بررسی روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود در تحلیل پایداری شیب (مطالعه موردی زمین لغزش زارم‌رود)

محسن کبیری کوچکسرایی

آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان سمنان

چکیده

رویدادهایی که اثر ناپایداری در دامنه شیب، موجب حرکت توده‌ای شیب خاکی به سمت پایین شوند را زمین‌لغزش می‌نامند. عوامل مهم بی‌ثباتی شیب، نیروی جاذبه زمین، نیروهای افقی مانند زلزله و آب هستند که در سطح موجب فرسایش و در قسمت‌های عمیق‌تر موجب ایجاد فشار آب منفذی و کاهش مقاومت خاک می‌گردد. ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیتهای زمین‌ساختی، لرزه‌خیزی زیاد و شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، شرایط ایجاد زمین‌لغزش را دارا است. بنابراین تحلیل پایداری شیب‌ها و ارزیابی ایمنی آنها امری حیاتی به شمار می‌رود. انتخاب روش صحیح برای تحلیل پایداری یکی از چالش‌های مهندسان در برآورد پایداری یک شیب است که به شرایط پروژه و محدودیت‌های ذاتی هر روش بستگی دارد. این مقاله مطالعه موردی تحلیل پایداری یک شیب خاکی در منطقه زارم‌رود استان مازندران را به روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود ارائه می‌دهد. نتایج نشان داده است ضریب اطمینان حاصل از روش اجزاء محدود نسبت به روش تعادل حدی در حدود ۳ درصد کمتر بوده است که قابل توجه نمی‌باشد.

۱– مقدمه

زمین لغزش حرکت یک توده سنگ یا خاک در یک شیب است [۱] که به دلایل متفاوت مانند اعمال نیروی اضافی (وقوع زمین‌لرزه، بارگذاری ناشی از ساخت و ساز)، تغییر هندسه شیب (به دلیل انجام عملیات ساختمانی، راه‌سازی یا ...) یا تغییرات مقاومت خاک ناشی از تغییر مشخصات آن (مانند افزایش درصد رطوبت ناشی از ذوب سریع برف، تغییرات رژیم جریان آب و شرایط زهکشی ناشی از عوامل انسانی و طبیعی) رخ می‌دهند. علاوه بر این شرایط زمین‌لغزش از عواملی مانند توپوگرافی، نوع سنگ و خاک، شکستگیها و شرایط سطوح بستر نیز تاثیر می‌پذیرند [۲ و ۳]. عامل تحریک توده سنگ و خاک، نیروی جاذبه، زلزله، ساخت و ساز، افزایش فشار آب منفذی ناشی از باران، سبک‌سازی پایین‌دست توده و بسیاری عوامل دیگر است. حرکت زمین ممکن است بسیار کند رخ دهد (تنها چند میلی‌متر در سال) یا با سرعت بسیار بروز کند و تأثیرات مصیبت‌باری به جای گذارد.

مسئله دیگری که بسیاری از خطرات را باعث می شود این است که اغلب خاکها بلافاصله پس از اعمال تغییرات (مانند خاکبرداری) تا مدتی پایدار هستند، اما به تدریج از میزان پایداری آنها کاسته می‌شود و این مدت ممکن است چند ساعت یا چند روز یا حتی چند ماه به طول بینجامد.

این پدیده، دلایل گوناگونی دارد که به عنوان نمونه می‌توان به چند مورد زیر اشاره کرد:

الف- ممکن است، تغییرشکل تدریجی، که بر اثر برداشت حایل جانبی (یعنی خاک اطراف) ایجاد می‌شود، پس از مدتی باعث ریزش و رانش شود.

ب- در خاکهای رسی با درصد رطوبت زیاد، ممکن است خشک شدن خاک همراه با ترکهای انقباضی باشد و بدین ترتیب، شکافهایی در خاک ایجاد شود که ضعف پایداری را ایجاد کند، به ویژه، پر شدن بعدی این شکافها با آبهای سطحی یا ناشی از بارندگی می‌تواند خطر ریزش را افزایش دهد.

ج- در خاکهای رسی خشک، ممکن است افزایش بعدی درصد رطوبت باعث سستی خاک و ریزش شود.

زمین‌لغزش در ایران بعنوان یک بلای طبیعی، سالیانه خسارات جانی و مالی فراوانی به کشور وارد می‌سازد.

رانش زمین حتی می‌تواند در بستر دریا و زیر آب رخ دهد و امواج جزر و مدی به وجود آورد که باعث تخریب در مناطق ساحلی شود. تعداد زیادی زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله بعلت پدیده روانگرایی ایجاد شده است، لیکن تعداد قابل ملاحظهٔ دیگری از آنها بعلت گسیختگی شیروانی بوده که در شرایط استاتیکی هم پایداری ضعیفی داشته‌اند.

اگر برای بلایای طبیعی دیگر احتمال وقوع هر از چند گاهی قائل شویم، پتانسیل وقوع پدیده لغزش در کشور را باید هر لحظه در نظر گرفت. بر اساس یک برآورد اولیه، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق زمین‌لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود و این در صورتی است که از بین رفتن منابع طبیعی غیرقابل بازگشت به حساب آورده نشوند [٤].

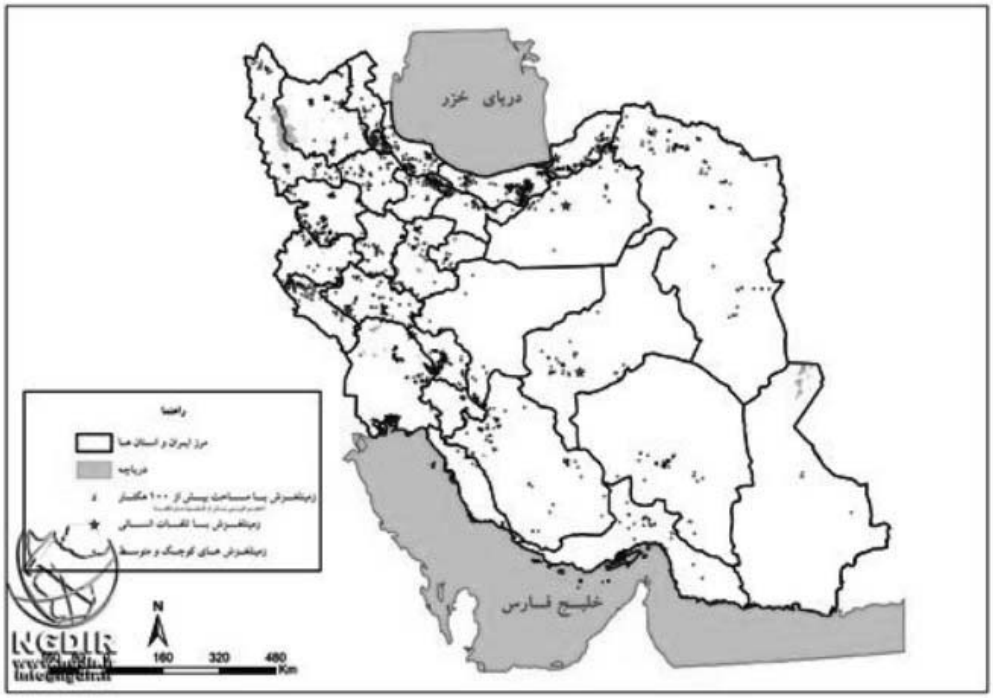
این پدیده همه ساله در اکثر نقاط کشور موجب خسارت‌های اقتصادی به تاسیسات، پروژه‌های عمرانی و طبیعی، منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی گشته یا آنها را مورد تهدید قرار می‌دهد.

نقشه پراکندگی زمین‌لغزش‌های ایران در سال ۲۰۰۰ توسط معاونت آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده و در وبسایت داده‌های علوم زمین [۵]، قابل دسترس می‌باشد. این نقشه که در شکل ۱ به نمایش درآمده است، نشان می‌دهد بیشتر زمین‌لغزش‌های ایران در محل ارتفاعات، به ویژه رشته کوههای البرز و زاگرس اتفاق افتاده و اکثر زمین‌لغزش‌های بزرگ و با تلفات انسانی نیز در محدوده رشته کوه البرز روی داده‌اند.

ایران از نظر عوارض طبیعی به ویژه توپوگرافی بسیار متنوع و متغیر است [٦]. آنچه مسلم است رشته کوه البرز، در کمربند آلپ- هیمالیا واقع شده و می‌توان بیان داشت که تکتونیک البرز، یک تکتونیک جوان و پیوسته فعال بوده و اکنون نیز این فعالیت‌ها ادامه دارد [۷].

از دیدگاه مهندسی، مهندسان طراح، نه تنها پایداری شیب، بلکه نتیجه آسیب ناشی از گسیختگی شیب را هم در نظر می‌گیرند. در مرحله اولیه، اکثریت مطالعات احتمالی به منظور توصیف پایداری شیب با استفاده از احتمال گسیختگی و یا ضریب اطمینان در برابر گسیختگی می‌باشد. تجزیه و تحلیل پایداری شیب به ویژه برای مهندسان ژئوتکنیک اهمیت خاصی دارد، زیرا شکست شیب می‌تواند تاثیرات اجتماعی و اقتصادی ناخوشایند داشته باشد [۸]. روشهای مختلفی برای تحلیل پایداری شیب ارائه شده است که از بین آنها می توان به روش‌های تعادلی حدی (LE)، اجزاء محدود (FE) و تفاضل محدود (FD) اشاره کرد. روش تعادل حدی که از متداول‌ترین روش‌های تحلیل به شمار می‌رود، بر اساس در نظر گرفتن یک یا چند مکانیسم گسیختگی و محاسبه ضریب اطمینان می‌باشد. پیش از پیشرفت کامپیوترها، تحلیل‌های پایداری شیب به صورت گرافیکی یا با استفاده از محاسبات دستی انجام

می‌شدند. امروزه، گزینه‌های نرم‌افزاری بسیار زیادی از قبیل روش‌های تعادل حدی و رویکردهای تحلیل عددی پیش روی مهندسان قرار دارد. برای چندین دهه، روش تعادل حدی با استفاده از معیار موهر-کولمب، رایج ترین روش در حل مشکلات مهندسی ژئوتکنیک بوده است [۹ و ۱۰]



شکل ۱- نقشه پراکندکی زمین لغزش های ایران

در روش‌های تعادل حدی، احتمال لغزش توده سنگ یا خاک بر اثر نیروی‌های وارده مورد بررسی قرار می‌گیرد. مبنای تمام این روش‌ها، مقایسه نیروها یا گشتاورهای مقاوم در خلال حرکت توده نسبت به نیروها و گشتاورهای محرک (به وجود آورنده ناپایداری) است. به این ترتیب بر اساس حالات گسیختگی شناخته شده، آن گسیختگی که منجر به ناپایداری می‌گردد، در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. هرچند روش‌های تعادل حدی به عنوان ساده‌ترین و متداول‌ترین گزینه شناخته می‌شوند، اما در صورت پیچیده بودن مکانیسم شکست شیب (وجود تغییرشکل‌های داخلی، گسیختگی‌های ترد، خزش، روانگرایی لایه‌های ضعیف خاک و غیره)، این روش‌ها قابل استفاده نخواهد بود. در چنین شرایطی، باید از روش‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌سازی عددی بهره گرفته شود.

جامع‌ترین روش استفاده شده در بررسی رفتار و پاسخ شیب‌ها، روش‌های عددی نظیر تفاضل محدود و اجزاء محدود هستند که برای انجام آن، اندازه گیری‌های دقیقی از خواص مصالح و پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز است و زمان و هزینه قابل‌توجهی را طلب می کند [۱۱]. محققان متعددی بیان کرده‌اند که روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود مزایای بیشتری نسبت به روش تعادل حدی دارند. با این حال مطالعات دیگر نشان داده‌اند که سادگی روش تعادل حدی استفاده از این روش را در قیاس با روش‌های عددی مناسب‌تر و موثرتر می‌کنند. همچنین در روش‌های اجزاء محدود اگر لازم باشد روند تغییرات تنش و کرنش

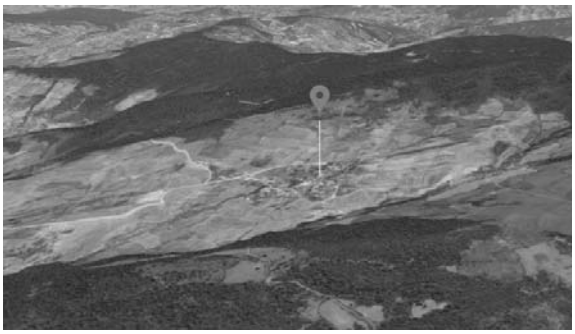
بررسی گردد، استفاده از شبکه‌بندی (المان‌بندی) ریزتر نیاز است که می‌تواند سرعت محاسبات را بخصوص در مدلهای پیچیده‌تر بکاهد [۱۲]. برخی نتایج حکایت از این دارد که در برابر افزایش شیب شیروانی، روش اجزاء محدود ضرایب اطمینان کمتری را در مقایسه با روش تعادل حدی بدست می دهد؛ همچنین با استناد به این نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آب زیرزمینی در شیروانی این اختلاف به شکل معناداری بیشتر خواهد شد [۱۳].

در ادامه با انجام مطالعه موردی به ارزیابی ضرائب اطمینان پایداری حاصل از یک شیب خاکی در منطقه زارم‌رود استان مازندران، توسط نرم‌افزار Geostudio-SLOPE/W که بر اساس تعادل حدی عمل می‌کند در مقایسه با نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS، پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محل مورد مطالعه

حوضه آبخیز زارم‌رود در شمال ایران و در بخش مرکزی استان مازندران و در ۳۰ کیلومتری جنوب شهرستان ساری واقع شده است. این حوضه یکی از مهمترین زیرحوضه‌های حوضه آبخیز تجن می‌باشد (شکل ۳). این حوضه دارای پوشش گیاهی جنگلی انبوه با دامنه‌هایی با شیب متوسط است که قسمت اعظم بارش در آن به صورت باران می‌باشد، ولی بارش برف در ماه‌های زمستانی سال بطور محلی دیده می‌شود. بر اساس روش آمبرژه اقلیم حوضه خیلی مرطوب می‌باشد و متوسط بارندگی آن ۹۸۷/۵ میلی‌متر است. حوضه زارم‌رود از نظر ساختمانی و زمین‌ریخت‌شناسی دارای ناهمواری‌های ژورایی است که شامل چین‌خوردگی می‌باشند و فرآیند فرسایش در آنها زیاد عمل نکرده است، ولی بتدریج تحت عمل فرسایش قرار خواهند گرفت. دامنه‌های منظم که بیشترین رخساره موجود در حوضه است، بر روی واحد مارنی با پوشش جنگلی قرار دارد [۱٤].



شکل ۲- روستای برما زارم‌رود (N 53°43'57.6"E 36°27'46.6")

رودخانه زارم رود به طول حدود ۱۰۰ کیلومتر از ٦۰ کیلومتری جنوب بهشهر شروع می‌شود و در دو کیلومتری روستای آهودشت به رودخانه تجن می‌ریزد.

در حال حاضر مسدود شدن راههای ارتباطی با رانش زمین در مناطق کوهستانی و جنگلی این محدوده به عنوان یک تهدید جدی مطرح است (شکل ۳) و وجود ۸۲ نقطه رانشی در استان مازندران نگرانی روستاییان بالادست را دوچندان کرده است.

بررسی حرکات توده‌ای در این منطقه به دلیل شرایط طبیعی از جمله دارا بودن ساختمان گسلی، شیب زیاد، اقلیم مرطوب، خاک حساس و غیر مقاوم دارای پتانسیل لغزشی است و دخالت انسان در آن باعث ایجاد و تشدید حرکات توده‌ای می شود.

از مقایسه لغزش‌های ناشی از دخالت انسان با لغزش‌های ناشی از شرایط طبیعی معلوم می‌شود که در دامنه‌هایی که کمتر مورد دخالت انسان بوده‌اند، شیب لازم برای ایجاد حرکات توده‌ای عمدتا بالای ۵۰ درصد می‌باشد. این در حالتی است که دامنه‌هایی که بیشتر مورد دخالت و استفاده انسان قرار گرفته‌اند (دامنه های پاکسازی شده از جنگل، جنگل بهره‌برداری شده،

زمـین‌هـای زراعی و مسکونی، جاده‌ها و...) این مقدار شیب به ۲۰ درصد تقلیل می یابد.

شکل ۳- پارک ملی پابند، مازندران

نتـایج حاصـل از آزمـایش خـاک در مناطق لغزشی بیانگر این موضوع است که نوع خاک منطقه متشکل از بافـت لـومی رسـی، لـومی شنی و شنی رسی می‌باشد و دانه‌بندی خاک نشان دهنده ساختمان ریزدانه خاک است کـه ایـن دو نکته تاثیر وجود عامل خاک حساس در وقوع پدیده لغزش در این منطقه را توجیه می‌کند. بیشتر لغزش‌ها در زمین‌ها و دامنه‌هایی اتفاق افتاده است که از نظر پوشش گیاهی دارای پوشش علفی بوده یـا در آن بهره‌برداری به صورت قطع یکسره درخت صورت گرفته است یا این که محور جـاده سـبب قطـع پیوسـتگی دامنه‌ها شده و عبور ماشین آلات سنگین در این منطقه سبب تشـدید حرکـت تـوده‌ای در کنـار محـور جـاده شـده است. با توجه به توریستی بودن منطقه، ساخت مجتمع‌های مسکونی در آن دارای سـرعت چشـمگیری است و ساخت ابنیه روی خاک مستعد لغزش عامل محرک جهت تشدید این پدیده است، به صورتی که می‌توان یکی از علل وقـوع ایـن پدیـده در منطقـه مـورد مطالعـه را اضافه بار ناشی از احداث ساختمان‌های احداثی دانست و به موازات این عمل استفاده از ذخیره آب زیرزمینی منطقه جهت پیشبرد عملیات ساختمانی و عمرانی، عاملی جهت پایین رفتن سـطح آب زیرزمینـی شده و با افزایش وزن موثر توده خاک در مناطق مستعد، به ناپایدار شدن شیب کمک کرده است [۱۵].

۲-۲- روش تعادل حدی

در روش تحلیل پایداری شیروانی به روش تعادل حدی، یک مکانیزم گسیختگی فرض و با اعمال قانون تعادل و معادله رفتاری بر بلوک گسیخته شده، پایداری شیب بررسی می‌شود. روش تعادل حدی بر نسبت نیروهای مقاوم و محرک استوار است. در این روش با تعیین ضریب اطمینان می توان پتانسیل لغزش یا پایداری توده‌های خاک و سنگ را در شیروانی‌ها بیان نمود. با توجه به ویژگی‌های مقاومتی و زمین‌شناسی، در هر منطقه می‌توان لغزش خاصی را شاهد بود. اما مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در مدل‌های گسیختگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقدار چسبندگی مصالح تشکیل‌دهنده شیب است [۱۱]. درحالت کلی دو شکل اصلی گسیختگی در زمین‌لغزش وجود دارد: الف) لغزش انتقالی یا ساده که در آن توده‌ای از مواد به روی یک سطح کم و بیش سخت به سمت پایین دامنه می‌لغزند. ب) لغزش دایره‌ای یا چرخشی که در راستای سطوحی منحنی و قاشقی شکل، که حداکثر تنش برشی به آن اعمال می‌شود صورت می‌گیرد[۱۶]. برای ایجاد لغزش دایره‌ای معمولاً نیاز به شرایط زمین‌شناسی ویژه و وجود ناپیوستگی‌ها و گسستگی‌های مشخص نیست در حالی که شرایط زمین‌شناسی و در راس آن وجود ناپیوستگی‌های دارای جهت‌یابی خاص، از جمله عوامل ایجاد یک لغزش انتقالی است. در این روش تحلیل پس از تعیین نیروهای وارد بر سطح گسیختگی، با استفاده از معادلات تعادل نیروی لازم برای گسیختگی مشخص می‌گردد. در روش‌های تعادل حدی، احتمال لغزش توده سنگ یا خاک بر اثر نیروی جاذبه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین تعادل نیرو یا گشتاور توده‌ای از خاک روی یک سطح

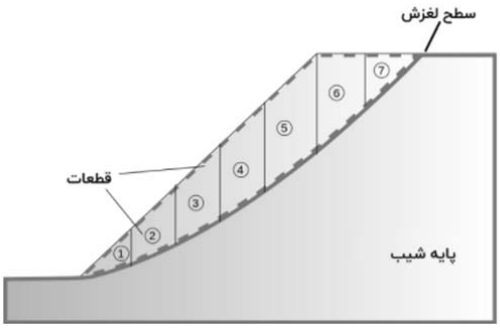
گسیختگی بالقوه مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر دو نوع حرکت سطح لغزش شیب‌های سنگی یا خاکی در روش تعادل حدی (انتقالی یا دورانی) قابل تحلیل است. در حالت انتقالی، خاک روی این سطح گسیختگی صلب در نظر گرفته می شود (یعنی برش تنها روی این سطح می-تواند اتفاق بیفتد) و فرض می‌گردد که مقاومت برشی خاک بر روی این سطح با سرعت یکسانی در تمامی نقاط بسیج می‌شود. در نتیجه ضریب اطمینان بر روی تمام نقاط سطح گسیختگی ثابت خواهد بود. تفاوت اصلی میان روش‌های مختلف تعادل حدی، در فرضیات شکل صفحه لغزش (مدور، اسپیرال لگاریتمی، غیرقوسی و ...) و نیز کاربرد علم استاتیک در ارزیابی تعادل و پایداری (استفاده از مجموع نیروها، مجموع لنگرها و ...) می باشد[۱۳]. در این نوع مدل‌ها پس از اینکه خواص خاک و هندسه شیب ایجاد شد، محاسبات پایداری انجام می‌شود تا اطمینان حاصل شود که نیروهایی که باعث تخریب شیب می‌شوند، به طور قابل توجهی کمتر از نیروهای مقاوم هستند. فرض اساسی این است که گسیختگی از طریق لغزیدن یک توده در امتداد سطح لغزش اتفاق می‌افتد.

در تمام روش‌های تعادل حدی فرض می‌شود که مقدار مقاومت برشی در امتداد سطح شکست احتمالی با استفاده از روابط خطی یا غیرخطی مور-کولمب قابل تعیین است. متداول‌ترین رابطه در این زمینه رابطه ۱ است:

$$\tau = \sigma' \tan \phi' + c' \qquad (۱)$$

که در آن τ مقاومت برشی سطح گسیختگی، σ' تنش قائم موثر، φ' زاویه اصطکاک موثر و c' چسبندگی موثر است.

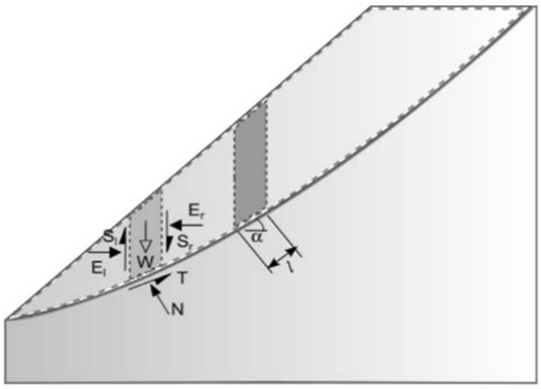
روش قطعات محبوب‌ترین رویکرد در بین روش‌های تعادل حدی است. تحلیل پایداری در این روش شامل گذراندن سطح لغزش احتمالی از میان توده خاک و تقسیم بخش محاط شده شیروانی به تکه‌های عمودی و تعیین ضریب اطمینان است[۱۷]. در روش معمولی قطعات، توده در حال لغزش (توده بالای سطح شکست) به چندین قطعه تقسیم می‌شود (شکل ٤). نیروی اعمال شده به هریک از این قطعات با در نظر گرفتن تعادل مکانیکی (نیرو و گشتاور) آن قطعه به دست می‌آید. بر اساس فرضیات این روش، هر قطعه فقط وزن خود را تحمل می‌کند و هیچ فعل و انفعالی با قطعات دیگر ندارد. با این وجود، قانون سوم نیوتون در این روش رعایت نمی‌شود؛ زیرا به طور کلی، نیروهای برآیند سمت راست و چپ هر قطعه دارای مقدار برابر و همچنین دارای امتداد یکسان نیستند.



شکل ٤- نحوه تقسیم بندی توده شیب در روش قطعات

رویکرد اتخاذ شده در روش قطعات، تنها با در نظر گرفتن وزن خاک به همراه تنش‌های قائم و برشی در امتداد سطح شکست، امکان انجام یک محاسبه ساده برای تعیین تعادل استاتیکی شیب را فراهم می‌کند. در حالت کلی، نیروی وارد بر یک قطعه همانند شکل ۵ نمایش داده می‌شود.

در شکل ۵ فرض می‌شود که بلوک مورد بررسی دارای ضخامت b است. قطعات سمت چپ و راست، نیروهای نرمال E_l و E_r و نیروهای برشی S_l و S_r را به قطعه مورد بررسی اعمال می‌کنند و وزن این قطعه، نیروی W را به وجود می‌آورد و این نیروها با نیروی عمودی N و عکس‌العمل T در حالت تعادل قرار دارند.



شکل ۵- نمایش بردارهای تعادل نیرو در روش قطعات

در روش معمولی قطعات، نیروهای برآیند عمودی و افقی از طریق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\Sigma F_v = 0 = W - N\cos\alpha - T\sin\alpha \qquad (۲)$$

$$\Sigma F_h = 0 = kW - N\sin\alpha - T\cos\alpha \qquad (۳)$$

با این توضیح که k، یک ضریب خطی است که میزان افزایش نیروی افقی نسبت به عمق قطعه را نشان می‌دهد. با حل رابطه نیروی افقی نسبت به N داریم:

$$N = W\cos\alpha - kW\sin\alpha \qquad (٤)$$

در مرحله بعد، فرض می‌شود که هر قطعه می‌تواند حول یک مرکز دوران کند و گشتاور حول این مرکز نیز باید در حالت تعادل قرار داشته باشد. رابطه تعادل گشتاورهای تمام قطعات به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Sigma M = 0 = \Sigma(W_j x_j - T_j r_j - N_j f_j - kW_j e_j) \qquad (۵)$$

که j شماره قطعه است و x_j، r_j، f_j و e_j بازوهای گشتاورند. پس از جایگذاری نیروی برشی در معادله گشتاور، می‌توان آن را برای تعیین نیروهای برشی در سطح لغزش استفاده کرد:

$$\Sigma T_j r_j = \Sigma(W_j x_j - (W_j\cos\alpha_j - kW_j\sin\alpha_j) - kW_j e_j \qquad (٦)$$

و با به کارگیری معیار گسیختگی موهر- کولمب و تبدیل تنش‌ها به گشتاور خواهیم داشت:

$$\Sigma\tau_j l_j r_j = l_j r_j \sigma'\tan\phi' + l_j r_j c' \qquad (۷)$$

بنابراین:

$$\Sigma\tau_j l_j r_j = r_j(N_j - u_j l_j)\tan\phi' + l_j r_j c' \qquad (۸)$$

که u_j، فشار آب منفذی است. ضریب ایمنی در این حالت، نسبت گشتاور ماکزیمم به گشتاور تخمینی خواهد بود.

ضریب ایمنی به عنوان یکی از خروجی‌های اصلی تحلیل‌های تعادل حدی به حساب می‌آید. این ضریب به صورت نسبت مقاومت برشی به تنش برشی تعریف می‌شود و اگر مقدار ضریب ایمنی کمتر از ۱ باشد، شیب ناپایدار خواهد بود.

SLOPE/W یکی از نرم‌افزارهای موجود در مجموعه Geostudio است. این نرم‌افزار از روش‌های تعادل حدی متنوعی برای تحلیل پایداری شیب استفاده می‌نماید و بر مبنای ضریب ایمنی برای تعادل گشتاور و نیرو توسعه یافته است. باید توجه داشت همه روش‌های تعادل حدی از معادله رفتاری موهر- کولمب و فرض قانون جریان همبسته استفاده می نمایند [۱۸].

۲-۳- روش اجزاء محدود

روش‌های مدل‌سازی عددی، امکان حل مسائلی با هندسه پیچیده، ناهمسانگردی مواد، رفتار غیرخطی، تنش‌های برجا و غیره را فراهم می‌کند. این‌گونه مسائل با استفاده از روش‌های معمولی قابل حل نیستند. به علاوه، در تحلیل‌های عددی می‌توان تغییرشکل و گسیختگی مصالح، فشار آب منفذی، خزش، بارگذاری دینامیکی، حساسیت مصالح به تغییر پارامترهای مختلف را نیز مورد ارزیابی قرار داد. روش‌های تحلیل عددی، محدودیت‌هایی نیز دارند. به عنوان مثال دسترسی به اطلاعات مورد نیاز در اکثر مواقع دشوار است. علاوه بر این، تحلیل‌ها باید توسط

افراد متخصص و باتجربه انجام شوند. دستیابی به تجربه و تخصص در انجام تحلیل‌های عددی، نیازمند کسب اطلاعات کافی در زمینه محدودیت‌های موجود در هنگام اعمال شرایط مرزی، مش‌بندی، اختصاص حافظه لازم به نرم‌افزار و زمان تحلیل است. روش‌های عددی مورد استفاده برای تحلیل پایداری شیب به سه گروه اصلی مدل‌سازی پیوسته، ناپیوسته و هیبریدی تقسیم‌بندی می‌شوند.

در روش تنش- تغییرشکل، توزیع تنش و کرنش در قسمت‌های مختلف شیروانی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و ضریب اطمینان مستعدترین سطح گسیختگی ، با مقایسه مقاومت برشی قابل بسیج شدن در سطح مذکور و مجموع نیروهای محرک در آن سطح تعیین می‌شود. یکی از روش‌های نوین حل این معادلات استفاده از روش اجزاء محدود می‌باشد. در روش اجزاء محدود، ماتریس سختی اجزاء، که مرتبط کننده نیرو در هر گره به تغییرمکان آن گره است، بر مبنای به حداقل رساندن کل انرژی پتانسیل تعیین می‌شود [۱۳]. در واقع رویکرد اجزاء محدود یک روش قابل انجام برای تحلیل دامنه‌های دارای خاک غیرهمگن، با هندسه نامنظم و الگوی جریان آب دلخواه است. این روش شامل انتقال کل جرم شیب به تعداد محدودی از المان‌ها به کمک مش‌بندی می‌شود. برخی محدودیت‌ها برای روش اجزاء محدود در تحلیل پایداری شیب به شرح ذیل است [۱۰ و ۱۹]:

الف) بسته به شرایط انتخاب شده نتایج متفاوتی برای ضریب ایمنی به دست می‌آید.

ب) تفسیر نتایج ساده نیست زیرا کاربران باید به شواهد و تجربه خود رجوع کنند تا توانایی مدل را برای دقت پیش بینی رفتار شیب بسنجند.

ج) پیچیدگی روش و دشواری در درک و عدم اطمینان در نتایج، نیاز به کاربر آموزش دیده با تجربه مدل‌سازی عددی برای انجام تحلیل‌های پیچیده را ضروری می‌سازد.

د) تعیین پارامترهای ورودی دشوار است.

قابل ذکراست که در روش‌های عددی به منظور تعیین ضریب اطمینان از روش کاهش مقاومت استفاده می شود و اطلاعاتی درباره مکانیزم شکست، الگوی جابجایی شیروانی و کنتورهای تنش به دست می‌آید. تکنیک کاهش مقاومت برشی که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته است دارای دو مزیت نسبت به روش تعادل حدی می‌باشد. اول این که سطح شکست بحرانی بطور مستقیم و دقیق به دست می‌آید و نیازی به مشخص کردن سطح شکست (دایره‌ای، خطی و غیره) نیست. در ثانی روش‌های عددی بطور مستقیم تعادل چرخشی و انتقالی را ارضا می‌کنند، در صورتی که روش تعادل حدی چنین قابلیتی را ندارد. از طرفی روش کاهش مقاومت قابلیت‌های زیادی در بررسی پایداری شیروانی‌ها در شرایط پیچیده دارد و یکی از قدرتمندترین روش‌ها برای تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی است. روش کاهش مقاومت برشی اولین بار توسط زینکویچ و همکاران (۱۹۷۵) استفاده شد. از این تکنیک در چند نرم‌افزار اجزای محدود شناخته شده در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک همچون زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی آنقدر کاهش می‌یابند تا شیب در آستانه ناپایداری قرار گیرد؛ از این رو ضریب اطمینان به شکل نسبت بین پارامترهای مقاومتی اولیه و نهایی تعریف می‌شود. محاسن اصلی این روش به این شرح میباشند [۲۰]:

الف) سطح گسیختگی بحرانی به صورت خودکار از تنش برشی ناشی از اعمال بارهای وزنی و کاهش مقاومت برشی مشخص می‌شود.

ب) هیچ فرضی برای توزیع نیروی برشی بین لایه‌ای لازم نیست.

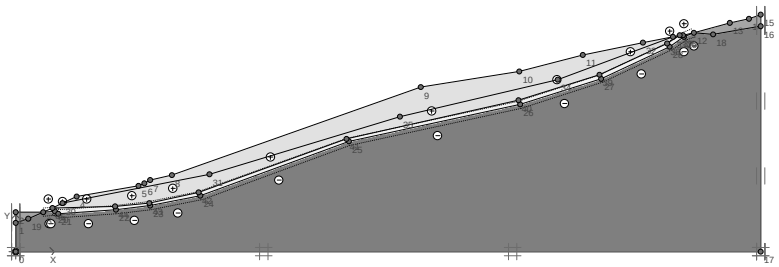
ج) قابل کاربرد در شرایط پیچیده است و می‌تواند اطلاعاتی راجع به تنش‌ها، تغییرمکان‌ها و فشارهای حفره‌ای بدهد که در روش تعادل حدی ممکن نیست.

د) امکان در نظر گرفتن تأثیر روابط رفتاری مختلف و قانون جریان غیروابسته وجود دارد.

مطالعات نشان داده که این روش ضریب اطمینان کمتری نسبت به دیگر روش‌ها به دست می‌دهد و این در جهت اطمینان می‌باشد.

۲-۴- مشخصات فیزیکی و هندسی مدل

مدل، شیبی خاکی در منطقه زارمرود را شبیه‌سازی می‌کند. ابعاد تقریبی شیب خاکی مورد مطالعه با طول حدود ٤٦٠ متر و ارتفاع ١٤٥ متر است. شیب مشتمل بر یک لایه خاکی است که روی سنگ بستر شیبدار قرار گرفته است. آب زیرزمینی نیز در امتداد سنگ بستر به پایین‌دست جریان می‌یابد. هندسه مدل در نرم‌افزار PLAXIS در شکل ٦ ارائه شده است. پارامترهای ژئومکانیکی خاک روی سنگ بستر نیز در جدول ١ خلاصه شده است.



شکل ٦- مشخصات هندسی شیب و لایه بندی مصالح

جدول ١- مشخصات ژئومکانیکی خاک شیب

وزن مخصوص (kN/m^3)	ضریب پوآسون	مدول الاستیسیته (kN/m^2)	چسبندگی (kN/m^2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
٢٠	٠/٣٥	١٠٠٠٠	١٠	٣٠

٣- مدلسازی و تحلیل

تنش‌های اولیه در مدل دوبعدی ساخته شده با نرم‌افزار پلکسیس با استفاده از روش بارگذاری ثقلی انجام گرفته است. در شکل ٧ کانتور تنش های اولیه در مدل نشان داده شده است. ساخت مدل به صورت کرنش مسطح بوده است. برای استفاده از روش اجزاء محدود از یک مش‌بندی مشتمل بر ٨٣٦ المان با اندازه متوسط ٩/٠٣ متر استفاده شده است. تعداد گره ها و نقاط تنش مورد بررسی به ترتیب ٧٨٩٩ و ١٠٠٣٢ بوده است.

٣-١- بررسی ضعیف‌ترین گوه گسیختگی محتمل

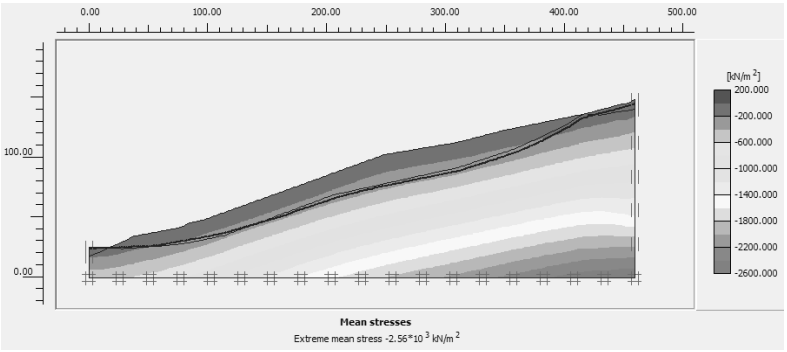
با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی در مدل‌های ساخته شده به روش اجزاء محدود، همواره آن گوه گسیختگی که بیشترین احتمال لغزش را دارد، وارد فاز پلاستیک شده و کمترین مقدار ممکن برای ضریب اطمینان حاصل می‌گردد؛ در حالی که روش تعادل حدی به شدت وابسته به سطوحی است که توسط کاربر به عنوان سطوح گسیختگی احتمالی معرفی می گردد. در این روش عددی، گوه گسیختگی زمانی تشکیل می‌شود که پارامترهای

مقاومتی خاک آنقدر کاهش یافته باشند که تغییرشکل‌های شیروانی شبیه‌سازی شده تحت اثر نیروهای ثقلی یا هر نیروی از پیش تعریف شده دیگر از محدوده الاستیک خارج شده و وارد فاز پلاستیک گردد.

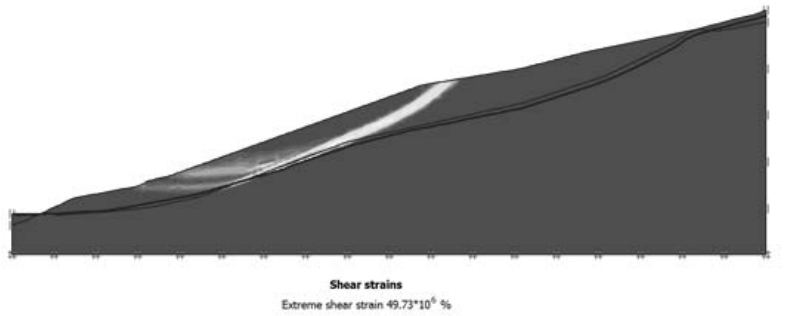
۳-۱-۱- نرم‌افزار PLAXIS

محتمل ترین گوه گسیختگی در حالتی که اثر مرز مشترک خاک شیب و سنگ بستر نادیده گرفته شود در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار ضریب اطمینان حاصل شده به روش کاهش مقاومت برشی در این حالت برابر با ۱/۸۰ می باشد.

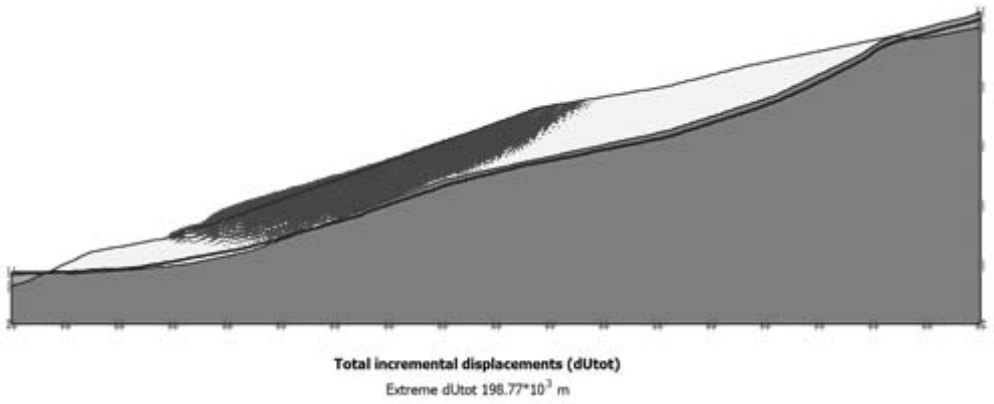
مکانیزم گسیختگی محتمل توسط بردارهای جابجایی پس از تحلیل به روش کاهش مقاومت برشی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷- کانتور تنش‌های اولیه ایجاد شده در مدل پلکسیس با استفاده از روش بارگذاری ثقلی



شکل ۸- نمایش گوه گسیختگی پس از آنالیز به روش کاهش مقاومت برشی



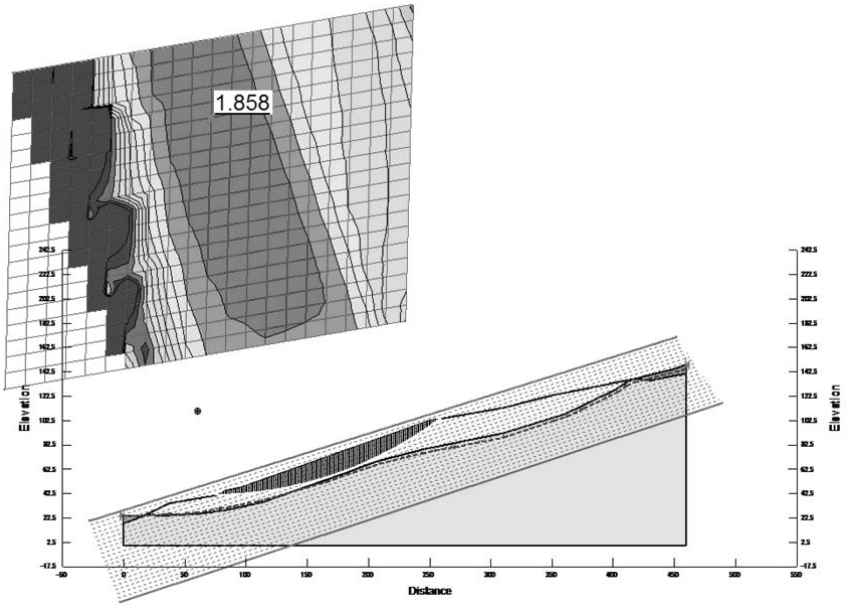
شکل ۹- نمایش گوه گسیختگی محتمل توسط بردار های جابجایی

۳-۱-۲- نرم‌افزار Geostudio

ضریب اطمینان حاصل از این نرم‌افزار و سطح گسیختگی متناظر با آن به شدت به روش اعمال سطوح لغزش احتمالی وابسته است.

در شیروانی مدل‌شده، اگر ابتدا و انتهای شیروانی به عنوان نقاطی که سطح گسیختگی محتمل از آن عبور می‌کند معرفی گردد، ضریب اطمینان حاصل مربوط به لغزش کلی شیروانی از روی سنگ بستر است و لغزش‌های جزئی‌تر همانند آنچه که روش اجزاء محدود ارائه نمود، به نمایش در نخواهند آمد. بنابر این برای تعیین محتمل‌ترین سطح گسیختگی در نرم‌افزار Geostudio از روش Grid & Radius استفاده شده است تا بتواند قوس‌های کوچکتر روی سطح شیب را نیز تحت پوشش قرار دهد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشخص است، ضریب اطمینان حاصل از این روش برابر با ۱/۸۵ بوده و سطح گسیختگی محتمل نشان داده شده نیز انطباق بسیار خوبی با نرم افزار Plaxis دارد.

مقادیر ضریب اطمینان حداقل بدست آمده از دو روش بسیار به هم بسیار نزدیک و مقدار ضریب اطمینان حاصل از خروجی‌های نرم‌افزر PLAXIS حدود ۳٪ کمتر از ضریب اطمینان ارائه شده توسط نرم‌افزار SLOPE/W می‌باشد که در تحقیقات محققین دیگر نیز تایید شده است [۲۱].



شکل ۱۰- محاسبه حداقل ضریب اطمینان پایداری شیب مورد بررسی با روش Grid & Radius

۳-۲- بررسی احتمال لغزش کلی

همانگونه که تشریح گردید، برای تعیین ضریب اطمینان لغزش کلی شیروانی در نرم‌افزار Geostudio کافی است ابتدا و انتهای شیروانی به عنوان نقاطی که سطح گسیختگی محتمل از آن عبور می‌کند، معرفی گردد. در این حالت لغزش شیروانی روی سنگ بستر رخ خواهد داد. اما در نرم‌افزار Plaxis برای حصول این امر باید تغییراتی در خصوصیات مقاومتی خاک سطح شیروانی اعمال نمود.

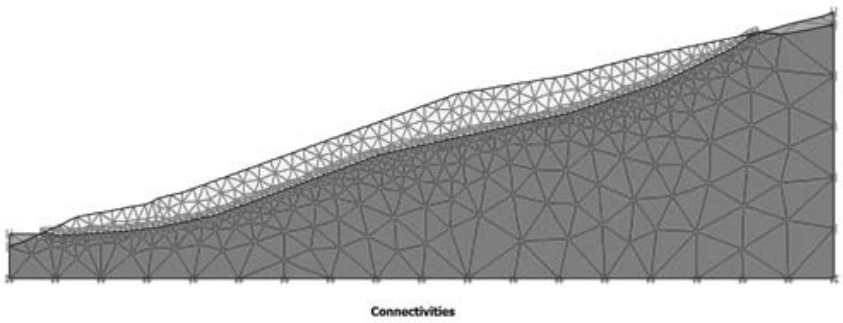
۳-۲-۱- نرم‌افزار PLAXIS

ضرائب اطمینان حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار Plaxis مربوط به ضعیف‌ترین سطح موجود یعنی محتمل‌ترین سطح لغزش می‌باشد. در این مدل برای اینکه

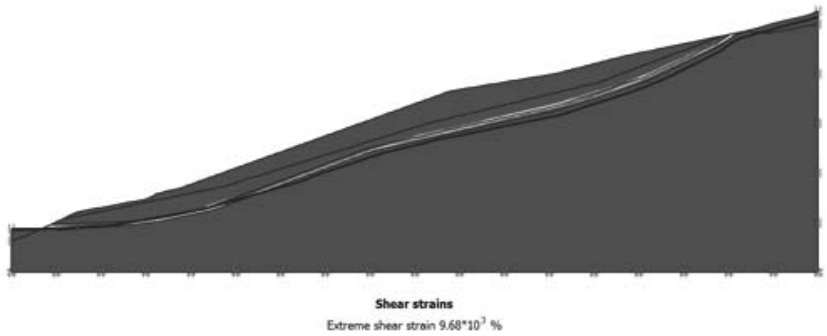
بتوان ضریب اطمینان لغزش کلی را بدست آورد، پارامترهای مقاومتی خاک در نرم‌افزار به حدی افزایش داده شدند تا هیچگونه گسیختگی موضعی در خاک سطح شیب ایجاد نشود و لغزش به اجبار از روی سنگ بستر رخ دهد. در مناطقی که تمرکز تنش بیشتری وجود دارد برای بالا بردن دقت تحلیل باید از المان‌های بیشتر و در نتیجه، مش‌بندی ریزتری استفاده نمود [۲۲]. همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص است، اندازه مش‌ها روی سنگ بستر که به عنوان سطح لغزش در نظر گرفته شده بسیار ریزتر است.

شکل ۱۲ سطح گسیختگی کلی شیروانی را که به روش کاهش مقاومت حاصل شده نشان می‌دهد. ضریب اطمینان حاصل از این روش برابر با ۲/۱۵ می باشد.

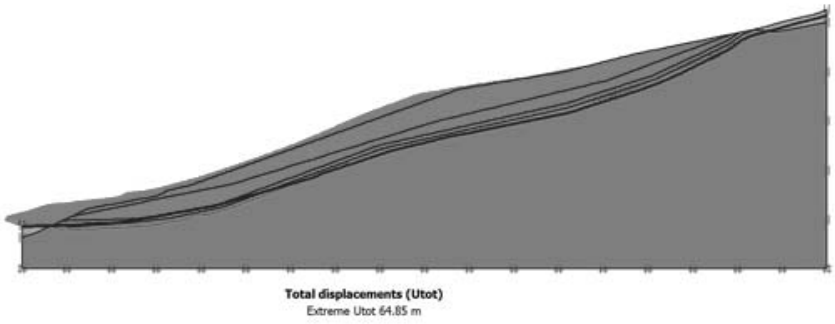
به همین ترتیب در شکل ۱۳ کانتور تغییرمکان حاصل از لغزش روی سنگ بستر به نمایش درآمده است.



شکل ۱۱- نمایش هندسه و شبکه اجزا محدود انتخاب شده به همراه المان وجه مشترک (اینترفیس) برای سطح لغزش



شکل ۱۲- کانتور تنش‌های برشی شیروانی جهت بررسی ضریب اطمینان لغزش خاک بر روی لایه سنگی



شکل ۱۳- کانتور تغییرمکان‌های رخ داده طی لغزش بر روی سنگ بستر

۳-۲-۲- نرم‌افزار Geostudio

ضریب اطمینان حاصل از روش تعادل حدی مورد استفاده در نرم افزار SLOPE/W برابر با ۲/۲۱ است که ضمن قرابت با نتیجه حاصل از روش اجزاء محدود مورد استفاده در نرم افزار Plaxis، باز هم مقداری نسبت به آن فزونی دارد. شکل ١٤ مقدار مقاومت برشی موجود در تمامی نقاط سطح لغزش در زیر لایه خاکی را نسبت به نیروی برشی بسیج شده در این نقاط نشان می‌دهد. همانگونه که پیدا است، مقادیر مقاومتی حدود ۲ برابر تنش برشی است که در این نقاط بسیج شده‌اند و این موضوع در مقدار ضریب ایمنی بدست آمده نیز قابل درک است.

شکل ١٤- مقایسه نیروی برشی بسیج‌شده و مقاومت برشی موجود بر روی سطح لغزش کل

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تلاش شد مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل پایداری یک شیب شیروانی به روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود، صورت پذیرد. با مقایسه سطوح گسیختگی محتمل ارائه شده توسط مدل‌های نرم‌افزاری مشخص شد که اگر هندسه مدل به درستی پیاده شود و فرضیات اولیه در مورد خصوصیات مقاومتی و همچنین شکل گسیختگی منطقی باشد، نتایج تا حد زیادی به هم نزدیک خواهد بود. با بررسی روند ساخت مدل در دو نرم‌افزار و خروجی‌های بدست آمده می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

الف) مدل‌سازی مناسب علاوه بر هندسه به عوامل دیگری نیز بستگی دارد؛ از جمله در نظر گرفتن مقادیر مناسب پارامترهای مقاومتی خاک در نرم‌افزار Plaxis و همچنین تعریف سطوح لغزش محتمل مناسب در نرم‌افزار SLOPE/W.

ب) ضریب اطمینان بدست آمده از روش اجزاء محدود به مقدار متناظر حاصل از روش تعادل حدی بسیار نزدیک است (٪۳ کمتر است).

ج) نواحی گسیختگی موضعی که در مدل Plaxis وارد فاز خمیری شده‌اند دارای انطباق معناداری با سطح محتمل برای لغزش در روش تعادل حدی می‌باشد.

د) علیرغم اینکه اکثر تحقیقات گذشته بیانگر دقت بالاتر روش اجزاء محدود بوده‌اند، اما با در نظر گرفتن سهولت استفاده و امکان بروز خطاهای کمتر در روش تعادل حدی، به نظر می‌رسد استفاده از این روش در حل مسائلی که پیچیدگی هندسی کمتری دارد، منطقی باشد.

۵- مراجع

1- Cruden, D. M. (1991). "A simple definition of a landslide." Bulletin of Engineering Geology and the Environment 43(1): 27-29.

2- Crozier, M., 'Landslides: Causes, Consequences and Environment', Croom Helm Ltd, London or Sydney. 1986, ISBN 0-7099-0709-7.

3- Turner, A. and R. Schuster, 'Landslides: Investigation and Mitigation' Transportation Research Board Special Report 247. National Research Council, Washington, DC, 1996. 673.

٤- کمک پناه، ع، س،م.، حسینی، م.، متظرالقائم، س.، شریفی، خ. (۱۳۷۱)، "زمین لغزه و مروری بر زمین لغزه‌های ایران" ، پژوهشگاه زلزله و مهندسی زلزله ایران، جلد اول .

5- The website of National Geosciences Database of Iran. [cited 2001; An Iranian governmental agency active in the field of geology]. Available from: www.ngdir.ir.

٦- جوکار سرهنگی، ع.، غلامی، و.، گنبد، م،ب.، شریفی، خ. (۱۳۸۷)، "بررسی تاثیر عوامل توپوگرافی در شدت فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز زارم رود)" پژوهش‌های جغرافیایی، ٦۳، ۲، ۱۷۷-۱٦۹ .

۷- لویزه، ف. (۱۳۸٤)، " بررسی منشا و میزان تمرکز آلاینده‌های فلزی سنگین در حوضه آبریز رودخانه های تالار تجن نکارود" بیست و یکمین گردهمائی علوم زمین، وبسایت سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، **https://gsi.ir/fa/gsiArticles/2209**

8- Serra, M.P., 'Geotechnical stability analysis using student versions of FLAC, PLAXIS and SLOPE/W', in Faculty of Health, Engineering & Sciences. 2013, University of Southern Queensland.

9- Duncan, J. and S. Wrigth, 'Soil strength and slope stability', John Willey & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

10- \Hammouri, N.A., Malkawi, A.I.H., and Yamin, M.M., 'Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach'. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008. 67(4): p. 471.

۱۱- عباسی، ع.، حسنلو، م، ر.، حسنلو راد، م.، (۱۳۹۲)، "مقایسه روش‌های تعادل حدی و عددی جهت آنالیز شیب‌های سنگی"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی، ۳۰ مهر و اول آبان ۱۳۹۲.

۱۲- بزاززاده، ح.، دهقانی، م.. (۱۳۹۰)، "بررسی روش-های مختلف مدلسازی شیبهای خاکی در نرم‌افزار **PLAXIS**" ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۷-٦ اردیبهشت ۱۳۹۰.

۱۳- رمضانی اردی، ت.، اسماعیلی فلک، م.، بینا نمین، ا.، فرید، ر.، "بررسی تاثیر درجه شیب در تحلیل پایداری شیروانی‌ها با بهره‌گیری از روش‌های تعادل حدی و روش اجزاء محدود"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی، ۳۰ مهر و اول آبان ۱۳۹۲.

۱٤- روشان، ح.، وهاب زاده، ق.، سلیمانی، ک.، خالدی درویشان، ع.، (۱۳۹۰)، "اهمیت واحدهای سنگ-شناسی در مطالعات فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز زارم رود)"، پانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، ۲٤-۲۳ آذر ۱۳۹۰.

۱۵- فاضلی شهرودی، ا.، حسینی ، س، ا.، (۱۳۹۲)، "مطالعه عوامل وقوع پدیده زمین لغزش جنگلی" هشتمین همایش انجمن زمین شناسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۸-۱۷ شهریور ۱۳۹۲.

16- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types

and processes. Transportation research board special report, (247.(

17- GEOSLOPE-International, SLOPE/W Manual, G.-S. International, Editor. 2007: Canada.

18- Duncan, J. Michael, (1996), "Limit equilibrium and finite element analysis of slopes", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, no. 7, p.577-597.

19- Griffiths, D. and P. Lane, "Slope stability analysis by finite elements". Geotechnique, 1999. 49(3): p. 387-403.

20- Griffiths, D.Y., and Fenton, Gordon A.,(2004), "Probabilistic slope stability analysis by finite elements," ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vo1. 130.

21- Khabbaz, H., B. Fatahi, and C. Nucifora. "Finite element methods against limit equilibrium approaches for slope stability analysis". 11th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics-Ground Engineering in a Changing World. 2012. Geomechanical Society and New Zealand Geotechnical Society.

22- Ghiassian, H., M. Jalili, and D. Kasemi, "Model study of sandy slopes under uniform seepage and reinforced with anchored geosynthetics". Geosynthetics International, 2009. 16(6): p. 452-467