

## 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

عطاآقایی آرای: دانشگاه علم و صنعت ایران،

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

پذیرش ۸۸/۱۲/۲

تاریخ: دریافت ۸۸/۳/۱۰

### چکیده

بررسی ویژگی‌های مهندسی مصالح ترانشه‌های آبرفتی و سیمانی شده محوطه 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 PLAXIS 3D Tunnel و PLAXIS 7.2، 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  $18^\circ$  نسبت به افق در بالا) است. برای مسئله مورد نظر، برنامه شبکه‌های عصبی مصنوعی سه لایه پرسپترون (MLP) در محیط MATLAB 7 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

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 در نظر گرفته 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) و (Spencer, ۱۹۶۷) و (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 از این فرضیات مناسب هستند.

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 ترانسه‌ها، متفاوت از فرض‌های کرنش صفحه‌ای بوده و بنا بر این انجام تحلیل‌های پایداری سه بعدی ترانسه‌ها 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 همه 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 توأم) 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 شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای قابلیت‌های تخمین و تعمیم است و به همین دلیل در موضوعات مختلف خاک و پی در سال‌های اخیر به کار گرفته می‌شوند که به‌عنوان مثال می‌توان از پژوهش‌گرانی چون Banimahd و همکاران (۲۰۰۵، Sakellariou و Ferreninou، ۲۰۰۵، Baziar و Jafarian، ۲۰۰۷) نام برد.

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

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 ترانسه 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 ویژگی‌های مقاومتی آبرفت سیمانی ارزیابی می‌شود.

### مشخصات محل بررسی شده

محل بررسی شده شیب‌های تند و ترانسه‌های 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 ترانسه‌های 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 ترانسه‌های راه‌های دسترسی و اثرات آن‌ها بر پایداری بسیار مهم است. به طوری که اخیراً، با توجه به اثرات هوازدگی در کاهش مقاومت و هم‌چنین برای محافظت شیب‌ها و ترانسه‌های 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.

### 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 و شیب لایه‌بندی آن‌ها در محل بررسی شده در حدود ۲۵-۳۰ 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 جدول ۱ 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).

جدول ۱. 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 (گیشنا) (محل ۱)	۶۱	۲۷	۱۰	۲
ساخت‌گاه هتل پنج ستاره در مجموعه برج میلاد تهران (محل ۲)	۶۷	۲۲	۷	۴

### 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 محل ۱، مواد رسی، شامل اکسیدهای آهن و سیلیس (مثل مونت موریونیت)، مواد کلسیتی شامل کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 ترانسه‌های به ظاهر پایدار فعلی ممکن است به مرور زمان در اثر عوامل جوی و یا هوازندگی ناپایدار شوند.

### گروه‌بندی خاک برداری

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

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

محل اخذ نمونه		اکسیدها (%)
محل ۱- سیمانی شده متوسط	محل ۲- سیمانی شده قوی	
۵۴/۶۱	۹/۰	$\text{SiO}_2$
۱۵/۴۵	۱/۸۵	$\text{Al}_2\text{O}_3$

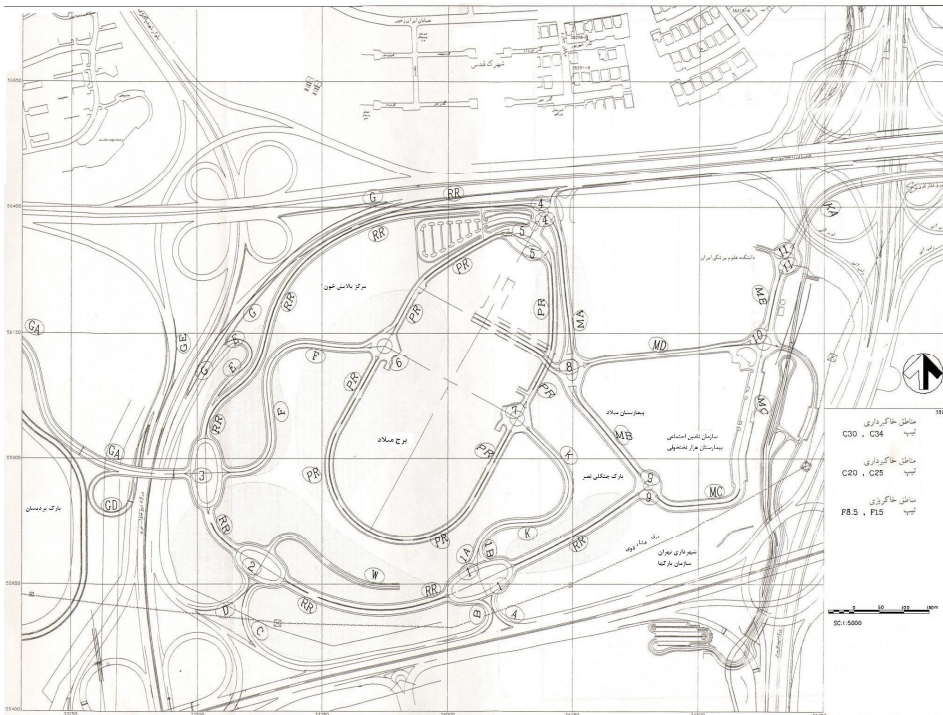
۲/۰	۵/۰	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴۸/۱۶	۱۲/۶	CaO
۰/۶	۰/۴۰	MgO
-	۰/۰۱	SO <sub>3</sub>
۰/۰۵	۰/۰۲۱	Cl
۳۷/۶۶	۹/۲۰	مفقودی در اثر ذوب
۸۶/۰	۲۲/۵	CaCO <sub>3</sub> برآوردی

جدول ۳. گروه‌بندی خاک‌برداری بر حسب ارتفاع و محل

شماره	شرح	تیپ	تعداد مقاطع	محل قرارگیری مقاطع	ملاحظات
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 ۱۵ تا ۲۰ متر	C20	۸	مسیرهای W, RR, K و PR	نواحی جنوبی برج
۵	خاک‌برداری به عمق ۲۱ تا 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 ۳۴ متر	C34	۲	مسیرهای RR و C در کنار میدان ۲	بحرانی‌ترین خاک‌برداری

### لایه‌بندی خاک و نتایج آزمایش‌ها

سه نوع لایه‌بندی متمایز برای تحلیل این ترانسه‌ها 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.



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 تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک‌های درشت‌دانه و سیمانی‌شده آبرفت درشت‌دانه تهران، به طور معمول برآورد پارامترهای مقاومتی برشی براساس نمونه‌های دست‌خورده 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).



آزمایش‌های درجای صحرایی انجام شده در محل برج، شامل برش درجا (برای تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، بارگذاری صفحه (برای تعیین متغیرهای تغییرشکل پذیری و ضریب واکنش بستر)، بارگذاری صفحه در لبه ترانسه (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  $30 \times 30 \times 50$  سانتی‌متر، سه محوری به قطر  $10$  سانتی‌متر، دانه‌بندی و هیدرومتری) برای به‌دست آوردن پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی آبرفت‌های مورد نظر انجام شده است (یثربی و همکاران،  $1380$ ؛ حائری و همکاران،  $1382$ ؛ پهلوان و همکاران،  $1382$ ؛ پهلوان،  $1381$ ؛ اصغری،  $1381$ ؛ ماندرو،  $1371$ ؛ دریا خاک و پی،  $1382$ ).

بهترین متغیر حاصل از پرسیومتری مدول یانگ است (Clarke،  $1995$ ؛ پهلوان  $1381$ ) با توجه به مقدار نشست  $24/3$  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 جدول ۴ ارائه شده است.

### مدلسازی عددی

برای محاسبه FoS ترانسه‌ها 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 کلاهدک و در واقع از نخستین مدل‌های رفتاری

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:

$$E: \text{مدول یانگ [ kN/m}^2 \text{]}$$

$$V: \text{ضریب پواسن (بدون بعد)}$$

$$\phi: \text{زاویه اصطکاک (درجه)}$$

$$c: \text{چسبندگی [ kN/m}^2 \text{]}$$

$$\psi: \text{زاویه اتساع (درجه)}$$

یادآوری می‌شود که در صورت نبود اطلاعات آزمایشگاهی مناسب، برای محاسبه زاویه اتساع ( $\psi$ ) از رابطه  $\psi = \phi - 30^\circ$  استفاده می‌شود. در حالت‌هایی که  $\phi$  کم‌تر از  $30^\circ$  درجه باشد  $\psi$  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 PLAXIS 7.2 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

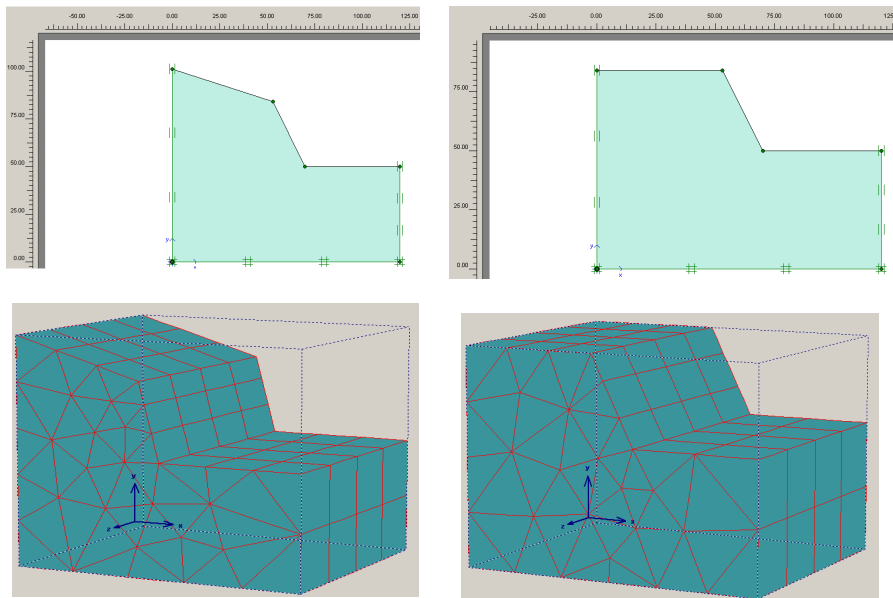
L2	L1-2	L1-1	مشخصات
قسمت‌های شمالی	قسمت تختانی خاک تختانی ناحیه شمالی و کل ناحیه جنوبی محدوده ساختگاه	قسمت تختانی خاک تختانی ناحیه شمالی و کل ناحیه جنوبی محدوده ساختگاه	محل مشاهده شده
رس گاهی همراه ماسه و شن رنگ قهوه‌ای و سخت	خاک درشت‌دانه شن رس‌دار همراه ماسه و یا ماسه رس‌دار همراه شن با دانه‌بندی خوب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

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

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 جدول ۵ 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 به کار رفته در تحلیل‌ها برای ترانشه تیپ C34 و برای شیب ۱ افقی: ۲ قائم، در دو حالت سطح بالای ترانشه افقی و

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

شکل ۳ تغییر شکل‌های کل برای حالت دو بعدی برای ترانشه به ارتفاع ۳۴ متر، شیب ۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1 را نشان می‌دهد که به وضوح هندسه سطح ناپایدار قابل تشخیص است. شکل ۴ بردار جابه‌جایی‌ها را در یک صفحه میانی، برای ترانشه مذکور، به ترتیب برای حالت دو بعدی و سه بعدی را نشان می‌دهد که باز هم هندسه بخش ناپایدار به آسانی قابل 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 متر ۲ قائم و مصالح L1-1 نشان می‌دهد. به کشش افتادن بخش‌های بالای ترانشه جالب است.



ب

الف

شکل ۲. هندسه به کار 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

### تجزیه و تحلیل نتایج

در جدول ۶، تقریباً اکثر پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر ضریب پایداری ارائه شده است. ارائه فرمول‌های تجربی به‌طوری که بتوانند اثر چندین پارامتر را در محاسبه ضریب پایداری شیب در نظر بگیرد، ابزار بسیار مفیدی در تخمین پایداری اولیه شیب‌ها هستند. لذا با معرفی پارامترهای بی بعد (روابط ۱ الی ۳)، برای یافتن منحنی و فرمول تجربی ساده و کاربردی، بررسی نتایج دنبال شد.

$$\lambda_{\phi c} = H \cdot \gamma / c \cdot \tan(\phi) \quad (1)$$

$$\lambda_G = b / H \cdot \tan(\beta) \quad (2)$$

$$\lambda_{\beta\phi} = \tan(\beta) / \tan(\phi) \quad (3)$$

نتایج تحلیل برای پارامترهای بی بعد شده در جدول ۶ ارائه شده است. به‌عنوان نمونه نتایج ضریب اطمینان (FoS) حاصل از تحلیل‌ها در برابر پارامترهای بی بعد حاصل از رابطه (۱) در شکل ۶ ارائه شده است. شکل ۶ (a,b) مقادیر FoS برای حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در برابر  $\lambda_{\phi c}$  (رابطه ۱) را به ترتیب برای ترانسه افقی و ترانسه با شیب

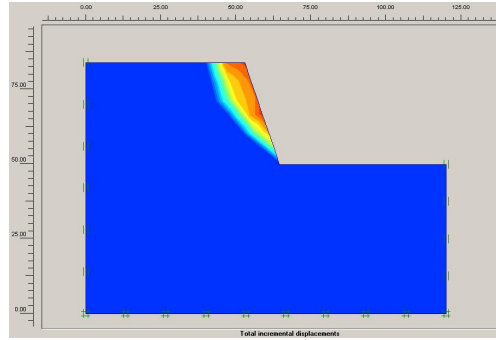
جدول ۵. مشخصات تحلیل‌های انجام شده

شماره	گروه خاک برداری	جنس خاک	شیب (افقی)؟ (قائم)	شماره	گروه خاک برداری	جنس خاک	شیب (افقی)؟ (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

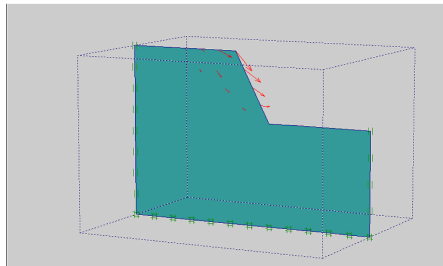
۳	L2	C14	۴۴	۴	L1-1	C30	۱۲
۴	L2	C14	۴۵	۲	L1-2	C30	۱۳
۲	L1-1	C10	۴۶	۳	L1-2	C30	۱۴
۳	L1-1	C10	۴۷	۴	L1-2	C30	۱۵
۴	L1-1	C10	۴۸	۲	L2	C30	۱۶
۲	L1-2	C10	۴۹	۳	L2	C30	۱۷
۳	L1-2	C10	۵۰	۴	L2	C30	۱۸
۴	L1-2	C10	۵۱	۲	L1-1	C25	۱۹
۲	L2	C10	۵۲	۳	L1-1	C25	۲۰
۳	L2	C10	۵۳	۴	L1-1	C25	۲۱
۴	L2	C10	۵۴	۲	L1-2	C25	۲۲
۲	L1-1	C6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

۱۸ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود منحنی توانی با داده‌ها انطباق خوبی دارد. براساس نتایج برای ترانسه افقی، مقادیر ضریب پایداری در حالت سه بعدی اندکی بیش از مقادیر نظیر دوبعدی در یک  $\lambda_{\phi c}$  معین است. اما برای ترانسه با شیب ۱۸ درجه در بالای ترانسه تا  $\lambda_{\phi c}$  در حدود ۵، مقادیر ضریب پایداری دو حالت تقریباً برابر، اما در مقادیر بیشتر  $\lambda_{\phi c}$  روند برعکس حالت ترانسه با سطح بالای افقی می‌شود. در کل نتایج ضریب پایداری در حالت ترانسه دارای شیب، کم‌تر از مقادیر نظیر در حالت ترانسه 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.

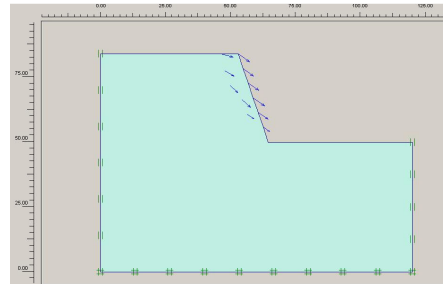
تحلیل پایداری ترانشه‌های مسیرهای دسترسی در محوطه برج میلاد با استفاده از روش‌های عددی ...



شکل ۳. نمایش تغییرشکل‌های کل برای تحلیل دوبعدی برای ترانشه با ارتفاع ۳۴ متر، شیب ۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1

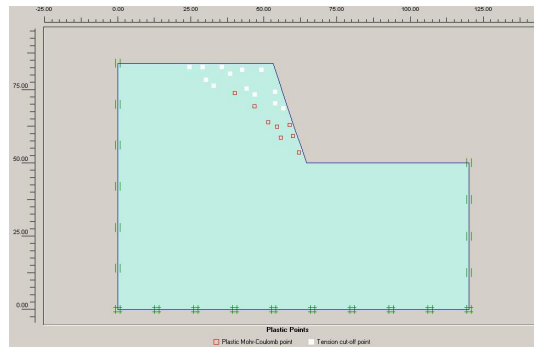


ب



الف

شکل ۴. نمایش برداری جابه‌جایی‌ها برای ترانشه به ارتفاع ۳۴ متر، ۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1. الف) تحلیل دو بعدی، ب) تحلیل سه بعدی در یک صفحه میانی



شکل ۵. نقاط پلاستیک شده و تحت کشش در حالت دوبعدی برای ترانشه به ارتفاع ۳۴ متر با شیب ۱ افقی: ۲ قائم و مصالح L1-1

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

	C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	H (m)	1H:V	ψ (°)	SaF. 2D	SaF. 3D	SaF. 2DSlope	SaF. 3DSlope	λ <sub>q</sub> =HY/C*ATAN(φ)	λ <sub>q</sub>	λ <sub>q</sub>
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	1.087	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



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

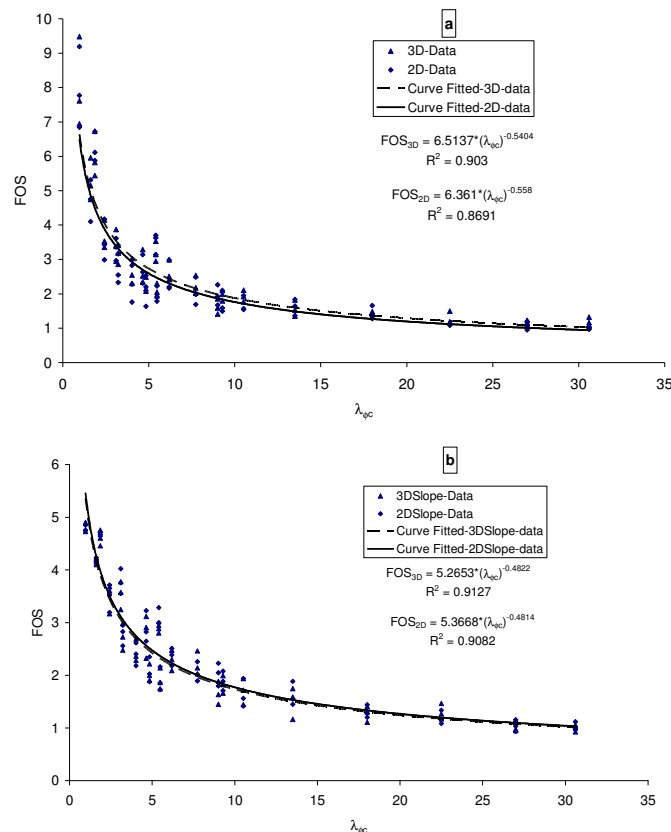
ادامه جدول ۶

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 جدول ۶، مقادیر FOS در برابر  $\lambda\beta_0$  و همچنین  $\lambda G$  دارای پراکنندگی زیاد است. لذا برای داشتن روشی ساده و قابل اطمینان برای محاسبه ضریب پایداری، خصوصاً جهت تلفیق نتایج دو حالت ترانشه افقی و شیبدار، باید به دنبال روش‌های دیگر از جمله روشهای ANNs باشیم.

### استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین FoS ترائشه‌ها

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  $\lambda_{yc}$  (منحنی توانی با داده‌ها انطباق خوبی دارد)، (a) ترائشه افقی، (b) ترائشه با شیب ۱۸ درجه در بالای آن

### شبکه به کار 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

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 مومتوم 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 از آموزش‌های 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 شده است. در این پژوهش یک مجموعه فراگیر از نتایج ضرایب اطمینان، مشتمل بر ۶۳ سطر عدد (برای ۲۵۲ گزینه مختلف) برای آموزش (۸۵٪)، ارزیابی (۱۰٪) و آزمایشی (۵٪) شبکه استفاده شده است.

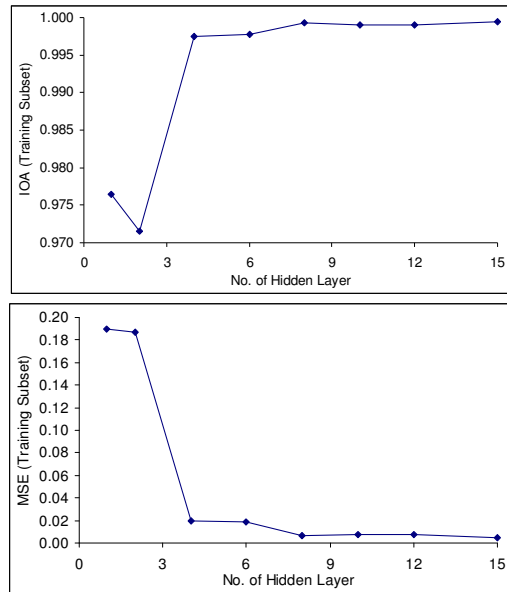
جدول ۷. پارامترهای ورودی و خروجی مدل در ANN

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

### ارزیابی مدل

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

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. در کل، 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 (شکل ۷). 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 به عنوان 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 شبکه 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 پیش‌بینی ضرایب پایداری موارد بررسی نشده هم بهره گرفت.

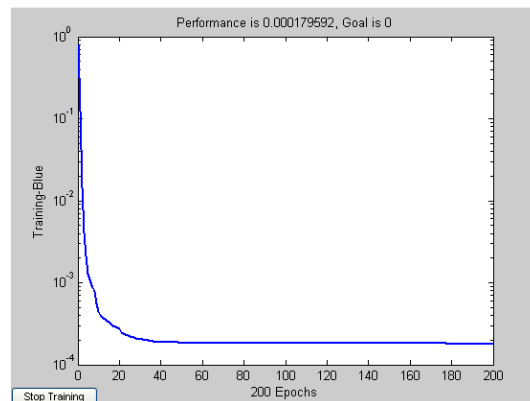


(ب)

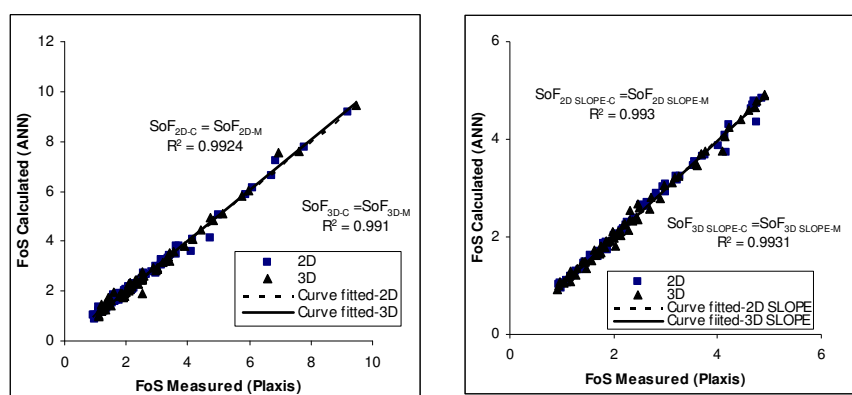
(الف)

شکل ۷. شاخص‌های خطا در برابر تعداد لایه‌های مخفی میانی (الف) MSE، (ب) IOA  
 جدول ۸. عمل کرد 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



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



شکل ۹. 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 ترانسه‌ها ارائه شده است که از این طریق می‌توان فرمولی برای محاسبه ضرایب اطمینان شیب مورد نظر ارائه کرد. برای مسئله مورد نظر رابطه بین ضرایب اطمینان و سایر پارامترهای شیب در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$FoS = \text{pureline}(w2(\text{tansig}(w1 * \text{TestDataIn}) + b1) + b2) \quad (4)$$

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

میانی و خروجی،  $b_1$  و  $b_2$  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. این که 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 ترانسه‌ها در حالت‌های دو

بعدی و سه بعدی

$w_1 = \text{netMILAD.iw}\{1,1\}$				$w_2 = \text{netMILAD.lw}\{2,1\}$			$b_1 = \text{netMILAD.b}\{1,1\}$	$b_2 = \text{etMILAD.b}\{2,1\}$	
Hidden	$c$	$\phi$	E	H	FoS <sub>2D</sub>	FoS <sub>3D</sub>	FoS <sub>2D</sub>	Bias hidden layer	Bias Output layer
1H:?	V	$\psi$			SLOPE	FoS <sub>3D</sub> .SLOPE		2.8021	2.3955
Neuron								-3.7706	3.8840
1	-1.8219	-5.9515	0.1415		-0.3133	-0.560	0.1680	2.0600	1.4408
	4.8969	5.4739	1.8953		0.1977			1.2024	1.8505
2	-3.0593	5.3022	1.3353		0.1844	-1.774	1.4680	0.0740	
	4.7985	0.0749	0.0683		0.0508			2.6471	
3	-1.7849	-2.7062	3.2506	-	2.3005	1.1983	0.3807	-6.5062	
	9.9496	0.1017	-1.3517		0.7947			-0.2262	
4	0.3805	5.7197	-2.8392		-0.5740	0.0488	-2.253	-0.6214	
	1.7667	-0.1795	-3.4549		1.7318			2.2669	
5	0.7063	-4.3226	-1.2690		-0.3368	0.1389	-0.459		
	0.0720	3.9955	2.3080		0.3898				
6	0.8914	-1.0147	2.5360		0.1724	-0.9190	0.3276		
	0.3334	-1.5538	-4.0728		0.0606				
7	-0.6491	5.4323	2.2465		-0.1112	0.8119	-1.4397		
	4.4012	-0.0384	2.0530		0.2315				
8	-3.6203	6.2192	1.1354		-0.0781	0.3495	-0.1306		
	0.0134	-6.1870	-0.7655		0.0084				
9	2.2842	-3.4148	-4.6827		-0.1225	0.7342	-0.2192		
	6.4354	0.1340	-5.8969		0.0013				
10	2.2360	-3.5914	-3.2052	-	1.4194	-0.8164	1.9786		
	0.1442	0.9595	3.5064		1.7289				



### نتیجه‌گیری

این مقاله، نتایج تحلیل پایداری ترانسه‌های مسیره‌های 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 ترانسه دارای ارتفاع بلند هستند ضرایب پایداری نزدیک ۱ است. بدیهی است که در صورت اندکی هوازگی 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 ترانسه‌ها در حالت دو بعدی و سه بعدی گزینه مناسبی است، اما استفاده از آن مستلزم صرف وقت و هزینه خصوصاً از جنبه انتخاب پارامتر و مدل‌سازی هندسه ترانسه است.
۳. ارائه ضریب پایداری ترانسه بر اساس مشخصات هندسی ترانسه 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  $\lambda_{qc}$ ، 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 بی بعد  $\lambda_{qc}$  برای ترانسه‌های موجود آبرفت سیمانی شده اطراف برج میلاد نشان می‌دهد در حالت ترانسه با سطح افقی، مقادیر تحلیل سه بعدی اندکی بیش از مقادیر تحلیل دوبعدی کرنش صفحه‌ای است، اما برای ترانسه با شیب ۱۸ درجه در بالای ترانسه تا  $\lambda_{qc}$  در حدود ۵ مقادیر ضریب اطمینان تقریباً با هم برابر، اما در مقادیر  $\lambda_{qc}$  بیشتر، ضریب اطمینان تحلیل دو بعدی اندکی بیش‌تر از مقادیر نظیر سه بعدی است.
۵. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) پتانسیل مناسبی در به‌دست آوردن ضریب پایداری ترانسه‌های مسیره‌های دسترسی برج میلاد تحت شرایط استاتیکی برای ترانسه

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 متغیرهای تغییرشکل پذیری آبرفت‌های درشت‌دانه تهران با استفاده از پرسوومتر 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 پرسوومتر، 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، ۱۵ (۱۳۸۲) - ۲.
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).

۷. گزارش میانکاردر محل مجتمع تجاری-تفریحی جنوبی برج میلاد، مهندسان مشاور دریا خاک و پی (بهار ۱۳۸۲).
۸. یثربی، س. ش.، حائری، س. م.، اصغری، ا.، توفیق ریحانی، م. ح.، تاثیر سیمان‌تسیون بر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل خاک‌های درشت‌دانه با نگرشی به آبرفت‌های تهران، گزارش 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.

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.