



Semnan University



Research Article

Effect of Convex Corners on Displacement of Restrained Excavation Walls: A Three-Dimensional Analysis

Mahsa Mokhtari Dehaqani^a, Maryam Mokhtari^{b*}, Mohammad Hazeghian^c

^a Master of Geotechnics, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

^b Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

^c Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

PAPER INFO

aper history:

Received: 2025-07-30

Revised: 2025-10-21

Accepted: 2025-10-21

Keywords:

Retaining structure,

Anchor rod,

Convex corner,

Three-dimensional -
numerical analysis,

FLAC3D software.

ABSTRACT

In excavation projects, presence of convex corners makes 2D analyses inaccurate. This study investigates the effect of these corners on deformation of retaining walls using 3D modeling. The present study uses FLAC3D software for two-dimensional and three-dimensional numerical modeling to study the effect of convex corners on the deformations caused by excavation for walls stabilized by anchor rod method. It also examines the effect of various parameters such as soil type, soil adhesion, pit height and reliability coefficient on the deformation rate of convex corner. Results of the present study show that the length of corner-affected area (area around the convex corner where values of the three-dimensional displacement ratio at the location of crown pit is greater than the two-dimensional corresponding value) decreases with the decrease in soil resistance. So, in weak, medium and strong soil, it is 2H, 1.5H and 1.25H respectively. Due to the influence of three-dimensional geometry of convex corner, the three-dimensional reliability coefficient values are lower than corresponding two-dimensional values.

* Corresponding author.

E-mail address: mokhtari@yazd.ac.ir



مقاله پژوهشی

تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی دیواره‌های گودبرداری مهار شده: تحلیل سه‌بُعدی

مهسا مختاری دهقانی^۱، مریم مختاری^{۲*}، محمد حاذقیان^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در پروژه‌های گودبرداری، وجود کنج‌های محدب باعث می‌شود تحلیل‌های دو بُعدی دقیق نباشند. این پژوهش، به بررسی تأثیر این کنج‌ها بر تغییر شکل دیواره‌های مهار شده، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بُعدی می‌پردازد. در واقع، پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D به مدل‌سازی عددی دوبُعدی و سه‌بُعدی اثر کنج‌های محدب بر تغییر شکل‌های ناشی از گودبرداری برای دیواره‌های پایدارسازی شده با روش میل‌مهار می‌پردازد. همچنین، تأثیر پارامترهایی نظیر نوع خاک، چسبندگی و ضریب اطمینان طراحی هدف (Target Design FOS) بر تغییر شکل‌ها و ضریب اطمینان پایداری نهایی (Final Stability FOS) در کنج محدب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که طول ناحیه تحت تأثیر کنج (ناحیه‌ای از اطراف کنج محدب که در آن مقادیر نسبت جابه‌جایی سه‌بُعدی در محل تاج گود بزرگتر از مقدار متناظر دوبُعدی است) با کاهش مقاومت خاک کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری که در خاک ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب $1/25H$ ، $1/5H$ و $1/2H$ است. به علت تأثیر هندسه سه‌بُعدی کنج محدب، مقادیر ضریب اطمینان سه‌بُعدی کمتر از مقادیر متناظر دوبُعدی هستند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

واژگان کلیدی:

سازه نگهبان،
میل‌مهار،
کنج محدب،
تحلیل عددی سه‌بُعدی،
نرم‌افزار FLAC3D.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mokhtari@yazd.ac.ir

استناد به این مقاله: مختاری دهقانی، مهسا، مختاری، مریم و حاذقیان، محمد. (۱۴۰۴). تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی دیواره‌های گودبرداری مهار شده:

تحلیل سه‌بُعدی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱ (۳)، ۳۹-۶۰

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38506.1728>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت شهرها و کمبود فضا در این عرصه، جامعه‌ی بشری در زمینه‌ی طراحی و احداث ساختمان‌های بلند پیشرفت چشمگیری داشته و این موضوع تعداد ساختمان‌های بلند با زیرزمین‌های عمیق را افزایش داده است (وافی شهری و همکاران، ۲۰۲۳). برای ایجاد این زیرزمین‌ها لازم است تا خاک محل برداشته شود و اصطلاحاً گودبرداری صورت بگیرد. از این‌رو، بحث گودبرداری عمیق با روش پایدارسازی مناسب اهمیت به‌سزایی پیدا کرده است (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳؛ اشرفی، ۲۰۲۱).

میل‌مهار^۱ یکی از پُرکاربردترین روش‌ها در گودبرداری‌های عمیق و پایدارسازی شیب‌ها است که اساس آن افزایش تنش‌های مقاوم گوه گسیختگی خاک است (سبتینی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سان و همکاران، ۲۰۱۹). در این روش، از یک المان فولادی (کابل، میله) جهت افزایش مقاومت برشی سطح گسیختگی استفاده می‌شود (خرمی، ۲۰۱۷). علاوه بر این، با استفاده از نیروی پیش‌تندگی ایجاد شده در کابل، نیروی اصطکاک در سطح گسیختگی و در نتیجه ضریب اطمینان پایداری گوه گسیختگی افزایش می‌یابد (رضایی، ۲۰۱۳).

اولین استفاده از مهارهای گروتی در ایالات متحده مربوط به نگهداری و حفاظت موقت پروژه‌های خاک‌برداری بود که توسط پیمانکاران خاصی انجام شد. البته اروپاییان قبل از ایالات متحده به این کار مشغول بوده و روش‌های انحصاری داشتند که در اختیار شرکت‌های ایالات متحده قرار دادند. استفاده از این روش به‌عنوان سیستم نگهبان دائمی در پروژه‌های عمومی آمریکا از سال ۱۹۶۰ تا به امروز باب شده است (نیرلیچ و بروس، ۱۹۹۷) و تاکنون پژوهش‌های متعددی در خصوص میل‌مهار و خصوصاً مدل‌سازی آن انجام شده

است. به عنوان نمونه، دوزسیر^۲ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی و آزمایش ۳۶۰۰ میل‌مهار تکی برای نگهداری گود مشخصی به عمق ۲۵ متر در مسکو و دیوار دیافراگمی به عمق ۴۵ متر در خاک‌های مختلف ژئوتکنیک پرداختند که شامل خاک‌های ترکیبی رس با مقاومت کم، ماسه و سیلت بود. تلاش‌های گذشته برای حفظ بار حداکثر ۶۰۰ کیلونیوتن در مهارها به دلیل خزش، غیرقابل قبول بوده و شکست‌خورده است؛ اما با معرفی تکنیک‌های تقویت میل‌مهار مانند تزریق انتهای آن در خاک دانه‌ای و بعد از تزریق در خاک چسبنده، ظرفیت میل‌مهار دو برابر می‌شود. شیب‌سنج‌های نصب‌شده، میزان حرکات جانبی دیوار را با نتیجه مدل‌سازی در نرم‌افزار PLAXIS نشان می‌دهند. این پروژه زمینه را فراهم کرد تا پیمانکاران با فناوری میل‌مهار ماهر شوند و با اجرای مؤثر عملیات بعد از تزریق را به‌درستی انجام دهند. با نصب مهارها، جابه‌جایی دیوار تا حداکثر ۷/۵ میلی‌متر محدود شد. مهمترین مزیت استفاده از میل‌مهار در این پروژه، محدود کردن جابه‌جایی‌های دیوار و کاهش نشست به طرز چشمگیر است (دوزسیر و همکاران، ۲۰۱۵).

همچنین، شیکل و همکاران (۲۰۱۸) مطالعاتی به‌منظور تعیین عوامل مؤثر بر جابه‌جایی گود انجام دادند. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف مانند سربار، نیروی پیش‌تندگی، طول مهارشده و طول مهار نشده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که خروجی حاصل از نرم‌افزار اجزای محدود می‌تواند به‌درستی جابه‌جایی افقی دیوار را پیش‌بینی کند. این در حالی است که در بیشتر پروژه‌های عمرانی، مخصوصاً پروژه‌های ساختمانی، پلان زمین به‌صورت منظم است. اما برخی از پلان‌ها دارای کنج‌های محدب و مقعر هستند که در هنگام گودبرداری‌های عمیق مشکل‌آفرین می‌شوند و شرایط خاصی را ایجاد می‌کنند. بیشتر طراحان برای طراحی

چنین پروژه‌هایی شرایط مسئله را به صورت کرنش مسطح در نظر می‌گیرند و به صورت دوبعدی طراحی را پیش می‌برند (مختاری دهقانی و همکاران، ۲۰۲۳). اما تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هندسه کنج‌ها اثرات قابل توجهی بر پایداری و تغییر شکل دیواره‌های گود دارد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

جرمیچ و همکاران (۲۰۰۰) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که در کنج‌های محدب، ضریب اطمینان پایداری شیروانی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در نتیجه، در کنج‌های محدب، مقادیر حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی می‌تواند در تخمین تغییر شکل‌های واقعی نسبت به مدل‌سازی دوبعدی بسیار مؤثر باشد.

علاوه بر این، در این خصوص، وو و همکاران (۲۰۱۰) با در نظر گرفتن اثر کنج و تاریخچه داده‌های به‌دست آمده به بررسی نشست زمین و تغییر شکل دیواره گود پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییر شکل دیواره در هر مرحله از گودبرداری تقریباً بین ۰/۲ تا ۰/۵ درصد ارتفاع گود و تحت اثر کنج بوده است. همچنین، بیشترین نشست سطح زمین تقریباً در موقعیت مرکز دیوار رخ داده است و نشست‌های کنج با توجه به اثر آن کمتر و معمولاً بین ۲۰ تا ۶۰ درصد بیشترین نشست بوده است. همچنین، ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر کنج محدب در گودبرداری که موقعیت آن در محل تقاطع دو خط مترو شماره ۱ و ۳ در کینگ دائو شمالی^۱ پرداختند. در این پروژه، از سیستم سازه نگهبان شمع و میل مهار برای ناحیه دیواره گود در قسمت خط ۳ مترو و شمع و مهار متقابل برای ناحیه گود در قسمت خط ۱ مترو استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه کنج محدب، جابه‌جایی‌ها در محل تقاطع دو خط مترو (در محل کنج محدب) کاهش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر، ژائو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر کنج‌های محدب و مقعر در گودهای عمیق پرداختند.

در این تحقیق، مشخص شد که محدوده‌ی 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 تغییر شکل دورانی نیز قرار می‌گیرند. الگوی نشست در محل کنج گود یک سطح سه‌بعدی است و ترک‌های ساختمان که به دلیل نشت تفاضلی و تغییر شکل دورانی ایجاد می‌شوند، هنگامی که ساختمان‌ها در محدوده‌ی مؤثر اصلی قرار می‌گیرند، می‌توانند ظاهر شوند. همچنین، در این خصوص، ژیشازی آتیلا و همکاران (۲۰۱۶) اثر کنج محدب در گودبرداری به روش دیوار دیافراگمی را با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. عمق مدفون گود ۸ متر در نظر گرفته شد. آن‌ها چهار پلان با ابعاد مختلف را بررسی کردند. برای پرهیز از اثرات منفی جابه‌جایی‌های بزرگ، گودبرداری در چهار مرحله صورت گرفته است. در این تحقیق، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شد و گودبرداری روی یک لایه ماسه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که لنگر خمشی حول محور افقی دیوار در آنالیز سه‌بعدی نسبت به آنالیز دوبعدی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. لنگر خمشی حول محور قائم دیوار در آنالیز سه‌بعدی نسبت به آنالیز دوبعدی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر و نسبت به لنگر خمشی حول محور افقی نیز بیشتر است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر چه زاویه کنج محدب بیشتر می‌شود، لنگر خمشی حول محور قائم به سمت مثبت حرکت می‌کند.

علاوه بر این، ایمنی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از نرم‌افزار Abaqus به تحلیل سه‌بعدی رفتار کنج محدب در گودبرداری‌های عمیق پرداختند. آن‌ها دو نوع گود با هندسه مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نوع هندسه گوشه در رفتار گود اثر

می‌گذارد. نوع خاک بیش از سایر پارامترها بر جابه‌جایی - های کنج محدب اثر می‌گذارد. هر چه خاک متراکم‌تر گردد، تغییر شکل کنج محدب کمتر می‌شود. زاد و هجر (۲۰۱۹) نیز با مدل‌سازی سه‌بعدی گودی به بررسی تأثیر کنج مقعر با سیستم نگهدارنده میخ‌کوبی پرداختند. برای بررسی اثر گوشه بر جابه‌جایی‌های عمودی و افقی، گود با پلان‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که فاصله میخ‌ها در اطراف کنج مقعر با توجه به اثرات سه‌بعدی کنج‌ها می‌تواند افزایش یابد که منجر به اقتصادی‌تر شدن سیستم میخ‌گذاری می‌شود. در این زمینه، رضامند و همکاران (۲۰۲۱) نیز با تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS 3D به بررسی اثر کنج محدب و مقعر در گودبرداری‌های عمیق پرداختند. در این تحقیق از سیستم سازه نگهدارنده میخ‌گذاری برای مهار گود استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی - های حاصل از تحلیل سه‌بعدی حدود ۵۰ درصد بیشتر از مدل کرنش صفحه‌ای است.

لازم به ذکر است که خداوردیان و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی، به بررسی اثر کنج‌های محدب در دیواره‌های پایدارسازی شده با روش میخ‌کوبی^۱ پرداخته‌اند. سیستم میخ‌کوبی یک روش پسیو^۲ است که در آن المان‌های تسلیح در اثر تغییر شکل توده خاک فعال می‌شوند. اما سیستم میل‌مهار یا انکراژ^۳ که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته، یک سیستم اکتیو^۴ است که با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی، رفتار دیواره و توده خاک را پیش از وقوع جابه‌جایی‌های بزرگ کنترل می‌کند. با توجه به تفاوت بنیادین در مکانیزم عملکرد این دو سیستم، الگوهای توزیع تنش و تغییر شکل آن‌ها در ناحیه کنج محدب لزوماً یکسان نبوده و نتایج قابل تعمیم نیستند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار این ناحیه بحرانی در سیستم‌های انکراژی تعریف گردید تا نتایج کاربردی

و مشخصی برای این روش پرکاربرد پایدارسازی ارائه دهد.

همانطور که اشاره شد، در گذشته، تحقیقات زیادی روی تأثیر کنج‌های محدب بر الگوی تغییر شکل‌های دیواره‌های گود (نسبت به تحلیل کرنش مسطح) و طرح سیستم سازه نگهدارنده انجام شده است که به آنها اشاره شد. اما در اکثر تحقیقات پیشین، سیستم سازه نگهدارنده 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 میل‌مهار می‌پردازد که در مطالعات پیشین به آن کمتر پرداخته شده است. همچنین، هندسه سه‌بعدی کنج‌ها در مطالعه حاضر به نحوی در نظر گرفته شده است که نتایج به‌دست آمده از این مطالعات قابل تعمیم بوده و از آن می‌توان برای تدقیق و اصلاح طرح سازه نگهدارنده با روش میل‌مهار در محدوده سه‌بعدی کنج استفاده نمود. همچنین، تا کنون به بررسی تغییر پارامتر چسبندگی خاک و تغییر ضریب اطمینان طراحی و تأثیر آن بر میزان جابه‌جایی‌ها پرداخته نشده است. اما در مطالعه حاضر، تمام موارد ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. روش تحقیق

همانطور که اشاره شد، هدف این مطالعه مدل‌سازی عددی دوبعدی و سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار FLAC3D به منظور مطالعه اثر کنج‌های محدب بر تغییر شکل‌های ناشی از گودبرداری برای دیواره‌های پایدارسازی شده به روش میل‌مهار است. همچنین، در این پژوهش، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نوع خاک، چسبندگی خاک، ارتفاع گود و ضریب اطمینان بر میزان تغییر شکل‌های کنج محدب بررسی می‌شود. در این قسمت، جزئیات مدل‌سازی و فرضیات مدل‌سازی شامل المان کابل، المان

شاتکریت، مدل رفتاری، ابعاد مدل و شرایط مرزی بیان می‌شود.

قرار گیرد. مشخصات مصالح سنگی به کار رفته، نوع قیر مصرفی، روش ساخت نمونه‌ها و آماده‌سازی آن‌ها برای آزمایش، از عوامل مهم در تبیین روش آزمایش می‌باشند که در این قسمت توضیح داده شده‌اند.

۱-۲. المان کابل

در این مطالعه جهت مدل‌سازی میل‌مهار، از المان کابل^۱ استفاده می‌گردد. در نرم‌افزار FLAC3D، جهت مدل‌سازی میل‌مهار با توجه به اینکه در سیستم سازه نگهبان مهارگذاری، مهار تحت کشش قرار می‌گیرد، از المان کابل استفاده می‌گردد. هر المان سازه‌ای کابل با تعریف هندسه، خصوصیات ماده و دوغاب آن مشخص می‌شود. المان کابل به صورت یک ماده الاستوپلاستیک کامل رفتار می‌کند که می‌تواند در برابر کشش و فشار مقاومت کند، ولی دارای مقاومت خمشی نیست. برای اینکه نیروی حاصل از جابه‌جایی نسبی بین کابل و خاک در تمام طول کابل گسترش یابد، باید در قسمت انتهایی آن دوغاب تزریق شود. همچنین، جابه‌جایی نسبی المان کابل و خاک، موجب ایجاد تنش برشی در المان گروت می‌شود و المان گروت تنش برشی را به خاک منتقل می‌کند. المان ساختاری کابل برای مدل کردن سیستم‌های نگهداری که ظرفیت کششی در آن‌ها اهمیت دارد، استفاده می‌شود.

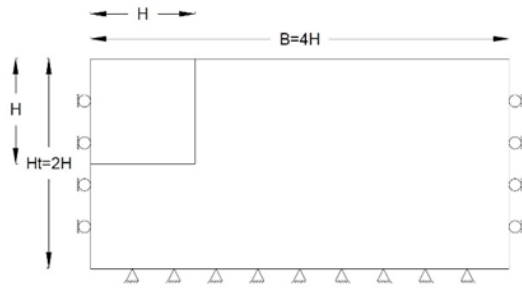
۲-۲. المان شاتکریت

در نرم‌افزار FLAC3D، برای مدل‌سازی المان شاتکریت و سایر سازه‌های جدار نازک که جابه‌جایی حاصل از تغییر شکل‌های برشی در آن‌ها قابل چشم‌پوشی است، می‌توان از المان‌های پوسته‌ای استفاده کرد. المان پوسته‌ای که دارای رفتار الاستیک خطی همسان و بدون حد گسیختگی می‌باشد، به صورت مثلثی سه‌گره‌ای در نظر گرفته می‌شود. در این پروژه، از المان شل DKT (المان خمش صفحه‌ای) که دارای ۹ درجه آزادی است و تنها می‌تواند در برابر خمش مقاومت کند و نه بار غشایی، برای مدل‌سازی شاتکریت استفاده شده است. مدول الاستیسیته فولاد و بتن به ترتیب ۲۰۰ GPa و ۲۰ GPa فرض شده است.

۳-۲. مدل رفتاری

در این مطالعه، از مدل رفتاری پلاستیک با معیار گسیختگی تسلیم‌شونده^۲ که یک مدل رفتاری با کرنش سخت‌شونده است، استفاده شده است. این مدل به طور جامع، بیانگر رفتار غیرخطی خاک (یعنی رفتار بارگذاری/ باربرداری) است و شامل سختی کرنشی اصطکاک و رفتار نرم‌شوندگی تحت برش است. در جدول ۱، مشخصات مصالح برای تعریف مدل رفتاری (CY) در نرم‌افزار FLAC3D نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که مدل‌سازی المان‌های کابل بدون در نظر گرفتن مقاومت خمشی و فرض رفتار الاستوپلاستیک کامل برای کابل‌ها و شاتکریت، از جمله ساده‌سازی‌های این مطالعه است. این فرضیات در راستای دستیابی به اهداف اصلی تحقیق و حفظ قابلیت اجرایی مدل‌سازی سه‌بعدی با پیچیدگی‌های ژئومتریک بالا اعمال شده‌اند. برای تحلیل‌های دقیق‌تر سازه‌ای میل‌مهاری و شاتکریت، مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر و ملاحظات دقیق‌تری در خصوص بارهای خمشی و پیچیده مورد نیاز خواهد بود که می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی



شکل ۱. شرایط مرزی و ابعاد مدل دوبعدی

۳. صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی صحت و اعتبار رویکرد مدل‌سازی عددی به‌کار رفته در این پژوهش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک مطالعه موردی واقعی با داده‌های میدانی منتشر شده مقایسه گردید. برای این منظور، از یک تمرین محک^۱ معتبر بین‌المللی که توسط شوايگر (۲۰۰۲) ارائه شده است، استفاده شد. این مطالعه موردی مربوط به یک پروژه گودبرداری عمیق به ارتفاع ۸/۱۶ متر در پروفیل خاک ماسه برلین است که توسط یک دیوار دیافراگمی و سه ردیف میل‌مهار (انکر) پیش‌تینده پایدارسازی شده است.

در این پروژه، رفتار دیواره به وسیله ابزار دقیق به طور کامل پایش شده و داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی آن در مراجع علمی منتشر شده است. در مرحله صحت‌سنجی، ابتدا این پروژه واقعی با تمام جزئیات هندسی، مشخصات لایه‌های خاک (شامل دو لایه ماسه)، مشخصات دیوار دیافراگمی، مشخصات انکرها و مراحل ساخت (شامل گودبرداری و اعمال نیروی پیش‌تیدگی) مطابق با اسناد مرجع در نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی گردید. نتایج به‌دست آمده از راهنمای نرم‌افزار FLAC3D در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

سپس، نتایج حاصل از تحلیل عددی، به طور مشخص پروفیل تغییرشکل جانبی دیواره دیافراگمی، با نتایج اندازه‌گیری‌های واقعی میدانی^۲ گزارش شده برای

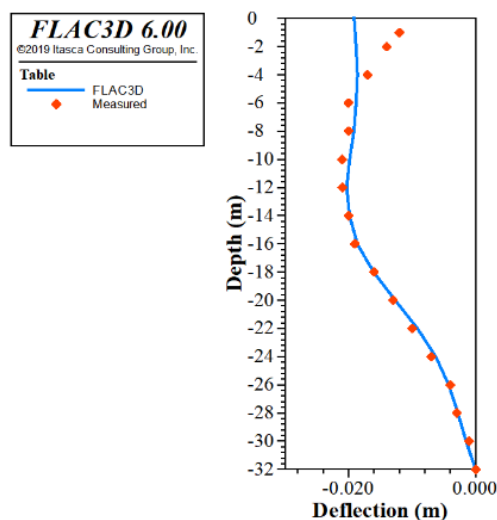
۴-۲. شرایط مرزی

ابعاد مدل باتوجه به آنالیزهای حساسیت انجام شده در مطالعه خداوردیان و همکاران (۲۰۲۱) در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در حالت استاتیک، با استفاده از تکیه‌گاه‌هایی مدل می‌شود که این تکیه‌گاه‌ها باید با شرایط مرزی در واقعیت همخوانی داشته باشند. شرایط مرزی در مسائل متعارف گودبرداری به شرح زیر است (شکل ۱):

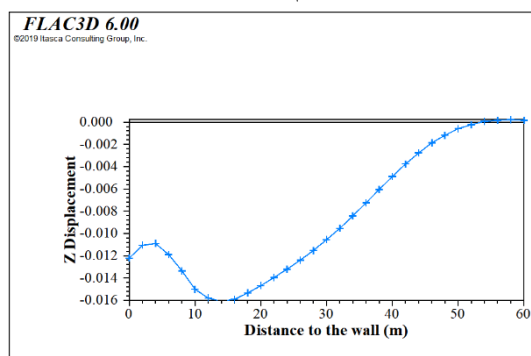
- مرزهای قائم (طرفین مدل) در راستای عمود بر صفحه مرزها مقید می‌شوند.
- مرز افقی در کف مدل در هر سه راستا مقید می‌شود.
- مرز افقی در سطح زمین در هر سه راستا آزاد است.

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری مورد استفاده

پارامتر	واحد	توضیحات
زاویه اصطکاک	درجه	حداقل زاویه‌ی اصطکاک مورد قبول در نرم‌افزار برای محاسبات عددی، ۰/۱ درجه است.
زاویه اتساع (y)	درجه	مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار صفر درجه است.
چسبندگی (C)	kPa	مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار صفر است.
Pref	kPa	معمولاً برابر با فشار هوا (kPa) ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود.
ضریب پواسون (v)	-	مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار ۰/۲ است.
توان باربرداری (m)	-	مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار ۰/۵ است.
Flag-cap	-	در حالتی که مدل دارای کلاهی نباشد مقدار صفر و در حالتی که مدل دارای کلاهی باشد مقدار ۱ است.



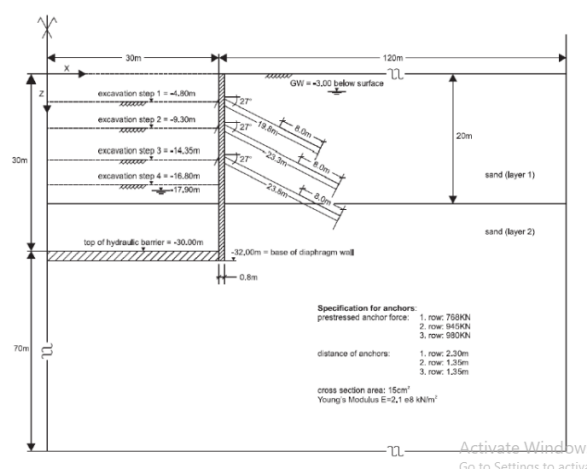
شکل ۳. تغییر شکل محاسبه شده توسط نرم افزار، از راهنمای نرم افزار FLAC3D



شکل ۴. محاسبه نشست زمین در نزدیکی دیوار، از راهنمای نرم افزار FLAC3D

برای اطمینان از صحت عملکرد نرم افزار، نتایج حاصل از راهنمای نرم افزار FLAC3D با نتایج به دست آمده از تحلیل مثال نرم افزار مقایسه می شود. اگر نتایج کاملاً یکسان باشد می توان از صحت عملکرد نرم افزار اطمینان حاصل کرد. شکل ۵ نتایج به دست آمده از تحلیل مثال نرم افزار نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج کاملاً یکسان هستند و می توان به نتایج به دست آمده از نرم افزار FLAC3D اعتماد کرد.

این پروژه مقایسه شد. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج پیش بینی شده توسط مدل عددی (خط ممتد) و مقادیر اندازه گیری شده در محل (نقاط توپر) وجود دارد. این انطباق مطلوب، قابلیت رویکرد مدل سازی، مدل رفتاری خاک و فرضیات به کار رفته در این پژوهش را برای شبیه سازی صحیح این دسته از مسائل ژئوتکنیک تأیید می نماید و می توان با اطمینان کافی به نتایج تحلیل های پارامتریک در ادامه پژوهش استناد نمود (شوایگر، ۲۰۰۲).



شکل ۲. نمای جانبی مدل در نرم افزار FLAC3D

برای اطمینان از صحت عملکرد نرم افزار، نتایج حاصل از راهنمای نرم افزار FLAC3D را با نتایج به دست آمده از تحلیل مثال نرم افزار مقایسه می کنیم اگر نتایج کاملاً یکسان باشد می توان از صحت عملکرد نرم افزار اطمینان حاصل کرد. شکل ۵ و شکل ۶ نتایج به دست آمده از تحلیل مثال نرم افزار نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج کاملاً یکسان هستند و می توان به نتایج به دست آمده از نرم افزار FLAC3D اعتماد کرد.

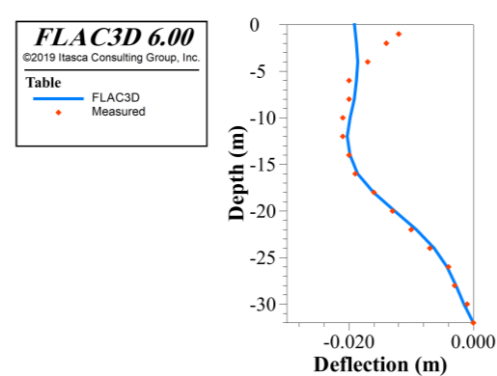
مسطح) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام و در صورتی که مقادیر جابه‌جایی کل دیوار گود بیشتر از مقدار مجاز (در اینجا $H/0.04$) بود، طرح مجدداً اصلاح شد. لازم به ذکر است که برای بررسی تغییر شکل‌ها، از مدل رفتاری CYSOIL بهره گرفته شده است که یک مدل پلاستیک پوش‌دار با قابلیت سخت‌شوندگی کرنشی محسوب می‌شود. پارامترهای کلیدی این مدل رفتاری شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، زاویه اتساع (ψ)، چسبندگی (c)، نسبت پواسون خاک (ν)، توان باربری (m) که در تمامی تحلیل‌های این پژوهش بر اساس فرض پیش‌فرض نرم‌افزار FLAC3D برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است. ضریب بیش‌تحکیمی (OCR) که برای تمامی سناریوها مقدار 1 فرض گردیده (به‌منزله خاک با تحکیم طبیعی)، فشار مرجع که در این مطالعه معادل فشار اتمسفری ($100 \text{ kPa} = p_{ref}$) تعیین شده است، و همچنین پارامترهای G_{ref} و R می‌باشند. محاسبات پارامترهای G_{ref} و R بر اساس روابط مربوطه انجام می‌شود (روابط ۱ و ۲).

$$G_{ref} = \frac{E_{50}}{P_{ref}} \cdot \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (1)$$

$$R = \frac{E_{1\sigma}}{E_{50}} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} - 1 \quad (2)$$

در این روابط، E_{50} مدول بارگذاری سکانت در 50% درصد مقاومت برشی نهایی و E_{ur} مدول بارگذاری-بارگیری مجدد را نشان می‌دهد. در کل مطالعه حاضر، فرض بر این است که $E_{ur} = 3E_{50}$ (بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار FLAC3D) باشد.

ارتفاع گود مدل مرجع 10 متر است و در خاک ضعیف قرار دارد. در این مطالعه، یک ضریب اطمینان طراحی ثابت 1.5 برای سیستم میل‌مهارها در نظر گرفته شد. انتخاب این مقدار متداول، با هدف ایجاد یک مبنای یکنواخت و استاندارد برای مقایسه تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی دیواره‌ها تحت شرایط مختلف خاک و عمق

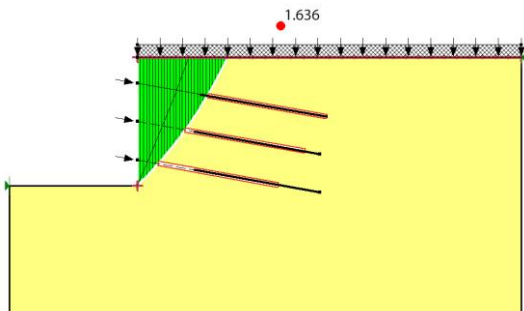


شکل ۵. محاسبه تغییر شکل اندازه‌گیری شده دیوار و تغییر شکل محاسبه شده توسط نرم‌افزار، از تحلیل مثال نرم‌افزار FLAC3D

۴. توصیف مسئله

به‌منظور مطالعه تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی‌های افقی و قائم دیوارهای پایدارسازی شده با سیستم میل‌مهار، به‌طور کلی ۱۸ آنالیز دوبعدی و سه‌بعدی (کنج محدب) با سه ارتفاع گود 10 ، 15 و 20 متر برای سه نوع خاک ضعیف، متوسط و قوی (از نظر تراکم) انجام شد. مشخصات خاک در جدول ۲ نمایش داده شده است. در آنالیزها فرض شده است که تنها سرباری که معادل سربار خیابان و تأسیسات شهری به مقدار 10 kPa به سطح زمین اعمال می‌شود. در مطالعه حاضر، طراحی سیستم میل‌مهار برای یک گود مشخص در سه مرحله انجام شده است. در مرحله اول، آرایش مهارها با استفاده از راهنمای FHWA (بریز، ۱۹۹۷) و بر اساس عمق گود و نوع خاک مورد نظر انتخاب شد. سپس، ضریب اطمینان پایداری کلی طرح اولیه با استفاده از نرم‌افزار تعادل حدی GeoSlope کنترل شد تا اطمینان حاصل شود که از ضریب اطمینان طراحی هدف (در این مطالعه 1.5) کمتر نباشد. در مراحل بعد، ضریب اطمینان پایداری نهایی مدل‌ها با استفاده از روش کاهش مقاومت (SRM) در نرم‌افزار FLAC3D در هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی محاسبه گردید. در انتها، آنالیز تغییر شکل دوبعدی (کرنش

تحلیل‌های زهکشی‌شده خاک‌های ماسه‌ای و مخلوط است که در مراجع معتبر ژئوتکنیک نیز در همین محدوده پیشنهاد می‌شود (برای مثال، داس، ۲۰۱۰). فرض می‌شود که این ساده‌سازی تأثیر قابل توجهی بر روندهای کلی مشاهده شده در نتایج ندارد.



شکل ۶. سطح گوه گسیختگی به همراه ضریب اطمینان پایداری مدل مرجع

گودبرداری صورت گرفته است. اگرچه رفتار خاک‌های مختلف در جداول ۳، ۴ و ۵ با دقت مدل‌سازی شده‌اند، اما استفاده از ضریب اطمینان ثابت، به تمرکز پژوهش بر روی اثرات هندسی و مقایسه‌ای کمک می‌کند و از پیچیدگی‌های تحلیل ناشی از تغییر مداوم پارامترهای طراحی جلوگیری می‌نماید. تحلیل حساسیت نسبت به تغییر ضریب اطمینان برای انواع خاک، در حالی که موضوعی ارزشمند برای طراحی‌های تفصیلی‌تر است، فراتر از حیطه و اهداف اصلی این پژوهش محسوب می‌شود و می‌تواند به عنوان موضوعی برای تحقیقات آتی مطرح گردد.

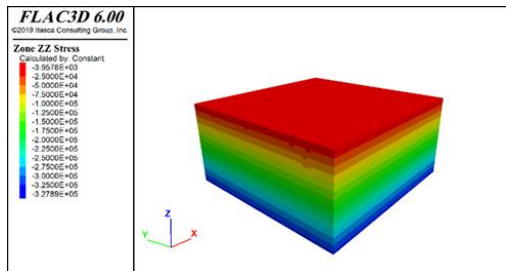
در شکل ۶، سطح گوه گسیختگی مدل در نرم‌افزار Geoslope به همراه ضریب اطمینان پایداری گود نمایش داده شده است.

در تمامی تحلیل‌ها، ضریب پواسون (ν) برای هر سه نوع خاک برابر با 0.3 در نظر گرفته شد. هرچند این پارامتر می‌تواند با تراکم و نوع خاک تغییر کند، اما با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی اصلی خاک (ϕ و c) بر رفتار کنج محذب است، از یک مقدار ثابت و نماینده برای ضریب پواسون استفاده شد تا اثر متغیرهای اصلی مورد مطالعه ایزوله گردد. مقدار 0.3 یک انتخاب رایج و معقول برای

جدول ۲. مشخصات انواع خاک

نام خاک	نوع خاک	ϕ_0	E50 (MPa)	ψ_0	γ (kN/m ³)	μ	Bond Strength (kPa)
ضعیف (I) (Loose)	ماسه روان تا متوسط تراکم (Loose to Medium-Dense) (Sand)	۳۰	۳۰	۰	۱۶/۶	۰/۳	۳۰۰
متوسط (II) (Medium)	ماسه متوسط تراکم تا متراکم (Medium-Dense to Dense) (Sand)	۳۶	۵۷	۶	۱۷/۸	۰/۳	۵۰۰
قوی (III) (Dense)	ماسه متراکم تا بسیار متراکم (Dense to Very Dense) (Sand)	۴۱	۹۰	۱۱	۱۸/۷	۰/۳	۷۰۰

محیط خاک تنها وزن خود را تحمل می‌کند. همچنین، علاوه بر وزن خاک، وزن سربار نیز باید به محیط خاک در شرایط اولیه اعمال گردد. شکل ۸، تنش‌های قائم برجا، پیش از اعمال سربار، گود ۱۰ متری مدل مرجع را نمایش می‌دهد.

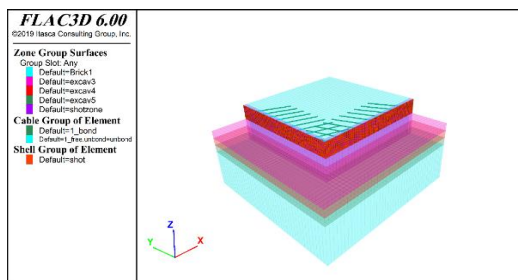


شکل ۸. اعمال تنش قائم برجا در مدل مرجع

۴-۳. خاکبرداری، نصب شاتکریت و جایگذاری

میل مهارها در مدل مرجع

در ابتدا، جابه‌جایی‌های ناشی از تنش‌های برجا صفر می‌شود. سپس مرحله خاک‌برداری، نصب شاتکریت و جایگذاری مهارها انجام می‌شود. این مراحل تا رسیدن به انتهای گود ادامه می‌یابد. در شکل ۹، اولین مرحله از خاک‌برداری، شاتکریت و نصب مهارها در مدل مرجع نشان داده شده است. شایان ذکر است که پوسته‌های شاتکریتی در دو وجه کنج محدب در محل تقاطعشان جدا از یکدیگر فرض شده‌اند و اتصالی ندارند. بدین ترتیب مقاومت کششی پوسته‌های شاتکریتی نمی‌تواند نقش محصورکنندگی برای کنج محدب ایفا کند که محافظه‌کارانه است.



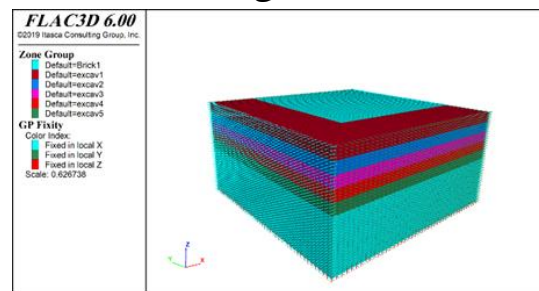
شکل ۹. خاکبرداری، نصب شاتکریت و جایگذاری

میل مهارها در مدل مرجع

این سه دسته خاک به ترتیب متناظر با رفتار خاک‌های ماسه‌ای در تراکم‌های مختلف انتخاب شده‌اند تا طیف وسیعی از شرایط محتمل در پروژه‌های گودبرداری شهری را پوشش دهند. لازم به توضیح است که هرچند خاک‌های ماسه‌ای در حالت ایده‌آل فاقد چسبندگی هستند، اما در شرایط واقعی صحرایی، این خاک‌ها اغلب مقداری چسبندگی ظاهری یا واقعی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از مکانیزم‌هایی نظیر مکش موینگی در حالت غیراشباع، قفل و بست بین ذرات و یا سیمانتاسیون ضعیف باشد. بنابراین، مقادیر اندک چسبندگی در نظر گرفته شده در این پژوهش، برای نمایندگی این اثرات واقعی در پروفیل‌های خاک ماسه‌ای طبیعی انتخاب شده است.

۴-۱. شرایط مرزی مدل مرجع

در این قسمت، مطابق با بخش ۲-۴ شرایط مرزی به مدل اعمال گردید. حرکت عمود بر صفحه مرزهای جانبی مدل بسته شده است. همچنین، حرکت مرزهای پایینی مدل در تمام جهات بسته شده است. شکل ۷، شرایط مرزی اعمال‌شده به مدل مرجع را نشان می‌دهد.



شکل ۷. اعمال شرایط مرزی به مدل مرجع

۴-۲. شرایط اولیه و سربار به مدل مرجع

بدیهی است که هر مدل خاکی پیش از آن که سازه‌ای روی آن قرار گیرد، تنها وزن خود را تحمل کرده و در صورت وجود آب، فشار ناشی از آب نیز در آن وجود دارد. در این پژوهش، خاک خشک فرض شده است و

گوشه، اثر معکوس داشته باشد. در نتیجه، حمایت جانبی که در بخش‌های مستقیم دیواره یا در کنج‌های مقعر ممکن است از طریق اثر طاق‌شدگی فراهم شود، در کنج‌های محدب کمتر است. علاوه بر اینها هندسه کنج محدب به گونه‌ای است که می‌تواند منجر به تمرکز تغییر شکل‌ها در ناحیه تاج گود شود، زیرا خاک در این بخش تمایل به برون‌زدگی بیشتری دارد. این در حالی است که تحلیل دوبعدی مقادیر جابه‌جایی را کمتر از واقعیت (در حالت سه‌بعدی) تخمین می‌زند؛ از این‌رو تحلیل سه‌بعدی ضرورت می‌یابد.

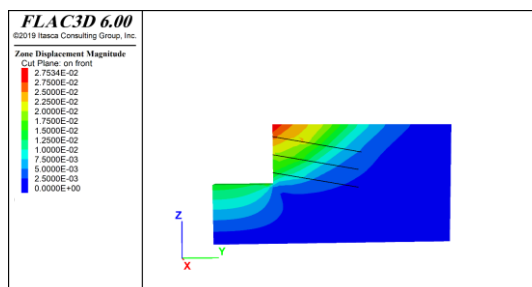
۴-۴. آنالیز پارامتر

برای هر کدام از خاک‌های فوق (جدول ۲) شش بار مدل‌سازی انجام شده است. بدین صورت که در ابتدا برای گودهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری با ضریب اطمینان طراحی ۱/۵ و مقدار چسبندگی 10 kN/m^2 مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی انجام گرفته است. سپس برای گود ۱۵ متری در هر سه نوع خاک مقدار چسبندگی خاک را از عدد 10 kN/m^2 به عدد ۲۰ و ۳۰ افزایش داده و نتایج حاصل از تغییر شکل‌ها و ضریب اطمینان پایداری مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت برای گود ۱۵ متری در هر سه نوع خاک ضریب اطمینان طراحی را به عدد ۲ افزایش داده و نتایج تغییر شکل‌ها و ضریب اطمینان گود مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳، نحوه انجام آنالیز پارامتر برای خاک ضعیف، متوسط و قوی را نشان می‌دهد.

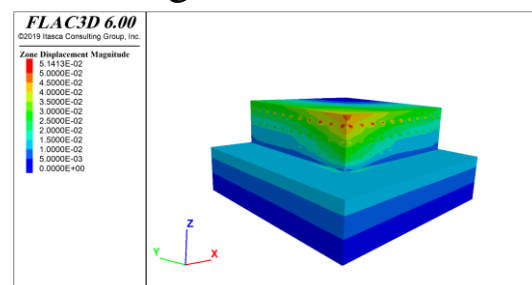
جدول ۳. آنالیز پارامتر برای انواع خاک

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	چسبندگی (kN/m^2)	ضریب اطمینان طراحی
خاک ضعیف	۱۰	۱۰	۱/۵
	۱۵	۱۰	۱/۵
	۲۰	۱۰	۱/۵
	۱۵	۲۰	۱/۵
	۱۵	۳۰	۱/۵
	۱۵	۱۰	۲
	۱۰	۱۰	۱/۵

شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب کانتور جابه‌جایی کل حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی برای گود ۱۰ متری با خاک ضعیف را که در واقع مدل مرجع است نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. کانتور جابه‌جایی کل دوبعدی گود ۱۰ متری با خاک ضعیف (مدل مرجع)



شکل ۱۱. کانتور جابه‌جایی کل سه‌بعدی گود ۱۰ متری با خاک ضعیف (مدل مرجع)

با مقایسه نتایج تغییر شکل‌های حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در محل تاج گود در نرم‌افزار FLAC3D مشخص می‌شود که مقدار جابه‌جایی کل تاج گود در موقعیت کنج محدب (جابه‌جایی کل سه‌بعدی) همواره بیشتر از مقدار جابه‌جایی کل دوبعدی است و این مسئله موقعیت حساس کنج محدب را نشان می‌دهد (شکل ۱۰ و شکل ۱۱)؛ چرا که در تحلیل سه‌بعدی آزادی حرکتی بیشتری نسبت به حالت دوبعدی است. همچنین، در کنج‌های مقعر، هندسه سازه به گونه‌ای است که پتانسیل ایجاد "اثر طاق‌شدگی" یا "اثر گوشه" را فراهم می‌کند که منجر به افزایش سختی سیستم و کاهش جابه‌جایی‌ها می‌شود. اما در کنج‌های محدب، این اثر طاق‌شدگی به صورت مثبت وجود ندارد و حتی ممکن است به دلیل تمرکز تنش‌ها و آزادی بیشتر در اطراف

همواره بیشتر از مقدار جابه‌جایی کل دوبعدی است و این مسئله موقعیت حساس کنج محدب را نشان می‌دهد. برای هر کدام از خاک‌های ذکر شده شش بار مدل‌سازی انجام شد که به طور کلی ۱۸ بار مدل‌سازی دوبعدی و ۱۸ بار مدل‌سازی سه‌بعدی صورت گرفت. جدول ۴ نتایج حاصل تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی کنج محدب در نرم‌افزار FLAC3D را نشان می‌دهد که مقادیر جابه‌جایی کل تاج گود با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از نتایج برداشت می‌شود، مقادیر جابه‌جایی کل تاج گود در محل کنج محدب در تحلیل سه‌بعدی همواره بیشتر از مقادیر دوبعدی است.

۱۵	۱۰	۱/۵
۲۰	۱۰	۱/۵
۱۵	۲۰	۱/۵
۱۵	۳۰	۱/۵
۱۵	۱۰	۲
۱۰	۱۰	۱/۵
۱۵	۱۰	۱/۵
۲۰	۱۰	۱/۵
۱۵	۲۰	۱/۵
۱۵	۳۰	۱/۵
۱۵	۱۰	۲

۵. نتایج و بحث

با مقایسه نتایج حاصل از تغییر شکل‌های حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در محل تاج گود در نرم‌افزار FLAC3D مشخص می‌شود که مقدار جابه‌جایی کل تاج گود در موقعیت کنج محدب (جابه‌جایی کل سه‌بعدی)

جدول ۴. مقایسه جابه‌جایی کل حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	چسبندگی (kN/m ²)	ضریب اطمینان مورد نیاز	جابه‌جایی کل دوبعدی (cm)	جابه‌جایی کل سه‌بعدی (cm)
۱ (ضعیف)	۱۰	۱۰	۱/۵	۲/۷۲	۴/۵۲
۲ (ضعیف)	۱۵	۱۰	۱/۵	۴/۹۹	۸/۱۶
۳ (ضعیف)	۲۰	۱۰	۱/۵	۷/۵۷	۹/۹۰
۴ (ضعیف)	۱۵	۲۰	۱/۵	۴/۶۰	۷/۴۰
۵ (ضعیف)	۱۵	۳۰	۱/۵	۴/۱۰	۶/۵۰
۶ (ضعیف)	۱۵	۱۰	۲	۴/۵۶	۶/۲۰
۷ (متوسط)	۱۰	۱۰	۱/۵	۱/۳۴	۲/۳۳
۸ (متوسط)	۱۵	۱۰	۱/۵	۲/۴۱	۴/۴۰
۹ (متوسط)	۲۰	۱۰	۱/۵	۳/۶۴	۶/۰۴
۱۰ (متوسط)	۱۵	۲۰	۱/۵	۱/۹۰	۳/۲۰
۱۱ (متوسط)	۱۵	۳۰	۱/۵	۱/۸۹	۳/۰
۱۲ (متوسط)	۱۵	۱۰	۲	۱/۹۹	۳/۵۹
۱۳ (قوی)	۱۰	۱۰	۱/۵	۰/۷۹	۱/۵۲
۱۴ (قوی)	۱۵	۱۰	۱/۵	۱/۶۲	۳/۱۹
۱۵ (قوی)	۲۰	۱۰	۱/۵	۲	۳/۵۱
۱۶ (قوی)	۱۵	۲۰	۱/۵	۱/۴۶	۲/۸۱
۱۷ (قوی)	۱۵	۳۰	۱/۵	۱/۱۲	۲/۱۰
۱۸ (قوی)	۱۵	۱۰	۲	۱/۲۹	۲/۳۰

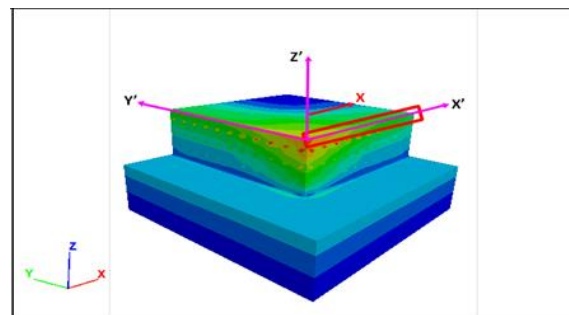
به ضعیف، طول ناحیه تحت تأثیر کنج حدود ۶۰٪ افزایش می‌یابد.

این مشاهده که طول ناحیه تحت تأثیر کنج با افزایش مقاومت خاک کاهش می‌یابد، ریشه در مکانیزم‌های بنیادین رفتار خاک دارد. اندازه این ناحیه ارتباط مستقیمی با ابعاد گوه گسیختگی پتانسیل در پشت دیواره دارد. در خاک‌های ضعیف با پارامترهای مقاومتی پایین (زاویه اصطکاک و چسبندگی کم)، مطابق با تئوری‌های کلاسیک فشار خاک، سطح گسیختگی با زاویه کمتری نسبت به افق تشکیل شده و تا فاصله دورتری از دیواره گسترش می‌یابد. در چنین شرایطی، خاک قابلیت محدودی برای توزیع و مهار تنش‌ها به صورت موضعی دارد که از آن به اثر طاق‌زدگی^۱ یاد می‌شود. در نتیجه، تأثیرات ناشی از نبود قید جانبی در کنج محدب، در حجم بزرگتری از خاک منتشر شده و ناحیه تحت تأثیر وسیع‌تری (تا حدود $2H$) را به وجود می‌آورد.

در مقابل، در خاک‌های قوی با مقاومت برشی بالا، گوه گسیختگی کوچکتر، پرسیب‌تر و بسیار نزدیک‌تر به دیواره تشکیل می‌شود. این خاک‌ها به دلیل سختی و مقاومت بالاتر، به طور مؤثری مکانیزم طاق‌زدگی را فعال می‌کنند. این طاق خاکی، تنش‌ها را به اطراف ناحیه گودبرداری شده منتقل کرده و اثرات آشفستگی هندسی (کنج) را به صورت موضعی مهار می‌کند. به همین دلیل، طول ناحیه‌ای که رفتار آن به طور معناداری تحت تأثیر هندسه سه‌بعدی کنج قرار می‌گیرد، به طور قابل توجهی کوتاه‌تر است (تا حدود $1/25 H$).

در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب برای گود به ارتفاع ۱۵ متر، تأثیر چسبندگی در خاک ضعیف، متوسط و قوی بررسی شده است. مقدار چسبندگی خاک $10, 20, 30 \text{ kN/m}^2$ و در قسمت (الف) مقادیر تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی و در قسمت (ب) نسبت تغییرشکل (PSR) مقایسه شده است.

به منظور مطالعه اثر کنج محدب بر تغییرشکل دیواره گود، از کمیت نسبت کرنش مسطح استفاده می‌شود که به اختصار PSR نامیده می‌شود. کمیت را می‌توان برای جابه‌جایی کل تعریف نمود. کمیت PSR برای جابه‌جایی کل به صورت نسبت جابه‌جایی کل سه‌بعدی به جابه‌جایی کل حاصل از تحلیل دوبعدی تعریف می‌شود. نمودار PSR بر اساس فاصله از کنج محدب تعریف می‌شود که در شکل ۱۲ منظور از فاصله از کنج محدب نشان داده شده است.

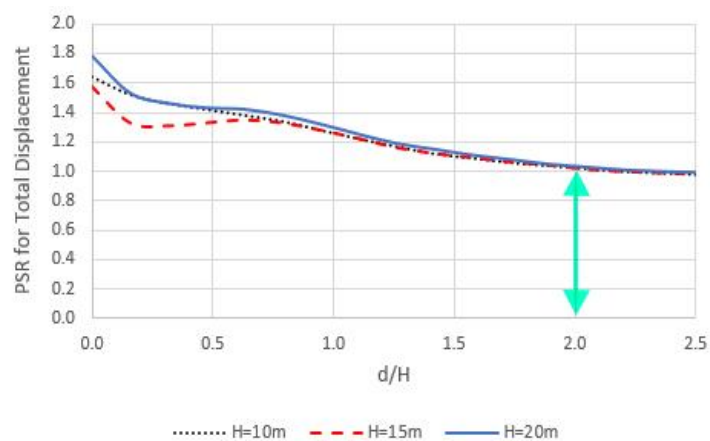


شکل ۱۲. فاصله از کنج در کنج محدب

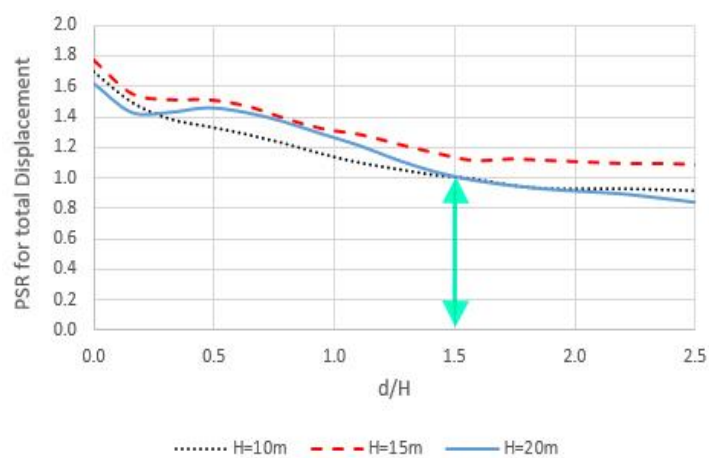
شکل ۱۳، نمودار PSR جابه‌جایی کل گود بر اساس فاصله از کنج محدب (X) برای گودهای با ارتفاع ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری با خاک ضعیف، متوسط و قوی برای گود با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری را نشان می‌دهد.

ناحیه‌ای از اطراف کنج که وضعیت تغییرشکل‌ها در آن متأثر از هندسه سه‌بعدی است و دارای PSR جابه‌جایی کل بزرگتر از یک است ناحیه تحت تأثیر کنج تعریف می‌شود. طول ناحیه تحت تأثیر کنج برای هر مدل با استفاده از نمودارهای شکل ۱۳ تعیین و با خط قائم سبز رنگ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، طول‌های ناحیه تحت تأثیر کنج برای خاک‌های ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب برابر $2H$ ، $1/5H$ و $1/25H$ است (H ارتفاع گود است). جالب است که این طول تابع نوع خاک بوده و با ضعیف شدن خاک افزایش می‌یابد. با تغییر نوع خاک از قوی

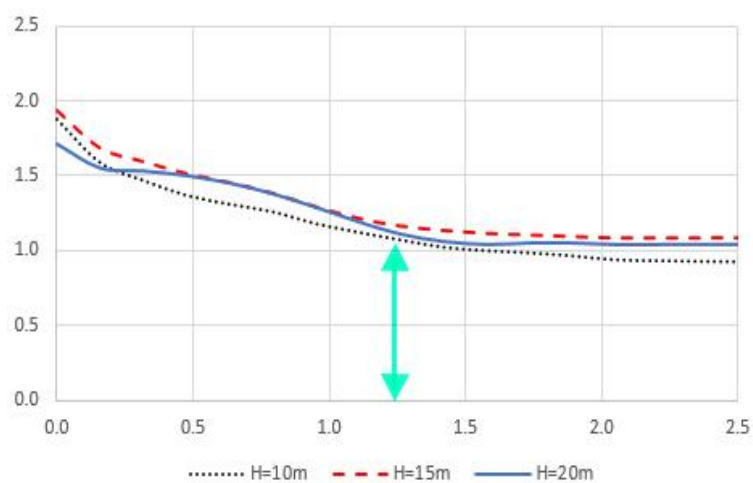
تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی دیواره‌های گودبرداری مهار شده: تحلیل سه‌بعدی



(الف)

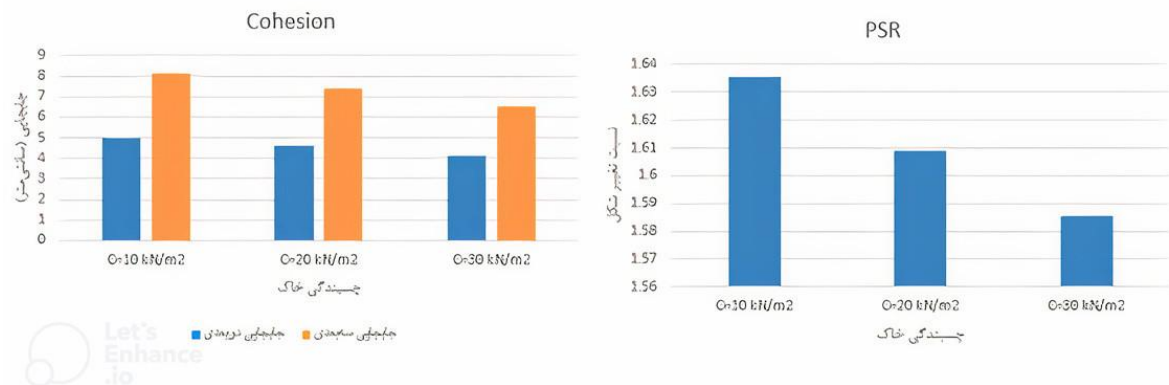


(ب)



(ج)

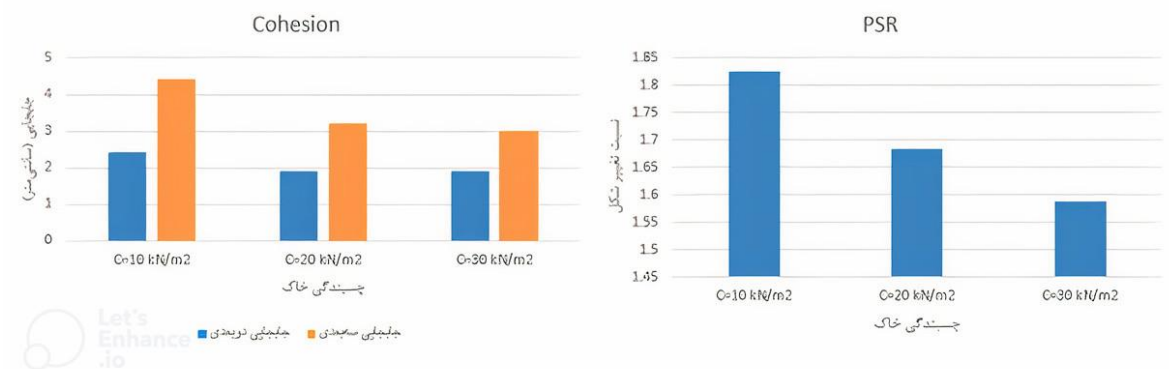
شکل ۱۳. نمودار PSR جابه‌جایی کل در محل تاج گود بر حسب فاصله از کنج محدب
الف) خاک ضعیف، ب) خاک متوسط و ج) خاک قوی



(ب)

(الف)

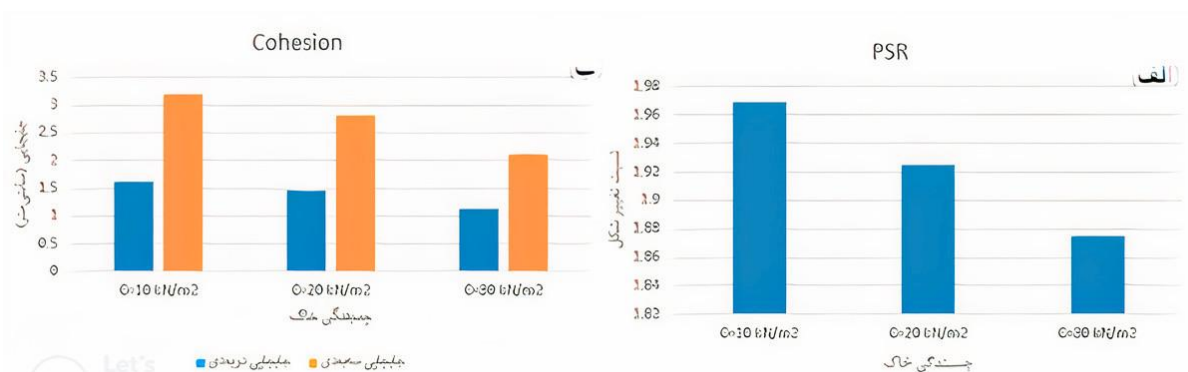
شکل ۱۴. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر چسبندگی خاک در گود ۱۵ متری با خاک ضعیف بر جابه‌جایی دوبعدی و سه‌بعدی



(ب)

(الف)

شکل ۱۵. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر چسبندگی خاک در گود ۱۵ متری با خاک متوسط بر جابه‌جایی دوبعدی



(ب)

(الف)

شکل ۱۶. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر چسبندگی خاک در گود ۱۵ متری با خاک قوی بر جابه‌جایی دوبعدی و قوی

همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، با تغییر چسبندگی خاک از مقدار 10 kN/m^2 به 30 برای گود به ارتفاع 15 متر در خاک ضعیف، مقدار تغییرشکل دوبعدی تاج گود از $4/99$ به $4/10$ سانتی‌متر و میزان تغییرشکل سه‌بعدی کنج محدب از $8/16$ به $6/50$ سانتی‌متر رسیده است. این اعداد نشان‌دهنده تأثیر پارامتر چسبندگی خاک بر تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشند، که با افزایش چسبندگی، تغییرشکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در خاک ضعیف کاهش پیدا می‌کند. مقادیر PSR از $1/63$ به $1/58$ نزدیک شده است که نشان می‌دهد نسبت تغییرشکل هم با افزایش چسبندگی کاهش پیدا کرده است. میانگین PSR عدد $1/60$ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۱۵ مشخص است، با تغییر چسبندگی خاک از مقدار 10 kN/m^2 به 30 برای گود به ارتفاع 15 متر در خاک متوسط، مقدار تغییرشکل دوبعدی تاج گود از $2/41$ به $1/89$ سانتی‌متر و میزان تغییرشکل سه‌بعدی کنج محدب از $4/40$ به 3 سانتی‌متر رسیده است. این اعداد، تأثیر پارامتر چسبندگی خاک بر تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی را نشان می‌دهند که با افزایش چسبندگی میزان جابه‌جایی کاهش پیدا کرده است. مقادیر PSR از $1/82$ به $1/58$ نزدیک شده است که نشان می‌دهد نسبت تغییرشکل هم با افزایش چسبندگی کاهش پیدا کرده است. میانگین PSR عدد $1/69$ را نشان می‌دهد.

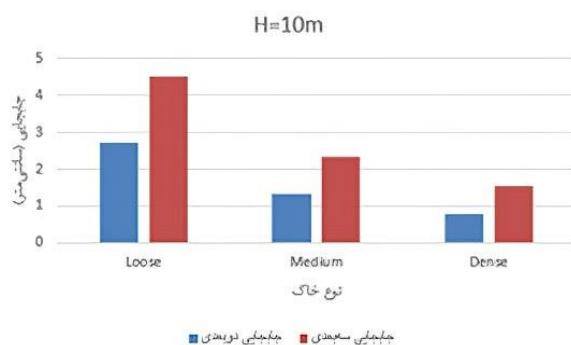
همان‌طور که از شکل ۱۶ مشخص است، با تغییر چسبندگی خاک از مقدار 10 kN/m^2 به 30 سانتی‌متر برای گود به ارتفاع 15 متر در خاک قوی، مقدار تغییرشکل دوبعدی تاج گود از $1/62$ به $1/12$ سانتی‌متر و میزان تغییرشکل سه‌بعدی کنج محدب از $3/19$ به $2/10$ سانتی‌متر رسیده است. این اعداد نشان‌دهنده تأثیر پارامتر چسبندگی خاک بر تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشند. مقادیر PSR از $1/96$ به $1/87$ نزدیک شده است که نشان می‌دهد نسبت تغییرشکل هم با افزایش چسبندگی کاهش پیدا کرده است. میانگین PSR عدد $1/91$ را نشان می‌دهد.

کاهش مقدار PSR با افزایش چسبندگی را می‌توان اینگونه تبیین نمود که پارامتر چسبندگی (c) باعث افزایش یکپارچگی و تمامیت در توده خاک می‌شود. در شرایطی که چسبندگی خاک کم است، به دلیل عدم وجود قید جانبی کافی در کنج محدب، خاک در این ناحیه آزادی حرکت بسیار بیشتری نسبت به شرایط کرنش مسطح دارد و این امر منجر به مقادیر بالای PSR می‌شود. با افزایش چسبندگی، توده خاک رفتار منسجم‌تری از خود نشان می‌دهد و قابلیت بیشتری برای توزیع تنش‌ها و مقاومت در برابر تغییرشکل‌ها به صورت یکپارچه پیدا می‌کند. این انسجام داخلی تا حدی نبود قید هندسی در کنج را جبران کرده و یک نوع "اثر طاق‌زدگی داخلی" در خاک ایجاد می‌کند. در نتیجه، جابه‌جایی "اضافی" که به دلیل اثر سه‌بعدی کنج رخ می‌دهد، کاهش یافته و رفتار کنج به رفتار بخش مستقیم دیواره (کرنش مسطح) نزدیک‌تر می‌شود. این امر باعث می‌شود که نسبت جابه‌جایی سه‌بعدی به دوبعدی (PSR) کاهش یابد. برای هر سه نوع خاک ذکر شده، با افزایش چسبندگی مقدار جابه‌جایی دوبعدی و سه‌بعدی کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با مقایسه نتایج دوبعدی و سه‌بعدی می‌توان دریافت که مقادیر جابه‌جایی سه‌بعدی تاج گود نسبت به حالت دوبعدی برای کنج محدب بیشتر شده است. این امر ثابت می‌کند که برای محاسبه تغییرشکل‌های کنج محدب نمی‌توان به نتایج دوبعدی (کرنش مسطح) اکتفا کرد و باید تحلیل سه‌بعدی انجام گیرد.

همچنین، مقدار PSR با افزایش چسبندگی در هر سه نوع خاک کاهش پیدا می‌کند؛ اما مقدار PSR میانگین برای خاک ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب برابر $1/60$ ، $1/69$ و $1/91$ را نشان می‌دهد. این بدین معنی است که مقدار میانگین PSR با تراکم شدن خاک افزایش پیدا کرده است. در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، تأثیر نوع خاک برای گود به ارتفاع 10 متر بررسی شده است. تغییرشکل دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب در خاک ضعیف، متوسط و قوی و همچنین، نسبت تغییرشکل (PSR) مقایسه شده است.

به ۲ سانتی‌متر و جابه‌جایی سه‌بعدی کنج محدب از ۹/۹ به ۳/۵۱ سانتی‌متر نزدیک شده است؛ که این اعداد تأثیر نوع خاک بر میزان جابه‌جایی کنج محدب را نشان می‌دهند. همچنین، مقادیر PSR اعداد ۱/۳۰، ۱/۶۵ و ۱/۷۵ را نشان می‌دهند که در واقع نسبت تغییر شکل با متراکم شدن خاک افزایشی است.

همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اطمینان طراحی گود از ۱/۵ به ۲، مقادیر جابه‌جایی دوبعدی و سه‌بعدی کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ برای گود به ارتفاع ۱۵ متر به ترتیب برای خاک ضعیف، متوسط و قوی نشان داده شده است، میزان تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی با افزایش ضریب اطمینان طراحی کاهش پیدا کرده است.



(ب)

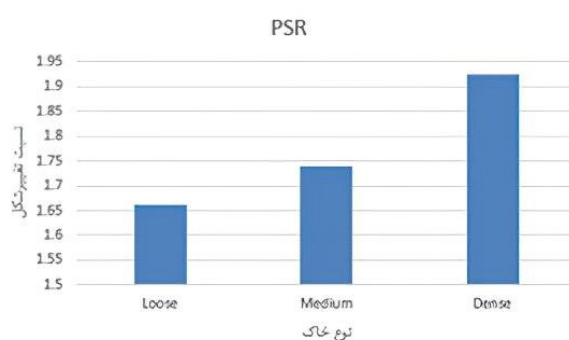
شکل ۱۷. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر نوع خاک بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی برای گود ۱۰ متری

همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، برای گود ۱۰ متری، با تغییر نوع خاک از ضعیف به قوی، مقدار جابه‌جایی دوبعدی از عدد ۲/۴۱ به ۰/۷۹ سانتی‌متر رسیده است و مقدار جابه‌جایی سه‌بعدی از ۴/۵۲ به ۱/۵۲ سانتی‌متر رسیده است. این نشان دهنده تأثیر نوع خاک در تغییر شکل تاج گود و در واقع کنج محدب است. هر چه خاک متراکم‌تر باشد میزان جابه‌جایی کمتر می‌شود.

همچنین، مقادیر PSR اعداد ۱/۶۶، ۱/۷۳ و ۱/۹۲ را نشان می‌دهد که در واقع نسبت تغییر شکل با متراکم شدن خاک افزایشی است.

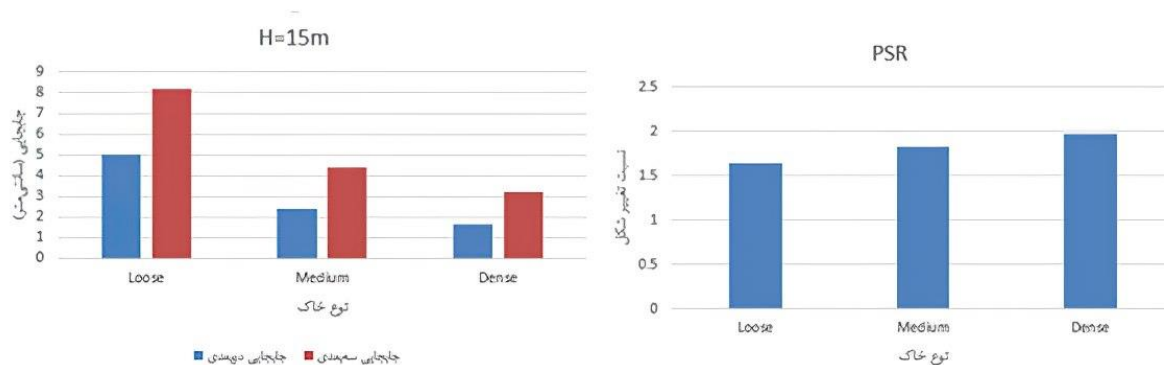
همان‌طور که از شکل ۱۸ برداشت می‌شود، با متراکم شدن خاک، مقدار تغییر شکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی کاهش پیدا کرده است. مقادیر جابه‌جایی دوبعدی تاج گود از ۴/۹۹ به ۱/۶۲ سانتی‌متر و سه‌بعدی کنج محدب از ۸/۱۶ به ۳/۱۹ سانتی‌متر نزدیک شده است. همچنین، مقادیر PSR اعداد ۱/۶۳، ۱/۸۲ و ۱/۹۶ را نشان می‌دهد که در واقع نسبت تغییر شکل با متراکم شدن خاک افزایشی است.

همان‌طور که از شکل ۱۹ مشخص است، مقادیر جابه‌جایی با تغییر نوع خاک از ضعیف به قوی، کاهش پیدا کرده است. مقدار جابه‌جایی دوبعدی تاج گود از عدد ۷/۵۷



(الف)

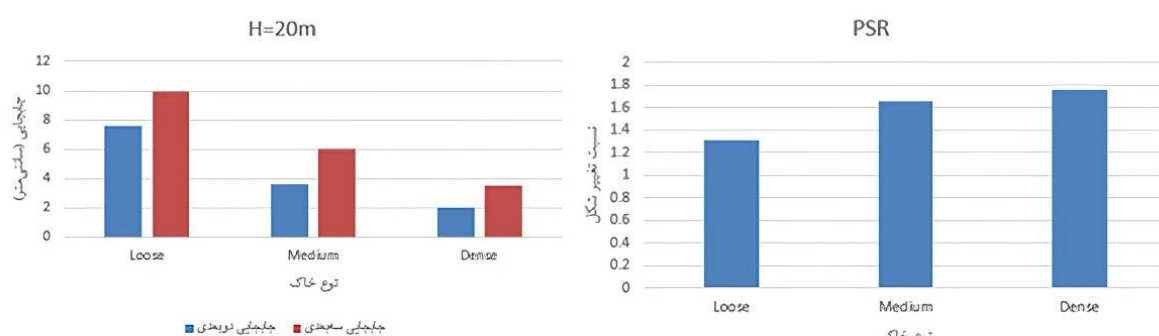
تأثیر کنج محدب بر جابه‌جایی دیواره‌های گودبرداری مهار شده: تحلیل سه‌بعدی



(ب)

(الف)

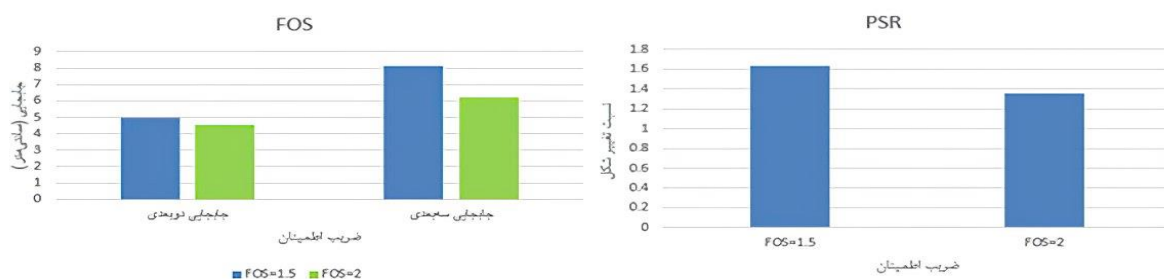
شکل ۱۸. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر نوع خاک بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی برای گود ۱۵ متری



(ب)

(الف)

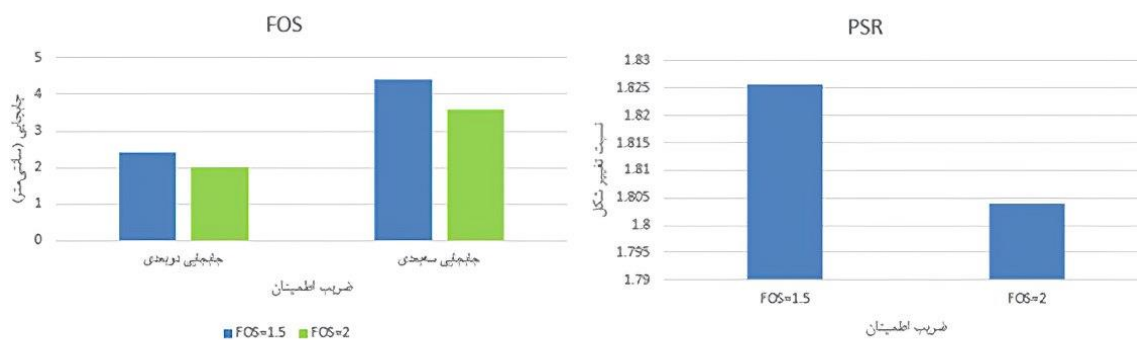
شکل ۱۹. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر نوع خاک بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی برای گود ۲۰ متری



(ب)

(الف)

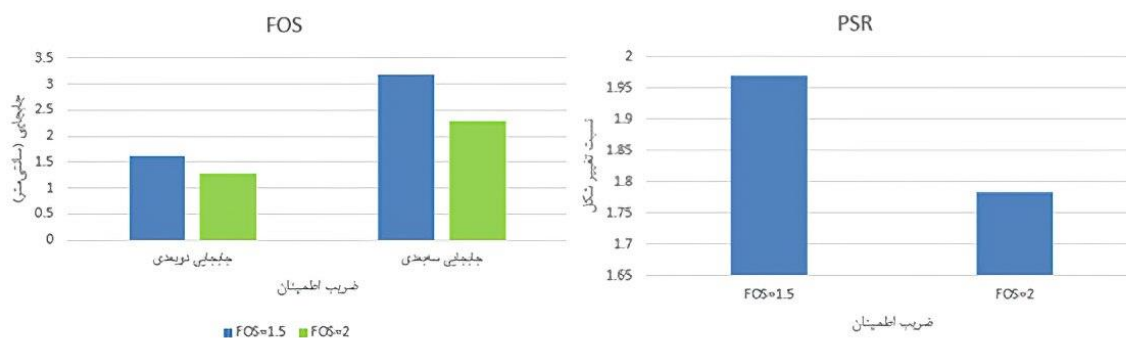
شکل ۲۰. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر تغییر ضریب اطمینان پایداری گود بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی در خاک ضعیف



(ب)

(الف)

شکل ۲۱. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر تغییر ضریب اطمینان پایداری گود بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی در خاک متوسط



(ب)

(الف)

شکل ۲۲. الف) نمودار PSR و ب) نمودار تأثیر تغییر ضریب اطمینان پایداری گود بر تغییر شکل دوبعدی و سه‌بعدی در خاک قوی

جدول ۵. مقایسه ضرایب اطمینان دوبعدی و سه‌بعدی در خاک ضعیف

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	چسبندگی (kN/m ²)	ضریب اطمینان مورد نیاز	ضریب اطمینان دوبعدی Geoslope	ضریب اطمینان دوبعدی FLAC3D	ضریب اطمینان سه‌بعدی FLAC3D
I	۱۰	۱۰	۱/۵	۱/۶۳	۱/۵۹	۱/۵
	۱۵	۱۰	۱/۵	۱/۸۹	۱/۵۳	۱/۴۴
	۲۰	۱۰	۱/۵	۲/۰۱	۱/۵۳	۱/۴۱
	۱۵	۲۰	۱/۵	۱/۶۵	۱/۵۶	۱/۴۷
	۱۵	۳۰	۱/۵	۱/۶۲	۱/۵۹	۱/۵۳
	۱۵	۱۰	۲	۳/۸۱	۱/۹۷	۱/۷۸

جدول ۶. مقایسه ضرایب اطمینان دوبعدی و سه‌بعدی در خاک متوسط

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	چسبندگی (kN/m ²)	ضریب اطمینان مورد نیاز	ضریب اطمینان دوبعدی Geoslope	ضریب اطمینان دوبعدی FLAC3D	ضریب اطمینان سه‌بعدی FLAC3D
II	۱۰	۱۰	۱/۵	۱/۷۷	۱/۷۸	۱/۶۰
	۱۵	۱۰	۱/۵	۱/۶۶	۱/۵۹	۱/۴۷
	۲۰	۱۰	۱/۵	۱/۷۳	۱/۶۶	۱/۵۳
	۱۵	۲۰	۱/۵	۱/۶۶	۱/۶۹	۱/۵۶
	۱۵	۳۰	۱/۵	۱/۶۶	۱/۶۰	۱/۵۶
	۱۵	۱۰	۲	۲/۶۷	۲/۰۳	۱/۸۱

جدول ۷. مقایسه ضرایب اطمینان دوبعدی و سه‌بعدی در خاک قوی

نوع خاک	ارتفاع گود (m)	چسبندگی (kN/m ²)	ضریب اطمینان مورد نیاز	ضریب اطمینان دوبعدی Geoslope	ضریب اطمینان دوبعدی FLAC3D	ضریب اطمینان سه‌بعدی FLAC3D
III	۱۰	۱۰	۱/۵	۱/۷۰	۱/۶۶	۱/۵۳
	۱۵	۱۰	۱/۵	۱/۶۴	۱/۵۳	۱/۴۴
	۲۰	۱۰	۱/۵	۱/۷۳	۱/۷۲	۱/۵۶
	۱۵	۲۰	۱/۵	۱/۷۱	۱/۷۲	۱/۵۶
	۱۵	۳۰	۱/۵	۱/۶۹	۱/۷۲	۱/۶۰
	۱۵	۱۰	۲	۲/۳۷	۲/۱۹	۱/۹۴

۱. جابه‌جایی دیواره در ناحیه کنج محدب به طور قابل توجهی بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط تحلیل‌های متداول دوبعدی (کرنش مسطح) است.

۲. طول ناحیه متأثر از کنج (که در آن جابه‌جایی سه‌بعدی بیشتر از دوبعدی است) تابعی از مقاومت خاک بوده و برای خاک‌های ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب برابر $1.0H$ ، $2.0H$ و $1.25H$ (ارتفاع گود) به دست آمد. این طول وابستگی معناداری به ارتفاع گود نشان نداد.

۳. با افزایش مقاومت خاک (از ضعیف به قوی)، جابه‌جایی‌ها کاهش یافته، اما نسبت جابه‌جایی سه‌بعدی به دوبعدی (PSR) افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر تحلیل سه‌بعدی در خاک‌های مقاوم‌تر است.

۴. افزایش چسبندگی خاک منجر به کاهش همزمان جابه‌جایی‌ها و نسبت PSR می‌شود.

در خصوص کاربرد عملی نتایج این پژوهش، می‌توان به ویژه قواعد سرانگشتی ارائه شده برای طول ناحیه تحت تأثیر کنج (از $1.25H$ تا $2H$) که کاربرد عملی مستقیمی برای مهندسان طراح دارد اشاره کرد. این قواعد به طراحان اجازه می‌دهد تا در فاز طراحی اولیه و با استفاده از تحلیل‌های رایج دوبعدی، محدوده‌ای که نیازمند توجه ویژه و تقویت سیستم پایدارسازی در اطراف کنج‌های محدب است را به سرعت برآورد کرده و طرحی ایمن‌تر و بهینه‌تر ارائه دهند.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر کنج‌های محدب بر رفتار دیواره‌های گودبرداری مهار شده با سیستم میل‌مهار از طریق تحلیل‌های عددی سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های اصلی به شرح زیر است:

۵. افزایش ضریب اطمینان طراحی (از ۱/۵ به ۲) مطابق
انتظار باعث کاهش جابه‌جایی‌ها در هر دو حالت دویعدی
و سه‌بعدی می‌گردد.
۶. ضریب اطمینان پایداری محاسبه شده برای مدل
سه‌بعدی کنج محدب، کمتر از مقدار متناظر دویعدی آن
است که بیانگر پایداری کمتر این ناحیه بحرانی است.

۷. مراجع

- Ashrafi, H. 2021. "Excavation and guard structures". Noavar. [In Persian]
- BRIDGES, H. 1997. US Department of Transportation-Federal Highway Administration.
- Imeni, H., Ghanbari, A., Rashidi, F. and Shahir, H. 2017. "Numerical study on the effect of convex corner on the behavior of deep excavation". *Electr. J. Geotech. Eng.*, 22(10): 3965–3984.
- Das, B. M. 2010. "Principles of Geotechnical Engineering". Cengage Learning.
- Duzceer, R., Mothersille, D., Okumusoglu, B. and Gokalp, A. 2015. "Support of 25 m deep excavation using ground anchors in Russia". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 168(4): 1-15.
- Jeremic, B., Shibamoto, Y., Milicic, B., Nikolic, N., et al. 2000. "Hyperfractionated radiation therapy with or without concurrent low-dose daily cisplatin in locally advanced squamous cell carcinoma of the head and neck: A prospective randomized trial". *J. Clin. Oncol.*, 18(7).
- Khodaverdian, S., Hazeghian, M. and Mokhtari, M. 2021. "Three-dimensional numerical study of the effect of convex corners on the displacements induced by excavation for soil-nailed walls". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 53(8): 3279–3298.
- Khorami, H. 2017. "Analysis and comparison of deep excavation wall stabilization using nailing and anchoring methods". Saroye Institute of Higher Education. [In Persian]
- Mokhtari Dehaqani, M., Mokhtari, M., Hazeghian, M. and Etarabi, H. 2023. Three-dimensional numerical study of the effect of convex corners on excavation-induced displacements for a wall stabilized by the tie rod method". 13th International Congress of Civil Engineering. [In Persian]
- Nierlich, H. and Bruce, D. A. 1997. "A review of the post-tensioning institute's revised recommendations for prestressed rock and soil anchors". In *Ground Anchorages and Anchored Structures: Proceedings of the International Conference Organized by the Institution of Civil Engineers*.
- Rezamand, A., Afrazi, M. and Shahidikhah, M. 2021. "Study of convex corners' effect on the displacements induced by soil-nailed excavations". *J. Adv. Eng. Comput.*, 5(4): 277–290.
- Rezaei, M. 2013. "Angular effect of expansion on analyses related to excavation guard structures". Isfahan University of Technology. [In Persian]
- Sabatini, P. J., Pass, D. G. and Bachus, R. C. 1999. "Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems". USDOT, FHWA.
- Schweiger, H. F. 2002. "Results from numerical benchmark exercises in geotechnics". In 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 305-314. Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.
- Shickel, B., Tighe, P. J., Bihorac, A. and Rashidi, P. 2018. "Deep EHR: A survey of recent advances in deep learning techniques for electronic health record (EHR) analysis". *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, 22(5): 1589–1604. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2767063>
- Sun, J., Wang, S., Shi, X., Wu, F. and Zeng, L. 2019. "Study on the design method for the deformation state control of pile-anchor structures in deep foundation pits". *Adv. Civ. Eng.*, 2019: 9641674. <https://doi.org/10.1155/2019/9641674>
- Szepesházi Attila, M. A. M. B. 2016. "Three dimensional finite element analysis of deep excavations' concave corners". *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 60(3): 371–378. <https://doi.org/10.3311/PPci.8608>
- Vafi Shahri, J., Pourrostam, T., Ghareh, S. and Mazrouei, A. 2023. "Design of a guard structure system for urban ditches with value engineering approach". *Struct. Eng. Constr.*, 10(9): 73-92. [In Persian]
- Wu, C. H., Ou, C. Y. and Tung, N. 2010. "Corner effects in deep excavations-establishment of a forecast model for taipei basin T2 zone". *J. Mar. Sci. Tech.*, 18(1).
- Zad, A. A. and Hejr, M. M. 2019. "Investigation of corner effects of deep excavations using the combination of soil nailing and ground-anchors methods". In 13th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Perth, Australia.
- Zhang, M., Wang, X., Yang, G. and Wang, Y. 2011. "Numerical investigation of the convex effect on the behavior of crossing excavations". *J. Zhejiang Univ.-Sci. A*, 12(10): 747–757. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1100028>
- Zhao, W., Chen, C., Li, S. and Pang, Y. 2015. "Researches on the influence on neighboring buildings by concave and convex location effect of excavations in soft soil area". *J. Intell. Robot. Syst.*, 79(3): 351–369. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0109-7>