

## مدل سازی عددی زمین لغزش سیلارد در حوضه آبخیز سد لتیان

غلامرضا تدین فر<sup>۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
مدل سازی عددی، پارامترهای مقاومت برشی، زمین لغزش، حوضه سد لتیان، نرم افزار FLAC.	
	<p>مناطق کوهستانی که بخش عمده‌ای از سرزمین ایران را فرا گرفته است همواره مورد تهدید ناپایداری‌های دامنه‌ای و وقوع لغزش ناشی از آن بوده است. این پدیده، هر ساله خسارات زیادی را به راه‌ها و اراضی مورد بهره‌برداری انسان در این مناطق وارد می‌کند. وجود عوامل مستعدکننده ناپایداری دامنه‌ها نظیر شیب، جنس لایه های زمین و کاربری اراضی موجب خسارت فراوان به منابع طبیعی از قبیل هدررفت سریع خاک، تخریب اراضی کشاورزی، جنگل‌ها و جاده‌ها می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق، رسیدن به جایگاه، نقش و کاربرد روش مدل سازی عددی در پیش‌بینی وقوع زمین لغزش‌ها می‌باشد. لذا برای این منظور و در محیط نرم‌افزار FLAC نسبت به مدل سازی و تحلیل عددی به روش آنالیز برگشتی برای زمین لغزش سیلارد در حوضه آبخیز سد لتیان و با در نظر گرفتن تمام معیارهای ژئوتکنیکی (آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی و عوامل تاثیرگذار بر وقوع آن)، اقدام گردید و نتایج حاصله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. محاسبات مربوط به ضریب اطمینان برای پایداری شیب و نیز اندازه‌گیری جابجایی نقاط مفروض بر روی دامنه که بر روی مدل سازی دقیق هندسی و اعمال خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه های خاک، صورت گرفت؛ نشان دادند که کاهش پارامترهای مقاومتی خاک منطقه به دلایلی همچون هوازدگی لایه های خاک و بارندگی از عوامل اصلی وقوع این لغزش بوده‌اند که نقش آب در آن به دو صورت کاهنده‌ی مقاومت (کاهش شدید چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و افزایش‌دهنده‌ی نیروی برشی از طریق فشار آب منفذی بواسطه‌ی اشباع شدن خاک بسیار برجسته است.</p>

### ۱- مقدمه

در زمین‌های شیب‌دار به شمار می‌رود که هر ساله خسارت های جانی و مالی فراوانی را به بار می‌آورد. دامنه های شیب دار واقع در زمین های سست که به صورت طبیعی یا مصنوعی ایجاد شده اند، مستعد پدیده زمین لغزش هستند [۱].

کروند حرکت‌های توده‌ای را ناشی از به حرکت درآمدن توده ای از سنگ، خاک و واریزه به پایین دامنه دانسته است و

بشر از دیرباز در پی بروز حوادث، به دنبال دلیل و یا دلایل وقوع حادثه بوده تا با کسب تجربه از آن بتواند خود و مایملک خود را در برابر حوادث مشابه بیمه نماید. در این خصوص حتی گام را فراتر گذاشته و به دنبال پیش‌بینی وقوع حوادث بوده است تا بتواند جلو حادثه را بگیرد و یا حداقل از آن دوری کند.

در این میان زمین لغزش یکی از مخرب‌ترین حوادث طبیعی

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: r.tadayon@hsu.ac.ir

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

کامپیوتر در عصر جدید بطور فزاینده‌ای با احاطه بر تمام مباحث جای روش‌های سخت و زمان‌بر را گرفته است. امروزه روش‌های عددی که قادر به تعیین جزئیات تنش و تغییر مکان در نقاط مختلف یک مدل می‌باشند؛ فراگیرترین روش‌های محاسباتی برای اصول مختلف مهندسی می‌باشند و مدل‌سازی توسط این روش‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که کاهش زمان محاسبه و بالا رفتن دقت ضریب اطمینان در حدود  $\pm 6\%$  درصد از ویژگی‌های اصلی آن به شمار می‌رود [۱۱].

جدای از مدل‌سازی‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی، با آمدن رایانه و نرم‌افزارها، فضای جدیدی تحت عنوان مدل‌سازی عددی پیش روی انسان گشوده شد. و نرم‌افزارهای زیادی معرفی و بکار گرفته شده اند. از بین تمام آنها، نرم‌افزار قدرتمند<sup>۱</sup> FLAC ساخته شده توسط شرکت ITASCA بعنوان یک روش عددی استاندارد و جایگزینی قدرتمند برای روش اجزاء محدود در مسائل مربوط به تغییر شکل‌های بزرگ و یا حتی با قابلیت‌های بسیار زیاد در گسیختگی، توانسته راه را برای مدل‌سازی عددی هموار نماید. این نرم‌افزار یک برنامه تفاضل محدود می‌باشد که می‌تواند رفتار سازه‌های خاکی، سنگی یا دیگر مصالح را که ممکن است پس از عبور از حدود الاستیک دچار جریان پلاستیکی شوند، بصورت دو بعدی یا سه بعدی شبیه سازی نماید. در این نرم‌افزار، پروژه طوری طراحی می‌گردد که منطبق با واقعیات طبیعی باشد و بوسیله شبکه‌ای از المان‌ها یا زون‌ها نمایش داده شوند. در این شبکه، هر المان مطابق با قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده با شرایط مرزی رفتار می‌کند. اگر تنش‌ها به اندازه کافی بزرگ باشند که سبب تسلیم شدن مواد و جریان آنها شوند، شبکه طراحی شده می‌تواند مطابق واقعیت (در حالت کرنش بزرگ) تغییر شکل یابد و همراه با مصالح مذکور حرکت نماید و لذا رفتارهای غیرخطی مصالح یا سیستم‌های ناپایدار حتی در مواردی چون شکست و تسلیم در فروپاشی نهایی را می‌توان بررسی و روند تغییرات را مشاهده و محاسبه نمود [۱۰].

اغلب برنامه‌های اجزای محدود، ماتریس المان‌ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل می‌سازند. به عبارتی حوزه تعریف تابع از تعداد متناهی المان و تعداد ثابتی گره تشکیل

ترزاقی زمین‌لغزش را برای تمامی حرکت‌های توده‌ای در سطوح شیب‌دار شامل واژگونی، افتان و سیلان‌های واریزه‌ای به حساب می‌آورد [۲].

زمین‌لغزش‌ها از پدیده‌های رایج در مناطق کوهستانی و تپه ماهوری در سراسر جهان می‌باشند و در بسیاری از کشورها باعث آسیب‌های مالی و جانی زیادی می‌شوند و به همین دلیل پژوهشگران توجه خاصی به این بلای طبیعی دارند [۳].

شاید موضوع زمین‌لغزش در مباحث راه‌سازی به عنوان یک موضوع فرعی دیده شود ولی عملاً شناسایی آن و جلوگیری از وقوع این پدیده با ایجاد دیوارهای حائل یا روش‌های دیگر می‌تواند در حفظ و نگهداری جاده‌ها بسیار با اهمیت و حیاتی باشد. این پدیده‌ها اغلب باعث اختلال عمده در ساختارها و زیرساخت‌ها مانند جاده‌ها، راه‌آهن و خطوط برق می‌شوند و ممکن است تغییرات چشم‌گیری در مورفولوژی منطقه ایجاد کنند. بنابراین مانع خدمات رسانی سریع و اضطراری می‌شوند [۴]. در دهه‌های آتی، مناطق حساس به زمین‌لغزش به خاطر شهرنشینی، فعالیت‌های توسعه‌ای، جنگل‌زدایی و الگوهای تغییرات آب و هوایی در حال افزایش است [۵]. در کشور ایران بخصوص در اغلب حوضه‌های آبخیز، علاوه بر عوامل طبیعی مانند اقلیم، سنگ‌شناسی و توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر در کاربری اراضی، جاده‌سازی و عملیات کشاورزی غیراصولی نیز باعث وقوع زمین‌لغزش‌های متعددی شده است. بطوریکه سالیانه، خسارت‌های هنگفتی را بوجود می‌آورد [۶].

بررسی پایداری شیب‌های خاکی از مسائل مهم و روزمره مهندسی ژئوتکنیک است. تحلیل پایداری شیب‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های تعادل حدی، تحلیل حدی، اجزای محدود و تفاضل محدود انجام داد [۷]. در این میان روش تفاضل محدود دارای محاسن زیادی نسبت به روش‌های دیگر است [۱۰].

برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها، هنگامی که داده‌ها قابل مدیریت باشند؛ تجزیه و تحلیل آنها معمولاً بسیار آسان است؛ مخصوصاً اگر روش دستی و ترسیمی نظیر روش فلنیوس (1927) یا بیشاپ (1955) بکار گرفته شود. اما باید توجه کرد که این روش‌ها نمی‌توانند بطور جامع همه آیت‌ها را دربرگیرند و لذا روش‌های مدل‌سازی عددی به کمک

<sup>1</sup> Fast Lagrangian Analysis of Continua

جغرافیایی آن  $35^{\circ}47'42''$  می باشد (شکل ۱).



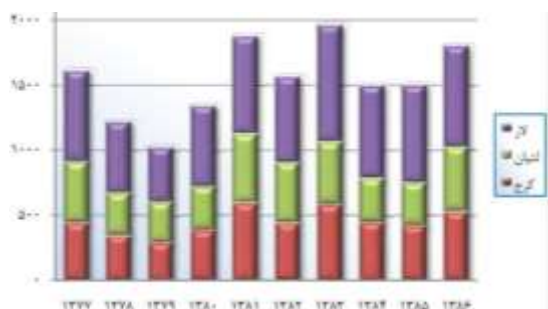
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه (زمین لغزش سیلارد با رنگ قرمز مشخص شده است) [۱۲].

## ۲-۱ شرایط آب و هوایی منطقه

شرایط آب و هوایی و اقلیمی یکی از ده‌ها عاملی به شمار می رود که بر وقوع زمین لغزش‌ها مؤثرند [۱۳]. لذا برای هر پژوهش در خصوص ناپایداری شیب‌ها باید به این موضوع نیز پرداخته شود. براساس تقسیمات آب و هوایی کوپن-گایگر نوع آب و هوا در منطقه مورد پژوهش، BSK معرفی شده است که در آن BS به عنوان اقلیم نیمه خشک شناخته می شود و حرف K نشانگر اقلیم‌هایی است که در عرض‌های میانی جغرافیایی قرار دارند و دمای میانگین سالانه آن‌ها زیر ۱۸ درجه است. ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا ۱۷۰۰ متر و میانگین دمای سالانه آن در شب و روز به ترتیب ۵ و ۱۳ درجه سانتیگراد برآورد شده است.

با نفوذ آب باران به درون خاک شیب‌دار، به دلیل پیشروی جبهه مرطوب، فشار منفذی در ناحیه غیراشباع افزایش می یابد و مکش ماتریکس خاک کاهش می یابد. این امر مقاومت برشی خاک را کاهش می دهد که در نهایت منجر به خرابی های شیب غیر اشباع خاک می شود [۱۴-۱۵].

میزان بارندگی در حوضه آبریز سدهای تهران طی سال های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۶ مطابق شکل زیر ارائه گردیده است.



شکل ۲- میزان بارندگی در حوضه آبریز سدهای تهران طی سال های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۶ [۱۶].

شده است. تغییر مکان‌های داخل هر المان با استفاده از تابع شکل که جابجایی‌های گرهی را به هم مرتبط می کند، تخمین زده می شود. معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی اولیه با مجموعه معادلات جبری جایگزین می شوند تا نهایتاً سازگاری و تعامل بین اجزاء بدست آید [۱۲].

با توجه به اینکه سد لتیان به عنوان یکی از مهمترین منابع تامین کننده ی آب کلان شهر تهران و همچنین دشت ورامین در حوضه جاجرود قرار گرفته است، وقوع حرکات دامنه‌ای، مسیرهای ارتباطی در این منطقه را با خطر جدی مواجه نموده است. منطقه جاجرود واقع در شمال شرق تهران به ویژگی‌های توپوگرافی و زمین شناسی، یکی از مناطق مستعد کشور نسبت به وقوع زمین لغزش و سایر پدیده‌های مرتبط با لغزش دامنه‌ها می باشد [۱۳].

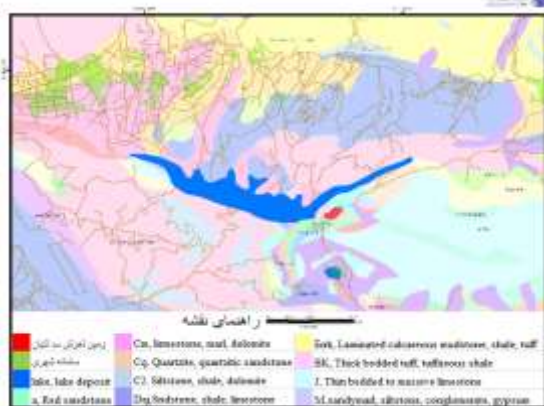
بررسی خطر زمین لغزش، پیش از وقوع آن با هدف تثبیت و پایدارسازی، به شناسایی عوامل تاثیرگذار آن، بستگی دارد و می تواند تا حدود زیادی جلو خسارات پیش‌بینی نشده را بگیرد. لذا در این پژوهش، از روش مدل سازی عددی به کمک نرم افزار FLAC، برای شناساندن عوامل موثر بر زمین لغزش سیلارد، استفاده شده است.

## ۲- معرفی منطقه

حوضه آبخیز سد لتیان در شمال شرق تهران و در محدوده طول جغرافیایی  $51^{\circ}21'54''$  تا  $51^{\circ}50'58''$  و عرض جغرافیایی  $35^{\circ}46'14''$  تا  $35^{\circ}46'33''$  قرار دارد. در این منطقه به دلیل وجود سازندهای حساس به زمین لغزش و همچنین گسل‌های مهمی که موجب خردشدگی شدید سنگ بستر شده‌اند؛ زمین لغزش‌های زیادی را بوجود آورده ی و خساراتی را نیز به بار آورده‌اند. اهمیت این منطقه، به خاطر وجود سد لتیان است که یکی از سدهای مهم تامین آب شرب ساکنین کلان شهر تهران و اراضی زراعی منطقه‌ی لواسانات می باشد. این زمین لغزش‌ها نه تنها خود سد را تهدید می کنند؛ بلکه با ایجاد رسوب در دریاچه‌ی سد موجب کاهش حجم آب آن می گردند. زمین لغزش سیلارد به طول و عرض تقریبی به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ متر یکی از این زمین لغزش‌ها است که در دامنه کوه جاجرود و حد فاصل مسیر ارتباطی جاجرود به لواسان بزرگ و در فاصله ۲۵۰ متری شمال شرق محور سد لتیان و مشرف بر ساحل چپ دریاچه سد قرار دارد.

طول جغرافیایی این زمین لغزش  $51^{\circ}41'12''$  و عرض

های رسی با چسبندگی بالا شده که این کانی‌ها به هنگام اشباع شدن از پارامترهای مقاومت برشی پایینی برخوردار خواهند بود و در نتیجه مستعد لغزش می‌باشند (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه زمین شناسی محدوده مورد بررسی [۱۲].

در این منطقه لایه‌های هوازده تشکیلات توفی که به کانی‌های رسی تبدیل گشته‌اند در ترانشه‌های حاشیه جاده به وضوح دیده می‌شود و احتمال اینکه سطح لغزش در چنین مصالحی گسترش یافته باشد، وجود دارد. همچنین به دلیل تکتونیزه بودن محل مورد مطالعه و گسترش درزه‌های تکتونیکی در مصالح سنگی، احتمال گسترش سطح لغزش در مصالح سنگی نیز منتفی نمی‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- توالی رسوبات لغزشی در دیواره ترانشه محل زمین- لغزش رسوبات دانه درشت کوهرفتی در بالا و رسوبات هوازده دانه ریز در زیر [۱۲].

### ۲-۳ شرایط توپوگرافی منطقه

تحقیقات ژئومورفولوژی ناشی از مطالعات و مشاهدات صحرائی می‌تواند پیچیدگی حرکت شیب را توصیف نموده و در نهایت به جمع‌بندی اجتناب ناپذیری از مدل‌های انتزاعی منجر شود، چیزی که متأسفانه در اغلب تحقیقات نادیده گرفته می‌شود. تجزیه و تحلیل‌های خاص ژئومورفولوژیکی

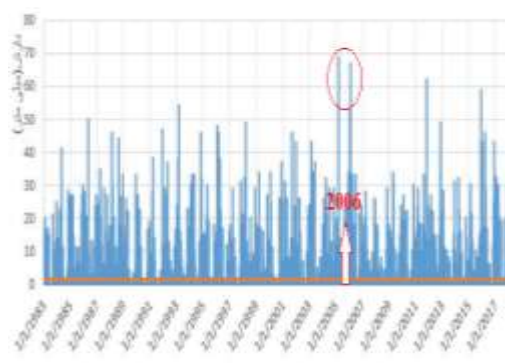
هر چند میانگین بارش طی ده سال (بین سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۶) ۴۳۰ میلی‌متر برآورد شده است (جدول ۱).

جدول ۱- میزان بارش متنظر با حوضه سد لتیان، محاسبه شده

از شکل ۲

سال	۱۳۷۷	۱۳۷۸	۱۳۷۹	۱۳۸۰	۱۳۸۱	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶
بارش (mm)	۵۰۰	۳۵۰	۳۲۵	۳۵۰	۵۷۵	۵۰۰	۵۲۵	۳۵۰	۳۰۰	۵۵۰

اما آنچه که اهمیت بیشتری دارد میزان بارش روزانه است که از عوامل مهم و تأثیرگذار بر وقوع زمین لغزش می‌باشد. بر اساس اطلاعات موجود (۱۹۸۳-۲۰۱۸) در ایستگاه هواشناسی لتیان میزان بارش به صورت زیر ارائه گردیده است [۱۷].



شکل ۳- میزان بارش روزانه بر اساس اطلاعات موجود در ایستگاه هواشناسی لتیان (۱۹۸۳-۲۰۱۸) [۱۶].

همانطور که از شکل برداشت می‌شود بیشترین میزان بارندگی در سال ۲۰۰۶ میلادی (۱۳۸۴ ه.ش) و احتمالاً در همان ایام قبل از وقوع لغزش بوده است. نتایج چائو لیانگ و همکارانش [۱۸] نشان می‌دهد که خاک در عمق تقریباً ۲ متری زیر سطح پس از ۲۴ ساعت بارندگی به اشباع کامل می‌رسد و ناحیه شکست پلاستیک عمدتاً در سطح و نوک شیب توزیع می‌شود. همچنین بر اساس مطالعات کراوتر [۱۹] وابستگی زیادی بین شتاب و شدت بارش وجود دارد، بطوریکه بارش می‌تواند تأثیر خود را تا یک هفته و حداکثر یک ماه در وقوع لغزش شیب نشان دهد.

### ۲-۲ شرایط زمین شناسی منطقه

جنس لایه‌های زمین نیز از جمله عوامل دیگر مهم وقوع لغزش است [۱۳]. لذا با بررسی رسوبات محدوده زمین لغزش مصالح که سازندهای کرج و لالون است نشان می‌دهد قطعات به شدت هوازده شامل توف، سیلتستون، توف ماسه‌ای و مصالح دیگری می‌باشد. هوازده‌گی توف‌ها منجر به تولید کانی

و در حدود ۲۰۰ متر از جاده ارتباطی را تخریب نموده است (شکل ۸).



شکل ۸- نمای کلی از زمین لغزش [۱۲].

این بخش به صورت یک توده مجزا نیست، بلکه زمین لغزشی مرکب از چهار توده لغزشی کوچک می‌باشد. مکانیسم آن با توجه به شواهد سطحی از نوع چرخشی می‌باشد که موجب بالآمدگی و کج‌شدگی جاده به میزان تقریبی ۱ متر شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰).



شکل ۹- بالآمدگی و کج‌شدگی جاده در محدوده لغزشی [۱۲].



شکل ۱۰- بالآمدگی جاده در محدوده لغزشی [۱۲].

در این پهنه لغزشی، لغزش‌های مجزای دیگری نیز دیده می‌شود. از آن جمله می‌توان به حاشیه راست این پهنه لغزشی اشاره کرد که لغزش چرخشی دیگری با ارتفاع پرتگاه حدود ۲/۵ متر مشاهده می‌شود. مطابق شکل زیر در حاشیه سمت چپ پهنه لغزشی نیز ناپایداری دامنه‌ای دیگری وجود دارد که باعث تخریب دو باب ساختمان مسکونی شده است.

امکان بازسازی انواع فرآیندهای درگیر (نوع، مکانیسم، جهت و غیره) و احتمالاً توالی حرکت‌شناسی در حین حرکت شیب را نشان می‌دهد [۲۰]. بطور کلی یک برنامه تحقیق و مطالعه دقیق برای حرکت شیب به ترکیبی از تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی، ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و هیدرولوژیکی نیاز دارد [۲۱].

شکل‌های زیر نمایی کلی از وضعیت توپوگرافی محدوده زمین لغزش را نشان می‌دهند.



شکل ۶- پرتگاه زمین لغزش در حاشیه سمت راست پهنه لغزشی سیلارد [۱۲].



شکل ۷- نمونه‌هایی از پرتگاه‌ها و ترک‌های برشی مکرر در قسمت‌های مختلف زمین لغزش [۱۲].

### ۳- روش انجام کار

#### ۳-۱ مطالعات و مشاهدات صحرائی

با توجه به اینکه در روش مدل‌سازی عددی، نیاز بسیار زیادی به تطابق واقعیت و مدل احساس می‌شود؛ لذا باید وضعیت منطقه بطور دقیق بررسی شده و عملاً یک نوع راستی آزمایی در جهت ساخت مدل بوجود آید. از این رو مطالعات کمیته زمین لغزش و مخاطرات زمین وزارت کشاورزی به دقت مورد بررسی قرار گرفت که بخش‌هایی از آن در زیر آورده شده است:

زمین لغزش مورد مطالعه از دو بخش تقریباً مجزا از هم در بالا و پایین مسیر ارتباطی جاجرود-لواسان تشکیل شده است. بخش بالای جاده در ابتدا و در اسفندماه ۱۳۸۴ فعال

۹۴ نمونه دست خورده از مصالح روباره اخذ گردیده و تحت انجام آزمایشات آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. با آزمایشات دانه بندی مشخص شد حدود ۲۹ درصد نمونه‌ها در رده GC، ۴۳ درصد در رده SC، ۱۶ درصد در رده CL و بقیه در رده‌های متفرقه قرار گرفته‌اند. برای تخمین مقاومت برشی مصالح روباره، ۷ مورد آزمایش سه محوری ۴ اینچ بر روی نمونه‌هایی که مطابق با شرایط طبیعی مصالح روباره بازسازی شده بودند، انجام گردید. جدول ۳ نتایج حاصل از این آزمایشات را نشان می‌دهد که در آن زاویه اصطکاک داخلی بین ۲۰ تا ۳۹ درجه و چسبندگی بین ۰/۱ تا ۲/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر بوده است [۲۲].

جدول ۳- نتایج آزمایش سه محوری

نام خاک	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی gr/cm <sup>2</sup>
مصالح روباره	۲۰-۳۹	۰/۱-۲/۴

#### ۴- مدل‌سازی عددی

##### ۴-۱ تحلیل پایداری به روش عددی

روش‌های تعادل حدی برای تحلیل، محدود به مسائل ساده ای هستند که در آنها هدف بکارگیری هندسه ساده شیب و شرایط مقدماتی نیرو، جهت درک کلی از نحوه مکانیسم گسیختگی است. اما بررسی پایداری سطوح شیروانی‌ها شامل پیچیدگی‌هایی در هندسه، ناهمگنی مواد، رفتار غیرخطی، تنش‌های برجا و مواردی دیگر (فشار منفذی و بارهای زلزله و ...) می‌باشد. به طوری که با روش‌های متداول تعادل حدی قابل حل نمی‌باشند. با پیشرفت علوم در حوزه های نرم‌افزاری، قدرت محاسبه و دسترسی نسبی به کدهای عددی که برای شبیه‌سازی پتانسیل لغزش سطوح شیب‌دار موجود است، موجب شده که استفاده از این گونه تحلیل‌ها به عنوان یک روش اصلی در بررسی سطوح شیب‌دار خاکی و سنگی مدنظر قرار گیرد. اساس کار روش عددی تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط می‌باشد. با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط و تعیین میزان تغییر شکل آنها، با استفاده از تکنیک کاهش مقاومت برشی می‌باشد؛ موقعیت، تعداد و ارتباط نقاط فوق‌الذکر، توسط المان بندی محیط مشخص می‌شود. در مقایسه با روش‌های تعادل حدی، تکنیک کاهش مقاومت برشی از چند مزیت چشم‌گیر برخوردار است. اول اینکه در این تکنیک احتیاج به پیش‌آگاهی از مد شکست و مهمتر از آن مکانیسم



شکل ۱۱- تخریب ساختمان‌های مسکونی بر اثر لغزش در مرکز پهنه لغزشی [۱۲].

##### ۳-۲ آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی

در اکتشافات صحرایی انجام شده ۱۰ چاهک با مترآژ کل ۶۳۰ متر در محدوده لغزش مورد مطالعه حفر گردیده که از این مقدار، ۱۸۰ متر آن در مصالح روباره بوده است. هرچند در برنامه‌ریزی‌های انجام نمونه‌گیری دست‌خورده و دست نخورده از مصالح روباره در دستور کار قرار گرفته بود؛ اما بدلیل ماهیت خاص مصالح روباره و وجود دانه‌های شن در بافت خاک، عملاً نمونه‌گیری دست‌خورده از مصالح مذکور امکان پذیر نگردید. در مطالعات پیشین انجام شده نیز ۶ گمانه و ۳ گالری در محدوده مورد مطالعه حفر گردیده بود که از نتایج آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی آنها نیز استفاده شده است [۱۲].

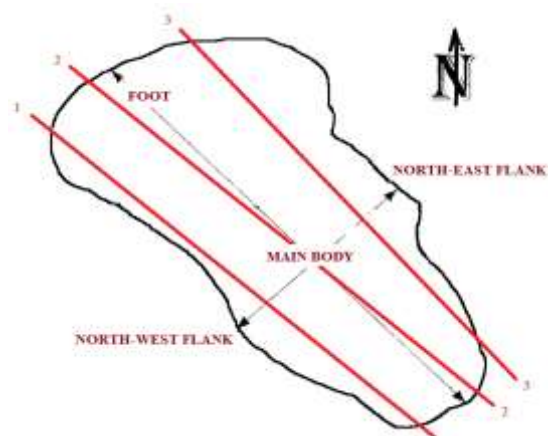
با توجه به نتایج آزمایشات نفوذ استاندارد (SPT) انجام شده در مصالح روباره، این نتیجه حاصل گردیده است که متوسط عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده برای اغلب بافت خاک‌های رویی منطقه حدود ۲۲ می‌باشد. این عدد نمایانگر تراکم متوسط تا کم مصالح روباره بوده و زاویه اصطکاک داخلی آن بین ۲۵ تا ۳۰ درجه تخمین زده شده است. همچنین از آزمایشات دانسیته در محل، این نتیجه حاصل گردیده است که دانسیته خشک مصالح روباره بین ۱/۶۳ تا ۱/۹۳ متغیر بوده (بطور متوسط ۱/۷۶ گرم بر سانتیمتر مکعب) و متوسط درصد رطوبت نمونه‌های اخذ شده از چاله‌های دانسیته نیز مطابق جدول ۲ برابر ۸/۵۹ بوده است [۲۲].

جدول ۲- نتایج SPT و دانسیته

نام خاک	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	عدد نفوذ استاندارد	درصد رطوبت	زاویه اصطکاک داخلی
مصالح روباره	۱/۶۳-۱/۹۳	۲۲	۸/۵۹	۲۵-۳۰

حین حفاری گمانه‌های اکتشافی مطالعات ژئوتکنیک، حدود

نظر گسیختگی رخ داده است، لذا می‌توان بر روی آن تحلیل برگشتی را انجام داد. لذا فرض گردید ترانسه مذکور دارای ضریب ایمنی نزدیک به ۱ است. در ترانسه مذکور تمامی زوج پارامترهایی که می‌توانند ضریب ایمنی بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ را تولید کنند؛ مورد بررسی قرار گرفتند و از میان این پارامترها زوج پارامتری که باعث تولید سطح گسیختگی مذکور شده‌اند؛ انتخاب گردید. سطح گسیختگی رخ داده نشانگر این است که عموماً مصالح ترانسه دارای زاویه اصطکاک داخلی پایین و چسبندگی بالایی هستند. پارامترهای تحلیل ترانسه بر مبنای نتایج در لایه سنگ هوازده بر مبنای نتایج تحلیل برگشتی انتخاب شده است. به منظور مدل‌کردن لغزش با استفاده از نرم افزار FLAC و تخمین پارامترهای مقاومتی خاک، مقاطع ۱-۱، ۲-۲ و ۳-۳ انتخاب گردید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- موقعیت مقاطع انتخاب شده برای مدل‌سازی براساس مطالعات شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

سطح لغزش شناسایی شده بوسیله مطالعات زمین‌شناسی طرح، عمدتاً در ناحیه توف هوازده قرار داشته و لغزش انجام شده باعث گسترش ترک‌ها تا سطح روباره شده است. بنابراین با انتخاب پارامترهای نواحی سنگ سالم و روباره، تخمین پارامترهای مقاومتی لایه توف هوازده (با توجه به نقش قابل توجه خصوصیات این لایه در وقوع زمین‌لغزش) مدنظر قرار گرفت. سپس اقدام به انجام تحلیل‌های پایداری با دسته پارامترهای مختلف جهت محاسبه ضریب اطمینان شیب گردید. برای وزن واحد حجم ناحیه توف هوازده از متوسط نتایج آزمایشات چگالی و تعیین درصد رطوبت انجام شده بر روی نمونه‌های مربوطه استفاده شده است. برای مدل سازی درست و دقیق این محدوده و نیز صحت‌سنجی آن، از اطلاعات و داده‌های ژئوتکنیکی نمونه‌های بدست آمده از

شکست احتمالی نیست و مزیت دیگر آن، عدم نیاز به فرضیات اولیه در زمینه نیروهای میان برشی است [۲۳-۲۴]. امروزه تکنیک کاهش مقاومت برشی بیش از پیش در زمینه تحلیل پایداری شیروانی‌ها مورد توجه و تایید مهندسين این زمینه قرار گرفته است و این روش در اکثر نرم افزارهای عددی تجاری گنجانده شده است [۲۵]. در این روش فاکتور ایمنی، به صورت نسبت مقاومت برشی واقعی محیط شیروانی به مقاومت برشی آستانه شکست شیروانی محاسبه می‌شود. بر اساس این تعریف در تکنیک کاهش مقاومت برشی، مقاومت برشی محیط به طور پیوسته کاهش می‌یابد تا در نهایت با رسیدن به شرایط بحرانی، شیروانی در آستانه ناپایداری قرار گیرد. به طور مثال با فرض رفتار خطی برای مقاومت برشی محیط مشابه معیار موهر-کولمب می‌توان مبنای این تکنیک را به صورت زیر بیان کرد.

$$F = \frac{\text{مقاومت برشی}}{\text{تنش برشی در حالت تعادل}} \quad (1)$$

$$F = \frac{c + \sigma \cdot \tan \phi}{\tau} \quad (2)$$

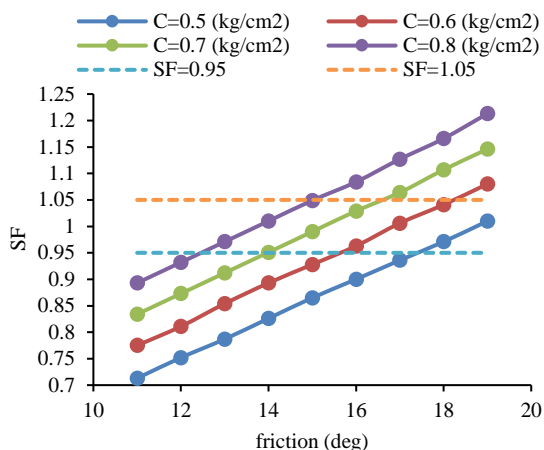
$$\frac{\tau}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \frac{\sigma_n \tan \phi}{F_s} \quad (3)$$

مدل موهر-کولمب از ساده‌ترین مدل‌های رفتاری خاک می‌باشد و به دلیل اینکه در این مدل اکثر پارامترهای اساسی خاک اعم از خمیری و کشسان وجود دارد، برای مدل‌کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب است. این مدل به دلیل سادگی و عدم نیاز به پارامترهای متعدد، در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶].

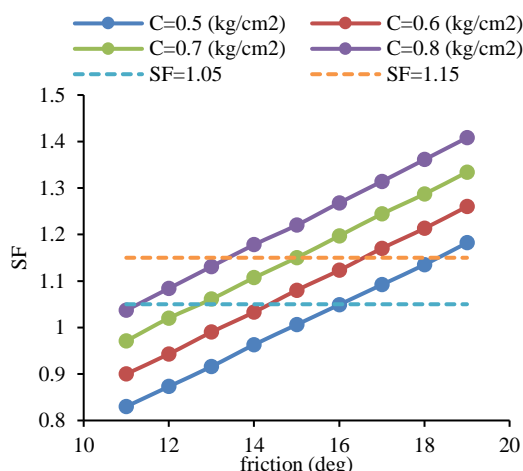
## ۲-۴ تحلیل برگشتی پایداری شیروانی سیلارد

مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش تعادل حدی کمتر از روش تفاضل محدود است. این نتیجه را می‌توان به دلیل در نظرگرفتن تعادل نقطه‌ای در روش تفاضل محدود و حل معادلات به کمک روش‌های دقیق‌تر دانست [۲۷].

عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌ها و عدم هم‌خوانی نتایج آزمایشگاهی و صحرایی موضوعی است که غالب تحلیل‌های مهندسی در محیط‌های خاکی و سنگی را با مشکل مواجه می‌سازد. استفاده از تحلیل برگشتی در رفع این نقیصه موثر است و در صورت انتخاب، غالباً بر اساس کنترل یک پارامتر می‌باشند. از آنجایی که در شیروانی مورد

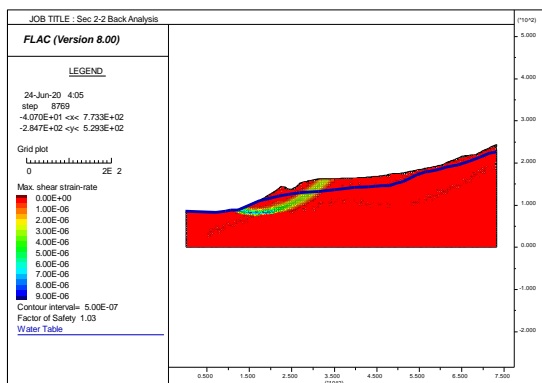


شکل ۱۴- مقطع ۲-۲



شکل ۱۵- مقطع ۳-۳

همانطور که ملاحظه می گردد، ضریب اطمینان در مقاطع ۱-۱ و ۲-۲ با دسته پارامترهای یکسان تقریباً نزدیک به هم بوده، اما ضریب اطمینان مقطع ۳-۳ اندکی بزرگتر است. بنابراین برای تدقیق پارامترهای سنگ هوازده از نتایج آنالیزهای مقاطع ۱-۱ و ۲-۲ استفاده شد. شکل زیر نمونه‌ای از مدل ساخته شده برای آنالیز برگشتی را نشان می دهد.



شکل ۱۶- نمونه‌ای از مدل ساخته شده برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک با روش آنالیز برگشتی

حفر گمانه‌های اکتشافی شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس استفاده گردیده و با محاسبات نرم افزاری Geo-slope و مدل ارائه شده توسط این شرکت مقایسه شده است.

جدول ۴- پارامترهای ژئوتکنیکی انواع سنگ درگیر در زمین لغزش سیلارد

نوع سنگ	جرم مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	جرم مخصوص اشباع (gr/cm <sup>3</sup> )	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک
روباره	۱/۹	۲/۱	۱۰	۲۸
سنگ سالم	۲/۱	۲/۱۷	۲۴۰	۲۵
سنگ هوازده	۲/۱	۲/۱۷	۹۰-۵۰	۲۰-۱۲

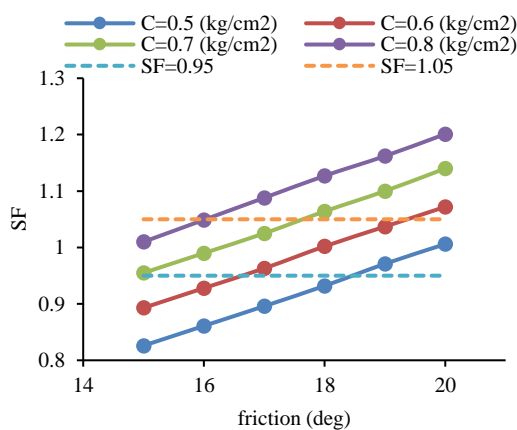
### ۴-۳ تعیین پارامترهای سنگ هوازده با استفاده از آنالیز برگشتی

برای محاسبه پارامترهای ناحیه توف هوازده، بازه‌ای از پارامترها برای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سنگ مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۵- بازه پارامترهای انتخاب شده برای سنگ هوازده

جنس سنگ	چسبندگی (kg/cm <sup>2</sup> )	زاویه اصطکاک داخلی
سنگ هوازده	۰/۵ - ۰/۸	۲۰-۱۱

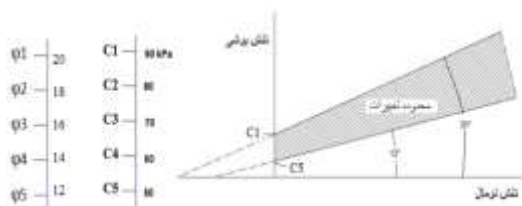
در شکل‌های زیر ارتباط بین دسته پارامترهای مختلف و ضریب اطمینان در سطوح لغزش نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در این تحلیل‌ها سطوح لغزشی که دارای ضریب اطمینان حداقل می باشد، جستجو شده است. با توجه به نتایج رفتارنگاری‌های انجام شده که حکایت از ادامه روند حرکت شیب به سمت دریاچه دارد، ضریب اطمینان حدود ۱ در نظر گرفته شد. لذا دسته پارامترهایی که دارای ضریب اطمینان ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ می باشند، از نمودارهای ۱۳ تا ۱۵ قابل استنتاج می باشند.



شکل ۱۳- مقطع ۱-۱

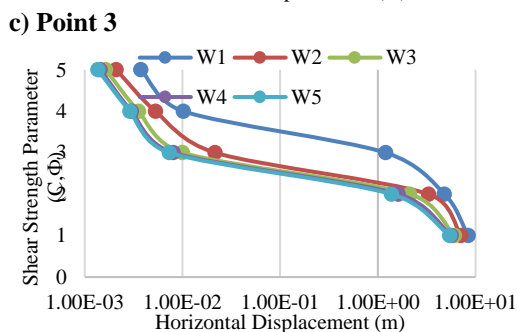
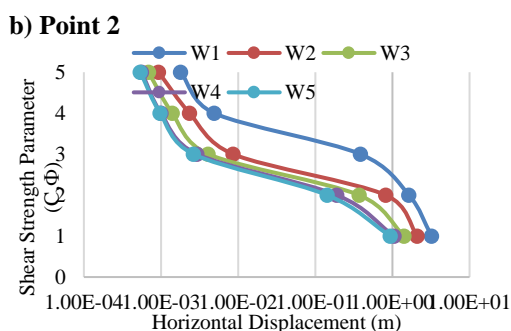
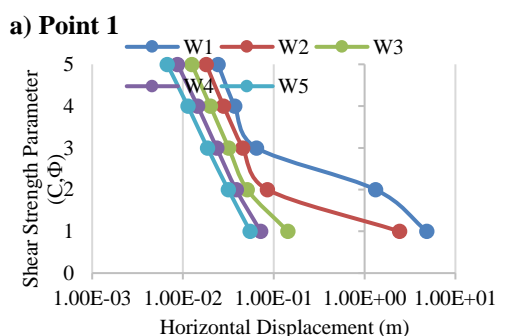


می‌توان در محدوده شکل (۱۹)، تحلیل پایداری شیب را برای زوج پارامترها در پنج رده (C1,  $\phi$ 1) تا (C5,  $\phi$ 5) تحت عنوان مدل‌سازی عددی انجام داد.



شکل ۱۹- محدوده تغییرات پارامترهای مقاومت برشی، بدست آمده از آنالیز برگشتی

مطابق شکل (۲۰)، شرایط پایداری شیب، با اعمال زوج پارامترها (زوج (C1,  $\phi$ 1) بیشترین مقدار را دارا بوده و زوج (C5,  $\phi$ 5) کمترین مقدار را دارد) برای ترازهای مختلف سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته و میزان جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳ بدست آمده‌اند تا بر اساس تشدید جابجایی‌ها، عامل لغزش در این مرحله شناسایی گردد.

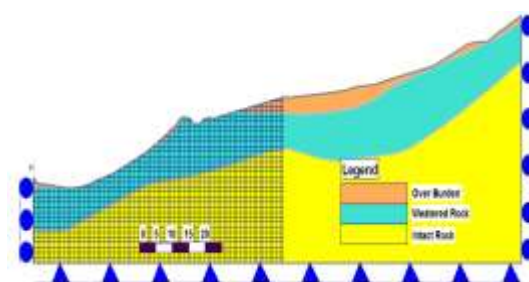


شکل ۲۰- جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳ تحت تاثیر کاهش پارامترهای مقاومتی خاک در هر یک از ترازهای آب زیرزمینی

#### ۴-۴ رسیدن به بهترین مدل عددی

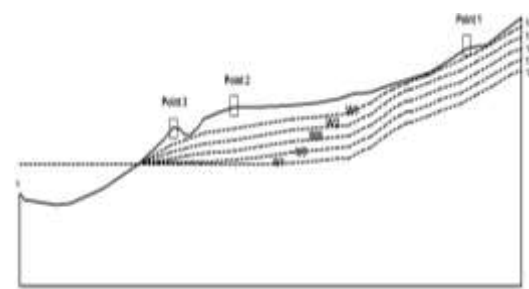
برای رسیدن به مدل واقعی این پدیده، تمام موارد (نظیر بالآمدن سطح آب زیرزمینی و یا تغییر خصوصیات مکانیکی لایه‌ها) که ممکن است منجر به حرکت شیب شده باشد تک تک به مدل ساده‌ی طراحی شده با نرم افزار دوبعدی FLAC اضافه می‌شود تا در نهایت مدل رضایت‌بخشی از وقوع زمین‌لغزش حاصل گردد (شکل ۱۷).

این روش برای تجزیه و تحلیل حالت اصلی شیب (قبل از حرکت آن) به منظور شناسایی علل حرکت شیب و محاسبه‌ی توسعه احتمالی بیشتر در نظر گرفته شده است [۲۸].



شکل ۱۷- شرایط مرزی مدل عددی

بر روی مدل فوق که بالغ بر ۸۰۰۰ المان به ابعاد ۱ در ۱ شامل می‌شود، سطح آب زیرزمینی نیز در ترازهای مختلف تعریف شده است تا اثر آب زیرزمینی بصورت فشار آب‌منفذی و همچنین اضافه شدن وزن خاک در اثر اشباع کردن لایه‌های خاک منظور گردد. همچنین برای بررسی وضعیت جابجایی خاک سطحی، سه نقطه ۱، ۲ و ۳ بر روی دامنه شیب تعریف شده است (شکل ۱۸).

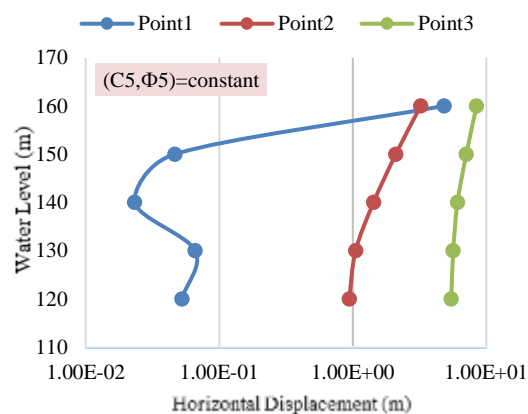
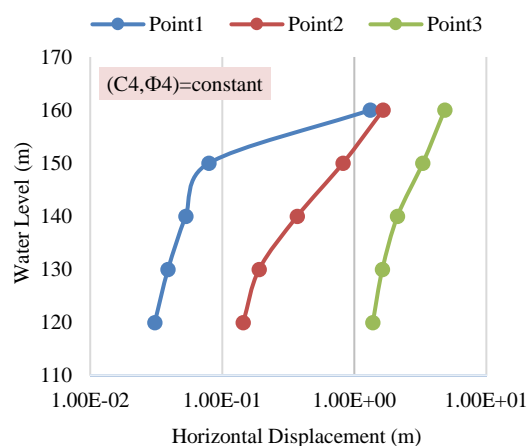
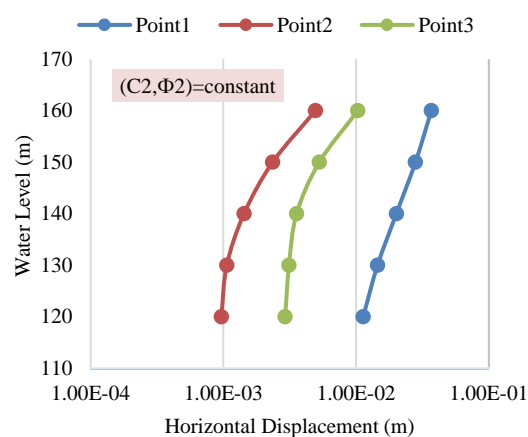
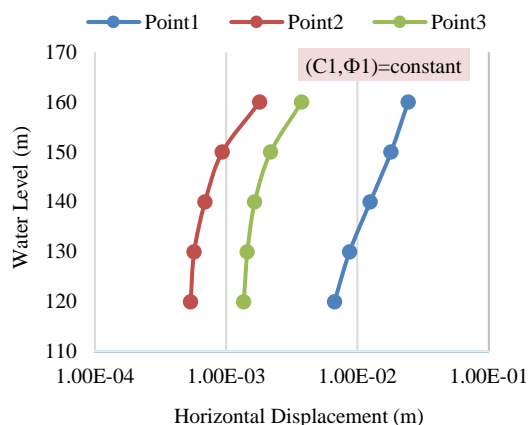


شکل ۱۸- نمای شماتیک سطح آب

در ادامه به تمام پیش‌بینی‌ها و رویدادهایی که ممکن است باعث وقوع زمین‌لغزش شده باشند؛ اشاره می‌شود:

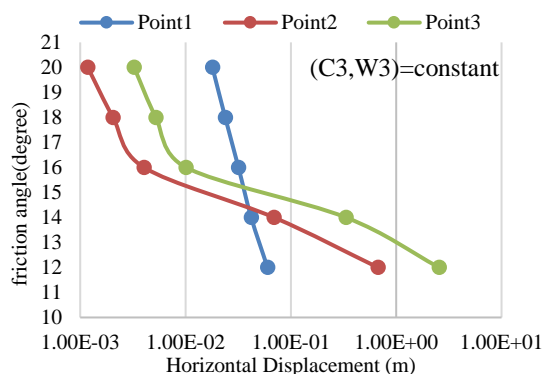
رویداد ۱) کاهش پارامترهای مقاومت برشی در سنگ‌های هوازده تحت شرایط استاتیکی

همانطور که از جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، عمده تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در سنگ هوازده وجود دارد و لذا

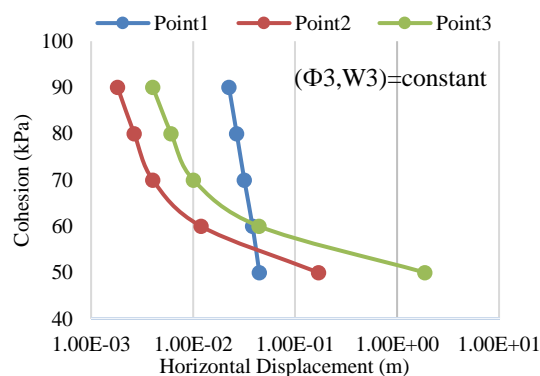


شکل ۲۳- اثر تراز آب زیرزمینی بر جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳

در ادامه برای اینکه تاثیر هر یک از پارامترهای مقاومت برشی مشخص گردد، میزان جابجایی نقاط ۱، ۲ و ۳ فقط برای تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بطور جداگانه و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها با استفاده از مدل‌سازی عددی محاسبه و ترسیم شده است (شکل‌های ۲۱ و ۲۲).



شکل ۲۱- اثر زاویه اصطکاک داخلی بر جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳ در شرایط میانگین چسبندگی و تراز آب زیرزمینی



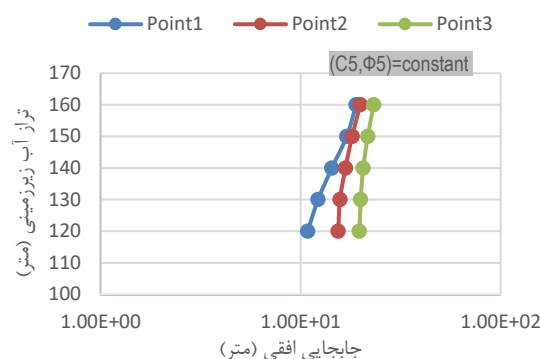
شکل ۲۲- اثر چسبندگی بر جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳ در شرایط میانگین زاویه اصطکاک داخلی و تراز آب زیرزمینی

همانطور که از شکل‌های (۲۰) و (۲۱) ملاحظه می‌گردد؛ تاثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به یک اندازه بر پایداری شیب موثر بوده و لذا در نظر گرفتن زوج پارامترهای مقاومت برشی برای مدل‌سازی، روش بهبوده‌ای نبوده است. رویداد (۲) بالا آمدن سطح تراز آب زیرزمینی در اثر بارندگی و تحت شرایط استاتیکی

کوپر جان [۲۹] گزارش کرده است که خاکریز ماسه‌ای ساحلی در منطقه زلاند هلند به واسطه‌ی افزایش سطح آب از ۲/۸ به ۴/۶ در اثر بارندگی‌های فصل بهار، دچار لغزش شده است. در ادامه روند مدل‌سازی و رسیدن به شرایط ایده آل، تحلیل پایداری شیب با تک‌تک زوج پارامترهای مقاومت برشی برای ترازهای مختلف آب زیرزمینی انجام و نتایج مربوطه در شکل (۲۳) ترسیم گردیده است.

### رویداد ۳) بررسی اثر نیروی زلزله

هرچند وقوع زلزله به عنوان یک نیروی خارجی مؤثر بر زمین لغزش مطرح است ولی هرگز برای این زمین لغزش گزارش نشده است؛ با این وجود برای بررسی دقیق روند مدل سازی و رسیدن به نتایج واقعی، ایستایی شیب با اعمال اثر ضریب زلزله  $0.15g$  تحلیل گردید و نتایج حاصل، لغزش این شیب را حتی بدون هیچگونه تغییری در کاهش زوج پارامترهای مقاومتی نشان نداد (شکل ۲۴).



شکل ۲۴- جابجایی افقی نقاط ۱، ۲ و ۳ در شرایط کمترین مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با بالاترین تراز آب زیرزمینی و اعمال اثر ضریب زلزله  $0.15g$

لذا این پیش‌بینی، جایگاهی در مدل سازی نخواهد داشت و از توضیحات بیشتر در این خصوص خودداری گردیده است.

### ۵- بحث و نتیجه گیری

از نتایج میدانی و خروجی‌های این نرم افزار چنین برمی‌آید

که کاهش پارامترهای مقاومتی خاک منطقه به هر دلیلی (هوازدگی، بارندگی، خاکبرداری برای جاده سازی و ...) از عوامل اصلی وقوع این لغزش بوده اند که نقش آب در آن به دو صورت کاهنده‌ی مقاومت و افزایش دهنده‌ی نیروی برشی از طریق اشباع کردن خاک بسیار برجسته است. وجود خاک سربراه‌ی مستعد کاهش پتانسیل مقاومتی نیز مزید بر علت بوده و تحت تاثیر کاهش شدید چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی قرار داشته است. مطابق نتایج حاصله، شرایط پایداری شیب، با در نظر گرفتن زوج پارامترهای مقاومتی  $(C1, \phi1)$  تا  $(C5, \phi5)$  برای ترازهای مختلف سطح آب زیرزمینی و شیب لغزش یافته مورد تحلیل قرار گرفت و میزان جابجایی افقی نقاط فرضی ۱، ۲ و ۳ محاسبه گردید. به دنبال شدت یافتن جابجایی‌ها، دلیل اصلی لغزش، رسیدن پارامترهای مقاومتی به حد  $(C4, \phi4)$  بوده که مطابق مقادیر حاصله از نمونه برداری نیز همین مقادیر می‌باشد و این در حالی است که سطح آب زیرزمینی حتی به تراز  $W_2$  نرسیده است (در عمل نیز اینگونه بوده است).

از نتیجه‌گیری فرعی این تحقیق نیز می‌توان بر این موضوع صحنه گذاشت که مدل سازی عددی نه تنها برای زمین لغزش‌ها کارایی دارد؛ بلکه برای هم خانواده‌ی شیب‌ها یعنی خاکریزها، گودبرداری‌ها و همچنین برای بررسی شرایط و علل ناپایداری دیواره تونل‌ها و غیره می‌تواند به عنوان روش و ابزاری قدرتمند در خدمت تحلیل دیواره‌ها قرار گیرد.

### مراجع

- [۱] نوفرستی، ویسکرمی، رحیم دل، "تحلیل و بررسی پتانسیل زمین لغزش به کمک مدل سازی عددی (مطالعه موردی: محور قائن-افین در استان خراسان جنوبی)"، پژوهش‌های عمران و محیط زیست، دوره ۵، شماره ۱، ۲۰۱۹، صفحه ۷۷-۸۸.
- [۲] مرادی، محمدی، پورقاسمی، فیض‌نیا، "تحلیل و برآورد خطر زمین لغزش با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در بخشی از جاده هراز"، برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۴، شماره ۲ (پیاپی ۶۶)، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۲۳۳-۲۴۷.
- [3] Alexakis, D.D., Agapiou, A., Tzouvaras, M., Themistocleous, K., Neocleous, K., Michaelides, S., Hadjimitsis, D.G., "Integrated Use of GIS and Remote Sensing for Monitoring Landslides in Transportation Pavements. The Case Study of Pathos area in Cyprus". Nat. Hazards 72 (1), 2013, pp. 119-141.
- [4] Caccavale, M., Matano, F., Sacchi, M., "An integrated approach to earthquake-induced landslide hazard zoning based on probabilistic seismic scenario for Phlegrean Islands (Ischia, Procida and Vivara)", Geomorphology 295, 2017, pp. 259-235.
- [5] Zhu, A., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T., "An Expert Knowledge-Based Approach To Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Fuzzy. Logic", Geomorphology 214, 2014, pp. 128-138.

[۶] شفقتی، مصلحت جو، "ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با روش انبالاگان در محیط ArcGIS، مطالعه موردی: حوضه آبخیز چاکرود گیلان"، فصلنامه جغرافیایی سرزمین. دوره ۹، شماره ۳۵، ۱۳۹۱، صفحه ۹۵-۱۰۴.

[7] Cheng, Yung Ming; LAU, C. K., "Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight", CRC Press, 2008.

[8] PFC3D, User's Manual. Itasca Consulting Group. Inc, Minneapolis, USA, 2005.

[9] Wyllie, Duncan C.; NORRISH, Norman I., " Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 13-SOIL Slope Stability Analysis", USA, 1996.

[۱۰] حاجی عزیزی و همکاران، "تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها-مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، ۱۳۹۳، صفحه ۱۵۳-۱۶۵.

[۱۱] قنواتی عزت اله، "پهنه بندی خطر لغزش در حوضه جاجرود با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی"، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، دوره ۱۷، شماره ۲۰، بهار ۱۳۹۰، صفحه ۵۱-۶۸.

[۱۲] گروه مطالعه امور زمین‌لغزش، "فهرست زمین لغزشهای کشور"، سازمان جنگلها و مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری، ۱۳۸۵.

[13] Eckel, Edwin B., "Landslides and engineering practice", Highway Research Board Special Report, 1958, 29.

[14] Dooradarshi C, Murali Krishna, "Effect of slope angle on the stability of a slope under rainfall infiltration", Indian Geotech J, 2019, Vol 49, No. 6, 708-717

[15] Pei P, Zhao YL, Ni P, Mei G., "A protective measure for expansive soil slopes based on moisture content control", Eng. Geol., 2020, 269

[۱۶] نعمتی، سرداری چرمی، "تحلیل وضعیت منابع آب حوضه سد لتیان بر اساس مدل مفهومی DPSIR"، انسان و محیط زیست، دوره ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۳۱-۴۶.

[۱۷] شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، "مطالعات زمین شناسی حوضه آبریز سد لتیان"، کارفرما: سازمان آب منطقه ای تهران، ۱۳۸۲.

[18] LIANG, Chao, et al., "Analysis of shallow landslide mechanism of expansive soil slope under rainfall: a case study", Arabian Journal of Geosciences, 2021, Vol.14, No.7, pp. 1-11.

[19] Krauter, E., "Landslides – Types and Risk Assessment", CERG Intensive Course, Dornbirn, Austria, 2002, pp. 14-21.

[20] BOGAARD, Thomas Adrianus, "Analysis of hydrological processes in unstable clayey slopes", PhD Thesis, 2001.

[21] GEERTSEMA, Marten POJAR, James J., "Influence of landslides on biophysical diversity—a perspective from British Columbia", Geomorphology, Vol.89, No.1-2, pp.55-69.

[۲۲] شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، "گزارش طرح علاج بخشی نشست جاده لتیان-کلان"، کارفرما: سازمان آب منطقه ای تهران، ۱۳۸۲.

[23] Konietzky, H.; Hart, R.; Billaux, D., "Mathematische Modellierung von geklüftetem Fels. Numerische Simulationen in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren", Gelsenkirchen, 2000.

[24] Konietzky, Heinz., "Numerische Simulationen in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren", Habilitationsschrift zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur habilatus. Institut für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2001.

[25] Wang, B.; Vardon, P. J.; Hicks, M. A., "Investigation of retrogressive and progressive slope failure mechanisms using the material point method. Computers and Geotechnics", Vol.78, 2016, pp.88-98.

[۲۶] قره و همکاران، "بررسی رفتار سد خاکی چهچهه با استفاده از نتایج رفتارسنجی و تحلیل برگشتی"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۱-۲۴.

[۲۷] حاجی عزیزی و محمد، "تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی تاثیر ستون های سنگی در پایداری شیب خاکی واقع بر خاک رسی نرم"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۴۳-۵۲.

[28] Lorig, L. & Varona, P., "Practical Slope Stability Analysis Using Finite Difference Codes", In: Hustrulid, W. A., McCarter, M. K. & van Zyl, D, 2000.

[29] Kopperjan, A. W.; Van Wamelen, B. M.; Weinberg, L. J. H., "Coastal flow slides in the Dutch province of Zeeland", 1948.