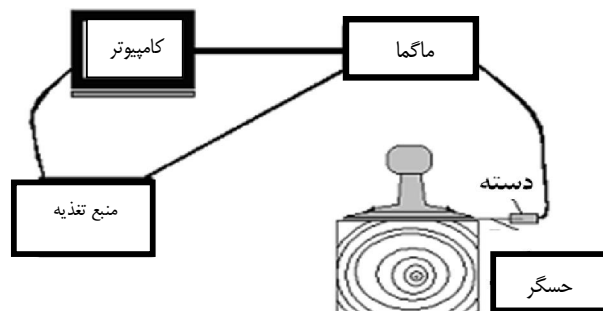
حسگرهای تک‌اسکن دارای سیستم اندازه‌گیری توزیع نیرو، سنسورها، نرم‌افزار و پشتیبانی فنی هستند. فشارسنج‌ها به وسیله یک سنسور ماتریسی متشکل از دو ورق پولی‌استر ساخته شده‌اند که الکترودهای نقره‌فام رسانا بر روی آن‌ها حک شده است. یکی از این صفحه‌ها دارای جوهر نیمه‌رسانا در ردیف‌های چاپ شده است؛ در حالی که صفحه دیگر دارای همان جوهر در ستون‌های عمودی است. سپس دو صفحه پولی‌استر، به یکدیگر چسبانده می‌شوند. شکل (۴-۵)، اساس سنسور تک‌اسکن و اجزای آن را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) نمای کلی اساس سنسور تک‌اسکن

1. Tekscan Pressure Sensors
2. Geokon Earth Pressure Cells

جوهر به کار رفته به فشار حساس است و انتشار آن مانند اجزای یک کرنش‌سنج با نیروی وارده تغییر می‌کند. سیستم با رسیدن همزمان نیرو به یک ردیف و یک ستون، مکان رسیدن ردیف و ستون تکمیل‌کننده جریان را مجزا می‌کند. نیروی وارده توسط اندازه‌گیری تغییر در مقاومت ویژه جریان، محاسبه می‌شود. زمانی که نیرو روی حسگر توزیع می‌شود، این روند برای تمام ردیف‌ها و ستون‌ها تکرار شده و توزیع نیروی روی ناحیه فعال تعیین می‌شود. وقتی فشار به حد ظرفیت یک حسگر خاص برسد، حالت اشباع سلول رخ می‌دهد. حسگرها برای محدوده فشارهای مختلفی ساخته می‌شوند. حسگرهای تک‌اسکن یک سیستم ۸ تکه هستند؛ به این معنا که سلول‌ها، یک ردیف مقدار از ۰ تا ۲۵۵ را ثبت می‌کنند. وقتی که سلول ۲۵۵ را می‌خواند، اشباع در آن قابل ملاحظه است [۳]. حسگری که به منظور اندازه‌گیری‌های فشار در خط ریلی مورد استفاده قرار گرفته، دارای ظرفیت تقریبی ۱۲۰۰psi می‌باشد. علاوه بر حسگر، تعداد زیادی از اجزای دیگر، به منظور هدایت و پیش‌برد یک آزمایش و ثبت اندازه‌گیری‌ها، مورد نیاز است. اولین مورد، دسته برداشت داده<sup>۱</sup> است که روی نوار حسگر چسبانده می‌شود. این دسته به وسیله پین‌هایی، محکم به حسگر پیچ می‌شوند. این پین‌ها یک ارتباط منحصر به فرد با هر جریان نقره ایجاد می‌کنند که به ستون‌ها و سطرهای جوهر متصل هستند [۳]. سپس دسته با سیم به یک جعبه ماگما متصل می‌شود. وظیفه اصلی این جعبه، ایجاد تغییر شکل در خروجی دسته و تبدیل آن به ورودی کامپیوتر می‌باشد. آخرین قطعه از تجهیزات، یک رایانه می‌باشد که نرم‌افزار مربوط به حسگر روی آن نصب شده است. این برنامه کامپیوتری با هدف ایجاد قابلیت ثبت و تحلیل داده، توسعه یافته است. شکل (۵-۵) نمای کلی چیدمان سیستم تک‌اسکن برای یک تست میدانی را نشان می‌دهد. شکل (۵-۶) منظره‌ای از داخل خط به همراه سیستم مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵) چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری تک اسکن

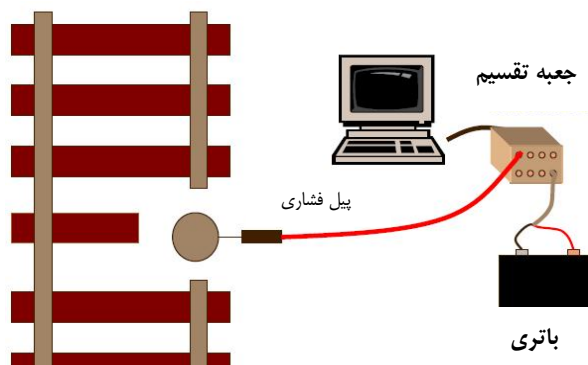


شکل ۶-۵) نمایی از داخل خط تست

به منظور اندازه‌گیری فشار اعمالی قطار روی مصالح تکیه‌گاهی در داخل سازه خط، از فشارسنج‌های ژئوکن استفاده می‌شود. قسمتی از وسیله که بار دریافت می‌کند، از دو صفحه مدور فولاد ضدزنگ تشکیل می‌شود، که اندکی محدب هستند. قطر این دو صفحه دایره‌ای ۹ اینچ و از لبه به یکدیگر جوش شده‌اند. فضای بین دو صفحه، به وسیله سیال هیدرولیکی هوازدایی شده، پر شده است. زمانی که باری به صفحات وارد می‌آید، سیال داخل آن فشرده می‌شود که باعث اعمال نیرو در لوله فولادی می‌شود. این لوله‌گذاری به یک مبدل فشار متصل است که فشار سیال فشرده شده را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل

می‌کند. سیگنال الکتریکی مبدل فشار از میان کابل سیگنال به محل پردازش خروجی انتشار می‌یابد. فشارسنج‌های مورد استفاده در محل برای به‌دست آوردن فشار در زیرسازی، دارای ظرفیتی معادل ۱۰۰ psi می‌باشد که این مقدار برای داده‌برداری کفایت می‌کند.

علاوه بر فشارسنج، یک رایانه و جعبه اتصال برای تعیین فشارها لازم است. جعبه اتصال از یک سمت به فشارسنج‌ها و از سوی دیگر به رایانه متصل می‌شود. یک باتری ۱۲ ولتی توان لازم برای سیگنال الکتریکی را مهیا می‌کند. در این روش، جعبه اتصال نقش یک مرکز را بازی می‌کند که سایر اجزا به آن متصل شده‌اند. جعبه اتصال همچنین ورودی‌های متعدد برای اتصال فشارسنج‌های اضافی، به منظور ثبت داده‌ها به صورت همزمان از چند فشارسنج را فراهم می‌کند. برنامه مربوط به این سیستم به کاربر امکان ثبت بلافاصله سیگنال از فشارسنج را می‌دهد. شکل (۷-۵) نمای جامعی از شیوه چیدمان فشارسنج در تست میدانی را نشان می‌دهد. شکل (۸-۵) تصویری از تست میدانی مربوطه را نمایش می‌دهد. هر فشارسنج ژئوکن قبل از تست، با ناوگان کالیبره می‌شود. این کار به دلیل تعیین ضریب کالیبراسیون انجام می‌شود. این ضریب باعث تبدیل ولتاژ خوانده شده به مقدار فشار واقعی می‌شود. روند کار شامل توسعه یک نمودار از ولتاژهای ثبت شده برای فشارهای عمودی معلوم است. از این نمودار، وارون شیب مشخص می‌شود که همان ضریب کالیبراسیون است. سپس ضریب کالیبراسیون در ولتاژ خوانده شده، ضرب می‌شود تا فشار معین شود.



شکل (۷-۵) نحوه چیدمان در اندازه‌گیری‌های فشارسنج





شکل ۵-۸) تصویر تست اندازه‌گیری فشار در داخل خط

#### ۵-۲-۲- سیستم پیش‌بینی‌کننده نتایج

از برنامه کنتراک به‌عنوان سیستم پیش‌بینی در این آزمایش، استفاده شده است. در واقع هدف اصلی پس از گرفتن نتایج تست میدانی، مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار می‌باشد.

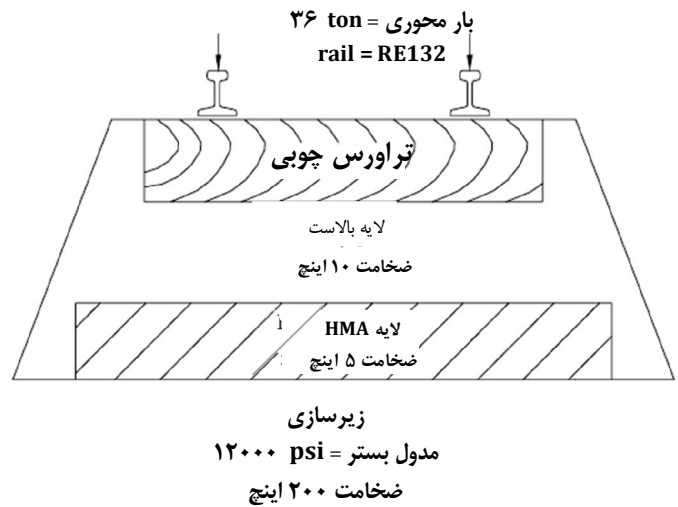
#### ۵-۲-۳- مشخصات محل‌های تست میدانی

در پروژه مذکور، دو محل به‌عنوان خط تست باز انتخاب شدند؛ خط اول روی یکی از خطوط حمل و نقل CSX واقع در Conway, KY و دیگری روی خط تست TTCI<sup>۱</sup>. شکل (۵-۹) و شکل (۵-۱۰) به ترتیب نشان‌دهنده مقطع خط در Conway, KY و TTCI می‌باشد، پارامترهای مخصوص به هر دو خط در جدول (۵-۱) آورده شده است.

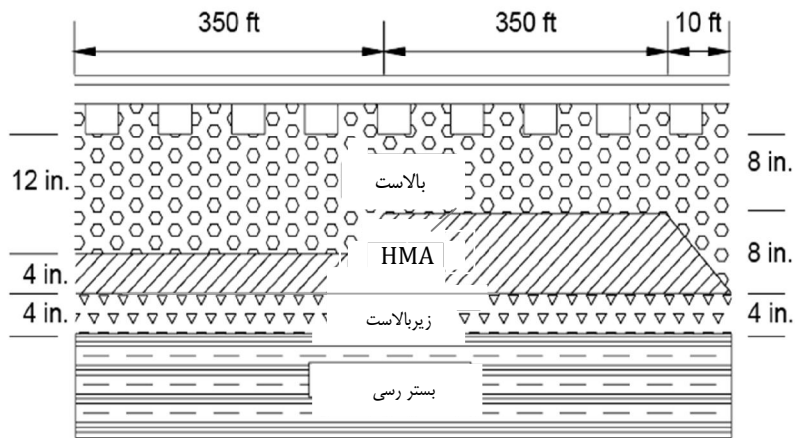
---

1. Transportation Technology Center Inc

مقدمه‌ای بر کاربرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی



شکل ۹-۵) مقطع زیرسازی HMA خط CSX واقع در Conway, ky



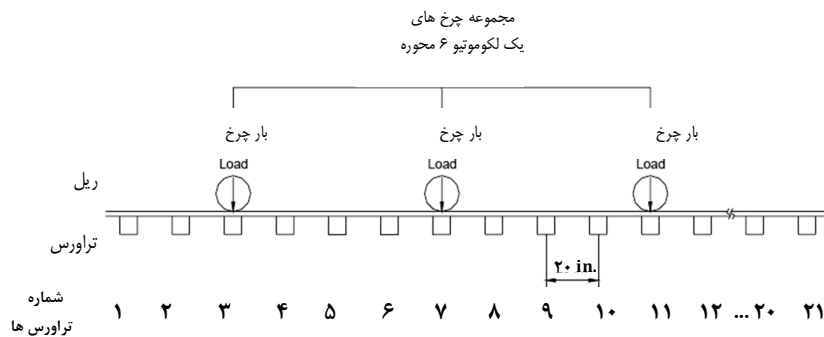
شکل ۱۰-۵) مقطع طولی زیرسازی HMA واقع در TTCI

جدول ۵-۱. جزئیات پارامترهای خط برای Conway, ky و زیرسازی‌های بالاستی

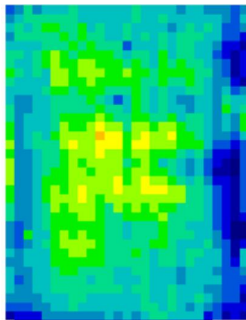
نام پارامتر	Conway, KY	TTCI
بار چرخ (پوند)	۳۶۰۰	همانند Conway, KY
نوع ریل	RE 132	
نوع تراورس	تراورس چوبی	
فاصله بین تراورس‌ها (اینچ)	۲۰	
ابعاد تراورس (اینچ)	۹×۷×۱۰.۲	
مدول بالاست (psi)	۴۶۴۱۲	
نسبت پواسون بالاست	۰/۳	
ضخامت بالاست (اینچ)	۱۰	۱۲ تا ۸
ضخامت زیربلاست (اینچ)	ندارد	۴
نسبت پواسون زیربلاست	ندارد	۰/۳۵
ضخامت آسفالت (اینچ)	۵	۸ تا ۴
نسبت پواسون لایه HMA	۰/۴۵	۰/۴۵
دما به $HMA (F^0)$	۵۰ بهار	همانند Conway, KY
	۶۳ تابستان	
	۳۷ پاییز	
	۱۹ زمستان	
مدول لایه $HMA(psi)$	۶۹۸۰۰۰ بهار	
	۳۷۲۰۰۰ تابستان	
	۱۲۵۰۰۰۰ پاییز	
	۲۲۵۰۰۰۰ زمستان	
درصد ناخالصی HMA	۵/۷	۵/۷
درصد قبر طبیعی HMA	۱۳/۵	۱۳/۵
ویسکوزیته HMA در $21^{\circ} C$	۲۵۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰
مدول بستر (psi)	۱۱۶۰۰	۵۸۰۰
ضخامت بستر (اینچ)	۲۰۰	همانند Conway, KY
نسبت پواسون بستر	۰/۴	
نسبت پواسون بستر سنگی	۰/۵	
حجم ترافیک (MGT)	۵۰	۳۵

## ۵-۲-۴- ارائه اطلاعات خروجی و تحلیل آن‌ها

حسگرهای تک‌اسکن بین ریل و صفحه تراورس قرار داده می‌شوند تا فشار زیر ریل تعیین کنند. این موضوع در تعیین نیروهای واکنش زیر نشیمن ریل برای بار چرخ و برای محاسبات مرتبط با خط مانند تحلیل تغییرشکل تراورس و ریل کاربرد دارد. تست‌ها در Conway, ky هدایت شدند. در این تست از یک لکوموتیو ۶ محوره استفاده شده است، که نوع متداول لکوموتیو در ایالات متحده است. موقعیت چرخ‌ها در طول خط در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. از حسگرهای تک‌اسکن برای اندازه‌گیری فشارهای زیر ریل، از تراورس شماره ۱ تا ۲۱ استفاده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، فشارهای حداکثر در تراورس‌های ۳، ۷ و ۱۱ در زیر چرخ‌ها به وقوع پیوسته است. شکل (۵-۱۲) فشار توزیع شده زیر تراورس شماره ۷ را نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که نیروی واکنش اصلی زیر ریل، در موقعیت تراورس شماره ۷، ۲۳۷۳۰ پوند است [۱].

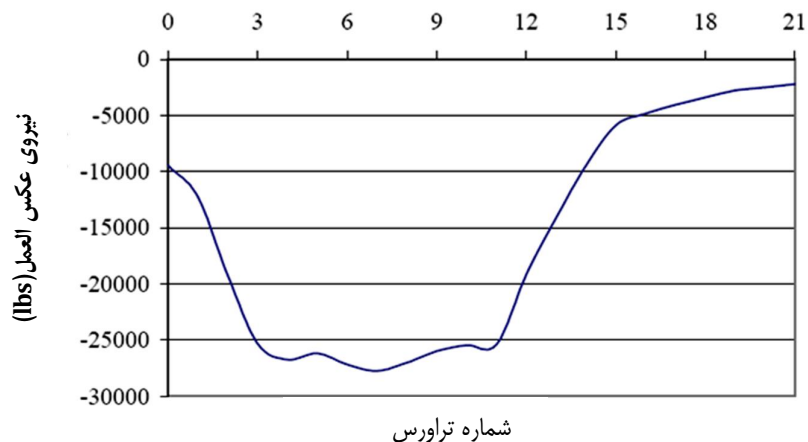


شکل ۵-۱۱) موقعیت بوژی نسبت به خط



شکل ۵-۱۲) فشار توزیع شده زیر تراورس شماره ۷

همچنین، اگر نیروی توزیع شده در طول ریل، به وسیله رسم نمودار نیروهای تکیه‌گاه در هر تراورس مدنظر قرار گیرد، می‌تواند مفید واقع شود. این مسئله در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت نیروهای توزیع شده واکنشی در طول خط با مرکز بار چرخ به‌طور کامل همخوانی دارد. علاوه بر این باید توجه کرد که خط ریلی، خود دارای یک بار مرده می‌باشد که منجر به یک نیروی واکنش در حدود ۲۲۴۸ پوند می‌شود، که این مقدار در تراورس شماره ۲۱ اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۱۳)، نشان‌دهنده این موضوع است که منحنی نیروی واکنش در حد فاصل تراورس ۱۴ تا ۲۱ بسیار هموار است. این بدان معناست که نیروهای واکنشی زیر این تراورس‌ها خیلی کم دچار تغییر شده است. از این رو، یک نتیجه ابتدایی که می‌توان متصور بود این است که حد فاصل نیروی "مؤثر" در حدود ۱۵ تراورس ابتدایی می‌باشد. بوژی لکوموتیو مورد استفاده دارای سه چرخ محور می‌باشد؛ بنابراین، در استفاده از اصل جمع آثار برای بار هر چرخ تنها می‌توان دریافت که فاصله مؤثر چیزی حدود ۱۰ تا ۱۲ فاصله تراورس باشد. این یافته بسیار حائز اهمیت است؛ چراکه این موضوع، فاصله مؤثر برای یک بار تنها را تعیین می‌کند و هنگام استفاده از کنترک برای محاسبه تنش‌ها در ساختار خط می‌توان از این نتیجه استفاده کرد.

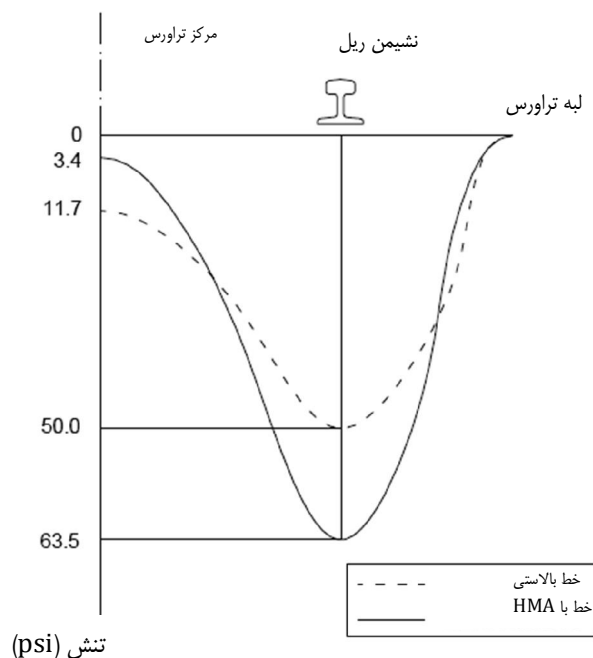


شکل ۵-۱۳) توزیع نیرو در طول خط

مقادیر پیش‌بینی شده در شکل (۵-۱۴) تنش فشاری عمودی توزیع شده در زیر تراورس را نشان می‌دهد. طبق این شکل، یک توزیع تنش فشاری عمودی غیر یکنواخت، وجود دارد. بیشینه فشار در زیر نشیمن‌گاه ریل و فشار صفر در لبه انتهایی تراورس ایجاد می‌شود. همچنین توزیع فشار پیش‌بینی شده، برای یک زیرسازی سنتی بالاستی در شکل (۵-۱۴) ترسیم شده است.

با توجه به این شکل برای بارهای مشابه، نمودار توزیع تنش فشاری برای دو نوع زیرسازی، متفاوت است. برای زیرسازی HMA، فشار قله زیر نشیمن ریل بزرگتر از فشار بیشینه زیرسازی بالاستی است؛ در حالی که برای فشار در مرکز تراورس، فشار زیرسازی HMA کمتر از نوع بالاستی است. هرچند دو منحنی در ظاهر متفاوتند؛ اما قسمت محصور شده در دو منحنی با هم برابر است و این موضوع تا زمانی منطقی است که نیروی واکنشی دو نوع خط با هم برابر باشند.

باید توجه کرد که در مرکز تراورس، تنش‌های فشاری عمودی به ترتیب  $11/7 \text{ psi}$  و  $3/4 \text{ psi}$  برای خطوط بالاستی و HMA هستند. این مقادیر تنها حدود ۲۵ و ۵ درصد از مقدار بیشینه زیر نشیمن ریل در زیرسازی‌های مربوطه را تشکیل می‌دهند. این اطلاعات، به‌طور خاص برای محاسبات در طراحی تراورس مفید هستند.



شکل ۵-۱۴) توزیع تنش فشاری قائم پیش‌بینی شده زیر تراورس برای زیر سازی‌های HMA و بالاستی

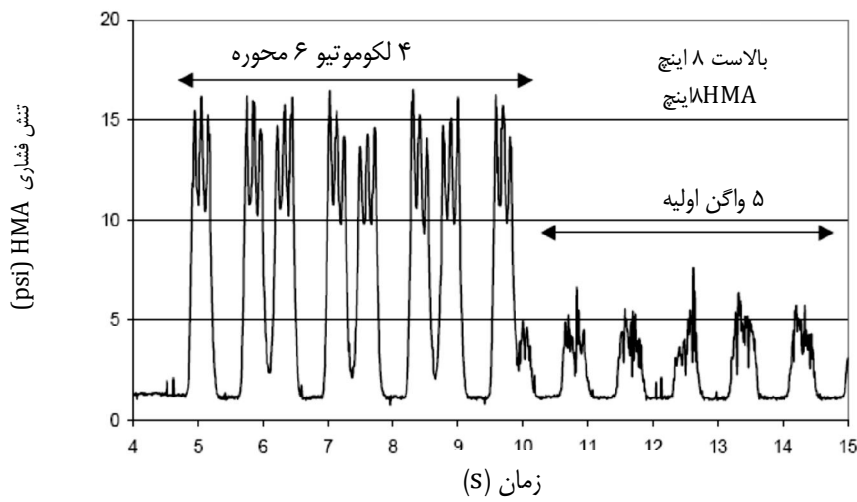
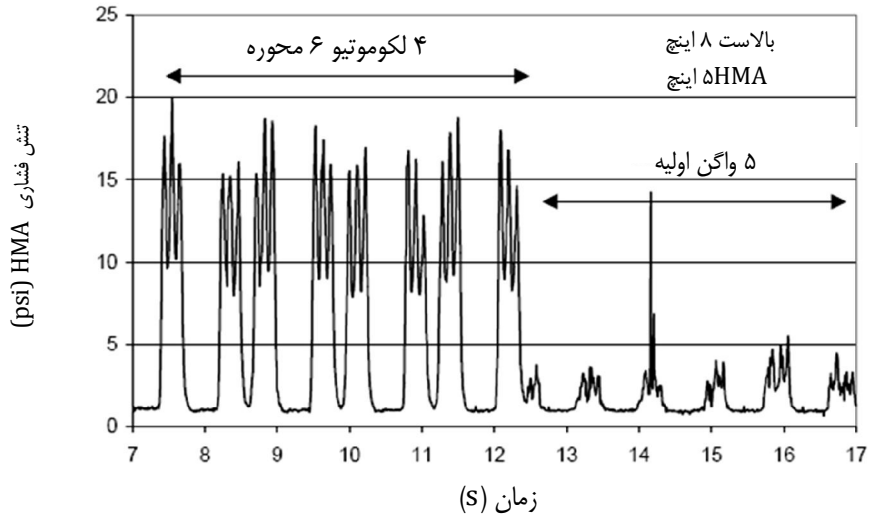
تنش‌های فشاری قائم روی لایه HMA به وسیله فشارسنج‌های زمین اندازه‌گیری شده و نتایج آن با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط کنترلر مقایسه گردیده است. برای خط CSX واقع در Conway, KY تنش‌های فشاری قائم اندازه‌گیری شده در HMA با ضخامت ۵ اینچ، ۱۶ psi و برای HMA با ضخامت ۸ اینچ، ۱۵ psi هستند که در شکل (۵-۱۵) نمایش داده شده است. مقادیر پیش‌بینی شده از کنترلر برای این دو مورد، ۲۱ psi و ۲۲ psi است. همچنین برای خط TTCI، مقادیر فشار اندازه‌گیری شده برای هر دو مقطع، ۱۵ psi به دست آمده که در شکل (۵-۱۶) مشهود است. مقادیر پیش‌بینی شده توسط کنترلر، ۱۲ psi برای مقطع HMA ۴ اینچ و ۲۲ psi برای مقطع HMA ۸ اینچ است. با مقایسه مقادیر، تفاوت‌ها نمایان می‌شوند. برای روشن شدن این موضوع، ضروری است تا با نقش لایه HMA آشنا شویم. HMA یک ماده ویسکوالاستیک است و بر پایه کارایی‌اش اجرا می‌شود. این ماده، زمانی که تحت کرنش کششی زیاد قرار گیرد به واسطه ترک‌های به وجود آمده در قسمت زیرین لایه‌اش مستعد شکست می‌شود و تنش فشاری قائم نقش چندانی در شکست آن ندارد. بنابراین مدل کنترلر،

اصولاً به‌جای محاسبه تنش فشاری، در جهت محاسبه کرنش کششی در قسمت زیرین لایه HMA رفتار می‌کند. در نتیجه در این نوع خطوط، مقادیر پیش‌بینی‌شده برای تنش فشاری قائم، ممکن است بر واقعیت منطبق نباشد.

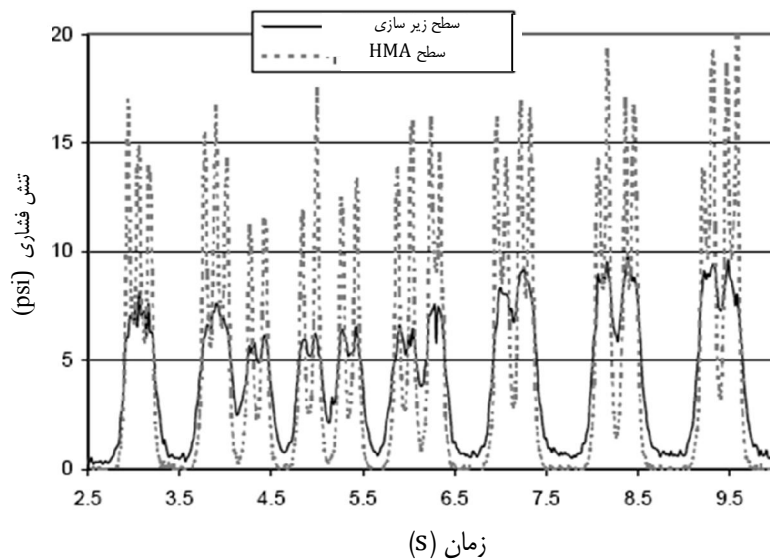
تنش فشاری قائم بستر، به‌دلیل وابستگی به اجزای خط، یک موضوع مهم است. اندازه‌گیری‌های میدانی روی مقطع با لایه HMA ۸ اینچی در خط تست TTCI برای جنبه دینامیکی لحاظ شده است. نتایج این تست در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت تنش فشاری قائم روی بستر در حدود ۸ psi است. در ضمن، تنش فشاری قائم روی بستر در مقطع با لایه HMA ۴ اینچ هم ثبت شده که مقدار آن ۷/۷ psi است. مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط کنترک برای این دو مورد، ۸/۳ psi و ۸/۲ هستند، که این مقادیر بسیار نزدیک به واقعیت هستند [۱]. برای مقایسه، یک خط بالاستی در خط تست TTCI انتخاب شده است. این خط دارای بالاست به ضخامت ۱۸ اینچ است. تنش فشاری قائم اندازه‌گیری شده از این خط، حدود ۱۱/۶ psi و مقدار پیش‌بینی شده توسط کنترک برابر ۱۱ psi است.

جدول (۵-۲) و (۵-۳) شامل تمام مقادیر پیش‌بینی شده کنترک و نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی برای تست‌های Conway و TTCI می‌باشند.





شکل ۵-۱۵) تشنش فشاری دینامیکی اندازه‌گیری شده روی لایه HMA برای قطار خالی روی خط اصلی حمل و نقل CSX واقع در Conway, Ky



شکل ۵-۱۶ تنش فشاری دینامیکی اندازه‌گیری شده روی خط تست TPCI

جدول ۵-۲. مقایسه برای خط اصلی CSX واقع در Conway, Kentucky

ضخامت		تنش فشاری بالاست		تنش فشاری HMA		تنش فشاری بستر	
HMA	بلاست	میدانی	کنترک	میدانی	کنترک	میدانی	کنترک
۵	۱۰	-	۴۷/۹	۱۶/۰	۲۱/۰	-	۱۳/۶
۸	۱۰	-	۴۸/۷	۱۵/۰	۲۲/۰	-	۱۱/۷

جدول ۵-۳. مقایسه برای خط تست TPCI در Pueblo, Colorado

۴	۱۲	-	۴۳/۵	۱۴/۹	۱۱/۷	۸/۰	۸/۳
۸	۸	-	۴۷/۰	۱۴/۹	۲۱/۹	۷/۷	۸/۲

## ۵-۳- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت در واقع، روندی است که در آن با یکسان‌سازی همه شرایط و پارامترها به جز پارامتر مورد نظر، به بررسی تأثیر آن پارامتر روی نتایج می‌پردازد.

نمودارهای ارائه شده در نهایت حاوی دید جامعی نسبت به تأثیر میزان بار محوری و مدول بستر، بر تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از تحلیل نرم‌افزار است. همچنین تأثیر این دو پارامتر بر هر سه نمونه زیرسازی (بالاستی، آسفالتی، ترکیبی) بررسی می‌شود.

داده‌های ارائه شده در جدول (۵-۴) از نتایج یک مثال با مدول بستر (psi) ۱۲۰۰۰ و بار محوری ۳۶ تن که با کترک مورد تحلیل واقع شده، استخراج شده است. سایر اطلاعات موجود، با تغییر مقادیر مدول بستر و بار محوری در سه نوع طراحی یاد شده به دست آمده‌اند.

مدول بستر از یک مقدار نسبتاً ضعیف، (psi) ۶۰۰۰ تا مقدار قوی، (psi) ۲۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. برای بار محوری استاندارد طراحی، مقادیر ۳۳، ۳۶ و ۳۹ تن به منظور ارزیابی انتخاب شده‌اند. این اطلاعات به صورت نموداری در تصاویر (۵-۱۷) تا (۵-۳۰) به نمایش درآمده‌اند. در ادامه به اختصار، تغییرات در پارامترها و میزان تأثیر هر کدام از آن‌ها به طور مجزا ارائه شده است [۴].

جدول ۵-۴. اطلاعات خروجی برنامه با تغییرات در مقدار چند پارامتر [۴]

زیرسازی ترکیبی	لایه ۴ عمر بستر (سال)	۵/۷۳	۳۰/۳۳	۸۲/۰۱	۱۱۸/۴۴
	لایه ۲ عمر آسفالت (سال)	۱۵/۰۴	۳۹/۲۸	۷۰/۴۱	۸۵/۴۰
زیرسازی آسفالتی	لایه ۴ تنش فشار بستر (Psi)	۷/۷۰	۹/۶۳	۱۰/۸۰	۱۱/۳۵
	لایه ۲ کرنش کششی آسفالت	۰/۰۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۱۵۰	۰/۰۰۰۱۱۹	۰/۰۰۰۱۱۲
	لایه ۳ عمر بستر (سال)	۴/۵۸	۲۱/۲۳	۵۲/۰۹	۷۳/۱۸
	لایه ۲ عمر آسفالت (سال)	۱۰/۶۹	۲۴/۸۴	۴۲/۱۰	۵۱/۵۱
	لایه ۳ تنش فشاری بستر (psi)	۸/۳۸	۱۰/۸۲	۱۲/۶۵	۱۳/۴۰
	لایه ۲ کشش کششی آسفالت	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۱۵۵	۰/۰۰۰۲۶۱
بالاستی سنتی	لایه ۳ عمر بستر (سال)	۱/۷۷	۸/۵۲	۲۱/۰۲	۲۹/۵۹
	لایه ۳ تنش فشاری بستر (psi)	۹/۶۳	۱۲/۲۸	۱۴/۲۳	۱۵/۰۶
نوع زیرسازی	مدول بستر (psi)	۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۱۰۰۰
	بار محوری (ton)	۳۳			

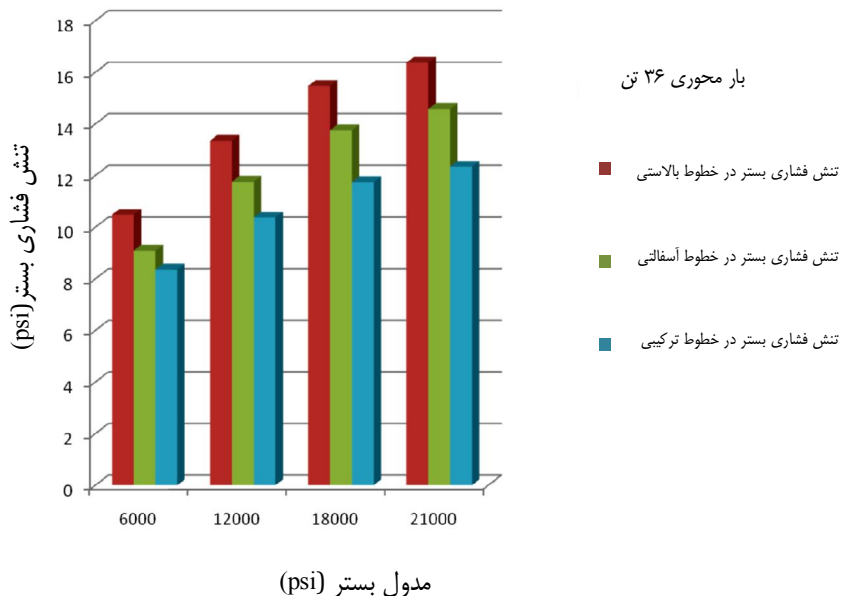
ادامہ جدول ۴-۵

فصل پنجم: بررسی نتایج عددی

۳۸				۳۹			
۴/۲۴	۲۲/۵۶	۵۹/۸۶	۸۶/۲۷	۳/۲۲	۱۶/۹۷	۴۴/۹۰	۶۴/۷۹
۱۱/۲۳	۳۹/۴۸	۵۲/۳۰	۶۳/۷۳	۸/۵۴	۲۲/۴۹	۳۹/۹۴	۴۸/۷۱
۸/۳۵	۱۰/۳۸	۱۱/۷۴	۱۲/۳۴	۹/۰۱	۱۱/۳۰	۱۲/۶۷	۱۳/۳۳
۰/۰۰۰۰۲۲۵	۰/۰۰۰۰۱۶۳	۰/۰۰۰۰۱۳۱	۰/۰۰۰۰۱۲۲	۰/۰۰۰۰۳۴۵	۰/۰۰۰۰۱۷۷	۰/۰۰۰۰۱۴۲	۰/۰۰۰۰۱۳۳
۳/۳۹	۱۵/۶۸	۳۸/۰۵	۵۳/۳۷	۲/۵۶	۱۱/۷۹	۲۸/۵۲	۳۹/۹۵
۷/۹۹	۱۸/۸۵	۳۱/۲۶	۳۸/۲۱	۶/۱۱	۱۴/۳۸	۲۳/۷۹	۲۹/۰۵
۹/۰۹	۱۱/۷۶	۱۳/۷۶	۱۴/۵۸	۹/۸۰	۱۲/۶۹	۱۴/۸۶	۱۵/۷۵
۰/۰۰۰۰۲۶۱	۰/۰۰۰۰۱۹۹	۰/۰۰۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰۰۱۵۸	۰/۰۰۰۰۲۸۴	۰/۰۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۰۱۸۵	۰/۰۰۰۰۱۷۲
۱/۲۹	۶/۲۴۴	۱۵/۳۹	۲۱/۶۴	۰/۹۷	۴/۶۹	۱۱/۵۶	۱۶/۲۴
۱۰/۴۸	۱۳/۳۵	۱۵/۴۷	۱۶/۳۸	۱۱/۳۳	۱۴/۴۱	۱۶/۷۱	۱۷/۶۸
۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۱۰۰۰	۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۱۰۰۰

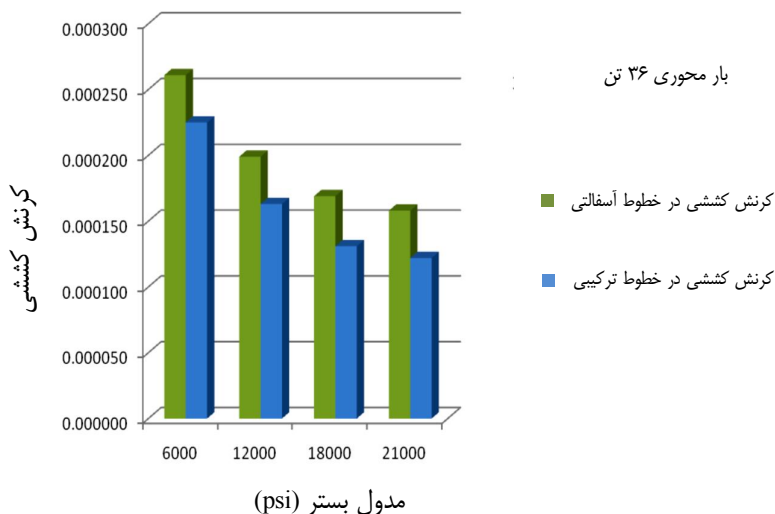
## ۵-۳-۱- تأثیر تغییر مدول بستر

نمودارهای مربوط به شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) تأثیر تغییر مدول بستر را روی تنش فشاری (برای هر ۳ نوع طراحی)<sup>۱</sup> و همچنین تأثیر آن روی کرنش کششی (مربوط به زیرسازی آسفالتی و ترکیبی) نشان می‌دهد. با سخت شدن هرچه بیشتر بستر، تنش فشاری بستر هم بیشتر افزایش می‌یابد، که این واقعیت توسط تحلیل‌های گذشته هم تأیید شده است. این در حالی است که سخت‌تر شدن بستر، کرنش کششی در قسمت پایینی لایه آسفالت را کاهش می‌دهد. دلیل اصلی این موضوع کاهش تغییر شکل و گسیختگی آسفالت در اثر سخت‌تر شدن بستر می‌باشد.



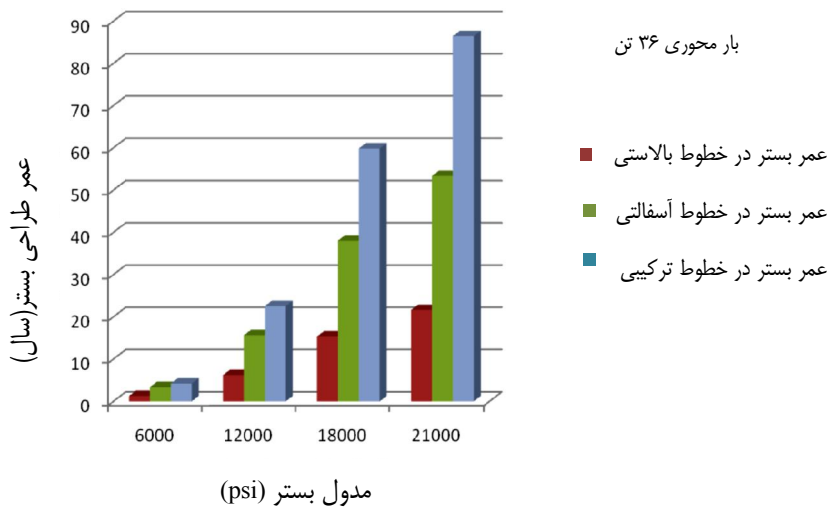
شکل ۵-۱۷) تأثیر تغییر مدول بستر روی تنش فشاری بستر

۱. رجوع به شکل (۱-۱۴)

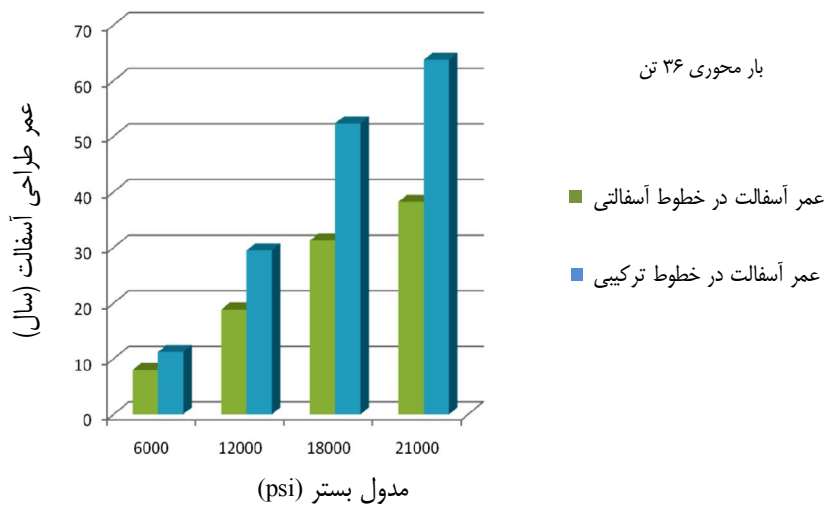


شکل ۵-۱۸) تأثیر تغییر مدول بستر روی کرنش کششی آسفالت

شکل (۵-۱۹) و شکل (۵-۲۰) تأثیرات مشابه تغییر مدول بستر و تأثیر آن روی عمر طرح را نشان می‌دهند. نکته قابل تأمل در شکل (۵-۱۹)، افزایش عمر طراحی به‌طور ملموس با افزایش سختی بستر است. این مسئله حتی با افزایش بار محوری هم اتفاق می‌افتد. همچنین عمر طراحی برای دو زیرسازی دارای آسفالت به‌طور مشخصی بیش از طراحی زیرسازی بالاستی افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که بسترهای نرم نیازمند شکل‌دهی و تسطیح دوره‌ای به‌منظور انتقال صحیح نیرو و کرنش هستند که نشان از عمر طراحی کوتاه‌شان دارد. از شکل (۵-۲۰) می‌توان دریافت که بسترهای سخت‌تر به‌طور ملموس عمر بسترهای آسفالتی را افزایش می‌دهد. مقایسه شکل (۵-۱۹) و شکل (۵-۲۰) نشان می‌دهد که در نتیجه استفاده از بسترهای آسفالتی، تنش‌های وارده کمتری به بستر رسیده و عمر طراحی نسبت به طراحی بالاستی بیشتر می‌باشد.



شکل ۵-۱۹) تأثیر تغییر مدول بستر روی عمر بستر

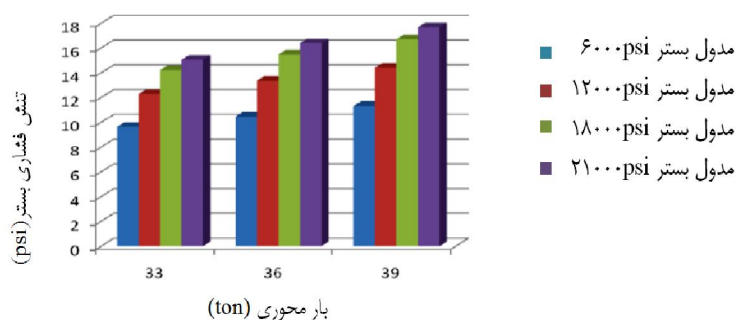


شکل ۵-۲۰) تأثیر تغییر مدول بستر روی عمر آسفالت

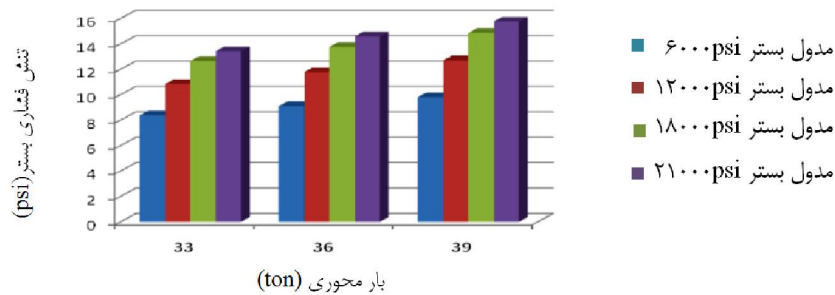


## ۵-۳-۲- تأثیر تغییر بار محوری

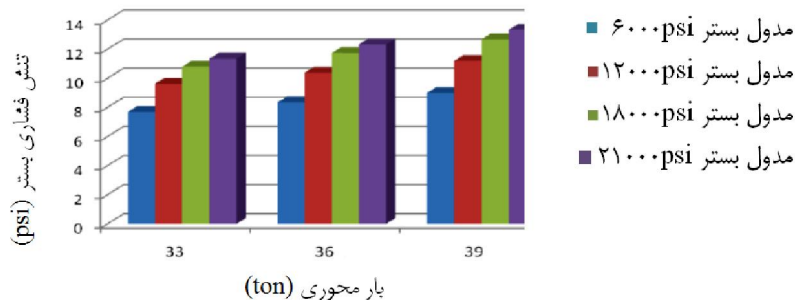
شکل‌های (۵-۲۱)، (۵-۲۲) و (۵-۲۳) اطلاعاتی مشابه محتوای شکل (۵-۱۷) (برای هر سه طرح زیرسازی) دارند، با این توضیح که اطلاعات اضافه شده برای بارهای محوری ۳۳ و ۳۹ تن نیز لحاظ شده‌اند. در واقع در این قسمت اثر تغییر بار محوری قابل مشاهده می‌باشد. این سه شکل به ترتیب مربوط به خطوط بالاستی، آسفالتی و ترکیبی می‌باشد. همچنین در خط با یک مدول بستر مشخص، افزایش بار محوری، باعث مقدار اندکی افزایش در تنش فشاری وارد بر بستر در طراحی زیرسازی می‌شود.



شکل (۵-۲۱) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی تنش فشاری در خطوط بالاستی

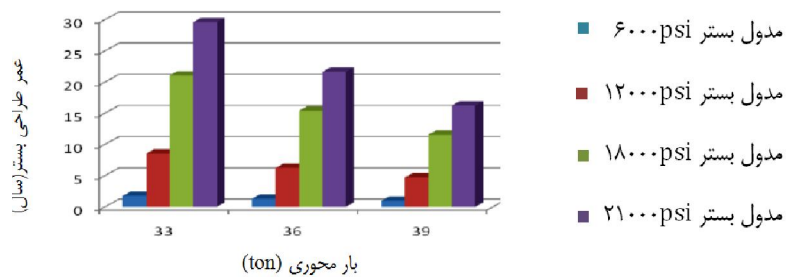


شکل (۵-۲۲) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی تنش فشاری در خطوط آسفالتی

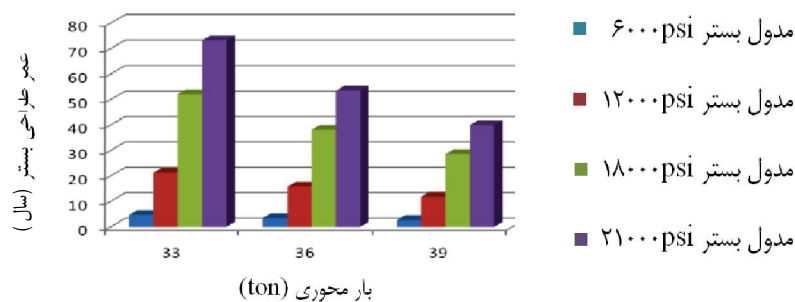


شکل ۵-۲۳) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی تنش فشاری در خطوط ترکیبی

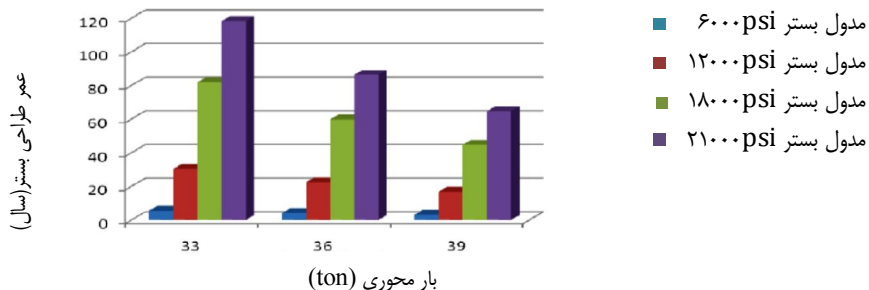
شکل (۵-۲۴)، شکل (۵-۲۵) و شکل (۵-۲۶) تأثیر بار محوری و مدول بستر را روی عمر طراحی بستر نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۴) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی عمر بستر در خطوط بالاستی

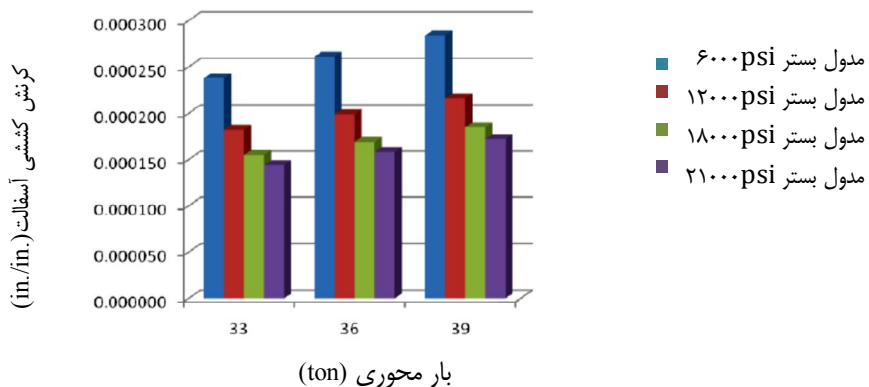


شکل ۵-۲۵) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی عمر بستر در خطوط آسفالتی

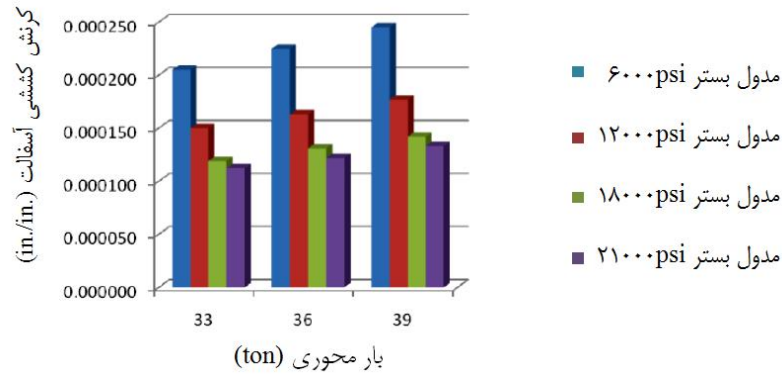


شکل ۵-۲۶) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی عمر بستر در خطوط ترکیبی

افزایش بار محوری در یک مدول بستر مشخص، باعث کاهش در عمر طراحی خط می‌شود. شکل‌های (۲۷-۵) و (۲۸-۵) مربوط به تأثیر افزایش بار محوری و مدول بستر روی کرنش کششی زیرین لایه آسفالتی برای دو نوع زیرسازی آسفالتی می‌باشد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، تأثیر افزایش بار محوری برای یک مدول بستر معین، افزایش اندکی در کرنش کششی لایه آسفالت می‌باشد. همچنین افزایش مدول بستر در کاهش این کرنش تأثیر زیادی دارد.

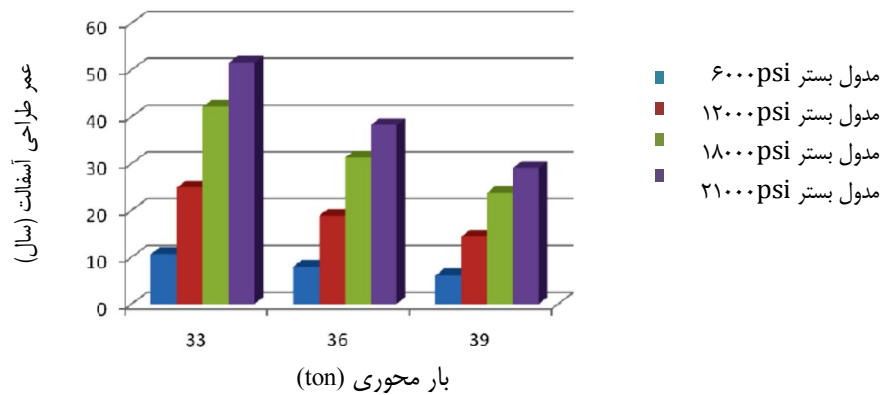


شکل ۵-۲۷) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی کرنش کششی در خطوط آسفالتی

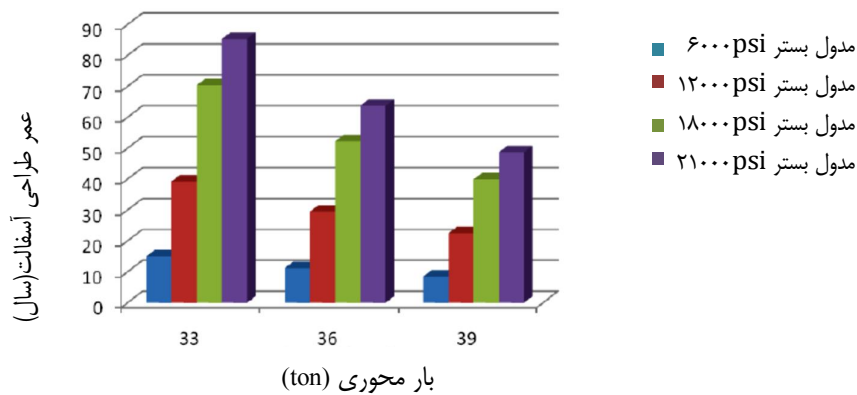


شکل ۵-۲۸) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی کرنش کششی در خطوط ترکیبی

اشکال (۵-۲۹) و (۵-۳۰) حاوی همان اطلاعات اشکال (۵-۲۷) و (۵-۲۸) است با این تفاوت که به بررسی عمر آسفالت پرداخته شده است.



شکل ۵-۲۹) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی عمر آسفالت در خطوط آسفالتی



شکل ۵-۳) تأثیر بار محوری و مدول بستر بر روی عمر آسفالت در خطوط ترکیبی

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، برنامه کنترل به‌منظور فرایند طراحی زیرسازی‌های لایه‌ای الاستیک در راه‌آهن طراحی شده و نرم‌افزار این قابلیت را به‌کاربر می‌دهد که با یک رویه تحلیلی به طراحی زیرسازی بپردازد.

#### ۵-۴- مثال‌هایی عددی از تحلیل خطوط ریلی

در این قسمت سه مثال با پارامترهای ورودی مجزا با کنترل مورد تحلیل واقع شده است [۵]. در هر مثال خلاصه نتایج در جدول مربوطه در انتهای هر مثال آورده شده است.

#### ۵-۴-۱- خطوط بالاستی مرسوم

##### مثال (۵-۱)

خط راه‌آهنی را مطابق شکل (۵-۳۱) با مشخصات زیر در نظر بگیرید:

نوع زیر سازی: بالاستی

نوع تراورس: بتنی

مدول بستر: ۱۲۰۰۰ psi

مشخصات لایه‌ها :

لایه ۱: ۱۰" بالاست

لایه ۲: ۴" زیربالات

لایه ۳: ۲۰۰" بستر خاکی

لایه ۴: بستر سنگی (ضخامت نامحدود)

نوع ریل: RE115

بار چرخ: ۳۶۰۰۰ lb

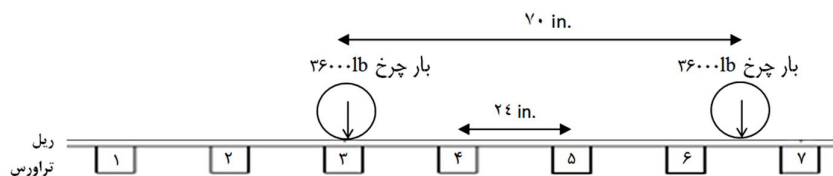
تعداد تکرار پیش بینی شده:

بهار: ۵۰۰۰۰

تابستان: ۵۰۰۰۰

پائیز: ۵۰۰۰۰

زمستان: ۵۰۰۰۰



۱۰ in.	بالات	$K_1=18000 \text{ psi};$ $K_2=0.5; \nu = 0.35$
۴ in.	زیر بالات	$K_1=20000 \text{ psi};$ $K_2=0.5; \nu = 0.35$
۲۰۰ in.	بستر	$E=12000 \text{ psi};$ $\nu = 0.4$

بستر سنگی  $E = 0.1 \times 10^{10} \text{ psi}$   $\nu = 0.5$

شکل ۵-۳۱) زیرسازی خط مربوط به مثال (۵-۱)

## نتایج تحلیل زیرسازی

با اجرای روندی که پیشتر درباره کنتراک ذکر شد، نتایج زیر قابل استخراج هستند.

عمر لایه بستر (سال)	تنش فشاری روی بستر (psi)	فصل
۱۳	-۱۰/۸۲۳	بهار
	-۱۰/۸۳۱	تابستان
	-۱۰/۸۳۰	پائیز
	-۱۰/۸۳۰	زمستان

## ۵-۴-۲- خطوط آسفالتی

## مثال (۵-۲)

خط راه‌آه‌نی را مطابق شکل (۵-۳۲) با مشخصات زیر در نظر بگیرید:

نوع زیر سازی: آسفالتی<sup>۱</sup>

نوع تراورس: چوبی

مدول بستر: ۱۲۰۰۰ psi

مشخصات لایه ها:

لایه ۱: ۸" بالاست

لایه ۲: ۶" آسفالت

لایه ۳: ۲۰۰" بستر خاکی

لایه ۴: بستر سنگی (ضخامت نامحدود)

نوع ریل: RE132

بار چرخ: ۳۶۰۰۰lb

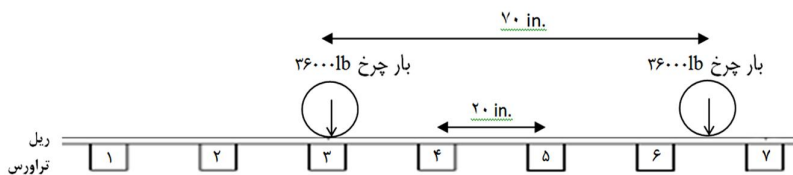
تعداد تکرار پیش بینی شده:

بهار: ۵۰۰۰۰

تابستان: ۵۰۰۰۰

پائیز: ۵۰۰۰۰

زمستان: ۵۰۰۰۰



8 in.	بالاست	$K_1 = 4000, 6800, 9333, 15000 \text{ psi};$ $K_2 = 0.5; \nu = 0.35$
6 in.	HMA	وابسته به دما است. $\nu = 0.45$
200 in.	بستر	$E = 6000, 8000, 9000, 11000 \text{ psi};$ $\nu = 0.4$
بستر سنگی		$E = 0.1 \times 10^{20} \text{ psi}$ $\nu = 0.5$

شکل ۳۲-۵) زیر سازی خط مربوط به مثال (۲-۵)



## نتایج تحلیل زیرسازی

عمر لایه آسفالتی (سال)	عمر لایه بستر (سال)	تنش کششی لایه آسفالتی (psi)	تنش فشاری روی بستر (psi)	
۱۸	۱۵	۰/۰۰۰۱۴۷۳	۱۰/۸۴۲	بهار
		۰/۰۰۰۲۰۱۹	۱۱/۸۷۹	تابستان
		۰/۰۰۰۱۰۹۷	۹/۷۸۷	پائیز
		۰/۰۰۰۰۸۷	۸/۹۹۴	زمستان

## ۵-۴-۳- خطوط ترکیبی

## مثال (۵-۳)

خط راه‌آهنی را مطابق شکل (۵-۳۳) با مشخصات زیر در نظر بگیرید:

نوع زیرسازی: ترکیبی<sup>۱</sup>

نوع تراورس: بتنی

مدول بستر: ۱۲۰۰۰ psi

مشخصات لایه‌ها:

لایه ۱: ۸" بالاست

لایه ۲: ۶" آسفالت

لایه ۳: ۴" زیربلاست

لایه ۴: ۲۰۰" بستر خاکی

لایه ۵: بستر سنگی (ضخامت نامحدود)

نوع ریل : RE115

بار چرخ : ۳۶۰۰۰lb

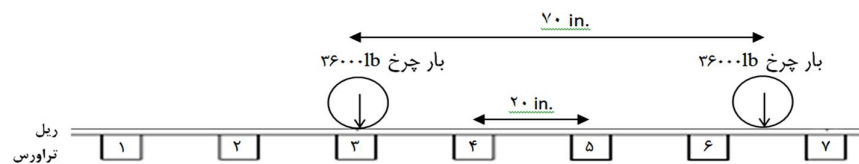
تعداد تکرار پیش بینی شده :

بهار : ۵۰۰۰۰

تابستان : ۵۰۰۰۰

پائیز : ۵۰۰۰۰

زمستان : ۵۰۰۰۰



8 in.	بالاست	$K_1=18000 \text{ psi} ;$ $K_2=0.5 ; \nu = 0.35$
6 in.	HMA	E. وابسته به دما است $\nu = 0.45$
4 in.	زیر بالاست	$K_1=20000 \text{ psi} ;$ $K_2=0.5 ; \nu = 0.35$
200 in.	بستر	$E=12000 \text{ psi} ;$ $\nu = 0.4$
بستر سنگی		$E=0.1 \times 10^{10} \text{ psi} ,$ $\nu = 0.5$

شکل (۳۳-۵) زیرسازی خط مربوط به مثال (۳-۵)

## نتایج تحلیل زیرسازی

عمر لایه آسفالتی (سال)	عمر لایه بستر (سال)	تنش کششی لایه آسفالتی (psi)	تنش فشاری روی بستر (psi)	
۷۳	۳۱	۹/۵۳۷	-۸/۸۶۱	بهار
		۰/۰۰۰۱۱	-۹/۲۷۵	تابستان
		۷/۷۰۷	-۸/۳۸۱	پائیز
		۶/۴۵۰	-۸/۰۳۰	زمستان

## ۵-۵- نتایج عددی

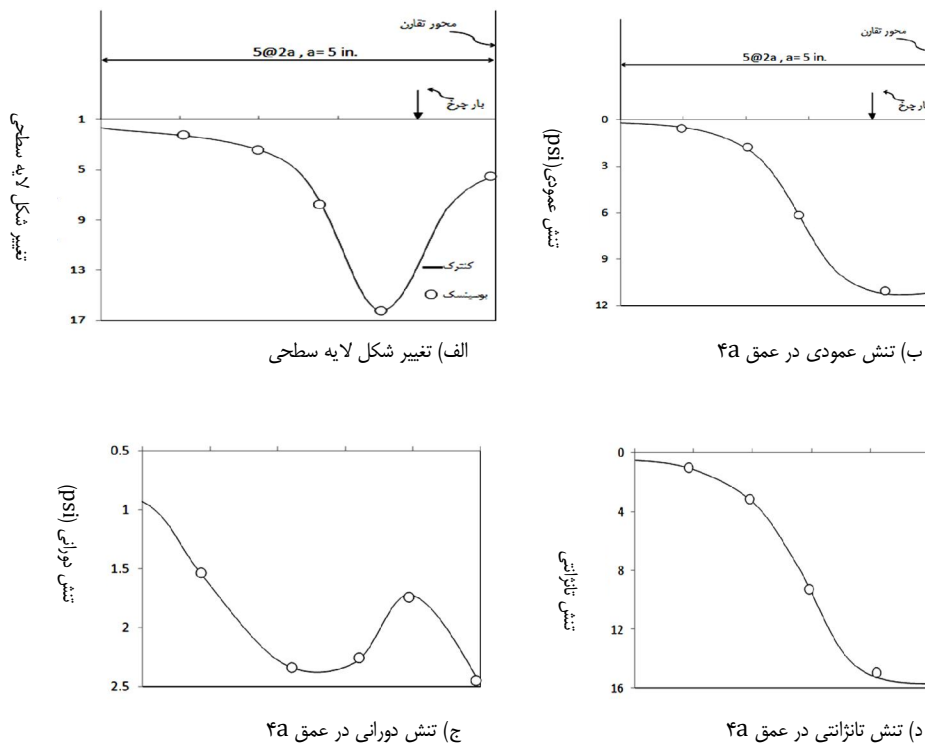
به منظور تحقیق در صحت عملکرد کنتراک، این بار نتایج عددی به دست آمده از برنامه با پاسخهای تحلیلی بوسینسک مقایسه شده است که این مقایسه تطابق خوبی را بین نتایج نشان داد. همچنین برای یک مورد عملی با زیرسازی سنتی (بالاستی)، نتایج کنتراک به طور مطلوبی با نتایج ژئوترک مطابقت نشان دادند. با این که کنتراک و ژئوترک از تئوری لایه‌ای مشابهی استفاده می‌کنند، پروسه حل در کنتراک به طور مستقل و بدون رجوع به ژئوترک انجام می‌شود.

در ادامه اثر تعداد تراورس‌ها در تحلیل NTA<sup>۱</sup> روی تنش‌ها و کرنش‌های بیشینه و تغییر شکل‌ها بررسی می‌شوند. به منظور کمک به درک طراحی زیرسازی HMA، اثر ضخامت HMA و لایه‌های دانه‌ای، روی تنش‌ها و کرنش‌های بحرانی در زیرسازی، ارائه شده است.

۱. تعداد تراورس‌های درگیر در تحلیل

## ۵-۱-۵- مقایسه با تحلیل‌های بوسینسک

آل‌وین و اولری<sup>۱</sup> بر اساس تئوری بوسینسک، معادلات و گراف‌هایی برای تعیین جابجایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در یک نیم‌فضای همگن الاستیک، زیر یک ناحیه دایره‌ای بارگذاری شده، ارائه دادند. برای شبیه‌سازی بارگذاری متقارن در کنتراک، دو ناحیه بارگذاری، هریک به شعاع  $a$ ، با فشار  $100 \text{ psi}$  و به فاصله مرکز به مرکز  $4a$  در نظر گرفته شده است. با فرض مدول یانگ  $10000 \text{ psi}$  ( $69 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0.5$  برای نیم‌فضا، تغییر شکل قائم روی سطح و تنش‌های قائم، به‌صورت شعاعی و مماسی در عمق  $4a$  در زیر سطح، در طول خط اتصال مرکز دو ناحیه بارگذاری، با برهم نهی آثار تعیین و با نتایج بدست آمده از کنتراک مقایسه شده‌اند، که در شکل (۵-۳۴) ارائه شده است.



$$(1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm} ; 1 \text{ lb.} = 4.45 \text{ N.} ; 1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2)$$

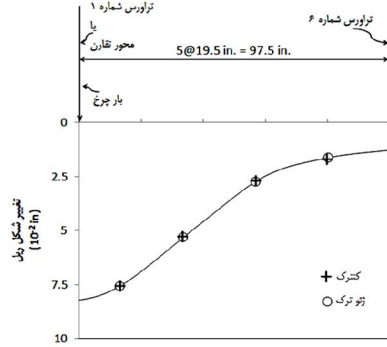
شکل (۵-۳۴) مقایسه با راه حل بوسینسک

1. Ahlvin and Ulery, 1962

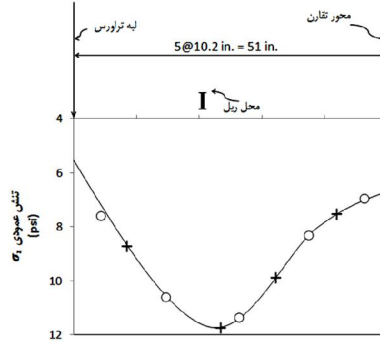
- در استفاده از کنترک برای تحلیل، مفروضات زیر در نظر گرفته شده‌اند:
- زیرسازی خط ریلی از دو لایه با مدول یانگ  $1000 \text{ psi}$  ( $69 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0.5$  تشکیل شده است.
  - ۶ نقطه در جهت عرضی مفروض است و فاصله دو نقطه  $2a$  می‌باشد.
  - عرض تراورس  $7/85 \text{ in}$  ( $20 \text{ cm}$ ) فرض شده تا یک شعاع تماس (a) به اندازه ۵ اینچ بدست آید.
  - ممان اینرسی نسبتاً کوچک برای ریل و تراورس‌ها و یک ثابت فنر بزرگ برای فنرهای بین ریل و تراورس‌ها فرض شده است.
- شکل (۳۴-۵) نشان‌دهنده تطابق این دو پاسخ است، که بیانگر صحت قسمت لایه‌ای برنامه است.

#### ۵-۲-۵- مقایسه با ژئوترک

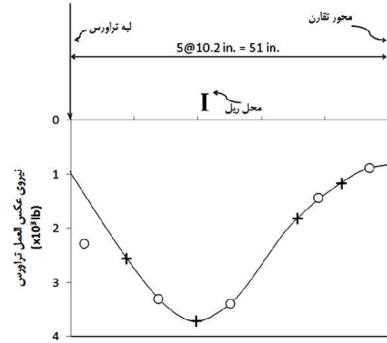
- استوارت و سلیگ<sup>۱</sup> یک خط سنتی شامل ریل RE136، تراورس چوبی، بالاست و بستر را تحت اثر بار چرخ تنه‌ای  $32900 \text{ lb}$  ( $146 \text{ kN}$ ) تحلیل نمودند. پاسخ‌هایی که آن‌ها در ژئوترک به دست آوردند با کنترک مقایسه شد. داده‌های زیر برای تحلیل استفاده شدند:
- مدول مقطع ریل  $23/9 \text{ in}^3$  ( $391/7 \text{ cm}^3$ )، ممان اینرسی  $94/9 \text{ in}^4$  ( $3950 \text{ cm}^4$ )، مدول الاستیسیته  $3 \times 10^7 \text{ psi}$  ( $207 \text{ GN/m}^2$ )، سختی فنر  $7 \times 10^6 \text{ lb/in}$  ( $12/3 \text{ MN/cm}$ )
- ضخامت تراورس  $7 \text{ in}$  ( $18 \text{ cm}$ )، عرض  $9 \text{ in}$  ( $23 \text{ cm}$ )، طول  $102 \text{ in}$  ( $2/59 \text{ m}$ ) در فواصل  $19/5 \text{ in}$  ( $49/5 \text{ cm}$ ) و مدول الاستیک  $1/5 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $10/4 \text{ GN/m}^2$ )
- ضخامت بالاست  $12 \text{ in}$  ( $30 \text{ cm}$ )، مدول الاستیسیته  $45000 \text{ psi}$  ( $200 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0/3$  و مدول الاستیسیته بستر  $8000 \text{ psi}$  ( $356 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0/4$ .
- شکل (۳۵-۵) مقایسه پاسخ‌ها بین کنترک و ژئوترک برای تغییر شکل‌های ریل، واکنش‌ها و تغییر شکل‌های تراورس شماره ۱ و سه تنش نرمال در لایه بالاست زیر تراورس شماره ۱ را نشان می‌دهد. پاسخ‌های کنترک با خطوط ممتد و پاسخ‌های ژئوترک با دوایر کوچک نمایش داده شده‌اند.



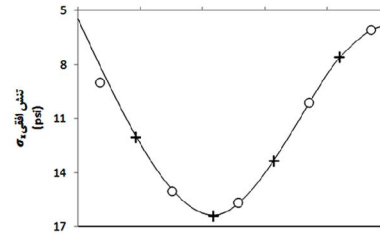
د) تغییر شکل ریل



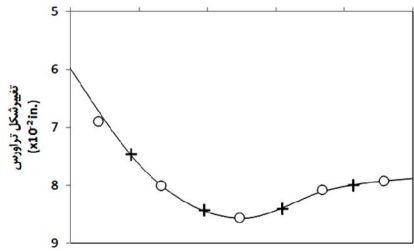
الف) تنش عمودی



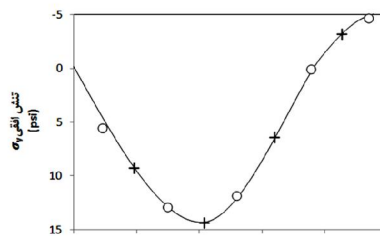
ه) عکس العمل تراورس



ب) تنش افقی در راستای X



و) تغییر شکل تراورس



ج) تنش افقی در راستای Y

( 1 in. = 2.54 cm ; 1 lb. = 4.45 N. ; 1 psi = 6.9 kN/m<sup>2</sup>)

شکل ۵-۳۵) مقایسه با پاسخ ژئوترک

مطابق شکل (۵-۳۵)، هر دو پاسخ به جز در نزدیکی انتهای تراورس، مطابقت بسیار خوبی دارند. این مسئله از قبل قابل پیش‌بینی بود؛ چرا که کنتراک یک نقطه گرمای در انتهای تراورس در نظر می‌گیرد؛ درحالی‌که ژئوترک یک نقطه گرمای در یک فاصله از انتهای تراورس فرض می‌کند. توجه کنید که کنتراک یک نقطه به‌طور مستقیم زیر ریل دارد که ژئوترک فاقد آن است. به‌عنوان یک نتیجه، ژئوترک ماکزیمم را از دست می‌دهد و تنش بحرانی کوچکتری نسبت به کنتراک نتیجه می‌دهد.

### ۵-۳-۵- اثر تعداد تراورس‌ها

در نرم‌افزار کنتراک پارامتر NTA برای مشخص کردن تعداد تراورس‌های درگیر در تحلیل به کار گرفته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر مطرح شد، تعداد ۶ تراورس برای NTA پیشنهاد شده است. به‌منظور بررسی ماهیت عملی این پیشنهاد، اثر NTA روی تغییر شکل‌های ماکزیمم ریل و تنش‌ها و کرنش‌های بحرانی بررسی شده است. جدول (۵-۵) اثر NTA روی تغییر شکل بیشینه ریل، کرنش کششی افقی بحرانی در زیر لایه آسفالتی، و تنش و کرنش فشاری قائم بحرانی روی بستر را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۵. تأثیر تعداد تراورس‌ها برای تحلیل NTA بر روی تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های بیشینه

NTA	بیشینه تغییر شکل ریل (in.)	بیشینه کرنش کششی ( $\times 10^{-4}$ )	بیشینه تنش فشاری (psi)	بیشینه کرنش فشاری ( $\times 10^{-3}$ )
۴	۰/۱۱۴۶۰	۲/۳۵	۹/۱۸۶	۱/۰۲
۶	۰/۱۱۴۹۴	۲/۴۶	۹/۴۴۲	۱/۰۳
۹	۰/۱۱۴۵۳	۲/۴۴	۹/۳۸۳	۱/۰۲
۱۲	۰/۱۱۴۵۱	۲/۴۴	۹/۳۸۱	۱/۰۲

1 in. = 2.54 cm ; 1 psi = 6.9 kN/m<sup>2</sup>

قابل مشاهده است که استفاده از ۶ تراورس نتایج نزدیکی به ۹ یا ۱۲ تراورس دارد و خطای موجود از نوع خطای ایمن می‌باشد؛ چراکه بیشترین مقدار را نتیجه می‌دهد. در این تحلیل، خط از ریل RE132، تراورس چوبی، HMA، اساس و بستر دانه‌ای تشکیل می‌شود و در معرض دو بار چرخ، هرکدام به وزن ۳۳۰۰۰ lb (۱۴۷kN) و به فاصله ۷۰ in (۱/۷۸ m) از هم قرار می‌گیرد. داده‌های زیر مفروض‌اند:

مدول مقطع ریل  $22/5 \text{ in}^3$  ( $369 \text{ cm}^3$ )، ممان اینرسی  $88/4 \text{ in}^4$  ( $3680 \text{ cm}^4$ )، مدول الاستیسیته  $3 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $207 \text{ GN/m}^2$ ) و سختی فنر  $10^7 \text{ lb/in}$  ( $17/5 \text{ MN/cm}$ )

ضخامت تراورس  $7 \text{ in}$  ( $18 \text{ cm}$ )، پهنای  $9 \text{ in}$  ( $23 \text{ cm}$ )، طول  $102 \text{ in}$  ( $2/59 \text{ m}$ ) در فواصل  $20 \text{ in}$  ( $51 \text{ cm}$ ) و مدول الاستیسیته  $1/25 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $8.6 \text{ GN/m}^2$ )

HMA به ضخامت  $6 \text{ in}$  ( $15 \text{ cm}$ )، مدول الاستیسیته  $60000 \text{ psi}$  ( $4/1 \text{ GN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0/45$

اساس دانه‌ای به ضخامت  $10 \text{ in}$  ( $25 \text{ cm}$ )، مدول الاستیسیته  $25000 \text{ psi}$  ( $173 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0/35$

مدول الاستیسیته بستر  $7500 \text{ psi}$  ( $52 \text{ MN/m}^2$ ) و نسبت پواسون  $0/4$

#### ۵-۴-۵- اثر ضخامت لایه‌ها

برای نشان دادن اثر ضخامت لایه‌ها روی کرنش کششی بحرانی زیر HMA و تنش فشاری بحرانی روی سطح بستر، یک مطالعه پارامتری به وسیله تغییر ضخامت لایه‌ها و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام شده است. شکل (۵-۳۶) خواص مصالح به کار رفته برای تحلیل رولایه<sup>۱</sup> که در آن HMA مستقیماً زیر تراورس‌ها قرار دارد و زیر لایه<sup>۲</sup> که در آن HMA در قسمت زیرین بالاست قرار دارد را نشان می‌دهد. دلیل مدول الاستیک  $3000 \text{ psi}$  ( $210 \text{ MN/m}^2$ ) برای مصالح اساس در زیرسازی زیر لایه این است که تنش محصور در زیر لایه نسبت به رولایه به خاطر وجود لایه بالاست اضافی، کوچکتر است. در این تحلیل داده‌های زیر استفاده شده‌اند:

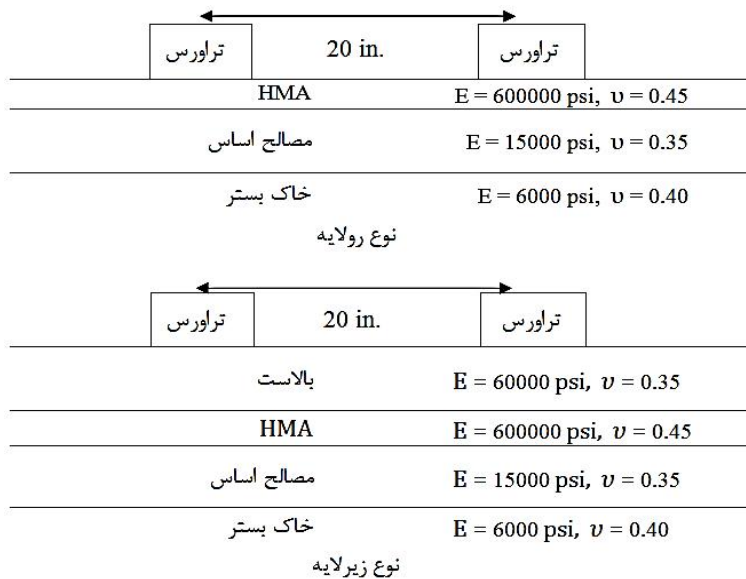
ریل: RE132 با مدول مقطع  $22/5 \text{ in}^3$  ( $369 \text{ cm}^3$ )، ممان اینرسی  $88/4 \text{ in}^4$  ( $3680 \text{ cm}^4$ )، مدول الاستیسیته  $3 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $207 \text{ GN/m}^2$ )، سختی فنر  $10^7 \text{ lb/in}$  ( $180 \text{ MN/mm}$ ) و گیبج ریل (مرکز به مرکز ریل)  $59/2 \text{ in}$  ( $1/33 \text{ m}$ ).



تراورس: ضخامت تراورس  $6/75$  in ( $17$ cm)، پهنای  $9$  in ( $23$ cm)، طول  $1.02$  in ( $2/59$ m) در فواصل  $2.0$  in ( $51$  cm) و مدول الاستیسیته  $10^6 \times 1/25$  ( $8/6$ GN/m<sup>2</sup>) psi.

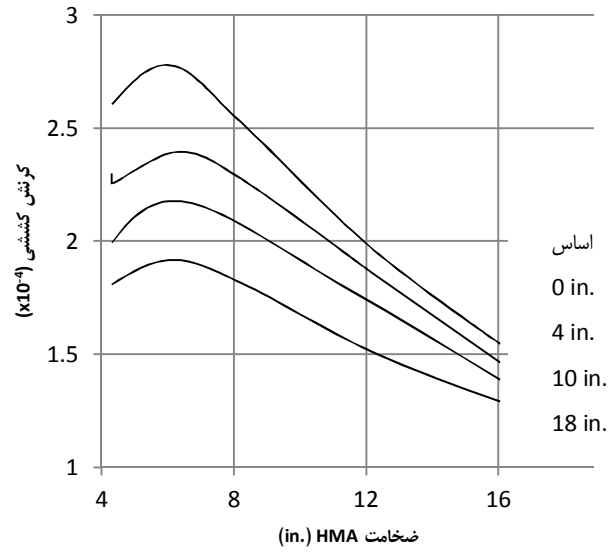
بار: تعداد محورها ۲ عدد، بار چرخ  $33000$  lb ( $147$ kN) و فاصله محورها  $70$  in ( $1/8$  m).

شکل (۵-۳۷) اثر ضخامت HMA و اساس روی کرنش‌های کششی در رولایه و زیرلایه را نشان می‌دهد. در رولایه زمانی که ضخامت HMA در بازه ۴ تا ۸ in ( $100$  تا  $200$  mm) است، ضخامت اساس دانه‌ای به‌طور مشخص روی کرنش کششی اثر می‌گذارد، اما ضخامت HMA اثر کمی دارد. در مورد زیرلایه، اثر ضخامت اساس روی کرنش کششی به‌طور نسبی کوچک است.

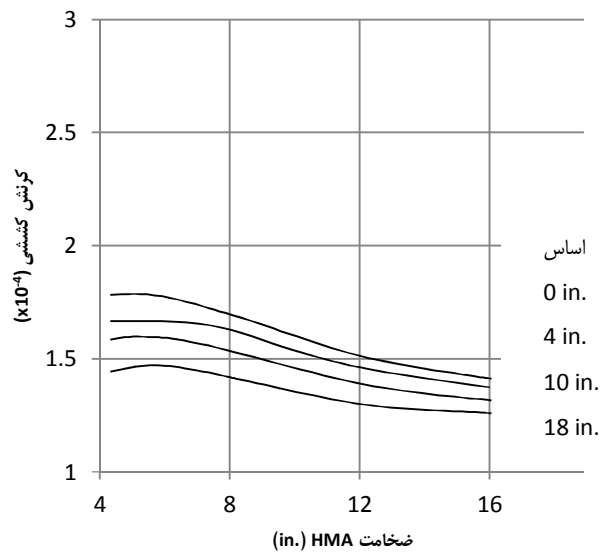


$$(1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm} ; 1 \text{ psi} = 6.9 \text{ kN/m}^2)$$

شکل ۵-۳۶) ویژگی مصالح استفاده شده برای تحلیل



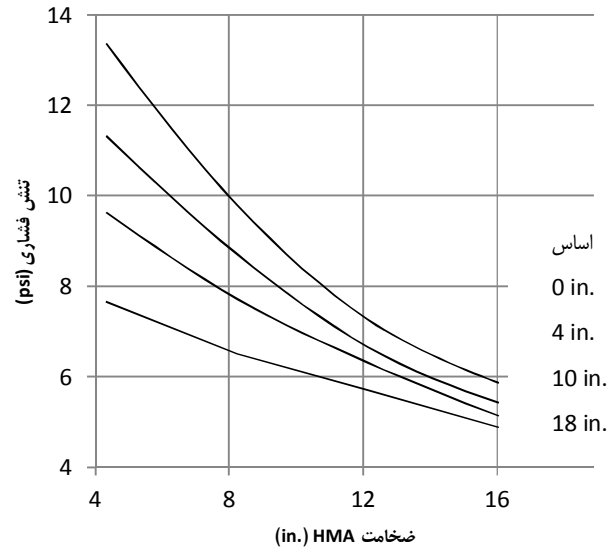
الف) رو لایه



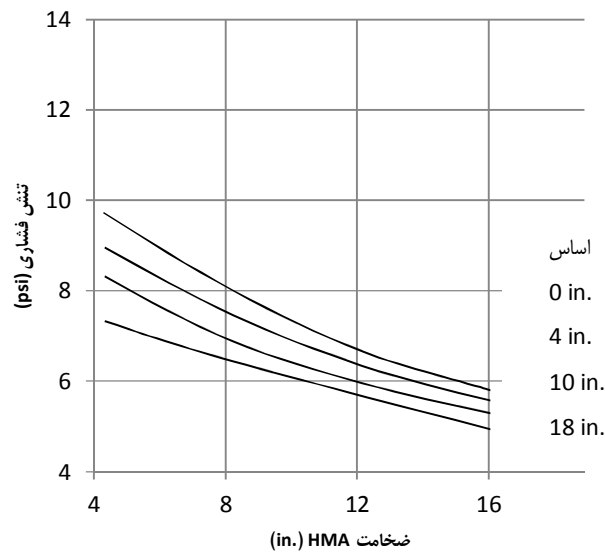
ب) زیر لایه

شکل ۵-۳۷ تأثیر ضخامت HMA و اساس بر کرنش‌های کششی

شکل (۵-۳۸) اثر ضخامت HMA و اساس روی تنش‌های فشاری در هر دو مورد رولایه و زیرلایه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ضخامت اساس اثر بسیار بزرگتری روی تنش‌های فشاری در رولایه نسبت به زیرلایه دارد. به همین دلیل است که توصیه می‌شود به جز در مواردی که بستر بسیار قوی باشد، حتماً لایه اساس برای رولایه استفاده شود. در تحلیل زیر HMA به‌طور مستقیم روی بستر و بدون مصالح اساس استفاده شده است. شکل (۵-۳۹) اثر ضخامت بالاست و HMA روی کرنش‌های کششی و تنش‌های فشاری در زیرلایه را نشان می‌دهد. ضخامت HMA اثر بیشتری روی تنش فشاری نسبت به کرنش کششی دارد. اثر ضخامت بالاست روی کرنش‌های کششی و تنش‌های فشاری تقریباً قابل توجه است. به همین دلیل است که توصیه می‌شود در طراحی زیرلایه ضخامت‌های هر دو لایه بالاست و HMA تغییر داده شوند تا این تنش‌ها و کرنش‌ها در محدوده مجاز نگه داشته شوند.

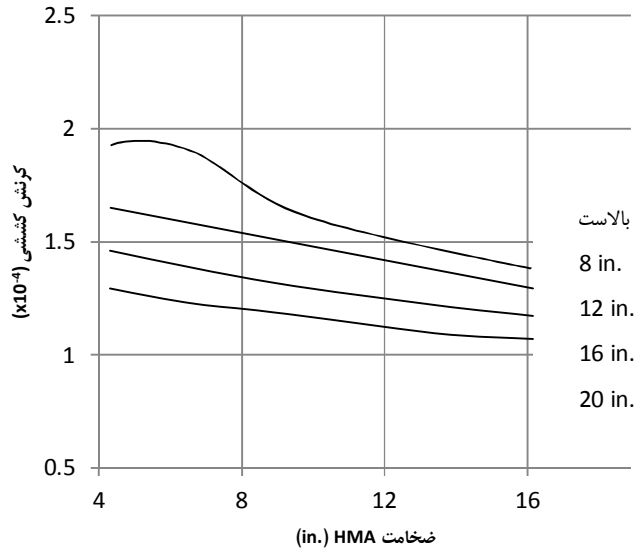


الف) رو لایه

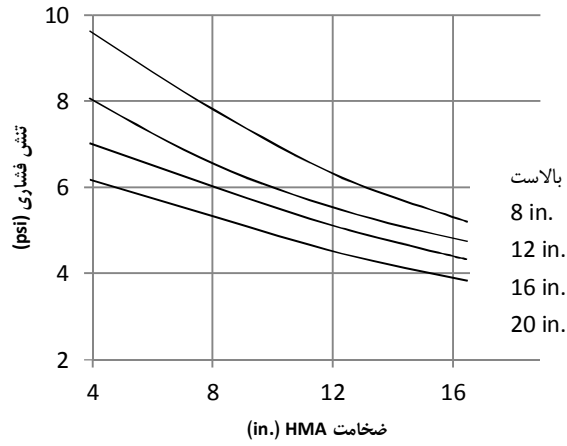


ب) زیر لایه

شکل ۵-۳۸) تأثیر ضخامت HMA و اساس بر تنش‌های فشاری



الف) کرنش کششی



ب) تنش فشاری

شکل ۵-۳۹) تأثیر بالاست و HMA بر کرنش‌های کششی و تنش‌های فشاری

۵-۶- مراجع و منابع

- [1] Rose, J. Bei Su, MSCE and Frank Twehues, EIT, Comparisons of Railroad Track and Substructure Computer Model Predictive Stress Values and In-Situ Stress Measurements.
- [2] Rose, J., Brown, E. and Osborne, M., (2000) *Asphalt Trackbed Technology Development; The First 20years*. Transportation Research Record 1713, Transportation Research Board, pp 1-9.
- [3] Stith, J. C., (2004) Railroad Track Pressure Measurements at the Rail/Tie Plate Interface using Tekscan Sensors, Master's Thesis (in preparation), University of Kentucky, Department of Civil Engineering
- [4] Kentrack, A Performance-Based Layered Elastic Railway Trackbed Structural Design And Analysis Procedure – A Tutorial. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference JRC2010 April 27-29, 2010, Urbana, Illinois, USA
- [5] Kentrack: A Coputer Program for Hot-Mix Asphalt and Conventional Ballast Railway Trackbeds. Yang H. Huang, Chiang Lin, Xuejun Deng, Jerry Rose, Asphalt Institute, (Publication RR-84-1) and National Asphalt Pavement Association, 164 pages

### مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن کتابهای زیر را منتشر کرده است :

- ۱- راهنمای عیوب ریلها - ۱۳۶۸
- ۲- فرهنگ شش زبانه عمومی واژگان و اصطلاحات راه آهن - ۱۳۷۲
- ۳- عیوب پل های راه آهن و اقدامات اصلاحی آنها - ۱۳۷۶
- ۴- اطلاعات جامع ترمز راه آهن با شرح آحاد و مختصات سیستم کنور - ۱۳۷۹
- ۵- فرهنگ توصیفی اصطلاحات علایم الکتریکی راه آهن - ۱۳۸۱
- ۶- شناسایی و طریقه بهره برداری از تجهیزات مکانیکی لکوموتیوهای دیزل الکتریک - ۱۳۸۲
- ۷- نگهداری و تعمیرات زیر سازی و روسازی خطوط ریلی - ۱۳۸۳
- ۸- شناسایی و طریقه بهره برداری از تجهیزات الکتریکی لکوموتیوهای دیزل الکتریک - ۱۳۸۳
- ۹- واژه نامه سه زبانه ماشین آلات روسازی ریلی - ۱۳۸۴
- ۱۰- بازدید قطار هر ایستگاه - ۱۳۸۴
- ۱۱- آموزش سوزنیان - ۱۳۸۴
- ۱۲- مقدمه ای بر مدیریت نگهداری و تعمیرات خطوط راه آهن - ۱۳۸۴
- ۱۳- اصول مهندسی روسازی خط آهن - ۱۳۸۵
- ۱۴- الفبای چرخ واگن و لکوموتیو - ۱۳۸۵
- ۱۵- اصول مهندسی خط راه آهن - ۱۳۸۵
- ۱۶- ترمز لکوموتیو و قطار - ۱۳۸۶
- ۱۷- آموزش مانورچی - ۱۳۸۶
- ۱۸- ایمنی علایم الکتریکی راه آهن - ۱۳۸۶
- ۱۹- مجموعه پرسش و پاسخ مشاغل سیر و حرکت راه آهن - ۱۳۸۶
- ۲۰- مجموعه پرسش و پاسخ شغل لکوموتیورانی - ۱۳۸۶
- ۲۱- مجموعه پرسش و پاسخ شغل بازدیدکننده قطار - ۱۳۸۶
- ۲۲- الکترونیک قطار - ۱۳۸۶
- ۲۳- مجموعه پرسش و پاسخ مشاغل سیر و حرکت راه آهن (چاپ دوم-همراه با اصطلاحات) - ۱۳۸۶
- ۲۴- راهنمای کاربردی مهندسی راه آهن - ۱۳۸۶
- ۲۵- دستورالعمل تعمیر موتور روستون - ۱۳۸۷

- ۲۶- آشنایی با سازمان بین‌المللی راه‌آهن‌ها (OSID) - ۱۳۸۷
- ۲۷- مبانی علایم الکتریکی راه‌آهن - ۱۳۸۷
- ۲۸- آشنایی با جرثقیل‌های راه‌آهن - ۱۳۸۷
- ۲۹- آموزش سرمانورچی - ۱۳۸۷
- ۳۰- آشنایی با واگن‌های باری راه‌آهن - ۱۳۸۷
- ۳۱- ایمنی و ریل (جلد اول و دوم) - ۱۳۸۸
- ۳۲- راهنمایی علامات اختصاری کاربردی در لکوموتیو آلستوم - ۱۳۸۸
- ۳۳- ترمز لکوموتیو و قطار ( چاپ دوم - همراه با اصلاحات ) - ۱۳۸۸
- ۳۴- آموزش رئیس قطار باری - ۱۳۸۸
- ۳۵- آشنایی و طریقه بهره‌برداری از لکوموتیوهای برقی RC4 - ۱۳۸۹
- ۳۶- آشنایی با لکوموتیوهای برقی - ۱۳۸۹
- ۳۷- تجهیزات شبکه تماس خطوط برقی راه‌آهن - ۱۳۸۹
- ۳۸- مجموعه پرسش و پاسخ شغل لکوموتیورانی (ویرایش دوم) - ۱۳۹۰
- ۳۹- سیستم ترمز لکوموتیوهای آلستوم - ۱۳۹۰
- ۴۰- مجموعه پرسش و پاسخ شغل لکوموتیورانی (ویرایش دوم) - ۱۳۹۰
- ۴۱- بررسی خروج از خط - ۱۳۹۰
- ۴۲- ابنیه فنی و حفاظتی - ۱۳۹۰
- ۴۳- توصیه‌های ایمنی برای راهبران درزین - ۱۳۹۰
- ۴۴- آشنایی با واگن‌های باری راه‌آهن (ویرایش دوم) - ۱۳۹۰
- ۴۵- پرسش و پاسخ شغل سوزن‌بانی - ۱۳۹۰
- ۴۶- پرسش و پاسخ شغل مانورچی و سرمانورچی - ۱۳۹۱
- ۴۷- پرسش و پاسخ شغل رئیس قطار باری - ۱۳۹۱
- ۴۸- پرسش و پاسخ شغل مسئول و متصدی ترافیک ، رئیس و معاون ایستگاه - ۱۳۹۱
- ۴۹- پرسش و پاسخ شغل مسئول و متصدی کنترل و کنترلر - ۱۳۹۱
- ۵۰- شناسایی و طریقه بهره‌برداری از تجهیزات الکتریکی لکوموتیوهای GM ، (ویرایش دوم) - ۱۳۹۱
- ۵۱- مبانی ارتباطات راه‌آهن - ۱۳۹۱
- ۵۲- آشنایی با راه‌آهن پرسرعت - ۱۳۹۱



- ۵۳- راهنمای کاربری لکوموتیو زیمنس مدل ER34PC - ۱۳۹۱
- ۵۴- آشنایی با تجهیزات ارتباطات و علایم الکتریکی راه آهن - ۱۳۹۱
- ۵۵- آشنایی با سیستم های علایم الکتریکی - ۱۳۹۱
- ۵۶- مدارات الکتریکی لکوموتیوهای GM - ۱۳۹۲
- ۵۷- ارتباطات در لکوموتیو - ۱۳۹۲
- ۵۸- توصیه های ایمنی برای متصدیان ترافیک - ۱۳۹۲
- ۵۹- ترمز هوا و بهره برداری از آن در راهبری قطار - ۱۳۹۲
- ۶۰- آشنایی با واگن ها و سیستم های ترمز راه آهن - ۱۳۹۲
- ۶۱- ارتباطات و علایم در راه آهن از دیروز تا فردا - ۱۳۹۳
- ۶۲- راهنمای راهبری لکوموتیو زیمنس (ویرایش دوم) - ۱۳۹۳
- ۶۳- آشنایی با راه آهن برقی - ۱۳۹۳
- ۶۴- مدل بندی رگرسیون در راه آهن - ۱۳۹۳
- ۶۵- ارتباطات نوین در راه آهن - ۱۳۹۴
- ۶۶- اصول مهندسی راه آهن برقی - ۱۳۹۴
- ۶۷- اصول سرپرستی در واحدهای عملیاتی - فنی راه آهن - ۱۳۹۴
- ۶۸- تحلیل هزینه های چرخه عمر در مهندسی راه آهن - ۱۳۹۴
- ۶۹- دستورالعمل تعمیر کمپرسور هوایی کامینز - ۱۳۹۴
- ۷۰- مقدمه ای بر کاربرد مخلوط های آسفالتی گرم در خطوط ریلی بالاستی - ۱۳۹۵

• **کتاب ارتقای ایمنی (آموزش سیار)**

- ۷۱- آموزش پیشگیری از سوانح و رعایت اصول ایمنی در سیر و حرکت - ویژه سوزن بان - ۱۳۸۰
- ۷۲- آموزش پیشگیری از سوانح و رعایت اصول ایمنی در سیر و حرکت - ویژه رؤسا و معاونین ایستگاه های غیر تشکیلاتی - ۱۳۸۰
- ۷۳- شناسایی عیوب خط و پارامترهای نگهداری و ایمنی - ویژه رؤسا ، معاونین قطعات و متصدیان تعمیرات خط - ۱۳۸۱

- ۷۴- ماشین آلات مکانیزه در نگهداری ، بهسازی و نوسازی خطوط راه آهن - ویژه رؤسا ، معاونین قطعات و متصدیان تعمیرات خط - ۱۳۸۱
- ۷۵- آموزش نکات ایمنی و حفاظتی در امور ناوگان و سیر و حرکت و دیو - ویژه لکوموتیورانان - ۱۳۸۱
- ۷۶- نکات ایمنی در کنترل و بازرسی فنی قطارها- ۱۳۸۱
- ۷۷- دستورالعمل‌های تشخیص خرابی و نکات ایمنی در اینتر لاکینگ رله‌ای - ۱۳۸۱
- ۷۸- آموزش پیشگیری از سوانح و رعایت اصول ایمنی در سیر و حرکت - ویژه رؤسای قطار - ۱۳۸۲
- ۷۹- آموزش پیشگیری از سوانح و رعایت اصول ایمنی در سیر و حرکت - ویژه سرمانورچی و مانورچی - ۱۳۸۳
- ۸۰- آموزش نکات ایمنی و حفاظتی لکوموتیوهای GM - ویژه لکوموتیورانان - جلد دوم - ۱۳۸۳
- ۸۱- شناسایی و بازرسی فنی واگن‌های باری اکرایی - ۱۳۸۴
- ۸۲- راهنمای بی‌سیم - ۱۳۸۵
- ۸۳- استفاده از جرثقیل‌های ریلی در جمع‌آوری سوانح - ۱۳۸۶
- ۸۴- شناسایی و بازرسی فنی واگن‌های باری با سیستم روسی (چاپ دوم) - ۱۳۸۶

#### • کتاب‌های در مرحله آماده سازی و چاپ

- ۱- جوش درز ریل
- ۲- اطلاعات عمومی راه آهن