

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Assessment of Behavior of Soil-Nailed Wall

Abdollah Tabaroei ^{a,*}, Seyedeh Toktam Seyedi ^b

^a Department of Civil Engineering, Eshragh Institute of Higher Education, Bojnourd, Iran

^b Department of Civil Engineering, Toos Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

Received: 10 April 2023; **Reviewed:** 27 July 2023; **Accepted:** 12 February 2024

Keywords:

Soil-nailed wall, Seismic load, PLAXIS 2D software, Horizontal displacement of the wall, Foundation settlement.

1. Introduction

In current study, firstly the soil-nailed wall of the Seattle area of Washington was modeled by PLAXIS 2D software. After validating the numerical model, the effect of adjacent surcharge distance from the excavation edge on the static and seismic performance of the soil-nailed wall was investigated. The results of numerical analysis indicated that the maximum value of shear force of the wall is created in the place of nails, and with the increase of depth, the value of shear force has increased, which was proportional to the distribution of the soil lateral pressure relative to the wall, which is in triangular. The results of the analyses showed that by changing the distance of the surcharge from the excavation edge, the values of the force component in the nails and as a result, the stability of the wall are affected. In addition, in foundations close to the excavation, the issue of differential settlement caused by the location of wedge failure is a very important parameter and should be considered by designers.

2. Numerical model validation

In this study, to investigate the effect of using a soil nailing system, the model studied by Thompson and Miller (1990) was adopted and analyzed in PLAXIS 2D. Fig. 1-a shows the horizontal deformation values obtained from measurements during the excavation activates and the results obtained from the numerical modeling of this study. As can be seen, the maximum displacement occurred at the highest point of the excavation wall, which was approximately between 19 and 20mm, while the maximum displacement value obtained from the numerical modeling at the highest height of the wall was 19.90mm. The distribution of the maximum mobilized axial force measured by strain gauges in the nails and the results obtained from this study using PLAXIS 2D software are shown in Fig. 1-b. By comparing Fig. 1, it can be seen that the numerical modeling results of the present study are in good agreement with the instrumentation results of the instrumentation used in previous study. Therefore, it can be concluded that the selection of structural elements, behavioral models, and material properties assigned to each element and analytical steps in modeling were appropriate.

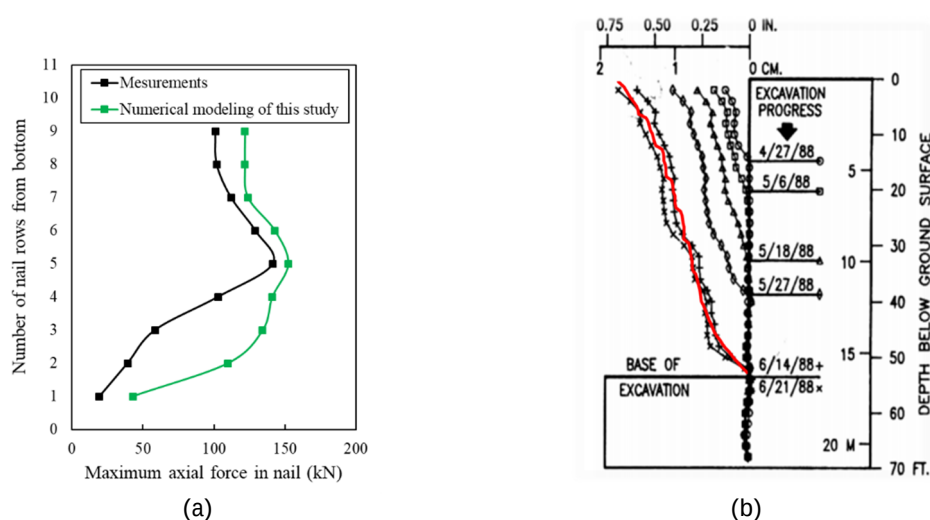


Fig. 1. The comparison between measured data and numerical modeling of this study: **a)** Horizontal wall deformation profile, **b)** Distribution of maximum axial force mobilized in nails

3. Results and discussion

In this section, the effect of the important parameter of the distance of the adjacent surcharge from the excavation edge on the stability of the excavation wall using the nailed method has been investigated. In the numerical analyses, the distance of the adjacent surcharge from the excavation edge has been considered to be 1, 5, 10 and 15m.

3.1. Horizontal displacement of the wall

The results showed that, in both static and dynamic cases, the distance of the adjacent surcharge from the excavation edge does not have a significant effect on the horizontal displacement values of the lower areas of the wall, but in the upper areas, the horizontal displacement value of the wall decreases as the distance of the surcharge from the excavation edge increases.

3.2. Wall shear force distribution

The results illustrated that, in both static and dynamic cases, the highest shear force of the wall is generated at the location of the nails, so that a sudden jump in the shear force distribution occurs at this location and the shear force increases from the top to the bottom of the wall, which is proportional to the distribution of lateral soil pressure relative to the wall, which is triangular, and its value also increases with increasing depth. The results showed that in both static and dynamic cases, changing the distance of the adjacent surcharge from the edge of the excavation does not have a significant effect on the shear force created in the wall, and in the four cases studied, the values of the shear force generated in the wall are very close to each other.

3.3. Wall bending moment distribution

The results showed that in both static and dynamic cases, the bending moment of the wall is lower at the location of the nails and reaches its maximum at the distances between the nails. The presence of nails prevents the wall from moving towards the excavation caused by the lateral pressure of the soil, and as a result, the bending moment of the wall increases around the nail heads. On the other hand, the maximum negative bending moment was observed in the wall at the distance between the two nails, which is natural considering the resistance effect of the nails against the horizontal deformation of the wall.

3.4. Foundation vertical displacement of the structure adjacent to the excavation

The results indicated that, the highest settlement value is related to the nearest point of the foundation at a distance of 1m from the edge of the excavation, which is equal to 14mm. Foundations with distances of 10 and 15m from the edge of the excavation have almost the same behavior and the settlement value decreases with distance from the edge of the excavation.

3.5. Maximum axial force in nails

The results indicated that, in both static and dynamic cases, the maximum axial force generated in the nails with different horizontal distances of the surcharge from the excavation edge is very close to each other, and it can be stated that changing the distance of the adjacent surcharge from the excavation edge has a negligible effect on the axial force generated in the nails.

3.6. Factor of safety for excavation wall stability

The results illustrated that, in static analysis, as the distance of the adjacent surcharge from the edge of the excavation increases, the value of the safety factor for excavation stability increases with a gentle slope, which is due to the reduction in surcharge pressure on the wall due to the increase in the distance of the adjacent surcharge and, as a result, the stability of the wall. In dynamic analysis, the values of the safety factor are very close to each other, which can be interpreted as the horizontal force caused by the earthquake acceleration is such that the effect of surcharge pressure on it can be ignored.

4. Conclusions

In this study, the performance of a nailed wall in deep excavation was investigated. For this purpose, first, the nailed wall in the Seattle, Washington area was modeled using PLAXIS 2D software, and then, in order to verify the results of the constructed numerical model, the results were compared with the results presented in the previous study. The results indicated that in dynamic analysis, the distance of the adjacent surcharge from the excavation edge does not have a significant effect on the horizontal displacement of the wall values. The shear force of the wall at the nail location is greater than in the surrounding areas and the direction of the shear force also changes at the nail location. The wall bending moment is the highest in the distance between two nails compared to the surrounding areas, and the bending moment increases from the upper areas of the wall to the bottom. The position and amount of maximum settlement of the foundation of the structure adjacent to the excavation changes with increasing distance from the edge of the excavation, such that the maximum settlement occurs at the closest point. As the horizontal distance of the surcharge from the edge of the excavation increases, the amount of axial force generated in the nails decreases slightly. In dynamic analysis, changing the surcharge distance from the excavation edge does not have a significant effect on the stability safety factor.

ارزیابی عددی رفتار دیوار میخ‌کوبی شده

عبداله تبرئی^{1*}، سیده‌تکتم سیدی²

¹ استادیار گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی اشراق، بجنورد

² دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی توس، مشهد

دریافت: 1402/2/21، بازنگری: 1402/5/5، پذیرش: 1402/11/23، نشر آنلاین: 1402/11/23

چکیده

امروزه، با توجه به رشد جمعیت در مناطق شهری، ساخت ساختمان‌های مرتفع گسترش یافته است. ایجاد ساختمان‌های مرتفع، نیازمند ایجاد طبقاتی در سطح زیرزمین و لزوم طراحی و اجرای گودبرداری زمین آن می‌باشد. در پژوهش حاضر، ابتدا دیواره میخ‌کوبی شده منطقه سیاتل واشنگتن توسط نرم‌افزار PLAXIS 2D مدل‌سازی شده است. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر عملکرد استاتیکی و لرزه‌ای دیوار میخ‌کوبی شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های عددی بیان‌گر این بودند که بیش‌ترین مقدار نیروی برشی دیوار در محل میخ‌ها ایجاد می‌شود و با افزایش عمق، مقدار نیروی برشی افزایش پیدا کرده که این امر با توزیع فشار جانبی خاک نسبت به دیوار که به‌صورت مثلی بوده متناسب می‌باشد. وجود میخ‌ها مانع حرکت دیوار به سمت گودبرداری شده و در نتیجه لنگر خمشی دیوار در اطراف هد میخ‌ها افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند با تغییر فاصله سربار از لبه گودبرداری، مقادیر مؤلفه نیرو در میخ‌ها و در نتیجه پایداری دیواره تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به‌علاوه، در فونداسیون‌های نزدیک به گودبرداری موضوع نشست اختلافی ناشی از محل گوه گسیختگی یک پارامتر بسیار مهم بوده و بایستی مورد توجه طراحان قرار بگیرد.

کلیدواژه‌ها: دیوار میخ‌کوبی شده، نرم‌افزار PLAXIS 2D، تغییر مکان افقی دیوار، نشست فونداسیون.

1- مقدمه

گودبرداری‌های شهری با روش‌های مدرن و کم هزینه‌تر که رفتار سازه‌ای مناسبی دارند، استفاده از روش میخ‌کوبی را به‌عنوان یک روش تسلیح مناسب مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک قرار می‌دهد. میخ‌کوبی یک روش حفاظتی برای خاک توسط میله‌های فولادی می‌باشد که شبکه‌ای را پدید آورده که منجر به ایجاد یک توده خاکی پایدار گردیده و این توده پایدار مواد ناپایدار پشت خود را حفاظت می‌نماید. میخ‌کوبی، مقاومت کششی و برشی خاک را افزایش می‌دهد. مجموعه حاصل از این روش مانند یک دیوار حائل وزنی عمل نموده و می‌تواند به‌عنوان یک سازه باربر عمل نماید. دیوارهای میخ‌کوبی به دلیل انعطاف‌پذیری، سرعت، سهولت اجرا و اقتصادی‌تر بودن نسبت به سایر سیستم‌های پایدارسازی طی سه دهه اخیر مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته‌اند. عناصر اصلی دیوار میخ‌کوبی شده شامل میخ‌های فلزی مسلح‌کننده، ملات تزریقی، زهکش و رویه می‌باشند که در شکل (1) نشان داده شده است.

با توسعه شهرسازی، امروزه نیازمند اجرای زیرساخت‌های عمرانی نظیر ساختمان‌های مرتفع، برج‌ها، متروها و غیره هستیم. با گسترش صنعت حمل‌ونقل عبور جاده‌ها و راه آهن از مناطق کوهستانی و پُرخطر و لزوم ایجاد خاک‌برداری‌های قائم و نیاز به سیستم‌های نگهداری و پایدارکننده گودبرداری‌ها بیش‌تر از گذشته احساس می‌شود. ناپایداری‌های این گودبرداری‌ها یکی از مخاطرات مهم و تهدیدکننده در اجرای سازه‌های مورد نظر می‌باشد. زیرا انجام گودبرداری‌های غیرایمن می‌تواند سبب ایجاد مشکلات جدی برای سازه‌های اطراف گودبرداری شود که نادیده گرفتن آن‌ها می‌تواند، مشکلات جبران‌ناپذیری را ایجاد نماید. روش مناسب پایدارسازی یک گودبرداری به عوامل متعددی همچون شرایط ژئوتکنیکی محل، ابعاد زمین، عمق گودبرداری، سطح آب زیرزمینی، شرایط ساختمان‌های مجاور، شرایط اقتصادی پروژه، لرزه‌خیزی منطقه و غیره بستگی دارد. لزوم توجه به پایدارسازی



یکی انتخاب شود. همچنین وی بیان نمود ضریب اطمینان دیوار میخ کوبی شده مورب بیش تر از دیوار میخ کوبی شده قائم می باشد. Babu و Singh (2010) با استفاده از مدل سازی عددی دوبعدی بر روی دیوارهای میخ کوبی شده با نرم افزار PLAXIS به این نتیجه رسیدند که مدل های رفتاری پیشرفته تر خاک اثر جزئی روی کل تحلیل پایداری دیوار میخ کوبی شده و افزایش المان های تنش مانند نیروهای محوری، لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در میخ های خاکی دارد. به علاوه، زمانی که تغییر مکان های خیلی کوچک دیوار میخ کوبی شده بر روی تغییر مکان و پایداری دیوار مؤثر باشد، استفاده از مدل های رفتاری پیشرفته تر برای خاک ضروری می باشد.

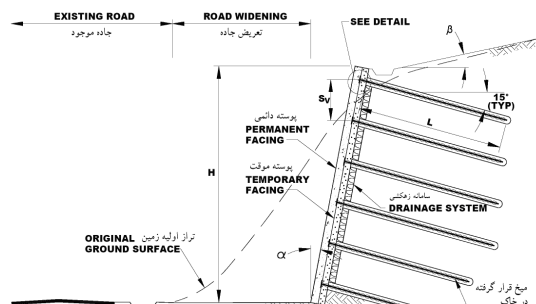
Zamiran و همکاران (2012) به بررسی عددی دیوارهای میخ خاک تحت ورودی ارتعاشی پرداختند و نتایج خود را با عملکرد دیوارهای میخ خاک تحت بارگذاری آماری معمولی مقایسه نمودند. نتایج مطالعه آنان با نرم افزار FLAC نشان داد که این نرم افزار می تواند رفتار متقابل خاک- دوغاب- میخ را به طور مناسب شبیه سازی نماید.

Wu و همکاران (2013) به مطالعه تأثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر پایداری شیب های مسلح شده به روش میخ-کوبی پرداختند و دریافتند، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک از مهم ترین عوامل تأثیرگذار در پایداری شیب مسلح با میخ-کوبی می باشند. به علاوه آنان نشان دادند چنانچه مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک منطقی انتخاب شوند، شیب از ضریب اطمینان بالاتری برخوردار می باشد.

Zhang و همکاران (2014) به شکل گسترده ای بر روی ارتباط بین پایداری و تغییر شکل سازه های خاکی میخ کوبی مطالعه نمودند. آنان ایده و روش جدیدی را جهت مشخص نمودن تغییر شکل سازه های نگهبان مشابه ارائه دادند. روش جدید ارائه شده توسط آنان قادر است تغییر شکل سازه های میخ کوبی را محاسبه نماید.

Ghareh (2015) در مطالعه ای نشان داد که مشخصات فیزیکی خاک ها و سربار اثر مستقیمی بر سازه های میخ کوبی شده دارند. به علاوه، مشکلاتی در ارتباط با مدل سازی دقیق رفتار این سازه ها در خاک های چسبند و غیر چسبند وجود دارد.

Ye و همکاران (2017) با انجام مطالعه تجربی و عددی، یک سیستم جدید میخ خاک را توسعه دادند. آنان نشان دادند صرف-نظر از زاویه شکل متفاوت (β) و ضریب اصطکاک (μ)، اجزای افقی اعمال شده بر روی توده سیمان منبسط شده نقش مهمی در تعیین نیروی بیرون کشش¹ سیستم دارند.



شکل 1- مقطع عرضی یک دیوار میخ کوبی شده (1998. Bryne)

در زمینه دیوارهای مسلح شده با المان های میخ و سیستم ترکیبی میخ و مهار مطالعاتی در متون فنی صورت گرفته که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. در مطالعه عددی صورت گرفته توسط Haddad و Karimi farzaghi (2007) مشخص شد که در دیواره مهاربندی شده با سیستم ترکیبی میخ کوبی و مهار پیش تنیده، قرارگیری کابل مهاری در هر ارتفاعی از دیوار باعث افزایش مقاومت شده و بهترین مکان قرارگیری کابل مهاری در قسمت میانی دیوار می باشد.

Hajian Niya و همکاران (2011) به بررسی کاهش تغییر شکل دیواره با استفاده از روش ترکیبی میخ کوبی و مهاری پرداختند. آنان بیان نمودند چنین سیستمی هم سبب افزایش ضریب اطمینان شده و هم مقادیر جابه جایی افقی را کاهش می دهد. نتایج مطالعه آنان نشان داد هر چه مهارها در قسمت های پایین تر گودبرداری قرار گیرند ضریب اطمینان افزایش می یابد.

Mahdizadeh Shandiz (2012) به مدل سازی عددی دوبعدی دو گودبرداری به سیستم میخ کوبی با استفاده از نرم-افزارهای PLAXIS و ABAQUS پرداخت. نتایج مطالعه وی نشان داد در خاک های ضعیف تر نتایج حاصل از شبکه بندی ریز تغییر شکل های افقی بیش تری را نشان داده و همچنین با افزایش چسبندگی خاک مقادیر تغییر شکل دیواره گود به سمت یک سوم پایینی دیوار حرکت می کند.

Morse Cheriq و Yousefi Rad (2018) در پژوهشی عددی با نرم افزار PLAXIS به بررسی پایداری سازی گودبرداری به روش میخ-کوبی در خاک های دانه ای با سطح پایدار آب زیرزمینی پرداختند. نتایج مطالعه آنان نشان داد با افزایش سطح آب زیرزمینی میزان ناپایداری و تغییر شکل افزایش می یابد به گونه ای که در عمق های بیش از 9 متر باید از روش های قوی تری مانند ترکیبی از میخ و مهار استفاده نمود.

Mittal (2006) پس از بررسی بر روی کاربرد میخ کوبی خاک در کنترل تراوش نشان داد بهتر است فاصله افقی و عمودی میخ ها

الاستیسیته (که با عمق افزایش می‌یابد) و ضریب پواسون خاک متغیر می‌باشند، بنابراین جهت شبیه‌سازی خاک در نرم‌افزار PLAXIS 2D تنها یک لایه خاک مدل‌سازی گردیده که مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای این لایه خاک میانگین وزنی مقادیر ارائه شده در مطالعات Thompson و Miller (1990) و Zolqadr و Yasrobi (2014) در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی رفتار خاک در نرم‌افزار PLAXIS 2D نیز از مدل رفتاری موهر-کولمب² استفاده شده است. مشخصات خاک مورد استفاده در مدل‌سازی عددی در جدول (1) ارائه شده است. به‌منظور مدل‌سازی دیواره بتن پاشی شده و میخ‌ها در نرم‌افزار PLAXIS 2D مطابق پیشنهاد ارائه شده توسط Brinkgreve (2002) به ترتیب از المان‌های صفحه³ و ژئوگرید⁴ استفاده شده که مقادیر پارامترهای آن‌ها در جدول (2) ارائه گردیده است. مدل عددی ساخته شده پژوهش حاضر در نرم‌افزار PLAXIS 2D، در شکل (2) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، شرایط مرزی مدل به‌صورت استاندارد تحلیل استاتیکی تعریف گردیده که شامل مرز تمام‌گیردار در کف مدل می‌باشد. مرزهای جانبی برای نشان دادن نشست در مدل در راستای قائم آزاد بوده در حالی که در راستای افقی درگیر می‌باشند.

جدول 1- مشخصات خاک مورد استفاده در مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر (Thompson و Miller، 1990؛ Zolqadr و Yasrobi، 2014)

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
وزن مخصوص	γ	کیلو نیوتن بر مترمکعب	21/60
چسبندگی	c	کیلو پاسکال	9/60
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه	40
مدول الاستیسیته	E	کیلو پاسکال	$23/05 \times 10^4$
ضریب پواسون	ν	-	0/28

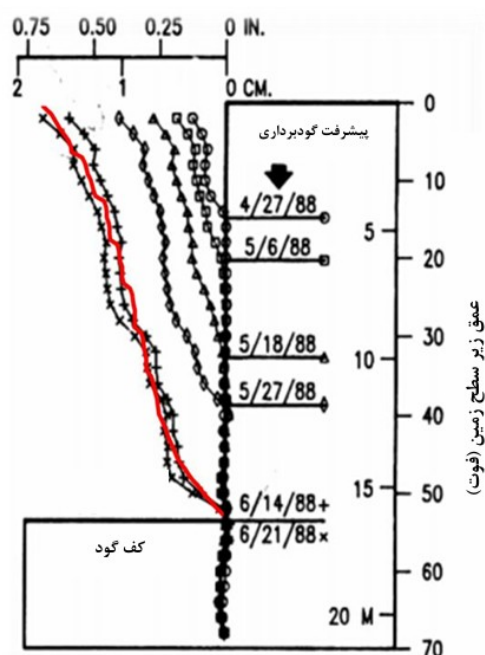
جدول 2- پارامترهای دیواره بتن پاشی شده و میخ‌های مورد استفاده در مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر (Zolqadr و Yasrobi، 2014)

نام عضو سازه‌ای	نوع المان	پارامتر	نماد	واحد	مقدار
دیواره بتن‌پاشی شده	صفحه	سختی محوری	EA	کیلو نیوتن بر متر	$2/73 \times 10^6$
		سختی خمشی	EI	کیلو نیوتن بر مترمربع بر متر	$3/96 \times 10^4$
میخ‌ها	ژئوگرید	سختی محوری	EA	کیلو نیوتن بر متر	$7/50 \times 10^4$
		سختی خمشی	EI	کیلو نیوتن بر مترمربع بر متر	-

Ramkrishnan و Sharma (2020) با استفاده از تحلیل‌های عددی، همبستگی جدیدی را بین پارامترهای مؤثر بر روی رفتار دیوار ایجاد نمودند. نتایج مطالعه آنان نشان داد، طول عضو میخ برای $\frac{1}{3}$ قسمت پایینی می‌تواند به‌میزان قابل توجه 20-10٪ کمتر از طول آن‌ها نسبت به $\frac{1}{3}$ قسمت‌های بالایی و میانی دیوار باشد. مروری بر ادبیات فنی گذشته نشان می‌دهد، مطالعات نسبتاً محدودی در خصوص رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار میخ‌کوبی شده صورت گرفته است. از آنجایی که ممکن است برخی از گودبرداری‌هایی که به‌کمک این روش پایدار می‌شوند در مناطق شهری واقع شده باشند، بنابراین اهمیت کنترل مقادیر جابه‌جایی‌ها با استفاده از این روش در برابر بار لرزه‌ای بیش از پیش مورد توجه مهندسين طراح ژئوتکنیک قرار گرفته است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند کاربردهای عملی فراوانی را برای طراحان و مهندسين ایجاد نماید.

2- صحت‌سنجی مدل عددی

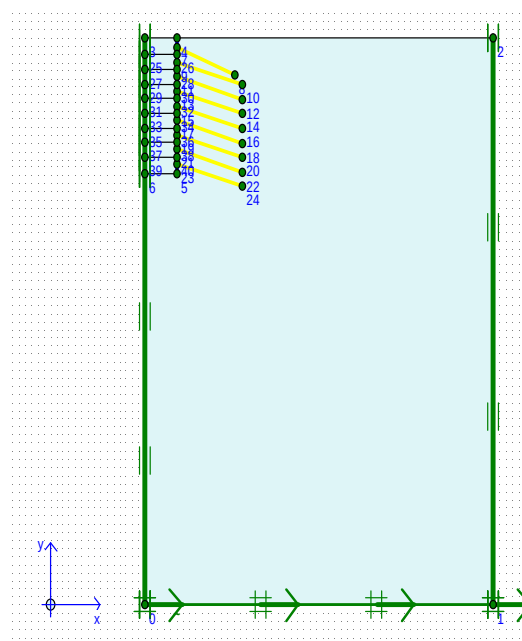
در پژوهش حاضر، دیواره میخ‌کوبی شده مطالعه شده توسط Thompson و Miller (1990) در نرم‌افزار PLAXIS 2D مدل‌سازی شده است. علت استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D، مدل‌سازی ساده‌تر مجموعه میخ-دیواره بتن پاشی شده- خاک در پایداری گودبرداری به‌روش میخ‌کوبی در حالت دینامیکی می‌باشد. این دیواره میخ‌کوبی شده در منطقه سیاتل واشنگتن ساخته شده و 16 متر عمق دارد و دارای نه ردیف میخ بوده که طول و زاویه (نسبت به افق) میخ ردیف اول به‌ترتیب برابر 9/80 متر و 20 درجه و طول و زاویه سایر ردیف میخ‌ها نیز به‌ترتیب برابر 10/70 متر و 15 درجه می‌باشد. فواصل افقی و قائم میخ‌ها (به قطر 25 میلی‌متر) نیز برابر 1/80 متر می‌باشند. قطر گمانه‌های حفاری شده جهت نصب میخ و اعمال دوغاب نیز برابر 203 میلی‌متر بود. با توجه به این که وزن مخصوص و پارامترهای مقاومتی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) خاک برای پنج لایه خاک محل این پروژه یکسان بوده و تنها مقادیر پارامترهای مدول



شکل 3- پروفیل تغییر شکل افقی اندازه‌گیری شده در طول عملیات گودبرداری به‌دست آمده از ابزار سنج‌ها (Thompson و Miller، 1990 و Zolqadr و Yasrobi، 2014) و نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر (خط قرمز رنگ)

بایستی اشاره نمود با نصب کرنش سنج‌هایی در سطح دیواره و طول میخ، مقادیر نیروی محوری میخ‌ها نیز اندازه‌گیری شدند (Thompson و Miller، 1990). توزیع حداکثر نیروی محوری بسیج شده اندازه‌گیری شده توسط کرنش سنج‌ها در میخ‌ها (Thompson و Miller، 1990) و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر توسط نرم‌افزار PLAXIS 2D، در شکل (4) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقداری اختلاف بین حداکثر نیروی محوری بسیج شده در میخ‌های شماره‌های (1) و (2) وجود دارد که علت آن این است که در دیواره گودبرداری بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در ارتفاع حدود $\frac{2}{3}H$: ارتفاع دیوار) رخ می‌دهد و با حرکت به سمت پایین دیوار به‌واسطه اثر گوشه مقدار نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای مشکی و سبز رنگ در شکل (4)، می‌توان به تطابق مناسب ایجاد شده بین نتایج به‌دست آمده از ابزارسنج‌ها (Thompson و Miller، 1990) و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر پی‌برد، به‌طوری که درصد اختلاف بین حداکثر نیروی محوری بسیج شده در حدود 8٪ می‌باشد که با توجه به ملاحظات موجود در مقادیر پارامترهای مصالح و مدل رفتاری خاک در واقعیت و در شبیه‌سازی نرم‌افزاری این اختلاف قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

در مرحله اول پس از ایجاد هندسه مدل و اختصاص مصالح و مدل رفتاری به المان‌های ساختاری، مدل تحت تحلیل استاتیکی در اثر شتاب جاذبه قرار گرفته تا شرایط تنش‌های اولیه در عمق خاک رخ دهد. سپس گودبرداری در نه مرحله انجام گرفته است. هر مرحله شامل گودبرداری تا تراز معین، فعال نمودن المان‌های صفحه و ژئوگرید که به ترتیب نماینده دیواره بتن پاشی شده و میخ هستند، می‌باشد. در پایان، هر مرحله مدل تحت تحلیل استاتیکی قرار می‌گیرد تا نتایج مورد بررسی قرار بگیرند.



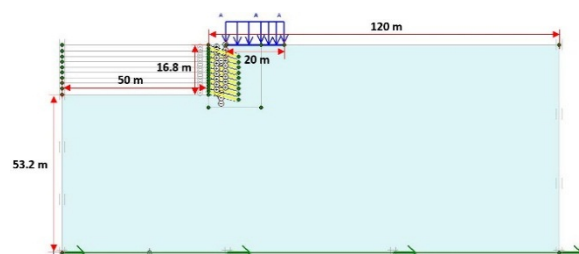
شکل 2- مدل عددی ساخته شده پژوهش حاضر در نرم‌افزار PLAXIS 2D

با توجه به نتایج به‌دست آمده از ابزار سنج‌های موجود در دیواره و ثبت مقادیر جابه‌جایی (Thompson و Miller، 1990)، نتایج تغییر شکل افقی در مرحله نهایی مدل‌سازی با نتایج مندرج در این مرجع مقایسه گردیده است. شکل (3) نشان‌دهنده مقادیر تغییر شکل افقی اندازه‌گیری شده توسط ابزارسنج‌ها (Thompson و Miller، 1990) در طول عملیات گودبرداری و نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جابه‌جایی حداکثر در بالاترین نقطه دیواره گودبرداری رخ داده که مقدار آن تقریباً بین 19 و 20 میلی‌متر بوده درحالی‌که حداکثر مقدار جابه‌جایی به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی در بالاترین ارتفاع دیوار برابر 19/90 میلی‌متر می‌باشد.

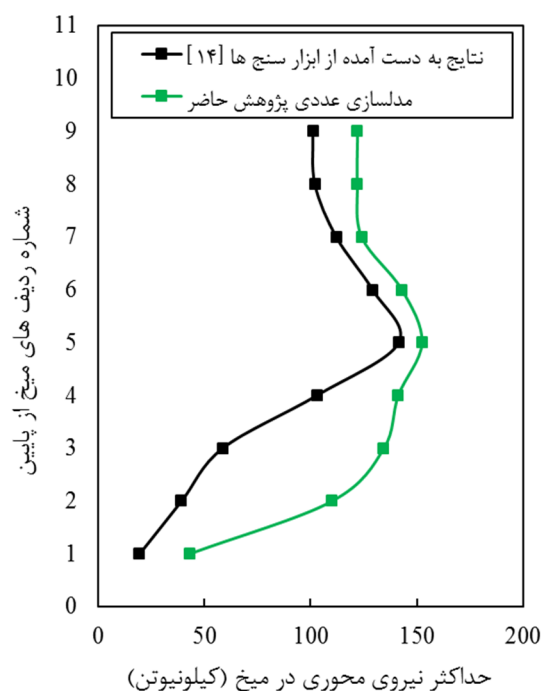
یه میزانی باشد که شرایط مرزی حداقل تأثیر را بر روی نتایج تحلیل داشته باشد. در متون فنی، مقادیری را برای ابعاد مدل‌های عددی پیشنهاد نموده‌اند تا اثرات مرزی کم‌ترین تأثیر را بر روی نتایج بگذارند. یکی از این پارامترها فاصله مرز بالا دست مدل از دیواره گودبرداری می‌باشد.

Lin و همکاران (2003) و Ou (2006) این مقدار را به ترتیب برابر $3D_e$ و $3-4D_e$ (عمق گودبرداری) پیشنهاد نمودند. در پژوهش حاضر جهت اطمینان بیش‌تر، مقدار این فاصله برابر 120 متر (بزرگ‌تر از مقدار $7D_e$) در نظر گرفته شده است. پارامتر مهم تأثیرگذار دیگر، فاصله قائم بین مرزهای مدل عددی از کف گودبرداری می‌باشد.

Braid و Lim (1997) و Rutherford (2004) این مقدار را به ترتیب برابر $2-3D_e$ و $1/20D_e$ پیشنهاد نمودند که در این پژوهش این مقدار برابر 53/20 متر (بزرگ‌تر از مقدار $3D_e$) در نظر گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل خاک سخت شونده⁵ استفاده گردیده است. مقدار ضریب میرایی برای خاک نیز برابر 1٪ در نظر گرفته شده است. جهت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بین دیوار و خاک و همچنین میخ و خاک از المان سطح مشترک استفاده شده که مقدار ضریب اصطکاک بین آن‌ها برابر 0/67 در نظر گرفته شده است. به صورت کلی، شرایط مرزی مدل شامل دو دسته شرایط مرزی استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. در شرایط مرزی استاتیکی، کف مدل در راستای افقی و قائم بسته شده و مرزهای کناری (جانبی) در راستای افقی بسته شده‌اند. شرایط مرزی دینامیکی شامل در نظر گرفتن مرز جاذب انرژی در کف و کناره و همچنین اعمال زلزله به صورت افقی به کف مدل می‌باشد. هندسه مدل به همراه ابعاد بخش‌های مختلف آن در شکل (5) نشان داده شده است. به منظور شبکه‌بندی مدل اجزای محدود از المان 15 گره‌ای استفاده شده است. از آن جا که مدت زمان تحلیل‌های دینامیکی تا حد زیادی به ابعاد المان‌ها وابسته می‌باشند، سعی شده است که شبکه‌بندی مدل عددی به صورت بهینه انجام شود.



شکل 5- هندسه مدل عددی دوبعدی ساخته شده در پژوهش حاضر به همراه ابعاد بخش‌های مختلف آن

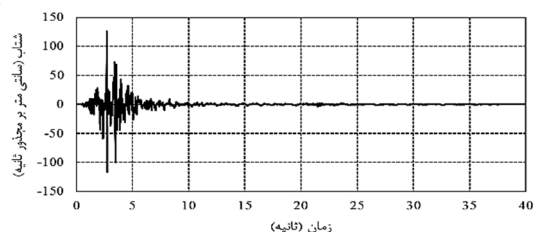


شکل 4- توزیع حداکثر نیروی محوری بسیج شده در میخ‌ها به دست آمده از ابزارسنج‌های به کاررفته در مرجع (Thompson و Miller، 1990) و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر

با مقایسه شکل‌های (3) و (4) می‌توان به انطباق مناسب نتایج مدل‌سازی عددی مطالعه حاضر با نتایج ابزاربندی ابزارسنج‌های به کاررفته در مرجع (Thompson و Miller، 1990) پی‌برد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت انتخاب المان‌های ساختاری، مدل‌های رفتاری و مشخصات مصالح تخصیص داده شده به هریک از المان‌ها و گام‌های تحلیلی در مدل‌سازی مناسب بوده است.

3- جزئیات تحلیل‌های عددی دوبعدی

در این بخش، اثر پارامتر مهم فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر پایداری دیواره گودبرداری به روش میخ‌کوبی شده مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های عددی، فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری برابر 1، 5، 10 و 15 متر در نظر گرفته شده‌اند. در مدل‌های هندسی ساخته شده، بارگذاری شامل یک سربار ترافیک در بالادست گودبرداری به عرض 20 متر که مقدار آن براساس مبحث ششم مقررات ملی ایران (1398) و با اعمال ضریب افزایش 1/5، برابر با 10 کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشد. عرض این بار مطابق با عرض معمول برای یک بلوار با سه خط رفت و سه خط برگشت برابر 20 متر و مقدار آن با اعمال ضریب افزایش 1/5 انتخاب شده است. فاصله مرزهای سازه موجود بایستی



شکل 7- شتاب نگاشت زلزله باجا (2010) در ایالت کالیفرنیا

4- نتایج و تفسیر

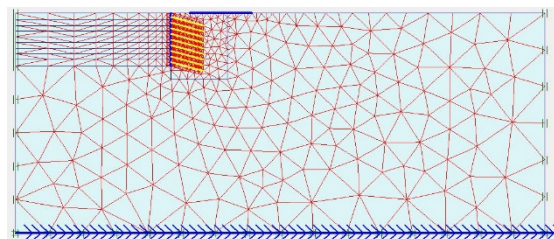
در این بخش، نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی دوبعدی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، در تحلیل‌های عددی پارامتر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری به‌عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده که مقدار این پارامتر به‌ترتیب برابر 1، 5، 10 و 15 متر می‌باشد. اثر این پارامتر در دو حالت استاتیکی و دینامیکی بر روی خروجی‌های زیر مورد تفسیر قرار گرفته است:

- 1- تغییر مکان افقی دیوار
- 2- توزیع نیروی برشی دیوار
- 3- توزیع لنگر خمشی دیوار
- 4- تغییر مکان قائم فونداسیون سازه مجاور گودبرداری
- 5- حداکثر نیروی محوری در میخ‌ها
- 6- ضریب اطمینان پایداری دیواره گودبرداری

4-1- تغییر مکان افقی دیوار

نتایج حاصل از اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر تغییر مکان افقی دیوار در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی در شکل (8) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر تغییر مکان افقی نواحی پایینی دیوار ندارد ولی در نواحی فوقانی با افزایش فاصله سربار از لبه گودبرداری مقدار تغییر مکان افقی دیوار کاهش می‌یابد، به‌طوری که با تغییر فاصله سربار مجاور گودبرداری از 1 به 15 متر میزان تغییر مکان افقی دیوار در حالت استاتیکی حدود 25٪ کاهش می‌یابد. واضح است توزیع بار جانبی ناشی از سربار به دیوار، از بالا تا پایین دیوار به‌صورت ثابت وارد می‌شود. نواحی فوقانی دیوار آزاد بوده و امکان تغییر مکان افقی در آن فراهم می‌باشد، بنابراین مقادیر تغییر شکل‌ها در این نواحی ناشی از سربار بیش‌تر بوده ولی در نواحی پایینی دیوار به‌واسطه اثر گوشه مقادیر تغییر شکل ناشی از سربار کاهش می‌یابد. مطابق شکل (8)، بیش‌ترین مقدار تغییر مکان افقی دیوار در نواحی میانی آن رخ داده و مقدار آن در حدود 12 میلی‌متر می‌باشد.

در این راستا در نواحی اطراف دیوار و میخ‌ها که نیاز به نتایج دقیق‌تر است از المان‌های ریزتر استفاده شده و با فاصله گرفتن از این نواحی و رفتن به سمت مرزهای مدل ابعاد المان‌ها افزایش یافته‌اند. در شکل (6)، شبکه مورد استفاده در تحلیل‌های عددی دوبعدی پژوهش حاضر نشان شده است.



شکل 6- شبکه مورد استفاده در تحلیل‌های عددی دوبعدی پژوهش حاضر

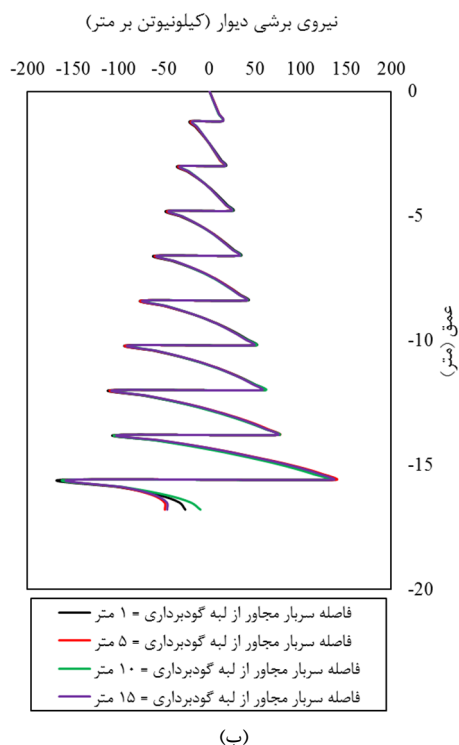
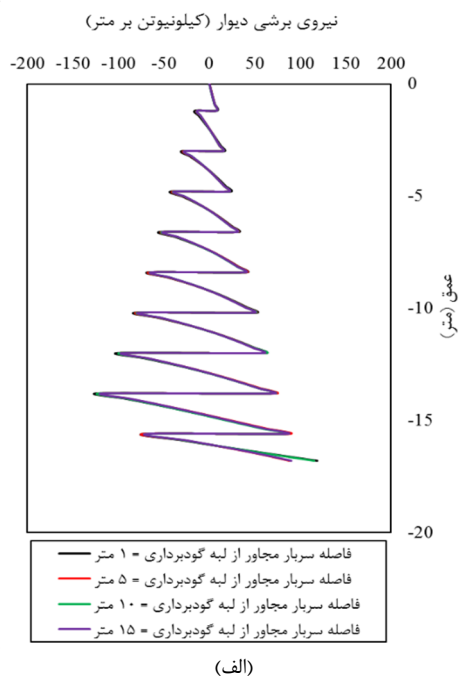
پس از ساخت مدل عددی و تعریف شرایط اولیه تنش و فشار آب، مرحله انجام تحلیل فرا می‌رسد. تحلیل به‌صورت ساخت مرحله‌ای و با تعریف گام‌های مختلف انجام می‌شود. برای تحلیل مدل‌های عددی پژوهش حاضر از 13 مرحله استفاده شده است. این مراحل به‌ترتیب زیر می‌باشند. مرحله صفر: این مرحله مربوط به معرفی شرایط اولیه تنش در مدل عددی می‌باشد. مرحله (1): در این مرحله سربار ترافیک موجود در مدل عددی فعال می‌شود.

مرحل (2) تا (10): در مرحله (2) عملیات اجرای گودبرداری آغاز می‌شود. در این مراحل لایه‌های خاک به‌ترتیب از بالا به پایین برداشته شده و ردیف‌های میخ و بتن پاشی شده مربوط به هر ردیف بر روی دیوار اجرا می‌شوند.

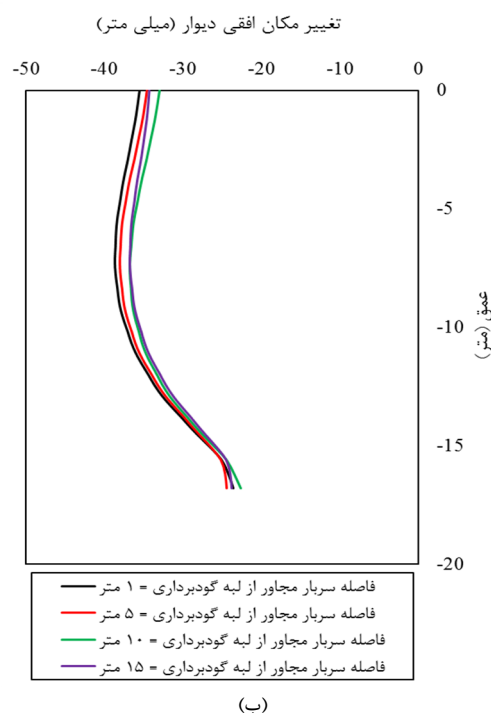
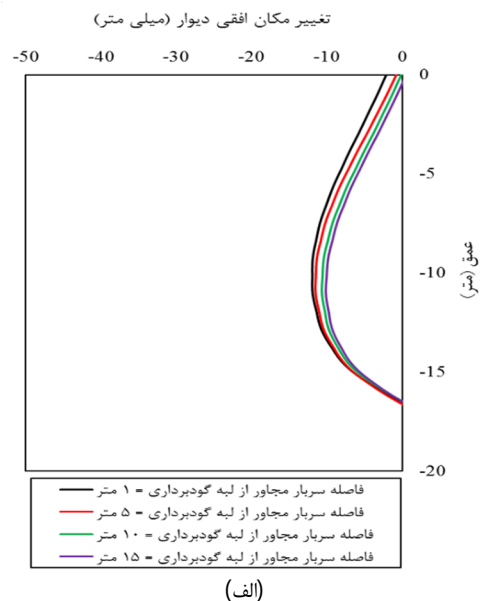
مرحله (11): در این مرحله ضریب ایمنی دیواره گودبرداری با استفاده از روش کاهش پارامترهای مقاومتی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت استاتیکی محاسبه می‌شود.

مرحله (12): در این مرحله تحلیل دینامیکی انجام می‌شود. برای انجام تحلیل دینامیکی از شتاب نگاشت زلزله باجا⁶ (2010) در ایالت کالیفرنیا⁷ استفاده شده است. این زلزله با بزرگای 7/20 ریشتر در عمق 10 کیلومتری زمین رخ داده است. نمودار شتاب-زمان این زلزله در شکل (7) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، شتاب برحسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و زمان برحسب ثانیه می‌باشد. در تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته، بازه‌های زمانی رکورد زلزله بسیار کوچک در نظر گرفته شده است ($\Delta t = 0.005 \text{ s}$).

و از بالا به سمت پایین دیوار مقدار نیروی برشی افزایش پیدا کرده که این امر با توزیع فشار جانبی خاک نسبت به دیوار که به صورت مثلی می باشد متناسب بوده و با افزایش عمق مقدار آن نیز افزایش می یابد.



شکل 9- توزیع نیروی برشی دیوار به ازای مقادیر مختلف فواصل سربار مجاور از لبه گودبرداری: (الف) حالت استاتیکی، (ب) حالت دینامیکی

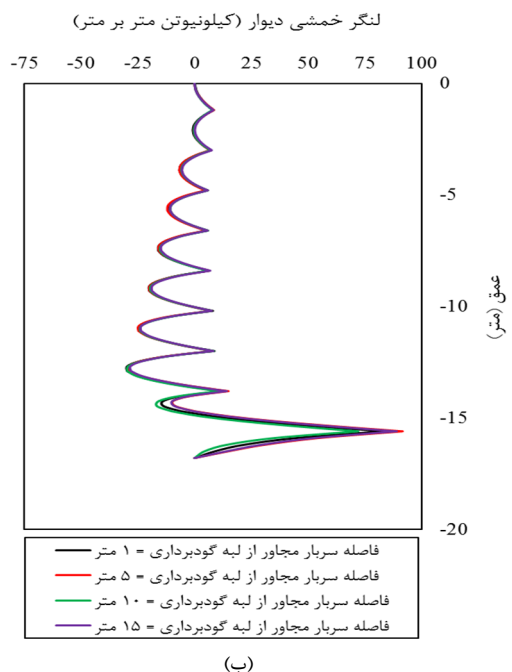
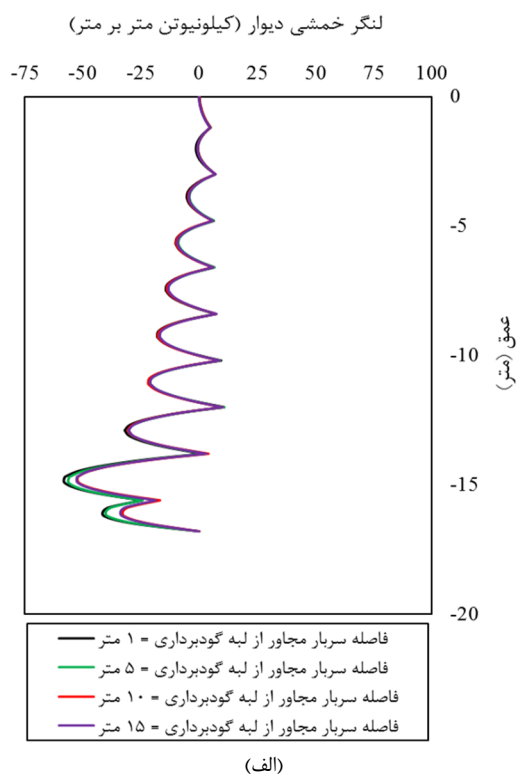


شکل 8- پروفیل تغییر مکان افقی دیوار به ازای مقادیر مختلف فواصل سربار مجاور از لبه گودبرداری: (الف) حالت استاتیکی، (ب) حالت دینامیکی

2-4- توزیع نیروی برشی دیوار

در شکل (9)، نتایج به دست آمده از اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر توزیع نیروی برشی دیوار در حالت های استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. همان طور که در شکل نیز مشاهده می شود، در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی بیشترین مقدار نیروی برشی دیوار در محل میخ ها ایجاد می شود، به طوری که در این محل یک پرش ناگهانی در توزیع نیروی برشی ایجاد می گردد

دینامیکی به علت همزمان بودن شتاب افقی زلزله و فشار قائم خاک، فشار قابل ملاحظه‌ای در ناحیه پاشنه دیوار ایجاد می‌شود که این امر باعث افزایش نیروی محوری در میخ‌های قسمت پایینی و در نتیجه لنگر خمشی دیوار می‌شود.



شکل 10- توزیع لنگر خمشی دیوار به‌ازای مقادیر مختلف فواصل سر بار مجاور از لبه گودبرداری: الف) حالت استاتیکی، ب) حالت دینامیکی

نتایج نشان دادند، در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی تغییر فاصله سر بار مجاور از لبه گودبرداری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی برشی ایجاد شده در دیوار ندارد و در چهار حالت مورد بررسی، مقادیر نیروی برشی ایجاد شده در دیوار بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند. علت این امر را می‌توان بدین‌گونه تفسیر نمود که تغییر فاصله افقی سر بار تأثیر قابل توجهی بر مقدار نیروی محوری کل ایجاد شده در میخ‌ها نداشته و از آن جا که نیروی برشی ایجاد شده در هد میخ‌ها با نیروی محوری ایجاد شده در آن‌ها متناسب است، مقدار نیروی برشی ایجاد شده در دیوار نیز تغییری پیدا نمی‌کند.

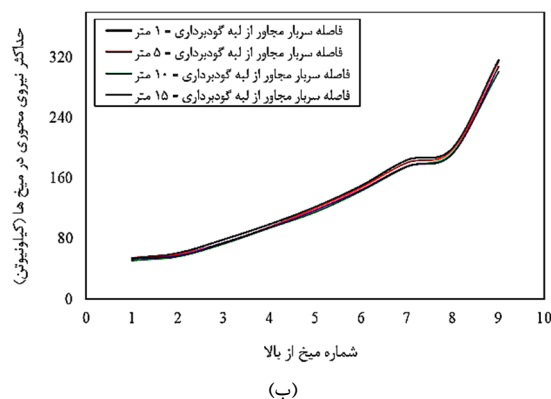
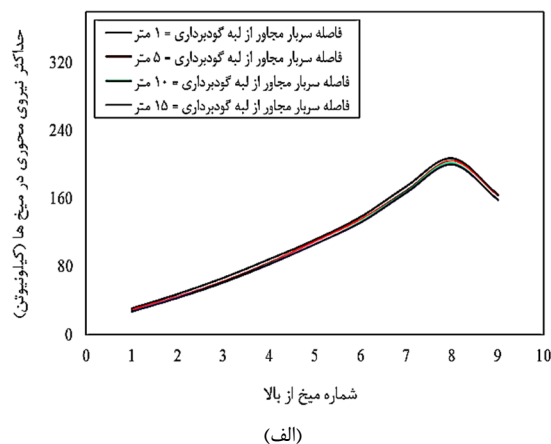
3-4- توزیع لنگر خمشی دیوار

نتایج به‌دست آمده از اثر فاصله سر بار مجاور از لبه گودبرداری بر توزیع لنگر خمشی دیوار در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی در شکل (10) نشان داده شده است. نتایج نشان دادند، در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی مقدار لنگر خمشی دیوار در محل میخ‌ها کم‌تر و در فواصل بین میخ‌ها به حداکثر خود می‌رسد. وجود میخ‌ها مانع حرکت دیوار به سمت گودبرداری ناشی از فشار جانبی خاک شده و در نتیجه لنگر خمشی دیوار در اطراف هد میخ‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، در فاصله بین دو میخ بیش‌ترین مقدار لنگر خمشی منفی در دیوار مشاهده گردید که با توجه به اثر مقاومتی میخ‌ها در مقابل تغییر شکل افقی دیوار، امری طبیعی می‌باشد. در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی از بالای دیوار به سمت پایین، مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در دیوار افزایش می‌یابد. این امر با شکل توزیع فشار افقی خاک به دیوار که به صورت مثلی می‌باشد متناسب بوده و با افزایش عمق مقدار آن نیز افزایش می‌یابد.

در حالت استاتیکی تغییر فاصله سر بار مجاور از لبه گودبرداری تأثیر قابل توجهی بر توزیع لنگر خمشی در نواحی فوقانی دیوار نداشته ولی در نواحی پایینی با افزایش فاصله افقی سر بار از لبه گودبرداری مقدار لنگر خمشی دیوار کاهش می‌یابد، که علت این امر را می‌توان بدین‌گونه تفسیر نمود که با افزایش فاصله افقی سر بار از لبه گودبرداری مقدار توزیع بار جانبی ناشی از آن بر دیوار کاهش می‌یابد و این اثر در نواحی فوقانی ناچیز بوده ولی در نواحی پایینی دیوار قابل تشخیص‌تر می‌باشد. مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در دیوار برای دو فاصله 1 و 5 متر نزدیک به یکدیگر بوده و دارای اختلاف حدود 30٪ با فواصل 10 و 15 متری می‌باشد. در حالت دینامیکی در محل پایین‌ترین میخ یک پرش در نمودار لنگر خمشی دیوار مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار لنگر خمشی دیوار در همین نقطه ایجاد شده که مقدار آن حدوداً برابر 100 کیلو نیوتن متر بر متر می‌باشد. علت این امر این است که در تحلیل

اندکی کاهش می‌یابد، چرا که با افزایش فاصله از لبه گودبرداری میزان سربار موجود بر روی گوه گسیختگی کاهش یافته و متعاقباً مقدار نیروی محوری میخ‌ها نیز کاهش می‌یابد. همچنین بایستی اشاره نمود اگر چه نیروی محوری کل در میخ‌ها با تغییر فاصله سربار از لبه گودبرداری تغییر چندانی نمی‌کند ولی نتایج تحلیل‌ها نشان دادند با تغییر این فاصله، مقادیر مؤلفه نیرو در میخ‌ها و در نتیجه پایداری دیواره تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

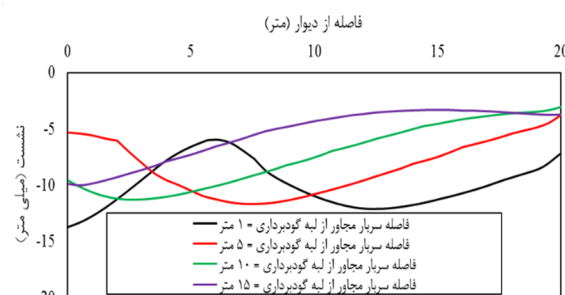
مطابق شکل (12) در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی، مقدار حداکثر نیروی محوری از میخ بالایی به سمت پایین به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. روند تغییرات مقدار حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها در حالت استاتیکی با حالت دینامیکی متفاوت می‌باشد. در حالت استاتیکی، در میخ ما قبل آخر روند معکوس شده و این میخ بیش‌ترین مقدار نیروی محوری را دارا بوده که مقدار آن تقریباً برابر 210 کیلو نیوتن می‌باشد. در حالت دینامیکی، یک جهش در مقدار نیروی پایین‌ترین میخ نسبت به میخ ما قبل آن مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین مقدار نیروی محوری مربوط به همین میخ بوده که مقدار آن برابر 320 کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل 12- تغییرات حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها به‌ازای مقادیر مختلف فواصل سربار مجاور از لبه گودبرداری: (الف) حالت استاتیکی، (ب) حالت دینامیکی

4-4- تغییر مکان قائم فونداسیون سازه مجاور گودبرداری

نتایج به‌دست آمده از اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر تغییر مکان قائم فونداسیون سازه مجاور گودبرداری (نشست) در حالت دینامیکی در شکل (11) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، بیش‌ترین مقدار نشست مربوط به نزدیک‌ترین نقطه فونداسیون با فاصله یک متر از لبه گودبرداری بوده که مقدار آن برابر 14 میلی‌متر می‌باشد. فونداسیون‌ها با فواصل 10 و 15 متر از لبه گودبرداری تقریباً رفتار مشابهی دارند و با فاصله گرفتن از لبه گودبرداری مقدار نشست در آن‌ها کاهش می‌یابد. در فونداسیون با فاصله 5 متر از لبه گودبرداری، کم‌ترین مقدار نشست مربوط به نواحی ابتدایی و انتهایی بوده و در نقطه میانی فونداسیون که در نزدیکی گوه گسیختگی قرار دارد، بیش‌ترین مقدار نشست رخ می‌دهد. بیش‌ترین مقدار نشست اختلافی در فونداسیون با فاصله یک متر از لبه گودبرداری رخ داده که مقدار آن در حدود 9 میلی‌متر می‌باشد که آن نیز در محل گوه گسیختگی رخ داده است. بنابراین در فونداسیون‌های نزدیک به گودبرداری موضوع نشست اختلافی ناشی از محل گوه گسیختگی یک پارامتر بسیار مهم بوده و بایستی مورد توجه طراحان قرار بگیرد.



شکل 11- پروفیل تغییر مکان قائم فونداسیون سازه مجاور گودبرداری در حالت دینامیکی به‌ازای مقادیر مختلف فواصل سربار مجاور از لبه گودبرداری

4-5- حداکثر نیروی محوری در میخ‌ها

در شکل (12)، نتایج به‌دست آمده از اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر مقادیر حداکثر نیروی محوری در میخ‌ها در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. نتایج نشان دادند، در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها با فواصل افقی مختلف سربار از لبه گودبرداری، بسیار نزدیک به هم بوده و می‌توان اظهار داشت که تغییر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری تأثیر ناچیزی بر نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها دارد. با افزایش فاصله افقی سربار از لبه گودبرداری، مقدار نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها به‌میزان

مورد بررسی قرار گرفت. برخی از یافته‌های به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی پژوهش حاضر به‌شرح زیر می‌باشند:

(1) در حالت دینامیکی، تغییر مکان افقی دیواره گودبرداری از بالا به پایین تقریباً دارای مقدار ثابتی می‌باشد. در چنین حالتی کم‌ترین مقدار تغییر مکان در پای دیوار مشاهده شد. نتایج بیان‌گر این بودند که در تحلیل دینامیکی، فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر تغییر مکان افقی دیوار ندارد.

(2) نیروی برشی دیوار در محل میخ‌ها مقادیر بیش‌تری نسبت به نواحی اطراف آن داشته و جهت نیروی برشی در محل میخ‌ها نیز تغییر می‌نماید. مقدار نیروی برشی ایجاد شده در دیوار چندان تحت تأثیر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری نبوده و مقادیر حاصل در تحلیل‌های مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند.

(3) مقدار لنگر خمشی دیوار در فاصله بین دو میخ بیش‌ترین مقدار را نسبت به نواحی اطراف آن داشته و مقدار لنگر خمشی از نواحی فوقانی دیوار به سمت پایین آن روند افزایشی دارد. در حالت استاتیکی، بیش‌ترین مقدار لنگر خمشی دیوار در فاصله بین دو میخ پایینی رخ داد، در حالی که در تحلیل دینامیکی در محل پایین‌ترین میخ مشاهده شد که مقدار آن نیز تقریباً دو برابر مقدار لنگر خمشی حداکثر دیوار در حالت استاتیکی بود.

(4) موقعیت و مقدار حداکثر نشست فونداسیون سازه مجاور گودبرداری با افزایش فاصله آن از لبه گودبرداری تغییر می‌کند، به‌طوری که بیش‌ترین مقدار نشست در نزدیک‌ترین حالت رخ می‌دهد و با افزایش فاصله از لبه گودبرداری مقدار نشست فونداسیون کاهش می‌یابد.

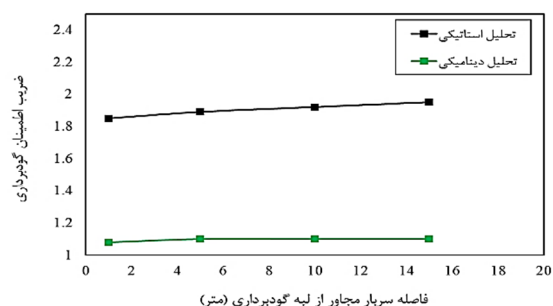
(5) با افزایش فاصله افقی سربار از لبه گودبرداری، مقدار نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها به‌میزان اندکی کاهش می‌یابد. مقدار حداکثر نیروی محوری از میخ بالایی به سمت پایین به‌صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. در حالت استاتیکی، در میخ ما قبل آخر روند معکوس شده و این میخ بیش‌ترین مقدار نیروی محوری را دارا می‌باشد. در حالت دینامیکی، یک جهش در مقدار نیروی پایین‌ترین میخ نسبت به میخ ما قبل آن مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین مقدار نیروی محوری مربوط به همین میخ می‌باشد.

(6) در حالت استاتیکی، با افزایش فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری ضریب اطمینان پایداری گودبرداری با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند. در تحلیل دینامیکی، تغییر فاصله سربار از لبه گودبرداری تأثیر قابل توجهی بر ضریب اطمینان پایداری ندارد. (7) نتایج ارائه شده در این پژوهش می‌تواند به مهندسین طراح در طراحی و پایدارسازی گودبرداری به‌روش میخ‌کوبی راهنمایی نماید تا با بتوانند جابه‌جایی‌های ایجاد شده ناشی سربارهای اطراف را به‌خوبی پیش‌بینی نمایند.

بایستی اشاره نمود مقادیر نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها نسبت به تحلیل استاتیکی بیش‌تر می‌باشند و میزان اختلاف در میخ‌های مختلف نیز متفاوت بوده که از حدود صفر در میخ ماقبل آخر تا حدود 100٪ اختلاف در میخ آخر متغیر می‌باشد.

4-6- ضریب اطمینان پایداری دیواره گودبرداری

نتایج به‌دست آمده از اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر ضریب اطمینان پایداری دیواره گودبرداری در حالت دینامیکی در شکل (13) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود در تحلیل استاتیکی با افزایش مقدار فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری، مقدار ضریب اطمینان پایداری گودبرداری با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند که علت آن کاهش فشار سربار بر دیوار ناشی از افزایش فاصله سربار مجاور و در نتیجه افزایش پایداری دیوار می‌باشد. در تحلیل دینامیکی، مقادیر ضریب اطمینان بسیار نزدیک به هم می‌باشند، که علت این امر را می‌توان بدین‌گونه تفسیر نمود که نیروی افقی ناشی از شتاب زلزله به-میزانی است که اثر فشار سربار در مقابل آن قابل چشم‌پوشی می‌باشد. کم‌ترین مقدار ضریب اطمینان در فاصله افقی سربار یک متر مشاهده گردید که مقدار آن برابر 1/08 می‌باشد و در سایر فواصل مقدار ضریب اطمینان برابر 1/10 به‌دست آمد.



شکل 13- تغییرات ضریب اطمینان پایداری دیواره گودبرداری در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی به‌ازای مقادیر مختلف فواصل سربار مجاور از لبه گودبرداری

5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد یک دیوار میخ‌کوبی شده در گودبرداری عمیق مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور ابتدا دیواره میخ‌کوبی شده منطقه سیاتل واشنگتن توسط نرم‌افزار PLAXIS 2D مدل‌سازی و سپس به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی ساخته شده، نتایج با نتایج ارائه شده در (Thompson و Miller, 1990) مقایسه گردید. درنهایت، اثر فاصله سربار مجاور از لبه گودبرداری بر پاسخ استاتیکی و لرزه‌ای دیوار میخ‌کوبی شده

6- مراجع

- Ou CY, "Deep excavation theory and practice", Taylor and Francis/Balkema, London, 2006.
- Rutherford CJ, "Design manual for excavation support using deep mixing technology", Master's Dissertation, College of Engineering, Texas A&M University, Texas, 2004.
- Sharma A, Ramkrishnan R, "Parametric optimization and multi-regression analysis for soil nailing using numerical approaches", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020;38, 3505-3523.
<https://doi.org/10.1007/s10706-020-01230-8>
- Singh VP, Sivakumar Babu, GL, "2D Numerical Simulations of Soil Nail Walls", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28 (4), 299-309.
<https://doi.org/10.1007/s10706-009-9292-x>
- Thompson SR, Miller IR, "Design, construction and performance of a soil nailed wall in Seattle, Washington", In: *Proceeding of a conference on design and performance of earth retaining structures*, ASCE Special Publication, 1990, 25, 629-643.
- Wu D, Wang P, Liu GQ, "Influence of C and u values on slope supporting by soil nailing wall in thick miscellaneous fill site", *Advanced Materials Research*, 2013, 504-507.
- Ye X, Wang S, Wang Q, Sloan SW, Sheng D, "Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil", *Computers and Geotechnics*, 2017, 90, 202-214.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.06.011>
- Zamiran S, Ghojavand H, Saba H, "Numerical Analysis of Soil Nail Walls under Seismic Condition in 3D Form Excavations", *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204-208, 2671-2676.
[10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2671](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2671)
- Zhang CC, Xu Q, Zhu HH, Shi B, Yin JH, "Evaluations of load-deformation behavior of soil nail using hyperbolic pullout model", *Geomechanics and Engineering*, 2014, 277-292.
<https://doi.org/10.12989/gae.2014.6.3.277>
- Zolqadr E, Yasrobi SS, "Effect of wall batter angle on soil nail walls performance", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 2014, 133-136.
- Briaud JL, Lim Y, "Soil-nailed wall under piled bridge abutment: simulation and guidelines", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123 (11), 1043-1050.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:11\(1043\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:11(1043))
- Brinkgreve RBJ, "PLAXIS 2D Version 8.6", Manuals, 2002.
- Bryne R, "Manual for design & construction monitoring of soil nail walls", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1998.
- Ghareh S, "Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils", *Measurement*, 2015, 73, 341-351.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.043>
- Haddad A, Karimi Farzaghi B, "Optimization of excavated walls using a combined nailing and anchoring system", *Fourth International Conference on Geotechnical and Soil Engineering*, Iran, 2007.
- Hajian-niya A, Ebrahimian B, Hadizadeh Bazaz D, "Reducing the deformation of the pit walls using a combination of nailing and anchoring methods", *National Conference on Structures, Roads, Architecture*, Chalus, 2011.
- Lin DG, Chung TC, Phien-Wej N, "Quantitative evaluation of corner effect on deformation behavior of multi-strutted deep excavation in Bangkok subsoil", *Geotechnical Engineering*, 2003, 34 (1), 41-57.
- Mahdizadeh Shandiz M, "Numerical modeling of trench behavior stabilized by rod driving method-a case study", Master's thesis, University of Science and Technology, Tehran 2012.
- Mittal S, "Soil nailing application in erosion control—an experimental study", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24 (3), 675-688.
<https://doi.org/10.1007/s10706-005-2577-9>
- Morse Cheriq B, Yousefi Rad M, "Stabilization of excavation by nailing method in granular soils with stable groundwater level", *Third National Conference of Iranian Geotechnical Engineering*, 2018.
- National Building Regulations, Topic 6, "Loads on Buildings", Ministry of Housing and Urban Development, Deputy of Housing and Building, National Building Regulations Office, 2019 edition.