

"درس آموخته‌های چالش‌های گذشته"

۹-۱۲ آبان ماه ۱۴۰۱

بررسی گزینه‌های ساخت ایستگاه‌های زیرزمینی مترو به روش کند و پوش و صحت طراحی آن با استفاده از نتایج ابزار دقیق

هومن روحانی^{۱*}، کورش شهریار^۲، داریوش محمدی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ hooman.rhn@aut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ k.shahriar@aut.ac.ir

^۳ دانشجوی دکترای تخصصی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ d.mohammadi@aut.ac.ir

چکیده

در بسیاری از موارد، ساخت و توسعه خطوط قطار شهری، زمان عملیات و هزینه‌های بسیار زیادی دارند، به همین منظور می‌بایست زمان‌بندی و برنامه‌ریزی به نوعی انجام شود که هزینه‌ها و زمان احداث تا حد امکان به حداقل مقدار ممکن کاهش یابند. به همین علت، معمولاً آماده‌سازی ایستگاه در حال احداث، به نوعی برنامه‌ریزی می‌شود که مقدمات و شرایط ورود و استقرار ماشین به منظور تعمیر و نگهداری و سایر فرایندهای پشتیبانی، پیش از رسیدن TBM به ایستگاه، انجام شده باشد. در حین احداث ایستگاه S05 از خط دوم قطار شهری تبریز، پیش از آماده‌سازی کامل ایستگاه، TBM به ایستگاه مورد نظر رسیده است و همین موضوع باعث به وجود آمدن محدودیت زمانی برای احداث ایستگاه شده است. بنابراین تصمیم گرفته شد تا بخشی از ایستگاه به روشی متفاوت از روش معمول احداث شود. به همین دلیل برای پایدارسازی دیواره گود، یک ردیف از استرات‌ها حذف و فونداسیون به عنوان جایگزین، در پایین‌ترین تراز ارتفاعی گود، در گام‌های مختلف اجرا شد. افزایش اختلاف تراز استرات باقی‌مانده با پایین‌ترین تراز ارتفاعی گود، موجب شد تا مدل‌سازی با در نظر گرفتن حفاری چند مرحله‌ای صورت بگیرد. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از ساخت چندین مدل عددی در نرم‌افزار Plaxis دو بعدی و مقایسه نتایج حاصل با نتایج حاصل از ابزاربندی‌ها و رفتارنگاری‌های انجام شده در حین احداث ایستگاه، مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش به منظور مدل‌سازی صحیح حفاری چند مرحله‌ای در ترانشه‌های مهار شده، مشخص شود که در این مقاله پس از ساخت چندین مدل عددی و صحت‌سنجی مدل، مقادیر بیشترین جابه‌جایی افقی در شمع‌ها با در نظر گرفتن مقادیر مختلف کمیت ترخیص تنش حاصل شده است و با نتایج حاصل از ابزاربندی‌ها و رفتارنگاری‌ها مقایسه شده است. مقایسه‌های صورت گرفته، مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش به منظور مدل‌سازی حفاری چند مرحله‌ای در ترانشه‌های مهار شده را معادل مقدار ۰.۴۶ مشخص کرده است.

واژه‌های کلیدی: تونل‌سازی، کند و پوش، ترخیص تنش، ترانشه مهار شده، ابزاربندی و رفتارنگاری، قطار شهری تبریز، حفاری چند مرحله‌ای

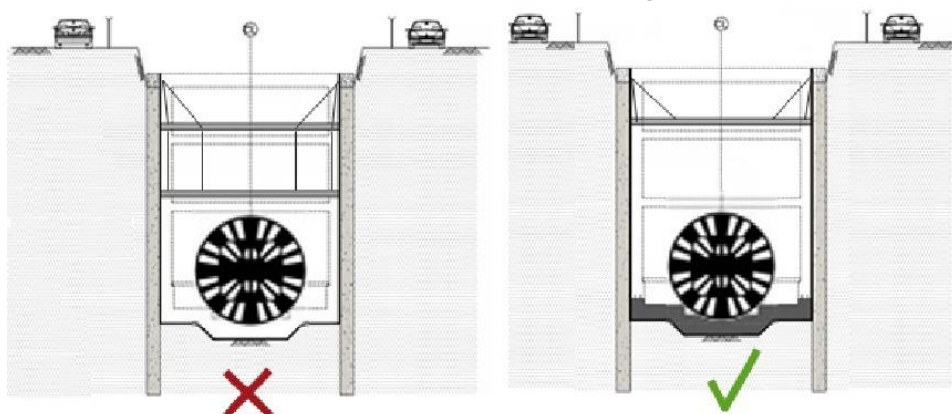
۱- مقدمه

طراحی و اجرای گودهای عمیق شهری، فعالیت‌های مهندسی بسیار چالش برانگیزی هستند و نیاز به بررسی دقیق شرایط زمین‌شناسی، انتخاب سازه نگهدارنده مناسب و ایمن و همچنین استفاده از مدل‌سازی عددی مناسب به منظور تحلیل هر چه دقیق‌تر برهم کنش خاک و سازه دارند. برای حفاری ایستگاه مترو یا تونل واقع در محیط شهری، این چالش با وجود سازه‌ها و تاسیسات در نزدیکی محل اجرا پیچیده‌تر می‌شود. [۵-۱] به طور کلی به منظور محاسبه و تخمین مقدار جابه‌جایی دیوارها و همچنین نشست در سطح زمین در پروژه‌های این چنینی دو دسته از روش‌ها وجود دارند که عبارتند از روش‌های تحلیلی یا عددی و روش‌های تجربی و نیمه تجربی. [۱۱-۶] با مقایسه بین نتایج حاصل شده از روش‌های تجربی یا نیمه تجربی و روش‌های عددی یا تحلیلی مشخص می‌شود که روش‌های تجربی و نیمه تجربی تخمین با دقت کمتر و در عین حال ساده‌تری ارائه می‌دهند. بنابراین روش‌های تجربی و نیمه تجربی روش‌های خوبی به منظور فراهم کردن یک تخمین اولیه از شرایط مسئله می‌باشند. زیرا این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های حاصل شده از داده‌های مربوط به پروژه‌های مختلف هستند. [۱۲] به همین علت در این مقاله، با استفاده از

مدلسازی عددی در نرم افزار Plaxis دو بعدی و مقایسه نتایج با نتایج ابزار دقیق، صحت طراحی سازه زیرزمینی ایستگاه S05 از خط دوم قطار شهری تبریز که به روش کند و پوش اجرا شده است بررسی و مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش به منظور مدلسازی بهتر و دقیق تر پروژه های مشابه حاصل شده است. در ادامه ابتدا مسئله مورد بحث و راه حل ارائه شده، مطرح شده است و سپس با استفاده از مدلسازی عددی و صحت سنجی مدل ساخته شده، مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش به منظور مدلسازی عددی گودهای شهری که با یک ردیف استرات و اجرای فونداسیون در کف گود اجرا می شوند حاصل شده است. همانطور که پیش تر اشاره شد، بخشی از سازه نگهبان مورد استفاده در ایستگاه S05 از خط دوم قطار شهری تبریز متشکل از ۲ ردیف استرات است، که در بخش دیگر از این ایستگاه، ردیف دوم از استرات ها، به منظور کاهش هزینه ها و محدودیت زمان اجرا، حذف شده است و فونداسیون در کف ایستگاه جایگزین شده است. به همین علت عمق زیادی از ایستگاه، به صورت مرحله ای و بدون نصب استرات حفاری شده است. که در این مقاله ضریب مربوط به کمیت ترخیص تنش و حفاری مرحله ای صحیح به منظور مدلسازی مسئله مذکور محاسبه شده است. در ادامه، پس از طرح مسئله و بررسی گزینه های ساخت ایستگاه، محل مورد مطالعه معرفی شده است و نتایج حاصل از مدلسازی عددی ارائه و مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش مشخص شده است.

۲- طرح مسئله

همانطور که پیش تر اشاره شد، در عملیات ساخت و احداث ایستگاه S05 از خط دوم قطار شهری تبریز، به علت محدودیت زمانی پیش آمده ناشی از رسیدن TBM پیش از آماده سازی ایستگاه، از طرح سازه نگهبان جدیدی، در بخشی از ایستگاه استفاده شد. مطابق شکل (۱)، طرح اول و معمول شامل دو ردیف استرات و اجرای شمع به منظور نگهداری دیواره های ایستگاه است. اما طرح دوم که از نظر زمانی و اقتصادی، طرح بهتری محسوب می شود، شامل یک ردیف استرات، اجرای شمع به منظور نگهداری دیواره های ایستگاه و همچنین اجرای فونداسیون در گام های مختلف در کف ایستگاه به عنوان جایگزین ردیف دوم استرات در طرح اول، است.



شکل (۱): شکل سمت چپ (طرح اول) و شکل سمت راست (طرح دوم)

مطابق شکل فوق، مراحل حفاری طرح اول، با در نظر گرفتن دو ردیف از استرات ها و همچنین اجرای شمع به عنوان سازه نگهبان دیوارهای ایستگاه، عبارتند از:

(۱) گودبرداری تا تراز سر شمع ها

(۲) حفاری تا تراز استرات ردیف اول

(۳) حفاری تا تراز استرات ردیف دوم

(۴) حفاری تا تراز کف ترانشه

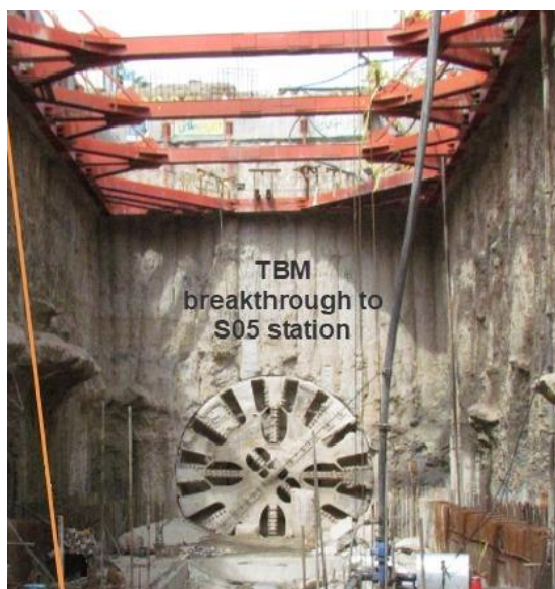
همچنین مراحل حفاری طرح دوم، با در نظر گرفتن یک ردیف استرات، اجرای شمع به عنوان سازه نگهبان دیوارهای ایستگاه و حذف ردیف دوم استرات و جایگزین نمودن فونداسیون در کف ایستگاه، عبارتند از:

(۱) گودبرداری تا تراز سر شمع ها

(۲) حفاری تا تراز استرات ردیف اول

(۳) حفاری تا تراز کف ترانشه

مطابق شکل (۲)، لحظه ورود و رسیدن TBM به ایستگاه S05 از خط دوم قطار شهری تبریز قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می شود که در این بخش از ایستگاه، طرح دوم به عنوان طرح مناسب سازه نگهبان، اجرا شده است.



شکل (۲): نمایی از اجرای طرح دوم در بخشی از ایستگاه S05 خط دوم قطار شهری تبریز

بنابراین مطابق شکل فوق، مراحل سوم و چهارم در طرح اول، به صورت همزمان و بدون نصب استرات ردیف دوم، در طرح اول انجام می‌شوند. عدم نصب استرات ردیف دوم در طرح دوم و اجرای فونداسیون در گام‌های مختلف در طرح دوم، منجر به اختلاف تراز بسیار زیاد بین آخرین استرات نصب شده با کف ایستگاه می‌شود. به همین منظور می‌بایست این بخش از حفاری به صورت مرحله‌ای و در گام‌های مختلف انجام شود. بنابر این می‌بایست به منظور مدلسازی بهتر حفاری با روش و طرح دوم، از قابلیت ساخت مرحله‌ای و در نظر گرفتن مقدار کمیت ترخیص تنش در مدلسازی عددی استفاده شود.

۳- مطالعه موردی: ایستگاه S05 از خط دوم مترو تبریز

به منظور محاسبه مقدار مناسب و دقیق کمیت ترخیص تنش یک مطالعه موردی با استفاده از مدلسازی عددی به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار Plaxis دو بعدی انجام شده است و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. در ادامه پس از معرفی محل مورد مطالعه و ارائه مشخصات ژئوتکنیکی محل مورد مطالعه، مدلسازی انجام شده است و پس از صحت‌سنجی مدل ساخته شده، نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و مقدار مناسب کمیت ترخیص تنش حاصل شده است.

۳-۱- معرفی محل مورد مطالعه

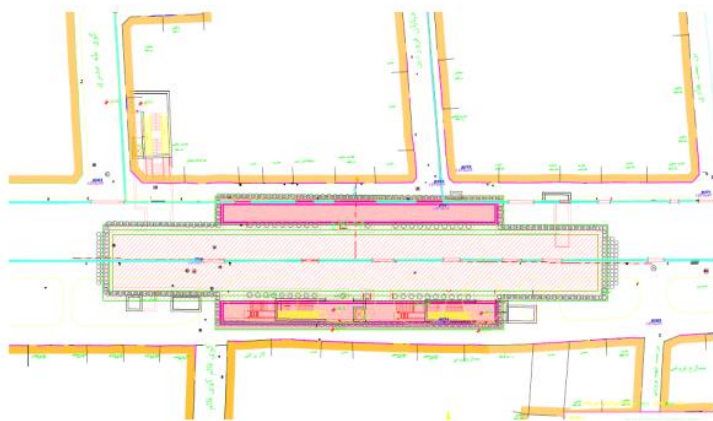
محل مورد مطالعه، ایستگاه S05 از خط ۲ مترو تبریز است. خط ۲ قطار شهری تبریز از محل کارخانه کود آلی در غرب شهر تبریز آغاز گشته و پس از عبور از مرکز شهر در محل نمایشگاه بین‌المللی تبریز، واقع در میدان بسیج، در بخش شرقی شهر به پایان می‌رسد. این خط دارای ۲۰ ایستگاه است و مسیر عبوری آن از خروجی دیو تا شرق ایستگاه انتهایی به طول تقریبی ۲۲,۴ کیلومتر است. در بخش غربی مسیر، یک دیو و در بخش شرقی، یک پارکینگ زیرزمینی احداث شده است. مسیر قطار شهری خط ۲ مترو تبریز مطابق شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز

ایستگاه S05 پنجمین ایستگاه از خط ۲ قطار شهری تبریز است. ایستگاه S05 در خیابان قدس یا قره آغاچ، قبل از سه راهی علامه امینی واقع

شده است. این ایستگاه دارای ۳ طبقه است و در مرکز ایستگاه، تراز روی ریل در عمق ۲۱,۸۳ متری سطح زمین قرار دارد. موقعیت ایستگاه S05 و دسترسی‌های مربوط به آن در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴): موقعیت ایستگاه S05 و دسترسی‌های مربوط به آن

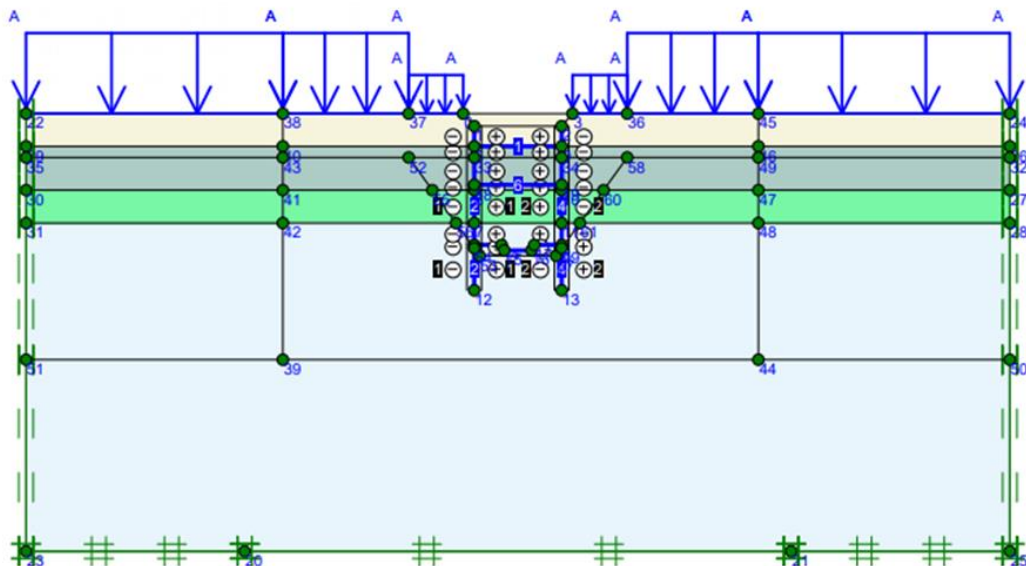
با توجه به گزارش ژئوتکنیک ایستگاه S05، مشخصات ژئوتکنیکی خاک به کار گرفته شده در تحلیل‌ها بر اساس جدول (۱) ارائه شده است. تعیین مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی جهت انجام تحلیل و طراحی ایستگاه S05 بر اساس جدول (۱)، با قضاوت مهندسی از نتایج لوگ گمانه‌ها و نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی همچون آزمایش دانه‌بندی، برش مستقیم و سه محوری صورت گرفته است.

جدول (۱): مشخصات ژئوتکنیکی ایستگاه

عمق لایه (متر)	۶-۱	۱۴-۶	۲۰-۱۴	۳۵-۲۰
جنس غالب	SC	SM, ML, CL	SM	ML, CL
عدد SPT	۵۰-۲۰	۵۰-۱۵	۵۰-۳۰	۵۰<
چسبندگی $UU (Kg/cm^2)$	۰,۳-۰,۲	۰,۵-۰,۳	۰,۵-۰,۳	۰,۷-۰,۵
چسبندگی $CU (Kg/cm^2)$	۰,۲-۰,۱	۰,۳-۰,۲	۰,۳-۰,۲	۰,۵-۰,۳
زاویه اصطکاک داخلی ϕ_{UU}	۲۰-۱۸	۱۸-۱۶	۲۲-۲۰	۲۰-۱۸
زاویه اصطکاک داخلی ϕ_{CU}	۲۸-۲۶	۲۸-۲۶	۳۰-۲۸	۲۸-۲۶
وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱,۷۰-۱,۶۵	۱,۷۰-۱,۶۰	۱,۷۵-۱,۷۰	۱,۷۵-۱,۷۰
نسبت پواسون	۰,۳۳-۰,۳۱	۰,۳۸-۰,۳۵	۰,۳۲-۰,۳۰	۰,۳۸-۰,۳۶
مدول تغییر شکل قائم (Kg/cm^2)	۴۰۰-۳۰۰	۴۵۰-۳۵۰	۵۵۰-۴۰۰	۵۰۰-۴۰۰
مدول تغییر شکل افقی (Kg/cm^2)	۳۰۰-۲۰۰	۳۵۰-۲۵۰	۴۰۰-۳۰۰	۳۵۰-۲۵۰
مدول بارگذاری مجدد قائم (Kg/cm^2)	۸۰۰-۶۰۰	۹۰۰-۷۰۰	۱۰۰۰-۸۰۰	۱۰۰۰-۸۰۰
ضریب نفوذپذیری cm/s	$۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۳}$	$۱۰^{-۵}$ تا $۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۵}$ تا $۱۰^{-۶}$
قابلیت تراکم‌پذیری حجمی MPa^{-1}	-	-	۰,۰۴-۰,۰۲	۰,۰۶-۰,۰۳

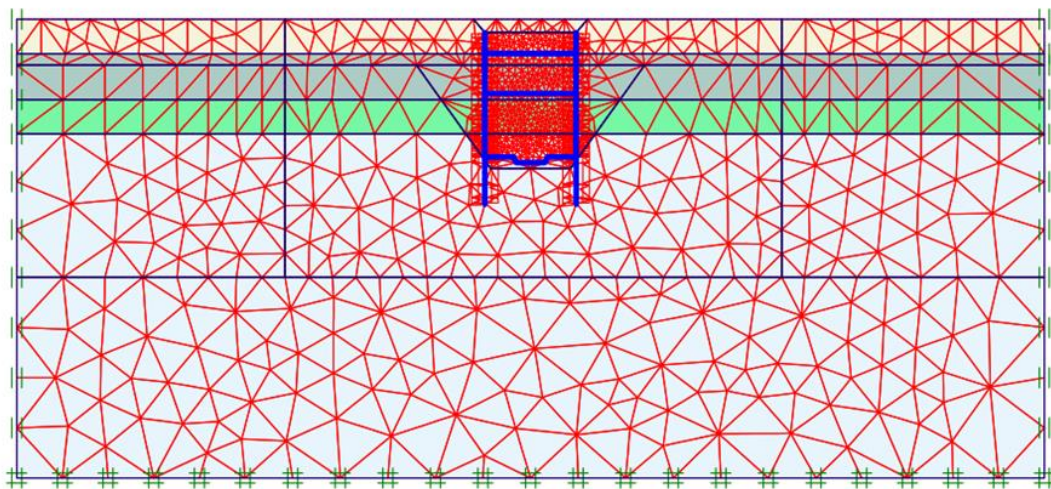
۳-۲- مدلسازی عددی

به منظور حل مسئله موجود از نرم‌افزار Plaxis دو بعدی نسخه ۸ استفاده شده است. نرم‌افزار Plaxis بر اساس روش اجزای محدود (FEM) توسعه یافته است و ابزار توانمندی برای مدلسازی انواع مسائل ژئوتکنیکی با شرایط هندسی پیچیده است. به منظور مدلسازی با استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا هندسه مسئله ساخته شده است و مدل رفتاری و خصوصیات مواد و مصالح تخصیص یافته است، و سپس شرایط مرزی و شرایط اولیه ایجاد شده است و در نهایت، مدل ساخته شده مش‌بندی شده است. شرایط مسئله به صورت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است و شمعه‌ها و استرات‌ها با استفاده از المان Plate مدلسازی شده‌اند. شرایط مرزی به صورتی است که جابه‌جایی افقی و قائم در مرز افقی پایین مدل صفر در نظر گرفته شده است و همچنین جابه‌جایی افقی در مرز قائم راست و چپ مدل نیز صفر است. برای شمعه‌ها و استرات‌ها از مدل رفتاری الاستیک خطی و مدل رفتاری خاک سخت شونده نیز برای زمین در نظر گرفته شده است. هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار مطابق شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل (۵): هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار

مطابق شکل فوق مشاهده می شود که جابه جایی مرزهای قائم راست و چپ مدل در راستای قائم صفر نشده اند و به مدل اجازه نشست در راستای قائم و از سطح زمین داده شده است. همچنین در دو سمت محل احداث ایستگاه و انجام حفاری، در سطح زمین دو بارگذاری در نظر گرفته شده است که عبارتند از بار ترافیک، به مقدار ۲۴ کیلو نیوتن بر متر مربع و بار ناشی از ساختمان های هم جوار، به مقدار ۵۰ کیلو نیوتن بر متر مربع. پس از ساخت هندسه مسئله و تخصیص مواد و مصالح مربوط به زمین و سازه نگهدار، مدل مطابق شکل (۶) مش بندی شده است.

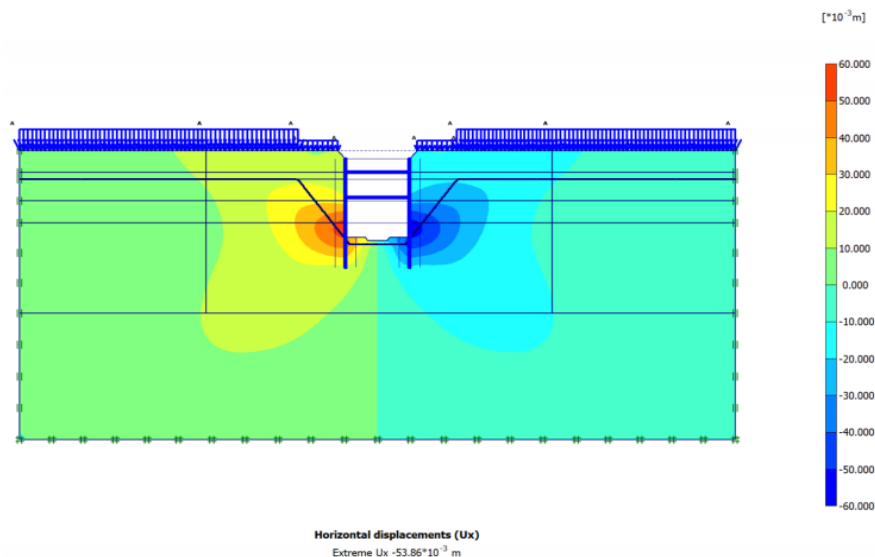


شکل (۶): شبکه مش ایجاد شده بر روی هندسه مدل

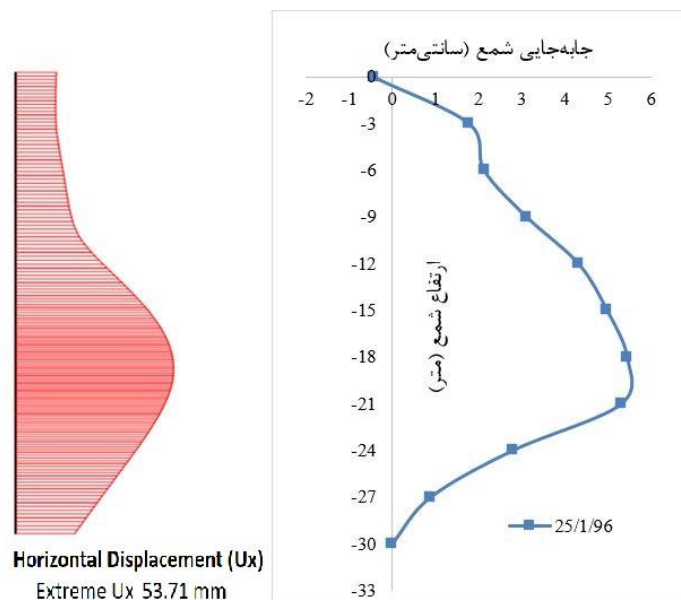
مطابق شکل فوق مشاهده می شود که شبکه مش ایجاد شده بر روی هندسه مدل، با استفاده از المان های مثلثی ۱۵ گره ای توسعه یافته است. لازم به ذکر است که به منظور افزایش دقت محاسبات، شبکه مش در نواحی نزدیک به حفاری و به خصوص نزدیک به سازه نگهدار، استرات و فونداسیون بسیار ریزتر از سایر نواحی ایجاد شده است.

۳-۳- صحت سنجی مدل عددی

به منظور اطمینان یافتن از مدل عددی ساخته شده، در ابتدا با استفاده از مدل ساخته شده و با در نظر گرفتن هر دو ردیف استرات و بدون به کار گرفتن فونداسیون اجرا شده در کف گود، جابجایی های مدل و شمع ها به ترتیب مطابق شکل (۷) و (۸) محاسبه شده است. همانطور که پیش تر اشاره شد، در طرح اولیه، به منظور نصب دو ردیف از استرات، چهار مرحله حفاری و خاکبرداری انجام می شود. که حداکثر جابه جایی جانبی شمع ها در اجرای طرح اول، مطابق شکل (۷) و (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۷): جابه‌جایی‌های افقی مدل با در نظر گرفتن دو ردیف استرات و بدون فونداسیون



شکل (۸): مقایسه نتایج جابه‌جایی افقی شمع‌ها با در نظر گرفتن دو ردیف استرات و بدون فونداسیون حاصل از مدلسازی عددی با نتایج حاصل از ابزاربندی

مطابق شکل‌های فوق، نتایج حاصل از مدلسازی عددی، با نتایج حاصل ابزار دقیق مطابقت دارد، که حاکی از صحت مدل ساخته شده است.

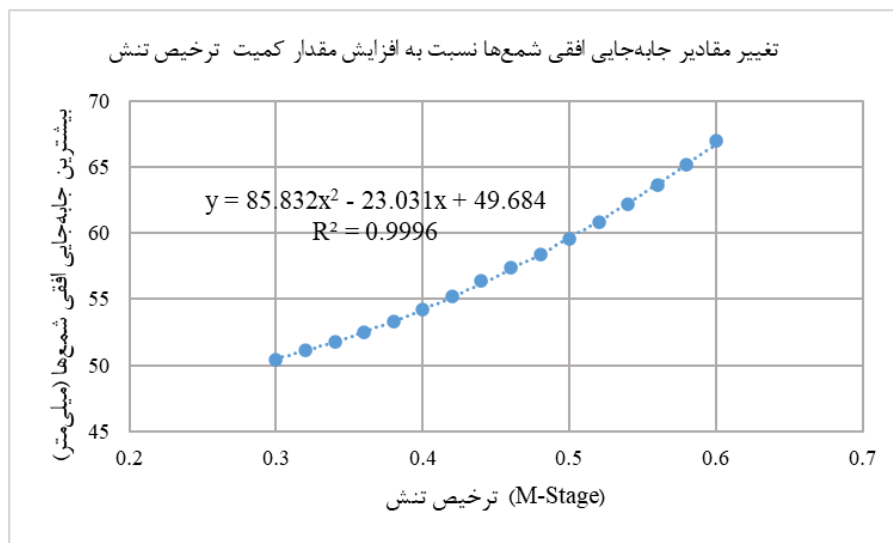
۳-۴- نتایج حاصل از مدلسازی عددی

در طراحی و اجرای طرح دوم، با حذف استرات ردیف دوم و جایگزین نمودن فونداسیون، چهار مرحله حفاری ذکر شده در طرح اول، به سه مرحله برای طرح دوم تقلیل یافت، که در این طرح، اختلاف تراز استرات ردیف اول تا کف ترانشه معادل ۱۸ متر است. با توجه به زیاد بودن مقدار یاد شده در مقایسه با دو مرحله دیگر حفاری و گودبرداری، این مرحله از حفاری، به صورت حفاری مرحله‌ای مدلسازی شده است. مراحل و گام‌های مدلسازی به ترتیب ذیل هستند:

- | | |
|---|-----------------------------------|
| (۱) اعمال بارهای گسترده موجود در سطح زمین | (۵) حفاری تا تراز استرات ردیف اول |
| (۲) نوسازی تغییر مکان‌ها | (۶) نصب استرات‌های ردیف اول |
| (۳) گودبرداری تا تراز سر شمع‌ها | (۷) حفاری تا کف ترانشه |
| (۴) اجرای شمع‌ها (حفاری و بتن‌ریزی) | (۸) اجرای فونداسیون |

به منظور در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای، در اجرای مرحله ۷ میزان کمیت ترخیص تنش از مقدار ۰.۳ تا ۰.۶ با گام‌های ۰.۰۲، تغییر داده شده است تا مشخص شود که کدام مقدار با نتایج ابزار دقیق مطابقت دارد. به منظور یافتن مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش (M-Stage)، مقدار

بیشترین جابه‌جایی افقی شمع‌ها در نتایج مدلسازی با مقادیر متفاوت کمیت ترخیص تنش (M_{Stage})، با مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری شده شمع‌ها مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدلسازی با مقادیر مختلف کمیت ترخیص تنش (M_{Stage}) مطابق نمودار شکل (۹) ارائه شده است.

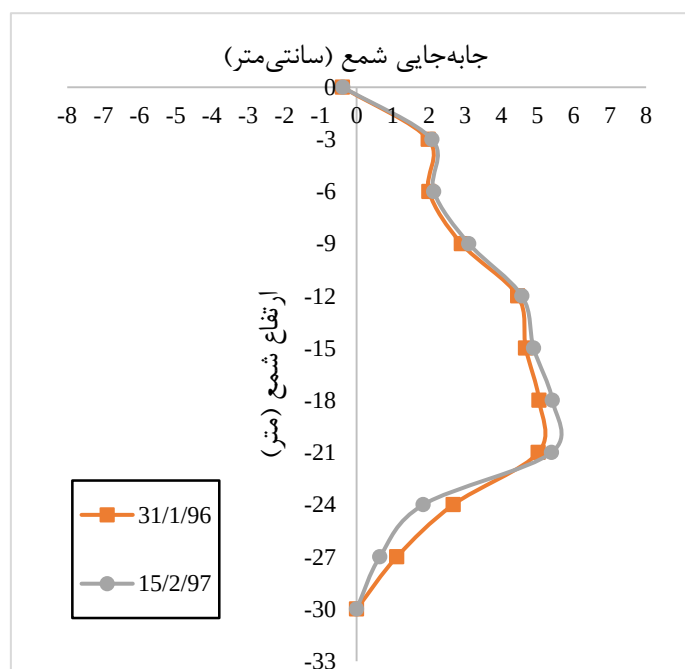


شکل (۹): مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها بر حسب تغییرات مقدار کمیت ترخیص تنش (M_{Stage})

مطابق نمودار شکل فوق مشاهده می‌شود که یک رابطه درجه دوم با تقریب بسیار مناسب بین مقادیر بیشترین جابه‌جایی افقی شمع‌ها نسبت به تغییرات مقادیر کمیت ترخیص تنش وجود دارد که مطابق رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\delta_{x,max,pile} = 85.832(M_{Stage})^2 - 23.031(M_{Stage}) + 49.684 \quad (1)$$

که در رابطه فوق، $\delta_{x,max,pile}$ بیانگر حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها بر حسب میلی‌متر و M_{Stage} برابر با کمیت ترخیص تنش است. همچنین نتایج حاصل از ابزاربندی مطابق شکل (۱۰) نمایش داده شده است. جابه‌جایی افقی شمع‌ها در فواصل ۳ متری و در زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری شده است.



شکل (۱۰): مقادیر جابه‌جایی افقی شمع در ترازهای مختلف که با استفاده از ابزاربندی حاصل شده است

مطابق شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که، حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها که با استفاده از ابزاربندی حاصل شده است برابر با ۵۷ میلی‌متر است. بنابر

این، با جایگذاری مقدار یاد شده در رابطه (۱)، مقدار کمیت ترخیص تنش برابر ۰,۴۶ حاصل شده است.

۳-۵- تفسیر نتایج

در این مقاله با استفاده از ساخت چندین مدل عددی، با در نظر گرفتن قابلیت ساخت مرحله‌ای نرم‌افزار Plaxis دو بعدی، نتایج حاصل از مدل عددی برای مقادیر مختلف کمیت ترخیص تنش، با نتایج حاصل از ابزار دقیق مقایسه شده است. مطابق نتایج حاصل از مدلسازی، مقادیر جابه‌جایی‌ها برای مقدار ترخیص تنش برابر با ۰,۴۶ با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق مطابقت دارد. بنابراین مقدار مناسب کمیت ترخیص تنش به منظور مدلسازی عددی مسائل مشابه مسئله موجود، برابر با ۰,۴۶ است. همچنین مطابق نتایج حاصل از مدل عددی، یک رابطه درجه دوم با تقریب بسیار دقیق و مناسب، بین مقادیر ترخیص تنش و حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از ساخت چندین مدل عددی دو بعدی و با استفاده از روش اجزای محدود، نتایج طراحی سازه‌های نگهدارنده موقت و نتایج حاصل شده از اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق، با نتایج مدل دو بعدی مقایسه شود و مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش، برای مدلسازی دو بعدی تعیین شود، که در این مقاله مشخص شده است که مقدار صحیح این کمیت برابر با مقدار ۰,۴۶ است. لازم به ذکر است که مزیت و اهمیت طرح دوم سازه نگهدارنده، مبنی بر حذف ردیف دوم از استرات‌ها و جایگزین نمودن فونداسیون، کاهش زمان ایجاد ایستگاه‌ها و کاهش هزینه ساخت است. بنابراین نتایج این مطالعه عبارتند از:

- مقدار صحیح کمیت ترخیص تنش برای مدلسازی دو بعدی روش کند و پوش در ترانشه مهار شده، در هنگام حذف یک ردیف از استرات‌ها، که حذف استرات منجر به اختلاف تراز بسیار زیاد بین استرات باقی مانده تا کف ترانشه شود، برابر با ۰,۴۶ است.
- بین مقدار حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها با مقدار کمیت ترخیص تنش، یک رابطه درجه دوم با تقریب بسیار بالا و مناسب برقرار است.
- با افزایش مقدار کمیت ترخیص تنش، مقدار حداکثر جابه‌جایی افقی شمع‌ها افزایش می‌یابد.
- حذف یک یا چند ردیف از استرات‌ها و جایگزین نمودن فونداسیون در کف ترانشه‌های مهار شده، باعث کاهش زمان و هزینه احداث ایستگاه‌های قطار شهری می‌شود.

مراجع

- [۱] Tan, Y., Lu, Y., "Why excavation of a small air shaft caused excessively large displacements: forensic investigation", J. Perform. Constr. Facil. ASCE 31 (2), 04016083, 2017.
- [۲] Verma, S.K., Bhadauria, S.S., Akhtar, S., "In-situ condition monitoring of reinforced concrete structures", Front. Struct. Civ. Eng. 10 (4), pp. 420–437, 2016.
- [۳] Wu, H.N., Shen, S.L., Liao, S.M., Yin, Z.Y., "Longitudinal structural modeling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings", Tunnel. Underground Space Technol. 50, pp. 317–323, 2015.
- [۴] Shen, S.L., Wu, H.N., Cui, Y.J., Yin, Z.Y., "Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai", Tunnel. Underground Space Technol. 40, pp. 309–323, 2014.
- [۵] Tan, Y., Li, M., "Measured performance of a 26 m deep top-down in excavation in downtown Shanghai", Can. Geotech. J. 48 (5), pp. 704–719, 2011.
- [۶] Hashash, Y. M. A., Whittle, A. J., "Ground movement prediction for deep excavations in soft clay.", J. Geotech. Eng., 122(6), pp. 474–486, 1996.
- [۷] Finno, R. J., Calvello, M., "Supported excavations: Observational method and inverse modeling.", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 131(7), pp. 826–836, 2005.
- [۸] Son, M., Cording, E. J., "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements.", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 131(2), pp. 162–177, 2005.
- [۹] Osooli, A., Hashash, Y. M. A., Song, H., "Interplay between field measurements and soil behavior for capturing supported excavation response.", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136(1), pp. 69–84, 2010.
- [۱۰] Hashash, Y. M. A., Osooli, A., Marulanda, C., "Central artery/ tunnel project excavation induced ground deformations.", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134(9), pp. 1399–1406, 2008.
- [۱۱] Schuster, M., Kung, G. T. C., Juang, C. H., Hashash, Y. M. A., "Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation.", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 135(12), pp. 1823–1835, 2009.
- [۱۲] Tan, Y., Wei, B., "Observed behavior of a long and deep excavation constructed by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay.", J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 138 (1), pp. 69–88, 2012.