

بررسی رفتار دیوار مقاوم شده به وسیله مهار گذاری در برابر انفجار سطحی

سید رسول سورانی^۱، فریدون خسروی^{۲*}، سهیل شریفی^۳

۱ و ۳- کارشناس ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۷/۰۷/۳۰، پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۶)

چکیده

گودبرداری فضاهای زیرزمینی، مکان‌هایی را برای کاربردها پدافندی و نظامی مهیا می‌کند. پایداری دیواره گودبرداری، یکی از مسائل مهم در زمینه ژئوتکنیک است. از جمله روش‌های پایداری دیواره گودبرداری استفاده از مهارهای فولادی است. این مهارها سطح دیواره را به خاک پشت آن می‌دوزند و بدین طریق پایداری دیواره را فراهم می‌نمایند. در این پژوهش رفتار دیواره مهار گذاری شده توسط میخکوبی، انکراژ و ترکیبی از میخکوبی و انکراژ در نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus در برابر بار انفجار، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین المان‌های مسلح‌کننده در دیواره‌های مختلف به گونه‌ای قرار داده شده است که ضریب اطمینان پایداری برابر ۱/۵ به دست آید. مدل‌های عددی به گونه‌ای انتخاب گردیده‌اند که بهترین طرح برای مقابله با بار دینامیکی ناشی از انفجار مشخص گردد. بار انفجار اعمالی در نرم‌افزار معادل انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT است و این بار در فاصله ۳ برابری عمق گود بر روی سطح زمین اعمال گردیده است. همچنین مدل‌سازی دیواره پایداری شده به روش تمام انکر، در حالت استاتیکی صحت‌سنجی شده است. بر اساس نتایج، تغییر شکل تاج دیواره مهار شده پس از انفجار در مدل‌های مختلف ۵ تا ۶۵ برابر به نسبت قبل از انفجار و تغییر شکل اولیه ناشی از بار استاتیکی وارده به دیواره پس از پایان گودبرداری، افزایش یافت. در آنالیز استاتیکی، دیواره‌ای که صرفاً با استفاده از روش میخکوبی (نیل گذاری) پایدار شده، بیشترین مقدار تغییر شکل را به نسبت سایر مدل‌ها نشان داد ولی پس از انفجار، بیشترین مقدار تغییر شکل دیواره، در دیواره پایداری شده به وسیله ترکیبی از انکر و نیل، مشاهده شد. میزان ضریب اطمینان پایداری کلی دیواره میخکوبی شده قبل از انفجار ۱/۵ بوده و پس از آن به ۱/۰۱ رسید. همچنین انفجار باعث افزایشی تا ۱۱۰ درصدی تنش در مهارها شده است.

کلیدواژه‌ها: گودبرداری، انفجار، مدل‌سازی عددی، دیوار میخکوبی شده

Investigation of Reinforced Soil Nail Wall Behavior against Surface Blast

S. R. Soorani, F. Khosravi*, S. Sharifi

Imam Hossein University

(Received: 22/10/2018; Accepted: 26/01/2019)

Abstract

Excavation of underground spaces provides locality for military and defence application. The stability of the excavation wall is one of the important issues in the field of geotechnics. The use of steel anchor elements is one of the sustainable methods for stability of excavation walls. These anchors pin the surface of the wall to the back soil, providing the wall's stability. In this research, the behavior of soil nailing, anchored walls and their combination against the blast load has been modeled by Abaqus finite element software. Also reinforcing elements are placed in different walls so that the safety factor becomes 1.5. Different numerical models are chosen to determine the best plan for dealing with the dynamic load caused by the explosion. The explosive charge in software is equivalent to the 120 kg TNT explosion, and this load is applied at a distance of three times of the depth to excavation. Also the modeling of full anchored wall has been verified in static mode. Based on the results, the deformation of the top of the wall after the explosion increased by 5 to 65 times of those before the explosion in various models and the primitive deformation caused by static load increased after excavation. In a wall that was completely reinforced by nails, static analysis showed the highest amount of deformation, but after the explosion, the wall reinforced by the combination of anchors and nails showed the most deformation. The safety factor of the nailing wall before the explosion was 1.5 and then reached to 1.01. The explosion also caused a 110% increase in tensile stress of the Anchors.

Keywords: Excavation, Blasting, Numerical Modeling, Soil Nailing Wall

۱. مقدمه

در مباحث پدافند غیرعامل استفاده از فضاهای زیرزمینی جایگاه ویژه‌ای دارد. نکته قابل توجه در زمینه فضاهای زیرزمینی، ایمن‌سازی راه‌های دسترسی به آن‌ها در برابر انفجار است، گام اول برای ساخت فضای زیرزمینی در محلی مسطح، گودبرداری است. راه دسترسی به فضاهای زیرزمینی می‌تواند از طریق شفت‌های قائم صورت گیرد. پایدارسازی دیواره شفت قائم و یا پرتال‌های ورودی تونل‌ها که بنا به کاربرد می‌توانند تحت تأثیر بارهای دینامیکی همچون انفجار قرار گیرند، از اهمیت خاصی برخوردار است. از زمان‌های گذشته تاکنون، روش‌های مختلفی برای پایدارسازی دیواره گودبرداری پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سیستم‌های مهاری با بلوک‌های بتنی یکی از روش‌های ایجاد پایداری و کنترل مقادیر جابه‌جایی‌های دیواره گودبرداری است. سیستم‌های مهاری اولین بار به‌عنوان سیستم‌های حفاری سازه نگهبان موقت در آمریکا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در آمریکا برای پروژه‌های بخش دولتی از مهارهای دائم استفاده گردید، که تا اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی معمول نبودند. با توجه به مزایایی که سیستم‌های مهاری در گودبرداری‌های قائم به‌ویژه گودهای عمیق نسبت به سایر روش‌های گودبرداری دارند تثبیت با استفاده از میخ و مهار از محبوبیت بیش‌تری در جامعه طراحان برخوردار هستند؛ گودبرداری با سیستم مهاری در ایران تا حدودی نوپا و جدید است.

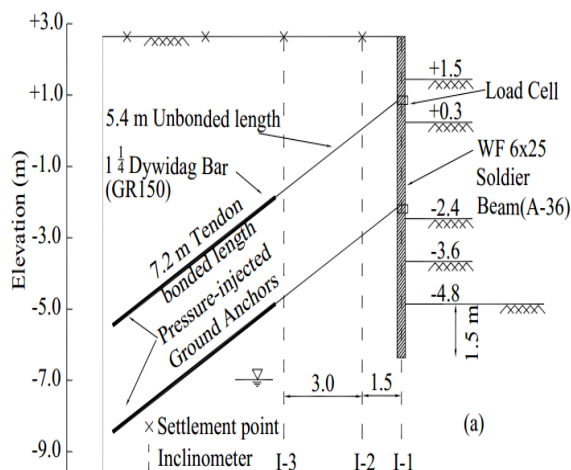
اساس کار دیوارهای با سیستم مهاری ایجاد یک پایداری وزنی داخلی هستند که هدف آن تأمین پایداری در برابر شکل‌های مختلف شکست خارجی است. مهارها از جنس میلگرد و یا تاندون‌های پیش‌تنیده هستند که با تزریق سیمان به خاک پیرامون متصل شده‌اند و برای حفظ پایداری و کنترل جابه‌جایی دیواره گود استفاده می‌شوند. مهارها در سوراخ‌های حفاری شده نصب می‌شوند و تاندون تا بار طراحی پیش‌تنیده می‌گردند تا نیروی مورد نیاز را بسیج و از زمین به المان سازه‌ای منتقل کنند. در شرایط ساخت و طراحی یکسان، سیستم‌های مهاری دارای مزایای بیش‌تری از سیستم‌های سنتی هستند که نتایج آن در ملاحظات اقتصادی و منافع فنی منعکس می‌شوند. در ادامه خلاصه‌ای از تحقیق‌های صورت گرفته در رابطه با انفجار در محیط‌های خاکی ارائه می‌گردد.

عمده پژوهش‌های صورت گرفته‌شده در خصوص گسترش موج انفجار در خاک مربوط به ارزیابی رفتار سازه‌های زیرزمینی

به‌خصوص تونل در مواجهه با بار انفجاری است، برای مثال مبارکی و واقفی [۱] به بررسی عمق و شکل سطح مقطع تونل تحت بار انفجاری پرداختند و با مدل کردن مقطع جعبه تونل مترو به شکل کوبه (Kobe) و محیط خاک و هوای پیرامون آن تحت انفجار سطحی، جابه‌جایی‌ها و فشار را در سه نقطه از مقطع بررسی کرده و نتیجه گرفتند که بیش‌ترین جابه‌جایی مربوط به سقف تونل و زیر محل انفجار (که به مقدار اندکی بیشتر از گوشه سقف است) است. تیواری و همکاران [۲] نیز به تحلیل دینامیکی سه‌بعدی تونل‌های زیرزمینی با مقطع دایره‌ای تحت یک انفجار درونی پرداخته و با تغییر پارامترهای ضخامت جداره تونل، وزن خرج انفجاری و زاویه گسیختگی خاک نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار خرج TNT مقدار فشار فعال روی خط تونل و تغییر شکل لاینینگ و خاک اطراف آن افزایش یافته و همچنین با کاهش ضخامت جداره تونل، تغییر شکل تونل افزایش و با کاهش زاویه گسیختگی خاک، تغییر شکل لاینینگ تونل و خاک اطراف آن افزایش می‌یابد. صفا و همکاران [۳] با تحقیق بر روی موج‌گیرها و استفاده از نرم‌افزار AUTODYN اثر مسیره‌های انحرافی در تونل را در مقابل انفجارهای خارج از تونل بررسی کردند. آن‌ها با تغییر مقدار و فاصله خرج انفجاری از دهانه تونل به یک فاصله بهینه برای اجرای موج‌گیر از دهانه تونل دست یافتند. یانگ و همکاران [۴] اثر انفجار سطحی را بر یک تونل مترو بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اگر تونل مترو در عمق بیش‌تر از ۷ متر حفر شده و ماده انفجاری معادل کمتر از ۴۴۵ کیلوگرم TNT باشد تونل مذکور ایمن خواهد بود. در زمینه سایر فضاهای زیرزمینی تحت اثر بار انفجار نیز تحقیقات فراوانی صورت گرفته است که می‌توان به تحقیق‌های لو و همکاران [۵] و ونگ و همکاران [۶] اشاره نمود. لو و همکاران [۵] با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) به مقایسه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی سازه‌های مدفون در مقابل انفجار و تحلیل پاسخ سازه مدفون به آن پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی از ترکیبی از محیط‌های لاگرانژ و (SPH) استفاده کردند به این صورت که در مناطقی از هندسه مدل که دچار تغییر شکل‌های زیاد است از مدل ذرات و در سایر قسمت‌ها از محیط لاگرانژ کمک گرفته و نتیجه گرفتند که مدل دوبعدی نتایج قابل قبولی برای تحلیل‌های انفجاری دارد. حسینی و همکاران [۷] به مدل‌سازی عددی پدیده انفجار مدفون با استفاده از روش همبسته اوپلری-لاگرانژی (CEL) و بررسی پاسخ خاک و سازه مدفون به این انفجار پرداختند و بیان داشتند هرچه خاک مقاوم‌تر و چسبنده‌تر باشد، حجم و قطر حفره ناشی از انفجار کمتر است. با این حال وجود

۲-۱. صحت سنجی

در سال ۱۹۹۱، گودی با سیستم مهاری تمام‌مقیاس در دانشگاه Texas A&M به همراه ابزارگذاری اجرا گردید (شکل ۱)، که به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی به کار گرفته خواهد شد. مزیت انتخاب این مورد در این است که مدل‌سازی‌های عددی متعددی با استفاده از نرم‌افزارهای عددی بر روی این دیوار انجام شده است. از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های عددی این پروژه می‌توان به پژوهش بریو و لیم [۱۱] در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد. دیوار مذکور دارای طول ۶۰ متر و ارتفاع ۷/۵ متر و فاصله مرکز به مرکز تیرهای نگهبان ۲/۴۴ متر است. مهارهای مورد استفاده در این پروژه با زاویه شیب ۳۰ درجه با افق در تراز ۱/۸ و ۴/۸ متر زیر سطح زمین نصب گردیده‌اند. گمانه‌ها به قطر ۸۹ میلی‌متر به طول ۱۲/۳۵ متر برای جایگذاری مهارها حفاری شده‌اند. برای مهارها از تاندون فولادی با قطر ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. طول گیردار هر دو ردیف مهارها، ۷/۳ متر است. خاک محل شامل یک لایه ۱۳ متری ماسه رسوبی لای‌دار نیمه متراکم رودخانه‌ای با وزن مخصوص متوسط $18/5 \text{ kN/m}^3$ با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد شامل ۱۰ ضربه در $0/3 \text{ m}$ در سطح و ۲۷ ضربه در $0/3 \text{ m}$ در کف تیر نگهبان است.



شکل ۱. دیوار برلینی مهارشده با دو ردیف مهار، دانشگاه Texas A&M [۱۲]

به جهت صحت‌سنجی مدل، مدل عددی کرنش مسطح دوبعدی با نرم‌افزار Abaqus بر اساس مشخصات مصالح ارائه شده توسط بریو و لیم ساخته شد. در شکل (۲) تغییر شکل افقی به دست آمده در دیواره گود از مدل ساخته شده در این پژوهش، مدل بریو و لیم و مقادیر اندازه‌گیری شده ارائه شده است.

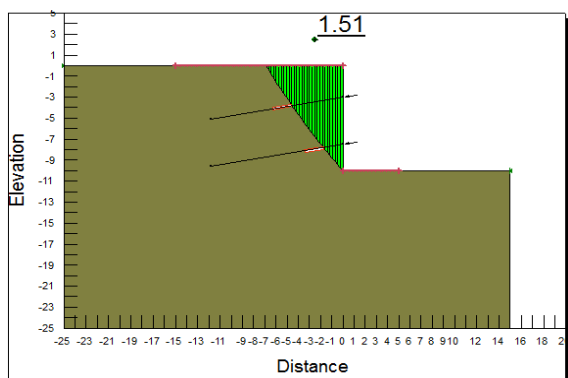
چسبندگی در خاک رفتار حوزه دور آن را دچار تغییر نمی‌کند. اما تراکم خاک که وابسته به مدول یانگ و چگالی آن است در رفتار حوزه دور خاک در برابر موج انفجار کاملاً تأثیرگذار است.

باین حال در زمینه تأثیر انفجار بر روی سازه‌های نگهبان خاک در گودبرداری تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. در این زمینه می‌توان به تحقیق یوگندراکومر و همکاران [۸] اشاره نمود که به رفتار دیوار حائل مسلح شده در برابر بارهای دینامیکی (انفجار) پرداخته‌اند. مقایسه نتایج این مطالعه و داده‌های میدانی نشان داد که رویکرد افزایش گام به گام مدول الاستیک در نرم‌افزار اجزاء محدود TARA-3، بهترین پیش‌بینی برای پاسخ دینامیکی دیوار در بارگذاری انفجار را نشان می‌دهد. همچنین بازیار و همکاران [۹] به بررسی و مقایسه رفتار دیوار خاک مسلح و دیوار وزنی در برابر انفجار پرداخته‌اند. ژیاولین [۱۰] به ارزیابی تأثیر گودبرداری انفجاری بر روی پایداری دینامیکی دیوار میخکوبی شده در یک پروژه پرداخت. در این مطالعه، روش محاسباتی پایداری دینامیکی بر اساس تئوری تعادل محدود جسم صلب در سه بعد ارائه گردید. این محاسبات باعث ایجاد پیش‌بینی مناسبی از پایداری دینامیکی دیوار میخکوبی شده در برابر انفجار گردید و برخی از مشکلات طراحی و اجرا را حل نمود.

هدف از این مقاله بررسی رفتار دیوارهای مهارشده به وسیله المان‌های فولادی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود در حالت دوبعدی است. به همین منظور دیواره مهارشده به وسیله میخکوبی و انکراژ در برابر انفجار با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفت. به جهت ارزیابی عملکرد دیواره‌های مهاری از سه مدل با سیستم مهاری متفاوت استفاده شده است. مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که دارای ضریب اطمینان پایداری یکسانی باشند. در ادامه به بیان روش تحقیق و نحوه صحت‌سنجی پرداخته می‌شود.

۲. روش تحقیق

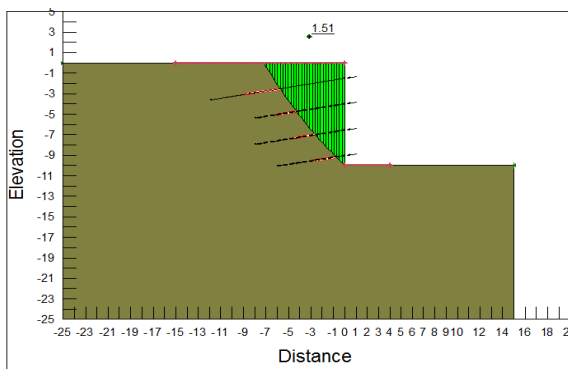
در ابتدا مدل ساخته شده در نرم‌افزار مورد استفاده با نتایج پایایی یک مورد واقعی تمام‌مقیاس ابزارگذاری شده صحت‌سنجی می‌شود تا از انعکاس مناسب شرایط واقعی در مدل ساخته شده اطمینان حاصل گردد. به دلیل نبود داده‌های دیواره پایدارشده در برابر بارگذاری انفجار، تنها صحت‌سنجی استاتیکی صورت می‌گیرد.



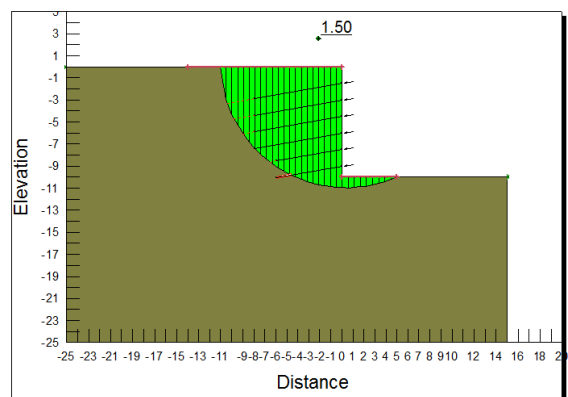
شکل ۳. مدل شماره ۱، گود ۱۰ متری تماماً انکر

مدل ۲ ترکیبی از مهار پیش‌تنیده (انکر) و میخکوبی (نیل) است. یک مهار پیش‌تنیده در لایه اول و تراز $-1/5$ قرار داده شده است. این مهار به اندازه ۲۴ تن به واحد طول عمود بر صفحه پیش‌تنیده گردیده است و در زیر آن از دولایه نیل ۸ متری و یک‌لایه نیل ۶ متری به فاصله ۲ از یکدیگر استفاده گردید.

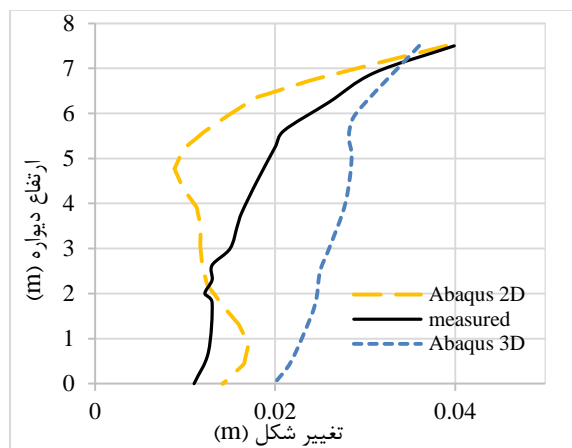
در مدل ۳ که یک مدل کاملاً میخکوبی شده است، از ۴ ردیف نیل ۸ متری با فاصله $1/5$ متری از یکدیگر و دو ردیف نیل ۶ متری در زیر آن‌ها با فاصله $1/5$ متری از یکدیگر استفاده شد. ردیف اول مهار در تراز $-1/5$ از تاج گود قرار دارد.



شکل ۴. گود ۱۰ متری ترکیبی از نیل و انکر



شکل ۵. گود ۱۰ متری تماماً نیل



شکل ۲. جابه‌جای افقی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مدل بریو و لیم و مدل صحت‌سنجی برای دیوار برلینی دانشگاه Texas A&M

با توجه به شکل (۲) تغییر شکل تاج گود در مدل دوبعدی و مقدار اندازه‌گیری شده دارای تطابق خوبی هستند. ولی در محل قرارگیری انکر برخلاف مدل سه‌بعدی، مدل دوبعدی تغییر شکل کمتری را از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده است که به دلیل نیروی پیش‌تنیده ۱۸۰ کیلو نیوتونی انکر و معادل‌سازی تیر نگهبان با یک صفحه است. البته معادل‌سازی به‌گونه‌ای صورت گرفت است که هر دو مقطع دارای مقاومت خمشی یکسانی باشند.

۲-۲. انتخاب مدل

برای ارزیابی تأثیر نوع مهار بر عملکرد دیوار پایدار شده، سه مدل به صورت زیر انتخاب گردید:

- مدل ۱: کاملاً مهار پیش‌تنیده (تماماً انکر)
- مدل ۲: ترکیبی از میخکوبی و مهار پیش‌تنیده
- مدل ۳: کاملاً میخکوبی (تماماً نیل)

برای یکسان بودن شرایط پایداری در این مدل‌ها از نرم‌افزار GeoStudio و روش Spencer استفاده گردید. بر اساس آئین‌نامه FHWA ضریب اطمینان برای دیواره‌های پایدار شده به‌وسیله مهارگذاری در حالت دائم بایستی حداقل $1/5$ باشد. بر همین اساس چیدمان، طول و مشخصات مهارها در سه مدل به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در هر سه مدل ضریب اطمینان در حدود $1/5$ به‌دست آید. سه مدل در شکل‌های (۳-۵) نشان داده شده‌اند. هم‌چنین مشخصات خاک و سیستم پایدارسازی این دیواره‌ها به ترتیب در جدول‌های (۱-۲) ارائه شده است.

برای پایدارسازی دیواره مدل شماره ۱ از دو مهار پیش‌تنیده استفاده گردید. به هر یک از مهارها نیروی ۲۵ تنی به واحد طول عمود بر صفحه اعمال شده است. مهار اول در تراز ۳- و مهار دوم در تراز $-7/5$ از تاج گود قرار دارد.

جدول ۱. مشخصات خاک دیواره‌های پایدار شده

مشخصات	واحد	مدل ۱
وزن مخصوص غیراشباع، γ_{unsat}	[kN/m ³]	۱۸
چسبندگی، C	[kN/m ²]	۱
زاویه اصطکاک، ϕ	[°]	۳۲
زاویه اتساع، ψ	[°]	۲
مدول یانگ، E	[kN/m ²]	۴۰۰۰۰
سختی باربرداری-گذاری مجدد، E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	۱۲۰۰۰۰
ضریب رانش خاک، K_0	-	۰/۴۷
ضریب پواسون، ν	-	۰/۳

به‌دست آمد. با توجه به در نظر گرفتن ماده منفجره به میزان ۱۲۰ kg در این پژوهش، بر اساس رابطه (۱)، قطر گودال انفجار در حدود ۳/۵ m به‌دست می‌آید.

با استفاده از روابط (۳-۴) به‌ترتیب حداکثر فشار در میدان آزاد خاک (P_0) برحسب پاسکال و مدت‌زمانی که فشار از مقدار پیک به صفر می‌رسد یا همان مدت‌زمان مثبت انفجار (t_d) محاسبه می‌گردد که با استفاده از این دو مقدار، نمودار تنش- زمان اعمالی به مرز گودال به‌دست می‌آید [۱۴].

$$P_0 = 0.0488\rho C f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

$$t_d = 2i_0/P_0 \quad (4)$$

در روابط (۳-۴)، C سرعت موج بارگذاری برحسب m/s است که تابعی از سرعت لرزه‌ای c_s و حداکثر سرعت لرزه‌ای V_0 است و برای خاک ماسه از رابطه (۵) به‌دست می‌آید، ρ چگالی خاک برحسب kg/m^3 ، f_c ضریب جفت‌شدگی که با فرض سطحی بودن انفجار در این پژوهش این ضریب برابر ۰/۴ به‌دست می‌آید، R فاصله از مرکز انفجار به متر و n ضریب تضعیف موج که برای خاک ماسه‌ای متراکم در حدود ۲/۷۵ است. i_0 تکانه ویژه است که از رابطه (۶) به‌دست می‌آید [۱۴].

$$C = c_s + \left(\frac{n+1}{n-1} \right) V_0 \quad (5)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, V_0 = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n}$$

$$i_0 = \rho C X_r^{max} \quad (6)$$

X_r^{max} حداکثر جابه‌جایی ذرات خاک برحسب متر برای انفجار مدفون یا نیمه مدفون است و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\frac{X_r^{max}}{W^{1/3}} = 60 \frac{f_c}{C} \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{1-n} \quad (7)$$

بر اساس روابط ارائه‌شده و جایگذاری مقادیر مربوط به خاک حداکثر فشار در میدان آزاد خاک در حدود $10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ به‌دست می‌آید و این فشار باید طی ۰/۰۵ ثانیه به صفر برسد. در این پژوهش انرژی ناشی از این انفجار به‌صورت نمودار تنش-زمان به خاک انتقال داده شد.

۴-۲. مدل سازی

با توجه به این‌که نرم‌افزار Abaqus، نرم‌افزاری تنها مختص ژئوتکنیک نیست، برخی از نیازهای یک مدل سازی ژئوتکنیک را

زاویه اتساع در نظر گرفته‌شده در جدول (۱) بر اساس پیشنهاد بولتون برای خاک‌های ماسه‌ای با زاویه اصطکاک بالای ۳۰ درجه است که به‌صورت زیر (رابطه ۱) است [۱۶]:

$$\psi = \phi - 30 \quad (1)$$

جدول ۲. مشخصات شاتکریت و مهارهای استفاده‌شده در پایدارسازی دیواره‌ها

مشخصات	واحد	استرند	میخ	شاتکریت
تنش تسلیم	[kg/cm ²]	۱۸۶۰۰	۳۰۰۰	-
قطر مهار	[mm]	۱۴	۳۲	-
طول آزاد مهار	[m]	۸	-	-
طول گیردار مهار	[m]	۴	۸ و ۶	-
مدول یانگ، E	[kN/m ²]	۲۱۰۰۰	۲۱۰۰۰	۲۰۰۰
وزن مخصوص، ρ	[kg/m ³]	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۲۴۰۰
ضریب پواسون، ν	-	۰/۳	۰/۳	۰/۳
ضخامت	m	-	-	۰/۱

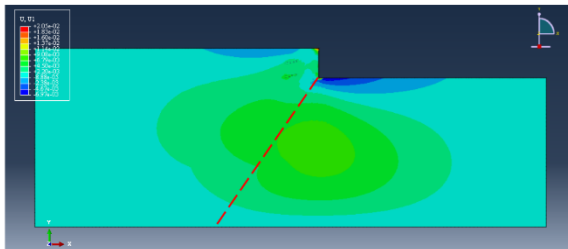
۳-۲. بار انفجار

در این پژوهش بار معادل انفجار ۱۲۰ کیلو TNT در فاصله سه برابر عمق گود به سطح زمین وارد گردید. با توجه به آزمایش‌های میدانی انجام‌شده توسط آمبروسینی و همکاران [۱۳] بر روی خاک‌های مختلف، رابطه (۲) برای قطر گودال انفجار پیشنهاد شد.

$$D = 0.51(W)^{1/3} \pm 5\% \quad (2)$$

در رابطه (۲) W وزن TNT معادل ماده منفجره بمب برحسب kg و D قطر گودال برحسب متر است. بر اساس پژوهش اسمیت و همکاران [۱۴] ضریب ۰/۵۱ در رابطه ۱ برابر ۰/۶

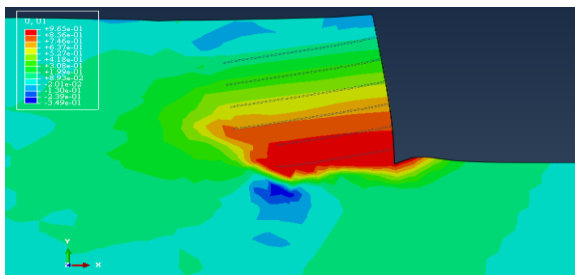
در دیواره و ممان ایجاد می‌شود در شاکریت مورد مقایسه قرار گیرد. شکل (۷) تصویر مدل ۱ در نرم‌افزار پس از آنالیز استاتیکی است. در این شکل مرز ناحیه‌های با مدول الاستیک متفاوت با خط چین نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییر شکل افقی مدل شماره ۱ پس از آنالیز استاتیکی (با میل به رنگ قرمز، تغییر شکل بیشتر می‌شود).

بر اساس نتایج تحلیل استاتیکی مدل ۲، بیشترین تنش در آخرین نیل که در پایین‌ترین تراز قرار دارد، ایجاد شده است. بر همین اساس می‌توان پیشنهاد کرد برای بهینه‌شدن طرح‌های مهارهای بهتر است با افزایش عمق سطح مقطع مهارهای استفاده‌شده نیز افزایش یابد. چراکه با افزایش عمق میزان تنش ایجادشده در مهارها افزایش می‌یابد.

در مدل شماره ۳ از تحلیل حرارتی برای به‌دست آوردن ضریب اطمینان خاک استفاده گردید. برای توضیح نحوه به‌دست آوردن ضریب اطمینان با استفاده از تحلیل حرارتی خواننده به مقاله ژئو و همکاران [۱۵] ارجاع داده می‌شود. بر همین اساس ضریب اطمینان ۱/۵۶ به‌دست آمد که اندکی از مقدار به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار ژئو استدیو، بیشتر است. شکل (۸) مدل ۳ در حین تحلیل حرارتی نشان داده شده است.

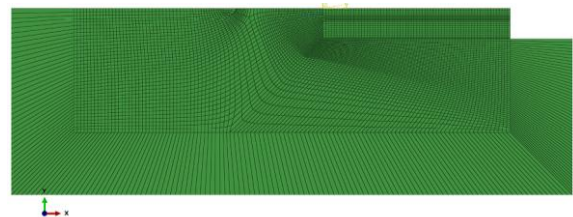


شکل ۸. مدل ۳ تحت تحلیل حرارتی

همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، بعد از تحلیل حرارتی برای به‌دست آوردن ضریب اطمینان پایداری با استفاده از نرم‌افزار Abaqus، پاشنه گود بیش از ۹۶ سانتی‌متر حرکت کرده است و این نشان از ناپایدار شدن گود در حین این تحلیل و پارامترهای مقاومتی کاهش یافته است. در ادامه تغییر شکل‌های دیواره گود و لنگر خمشی ایجادشده در شاکریت در سه مدل در شکل‌های (۹-۱۰) ارائه شده است. در نمودارهای ارائه‌شده در این

در خود ندارد. از جمله محدودیت‌های این نرم‌افزار در حوزه ژئوتکنیک عدم وجود مدل رفتار الاستیک غیرخطی دانکن-چنگ است. برای رفع این مشکل با در نظر گرفتن محدوده بارگذاری و باربرداری بر اساس توزیع تنش ۱-۲، می‌توان مدول الاستیسیته خاک در محدوده باربرداری را بالاتر وارد نمود تا از بالادستی خاک به دلیل باربرداری و در نتیجه خطا در نتایج به‌دست آمده جلوگیری شود. در این پژوهش مدول ناحیه متأثر از باربرداری سه برابر مدول معمول خاک به نرم‌افزار وارد شد. همچنین در مدل‌سازی جهت آنالیز دینامیکی مرزهای نمونه برای عدم برگشت بار ناشی از انفجار، نامحدود در نظر گرفته شدند. البته یک مدل با دو مرز محدود و نامحدود ساخته شد که نتایج آن در قسمت نتایج ارائه خواهد شد. در شکل (۶) مش‌بندی مدل ۱ نشان داده شده است.

از آنجایی که تحلیل‌های انجام‌گرفته در این پژوهش به صورت کرنش مسطح و دوبعدی هستند از المان مربعی برای انجام تحلیل‌ها استفاده گردید. مش‌بندی به این صورت انجام گرفت که در محدوده نزدیک به دیوار گود ابعاد مش ۰/۵ متر و با دور شدن از دیواره در نهایت ابعاد مش به ۱ متر می‌رسد. قسمت پیوسته مهارها در نرم‌افزار با المان wire مدل گردیدند و قسمت ناپیوستگی انکر به صورت فنر مدل گردید و یک نیروی محوری معادل با نیرویی پیش‌تنیدگی در آن اعمال گردید. همچنین به جهت بالا بردن دقت و همسانی مدل‌سازی و اجراء، ابتدا خاک تا تراز ۰/۵ متری پایین‌تر از هر یک از مهارها برداشته شده سپس آن مهار فعال می‌گردد و این عملیات گام‌به‌گام تا انتهای گودبرداری تکرار می‌گردد.



شکل ۶. مدل ۱ پس از مش‌بندی

در مدل‌سازی مهارهای پیش‌تنیده فرض شده است پیوستگی بین مهار و خاک به مقدار کافی وجود دارد. این بدان معناست که قسمت پیوستگی مهار توانایی انتقال بار پیش‌تنیدگی به خاک را بدون گسیختگی دارد و این انتقال تا انتهای آنالیز همچنان صورت می‌گیرد.

۳. نتایج و بحث

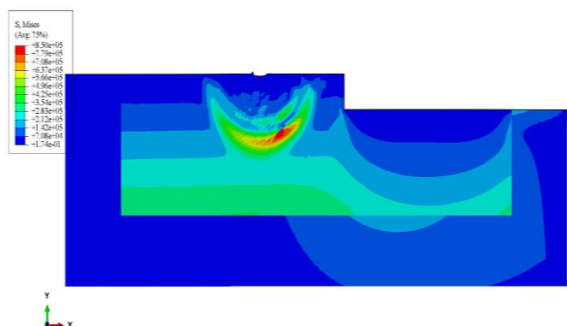
۳-۱. قبل از انفجار

پس از مدل‌سازی هر یک از مدل‌ها ابتدا آن‌ها تحت حالت استاتیکی مورد آنالیز قرار گرفتند تا میزان تغییر شکل ایجادشده

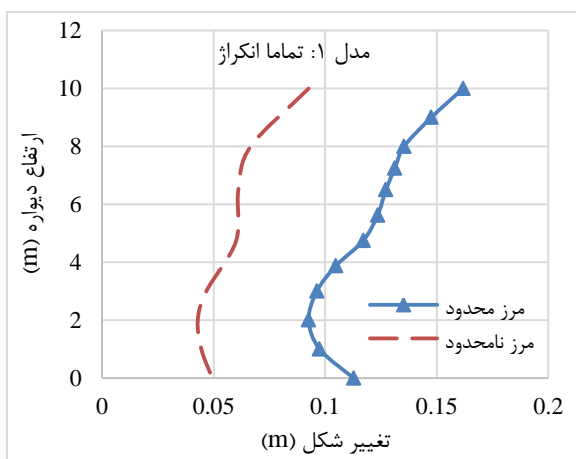
مشخص است. در مدل تماماً انکر به دلیل آنکه تنها از دو مهار استفاده شده است و مهار اولی در عمق سه متری از بالای دیواره قرار دارد، تاج گود به بیرون رفته است. با این حال تغییر شکل این مدل در قسمت‌های پایینی کمتر از دو دیوار دیگر است.

۲-۳. پس از انفجار

تنش معادل انفجار ۱۲۰ کیلو TNT در فاصله سه برابر عمق گود در سطح زمین به محلی به عرض ۳/۵ متر وارد شد. این تنش در مدت زمان ۰/۰۵ ثانیه به خاک وارد گردید. شکل (۱۱) تنش ایجاد شده در خاک ۰/۰۷ ثانیه پس از انفجار را در مدل ۲ نشان داده است.



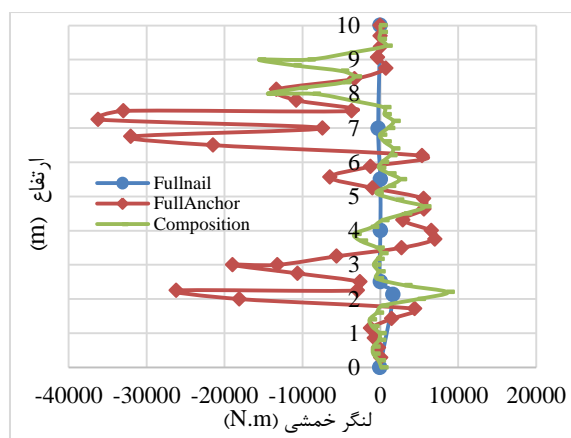
شکل ۱۱. تنش ایجاد شده در خاک ۰/۰۷ ثانیه پس از انفجار در مدل ۲ در مدل ۱ تحلیل با هر دو نوع مرز جاذب انرژی (نامحدود) و مرز محدود انجام گرفت. تغییر شکل دیواره در هر دو روش در شکل (۱۲) ارائه شده است.



شکل ۱۲. تغییر شکل دیواره مدل ۱ در دو حالت مدل‌سازی

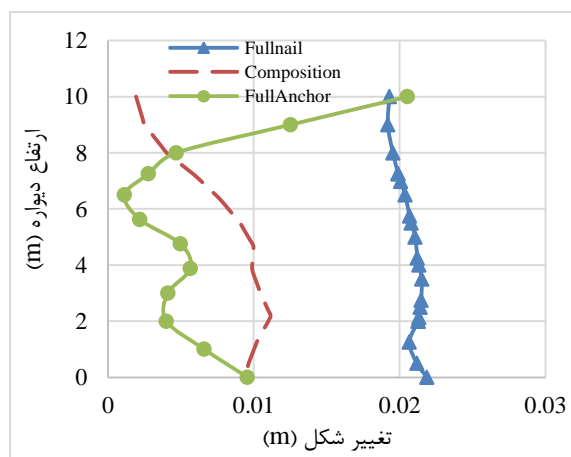
همان‌طور که از شکل (۱۲) مشخص است عدم استفاده از مرز جاذب باعث افزایش حدود ۸۰ درصدی تغییر شکل در دیواره می‌گردد. در شکل (۱۳) تغییر شکل سه دیواره پس از انفجار ارائه شده است.

مقاله کنج گود (نقطه تلاقی دیواره گود و کف گود) به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است.



شکل ۹. لنگر خمشی در شاکریت

بر اساس شکل (۹) بیش‌ترین لنگر در دیواره تماماً انکر ایجاد شده است. نتیجه خمش بالا در تغییر شکل و تورفتگی شاکریت در محل انکرها دیده می‌شود. این بدان معناست که در صورت اهمیت تغییر شکل در محل انکراژها بایستی در زمان طراحی شاکریت برای این قسمت از دیواره‌ها ضخامت بیشتر و مصالح مقاوم‌تری استفاده شود. البته در مدل‌سازی صورت گرفته‌شده ضخامت شاکریت ۰/۰۱ متر وارد شده ولی در محل انکرها این ضخامت ۰/۰۴ وارد شده است. در دیواره تماماً نیل، لنگر ایجاد شده به نسبت دو دیواره دیگر ناچیز است.

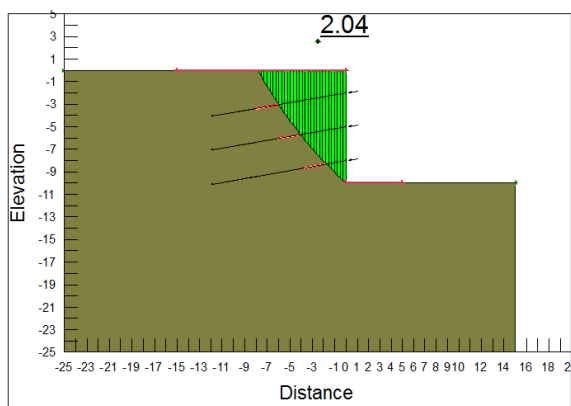


شکل ۱۰. تغییر شکل افقی دیواره در مدل‌های مختلف پس از تحلیل استاتیکی

با توجه به شکل (۱۰)، میانگین تغییر شکل ایجاد شده در دیواره تماماً نیل از دو دیواره دیگر به جز تاج گود، بیشتر است. همچنین در محل‌هایی که انکر وجود دارد به دلیل اعمال پیش‌تنیده بالا دیواره به سمت خاک کشیده شده است که تورفتگی قسمت بالای مدل ترکیبی، به دلیل وجود انکر کامل

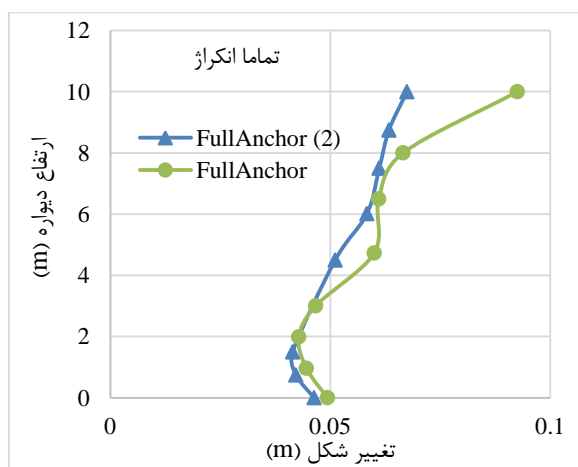
مقدار به ۵۱/۴ تن نیز رسید. در این حالت برای جلوگیری از تسلیم و یا گسیختگی المان‌های مهارای بایستی ضریب اطمینان بیشتر از ضرایب معمول در نظر گرفته شود.

برای کاهش تغییر شکل مدل تماماً آنکراژ، مدل دیگری به‌عنوان مدل چهارم با ضریب اطمینان پایداری ۲ (در حالت استاتیکی) ساخته و آنالیز گردید. تا بدین طریق تأثیر افزایش ضریب اطمینان پایداری در کنترل تغییر شکل‌های دیواره پس از انفجار مورد بررسی قرار گیرد. در این مدل از سه انکر به فاصله ۳ متر از یکدیگر مطابق با شکل (۱۵) استفاده گردید. نخستین انکر در تراز ۲- قرار داده شد. در هر یک از انکرها نیروی ۲۰ تنی به‌عنوان نیروی پیش‌تندگی اعمال شده است.



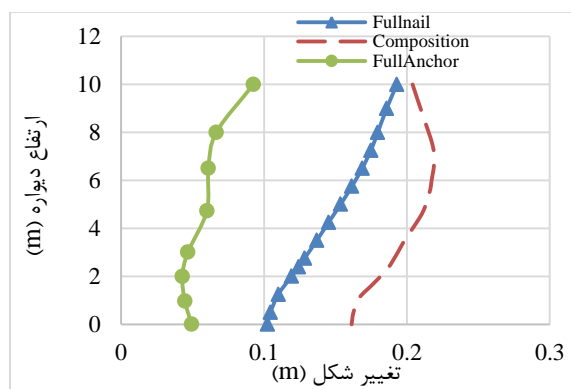
شکل ۱۵. مدل چهارم (تماماً آنکر (۲)) در نرم‌افزار GeoStudio

در شکل (۱۶) تغییر شکل دیواره مدل ۱ و مدل چهارم پس از انفجار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشخص است، تغییر شکل در تاج و وسط گود در مدل ۴ به نسبت مدل ۱ کمتر است و تغییر شکل تاج گود از ۹/۲ سانتی‌متر به ۶/۷ سانتی‌متر رسیده است.



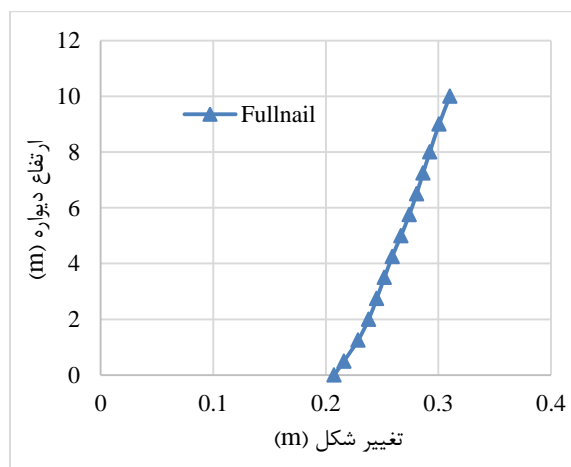
شکل ۱۶. تغییر شکل افقی دیوار مدل ۱ و مدل ۴ پس از انفجار

تا حدودی تغییر شکل تاج گود محدودتر شده است و این بدان معناست افزایش ضریب اطمینان پایداری در کاهش تغییر شکل



شکل ۱۳. تغییر شکل دیواره پس از برخورد موج انفجار با دیواره گود

بر اساس شکل (۱۳) تغییر شکل در دیواره مدل تماماً آنکر از دو مدل دیگر کمتر است. ولی با این حال این میزان تغییر شکل در تاج گود (در حدود ۱۰ سانتی‌متر) زیاد است. برای مثال در آیین‌نامه تغییر شکل مجاز برای آسیب نرسیدن به سازه‌های مجاور در حالت استاتیکی حداکثر ۲/۵ سانتی‌متر مطرح شده است. دیواره ترکیبی بیش‌ترین تغییر شکل را از خود نشان داده است که از این منظر ضعیف‌ترین دیواره است. این بدان معناست که استفاده از یک انکر در بالای گود به‌تنهایی در برابر بار ناشی از انفجار چندان مؤثر نیست. در دیواره می‌خکوبی‌شده تحلیل حرارتی برای به‌دست آوردن ضریب اطمینان دیواره پس از برخورد موج انفجار انجام گردید. که بر این اساس ضریب اطمینان ۱/۰۱ به‌دست آمد. این بدان معناست که احتمال ناپایداری دیواره پس از انفجار بسیار بالا است. نمودار شکل (۱۴) تغییر شکل دیواره تماماً نیل را در گام یک صدمی پس از شروع تحلیل حرارتی نشان می‌دهد. چنین تغییر شکل بزرگی نشان‌دهنده شروع ناپایداری شدن خاک است.



شکل ۱۴. تغییر شکل دیواره تماماً نیل، در گام ۰/۰۱ پس از شروع تحلیل حرارتی

نیروی محوری ایجادشده در قسمت پیوستگی (باند) آنکر پایینی مدل ۱ قبل از انفجار ۲۵ تن بود که پس از انفجار این

۵. مرجع ها

- [1] Mobaraki, B.; Vaghefi, M. "Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion"; *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 2015, 47, 114-122.
- [2] Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. "Dynamic Analysis of Underground Tunnels Subjected to Internal Blast Loading"; *World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI)*, Barcelona, 2014.
- [3] Tahmasebzadeh, M.; Tahmasebzadeh, S. "Effect of Using Blast Wave Trap in Tunnels with 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by an Explosion Outside the Tunne"; *J. Res. Dev.* 2015, 6, 201-210.
- [4] Yang, Y.; Xie, X.; Wang, R. "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion"; *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2010, 2, 373-384.
- [5] Lu, Y.; Wang, Z.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2d and 3d Numerical Simulations"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2005, 25, 275-288.
- [6] Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H.; Chong, K. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast"; *Comput. Struct.* 2005, 83, 339-356.
- [7] Hosseini, S. A.; Hosseini, N. "Numerical Modelling of Underground Explosion and Response of Buried Structures Using Coupled Eulerian-Lagrangian Method"; *J. Res. Dev.* 2018, 9, 325-336.
- [8] Yogendrakumar, M.; Bathurst, R. J.; Finn, W. L. "Dynamic Response Analysis of Reinforced-Soil Retaining Wall"; *J. Geotech. Geoenviron.* 1992, 118, 1158-1167.
- [9] Baziar, M. H.; Rabeti Moghadam, M.; Gholipour, S. "Numerical Investigation of Gravity and Reinforced Soil Wall Performance under Blast Loading"; *J. Res. Dev.* 2013, 3, 259-267.
- [10] Xiaolin, W. "Study on Effect of Excavation Blasting on dynamic Stability of Soil Nail Wall at Foundation Pit"; *Blasting* 1998, 2, 016.
- [11] Briaud, J. L.; Lim, Y. "Tieback Walls in Sand: Numerical Simulation and Design Implications"; *J. Geotech. Eng.* 1999, 125, 101-110.
- [12] Osouli, A.; Hashash, Y. M. "Case Studies of Prediction of Excavation Response Using Learned Excavation Performance"; *Int. J. Geoeng. Case Histories* 2010, 1, 340-366.
- [13] Ambrosini, R. D.; Luccioni, B. M. "Craters Produced by Explosions on the Soil Surface"; *J. Appl. Mech.* 2006, 73, 890-900.
- [14] Smith, P.; Hetherington, J. "Blast and Ballistic Loading of Structures. Laxtons"; Oxford. 1994
- [15] Xu, Q.; Yin, H.; Cao, X.; Li, Z. "A Temperature-Driven Strength Reduction Method for Slope Stability Analysis"; *Mech. Res. Commun.* 2009, 36, 224-231.
- [16] Hsiung, B. C.; Dao, S. D. "Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands"; *Electronic J. Geotech. Eng.* 2014, 1, 17325-17344.

تاج گود مؤثر بوده است. در حالت استفاده از مدل تمام انکر (۲)، دیواره پس از انفجار پایدار می ماند با این حال دارای تغییر شکل بیشینه ۶/۷ سانتی متری می گردد. تغییر شکل مجاز در دیواره گود بسیار متأثر از سازه مجاور آن است. در صورتی که وجود چنین تغییر شکل هایی همچنان بر اساس سازه مجاور آن غیرمجاز است، بایستی روش های دیگر پایدارسازی گودبرداری که دارای سختی بیشتری هستند، همچون دیوار دیافراگمی مورد ارزیابی قرار گیرند.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله اثر بارگذاری انفجار بر روی دیوار پایدار شده با مهار فولادی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تغییر شکل ایجاد شده در دیواره های دارای ضریب اطمینان پایدار یکسان، می توانند کاملاً مختلف باشد و در صورت اهمیت داشتن تغییر شکل ها برای مثال نزدیکی گودبرداری به ساختمان ها، بایستی طراحی از منظر تغییر شکل صورت گیرد. همچنین نتایج نشان دادند انفجار باعث افزایش ۵ تا ۶۵ برابری تغییر شکل افقی تاج گود در مدل های مختلف گردید. کمترین افزایش تغییر شکل در دیوار تماماً انکر بود. بر همین اساس استفاده از سیستم انکراژ در کنترل تغییر شکل ها بسیار مفید است. با این حال باید دقت نمود استفاده از تنها یک انکر در بالای گود باعث کنترل تغییر شکل در دیواره نمی گردد و دیواره از محلی که میخکوبی شده است به جلو حرکت می کند و به نوعی برای رسیدن به تعادل قسمت بالایی دیواره نیز به جلو حرکت می کند. دیوار تماماً میخکوبی شده پس از تجزیه و تحلیل استاتیکی تقریباً بیشترین تغییر شکل را داشت و ضریب اطمینان این دیوار پس از انفجار در حدود یک به دست آمد. با مقایسه مدل آنالیز شده با مرز نامحدود و مرز محدود، افزایش حدود ۸۰ درصدی تغییر شکل در دیواره مدل شده با مرز محدود به نسبت مرز نامحدود مشاهده گردید. این افزایش تغییر شکل به دلیل برگشت انرژی انفجار از دیواره ها است. در نتیجه برای جلوگیری از خطا بایستی از مرزهای نامحدود برای مدل سازی انفجار استفاده نمود. همچنین انفجار باعث افزایش ۱۱۰ درصدی تنش در مهارهای پیش تنیده گردید. این افزایش باعث کاهش ضریب اطمینان در برابر جاری شدن مهار گردید است و بایستی در طراحی گودهایی که در معرض بارهای دینامیکی هستند به این نکته توجه داشت.