نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال چهارم / شماره سیزدهم / تابستان ۱۳۹۶

Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant
4rd Year / No. 13 / March 2017

بررسی اثر محدودکنندگی دیوارهای مجاور ترانشهِ میخ‌کوبی شده بر رفتار آن با مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی

محسن صابر ماهانی*[۱]
مرتضی کشاورز[۲]

چکیده

تحلیل، طراحی و همچنین مطالعه پارامتریک رفتار دیوار میخکوبی‌شده، عموماً با استفاده از مدل‌های دوبعدی مبتنی بر فرضیات شرایط کرنش مسطح صورت می‌گیرد و اغلب بدون توجه به هندسه سه‌بعدی گودبرداری، نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی به شرایط واقعی سه‌بعدی تعمیم داده شده که این امر در بسیاری از مواقع منجر به ارائه طرح‌های ناایمن و در برخی موارد موجب ارائه طرح‌های محافظه‌کارانه و غیراقتصادی می‌شود. در مطالعه حاضر اثر محدودکنندگی دیوارهای مجاور ترانشه که عمود بر دیواره اصلی در کنج‌های گود قرارگرفته‌اند بر رفتار آن بررسی شده است. در این راستا، دیوار میخکوبی‌شده با هندسه گود مستطیلی به‌صورت سه‌بعدی و در مقیاس واقعی در برنامه پلکسیس سه‌بعدی[۳] مدل شده است و نتایج حاصل در مقطع بحرانی با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دوبعدی دیوار میخکوبی‌شده در برنامه پلکسیس دوبعدی[۴] مقایسه شده است. درواقع دیوارهای مجاور نقش تکیه‌گاه را ایفا کرده و بدین‌وسیله محدودیتی برای تغییرشکل دیواره میخکوبی شده می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرشکل‌های حاصل از تحلیل دوبعدی همواره بزرگ‌تر از نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی در مقطع بحرانی است و چنانچه طول دیواره اصلی (L) کمتر از 10H باشد میزان اثرات محدودکننده بیشتر است و درصورتی‌که L بزرگ‌تر از 10H گردد، نتایج تحلیل دوبعدی قابل‌تعمیم به شرایط سه‌بعدی است.

کلیدواژه‌ها

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

۱ *. استادیار و عضو هیئت‌علمی 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

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۸

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

مقدمه

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[1] 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[2] 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 جروسکویچ[3] ۲۰۰۴ و ۲۰۰۳)، (ساین و بابو[4] ۲۰۱۰)، (بابو، مورثی و سرینیواس[5] ۲۰۰۲)، (فن و لوو[6] 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، جئونگ[7] ۲۰۱۳)، (یانگ و درووم[8] ۲۰۰۰)، (ژانگ، سانگ و چن[9] ۱۹۹۹)، (اسمیت و سو[10] ۱۹۹۷). انجی و لی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، به بررسی اثر سختی سیستم میخکوبی در جبهه حفاری‌شده تونل بر میزان تغییرشکل‌ها پرداخته‌اند (انجی و لی[11] 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 ناایمن 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 به‌صورت 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 درنهایت منجر به طرحی ناایمن گردد.

در مطالعه حاضر جهت بررسی اثر یکی از جنبه‌های هندسه سه‌بعدی دیوار ترانشه‌ها بر روی تغییرشکل‌ها، دیوار میخکوبی شده با هندسه گود مستطیلی به‌صورت سه‌بعدی و 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 قرارگرفته‌اند بر رفتار آن مطالعه شده است. درواقع 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

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

(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 موهرکولمب و خاک سخت‌شونده استفاده می‌شود (بابو و ساین ۲۰۰۹). ساین و بابو در مطالعه خود به مقایسه نتایج حاصل از سه مدل رفتاری موهرکولمب و خاک سخت‌شونده و خاک سخت‌شونده با کرنش کوچک پرداخته‌اند (بابو و ساین ۲۰۱۰). در مطالعه حاضر برای بررسی رفتار دیوار میخکوبی شده از مدل رفتاری خاک سخت شونده استفاده می‌شود. جهت مدل‌سازی میخ‌خاک در برنامه Plaxis 2D می‌توان از دو المان Plate و Geogrid بهره برد (برینکگرو و ورمر[1] ۲۰۰۲). تفاوت میان این دو المان در سختی خمشی المان Plate است. مقاومت خمشی و برشی میخ‌خاک در دیوار میخکوبی‌شده توسط محققین زیادی مورد بررسی قرارگرفته 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[2] ۱۹۹۰). اسچلوزر 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 (اسچلوزر[3] ۱۹۹۱). در آیین‌نامه HA68 و FHWA نیز از اثر این دو عامل بر رفتار میخکوبی شده صرف‌نظر شده است (تایب[4] 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 بزرگ، حدود ۱۰٪ مقاومت بیرون کشیدگی را تأمین خواهد کرد (ژو و یین[5] ۲۰۰۸). در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی میخ‌خاک از المان Plate استفاده شده است و ازآنجایی‌که 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 به‌صورت الاستیک لحاظ شده است.

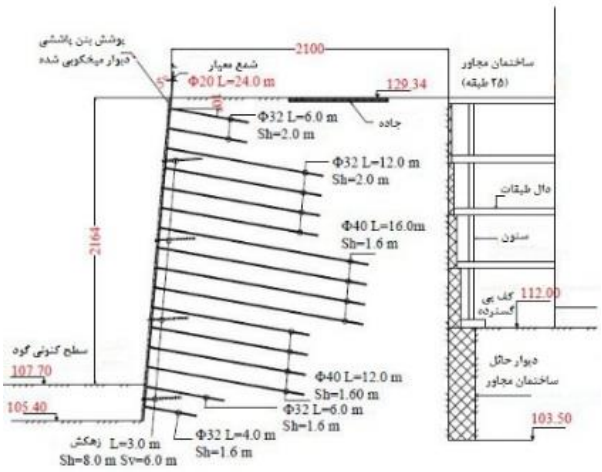
جهت مش‌بندی خاک در مدل‌های دوبعدی از المان مثلثی ۱۵ گره استفاده شده است. مش‌بندی المان Plate نیز بر اساس پیش‌فرض برنامه و به‌صورت المان تیر ۵ گره می‌باشد. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی تمامی مدل‌ها با ریزترین المان ممکن مدل شده است تا از عدم حساسیت نتایج به نوع مش‌بندی اطمینان حاصل گردد. در برنامه Plaxis بررسی اندرکنش بین خاک و سازه با کمک ابزار Interface امکان‌پذیر است. بر اساس مطالعه یین و چو می‌توان به‌درستی برای اغلب مدل‌سازی‌های دیوار میخکوبی شده از $R_{inter} = 1$ بهره برد (یین و چو[6] ۲۰۰۵). R_{inter} 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.

صحت سنجی نرم‌افزار Plaxis 2D

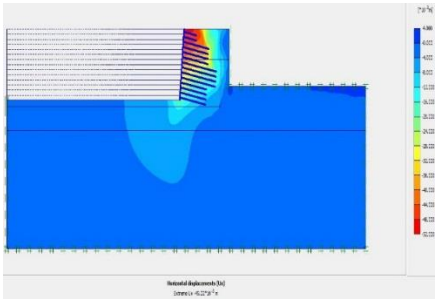
جهت بررسی صحتِ روش مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده در نرم‌افزار Plaxis 2D، با توجه به مطالعه صورت پذیرفته توسط دورگونوقلو و همکاران، به مدل‌سازی مقطع دیوار میخکوبی شده به عمق ۲۱ متر در محل قرارگیری انحراف سنج شماره ۹ در پروژه گودبرداری مرکز تجاری استانبول ترکیه پرداخته شده است (دورگونوقلو[7] و همکاران ۲۰۰۳ 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.

1. Brinkgreve & Vermeer
2. Juran, Baudrand, Farrag, & Elias
3. Schlosser
4. Taib
5. Zhou & Yin
6. Chu & Yin
7. Durgunoğlu

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



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



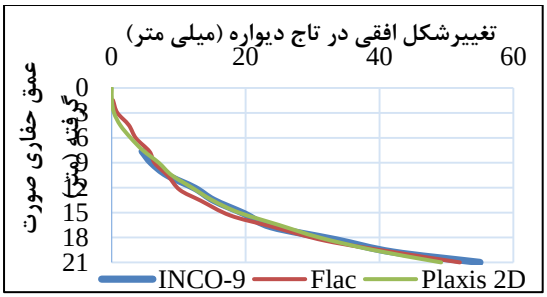
شکل (۲): کانتور تغییر شکل افقی در پایان تحلیل

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده 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 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) قابل‌مشاهده است.



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 پرداخته‌شده است. علت افقی درنظر 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 ارائه‌شده است (برینکگرو و ورمر[1] ۲۰۰۲).

1. Brinkgreve & Vermeer

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

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

$C(\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{m}^2})$	m	$\mathrm{E}_{\mathrm{ur}}^{\mathrm{ref}}(\mathrm{MPa})$	$\mathrm{E}_{\mathrm{oed}}^{\mathrm{ref}}(\mathrm{MPa})$	$\mathrm{E}_{50}^{\mathrm{ref}}(\mathrm{MPa})$	$\gamma\,(\frac{KN}{m^3})$
۱۰	۰,۵	۱۲۰	۴۰	۴۰	۱۹
$\mathrm{R}_{\mathrm{ref}}$	$\mathrm{K}_0^{\mathrm{NC}}$	$\mathrm{p}_{\mathrm{ref}}(\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{m}^2})$	ν_{ur}	$\psi(°)$	$\phi(°)$
۰,۹	۰,۳۸۴	۱۰۰	۰,۳۵	۲	۳۸

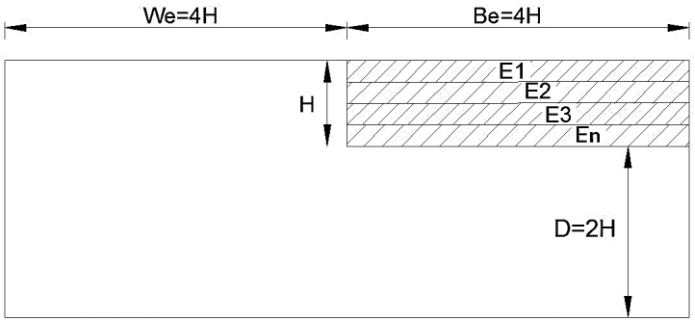
جدول (۲): مشخصات میخ‌خاک

ضریب پواسون υ	مدول الاستیک معادل $\mathrm{E}_{\mathrm{eq}}(\mathrm{Gpa})$	مدول الاستیک دوغاب تزریقی $\mathrm{E}_{\mathrm{g}}(\mathrm{Gpa})$	مدول الاستیک میلگرد $\mathrm{E}_{\mathrm{n}}(\mathrm{Gpa})$	قطر چال $\mathrm{D}_{DH}(\mathrm{mm})$	قطر میلگرد d(mm)
۰,۲	۳۸,۴۳	۲۰	۲۰۰	۱۰۰	۳۲

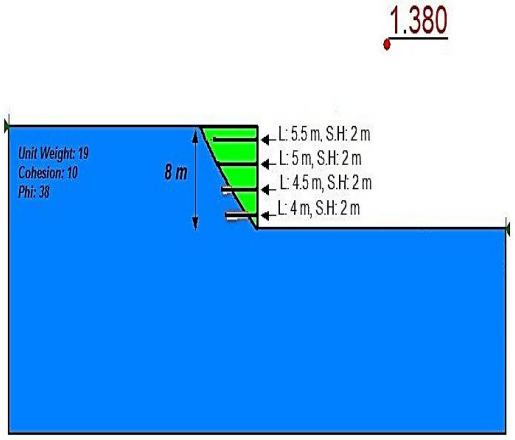
جدول (۳): مشخصات پوشش بتن پاششی

سختی محوری EA(N/m)	مقاومت خمشی EI(N.m)	ضریب پواسون υ	مدول الاستیک $\mathrm{E_s}$ (Gpa)	ضخامت پوشش t (mm)
۵×۱۰۹	۴,۱۷×۱۰۶	۰,۳	۵۰	۱۰۰

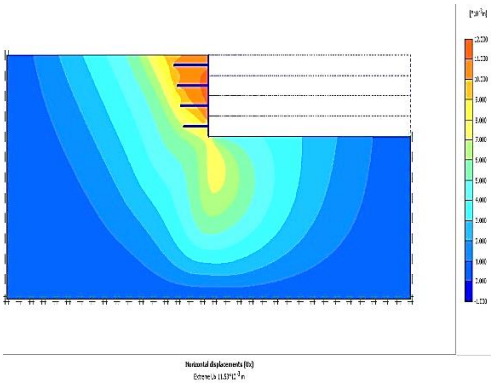
بر اساس توصیه‌های بولتن ۲۵ برنامه Plaxis (ساین و بابو ۲۰۰۹) و لیما و همکاران شرایط مرزی در مدل‌سازی برنامه Plaxis 2D به‌صورت شکل (۴) درنظر گرفته می‌شود. در اشکال ۵ تا ۱۰ آرایش میخ‌خاک حاصل از برنامه Geostudio و تغییر شکل افقی در آخرین مرحله خاک‌برداری در برنامه Plsxis 2D مشاهده می‌گردد.



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



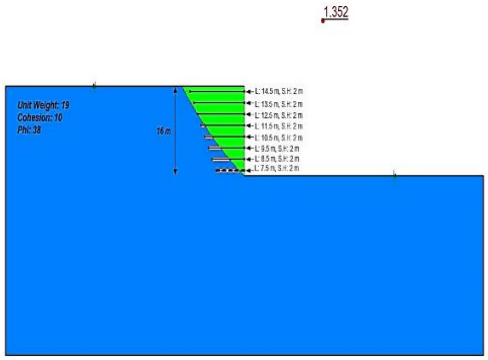
شکل (۵): سطح لغزش بحرانی و آرایش میخ‌خاک در دیوار به ارتفاع ۸ متر در برنامه Geostudio



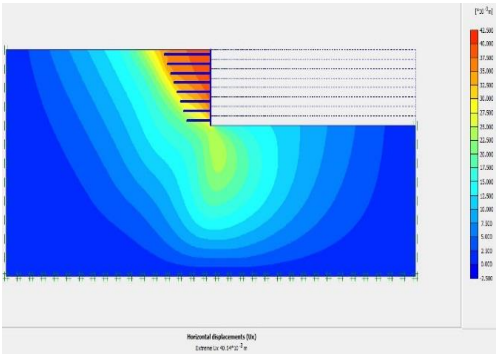
شکل (۶): کانتور تغییر شکل افقی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸ متر در آخرین مرحله خاک‌برداری

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

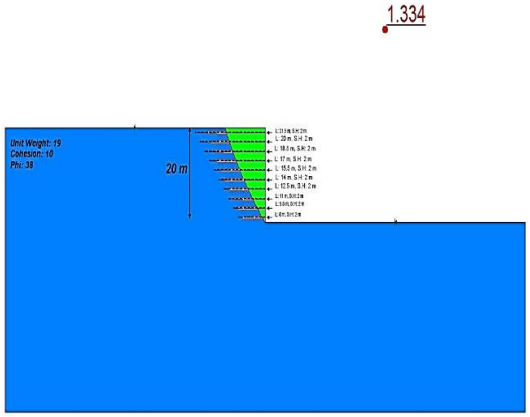
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



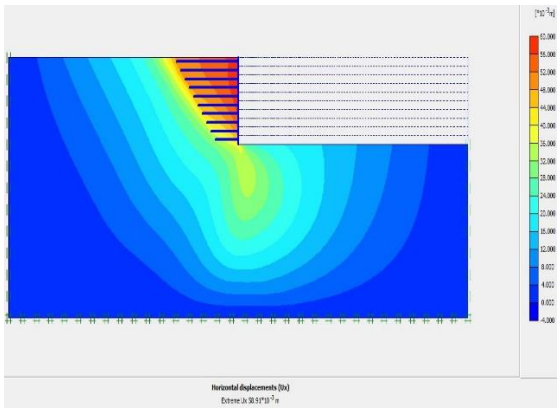
شکل (۷): سطح لغزش بحرانی و آرایش میخ‌خاک در دیوار به ارتفاع ۱۶ متر در برنامه Geostudio



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



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



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

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

عوامل مختلفی بر روی مقادیر تغییرشکل و الگوی تغییرشکل دیوار میخکوبی شده مؤثر است از آن جمله می‌توان دو علت اصلی که توسط لیما و همکاران ذکرشده است را اشاره نمود (لیما[1] و همکاران ۲۰۰۴):

الف) شرایط مرزی

ب) رفتار کلی صلب توده خاک

رفتار کلی توده خاک متأثر از عوامل مختلفی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مشخصات خاک، مشخصات میخ‌خاک و مشخصات پوشش بتن پاششی و مدل رفتاری انتخاب‌شده برای هر المان و همچنین آرایش میخ‌خاک‌ها در عمق دیواره و فاصله بین میخ‌خاک‌ها و زاویه میخ‌خاک‌ها نسبت به افق اشاره کرد.

مدل‌سازی سه‌بعدی

هدف از مدل‌سازی سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده بررسی اثر هندسه دیوار میخکوبی شده بر روی تغییرشکل‌ها است. پس دیوار میخکوبی شده با هندسه گود مستطیلی مطابق شکل (۱۲) مورد بررسی واقع شده است و اثر طول L بر روی تغییرشکل مقطع بحرانی ABCDE بررسی شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره‌شده جهت مدل‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation استفاده شده است.

مدل رفتاری خاک به‌صورت خاک سخت شونده است و مش‌بندی توده خاک به‌صورت منشور قائم ۱۵ گره‌ای است. جهت مدل‌سازی میخ‌خاک از المان تیر (Beam) که دارای سختی محوری و سختی خمشی است، استفاده‌شده و

1 Lima

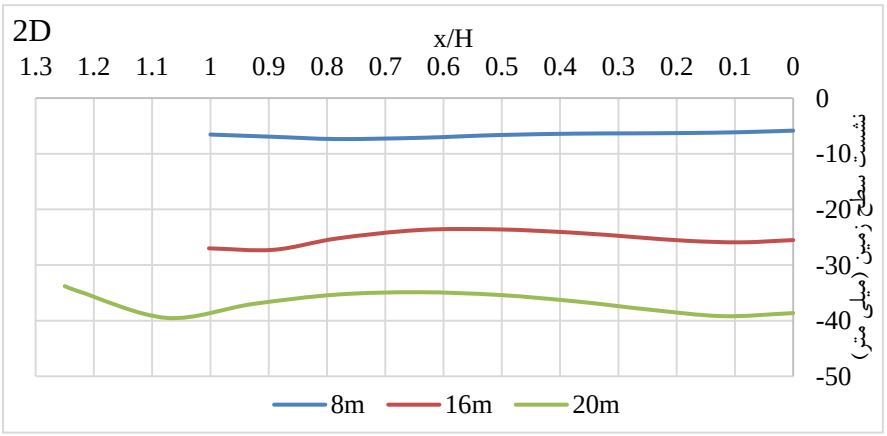
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

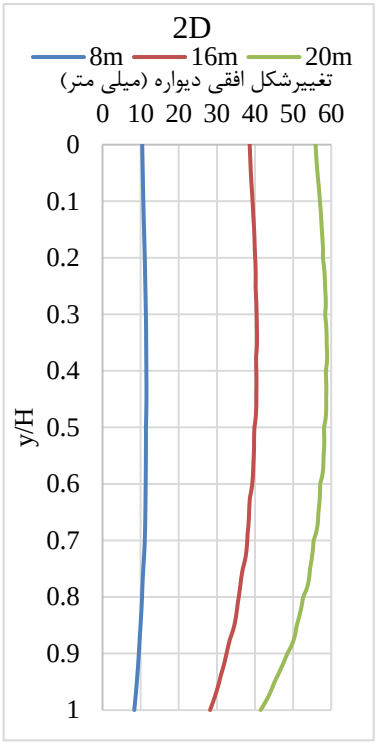
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

مش‌بندی 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. مش‌بندی المان سازه‌ای دیوار به‌صورت المان صفحه‌ای ۸ گره می‌باشد و هر گره دارای شش درجه آزادی است. مشخصات خاک و میخ‌خاک و پوشش بتن پاششی در مدل‌سازی سه‌بعدی بر اساس جداول ۱، ۲ و ۳ می‌باشد.

صحت سنجی مدل‌سازی سه‌بعدی

همان‌طور که از تعریف رفتار کرنش صفحه‌ای مشخص است، چنانچه بعد سوم سازه موردنظر (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 موردبررسی قرار دهیم. نمونه‌ای از این نوع رفتار را می‌توان در سدهای خاکی و یا شیروانی‌های طویل شاهد بود.



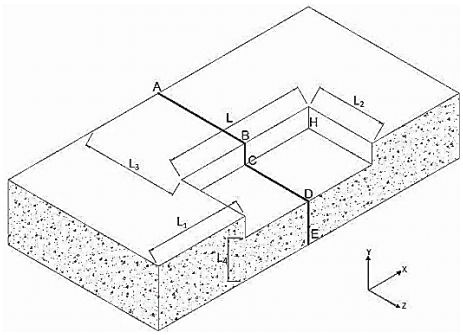


شکل (۱۱): تغییر شکل افقی و نشست سطح زمین در مدل دوبعدی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸، ۱۶ و ۲۰ متر

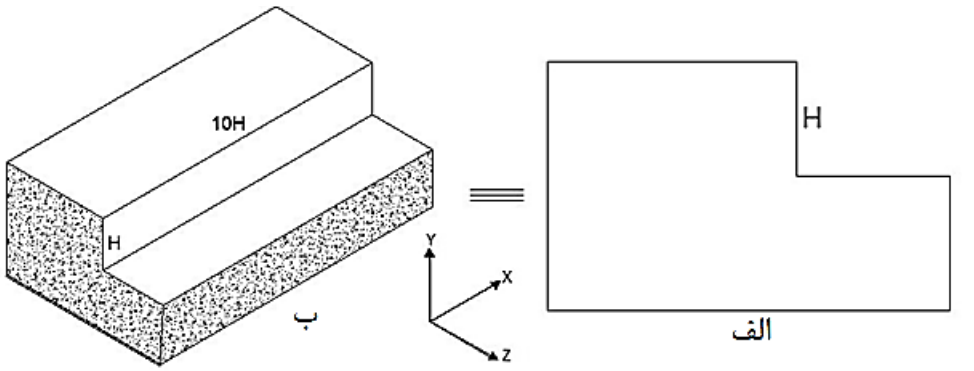
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

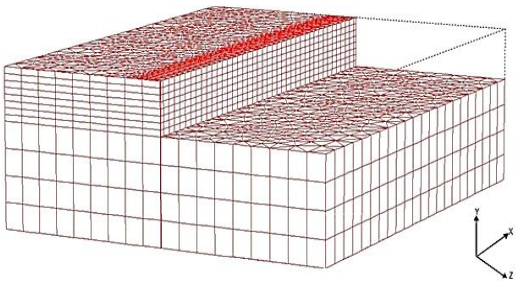
جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی سه‌بعدی، با توجه به تعریف رفتار کرنش صفحه‌ای، به مقایسه نتایج حاصل از مدل دوبعدی در دیوار میخکوبی شده به عمق ۸ متر و ۱۶ متر با مدل سه‌بعدی طویل با طول 10H در راستای بعد سوم (مطابق شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶) می‌پردازیم. در این مدل‌سازی، مقطع مدل سه‌بعدی موردبحث متناظر با مدل دوبعدی درنظر گرفته‌شده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



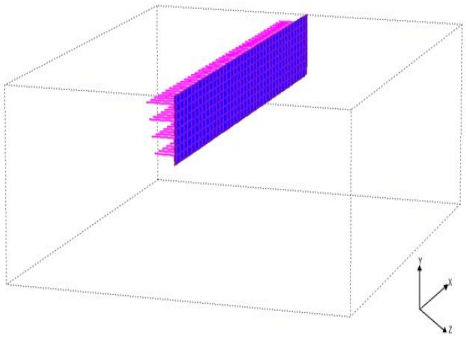
شکل (۱۲): نمای سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده به طول L در گودبرداری با هندسه مستطیلی و مقطع بحرانی ABCDE



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



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



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

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 قابل‌قبول است. نسبت $\frac{Z}{H}$ درواقع 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.

ساده‌سازی مدل‌سازی سه‌بعدی

تحلیل‌های سه‌بعدی به علت ماهیّت 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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

روش‌های مختلف کاهش حجم مدل‌سازی پرداخته‌شده است.

استفاده از تقارن مدل

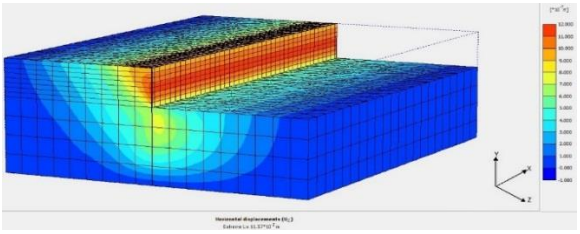
مدل سه‌بعدی دارای تقارن نسبت به صفحه ZY مقطع میانی (صفحه ABCDE) می‌باشد، پس می‌توان به‌جای مدل‌سازی کل مدل تنها نیمی از آن را مطابق شکل ۱۸ مدل نمود. جهت صحت‌سنجی نتایج این ساده‌سازی مجموعه‌ای از مدل‌های ترانشه قائم میخکوبی شده به ارتفاع ۸ متر ابتدا به‌صورت کامل و سپس به‌صورت مدل نیمه بررسی شده است. مدل 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.

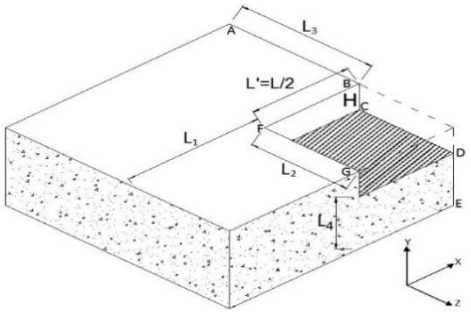
همان‌طور که از شکل (۱۹-الف) نشان داده‌شده مطابق با انتظار، نتایج حاصل از مدل کامل و مدل نیمه در مقطع بحرانی ABCDE، انطباق قابل‌قبولی با یکدیگر دارند و پس می‌توان به‌جای مدل‌سازی کل مدل به‌صورت کامل، تنها نیمی از مدل را مدنظر قرار داد تا بدین‌صورت در زمان مدل‌سازی و زمان تحلیل کاهش چشم‌گیری ایجاد نمود.

بررسی اثر دیواره مجاور به طول L_2

ازآنجایی‌که هدف اصلی از مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده در گودبرداری با هندسه مستطیلی، بررسی تغییرشکل‌ها 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 نیمهٔ محدود)، پرداخته‌شده است. مدل Fh-KH بیانگر مدل نیمهٔ 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 نیمهٔ محدود در شکل (۱۹-ب) ارائه‌شده است.



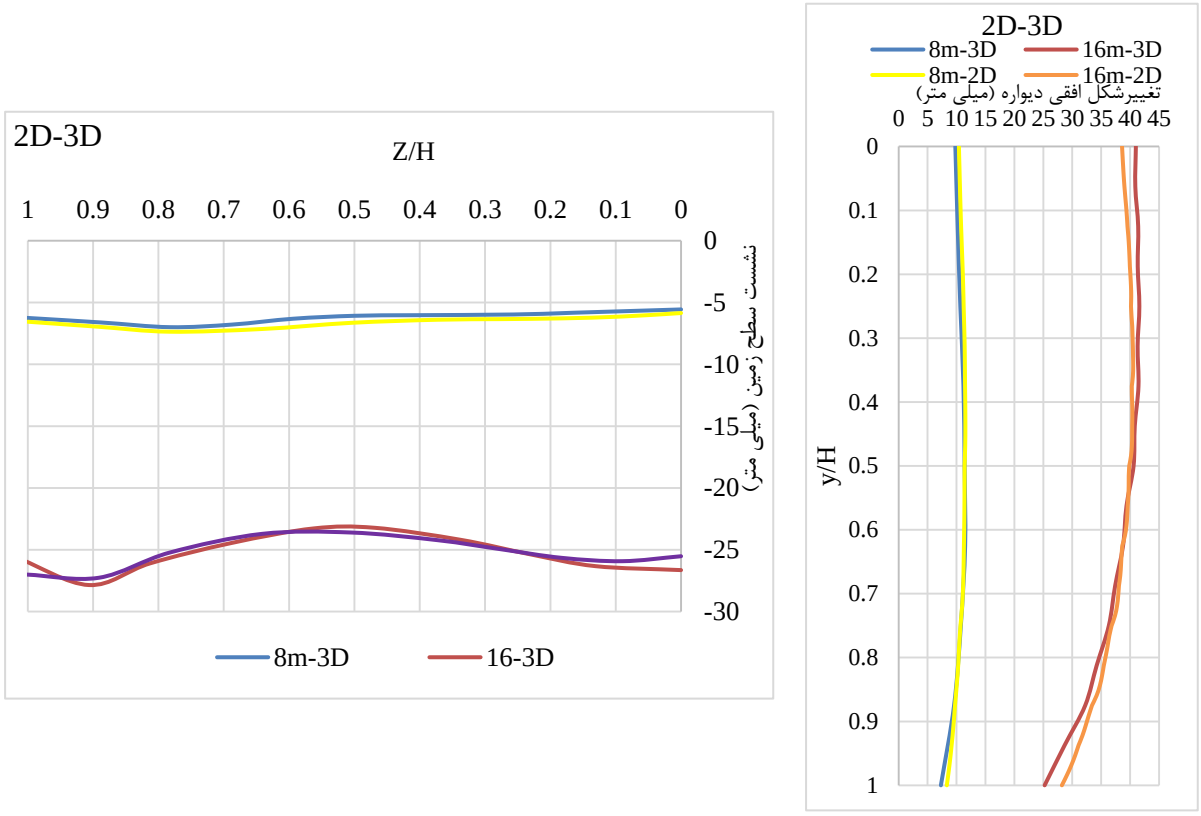
شکل (۱۶): کانتور تغییر شکل افقی در راستای Z در دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۸ متر



شکل (۱۸): نمای ۳بعدی از مدل نیمه دیوار میخکوبی شده به طول دیواره $L' = \frac{L}{2}$

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



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

همان‌طور که از شکل (۱۹-ب) مشخص است چنانچه طول L' کوچک باشد $(0.5H,\ H)$، تأثیر اعمال محدودیت حرکتی محسوس می‌باشد و اختلاف بین نتایج حدود ۴۳ درصد است ولی چنانچه فاصله مقطع بحرانی موردبررسی از دیواره FG به‌اندازه کافی بزرگ باشد $(2H,\ 3H,\ \ldots)$ میزان این اختلاف کاهش‌یافته و قابل‌قبول است. اختلاف بین نتایج خروجی از دو نوع مدل‌سازی برای طول‌های $L' = 2H, 3H$ 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

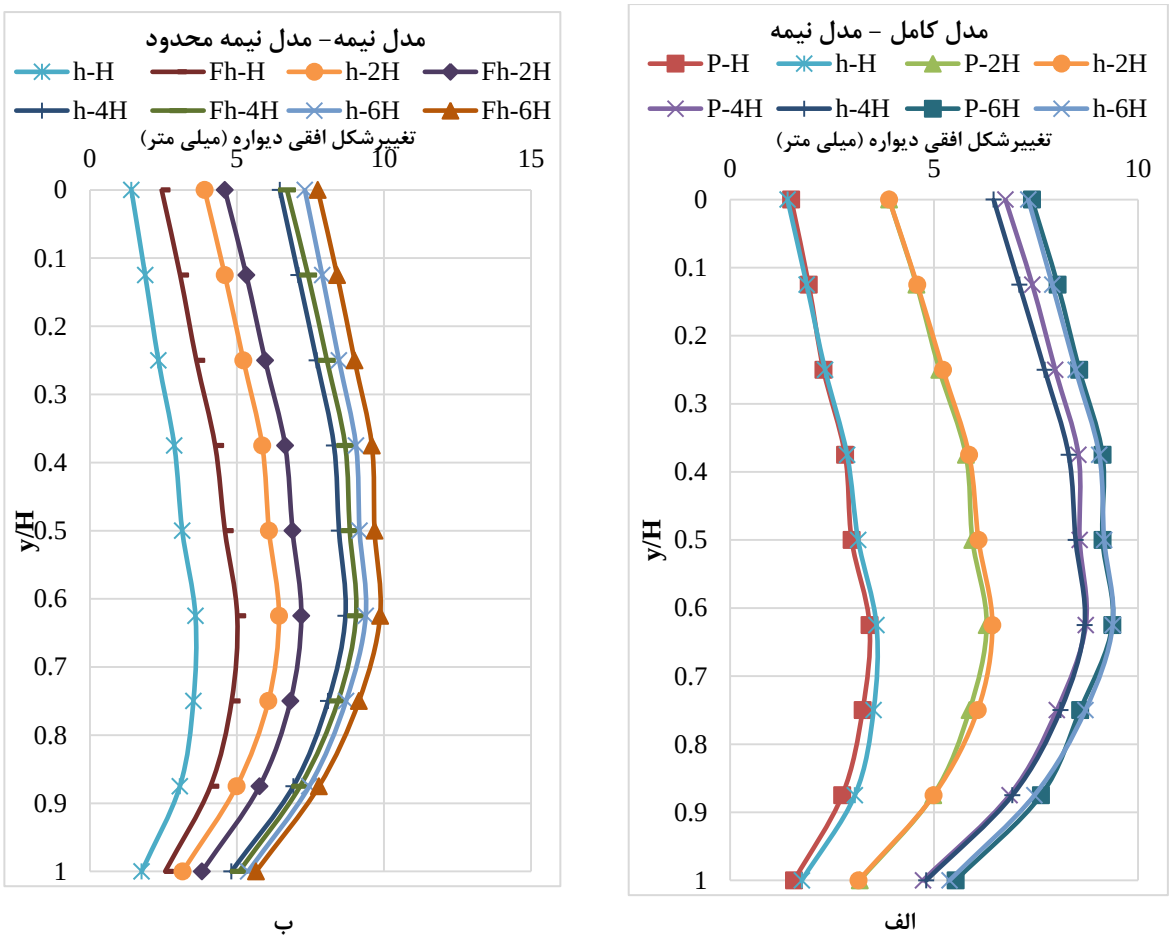
جهت بررسی شرایط مرزی مطابق شکل ۱۸ و یافتن حداقل طول‌های L_1, L_2, L_3, L_4 جهت کاهش اثرات مرزها بر روی نتایج تغییر شکل مقطع بحرانی ABCDE، از مدل دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۱۶ متر و به‌صورت مدل نیمهٔ محدود (Fh-6H-16m) استفاده‌شده است.

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 قرارگرفته 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 ارائه‌شده 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



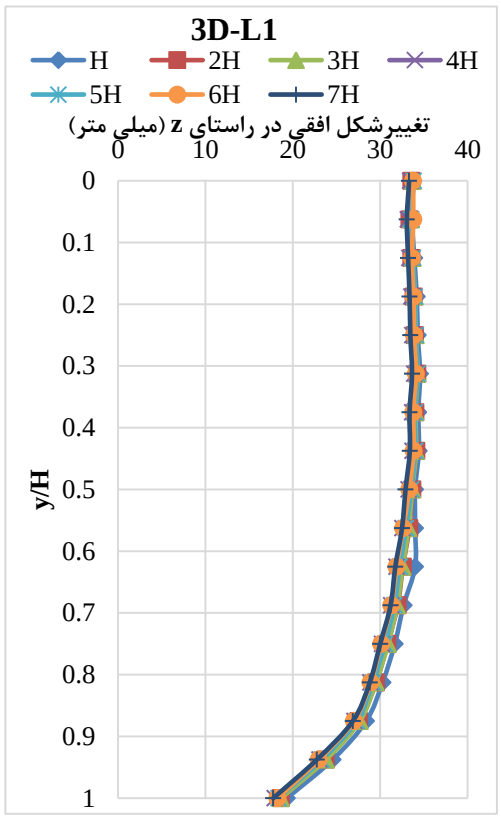
شکل (۱۹): مقایسه تغییر شکل افقی در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده ۸ متری
الف)– مدل کامل و مدل نیمه ب)– مدل نیمه و مدل نیمهٔ محدود

بررسی اثر طول L و مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و نتایج تحلیل سه‌بعدی در مقطع بحرانی

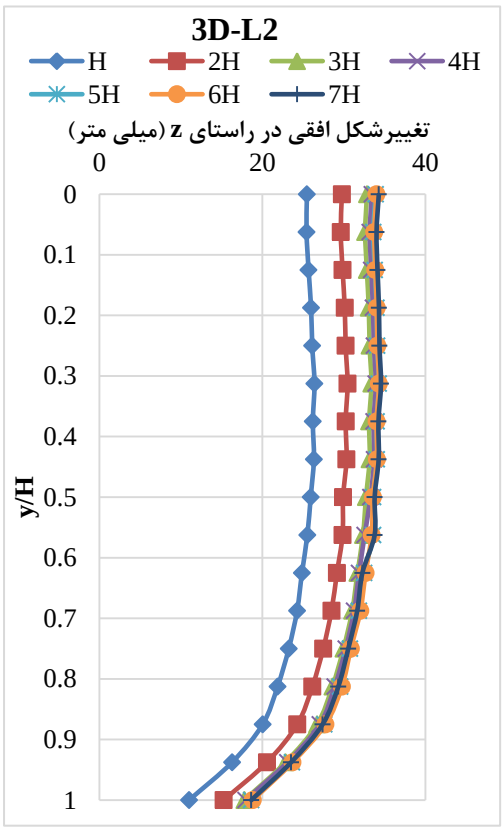
در راستای بررسی طول L در مدل‌های سه‌بعدی، به دنبال یافتن طول بحرانی هستیم. طول بحرانی طولی است که چنانچه بعد L مدل سه‌بعدی بیشتر از آن مقدار باشد، نتایج حاصل از تحلیل عددی سه‌بعدی در مقطع بحرانی میانی ABCDE با نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی کرنش صفحه‌ای دارای تطابق قابل‌قبولی است. پس در مدل‌سازی‌های صورت گرفته مدل‌های سه‌بعدی با طول‌های مختلف L=4H, 6H, 8H, 10H, 12H, 14H, 16H مدنظر قرارگرفته است و همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد می‌توان به‌جای مدل کامل از مدل نیمهٔ 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 مرز L_4 نیز برابر با 2H اعمال‌شده 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 ارائه‌شده است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

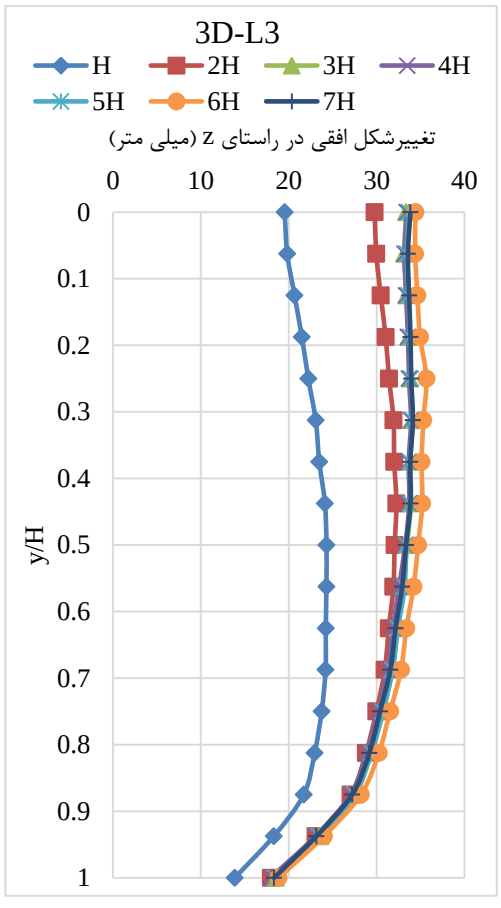
الف



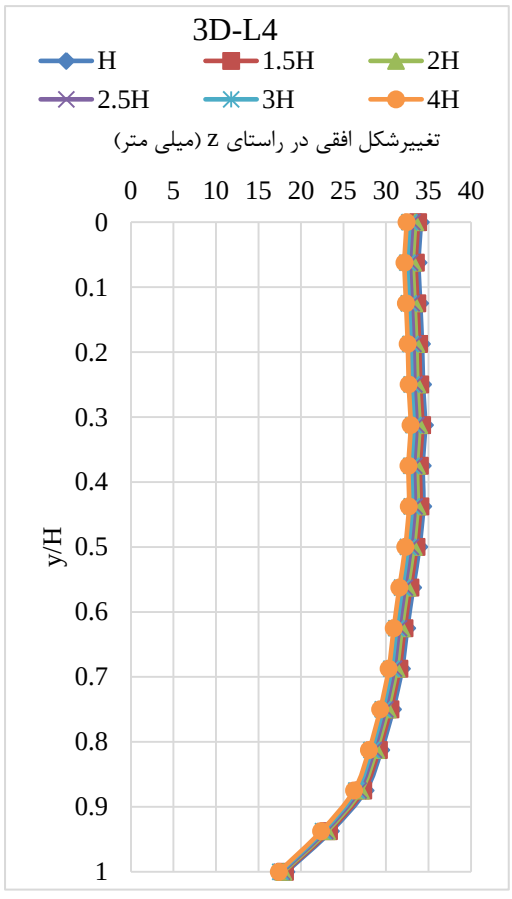
ب



پ



ت



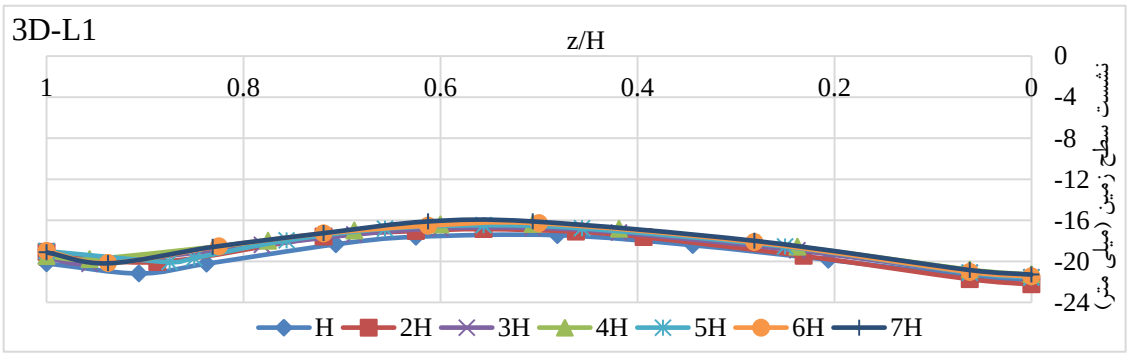
شکل (۲۰): تغییر شکل افقی در راستای Z در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده بر اساس الف)- تغییرات طول مرز L_1 ب)-

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

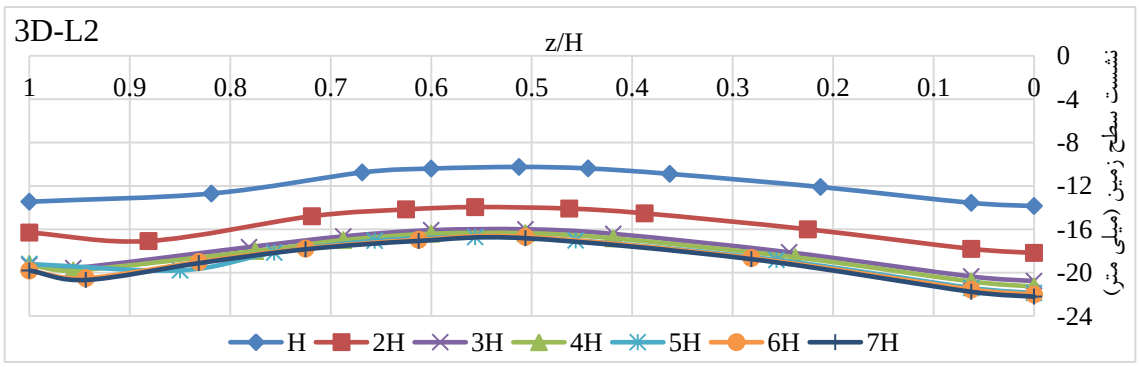
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

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

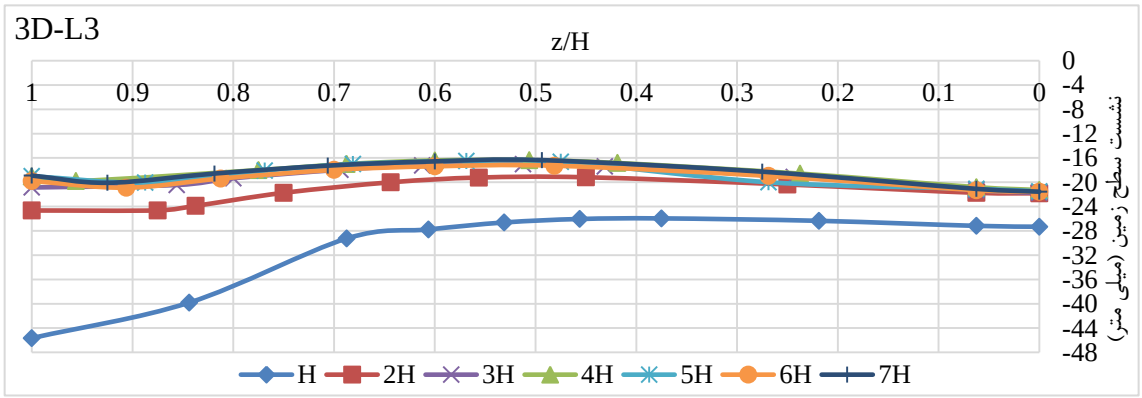
الف



ب



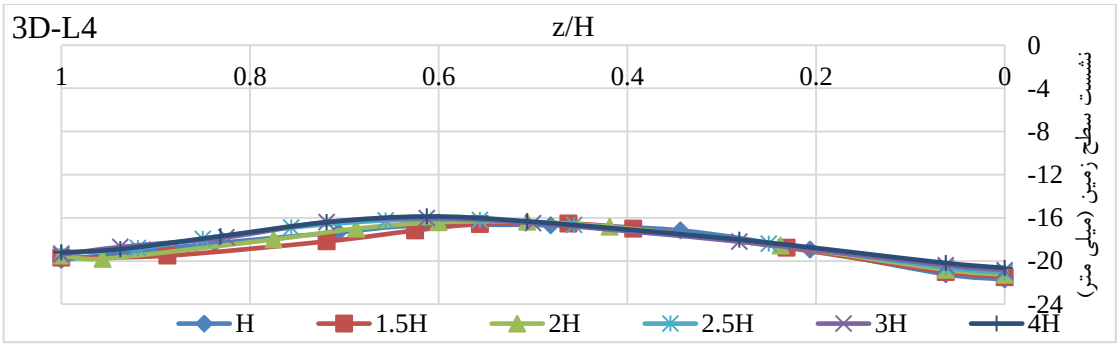
پ



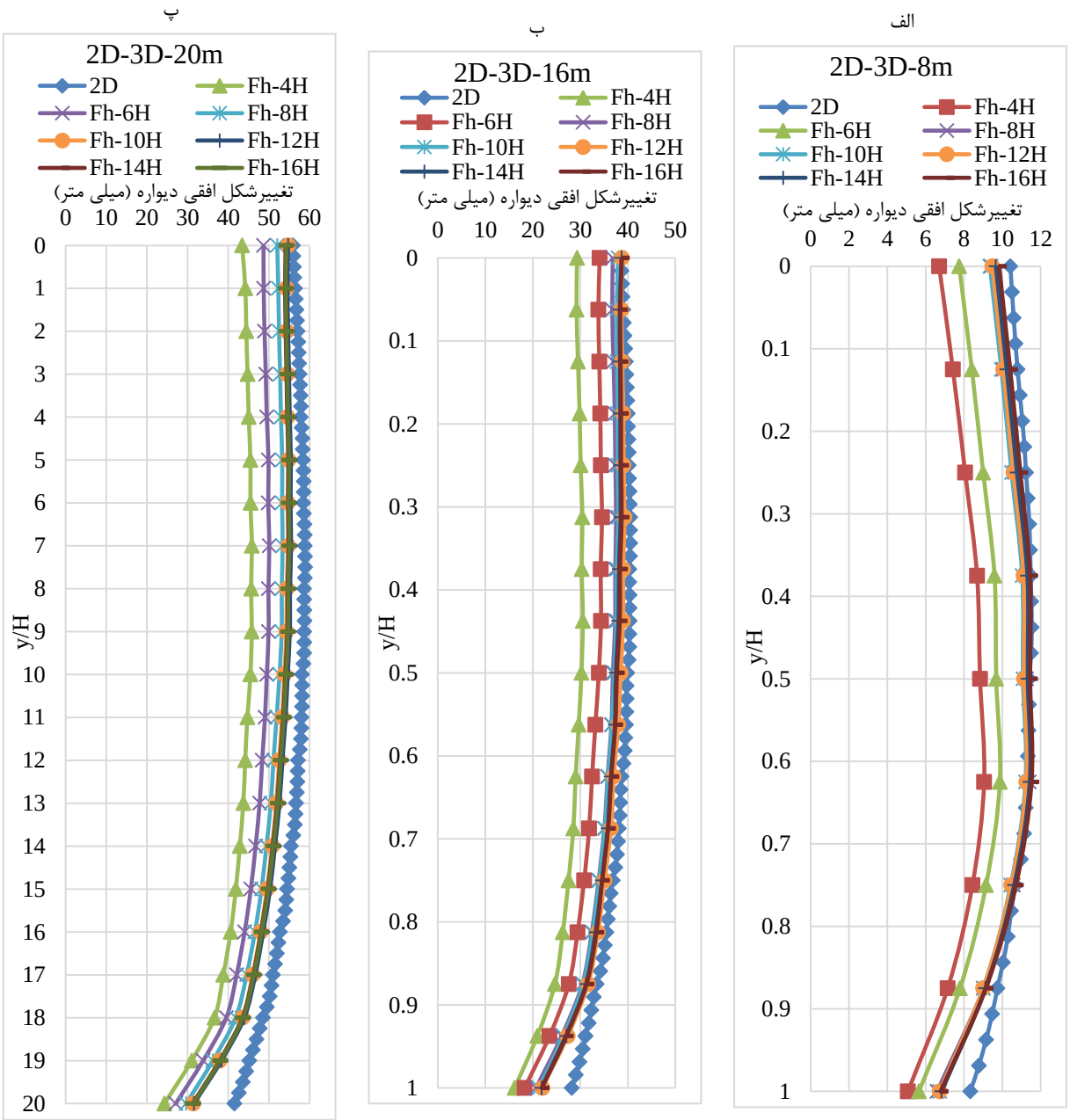
شکل (۲۱): نشست سطح زمین در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده بر اساس الف)- تغییرات طول مرز L_1 ب)- تغییرات طول مرز L_2 پ)- تغییرات طول مرز L_3

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



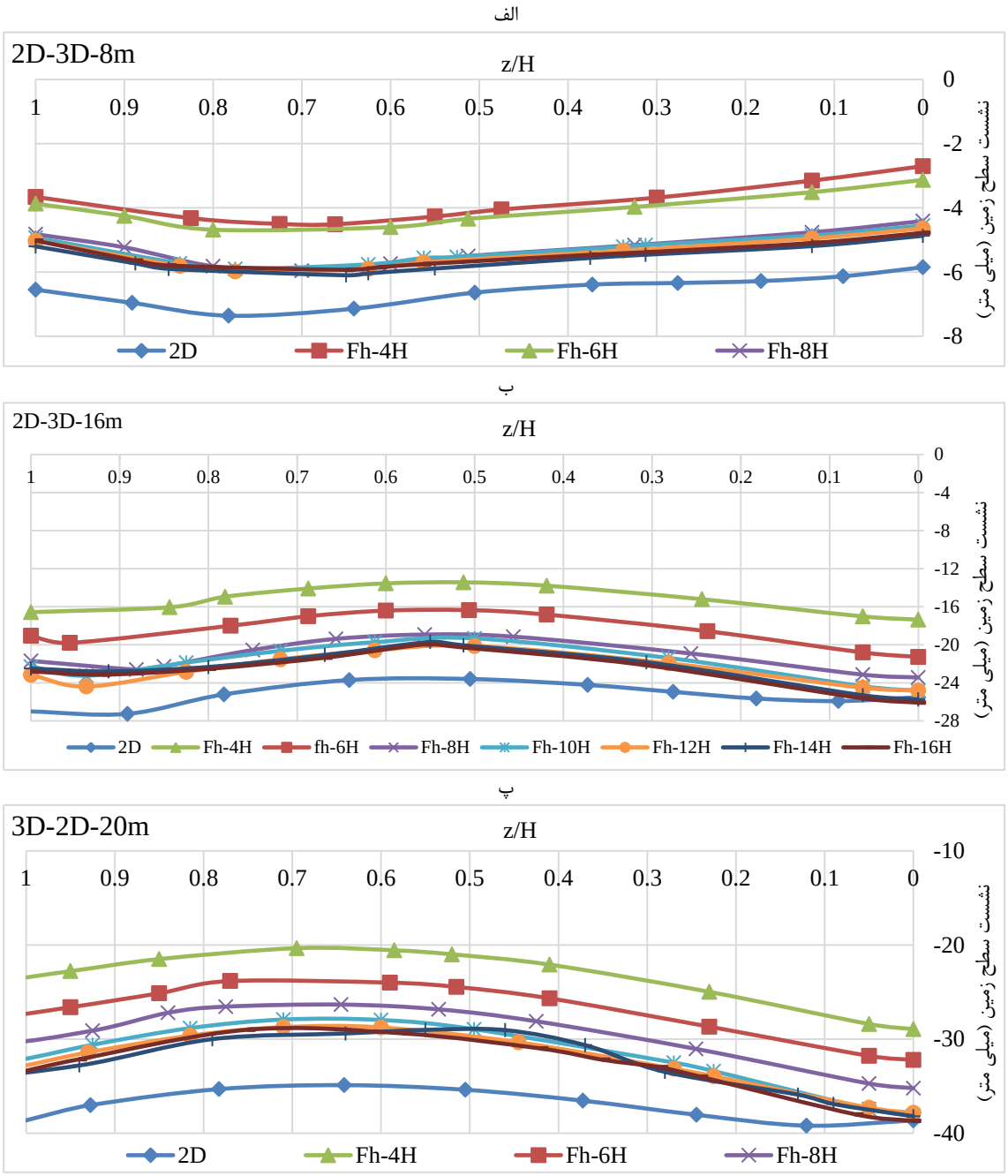
شکل (۲۲): نشست سطح زمین در مقطع بحرانی دیوار میخکوبی شده بر اساس تغییرات طول مرز L_4



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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]



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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

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 واقع‌شده 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، به‌عبارت‌دیگر دیوارهای مجاور به‌صورت 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 به‌طور 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 مشاهده‌شده 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 محدودکننده‌ی 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 به‌صورت 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 به‌صورت مناسبی می‌تواند جهت تحلیل سازه‌هایی که دارای بعد سوم طویل هستند مورداستفاده قرار گیرد اما درصورتی‌که 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]

مراجع

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 .

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 .

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.1.6]