

## بررسی اثر محدودکنندگی دیوارهای مجاور ترانشه میخ کوبی شده بر رفتار آن با مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه بعدی

محسن صابر ماهانی<sup>۱</sup>\*

مرتضی کشاورز<sup>۲</sup>

### چکیده

تحلیل، طراحی و همچنین مطالعه پارامتریک رفتار دیوار میخکوبی شده، عموماً با استفاده از مدل‌های دوبعدی مبتنی بر فرضیات شرایط کرنش مسطح صورت می‌گیرد و اغلب بدون توجه به هندسه سه بعدی گودبرداری، نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی به شرایط واقعی سه بعدی تعمیم داده شده که این امر در بسیاری از مواقع منجر به ارائه طرح‌های نایمن و در برخی موارد موجب ارائه طرح‌های محافظه کارانه و غیراقتصادی می‌شود. در مطالعه حاضر اثر محدودکنندگی دیوارهای مجاور ترانشه که عمود بر دیواره اصلی در کنج‌های گود قرار گرفته‌اند بر رفتار آن بررسی شده است. در این راستا، دیوار میخکوبی شده با هندسه گود مستطیلی به صورت سه بعدی و در مقیاس واقعی در برنامه پلکسیس سه بعدی<sup>۳</sup> مدل شده است و نتایج حاصل در مقطع بحرانی با نتایج به دست آمده از تحلیل دوبعدی دیوار میخکوبی شده در برنامه پلکسیس دوبعدی<sup>۴</sup> مقایسه شده است. در واقع دیوارهای مجاور نقش تکیه‌گاه را ایفا کرده و بدین وسیله محدودیتی برای تغییر شکل دیواره میخکوبی شده می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های حاصل از تحلیل دوبعدی همواره بزرگ‌تر از نتایج حاصل از تحلیل سه بعدی در مقطع بحرانی است و چنانچه طول دیواره اصلی (L) کمتر از 10H باشد میزان اثرات محدودکننده بیشتر است و در صورتی که L بزرگ‌تر از 10H گردد، نتایج تحلیل دوبعدی قابل تعمیم به شرایط سه بعدی است.

### کلیدواژه‌ها

میخکوبی دیواره، هندسه سه بعدی، تحلیل عددی دوبعدی و سه بعدی، اثر محدودکنندگی دیوار مجاور ترانشه

۱. \* استادیار و عضو هیئت علمی گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. msabermahani@iust.ac.ir

۲. کارشناس ارشد، مهندس ژئوتکنیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

3. Plaxis 3D Foundation

4. Plaxis 2D

## مقدمه

و چن<sup>۹</sup> (۱۹۹۹)، (اسمیت و سو<sup>۱۰</sup> ۱۹۹۷). انجی و لی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، به بررسی اثر سختی سیستم میخ‌کوبی در جبهه حفاری شده تونل بر میزان تغییرشکل‌ها پرداخته‌اند (انجی و لی<sup>۱۱</sup> ۲۰۰۲). امروزه در تحلیل و طراحی و همچنین مطالعه پارامتریک رفتار این نوع از دیواره‌ها، عموماً از مدل‌های دوبعدی مبتنی بر فرضیات شرایط کرنش مسطح استفاده می‌گردد و بسیاری از اوقات بدون توجه به هندسه سه‌بعدی گودبرداری، نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی به شرایط واقعی سه‌بعدی تعمیم داده می‌شود که این امر در بسیاری از مواقع باعث ارائه طرح‌های ناپایمان و در برخی موارد موجب ارائه طرح‌های محافظه‌کارانه و غیراقتصادی می‌گردد. همان‌طور که می‌دانیم اغلب، هندسه دیواره‌های گودبرداری و یا هندسه بارگذاری‌ها در واقعیت ماهیتی سه‌بعدی دارند که به علت محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی دوبعدی این‌گونه بارگذاری‌ها تنها به صورت صفحه‌ای و در شرایط کرنش مسطح مدل شده و پس اغلب، تنش‌های حاصل از مدل‌سازی دوبعدی کمتر از واقعیت موجود بوده و یا تغییرشکل‌ها بیشتر از واقعیت می‌باشند. پس تحلیل دوبعدی مربوط به شرایط واقعی سه‌بعدی می‌تواند در نهایت منجر به طرحی ناپایمان گردد.

در مطالعه حاضر جهت بررسی اثر یکی از جنبه‌های هندسه سه‌بعدی دیوار ترانشه‌ها بر روی تغییرشکل‌ها، دیوار میخ‌کوبی شده با هندسه گود مستطیلی به صورت سه‌بعدی در مقیاس واقعی در برنامه Plaxis 3D Foundation نسخه ۱٫۱ مدل شده است و نتایج حاصل در مقطع بحرانی با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دوبعدی دیوار میخ‌کوبی شده در برنامه Plaxis 2D نسخه ۸٫۵ مقایسه شده است. بدین‌وسیله اثر محدودکنندگی دیوارهای مجاور ترانشه که عمود بر دیواره اصلی در کنج‌های گود قرار گرفته‌اند بر رفتار آن مطالعه شده است. در واقع رفتار ترانشه محدود به دیوارهای جانبی متفاوت از ترانشه‌ای است که طولی نامحدود دارد و مدل‌سازی دوبعدی نیز با این فرض بکار گرفته می‌شود که طول ترانشه در راستای آن بی‌نهایت است

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی از قبیل سدها، نیروگاه‌ها، فضاهای زیرزمینی، راه‌ها و پروژه‌های ساختمانی، حفر ترانشه و پایدارسازی آن امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از روش‌های رایج جهت پایدارسازی دیواره‌های ترانشه، استفاده از میخ‌کوبی (Soil Nailing) است. تغییرشکل‌های ناشی از عملیات گودبرداری یکی از مؤثرترین پارامترها بر روی پایداری کلی توده خاک و شرایط بهره‌برداری می‌باشد. میخ‌کوبی خاک یک روش مسلح‌سازی درجا است. برای اینکه سیستم میخ‌کوبی به‌درستی عمل نماید، بایستی خاک تغییر مکان جانبی کافی داشته باشد تا در المان مسلح‌کننده نیروی کششی بسیج گردد، به این‌گونه رفتار حالت مقاوم گفته می‌شود (لازارت، الیاس، اسپینوزا و ساباتینی<sup>۱</sup> ۲۰۰۳).

جهت بررسی عددی و مدل‌سازی نرم‌افزاری سیستم دیوار میخ‌کوبی شده روش‌های مختلفی به‌صورت تعادل حدی و یا با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود وجود دارد. میتل در مطالعه خود با استفاده از روش تعادل حدی و به کمک روش تحلیلی دایره اصطکاک، به بررسی پارامترهای مؤثر بر روی ضریب اطمینان کلی دیوار میخ‌کوبی شده پرداخته است (میتل<sup>۲</sup> ۲۰۰۶). بررسی عوامل متعدد مؤثر بر رفتار دیوار میخ‌کوبی شده و بررسی تغییرشکل‌ها اغلب به‌صورت دوبعدی و با فرض کرنش صفحه‌ای صورت پذیرفته است (لیما، سایاو و جروسکوویچ<sup>۳</sup> ۲۰۰۴ و ۲۰۰۳)، (ساین و بابو<sup>۴</sup> ۲۰۱۰)، (بابو، مورثی و سرینیواس<sup>۵</sup> ۲۰۰۲)، (فن و لوو<sup>۶</sup> ۲۰۰۸). در مدل‌سازی‌های سه‌بعدی نیز اغلب به دلیل تکراری بودن آرایش میخ‌خاک‌ها در بعد سوم تنها به مدل‌سازی قطاع محدودی از دیوار میخ‌کوبی شده که شامل یک ستون از میخ‌خاک‌ها می‌باشد بسنده شده است (کیم، لی، جنونگ<sup>۷</sup> ۲۰۱۳)، (یانگ و دروم<sup>۸</sup> ۲۰۰۰)، (ژانگ، سانگ

1. Lazarte, Elias, Espinoza & Sabatini
2. Mittal
3. Lima, Sayão & Gerscovich
4. Singh & Babu
5. Babu, Murthy & Srinivas
6. Fan & Luo
7. Kim, Lee & Jeong
8. Yang & Drumm

9. Zhang, Song, & Chen

10. Smith & Su

11. Ng & Lee

بزرگ، حدود ۱۰٪ مقاومت بیرون کشیدگی را تأمین خواهد کرد (ژو و یین<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸). در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی میخ‌خاک از المان Plate استفاده شده است و از آنجایی که پوشش بتن پاششی نیز دارای مقاومت خمشی است پس جهت مدل‌سازی این جزء از دیوار میخکوبی شده نیز از المان Plate بهره برده شده است. مدل رفتاری میخ‌خاک و دیوار بتن پاششی به صورت الاستیک لحاظ شده است.

جهت مش‌بندی خاک در مدل‌های دوبعدی از المان مثلثی ۱۵ گره استفاده شده است. مش‌بندی المان Plate نیز بر اساس پیش‌فرض برنامه و به صورت المان تیر ۵ گره می‌باشد. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی تمامی مدل‌ها با ریزترین المان ممکن مدل شده است تا از عدم حساسیت نتایج به نوع مش‌بندی اطمینان حاصل گردد. در برنامه Plaxis بررسی اندرکنش بین خاک و سازه با کمک ابزار Interface امکان‌پذیر است. بر اساس مطالعه یین و چو می‌توان به درستی برای اغلب مدل‌سازی‌های دیوار میخکوبی شده از  $R_{inter} = 1$  بهره برد (یین و چو<sup>۶</sup>، ۲۰۰۵). ضریب تماسی بین خاک و اجزاء سازه‌ای می‌باشد و مقادیر ۱ بدین معنی است که تماس بین خاک و دوغاب تزریقی کاملاً صلب بوده و لغزشی قبل از گسیختگی رخ نمی‌دهد.

#### صحت‌سنجی نرم‌افزار Plaxis 2D

جهت بررسی صحت روش مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده در نرم‌افزار Plaxis 2D، با توجه به مطالعه صورت پذیرفته توسط دورگونوقلو و همکاران، به مدل‌سازی مقطع دیوار میخکوبی شده به عمق ۲۱ متر در محل قرارگیری انحراف سنج شماره ۹ در پروژه گودبرداری مرکز تجاری استانبول ترکیه پرداخته شده است (دورگونوقلو<sup>۷</sup> و همکاران ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷). نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی در نرم‌افزار Plaxis 2D با داده‌های ثبت‌شده مانیتورینگ و همچنین نتایج مدل‌سازی دورگونوقلو و همکاران در نرم‌افزار Flac مقایسه شده است.

(کرنش صفحه‌ای) پس هدف این مقاله بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی ترانشه محدود به دیوارهای مجاور و مقایسه آن با مدل سه‌بعدی با مقیاس واقعی است تا اثرات محدودکنندگی دیوارهای مجاور روشن گردد.

#### مدل‌سازی دوبعدی

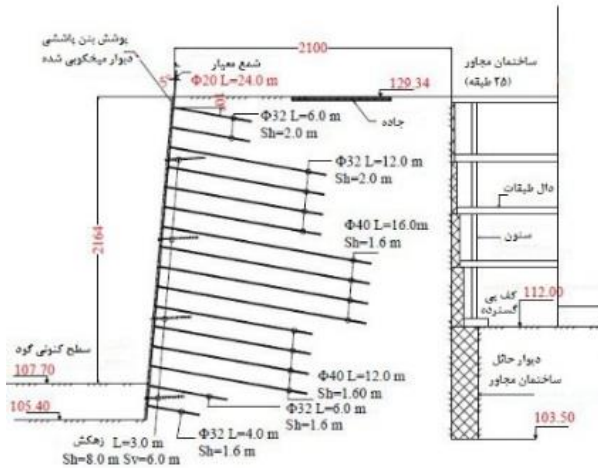
در مدل‌سازی دوبعدی صورت گرفته در برنامه Plaxis 2D اغلب از دو مدل رفتاری موهركولمب و خاک سخت‌شونده استفاده می‌شود (بابو و ساین<sup>۸</sup>، ۲۰۰۹). ساین و بابو در مطالعه خود به مقایسه نتایج حاصل از سه مدل رفتاری موهركولمب و خاک سخت‌شونده و خاک سخت‌شونده با کرنش کوچک پرداخته‌اند (بابو و ساین<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰). در مطالعه حاضر برای بررسی رفتار دیوار میخکوبی شده از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده استفاده می‌شود. جهت مدل‌سازی میخ‌خاک در برنامه Plaxis 2D می‌توان از دو المان Plate و Geogrid بهره برد (برینگر و وورمر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲). تفاوت میان این دو المان در سختی خمشی المان Plate است. مقاومت خمشی و برشی میخ‌خاک در دیوار میخکوبی شده توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. جوران در مطالعه خود بیان می‌دارد که میخ با شیب نفوذ ۱۰ تا ۱۵ درجه، تمایل به دوران دارد و پس اثر خمشی باعث بسیج شدن نیروی محوری خواهد شد (جوران، باودرند، فرانگ و الیاس<sup>۲</sup>، ۱۹۹۰). اسپلوزر با توجه به مشاهدات خود از نتایج آزمایشگاهی و بخصوص با بررسی نتایج پروژه کلوتر فرانسه بیان می‌دارد که در حین گسیختگی سیستم دیوار میخکوبی، مقاومت خمشی و برشی میخ‌خاک بسیج خواهد شد (اسپلوزر<sup>۳</sup>، ۱۹۹۱). در آیین‌نامه HA68 و FHWA نیز از اثر این دو عامل بر رفتار میخکوبی شده صرف‌نظر شده است (تایب<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰). مقایسه بین نتایج مدل ارائه‌شده در تحقیق ژو و یین و داده‌های ثبت‌شده واقعی دیوار میخکوبی شده، نشان می‌دهد که اثر پارامتر خمش در بحث مقاومت بیرون کشیدگی ناچیز است. البته این پارامتر در جابجایی‌های

1. Brinkgreve & Vermeer
2. Juran, Baudrand, Farrag, & Elias
3. Schlosser
4. Taib

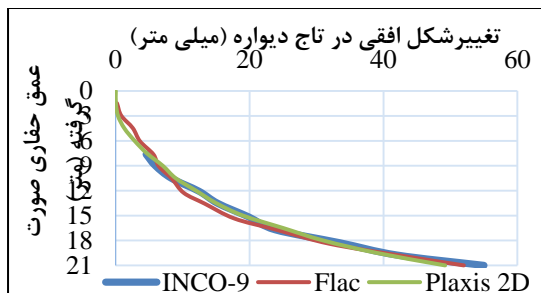
5. Zhou & Yin
6. Chu & Yin
7. Durgunoğlu

است و کانتور تغییر شکل افقی دیواره در پایان آخرین مرحله گودبرداری مطابق شکل (۲) است. همان‌طور که مشخص است بیشینه تغییر شکل دیواره در تاج برابر ۴۹ میلی‌متر می‌باشد.

جابجایی افقی ایجادشده در تاج دیوار میخ‌کوبی شده در طی مراحل گودبرداری بر اساس مدل‌سازی با نرم‌افزار Plaxis 2D به همراه داده‌های ثبت‌شده واقعی و همچنین نتایج حاصل از مطالعه صورت پذیرفته توسط دورگونوقلو در شکل (۳) قابل مشاهده است.

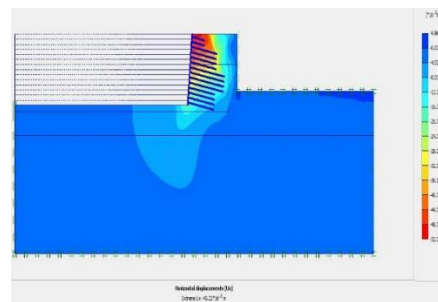


شکل (۱): نمای شماتیک مقطع دیوار میخ‌کوبی شده در محل استقرار انحراف سنج شماره ۹



شکل (۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در Plaxis 2D و نتایج مانیتورینگ

سپس جهت بررسی تغییر شکل‌ها به مدل‌سازی دوبعدی در نرم‌افزار Plaxis 2D پرداخته شده است. علت افقی در نظر گرفتن میخ‌خاک‌ها به‌خاطر محدودیت موجود در مدل‌سازی‌های سه‌بعدی در نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation می‌باشد. مشخصات خاک و میخ‌خاک و پوشش بتن پاششی در تمامی مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی یکسان و مطابق جداول ۱، ۲ و ۳ است. توضیحات لازم در مورد هر یک از پارامترهای جدول ۱ در مراجع موجود ارائه شده است (برینگر و ورمر<sup>۱</sup> ۲۰۰۲).



شکل (۲): کانتور تغییر شکل افقی در پایان تحلیل

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D و مدل رفتاری خاک سخت شونده انطباق مناسبی با میزان تغییر شکل‌های واقعی ثبت‌شده دیوار میخ‌کوبی شده دارد.

### معرفی مدل‌های دوبعدی

برای بررسی دوبعدی به معرفی سه دیوار میخ‌کوبی شده به ارتفاع ۸، ۱۶ و ۲۰ متری پرداخته می‌شود. ابتدا آرایش میخ‌خاک‌ها در هر دیوار بر اساس تحلیل تعادل حدی در برنامه Geostudio نسخه ۲۰۰۷ و باهدف تأمین حداقل ضریب اطمینان بر اساس آیین‌نامه FHWA، بررسی شده

جدول (۱): مشخصات خاک جهت تعریف مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS)

$C \left( \frac{KN}{m^2} \right)$	m	$E_{ur}^{ref} (MPa)$	$E_{oed}^{ref} (MPa)$	$E_{50}^{ref} (MPa)$	$\gamma \left( \frac{KN}{m^3} \right)$
۱۰	۰,۵	۱۲۰	۴۰	۴۰	۱۹
$R_{ref}$	$K_0^{NC}$	$P_{ref} \left( \frac{KN}{m^2} \right)$	$\nu_{ur}$	$\psi (^{\circ})$	$\phi (^{\circ})$
۰,۹	۰,۳۸۴	۱۰۰	۰,۳۵	۲	۳۸

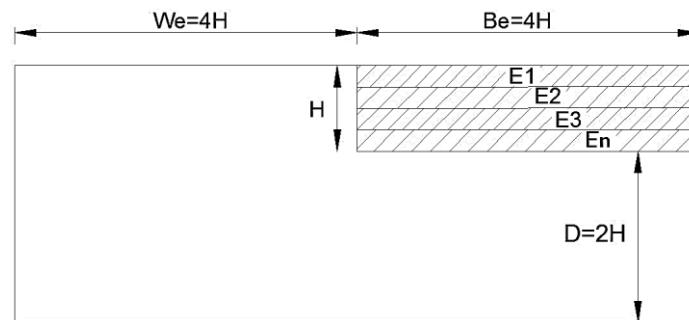
جدول (۲): مشخصات میخ خاک

ضریب پواسون $\nu$	مدول الاستیک معادل $E_{eq} (Gpa)$	مدول الاستیک دوغاب تزریقی $E_g (Gpa)$	مدول الاستیک میلگرد $E_n (Gpa)$	قطر چال $D_{DH} (mm)$	قطر میلگرد $d (mm)$
۰,۲	۳۸,۴۳	۲۰	۲۰۰	۱۰۰	۳۲

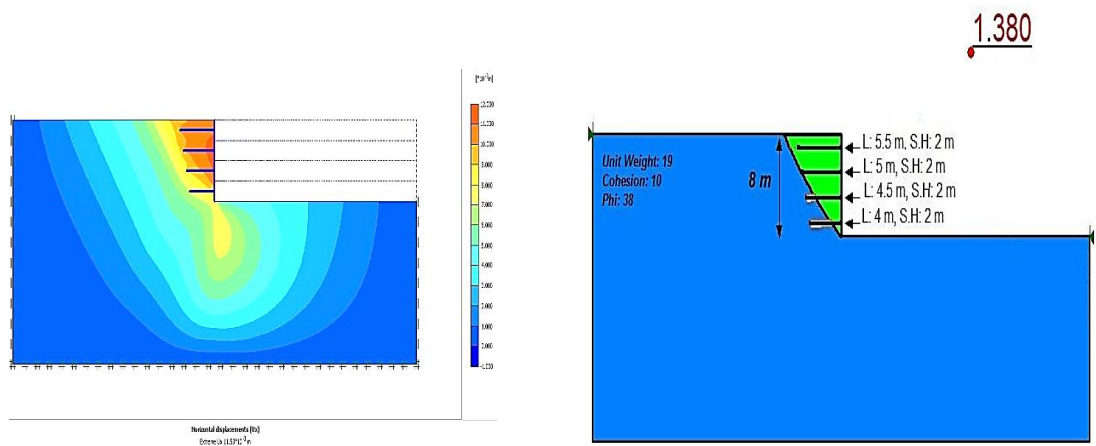
جدول (۳): مشخصات پوشش بتن پاششی

سختی محوری $EA (N/m)$	مقاومت خمشی $EI (N.m)$	ضریب پواسون $\nu$	مدول الاستیک $E_s (Gpa)$	ضخامت پوشش $t (mm)$
$5 \times 10^9$	$4,17 \times 10^6$	۰,۳	۵۰	۱۰۰

بر اساس توصیه‌های بولتن ۲۵ برنامه Plaxis (ساین و بابو و Geostudio و تغییر شکل افقی در آخرین مرحله Plaxis 2D به صورت شکل (۴) در نظر گرفته می‌شود. در خاک‌برداری در برنامه Plaxis 2D مشاهده می‌گردد.



شکل (۴): هندسه کلی مدل دوبعدی به همراه شرایط مرزی و مراحل خاک‌برداری در برنامه Plaxis 2D

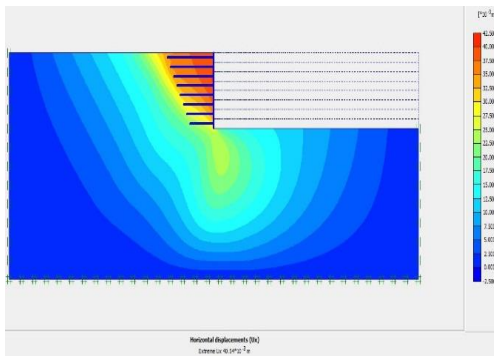


شکل (۶): کانتور تغییر شکل افقی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸ متر در آخرین مرحله خاک‌برداری

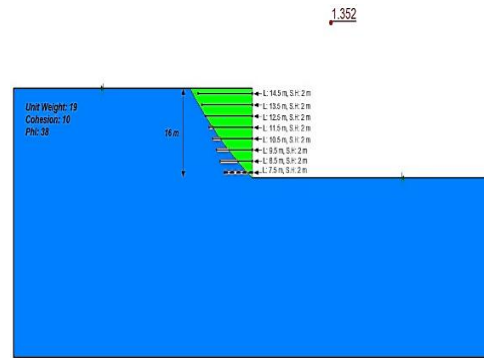
شکل (۵): سطح لغزش بحرانی و آرایش میخ خاک در دیوار به

ارتفاع ۸ متر در برنامه Geostudio

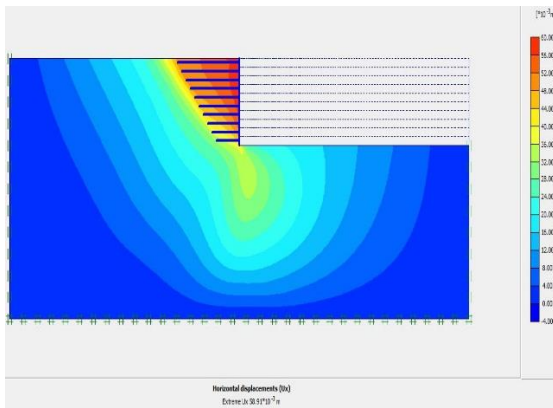
1.380



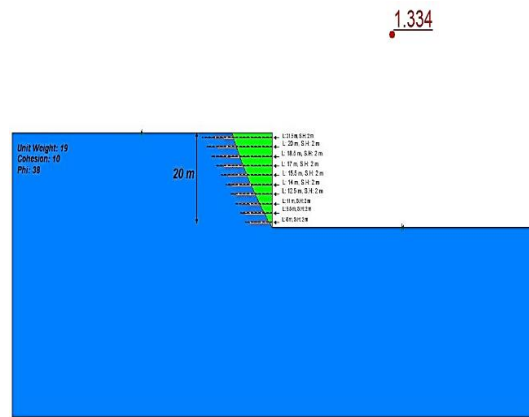
شکل (۸): کانتور تغییر شکل افقی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۱۶ متر در آخرین مرحله خاک برداری



شکل (۷): سطح لغزش بحرانی و آرایش میخ خاک در دیوار به ارتفاع ۱۶ متر در برنامه Geostudio



شکل (۱۰): کانتور تغییر شکل افقی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۲۰ متر در آخرین مرحله خاک برداری



شکل (۹): سطح لغزش بحرانی و آرایش میخ خاک در دیوار به ارتفاع ۲۰ متر در برنامه Geostudio

برای هر المان و همچنین آرایش میخ خاکها در عمق دیواره و فاصله بین میخ خاکها و زاویه میخ خاکها نسبت به افق اشاره کرد.

#### مدل سازی سه بعدی

هدف از مدل سازی سه بعدی دیوار میخکوبی شده بررسی اثر هندسه دیوار میخکوبی شده بر روی تغییر شکلها است. پس دیوار میخکوبی شده با هندسه گود مستطیلی مطابق شکل (۱۲) مورد بررسی واقع شده است و اثر طول  $L$  بر روی تغییر شکل مقطع بحرانی ABCDE بررسی شده است. همانطور که قبلاً اشاره شده جهت مدل سازی سه بعدی از نرم افزار Plaxis 3D Foundation استفاده شده است.

مدل رفتاری خاک به صورت خاک سخت شونده است و مش بندی توده خاک به صورت منشور قائم ۱۵ گره ای است. جهت مدل سازی میخ خاک از المان تیر (Beam) که دارای سختی محوری و سختی خمشی است، استفاده شده و

تغییر شکل افقی و نشست سطح زمین در سه دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸، ۱۶ و ۲۰ متری به صورت شکل ۱۱ است. با توجه به نمودارها و اشکال فوق (تغییر شکل افقی و نشست) مشاهده می شود که برخلاف ادبیات فنی تغییرهای ماکزیمم در تاج رخ نداده است.

عوامل مختلفی بر روی مقادیر تغییر شکل و الگوی تغییر شکل دیوار میخکوبی شده مؤثر است از آن جمله می توان دو علت اصلی که توسط لیما و همکاران ذکر شده است را اشاره نمود (لیما<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۰۴):

(الف) شرایط مرزی

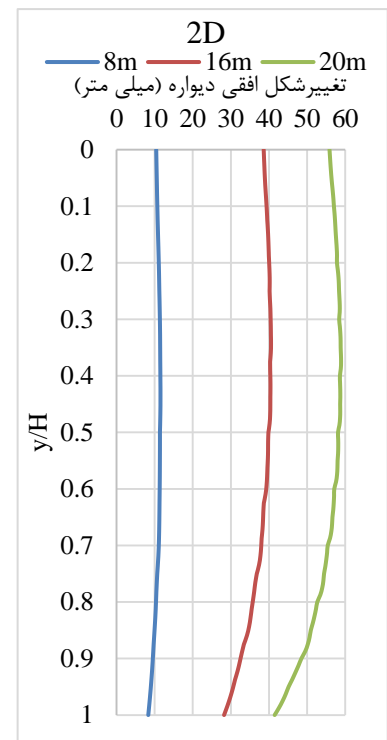
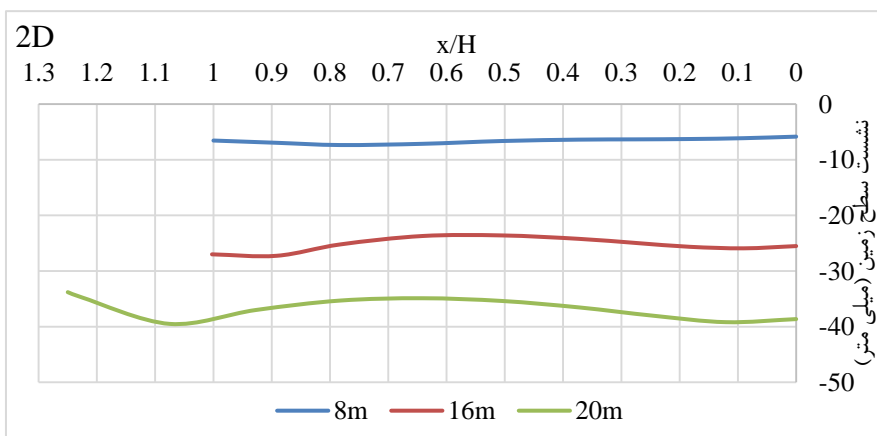
(ب) رفتار کلی صلب توده خاک

رفتار کلی توده خاک متأثر از عوامل مختلفی می باشد که از آن جمله می توان به مشخصات خاک، مشخصات میخ خاک و مشخصات پوشش بتن پاششی و مدل رفتاری انتخاب شده

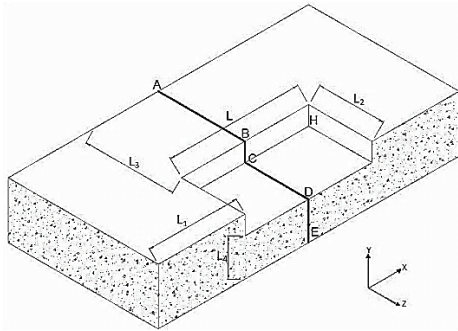
### صحت سنجی مدل سازی سه بعدی

همان طور که از تعریف رفتار کرنش صفحه‌ای مشخص است، چنانچه بعد سوم سازه مورد نظر (در راستای X مطابق شکل ۱۳) دارای طول بسیار بلندی نسبت به سایر ابعاد باشد، انتظار خواهیم داشت که کرنش در راستای سوم (X) ناچیز و برابر صفر باشد. پس قادر خواهیم بود تا رفتار کلی سازه را با رفتار دوبعدی مقطعی از آن مورد بررسی قرار دهیم. نمونه‌ای از این نوع رفتار را می‌توان در سدهای خاکی و یا شیروانی‌های طویل شاهد بود.

مش بندی این المان شامل سه گره می‌باشد و هر گره دارای شش درجه آزادی است. پوشش بتن پاششی به کمک المان دیوار (Wall) که دارای سختی خمشی در صفحه خود است، مدل شده است. مش بندی المان سازه‌ای دیوار به صورت المان صفحه‌ای ۸ گره می‌باشد و هر گره دارای شش درجه آزادی است. مشخصات خاک و میخ‌خاک و پوشش بتن پاششی در مدل سازی سه بعدی بر اساس جداول ۱، ۲ و ۳ می‌باشد.

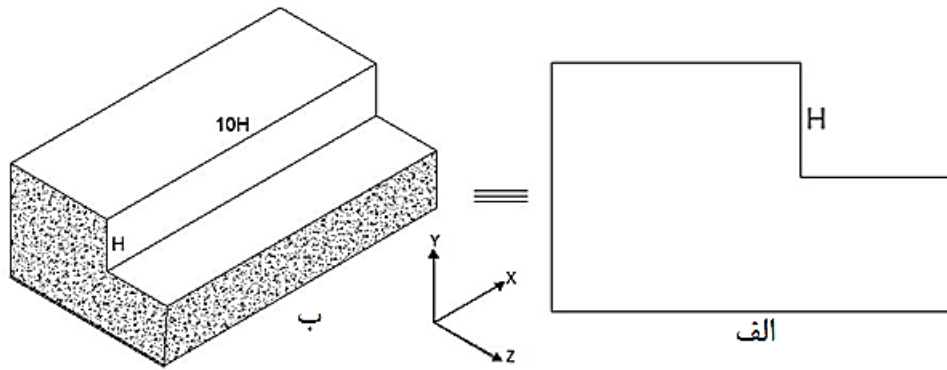


شکل (۱۱): تغییر شکل افقی و نشست سطح زمین در مدل دوبعدی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸، ۱۶ و ۲۰ متر

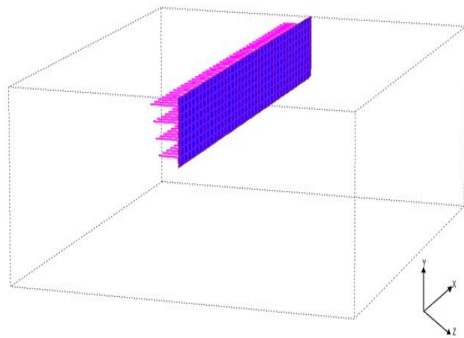


شکل (۱۲): نمای سه بعدی دیوار میخکوبی شده به طول  $L$  در گودبرداری با هندسه مستطیلی و مقطع بحرانی  $ABCDE$

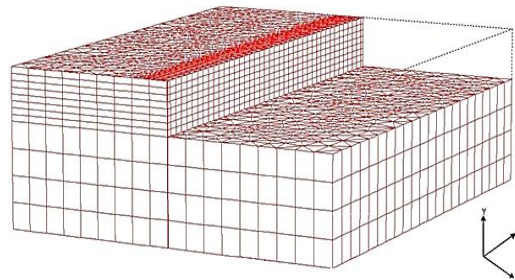
جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی سه‌بعدی، با توجه به تعریف رفتار کرنش صفحه‌ای، به مقایسه نتایج حاصل از مدل دوبعدی در دیوار میخکوبی شده به عمق ۸ متر و ۱۶ متر با مدل سه‌بعدی طویل با طول  $10H$  در راستای بعد سوم (مطابق شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶) می‌پردازیم. در این مدل‌سازی، مقطع مدل سه‌بعدی مورد بحث متناظر با مدل دوبعدی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جداره جانبی مدل سه‌بعدی به صورت غلظکی است و تنها در جهت عمود بر جداره محدودیت حرکتی دارد. کف مدل نیز در تمامی جهات بسته شده است.



شکل (۱۳): اصل روش کرنش صفحه‌ای برای مدل‌سازی سازه‌های طویل (الف) - مدل مقطع دوبعدی کرنش صفحه‌ای (ب) - مدل سه‌بعدی طویل



شکل (۱۵): نمایش میخ‌خاک و پوشش بتن پاششی مدل سه‌بعدی طویل



شکل (۱۴): مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده در آخرین مرحله خاک‌برداری دیوار میخکوبی شده ۸ متری

### ساده‌سازی مدل‌سازی سه‌بعدی

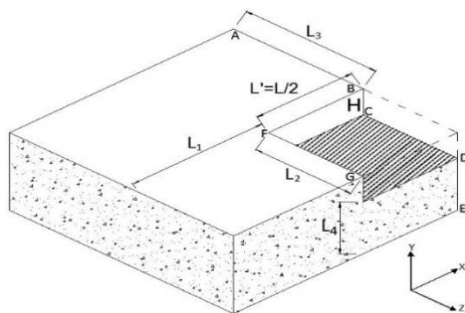
تحلیل‌های سه‌بعدی به علت ماهیت مطالعه حاضر و همچنین مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده در مقیاس واقعی، دارای حجم بالایی است که موجب طولانی شدن روند مدل‌سازی و زمان تحلیل می‌شود. پس در راستای ساده‌سازی و کاهش هزینه زمانی، در ادامه به بررسی

حداکثر اختلاف در تغییر شکل‌ها حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی مطابق شکل ۱۷ به حدود ۶ درصد می‌رسد و رفتار کلی تغییر شکل افقی (جانبی) و نشست در کل انطباق مناسبی با یکدیگر داشته و قابل قبول است. نسبت  $\frac{Z}{H}$  در واقع نسبت فاصله از تاج دیواره بر ارتفاع دیوار میخکوبی شده را نشان می‌دهد و نسبت  $\frac{y}{H}$  بیان‌کننده نسبت عمق از تاج نسبت به ارتفاع دیوار میخکوبی شده می‌باشد.



### بررسی اثر دیواره مجاور به طول $L_2$

از آنجایی که هدف اصلی از مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده در گودبرداری با هندسه مستطیلی، بررسی تغییر شکل‌ها در مقطع بحرانی دیوار طویل به طول  $L$  است. پس رفتار دیواره FG به طول  $L_2$  در شکل ۱۸ موضوع مورد بررسی در این تحقیق نیست؛ بنابراین جهت کاهش هزینه زمانی می‌توان با استفاده از ابزار Line Fixity در نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation دیواره گودبرداری شده به طول  $L_2$  را در حین مراحل خاک‌برداری و مراحل تحلیل در راستای X در برابر حرکت جانبی محدود نمود و از مدل‌سازی میخ‌خاک‌ها و پوشش بتن پاششی در این ناحیه از مدل صرف‌نظر کرد. ولی اعمال این محدودیت نیاز به بررسی و صحت‌سنجی دارد. پس در ادامه به بررسی مدل نیمه دیوار میخکوبی شده و مدل نیمه دیوار میخکوبی شده همراه با دیواره مجاور محدود شده (مدل نیمه محدود)، پرداخته شده است. مدل Fh-KH بیانگر مدل نیمه محدود دیوار میخکوبی شده با گودبرداری مستطیلی با طول دیواره  $L' = \frac{L}{2} = \frac{KH}{2}$  می‌باشد. مقایسه نتایج تغییر شکل افقی در مقطع بحرانی ABCDE در مدل نیمه و مدل نیمه محدود در شکل (۱۹-ب) ارائه شده است.



شکل (۱۸): نمای ۳ بعدی از مدل نیمه دیوار میخکوبی شده

$$L' = \frac{L}{2} = \frac{KH}{2}$$

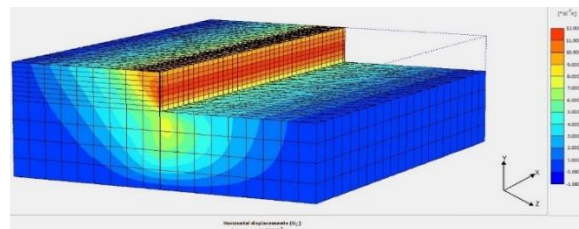
روش‌های مختلف کاهش حجم مدل‌سازی پرداخته شده است.

### استفاده از تقارن مدل

مدل سه‌بعدی دارای تقارن نسبت به صفحه ZY مقطع میانی (صفحه ABCDE) می‌باشد، پس می‌توان به جای مدل‌سازی کل مدل تنها نیمی از آن را مطابق شکل ۱۸ مدل نمود. جهت صحت‌سنجی نتایج این ساده‌سازی مجموعه‌ای از مدل‌های ترانشه قائم میخکوبی شده به ارتفاع ۸ متر ابتدا به صورت کامل و سپس به صورت مدل نیمه بررسی شده است. مدل P-KH بیانگر مدل کامل دیوار میخکوبی شده با طول دیواره  $L=KH$  است.

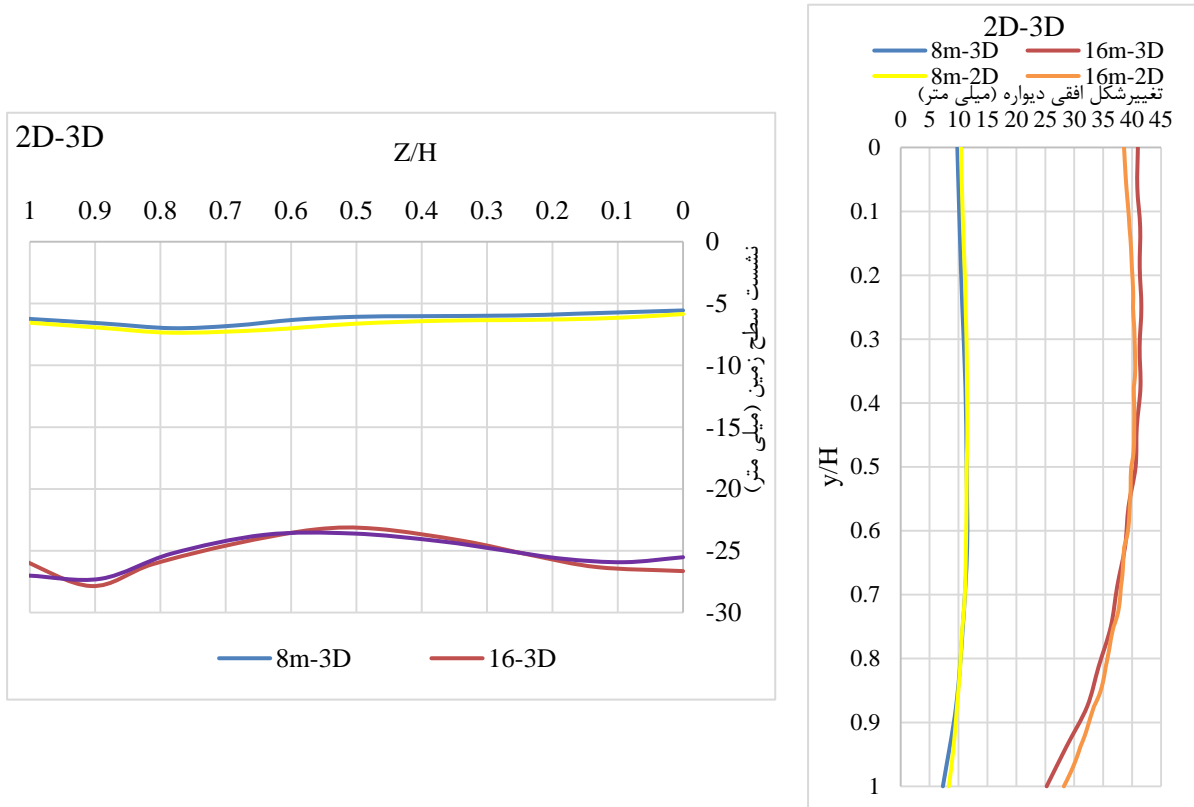
مدل h-KH بیانگر مدل نیمه دیوار میخکوبی شده با طول دیواره  $L' = \frac{L}{2} = \frac{KH}{2}$  است.

همان‌طور که از شکل (۱۹-الف) نشان داده شده مطابق با انتظار، نتایج حاصل از مدل کامل و مدل نیمه در مقطع بحرانی ABCDE، انطباق قابل‌قبولی با یکدیگر دارند و پس می‌توان به جای مدل‌سازی کل مدل به صورت کامل، تنها نیمی از مدل را مدنظر قرار داد تا بدین صورت در زمان مدل‌سازی و زمان تحلیل کاهش چشم‌گیری ایجاد نمود.



شکل (۱۶): کانتور تغییر شکل افقی در راستای Z در دیوار میخکوبی شده

به ارتفاع ۸ متر



شکل (۱۷): مقایسه تغییر شکل افقی (راست) و نشست سطح زمین (چپ) در مدل دوبعدی و سه‌بعدی طویل در دیوار میخ‌کوبی شده ۸ و ۱۶ متری

میخ‌کوبی شده به ارتفاع ۱۶ متر و به‌صورت مدل نیمه محدود (Fh-6H-16m) استفاده شده است.

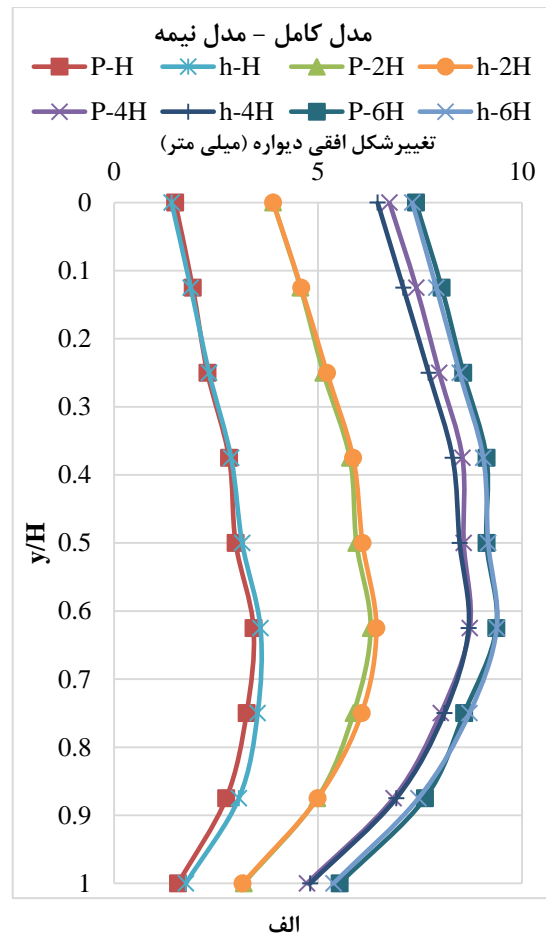
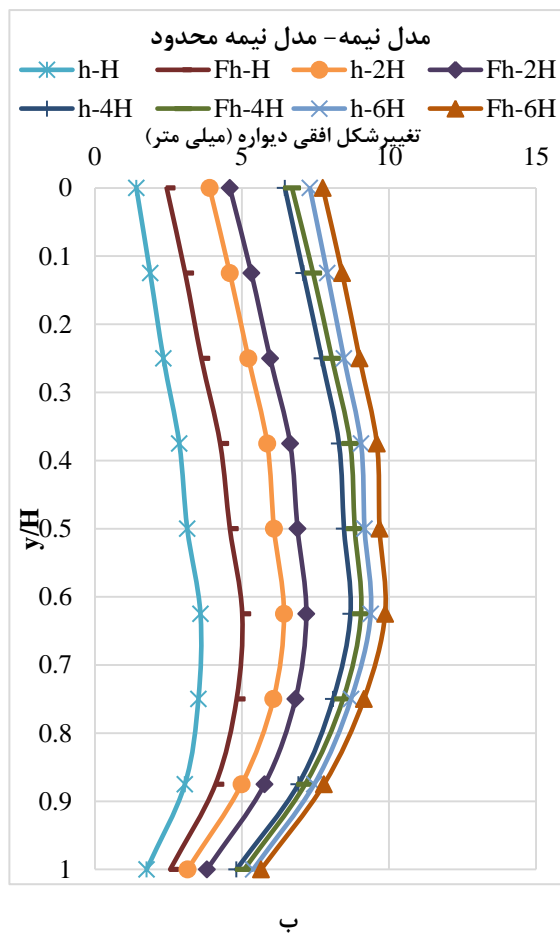
در بررسی شرایط مرزی، هریک از ابعاد  $L_1, L_2, L_3$  به‌صورت جداگانه و با طول‌های  $H, 2H, 3H, 4H, 5H, 6H, 7H$  و بعد  $L_4$  با طول‌های  $H, 1.5H, 2H, 2.5H, 3H, 4H$  مدنظر قرار گرفته است و تغییرات تغییر شکل افقی در راستای  $Z$  در مقطع بحرانی و نشست متناظر همان مقطع در سطح زمین، در اشکال ۲۰ تا ۲۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات طول  $L_1$  و  $L_4$  اثر چندانی بر روی تغییر شکل جانبی در راستای  $Z$  و نشست سطح زمین در مقطع بحرانی ندارد. از سوی دیگر حداقل طول  $L_2$  و  $L_3$  جهت کاهش اثر مرز بر روی نتایج مقطع بحرانی برابر با  $3H$  می‌باشد.

همان‌طور که از شکل (۱۹-ب) مشخص است چنانچه طول  $L'_1$  کوچک باشد ( $0.5H, H$ )، تأثیر اعمال محدودیت حرکتی محسوس می‌باشد و اختلاف بین نتایج حدود ۴۳ درصد است ولی چنانچه فاصله مقطع بحرانی مورد بررسی از دیواره FG به اندازه کافی بزرگ باشد ( $2H, 3H, \dots$ ) میزان این اختلاف کاهش یافته و قابل قبول است. اختلاف بین نتایج خروجی از دو نوع مدل‌سازی برای طول‌های  $L'_1 = 2H, 3H$  به حدود ۶ درصد می‌رسد که با توجه به اینکه زمان تحلیل و مدل‌سازی به‌صورت قابل‌توجهی کاهش می‌یابد می‌توان از این اختلاف صرف‌نظر نمود.

#### بررسی شرایط مرزی مدل سه‌بعدی

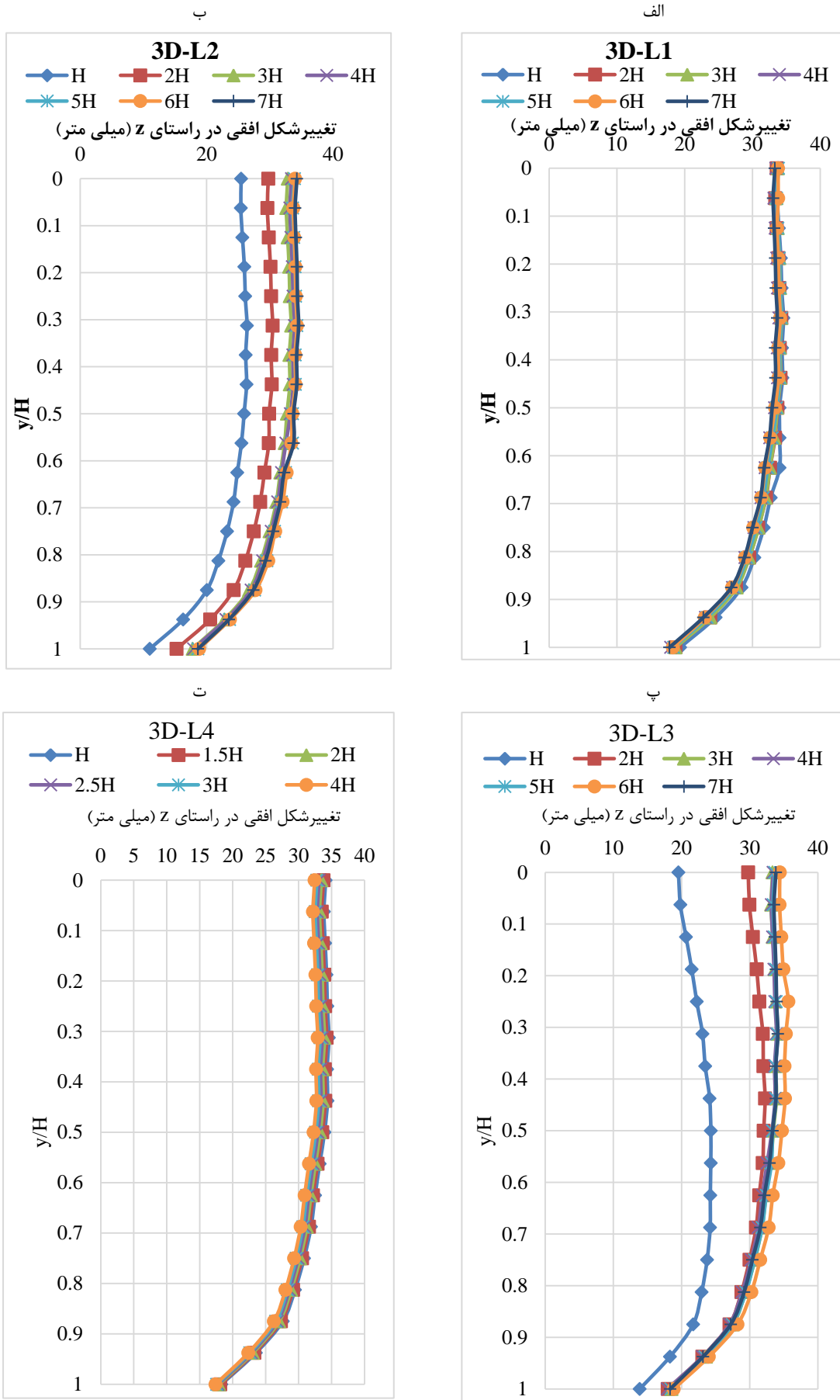
جهت بررسی شرایط مرزی مطابق شکل ۱۸ و یافتن حداقل طول‌های  $L_1, L_2, L_3, L_4$  جهت کاهش اثرات مرزها بر روی نتایج تغییر شکل مقطع بحرانی ABCDE، از مدل دیوار



شکل (۱۹): مقایسه تغییر شکل افقی در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده ۸ متری  
 الف- مدل کامل و مدل نیمه (ب) - مدل نیمه و مدل نیمه محدود

مدل کامل از مدل نیمه محدود استفاده کرد و از سوی دیگر در مدل‌سازی‌های صورت گرفته جهت کاهش اثرات مرزها بر روی نتایج، حداقل طول مرزها  $L_1, L_2, L_3$  برابر با  $4H$  و حداقل طول مرزها  $L_4$  نیز برابر با  $2H$  اعمال شده است. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی سه دیوار به ارتفاع ۸، ۱۶ و ۲۰ به همراه نتایج حاصل در مقطع بحرانی مدل سه‌بعدی نیمه محدود با حداقل شرایط مرزی و با طول‌های مختلف  $L$  ارائه شده است.

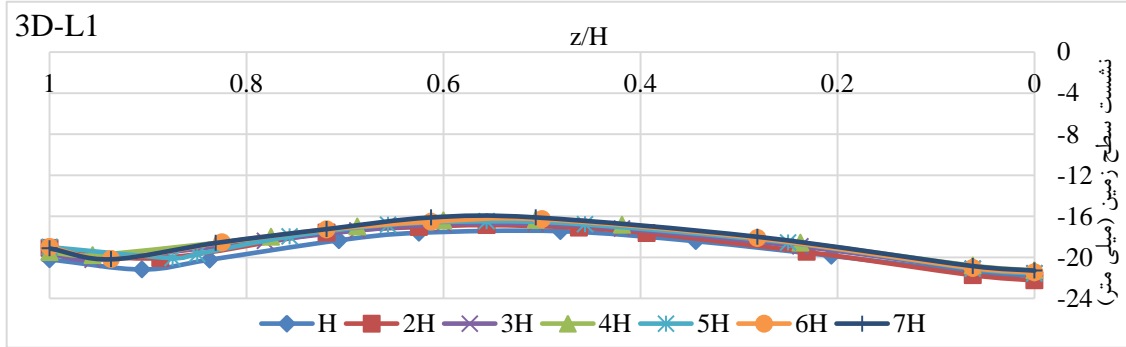
**بررسی اثر طول  $L$  و مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و نتایج تحلیل سه‌بعدی در مقطع بحرانی**  
 در راستای بررسی طول  $L$  در مدل‌های سه‌بعدی، به دنبال یافتن طول بحرانی هستیم. طول بحرانی طولی است که چنانچه بعد  $L$  مدل سه‌بعدی بیشتر از آن مقدار باشد، نتایج حاصل از تحلیل عددی سه‌بعدی در مقطع بحرانی میانی ABCDE با نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی کرنش صفحه‌ای دارای تطابق قابل قبولی است. پس در مدل‌سازی‌های صورت گرفته مدل‌های سه‌بعدی با طول‌های مختلف  $L=4H, 6H, 8H, 10H, 12H, 14H, 16H$  مدنظر قرار گرفته است و همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد می‌توان به‌جای



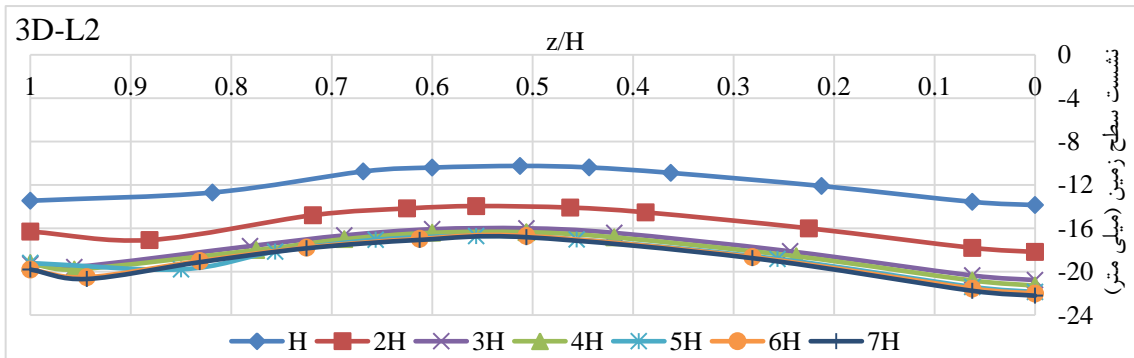
شکل (۲۰): تغییر شکل افقی در راستای Z در مقطع بحرانی دیوار میخ‌کوبی شده بر اساس الف) - تغییرات طول مرز  $L_1$  (ب) -

تغییرات طول مرز  $L_2$  (پ) - تغییرات طول مرز  $L_3$  (ت) - تغییرات طول مرز  $L_4$

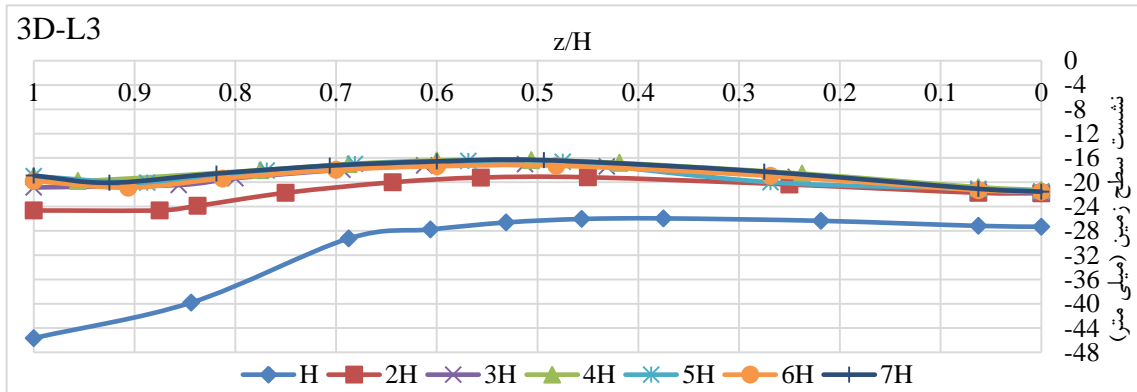
الف



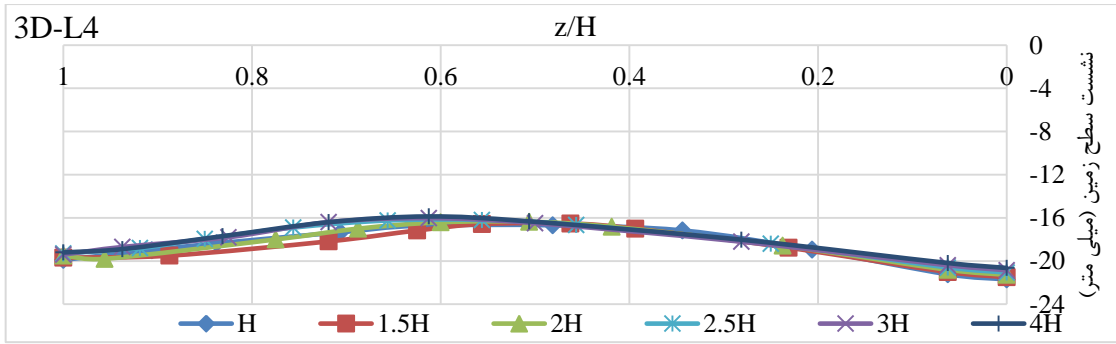
ب



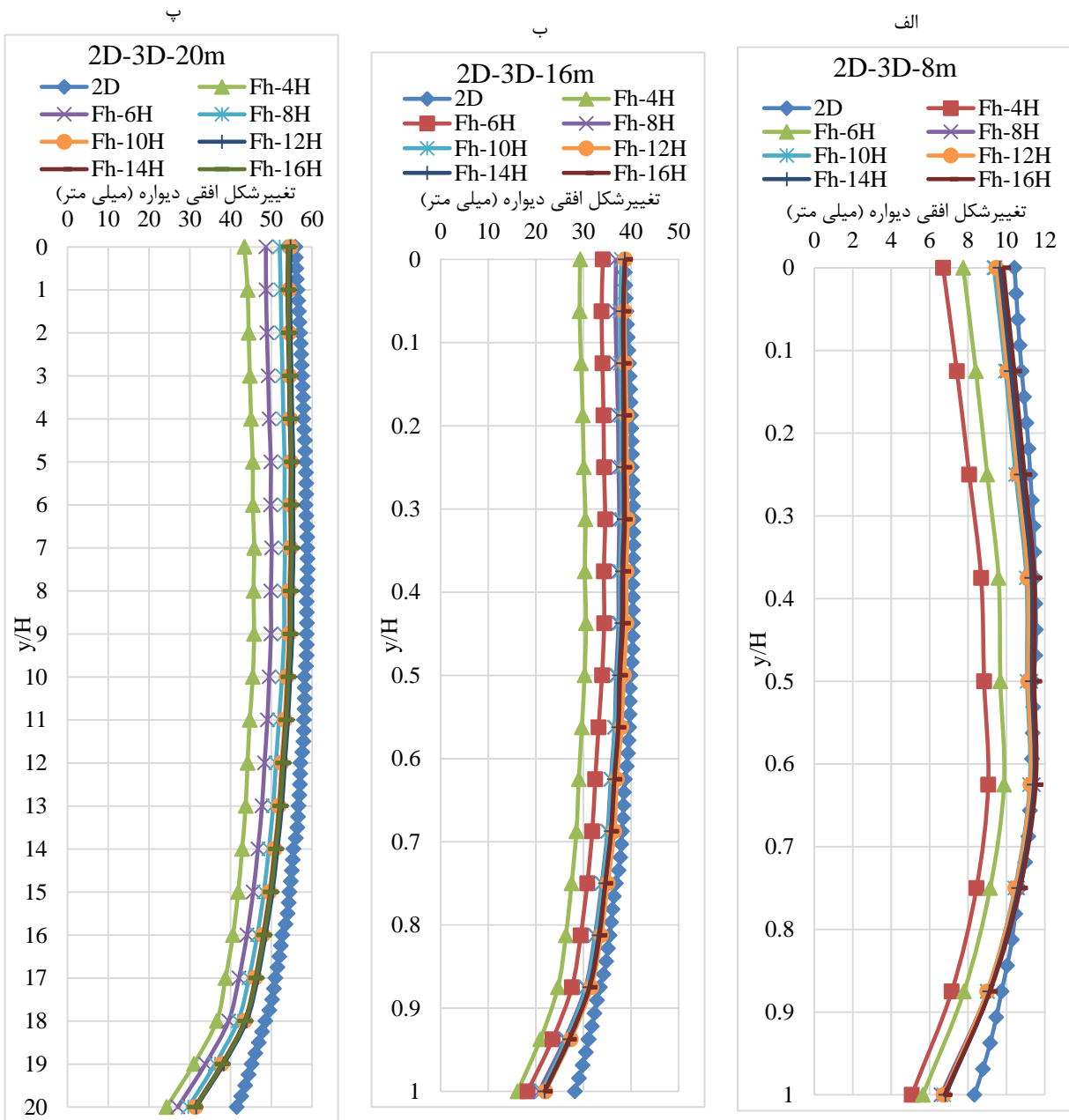
پ



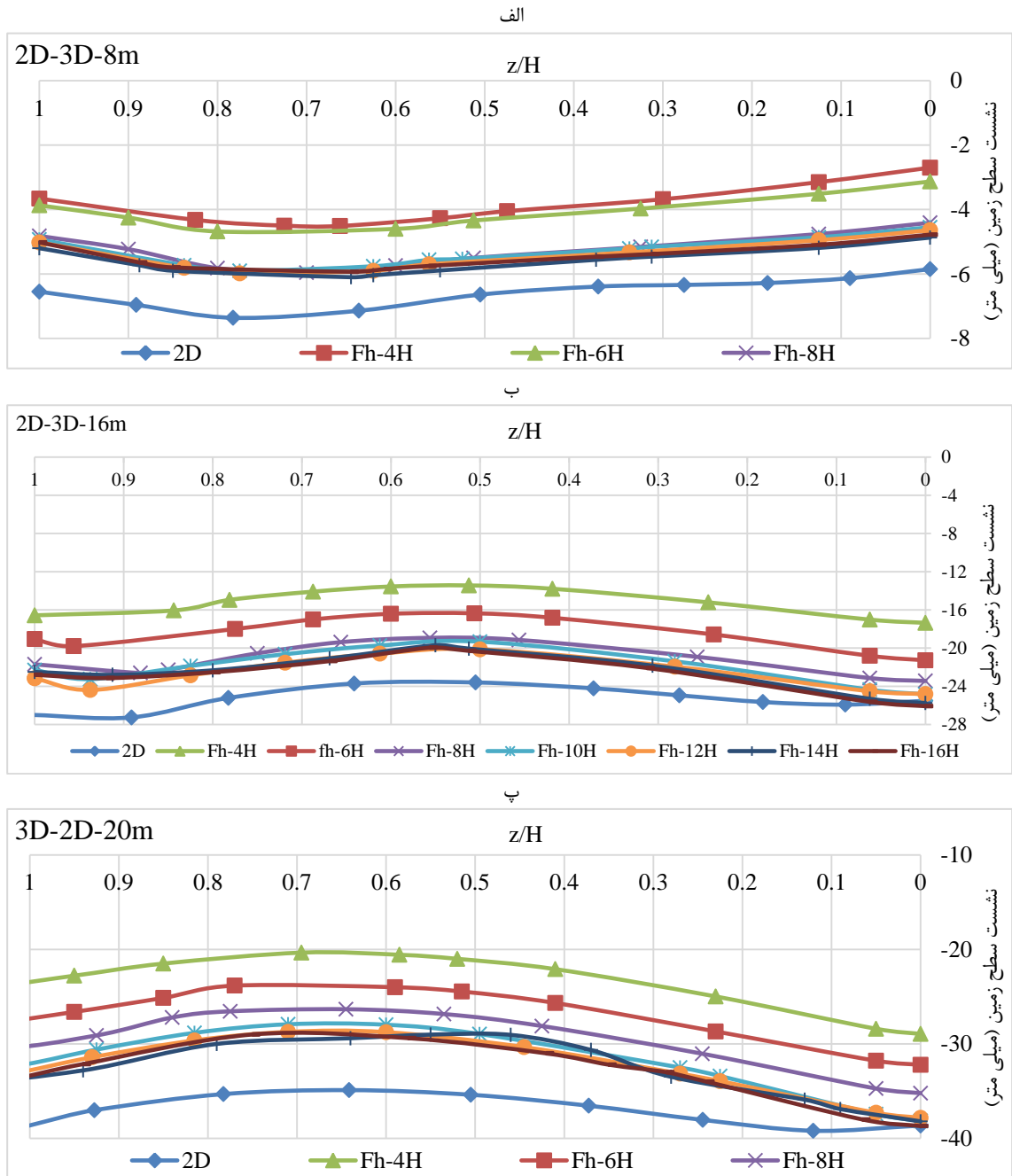
شکل (۲۱): نشست سطح زمین در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده بر اساس الف) - تغییرات طول مرز  $L_1$  (ب) - تغییرات طول مرز  $L_2$  (پ) - تغییرات طول مرز  $L_3$



شکل (۲۲): نشست سطح زمین در مقطع بحرانی دیوار میخ‌کوبی شده بر اساس تغییرات طول مرز  $L_4$



شکل (۲۳): مقایسه تغییر شکل افقی در مدل دوبعدی و سه‌بعدی دیوار میخ‌کوبی شده با طول‌های مختلف  $L$  (الف) - دیوار ۸ متری (ب) - دیوار ۱۶ متری (پ) - دیوار ۲۰ متری



شکل (۲۴): مقایسه نشست سطح زمین در مدل دوبعدی و سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده با طول‌های مختلف  $L$  (الف) - دیوار ۸ متری (ب) - دیوار ۱۶ متری (پ) - دیوار ۲۰ متری

## نتیجه‌گیری

- مطالعه و بررسی بعد  $L$  در دیوار میخ‌کوبی شده با هندسه گود مستطیلی، نشان‌دهنده اثرات محدودکننده دیوارهای مجاور در مدل سه‌بعدی است.
- طبق انتظار مقطع بحرانی در دیوار به طول  $L$ ، در مقطع میانی این دیواره واقع شده و اثر محدودکننده دیوارهای مجاور در گوشه‌های درونی ناحیه گودبرداری شده بیشتر است و هر چه به بخش میانی دیوار با طول  $L$  نزدیک‌تر می‌شویم (مقطع بحرانی ABCDE) از اثرات محدودکنندگی کاسته شده، به عبارت دیگر دیوارهای مجاور به صورت یک تکیه‌گاه عمل می‌کنند که مطابق با مفهوم فیزیکی هندسه گود نیز می‌باشد.
- نتایج تغییر شکل جانبی در مدل سه‌بعدی دیوار میخ‌کوبی شده با طول  $L=4H$  به طور متوسط حدود ۳۰ درصد کمتر از مدل دوبعدی است و برای مقادیر  $L$  بزرگ‌تر از  $10H$  این اختلاف به حداقل ممکن رسیده است. اختلاف اندک مشاهده شده را نیز می‌توان به ماهیت سه‌بعدی دیوار میخ‌کوبی شده و اثرات محدودکننده جداره‌های مجاور مرتبط دانست. پس می‌توان این‌گونه بیان داشت که چنانچه طول دیوار  $L$  کمتر از  $10H$  باشد اثرات محدودکننده وجود دیوارهای مجاور باعث کاهش تغییر شکل افقی و
- نشست سطح زمین در مقطع بحرانی می‌شود و چنانچه تحلیل‌های دوبعدی مدنظر قرار گیرد میزان نشست و تغییر شکل دست‌بالا (محافظه‌کارانه) محاسبه می‌شود.
- انطباق نتایج حاصل از تحلیل مدل کامل دیوار میخ‌کوبی شده و مدل نیمه دیوار میخ‌کوبی شده بیانگر این واقعیت است که می‌توان به صورت مناسبی از خاصیت تقارن مدل اصلی جهت ساده‌سازی و کاهش المان‌های مدل شده و کاهش زمان تحلیل بهره برد.
- مدل‌سازی سه‌بعدی دیوار میخ‌کوبی شده طویل (با بعد سوم بلند در راستای  $X$ ) بیانگر این واقعیت است که تحلیل دوبعدی به صورت مناسبی می‌تواند جهت تحلیل سازه‌هایی که دارای بعد سوم طویل هستند مورداستفاده قرار گیرد اما در صورتی که بعد سوم محدود باشد نتایج تحلیل سه‌بعدی با نتایج تحلیل دوبعدی تطابق نخواهد داشت.
- خوشبختانه از منظر میزان تغییر شکل دیواره گود و پروفیل نشست سطح بالای گود، نتایج تحلیل دوبعدی محافظه‌کارانه‌تر از تحلیل سه‌بعدی است. پس از منظر عملکرد و ایمنی گودبرداری استفاده از تحلیل‌های دوبعدی ارجح اما از دیدگاه اقتصادی، انجام تحلیل‌های دقیق سه‌بعدی و لحاظ نمودن اثرات محدودکننده دیواره‌های مجاور اولویت دارد.



## مراجع

- 11- Lazarte, C., Elias, V., Espinoza, R., & Sabatini, P. (2003). Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls. Federal Highway Administration, Washington, DC .
- 12- Lima, A., Gerscovich, D., & Sayão, A. (2004). Considerations on the soil nailing technique for stabilizing excavated slopes. *stress*, 10, 0.69 .
- 13- Lima, A. P., Sayão, A., & Gerscovich, D. M. S. (2003). Considerations on the Numerical Modeling of Nailed Soil Excavations. Paper presented at the Proc. of the 4rd Int. Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering.
- 14- Mittal, S. (2006). Soil Nailing Application in erosion control—an experimental study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(3), 675-688 .
- 15- Ng, C., & Lee, G. (2002). A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces. *Computers and Geotechnics*, 29(8), 673-697 .
- 16- Schlosser, F. (1991). The multicriteria theory in soil nailing. *Ground Engineering*, 24.
- 17- Singh, V. P., & Babu, G. S. (2010). 2D numerical simulations of soil nail walls. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 299-309 .
- 18- Smith, I., & Su, N. (1997). Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(9), 583-597 .
- 19- Taib, S. (2010). A Review of Soil Nailing Design Approaches. *UNIMAS E-Journal of Civil Engineering*
- 20- Yang, M. Z., & Drumm, E. C. (2000). Numerical analysis of the load transfer and deformation in a soil nailed slope. *Geotechnical special publication*, 102-116 .
- 21- Zhang, M., Song, E., & Chen, Z. (1999). Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM). *Computers and Geotechnics*, 25(4), 191-204 .
- 22- Zhou, W.-H., & Yin, J.-H. (2008). A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 479-488 .
- 1- Babu, G., & Singh, V. P. (2009). Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D. *Plaxis Bulletin Spring issue*, 16-21 .
- 2- Babu, G. S., Murthy, B. S., & Srinivas, A. (2002). Analysis of construction factors influencing the behaviour of soil-nailed earth retaining walls. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 6(3), 137-143 .
- 3- Brinkgreve, R., & Vermeer, P. (2002). *Plaxis users manual*. Balkema, Rotterdam (The Neetherlands).
- 4- Chu, L.-M., & Yin, J.-H. (2005). Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1097-1107 .
- 5- Durgunoglu, H., Kulac, H., & Arkun, B. (2003). A Deep Retaining System Construction with Soil Nailing in Soft Rocks in Istanbul, Turkey, SARA-2003 Conference, June 22-26: MIT Cambridge, USA.
- 6- Durgunoğlu, H. T., Keskin, H. B., Kulaç, H. F., İkiz, S., & Karadayılar, T. (2007). Performance of very deep temporary soil nailed walls in Istanbul .
- 7- Fan, C.-C., & Luo, J.-H.(2008) .Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes. *Computers and Geotechnics*, 35(4), 585-599 .
- 8- Jewell, R., & Pedley, M. (1992). Analysis for soil reinforcement with bending stiffness. *Journal of geotechnical engineering*, 118(10), 1505-1521.
- 9- Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., & Elias, V. (1990). Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures. *Journal of geotechnical engineering*, 116(1), 54-72 .
- 10- Kim, Y., Lee, S., Jeong, S., & Kim, J. (2013). The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes. *Computers and Geotechnics*, 49, 253-263 .