



مطالعه عددی سه بعدی تأثیر کنج‌های محدب بر جابه‌جایی‌های ناشی از عملیات گودبرداری برای دیواره‌های پایدارسازی شده با روش میخ‌گذاری

سروش خداوردیان، محمد حاذقیان*، مریم مختاری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

گودبرداری عمیق

میخ‌گذاری

کنج محدب

تحلیل سه‌بعدی

FLAC^{3D}

خلاصه: در بسیاری از پروژه‌های گودبرداری، شکل پلان گودبرداری غیرمنظم و دارای کنج‌های محدب و مقعر است. در عمل، اغلب مواقع از تحلیل‌های دوبعدی (کرنش مسطح) برای کنترل ضریب اطمینان و برآورد تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری در کنج‌های محدب و مقعر استفاده می‌شود. اما بر خلاف کنج‌های مقعر، استفاده از تحلیل‌های دوبعدی برای کنج‌های محدب غیرمحافظه‌کارانه است. مطالعه حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی به مطالعه اثرات کنج محدب بر تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری برای دیواره‌های پایدارسازی شده با روش میخ‌گذاری می‌پردازد. بدین منظور، یک مطالعه پارامتریک انجام می‌شود که شامل تحلیل‌های تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی نُه دیوار پایدارسازی شده با روش میخ‌گذاری با سه ارتفاع و سه نوع خاک متفاوت است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که طول ناحیه تحت تأثیر کنج (ناحیه‌ای از اطراف کنج محدب که در آن مقادیر نشست سه‌بعدی در محل تاج گود بزرگ‌تر از مقدار متناظر دوبعدی است) با کاهش مقاومت خاک افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر نسبت نشست سه‌بعدی به دوبعدی در طول ناحیه تحت تأثیر کنج به ارتفاع گود و نوع خاک وابسته نیست. همچنین نتایج نشان می‌دهد که آزمایش دادن به میخ‌ها در طول ناحیه تحت تأثیر کنج به صورت قابل توجهی جابه‌جایی‌ها در این ناحیه را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر با توسعه شهرنشینی و افزایش جمعیت، لزوم طراحی ساختمان‌های بلند مرتبه اجتناب ناپذیر گردیده است. از طرفی محدودیت ارتفاع در ساخت و ساز در برخی از اماکن و شهرهای تاریخی و افزایش روز افزون ارزش زمین در چند سال اخیر، بسیاری از مالکان را مجاب به احداث ساختمان دارای چند طبقه زیرزمین نموده است. افزایش عمق گودبرداری به ویژه در مناطق شهری در مجاورت ساختمان‌ها و معابر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و تأمین پایداری و کنترل جابه‌جایی‌های دیواره گود و سطح زمین پشت دیواره باید با دقت بررسی شود. در این شرایط برخی از روش‌های پایدارسازی گود کارایی خود را از دست می‌دهند. از این رو، بحث گودبرداری عمیق با

روش پایدارسازی مناسب اهمیت بسزایی پیدا کرده است.

روش میخ‌گذاری^۱ یکی از انواع سازه‌های نگهدارنده برای پایدارسازی دیواره‌های گود است. طراحی این روش براساس انتقال نیروی محرک توده خاک به میخ‌ها و انتقال این نیروها به توده خاک ایمن است که به پارامترهای متعددی از جمله روش نصب، روش تزریق، مشخصات خاک و سازه نگهدارنده بستگی دارد. اساس کار روش میخ‌گذاری بدین صورت است که میخ‌ها اجرا شده و با خاک‌برداری عمق‌های بیشتر، دیواره گود مقداری جابه‌جایی پیدا می‌کند که سبب فعال شدن میخ‌ها می‌گردد.

در اغلب پروژه‌های عمرانی به خصوص پروژه‌های ساختمانی، پلان زمین موجود جهت ساخت و ساز به صورت چهارگوشه یا چند گوشه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.hazeghian@yazd.ac.ir

1 Soil Nailing

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



در سال ۲۰۱۲ یوان و ژانگ^۴ به بررسی عملکرد سه‌بعدی یک گود عمیق نامنظم در رس نرم شانگهای پرداختند. در این تحقیق تغییرشکل دیوار دیافراگمی، نشست سطح زمین و نیروی محوری مهارهای متقابل برداشت شده بود. آنها در این تحقیق نتیجه گرفتند که به جز فاکتورهای عمومی شناسایی شده مانند عمق و عرض گود، سختی دیواره، فاصله مهارها و مشخصات خاک، زاویه اتصال دو دیوار دیافراگمی مجاور هم نیز تأثیر قابل توجهی بر تغییرشکل دیواره و نشست سطح زمین گود عمیق نامنظم دارد [۴].

ژائو و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۴ در تحقیق خود به بررسی اثر کنج‌های مقعر و محدب در گودبرداری بر روی ساختمان‌های مجاور پرداختند. در این تحقیق مشخص شد که محدوده تحت تأثیر نشست در مجاور کنج‌های مقعر و محدب بسیار متفاوت از میانه گود است. به دلیل اثر این کنج‌ها، ساختمان‌های مجاور نه تنها تحت تأثیر نشست، بلکه تحت تأثیر تغییرشکل دورانی نیز قرار می‌گیرند. الگوی نشست در محل کنج گود یک سطح سه‌بعدی است و ترک‌های ساختمان که به دلیل نشست تفاضلی و تغییرشکل دورانی ایجاد می‌شوند، هنگامی که ساختمان‌ها در محدوده مؤثر اصلی قرار می‌گیرند، می‌توانند ظاهر شوند [۵].

در سال ۲۰۱۷، ایمنی و همکاران^۶ به بررسی اثر کنج‌های محدب بر رفتار گودبرداری عمیق پایدارسازی شده به وسیله سیستم میخ‌گذاری پرداختند. در این تحقیق چندین گود با هندسه و محل قرارگیری متفاوت کنج محدب در نرم‌افزار المان محدود Abaqus مدل‌سازی شدند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که گودبرداری و محل کنج محدب تأثیر زیادی بر روی جابه‌جایی دارد [۶].

تحقیقات زیادی در گذشته به مطالعه تأثیر کنج‌های محدب بر الگوی تغییرشکل‌های دیواره‌های گود (نسبت به تحلیل کرنش مسطح) و طرح سیستم سازه‌نگهبان پرداخته‌اند [۱-۸] که در بالا به برخی از آنها اشاره شد. اما در اکثر تحقیقات پیشین، سیستم سازه‌نگهبان از نوع دیوار دیافراگمی یا مهار متقابل و همچنین هندسه گود دارای ابعاد مشخص و منحصر به فرد بوده است. مطالعه حاضر به بررسی عددی تأثیر کنج‌های محدب در سیستم میخ‌گذاری می‌پردازد که در مطالعات پیشین به آن کمتر پرداخته شده است. همچنین

است. به عبارت دیگر زمین دارای کنج‌های محدب (گوشه‌های بیرون زده) و کنج‌های مقعر (گوشه‌های فرو رفته) است. هنگام گودبرداری عمیق در این پروژه‌ها، کنج‌های موجود شرایط خاصی را برای پروژه ایجاد خواهند کرد. اغلب مهندسين طراح جهت طراحی سازه نگهبان چنین پروژه‌هایی شرایط مسأله را به صورت کرنش مسطح در نظر می‌گیرند و طراحی را به صورت دو بعدی انجام می‌دهند. اما تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هندسه کنج‌ها اثرات قابل توجهی بر پایداری و تغییرشکل دیواره‌های گود دارد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

او و همکارانش^۱ در سال ۱۹۹۶ در تحقیق خود با استفاده از یک روش غیرخطی المان محدود سه‌بعدی، اثر وجود کنج بر روی تغییرشکل دیواره گود در خاک‌های رسی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با انجام یک مطالعه پارامتری، یک رابطه تجربی ارائه کردند که تغییرشکل دیواره گودبرداری در محدوده کنج را بر اساس نتایج المان محدود دویبعدی تخمین می‌زند [۱].

لی و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۸، به بررسی اثرات کنج‌ها روی تغییرشکل دیواره و حرکت سطح زمین در گودبرداری‌های عمیق مهارشده بوسیله مهار متقابل پرداختند. آن‌ها با مقایسه چندین پروژه گودبرداری که اثرات کنج مشهود بود، نتیجه گرفتند که این اثرات به سه فاکتور وابسته هستند: نسبت طول به عمق گود، عمق لایه نسبتاً سخت و سختی سیستم مهار متقابل. علاوه بر این در این تحقیق نشان داده شد که در فاصله برابر یا بیش از عمق گودبرداری، می‌توان از اثر گوشه صرف‌نظر کرد و از مدل‌سازی دویبعدی با تحلیل کرنش مسطح استفاده کرد [۲].

فینو و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۷ تعداد ۱۵۰ مدل‌سازی المان محدود برای تعیین اثرات هندسه گود مانند طول و عرض پلان گودبرداری، ارتفاع گود، سختی سیستم دیواره و ضریب اطمینان در برابر بالازدگی کف روی جابه‌جایی‌های سه‌بعدی زمین به دلیل گودبرداری روی خاک‌های رسی، انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد هنگامی که نسبت طول به عمق گود بیشتر از ۶ باشد، نتایج مدل‌سازی‌های کرنش مسطح با نتایج جابه‌جایی‌های محاسبه شده مرکز دیواره در مدل‌سازی سه‌بعدی همخوانی دارد [۳].

4 Yuan & Zhang

5 Zhao et al.

6 Imeni et al.

1 Ou et al.

2 Lee et al.

3 Finno et al.

جدول ۱. پارامترهای مدل خاک سخت شونده [۹]

Table 1. Hardening Soil Parameters [9]

مقدار	پارامتر	
با توجه به جنس خاک	چسبندگی (C)	۱
با توجه به جنس خاک	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	۲
$\phi - 30$	زاویه اتساع (ψ)	۳
با توجه به جنس خاک	مدول الاستیسیته سکانت (E_{50}^{ref})	۴
$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$	مدول الاستیسیته تانژانت (E_{oed}^{ref})	۵
$4E_{50}^{ref}$	مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری (E_{ur}^{ref})	۶
۰/۲۵	ضریب پواسون (ν)	۷
با توجه به جنس خاک	نسبت پیش تحکیمی (OCR)	۸
$(1 - \sin \phi) \times OCR^{\sin \phi}$	ضریب فشار جانبی (K_{nc})	۹
۰/۵	ثابت m	۱۰

۲-۲- المان شاتکریت

برای مدل‌سازی شاتکریت از المان لاینر استفاده شده است. در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، المان لاینر یک نوع المان پوسته‌ای (شل) با مدل رفتاری الاستیک است. این نوع المان بوسیله یک سری فنرهای خطی با خاک در تماس بوده و اندرکنش الاستوپلاستیک با آن دارد. المان‌های لاینر می‌توانند نسبت به خاک بلغزند؛ که معیار لغزش براساس قانون موهرکولمب تعیین می‌شود. با بکارگیری المان‌های لاینر از نوع DKT-CST، هر دو نوع سختی محوری و خمشی برای المان شاتکریت در نظر گرفته می‌شود [۹]. در آنالیزهای پارامتری، مصالح شاتکریت از نوع بتن با مدول الاستیسیته ۲۰ GPa و ضریب پواسون ۰/۱۵ فرض شده است. همچنین ضخامت شاتکریت در آنالیزهای پارامتری ۱۰۰ mm فرض می‌شود. شایان ذکر است که زاویه اصطکاک و چسبندگی صفحه تماس المان لاینر با خاک دو سوم مقادیر متناظر خاک فرض شده است.

۲-۳- مدل رفتاری خاک

مدل‌های رفتاری خاک در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به دو گروه الاستیک و پلاستیک تقسیم‌بندی می‌شوند. گروه الاستیک شامل مدل‌های الاستیک، ارتوتروپیک و آنیزوتروپیک است. گروه پلاستیک شامل مدل‌های متعددی از جمله مدل‌های دراگر-پراگر، موهر-کولمب،

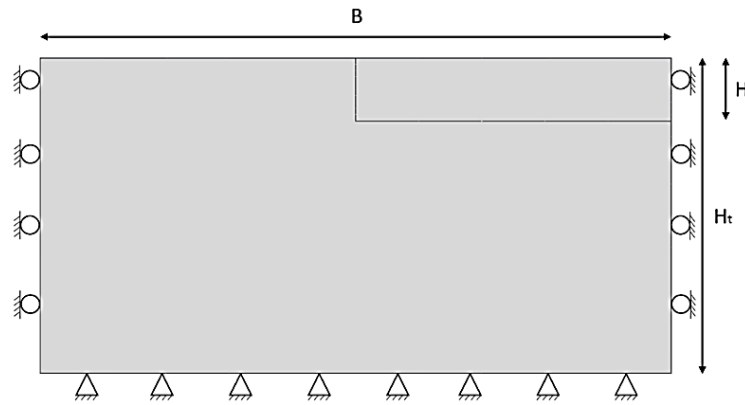
هندسه سه‌بعدی کنج‌ها در مطالعه حاضر به نحوی در نظر گرفته شده است که نتایج بدست آمده از این مطالعات قابل تعمیم بوده و از آن می‌توان برای تدقیق و اصلاح طرح سازه نگهبان با روش میخ‌گذاری در محدوده سه‌بعدی کنج استفاده نمود.

۲- فرضیات مدل‌سازی

در این بخش فرضیات مدل‌سازی شامل المان میخ، المان شاتکریت، مدل رفتاری خاک، شرایط مرزی، ابعاد مدل و چگالی مش بیان می‌شود.

۲-۱- المان میخ

با توجه به اینکه در سیستم سازه نگهبان میخ‌گذاری، میخ تحت کشش قرار می‌گیرد، از المان میله برای مدل‌سازی میخ استفاده شده است. در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، المان میله به صورت یک ماده الاستوپلاستیک کامل رفتار می‌کند که می‌تواند در برابر کشش و فشار مقاومت کند، ولی دارای مقاومت خمشی نیست. جابه‌جایی نسبی المان میله و خاک، موجب ایجاد تنش برشی در المان گروت می‌شود و المان گروت تنش برشی را به خاک منتقل می‌کند [۹]. در آنالیزهای پارامتری، مصالح میخ از نوع فولاد AIII با تنش تسلیم ۴۰۰ MPa و مدول الاستیسیته ۲۰۰ GPa فرض شده است.



شکل ۱. مدل دوبعدی و شرایط مرزی

Fig. 1. Two-Dimensional model and boundary conditions

نرم افزارهای عددی به این صورت امکان پذیر نیست، لذا در مدل سازی یک پروژه ژئوتکنیکی می بایست به جای کل محیط بی نهایت که عملاً ممکن نیست، حجم محدودی از خاک که بر روی نتایج مدل سازی مؤثر است، مدل شود. اما این حجم محدود خاکی باید به گونه ای انتخاب شود که تأثیر مرزهای آن در عرض و عمق بر روی جواب های مدل به حداقل برسد. به عبارت ساده تر، انتخاب این مرزهای خاکی باید به گونه ای باشد که به اندازه کافی از محدوده تنش و یا تغییر شکل های سازه ژئوتکنیکی دور بوده و حداقل تأثیر را بر روی نتایج آن بگذارد. در مطالعه حاضر، جهت تعیین ابعاد مناسب محیط خاک، سه گود با ارتفاع ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری و برای هر کدام از گودها دو نوع خاک (۱) و (۲) در نظر گرفته شد. مشخصات هر یک از خاک های (۱) و (۲) را می توان در جدول ۲ مشاهده کرد. ابتدا طرح سیستم میخ گذاری در هر یک از خاک ها با استفاده از راهنمای FHWA [۱۰] تعیین گردید، سپس با استفاده از نرم افزار GeoSlope، جهت تأمین ضریب اطمینان پایداری کلی، طرح اصلاح گردید. پس از اصلاح طرح، تحلیل عددی دوبعدی با استفاده از نرم افزار FLAC^{3D} صورت گرفت.

برای تعیین ابعاد مناسب محیط خاکی، ابتدا ارتفاع مدل و سپس عرض مدل با استفاده از آنالیز حساسیت انتخاب گردید. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، B عرض مدل، H ارتفاع گود و H_t ارتفاع مدل است. در ابتدا جهت تعیین ارتفاع بهینه مدل، ارتفاع مدل (H_t) در هر یک از گودهای مورد نظر، برابر با H ، $۳H$ ، $۴H$ و $۵H$ در نظر گرفته شد. در این مرحله جهت کاهش اثر مرزهای جانبی بر روی نتایج حاصل از تحلیل عددی، مقدار عرض مدل (B) ثابت و برابر با $۱۰H$ در نظر گرفته شد. پس از یافتن مقدار بهینه H_t

سخت شونده، متورم شونده، هوک-براون و ... است. مدل سخت شونده^۱ (PH) یک مدل رفتاری سخت شونده برشی و حجمی برای مدل سازی رفتار خاک است. خاک موقع قرار گرفتن تحت بارگذاری انحرافی اولیه، یک کاهش سختی نشان می دهد و به طور همزمان کرنش های پلاستیک غیرقابل بازگشت توسعه می یابند. شایان ذکر است مدل خاک سخت شونده به دلیل در نظر گرفتن سختی بارگذاری و باربرداری به صورت مجزا، در مدل سازی گودبرداری ها و بدست آوردن نتایج تغییر شکل های ناشی از آنها دقت و عملکرد بسیار مناسبی را از خود نشان می دهد [۹]. در مطالعه حاضر از مدل سخت شونده استفاده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مورد نیاز در مدل خاک سخت شونده را نشان می دهد.

۴-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی با استفاده از تکیه گاه هایی مدل می شود که این تکیه گاه ها باید با شرایط مرزها در واقعیت همخوانی داشته باشد. شرایط مرزی در مسائل متعارف گودبرداری به شرح زیر است (شکل ۱):

(۱) مرزهای قائم (دو سمت مدل) در راستای عمود بر صفحه بسته (fix) هستند.

(۲) مرز افقی کف مدل در تمامی جهات بسته است.

(۳) مرز افقی سطح زمین در تمامی جهات آزاد (free) است.

۵-۲- ابعاد مدل

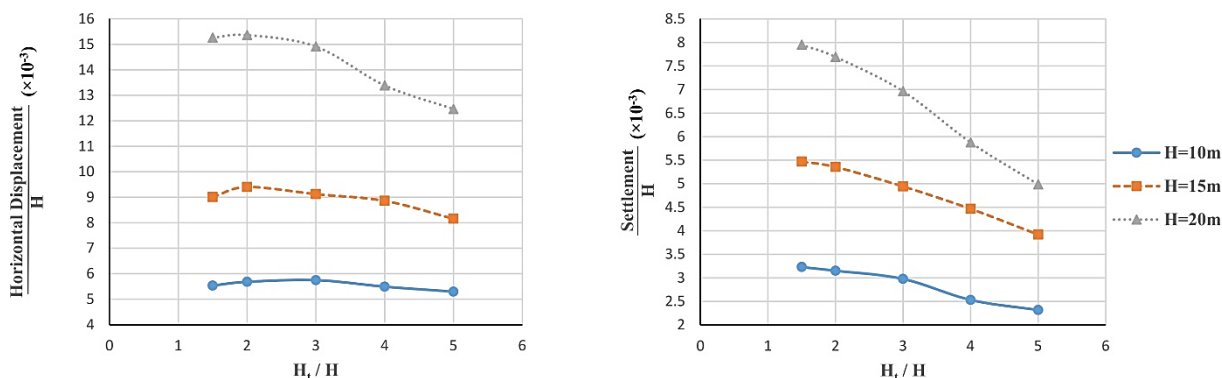
خاک یک محیط نیمه بی نهایت است و مدل سازی آن در

1 Plastic-Hardening

جدول ۲. مشخصات خاک‌های در نظر گرفته شده جهت آنالیز حساسیت

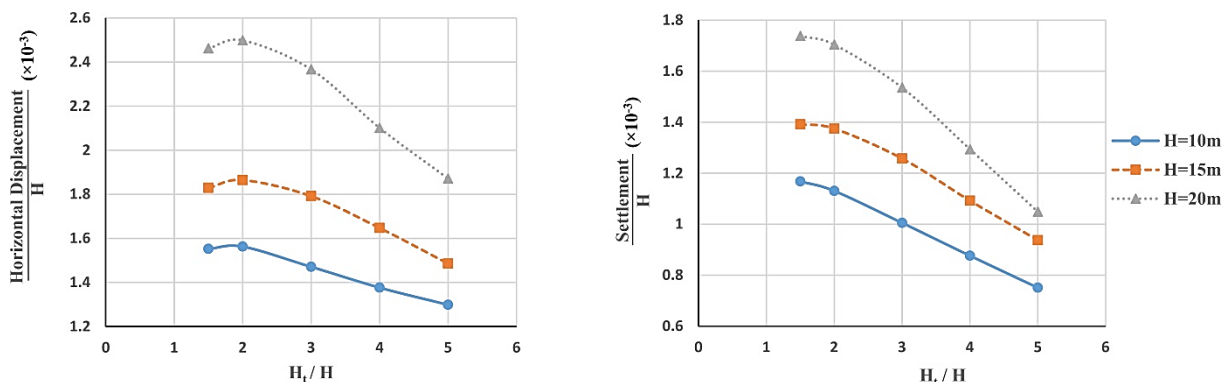
Table 2. The properties of soils considered in the sensitivity analysis

نوع خاک	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	E_{50} (MPa)	مقاومت باند (MPa)	وزن مخصوص (kN/m^3)
خاک ۱	۵	۲۵	۲۰	۰/۲	۱۶
خاک ۲	۲۰	۴۰	۸۰	۰/۸	۲۰



شکل ۲. جابه‌جایی افقی و نشست نرمالیزه شده تاج دیواره گود برحسب نسبت ارتفاع مدل به ارتفاع گود (خاک ۱)

Fig. 2. Normalized horizontal displacement and settlement of the wall crest versus the ratio of the model height to the wall height (soil 1)



شکل ۳. جابه‌جایی افقی و نشست نرمالیزه شده تاج دیواره گود برحسب نسبت ارتفاع مدل به ارتفاع گود (خاک ۲)

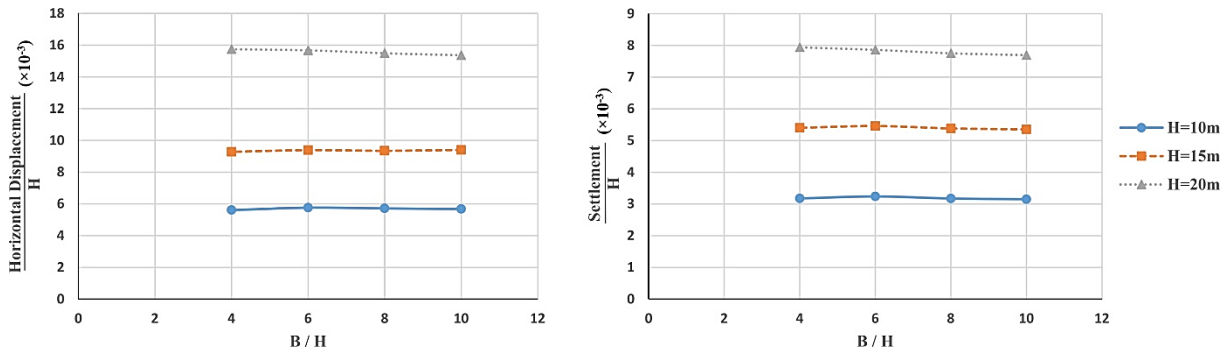
Fig. 3. Normalized horizontal displacement and settlement of the wall crest versus the ratio of the model height to the wall height (soil 2)

سپس به صورت خطی کاهش می‌یابد.

دلیل کاهش مقادیر جابه‌جایی‌ها با افزایش ارتفاع مدل را می‌توان این‌چنین توجیه کرد. مدل‌سازی عددی کلیه سیستم‌های پایدارسازی از جمله میخ‌گذاری با خاک‌برداری همراه است. هنگامی که قسمتی از خاک جلوی گود در مدل‌سازی عددی برداشته می‌شود، یک نوع ترخیص تنش (باربرداری) به ناحیه اطراف خاک‌برداری اعمال می‌شود. اگر ناحیه خاک موجود بین کف گود تا کف مدل در هر مرحله از خاک‌برداری را یک ستون خاکی در نظر بگیریم، پس از

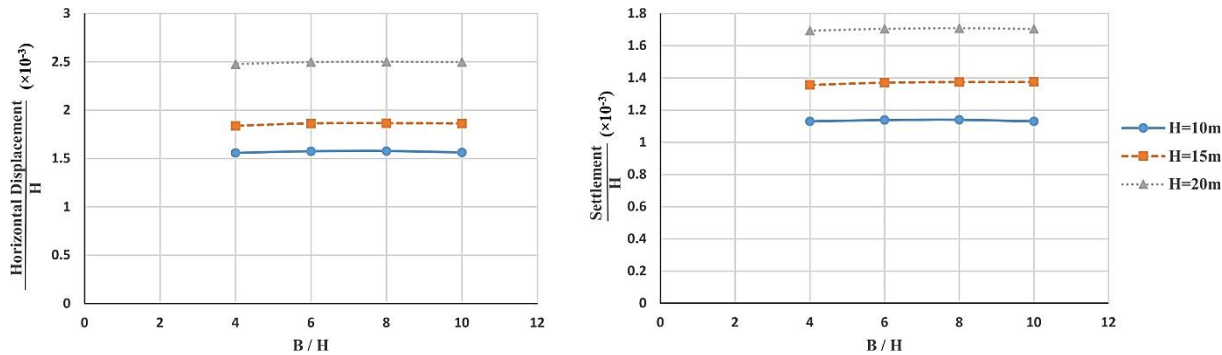
جهت تعیین عرض بهینه مدل، ارتفاع مدل ثابت و برابر با مقدار بهینه و مقدار B برابر با $8H$ ، $6H$ و $4H$ در نظر گرفته شد.

شکل ۲ و شکل ۳ تغییرات جابه‌جایی افقی و نشست در محل تاج گود برحسب ارتفاع مدل به ارتفاع گود را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که مقادیر جابه‌جایی و ارتفاع مدل نسبت به ارتفاع گود نرمالیزه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع مدل، همگرایی خاصی در جابه‌جایی‌ها رخ نمی‌دهد. با افزایش ارتفاع مدل تا ۲ برابر ارتفاع گود، مقادیر جابه‌جایی افقی و نشست تقریباً ثابت و



شکل ۴. جابه‌جایی افقی و نشست نرمالیزه شده تاج دیواره گود برحسب نسبت عرض مدل به ارتفاع گود (خاک ۱)

Fig. 4. Normalized horizontal displacement and settlement of the wall crest versus the ratio of the model width to the wall height (soil 1)



شکل ۵. جابه‌جایی افقی و نشست نرمالیزه شده تاج دیواره گود برحسب نسبت عرض مدل به ارتفاع گود (خاک ۲)

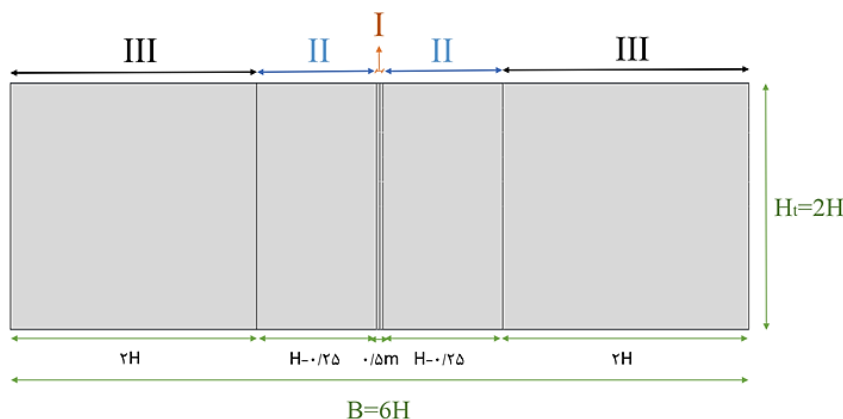
Fig. 5. Normalized horizontal displacement and settlement of the wall crest versus the ratio of the model width to the wall height (soil 2)

بالا، توصیه نمی‌شود عمق مدل بیش از ۲ برابر عمق گود در نظر گرفته شود؛ چرا که اثرات ناشی از بالآمدگی موجب کاهش جابه‌جایی‌های پیش‌بینی‌شده می‌شود. در مطالعه حاضر، عمق مدل $H_f=2H$ فرض شد. مقاله لیم و برابود^۱ در سال ۱۹۹۹ [۱۱] که یکی از مقالات معتبر در زمینه مدل‌سازی عددی گودبرداری است، عمق مناسب مدل را $2/2H$ توصیه کرده است که بسیار نزدیک به فرض در نظر گرفته شده در مقاله حاضر است.

شکل ۴ و شکل ۵ تغییرات جابه‌جایی افقی و نشست نرمالیزه شده در محل تاج گود برحسب نسبت عرض مدل به ارتفاع گود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عرض مدل از $4H$ تا $10H$ ، مقادیر جابه‌جایی‌ها چندان تغییر نمی‌کند. در مطالعه حاضر $B=6H$ فرض شد.

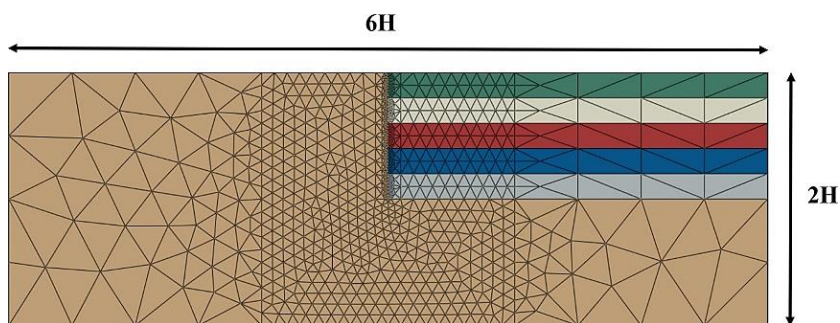
خاک‌برداری، کل این ستون در حالت باربرداری قرار خواهد گرفت و مقداری کرنش طولی مثبت ناشی از تغییر (کاهش) تنش مؤثر در این ستون اتفاق خواهد افتاد. مقدار این کرنش تابع پارامترهای تغییرشکلی مسیر باربرداری و نوع مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای خاک است. وقوع این کرنش طولی مثبت موجب بالآمدگی مدل و در نتیجه کاهش مقادیر جابه‌جایی افقی و نشست می‌شود. در برخی از مواقع به قدری این بالآمدگی زیاد می‌شود که دیواره گود به سمت عقب رانده و حتی سطح زمین نیز دچار بالآمدگی می‌شود. بنابراین نمی‌توان نتیجه گرفت که هر چه مرز پایینی مدل از کف گود فاصله بگیرد، تحلیل‌ها دقیق‌تر می‌شود، چرا که هر چه ارتفاع این ستون خاکی بیشتر شود، بالآمدگی کف گود نیز بیشتر خواهد شد.

با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیزهای پارامتری و توضیحات



شکل ۶. ناحیه بندی مدل جهت تعیین چگالی مش

Fig. 6. Zoning the model to determine of mesh density



شکل ۷. مدل دوبعدی گود

Fig. 7. Two-Dimensional model of the excavation

شامل اطلاعات مش بندی است. با فراخوانی این فایل توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ ، مدل و مش بندی آن وارد نرم افزار $FLAC^{3D}$ می شود.

۳- صحت سنجی

جهت صحت سنجی فرضیات و مراحل مدل سازی، از نتایج برداشت شده در یک دیواره میخ گذاری شده استفاده می گردد. این دیواره در کمپ دیویس دانشگاه کالیفرنیا واقع شده است. پروفیل زمین در نزدیکی محل دیواره صاف است و لایه های خاک منطقه را سیلت ماسه ای و رس سیلتی تشکیل می دهند. عمق دیواره $9/2$ متر می باشد که خاک برداری آن در ۵ مرحله انجام شده است. طول میخها $6/1$ متر است که با زاویه 20° درجه نسبت به افق در محل گمانه قرار گرفته اند. فاصله افقی و قائم میخها $1/8$ متر است [۱۲]. سایر اطلاعات در جدول ۳ ارائه شده است. تغییر شکل افقی دیواره تا

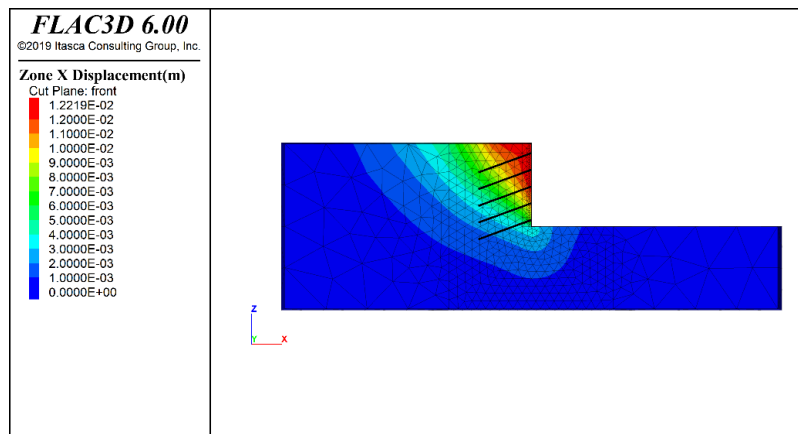
۲-۶- الگوی مش

از دیگر نکات مهم در مدل سازی عددی، المان بندی یا همان مش بندی مدل است. در مطالعه حاضر از المان های هرمی ۴ گرهی استفاده شده است. جهت تعیین چگالی مش، مدل مطابق شکل ۶ به سه ناحیه I، II و III، تقسیم بندی شد. با توجه به نکاتی که جهت برقراری اتصال میخها به شاتکریت بر روی دیواره گود وجود دارد، چگالی مش در ناحیه I بسیار ریز و با بعد مش $0/25$ متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق پس از انجام آنالیز حساسیت، چگالی مش مناسب در ناحیه II و III به ترتیب برابر ۱ و ۵ بدست آمد.

شکل ۷ مدل نهایی یک گود ۱۰ متری که در نرم افزار Abaqus ساخته و مش بندی شده است را نشان می دهد. نواحی خاک برداری با رنگ های متفاوت مشخص شده است. پس از مش بندی مدل در نرم افزار Abaqus، از آن یک فایل خروجی گرفته می شود که

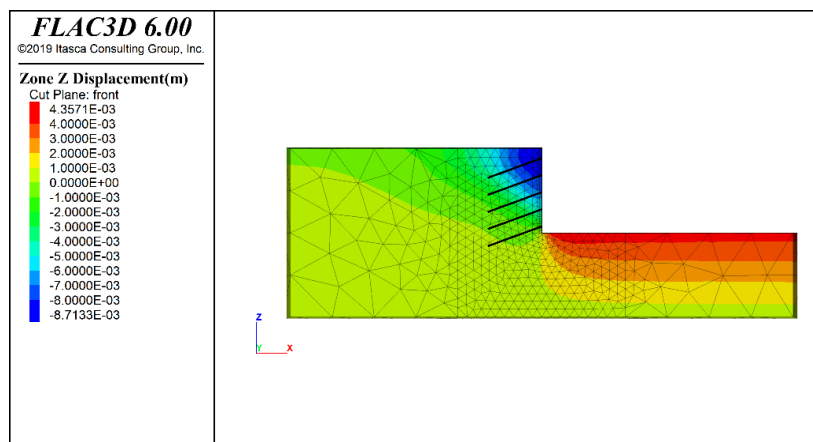
جدول ۳. اطلاعات مربوط به دیوار خاکی میخ‌گذاری شده برای مدل صحت‌سنجی [۱۲]
Table 3. Information of the soil nailed wall in the verification analysis

۱۹	وزن مخصوص خاک (kN/m ³)	۱/۱	فاصله اولین میخ از سطح زمین (m)
۸۰	E ₅₀ (MPa)	۱/۸	ارتفاع گام‌های خاک‌برداری (m)
۰/۲۵	ضریب پواسون خاک	۲۵	قطر میخ‌ها (mm)
۰/۶۴	ضریب فشار جانبی خاک	۱۰۰	قطر گمانه (mm)
۰/۳	ثابت m	۳۴۰	تنش تسلیم میخ (MPa)
۱۰۰	ضخامت شاتکریت (mm)	۲۲۰	مدول الاستیسیته میخ (GPa)
۲۶	وزن مخصوص بتن شاتکریت (kN/m ³)	۲/۲	ضریب پیش‌تحکیمی (OCR)
۲۱	مدول الاستیسیته بتن شاتکریت (GPa)	۲۰	چسبندگی خاک (kpa)
۰/۱۵	ضریب پواسون شاتکریت	۳۶	زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)



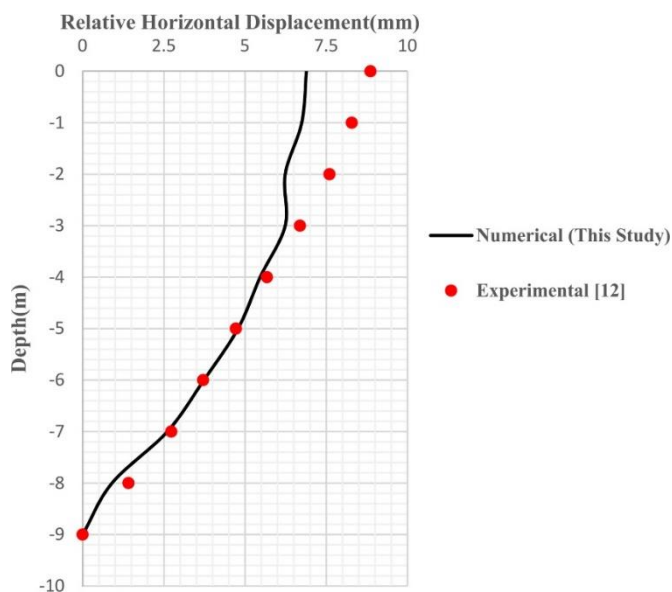
شکل ۸. کانتور جابه‌جایی افقی دیواره خاکی برای مدل صحت‌سنجی

Fig. 8. Horizontal displacement of the soil nailed wall in the verification analysis



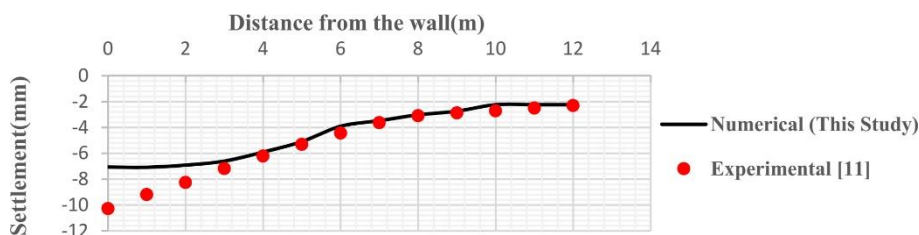
شکل ۹. کانتور نشست دیواره خاکی برای مدل صحت‌سنجی

Fig. 9. Settlement of the soil nailed wall in the verification analysis



شکل ۱۰. جابه‌جایی افقی دیواره خاکی در فاصله ۱/۵ متری از بر دیواره (مقایسه نتایج تجربی و عددی)

Fig. 10. Horizontal displacement of the soil nailed wall at a distance of 1.5 meters from the wall facing (Comparison of experimental and numerical results)



شکل ۱۱. پروفیل نشست زمین در پشت دیواره خاکی تا فاصله ۱۲ متری از بر دیواره (مقایسه نتایج تجربی و عددی)

Fig. 11. Settlement of the soil wall up to a distance of 12 meters from the wall facing (Comparison of experimental and numerical results)

۴- مفروضات در نظر گرفته شده برای مسأله

به منظور مطالعه تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی‌های افقی و قائم دیوارهای پایدارسازی شده با سیستم میخ‌گذاری، ۹ آنالیز دوبعدی و سه‌بعدی (کنج محدب) با سه ارتفاع گود ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر و سه نوع خاک ضعیف، متوسط و قوی انجام شد. مشخصات انواع خاک استفاده شده در این تحلیل‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. در این آنالیزها فرض شده است که خاک‌برداری در گام‌های دو متری انجام می‌شود. همچنین فرض شده است که اطراف گود هیچ ساختمانی وجود ندارد و تنها سرباری معادل با سربار خیابان و تأسیسات شهری به مقدار ۱۰ kPa به سطح زمین اعمال می‌شود. زاویه میخ‌ها نسبت به افق صفر درجه در نظر گرفته شده است.

کف گود توسط شیب‌سنج‌های قرار گرفته در گمانه‌های عمودی حفر شده اندازه‌گیری شده است. این شیب‌سنج‌ها در فاصله ۱/۵ متری از پشت دیواره نصب شده‌اند.

با استفاده از اطلاعات ذکر شده در جدول ۳ و فرضیات ذکر شده برای مدل‌سازی، تحلیل تغییرشکل دوبعدی دیواره مورد نظر انجام شد. کانتورهای تغییرشکل افقی و نشست به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده‌اند. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب پروفیل‌های تجربی و عددی جابه‌جایی افقی دیواره گود در فاصله ۱/۵ متری از برگود و نشست پشت دیواره گود را مقایسه می‌کنند. با توجه به مقایسه صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که جابه‌جایی‌های پیش‌بینی شده از تحلیل عددی و تجربی سازگاری نسبتاً خوبی با هم دارند.

جدول ۴. مشخصات انواع خاک
Table 4. Properties of soil types

وزن مخصوص (kN/m ³)	مقاومت باند (MPa)	E ₅₀ (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	نوع خاک
۱۸	۰/۴	۴۰	۳۰	۱۰	ضعیف
۱۹	۰/۶	۶۰	۳۵	۱۵	متوسط
۲۰	۰/۸	۸۰	۴۰	۲۰	قوی

جدول ۵. کلیات طرح سازه‌نگهبان برای مدل‌های مختلف
Table 5. The retaining structure designs for the various models

قطر میخ‌ها به ترتیب از بالا به پائین گود (mm)	طول میخ‌ها به ترتیب از بالا به پائین گود (m)	فاصله افقی (m)	فاصله قائم (m)	فاصله اولین میخ از تاج گود (m)	تعداد میخ	ارتفاع گود (m)	نوع خاک
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۰	۱۰ (۳) - ۶ - ۵	۲	۲	۱	۵	۱۰	ضعیف
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۰	۱۳ (۴) - ۱۲ (۳)	۱	۲	۱/۵	۷	۱۵	
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۲	۱۳ (۲) - ۱۲ (۲) - ۱۰ - ۸ (۲)	۲	۲	۱/۵	۷	۱۵	متوسط
۳۲ (۳) - ۲۸ (۴) - دو برابر ۳۲	۱۵ (۴) - ۱۴ - ۱۳ (۳) - ۱۰	۱/۵	۲	۱	۱۰	۲۰	
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۰	۱۰ (۳) - ۸ - ۷/۵	۲	۲	۱/۵	۵	۱۰	قوی
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۰	۱۲ (۱۰) - ۱۰ (۳)	۲	۲	۱/۵	۷	۱۵	
۲۵ (۲) - ۲۸ (۳) - دو برابر ۳۲	۱۲ (۱۰) - ۱۰ (۳)	۲	۲	۱/۵	۱۰	۲۰	

۴-۱- طراحی سیستم سازه نگهبان میخ‌گذاری

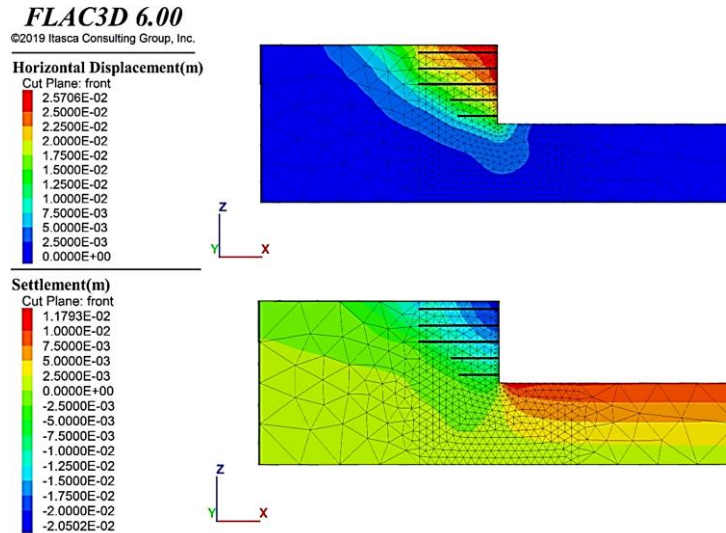
در مطالعه حاضر، طراحی سیستم میخ‌گذاری برای یک گود مشخص در سه مرحله انجام شده است. در مرحله اول، آرایش میخ‌ها با استفاده از راهنمای FHWA [۱۰] و براساس عمق گود و نوع خاک مورد نظر انتخاب شد. سپس ضریب اطمینان پایداری کلی طرح اولیه با استفاده از نرم‌افزار GeoSlope کنترل و در صورت کمتر بودن آن از مقدار مجاز (در اینجا ۱/۳۵)، طرح اصلاح شد. در انتها، آنالیز تغییرشکل دوبعدی (کرنش مسطح) با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام و در صورتی که مقادیر جابه‌جایی افقی و نشست حداکثر دیواره گود بیشتر از مقدار مجاز (در اینجا ۰/۰۳H) بودند، طرح مجدداً اصلاح شد. جدول ۵ کلیات طرح نهایی سازه نگهبان با روش میخ‌گذاری برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. اعداد داخل پرانتز در ستون‌های مرتبط با

طول و قطر میخ‌ها، تعداد میخ‌های تکراری با طول و قطر مشابه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، ۱۰ (۳) در ردیف اول جدول ۵ بدین معنی است که طول میخ‌های ردیف اول، دوم و سوم ۱۰ متر است. قابل توجه است که برای مدل گود ۲۰ متری خاک ضعیف، سیستم میخ‌گذاری به تنهایی برای کنترل تغییرشکل‌ها جوابگو نبود و نیاز به استفاده از شمع بود؛ لذا این مدل از مطالعه حاضر حذف گردید.

شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست حاصل از تحلیل‌های عددی دوبعدی برای گودهای ۱۰ متری با خاک ضعیف و ۲۰ متری با خاک قوی را نشان می‌دهد.

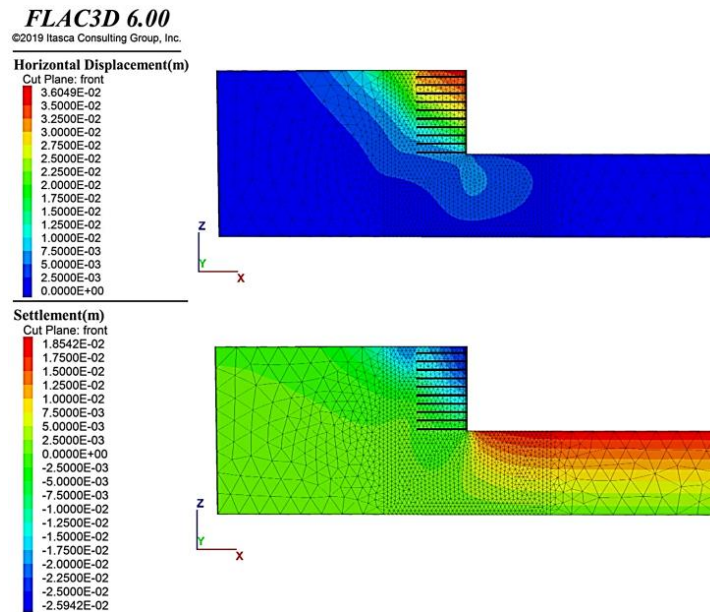
۴-۲- تحلیل سه‌بعدی کنج محذب

بعد از اتمام مرحله طراحی، تحلیل‌های سه‌بعدی کنج محذب



شکل ۱۲. کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست گود ۱۰ متری با خاک ضعیف

Fig. 12. The contour of horizontal displacement and settlement for the 10 m model with the weak soil



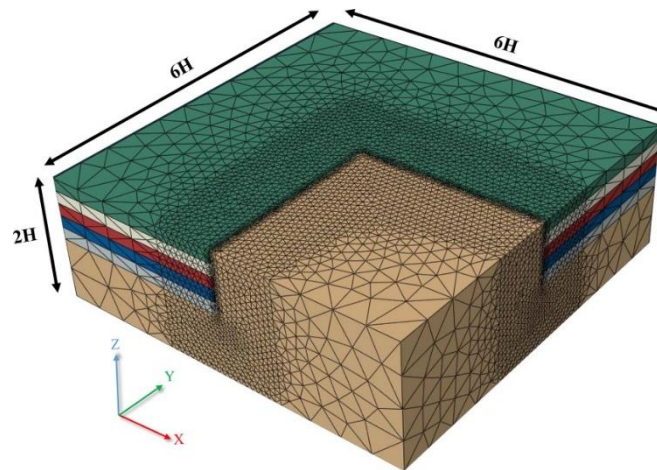
شکل ۱۳. کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست گود ۲۰ متری با خاک قوی

Fig. 13. The contour of horizontal displacement and settlement for the 20 m model with the strong soil

پایینی مدل در تمامی جهات بسته شده است. شایان ذکر است که پوسته‌های شاتکریتی دو وجه کنج محدب در محل تقاطعشان جدا از یکدیگر مدل فرض شدند و اتصالی ندارند. بدین ترتیب مقاومت کششی پوسته‌های شاتکریتی نمی‌تواند نقش محصورکنندگی برای کنج محدب ایفا کند که محافظه‌کارانه است.

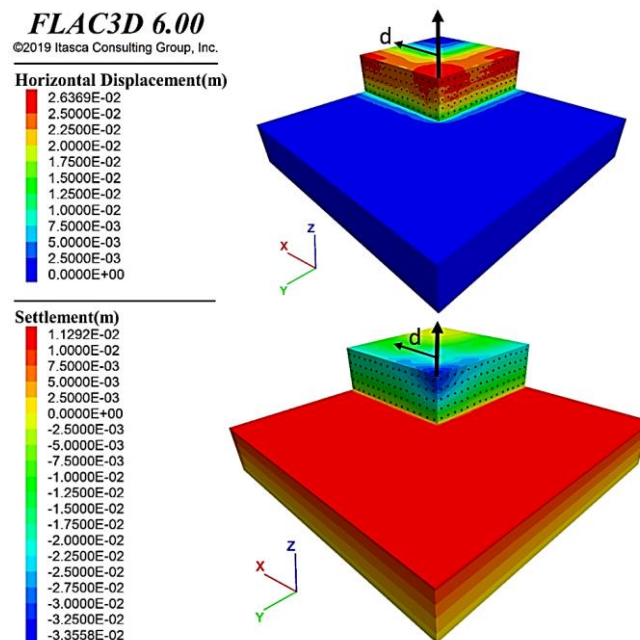
شکل ۱۵ و شکل ۱۶ به ترتیب کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست

برای مدل‌های مختلف انجام شد. شکل ۱۴ مدل سه‌بعدی کنج محدب برای یک دیواره با ارتفاع H را نشان می‌دهد. طول، عرض و ارتفاع مدل به ترتیب $6H$ ، $6H$ و $2H$ در نظر گرفته شد. ابعاد و چگالی مش مدل سه‌بعدی به گونه‌ای است که تصویر مدل سه‌بعدی بر روی صفحات YZ یا XZ مشابه مدل دوبعدی (شکل ۷) است. حرکت عمود بر صفحه مرزهای جانبی مدل بسته شده است. همچنین حرکت مرز



شکل ۱۴. مدل سه بعدی کنج محدب

Fig. 14. Three-Dimensional model of a convex corner

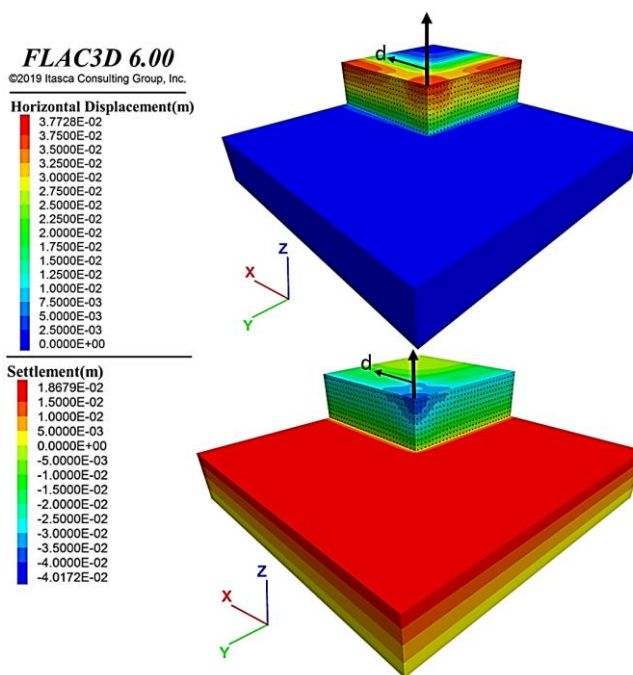


شکل ۱۵. کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست گود ۱۰ متری با خاک ضعیف

Fig. 15. The contour of horizontal displacement and settlement for the 10 m model with the weak soil

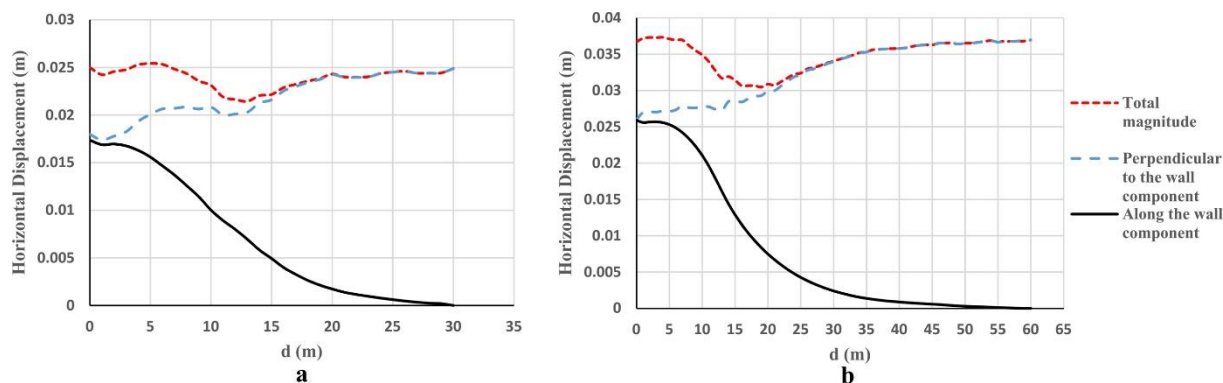
کنج (d) برای مدل‌های ۱۰ متری با خاک ضعیف (شکل ۱۵) و ۲۰ متری با خاک قوی (شکل ۱۶) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از کنج (و نزدیک شدن به مرزهای مدل)، مولفه‌ی در راستای دیواره کاهش می‌یابد که بدیهی است؛ اما مولفه‌ی عمود بر دیواره افزایش می‌یابد و به مقدار جابه‌جایی افقی در تحلیل دوبعدی (کرنش مسطح) همگرا می‌شود. روند کاهشی مولفه‌ی در

حاصل از تحلیل‌های عددی سه‌بعدی کنج محدب برای گودهای ۱۰ متری با خاک ضعیف و ۲۰ متری با خاک قوی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که جابه‌جایی افقی در مدل سه بعدی یک بردار است که از برآیند دو مولفه عمود بر دیواره و در راستای دیواره (در راستای d در شکل ۱۵ و شکل ۱۶) حاصل می‌شود. شکل ۱۷ تغییرات مولفه‌های بردار جابه‌جایی افقی و مقدار کل آن در تاج دیواره بر حسب فاصله از



شکل ۱۶. کانتورهای جابه‌جایی افقی و نشست گود ۲۰ متری با خاک قوی

Fig. 16. The contour of horizontal displacement and settlement for the 20 m model with the strong soil



شکل ۱۷. تغییرات مولفه‌های در راستای دیواره، عمود بر دیواره و مقدار کل جابه‌جایی افقی در تاج دیواره برحسب فاصله از کنج محدب: (a) گود ۱۰ متری با خاک ضعیف، (b) گود ۲۰ متری با خاک قوی

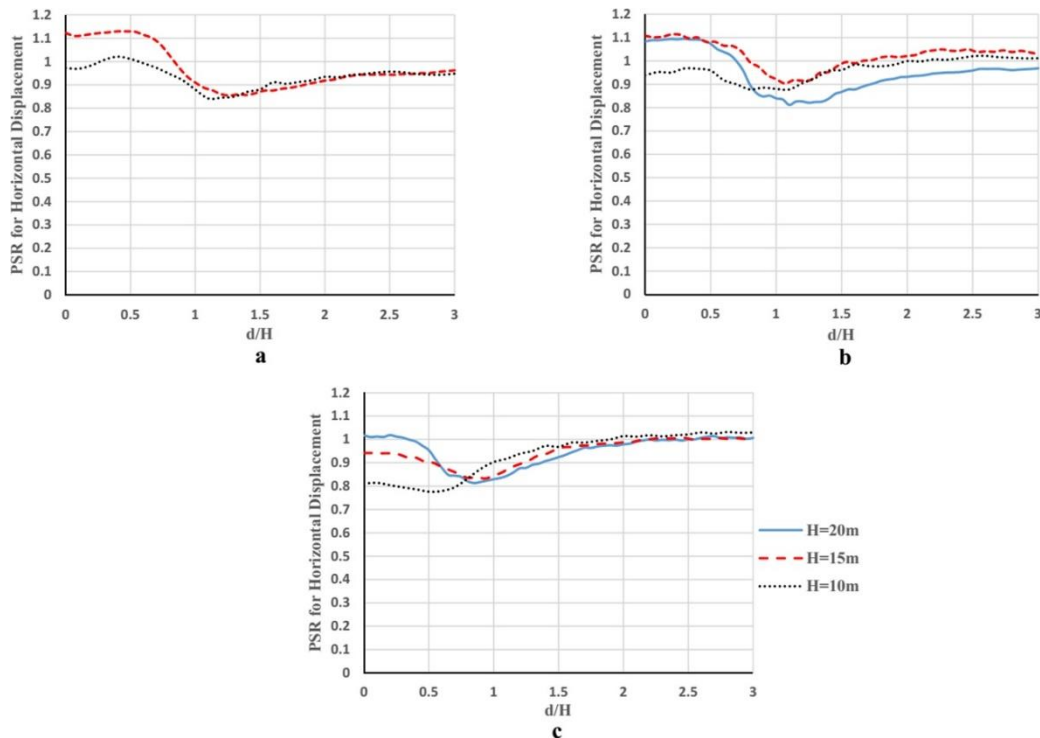
Fig. 17. Variations of the components of along the wall, perpendicular to the wall and the total magnitude of horizontal displacement at the wall crest versus distance from the corner tip: a) 10 m model with the weak soil, b) 20 model with the strong soil

۵- مقایسه تغییر شکل مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی

به منظور مطالعه اثر کنج محدب بر تغییر شکل دیواره گود، از کمیت نسبت کرنش مسطح^۱ استفاده می‌شود. کمیت PSR را می‌توان هم برای جابه‌جایی افقی و هم برای نشست تعریف نمود. کمیت PSR برای جابه‌جایی افقی به صورت نسبت جابه‌جایی افقی سه‌بعدی به

راستای دیواره و روند افزایشی مولفه‌ی عمود بر دیواره بردار جابه‌جایی افقی موجب می‌شود که مقدار کل جابه‌جایی افقی ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد. در مجموع به نظر می‌رسد که ترکیب سه عامل هندسه سه‌بعدی، مقاومت کششی پوسته‌های شاتکریتی و اندرکنش اصطکاکی پوسته‌های شاتکریتی با خاک باعث می‌شود که الگوی جابه‌جایی افقی دیواره‌های گود در محل کنج محدب پیچیده و غیرمنظم شود.

1 Plane Strain Ratio (PSR)



شکل ۱۸. نمودارهای PSR جابه‌جایی افقی در محل تاج گود بر حسب فاصله از کنج محدب: (a) خاک ضعیف، (b) خاک متوسط و (c) خاک قوی
Fig. 18. PSR diagrams of horizontal displacement at the wall crest versus distance from the corner tip: a) weak soil b) medium soil c) strong soil

را ناحیه تحت تأثیر کنج تعریف می‌کنیم. طول ناحیه تحت تأثیر کنج برای هر مدل با استفاده از نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۹ تعیین و با خط‌چین‌های قائم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول‌های ناحیه تحت تأثیر کنج برای خاک‌های ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب تقریباً برابر با $2H$ ، $1.5H$ و $1.25H$ است (H ارتفاع گود است). جالب توجه است که این طول تابع نوع خاک است و با ضعیف شدن خاک افزایش می‌یابد. با تغییر نوع خاک از قوی به ضعیف، طول ناحیه تحت تأثیر کنج حدود ۶۰٪ افزایش می‌یابد.

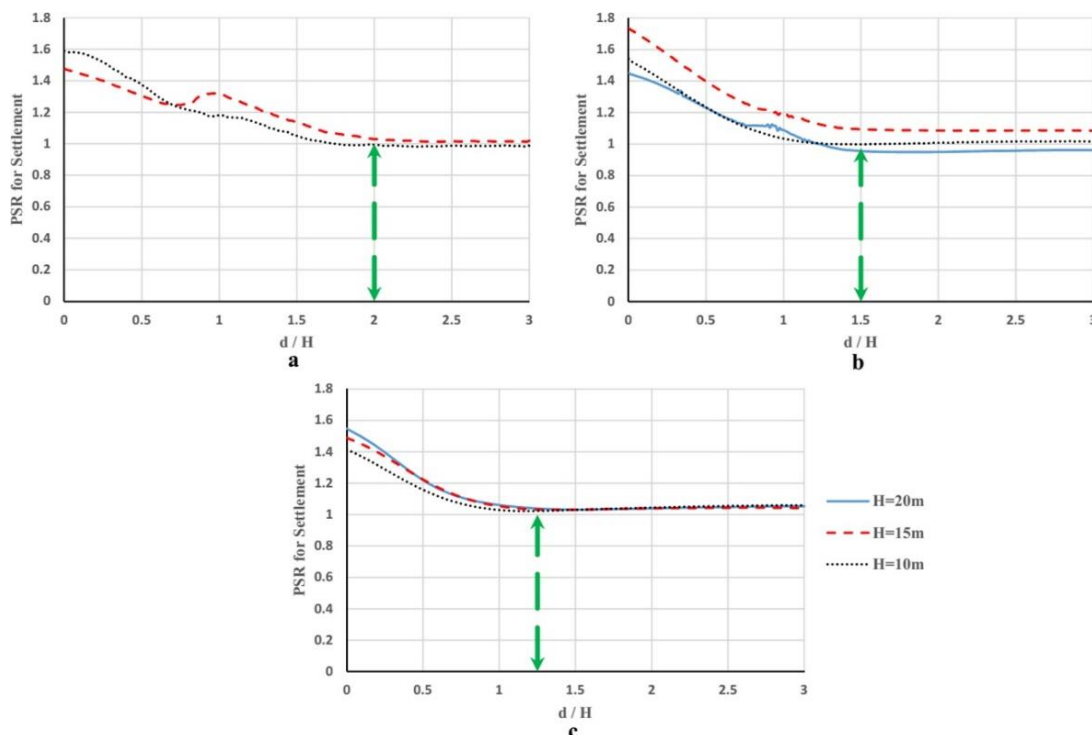
جدول ۶ مقادیر PSR نشست حداکثر (مقادیر PSR نشست در $d=0$ ، شکل ۱۹) برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر PSR حداکثر چندان وابسته به نوع خاک و ارتفاع گود نیست و به طور میانگین حدوداً برابر با $1/5$ به دست آمده است.

همان‌طور که نشان داده شد، مقادیر نشست در طول ناحیه تحت تأثیر کنج بیشتر از مقادیر نشست حاصل از تحلیل دوبعدی

دوبعدی و برای نشست به صورت نسبت نشست سه‌بعدی به دوبعدی تعریف می‌شود. شکل ۱۸ و شکل ۱۹ به ترتیب نمودارهای تغییرات PSR جابه‌جایی افقی و نشست بر حسب فاصله از محل کنج محدب (پارامتر d در شکل ۱۵ و شکل ۱۶) برای گودهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری با خاک‌های مختلف در محل تاج گود و در طول دیواره گود را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از مرزهای مدل و نزدیک شدن به محل کنج محدب، مقادیر نشست سه‌بعدی به صورت قابل توجهی نسبت به مقادیر دوبعدی افزایش می‌یابد، اما مقادیر جابه‌جایی افقی سه‌بعدی تفاوت چندانی با مقادیر دوبعدی ندارند (حداکثر ده درصد بزرگ‌تر هستند). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که PSR نشست در مقایسه با PSR جابه‌جایی افقی بحرانی‌تر است. از این رو جهت مقایسه نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی از کمیت نسبت کرنش مسطح برای نشست استفاده می‌گردد.

ناحیه‌ای از اطراف کنج که وضعیت تغییرشکل‌ها در آن متأثر از هندسه سه‌بعدی است و دارای PSR نشست بزرگتر از ۱ هست



شکل ۱۹. نمودارهای PSR نشست در محل تاج گود بر حسب فاصله از کنج محدب: (a) خاک ضعیف، (b) خاک متوسط و (c) خاک قوی
 Fig. 19. PSR diagrams of settlement at the wall crest versus distance from the convex corner: a) weak soil b) medium soil c) strong soil

جدول ۶. مقادیر PSR نشست حداکثر در طول ناحیه تحت تأثیر کنج برای مدل‌های مختلف
 Table 6. Maximum values of the PSR along the affected zone for the various models

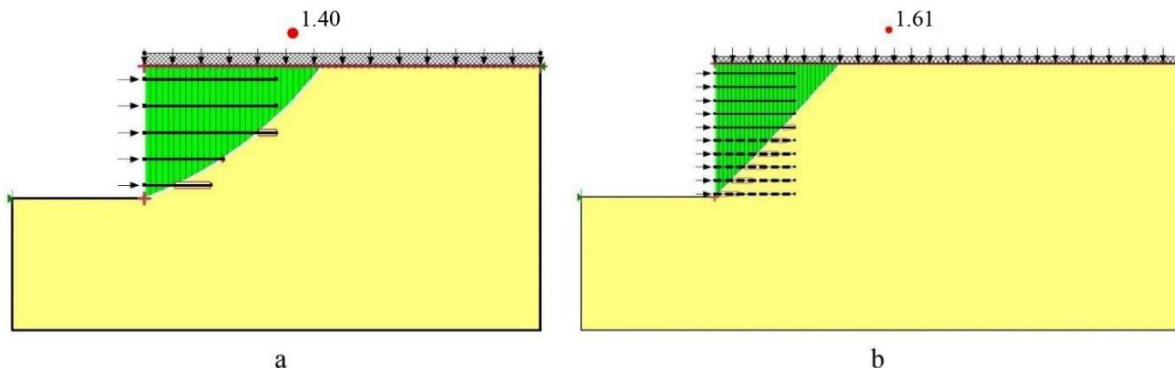
نوع خاک	ارتفاع گود (m)	PSR نشست حداکثر
ضعیف	۱۰	۱/۵۹
	۱۵	۱/۴۸
متوسط	۱۰	۱/۵۴
	۱۵	۱/۷۳
	۲۰	۱/۴۵
قوی	۱۰	۱/۴۱
	۱۵	۱/۴۹
	۲۰	۱/۵۵

نسبت به مقادیر نشست حاصل از تحلیل دوبعدی به صورت میانگین حداکثر حدود ۵۰ درصد در طول ناحیه تحت تأثیر کنج بیشتر است. بنابراین توصیه می‌شود که در کنترل تغییرشکل سازه نگیهان در طول این ناحیه با استفاده از تحلیل کرنش مسطح (دوبعدی)، مقادیر نشست حاصل از تحلیل دوبعدی ۵۰٪ افزایش یابد و سپس با مقدار نشست مجاز کنترل شود. بدین ترتیب اثر افزایش هندسه سه‌بعدی کنج محدب بر

است. بنابراین توصیه می‌شود که کنترل تغییرشکل‌ها در طول ناحیه تحت تأثیر کنج با استفاده از تحلیل سه‌بعدی انجام شود. در صورت عدم استفاده از تحلیل سه‌بعدی، از نتایج مطالعه حاضر و با استفاده از تحلیل دوبعدی می‌توان برای کنترل تغییرشکل‌ها در این ناحیه به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، استفاده نمود. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شد، مقادیر نشست حاصل از تحلیل سه‌بعدی

جدول ۷. ضرایب اطمینان پایداری گود
Table 7. The excavation stability safety factors

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	ضریب اطمینان دوبعدی GeoSlope	ضریب اطمینان دوبعدی FLAC ^{3D}	ضریب اطمینان سه بعدی FLAC ^{3D}
ضعیف	۱۰	۱/۴۰	۱/۴۷	۱/۴۷
	۱۵	۱/۶۴	۱/۵۹	۱/۵۹
	۱۰	۱/۴۰	۱/۵۶	۱/۵۶
متوسط	۱۵	۱/۴۹	۱/۵۳	۱/۵
	۲۰	۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۵۳
	۱۰	۱/۴۲	۱/۸	۱/۶۹
قوی	۱۵	۱/۵۰	۱/۶۹	۱/۶۶
	۲۰	۱/۶۱	۱/۷۲	۱/۶۹



شکل ۲۰. گوه‌های گسیختگی حاصل از تحلیل پایداری به روش تعادل حدی: (a) گود ۱۰ متری با خاک ضعیف، (b) گود ۲۰ متری با خاک قوی

Fig. 20. Failure wedges resulting from the stability analysis by the limit equilibrium method

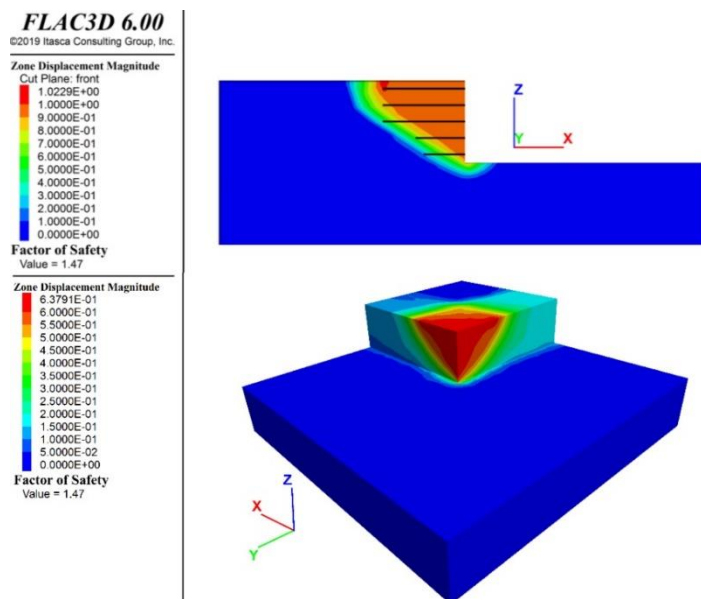
دیواره‌های میخ‌گذاری شده، همان‌طور که قبلاً در بخش ۴-۱ ذکر شد، ضریب اطمینان‌های دوبعدی به دست آمده از روش تعادل حدی (نرم‌افزار GeoSlope) براساس پیشنهاد راهنمای FHWA [۱۰] معیار بوده است. برای محاسبه ضریب اطمینان‌های سه بعدی تنها از نرم‌افزار FLAC^{3D} استفاده شده است، چراکه نرم‌افزار GeoSlope قادر به محاسبه ضریب اطمینان برای مدل‌های سه بعدی نیست.

مقادیر ضریب اطمینان‌های دوبعدی و سه بعدی برای مدل‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. شکل ۲۰ گوه‌های گسیختگی حاصل از تحلیل پایداری در نرم‌افزار GeoSlope (روش تعادل حدی) برای گودهای ۱۰ متری با خاک ضعیف و ۲۰ متری با خاک قوی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲۱ و شکل ۲۲ به ترتیب گوه‌های

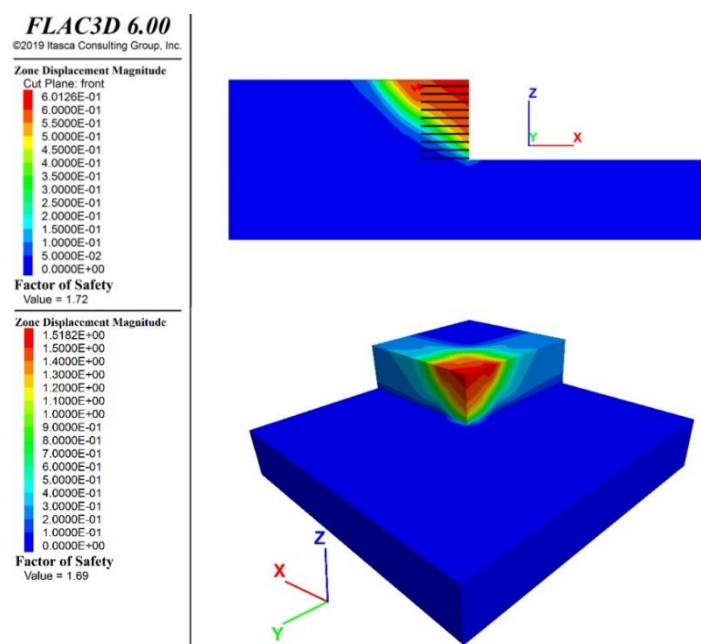
مقادیر نشست حاصل از تحلیل دوبعدی در طول ناحیه تحت تأثیر کنج در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده برای هندسه مدل سه بعدی (طول بزرگ ۳H برای دیواره‌های متقاطع در کنج محدب، شکل ۱۴)، راهکار پیشنهادی محافظه کارانه و مهندسی است.

۶- مقایسه ضریب اطمینان‌های پایداری مدل‌های دوبعدی و سه بعدی

ضریب اطمینان‌های مدل‌های دوبعدی مطالعه حاضر با استفاده از هر دو نرم‌افزار GeoSlope و FLAC^{3D} محاسبه شده‌اند. اولی ضریب اطمینان را با استفاده از روش تعادل حدی و دومی بر اساس روش کاهش مقاومت محاسبه می‌کند. شایان ذکر است که برای طراحی



شکل ۲۱. گوه‌های گسیختگی دوبعدی و سه‌بعدی حاصل از تحلیل پایداری به روش کاهش مقاومت برای مدل گود ۱۰ متری با خاک ضعیف
 Fig. 21. Two-dimensional and three-dimensional failure wedges obtained from the stability analysis by the strength reduction method (10 m model with the weak soil)



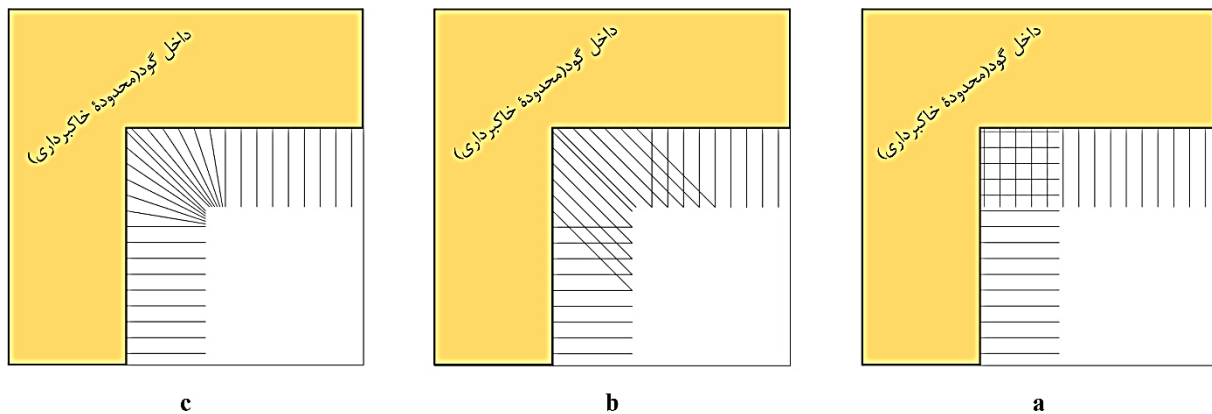
شکل ۲۲. گوه‌های گسیختگی دوبعدی و سه‌بعدی حاصل از تحلیل پایداری به روش کاهش مقاومت برای مدل گود ۲۰ متری با خاک قوی
 Fig. 22. Two-dimensional and three-dimensional failure wedges obtained from the stability analysis by the strength reduction method (20 m model with the strong soil)

ضریب اطمینان‌های دوبعدی به دست آمده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ تا حدودی (بین صفر تا ۲۳ درصد) متفاوت از مقادیر متناظر به دست‌آمده از نرم‌افزار GeoSlope هستند که به اختلاف روش‌های کاهش مقاومت و تعادل حدی در محاسبه ضریب اطمینان باز

گسیختگی حاصل از تحلیل‌های پایداری دوبعدی و سه‌بعدی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ (روش کاهش مقاومت) برای گودهای ۱۰ متری با خاک ضعیف و ۲۰ متری با خاک قوی را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ضریب اطمینان در جدول ۷ می‌توان گفت که

جدول ۷. ضرایب اطمینان پایداری گود
Table 7. The excavation stability safety factors

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	ضریب اطمینان دوبعدی GeoSlope	ضریب اطمینان دوبعدی FLAC ^{3D}	ضریب اطمینان سه بعدی FLAC ^{3D}
ضعیف	۱۰	۱/۴۰	۱/۴۷	۱/۴۷
	۱۵	۱/۶۴	۱/۵۹	۱/۵۹
	۱۰	۱/۴۰	۱/۶۶	۱/۵۶
متوسط	۱۵	۱/۴۹	۱/۵۳	۱/۵
	۲۰	۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۵۳
	۱۰	۱/۴۲	۱/۸	۱/۶۹
قوی	۱۵	۱/۵۰	۱/۶۹	۱/۶۶
	۲۰	۱/۶۱	۱/۷۲	۱/۶۹



شکل ۲۳. حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای آزمون میخ‌ها در ناحیه تحت تأثیر کنج: (a) بدون آزمون، (b) با آزمون ثابت ۴۵ درجه و (c) با آزمون متغیر

Fig. 23. Various modes of nails azimuth in the affected zone: a) no azimuth b) constant 45 degree azimuth c) variable azimuth

۷- بررسی اثر آزمون میخ‌ها در ناحیه تحت تأثیر کنج

جهت بررسی اثر آزمون میخ‌ها در ناحیه تحت تأثیر، سه حالت در نظر گرفته شد: بدون آزمون (شکل ۲۳ a) که حالت پیش فرض مطالعه حاضر بوده است، با آزمون ثابت و برابر با ۴۵ درجه در طول محدوده (شکل ۲۳ b) و با آزمون متغیر در طول محدوده از ۴۵ درجه تا صفر درجه (شکل ۲۳ c).

مطالعه اثر آزمون دادن به میخ‌ها تنها بر روی گود ۱۵ متری انجام شد. جدول ۸ جابه‌جایی افقی و نشست حداکثر دیواره برای گود ۱۵ متری با انواع خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

می‌گردد. جالب توجه است که میزان این اختلاف با افزایش عمق گود کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، مقایسه ضریب اطمینان‌های دوبعدی و سه‌بعدی محاسبه شده با روش کاهش مقاومت (FLAC^{3D}) نشان می‌دهد که مقادیر سه‌بعدی کمتر هستند؛ این کاهش را می‌توان به هندسه سه‌بعدی کنج محدب نسبت داد. البته قابل توجه است که این اختلاف برای اغلب مدل‌ها بسیار ناچیز است. بنابراین می‌توان گفت که اثر هندسه سه‌بعدی کنج محدب بر جابه‌جایی‌های دیواره‌های گود بسیار بیشتر از ضریب اطمینان پایداری است.

جدول ۸. جابه‌جایی افقی و نشست حداکثر مدل ۱۵ متری برای انواع خاک و آزیموت‌های مختلف

Table 8. Maximum horizontal displacement and settlement of 15 m model for various types of soil and azimuths

نوع خاک	حالت بدون آزیموت		حالت آزیموت ثابت		حالت آزیموت متغیر	
	جابه‌جایی افقی حداکثر (mm)	نشست حداکثر (mm)	جابه‌جایی افقی حداکثر (mm)	نشست حداکثر (mm)	جابه‌جایی افقی حداکثر (mm)	نشست حداکثر (mm)
ضعیف	۵۱/۶	۴۸/۵	۳۷۷	۹۴۱/۲	۱۸۵/۸	۳۲۶/۱
متوسط	۳۵/۸	۴۰/۴	۹۷/۷	۱۹۳	۷۷	۱۱۴/۵
قوی	۲۳/۵	۲۶/۲	۵۳	۸۰/۲	۳۹/۳	۵۴/۸

دوبعدی و سه‌بعدی ۹ مدل گود با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر و سه نوع خاک ضعیف، متوسط و قوی انجام شد. سپس با مقایسه نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، اثر سه‌بعدی کنج محدب بر جابه‌جایی افقی و نشست دیواره‌های گود و همچنین ضریب اطمینان پایداری مورد مطالعه قرار گرفت. در انتها، تأثیر آزیموت میخ‌ها در محدوده کنج محدب مطالعه شد. نتایج مهم مطالعه حاضر عبارتند از:

۱. تأثیر هندسه سه‌بعدی کنج محدب بر نشست دیواره‌های گود بسیار بیشتر از تأثیر آن بر جابه‌جایی افقی است؛ لذا نشست، معیار بحرانی برای کنترل تغییرشکل دیواره‌های گود در طراحی سیستم میخ‌گذاری برای کنج‌های محدب است.

۲. طول ناحیه تحت تأثیر کنج (ناحیه‌ای از اطراف کنج محدب که مقادیر نشست حاصل از تحلیل سه‌بعدی بزرگ‌تر از مقادیر دوبعدی است؛ به عبارت دیگر $PSR > 1$) وابسته به نوع خاک است بطوری‌که با افزایش مقاومت خاک کاهش می‌یابد. طول‌های ناحیه تحت تأثیر کنج برای خاک ضعیف، متوسط و قوی بطور تقریبی برابر با $2H$ ، $1.5H$ و $1.25H$ است.

۳. مقادیر PSR نشست حداکثر (حداکثر نسبت مقدار نشست سه‌بعدی در طول ناحیه تحت تأثیر کنج به مقدار نشست دوبعدی) به جنس خاک و ارتفاع گود وابسته نیست. این مقدار به طور میانگین تقریباً برابر با 1.50 است. این بدین معنی است که مقدار نشست حاصل از تحلیل سه‌بعدی در ناحیه تحت تأثیر کنج تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از مقدار نشست حاصل از تحلیل دوبعدی است. در صورت عدم استفاده از تحلیل سه‌بعدی، از این معیار می‌توان برای کنترل تغییرشکل‌ها در ناحیه تحت تأثیر کنج بر اساس نتایج تحلیل دوبعدی

می‌شود، آزیموت دادن به میخ‌ها (به خصوص آزیموت ثابت) در طول ناحیه تحت تأثیر کنج به صورت چشمگیری مقادیر جابه‌جایی افقی و نشست را افزایش می‌دهد. دلیل وقوع چنین افزایشی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با آزیموت دادن به میخ‌ها، نیروی کششی مقاوم میخ‌ها به دو مؤلفه عمود بر دیواره و مماس بر دیواره تجزیه می‌شود. بدیهی است مؤلفه مماس بر دیواره نقش چندانی در جلوگیری از حرکت دیواره گود ایفا نمی‌کند. به عبارت دیگر، با آزیموت دادن به میخ‌ها، از تمام ظرفیت کششی میخ‌ها جهت مقاومت در برابر فشار جانبی خاک استفاده نمی‌شود و بنابراین تغییرشکل دیواره‌های گود در محل کنج به‌صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. بنابراین تغییر آزیموت میخ‌ها در محدوده تحت تأثیر کنج به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود و استفاده از حالت پیش فرض این تحقیق (حالت بدون آزیموت) بهترین روش اجرای میخ‌ها در این ناحیه است.

۸- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به مطالعه اثر کنج محدب بر تغییرشکل دیواره‌های پایدارسازی شده با روش میخ‌گذاری با استفاده از تحلیل عددی پرداخته است. برای ساخت و مش‌بندی مدل‌ها از نرم‌افزار Abaqus، برای کنترل ضریب اطمینان پایداری کلی مدل‌ها از نرم‌افزار GeoSlope و برای انجام تحلیل‌های تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌ها از نرم‌افزار FLAC^{3D} استفاده گردیده است. با انجام یک آنالیز صحت‌سنجی و مقایسه تغییرشکل‌های عددی و تجربی، درستی روش مدل‌سازی، فرضیات و نرم‌افزارهای مورد استفاده، مورد تأیید قرار گرفت. در ادامه، در قالب یک تحلیل پارامتری، تحلیل‌های تغییرشکل

استفاده نمود.

۴. آزمون دادن به میخها در ناحیه تحت تأثیر کنج محدب به صورت چشمگیری جابه‌جایی‌ها را افزایش می‌دهد و به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود.

۵. مقادیر ضریب اطمینان‌های سه‌بعدی (محاسبه شده با روش کاهش مقاومت) کمتر یا مساوی مقادیر متناظر دویبعدی هستند. این اختلاف را می‌توان به تأثیر هندسه سه‌بعدی کنج محدب نسبت داد. البته تأثیر هندسه سه‌بعدی کنج بر جابه‌جایی‌های دیواره‌های گود بسیار بیشتر از تأثیر آن بر ضریب اطمینان است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

مدول الاستیسیته،	GPa	E
مدول الاستیسیته سکانت،	MPa	E_{50}
تنش تسلیم،	MPa	F_y

علائم یونانی

چگالی،	kg/m^3	ρ
--------	-----------------	--------

مراجع

- [1] C. Ou, D.-C. Chiou, T.-S. Wu, Three-Dimensional finite element analysis of deep excavations, *Geotechnical Engineering*, 5(122) (1996) 345-337.
- [2] F.H. Lee, K.Y. Young, K.C.N. Quan, K.T. Chee, Effect of corners in strutted excavations: Field monitoring and case histories, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 5(124) (1998) 349-339.
- [3] R.J. Finno, J.T. Blackburn, J.F. Roboski, Three-Dimensional effects for supported excavations in clay, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1(133) (2007) 36-30.
- [4] H. Yuan, Q. Zhang, Three dimensional performance observed in an irregular deep excavation in Shanghai soft

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Khodaverdian, M. Hazeighian, M. Mokhtari, *Three-dimensional Numerical Study of the Effect of Convex Corners on the Displacements Induced by Excavation for Soil-Nailed Walls*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 3279-3298.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17826.6687

