

S. A. Yadavar

Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail:

A.yadavar@stu.qom.ac.ir

E. Dehghani*

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail:

eng_dehghani@yahoo.com

Investigation of the Lateral Soil Pressure on the Basement Walls Constructed Based on Top-down Method

The method for retaining the excavated pit could have a significant effect on the soil pressure acting on the retaining walls; For this purpose, since the Top-Down construction method is widely used, In this study, a series of numerical analyses has been conducted to investigate the effect of the excavation method and the distribution of the structural elements on the soil pressure distribution. Generally, for engineering purposes, active and at-rest soil pressure distribution and the Peck apparent pressure distribution (in the case of retained walls) are used for soil pressure determination. The results of the study suggest that in contrast to the at-rest and active soil pressure distribution, the pressure distribution on retaining walls has no similarity with the triangular distribution and the Peck's APD provides an acceptable estimation of soil pressure and its distribution. The results also show that with the increase of deformation due to the construction of the wall, as an example in one case, a 60% increase in ground settlement reduced the soil pressure acting on the walls by up to 15%. It's also noteworthy that this study focuses only on a special type of soil, So the result might be inapplicable to other circumstances.

Keywords: Lateral soil pressure, Top-Down method, Peck's APD, Arching effect.

* Corresponding author

Received 21 April 2022, Revised 04 June 2022, Accepted 09 June 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8131.1390

بررسی فشار خاک وارد بر دیوارهای زیرزمین در روش‌های متداول اجرای گود به صورت بالا به پایین

روش اجرای گود می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در میزان فشارهای وارده بر دیوارهای حائل داشته باشد؛ بدین منظور و از آنجایی که روش اجرای بالا به پایین امروزه به شکل گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این تحقیق مطالعه عددی در نرم‌افزار Plaxis به منظور بررسی تأثیرات شیوهی خاک‌برداری و چینش المان‌های سازه‌ای در فشار خاک وارد بر دیوارهای زیرزمین، انجام شده است. به شکل کلی، در کاربردهای مهندسی جهت تعیین فشار خاک عموماً از فشار خاک حالت سکون و یا فعال و برای دیوارهای مهارشده از دیاگرام‌های ظاهری فشار استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که برخلاف توزیع فشار خاک حالت سکون و فعال، توزیع فشار وارد بر دیوارهای حائل در روش ساخت از بالا هیچ‌گونه قرابتی با توزیع مثلی نداشته و توزیع فشار ظاهری پک تخمین قابل قبولی از اندازه فشار خاک و توزیع آن ارائه می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از تأثیرگذاری بالای تغییر شکل‌ها در فشار وارده بر دیوارها می‌باشد؛ و به‌عنوان نمونه در یک حالت افزایش ۶۰ درصدی تغییر شکل‌ها منجر به کاهش حدود ۱۵ درصدی کل فشار وارد بر دیوار شده است. مدل‌سازی انجام‌شده در این تحقیق صرفاً بر اساس یک نوع از خاک ماسه‌ای بوده که می‌بایست در تحلیل و استفاده از نتایج، به این امر توجه داشت.

واژگان کلیدی: فشار جانبی خاک، خاک‌برداری بالا به پایین، توزیع پک، اثرات قوس زدگی.

سید علی یادآور

دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

A.yadavar@stu.qom.ac.ir

احسان دهقانی

فیروزآبادی*

استادیار، دانشکده فنی و
مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

eng_dehghani@yahoo.com

۱- مقدمه

دیوارهای پیرامونی زیرسازه که به دیوارهای زیرزمین مشهور هستند، سعی شده است تا فشار خاک وارد بر آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد، برای نیل به این هدف روش اجرای ساخت به صورت بالا به پایین به دلیل گستردگی استفاده از آن، انتخاب شده است.

۱-۱- معرفی روش بالا به پایین

روش پایدارسازی گود و اجرای هم‌زمان سازه به شکل بالا به پایین اولین بار در شهرهای میلان و پاریس و در دهه ۶۰ میلادی ابداع شد که هدف اصلی از این نوع اجراء، حفاظت از ساختمان‌های تاریخی مجاور محل گودبرداری و کنترل نشست‌ها بود [۱]. رفته‌رفته این روش اجرا به یکی از روش‌های متداول اجرای گود و سازه بدل گردید. این روش پایدارسازی و اجراء، همانند سایر

دیوارهای پیرامونی زیرسازه سهم مهم و تأثیرگذاری در رفتار کلی سازه‌ها ایفا می‌کنند. از سوی دیگر و از آنجاکه این دیوارها در تماس با خاک قرار دارند، می‌توان گفت رفتار این دیوارها متأثر از قوانین اندرکنشی خاک و سازه خواهد بود که همین امر بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. یکی از کلیدی‌ترین عواملی که طراحی این دیوارها را به خود وابسته می‌کند، فشار جانبی خاک می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی بهتر رفتار

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹.

DOI: 10.22091/cer.2022.8131.1390 شناسه دیجیتال

تحقیقات متعددی حاکی از کنترل تغییرشکلها با وجود ضعیف بودن پارامترهای مقاومتی خاک محل، می باشد [۱۱-۱۴]. روش ساخت از بالا دارای تنوع اجرایی زیادی بوده که در پروژه‌های ساختمانی ایران بعضاً به دلیل کمبود امکانات یا به منظور کاهش هزینه‌ها، امکان ساخت یکپارچه دیوارهای پیرامونی پیش از خاکبرداری وجود نداشته و این دیوارها به صورت مرحله‌ای و با پیشرفت خاکبرداری اجرا می‌شوند. عمده تفاوت این شیوه ساخت مرحله‌ای با روش متداول مذکور در آن است که در این روش پس از اجرا و نصب ستون‌ها و بدون ساخت دیوارهای پیرامونی ابتدا حفاری قسمت میانی تا تراز معین انجام شده و سپس قسمت‌های کناری به صورت یک دهانه در میان حفاری شده و بلافاصله دیوار مربوط به آن دهانه اجرا می‌شود [۱۵].

همان‌طور که گفته شد این روش ساخت در فضای ساخت ساختمانی شهری متداول‌تر بوده و با توجه به تحقیقات محدود صورت گرفته در این حوزه هدف این تحقیق بررسی دقیق‌تر این روش و تأثیرات اجرای مرحله‌ای بر رفتار خاک می‌باشد. در ادامه به منظور خلاصه‌نویسی به روشی که دیوارهای پیرامونی در آن به صورت مرحله‌ای ساخته شده روش اول و به حالتی که دیوارها پیش از شروع مراحل خاکبرداری ساخته می‌شوند، روش دوم اطلاق خواهد شد.

۱-۲- روش های مشهور و متداول تعیین فشار خاک در طراحی دیوار

تعیین فشار جانبی خاک به‌طور کلی یکی از کلیدی‌ترین فاکتورهای طراحی دیوارهای حائل است که در این راستا ساماتار^۱، ضمن بررسی مزایا و معایب روش ساخت از بالا، استفاده از دیاگرام‌های ظاهری فشار را در طراحی پیشنهاد کرده است [۱]. دیاگرام‌های ظاهری فشار برای تعیین فشار خاک در گودهای مهارشده به صورت

روش‌های مشابه داری تنوع زیادی بوده اما روند کلی و متداول آن بدان صورت می‌باشد که ابتدا دیوارهای حائل پیرامونی (عمدتاً به شکل دیوار دیافراگمی) اجرا شده و پس از اجرای دیوار، شمع‌هایی در محل ستون‌ها و در زیر تراز فونداسیون، به منظور ساخت شالوده موقت ستون‌ها اجرا می‌شوند. در مرحله بعد، ستون‌های سازه در محل شمع‌های اجراشده، نصب می‌شوند، سپس مراحل حفاری آغاز می‌گردد و دقیقاً پس از پایان خاکبرداری هر مرحله و رسیدن به تراز موردنظر، دال‌های بتنی طبقات اجرا می‌شوند. این دال‌ها اعضای دائمی سازه اصلی بوده که مشابه استرات‌ها در روش مهار متقابل بار ناشی از فشار جانبی خاک را منتقل می‌کنند. پس از اتمام مراحل خاکبرداری، شالوده اصلی سازه اجرا می‌شود. در این روش می‌توان هم‌زمان با اجرای طبقات زیرین سازه (زیرسازه) قسمت‌های فوقانی سازه (روسازه) را نیز اجرا کرد که سبب کاهش زمان ساخت و سازه خواهد شد [۲].

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی بررسی کارایی این روش ساخت و یا ارائه ابتکاراتی در این حوزه، انجام شده است؛ برای مثال می‌توان به دو روش مشهور «جزیره‌ای» و «بالا به پایین نیمه» اشاره کرد که ایده کلی این دو روش بر پایه ادغام دو روش بالا به پایین و روش پایین به بالای متعارف (مهارمتقابل) به منظور بهره‌مندی از سرعت بالای روش پایین به بالا و سختی زیاد روش بالا به پایین است [۳ و ۴]. همان‌طور که گفته شد محققین مختلفی سعی در بررسی کارایی این روش داشته که نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از توانایی بالای این روش در کنترل تغییرشکلها خصوصاً در خاک‌های سست و یا در سازه‌هایی با فرم هندسی نامتقارن و پیچیده، می‌باشد [۵-۱۱].

روش ساخت از بالا در ایران خصوصاً در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است، از جمله اولین سازه‌های زیرزمینی بزرگ مقیاس که مشابه روش شرح داده شده ساخته شده‌اند، می‌توان به ایستگاه‌های متروی شهری اهواز، اصفهان، تهران و تبریز اشاره کرد که نتایج

^۱- Samathar

شده آیا پدیده قوس زدگی می‌تواند در باز توزیع تنش‌ها تأثیرگذار باشد؟

در گودبرداری‌های انجام شده به روش مهار متقابل، وجود مهارها و در مواردی نیروی پیش‌تنیدگی آن‌ها، سبب جلوگیری از حرکت خاک به سمت داخل گود می‌شود با این وجود اما، در ترازهای پایین‌تر خصوصاً ترازهای زیرین گود و از آنجا که سختی خاک آن محدود کمتر بوده، قسمتی از خاک پشت دیوار، به سمت داخل حرکت کرده که این جابه‌جایی نسبی (نسبت به لایه ساکن) و به دنبال آن بسیج تنش‌های برشی در محل تماس توده‌های متحرک و ایستای خاک، باعث کاهش فشار در آن ناحیه می‌گردد؛ از این جهت لامب و ویتمن^۳، عنوان داشتند که فشار خاک در قسمت‌هایی بالای تقریباً در حالت مقاوم و در قسمت‌های زیرین در حالت فعال خواهد بود [۲۸].

نتایج تحقیقات صحرایی نگ^۴ و همکاران (۲۰۱۲)، نشان می‌دهد که قوس زدگی که در گودبرداری‌های مهارشده رخ می‌دهد، باعث افزایش تنش‌های جانبی خاک وارده به دیوار در ترازهای بالایی گود می‌شود [۲۹]؛ به عبارت دیگر در این گودهای مهارشده وجود اختلاف سختی مابین ناحیه مهارشده پشت استرات‌ها و بین خاک زیر تراز گودبرداری، موجب ظهور پدیده قوس زدگی و بازتوزیع تنش‌ها و به دنبال آن‌ها، تشکیل یک توزیع غیرخطی از فشار بر دیوار، مطابق شکل ۱، می‌شود.

علاوه بر قوس زدگی قائم که موضع مورد بحث تا بدین جا بود، وجود اختلاف سختی در راستای طولی گود نیز می‌تواند منجر به رخداد پدیده قوس زدگی و به دنبال آن باز توزیع تنش‌ها شود، برای نمونه در گودهای مهارشده به کمک شمع و الوار، به دلیل اختلاف بالای سختی بین شمع و الوارهای چوبی پدیده قوس زدگی افقی رخ خواهد داد.

مهار متقابل و در روش ساخت از پایین کاربرد دارد، با این وجود اما از آنجا که سقف‌ها در روش بالا به پایین عملکردی مشابه مهارهای سخت در روش مهار متقابل داشته، استفاده از این روش تا حدودی منطقی به نظر می‌رسد.

اولین و مشهورترین دیاگرام فشار ظاهری توسط ترزاقی و پک^۲ (۱۹۶۷) و پک (۱۹۶۹) ارائه گردید [۱۶] و [۱۷]. از آن زمان محققین متعددی با بررسی عددی و میدانی گودبرداری‌های مهارشده در خاک‌های مختلف، سعی در ارائه دیاگرام‌های طراحی تحت شرایط مختلف و یا ارزیابی این روش با مشاهدات میدانی داشتند [۱۸-۲۷]. با این وجود آنچه امروزه بیشتر در طراحی دیوارهای مهارشده در خاک‌های ماسه‌ای استفاده می‌شود توزیع ظاهری پک است که برای این نوع خاک‌ها به شکل یک توزیع یکنواخت بوده که براساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود. همچنین پوش چبوتاریف که برخلاف پوش پک از یک توزیع دوزنقه‌ای برخوردار است و حداکثر فشار آن براساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$p = 0.65 \gamma H K_a \quad (1)$$

$$p = 0.25 \gamma H \quad (2)$$

که در رابطه فوق، P ، γ ، H و K_a به ترتیب برابر فشار وارد بر هر نقطه از دیوار، وزن مخصوص خاک، ارتفاع دیوار و ضریب فشار فعال خاک است.

همان‌طور که بیان شد، دیاگرام‌های مذکور مرتبط با دیوارهای مهار شده است که در آن‌ها دیوار به صورت یکپارچه ساخته می‌شود. اکنون سؤال مهمی که مطرح می‌شود آن است که ساخت مرحله‌ای دیوار در روش اول چه تأثیری می‌تواند بر روی نتایج فشار داشته باشد، بدان معنا که در شرایطی که دیوار پس از خاکبرداری ساخته

³- Lambe and Whitman

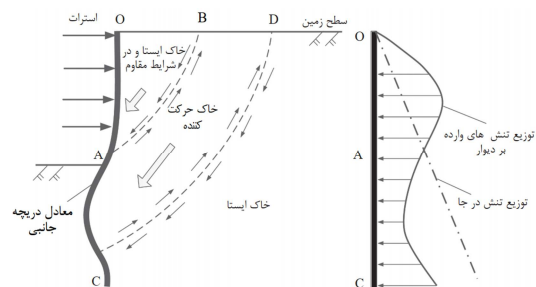
⁴- Ng

²- Terzaghi and Peck

قابل توجهی توزیع فشار جانبی خاک را تحت الشعاع قرار دهد؛ برای مثال، از آنجاکه در روش اول ابتدا ستون‌ها اجرا می‌شود و بعد خاکبرداری انجام شده و در نهایت دیوارها اجرا می‌شوند، می‌توان گفت در فاصله زمانی بین خاکبرداری تا اجرای دیوار عملاً خاک به کمک پدیده قوس زدگی، فشار جانبی ناشی از وزن خود را بر روی ستون‌ها منتقل می‌کند، در این صورت پس از ساخت دیوار عملاً نیروی جانبی خاصی (تا اجرای فاز بعدی خاکبرداری) از طرف خاک به دیوارها وارد نمی‌شود، این امر خصوصاً در طراحی دیوار طبقه آخر زیرزمین می‌تواند تأثیرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

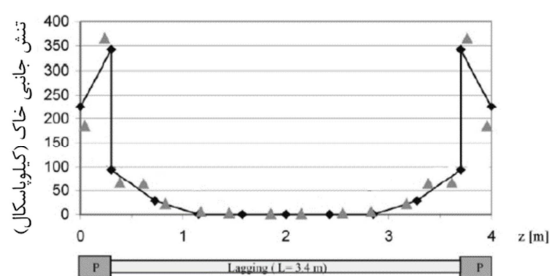
بنابراین براساس موارد ذکر شده می‌توان گفت، فشار جانبی وارده بر دیوارهای زیرزمین تابع عوامل مختلفی است که نیازمند به تحقیق و بررسی بیشتری بوده که متأسفانه در ادبیات فنی تحقیقات گسترده‌ای حول مسئله فشار جانبی وارد بر دیوارهای زیرزمین در روش اول صورت نگرفته است. با این وجود اما تحقیقات انجام شده توسط فاخر و همکاران (۱۳۹۷)، نشان می‌دهد که فشار وارد بر دیوارهای زیرزمین در روش دوم از روندی مشابه توزیع پیک و ترازقی برخوردار بوده و به صورت کلی فشار خاک ما بین فشار حالت سکون و فعال قرار می‌گیرد [۳۱]. مدل‌سازی عددی صورت گرفته توسط صادقی و رجحانی نیز بر همین مسئله یعنی قرار گرفتن فشار در ناحیه بین فشار خاک سکون و فعال تأکید دارد، اما نتایج ایشان حاکی از بالاتر بودن فشار جانبی خاک بر دیوار در روش اول نسبت به روش دوم می‌باشد [۳۲].

هدف این تحقیق به شکل کلی بررسی فشار جانبی وارد بر دیوار در حالت ساخت مرحله‌ای روش اجرای بالا به پایین و مقایسه اثرات این شیوه از اجرا بوده که بدین منظور از مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های عددی سه‌بعدی، استفاده شده که جزئیات آن در بخش آتی ارائه خواهد شد.



شکل ۱- اثرات قوس زدگی پشت دیوارهای مهارشده بر فشار جانبی وارده

در این راستا ورمیر^۵ و همکاران (۲۰۰۱)، با مدل‌سازی سه‌بعدی یک گود مهارشده به کمک شمع‌های نگهدارنده، فشار خاک وارده در فاصله بین دو شمع نگهدارنده را محاسبه کردند، همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است در نواحی میانی بین دو شمع عملاً فشار خاک خاصی به الوارهای چوبی وارد نشده و عمده فشارها به شمع‌ها و نواحی مجاور آن وارد شده است [۳۰].



شکل ۲- توزیع فشار جانبی وارده بر دیواره‌ی گود در یک تراز معین بر اساس نتایج ورمیر و همکاران [۳۰]

با توجه به تحقیقات یادشده می‌توان نتیجه گرفت که عمده پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه به بررسی کارایی این روش و یا به ارائه اصلاحاتی جهت بهبود آن می‌پردازند؛ از طرفی دیگر با توجه به روش متداول یادشده در ایران می‌توان نتیجه گرفت که این روش، از حیث شیوه اجرای دیوارهای حائل (ساخت مرحله‌به‌مرحله دیوارها حین گودبرداری) و همچنین زمان اجرای سقف طبقات، دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای با روش‌های مرسوم (ساخت یکپارچه دیوار) بوده که این اختلاف در شیوه‌ی اجرای دیوار می‌تواند تا حد

⁵- Vermeer

۲- مدل سازی

به منظور مدل سازی دقیق تر سختی تابع تنش خاک، از مدل رفتاری خاک سخت شونده استفاده شده است. هدف از انتخاب این مدل رفتاری، همان طور که گفته شد، شبیه سازی دقیق تر رفتار خاک در شرایط باربرداری (پس از حفاری) و محاسبه ی دقیق تر و تابع تنش سختی خاک در اعماق مختلف است. در این مدل رفتاری سختی خاک به کمک سه پارامتر ورودی: سختی سکانتی و سختی مماسی در حالت بارگذاری و باربرداری؛ و بر اساس تنش همه جانبه محاسبه شده که منجر به مدل سازی دقیق تر خاک در اعماق و شرایط مختلف می گردد. همچنین به دلیل آنکه انتظار می رود رفتار المان های سازه ای در شرایط استاتیکی در حوزه ی الاستیک باقی بماند، بنابراین از مدل رفتاری الاستیک برای مدل سازی آن ها استفاده شده است. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت شونده و الاستیک مرتبط با خاک و سازه ارائه گردیده است. بستر خاکی مورد مطالعه در این تحقیق با فرض خاک ماسه ای با چسبندگی اندک انتخاب شده است. هدف از انتخاب این بستر، بررسی رفتار دسته ای از خاک های دانه ای با میزان محدودی از چسبندگی ذاتی است؛ البته بررسی صرفاً یک نوع مشخصی از بستر خاکی می تواند دامنه کاربرد نتایج را تا حد زیادی به خود محدود کرده که می بایست در تحلیل نتایج بدان توجه داشت.

آنالیز اجزای محدود به دلیل توانایی بالا در حل مسائل ژئوتکنیکی امروزه به شکل وسیعی در تحقیقات و فعالیت های مهندسی و خصوصاً مسائل مرتبط با خاکبرداری و یا پایدارسازی گود، کاربرد دارد. از آنجاکه گودها علی الخصوص گودهای پایدار شده براساس روش اول ساخت از بالا، به دلیل تنوع مکانیسم های انتقال تنش در آن ها اساساً به صورت یک مسئله سه بعدی شناخته می شوند و همچنین از آنجاکه صحت استفاده از مدل سازی های عددی در حل مسائل سه بعدی مرتبط با گودبرداری ها، براساس داده های مطالعات صحرایی توسط محققین مختلفی مورد تأیید قرار گرفته است [۳۳-۳۸]، در این تحقیق، به منظور بررسی عوامل مختلف بر تنش های جانبی خاک، از نرم افزار عددی Plaxis 3D ۲۰۷ استفاده شده است [۳۹].

۲-۱- تعریف مصالح و مدل رفتاری خاک و سازه

مدل رفتاری مورد استفاده در آنالیز اجزای محدود نقش کلیدی را در صحت نتایج به دست آمده دارد؛ در نتیجه و از آنجایی که مسئله ی مورد بررسی در این تحقیق مرتبط با گودبرداری و به دنبال آن حاکم شدن شرایط باربرداری / بارگذاری مجدد و تأثیرات آن بر پارامترهای مقاومتی و سختی خاک بوده و همچنین

جدول ۱- پارامترهای مفروض به خاک مورد استفاده در تحقیق

مقادیر مفروض	یکا	پارامترهای مدل
Hardening Soil	-	مدل رفتاری
زهکشی شده	-	وضعیت زهکشی
18	kN / m^3	وزن مخصوص
45000	kN / m^2	E_{50}^{ref}
45000	kN / m^2	E_{oed}^{ref}
135000	kN / m^2	E_{ur}^{ref}
15	kN / m^2	C'_{ref}
30	o	ϕ'_{ref}

جدول ۲- پارامترهای مفروض برای المان‌های سازه‌ای

پارامترهای مدل	یکا	ستون	سقف	دیوار	شالوده
مدل رفتاری	-	الاستیک	الاستیک	الاستیک	الاستیک
مدول یانگ	kN / m^2	200×10^6	26×10^6	9.1×10^6	26×10^6
سطح مقطع	m^2	0.0303	-	-	-
ممان اینرسی	m^3	0.593×10^{-3}	-	-	-
ضخامت	m	-	0.2	0.4	1
وزن مخصوص	kN / m^3	78	25	25	25
ضریب پواسون	-	-	0.25	0.25	0.25

کاهش یافته (به‌منظور در نظرگیری اثرات ترک‌خوردگی) استفاده شده است. ستون‌ها نیز با فرض استفاده از پروفیل استاندارد HE300M، مدل‌سازی شده‌اند. نهایتاً شمع‌های قرارگرفته در زیرستون‌ها با طول ۳ متر و قطر ۸۰ سانتی‌متر و با فرض مشخصات مفروض در جدول ۳ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل رفتاری خاک سخت شونده شامل یازده پارامتر بوده که پارامترهای مرتبط با چسبندگی، سختی و زاویه اصطکاک داخلی آن با فرض خاک ماسه‌ای با چسبندگی کم انتخاب گردیده و سایر پارامترهای این مدل بر این اساس و به کمک روابط پیشنهادی ارائه‌شده در راهنمای نرم‌افزار پلکسیس تعیین شده‌اند [۴۰]. همچنین در این تحقیق از دیوارهای با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و با سختی

جدول ۳- مشخصات مفروض برای شمع‌ها

پارامترهای مدل	یکا	مقادیر مفروض
مدل رفتاری	-	الاستیک
وزن مخصوص	kN / m^3	25
مدول یانگ	kN / m^2	9.1×10^6
حداکثر مقاومت جدار	kN / m	100
حداکثر مقاومت نوک	kN	2000

برابر هفت متر (۲ طبقه زیرسازه) و در دسته‌ای دیگر بیست متر (۵ طبقه زیرسازه)، فرض شده است. ابعاد کلی مدل براساس آنچه توسط لی و همکاران (۲۰۱۶) توصیه شده، ابتدا 10.5×17.0 و با عمق ۶۸ متر انتخاب شد که نهایتاً و پس از انجام آنالیزهای حساسیت، مطابق شکل ۳، به ابعاد $4.0 \times 8.5 \times 12.0$ متر، کاهش یافت [۴۱]. ابعاد کلی مدل در هر دو حالت زیرسازه ۷ متری و ۲۰ متری یکسان فرض شده است.

۲-۲- ابعاد مدل، شرایط هندسی و مش بندی

سازه مفروض در این تحقیق دارای روسازه ای با ارتفاع ۱۵/۵ متر و پلان 15×24 متر، است. ابعاد پلان سازه، تعداد طبقات و فواصل آن به‌گونه‌ای فرض شده تا نماینده‌ی شماری از ساختمان‌های متعارف شهری باشند. برخلاف سایر تحقیقات پیشین و به دلیل کمبود تحقیقات از این دست، در این تحقیق سعی بر آن بوده است تا تمرکز اصلی بر روی بررسی اثرات پارامترهای سازه‌ای یا چینش آن‌ها قرار گیرد. عمق زیرسازه در مجموعه‌ای از مدل‌ها،

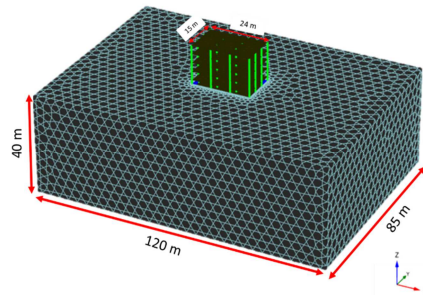
لازم به ذکر است، اندازه المان‌های خاک در تمامی نقاط یکسان نبوده و در نواحی اطراف سازه و سایر نواحی که دارای پیچیدگی‌های هندسی و یا ناهمگونی مصالح می‌باشند حسب مورد، اندازه المان‌ها جهت تطبیق پذیری بیشتر کاهش می‌یابد؛ در نقطه مقابل در نواحی دور و نواحی که تنش‌های خاصی به خاک وارد نمی‌شود عموماً از مش بندی درشت‌تر استفاده می‌شود.

۲-۳- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی شیوه مدل‌سازی عددی مورد استفاده در این تحقیق، مدل استفاده شده در تحقیقی مشابه که مورد مقایسه با نتایج صحرایی نیز قرار گرفته، مجدداً مدل‌سازی شده و نتایج آن با تحقیق مذکور و داده‌های صحرایی ثبت شده، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است؛ بدین منظور از تحقیقات سیونگ و همکاران (۲۰۱۶)، استفاده شده است. در این تحقیق به بررسی سه بعدی اثرات گودبرداری عمیق بر روی جابجایی افقی دیوارهای مهار شده در خاک‌های سست تا نیمه متراکم پرداخته شده و نتایج حاصله با داده‌های صحرایی مورد مقایسه قرار گرفته است [۴۲]. شکل ۴ نمایانگر جابجایی افقی دیوار در حالت‌های مختلف محاسبه سختی (منحنی‌های سیاه‌رنگ، و براساس عدد نفوذ استاندارد و آزمون درجا) و در مقایسه با نتایج مانیتورینگ صحرایی (منحنی قرمز رنگ) می‌باشد؛ همچنین منحنی آبی رنگ نمایانگر نتایج مدل صحت سنجی این تحقیق و براساس فرض سختی معادل ۴۰۰۰ برابر عدد نفوذ استاندارد، است. همان‌طور که از تصویر مذکور قابل مشاهده می‌باشد نتایج از همگرایی قابل قبول و بالایی علی‌الخصوص با نتایج داده‌های صحرایی، برخوردار می‌باشد.

جهت بررسی تأثیر اندازه المان‌ها بر روی نتایج حاصله، مجموعه‌ای از مدل‌ها و با اندازه‌های مختلفی از المان بندی ایجاد شد. پر واضح است که با تغییر طول المان‌های مش، تعداد کل المان‌ها نیز تغییر خواهد کرد. در شکل‌های ۵ و ۶ تأثیر اندازه المان و تغییرات آن‌ها به

فاصله ستون‌ها در بعد کوتاه‌تر (در جهت محور Y)، در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۵ متر فرض شده و در بعد بلندتر (در جهت X)، ستون‌ها با فواصل ۸،۶،۴،۲ و ۱۲ متر مدل‌سازی شده‌اند. طبقات زیرسازه به جز در دو مدل مجزا، با فاصله‌ی ۳/۵ متری (معادل فواصل طبقات در ساختمان‌های متعارف شهری) مدل شده‌اند که در آن دو مدل مذکور به منظور بررسی اثر تغییر فاصله‌ی طبقات، ۷ متری در نظر گرفته شده است.



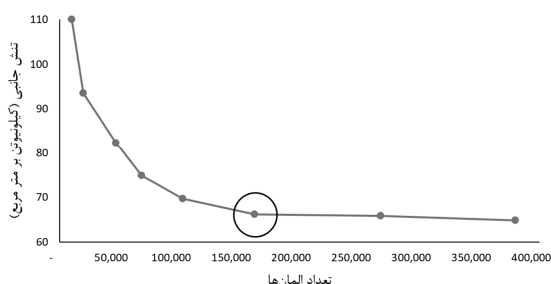
شکل ۳- ابعاد کلی مدل سه بعدی

پس از تکمیل مدل‌سازی هندسی خاک و سازه، هندسه تعریف شده می‌بایست به منظور انجام محاسبات مربوط به آنالیز اجزای محدود، به مجموعه‌ای از المان‌های کوچک تقسیم‌بندی شوند. به مجموعه‌ی این المان‌ها، مش گفته می‌شود. به شکل خلاصه اندازه و تعداد المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی دیوار، ستون و خاک پس از انجام آنالیزهای مربوطه در جدول ۴، ارائه شده است.

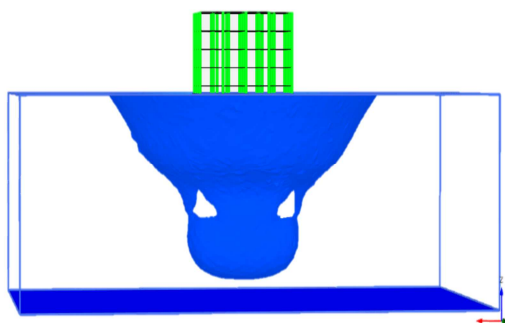
جدول ۴- تعداد و اندازه‌ی المان‌های مش در مدل سه بعدی

خاک	
تعداد کل المان‌ها	146,421
تعداد کل گره‌ها	277,475
متوسط اندازه‌ی المان‌ها (متر)	866/1
اندازه‌ی بزرگ‌ترین المان (متر)	441/8
اندازه‌ی کوچک‌ترین المان (متر)	2424/0
دیوار	
اندازه‌ی المان‌ها (متر)	25/0
ستون	
اندازه‌ی المان‌ها (متر)	25/0

فضای خالی موجود در تصویر اساساً متحمل هیچ‌گونه تغییرشکلی نشده است. در نتیجه می‌توان گفت که این ابعاد پیشنهادی از دقت کافی برخوردار می‌باشد.



شکل ۶- تأثیر تغییرات اندازه المان‌ها بر روی تنش خاک در نقطه‌ای با مختصات (۱۰،۳۵،۷۲) - متر



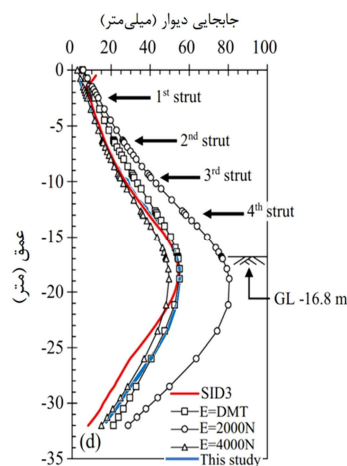
شکل ۷- کانتور تغییرشکل خاک در مرحله آخر ساخت

۴-۲- مراحل ساخت

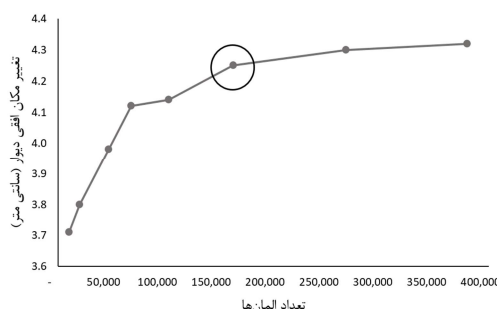
در جدول ۵ مراحل ساخت مربوط به گود ۲۰ متری و با فرض مرحله خاکبرداری ۳/۵ متری ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این مدل‌ها همان‌طور که گفته شده فاصله ستون‌ها بین ۲ تا ۱۲ متر متغیر می‌باشند. در شکل ۸- الف نیز برای نمونه شمای کلی یکی از زیرسازه مدل‌سازی شده به همراه عمق خاکبرداری هر گام و فاصله بین ستون‌ها، نمایش داده شده است. همان‌طور که گفته شد به‌منظور بررسی اثرات فاصله طبقات در دو مدل مجزا و با فرض مرحله خاکبرداری ۳/۵ متری طبقات زیرسازه قرارگرفته در ترازهای ۵/۵- و ۱۲/۵- متر، حذف گردیده‌اند.

در دسته دیگری از مدل‌ها بنابر آنچه پیش‌تر گفته شد مرحله خاکبرداری به عمق ۷ متر در نظرگرفته شده است که توالی آن‌ها مشابه حالت ۳/۵ متری بوده با این

ترتیب بر روی تغییرمکان دیوار و تنش وارد بر خاک در دو نقطه مختلف، نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشخص می‌باشد، با افزایش تعداد المان‌ها (کاهش اندازه‌ی المان‌های مش) نتایج حاصله دستخوش تغییراتی شده که پس از رسیدن به حد معینی، میزان این تغییرات، تا حدودی ثابت باقی می‌ماند که به‌منظور استقلال نتایج از ابعاد و اندازه‌ی المان‌های مش، این تعداد از المان‌ها انتخاب گردید؛ پر واضح است که مش‌بندی ریزتر علاوه بر تأثیرگذاری بسیار کم‌تر در نتایج سبب پیچیده‌تر و زمان‌گیرتر شدن فرآیند تحلیل خواهد شد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل صحت سنجی و تغییرمکان‌های دیوار براساس تحقیقات سیونگ و همکاران (۲۰۱۶)



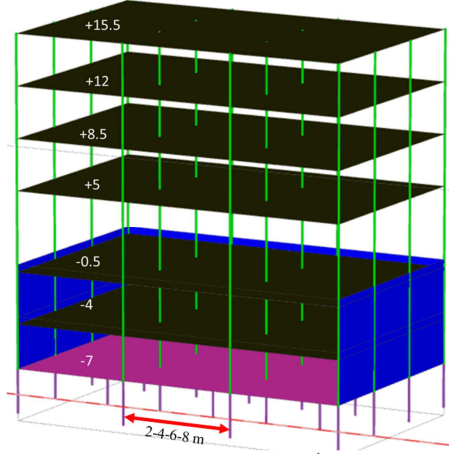
شکل ۵- تأثیر تغییرات اندازه المان‌ها بر روی تغییرمکان افقی دیوار در نقطه‌ای با مختصات (۱۶،۳۵،۶۵) - متر

درنهایت به‌منظور بررسی کفایت ابعاد کلی مدل، کانتور تغییرشکل در شکل ۷ نمایش داده شده است؛ براساس شکل ۷، تغییرشکل‌ها با مرزهای کنار و زیرین (خطوط آبی) فاصله فراوانی داشته و خاک قرارگرفته در

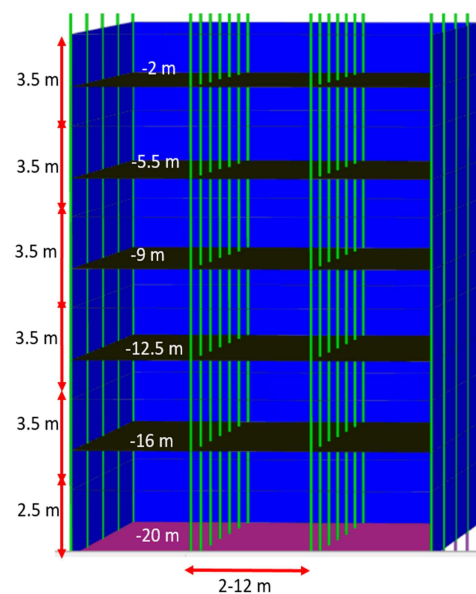
تفاوت که پس از خاکبرداری به عمق ۷ متر دیوارها به صورت ۷ متری اجرا می‌شوند. گودهای ۷ متری نیز صرفاً شامل دو مرحله خاکبرداری ۳/۵ شده که مشخصات

جدول ۵- توالی ساخت مربوط به گود ۲۰ متری با مرحله‌های خاکبرداری ۳/۵ متر

شماره مرحله	روش اول	روش دوم
1	توسعه تنش‌های برجا	توسعه تنش‌های برجا
2	اجرای شمع‌ها در زیر تراز پای ستون‌ها	اجرای ساخت دیوارهای پیرامونی تا تراز -۲۳
3	اجرای ستون‌های اصلی سازه	اجرای تمامی بخش‌های سازه‌ی فوقانی
4	اجرای سقف‌های روسازه	خاکبرداری تا ۳/۵-
5	خاکبرداری تا تراز ۳/۵- متری	ساخت سقف اول زیرسازه (تراز ۲-)
6	اجرای دیوار مرحله اول (تا تراز ۳/۵-) و سقف اول زیرسازه	خاکبرداری تا ۷-
7	خاکبرداری تا تراز ۷-	ساخت سقف دوم زیرسازه (تراز ۵/۵-)
8	اجرای دیوار مرحله دوم (تا تراز ۷-) و سقف دوم زیرسازه	خاکبرداری تا ۱۰/۵-
9	خاکبرداری تا تراز ۱۰/۵-	ساخت سقف سوم زیرسازه (تراز ۹-)
10	اجرای دیوار مرحله سوم (تا تراز ۱۰/۵-) و سقف سوم زیرسازه	خاکبرداری تا ۱۴-
11	خاکبرداری تا تراز ۱۴-	ساخت سقف چهارم زیرسازه (تراز ۲/۱۵-)
12	اجرای دیوار مرحله چهارم (تا تراز ۱۴-) و سقف چهارم زیرسازه	خاکبرداری تا ۱۷/۵-
13	خاکبرداری تا تراز ۱۷/۵-	ساخت سقف پنجم زیرسازه (تراز ۱۶-)
14	اجرای دیوار مرحله پنجم (تا تراز ۱۷/۵-) و سقف پنجم زیرسازه	خاکبرداری تا ۲۰-
15	خاکبرداری تا تراز ۲۰-	اجرای شالوده
16	اجرای شالوده و اتمام ساخت دیوارهای حائل (تا تراز ۲۰-)	-



(ب) مربوط به زیرسازه ۷ متری

(الف) زیرسازه‌ی مدل‌سازی شده با فواصل طبقات و خاکبرداری ۳/۵ متری
شکل ۸- شمای کلی مدل

۳- بحث و بررسی نتایج

گفت به عنوان یک حد بالای نسبتاً منطقی برای اکثر طول دیوار در روش اول، عمل کرده‌اند؛ همچنین با بررسی منحنی‌های ارائه شده در تصویر مذکور مشخص می‌گردد که توزیع مرتبط با فشار خاک فعال و سکون یا به تعبیر دیگر توزیع مثلثی فشار خاک هیچ قرابت و نزدیکی با نتایج نداشته و در مواردی عکس آن بوده، بدان معنا که برخلاف نتایج حاصله در ترازهای اولیه این توزیع، فشار خاک را در حدود صفر ارائه می‌کند و در ترازهای پایانی به بیشینه میزان خود می‌رسد که در تضاد کامل با نتایج قرار دارد؛ بنابراین می‌توان گفت استفاده از توزیع مثلثی منتهی به نتایج غیرواقعی خواهد شد. با بررسی نمودارهای مرتبط با گودهای بافاصله ستون ۲ تا ۱۲ متر در شرایط خاکبرداری ۳/۵ متری مشخص می‌شود افزایش فاصله‌ی ستون‌ها سبب افزایش فشار وارده بر دیوار خواهد شد؛ احتمالاً دلیل این مسئله حذف شدن تعدادی از ستون‌ها با افزایش فاصله‌ی آن‌ها بوده که منجر به حذف شماری از المان‌های باربر جانبی شده و نهایتاً فشار وارده بر دیوار بر این اساس افزایش می‌یابد.

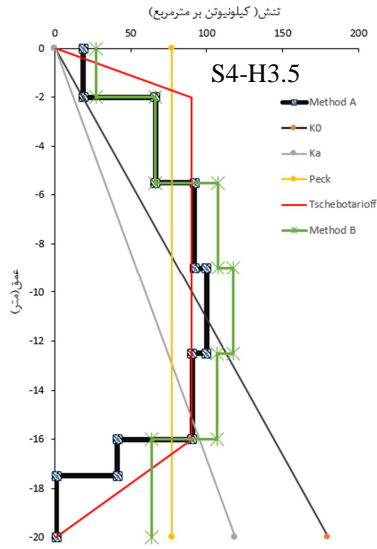
علاوه بر فاصله بین ستون‌ها، براساس نتایج می‌توان گفت که افزایش عمق مرحله خاکبرداری در هر مرحله و افزایش فاصله‌ی طبقات می‌توانند موجب بروز تغییراتی در میزان فشار جانبی خاک شود. با مقایسه‌ی نمودارهای مرتبط با مرحله خاکبرداری ۳/۵ و ۷ متری می‌توان گفت افزایش عمق مرحله خاکبرداری منجر به کاهش فشارهای وارده بر دیوار شده که احتمالاً به دلیل افزایش تغییرشکل‌ها می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد رخداد این تغییرها منجر به جابجایی نسبی توده خاک، نسبت به توده‌های ساکن و به دنبال آن بسیج تنش‌های اصطکاکی در مرزها (رخداد پدیده قوس زدگی) شده که نهایتاً به آزادسازی تنش‌های خاک می‌انجامد؛ همین مسئله را می‌توان در بررسی اثرات فاصله‌ی طبقات ملاحظه کرد.

براساس آنچه گفته شد در این تحقیق سعی بر تعیین فشار خاک وارد بر دیوار و ستون‌ها در حین و پس از پایان مراحل خاکبرداری می‌باشد، با این وجود اما بر اساس نتایج حاصله مشخص شد که فشار خاک وارد بر دیوار در مرحله‌ی پایانی به بیشینه مقدار خود می‌رسد، بر این اساس در گزارش فشار وارد بر دیوارها صرفاً به ارائه‌ی فشار در مرحله‌ی پایانی ساخت بسنده خواهد شد. در مطالعات عددی عموماً برای تعیین تنش‌های خاک در محدوده‌ی پشت دیوار، عموماً از خروجی تنش در سطح تماس دیوار و خاک استفاده می‌شود، استفاده از این خروجی‌ها به خصوص برای روش اول که در آن دیوار به شکل مرحله‌ای ساخته می‌شود، ممکن است منتهی به نمودارهایی با نوسانات زیاد در میزان تنش گردد؛ بدان معنا که به دلیل تغییرات گسترده‌ی سختی و جابجایی در محدوده‌ی نزدیک به پای دیوار در هر مرحله‌ی خاکبرداری، منحنی تنش با نوسانات موضعی شدیدی مواجه می‌شود. به منظور ارائه‌ی منطقی‌تر منحنی‌های فشار در این تحقیق، بر اساس منحنی لنگر وارد بر دیوار و به کمک آنالیز برگشتی توزیع فشار وارد بر دیوار محاسبه و ارائه گردیده است. در ادامه نتایج مرتبط با فشار وارد بر دیوار و ستون‌ها در آخرین مرحله‌ی ساخت و فشار وارد بر ستون‌ها در ناحیه‌ی خاکبرداری، ارائه و مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

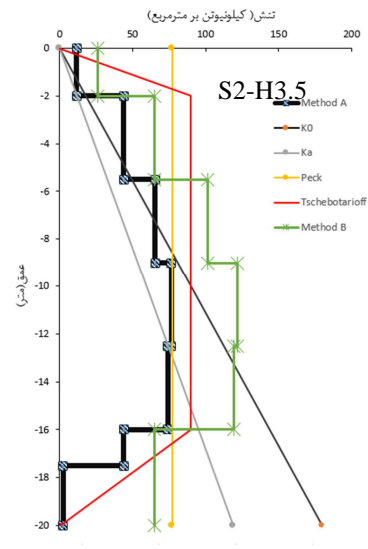
۳-۱- فشار وارد بر دیوار

در شکل ۹ مطابق آنچه گفته شد فشار وارد بر دیوار در برش میان ستون‌ها، در مرحله آخر و براساس منحنی لنگر، نمایش داده شده است. براساس نمودارهای ارائه شده می‌توان گفت در تمامی حالات فشار خاک وارد بر دیوار در روش اول کمتر از روش دوم است.

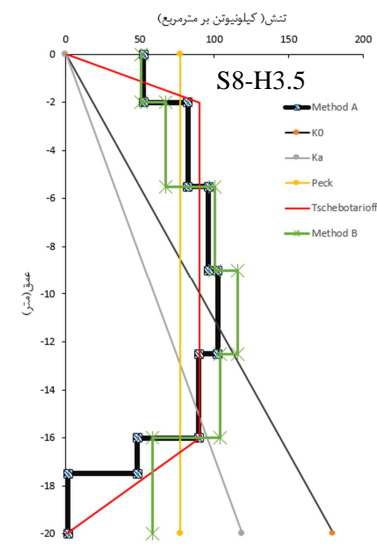
نکته مهم دیگر عملکرد نسبتاً قابل قبول پوش پک و چبوتاریف در تعیین فشار خاک بوده که تقریباً می‌توان



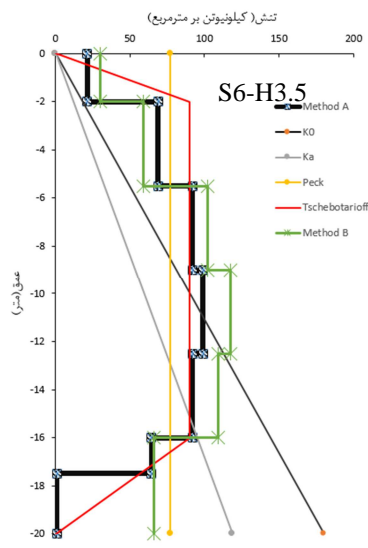
(ب)



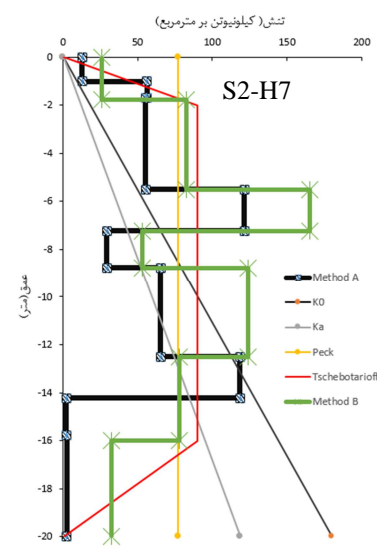
(الف)



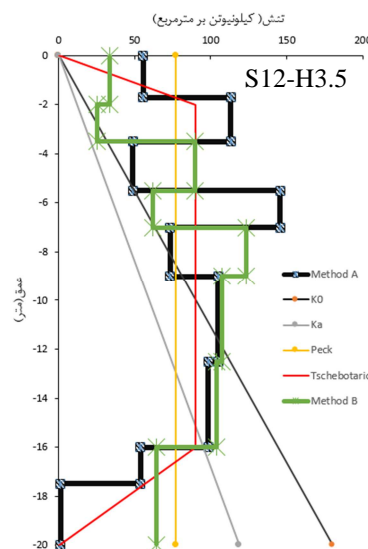
(ت)



(پ)

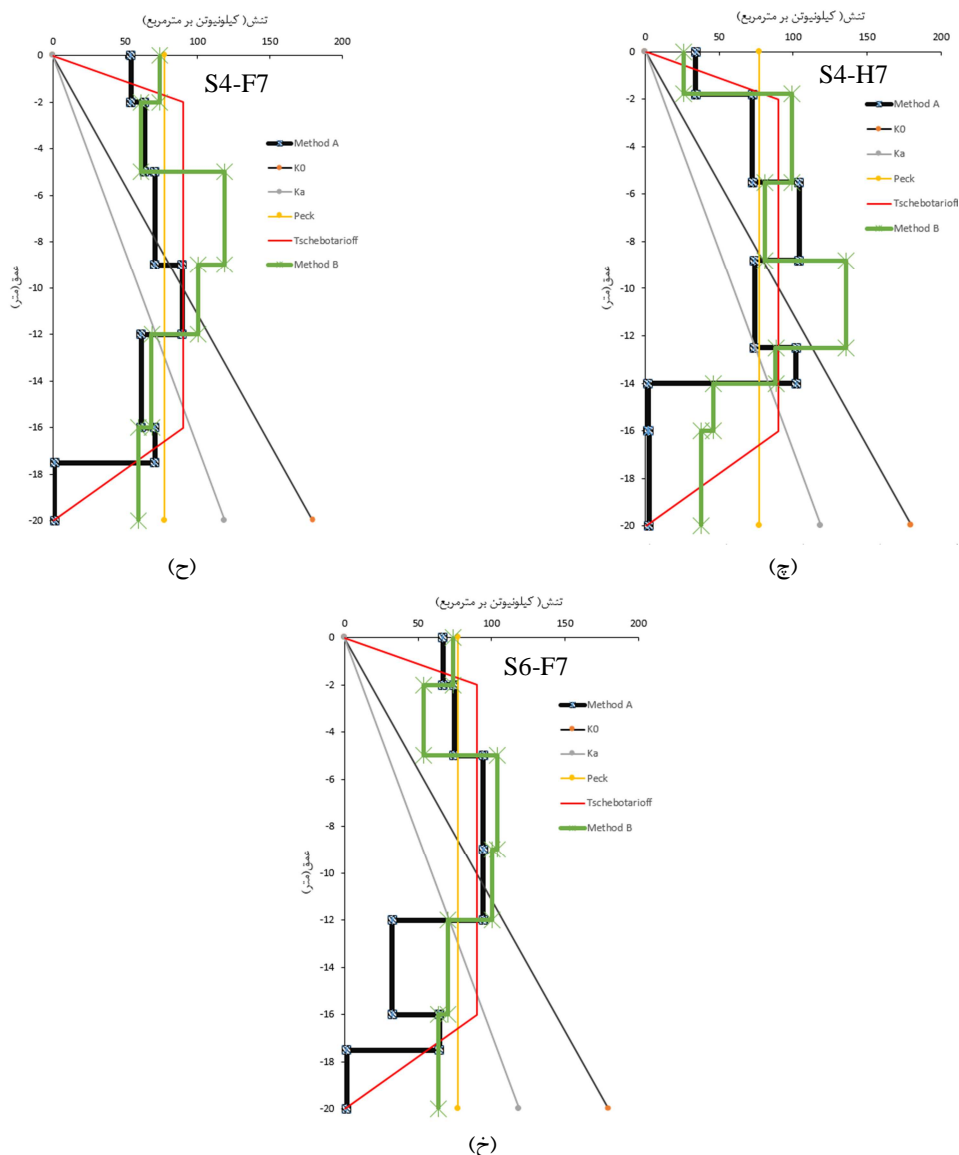


(ج)



(ث)

شکل ۹- نمودار فشار وارد بر دیوار در مرحله‌ی آخر ساخت، در هر دو حالت ساخت و در گود ۲۰ متری



شکل ۹- ادامه

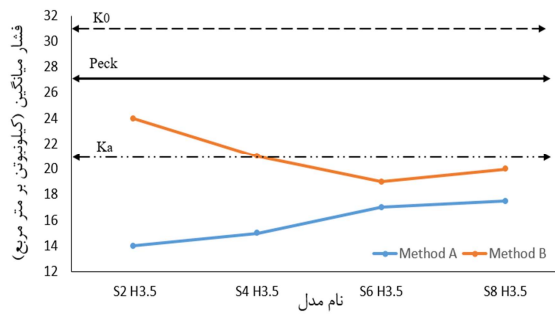
از آنجایی که دیوارها پس از پایان مراحل خاکبرداری ساخته می‌شوند، عملاً خاک به کمک مکانیسم‌های قوس زدگی به نوعی پایداری خود را حفظ کرده و تا شروع مرحله جدید خاکبرداری، فشار خاصی متوجه دیوار مرحله‌ی آخر نخواهد شد. لازم به ذکر است در شکل ۹، حروف S، H و F به ترتیب مرتبط با فاصله ستون‌ها، عمق مرحله خاک‌برداری و فاصله طبقات است؛ برای مثال S6-H3.5، مربوط به گود با فاصله ستون‌های ۶ و عمق مرحله خاکبرداری ۳/۵ متری است.

در شکل ۱۰، به منظور مقایسه‌ی فشار کلی وارد بر دیوار در مرحله‌ی آخر ساخت فشار میانگین خاک (تقسیم

در این حالت نیز با افزایش فاصله‌ی ما بین طبقات زیرسازه عملاً سختی جانبی دیوارها و ستون‌ها کاهش پیدا کرده که منجر به افزایش تغییر شکل‌ها و نهایتاً کاهش فشار خاک می‌گردد.

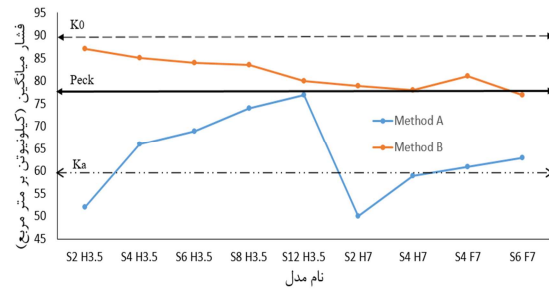
نکته مهم دیگری که در بررسی نمودارهای ارائه شده مشخص می‌شود آن است که با توجه به نوع فرآیند ساخت دیوار در روش اول عملاً به دیوار مرحله‌ی آخر هیچ فشاری از سمت خاک وارد نمی‌شود به طوری که در مدل‌های با مرحله خاکبرداری ۳/۵ و ۷ متری به ترتیب در ۲/۵ و ۶ متر پایانی دیوار فشار خاک در حدود صفر محاسبه شده که البته منطقی هم به نظر می‌رسد؛ زیرا

نمودارهای یادشده مشخص است، فشار خاک پک (و چبوتاریف) توانسته به‌عنوان یک حد بالا برای تمامی مدل‌های مرتبط با روش اول عملکرد و ضمناً این دو نمودار مجدداً نشان می‌دهند که فشار کلی خاک در حالت دوم از حالت اول که در آن دیوارهای حائل به‌صورت مرحله‌ای ساخته می‌شوند، بیشتر می‌باشد.



(ب)

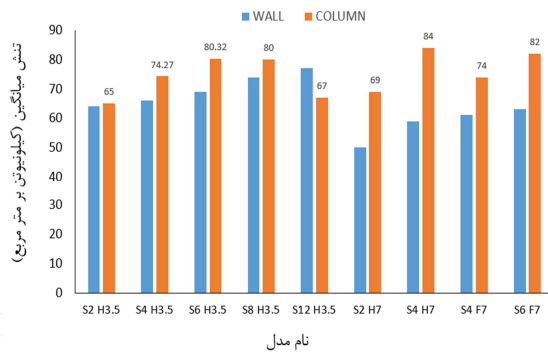
مساحت زیر نمودار فشار خاک بر طول دیوار) وارد بر دیوارهای ۲۰ و ۷ متری محاسبه و ارائه گردیده و با فشار میانگین حالت سکون، فعال و پوش پک و چبوتاریف (به دلیل آنکه از لحاظ میزان کل فشار با فشار پک بسیار نزدیک می‌باشد از ترسیم آن در شکل خودداری شده است) مقایسه به‌عمل آمده است. مجدداً همان‌طور که از



(الف)

شکل ۱۰- مقایسه تنش میانگین وارده بر دیوار در مدل‌های مختلف و در گود (الف) ۲۰ متری و (ب) ۷ متری

ستون از دیوار بیشتر می‌باشد؛ اما با این‌وجود فشار وارده کمتر از آن چیزی است که بعضی از محققین برای ستون‌ها گزارش می‌کنند.



شکل ۱۱- فشار میانگین وارد بر ستون‌ها در مقایسه با دیوار، در مدل‌های مختلف گود ۲۰ متری و در روش اول

نکته جالب‌توجه در نمودار بالا آن است که با افزایش عمق مرحله خاکبرداری، فشار خاک وارده بر ستون‌ها نیز افزایش می‌یابد که این مسئله امری بسیار روشن و قابل‌درکی است؛ زیرا با افزایش عمق مرحله خاکبرداری برای مثال از ۳/۵ به ۷ متر به دلیل افزایش فاصله بین دو تکیه‌گاه جانبی خاک (پای دیوار و تراز جدید کف گود)، از امکان تشکیل قوس‌های قائم کاسته شده و در نتیجه قوس زدگی افقی (قوس زدگی بین

همچنین براساس نمودارهای ارائه شده تا بدین اینجا می‌توان گفت که استفاده از فشار خاک حالت سکون محافظه‌کارانه و در بعضی از مواقع نادرست می‌باشد. نکته قابل‌توجهی که در بررسی شکل ۱۰-ب، مشخص می‌شود آن است که در گود ۷ متری و در روش اول ساخت، فشار کلی خاک در تمامی حالات با اختلاف زیاد از فشار فعال خاک کمتر محاسبه شده است. رخداد این مسئله بدان سبب می‌باشد که گود ۷ متری به کمک ۲ مرحله خاکبرداری ۳/۵ متری حفاری شده و این امر باعث می‌شود تا بر اساس منطقی که پیش‌تر شرح داده شد، تقریباً به نصف ارتفاع دیوار هیچ فشار از سمت خاک وارد نشده که نهایتاً منجر به کاهش شدید فشار میانگین خاک شود.

۳-۲- فشار وارد بر ستون

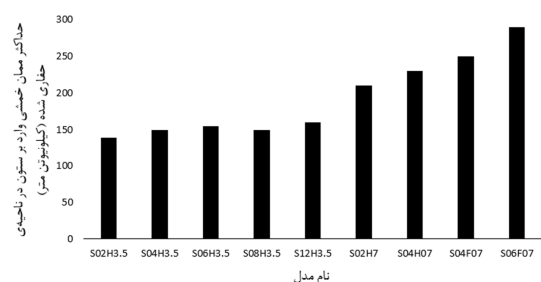
در شکل ۱۱، نمودار فشار میانگین وارده بر ستون‌های میانی (بر اساس منحنی لنگر) پس از آخرین مرحله‌ی ساخت و در مقایسه با فشار میانگین وارده بر دیوار، نمایش داده شده است. همان‌طور که در تصویر مشخص است، تقریباً در تمامی مدل‌ها فشار وارده بر

در ناحیه حفاری شده محاسبه شده و نسبت آن با فشار متوسط پانل خاک قرار گرفته بین دهانه بارگیر ستون و بین پای دیوار و تراز جدید کف گود، محاسبه شده است. فشار متوسط پانل خاک، از طریق حاصل ضرب میانگین تنش‌های افقی خاک در ناحیه خاکبرداری شده در طول بارگیر هر ستون (فاصله ستون‌ها)، محاسبه می‌گردد.

ستون‌ها) نقش بالاتری را در حفظ پایداری خاک ایفا خواهد کرد که نهایتاً موجب افزایش فشار بر ستون‌ها خواهد شد. از آنجاکه در مراحل خاکبرداری و در ناحیه حفاری شده، صرفاً ستون‌ها متحمل فشارهای خاک بوده نقش آن‌ها در پایداری کلی سیستم قابل توجه می‌باشد؛ بدین منظور در جدول ۶ متوسط فشار خاک وارد ستون‌ها

جدول ۶- متوسط فشار وارد بر ستون‌ها در ناحیه خاکبرداری در گود ۲۰ متری

فشار معادل پک (کیلونیوتن بر متر)	درصد فشار ستون به فشار پانل	متوسط فشار وارد بر پانل (کیلونیوتن بر متر)	متوسط فشار وارد بر ستون (کیلونیوتن بر متر)	نام مدل
78	%76/85	77/53	12/46	S2-H3.5
	%64/64	06/77	81/49	S4-H3.5
	%17/53	50/98	37/52	S6-H3.5
	%53/45	67/113	75/51	S8-H3.5
	%48/35	46/144	26/51	S12-H3.5
	%63/83	34/57	95/47	S2-H7
	%93/73	84/69	63/51	S4-H7
	%49/66	12/76	62/50	S4-F7
	%29/52	87/101	27/53	S6-F7



شکل ۱۲- حداکثر لنگر خمشی وارد بر ستون‌ها در مراحل گودبرداری و در مدل‌های مختلف مربوط به گود ۲۰ متری

بدین منظور در شکل ۱۳ نمودار نشست زمین در حالات مختلف روش اول و در مقایسه با روش دوم (مرتبط با بیشینه نشست محاسبه شده در روش دوم) ارائه شده است.

اولین نکته‌ای که در بررسی تمامی منحنی‌ها به چشم می‌خورد نشست کم‌تر خاک در مجاورت دیوار (نقاط ابتدایی) به دلیل اصطکاک بین خاک و سازه می‌باشد. همچنین در تمامی حالات نشست زمین در روش اول بیشتر از روش دوم بوده که همین مسئله به‌نوعی فشار فزاینده در روش دوم را نسبت به فشار محاسبه شده در روش اول توجیه می‌کند.

همان‌طور که در که در جدول ۶ مشخص می‌باشد در تمامی حالات متوسط فشار خاک وارد بر ستون‌ها تقریباً دستخوش تغییرات جدی نشده است و در تمامی حالات با فاصله قابل توجهی از فشار پک کمتر است. البته این ثبات فشار خاک الزاماً به معنی ثبات لنگر وارده بر دیوار نیست؛ با توجه به آنکه با افزایش فاصله طبقات و یا عمق مرحله خاکبرداری عملاً طول مهار نشده ستون‌ها افزایش یافته و همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، حداکثر لنگر وارد بر ستون‌ها نیز افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند که می‌بایست در طراحی و خصوصاً در اجرا و مهار موقت ستون‌ها، توجه ویژه‌ای بدان داشت.

۳-۳- نشست زمین

هدف اصلی این تحقیق، همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، بررسی تأثیر برخی از عوامل تأثیرگذار در فشار جانبی خاک وارد بر دیوار بوده اما با این‌وجود بررسی تغییرشکل‌ها می‌تواند در فهم و بررسی دقیق‌تر رفتار خاک، نقش مهمی را ایفا کند.

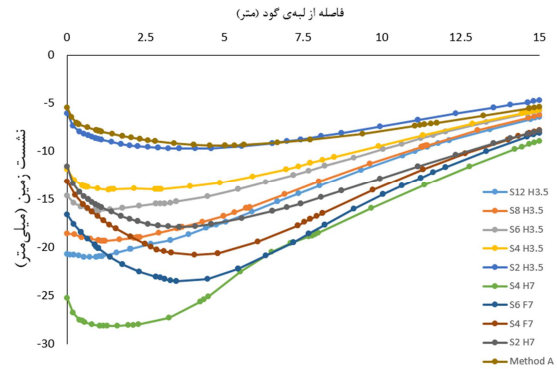
در تحقیق پیشرو، مطالعه عددی سه‌بعدی، به‌منظور بررسی فشار جانبی خاک وارد بر دیوار و ستون‌ها در روش بالا به پایین صورت گرفته و تأثیرات شیوه اجرای مرحله‌ای و یکپارچه دیوار مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به اهم نکات و یافته‌های این تحقیق اشاره می‌شود.

براساس نتایج می‌توان گفت که اندازه کل فشار وارده بر دیوار در روش بالا به پایین اول (ساخت مرحله‌ای دیوار)، به شکل کلی از فشار خاک محاسبه‌شده در روش دوم (ساخت یکپارچه دیوار) کمتر بوده و در بازه‌ای بین فشار خاک حالت فعال و سکون و نزدیک به فشار ظاهری پک و چبوتاریف، قرار می‌گیرد. این نتیجه در تطابق کامل با تحقیقات مرتاض و فاخر بوده، اما از حیث مقایسه تنش خاک در روش اول و دوم در تضاد با نتایج صادقی و رجحانی قرار دارد که احتمالاً، علت این مسئله به شیوه‌ی ارائه‌ی تنش‌های خاک در تحقیق مذکور برمی‌گردد، چراکه در تحقیق مذکور فشار خاک به شکل مستقیم از المان سطح تماس گزارش شده که منتهی به تنش‌های قابل توجه در نقاط محدود شده است.

روند خاکبرداری مرحله‌ای در روش اول سبب می‌شود که خاک پیش از ساخت دیوار از طریق مکانیسم‌های قوس زدگی، پایداری خود را حفظ کند؛ همین امر سبب شده تا عملاً فشار چندانی از سوی خاک به دیوارهای ساخته‌شده در مرحله‌ی آخر، وارد نشود.

به شکل کلی نتایج نشان می‌دهند که بین تغییر شکل‌های خاک و فشار جانبی آن (در صورت ثابت ماندن تعداد المان‌های حائل خاک) رابطه عکس وجود دارد؛ بدان معنا که با افزایش تغییر شکل‌ها برای مثال به دلیل افزایش عمق مرحله خاکبرداری در هر مرحله، فشار جانبی خاک کاهش پیدا می‌کند.

برخلاف پیشنهادات برخی از محققین که فشار بالایی برای ستون‌ها در روش ساخت از بالا ارائه می‌کنند، نتایج تحقیق و بر اساس منحنی لنگر وارد بر ستون‌ها



شکل ۱۳- مقایسه نشست زمین در مدل‌های مربوط به گود ۲۰ متری

به‌طور کلی می‌توان گفت که براساس نتایج، با افزایش عمق مرحله خاکبرداری و یا فاصله طبقات، نشست زمین و یا تغییر شکل‌ها، افزایش یافته که براساس منطقی که پیش‌تر شرح داده شد، می‌توان گفت این ازدیاد تغییر شکل‌ها نهایتاً منجر به کاهش فشار کلی وارده بر دیوار خواهد شد. با افزایش فاصله طبقات عملاً سختی جانبی سیستم کاهش پیدا کرده و در نتیجه تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابد که نهایتاً منجر به کاهش فشار وارده بر دیوار خواهد شد؛ با این‌وجود اما و براساس نتایج ارائه‌شده مشخص می‌شود که با افزایش فاصله ستون‌ها علی‌رغم افزایش جابجایی‌ها فشار معادل وارده بر دیوار و ستون‌ها افزایش یافته است. دلیل این مسئله را می‌توان در دو بخش دید: الف) به شکل کلی با افزایش فاصله‌ی ستون‌ها از تعداد آن‌ها کاسته خواهد شد که منجر به کاهش تعداد المان‌های باربر جانبی شده و نهایتاً سبب می‌شود میزان باری که به سایر المان‌ها وارد می‌شود افزایش یابد. ب) نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهند در مراحل حفاری، میزان باری که توسط ستون‌ها در ناحیه خاک‌برداری تحمل می‌شود با افزایش میزان فاصله ستون‌ها تغییر چندانی نمی‌کند. این در حالی است که فشار کلی پائل خاک در آن ناحیه افزایش یافته است. براساس مجموعه این موارد می‌توان گفت که فشار بیشتری به دیوارها وارد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

لنگر خمشی وارد بر این ستون‌ها با افزایش فاصله آن‌ها از یکدیگر دست‌خوش تغییرات گسترده‌ای نمی‌شود.

افزایش فاصله طبقات نیز تأثیر مستقیمی در تعیین میزان فشار وارد بر ستون‌ها و دیوارها دارد؛ بدین‌صورت که با دو برابر شدن فاصله طبقات زیرسازه، لنگر وارد بر ستون‌ها در ناحیه خاکبرداری شده نیز دو برابر خواهد شد و همچنین افزایش فاصله بین طبقات سبب افزایش تغییرشکل‌ها و به دنبال آن کاهش فشار جانبی خاک بر دیوارها خواهد شد.

در آخر لازم به ذکر است که دامنه کاربرد تمامی نتایج فوق صرفاً به مفروضات این تحقیق محدود شده و ممکن است با تغییر هرکدام از پارامترهایی که در این تحقیق ثابت فرض شده‌اند، نتایج دیگری حاصل گردد.

نشان می‌دهد که فشار خاک وارد بر ستون‌ها گرچه از فشار وارد بر دیوارها بیشتر بوده اما همچنان از فشار خاک حالت سکون کمتر است و در واقع بین فشار خاک پک (۱۹۶۹) و فشار حالت سکون قرار می‌گیرد.

براساس نتایج می‌توان گفت، افزایش فاصله بین ستون‌ها به دلیل کاهش تعداد المان‌های باربر جانبی باعث ازدیاد فشار و افزایش فاصله طبقات و مرحله‌های خاکبرداری به دلیل افزایش تغییرشکل‌ها باعث کاهش فشار وارد بر دیوارها می‌شوند.

در فاصله بین خاکبرداری و اجرای دیوارها این ستون‌ها هستند که تا حدودی متحمل فشار خاک محدوده خاکبرداری می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که

مراجع

- [1] Samathar, V. (2002). "Top down construction for deep basements". *Institution of Engineers, Sri Lanka, 96TH Annual Sessions*.
- [2] Ou, C.-Y. (2021). "Fundamentals of Deep Excavations", 1st edition, Taylor & Francis.
- [3] Tan, Y. & Wang, D. (2013). "Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1875–1893.
- [4] Tan, Yong, Zhu, H., Peng, F., Karlsrud, K. & Wei, B. (2017). "Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68, 244–261
- [5] Jamsawang, P., Voottipruex, P., Tanseng, P., Jongpradist, P. & Bergado, D. T. (2019). "Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation". *Acta Geotechnica*, 14(1), 225–246.
- [6] Wang, J. H., Xu, Z. H. & Wang, W. D. (2010). "Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 985–994.
- [7] Jeong, S. & Kim, D. (2018). "Estimation of the Load Sharing Ratio of Pre-installed Columns in Top-Down Buildings on Korean Rock". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(12), 4852–4861.
- [8] Ji, X., Ni, P., Zhao, W. & Yu, H. (2019). "Top-down excavation of an underpass linking two large-scale basements in sandy soil". *Arabian Journal of Geosciences*, 12(10).
- [9] Masini, L., Gaudio, D., Rampello, S. & Romani, E. (2021). Observed Performance of a Deep Excavation in the Historical Center of Rome. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(2), 05020015.
- [10] Li, Y., Zhang, W. & Zhang, R. (2022). "Numerical investigation on performance of braced excavation considering soil stress-induced anisotropy". *Acta Geotech.* 17, 563–575.
- [11] Yang, Z., Chen, Y., Yan, C. et al. (2011) "Numerical Evaluation of Isolation Walls in Modifying Excavation-Induced Displacement Field". *Arab J Sci Eng*.
- [12] Ghavidelakram, O., (2018). "Investigation of the methodology of implementing underground structures based on Top-Down Method". 9th Iranian Tunneling Conference (in Persian).
- [13] Ghazvinian, A., Monjezi, M., Hadei, M. R., Nejati, H. R., & Sarfarazi, V. (2011). "A Global Review of Metro Station Construction Project".
- [14] Behnia, C., Nejad, A. T., & Rad, H. S. (2021). "The investigation of Cut-and-cover, top-down construction method for a metro underground station; case study: Naghsh-e-Jahan Metro Station, Esfahan, Iran". *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 8(4), 491-504..
- [15] Ghorbani, A., Khodaparast, M., Moezi, A. (2018). "Field monitoring and numerical modeling in an excavation stabilized by Top-Down method (A case study)". *Journal of Civil and Environmental Researches*, 4(1), 57-70.

- [16] Terzaghi, K., Peck, R. B. & Mesri, G. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- [17] Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunneling in soft ground". *Proc. 7th ICSMFE, 1969*, 225–290.
- [18] Nandakumaran, P. & Joshi, V. H. (1973). "Static and dynamic active earth pressures behind retaining walls". *Bulletin of the Indian Society of Earthquake Technology*, 10(3).
- [19] Wong, I. H., Poh, T. Y. & Chuah, H. L. (1997). "Performance of excavations for depressed expressway in Singapore". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(7), 617–625.
- [20] Weatherby, D. E. (1998). *Design Manual for Permanent Ground Anchor Walls*. United States. Federal Highway Administration.
- [21] Hashash, Y. M. A. & Whittle, A. J. (2002). "Mechanisms of load transfer and arching for braced excavations in clay". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(3), 187–197.
- [22] Karlsrud, K. & Andresen, L. (2005). "Loads on braced excavations in soft clay". *International Journal of Geomechanics*, 5(2), 107–113.
- [23] Anderson, D. G. (2008). *Seismic analysis and design of retaining walls, buried structures, slopes, and embankments* (Vol. 611). Transportation Research Board.
- [24] Management, E. P., Analysis, S. S., Road, E., District, W., Road, E. & District, W. (2014). *Earth Pressure Distribution for Deep Excavations in Gravel Formation Sung-Chi Hsu 1, Yu-Ping Huang 2 and Tao-Ming Cheng 3* 1. 64–72.
- [25] Zhang, W., Hou, Z., Goh, A. T. C. & Zhang, R. (2019). "Estimation of strut forces for braced excavation in granular soils from numerical analysis and case histories". *Computers and Geotechnics*, 106, 286–295.
- [26] Alavinezhad, S. P. & Shahir, H. (2020). *Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c – w soil with surcharge*. 4, 481–489
- [27] Zhang, R., Teck, A., Goh, C., Li, Y., Hong, L. & Zhang, W. (2021). "Assessment of apparent earth pressure for braced excavations in anisotropic clay". *Acta Geotechnica*, 16(5), 1615–1626.
- [28] Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1969). "Soil mechanics. John Willey & Sons". *Inc., New York*, 553.
- [29] Ng, C. W. W., Hong, Y., Liu, G. B. & Liu, T. (2012). "Ground deformations and soil–structure interaction of a multi-propped excavation in Shanghai soft clays". *Géotechnique*, 62(10), 907–921.
- [30] Vermeer, P. A., Punlor, A. & Ruse, N. (2001). *Arching effects behind a soldier pile wall*. 28, 379–396.
- [31] Mortaz, M., Fakher, A., (2017). "Lateral earth pressure in Top-Down Excavation". 5th international Congress on civil engineering, architecture and urban development, (in Persian).
- [32] Sadeghi, M., Roghani, M., (2018). "Numerical study of earth pressure in Top-Down Construction". 11th National Congress on civil engineering, (in Persian).
- [33] Chheng, C. & Likitlersuang, S. (2018). "Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method". *Computers and Geotechnics*, 95, 68–81.
- [34] Dong, Y. P., Burd, H. J. & Houlsby, G. T. (2016). "Finite-element analysis of a deep excavation case history". *Géotechnique*, 66(1), 1–15.
- [35] Hsiung, B.-C. B., Yang, K.-H., Aila, W. & Ge, L. (2018). "Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 84–96.
- [36] Jamsawang, P., Jamnam, S., Jongpradist, P., Tanseng, P. & Horpibulsuk, S. (2017). "Numerical analysis of lateral movements and strut forces in deep cement mixing walls with top-down construction in soft clay". *Computers and Geotechnics*, 88, 174–181.
- [37] Lim, A., Ou, C.-Y. & Hsieh, P.-G. (2018). "Investigation of the integrated retaining system to limit deformations induced by deep excavation". *Acta Geotechnica*, 13(4), 973–995.
- [38] Orazalin, Z. Y., Whittle, A. J. & Olsen, M. B. (2015). "Three-dimensional analyses of excavation support system for the Stata Center basement on the MIT campus". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(7), 5015001.
- [39] *Plaxis 3D Reference Manual V20*. (2020).
- [40] *Plaxis Connect Edition V20.04 Material Models Manual*. (2020).
- [41] Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis A practical guide*, 1st edition. ICE Publishing.
- [42] Hsiung, B. C. B., Yang, K. H., Aila, W. & Hung, C. (2016). "Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands". *Computers and Geotechnics*, 80, 138–151.