

ارزیابی اثر پیش‌تنیدگی مهارهای فولادی بر جابه‌جایی دیوار دیافراگمی و خاک

محمد بهرامی^۱، محمدایمان خداکرمی^{۲*} و عبدالحسین حداد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۶/۷/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۷/۱۸)

چکیده

آرایش استرات‌ها در ارتفاع دیوارهای دیافراگمی در گودبرداری‌های عمیق، دارای محدودیت‌هایی برای تأمین فضای اجرایی مناسب است. به منظور کاهش تغییر مکان افقی دیوار، از اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها می‌توان استفاده کرد. در این مقاله اثر اعمال پیش‌تنیدگی به مهارهای فولادی بر رفتار دیوار دیافراگمی به منظور کاهش نشست خاک پشت دیوار ارزیابی گردیده است. تعدادی دیوار دیافراگمی با ارتفاع ۲۰ متر و ضخامت ۸۰ سانتی‌متر با عمق نهایی گود ۱۲ متر به روش عددی تفاضل محدود مورد بررسی قرار گرفته است. دیوار دیافراگمی در سه نوع خاک ماسه‌ای، در سه تراز آب مختلف، تحت ۳ حالت بدون پیش‌تنیدگی، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلونیوتن پیش‌تنیدگی مهار، مدل‌سازی گردیده که نتایج حاصل از ۲۷ مدل ساخته شده بیان‌گر آن است که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها موجب تغییر مکان افقی دیوار در ناحیه غیر مدفون دیوار می‌گردد؛ اما بر جابه‌جایی افقی دیوار در نواحی عمیق دیوار چندان اثرگذار نیست. بررسی‌های پژوهش حاضر مشخص نمود که با افزایش مدول الاستیک خاک و بالا بودن تراز آب زیرزمینی، حداکثر تغییر مکان افقی دیوار از پای دیوار به اواسط دیوار منتقل می‌گردد و از همین رو در خاک‌های با مدول الاستیک بالا و اشباع، مهارها توانایی بهتری برای کاهش حداکثر تغییر مکان افقی دیوار دارند. از آنجا که کاهش حداکثر تغییر مکان افقی دیوار منجر به کاهش حداکثر نشست خاک می‌گردد؛ با افزایش مدول الاستیک خاک و تراز آب زیرزمینی اثرگذاری پیش‌تنیدگی مهارها بر کاهش حداکثر میزان نشست خاک تشدید می‌گردد. از این رو، روش اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها به منظور کاهش نشست خاک پشت دیوار، مناسب خاک‌های با مدول الاستیک و تراز آب زیرزمینی بالاست.

کلیدواژه‌ها: دیوار دیافراگمی، پیش‌تنیدگی، استرات، گودبرداری عمیق، FLAC.

۱- مقدمه

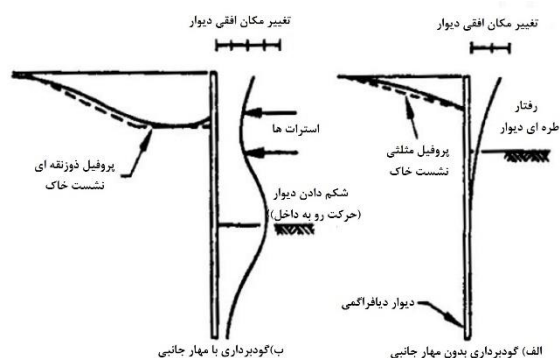
جهان محسوب می‌شوند (Ou, ۲۰۰۶). علیرغم کاربرد فراوان در دنیا، این روش در ایران چندان توسعه نیافته است و کم‌تر از روش‌های دیگر به کار برده می‌شود.

در گودبرداری‌های عمیق عموماً از مهار جانبی یا میل‌مهار جهت کاهش جابه‌جایی دیوار استفاده می‌گردد. میل‌مهارها جهت کنترل فشار جانبی خاک، سازه نگهبان را به خاک پشت گود متصل می‌کنند (Ou, ۲۰۰۶). مهار جانبی که درون گود واقع می‌گردد مانعی در برابر حرکات رو به گود دیوار دیافراگمی محسوب شده و باعث کاهش تغییر مکان افقی دیوار می‌گردد. مهارهای جانبی از دو عضو اصلی استرات و تیر افقی تشکیل یافته‌اند. استرات‌ها از جنس فولاد یا بتن هستند. استرات‌های فولادی با توجه به امکان برش و به‌کارگیری مجدد و همچنین داشتن وزن کمتر در ایران بیش‌تر مورد توجه هستند (وطن‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). پس از هر گام حفاری ابتدا تیر افقی به‌طور

ارزیابی جابه‌جایی خاک در حفاری‌های شهری، یک پارامتر مهم طراحی محسوب می‌گردد زیرا حرکات اضافی خاک ممکن است سبب آسیب رساندن به تأسیسات و ساختمان‌های مجاور گردد. به منظور کنترل حرکات خاک از سیستم دیوار نگهبان استفاده می‌گردد. دیوار دیافراگمی یکی از انواع دیوارهای نگهبان است که ضمن سرعت بالای اجرا، از ایمنی مناسبی نیز برخوردار است. طبق تعریف دیوار دیافراگمی دیواری پیوسته است که در زیر سطح زمین ساخته می‌شود. این دیوارها هم تکیه‌گاه سازه‌ای فراهم می‌کنند و هم مانعی در مقابل نفوذ آب به شمار می‌آیند (اشرفی، ۱۳۸۵).

دیوارهای دیافراگمی اولین بار در ایتالیا در دهه ۱۹۵۰ به کار رفتند. از آن زمان با گسترش سریع این روش، یکی از متداول‌ترین و گسترده‌ترین روش‌های حفاری و ساخت و سازهای زیرزمینی در

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۳-۳۱۵۳۵۲۰۴



شکل ۲- پروفیل جابه‌جایی دیوار و خاک
(Clough و O'Rourke، ۱۹۹۰)

بررسی اثرات ارتفاع دیوار، عمق گودبرداری و فاصله مهارها بر تغییر مکان جانبی دیوار دیافراگمی در رس‌های نرم منجر به ارائه طیفی از نتایج اثر مهار و عمق مدفون دیوار به منظور پیش‌بینی تغییر مکان جانبی دیوار دیافراگمی و نشست خاک پشت دیوار دیافراگمی گردید (Hashash و Whittle، ۱۹۹۰).

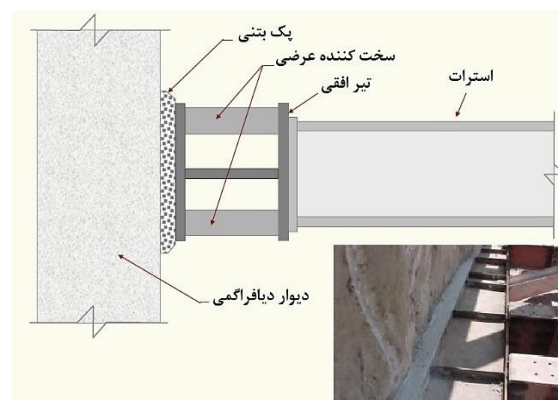
Ou و Hsieh (۱۹۹۸)، با بررسی رفتار دیوار دیافراگمی و نشست خاک پشت دیوار در چند نوع خاک مختلف نمودارهایی جهت پیش‌بینی تغییر مکان دیوار دیافراگمی و نشست خاک پشت دیوار ارائه کردند. پژوهش ایشان مؤید مطالعات Clough و O'Rourke (۱۹۹۰) بود.

Ou و همکاران (۱۹۹۸)، با ارزیابی اثر اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها در گودبرداری‌های مهار شده نتیجه گرفتند که استقرار استرات‌ها در اعماق کم باعث راندن دیوار دیافراگمی به خارج گود می‌گردد ولی در صورتی که استرات‌ها تا اعماق زیاد کار گذاشته شوند؛ پیش‌تنیدگی مهار به آسانی قادر به عقب راندن دیوار نخواهد بود.

Kung و همکاران (۲۰۰۷)، با اندازه‌گیری نشست خاک پشت دیوار نمونه‌های خاک Hsieh و Ou (۱۹۹۸)، ضمن تأیید پژوهش‌های پیشین، نمودارهای جدیدی جهت پیش‌بینی تغییر شکل افقی دیوار دیافراگمی مهار شده و نشست خاک رسی پشت دیوار ارائه نمودند. اثر تغییر مکان افقی دیوارهای دیافراگمی با ارتفاع‌های متنوع مهارشده با استرات فولادی پیش‌تنیده منجر به ارائه نمودارهای راهنمایی طراحی دیوار دیافراگمی با ارتفاع‌های مختلف گردید (Hwang و همکاران، ۲۰۰۷). ارزیابی عددی اثر الاستیسیته خاک و خزش بر رفتار دیوار دیافراگمی تحت مهارگذاری و مقایسه نتایج عددی با مطالعه موردی دیوار دیافراگمی احداث شده منجر به تعیین پارامترهای مناسب طراحی در خاک‌های ماسه‌ای گردید (Hsiung، ۲۰۰۹).

مطالعات Chowdhury و همکاران (۲۰۱۳)، بر اثر سختی مهار (استرات)، ضخامت دیوار، آرایش مهارها و عمق مدفون دیوار بر

پیوسته در امتداد دیوار نصب می‌گردد. سپس استرات‌ها در عمق مورد نظر مستقر می‌گردند. پس از آن روند حفاری ادامه می‌یابد (حداد و همکاران، ۱۳۹۴). در شکل (۱) جزئیات استقرار استرات درون ناحیه حفاری جهت کاهش تغییر شکل دیوار دیافراگمی نشان داده شده است.



شکل ۱- جزئیات کارگذاری مهار جانبی
(حداد و همکاران، ۱۳۹۴)

آرایش استرات‌ها در ارتفاع دیوار دیافراگمی بر تغییر مکان افقی دیوار تأثیرگذار است اما توزیع استرات‌ها در ارتفاع دیوار دارای محدودیت‌هایی است. ایجاد فضای کافی برای ماشین‌آلات و نیروی انسانی و همچنین قرار گرفتن این استرات‌ها در ترازهای از پیش تعیین شده چون تراز سقف‌ها از جمله این محدودیت‌ها هستند. از همین‌رو اعمال پیش‌تنیدگی به استرات‌های افقی یک روش مناسب جهت کاهش تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی محسوب می‌گردد. برای اعمال پیش‌تنیدگی به استرات‌ها یک جک بین استرات و تیر افقی متصل به دیوار دیافراگمی کار گذاشته می‌شود. این جک با اعمال نیرو سبب پیش‌تنیدگی در استرات‌ها خواهد شد. تحلیل دیوارهای دیافراگمی تحت بارها و شرایط مختلف خاک و مهار به منظور پیش‌بینی عملکرد دیوار حائز اهمیت است. وجود پیش‌تنیدگی و فاصله مهارگذاری و همچنین عمق مدفون این نوع دیوارها و سطح تراز آب زیرزمینی بر رفتار دیوار دیافراگمی اثرگذار است.

همانند آنچه در شکل (۲) ارائه شده است در صورت حاکم بودن حرکت‌های روبه داخل دیوار ناشی از مهارگذاری جانبی، نشست‌های خاک پشت دیوار به صورت یک پروفیل دوزنقه‌ای در می‌آیند؛ و در صورت حاکم بودن حرکت‌های طره‌ای دیوار، نشست‌ها یک الگوی مثلثی را دنبال می‌کنند. حالت اول عمدتاً مربوط به حفاری‌های عمیق در خاک رسی نرم تا متوسط بوده و حالت دوم عمدتاً در حفاری‌های ماسه‌ها و رس‌های سخت تا بسیار سخت رخ می‌دهد (Clough و O'Rourke، ۱۹۹۰).

مشخصات این خاک‌ها از مقاله Chowdhury و همکاران (۲۰۱۳)، اخذ شده است. این خاک‌ها مرتبط با حفاری ایستگاه O6 از خط نارنجی سیستم حمل و نقل کاپوسیونگ (Kaohsiung) هستند. مشخصات سه نوع خاک مورد استفاده، در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. در این جدول ϕ' زاویه اصطکاک داخلی و c' چسبندگی خاک هستند. تفاوت سه خاک مورد مطالعه در مقادیر مدول الاستیک است. افزایش مدول الاستیک عامل افزایش سختی خاک است. با کاهش سختی خاک ذرات خاک نسبت به یکدیگر راحت‌تر جابه‌جا می‌گردند. خاک‌های سست با جابه‌جایی بیش‌تر خود سبب پر کردن فضای خالی بین دیوار و خاک پس از آغاز حفاری گشته و فشار بیش‌تری بر دیوار وارد می‌نمایند. از همین‌رو رفتار دیوار در خاک‌هایی با سختی متنوع، مختلف است (حداد و همکاران، ۱۳۹۴).

سه ساختگاه متنوع از لحاظ تراز آب زیرزمینی ارزیابی شده تا مشخص گردد پیش‌تنیدگی مهارها در چه ساختگاهی از نظر آب زیرزمینی بر رفتار دیوار و نشست خاک اثرگذارتر است. سه تراز آب زیرزمینی منطبق بر سطح زمین و اعماق ۴ و ۸ متری زیر سطح زمین ارزیابی شده است. هنگامی که آب بر سطح زمین منطبق است خاک تماماً اشباع است و در اعماق آب زیرزمینی ۴ و ۸ متری زیرزمین به ترتیب اولین و دومین مرحله حفاری در خاک خشک اجرا می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات خاک برای ارزیابی عددی

شماره خاک	وزن مخصوص (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (درجه)	مدول الاستیک (kPa)
۱	۱۹/۷	صفر	۳۲	۱۹۰۰۰
۲	۱۹/۷	صفر	۳۳	۴۸۰۰۰
۳	۱۹/۹	صفر	۳۳	۷۰۰۰۰

مهار به کار رفته در ارزیابی عددی از نوع استرات فولادی با وزن مخصوص ۷۸۵۰ kg/m³ و مدول یانگ ۲×۱۰^۸ kN/m² است. فاصله افقی استرات‌ها در کلیه مدل‌ها ۵ متر در نظر گرفته شده است. مدل‌ها برای حالت بدون پیش‌تنیدگی و با ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلونیوتن پیش‌تنیدگی مهار تحلیل شده‌اند. مقادیر پیش‌تنیدگی مهارها به ترتیب برابر با ۶٪ و ۱۲٪ تنش مجاز آیین‌نامه AISC در نظر گرفته شده است (AISC، ۲۰۰۱).

جدول ۲- مشخصات استرات‌های فولادی برای ارزیابی عددی

مشخصات مقطع	سطح مقطع (m ² × 10 ⁻⁴)	ممان اینرسی (m ⁴ × 10 ⁻⁸)
H400×400×13×21	۲۱۸/۷	۶۶۶۰۰

نیروی محوری مهار، حداکثر نشست خاک پشت دیوار و حداکثر جابه‌جایی دیوار منجر به ارائه یک راهنمای طراحی مهار برای گودبرداری با دیوار نگهدارنده دیافراگمی گردید. بررسی اثرات حفاری در تغییر مکان جانبی دیوارهای دیافراگمی و نشست سطح زمین در پنج ایستگاه جنوب غربی مترو اهواز منجر به پیش‌بینی نشست خاک و تغییر مکان دیوار برای عمق حفاری نهایی ایستگاه مترو گردید. نتیجه پژوهش مذکور نشان داد که احداث ایستگاه مترو به روش دیوار دیافراگمی باعث نشستی در محدوده «ناچیز» در مناطق اطراف ایستگاه زیرزمینی مترو است (Pakbaz و همکاران، ۲۰۱۳).

توسط Hsiung و Dao (۲۰۱۴)، مقایسه نتایج ارزیابی عددی سه مدل رفتاری "مور کلمب"، "سخت‌شونده" و "سخت‌شونده با کرنش کوچک" بر جابه‌جایی خاک ناشی از گودبرداری محافظت شده با دیوار دیافراگمی صورت پذیرفت. در پژوهش مذکور رفتار خاک ماسه‌ای و دیوار دیافراگمی با ارتفاع ۳۲ متر و ضخامت ۹۰ سانتی‌متر بررسی گردیده است. تراز آب زیرزمینی در عمق ۲ متری واقع شده و دیوار با استرات‌های فولادی پیش‌تنیده مهار گردیده است. نشست سطح زمین ناشی از تحلیل نرم‌افزاری در فواصل مختلف پشت دیوار با نتایج مشاهده شده در گام‌های مختلف حفاری مقایسه گردید. طبق پژوهش مذکور مدل رفتاری مور کلمب دقیق‌ترین نتایج را برای تحلیل نشست خاک‌های ماسه‌ای بر اثر گودبرداری در مقایسه با سایر مدل‌های رفتاری ارائه می‌دهد. از همین‌رو در پژوهش حاضر از مدل رفتاری مور کلمب جهت تحلیل عددی استفاده گردیده است.

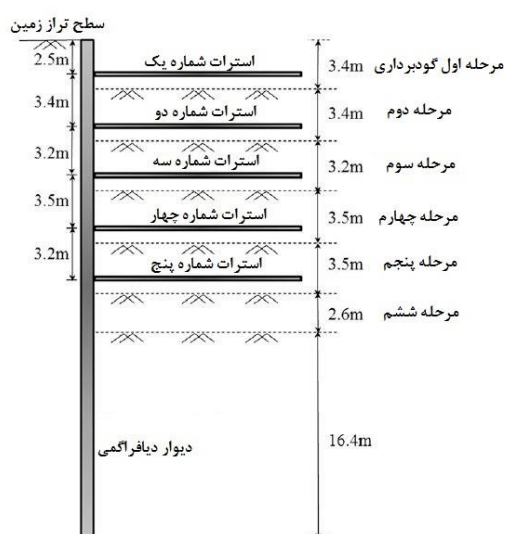
در مقاله حاضر اثر پیش‌تنیدگی استرات‌های فولادی بر تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی و جابه‌جایی ۳ نوع خاک ماسه‌ای، تحت ترازهای مختلف آب زیرزمینی بررسی شده است.

۲- تعریف مسئله

در این پژوهش اثر پیش‌تنیدگی مهارهای فولادی بر تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی و نشست خاک پشت دیوار با نرم‌افزار FLAC به روش عددی تفاضل محدود با مدل رفتاری مور کلمب بررسی گردیده است. دیوار دیافراگمی ۲۰ متری با ضخامت ۸۰ سانتی‌متر و با مدول یانگ ۲۲۰۰۰ MPa و نسبت پواسون ۰/۱۵ مدل شده است. عمق گودبرداری نهایی ۱۲ متر است و مشخصات سختی بتن دیوار دیافراگمی، عمق گودبرداری و آرایش مهارها از مقاله (Schweiger و Freiseder، ۱۹۹۸) اخذ شده است. مدل‌سازی در سه نوع خاک با مدول الاستیک مختلف و با سه نیروی پیش‌تنیدگی و در سه تراز آب مختلف انجام شده است. در مجموع ۲۷ مدل طراحی و تحلیل گردیده است. ۳ نوع خاک ماسه‌ای با نسبت پواسون ۰/۳ برای مدل‌سازی استفاده شده‌اند.

۳- صحت‌سنجی

به منظور اطمینان از روند مدل‌سازی ارزیابی عددی از دیوار ارائه شده، مقاله Chowdhury و همکاران (۲۰۱۳)، استفاده گردید. ایشان به منظور صحت‌سنجی پژوهش عددی خود از مطالعه موردی دیوار دیافراگمی ساخته شده، منتشر در مرجع (Hsiung, ۲۰۰۹)، استفاده کرده است. در مقاله حاضر برای صحت‌سنجی از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC استفاده گردیده است. نمایی از اعماق مختلف گودبرداری و آرایش مهارگذاری برای صحت‌سنجی در شکل (۵) ارائه شده است.



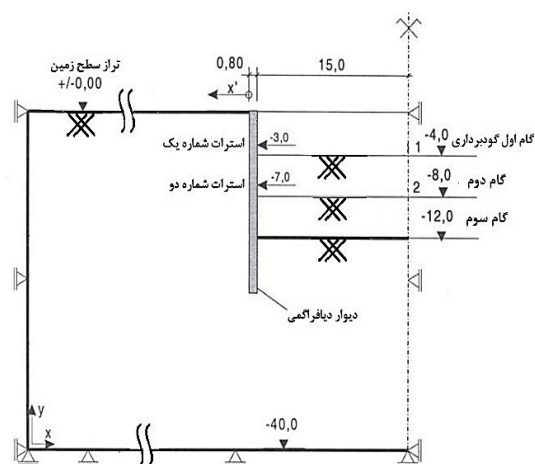
شکل ۵- اعماق مختلف چرخه گودبرداری و مهارگذاری به منظور صحت‌سنجی

یک دیوار دیافراگمی با ضخامت ۱ متر و ارتفاع ۳۶ متر در خاک ماسه‌ای لایه‌ای با عمق گودبرداری نهایی ۱۹/۶ متر با ۶ مرحله گودبرداری و ۵ مرحله مهارگذاری مدل گردید. مدول یانگ دیوار دیافراگمی بتنی برابر $2/5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ و نسبت پواسون آن $0/15$ است. سطح آب زیرزمینی در عمق ۳ متری زیر سطح تراز زمین واقع شده است. در هر مرحله ابتدا آب تا عمق مرحله مورد نظر گودبرداری تخلیه شد و سپس گودبرداری اجرا گردید. پس از آن مهارها در جای خود مستقر شدند و این چرخه تا رسیدن به عمق نهایی گود ادامه یافت. فاصله افقی مهارها ۴/۵ متر است. مشخصات مهارها که از نوع استرات فولادی با وزن مخصوص 7850 kg/m^3 و مدول یانگ $2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ هستند در جدول (۴) ارائه گردیده است.

خاک ماسه‌ای و دارای ۷ لایه است. نسبت پواسون خاک $0/3$ است و مشخصات لایه‌های مختلف خاک در جدول (۵) ارائه گردیده است.

پیش از خاک‌برداری، آب زیرزمینی در صورت وجود از ناحیه حفاری خارج گردیده است. از آنجا دیوارهای دیافراگمی، پیوسته و آب‌بند هستند مانع ورود آب زیرزمینی پشت دیوار به نواحی حفاری خواهند شد (حداد و همکاران، ۱۳۹۴). پس از خروج آب از ناحیه حفاری در یک سوی دیوار دیافراگمی آب زیرزمینی وجود داشته و در سوی دیگر (ناحیه حفاری) آب خارج شده است. از همین رو اعمال زهکشی باعث ایجاد فشار و راندن دیوار به سوی ناحیه حفاری می‌گردد.

در ادامه خاک‌برداری تا عمق مورد نظر هر مرحله و سپس نصب مهار و اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها صورت گرفته است. این روند تا رسیدن به عمق نهایی حفاری ادامه یافته است. مقطع و اعماق مختلف مراحل مدل‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. روند گام به گام چرخه گودبرداری برای اعماق زیر سطح زمین در جدول (۳) مشخص شده است.

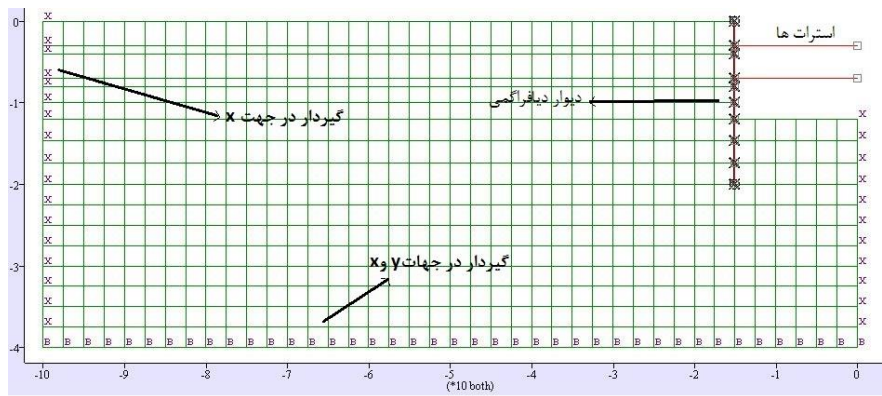


شکل ۳- نمایی از مدل‌سازی به منظور ارزیابی عددی

جدول ۳- اعماق چرخه گودبرداری برای ارزیابی عددی

گام	تخلیه آب (m)	گودبرداری (m)	نصب استرات (m)
۱	۴	۴	۳
۲	۸	۸	۷
۳	۱۲	۱۲	-

در شکل (۴) نمایی از هندسه مدل ساخته شده با نرم‌افزار FLAC نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی، خاک در پایین‌ترین تراز در هر دو جهت x و y گیردار و در کناره‌ها در جهت x گیردار شده است.



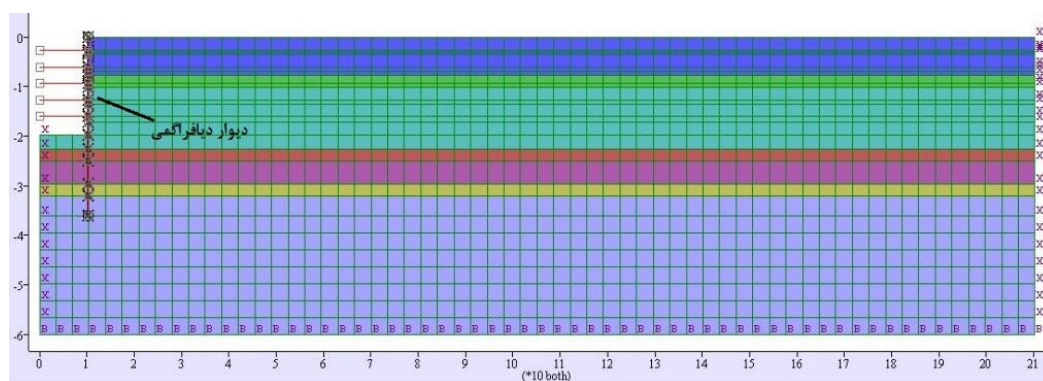
شکل ۴- آرایش مش و مدل ساخته شده با FLAC در عمق نهایی گودبرداری برای ارزیابی عددی

جدول ۴- مشخصات استرات‌های فولادی به منظور صحت‌سنجی (Hsiung, ۲۰۰۹)

شماره استرات	عمق استقرار (m)	مشخصات مقطع	سطح مقطع (m ² × 10 ⁻⁴)	ممان اینرسی (m ⁴ × 10 ⁻⁸)
۱	۲/۵	H350×350×12×19	۱۷۱/۹	۳۹۸۰۰
۲	۵/۹	H400×400×13×21	۲۱۸/۷	۶۶۶۰۰
۳	۹/۱	2H414×405×18×28	۵۹۰/۸	۱۸۵۶۰۰
۴	۱۲/۶	2H414×405×18×28	۵۹۰/۸	۱۸۵۶۰۰
۵	۱۵/۸	2H414×405×18×28	۵۹۰/۸	۱۸۵۶۰۰

جدول ۵- مشخصات لایه‌بندی خاک به منظور صحت‌سنجی (Hsiung, ۲۰۰۹)

عمق زیر سطح زمین (m)	وزن مخصوص (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	φ' (درجه)	مدول الاستیک (kPa)
۰/۰-۷/۵	۱۹/۷	صفر	۳۲	۱۹۰۰۰
۷/۵-۱۰/۰	۱۸/۶	صفر	۳۰	۸۰۰۰
۱۰/۰-۲۲/۵	۱۹/۶	صفر	۳۲	۲۸۰۰۰
۲۲/۵-۲۵/۰	۱۹/۳	صفر	۳۳	۲۸۰۰۰
۲۵/۰-۲۹/۵	۱۹/۷	صفر	۳۳	۴۸۰۰۰
۲۹/۵-۳۲/۰	۱۹/۵	صفر	۳۲	۳۲۰۰۰
۳۲/۰-۶۰/۰	۱۹/۹	صفر	۳۳	۷۰۰۰۰

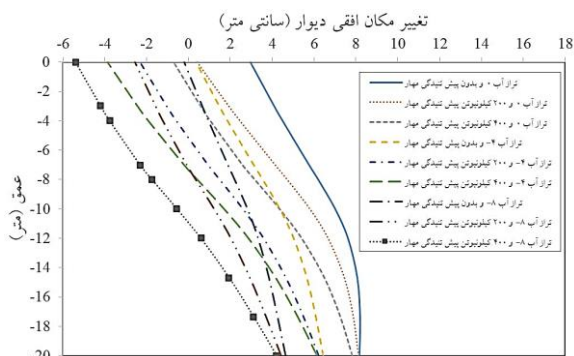


شکل ۶- مدل ساخته شده با FLAC در عمق نهایی گودبرداری برای صحت‌سنجی

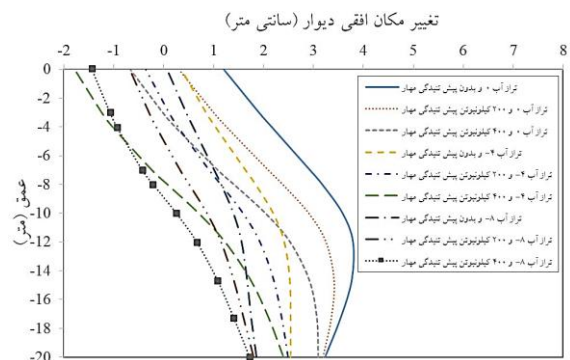
ارزیابی عددی مدل نرم‌افزاری منتج به تعیین تغییر مکان افقی دیوار و نشست خاک پشت دیوار گردید. تغییر مکان افقی دیوار و نشست خاک در مقایسه با نتایج پیشین به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه گردیده است. نتایج پیشین شامل نتایج محاسبات

در شکل (۶) مدل ساخته شده با نرم‌افزار FLAC برای صحت‌سنجی در آخرین گام گودبرداری ارائه گردیده است. خاک در پایین‌ترین تراز در هر دو جهت X و Y گیردار و در کناره‌ها در جهت X گیردار شده است.

۴-۱- اثر پیش‌تنیدگی مهار بر رفتار دیوار دیافراگمی در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) اثر توأم پیش‌تنیدگی مهار و تراز آب زیرزمینی بر رفتار دیوار در سه نوع خاک با مدول الاستیک متنوع ارائه شده است. با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل (۹) استنتاج می‌گردد در خاک ۱ که مدول الاستیک نسبتاً پایینی دارد؛ حداکثر تغییر مکان افقی دیوار در پایین‌ترین عمق دیوار اتفاق افتاده است. همچنین اعمال پیش‌تنیدگی به استرات‌ها باعث تغییر مکان افقی دیوار در ناحیه بالا و غیر مدفون گردیده است و بر حداکثر تغییر مکان افقی دیوار اثر ناچیزی داشته است. با بررسی اثرات ترازهای مختلف آب زیرزمینی بر رفتار دیوار نیز مشخص می‌گردد که بالا بودن آب زیرزمینی سبب جابه‌جایی بیش‌تر دیوار دیافراگمی به سوی داخل گود گشته است اما بر محل وقوع حداکثر تغییر مکان افقی دیوار چندان تأثیری نداشته است. از همین رو در خاک با مدول الاستیک پایین، اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها نقش چندانی در کاهش حداکثر تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی نداشته است.



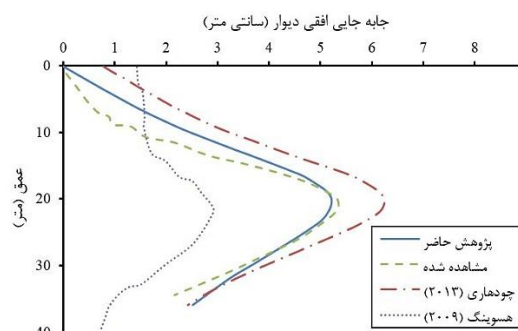
شکل ۹- تغییر مکان افقی دیوار در خاک ۱



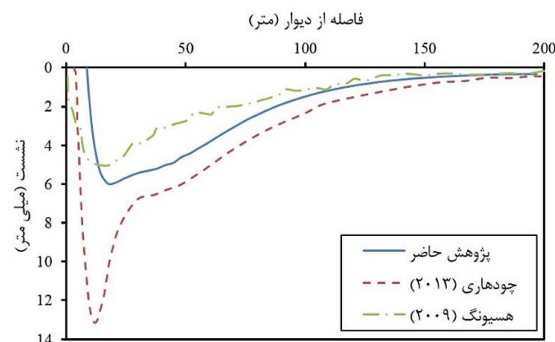
شکل ۱۰- تغییر مکان افقی دیوار در خاک ۲

در نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۰) اثر توأم پیش‌تنیدگی مهار و تراز آب زیرزمینی بر رفتار دیوار در خاک ۲ ارائه شده است. با بررسی این نمودار مشخص می‌گردد که با افزایش مدول الاستیک خاک، حداکثر تغییر مکان افقی دیوار از پایین‌ترین عمق

عددی Chowdhury و همکاران (۲۰۱۳) و Hsiung (۲۰۰۹) و مقادیر اندازه‌گیری شده تغییر مکان افقی دیوار است.



شکل ۷- صحت‌سنجی تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی



شکل ۸- صحت‌سنجی نشست خاک پشت دیوار دیافراگمی

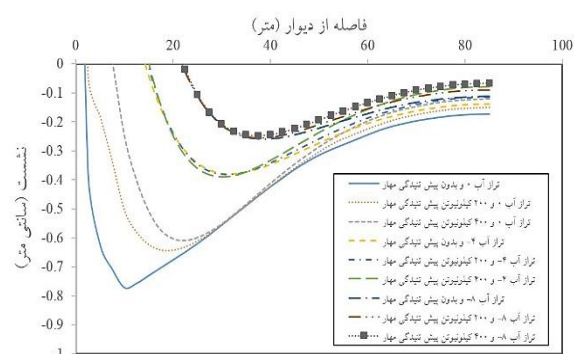
۴- نتایج آنالیز و بحث

ارزیابی‌های عددی این مقاله منجر به تعیین رفتار گود در حالات مختلف گردید. وقوع نشست سطحی زمین در اثر گودبرداری یکی از عوامل اصلی خسارت به تأسیسات و سازه‌های مجاور گودبرداری است. نشست سطح زمین معلول جابه‌جایی دیوار دیافراگمی بر اثر گودبرداری است. تغییر مکان دیوار دیافراگمی منجر به حرکت توده خاک نواحی اطراف حفاری می‌گردد. جابه‌جایی توده خاک در اعماق مختلف سبب ایجاد نشست خاک در سطح زمین می‌گردد. از همین رو با آنالیز رفتار دیوار، توده خاک و پروفیل نشست می‌توان ایمنی گودبرداری را ارزیابی نمود. در ادامه جابه‌جایی افقی دیوار، پروفیل‌های نشست سطحی زمین و کانتورهای حرکات افقی توده خاک برای ساختگاه‌های مختلف به تفکیک ارائه و تفسیر گشته است تا اثر تغییر سختی خاک و اثر آب زیرزمینی و اثرات اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها بر رفتار گود ارزیابی گردد.

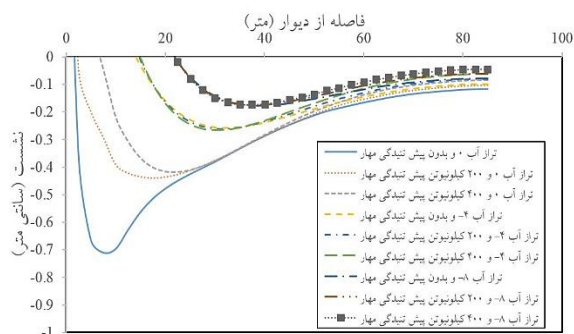
خاک باعث وقوع حداکثر تغییر مکان افقی دیوار در نواحی بالای دیوار گردد پس روش اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها مناسب با ساختگاه‌های مذکور است.

۴-۲- اثر پیش‌تنیدگی مهار بر نشست خاک

در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) پروفیل نشست خاک پشت دیوار در ترازهای مختلف آب زیرزمینی تحت نیروهای متنوع پیش‌تنیدگی مهار در ۳ نوع خاک مختلف ارائه شده است. با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش تراز آب زیرزمینی، پیش‌تنیدگی مهار تأثیری بر نشست خاک ندارد به گونه‌ای که در ترازهای آب ۴ متر و ۸ متر زیر سطح زمین، نمودارهای مختلف اعمال پیش‌تنیدگی تقریباً بر یکدیگر منطبق شده‌اند؛ و فقط در تراز آب بالاست که پیش‌تنیدگی باعث کاهش حداکثر نشست در خاک شماره ۱ گردیده است.



شکل ۱۲- پروفیل نشست خاک ۲

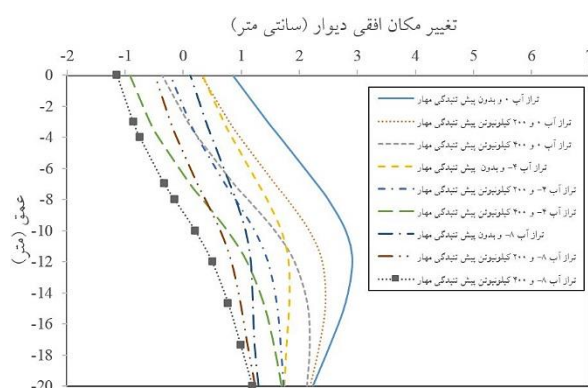


شکل ۱۳- پروفیل نشست خاک ۳

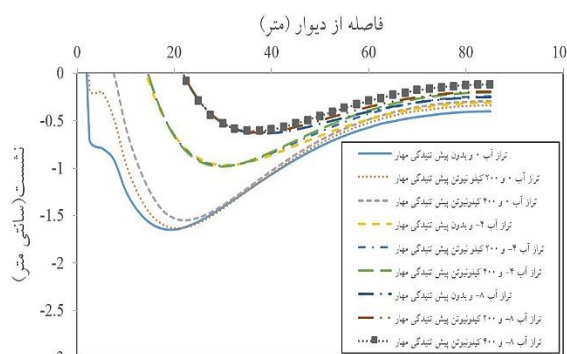
با ارزیابی نمودارهای نشست ارائه شده در شکل (۱۳) نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش مدول الاستیک خاک نشست کلی خاک کاهش می‌یابد. با افزایش مدول الاستیک خاک، اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها برای کاهش حداکثر نشست خاک در تراز آب منطبق بر سطح زمین اثرگذارتر نسبت به خاک با مدول الاستیک پایین است. هم‌چنین در خاک نوع ۲ نیز در ترازهای

دیوار به واسطه دیوار خصوصاً در تراز آب زیرزمینی بالا منتقل شده است.

در این نوع خاک نیز استرات‌ها بر کاهش تغییر مکان افقی دیوار در نواحی بالا و غیر مدفون دیوار اثرگذار بوده‌اند. با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۱) مشخص می‌گردد که در خاک ۳ که نسبت به دو خاک پیشین مدول الاستیک بالاتری دارد؛ حداکثر تغییر مکان افقی دیوار در نقطه بالاتری از پای دیوار قرار دارد. از آنجا که افزایش تراز آب زیرزمینی به طور کلی باعث افزایش تغییر مکان افقی دیوار و همچنین انتقال حداکثر تغییر مکان دیوار از پای دیوار به واسطه دیوار می‌گردد پس اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها در خاک شماره ۳ بخصوص در تراز آب منطبق بر سطح زمین بسیار اثرگذارتر بر کاهش حداکثر تغییر مکان افقی دیوار نسبت به سایر حالات است.

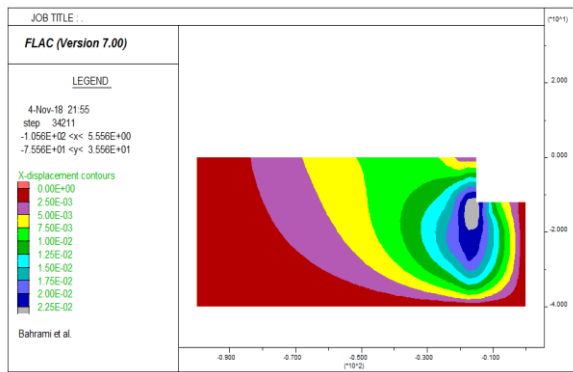


شکل ۱۱- تغییر مکان افقی دیوار در خاک ۳



شکل ۱۲- پروفیل نشست خاک ۱

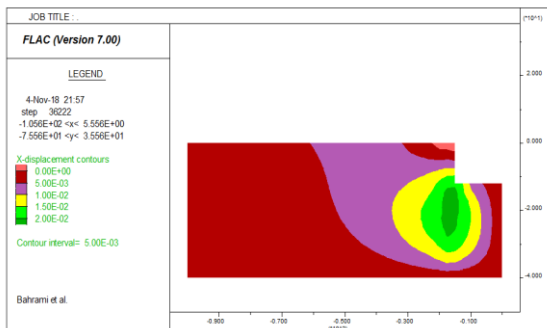
با ارزیابی شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) به طور کلی جمع‌بندی می‌گردد که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارهای جانبی سبب راندن بالای دیوار به سوی خارج گود می‌گردد ولی بر تغییر مکان نواحی عمیق دیوار چندان اثرگذار نیستند. از همین‌رو در ساختگاهی که تغییر مکان افقی دیوار در نواحی عمیق دیوار واقع گردد؛ پیش‌تنیدگی مهار جانبی تأثیر ناچیزی بر ارتقاء ایمنی گود خواهد داشت. از آنجا که عوامل ساختگاهی چون سختی بالا و اشباع بودن



شکل ۱۶- تغییر مکان افقی خاک ۳ در تراز آب صفر با ۲۰۰ کیلونیوتن پیش‌تنیدگی مهار

با ارزیابی کانتور ارائه شده در شکل (۱۶) درک می‌شود که اعمال پیش‌تنیدگی ۲۰۰ کیلونیوتن به مهار باعث کاهش میزان حداکثر تغییر مکان افقی خاک می‌گردد. در این حالت نیز همچنان حداکثر تغییر مکان افقی در عمق نهایی گود اتفاق افتاده است و با دور شدن از این ناحیه در هر دو جهت، کاهش تغییر مکان افقی خاک مشاهده می‌گردد.

همان‌طور که در کانتور شکل (۱۷) ارائه گردیده است؛ با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی مهارها به ۴۰۰ کیلونیوتن، حداکثر تغییر مکان افقی خاک کاهش یافته است. افزایش نیروی پیش‌تنیدگی مهارها سبب انتقال حداکثر تغییر مکان افقی خاک به سمت پایین دیوار گردیده است. ارزیابی کانتورهای ارائه شده در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به طور کلی نشانگر آن است که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها باعث تغییر محل وقوع حداکثر جابه‌جایی افقی خاک به سوی پای دیوار می‌گردد. علاوه بر این، پیش‌تنیدگی مهارها با کاهش حداکثر جابه‌جایی افقی توده خاک، سبب افزایش ایمنی سازه‌های مدفون نواحی مجاور گود نظیر لوله‌ها می‌گردد.



شکل ۱۷- تغییر مکان افقی خاک ۳ در تراز آب صفر با ۴۰۰ کیلونیوتن پیش‌تنیدگی مهار

پایین آب زیرزمینی، اعمال پیش‌تنیدگی چندان بر نشست خاک اثرگذار نیست.

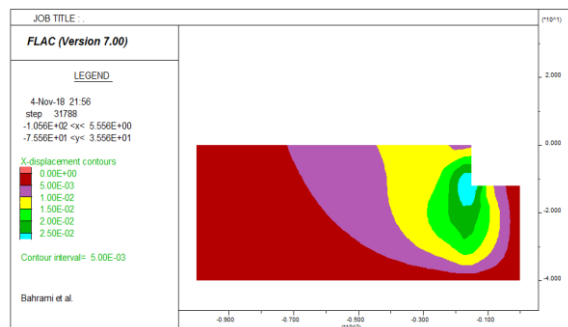
با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۴) نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش مدول الاستیک خاک اثرگذاری پیش‌تنیدگی مهار بر کاهش حداکثر نشست خاک در تراز آب بالا تشدید می‌گردد. در خاک شماره ۳ با مدول الاستیک بالا نیز در ترازهای پایین آب، اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها چندان بر نشست خاک اثرگذار نیست.

با ارزیابی نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) به طور کلی جمع‌بندی می‌گردد که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها در ساختگاه‌هایی با تراز آب زیرزمینی پایین و دارای خاک سست تأثیر ناچیزی بر کاهش نشست سطحی زمین دارد. ولی در خاک‌های سخت و اشباع اعمال پیش‌تنیدگی به مهارهای جانبی باعث کاهش ملموس نشست سطحی زمین می‌گردد.

۴-۳- اثر پیش‌تنیدگی مهار بر تغییر مکان افقی خاک

از آنجا که طبق نتایج بخش (۴-۲) اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها در خاک‌های با مدول الاستیک و تراز آب زیرزمینی بالا بر کاهش حداکثر نشست خاک اثرگذارتر است؛ در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) اثر پیش‌تنیدگی مهار بر تغییر مکان افقی خاک در خاک نوع ۳ با مدول الاستیک بالا و در تراز آب زیرزمینی منطبق بر سطح زمین در عمق نهایی گودبرداری ارائه گردیده است.

از آنجا که حرکت افقی خاک در سطح و عمق خاک می‌تواند سبب ایجاد نیرو به پی‌ها، سازه‌های سطحی و سازه‌های مدفون مجاور گود گشته و باعث خسارت بر سازه‌های مذکور گردد؛ ضرورت ارزیابی جابه‌جایی افقی توده خاک نواحی اطراف حفاری مشخص می‌گردد. با بررسی شکل (۱۵) که شامل گودبرداری بدون اعمال پیش‌تنیدگی به مهارهاست نتیجه‌گیری می‌شود که حداکثر تغییر مکان افقی دیوار در پایین گود و اواسط دیوار رخ داده است و با فاصله گرفتن از محل تقاطع عمق نهایی گود و دیوار در هر دو جهت از تغییر مکان افقی خاک کاسته می‌شود.



شکل ۱۵- تغییر مکان افقی خاک ۳ در تراز آب صفر بدون پیش‌تنیدگی مهار

- American Institute of Steel Construction (AISC), "Manual of steel construction, Allowable stress design", USA, 2001.
- Chowdhury S, Deb K, Sengupta A, "Estimation of Design Parameters for Braced Excavation: Numerical Study", International Journal of Geomechanics, ASCE, 2013, 13 (3), 234-247.
- Clough, GW, O'Rourke TD, "Construction Induced Movements of In-Situ Walls", Design and Performance of Earth Retaining Structures Conference, ASCE special publication, 1990.
- Freiseder MG, Schweiger HF, "Numerical Analysis of Deep Excavations", Proceedings of Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems, 1998, 283-292.
- Hashash YMA, Whittle, AJ, "Ground Movement Prediction for Deep Excavations in Soft Clay", Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 122 (6), 474-486.
- Hsieh PG, Ou CY, "Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused By Excavation", Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35, 1004-1017.
- Hsiung BC, "A Case Study on the Behaviour of a Deep Excavation in Sand", Computers and Geotechnics, 2009, 36 (4), 665-675.
- Hsiung BC, Dao SD, "Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands", The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19, 17325-17344.
- Hwang RN, Za- Cjieg M, Wang HC, "Toe Movements of Diaphragm Walls and Correction of Inclinator Readings", Journal of Geoengineering, 2007, 2 (2), 61-71.
- Itasca, "User's guide for FLAC version 7.0", Itasca Consulting group Inc., Minnesota, US, 2011.
- Kung GTC, Juang CH, Hsiao ECL, Hashash YMA, "Simplified Model for Wall Deflection and Ground Surface Settlement Caused By Braced Excavation in Clays", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (6), 731-747.
- Ou CY, "Deep Excavation: Theory and Practice", CRC Press, UK, 2006.
- Ou CY, Liao JT, Lin HD, "Performance of Diaphragm Wall Constructed Using Top Down Method", Geotech Geoenviron Eng, 1998, 124 (9), 798-808.
- Pakbaz M, Imanzadeh S, Bagherinia KH, "Characteristics of Diaphragm Wall Lateral Deformations and Ground Surface Settlements: Case Study in Iran-Ahwaz Metro", Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35, 109-121.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش عددی، رفتار دیوار دیافراگمی به روش تفاضل محدود بررسی گردید. در حالی که ضخامت دیوار، ارتفاع دیوار و عمق گود ثابت در نظر گرفته شده بود؛ تغییر مکان افقی دیوار دیافراگمی و همچنین نشست و جابه‌جایی خاک تحت نیروهای پیش‌تنیدگی متنوع مهارها در سه نوع خاک مختلف ماسه‌ای در ترازهای مختلف آب زیرزمینی بررسی گردید. نتایج پژوهش به شرح زیر است:

الف) ارزیابی‌های این مقاله مشخص نمود که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها باعث عقب راندن دیوار در نواحی غیر مدفون و بالای دیوار می‌گردد و پیش‌تنیدگی مهارها بر تغییر مکان افقی دیوار در نواحی مدفون و عمیق دیوار اثر اندکی دارد. همچنین بررسی‌های این مقاله نشان داد که افزایش مدول الاستیک خاک و بالا بودن تراز آب زیرزمینی سبب می‌گردند که حداکثر تغییر مکان افقی دیوار از پای دیوار به سمت اواسط دیوار منتقل شود.

ب) تحلیل‌های این مقاله نشان داد که اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها در کاهش حداکثر نشست خاک در ترازهای آب پایین‌چندان اثرگذار نیست و همچنین اثر پیش‌تنیدگی مهار بر کاهش حداکثر نشست خاک، با افزایش مدول الاستیک خاک تشدید می‌گردد.

پ) با جمع‌بندی ارزیابی‌های موجود در مقاله حاضر نتیجه‌گیری می‌شود از آنجا که بالا بودن تراز آب و افزایش مدول الاستیک خاک سبب می‌گردند که حداکثر تغییر مکان افقی دیوار از پایین دیوار به سمت بالا منتقل شود و همچنین پیش‌تنیدگی مهار بر قسمت‌های بالایی دیوار اثرگذارتر است و از سویی دیگر با کاهش حداکثر جابه‌جایی دیوار، نشست خاک پشت دیوار نیز کاسته می‌گردد؛ پس روش اعمال پیش‌تنیدگی به مهارها برای کنترل تغییر مکان افقی دیوار و نشست خاک، مناسب برای خاک‌های با مدول الاستیک بالا و اشباع است.

۶- مراجع

- اشرفی ح، "اصول و مبانی گودبرداری و سازه‌های نگهبان"، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۵.
- حداد ع، جاودانیان ح، مهرزاد ب، "گودبرداری‌های عمیق: مبانی نظری و اجرایی"، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۴.
- قضاوی م، مشفق یگانه م، "محاسبه نیروی لرزه‌ای وارد بر دیوار حائل و محل اثر آن در خاک‌های ماسه‌ای چند لایه"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست تبریز، ۱۳۹۲، ۴۲ (۲).
- وطن‌پور آ، ستوده ع، فرهیخته ع، "روش‌های طراحی و اجرای سازه‌های حفاظت موقت ایستگاه‌های مترو"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۹.

EXTENDED ABSTRACT

Assessment of the Effect of Pre-stressing Steel Strut on Displacement of the Diaphragm Wall and the Soil

Mohammad Bahrami, Mohammad Iman Khodakarami *, AbdolHossein Haddad

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, 35131-19111, Iran

Received: 08 February 2017; Accepted: 09 October 2017

Keywords:

Diaphragm wall, Pre-stressing, Strut, Deep excavation, FLAC

1. Introduction

In this research, the effects of pre-stressing steel struts on horizontal displacement of the diaphragm wall and settlement of the soil behind the wall are investigated utilizing the FLAC software through implementing the finite difference method and Mohr-Coulomb behavior model. A 20m diaphragm wall with 80 cm thickness and the Young's Modulus of 22000 MPa and the Poisson ratio of 0.15 is modeled. The final depth of excavation is 12 m and the properties corresponding to the concrete stiffness of the diaphragm wall, depth of excavation and arrangement of the struts are taken from (Freiseder and Schweiger, 1998). Modeling is done for 3 types of soils with different modulus of elasticity values including 3 pre-stressing forces and 3 different water levels, so totally 27 models were designed and analyzed. For this purpose 3 types of sandy soils with a Poisson ratio of 0.30 are used for modeling. The soils properties are taken from Chowdhury et al. (2013) and are given in Table 1. In this table ϕ' denotes the internal friction angle and C' denotes the soil's cohesion. This research is conducted for 3 water levels; at the ground level and for depths of 4 and 8 m below the ground level. The models are analyzed for three cases namely non-pre-stressing and pre-stressing forces of 200 and 400 KN.

Table 1. Soil properties used for the numerical assessment

Soil NO	Density (kN/m ³)	C' (kN/m ²)	ϕ' (Degree)	Modulus of Elasticity (kPa)
1	19.7	0	32	19000
2	19.7	0	33	48000
3	19.9	0	33	70000

The utilized struts in the numerical assessment are of the type of steel struts with the specific gravity of 7850 kg/m³ and the Young Modulus of 2×10^8 . The horizontal distance between the struts is taken 5 m for all the models. The properties of modeled struts are given in Table 2.

Table 2. Steel Struts properties used in the numerical assessment

Section provided	Cross sectional (m ² × 10 ⁻⁴)	Moment of inertia (m ⁴ × 10 ⁻⁸)
H400×400×13×21	218.7	66600

* Corresponding Author

E-mail addresses: jeobahrami@gmail.com (Mohammad Bahrami), khodakarami@semnan.ac.ir (Mohammad Iman Khodakarami), ahaddad@semnan.ac.ir (Abdol-Hossein Haddad).

First, in case of existing water, dewatering is done for the intended depth at each stage. In continuation, excavation is performed for the intended depth at each stage and then the struts are installed and prestressed. This process is continued to reach the final depth of excavation. The step-by-step procedure of the excavation cycle for depths below the ground level is shown in Table 3.

Table 3. Depths of excavation process

Step	Dewatering (m)	Excavation (m)	Installation of struts (m)
1	4	4	3
2	8	8	7
3	12	12	-

2. Validation

To ensure validity of the numerical modeling procedure, use has been made of the wall presented in the article by Chowdhury et al. (2013). They have utilized the case study model of the diaphragm wall published in article (Hsiung, 2009) for validation of his numerical research. The validation results are presented in Fig. 1

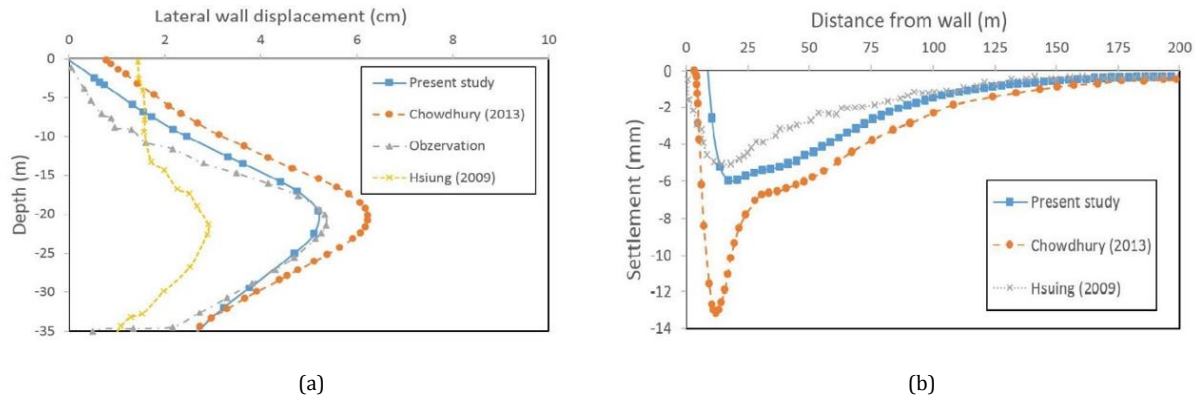


Fig. 1. Comparison of observed and predicted movement of wall and soil: a) Comparison of observed and predicted lateral displacement of wall, b) Predicted ground surface settlement

3. Analysis

3.1. Effect of pre-stressing of struts on the behavior of the diaphragm wall

Analysis and investigating the effect of pre-stressing on the steel struts show that with higher values of the soil elastic modulus and higher ground water levels, the position of maximum horizontal displacement moves from the wall base up to the ground level. Also with increase in the soil elastic modulus, the maximum horizontal displacement of the wall decreases.

3.2. Effect of struts pre-stressing on the soil settlement

Assessment of the article revealed that pre-stressing of the struts not only causes reduced soil settlement behind the wall but also causes that soil settlement initiate at a distance from the wall. Also the analyses made in this research showed that with lowering of the ground water level, pre-stressing of the struts would have insignificant effect on decreasing the soil settlement.

4. Conclusions

In this article numerical assessment of the diaphragm wall is done utilizing the finite difference method. While assuming the wall's thickness and length and also the excavation depth to be constant, the horizontal

displacement of the diaphragm wall and soil settlement under various struts pre-stressing forces for three different sandy soils and different ground water levels were investigated and the results are the follows:

A. The assessments made in this article revealed that pre-stressing the struts pushes back the wall at non-embedded and upper parts of the wall, and pre-stressing the struts has negligible effect on the horizontal displacement of the wall at the buried and deep parts of it. Also, investigations in this article showed that increase in the soil modulus of elasticity and higher water level cause transfer of the maximum horizontal displacement from the wall base toward the middle of the wall.

B. Analyses of this article showed that pre-stressing the struts is not significant in reducing the maximum soil settlement at lower ground water levels also the effect of pre-stressing the struts in reducing the maximum soil settlement is intensified by increase in the soil modulus of elasticity.

C. With respect to the assessments made in this article it is concluded that higher water level and increase in the soil modulus of elasticity cause transfer of the wall's maximum horizontal displacement toward the upper part of it. Also pre-stressing the struts affects more the upper parts of the wall and on the other hand with decrease in the maximum wall displacement, the amount of soil settlement behind the wall also decreases. Then pre-stressing the struts for controlling the wall's horizontal displacement and soil settlement is an appropriate method for the soils with higher values of modulus of elasticity and saturation.

5. References

- Freiseder MG, Schweiger HF, "Numerical Analysis of Deep Excavations", Proceedings of Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems, 1998, 283-292.
- Chowdhury SS, Deb K, Sengupta A, "Estimation of Design Parameters for Braced Excavation: Numerical Study", International Journal of Geomechanics, ASCE, 2013, 13 (3), 234-247.
- Hsiung BCB, "A Case Study on the Behaviour of A Deep Excavation in Sand", Computers and Geotechnics, 2009, 36 (4), 665-675.