

بررسی محدوده‌های تحت تأثیر کنج مقعر قائم و تعیین نسبت کرنش مسطح در گودبرداری‌های بسیار عمیق

نگرس ریاحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حامد بایسته* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۱۵-۲۵، (پژوهشی)

در پروژه‌های کاربردی عموماً از مدل‌سازی سه‌بعدی پرهیز می‌شود و با مدل‌های کرنش مسطح دوبعدی، طراحی صورت می‌گیرد، که افزایش هزینه‌های طرح را در پی خواهد داشت. در پژوهش حاضر، با بررسی نتایج پایش یک گود بسیار عمیق به عمق ۶۰ متر، که با روش مهارگذاری پایدارسازی شده بود و با رویکرد در نظر گرفتن اثر کنج مقعر قائم در مدل‌های سه‌بعدی، عواملی همچون: تأثیر عمق و طول گود و نسبت آنها در تغییر شکل‌ها و چگونگی توزیع آن در سطح دیواره، واکاوی و نسبت کرنش مسطح و عوامل مؤثر در آن ارزیابی شده است. کمترین مقدار نسبت کرنش مسطح در فاصله‌ی ۵ متری از گوشه رخ داده و مقدار آن در آن‌جا بین صفر تا ۰/۴۵ بوده است. به منظور بهینه‌سازی گودها، ابتدا بدون منظور کردن اثر سه‌بعدی و در حالتی با منظور کردن اثر کنج‌ها طراحی شده‌اند و با حفظ تغییر شکل یکسان بیشینه، مقایسه‌ی احجام صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند در صورت منظور کردن اثر کنج در طراحی روش پایدارسازی و متناسب با ابعاد گود، میزان ۲۱ الی ۵۵ درصد در طول مهارها صرفه‌جویی خواهد شد.

واژگان کلیدی: گود بسیار عمیق، تأثیر کنج، نسبت کرنش مسطح، مهارگذاری، بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

امروزه در ایران و خصوصاً کلان‌شهرها، تعداد زیادی پروژه‌های بزرگ با گودبرداری‌های عمیق تعریف، طراحی و اجرا می‌شوند. تأمین ایمنی مناسب از لحاظ پایداری و تغییر شکل‌های دیواره‌ی گود و نشست خاک مجاور، اهمیت ویژه‌ی دارد. نکته‌ی قابل توجه، بهینه‌سازی اقتصادی طرح‌های پایدارسازی همزمان با تأمین ضوابط آیین‌نامه‌ی است. یکی از مواردی که می‌تواند سبب بهینه‌سازی اقتصادی طرح‌های گودبرداری شود، منظور کردن آثار کنج‌ها در آنالیزها و به بیانی مدل‌سازی سه‌بعدی گودهاست. آنچه عموماً در پروژه‌های اجرایی متداول است، رفتار گودهاست که عموماً به صورت دوبعدی، مدل‌سازی و در حالت کرنش مسطح بررسی می‌شوند. هر چند در گودهای با طول دیواره‌ی زیاد و در وسط دیواره‌ها، فرض اخیر صحیح است، لیکن در فواصل نزدیک به کنج‌ها، رفتار متفاوت است و نمی‌توان آنها را به صورت کرنش مسطح مدل‌سازی کرد. برای ارزیابی شرایط حاکم بودن فرض کرنش مسطح حاکم، پارامتری با نام نسبت کرنش مسطح (PSR)^۱ در ادبیات فنی رواج یافته است.^۱ پارامتر PSR برای تعیین محدوده‌ی است که متأثر از کنج‌ها و تابع نسبت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۵/۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

DOI:10.24200/J30.2022.58809.3004

مشخصات هندسی گود، سختی سیستم و ضریب اطمینان در برابر بالاترین کف گود پرداختند و دریافتند که اثرپذیری از رفتار سه‌بعدی در گودهای با ابعاد کوچک‌تر، بیشتر است؛ به گونه‌ای که در گود با محیط 80×80 متر، تغییرشکل در عمق‌های مختلف در مدل سه‌بعدی و حالت کرنش سطح تفاوت چندانی ندارد. در حالی که در گود با محیط 20×20 متر، مقادیر مذکور تفاوت قابل توجهی دارند. و همکاران (۲۰۱۰)،^[۶] نموداری جهت بررسی اثر گوشه در مدل‌سازی گود مبتنی بر عدد نسبت کرنش سطح ارائه کردند و نشان دادند بیشینه‌ی جابه‌جایی دیوار در هر مرحله‌ی گودبرداری حدوداً $2/5$ تا $5/5$ درصد عمق گودبرداری در آن مرحله برای مقطع نزدیک به وسط است. همچنین جابه‌جایی دیواره در هر نقطه بستگی به عمق گودبرداری و فاصله‌ی آن نقطه از گوشه‌ها دارد و جابه‌جایی در گوشه‌ها در حدود 20 الی 60 درصد جابه‌جایی در وسط است. زمردیان و رضایی (۲۰۱۳)، نیز نشان دادند که با افزایش چسبندگی، نسبت کرنش سطح افزایش می‌یابد و با افزایش عمق، تأثیرپذیری پارامتر نسبت کرنش سطح از پارامتر چسبندگی بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی از تأثیر عمق در نسبت کرنش سطح کاسته می‌شود. برای هر عمق معین، با تغییر ضریب کشسانی نسبت کرنش سطح تغییر قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهد و این نسبت تقریباً ثابت است. به ازاء ضرایب کشسانی ثابت، با افزایش عمق نسبت کرنش سطح کاهش می‌یابد.^[۷] ژائو^۶ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۸] با مطالعه‌ی موردی یک گودبرداری عمیق به بررسی میزان تغییرشکل‌های ایجاد شده در گوشه‌های محدب و مقعر گود اخیر، که بر روی آنها سازه‌هایی موجود بود، پرداختند و دریافتند که الگوی نشست‌های ایجاد شده به مانند سطحی سه‌بعدی است و اگر سازه بر روی ناحیه‌ی که آثار تغییرشکل ترکیبی نشست و پیچش گوشه در آن بیشینه است، قرار گیرد، موجب ایجاد ترک در آن خواهد شد. لا^۷ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۹] در مقایسه‌ی نتایج آنالیز برگشتی سه‌بعدی با مقدار جابه‌جایی افقی اندازگیری شده، نشان دادند که هر چند مقدار مدول کشسانی خاک در رفتار گود مهم است، لکن تأثیر هندسه و اثر گوشه‌ی گود در عملکرد کلی، از جمله جابه‌جایی افقی نیز پراهمیت است. ژائو و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۰] با ارزیابی گودی به ارتفاع 12 متر، تأکید داشتند که در راستای بهینه‌سازی طرح، نباید در فرایند مدل‌سازی از فرض کرنش سطح استفاده کرد. چرا که در این موارد، دیوارهای عمود بر سطح مدل‌سازی شده به صورت کرنش سطح، در میزان تغییرشکل‌های نهایی تأثیر زیادی می‌گذارد. از طرفی ایشان در مطالعه‌ی خود یک گوشه‌ی بیرون‌زده (محدب) را نیز مدل‌سازی کردند و بیان داشتند در مسائل ژئوتکنیکی در شرایط واقعی، احتمال به وقوع پیوستن هندسه‌های نامنظم، که با فرض کرنش سطح مدل‌سازی در تناقض هستند، زیاد است. همچنین چنگ^۸ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۱] در بررسی تأثیر سه‌بعدی در تغییرشکل دیواره‌ی گود و ضریب کرنش سطح برای گودهای اجرا شده در خاک ماسه‌ی شل تا متوسط نشان دادند هر چقدر ضریب عرض به طول کوچک‌تر باشد، رفتار تغییرشکل‌پذیری خاک رسی و خاک ماسه‌ی به یکدیگر نزدیک می‌شود. هسیونگ^۹ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۲] با مدل عددی سه‌بعدی یک مطالعه‌ی موردی، نسبت کرنش سطح را استخراج کردند و نشان دادند که مقدار آن تابع نوع خاک است. چنگ و لیکیتارسونگ^{۱۰} (۲۰۱۸)،^[۱۳] نشان دادند که مقدار و تغییرات نسبت کرنش سطح برای نسبت عرض به طول کمتر از 1 در ماسه و رس مشابه است، ولی برای نسبت عرض به طول کمتر از $5/0$ ، مقدار آن در خاک ماسه‌ی بزرگ‌تر از خاک رس است.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد مفهوم اخیر تاکنون برای گودهای کوچک توسعه یافته است. لیکن در گودهای عمیق کمتر به آن توجه شده است. مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار سه‌بعدی در گودهای عمیق در یک مطالعه‌ی

موردی واقعی با پارامترهای ژئوتکنیکی صحت‌سنجی شده است، که به طرح‌های اقتصادی قابل‌توجهی منتج خواهد شد. از دیگر سو، با توجه به احجام عملیات پایداری نسبتاً بزرگ پروژه‌ها و همچنین قیمت قابل توجه مصالح استفاده شده در پایداری دیواره‌ی گودبرداری‌ها و فضای رقابتی بین شرکت‌های فعال در این زمینه، ضرورت ارائه‌ی طرح‌های بهینه و اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود و یکی از مواردی که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در امر بهینه‌سازی طرح‌های پایداری دیواره‌ی گودبرداری‌ها داشته باشد، در نظر گرفتن اثر سه‌بعدی کنج‌های مقعر قائم است، که کمتر در گودهای عمیق لحاظ شده و هدف دیگر پژوهش حاضر بوده است. عموم مطالعات نشان داده‌اند برای تحلیل بهتر رفتار گودها، زمانی که نسبت کرنش سطح کمتر از 1 است، باید از مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شود. لیکن زمانی که نسبت کرنش سطح برابر 1 باشد، نتایج مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی یکسان است. نسبت کرنش سطح، تابع مشخصات خاک و هندسه‌ی گود است، که در شرایط مختلف توسط پژوهشگران ارزیابی شده است. لیکن رفتار سه‌بعدی گودهای بسیار عمیق (بیش از 50 متر) و تعیین نسبت کرنش سطح در آنها تاکنون در ادبیات فنی بسیاری بررسی نشده است. از طرفی، از آن‌جا که در کلان‌شهرهای کشور، احداث گودهای بسیار عمیق در حال انجام است، رفتار سه‌بعدی گودهای بسیار عمیق در راستای بهینه‌سازی اقتصادی باید در دستور کار قرار گیرد، که هدف پژوهش حاضر نیز قرار گرفته است، تا بیان کمی مقادیر، رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر آثار مثبت کنج‌های مقعر قائم نهادینه شود.

۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر، با رویکرد ارزیابی نتایج پایش یک مطالعه‌ی موردی، انجام آنالیز بازگشتی به منظور تدقیق پارامترها و صحت‌سنجی مدل و نهایتاً مدل‌سازی سه‌بعدی رفتار گود و انجام مطالعات پارامتریک نظام یافته است. در ادامه، جزئیات هر مرحله ارائه شده است.

۱.۲. معرفی مطالعه‌ی موردی

در پژوهش حاضر، از نتایج پایش یک گود بسیار عمیق در منطقه‌ی ۲۲ شهر تهران استفاده شده است، که عمق آن 60 متر و پلان گود در ابعاد 175×300 متر بوده است.

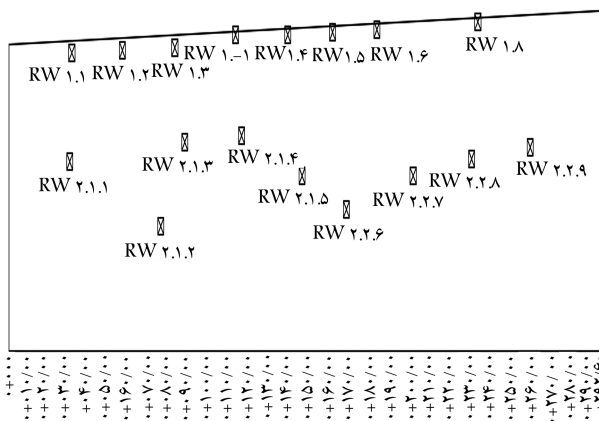
مطالعات ژئوتکنیک در محل پروژه نشان می‌دهد که خاک محدوده‌ی پروژه اغلب به صورت درشت‌دانه از نوع شن همراه با ماسه و میان‌لایه‌های سیلت و رس است. پارامترهای توده‌ی خاک در 4 لایه، در جدول 1 ارائه شده است. نتایج اخیر بر مبنای آزمون‌های بارگذاری صفحه و برش مستقیم برجا حاصل شده است، که بیانگر خاک با مقاومت بالایی است. در پژوهش حاضر به ارزیابی رفتار سه‌بعدی

جدول ۱. تقسیم‌بندی لایه‌های زمین و مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی.^[۱۴]

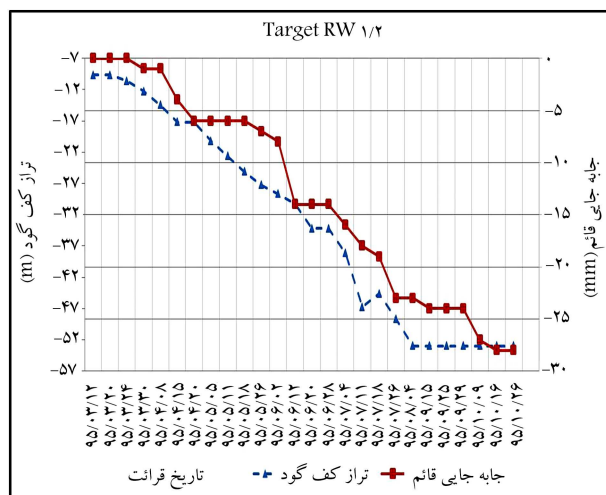
| عمق m | $\gamma (\frac{kN}{m^3})$ | φ | $c (kPa)$ | $E_{50} (kPa)$ | $E_{ur} (kPa)$ |
|----------|---------------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| ۰-۱۶ | ۱۹ | ۳۹ | ۴۰ | ۷۰۰۰۰ | ۲۱۰۰۰۰ |
| ۱۶-۳۱ | ۲۰ | ۴۲ | ۴۰ | ۹۰۰۰۰ | ۲۷۰۰۰۰ |
| ۳۱-۴۳ | ۲۰ | ۴۳ | ۴۵ | ۱۱۰۰۰۰ | ۳۳۰۰۰۰ |
| ۴۳-۸۱ | ۲۰ | ۴۴ | ۵۵ | ۱۲۰۰۰۰ | ۳۳۰۰۰۰ |

جدول ۲. مشخصات طراحی و چیدمان مهارها در دیوار غربی گود. [۱۴]

| ردیف | فاصله‌ی افقی مهارها (متر) | طول غلاف (متر) | طول باند (متر) | نیروی پیش‌تندگی (kN) |
|-------|---------------------------|----------------|----------------|----------------------|
| ۱ | ۲/۵ | ۲۸ | ۸ | ۳۱۲ |
| ۲-۵ | ۲/۵ | ۲۸ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۶-۷ | ۲/۵ | ۲۶ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۸-۹ | ۲/۵ | ۲۴ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۱۰-۱۱ | ۲/۵ | ۲۲ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۱۲-۱۳ | ۲/۵ | ۲۰ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۱۴-۱۵ | ۲/۵ | ۱۸ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۱۶-۱۷ | ۲/۵ | ۱۶ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۱۸-۱۹ | ۲/۵ | ۱۴ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۲۰-۲۱ | ۲/۵ | ۱۲ | ۸ | ۴۷۰ |
| ۲۲-۲۳ | ۲/۵ | ۱۰ | ۸ | ۴۷۰ |



شکل ۱. تصویری از نشانه‌های نقشه‌برداری دیوار غربی به عمق ۶۰ و طول ۳۰۰ متر. [۱۴]



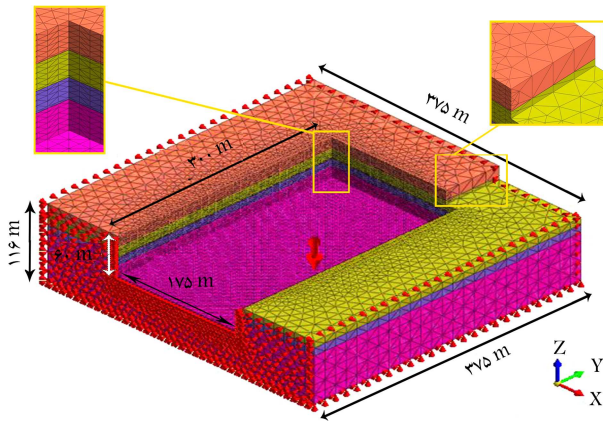
شکل ۲. نمودار جابه‌جایی قائم در نشانه‌ی نمونه. [۱۴]

ضلع غربی گود مذکور پرداخته شده و لذا اطلاعات ارائه شده فقط در خصوص نتایج پایش و طرح استفاده شده در دیوار غربی است. فاصله‌ی قائم مهارها^{۱۱}، ۲/۵ متر بوده است، که با توجه به ۲۳ ردیف مهار، کل ارتفاع گود معادل ۶۰ متر را پدیدار ساخته است. پایین‌ترین مهار از فاصله‌ی ۲/۵ متری کف گود و بالاترین مهار در فاصله‌ی ۲ متر از بالای گود تعبیه شده است.

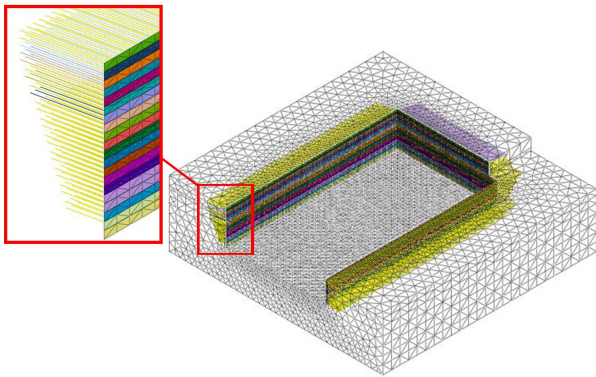
روش پایدارسازی گود اخیر به صورت روش مهارگذاری با رخیوش^{۱۲} بتنی بوده و طراحی و چیدمان مهارها مطابق با طراحی اولیه و آنچه که در آن اجرا شده بود، در مدل سه‌بعدی انجام شده است. رخیوش دیواره‌ها در هر مرحله از گودبرداری به طور جداگانه و هر یک به ارتفاع ۳ متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر تعریف شده است. فاصله‌ی عمودی هر ردیف از مهارها در دیواره‌ی غربی گود ۲/۵ متر بوده است. مشخصات مهارهای اجرا شده در جدول ۲ ارائه شده است. در این طرح از ۲۳ ردیف مهار با طول‌های ۱۸ تا ۳۶ متر استفاده شده است.^{۱۴} مهارها به صورت ۶ رشته‌یی و با زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به افق اجرا شده‌اند. در جدول ۲، منظور از طول غلاف، قسمتی از ابتدای مهار است که دور آن دوغاب تزریق نشده است و با خاک پیرامون خود اندرکنش ندارد. این قابلیت با تعبیه‌ی یک غلاف PVC در دور مهارها در فرایند اجرا ایجاد شده است. منظور از طول باند، قسمت انتهایی مهار است، که پیرامون آن تزریق دوغاب تحت فشار صورت گرفته و با خاک هم‌جسبی پیدا کرده است.^{۱۵} گفتنی است نیروهای پیش‌تندگی بر اساس آنچه در واقعیت اجرا شده است، منظور شده‌اند.

در پروژه‌ی مورد مطالعه با توجه به اهمیت و حساسیت‌های بالای پروژه، که ناشی از ابعاد بزرگ و هم‌جواری بدون فاصله با سازه‌ی مجاور است، پایش تغییرشکل‌ها با دقت بسیار بالا صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، تمرکز بر نتایج پایش دیوار غربی پروژه‌ی حاضر با عمق ۶۰ متر و طول ۳۰۰ متر بوده است و نمای نشانه‌های نقشه‌برداری برای نمونه‌ی نتایج پایش دو نشانه^{۱۳} در شکل‌های ۱ الی ۳ مشاهده می‌شود.^{۱۴} در شکل ۱، کیلومتر از هر نشانه در تصویر مشخص است.

مطابق شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان تغییرات تغییرشکل‌ها را با پیشرفت عملیات گودبرداری مشاهده کرد. با افزایش عمق گود طی زمان، تغییرشکل‌ها افزایش یافته‌اند،



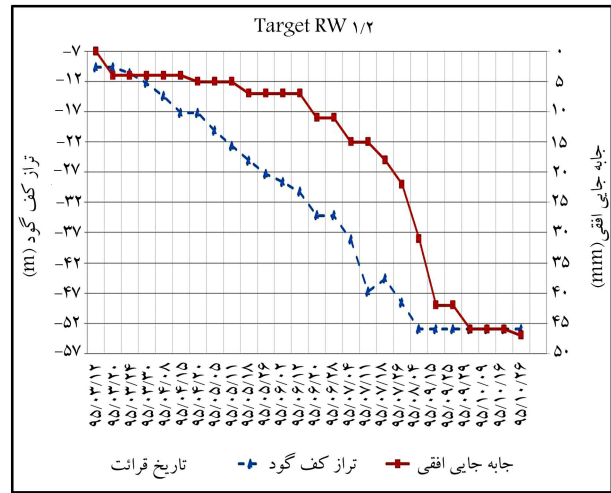
شکل ۴. نمایی از مدل سه بعدی ساخته شده به همراه لایه بندی خاک و ابعاد مدل و شرایط مرزی اعمال شده در لبه های مدل.



شکل ۵. نمایی از مدل سه بعدی ساخته شده و نمایش مهارها.

۱۰ متر به ۲/۵ متر تعریف و سپس کل مدل با فاصله ۲/۵ متر و از نوع سه وجهی، مش بندی شده است. تعداد المان های ایجاد شده معادل ۳۱۷۴۶۸ المان بوده است. در شکل های ۴ و ۵، نمایی از مدل سه بعدی ساخته شده به همراه لایه بندی خاک و ابعاد مدل مشاهده می شود. شرایط مرزی با محدود کردن مدل در لبه ها و در راستای افقی و قائم تعریف شده است. مشخصات مکانیکی صورت همگن و انتخاب مدل رفتاری سخت شونده است. مشخصات مکانیکی لایه های خاک در جدول ۱ ارائه شده است. اجزاء سازه ای مدل، مهارها و رخیوش دیوارها، از نوع کشسان با مدول کشسانی فولاد برابر با ۲۱۰ گیگاپاسکال و برای بتن برابر با ۲۰ گیگاپاسکال بوده است. در راستای مدل سازی گودبرداری، ابتدا شرایط اولیه تنش با شرایط فشار جانبی حالت سکون به خاک اعمال شد، تا شرایط تنش برجا شبیه سازی و تاریخچه تنش در آن ذخیره شود. در ادامه، به صورت مرحله ای نسبت به خاک برداری و فعال سازی مهارها اقدام شد. در شکل ۵، ناحیه ی بزرگ نمایی شده ی مراحل خاک برداری در هر گام با رنگی مجزا مشاهده می شود، که متناسب با هر مرحله، مهار مرتبط نیز فعال شده است. در راستای مدل سازی مهارها در ناحیه ی باند و ناحیه ی دارای غلاف، از قابلیت های نرم افزار Midas استفاده شده و از آن جا که نرم افزار Midas برای مدل سازی های ژئوتکنیکی توسعه یافته است، برای تعریف ناحیه ی دارای غلاف و باند در مهارها پیش فرض های مناسبی دارد.

در راستای صحت سنجی مدل سه بعدی، از نتایج پایش موجود استفاده شده است. در این راستا، از نشانه های واقع شده در یک تراز افقی روی دیوار غربی



شکل ۳. نمودار جابه جایی افقی در نشانه ی نمونه [۱۴].

تا نهایتاً در بیشینه ترین حالت، جابه جایی قائم به ۲۷ میلی متر و جابه جایی افقی به ۴۵ میلی متر رسیده و طی زمان ثابت مانده است. در بخش های بعد، به مقایسه ی نتایج نمودارهای ذکر شده با نتایج شبیه سازی پرداخته شده است.

۲.۲. مدل سازی عددی و صحت سنجی

به منظور مدل سازی رفتار سه بعدی گود از نرم افزار Midas TS NX و مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است، که استفاده از آن در پروژه های گودبرداری با عنایت به ماهیت باربرداری حین گودبرداری بسیار توصیه شده است. [۱۶] مشخصات شاخص مدل رفتاری ذکر شده عبارت از وابستگی سختی به سطح تنش، رفتار هایپر بولیک تنش - کرنش و تفاوت مدول بارگذاری و باربرداری است و لازم است سه نوع مدول کشسانی معرفی شود. مدول کشسانی اولیه E_i با استفاده از رابطه ی ۱ تعریف می شود، که در آن E_{δ_0} مدول کشسانی سکانتی در ۵۰٪ بارگسیختگی است و از رابطه ی ۲ استخراج می شود. همچنین R_f نسبت q_f در رابطه ی ۳ به q_a است، که به صورت پیش فرض برابر ۹/۰ لحاظ شده است.

همچنین، $E_{\delta_0}^{ref}$ مدول سکانتی آزمایش سه محوری در حالت استاندارد در فشار مرجع $p^{ref} = 100 \text{ kPa}$ است. σ'_t تنش اصلی کوچک تر، C' چسبندگی مؤثر و ϕ' زاویه ی اصطکاک مؤثر است. m نیز توان رابطه در وابستگی سختی به سطح تنش است. در مدل رفتاری ذکر شده، به منظور ارزیابی رفتار باربرداری و بارگذاری مجدد که در گودبرداری های بسیار رایج است، از مدول باربرداری E_{ur} استفاده می شود، که مطابق رابطه ی ۴ محاسبه شود. به طور کلی مدول باربرداری معادل ۳ برابر مدول بارگذاری است.

$$E_i = \frac{2E_{\delta_0}}{2 - R_f} \quad (1)$$

$$E_{\delta_0} = E_{\delta_0}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_t \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (2)$$

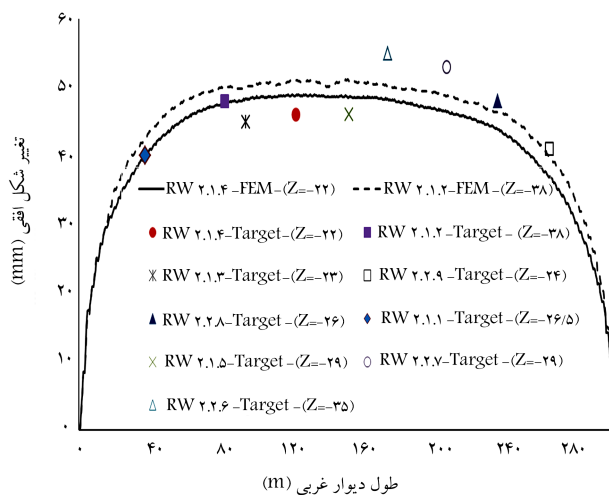
$$q_f = (c' \cot \phi' - \sigma'_t) \times \frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (3)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_t \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (4)$$

ضریب اندرکنش λ^4 مطابق ادبیات فنی در سیستم های میخ کوبی و مهارگذاری برابر با ۱ منظور شده است. [۱۷ و ۱۸] مش بندی در لبه ها از فاصله ی دور به نزدیک

جدول ۳. مقایسه‌ی قرائت نهایی نشانه‌های دیواره‌ی غربی گود با مقادیر خروجی نرم‌افزار سه‌بعدی.

| ردیف | نام نشانه | تغییرشکل پایش (mm) | | تغییرشکل افقی مدل (mm) | درصد خطا (%) |
|------|-----------|--------------------|------|------------------------|--------------|
| | | افقی | قائم | | |
| ۱ | RW ۱.۱ | ۳۴ | -۲۴ | ۳۱/۱ | -۸/۳۹ |
| ۲ | RW ۱.۲ | ۴۸ | -۲۹ | ۴۲/۸ | -۱۰/۸۳ |
| ۳ | RW ۱.۳ | ۴۹ | -۳۳ | ۴۵/۱ | -۷/۹۳ |
| ۴ | RW ۱.۱-۱ | ۴۰ | -۳۰ | ۳۷/۳ | -۶/۷۴ |
| ۵ | RW ۱-۸ | ۳۹ | -۱۴ | ۳۵ | -۱۰/۲۱ |
| ۶ | RW ۲.۱.۱ | ۴۰ | -۲۷ | ۴۲/۶ | +۶/۴۹ |
| ۷ | RW ۲.۱.۳ | ۴۵ | -۳۵ | ۴۸/۷ | +۸/۲۷ |
| ۸ | RW ۲.۱.۴ | ۴۶ | -۳۵ | ۴۹ | +۶/۵۴ |
| ۹ | RW ۲.۱.۵ | ۴۶ | -۳۰ | ۵۱ | +۱۰/۸۲ |
| ۱۰ | RW ۲.۱.۲ | ۴۸ | -۳۰ | ۵۰/۲ | +۴/۶۵ |
| ۱۱ | RW ۲.۲.۶ | ۵۵ | -۲۶ | ۵۹/۱ | +۷/۴۵ |
| ۱۲ | RW ۲.۲.۷ | ۵۳ | -۲۲ | ۵۶/۹ | +۷/۲۸ |
| ۱۳ | RW ۲.۲.۸ | ۴۸ | -۲۳ | ۵۲/۲ | +۸/۷۶ |
| ۱۴ | RW ۲.۲.۹ | ۴۱ | -۲۱ | ۴۳ | +۴/۹۹ |



شکل ۶. مقایسه‌ی روند تغییرشکل واقعی دیواره‌ی غربی گود مورد مطالعه با روند تغییرشکل مدل سه‌بعدی.

۳. نتایج و بحث

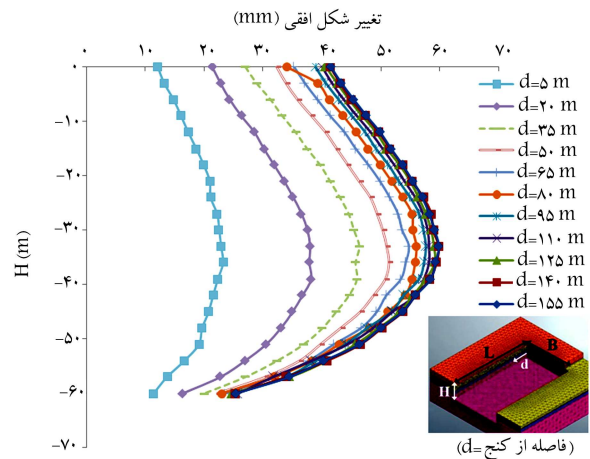
جهت بررسی اثر سه‌بعدی گوشه‌ها در جابه‌جایی افقی دیواره‌ی گود، از مدل سه‌بعدی در فواصل مختلف از گوشه‌ی تقاطع دیواره‌ی غربی با دیواره‌ی شمالی، نمودار جابه‌جایی افقی استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند، که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که مطابق آن جابه‌جایی افقی دیواره‌ی گود در میانه‌ی گود بیشتر شده است. همچنین تأثیر فاصله از گوشه در جابه‌جایی افقی دیواره‌ی گود در طول ارتفاع گود نشان داده شده است، که بیان‌گر افزایش فاصله از گوشه است، که باعث افزایش تغییر مکان‌های

استفاده شده است. ۱۴ عدد نشانه جهت بررسی تغییرات جابه‌جایی بر روی دیواره‌ی غربی نصب و مانی‌تورینگ گود از شروع گودبرداری تا اتمام عملیات گودبرداری به طور منظم انجام و نتایج ثبت شده است. با توجه به تحلیل نرم‌افزار از فاز اولیه تا فاز پایانی گودبرداری، جهت صحت‌سنجی سه‌بعدی گود از نتایج نشانه‌ها، که بعد از اتمام گودبرداری قرائت شده استفاده شده است. مشخصات قرائت نهایی نشانه‌های دیواره‌ی غربی گود و مقایسه‌ی آنها با خروجی نرم‌افزار مدل سه‌بعدی در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود درصد خطاها بین $4/99 +$ تا $10/83 -$ درصد متغیر است. مقادیر مثبت خطا به معنی مقدار بیشتر خروجی نرم‌افزار و مقادیر منفی خطا به معنی مقدار کمتر خروجی نرم‌افزار نسبت به تغییرشکل واقعی نشانه است. مقادیر ذکر شده حاکی از مدل‌سازی صحیح شرایط گود است و بر این اساس می‌توان به نتایج مطالعات پارامتریک آبی اعتماد داشت.

نشانه‌ها همگی در یک تراز قرار ندارند و در سطح دیواره با ترازهای مختلف پراکنده شده‌اند و جهت صحت‌سنجی نموداری، ابتدا مقدار جابه‌جایی افقی هر یک از نشانه‌ها با نمودار پلان جابه‌جایی افقی حاصل از مدل سه‌بعدی نرم‌افزار در تراز همان نشانه مقایسه شده است. به منظور مقایسه‌ی مقادیر قرائت شده از چند نشانه به طور هم‌زمان، ۹ عدد از نشانه‌ها که بین ترازهای ۲۲- متر و ۳۸- متر قرار داشتند، با دو نمودار پلان جابه‌جایی افقی حاصل از مدل سه‌بعدی نرم‌افزار در تراز ۲۲- متر و ۳۸- متر مقایسه شدند، که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در نمودار اخیر، محور افقی طول دیواره (۳۰° متر) و محور قائم تغییرشکل افقی گود است. روند تغییرشکل واقعی دیواره‌ی غربی گود مورد مطالعه با روند تغییرشکل مدل سه‌بعدی نرم‌افزار (خطوط منحنی در شکل) منطبق است. به بیانی دیگر، در محدوده‌ی تأثیر گوشه‌ها، تغییرشکل کمتر و در وسط گود، تغییرشکل‌ها بیشتر است، که در مدل‌های عددی سه‌بعدی و نتایج نقشه‌برداری مشاهده می‌شود.

جدول ۴. ابعاد دیواره‌های طراحی شده جهت مطالعه‌ی پارامتریک.

| شماره | حالت | L(m) | H(m) |
|-------|--------------------|------|------|
| ۱ | | ۶۰ | ۶۰ |
| ۲ | حالت اول | ۵۰ | ۵۰ |
| ۳ | (L = H) | ۴۰ | ۴۰ |
| ۴ | | ۳۰ | ۳۰ |
| ۵ | | ۶۰ | ۴۰ |
| ۶ | حالت دوم | ۵۰ | ۴۰ |
| ۷ | (H و L = ۴۰ متغیر) | ۴۰ | ۴۰ |
| ۸ | | ۳۰ | ۴۰ |



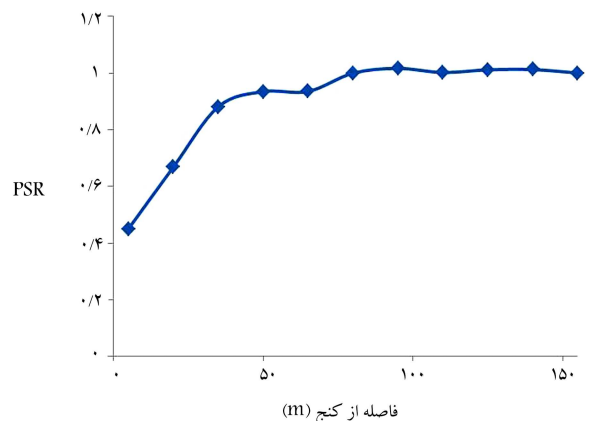
شکل ۷. جابه‌جایی افقی با فواصل مختلف از گوشه در دیواره‌ی غربی.

که تا طول ۴۰ متر آن بیشتر قابل تأمل است. کمترین مقدار نسبت کرنش مسطح، که در مطالعه‌ی حاضر محاسبه شده است، در فاصله‌ی ۵ متری از گوشه رخ داده و در این ناحیه بین ۰ تا ۰/۴۵ بوده است، که بیان‌گر تأثیر اثر گوشه در جابه‌جایی افقی دیواره‌ی گود و کاهش آن تا میزان ۴۵٪ جابه‌جایی افقی در وسط گود است، که در مطالعات پیشین نیز در گودهای با مشخصات دیگر اثبات شده است.^[۲]

آنچه بدیهی است بهره‌گیری از مزایای رفتار سه‌بعدی گود، زمانی مناسب است که منجر به بهینه‌سازی اقتصادی طرح شود. لذا لازم است پایداری گود بدون استفاده از مزایای رفتار سه‌بعدی گود با شرایطی که از آثار سه‌بعدی استفاده می‌شود، مقایسه شود. در این راستا، تعدادی دیواره‌ی گود با ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است. برای هر دیواره با ابعاد خاص، دو نوع طرح صورت گرفته است. طرح اولیه مانند طراحی‌های متداول بدون در نظر گرفتن آثار سه‌بعدی گوشه‌ها انجام شده است. طرح ثانویه، طراحی همان دیواره با در نظر گرفتن اثر سه‌بعدی گوشه بوده است. بدین شکل که در گوشه‌های گود و در قسمتی از پایین گود که متأثر از کنج است، فاصله‌ی افقی و عمودی مهارها به ۲ برابر مقدار طرح اولیه افزایش یافته است، به گونه‌ی که تغییرشکل‌ها در نواحی ذکر شده نیز به میزان تغییرشکل‌های وسط گود برسد. با این روش، در نواحی که به طراحی متراکم نیاز ندارد، مثل گوشه‌ها، با طراحی کمتر مهارها و با حاشیه‌ی ایمنی مناسب، تأثیر قابل توجهی در صرفه‌جویی هزینه‌ها خواهد شد. در پژوهش حاضر، شاخص مشترک بین طراحی‌های اولیه و ثانویه، بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی لب گود (تاج گود) به میزان ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بدین معنی که بودن یا نبودن مهارهایی که در طرح ثانویه از گوشه‌های گود حذف می‌شوند، در بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی که در لب گود اتفاق می‌افتد، تأثیری ندارد و آنها در جهت بهینه‌سازی اقتصادی طرح پایداری گودها، به راحتی و با ایمنی بالا قابل حذف هستند.

مشخصات و ابعاد دیواره‌هایی که جهت مطالعه‌ی پارامتریک، طراحی و مدل‌سازی سه‌بعدی شده‌اند، در جدول ۴ ارائه شده است، که در آن، L طول دیواره و H ارتفاع دیواره‌ی (عمق گود) است. مدل‌های پارامتریک در دو حالت تعریف شده‌اند: حالت اول، وقتی که طول دیواره‌ی گود برابر با ارتفاع گود شود (L=H). در حالت دوم، زمانی که طول دیواره‌ی گود ثابت است، ارتفاع گود (H) متغیر است. مدل‌های شماره‌ی ۳ و ۷، مدل‌های مشابه هستند و فقط جهت نشان دادن روند چگونگی انتخاب ابعاد دیواره‌ی مدل‌های پارامتریک در دو حالت مختلف، در جدول ۴ تکرار شده‌اند.

برای نمونه در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمای دوگود با ابعاد مختلف مشاهده می‌شود و طرح مبتنی بر شرایط کرنش مسطح و طرح مبتنی بر مدل‌سازی سه‌بعدی نیز نشان



شکل ۸. نمودار نسبت کرنش مسطح در طول دیواره‌ی غربی گود.

افقی شده است. به عنوان مثال، در فاصله‌ی ۵ متری از گوشه، بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی برابر با ۲۳ میلی‌متر بوده و با افزایش فاصله از گوشه تا ۵۰ متر، بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی به ۵۱ میلی‌متر افزایش یافته است.

همچنین در شکل اخیر مشاهده می‌شود که نرخ افزایش جابه‌جایی افقی و تأثیر پذیری اثر گوشه، در فاصله‌های کمتر از گوشه بیشتر از نمودارهای با فاصله بیشتر از گوشه است. به عنوان مثال، با افزایش ۱۵ متری در فاصله از گوشه، بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی فقط ۱ میلی‌متر افزایش داشته است و تقریباً می‌توان مقادیر مذکور را برابر در نظر گرفت. بر این اساس، اثر سه‌بعدی گوشه، که باعث کمتر شدن تغییرشکل‌ها می‌شود، در نقاط نزدیک به گوشه بیشتر بوده و در نقاط با فواصل بیشتر از گوشه و در میانه‌های گود، شرایط کرنش مسطح برقرار شده است. نتایج اخیر در برخی مطالعات پیشین نیز اثبات شده است.^[۲]

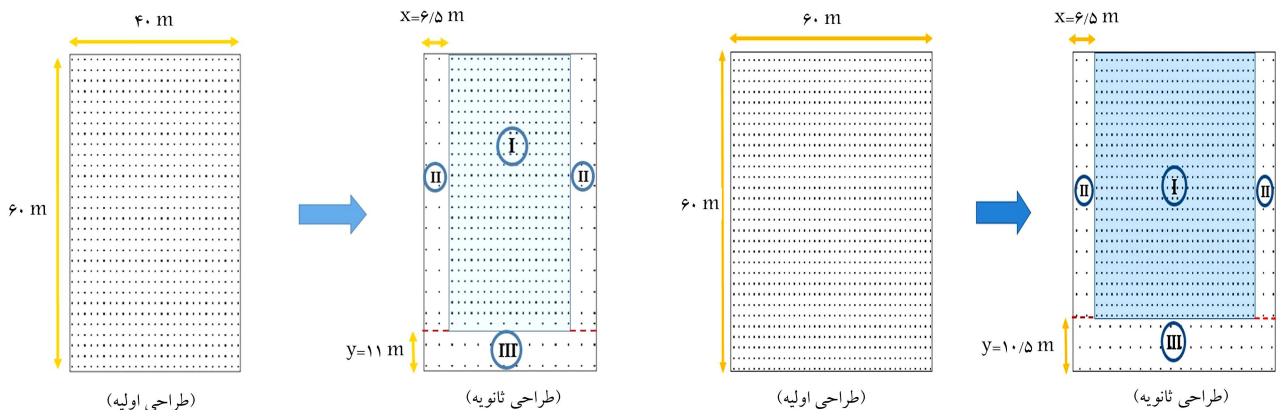
همچنین نمودار نسبت کرنش مسطح در طول دیواره‌ی غربی گود مورد مطالعه، که بر اساس تغییرشکل‌های تاج گود محاسبه شده است، در شکل ۸ مشاهده می‌شود. نتایج $d=155m$ به عنوان نقطه‌ی وسط گود، که بیشترین فاصله را از کنج و همچنین به دلیل عدم تأثیر اثر سه‌بعدی کنج، بیشترین جابه‌جایی افقی را دارد، به عنوان نسبت کرنش مسطح برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از گوشه، مقدار نسبت کرنش مسطح افزایش یافته است. بیشترین مقدار نسبت کرنش مسطح برابر با ۱ است، که از فاصله‌ی ۹۵ متر به بالا تا میانه‌ی دیواره‌ی گود اتفاق افتاده است. به بیانی دیگر، تا حدود ۹۰ متر، تغییرشکل متأثر از کنج‌ها خواهد بود،

جدول ۵. جزئیات و مقایسه‌ی طراحی‌های اولیه و ثانویه مدل 60×60 متر.

| تفاوت | طرح ثانویه | طرح اولیه | توضیحات |
|--------|---|-----------|----------------------------|
| ۲ | ۲۸ | ۳۰ | تعداد ردیف‌های مهارها |
| - | ناحیه‌ی (I) $1/5$ ناحیه‌های (II) و (III) 3 | $1/5$ | فاصله‌ی افقی مهارها (m) |
| - | ناحیه‌ی (I) 2 ناحیه‌های (II) و (III) 4 | ۲ | فاصله‌ی عمود مهار (m) |
| $0/09$ | $2/14$ | $2/05$ | جابه‌جایی افقی لب گود (cm) |
| ۸۷۸۴ | ۳۲۱۷۶ | ۴۰۹۶۰ | مجموع طول حفاری (m) |

جدول ۶. محاسبه‌ی صرفه‌ی اقتصادی اجرای طرح‌های ثانویه در مقایسه با طرح‌های اولیه‌ی مدل‌های پارامتریک.

| ردیف | مشخصات مدل گود (m × m) | طول مهار طرح اولیه (m) | طول مهار طرح ثانویه (m) | میزان صرفه‌جویی (m) | درصد صرفه‌جویی (%) |
|------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| ۱ | 60×60 | ۴۰۹۶۰ | ۳۲۱۷۶ | ۸۷۸۴ | ۲۱ |
| ۲ | 50×50 | ۲۳۱۰۰ | ۱۷۲۳۶ | ۵۸۶۴ | ۲۵ |
| ۳ | 40×40 | ۸۲۰۰ | ۵۰۶۰ | ۳۱۴۰ | ۳۸ |
| ۴ | 30×30 | ۳۶۰۰ | ۱۵۸۸ | ۲۰۱۲ | ۵۵ |
| ۵ | 40×60 | ۲۸۰۸۰ | ۲۰۴۰۰ | ۷۶۸۰ | ۲۷ |
| ۶ | 40×50 | ۱۸۹۰۰ | ۱۲۷۹۶ | ۶۱۰۴ | ۳۲ |
| ۷ | 40×30 | ۴۸۰۰ | ۲۵۳۶ | ۲۲۶۴ | ۴۷ |



شکل ۹. نمای شماتیک و مقایسه‌ی طراحی‌های اولیه و ثانویه‌ی گود مربعی.

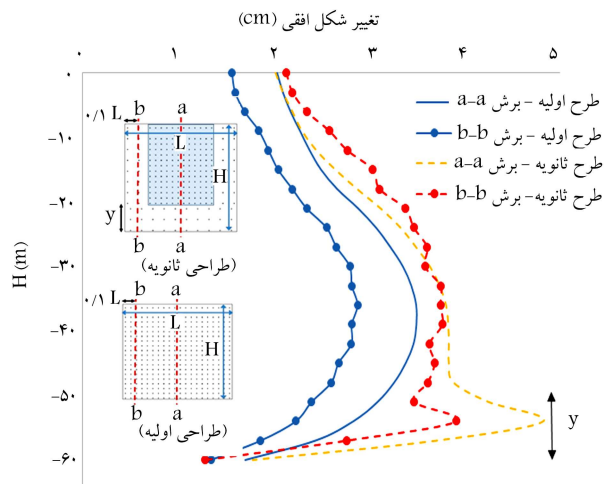
شکل ۱۰. نمای شماتیک و مقایسه‌ی طراحی‌های اولیه و ثانویه‌ی گود مستطیلی.

بررسی جزئیات و مقایسه‌ی طراحی‌های اولیه و ثانویه در مدل‌های پارامتریک با ابعاد مختلف نشان می‌دهد که عملیات هزینه‌بر اجرای سیستم پایداری دیواره‌ی گودها، مقادیر قابل توجهی کاهش داشته است. برای مثال، در بین کل مدل‌های پارامتریک، مجموع طول حفاری و همچنین مجموع طول مهار مورد نیاز ۲۱ الی ۵۵ درصد کاهش یافته است. با تبدیل این اعداد و ارقام به واحدهای مالی، اهمیت و صرفه‌ی اقتصادی پژوهش حاضر در استفاده از طراحی‌های ثانویه بیش از پیش آشکار خواهد شد، که در جدول ۶ ارائه شده است.

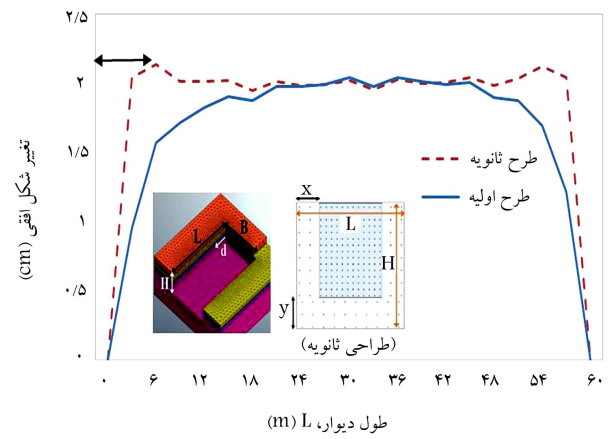
در طرح‌های اولیه، تغییرشکل‌های افقی در کناره‌های دیواره‌ی گود از ارتفاع بالا تا کم گود کمتر از تغییرشکل‌ها در مرکز دیواره‌ی گود بوده است. در طرح‌های ثانویه با کمتر شدن تراکم مهار در نواحی مذکور، تغییرشکل‌ها به مقادیر مرکز دیواره نزدیک‌تر

داده شده است. مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، در نواری از کناره‌ها و پایین دیواره‌ی گود، فاصله‌ی افقی و عمودی مهارها، در طراحی ثانویه به میزان ۲ برابر نسبت به طراحی اولیه افزایش یافته است. قسمت‌های مذکور به ترتیب «X» (قسمت کناری طول دیواره) و «Y» (قسمت پایین دیواره) نام‌گذاری شده‌اند.

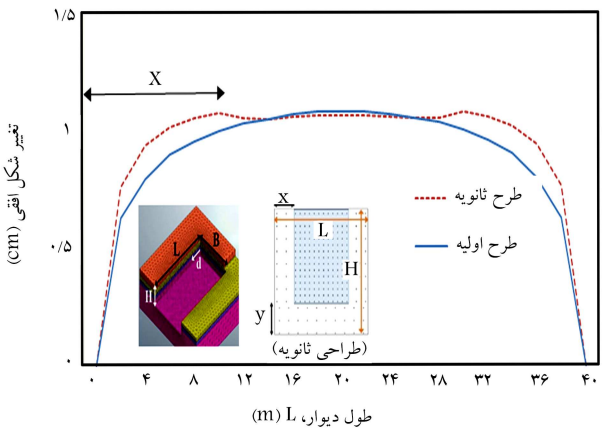
در جدول ۵، برای نمونه مقایسه‌ی اجمالی بین مشخصات فنی طرح، مانند فاصله‌های افقی و عمودی در نواحی گوناگون طرح‌های اولیه و ثانویه و نیز احجام و مقادیر عملیات هزینه‌بر مانند طول حفاری برای گود 60×60 متر ارائه شده است. همان طور که از مقادیر مذکور و مقایسه‌ی آنها مشاهده می‌شود، طرح‌های ثانویه در عین ایمنی و ثابت بودن بیشینه‌ی تغییرشکل افقی لب گود نسبت به طرح‌های اولیه‌ی متناظر، بسیار اقتصادی هستند.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی جابه‌جایی افقی وسط و کنارگود در طرح‌های اولیه و ثانویه و مدل ۶۰ × ۶۰ متر.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی جابه‌جایی افقی لب‌گود در طرح‌های اولیه و ثانویه و مدل ۶۰ × ۶۰ متر.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی جابه‌جایی افقی لب‌گود در طرح‌های اولیه و ثانویه و مدل ۴۰ × ۳۰ متر.

گود، پارامترهای بی‌بعد $\alpha = \frac{x}{L}$ و $\beta = \frac{y}{H}$ تعریف شده‌اند. در روابط فوق، x و y بخش‌های نشان داده شده در شکل ۱۳ هستند. α و β به ترتیب درصدی از طول و ارتفاع دیواره‌ی گود را نشان می‌دهند، که تحت تأثیر اثر سه‌بعدی گوشه، قابلیت برابر کردن فاصله‌ی افقی و عمودی مهارها در نواحی مذکور ممکن است. در رابطه‌های اخیر، L طول دیواره‌ی گود و H ارتفاع گود است. روند تغییرات α و β در مدل‌های پارامتریک با ابعاد گوناگون در نمودارهای شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن افزایش عمق سبب کاهش مقادیر α می‌شود. از آنجا که α بیان‌گر آثارکنج در رفتار است، لذا افزایش عمق سبب کاهش آثارکنج می‌شود. به عنوان مثال، در حالت اول و در عمق ۳۰ متری (مدل ۳۰ × ۳۰ متر)، مقدار α برابر با ۳۷٪ بوده است. لیکن با افزایش عمق گود به ۶۰ متر (مدل ۶۰ × ۶۰ متر)، α به مقدار ۱۱٪ تغییر یافته است. لذا با افزایش ۱۰٪ در عمق گود، مقدار α ، به میزان ۷۰٪ کاهش یافته است. این فرایند برای حالت دوم نیز با مقادیر متفاوت نسبت به حالت اول صادق است. همچنین نتایج نشان می‌دهد در مدل‌های حالت دوم (با $L=H$ است و در صورتی که $L/H < 1$ باشد، مقدار α بیشتر از حالت اول است. در صورتی که $L/H > 1$ باشد، مقدار α کمتر از حالت اول است.

در مورد مقادیر β نیز نتایج نشان می‌دهد افزایش عمق سبب کاهش مقادیر β

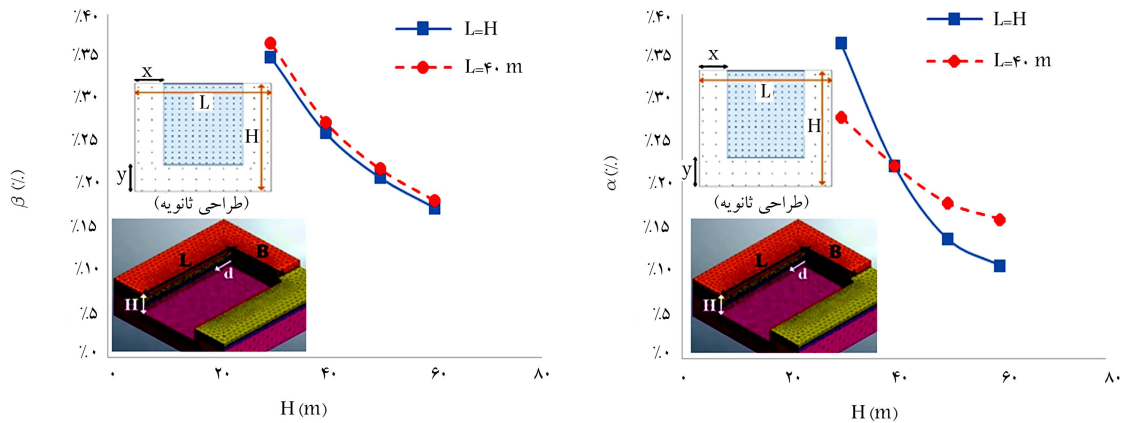
شده است. در این راستا، جهت درک بهتر از تغییرات اعمال شده در طرح‌های ثانویه، نمودارهای خروجی از تغییرشکل‌های طرح‌های اولیه و ثانویه در ابعاد مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند، که با توجه به محدودیت حجم نوشتار حاضر، فقط برای گود ۶۰ × ۶۰ متر ارائه شده است (شکل ۱۱).

در شکل ۱۱، جابه‌جایی افقی در لب‌گود در طراحی‌های اولیه و ثانویه و مدل ۶۰ × ۶۰ متر مشاهده می‌شود. در طراحی اولیه، بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در وسط طول دیواره‌ی گود اتفاق افتاده و در فواصل نزدیک‌تر به گوشه‌ها، تغییرشکل‌ها کوچک‌تر شده‌اند. همان‌طور که نتایج نمودارها نشان می‌دهد، شرط اول طراحی ثانویه مبنی بر برابر بودن بیشینه‌ی جابه‌جایی لب‌گود در طراحی‌های اولیه و ثانویه رعایت شده و مقادیر مذکور در میانه‌ی طول دیواره‌ی گود، از ۱۵ متر تا ۴۵ متر، تا حد زیادی برابر بوده‌اند. جابه‌جایی افقی لب‌گود در طراحی ثانویه و در نزدیکی گوشه‌ها (منطقه‌ی x) بیشتر از مقادیر متناظر در طراحی اولیه بوده است. برای مثال، در فاصله‌ی ۹ متری از گوشه‌ی سمت چپ، مقدار جابه‌جایی افقی در طراحی اولیه برابر با ۱/۷۲ سانتی‌متر و در طراحی ثانویه برابر با ۲/۰۲ سانتی‌متر بوده است.

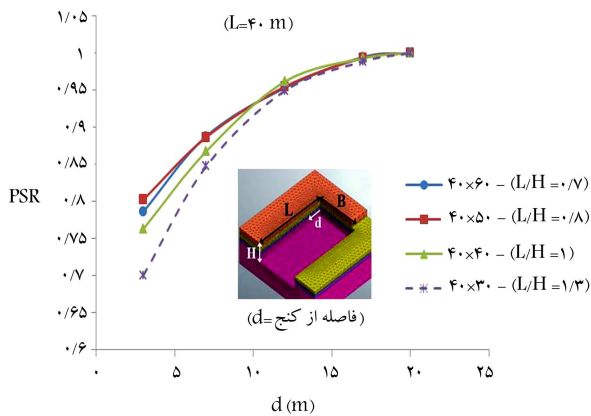
در شکل ۱۲، جابه‌جایی افقی در طول ارتفاع گود، در دو مقطع میانی (a-a) و کناری (b-b)، هر یک در طرح‌های اولیه و ثانویه و مدل ۶۰ × ۶۰ متر مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که طرح اولیه‌ی جابه‌جایی‌های افقی در مقطع میانی (a-a) بیشتر از مقطع کناری (b-b) است و با مقایسه‌ی آنها با مقاطع میانی و کناری طرح ثانویه، این نتیجه به دست می‌آید که با اعمال چیدمان طرح ثانویه و برابر کردن فواصل مهارها در نواحی کناری، جابه‌جایی افقی در مقطع کناری (b-b) طرح ثانویه افزایش یافته و به مقادیر جابه‌جایی افقی مقطع میانی (a-a) طرح اولیه نزدیک شده است. بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در مقطع میانی (a-a) و کناری (b-b) طرح ثانویه هر دو در طول y رخ داده‌اند. با توجه به نزدیکی مقادیر مربوط به نمودارهای مقطع میانی (a-a) و کناری (b-b) در طرح ثانویه مشاهده می‌شود که تغییرشکل‌های افقی در طراحی‌های ثانویه، به طور یکنواخت‌تری نسبت به طراحی‌های اولیه در سطح دیواره‌ی گود گسترده شده است.

به عنوان نمونه‌ی دیگر در شکل ۱۳، جابه‌جایی افقی در لب‌گود در طراحی‌های اولیه و ثانویه مدل ۴۰ × ۳۰ متر مشاهده می‌شود، که رویه‌ی همانند گود ۶۰ × ۶۰ متر دارد.

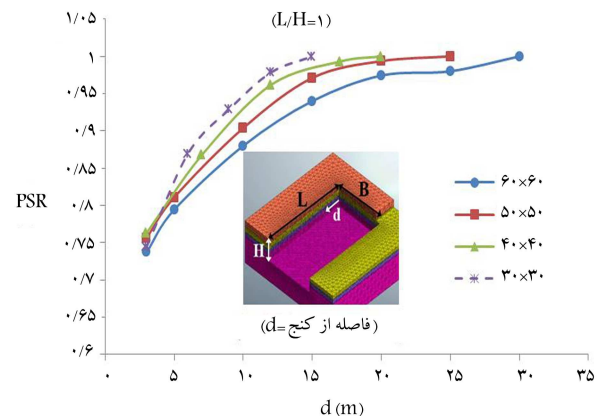
به منظور بررسی تأثیر هندسه‌ی گود در کمیت و کیفیت تأثیر کنج‌ها در رفتار



شکل ۱۴. روند تغییرات α و β در مدل‌های پارامتریک با ابعاد گوناگون.



شکل ۱۶. نمودار نسبت کرنش مسطح در طول دیواره‌ی گود مدل‌های پارامتریک (حالت دوم).



شکل ۱۵. نمودار نسبت کرنش مسطح در طول دیواره‌ی گود مدل‌های پارامتریک (حالت اول).

می‌شود. در این مورد نیز افزایش عمق سبب کاهش آثار گوشه می‌شود. ضمن این‌که مقادیر β در هر دو حالت تقریباً یکسان بوده و نسبت ابعاد گود، تأثیری در مقدار آن نداشته است. با افزایش H ، مقدار γ ثابت بوده است. لیکن شکل ۱۴ نشان می‌دهد با افزایش H ، مقدار β کاهش یافته است.

در شکل ۱۶، مقادیر نسبت کرنش مسطح در فواصل مختلف از گوشه برای مدل پارامتریک در حالت دوم مشاهده می‌شود. در این حالت با توجه به ثابت بودن طول دیواره، در هر فاصله‌ی از گوشه، موقعیت محل برای همه‌ی مدل‌ها یکسان است، لذا ارتفاع گود در مقادیر نسبت کرنش مسطح مؤثر است. با افزایش ارتفاع گود، مقدار نسبت کرنش مسطح افزایش می‌یابد. برای مثال، در مدل 40×40 متر با ارتفاع ۴۰ متر، در نقطه‌ی $d=3$ متر، مقدار نسبت کرنش مسطح برابر با 0.76 بوده است، که با افزایش ارتفاع و در مدل 40×50 متر با ارتفاع ۵۰ متر، این مقدار به 0.8 افزایش یافته است. با کاهش ارتفاع و در مدل 40×30 متر با ارتفاع ۳۰ متر، مقدار نسبت کرنش مسطح به مقدار 0.7 کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد با توجه به ثابت بودن طول دیواره‌ی گود، با کاهش ارتفاع که منجر به افزایش L/H می‌شود، مقادیر نسبت کرنش مسطح نسبت به گودهای با L/H کوچک‌تر، کاهش یافته است. چرا که در

در شکل ۱۵، مقادیر نسبت کرنش مسطح (PSR) در فواصل مختلف از گوشه برای ۴ مدل پارامتریک در حالت اول مشاهده می‌شود، که مطابق آن، در همه‌ی مدل‌های پارامتریک با هر ابعادی، نسبت کرنش مسطح در نقطه‌ی میانی گود برابر با ۱ بوده و با کاهش فاصله از گوشه (d) و افزایش اثر گوشه، مقدار نسبت کرنش مسطح نیز کاهش یافته است. برای مثال در مدل 40×40 متر در نقطه‌ی $d=20$ متر، نسبت کرنش مسطح برابر با ۱ و در نقطه‌ی $d=7$ متر، نسبت کرنش مسطح برابر با 0.87 بوده است. همچنین نمودارها نشان می‌دهند در مدل‌های با ابعاد کوچک‌تر، مقدار نسبت کرنش مسطح بیشتر است. چرا که در هر فاصله‌ی از گوشه (d)، برای گودهای بزرگ‌تر فاصله‌ی مذکور نسبت به گودهای کوچک‌تر به گوشه نزدیک‌تر است. برای مثال در نقطه‌ی $d=10$ متر، این نقطه برای گود 30×30 متر نزدیک به نقطه‌ی میانی گود ($d=15$ متر) و مقدار نسبت کرنش مسطح در آنجا 0.95 بوده است، که به نسبت کرنش مسطح میانی که برابر ۱ است، نزدیک‌تر است. لیکن همین نقطه ($d=10$ متر) برای یک گود بزرگ‌تر مثل گود 60×60 متر، یک نقطه‌ی کناری که به گوشه‌ی گود نزدیک‌تر است محسوب می‌شود و مقدار نسبت کرنش مسطح در

گودهای با L/H بزرگ‌تر، تأثیر اثر سه‌بعدی گوشه بیشتر است. مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر با مطالعات اخیر نشان می‌دهد افزون بر همبستگی مناسب بین مطالعات، امکان توسعه‌ی رفتار سه‌بعدی در طراحی‌های کاربردی به منظور بهینه‌سازی میسر است. [۱۹ و ۲۰]

در پژوهش حاضر، سه دیواره‌ی گود مدل‌سازی شده است. لیکن در راستای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود در راستای کاهش حجم محاسبات، از شرایط تقارن مسئله استفاده شود و فقط دیوار مورد مطالعه با شرایط مرزی مناسب مدل‌سازی شود. همچنین برای ارزیابی‌های بهتر آتی می‌توان مدل‌های عددی دوبعدی با فرض کرنش مسطح ساخت و جابه‌جایی‌های آنها با مدل‌های سه‌بعدی در وسط دهانه مقایسه و کنترل شوند.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با تحلیل پایش یک گود اجرا شده با عمق 6° مترو مدل‌سازی سه‌بعدی رفتار آن، به ارزیابی رفتار سه‌بعدی گودها پرداخته شده است. در این راستا، ضمن استخراج نسبت کرنش مسطح متناسب با شرایط هندسی گود، به بهینه‌سازی طرح‌ها متناسب با مطالعات پارامتریک پرداخته و میزان کاهش احجام برآورد شده و این نتایج به دست آمده است:

- گودهای با L/H بزرگ‌تر، تأثیر اثر سه‌بعدی گوشه بیشتر است. مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر با مطالعات اخیر نشان می‌دهد افزون بر همبستگی مناسب بین مطالعات، امکان توسعه‌ی رفتار سه‌بعدی در طراحی‌های کاربردی به منظور بهینه‌سازی میسر است. [۱۹ و ۲۰]
- در پژوهش حاضر، سه دیواره‌ی گود مدل‌سازی شده است. لیکن در راستای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود در راستای کاهش حجم محاسبات، از شرایط تقارن مسئله استفاده شود و فقط دیوار مورد مطالعه با شرایط مرزی مناسب مدل‌سازی شود. همچنین برای ارزیابی‌های بهتر آتی می‌توان مدل‌های عددی دوبعدی با فرض کرنش مسطح ساخت و جابه‌جایی‌های آنها با مدل‌های سه‌بعدی در وسط دهانه مقایسه و کنترل شوند.
- با افزایش عمق سبب کاهش مقادیر α (درصد نسبت ناحیه‌ی کم‌تراکم به طول دیواره‌ی گود) می‌شود. در حالت اول، با افزایش 10° در عمق گود، مقدار α ، به میزان 7° کاهش یافته است. این فرایند برای حالت دوم نیز با مقادیر متفاوت نسبت به حالت اول صادق بوده است.
- افزایش عمق سبب کاهش مقادیر β (درصد نسبت ناحیه‌ی کم‌تراکم به ارتفاع دیواره‌ی گود) می‌شود. در این مورد نیز افزایش عمق سبب کاهش آثار گوشه شده است. ضمن این‌که مقادیر β در هر دو حالت مدل‌های پارامتریک تقریباً یکسان بوده و نسبت ابعاد گود تأثیری در مقدار β نداشته است.
- کمینه و بیشینه‌ی مقدار نسبت کرنش مسطح در گوشه و وسط گود، در همه‌ی ابعاد یکسان و برابر با $75^\circ/1$ تا 1 بوده و با توجه به برابر بودن ابعاد گود (طول و ارتفاع)، هیچ‌یک از آنها تأثیری در بازه‌ی مقدار نسبت کرنش مسطح نداشته است.
- با توجه به ثابت بودن طول دیواره‌ی گود، با کاهش ارتفاع که منجر به افزایش L/H می‌شود، مقادیر نسبت کرنش مسطح نسبت به گودهای با L/H کوچک‌تر کاهش یافته است. چرا که در گودهای با L/H بزرگ‌تر، تأثیر اثر سه‌بعدی گوشه بیشتر است.

پانویس‌ها

1. plain strain ratio
2. Ou
3. Lee
4. Finno
5. Wu
6. Zhao
7. Law
8. Cheng
9. Hsiung
10. Cheng & Likitlersuang
11. anchor
12. shotcrete
13. target
14. interface

منابع (References)

1. Hsiung, B.C.B., Likitlersuang, S., Phan, K. and et al. "Impacts of the plane strain ratio on excavations in soft alluvium deposits", *Acta Geotechnica*, 16, pp. 1923-1938 (2021).

2. Hsiung, Bin-Chen Benson, Yang, K.H., Aila, W. and et al. "Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands", *Computers and Geotechnics*, 80, pp.138-151 (2016).
3. Ou, C.-Y., Chiou, D.-C. and Wu, T.-S. "Three-dimensional finite element analysis of deep excavations", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), pp. 337-345 (1996).
4. Lee, F.H., Yong, K.Y., Quan, K.C. and et al. "Effect of corners in strutted excavations: field monitoring and case histories", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), pp. 339-349 (1998).
5. Finno, R.J., Blackburn, J.T. and Roboski, J.F. "Three-dimensional effects for supported excavations in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), pp.30-36 (2007).
6. Wu, C.H., Ou, C.Y. and Tung, N.C. "Corner effects in deep excavations-establishment of a forecast model for taipei basin T2 zone", *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), pp. 1-11 (2010).
7. Zomorodian, S.M.A. and Rezaei, M.H. "Two and three-dimensional analyses of supported excavations via truss", *Journal of Computational Methods In Engineering*, 32(1) , pp. 27-50 (2013).

8. Zhao, W., Chen, Ch., Li, Sh. and et al. "Researches on the influence on neighboring buildings by concave and convex location effect of excavations in soft soil area", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **79**(3-4), pp. 351-369 (2015).
9. Law, K.H., Roslan, H. and Zubaidah, I. "3D numerical analysis and performance of deep excavations in Kenny Hill formation. ", *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Hicks, London: Taylor & Francis Group, pp. 759-764 (2014).
10. Zhao Sh.-Li, Zhang G., Li, M.-X. and et al. "The feature of deformation at convex corner of deep foundation pit based on FLAC3D", *Directory of Open Access Journals*, **2**(1), pp. 1-9 (2016).
11. Cheng, C. and Likitlersuang, S. "Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method", *Computers and Geotechnics*, **95**, pp. 68-81 (2018).
12. Hsiung, Bin-Chen Benson, and Dao, S.D. "Impacts from three-dimensional effect on the wall deflection induced by a deep excavation in Kaohsiung, Taiwan", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, **2**(45), pp. 1602-1607 (2016).
13. Cheng, C. and Likitlersuang, S. "Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method", *Computers and Geotechnics*, **95**, pp. 68-81 (2018).
14. "Excavation report for IRAN-MALL project?", Tahkim Saze Meryan (in Persian) (1390).
15. FHWA, "Ground anchors and anchored systems, technical manual no. FHWA-IF-99-015", (Authors: P.J. Sabatini, D.G. Pass, R.C. Bachus) (1999).
16. Zhang, W. and Liu, H. "Design of deep braced excavation and earth retaining systems Un andder complex built environmen", Springer, pp. 459 (2022).
17. Chu, L.-M. and Yin, J.-H. "Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests", *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(9), pp. 1097-1107 (2005).
18. Wang, Z. and W. Richwien "A study of soil-reinforcement interface friction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(1), pp. 92-94 (2002).
19. Sabermahani M. and Keshavarz, M. "Study on limitative effects of adjacent walls of soil nailed trenches by comparing 2D & 3D analysis results", *Dam and Hydroelectric Powerplant*, **4**(13), pp. 26-42 (in Persian) (2017).
20. Khazaei, J. and Ghahramani, A. "Comparison of nail axial force, deformation and failure urfaces in sand and clay soils with considering corner effect", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(4), 2021, pp. 251-266 (in Persian) (2021).