تحلیل پایداری ترانشه‌های مسیرهای دسترسی در محوطه برج میلاد با استفاده از روش‌های عددی و شبکه‌های عصبی مصنوعی

حمیدرضا رازقی: دانشگاه علم و صنعت ایران
عطاآقایی‌آرایی: دانشگاه علم و صنعت ایران،
مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

تاریخ: **دریافت** ۸۸/۳/۱۰ **پذیرش** ۸۸/۱۲/۲

چکیده

بررسی ویژگی‌های مهندسی مصالح ترانشه‌های آبرفتی و سیمانی شده محوطهٔ برج میلاد تهران و نتایج تحلیل پایداری درحالت استاتیکی با استفاده از نرم افزارهای المان محدود و همچنین بررسی قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی برای محاسبه ضرایب پایداری موضوع این مقاله است. بر اساس مشخصات هندسی ترانشه‌ها و ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکلی آبرفت، ضریب پایداری ترانشه‌ها در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی، به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای PLAXIS7.2 و PLAXIS 3D Tunnel، محاسبه و نتایج حاصل با یک‌دیگر مقایسه شده است. در ادامه قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANNs) در به‌دست آوردن ضریب پایداری (FoS) ترانشه‌های مسیرهای دسترسی برج میلاد بررسی شده است. بانک اطلاعات به‌کار رفته در شبکه، شامل ضرایب تحلیل پایداری حاصل از ۲۵۶ گزینه مختلف (2D، 3D، ترانشه افقی و یا با شیب ۱۸° نسبت به افق در بالا) است. برای مسئله مورد نظر، برنامه شبکه‌های عصبی مصنوعی سه لایه پرسپترون(MLP) در محیط MATLAB7 نوشته شد و شبکه بهینه(تعداد لایه‌های مخفی، تابع تبدیل و نوع آموزش شبکه) به طریق سعی و خطا، و با توجه به شاخص‌های خطا و تطابق با داده‌ها انتخاب شد. پارامترهای ورودی شبکه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

شامل مشخصات ژئوتکنیکی و هندسی ترانشه‌ها (چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول یانگ، ارتفاع شیب، شیب ترانشه و زاویه اتساع) و پارامترهای خروجی شامل ضرایب پایداری در حالت‌های مختلف است. نتایج نشان می‌دهد که ANNs قابلیت بسیار مناسبی در تخمین ضرایب پایداری ترانشه‌ها در کلیه موارد بررسی شده دارد.

واژه‌ها: ترانشه، برج میلاد، ضریب پایداری، PLAXIS، شبکه‌های عصبی مصنوعی

مقدمه

تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی، ترانشه‌های راه و شیب‌های خاکریزه‌ای سدهای خاکی، یکی از مسائل معمول در پروژه‌های عمرانی است. تخمین ضریب پایداری شیب یک مسئله مهندسی بوده که شامل در نظرگیری چندین پارامتر است. تحلیل‌های پایداری شیب‌ها، معمولاً با روش‌های تعادل حدی صورت می‌گیرد، که این روش‌ها غالباً قبل از اختراع کامپیوتر توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها نیازمند اطلاعاتی راجع به پارامترهای مقاومتی و پارامترهای هندسی توده خاک و یا سنگ است. در تکنیک تعادل حدی برای بررسی پایداری شیب، ضریب پایداری در سطح محتمل گسیختگی و یا سطح لغزش بحرانی محاسبه می‌شود. یک‌چنین روش‌های محاسباتی دارای دقت‌های متفاوت، بسته به مناسب بودن فرضیات درنظرگرفته شده برای تحلیل مورد نظرند. در روش‌های تحلیل به روش تعادل حدی، باید موقعیت سطح لغزش بحرانی و مقدار ضریب پایداری حداقل در تعدادی سطح لغزش محتمل، بررسی شوند. در روش‌های ارائه شده توسط (Taylor،۱۹۳۷) و (Bishop ،۱۹۵۳) شکل سطح لغزش، دایره‌ای شکل فرض شده است. در دیگر روش‌های معرفی شده توسط(Janbu ۱۹۵۴، Spencer ۱۹۶۷، Sarma ۱۹۷۵ و Hoek و Bray ۱۹۸۱) انواع سطح لغزش را می‌توان در نظر گرفت. دقت روش‌های ذکر شده در بالا تا حدود زیادی وابسته به فرضیات آن‌ها و دقت در تعیین پارامترهای مقاومت برشی است. به طور کلی فرض بر این است که خاک ایزوتروپ و همسان است. هرچند که این فرضیات کاملاً واقعی نیستند، اما نتایج حاصل ازاین فرضیات مناسب هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

در چند دهه اخیر از تحلیل‌های المان محدودی هم برای انجام تحلیل پایداری شیب‌ها استفاده شده است. در این تحلیل‌ها به جای سطح لغزش، از طریق کاهش ضرایب چسبندگی و زاویه اصطکاک برای پیدا کردن سطح لغزش بحرانی و در نتیجه ضریب اطمینان شیب استفاده می‌شود (مثل نرم‌افزار PLAXIS).

در اغلب موارد، تحلیل بر مبنای مدل‌های دو بعدی، تحت شرایط کرنش صفحه‌ای صورت می‌گیرد. اما اغلب خرابی ترانشه‌ها، متفاوت از فرض‌های کرنش صفحه‌ای بوده و بنا بر این انجام تحلیل‌های پایداری سه بعدی ترانشه‌ها در پاره‌ای موارد، مناسب‌تر به نظر می‌رسد. در نظر نگرفتن اثرات سه بعدی ممکن است در مواردی باعث جواب‌های نامطمئن شود. مثلاً اگر اثرات سه بعدی شیب‌ها در تحلیل برگشتی مقاومت برشی در نظر گرفته نشود، مقاومت برشی محاسبه شده از تحلیل برگشتی زیاد خواهد بود (Farzaneh و Askari، ۲۰۰۳).

در همهٔ روش‌های مدل‌سازی عددی (روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی پایه، روش المان محدود، روش المان مرزی، روش المان مجزا، روش‌های Hybrid، روش‌های عددی توسعه یافته و روش‌های تحلیل کاملاً توام) سعی می‌شود مکانیزم ارتباط یک به یک در مدل بین نتایج ایجاد شود (Jing و Hudson، ۲۰۰۲؛ Jing، ۲۰۰۳). گاهی هدف یافتن رابطه مستقیم بین هندسه مدل، مکانیزم‌های فیزیکی و خواص معادل مصالح نیست، که در این مواقع روش‌های یاد شده در بالا چندان مفید نیستند. یافتن مکانیزم‌های ارتباط غیر یک به یک را می‌توان با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام داد که در این روش، مکانیزم‌های تاثیرگذار، کاملاً به هم مرتبط نیستند. همچنین مدل‌های حاصل از شبکه های عصبی مصنوعی دارای قابلیت‌های تخمین و تعمیم است و به همین دلیل در موضوعات مختلف خاک و پی در سال‌های اخیر به‌کار گرفته می‌شوند که به‌عنوان مثال می‌توان از پژوهش‌گرانی چون Banimahd) و همکاران ۲۰۰۵، Sakellariou و Fereninou ۲۰۰۵، Baziar و Jafarian ۲۰۰۷) نام برد.

به هر حال، هرچند نمودارهای تحلیلی ارائه شده در ادبیات فنی، روش ساده تر، سریع‌تر و ابزار مفیدی در تخمین پایداری اولیه شیب‌ها هستند (Duncan، ۱۹۹۶)، اما با توجه به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

قابلیت‌های شبکه‌های عصبی، در صورت آموزش مناسب می‌توانند ابزار بسیار مؤثرتر در تخمین ضریب پایداری شیب‌ها باشند (Sakellariou و Fereninou، ۲۰۰۵).

در این مقاله ضمن مروری بر ویژگی‌های مهندسی آبرفت سیمانی شده محوطه برج میلاد تهران، نتایج تحلیل پایداری با نرم‌افزار PLAXIS در حالت دو و سه بعدی برای تیپ‌های مختلف خاک‌برداری ارائه می‌شود. با معرفی پارامترهای بی بعد براساس مشخصات هندسی ترانشه و ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکلی آن‌ها و ارائه منحنی‌های حاصل برای ضریب پایداری (FoS) در این گونه آبرفت‌ها، به مقایسه نتایج ضریب پایداری حاصل از تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در آبرفت سیمانی شده پرداخته می‌شود. در ادامه پتانسیل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) نوشته شده و آموزش داده شده در تخمین ضریب پایداری، براساس مشخصات هندسی و ویژگی های مقاومتی آبرفت سیمانی ارزیابی می‌شود.

مشخصات محل بررسی شده

محل بررسی شده شیب‌های تند و ترانشه‌های نزدیک به قائم متعدد اطراف برج میلاد است، که در آبرفت سیمانی در محل برج میلاد، موجود و یا در حال ایجاد هستند که بعضی از ترانشه‌های تند یاد شده خصوصاً در بخش جنوبی برج (انتهای گیشا) برای مدت‌های طولانی پایدار باقی مانده‌اند. پایداری آن‌ها بیش‌تر به اثر سیمانی شدن روی مقاومت برشی آن‌ها نسبت داده می‌شود. با توجه به اهمیت سازه و پروژه مذکور، شناخت درست ویژگی‌های مهندسی آبرفت‌های محل برج و ترانشه‌های راه‌های دسترسی و اثرات آن‌ها بر پایداری بسیار مهم است. به طوری‌که اخیراً، با توجه به اثرات هوازدگی در کاهش مقاومت و هم‌چنین برای محافظت شیب‌ها و ترانشه‌های مذکور در برابر عوامل جوی، پایدارسازی آن‌ها با پوششهای ژئوتکستایل و هم‌چنین نصب میله مهارهای تزریقی در داخل خاک همراه با سنگ‌چینی در داخل شبکه تورهای سیمی در حال انجام است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

مشخصات زمین‌شناسی مهندسی آبرفت محوطه اطراف برج میلاد

بر پایه تقسیم‌بندی Rieben (۱۹۶۶)، برج میلاد، روی رسوبات گروه سنی زمین‌شناسی Pliocene، سازند هزاردره و علامت A، شامل شن ماسه‌دار تا ماسه شن‌دار همراه با قلوه سنگ (کنگلومرایی به رنگ خاکستری روشن) در حال احداث است. رسوبات مذکور نسبتاً همگن بوده وشیب لایه‌بندی آن‌ها در محل بررسی شده در حدود ۳۰-۲۵ درجه به سمت جنوب باختر است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی جریان یافته از کوه‌های شمال تهران هستند و سیمانی شدن آن متوسط تا زیاد است. به‌طورکلی سیمانی شدن آبرفت‌های تهران اغلب ثانویه بوده و به مرور زمان در اثر نهشته شده املاح شیمیایی حاصل از آب‌های زیرزمینی و تراکم رسوبات به‌وجود آمده‌است. به‌طوری‌که در بخش‌های زیرین دارای نفوذپذیری بسیار کم و هوازدگی و مقاومت مکانیکی بسیار بالا است و به سمت بالا، نفوذپذیری و هوازدگی افزایش یافته و از مقاومت مکانیکی کاسته می‌شود. علیرغم همگنی عمومی این نوع آبرفت، از نظر دانه‌بندی و سیمانی شدن غیرهمگن بوده و سیمانی شدن آن‌ها نه تنها در مقیاس بزرگ‌تر، نظیر توالی لایه‌های رسوبی، بلکه حتی در مقیاس‌های کوچک‌تر نظیر یک نمونه دستی نیز غیریک‌نواخت است. نتایج سنگ‌شناسی بر روی سنگ‌دانه‌های بخش شنی چند نمونه در جدول۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیش‌تر سنگ دانه‌ها از توف، شیل و سنگ‌های آتشفشانی تشکیل یافته‌اند. شکل ذرات نیمه مدور تا گرد گوشه و ضریب گردشدگی (Krumbein، ۱۹۴۱) آن‌ها بین ۰/۴ تا ۰/۵ است (یثربی و همکاران، ۱۳۸۰).

جدول۱. جنس اجزاء درشت‌دانه چند نمونه از آبرفت‌های محوطه برج میلاد تهران به صورت درصد وزنی(یثربی و همکاران، ۱۳۸۰)

محل	توف سبز	شیل	سنگ‌های آتشفشانی (گدازه و غیره)	عناصر فرعی (سنگ‌های آهکی، سیلیسی)
مسیر بزرگراه رسالت در انتهای کوی نصر (گیشا) (محل ۱)	۶۱	۲۷	۱۰	۲
ساخت‌گاه هتل پنج ستاره در مجموعه برج میلاد تهران(محل ۲)	۶۷	۲۲	۷	۴

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

جنس مواد سیمانی

نتایج تجزیه شیمیایی به روش ذوب قلیایی مواد سیمانی بین دانه‌های درشت‌دانه آبرفت مورد نظر که در جدول ۲ ارائه شده، نشان می‌دهد که در محل۱، مواد رسی، شامل اکسیدهای آهن و سیلیس (مثل مونت موریونیت)، مواد کلسیتی شامل کربنات کلیسیم (CaCO3) و کوارتز و در محل ۲ بلورهای سفید رنگ کلسیتی به همراه کمی کوارتز و رس تشکیل دهنده مواد سیمانی‌اند. درآبرفت‌های سیمانی شده‌ای که مواد ریزدانه کم‌تر از حدود ۱۵٪ است، بیش‌تر ذرات به وسیله سیمان کربناتی به یک‌دیگر متصل شده و مقاومت و چسبندگی خاک به مقدار زیادی ناشی از سیمان کربناتی است. ولی در آبرفت‌هایی که مقدار مواد ریزدانه بیش از مقدار مذکور است، مواد ریزدانه به صورت خمیر، اجزاء درشت‌دانه را در برگرفته و اجزای درشت دانه به حالت شناورند. در این حالت با وجود سیمان کربناتی اتصال بیش‌تر دانه‌های درشت‌دانه به وسیله خمیر ریزدانه صورت گرفته و مقاومت برشی خاک به مقدار زیادی تحت تأثیر خصوصیات مواد خمیری قرار دارد. در رسوباتی که خمیر آن‌ها دارای مواد رسی زیادی است، مقاومت و چسبندگی به مقدار زیادی متأثر از درصد رطوبت خاک است. لذا ترانشه‌های به ظاهر پایدار فعلی ممکن است به مرور زمان در اثر عوامل جوی و یا هوازدگی ناپایدار شوند.

گروه‌بندی خاک‌برداری

در طول مسیرهای دسترسی برج میلاد ۳۹ مقطع خاک‌برداری از عمق ۱/۵ متر تا ۳۴ متر تشخیص داده شده و تفکیک شده‌اند (شکل۱). به دلیل تعداد زیاد مقاطع و شباهت آن‌ها، خاک‌برداری‌ها به ۷ گروه اصلی به شرح جدول ۳ تقسیم شده است.

جدول ۲. نتایج تجزیهٔ مواد سیمانی چند نمونه از آبرفت‌های محوطه برج میلاد تهران به روش ذوب قلیایی (یثربی و همکاران، ۱۳۸۰)

اکسیدها (٪)	محل اخذ نمونه	
	محل ۱- سیمانی شده متوسط	محل ۲- سیمانی شده قوی
SiO_2	۵۴/۶۱	۹/۰
Al_2O_3	۱۵/۴۵	۱/۸۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

Fe_2O_3	۵/۰	۲/۰
CaO	۱۲/۶	۴۸/۱۶
MgO	۰/۴۰	۰/۶
SO_3	۰/۰۱	–
Cl	۰/۰۲۱	۰/۰۵
مفقودی در اثر ذوب	۹/۲۰	۳۷/۶۶
$CaCO_3$ برآوردی	۲۲/۵	۸۶/۰

جدول۳.گروه‌بندی خاک‌برداری بر حسب ارتفاع و محل

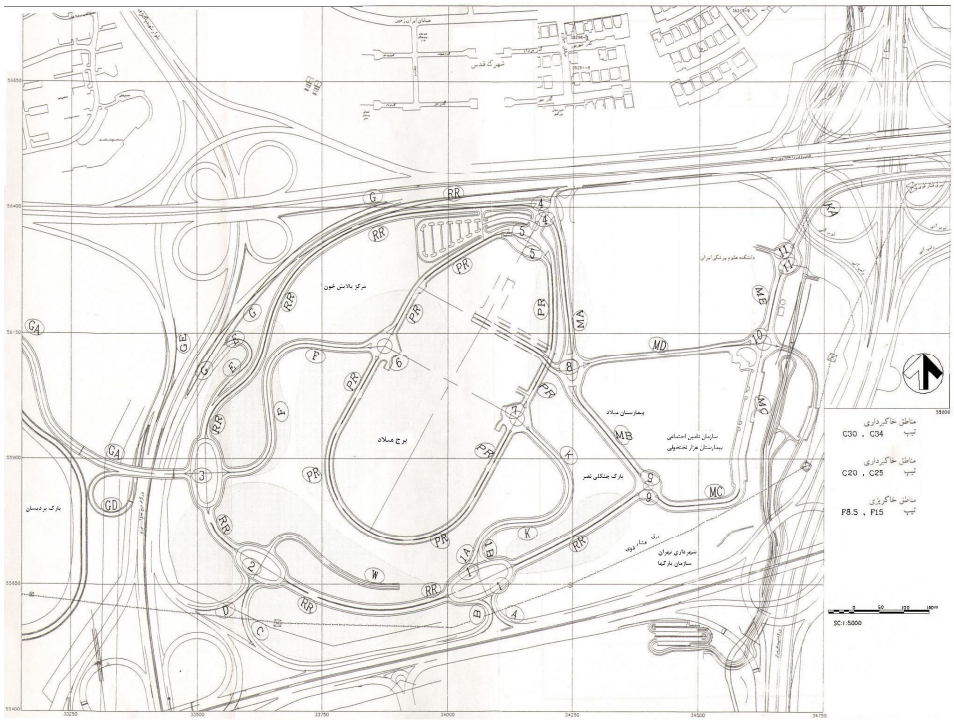
شماره	شرح	تیپ	تعداد مقاطع	محل قرارگیری مقاطع	ملاحضات
۱	خاک‌برداری به عمق ۱ تا ۶ متر	C6	۱۸	مناطق شمالی برج	رس بسیار سخت
۲	خاک‌برداری به عمق ۶/۵ تا ۱۰ متر	C10			
۳	خاک‌برداری به عمق ۱۱ تا ۱۴ متر	C14	۷	مسیرهای RR، PR، K، B و G	–
۴	خاک‌برداری به عمق ۱۵تا ۲۰متر	C20	۸	مسیرهای W، RR، K و PR	نواحی جنوبی برج
۵	خاک‌برداری به عمق ۲۱تا ۲۵ متر	C25	۲	مسیر W و مسیر RR بعد از میدان ۳	درشت دانه متراکم
۶	خاک‌برداری به عمق ۲۶ تا ۳۰ متر	C30	۲	مسیر RR بعد از میدان ۱ به سمت میدان ۹ و مسیر F	مناطق درشت‌دانه بسیار متراکم
۷	خاک‌برداری به عمق ۳۱ تا ۳۴متر	C34	۲	مسیرهای RR و C در کنار میدان ۲	بحرانی ترین خاک‌برداری

لایه‌بندی خاک و نتایج آزمایش ها

سه نوع لایه‌بندی متمایز برای تحلیل این ترانشه‌ها در نظر گرفته شده است که یکی لایه درشت‌دانه سطحی نسبتاً هوازده (L1-1) و دیگری لایه درشت دانه زیرسطحی (L1-2) و لایه بعدی لایه رسی (L2) لایه میانی است که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]



شکل ۱. مسیرهای دسترسی و محوطه برج میلاد (شرکت دریا خاک و پی، ۱۳۸۲)

متأسفانه چون تصور بر این است که خاک‌های درشت‌دانه که از آن‌ها به‌عنوان خاک غیرچسبنده نیز یاد می‌شود، دارای چسبندگی نیست، لذا مقاومت آن‌ها را تنها ناشی از اصطکاک بین دانه‌ای فرض می‌کنند. از طرفی با توجه به مشکلات تهیهٔ نمونه دست‌نخورده از خاک‌های درشت‌دانه و سیمانی‌شده آبرفت درشت‌دانه تهران، به طور معمول برآورد پارامترهای مقاومتی برشی براساس نمونه‌های دست خورده صورت می‌گیرد که در این صورت چسبندگی ناچیز برآورد شده و سبب طراحی‌های غیر اقتصادی و گاهاً جواب‌های گمراه‌کننده می‌شود. لذا باید با انجام آزمایش‌های مناسب روی نمونه‌های دست‌نخورده، آزمایش‌های برجا و حتی نتایج ابزار دقیق سازه‌های اطراف، برای به‌دست آوردن پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی برای مصالح درشت‌دانه سیمانته استفاده شود که خوشبختانه نتایج تعدادی از آزمایش‌های انجام شده در محل یاد شده موجود است (اصغری، ۱۳۸۱؛ پهلوان، ۱۳۸۱).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

آزمایش‌های درجای صحرایی انجام شده در محل برج، شامل برش درجا (برای تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، بارگذاری صفحه (برای تعیین متغییرهای تغییرشکل پذیری و ضریب واکنش بستر)، بارگذاری صفحه در لبه ترانشه (برای تعیین چسبندگی) و پرسیومتر منارد (برای تعیین مدول یانگ و مدول برشی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت برشی زه‌کشی نشده) و آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت، دانسیته درجا است و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی زیادی روی نمونه‌های دست خورده (نظیر برش مستقیم بزرگ ۳۰×۳۰ و ۵۰×۵۰ سانتی‌متر، سه محوری به قطر ۱۰ سانتی‌متر، دانه‌بندی و هیدرومتری) برای به‌دست آوردن پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی آبرفت‌های مورد نظر انجام شده است (یثربی و همکاران، ۱۳۸۰؛ حائری و همکاران، ۱۳۸۲؛ پهلوان و همکاران، ۱۳۸۲؛ پهلوان، ۱۳۸۱؛ اصغری، ۱۳۸۱؛ ماندرو، ۱۳۷۱؛ دریا خاک و پی، ۱۳۸۲).

بهترین متغییر حاصل از پرسیومتری مدول یانگ است (Clarke، ۱۹۹۵؛ پهلوان ۱۳۸۱) با توجه به مقدار نشست ۲۴/۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شده با یادمان سازه به روش میکروژئودزی، مدول Er از حلقه‌های باربرداری و بارگذاری مجدد در آزمایش‌های پرسیومتری را به‌عنوان مدول مناسب برای مدل‌های الاستیک خطی و یا الاستوپلاستیک موهر-کلمب معرفی کرد. با بررسی نتایج تمام آزمایش‌های انجام گرفته، پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مناسب برای مصالح مختلف انتخاب شد که خلاصه آن در جدول۴ ارائه شده است.

مدلسازی عددی

برای محاسبه FoS ترانشه‌ها می‌توان از نرم افزارهای المان محدودی PLAXIS و PLAXIS 3D Tunnel به ترتیب برای تحلیل‌های دوبعدی و سه بعدی استفاده کرد. در این نرم افزارها از روش کاهش ضریب اصطکاک و چسبندگی برای محاسبه ضریب پایداری استفاده می‌شود.

یکی از مدل‌های قابل به‌کارگیری در نرم افزارها، مدل رفتاری موهرکلمب است. این مدل، نمونه‌ای از مدل رفتاری الاستوپلاستیک فاقد کلاهک و در واقع از نخستین مدل‌های رفتاری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

ارائه شده برای مصالح خاکی و سنگریزه‌ای به شمار می‌رود. تعریف این مدل در PLAXIS با ۵ پارامتر صورت می‌گیرد. پارامترهای مدل و واحدهای استاندارد آن‌ها در زیر ارائه شده است:

E : مدول یانگ [kN/m^2]

ν : ضریب پواسن (بدون بعد)

ϕ : زاویه اصطکاک (درجه)

c : چسبندگی [kN/m^2]

ψ : زاویه اتساع (درجه)

یادآوری می‌شود که در صورت نبود اطلاعات آزمایشگاهی مناسب، برای محاسبه زاویه اتساع (ψ) از رابطه $\psi = \phi - ۳۰^\circ$ استفاده می‌شود. در حالت‌هایی که ϕ کم‌تر از ۳۰ درجه باشد ψ برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل عددی ترانشه‌ها در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی

برای محاسبه ضریب پایداری ترانشه‌های مسیرهای دسترسی اطراف برج میلاد، تحلیل‌های دو بعدی با PLAXIS7.2 و تحلیل‌های سه بعدی با PLAXIS 3D TUNNEL انجام شده است. از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و ۴ وجهی به ترتیب در تحلیل‌های دو بعدی و سه بعدی استفاده شده است. در تحلیل‌ها، برای مدل کردن رفتار مصالح از مدل موهر-کلمب استفاده شده است که پارامترهای مدل در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات لایه‌ها و مصالح

مشخصات	L1-1	L1-2	L2
محل مشاهده شده	قسمت تحتانی خاک تحتانی ناحیهٔ شمالی و کل ناحیهٔ جنوبی محدودهٔ ساختگاه	قسمت تحتانی خاک تحتانی ناحیهٔ شمالی و کل ناحیهٔ جنوبی محدودهٔ ساختگاه	قسمت‌های شمالی
جنس	خاک درشت‌دانه شن رس‌دار همراه ماسه و یا ماسه رس‌دار همراه شن با دانه‌بندی خوب تا بد، گاهی همراه لای به رنگ قهوه‌ای در اغلب نواحی سیمانی شده و همراه قلوه	خاک درشت‌دانه شن رس‌دار همراه ماسه و یا ماسه رس‌دار همراه شن با دانه‌بندی خوب تا بد، گاهی همراه لای به رنگ قهوه‌ای در اغلب نواحی سیمانی	رس گاهی همراه ماسه و شن رنگ قهوه‌ای و سخت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

	سنگ هوازده در لایه‌های سطحی		شده و همراه قلوه سنگ و بسیار متراکم		
طبقه‌بندی طبق USCS	GC, SC		GC, SC		CL, CH
درصد شن	GC	45< (شن) <57	GC	45< (شن) <57	4< (شن) <7
	SC	26< (شن) <33	SC	26< (شن) <33	
درصد ماسه	GC	30< (ماسه) <38	GC	30< (ماسه) <38	23< (ماسه) <29
	SC	47< (ماسه) <53	SC	47< (ماسه) <53	
درصد رس	GC	10< (رس) <30	GC	10< (رس) <30	65< (رس) <72
درصد رس	SC	16< (رس) <25	SC	16< (رس) <25	
رطوبت طبیعی (٪)	11< (w) <13		11< (w) <13		17< (w) <20
LL	42< (LL) <46		42< (LL) <46		42< (LL) <47
PL	22< (PL) <23		22< (PL) <23		21< (PL) <22
PI	20< (PI) <23		20< (PI) <23		21< (PI) <25
وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	19		19		18
وزن مخصوص طبیعی درجا (kN/m^3)	21		21		21
SPT	>45		>50		>50
$E(kg/cm^2)$	700		1600		1000
ν	0.35		0.35		0.35
$c\ (kg/cm^2)$	0.36		1.05		2
ϕ (°)	36		41		27

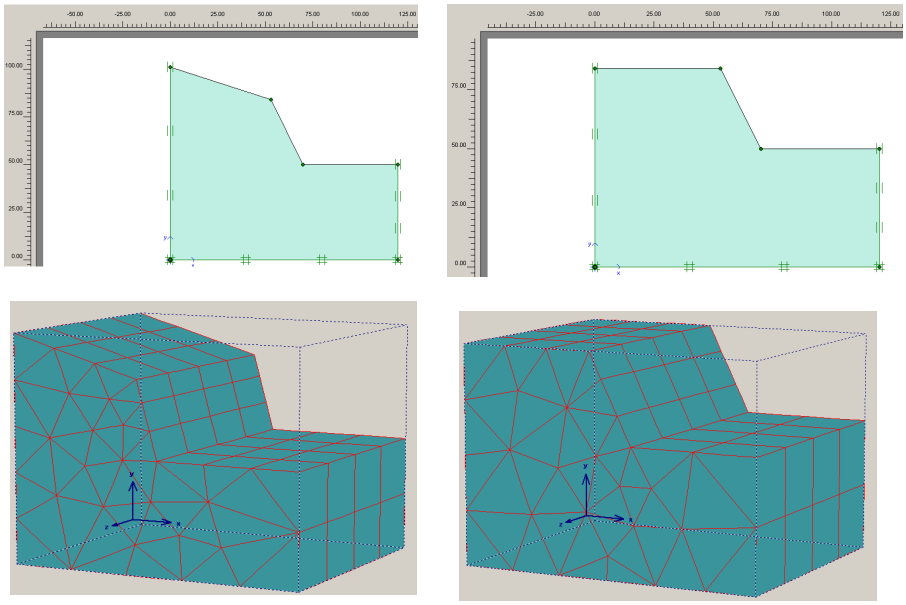
تحلیل‌ها برای حالت‌های استاتیکی بدون در نظر گرفتن وجود آب و با دو فرض افقی بودن و داشتن زاویه ۱۸ درجه سطح زمین در بالای ترانشه انجام گرفت. گزینه‌های مختلف در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها در جدول۵ ارائه شده است. مشخصات هندسی و پارامترهای مدل موهر-کلمب و همچنین نتایج تحلیل‌ها شامل ضرایب پایداری در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۲ به صورت نمونه هندسه به‌کار رفته در تحلیل‌ها برای ترانشه تیپ C34 و برای شیب ۱ افقی:۲ قائم، در دو حالت سطح بالای ترانشه افقی و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

شیب ۱۸ درجه نسبت به افق را نشان می‌دهد. برای تحلیل‌های سه بعدی، عـرض مقطـع ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

شکل۳ تغییرشکل‌های کل برای حالت دو بعدی برای ترانشه بـه ارتفـاع ۳۴ متـر، شـیب ۱ افقی:۲ قائم و مصالح L1-1 را نشان می‌دهد که به وضوع هندسه سطح ناپایدار قابل تشـخیص است. شکل۴ بردار جابه‌جایی‌ها را دریک صفحه میانی، برای ترانشه مذکور، بـه ترتیـب بـرای حالت دو بعدی و سه بعدی را نشان می‌دهد که باز هم هندسه بخش ناپایدار بـه آسـانی قابـل تشخیص است. شکل ۵ نتایج تحلیل برای نقاط پلاستیک شده و تحت کشش قرار گرفته را در حالت تحلیل دو بعدی برای ترانشه به ارتفاع ۳۴ متر۲ قائم و مصالح L1-1 نشان می‌دهـد. بـه کشش افتادن بخش‌های بالای ترانشه جالب است.



ب الف

شکل۲. هندسه به‌کار رفته در تحلیل‌ها برای ترانشه تیپ C34 و برای شیب ۱ افقی :۲ قائم در دو حالت الف) افقی بودن سطح بالای ترانشه و ب) داشتن شیب ۱۸ درجه نسبت به افق در بالای ترانشه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

تجزیه و تحلیل نتایج

در جدول ۶، تقریباً اکثر پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر ضریب پایداری ارائـه شـده اسـت. ارائه فرمول‌های تجربی به‌طوری که بتوانند اثر چندین پارامتر را در محاسـبه ضـریب پایـداری شیب در نظر بگیرد، ابزار بسیار مفیدی در تخمین پایداری اولیه شیب‌ها هستند. لذا با معرفـی پارامترهای بی بعد(روابط ۱ الی ۳)، برای یافتن منحنـی و فرمـول تجربـی سـاده و کـاربردی، بررسی نتایج دنبال شد.

$$\lambda_{\phi c}=H^*\gamma/c^*\tan(\phi) \quad (۱)$$

$$\lambda_G=b/H^*\tan(\beta) \quad (۲)$$

$$\lambda_{\beta\phi}= \tan(\beta)/\tan(\phi) \quad (۳)$$

نتایج تحلیل برای پارامترهای بی بعد شده در جدول ۶ ارائه شـده اسـت. بـه‌عنـوان نمونـه نتایج ضریب اطمینان (FoS) حاصل از تحلیل‌ها در برابر پارمترهای بی‌بعد حاصل از رابطه (۱) در شکل ۶ ارائه شده است. شکل۶ (a,b) مقادیر FoS برای حالت‌های دو بعدی و سه بعـدی در برابر $\lambda_{\phi c}$ (رابطه ۱) را به ترتیب برای ترانشه افقی و ترانشه با شیب

جدول۵. مشخصات تحلیل‌های انجام شده

شماره	گروه خاک‌برداری	جنس خاک	شیب(۱افقی ؟ قائم)	شماره	گروه خاک‌برداری	جنس خاک	شیب(۱افقی ؟ قائم)
۱	C34	L1-1	۲	۳۳	C20	L1-2	۴
۲	C34	L1-1	۳	۳۴	C20	L2	۲
۳	C34	L1-1	۴	۳۵	C20	L2	۳
۴	C34	L1-2	۲	۳۶	C20	L2	۴
۵	C34	L1-2	۳	۳۷	C14	L1-1	۲
۶	C34	L1-2	۴	۳۸	C14	L1-1	۳
۷	C34	L2	۲	۳۹	C14	L1-1	۴
۸	C34	L2	۳	۴۰	C14	L1-2	۲
۹	C34	L2	۴	۴۱	C14	L1-2	۳
۱۰	C30	L1-1	۲	۴۲	C14	L1-2	۴
۱۱	C30	L1-1	۳	۴۳	C14	L2	۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

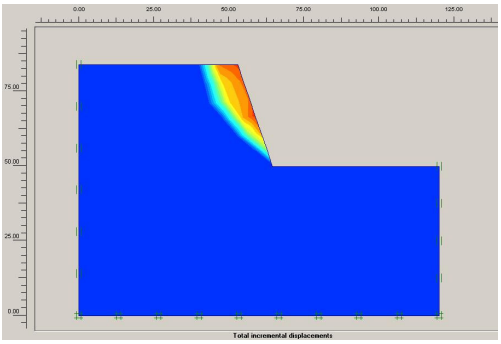
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

۱۲	C30	L1-1	۴	۴۴	C14	L2	۳
۱۳	C30	L1-2	۲	۴۵	C14	L2	۴
۱۴	C30	L1-2	۳	۴۶	C10	L1-1	۲
۱۵	C30	L1-2	۴	۴۷	C10	L1-1	۳
۱۶	C30	L2	۲	۴۸	C10	L1-1	۴
۱۷	C30	L2	۳	۴۹	C10	L1-2	۲
۱۸	C30	L2	۴	۵۰	C10	L1-2	۳
۱۹	C25	L1-1	۲	۵۱	C10	L1-2	۴
۲۰	C25	L1-1	۳	۵۲	C10	L2	۲
۲۱	C25	L1-1	۴	۵۳	C10	L2	۳
۲۲	C25	L1-2	۲	۵۴	C10	L2	۴
۲۳	C25	L1-2	۳	۵۵	C6	L1-1	۲
۲۴	C25	L1-2	۴	۵۶	C6	L1-1	۳
۲۵	C25	L2	۲	۵۷	C6	L1-1	۴
۲۶	C25	L2	۳	۵۸	C6	L1-2	۲
۲۷	C25	L2	۴	۵۹	C6	L1-2	۳
۲۸	C20	L1-1	۲	۶۰	C6	L1-2	۴
۲۹	C20	L1-1	۳	۶۱	C6	L2	۲
۳۰	C20	L1-1	۴	۶۲	C6	L2	۳
۳۱	C20	L1-2	۲	۶۳	C6	L2	۴
۳۲	C20	L1-2	۳				

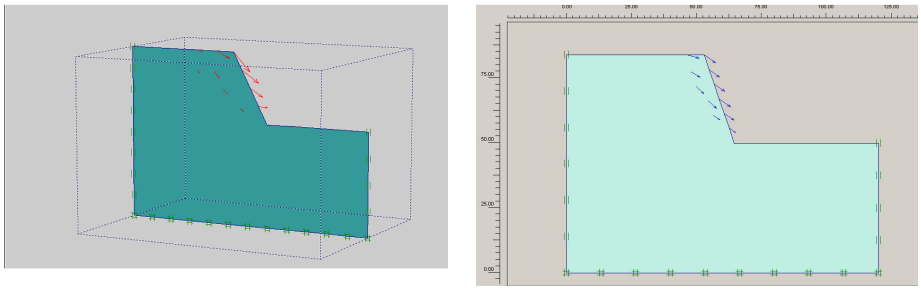
۱۸ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود منحنی توانی با داده‌ها انطباق خوبی دارد. براساس نتایج برای ترانشه افقی، مقادیر ضریب پایداری در حالت سه بعدی اندکی بیش از مقادیر نظیر دوبعدی در یک $\lambda_{\phi c}$ معیین است. اما برای ترانشه با شیب ۱۸ درجه در بالای ترانشه تا $\lambda_{\phi c}$ در حدود ۵، مقادیر ضریب پایداری دو حالت تقریباً برابر، اما در مقادیر بیشتر $\lambda_{\phi c}$، روند برعکس حالت ترانشه با سطح بالای افقی می‌شود. در کل نتایج ضریب پایداری در حالت ترانشه دارای شیب، کم‌تر از مقادیر نظیر در حالت ترانشه افقی است. براساس نتایج ارائه شده شکل ۶ به نظر می‌رسد که فرمول تجربی بی بعد شده $\lambda_{\phi c}$ پارامتر مناسبی در تعیین ضرایب پایداری بود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

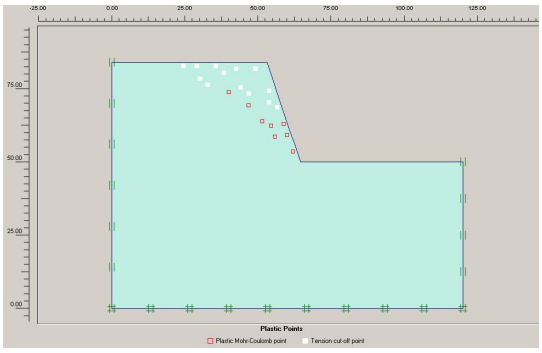


شکل۳. نمایش تغییرشکل‌های کل برای تحلیل دوبعدی برای ترانشه با ارتفاع ۳۴متر، شیب۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1



الف ب

شکل۴. نمایش برداری جابه‌جایی‌ها برای ترانشه به ارتفاع ۳۴متر،۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1، الف) تحلیل دو بعدی، ب) تحلیل سه بعدی در یک صفحه میانی



شکل۵. نقاط پلاستیک شده و تحت کشش در حالت دوبعدی برای ترانشه به ارتفاع ۳۴متر با شیب۱ افقی: ۲ قائم و مصالحL1-1

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول ۶. مشخصات هندسی و پارامترهای مدل موهر-کلمب و نتایج تحلیل پایداری برای حالت‌های دوبعدی و سه بعدی و پارامترهای بی بعد شده

	C (kg/cm²)	ϕ (°)	E (kg/cm²)	H (m)	1H:?V	ψ (°)	SaF. 2D	SaF. 3D	SaF. 2DSlope	SaF. 3DSlope	λϕc=H*Y/C*ATAN(ϕ)	λ_G	λ_{ψ}
1	0.36	36	700	34	2	6	1.021	1.323	1.12	1.033	30.60	3.26	0.72
2	0.36	36	700	34	3	6	0.978	1.164	0.963	1.055	30.60	3.67	0.81
3	0.36	36	700	34	4	6	0.973	1.09	0.988	0.926	30.60	3.90	0.86
4	1.05	41	1600	34	2	11	1.953	2.109	1.941	1.94	10.52	3.26	0.72
4	1.05	41	1600	34	3	11	1.572	1.922	1.561	1.717	10.52	3.67	0.81
6	1.05	41	1600	34	4	11	1.544	1.77	1.418	1.445	10.52	3.90	0.86
7	2	27	1000	34	2	0	2.226	2.302	2.162	2.139	5.48	3.26	0.72
8	2	27	1000	34	3	0	1.919	2.05	1.856	1.864	5.48	3.67	0.81
9	2	27	1000	34	4	0	1.786	1.946	1.729	1.744	5.48	3.90	0.86
10	0.36	36	700	30	2	6	1.194	1.231	1.157	1.151	27.00	3.69	0.72
11	0.36	36	700	30	3	6	1.072	1.163	1.033	0.977	27.00	4.16	0.81
12	0.36	36	700	30	4	6	0.948	1.094	0.936	0.952	27.00	4.42	0.86
13	1.05	41	1600	30	2	11	2.089	2.1	2.08	1.995	9.28	3.69	0.72
14	1.05	41	1600	30	3	11	1.593	1.983	1.887	1.821	9.28	4.16	0.81
15	1.05	41	1600	30	4	11	1.497	1.794	1.709	1.664	9.28	4.42	0.86
16	2	27	1000	30	2	0	2.533	2.487	2.352	2.216	4.83	3.69	0.72
17	2	27	1000	30	3	0	2.204	2.148	2.028	1.999	4.83	4.16	0.81
18	2	27	1000	30	4	0	1.637	2.079	1.877	1.906	4.83	4.42	0.86
19	0.36	36	700	25	2	6	1.121	1.492	1.335	1.466	22.50	4.43	0.72
20	0.36	36	700	25	3	6	1.097	1.184	1.16	1.268	22.50	5.00	0.81
21	0.36	36	700	25	4	6	1.087	1.178	1.087	1.175	22.50	5.30	0.86
22	1.05	41	1600	25	2	11	2.486	2.531	2.259	2.465	7.73	4.43	0.72
23	1.05	41	1600	25	3	11	1.983	2.172	2.021	2.139	7.73	5.00	0.81

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5] [Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

ادامه جدول ۶

24	1.05	41	1600	25	4	11	1.693	2.02	1.894	2.027	7.73	5.30	0.86
25	2	27	1000	25	2	0	2.824	3.024	2.615	2.692	4.03	4.43	0.72
26	2	27	1000	25	3	0	2.281	2.545	2.404	2.362	4.03	5.00	0.81
27	2	27	1000	25	4	0	1.757	2.306	2.183	2.284	4.03	5.30	0.86
28	0.36	36	700	20	2	6	1.657	1.484	1.443	1.409	18.00	5.54	0.72
29	0.36	36	700	20	3	6	1.337	1.437	1.273	1.309	18.00	6.25	0.81
30	0.36	36	700	20	4	6	1.274	1.341	1.201	1.109	18.00	6.63	0.86
31	1.05	41	1600	20	2	11	2.984	2.991	2.509	2.477	6.19	5.54	0.72
32	1.05	41	1600	20	3	11	2.202	2.509	2.388	2.302	6.19	6.25	0.81
33	1.05	41	1600	20	4	11	2.165	2.409	2.178	2.09	6.19	6.63	0.86
34	2	27	1000	20	2	0	3.165	3.416	2.948	2.98	3.22	5.54	0.72
35	2	27	1000	20	3	0	2.545	3.183	2.829	2.726	3.22	6.25	0.81
36	2	27	1000	20	4	0	2.333	2.86	2.562	2.479	3.22	6.63	0.86
37	0.36	36	700	15	2	6	1.832	1.818	1.887	1.748	13.50	7.38	0.72
38	0.36	36	700	15	3	6	1.641	1.527	1.55	1.586	13.50	8.33	0.81
39	0.36	36	700	15	4	6	1.366	1.349	1.449	1.164	13.50	8.84	0.86
40	1.05	41	1600	15	2	11	3.136	3.286	3.228	3.119	4.64	7.38	0.72
41	1.05	41	1600	15	3	11	2.6365	2.517	2.823	2.907	4.64	8.33	0.81
42	1.05	41	1600	15	4	11	2.311	2.345	2.647	2.325	4.64	8.84	0.86
43	2	27	1000	15	2	0	4.174	4.149	3.714	3.683	2.42	7.38	0.72
44	2	27	1000	15	3	0	3.429	3.536	3.522	3.602	2.42	8.33	0.81
45	2	27	1000	15	4	0	2.99	3.355	3.194	3.166	2.42	8.84	0.86
46	0.36	36	700	10	2	6	2.263	1.856	2.228	1.89	9.00	11.07	0.72
47	0.36	36	700	10	3	6	1.923	1.587	2.049	1.632	9.00	12.49	0.81
48	0.36	36	700	10	4	6	1.674	1.412	1.798	1.451	9.00	13.26	0.86

ادامه جدول ۶

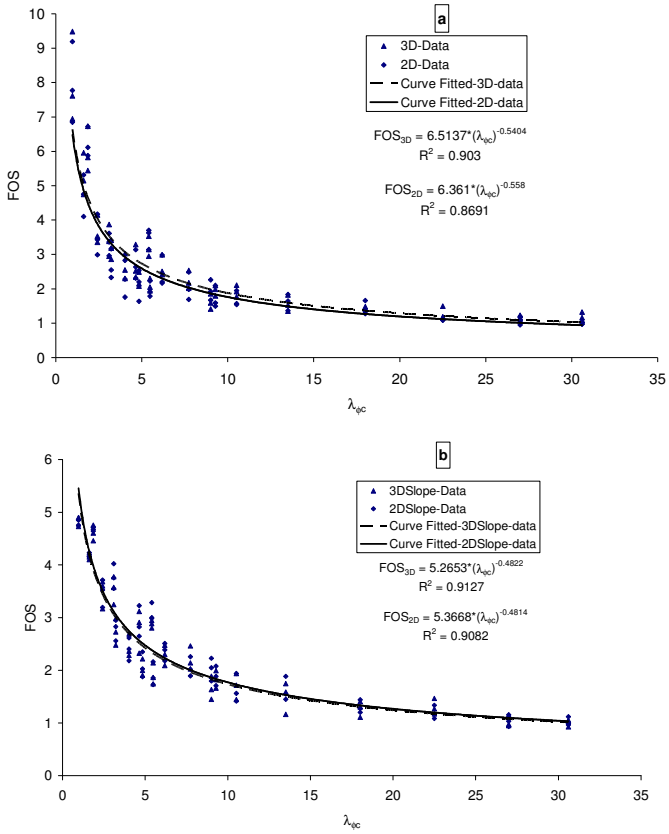
49	1.05	41	1600	10	2	11	3.613	3.874	4.022	3.774	3.09	11.07	0.72
50	1.05	41	1600	10	3	11	3.365	3.386	3.756	3.576	3.09	12.49	0.81
51	1.05	41	1600	10	4	11	2.96	2.945	3.555	3.249	3.09	13.26	0.86
52	2	27	1000	10	2	0	5.311	5.957	4.232	4.226	1.61	11.07	0.72
53	2	27	1000	10	3	0	4.755	5.15	4.152	4.153	1.61	12.49	0.81
54	2	27	1000	10	4	0	4.104	4.751	4.16	4.102	1.61	13.26	0.86
55	0.36	36	700	6	2	6	3.7	3.533	3.283	2.944	5.40	18.45	0.72
56	0.36	36	700	6	3	6	3.625	3.142	3.002	2.886	5.40	20.82	0.81
57	0.36	36	700	6	4	6	3.136	2.946	2.988	2.802	5.40	22.10	0.86
58	1.05	41	1600	6	2	11	6.72	6.733	4.712	4.756	1.86	18.45	0.72
59	1.05	41	1600	6	3	11	6.115	5.82	4.677	4.603	1.86	20.82	0.81
60	1.05	41	1600	6	4	11	5.873	5.442	4.642	4.457	1.86	22.10	0.86
61	2	27	1000	6	2	0	9.19	9.487	4.846	4.898	0.97	18.45	0.72
62	2	27	1000	6	3	0	7.77	7.614	4.756	4.897	0.97	20.82	0.81
63	2	27	1000	6	4	0	6.849	6.946	4.745	4.731	0.97	22.10	0.86

براساس نتایج جدول۶، مقادیر FoS در برابـر $\lambda_{\beta\phi}$ و همچنـین λ_G دارای پراکنـدگی زیـاد است. لذا برای داشتن روشی ساده و قابل اطمینان برای محاسـبه ضـریب پایـداری، خصوصـاً جهت تلفیق نتایج دو حالت ترانشه افقی و شیبدار، باید بـه دنبـال روش‌هـای دیگـر از جملـه روشهای ANNs باشیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی برای تخمین FoS ترانشه ها

نیاز به مدلی با قابلیت تعمیم و تخمین و عدم کارآرایی مناسب روش‌های معمول برای یافتن راهی آسان و ساده برای محاسبه FoS سبب شد که شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای مسئله مورد نظر، بررسی شود.



شکل ۶. مقادیر FoS برای حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در برابر $\lambda_{\phi c}$ (منحنی توانی با داده‌ها انطباق خوبی دارد)، (a) ترانشه افقی، (b) ترانشه با شیب ۱۸ درجه در بالای آن

شبکهٔ به‌کار رفته و بانک اطلاعاتی مدل

یک مدل شبکه عصبی مصنوعی سه لایه پرسپترون با توابع تحریک تانژانت زیگموئید (tansig) برای لایه میانی و خطی(pureline) برای لایه خروجی برای تخمین مقادیر ضرایب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

پایداری برای حالت‌های دو بعدی و سه بعدی و برای هندسه‌های مختلف نوشته و توسعه داده شد. برای پیاده کردن، آموزش و آزمایش شبکه از نرم‌افزار MATLAB7 استفاده شد. آموزش شبکه به روش Levenberg-Marquardt (LM) انجام گرفت. زیرا این روش نسبت به روش معمول انتشار خطا به عقب با مومنتوم از سرعت هم‌گرایی و کارآرایی بیش‌تری برخوردار است. در نوشتن برنامه از تکنیک‌های مخلوط کردن تصادفی داده‌ها و نرمال نمودن داده‌های ورودی و خروجی، یعنی تقسیم تمامی اعداد یک سطر یا ستون را بر حداکثر آن سطر یا ستون و تولید اعدادی بین صفر و یک، برای جلوگیری ازآموزش‌های غیرمعمول و وزن‌دهی نامناسب استفاده شده است. نرخ یادگیری شبکه ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. از بانک اطلاعاتی ارائه شده در جدول ۶ استفاده شده است. پارامترهای ورودی و خروجی مدل در جدول ۷ ارائه شده است. ستون‌های ۲ تا ۷ جدول ۶ به‌عنوان ورودی شبکه و ستون‌های ۸ تا ۱۱ خروجی شبکه در نظر گرفته شده‌است. در این پژوهش یک مجموعه فراگیراز نتایج ضرایب اطمینان، مشتمل بر۶۳ سطر عدد (برای ۲۵۲ گزینه مختلف) برای آموزش(۸۵٪)، ارزیابی(۱۰٪) و آزمایشی(۵٪) شبکه استفاده شده‌است.

جدول ۷. پارامترهای ورودی و خروجی مدل در ANN

حدود	ورودی						خروجی			
	c (kg/cm^2)	ϕ (°)	E (kg/cm^2)	1H:?V	H (m)	ψ (°)	FoS-2D	FoS-3D	SoF. 2DSlope	SoF. 3DSlope
مقدار حداکثر	2	41	1600	4	34	11	9.19	9.487	4.846	4.898
مقدار حداقل	0.36	27	700	2	6	0	0.973	1.09	0.963	0.926

ارزیابی مدل

برای مقایسه عمل‌کرد شبکه با نرون‌های میانی متفاوت، از ۵ شاخص خطا: میانگین قدر

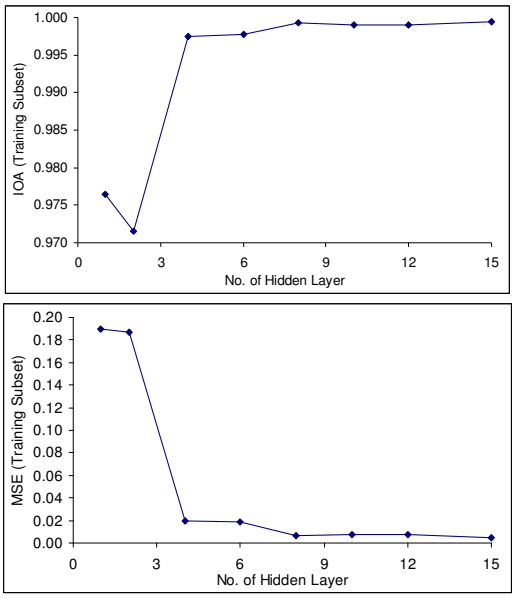
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

مطلق خطا (MAE)، میانگین خطا (MBE)، مربع میانگین خطا (MSE)، مربع مجذور میانگین خطا (RMSE) و ضریب هم‌بستگی (IOA) استفاده شده است. شاخص پنجمی در واقع رابطه بین میزان پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. درکل، هرچه چهار شاخص اولی کوچک‌تر و پنجمی بزرگ‌تر(نزدیک به ۱) باشد، به شرط تطابق با داده‌ها، عمل‌کرد شبکه دقیق‌تر است. انتخاب تابع تحریک و ساختار شبکه و تعداد تکرار با سعی و خطا تعیین شد. در قدم اول خطای شبکه‌ها با تعداد نرون‌های میانی متفاوت در مقابل مجموعه ارزیابی، برآورد گردید(شکل۷). دیده می‌شود که شبکه با ۱۰ نرون میانی، دارای کم‌ترین میزان خطا است. شکل ۸ کاهش خطا با افزایش تعداد سیکل مدل ANN نوشته شده در محیط MATLAB را نشان می‌دهد. در برنامه نوشته شده تعداد ۲۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. برای انتخاب دقیق‌تر شبکه سایر شاخص‌ها کنترل خطا برای داده‌های آموزشی و آزمایشی نیز ارزیابی شده است. با توجه به عمل‌کرد شبکه مورد نظر در برابر داده‌های آموزشی، آزمایشی و ارزیابی، در نهایت شبکه با ۱۰ نرون میانی به علت دارا بودن قدرت پیش‌بینی بهتر و میزان خطای کم‌تر به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شده است. جدول ۸ مقادیر MAE، MBE، MSE، RMSE و IOA برای شبکه با ۱۰ نرون میانی را نشان می‌دهد. مقادیر IOA برای هر سه مجموعه بیش از ۰/۹ است که طبق توضیحات Smith (۱۹۸۶)، برای IOA بیش از ۰/۸، مدل ارائه شده قابلیت تخمین بسیار مناسب نتایج را در محدوده داده‌های موجود در کاتولوک دارا است. شکل ۹ FoS محاسبه شده با PLAXIS را با نتایج حاصل از شبکهٔ عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد که انطباق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. لذا پس از تربیت شبکه با دادن تعدادی پارامتر به مدل، ضرایب پایداری به آسانی محاسبه می‌شود. ضمناً می‌توان از قابلیت تعمیم شبکه عصبی در پیش بینی ضرایب پایداری موارد بررسی نشده هم بهره گرفت.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]



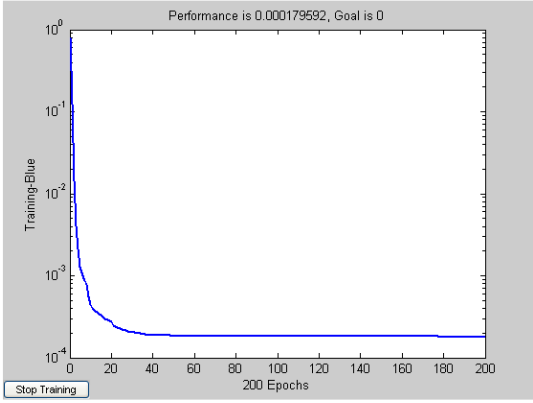
(الف) (ب)

شکل۷. شاخص‌های خطا در برابر تعداد لایه‌های مخفی میانی الف) MSE، ب) IOA

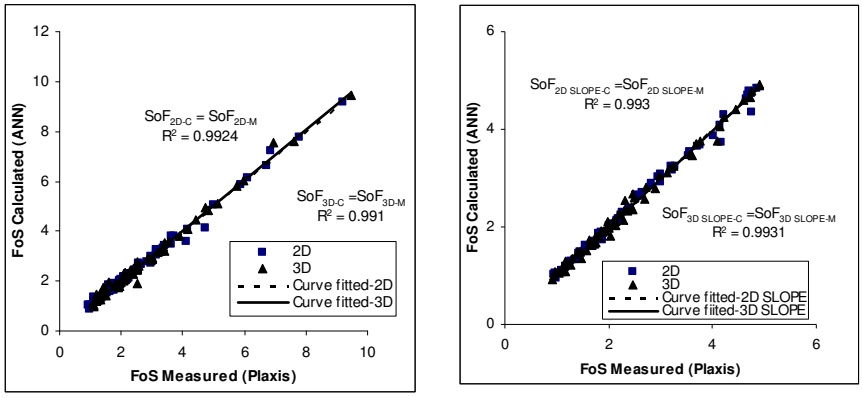
جدول۸. عمل‌کرد مدل نسبت به شاخص‌های خطا برای شبکه با ۱۰ نرون میانی

10 Hidden layers	Training subset	Testing subset	Validation subset
Total Error IOA	0.9990	0.9868	0.9917
Error IOA	0.9984	0.9958	0.9909
Total Error MAE	0.0010	0.0726	0.0250
Error MAE	0.0003	0.0251	0.1256
Total Error MBE	-0.0010	-0.0726	-0.0250
Error MBE	-0.0003	0.0251	0.1256
Total Error MSE	0.0073	0.0046	0.0054
Error MSE	0.0100	0.0017	0.0061
Total Error RMSE	0.0857	0.0677	0.0733
Error RMSE	0.0998	0.0409	0.0783

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]



شکل ۸. کاهش خطا با افزایش تعداد سیکل برای مدل نوشته شده با استفاده از ANN در محیط MATLAB



شکل۹. مقایسه مقادیر ضرایب اطمینان حاصل از PLAXIS با مقادیر حاصل از ANN

وزن هر یک از نرون‌های مخفی، وزن پارامترهای خروجی و توارش(Bias) آن‌ها در جدول ۹ برای ترانشه‌ها ارائه شده است که از این طریق می‌توان فرمولی برای محاسبهٔ ضرایب اطمینان شیب مورد نظر ارائه کرد. برای مسئله مورد نظر رابطه بین ضریب اطمینان و سایر پارامترهای شیب در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$FoS=pureline(w2(tansig(w1*TestDataIn)+b1)+b2) \quad (۴)$$

pureline : تابع تحریک خطی برای لایه خروجی، tansig : تابع تحریک تانژانت زیگموئید برای لایه میانی، w1 و w2 ماتریس‌های وزن به ترتیب برای نرون‌های مخفی لایه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

میانی و خروجی، b1 و b2 ماتریس‌های وزن به ترتیب برای لایه مخفی میانی و توارش(Bias) لایه خروجی است. باید ذکر شود که فرمول بالا یک تابع تقریب برای محاسبه ضریب اطمینان است. این‌که ورودی‌ها و خروجی‌ها چه رابطه‌ای با هم دارند معلوم نیست و از این نظر شبکه‌های عصبی مصنوعی یک جعبه سیاه (Black Box) است.

جدول ۹. مقادیر وزن‌ها و توارش برای مدل ANNs نوشته شده برای ترانشه‌ها در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی

w1 = netMILAD.iw{1,1}	w2= netMILAD.lw{2,1}	b1= netMILAD.b{1,1}	b2= etMILAD.b{2,1}
Hidden c ϕ E H 1H:?V ψ Neuron	FoS_{2D} FoS_{3D} $FoS_{2D\text{-}SLOPE}$ $FoS_{3D\text{-}SLOPE}$	Bias hidden layer	Bias Output layer
1 -1.8219 -5.9515 0.1415 4.8969 5.4739 1.8953	-0.3133 -0.560 0.1680 0.1977	2.8021	2.3955
2 -3.0593 5.3022 1.3353 4.7985 0.0749 0.0683	0.1844 -1.774 1.4680 0.0508	-3.7706	3.8840
3 -1.7849 -2.7062 3.2506 -9.9496 0.1017 -1.3517	2.3005 1.1983 0.3807 0.7947	2.0600	1.4408
4 0.3805 5.7197 -2.8392 1.7667 -0.1795 -3.4549	-0.5740 0.0488 -2.253 -1.7318	1.2024	1.8505
5 0.7063 -4.3226 -1.2690 0.0720 3.9955 2.3080	-0.3368 0.1389 -0.459 -0.3898	0.0740	
6 0.8914 -1.0147 2.5360 0.3334 -1.5538 -4.0728	0.1724 -0.9190 0.3276 0.0606	2.6471	
7 -0.6491 5.4323 2.2465 4.4012 -0.0384 2.0530	-0.1112 0.8119 -1.4397 -0.2315	-6.5062	
8 -3.6203 6.2192 1.1354 0.0134 -6.1870 -0.7655	-0.0781 0.3495 -0.1306 -0.0084	-0.2262	
9 2.2842 -3.4148 -4.6827 6.4354 0.1340 -5.8969	-0.1225 0.7342 -0.2192 0.0013	-0.6214	
10 2.2360 -3.5914 -3.2052 -0.1442 0.9595 3.5064	1.4194 -0.8164 1.9786 1.7289	2.2669	

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

نتیجه‌گیری

این مقاله، نتایج تحلیل پایداری ترانشه‌های مسیرهای دسترسی در محوطه برج میلاد با استفاده از روش‌های عددی و شبکه‌های عصبی مصنوعی را ارائه می‌دهد. براساس بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر قابل ارائه است:

۱. ویژگی‌های مهندسی آبرفت درشت‌دانه محوطه برج میلاد تهران به شدت متأثر از سیمانی شدن است که باید در انتخاب آزمایش‌های مناسب برای تعیین پارامترهای مصالح در تحلیل‌ها مدنظر قرار گیرد. همان‌گونه که نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد در بسیاری از حالت‌ها که ترانشه دارای ارتفاع بلند هستند ضرایب پایداری نزدیک ۱ است. بدیهی است که در صورت اندکی هوازدگی و در نتیجه تغییر پارامترها، بسیاری از آن‌ها دچار ناپایداری‌های جزئی خواهد شد. لذا نیاز به پایدارسازی آن‌ها است.

۲. هرچند نرم افزار PLAXIS برای تحلیل پایداری ترانشه‌ها در حالت دو بعدی و سه بعدی گزینه مناسبی است، اما استفاده از آن مستلزم صرف وقت و هزینهٔ خصوصاً از جنبه انتخاب پارامتر و مدل‌سازی هندسه ترانشه است.

۳. ارائه ضریب پایداری ترانشه بر اساس مشخصات هندسی ترانشه و ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکلی آبرفت‌های سیمانی شده به صورت روابط ساده برای مقاصد مهندسی، خصوصاً در طراحی‌های اولیه مهم است. براساس نتایج این تحقیق، هرچند پارامتر بی بعد $\lambda_{\phi c}$، پارامتر مناسبی برای تخمین ضریب پایداری شیب‌ها است اما پارامتر جامعی نیست.

۴. مقایسه نتایج ضریب پایداری تحلیلهای دوبعدی و سه بعدی با استفاده از پارامتر بی‌بعد $\lambda_{\phi c}$ برای ترانشه‌های موجود آبرفت سیمانی شده اطراف برج میلاد نشان می‌دهد در حالت ترانشه با سطح افقی، مقادیر تحلیل سه بعدی اندکی بیش از مقادیر تحلیل دوبعدی کرنش صفحه‌ای است، اما برای ترانشه با شیب ۱۸ درجه در بالای ترانشه تا $\lambda_{\phi c}$ در حدود ۵ مقادیر ضریب اطمینان تقریباً با هم برابر، اما در مقادیر $\lambda_{\phi c}$ بیش‌تر، ضریب اطمنان تحلیل دو بعدی اندکی بیش‌تر از مقادیر نظیر سه بعدی است.

۵. شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANNs) پتاسیل مناسبی در به‌دست آوردن ضریب پایداری ترانشه‌های مسیرهای دسترسی برج میلاد تحت شرایط استاتیکی برای ترانشه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

در همهٔ حالت‌های مورد بررسی را دارد. ضمناً می‌توان از قابلیت تعمیم شبکه عصبی مصنوعی برای موارد بررسی نشده هم بهره گرفت.

۶. در مورد انتخاب شیب بهینه خاک‌برداری و پایدار، انجام تحلیل‌های شبه استاتیکی نیز لازم است.

تشکر و قدردانی

بخشی از داده‌های این مقاله از اسناد موجود در بانک اطلاعات ژئوتکنیک کشور، واقع در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن اخذ شده است که بدین‌وسیله از آن مرکز تشکر می‌شود. ضمناً برنامه ANN نوشته شده در MATLAB برای محاسبه ضریب پایداری از طریق نویسنده دوم قابل دسترسی است.

منابع

۱. اصغری، ا.، تاثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی و تغییرشکلی خاک‌های درشت‌دانه با نگرشی به آبرفت‌های تهران، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۱).

۲. پهلوان، ب.، فاخر، ع.، خامه چیان، م. و صنیعی، ه.، مطالعه متغییرهای تغییرشکل پذیری آبرفت‌های درشت‌دانه تهران با استفاده از پرسیومتر منارد، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم، بهار و تابستان، شماره ۴۷-۴۸، ۹۶ (۱۳۸۲)- ۱۱۷.

۳. پهلوان، ب.، مطالعه پارامترهای تغییرشکل آبرفت درشت‌دانه تهران با استفاده از پرسیومتر، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۱).

۴. حائری، س. م.، یثربی، س. ش.، ارومیه‌ای، ع.، و اصغری، ا.، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آبرفت درشت‌دانه و سیمانی شده تهران ، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم، بهار و تابستان، شماره ۴۷-۴۸، (۱۳۸۲) ۲- ۱۵.

۵. گزارش ژئوتکنیک احداث ساختمان مرتفع پایگاه انتقال خون تهران، مهندسان مشاور ماندرو (۱۳۷۱).

۶. گزارش مرحله اول مطالعات ژئوتکنیک در محل ابنیه فنی مسیرهای دسترسی برج میلاد، مهندسان مشاور دریا خاک و پی (۱۳۸۲).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

۷. گزارش میانکاردر محل مجتمع تجاری-تفریحی جنوبی برج میلاد، مهندسان مشاور دریا خـاک و پی (بهار۱۳۸۲).

۸. یثربـی، س. ش.، حـائری، س. م.، اصـغری، ا.، توفیـق ریحـانی، م. ح.، تـاثیر سیمانتسـیون بـر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل خاک‌های درشت‌دانه با نگرشی به آبرفـت‌هـای تهـران، گـزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن(۱۳۸۰).

9. Banimahd, M., Yasrobi, S.S. & Woodward, P.K., Artificial neural network for stress–strain behavior of soils: Knowledge based verification, Computers and Geotechnics, ELSEVIER, 32, (2005) 377-386.

10. Baziar, M.H., & Jafarian, Y., Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: capacity energy, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, (2007) 1056–1072.

11. Bishop, A.W., The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes, Geotechnique, 5, (1955) 7–17.

12. Clarke, B.G., Pressuremeters in geotechnical design, Chapman & Hall, Cambridge, U.K. (1995).

13. Duncan, M., Soil slope stability analysis, Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, Washington Press, (1996) 337–371.

14. Farzaneh, O. & Askari, F., Three-dimensional analysis of nonhomogeneous slope, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.129, 2, (2003) 137-145.

15. Hoek, E. & Bray J.W., Rock Slope Engineering, 3rd edition, Institution of Mining and Metallurgy, London (1981).

16. Janbu, N., Application of composite slip circles for stability analysis, In: Proc. fourth European Conference on stability of earth slopes, Vol. 3, (1954) 43–49.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]

17. Jing, L. & Hudson J.A., Numerical methods in rock mechanics, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 39, (2002) 409–427.
18. Jing, L., A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 40, (2003) 283–353.
19. Krumbein, W.C., Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, Journal of Sedimentary Petrology, 11, (1941) 64-72.
20. Plaxis7.2, User manual, Brinkgreve R. B. J. and Vermeer, P. A.
21. Riben, E.H., Geological observations on alluvial deposits in northern Iran, Geological Survey of Iran, Report No. 9 (1966).
22. Sakellariou, M.G. & Ferentinou, M.D., A study of slope stability prediction using neural networks, Geotechnical and Geological Engineering, 23, (2005) 419–445.
23. Sarma, S.K., Seismic stability of earth dams and embankments, Geotechnique, 25, 4, (1975) 743–761.
24. Smith, G.N., Probability and statistics in civil engineering. London: Collins (1986).
25. Spencer, E., A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, Geotechnique, 17, (1967)11–26.
26. Taylor, D.W., Stability of earth slopes, J. Boston Soc. Civil Eng., 24, (1937) 197.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.2.5]