

تعیین محدوده تأثیر و فاصله ایمن از دیوار میخ کوبی تحت بار انفجار سطحی و زیرسطحی

علی رسولی^۱، مهدی خداپرست^{۲*}، حسین مقتدایی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹)

چکیده

توسعه سیستم‌های پدافند غیرعامل و اهمیت بار ناشی از انفجار و اتخاذ تدابیر لازم در خصوص اثرات ناشی از انفجار بر طراحی و عملکرد سازه‌های زیرزمینی از جمله گودهای پایدارشده با استفاده از روش میخ کوبی، بررسی اثر انفجار بر عملکرد و تغییر شکل دیواره‌های میخ کوبی شده را ضروری می‌سازد. لذا در این پژوهش مدل‌سازی سه بعدی و تحلیل دینامیکی غیرخطی یک دیواره میخ کوبی شده به عمق نه متر، در معرض بار ناشی از انفجار با استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. جهت مدل‌سازی بار انفجار از ماده منفجره تی‌ان‌تی در جرم‌های مختلف در سطح زمین و عمق‌های ۲، ۴ و ۶ متری در پشت دیواره استفاده شد. در این مطالعه ضمن تعریف دو مفهوم فاصله ایمن و محدوده تأثیر انفجار، نتایج به دست آمده نشان داد که در پایداری دیوار میخ کوبی شده در معرض بار انفجار، افزایش جرم ماده منفجره موجب افزایش تغییر شکل افقی ایجاد شده در لبه دیواره گود و تنش ایجاد شده در نیل‌ها می‌شود. همچنین تأثیر انفجار زیرسطحی بر پایداری دیوار میخ کوبی شده نسبت به انفجار سطحی با جرم یکسان ماده منفجره بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: بار انفجار، دیواره میخ کوبی شده، تغییر شکل افقی، تنش در نیل، ماسه رس‌دار، فاصله ایمن، محدوده تأثیر

Determination of the Effective Range and Safe Distance from the Nail Wall under Surface and Subsurface Blast Loads

A. Rasoli, M. Khodaparast*, H. Moghtadaee

Associate Professor, University of Qom, Qom, Iran.

(Received: 31/08/2021; Accepted: 10/11/2021)

Abstract

The development of passive defense systems and the importance of blast load and the adoption of necessary measures regarding the effects of blast loading on the design and performance of underground structures, including stabilized excavations using the nailing method, make it necessary to investigate the effect of blasting on the performance and deformation of nailed walls. Therefore, in the present study, three-dimensional modeling and nonlinear dynamic analysis of a nailed wall to a depth of 9 meters, under the blast load are investigated using the Coupled Eulerian-Lagrangian method in Abacus software. To model the blast load, TNT explosive is used in different masses on the ground surface and at the depths of 2, 4, and 6 meters behind the wall. In this study, while defining the two concepts of safe distance and explosion impact range, the results show that in the stabilization of the nailed wall under the blast load, the increase in explosive mass causes an increase in the horizontal deformation created at the edge of the excavation wall and the stress created in the nails. Also, the effect of subsurface explosion on the stability of the nailed wall is greater than the surface explosion with the same mass of explosives.

Keywords: Blast Load, Nailed Wall, Horizontal Deformation, Nail Stress, Sandy Clay, Safe Distance, Effective Distance

۱. مقدمه

می‌داد. نگی و همکاران [۵] اثر انفجار و تأثیر پارامترهایی چون عمق انفجار، مقدار ماده منفجره و مشخصات خاک را بر روی سازه‌های زیرزمینی مدفون با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار دادند. یانگ و همکاران [۶] نیز به بررسی مقاومت تونل متروی شانگهای در برابر بار انفجار با استفاده از نرم‌افزار LS - DYNA پرداختند. نتایج نشان داد که انتشار موج انفجار در خاک و تونل موجب ایجاد تنش و شتاب در لاینینگ تونل می‌شود. همچنین در این پژوهش ایمنی لاینینگ تونل بر اساس معیار شکست مورد ارزیابی قرار گرفت.

شینی [۷] اثر انفجار سطحی بر تونل‌های شهری در خاک‌های خشک و اشباع را بررسی کرد. در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تراز سفره آب زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با استفاده از نرم‌افزار Plaxis مورد بررسی قرار گرفت. بازیار و همکاران [۸] دو نوع دیوار حائل مرسوم در پروژه‌های عمرانی (دیوار حائل وزنی و خاک مسلح) را در دو تراز مختلف خاک در برابر بار انفجار مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش میزان تغییر شکل دیوارها تحت بار انفجار با استفاده از نرم‌افزار Flac مورد ارزیابی قرار گرفت. جایاسینگ و همکاران [۹] پژوهشی به منظور بررسی تأثیر جرم ماده منفجره بر روی واکنش شمع انجام دادند. در این پژوهش تغییر شکل افقی شمع برای مقدار ماده منفجره تی‌ان‌تی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم در عمق متوسط خاک و در فواصل مختلف از شمع مورد بررسی قرار گرفت.

هارنا و همکاران [۱۰] به بررسی پاسخ ضربه‌ای سازه‌های زیرزمینی ساخته شده از مواد کامپوزیت مسلح تحت بار انفجار، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. آن‌ها در این پژوهش تغییرمکان، تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از مدل‌سازی عددی را مورد بررسی قرار دادند. چاکرابورتی [۱۱] در پژوهش خود تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر جابه‌جایی جانبی نوک شمع و همچنین مقدار تنش متوسط ایجاد شده در خاک را تحت بار انفجار مورد بررسی قرار داد. برخورداری و انتظار [۱۲] با استفاده از روش اجزا مجزا به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی و عمق انفجار بر تغییرمکان عمودی و ممان خمشی تاج تونل‌های مترو پرداختند. خداپرست و حسینی [۱۳] با مدل‌سازی سه‌بعدی غیرخطی شمع بتن مسلح در نرم‌افزار آباکوس و به روش کوپل اولبری-لاگرانژی^۵، تأثیر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند.

خداپرست و مقبلی [۱۴] در پژوهشی به بررسی اثر بار انفجار بر روانگرایی خاک ماسه‌ای پرداختند. همچنین در پژوهشی دیگر خداپرست و همکاران [۱۵] اثر استفاده از خاک مسلح در کاهش اثرات ناشی از بار انفجار در خاک را مورد بررسی قرار دادند. جایاسینگ و همکاران [۱۶] مجموعه‌ای از آزمایش‌های میدانی

گسترش روز افزون گودبرداری‌ها^۱ و لزوم استفاده از اعماق پائین زمین جهت افزایش ظرفیت باربری و احداث سازه‌های عظیم و همچنین تأمین ایمنی لازم جهت ایجاد فضای امن به منظور فعالیت کارگران و تجهیزات، روش‌های متنوعی را جهت پایدارسازی آن‌ها به وجود آورده است که یکی از این روش‌ها استفاده از میل مهارهای خاک (سیستم‌های مهارگذاری در خاک) می‌باشد [۱].

عملکرد سیستم‌های میخ‌کوبی^۲ شده در یک گودبرداری عمیق به خصوص در محیط‌های شهری بر اساس پایداری و تغییر شکل جانبی و قائم آن‌ها بیان می‌شود. تغییرمکان جانبی و قائم دیواره‌ها در گودبرداری‌های عمیق می‌تواند به سازه‌های مجاور، تأسیسات و خیابان‌های مجاور گود آسیب برساند. این نوع گودبرداری به نحوی طراحی می‌شود که در برابر بارهای وارده پایدار بوده و تغییرشکل آن تا سطوح مجاز و قابل قبول محدود شود.

در مدت‌زمان بهره‌برداری از یک گود ممکن است که گود علاوه بر تحمل بارهای معمول وارد بر خود، در معرض انواع بارهای استاتیکی و دینامیکی غیرقابل پیش‌بینی از جمله بار دینامیکی ناشی از انفجار قرار گیرد. بار انفجار از جمله بارهای دینامیکی با زمان کوتاه می‌باشد که مدت‌زمان عادی این نوع بارگذاری چیزی حدود ۱۰۰۰ برابر کوتاه‌تر از مدت‌زمان اعمال بار ناشی از یک زلزله می‌باشد [۲]. از آنجا که انفجار در نزدیکی یک گود می‌تواند منجر به ریزش دیواره گود و در نتیجه تخریب سازه‌های مجاور آن شود، لذا بررسی اثرات بار انفجار بر دیوارهای گودبرداری شده لازم و ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون مطالعات بسیاری در راستای بررسی اثرات بار انفجار در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک انجام شده است. در ادامه به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌گردد. چپو و همکاران [۳] به بررسی اثر انفجار بر دیوارهای خاکی مسلح شده^۳ با لایه‌های ژئوسنتتیک^۴ پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که دیوارهای مسلح مانع انتشار موج فشار ناشی از انفجار شده و با جذب انرژی انفجار به هنگام تغییر شکل، میزان تخریب را کاهش می‌دهند.

لو و همکاران [۴] اثرات انفجار بر سازه‌های زیرزمینی را با مدل‌سازی دو بعدی و سه‌بعدی در نرم‌افزار اتوداین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل دو بعدی می‌تواند نتایج دقیقی در رابطه با اندازه دهانه، اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه و واکنش بحرانی در جلو دیواره فراهم آورد. پاسخ در بخش باقیمانده سازه تفاوت‌های قابل توجهی را بین مدل‌های دو بعدی و سه بعدی نشان

¹ Excavations

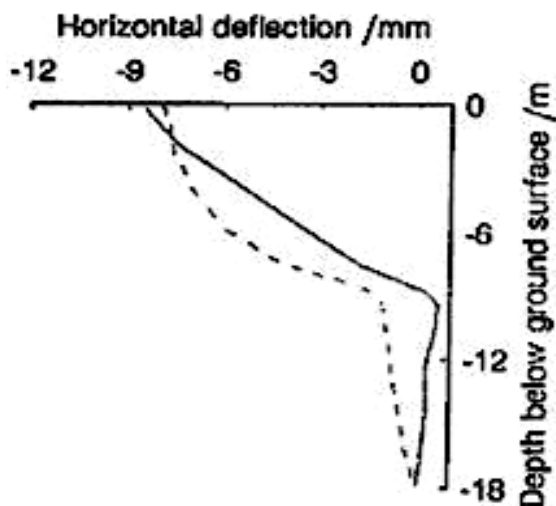
² Soil nailed system

³ Reinforced Soil Wall

⁴ Geosynthetics

⁵ Coupled Eulerian-Lagrangian approach

پژوهش را نشان می‌دهد. المان مقاوم رویه این دیواره متشکل از شاتکریت^۳ مسلح می‌باشد. عملیات گودبرداری در پنج مرحله که ارتفاع هر مرحله ۱/۸۳ متر می‌باشد (ارتفاع کل برابر ۹/۲ متر) انجام شده است. میخ‌ها در شبکه‌های ۱/۸۳ × ۱/۸۳ متر قرار گرفته‌اند که قطر و طول میخ‌ها به ترتیب برابر ۲۵ میلی‌متر و ۶/۱ متر و دارای شیب ۲۰ درجه نسبت به افق می‌باشند. مدل‌سازی این بخش به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام گردید. همچنین برای مدل‌سازی رفتار خاک تحت بارگذاری انفجار در نرم‌افزار از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده در مدل صحت‌سنجی برای خاک و مسلح‌کننده‌ها به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. همچنین جزئیات مسلح‌کننده‌ها و ابعاد مدل مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار تغییر شکل در دیواره توسط شن و همکاران (خط پیوسته) [۱۹] و مدل عددی همان دیواره توسط ژانگ و همکاران (خط چین) [۲۰]

جدول ۱. پارامترهای خاک ماسه لای دار در مدل صحت‌سنجی دیواره میخ کوبی [۱۹ و ۲۰]

| پارامتر | مقدار |
|------------------------|----------------------|
| وزن مخصوص (γ) | ۱۹ kN/m ³ |
| زاویه اصطکاک داخلی (φ) | ۳۶ degree |
| چسبندگی (c) | ۵ kPa |
| مدول الاستیسیته (E) | ۵۰ MPa |
| ضریب پواسون (ν) | ۰/۳ |

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده برای شاتکریت و میخ‌ها در مدل صحت‌سنجی دیواره میخ کوبی [۱۹ و ۲۰]

| مسلح‌کننده | میخ‌ها | شاتکریت |
|---------------------|---------|---------|
| مدول الاستیسیته (E) | ۲۲۰ GPa | ۲۵ GPa |
| ضریب پواسون (ν) | ۰/۲ | ۰/۳ |
| تنش تسلیم | ۴۲۰ MPa | - |

کنترل شده به منظور بررسی اثر انفجار بر روی رفتار شمع‌ها انجام دادند. این آزمایش‌ها با سه نوع شمع با شرایط متفاوت گیرداری در سر شمع‌ها انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که حداکثر لنگر خمشی در شمع دو سر گیردار در سر شمع اتفاق می‌افتد. در شمع یکسر گیردار حداکثر لنگر خمشی در نزدیکی وسط شمع بوده و مقدار لنگر خمشی در سر شمع به دلیل عدم وجود محدودیت صفر بوده است. همچنین نتایج نشان داد که برای تمام حالات، مقدار حداکثر نیروی محوری در سر شمع اتفاق می‌افتد.

یانگ و همکاران [۱۷] از مدل‌سازی عددی سه بعدی با روش کوپل اولبری-لاگرانژی جهت ارزیابی ویژگی‌های آسیب تونل مستقر در زیر تراز لایه‌های آب زیرزمینی در معرض بار انفجار، استفاده نمودند. محققین در این پژوهش از پوشش CFRP^۱ جهت بهبود مقاومت تونل استفاده نمودند. ابراهیم و همکاران [۱۸] نیز در پژوهشی به بررسی رفتار شمع‌های بتنی تحت اثر بارگذاری انفجار با ماده منفجره به جرم‌های مختلف و در فاصله‌های مختلف از شمع‌های بتنی پرداختند.

با بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که عمده تحقیقات انجام شده در حوزه تأثیر انفجار بر سازه‌های زیر زمینی معطوف به بررسی اثرات این بارگذاری به خصوص بر تونل‌ها، شمع‌ها و دیوارهای حائل است. بنابراین همچنان در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، اثرات انفجار بر سازه‌هایی از جمله سازه‌های نگهبان و دیوارهای مسلح، گودهای حفاظت شده و غیره کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از اینرو در این تحقیق بررسی اثر انفجار بر دیوارهای میخ کوبی شده مورد توجه قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی و تحلیل پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار Abaqus نسخه ۶/۱۷ و به روش تحلیل دینامیکی صریح^۲ و روش کوپل اولبری-لاگرانژی و در یک مرحله انجام شده است. زمان انجام تحلیل ۸۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. علت تعیین این زمان آن است که موج انفجار از تمام طول دیواره و تمام المان‌های میخ‌ها عبور کرده باشد.

۲-۱. صحت‌سنجی

در این مطالعه عددی صحت‌سنجی مدل در دو بخش دیوار میخ کوبی شده و بارگذاری انفجار انجام شده است. بخش اول صحت‌سنجی یک پروژه دیواره میخ کوبی شده به همراه اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها با استفاده از ابزار دقیق است که توسط شن و همکاران [۱۹] انجام گردیده است. همچنین نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها توسط ژانگ و همکاران [۲۰] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل شده است. شکل (۱) نمودارهای مربوط به این دو

^۳ Shotcrete

^۱ Carbon fiber reinforced polymer

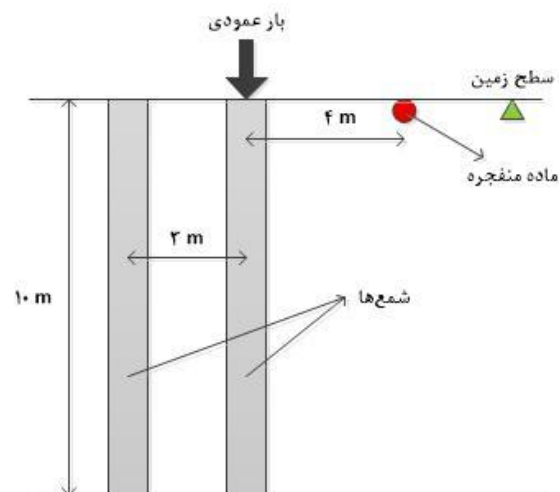
^۲ Explicit Dynamic

جدول ۳. پارامترهای خاک ماسه‌ای مدل صحت‌سنجی انفجار [۱۱]

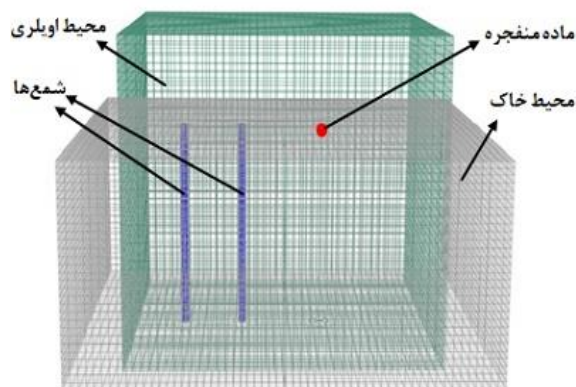
| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------|-----------------------|
| وزن مخصوص (γ) | $15/6 \text{ kN/m}^3$ |
| زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) | 30 degree |
| مدول الاستیسیته (E) | 28 MPa |
| ضریب پواسون (ν) | $0/2$ |

جدول ۴. پارامترهای فولاد استفاده‌شده در شمع‌ها در مدل صحت‌سنجی انفجار [۱۱]

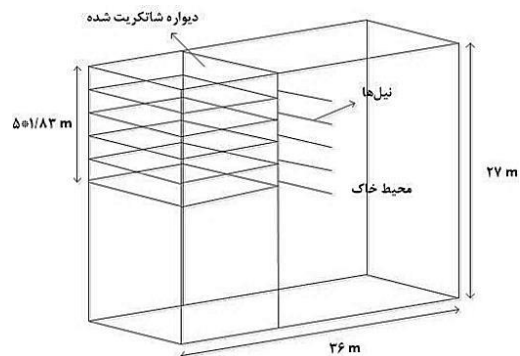
| پارامتر | مقدار | |
|---|-----------------------|-------------------|
| وزن مخصوص (γ) | 7800 kN/m^3 | |
| مدول الاستیسیته (E) | 200 GPa | |
| ضریب پواسون (ν) | $0/3$ | |
| تنش تسلیم | 350 MPa | |
| پارامترهای سخت‌شوندگی جانسون-کوک (J-C) | A | 360 MPa |
| | B | 635 MPa |
| | n | $0/114$ |
| | C | $0/075$ |



شکل ۴. موقعیت قرارگیری ماده منفجره و شمع‌ها

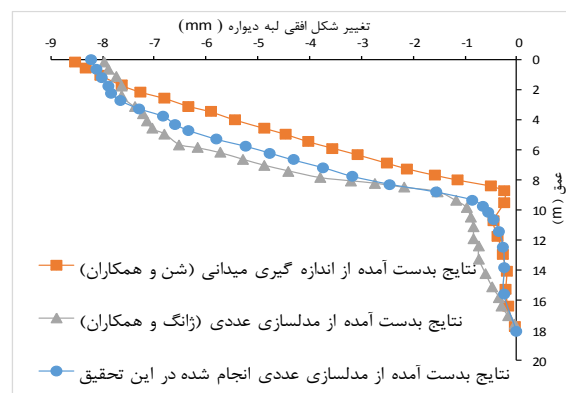


شکل ۵. جزئیات مدل صحت‌سنجی انفجار



شکل ۲. جزئیات مسلح‌کننده‌ها و ابعاد مدل صحت‌سنجی دیواره میخ‌کوبی

نتایج تحلیل مدل اجزا محدود نشان می‌دهد که بیشینه جابجایی افقی دیواره میلگردگذاری‌شده در بالای دیواره به وقوع پیوسته است. میزان تغییر شکل‌های افقی دیواره در گام آخر گودبرداری در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است نتایج حاصل از مدل‌سازی مطابقت خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صحرایی دارد.

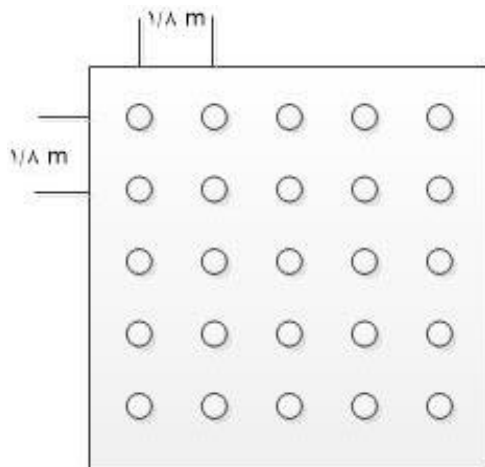


شکل ۳. مقایسه نتایج تغییر شکل افقی گود با نتایج اندازه‌گیری صحرایی شن و همکاران و مدل‌سازی عددی ژانگ و همکاران [۱۹ و ۲۰] در بخش دوم و جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی انفجار، از نتایج پژوهش چاکرابورتی استفاده شده است [۱۱]. در این تحقیق دو شمع فولادی جدار نازک مدفون در خاک تحت بارگذاری انفجار قرار گرفته‌اند و این شرایط با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در این مدل شمع‌های فولادی با قطر خارجی ۴۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۳۵ میلی‌متر و طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده‌اند. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر برابر ۳ متر بوده و فاصله شمع نزدیک تا ماده منفجره ۴ متر است. ماده منفجره TNT به شکل استوانه و به وزن ۵۰ کیلوگرم در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. محیط سه‌بعدی خاک در نظر گرفته شده $20 \times 20 \times 20$ متر است. بار عمودی ۵۰۰ کیلو نیوتن بر روی شمع نزدیک به ماده منفجره وارد می‌شود. مشخصات خاک و فولاد استفاده‌شده در شمع‌ها در جدول‌های (۳ و ۴) آورده شده است. همچنین موقعیت شمع‌ها و ماده منفجره در شکل‌های (۴ و ۵) نشان داده شده است.

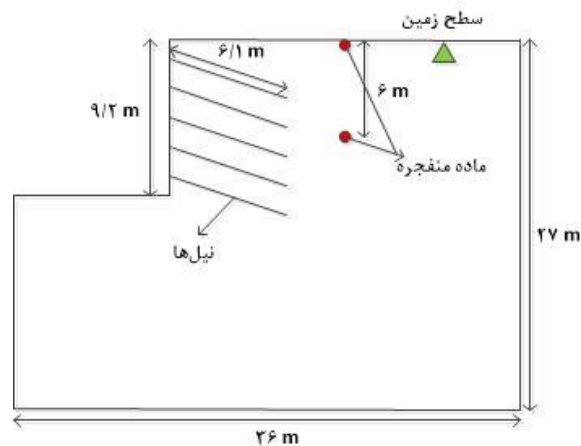
خاک، C و ϕ برای رفتار پلاستیک خاک و ψ برای زاویه اتساع خاک است. در این مدل رفتاری تسلیم زمانی در مصالح اتفاق می افتد که رابطه (۱) برقرار شود:

$$|\tau| = C + \tau_n \tan \phi \quad (1)$$

در رابطه (۱) تنش برشی، σ_n تنش عمودی، C چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است [۲۱]. همچنین المان استفاده



شکل ۷. پلان چیدمان نیل‌ها در دیواره گود



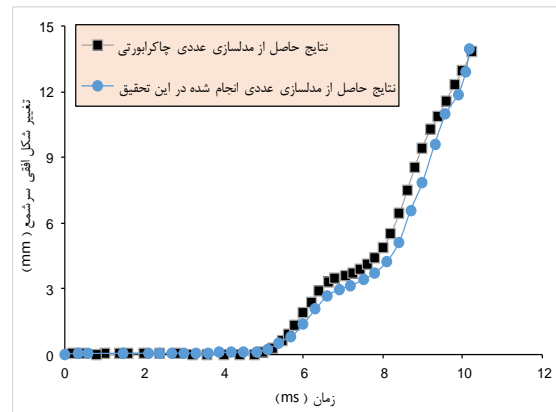
شکل ۸. جزئیات مدل اصلی پژوهش

شده در اجزا خاک، المان پیوسته^۲ مکعبی هشت‌گره‌ای (C3D8R) به همراه انتگرال کاهش یافته^۳ و کنترل ساعت شنی^۴ می‌باشد. حداقل و حداکثر اندازه ابعاد المان در نزدیکی و دور از محل انفجار به ترتیب ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۲-۲-۲. مدل‌سازی اجزا محدود ماده منفجره

ماده منفجره TNT مورد استفاده در مدل‌سازی با استفاده از المان‌های اولیری در آباکوس مدل‌سازی شده است. در المان‌های فضای اولیری^۵، المان‌های ماده منفجره کاملاً پر از جرم بوده در

به منظور صحت‌سنجی مدل، نتایج به دست آمده از تغییر مکان افقی سرشمع نزدیک به ماده منفجره با نتایج حاصل از پژوهش چاکرابورتی مقایسه شده است. شکل (۶) تطابق خوب مدل‌سازی انجام شده با داده‌های پژوهش چاکرابورتی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقایسه نتایج تغییر شکل افقی سرشمع با نتایج مدل‌سازی عددی چاکرابورتی [۱۱]

۲-۲. مدل اصلی پژوهش

در این پژوهش مدل ایجاد شده بر اساس مشخصات مدل‌های صحت‌سنجی ایجاد شده است. ارتفاع گودبرداری برابر ۹/۲ و از نیل‌های با طول ۶/۱ متر و با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق استفاده شده است. قطر میلگردهای مورد استفاده برابر ۲۵ میلی‌متر و فاصله افقی و عمودی نیل‌ها همانند مدل صحت‌سنجی برابر ۱/۸ متر است. عرض مدل بر اساس مدل شن و همکاران برابر ۹ متر در نظر گرفته شده است. المان مقاوم رویه دیواره متشکل از شاتریت مسلح است. ماده منفجره TNT به جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در سطح زمین و عمق‌های ۲، ۴ و ۶ متر از سطح زمین قرار داده شده است. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب پلان چیدمان نیل‌ها در دیواره گود و جزئیات مدل اصلی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱. مدل‌سازی اجزا محدود خاک

در این تحقیق مدل سه‌بعدی اجزا محدود خاک با استفاده از المان‌های لاگرانژی^۱ ایجاد شده است. ابعاد محیط خاک با توجه به مدل صحت‌سنجی، در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات مورد استفاده برای خاک بر اساس پارامترهای مدل صحت‌سنجی (جدول ۱) است. جهت مدل‌سازی رفتار خاک تحت بار دینامیکی انفجار در نرم‌افزار از مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک استفاده گردیده است. از این مدل رفتاری جهت مدل‌سازی مصالح اصطکاکی و چسبیده در نرم‌افزار استفاده می‌شود. معیار تسلیم این مدل بر اساس تنش‌های عمودی و برشی در صفحه τ - σ_n بیان می‌شود. این مدل شامل پنج پارامتر E و ν برای رفتار الاستیک

² Continuum

³ reduced integration

⁴ hourglass control

⁵ Eulerian elements

¹ Lagrangian elements

رفتاری جانسون-کوک بوده و T^* نیز دمای متناظر است [۱۹، ۲۰ و ۲۲]. پارامترهای مورد استفاده برای نیل‌ها در مدل‌سازی، پارامترهای آورده شده در جدول (۴) بوده با این تفاوت که برای مدول الاستیسیته از مقدار ۲۲۰ گیگاپاسکال و برای تنش تسلیم از مقدار ۴۲۰ مگاپاسکال استفاده شده است.

جدول ۵. پارامترهای ماده منفجره [۱۱]

| پارامتر | مقدار |
|---------------------|------------------------|
| چگالی (ρ) | ۱۶۳۰ kN/m ³ |
| سرعت موج انفجار (V) | ۶۹۳۰ m/s |
| A | ۳۷۳۸۰۰ MPa |
| B | ۳۷۴۷ MPa |
| ω | ۰/۳۵ |
| R ₁ | ۴/۱۵ |
| R ₂ | ۰/۹ |
| E ₀ | ۳۶۸۰ KJ/Kg |

۲-۲-۴. مدل‌سازی شاتکریت

در تحلیل‌های تغییر شکل، شاتکریت اجرا شده در دیواره گود به وسیله المان پوسته مدل شده و مدل رفتاری مورد استفاده برای المان‌های مربوط به شاتکریت به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین المان‌های شاتکریت به دیواره گود متصل^۶ شده است. در این تحلیل برای مدل‌سازی شاتکریت از المان‌های سه‌بعدی لاگرانژی پوسته^۷ چهار گره‌ای (S4R) با انتگرال کاهش یافته و کنترل ساعت شنی استفاده شده است. ضریب ارتجاعی مورد استفاده برای مصالح دیواره شاتکریت برابر ۲۵ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۵. شرایط مرزی

در مدل‌سازی انجام شده بین محیط اوپلری و محیط لاگرانژی از گزینه تماس کلی استفاده شده است. المان‌های نیل‌ها به صورت مدفون در داخل خاک قرار گرفته است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای محیط خاک به صورت مقید کردن صفحه پایین در تمام جهتها و همچنین مقید کردن صفحات قائم در جهت عمود بر همان صفحه است. شرایط مرزی جریان آزاد از نوع موج بدون بازگشت^۸ برای محیط اوپلری در نظر گرفته شده است که منجر به عدم انعکاس موج انفجار به داخل محیط اوپلری می‌شود. شکل (۹) اجزای تشکیل دهنده مدل اصلی به همراه شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای محیط را نشان می‌دهد.

حالی که سایر المان‌های اوپلری کاملاً خالی از هرگونه جرمی می‌باشند. المان‌های اوپلری و لاگرانژی نیز از طریق گزینه تماس کلی^۱ با یکدیگر در تماس هستند که بین سطوح ماده منفجره و خاک تعریف می‌گردد. در این تحقیق ماده منفجره با استفاده از معادله حالت (JWL)^۲ مدل‌سازی شده است. این معادله فشار ایجاد شده از طریق انفجار ماده منفجره شیمیایی را مدل‌سازی می‌کند. رابطه (۲) معادله حالت JWL را نشان می‌دهد [۲۲].

$$P = A(1 - \frac{\omega\rho}{R_1\rho_0})e^{-R_1\frac{\rho_0}{\rho}} + B(1 - \frac{\omega\rho}{R_2\rho_0})e^{-R_2\frac{\rho_0}{\rho}} + \omega\rho E_0 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، A، B، R₁، R₂ و ω مقادیر ثابت ماده منفجره TNT هستند. پارامتر A و B نشان‌دهنده بزرگی فشار و ρ_0 چگالی ماده منفجره، ρ چگالی انفجار ایجاد شده و E₀ انرژی درونی در واحد جرم است. در معادله JWL دو قسمت اولیه در سمت راست معادله نشان‌دهنده تولید فشار بالا در طول انفجار و آخرین قسمت از سمت راست معادله، نشان‌دهنده فشار پایین با توجه به حجم بالا در اثر انفجار می‌باشند. در این پژوهش برای مدل‌سازی ماده منفجره از المان‌های سه‌بعدی پیوسته اوپلری هشت‌گره‌ای (EC3D8R) استفاده شده است. پارامترهای ماده منفجره برای معادله JWL در جدول (۵) آورده شده است. در این تحقیق از ماده منفجره TNT به صورت مکعبی شکل در اعماق مختلف از سطح خاک استفاده شده است.

۲-۲-۳. مدل‌سازی مسلح کننده‌ها (میخ‌ها)

در دیوارهای میخ‌کوبی شده، میخ یک المان سازه‌ای در داخل خاک و دارای عملکرد کششی بوده که در تماس با خاک است. با توجه به مدل‌سازی سه‌بعدی مسئله، میخ‌ها به صورت المان مدفون^۳ در خاک مدل‌سازی شده‌اند که اندرکنش خاک و میخ در این حالت به خوبی مدل می‌شود. در این تحقیق برای مدل‌سازی نیل‌ها از المان‌های لاگرانژی سه‌بعدی دوگره‌ای خرپایی^۴ (T3D2) استفاده شده است [۲۲]. رفتار تنش-کرنش نیل‌ها با استفاده از مدل رفتار-ی پلاستیک سخت‌شوندگی جانسون-کوک (J-C)^۵ مدل شده است. این مدل برای تغییر شکل با نرخ کرنش بالای بسیاری از مواد به خصوص اکثر فلزات کاربرد دارد. رابطه (۳) ارتباط بین تنش و کرنش دینامیکی مدل جانسون-کوک با در نظر گرفتن نرخ کرنش وابسته را نشان می‌دهد:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - T^*{}^m) \quad (3)$$

که σ تنش تسلیم در نرخ کرنش غیر صفر و ε^* کرنش پلاستیک بدون بعد است ($\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$). ε نرخ کرنش پلاستیک معادل و $\varepsilon_0 = \frac{1}{s}$ نرخ کرنش مرجع است. A، B، C، m و n پارامترهای مدل

¹ General contact

² Jones-Wilkins-Lee

³ Embedded elements

⁴ Truss

⁵ Johnson-Cook

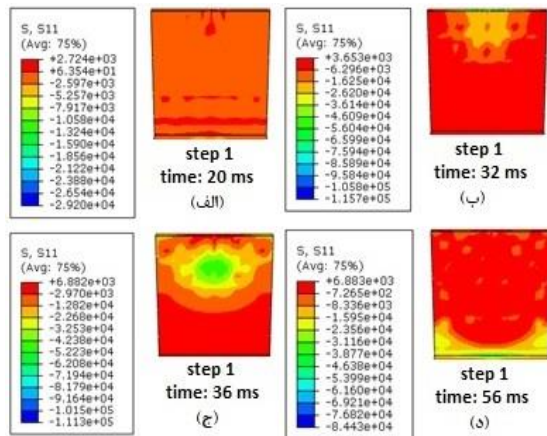
⁶ tie

⁷ Shell

⁸ Outflow-Free

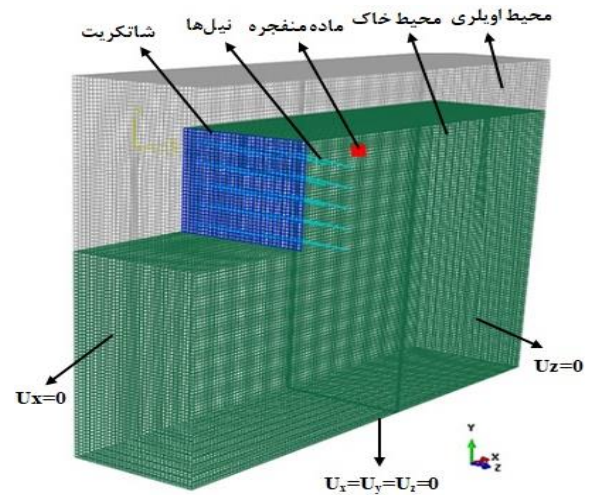
پارامتر دیگری که برای به دست آوردن فاصله ایمن مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار تنش تسلیم نیل‌ها می‌باشد. بر این اساس زمانی در فاصله ایمن خواهیم بود که بیشترین مقدار تنش ایجاد شده در نیل‌ها از مقدار تنش تسلیم آن‌ها تجاوز نکند. با توجه به مقدار تنش تسلیم نیل‌ها که ۴۲۰ مگاپاسکال می‌باشد، در نتیجه جهت قرارگیری در فاصله ایمن می‌بایست در هر کدام از نیل‌ها مقدار تنش ایجاد شده از مقدار مجاز ۴۲۰ مگاپاسکال بیشتر نگردد.

به همین منظور جهت محاسبه فاصله ایمن از دیوار میخ کوبی شده، در ابتدا مقدار ۱۰۰ کیلوگرم از ماده منفجره در فاصله افقی ۵ متری از دیواره قرار داده شد و مقدار بیشترین تنش ایجاد شده در نیل‌ها و مقدار تغییر شکل ایجاد شده در لبه دیواره گود اندازه‌گیری شد. در صورتی که این مقادیر از مقادیر مجاز بیشتر می‌شد، فاصله مورد نظر را یک متر افزایش داده و مجدداً بررسی صورت می‌گرفت. این کار تا آنجا ادامه یافت که فاصله ایمن به دست آید. این روند برای جرم‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم از ماده منفجره در سطح زمین و همچنین در عمق‌های ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۶ متری از سطح زمین و در عمق خاک انجام گردید. همچنین شکل (۱۰) تنش ایجاد شده در دیواره در زمان‌های ۰.۲، ۰.۳۲، ۰.۳۶ و ۰.۵۶ میلی‌ثانیه در شرایط انفجار سطحی ماده منفجره به جرم ۱۰۰ کیلوگرم در فاصله ۵ متری از دیواره را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تنش ایجاد شده در دیواره در زمان‌های ۰.۲، ۰.۳۲، ۰.۳۶ و ۰.۵۶ میلی‌ثانیه، انفجار سطحی ماده منفجره به جرم ۱۰۰ کیلوگرم در فاصله ۵ متری از دیواره

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب تغییر شکل در دیواره گود و تنش‌های ایجاد شده در نیل‌ها در فاصله ایمن ۱۰ متری و فاصله نا ایمن ۹ متری برای ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تغییر شکل در مرکز و کمی پایین‌تر از لبه دیواره گود اتفاق افتاده است. همچنین مقدار تغییر شکل ایجاد شده در لبه گود بر اساس میانگین‌گیری از المان‌های لبه دیواره محاسبه



شکل ۹. مدل سه‌بعدی اجزا محدود و شرایط مرزی خاک

۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقادیر مجاز تغییر شکل و تنش ایجاد شده در نیل‌ها جهت قرارگیری در فاصله ایمن

در این مطالعه پارامتری تحت عنوان فاصله افقی ایمن از دیواره گود تعریف می‌شود که مقدار آن بر اساس دو پارامتر تغییر شکل مجاز لبه دیواره و تنش تسلیم نیل‌ها تعیین شده است. بر این اساس فاصله ایمن از محل انفجار نزدیک‌ترین فاصله افقی محل انفجار از دیواره گود است که هم‌زمان مقدار تغییر شکل ایجاد شده در لبه دیواره گود از مقدار مجاز آن تجاوز نکند و همچنین مقدار تنش ایجاد شده در هیچ یک از نیل‌ها از تنش تسلیم آن‌ها بیشتر نگردد. داده‌های تجربی نشان می‌دهد که در دیوارهای میخ کوبی شده با L/H بین ۱ تا ۰.۷ و مقدار سربار قابل اغماض، مقدار حداکثر تغییر شکل بلند مدت افقی و عمودی در بالای دیواره می‌تواند از رابطه (۴) محاسبه شود [۲۳]:

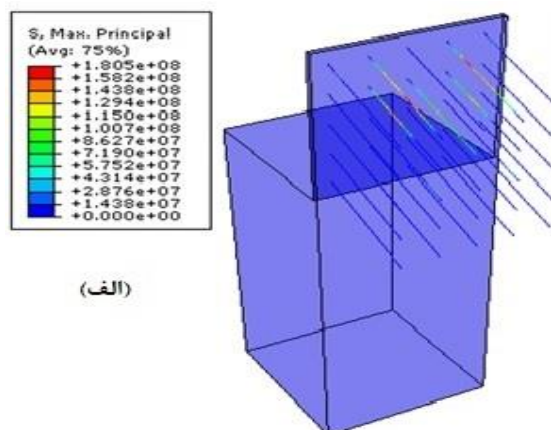
$$\delta_h = \left(\frac{d_h}{H}\right) \times H \quad (4)$$

L طول نیل و در رابطه (۴) پارامتر d_h/H نسبت وابسته به جنس خاک است که مقادیر مرتبط با آن در جدول (۶) آورده شده است. مقدار H نیز ارتفاع دیواره گود است [۲۳].

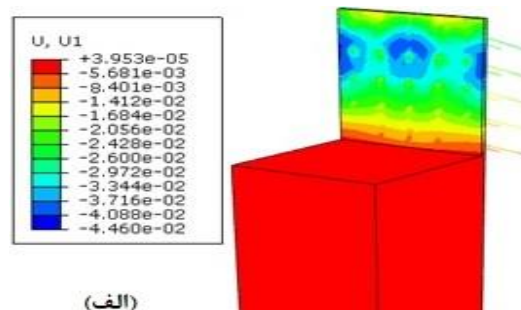
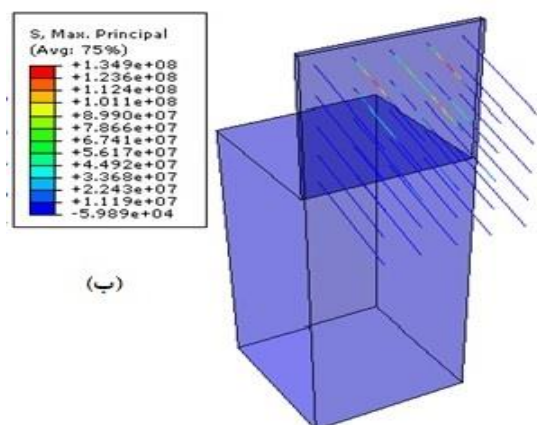
جدول ۶. مقادیر مجاز d_h/H برای خاک‌های مختلف [۲۳]

| نوع خاک | سنگ هوازده و خاک سخت | خاک ماسه‌ای | خاک ریززنده |
|---------|----------------------|-------------|-------------|
| d_h/H | ۱/۱۰۰۰ | ۱/۵۰۰ | ۱/۳۳۳ |

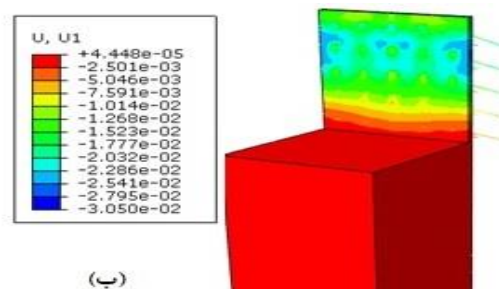
بر اساس جدول (۶) مقدار مجاز تغییر شکل دیواره جهت قرارگیری در فاصله ایمن برای خاک ماسه‌ای برابر ۱/۵۰۰ ارتفاع دیواره بوده که با توجه به ارتفاع ۹ متری گود، این مقدار برابر ۱۸ میلی‌متر است. در نتیجه زمانی در فاصله ایمن قرار خواهیم داشت که مقدار تغییر شکل ایجاد شده در دیوار بر اثر انفجار از مقدار ۱۸ میلی‌متر بیشتر نشود.



شده و برای شکل (۱۱-الف) ۲۱/۵ میلی‌متر و برای شکل (۱۱-ب) ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در المان‌های اطراف محل اتصال نیل‌ها به دیواره تغییر شکل کمتری اتفاق افتاده است که این موضوع نشانگر عملکرد مثبت نیل‌ها تحت بارگذاری انفجار می‌باشد. همچنین در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تنش در نیل‌های بالایی که کمترین فاصله تا محل انفجار (در سطح زمین) را دارند، ایجاد شده است. بیشترین تنش ایجاد شده در نیل‌ها در شکل (۱۲-الف) ۱۸۰ مگاپاسکال و در شکل (۱۲-ب) ۱۳۵ مگاپاسکال می‌باشد (در هر دو حالت کمتر از تنش تسلیم نیل‌ها).



شکل ۱۲. تنش ایجاد شده در نیل‌ها بر حسب پاسکال برای ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و انفجار در سطح زمین (الف) فاصله افقی نا ایمن ۹ متری از دیوار میخ‌کوبی (ب) فاصله افقی ایمن ۱۰ متری از دیوار میخ‌کوبی



جدول ۷. نتایج اثر انفجار بر دیواره میخ‌کوبی در سطح زمین و محاسبه فاصله افقی ایمن برای تغییر شکل مجاز ۱۸ میلی‌متر در دیوار میخ‌کوبی شده و تنش تسلیم ۴۲۰ مگاپاسکال برای نیل‌ها

| جرم ماده منفجره (kg) | فاصله افقی دیوار از مرکز انفجار (m) | بیشترین تنش ایجاد شده در نیل‌ها (MPa) | بیشترین تغییر شکل ایجاد شده در دیوار (mm) | فاصله افقی ایمن دیوار از مرکز انفجار (m) |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| ۱۰۰ | ۵ | ۲۴۵ | ۱۹/۵ | ۵/۳ |
| | ۶ | ۱۸۰ | ۱۳/۸ | |
| ۲۰۰ | ۹ | ۱۸۰ | ۲۱/۵ | ۹/۵ |
| | ۱۰ | ۱۳۵ | ۱۵ | |
| ۳۰۰ | ۱۱ | ۱۸۰ | ۱۸/۵ | ۱۱/۳ |
| | ۱۲ | ۱۳۱ | ۱۴/۸ | |
| ۴۰۰ | ۱۲ | ۱۷۰ | ۱۸/۳ | ۱۲/۱ |
| | ۱۳ | ۱۲۰ | ۱۴/۷ | |

شکل ۱۱. تغییر شکل ایجاد شده در دیواره گود بر حسب متر برای ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و انفجار در سطح زمین: (الف) فاصله افقی نا ایمن ۹ متری از دیوار میخ‌کوبی (ب) فاصله افقی ایمن ۱۰ متری از دیوار میخ‌کوبی

جدول (۷) نتایج بررسی‌های انجام شده برای محاسبه فاصله ایمن افقی از دیوار میخ‌کوبی شده در شرایط انفجار در سطح زمین را نشان می‌دهد. مقدار دقیق فاصله ایمن از درون‌یابی اعداد صحیح فاصله نا ایمن قبل از فاصله ایمن و فاصله ایمن به دست آمده است. این روند و بررسی نتایج حاصل جهت محاسبه فاصله افقی ایمن از دیوار میخ‌کوبی برای انفجار در اعماق ۲، ۴ و ۶ متری نیز انجام شد. جدول (۸) فواصل افقی ایمن را برای انفجار در اعماق ۲، ۴ و ۶ متری نشان می‌دهد.

جدول ۸. مقادیر فاصله ایمن برای انفجار در اعماق ۲، ۴ و ۶ متر

جرم‌های مختلف ماده منفجره به ۵/۱، ۹/۱، ۱۲/۴ و ۱۵/۴ متر تغییر یافته است. در انفجار در عمق ۶ متر و برای جرم‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم، مقادیر فاصله ایمن کاهش یافته و نزدیک به معادل این مقادیر در انفجار در سطح زمین است. این موضوع به این علت است که افزایش فاصله المان‌های لبه دیواره تا محل انفجار موجب کاهش تغییر شکل ایجادشده در لبه دیواره شده است. از سوی دیگر با وجود کاهش فاصله انفجار در عمق ۶ متر تا المان‌های نیل‌ها مقادیر تنش در جرم ۲۰۰ کیلوگرم از مقادیر مجاز تجاوز نکرده است.

نکته دیگر اینکه برای ماده منفجره به جرم‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم با افزایش فاصله تا المان‌های لبه دیواره گود که منجر به کاهش تغییر شکل‌های لبه دیواره تا کمتر از مقادیر تغییر شکل در انفجار در سطح زمین شده، برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی مقادیر فاصله ایمن از ۱۱/۳ متر در سطح زمین به ۱۲/۴ متر در عمق ۶ متری و برای ماده منفجره ۴۰۰ کیلوگرمی فاصله ایمن ۱۲/۱ متری در سطح زمین به ۱۵/۴ متر در عمق ۶ متری افزایش یافته است. این امر به دلیل افزایش تنش‌ها با توجه به کاهش فاصله محل انفجار تا المان‌های نیل‌ها بوده که موجب ایجاد تنش‌های بیشتری در نیل‌ها شده و در نتیجه موجب افزایش فاصله ایمن در وزن‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در عمق ۶ متری شده است.

۳-۲. محدوده تأثیر انفجار در خاک

محدوده تأثیر انفجار از نزدیک‌ترین فاصله ایمن افقی از لبه گود تا فاصله‌ای که اثر بار انفجار بر روی نیل‌ها و تغییر شکل دیواره ناچیز شده و عملاً موج انفجار بی اثر گشته است، در نظر گرفته می‌شود. جهت تعیین محدوده تأثیر، ماده منفجره از فاصله ایمن تا دورترین فاصله‌ای که اثر انفجار بر نیل‌ها و تغییر شکل دیواره خیلی اندک باشد، جابه‌جا شده است. در این پژوهش این روند برای ماده منفجره به جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در سطح و همچنین در عمق ۶ متری زمین انجام شده است. زمانی اثر انفجار نادیده گرفته می‌شود که دو پارامتر بیشترین مقدار تنش ایجادشده در نیل‌ها و تغییر شکل لبه دیواره به ترتیب از بیشترین مقدار تنش ایجادشده در نیل‌ها در انتهای تحلیل استاتیکی به اضافه ده درصد همین مقدار و همچنین بیشترین مقدار تغییر شکل لبه دیواره در انتهای تحلیل استاتیکی به اضافه ده درصد همین مقدار کمتر باشد. بدین ترتیب با توجه به این که بیشترین تنش ایجادشده در انتهای تحلیل استاتیکی در نیل‌ها حدود ۴۰ مگاپاسکال بوده است، لذا در این حالت مقدار بیشینه تنش ایجادشده در نیل‌ها برای تعیین محدوده مؤثر، ۴۴ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. همچنین از آنجا که بیشترین تغییر شکل ایجادشده در لبه دیواره گود در انتهای تحلیل استاتیکی ۸/۲ میلی‌متر بوده، بنابراین مقدار بیشینه تغییر شکل لبه گود برای تعیین محدوده مؤثر ۹ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. جدول (۹) محدوده تأثیر انفجار در سطح و

| جرم ماده منفجره (kg) | فاصله افقی ایمن دیوار از مرکز انفجار (m) | | |
|----------------------|--|-----------|-----------|
| | عمق ۲ متر | عمق ۴ متر | عمق ۶ متر |
| ۱۰۰ | ۵/۱ | ۶/۴ | ۷ |
| ۲۰۰ | ۹/۱ | ۱۰/۲ | ۱۰/۸ |
| ۳۰۰ | ۱۲/۴۳ | ۱۲/۱ | ۱۲/۷ |
| ۴۰۰ | ۱۵/۴۱ | ۱۴/۹ | ۱۴/۵ |

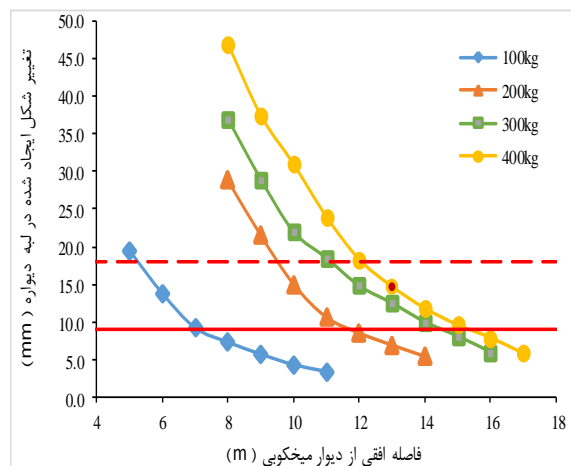
با توجه به بررسی جدول (۷) و همچنین بررسی نتایج مربوط به انفجار در اعماق دیگر مشاهده شد که در مواردی مقادیر تغییر شکل لبه دیواره و تنش ایجادشده در نیل‌ها از مقادیر مجاز (۱۸ میلی‌متر و ۴۲۰ مگاپاسکال) بیشتر گردید که این مقادیر مصداق قرارگیری دیوار میخ کوبی شده در فاصله نا ایمن از ماده منفجره است. با توجه به نتایج، با افزایش جرم ماده منفجره مقادیر فاصله ایمن افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش جرم ماده منفجره منجر به افزایش قدرت آسیب بار انفجار گردیده است. به عنوان مثال در انفجار در سطح زمین برای ماده منفجره به جرم ۱۰۰ کیلوگرم، فاصله ایمن ۵/۳ متر، ۲۰۰ کیلوگرم ۹/۵ متر، ۳۰۰ کیلوگرم ۱۱/۱ متر و برای ماده منفجره ۴۰۰ کیلوگرمی ۱۲/۱ متر است. همچنین مشاهده می‌شود که در انفجارهای در عمق زمین نسبت به انفجار در سطح، فاصله ایمن افزایش یافته است. این موضوع به این دلیل است که انفجار در سطح زمین موجب انتقال بخشی از انرژی موج انفجار به هوا شده و شوک زمین کمتری نسبت به قرارگیری ماده منفجره در عمق ایجاد می‌کند. در نتیجه مقدار تنش‌های ایجادشده در نیل‌ها و تغییر شکل لبه دیواره کمتر شده و فاصله ایمن در انفجار سطحی کمتر از انفجار در عمق می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر تغییر شکل دیوار با افزایش عمق انفجار از سطح به عمق ۶ متری زمین، به مقادیر تغییر شکل انفجار در سطح زمین نزدیک شده و از این مقادیر نیز کمتر شده است که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش فاصله مرکز انفجار تا المان‌های لبه دیواره باشد.

با توجه به نتایج، مقادیر فاصله ایمن در سطح زمین برای جرم‌های مختلف ماده منفجره ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۵/۳، ۹/۵، ۱۱/۱ و ۱۲/۱ متر است. همچنین فاصله ایمن برای انفجار در عمق ۲ متر به ترتیب ۷، ۱۰/۸، ۱۲/۷ و ۱۴/۵ متر گردیده است. این افزایش به این دلیل است که افزایش عمق انفجار موجب افزایش تغییر شکل لبه دیواره به دلیل افزایش شوک زمین نسبت به انفجار سطحی شده است. همچنین مقادیر تنش ایجادشده در نیل‌ها به دلیل نزدیک شدن مرکز انفجار به نیل‌ها افزایش زیادی داشته است. در ادامه با افزایش عمق انفجار از ۲ متر به ۴ متر مشاهده می‌شود که مقادیر فاصله ایمن برای جرم‌های ماده منفجره ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرمی به ترتیب به ۶/۴، ۱۰/۲، ۱۲/۱ و ۱۴/۹ متر تغییر کرده است. همچنین با افزایش عمق انفجار به ۶ متر مشاهده می‌شود که مقادیر فاصله ایمن برای

با توجه به نتایج جدول (۹) مشاهده می‌شود که محدوده تأثیر برای ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرم در سطح زمین از فاصله ۵/۳ تا ۱۰/۶ متر بوده و برای ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم به ۹/۵ تا ۱۳/۸ متر افزایش یافته است. این روند برای جرم‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم نیز به همین صورت بوده که نشان‌دهنده افزایش محدوده تأثیر با افزایش جرم ماده منفجره است. همچنین افزایش عمق انفجار موجب افزایش فاصله مؤثر شده است. برای مثال برای ماده منفجره به جرم ۱۰۰ کیلوگرم در انفجار در سطح زمین فاصله مؤثر از ۵/۳ تا ۱۰/۶ متر بوده است در حالی که در انفجار در عمق ۶ متر این مقدار به ۵/۱ تا ۱۷ متر افزایش یافته است. این موضوع به این دلیل است که در انفجار سطحی، به سبب زاویه‌دار بودن نیل‌ها فاصله مرکز انفجار تا نیل‌ها نسبت به انفجار در عمق بیشتر است. در نتیجه مقدار تنش ایجادشده در نیل‌ها در هنگام انفجار در عمق بسیار بیشتر از مقدار تنش در شرایط انفجار سطحی بوده و مقادیر فاصله مؤثر با افزایش عمق افزایش یافته است.

۳-۳. محدوده تأثیر انفجار در سطح زمین

به‌منظور بررسی محدوده تأثیر در اثر انفجار در سطح زمین از نمودارهای اثر افزایش فاصله قرارگیری ماده منفجره از لبه گود و اثر افزایش وزن ماده منفجره در محدوده تأثیر استفاده شده است. شکل (۱۵) و (۱۶) نمودارهای اثر جرم ماده منفجره و افزایش فاصله ماده منفجره از دیوار میخ‌کوبی را به ترتیب در تغییر شکل ایجادشده در لبه و تنش ایجادشده در نیل‌ها را نشان می‌دهد. خطوط افقی توپر مقادیر مجاز تغییر شکل لبه دیواره (۹ میلی‌متر) و تنش ایجادشده در نیل‌ها (۴۴ مگاپاسکال) به‌منظور قرارگرفتن در فاصله مؤثر را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر مجاز تغییر شکل لبه دیواره (۱۸ میلی‌متر) و تنش ایجادشده در نیل‌ها (۴۲۰ مگاپاسکال) به‌منظور قرارگیری در فاصله ایمن با خطوط افقی خط چین نشان داده شده است.



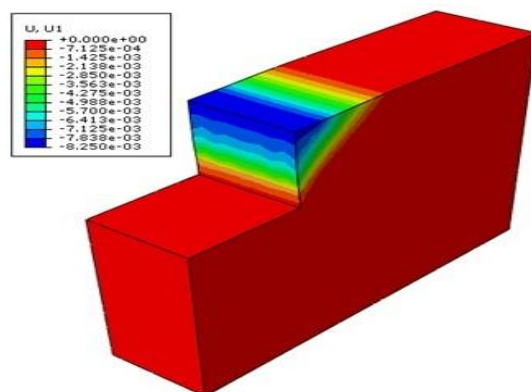
شکل ۱۵. تغییر شکل لبه دیواره گود با افزایش فاصله ماده منفجره تا انتهای محدوده تأثیر در انفجار در سطح زمین

عمق ۶ متری زمین را برای جرم‌های ماده منفجره ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم نشان می‌دهد.

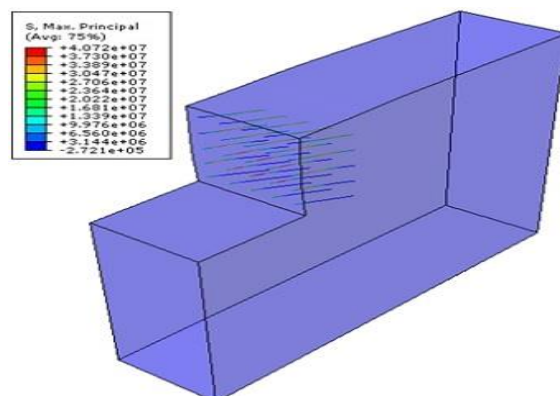
شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب کانتورهای تغییر شکل ایجادشده در دیواره گود و کانتورهای تنش‌های ایجادشده در نیل‌ها در انتهای تحلیل استاتیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۹. محدوده تأثیر انفجار در سطح و عمق ۶ متری زمین (حداکثر تنش ایجادشده در نیل‌ها در محدوده تأثیر برابر با ۴۴ مگاپاسکال)

| جرم ماده منفجره (kg) | فاصله ماده منفجره از سطح زمین (m) | تغییر شکل ایجادشده در دیواره در انتهای محدوده تأثیر (mm) | محدوده تأثیر (m) |
|----------------------|-----------------------------------|--|------------------|
| ۱۰۰ | ۰ | ۳/۸ | ۵/۳ - ۱۰/۶ |
| | ۶ | ۱/۴ | ۵/۱ - ۱۷ |
| ۲۰۰ | ۰ | ۵/۶ | ۹/۵ - ۱۳/۸ |
| | ۶ | ۱/۲ | ۹/۱ - ۲۵/۴ |
| ۳۰۰ | ۰ | ۶/۴ | ۱۱/۳ - ۱۵/۸ |
| | ۶ | ۱ | ۱۲/۴ - ۳۰/۵ |
| ۴۰۰ | ۰ | ۶/۸ | ۱۲/۱ - ۱۶/۵ |
| | ۶ | ۱/۰۲ | ۱۵/۴ - ۳۳/۸ |

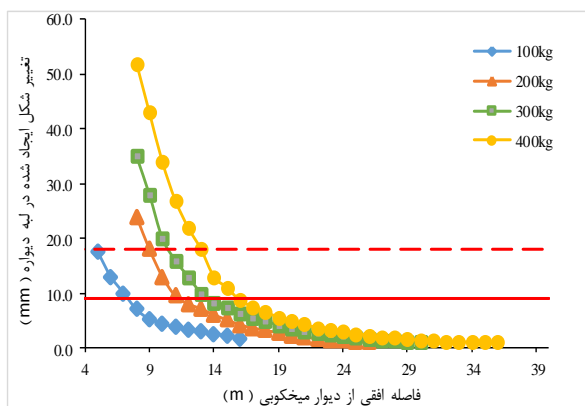


شکل ۱۳. تغییر شکل ایجادشده در دیواره گود در انتهای تحلیل استاتیکی بر حسب متر

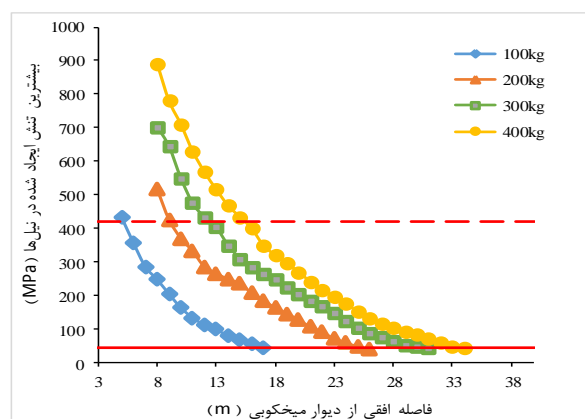


شکل ۱۴. تنش ایجادشده در نیل‌ها در انتهای تحلیل استاتیکی بر حسب پاسکال

متر نیز با افزایش فاصله از ۸ متر تا انتهای محدوده تأثیر، مقدار تغییر شکل افقی لبه دیواره به ترتیب برای جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مقدار ۸۰، ۹۵، ۹۷ و ۹۸ درصد کاهش یافته است. تنش ایجادشده در نیل‌ها نیز با افزایش فاصله از ۸ متر تا انتهای محدوده تأثیر به ترتیب برای جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مقدار ۸۲، ۹۱، ۹۴ و ۹۵/۵ درصد کاهش داشته است. همچنین همانند بررسی انجام‌شده در سطح زمین، در تعیین فاصله مؤثر تنش‌های ایجادشده در نیل‌ها حاکم است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که در انفجار در عمق ۶ متر همانند انفجار در سطح زمین تعداد داده‌های زیر خط مجاز در نمودار تنش ایجادشده در نیل‌ها نسبت به تعداد داده‌های زیر خط مجاز تغییر شکل ایجادشده در لبه دیواره کمتر است. این بدان معناست که ماده منفجره می‌بایست در فاصله بیشتری از نیل‌ها قرار گرفته تا مقادیر تنش ایجادشده در نیل‌ها از مقادیر مجاز برای فاصله مؤثر کمتر شود.



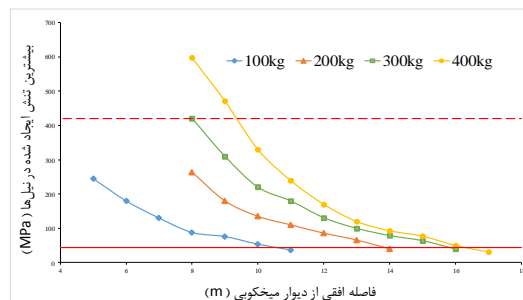
شکل ۱۷. تغییر شکل لبه دیواره گود با افزایش فاصله ماده منفجره تا انتهای محدوده تأثیر در انفجار در عمق ۶ متر



شکل ۱۸. تنش ایجادشده در نیل‌ها با افزایش فاصله ماده منفجره تا انتهای محدوده تأثیر در انفجار در عمق ۶ متر

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر بار انفجار بر دیوار میخ‌کوبی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از روش کوپل اویلری-



شکل ۱۶. تنش ایجادشده در نیل‌ها با افزایش فاصله ماده منفجره تا انتهای محدوده تأثیر در انفجار در سطح زمین

با بررسی نمودارهای شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود که افزایش وزن ماده منفجره منجر به افزایش محدوده تأثیر شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از ۸ متر تا انتهای محدوده تأثیر مقدار تغییر شکل افقی لبه دیواره به ترتیب برای جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مقدار ۴۹، ۸۰، ۸۳ و ۸۶ درصد کاهش یافته است. تنش ایجادشده در نیل‌ها نیز با افزایش فاصله از ۸ متر تا انتهای محدوده تأثیر به ترتیب برای جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مقدار ۵۰، ۸۴، ۹۰ و ۹۳ درصد کاهش داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد در تعیین فاصله مؤثر تنش‌های ایجادشده در نیل‌ها حاکم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد داده‌های زیر خط مجاز در نمودار تنش ایجادشده در نیل‌ها نسبت به تعداد داده‌های زیر خط مجاز تغییر شکل ایجادشده در لبه دیواره، کمتر است. این موضوع به این معناست که ماده منفجره می‌بایست در فاصله بیشتری از نیل‌ها قرار گیرد تا تنش ایجادشده در آن از مقادیر مجاز برای فاصله مؤثر کمتر شود.

۳-۴. محدوده تأثیر انفجار در عمق شش متر

به‌منظور بررسی محدوده تأثیر در اثر انفجار در عمق ۶ متر نیز از نمودارهای اثر افزایش فاصله قرارگیری ماده منفجره از لبه گود و اثر افزایش وزن ماده منفجره در محدوده تأثیر استفاده شده است. شکل (۱۷) و (۱۸) نمودارهای اثر جرم ماده منفجره و افزایش فاصله ماده منفجره از دیوار میخ‌کوبی را به ترتیب در تغییر شکل ایجادشده در لبه و تنش ایجادشده در نیل‌ها را نشان می‌دهد. به مانند بررسی انفجار در سطح زمین خطوط افقی توپیر مقادیر مجاز تغییر شکل لبه دیواره (۹ میلی‌متر) و تنش ایجادشده در نیل‌ها (۴۴ مگاپاسکال) به‌منظور قرارگرفتن در فاصله مؤثر را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر مجاز تغییر شکل لبه دیواره (۱۸ میلی‌متر) و تنش ایجادشده در نیل‌ها (۴۲۰ مگاپاسکال) به‌منظور قرارگیری در فاصله ایمن با خطوط افقی خط چین نشان داده شده است.

با بررسی نمودارهای شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشاهده می‌شود که همانند انفجار در سطح زمین، با افزایش جرم ماده منفجره محدوده تأثیر افزایش یافته است. همچنین در انفجار در عمق ۶

۵. مراجع‌ها

- [1] Bentler, D. J. "Finite Element Analysis of Deep Excavations"; Virginia Polytechnic Institute and State University. 1998, 10, 201-215.
- [2] TM5-1300. "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US army technical manual, 1990.
- [3] Chew, S. H.; Wong, W. K.; Chiat, N. g. C.; Tan, S. A.; Karunaratne, G. P. "Geosynthetics Reinforced Soil Wall Subject to Blast Loading"; ISRM Int. Symp, Melbourne, Australia. 2000, 49-54.
- [4] 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.
- [5] Nagy, N. M.; Eltehawy, E. A.; Elhanafy, H. M. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; 13th Int. Conf on Aerospace sciences & Aviation Technology. 2009.
- [6] Yang, Y.; Xie, X. I.; Wang, R. "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion"; J. Rock. Mech. Geotech. Eng. 2010, 2, 4, 373-384.
- [7] Sheini, D. "The Effect of Explosion on Tunnels in Unsaturated Layer Environments"; M.A. Thesis, K. N. Toosi University of Technology. 2013 (In Persian).
- [8] Bazyar, M. H.; Rabeti Moghadam, M.; Gholipour, S. "Numerical Investigation of Gravity and Reinforced Soil Wall Performance under Blast Loading"; Passive Defence Sci. & Technol. 2012, 3, 259-267 (In Persian).
- [9] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; Comput. Geotech. 2013, 5, 86-95.
- [10] Ch. B. V. H.; Prakash, A.; Jakel, R.; Rao B. P. "Numerical Study on Underground Structures Subjected to Shock Loading"; Int. J. Civil. Struct. Eng. 2014, 5, 3, 125-143.
- [11] Chakraborty, T. "Analysis of Hollow Steel Piles Subjected to Buried Blast Loading"; Comput. Geotech. 2016, 78, 194-202.
- [12] Entezari, H.; Barkhordari, K. "Effect of Surface Blasting on Subway Tunnels- A Parametric Study"; Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering 2017, 6, 63-72.
- [13] Khodaparast, M.; Hoseini, S. H. "Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading"; Passive Defence Sci. & Technol. 2019, 9, 393-404 (In Persian).
- [14] Khodaparast, M.; Moghbeli, M. "Numerical Simulation of Blast Induced Soil Liquefaction"; Passive Defence Sci. & Technol. 2020, 11, 205-210 (In Persian).
- [15] Khodaparast, M.; Mohamad Momeni, R.; Bayesteh, H. "Numerical Simulation of Surface Blast Reduction Using Composite Backfill"; Geosynt Int. 2021, 1-46.
- [16] Jayasinghe, L. B.; Goh, A. T. C.; Zhao, Z. Y.; Zhou, H. Y.; Gui, Y. L.; Tao, M. "A Field Study on Pile Response to Blast-Induced Ground Motion"; Soil. Dyn. Earthq. Eng. 2018, 114, 568-575.
- [17] Yang, G.; Wang, G.; LU, W.; Yan, P.; Chen, M. "Damage Assessment and Mitigation Measures of Underwater Tunnel Subjected to Blast Loads"; Tunn. Underg. Space Technol. 2019, 94, 103-131.

لاگرانژی و در فضای سه‌بعدی جهت محاسبه فاصله ایمن و محدوده تأثیر انفجار بر دیواره میخ‌کوبی شده بررسی شد. فاصله ایمن، نزدیک‌ترین فاصله افقی محل انفجار از دیواره گود است که هم‌زمان مقدار تنش ایجادشده در هیچ یک از نیل‌ها از تنش تسلیم آن‌ها بیشتر نشده و همچنین مقدار تغییر شکل ایجادشده در لبه دیواره گود از مقدار مجاز آن تجاوز نکند. همچنین محدوده‌ای که اثر بار انفجار بر نیل‌ها و تغییر شکل دیواره ناچیز بوده و عملاً موج انفجار بی اثر شده باشد، به‌عنوان محدوده تأثیر در نظر گرفته شد. با توجه به نمودارها و جدول‌های حاصل از بررسی‌های انجام‌شده، نتایج زیر را می‌توان استنباط کرد:

(۱) افزایش جرم ماده منفجره منجر به افزایش فاصله ایمن از دیوار میخ‌کوبی می‌شود. برای مثال در مسئله بررسی‌شده در این مطالعه در سطح زمین برای ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرمی فاصله ایمن ۵/۳ متر، ۲۰۰ کیلوگرم ۹/۵ متر، ۳۰۰ کیلوگرم ۱۱/۱ متر و برای ماده منفجره ۴۰۰ کیلوگرمی ۱۲/۱ متر است.

(۲) مقادیر فاصله ایمن در انفجار در سطح زمین از مقادیر فاصله ایمن در انفجار در عمق زمین کمتر بوده و انفجار در زیر سطح زمین موجب افزایش اثرات تخریبی ماده منفجره و افزایش فاصله ایمن می‌شود. به‌عنوان مثال در مسئله بررسی‌شده در این مطالعه، مقادیر فاصله ایمن در سطح زمین برای جرم‌های مختلف ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره به ترتیب ۵/۳، ۹/۵، ۱۱/۱ و ۱۲/۱ متر است و مقادیر فاصله ایمن برای عمق ۲ متری به ترتیب ۷، ۱۰/۸، ۱۲/۷ و ۱۴/۵ متر شده است.

(۳) افزایش جرم ماده منفجره موجب افزایش محدوده تأثیر از دیوار میخ‌کوبی می‌شود. همچنین محدوده تأثیر در انفجار در عمق زمین مقادیر بیشتری نسبت به انفجار در سطح زمین دارد. به‌طوری‌که در مسئله بررسی‌شده در این مطالعه، فاصله مؤثر برای جرم‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم ماده منفجره، در سطح زمین برابر ۱۰/۶، ۱۳/۸، ۱۵/۸ و ۱۶/۵ متر و در عمق ۶ متر برابر ۱۷، ۲۵/۴، ۳۰/۵ و ۳۳/۸ متر از دیوار میخ‌کوبی است.

(۴) در تعیین محدوده تأثیر، تنش‌های ایجادشده در نیل‌ها حاکم است. این بدان معناست که ماده منفجره می‌بایست در فاصله بیشتری از نیل‌ها قرار گرفته تا مقادیر تنش ایجادشده در آن از مقادیر مجاز برای فاصله مؤثر کمتر شود.

(۵) افزایش جرم ماده منفجره موجب افزایش تغییر شکل افقی ایجادشده در لبه دیواره گود و تنش ایجادشده در نیل‌ها شده و افزایش فاصله محل انفجار از دیوار میخ‌کوبی موجب کاهش اثرات انفجار بر عملکرد دیوار میخ‌کوبی می‌شود.

- [21] Coulomb, C. "Essai Sur Une Application Des Regles Des Maximis et Minimis a Quelques Problemes de Statique Relatifs a L'architecture"; Mem. Pres. Par. Div. Savants, 1773, 7, 343-382.
- [22] Abaqus, Ver. 6.17. Providence. 2017, (RI, USA): Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [23] Lazarte, C. A.; Elias, V.; Espinoza, R. D.; Sabatini, P. J. "Geotechnical Circular No. 7-Soil Nail Walls"; Report No. FHWA IF-02-017, Federal Highway Administration. 2003, Washington, DC.
- [18] Ibrahim, Y. E.; Nabil, M. "Finite Element Analysis of Pile Foundations under Surface Blast Loads"; Int. Conf. Damage Assessment of Structures, Singapore, 2020.
- [19] Shen, C. K.; Bang, S.; Herrman, L. R. "Ground Movement Analysis of Earth Support System"; J. Geotech. Eng. Division. ASCE. 1981, 107, 1609-1623.
- [20] Zhang, M.; Song, E.; Chen, Z. h. "Ground Movement Analysis of Soil Nailing Construction by Three-Dimensional (3-D) Finite Element Modeling (FEM)"; J. Comput. Geotech. 1999, 25, 191-204.