



مطالعه عددی تأثیر دیوار دیافراگمی در کاهش نشست های ناشی از تونل سازی مکانیزه

مجتبی شیرزده حق، محمد علیائی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

تونل سازی مکانیزه
دیوار دیافراگمی
نشست
ماشین حفار تونل
مدل سازی عددی

خلاصه: جابه‌جایی های ناشی از حفاری تونل در سطح و عمق زمین در صورت عدم کنترل می تواند برای سازه های سطحی و زیرساخت های شهری خطر آفرین باشد. از این رو، در هنگام تونل سازی در محیط شهری از روش های متنوعی برای کاهش نشست ها استفاده می شود. یکی از این روش ها، استفاده از دیوار دیافراگمی است. در این مطالعه تأثیر استفاده از دیوار دیافراگمی در کاهش جابه‌جایی های ناشی از حفاری تونل متروی مادرید با حضور لایه ضخیم خاک دستی بررسی گردیده است. برای این منظور حفاری مکانیزه تونل متروی مادرید به صورت گام به گام و سه بعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی گردیده است. در این مدل سازی ها مولفه های مختلف TBM یعنی فشار اعمالی به جبهه کار، تزریق دوغاب در پشت سگمنت ها، اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر کله حفار و سپر در نظر گرفته شده است. دیوار دیافراگمی نیز به صورت سه بعدی مدل سازی گردیده است. پارامترهای متغیر این مطالعه مدول الاستیسیته دیوار، طول دیوار، زبری بین دیوار و خاک، فاصله دیوار از محور تونل و دانسیته دیوار است. نتایج مطالعه نشان می دهد در بین پارامترهای مختلف تأثیرگذار، مدول الاستیسیته دیوار و فاصله آن از محور تونل بیشترین تأثیر را در کنترل نشست های قائم و جابه‌جایی های افقی ناشی از حفاری تونل داشته است. همچنین دیوار با فاصله ۰/۷ از محور تونل و طول نفوذ ۰/۵ D یا ۱D+C می تواند دیوار دیافراگمی بهینه در این پروژه باشد.

۱- مقدمه و مروری بر ادبیات فنی

در دهه های اخیر در بسیاری از شهرهای جهان و برخی از کلان شهرهای کشور، مترو جزو جدایی ناپذیر سیستم حمل و نقل عمومی گشته و با توسعه روز افزون همراه بوده است. از این رو مسئله حفاری تونل مترو در محیط شهری و نشستهای سطحی ناشی از آن همواره مورد توجه مهندسان و پژوهشگران حوزه ژئوتکنیک و تونلسازی بوده و اهمیت زیادی داشته است [۶-۱]. علی رغم اینکه حفاری مکانیزه تونل با استفاده از ماشین حفار یا همان TBM امکان کاهش نشستهای ناشی از تونلسازی را فراهم گردانیده، همچنان وقوع نشستهای قابل توجه و خطر آفرین برای سازه های سطحی و زیرساختهای شهری در برخی از پروژه ها از جمله در حد فاصل ایستگاه ۳ و ۴ خط ۲ متروی تبریز [۷] و پروژه متروی مادرید ثبت گردیده است [۸]. از این رو، موضوعاتی مانند رفتارسنجی و تحلیل برگشتی حفاری تونل در محیط شهری [۹]، مدلسازی عددی با استفاده از روشهایی مانند اجزای محدود و تفاضل محدود برای تخمین نشستهای ناشی از حفاری تونل

و مدلسازی عددی و فیزیکی روشهای سازه ای برای کاهش نشستهای ناشی از حفاری تونل همواره در پایان نامه ها و مقالات پژوهشی مورد توجه واقع گردیده است [۱۱ و ۱۰].

استفاده از روابط تجربی با فرم بسته مانند فرمولاسیون تجربی Peck (۱۹۶۹)، روابط O'Reilly و New (۱۹۸۲) و Attewell و Wood-man (۱۹۸۲) که بر اساس توزیع نرمال گاوس منحنی های نشستهای عرضی و طولی ناشی از حفاری و پارامتر افت حجم زمین را محاسبه می نماید، از گذشته تاکنون بسیار متداول است [۱۱]. در کنار این روشهای تجربی که معمولاً در تحلیل برگشتی داده های رفتارسنجی مورد استفاده قرار می گیرد، بهره گیری از مدلسازی با نرم افزارهای موجود در سالهای اخیر رشد پیدا کرده است. Kasper و Meschke در سال ۲۰۰۶ با مدلسازی عددی سه بعدی گام به گام حفاری با TBM و در نظر گرفتن جزئیات مختلف آن توجه ها را به سمت مدلسازی عددی جلب نموده اند [۱۲]. Lambroghi و همکارانش در سال ۲۰۱۲ روش مدلسازی حفاری مکانیزه را با پیشنهاد در

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.olyaei@modares.ac.ir

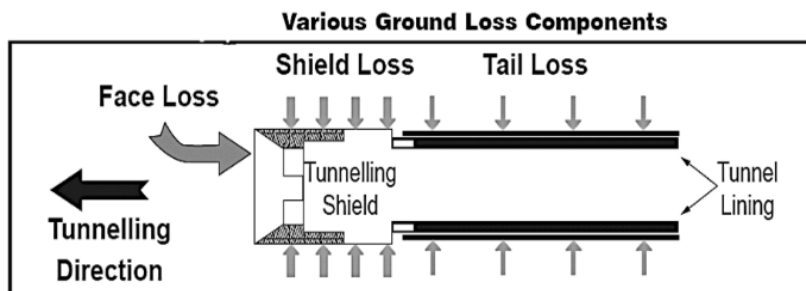


نظر گرفتن یک لایه با مشخصات مکانیکی الاستیک برای اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر سپر و کله حفار توسعه داده اند. آنها در مطالعه خود از نرم افزار FLAC استفاده نموده اند [۸]. در سالهای بعد، Fargnoli و همکارانش (۲۰۱۵) و Novozhenin و Vystrechil (۲۰۱۶) به ترتیب پروژه های حفاری تونل خط ۵ متروی میلان و متروی سن پترزبورگ را با مدلسازی عددی گام به گام TBM مورد بررسی قرار داده اند [۱۴ و ۱۳]. دقت در ادبیات فنی نشان می دهد که بیشتر مدلسازیها با استفاده از نرم افزار المان محدود PLAXIS و نرم افزار تفاضل محدود FLAC صورت گرفته است.

چنان که پیشتر عنوان شد طراحی و تکنولوژی TBM با تنظیم فشار جبهه کار و حفظ فشار زمین در فاصله بین حفاری و نصب پوشش باعث کنترل بیشتر تغییر شکلهای زمین گردیده است. تزریق دوغاب پشت سگمنتها، میزان افت حجم زمین را کاهش می دهد. با این وجود، در زمینهای سست و ضعیف با سطح آب زیرزمینی بالا، امکان وقوع نشستهای زیاد وجود دارد. از این رو برای کنترل هر چه بیشتر عواقب ناشی از تونلسازی برای سازه های سطحی و زیرساختهای شهری از مجموعه روشهای بهسازی زمین و روشهای سازه ای به طور گسترده استفاده می شود. روشهای بهسازی زمین با اصلاح خواص مهندسی زمین به دنبال کنترل و کاهش تغییر شکلهای ناشی از تونلسازی است. در این میان روشهایی مانند تزریق نفوذی و تزریق جبرانی نیز در سالهای اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. تزریق نفوذی در لایه نفوذپذیر نزدیک سطح زمین انجام می شود تا سختی آن افزایش یابد. تزریق جبرانی با نصب لوله های تزریق در زمین و در زیر نقاط در معرض خطر سازه صورت می گیرد. تزریق می تواند قبل از عبور تونل از نزدیکی سازه، در حین عبور تونل و یا پس از ساخت تونل و عبور آن از محل انجام شود. روشهای سازه ای با افزایش ظرفیت مقاومتی سازه به دنبال کاهش تأثیرات ناشی از تغییر شکل زمین است. افزایش توانایی پی برای مقاومت در برابر تغییر شکلهای پیش بینی شده، کاهش حساسیت سازه به تغییر شکلهای پیش بینی شده و کنترل تغییر شکلهای با ایزوله سازی پی مواردی است که میتوان با انجام عملیاتیهای اجرای شمع تا ناحیه عمیق تر از محدوده تأثیر، اجرای شمع و ریزشمع در زیر پی های سطحی ناکارآمد و اجرای دیوار دیافراگمی انجام داد [۱۵]. Cucino و همکارانش در سال ۲۰۱۰ برای کنترل نشستهای سطحی ناشی از حفاری متروی فلورانس و جلوگیری از آسیب دیدگی سازه های مجاور محدوده تونل به ویژه سازه های تاریخی، استفاده از روش تزریق جبرانی را با مدلسازی در نرم افزار المان محدود MIDAS GTS انجام داده اند [۱۶]. آنها در مطالعه

خود پورتهای تزریق را در نظر گرفته اند اما به داده های رفتارسنجی پروژه اشاره ای ننموده اند. Zhang و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی به بررسی تکنیکهای مختلف تزریق جبرانی برای کاهش بزرگی نشستهای زمین در حفاری تونل کم عمق پرداخته اند [۱۷]. آنها با مدلسازی عددی حفاری تونل متروی ووهان چین با روش NATM در نرم افزار FLAC به دنبال یافتن بهینه ترین تکنیک ممکن بوده اند و برای ساده سازی فرضیهایی مانند زمین یکنواخت و عدم حضور آب زیرزمینی را در نظر گرفته اند که با واقعیت پروژه تطابق نداشته است. Mariano و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با مدلسازی استفاده از دیوار شمعی در خط ۹ متروی بارسلون نشان داده اند که المانهای شمع بین سازه های اطراف و تونل برای کنترل حرکات زمین روش مناسبی می تواند باشد [۱۸]. Bilotta و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تحقیقاتی را با مدل سازی سانتیفریوژ ریزشمعهای نزدیک تونل برای بررسی نحوه تأثیرگذاری ریزشمعها بر کاهش نشستهای سطحی انجام داده اند [۱۹]. در این مطالعه فاصله ی بین ریزشمعها با یکدیگر و طول نفوذ آنها به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده است. Bilotta و همکارانش در مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۶ به مدل سازی عددی دو بعدی دیوار دیافراگمی و بررسی پارامترهایی مانند طول، ضخامت، نوع سطح تماس دیوار با خاک، وزن دیوار و فاصله دیوار از محور تونل در نرم افزار PLAXIS پرداخته اند [۲۰]. Bilotta و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با مدل سازی عددی سه بعدی شمعهای نگهبان پیرامون تونل در نرم افزار PLAXIS کاهش نشستهای ناشی از حفاری را بررسی کرده اند [۲۱]. Fantra و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با تحلیل دو بعدی کرنش صفحه ای در نرم افزار PLAXIS تأثیر پارامترهای طول و نوع سطح تماس دیوار دیافراگمی ساخته شده با پنلهای یکپارچه را بر روی منحنی نشستهای زمین بررسی کرده اند. آنها در بخش دیگری از مطالعه خود با مدلسازی سه بعدی دیوار دیافراگمی در نرم افزار PLAXIS، نتایج حاصل از مدل سازی دو بعدی و سه بعدی را با یکدیگر مقایسه نموده اند [۲۲].

بررسی مطالعه Lambrughی و همکارانش (۲۰۱۲) نشان می دهد که در محدوده کیلومتراژ ۳+۷۰۰ تا ۳+۸۰۰ متروی مادرید نشستهای سطحی بسیار زیادی رخ داده است. دلیل این اتفاق دو عامل روباره کم تونل و ضخامت زیاد لایه خاک دستی با مشخصات مکانیکی ضعیف بوده است. خاکهای دستی دارای ساختار سست و متخلخل است. در خاکهای دستی و نخاله ساختمانی علاوه بر پدیده ساختار داربستی خاک، وجود مواد آلی و زائدات گیاهی و نیز وجود قطعات بزرگ بتن و فلزات سبب ایجاد فضاهای



شکل ۱. مولفه های افت حجم زمین در حفاری مکانیزه [۲۹]

Fig. 1. Components of volume loss in mechanized tunneling

متر دارد و در انتهای آن، حفاظت از مقطع حفاری شده توسط سگمتها که قطعات بتنی پیش ساخته هستند، انجام می گیرد. نیروی پیشران TBM توسط یک سری جکهایی که به سگمتهای نصب شده در مراحل قبلی متکی می شوند، تامین می گردد. در قسمت جلوی سپر، کله حفار مجهز به مجموعه ای از تیغه های برنده قرار گرفته که با استفاده از آن عملیات حفاری انجام می گیرد. سطح جلویی سپرها بسته به شرایط ژئوتکنیکی زمین می تواند باز یا بسته باشد [۲۸]. ماشین حفار متعادل کننده با فشار زمین یا Earth Pressure Balanced-TBM با استفاده از خاک حفاری شده به جبهه کار فشار وارد می نماید و افزودنی های مختلفی مانند بنتونیت یا فوم به خاک حفاری شده تزریق می کند تا با نگهداری فشار بهینه و برقراری تعادل بین فشار وارد از سوی TBM به جبهه حفاری و فشار برجای خاک، از هر گونه افت حجم بیشتر زمین جلوگیری به عمل آورد. تغییر شکلهای ناشی از تونل سازی مکانیزه با TBM با جابه جایی خاک در جهت های طولی و شعاعی به سمت جبهه کار رخ می دهد. حجم خاکی که دچار ریزش می شود به آزادسازی فشار در جبهه کار بستگی دارد. جابه جایی خاک به سمت تونل را می توان به ایده افت حجم زمین یعنی اختلاف حجم خاک حفاری شده با مقدار خاکی که بر اساس تئوری باید حفاری می شد، ارتباط داد. افت حجم زمین برای حفاری با TBM به واسطه سه مولفه رخ می دهد: افت حجم جبهه با جابه جایی طولی زمین به سمت جبهه تونل، افت حجم سپر با جابه جایی شعاعی زمین به خاطر اختلاف قطر کله حفار و سپر و نهایتاً افت حجم انتهای سپر به خاطر انقباض یا پرکنندگی ناکافی دوغاب تزریقی در پشت سگمت (شکل ۱) [۲۹].

مراحل حفاری و نصب پوشش توسط TBM-EPB را می توان با

خالی بزرگ در خاک می گردد [۲۳]. ساخت و ساز در چنین شرایطی با خطرات بزرگی مانند نشستهای دراز مدت و پتانسیل ناپایداری مواجه است. به عنوان مثال عدم توجه به سست بودن خاک در منطقه ای مسکونی در نورثوسترن انگلیس، باعث گردیده نشستهای زمین ده سال پس از ساخت و ساز به ۳ متر برسد [۲۵ و ۲۴]. از این رو مطالعه رفتار مهندسی خاک دستی و مصالح پرکننده [۲۵] و ارزیابی احتمال خطرات پی سازی در خاکهای سست از موضوعات مطالعاتی مهم است [۲۶]. جزئیات لایه بندی زمین و نشستهای سطحی ناشی از حفاری تونل با TBM در این محدوده از مسیر متروی مادرید در بخشهای بعدی این نوشتار ارائه گردیده است. از طرف دیگر جمع بندی ادبیات فنی نشان می دهد که پیش از این مطالعه چندانی با مدلسازی عددی دیوار دیافراگمی برای کاهش نشستهای سطحی ناشی از حفاری مکانیزه تونل در حالت سه بعدی در نرم افزار المان محدود ABAQUS صورت نگرفته است. از این رو در این مطالعه، محدوده کیلومترهای ۳+۷۰۰ تا ۳+۸۰۰ متروی مادرید با خاک دستی ضخیم و نشستهای زیاد ناشی از تونلسازی انتخاب گردیده و با مدلسازی عددی سه بعدی در ABAQUS، تأثیر دیوار دیافراگمی در کاهش نشستها بررسی گردیده است.

۲- حفاری با TBM-EPB

در حفاری با TBM تمام عملیات حفاری، نصب پوشش و انتقال مواد حفاری شده به بیرون از تونل توسط خود دستگاه و به صورت مکانیزه انجام می شود. این نوع ماشینها در انواع زمینها از سنگ سخت گرفته تا خاک نرم و سست و آبدار قابل استفاده هستند. TBMها دارای یک ورق فولادی ضخیم و مقاوم هستند که سپر نامیده می شود. سپر طولی در حدود چند

جدول ۱. مشخصات مکانیکی خاک در مسیر متروی مادرید [۸]

Table 1. Mechanical properties of the ground in Madrid metro route

ψ	ϕ'	C'	ν	E	γ	
°	°	kPa	-	MPa	kN/m ³	
۵	۲۸/۰	۰	۰/۳۵	۱۰	۱۸/۰	خاک دستی
۵	۲۸/۰	۶۰	۰/۲۷	۴۰۰	۲۱/۸۰	ترکیب رس و گچ

ساده سازی به صورت زیر بیان نمود:

- حفاری تمام مقطع تونل توسط کله حفار و در داخل یک سپر محافظت کننده از سطح حفاری انجام می شود. پشت کله حفار، یک سپر فلزی سخت با قطری کوچکتر از قطر مقطع حفاری وجود دارد که از تغییر شکل زمین جلوگیری می نماید. اختلاف قطر مقطع حفاری با قطر خارجی سپر را اضافه حفاری پوشش می دهد.

- در انتهای سپر فلزی، سگمنتهای بتنی نصب می شوند. قطر خارجی پوشش نهایی ایجاد شده توسط این سگمنتهای از قطر مقطع حفاری کوچکتر است. پس از پیشروی و عبور سپر، سگمنتهای در تماس با سطح حفاری قرار گرفته و وظیفه نگهداری از زمین را بر عهده می گیرند. بدین ترتیب در این مرحله بار ناشی از فشار زمین بر سگمنتهای یا همان پوشش تونل اعمال می شود.

- همزمان با عبور سپر و تماس آزاد میان زمین و پوشش، فاصله میان سگمنتهای بتنی و مقطع حفاری با استفاده از دوغابی که به پشت سگمنتهای تزریق می گردد، پر می شود. با گذشت زمان دوغاب سخت تر شده و مدول یانگ آن افزایش می یابد.

۳- معرفی پروژه متروی مادرید

تونل متروی مادرید با قطر ۹/۳۸ متر و با استفاده از TBM-EPB حفاری شده است. در مقاطع مختلفی از پروژه حفاری مکانیزه متروی مادرید، نشستهای سطحی ناشی از تونلسازی با ابزار دقیق رفتارسنجی شده است. در جدول ۱ لایه بندی خاک در مسیر پروژه متروی شهر مادرید نشان داده شده

است. در محدوده کیلومتر ۳+۷۰۰ تا ۳+۸۰۰ این پروژه که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته، لایه بندی خاک به صورت حدود ۱۰ متر خاک دستی در سطح و ترکیبی از رس و گچ در عمق است. در جدول ۱؛ γ وزن واحد حجم، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، C' چسبندگی ظاهری، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی و ψ زاویه اتساع خاک است.

در خاک مادرید با توجه به وجود سفره های محدود آب زیرزمینی نامتصل به یکدیگر، مقدار درستی برای سطح آب زیرزمینی وجود ندارد. بنابراین حالت واقع گرایانه، مدلسازی عددی بدون در نظر گرفتن آب زیرزمینی است. همچنین مشاهدات مربوط به تزریق دوغاب در انتهای سپر، پیش و پس از سخت شدگی کامل دوغاب نشان می دهد در این پروژه، در نظر گرفتن مقدار صفر برای فشار تزریق دوغاب به واقعیت موجود نزدیکتر است [۸].

وجود لایه ضخیم خاک دستی با مشخصات مکانیکی ضعیف در سطح ضعیف امکان وقوع نشستهای سطحی را در محدوده مورد نظر متروی مادرید تسهیل نموده است. در جدولهای ۲ و ۳ مشخصات زمین در کیلومترهای ابزاربندی شده ۳+۷۲۱ و ۳+۷۵۷ ارائه گردیده است. ملاحظه می گردد که عمق خاک دستی در این دو مقطع به ترتیب ۱۰/۰۰ و ۸/۸۰ متر است. در شکل ۲ منحنی های عرضی نشستهای سطحی ناشی از حفاری تونل متروی مادرید در کیلومتر ۳+۷۲۱ و ۳+۷۵۷ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲ علی رغم استفاده از TBM و اعمال فشار قابل توجه به جبهه کار، نشستهای سطحی گستردهای به وقوع پیوسته و نشستهایی مانند ۲۸، ۳۶ و حتی ۷۵ میلیمتر ثبت گردیده است. این سطح از نشستها برای سازههای سطحی و زیرساختهای شهری بسیار خطرآفرین است و باید با استفاده از روشهایی که پیشتر ذکر گردید، کنترل و مهار شود.

در این مطالعه ابتدا یک مقطع از پروژه مادرید با کیلومتر ۳+۵۲۶

جدول ۲. جزئیات مقطع کیلومتر ۳+۷۲۱ متروی مادرید [۸]

Table 2. Specifications of the section 3+721

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)
۱	خاک دستی	۱۰/۰۰
۲	ترکیب رس و گچ	۴۰/۰۷

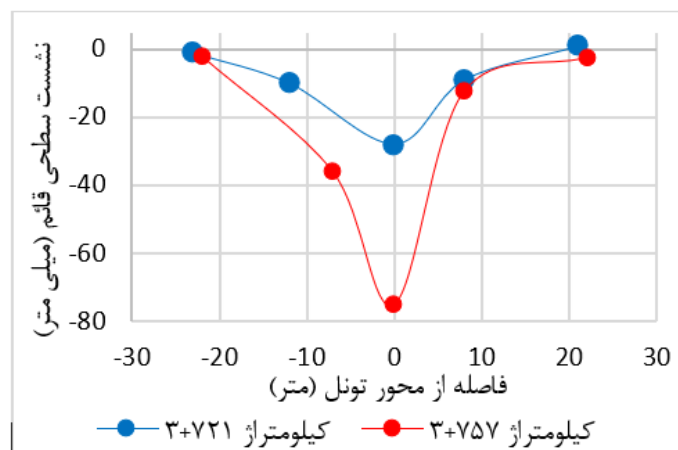
عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱۲/۷۱	۹/۳۸	-	۶۰/۰۰

جدول ۳. جزئیات مقطع کیلومتر ۳+۷۵۷ متروی مادرید [۸]

Table 3. Specifications of the section 3+757

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)
۱	خاک دستی	۸/۸۰
۲	ترکیب رس و گچ	۴۰/۵۱

عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱۱/۷۹	۹/۳۸	-	۶۰/۰۰



شکل ۲. نشست های سطحی قائم عرضی رفتارسنجی شده پروژه متروی مادرید [۸]

Fig. 2. Vertical surface settlements of Madrid metro

جدول ۴. جزئیات مقطع مدل سازی شده در این مطالعه

Table 4. Specifications of the numerical model

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)
۱	خاک دستی	۵/۰۰
۲	رس پلاستیک آبی و گچ	۵۰/۰۰

عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱۱/۷۰	۹/۳۸	-	۶۰/۰۰

۴- جزئیات مدل سازی عددی در ABAQUS

برای مدل سازی عددی از نرم افزار ABAQUS version. ۶.۴۱۸ استفاده شده است. این نرم افزار بر مبنای روش عددی المان محدود ۲۰۱۶ محاسبه می پردازد و با داشتن دو رویکرد explicit و implicit در حل مسائل و کتابخانه گسترده ای از انواع المانها ابزار معتبری برای مهندسين مکانیک و عمران به شمار می آید.

در مدل سازی حفاری با TBM شش بخش مختلف قطعه زمین، دیوار دیافراگمی، سپر، پوشش، خاک تزریق شده با دوغاب در انتهای سپر (گروت) و اضافه حفاری که در نتیجه اختلاف قطر کله حفار و قطر خارجی سپر ایجاد می شود، در نظر گرفته شده است. در پروژه متروی مادرید قطر مقطع حفاری شده ۹/۳۸ متر، قطر خارجی سپر ۹/۳۲ متر و ضخامت لایه اضافه حفاری برابر ۳ سانتیمتر، طول سپر ۱۰/۵ متر و طول هر رینگ پوشش برابر با ۱/۵ متر بوده است.

در مطالعه Lambrughi و همکاران ابعاد انتخاب شده برای مدل سه بعدی زمین در نرم افزار FLAC عبارتند بوده اند از:

- H+۴D: عمق مدل (در راستای محور Z)
- (H+۴D)²: طول مدل (در راستای محور X)
- (H+۴D)²: عرض مدل (در راستای محور Y)

که در آن H نشان دهنده عمق محور تونل از سطح زمین و D نشان دهنده قطر تونل است [۸]. بررسی ادبیات فنی و تجربه نویسندگان نشان می

برای صحت سنجی روش مدل سازی گام به گام در نرم افزار ABAQUS انتخاب شده است. مشخصات زمین و جزئیات تونل در این مقطع به همراه مقایسه نشستهای محاسبه شده به روش عددی با نشستهای رفتارسنجی شده با ابزار دقیق (فیلد) در بخش بعدی ارائه گردیده است. اما برای بررسی تأثیر دیوار دیافراگمی بر کنترل نشستهای ناشی از حفاری، یک مقطع فرضی با مشخصاتی که تقریباً مطابق وضعیت متروی مادرید در حد فاصل کیلومتراژ ۳+۷۰۰ و ۳+۸۰۰ آن است، انتخاب گردیده است. در این مقطع فرضی که جزئیات آن در جدول ارائه شده، برای سهولت مدل سازی عددی و جلوگیری از بروز مشکلاتی نظیر عدم همگرایی مدل سازی عددی به خاطر وقوع نشستهای بسیار زیاد و مشکلات مش بندی تونل واقع در دو لایه کاملاً متفاوت، عمق لایه خاک دستی برابر ۵ متر فرض گردیده است. فشار جبهه کار در این مقطع مطابق فشار واقعی اعمالی در محدوده مورد نظر متروی مادرید به صورت یکنواخت به مقدار ۶۰ کیلوپاسکال اعمال شده که تقریباً دو برابر فشار محاسباتی به روش متداول COB در عمق محور تونل است. روش COB فشار مورد نیاز برای حفظ پایداری جبهه کار تونل را کمی بیشتر از فشار حالت محرک زمین $(\sigma_T = K_a \sigma'_v - 2c\sqrt{K_a} + 20kPa)$ ذکر کرده است [۳۰]. بنابراین با توجه به چسبندگی قابل توجه لایه ترکیبی رس و گچ، فشار تئوریک جبهه کار مقدار بسیار کمی به دست می آید. دلیل یکنواخت بودن فشار اعمالی به جبهه کار این است که اگر چه فشار زمین با افزایش عمق متناسب با ضریب فشار جانبی افزایش می یابد، اما رفتارسنجیها نشان می دهد که توزیع فشار اعمالی با TBM به صورت پراکنده است [۸].

جدول ۵. المان های مورد استفاده در ABAQUS

Table 5. Types of elements used in ABAQUS

بخش	المان (3D)	توضیحات
زمین، دیوار و گروت	C3D8	پیوسته مکعبی شش ضلعی با ۸ گره
سپر، پوشش و اضافه حفاری	S4	پوسته چهارضلعی با ۴ گره

۴- المانهای سپر و اضافه حفاری در بخش حفاری شده در مرحله ۲، فعال شده است. برای در نظر گرفتن اضافه حفاری، یک لایه بسیار نازک با ضخامت ۳ سانتیمتر با مدل رفتاری الاستیک خطی تعریف شده و بین قطر خارجی سپر و مقطع حفاری قرار گرفته است.

۵- پس از انجام ۷ گام حفاری و پیشروی سپر، پوشش تونل در بخش حفاری شده در مرحله ۱، فعال گردیده و فاصله خالی میان پوشش و مقطع تونل، با گروت پوشش داده شده است. رفتار گروت و پوشش به صورت الاستیک خطی فرض گردیده و پوشش تونل به صورت یک رینگ کامل پیوسته مدلسازی شده و از اثر جداشدگی های بین سگمنتها صرف نظر گردیده است. با توجه به ورود واگن پشتیبان TBM به قسمت حفاری شده تونل، مقدار دانسیته پوشش تونل به طور مصنوعی افزایش داده شده است. در شکل ۴-ب وضع مدل پس از ۱۸ گام حفاری (۲۷ متر پیشروی) نمایش داده شده است.

با مراجعه به ادبیات فنی، جدول ۱۰ برای مشخصات دیوار دیافراگمی ارائه شده است. چنان که مشاهده می شود مشخصات مکانیکی دیوار با دانسیته یکسان در این دو منبع تنها به طور جزئی در مدول الاستیسیته تفاوت دارد. از این رو در این مطالعه مشخصات دیوار بر اساس جدول ۱۰ و با مدل رفتاری الاستیک خطی در دو حالت دانسیته 2400 kg/m^3 و دانسیته 3000 kg/m^3 اعمال گردیده است. عرض دیوار به اندازه ۰/۵ متر، طول نفوذ آن در عمق زمین (L) و فاصله دیوار از محور تونل (X) در این مطالعه عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است.

دهد ابعاد کوچکتر از پیشنهادات Lambrugh می تواند مرزهای مصنوعی را در مدلسازی عددی بی تأثیر نماید، اما برای دقت بیشتر از همین ابعاد استفاده گردیده است. نرم افزار ABAQUS در حالت سه بعدی شتاب ثقل را در راستای مثبت محور Z اعمال می نماید که این امر در مدلسازی منظور گردیده است (شکل ۴-الف). در جدول ۵ نوع المانهای مورد استفاده برای بخشهای مختلف مدل در نرم افزار ABAQUS نشان داده شده است.

در مدلسازی سه بعدی شش بخش زمین، دیوار دیافراگمی، سپر، اضافه حفاری، پوشش و گروت به طور جداگانه ساخته شده و اسمبل گردیده است. شکل واقعی سپر TBM مخروطی است. اما برای ساده سازی هندسه مدل، شکل سپر به صورت یک استوانه در نظر گرفته شده است. در جدولهای ۶ تا ۱۰ مشخصات مکانیکی هر یک از این بخشها ارائه شده است. در این مطالعه برای خاک از مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک کامل موهبر-کولمب با فرض جریان غیرهمراه استفاده شده است. فرآیند حفاری به صورت زیر مدلسازی گردیده است:

۱- تنشهای برجای اولیه در زمین اعمال شده و مدل در گام ژئواستاتیک به تعادل اولیه رسیده است (شکل ۵-الف).

۲- دیوار دیافراگمی در موقعیت خودش فعال گردیده است.

۲- المانهای داخل مقطع تونل در طول ۱/۵ متر (معادل عرض یک سگمنت) غیرفعال شده است.

۳- فشار لازم به جبهه کار اعمال گردیده است.

جدول ۶. مشخصات مکانیکی سپر [۸]

Table 6. Mechanical properties of the shield

نسبت پواسون بدنه سپر	مدول الاستیسیته بدنه سپر (GPa)	وزن سپر (kN)	طول سپر (m)	قطر سپر با شکل استوانه‌ای (m)	قطر حفاری (m)
۰/۱۲۵	۲۲/۵۰	۹۵۶۵	۱۰/۵۰	۹/۳۲	۹/۳۸

جدول ۷. مشخصات مکانیکی اضافه حفاری [۸]

Table 7. Mechanical properties of the overcut

ضخامت اضافه حفاری (m)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۰۳	۰/۲۰	۰/۱۰

جدول ۸. مشخصات مکانیکی پوشش تونل [۸]

Table 8. Mechanical properties of the lining

ضخامت (m)	دانسیتته اصلاح شده با توجه به وزن واگن پشتیبانی (kg/m^3)	دانسیتته اولیه (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۳۲	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۲۰	۳۸۰۰۰

جدول ۹. مشخصات مکانیکی گروت [۸]

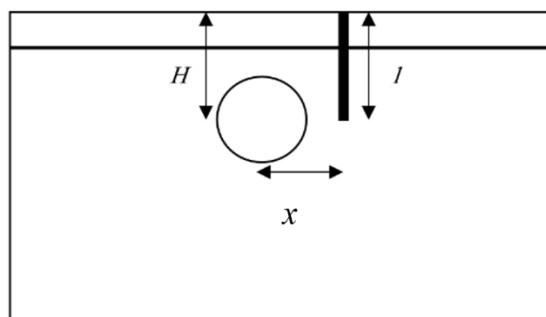
Table 9. Mechanical properties of the grout

دانسیتته گروت (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته سخت شده (MPa)
۲۴۰۰	۰/۲۸۶	۴۷۰

جدول ۱۰. مشخصات مکانیکی گروت [۸]

Table 10. Mechanical properties of the grout

دانسیتته گروت (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	
۲۴۰۰	۰/۲۰	۳۱۱۰۰	Józefiak (2015)
۳۰۰۰	۰/۲۰	۷۳۲۰۰	Józefiak (2015)
۲۴۰۰	۰/۲۰	۳۰۰۰۰	Comodromos (2013)



شکل ۳. نمایش شماتیک موقعیت دیوار دیافراگمی و تونل

Fig. 3. Schematic figure of the diaphragm wall

جدول ۱۱. مقادیر مفروض برای پارامترهای متغیر در این مطالعه

Table 11. Assumed values for parametric study variables

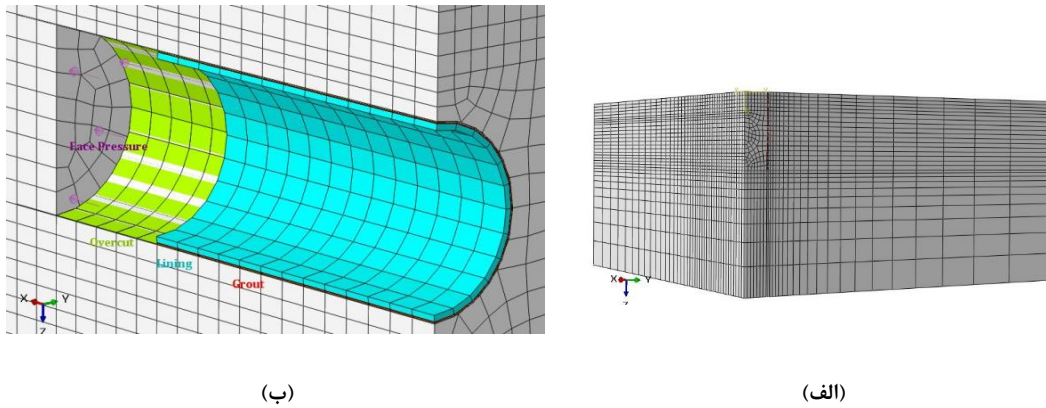
پارامتر متغیر	مقادیر مفروض
عمق لایه خاک دستی (m)	0, 5
فاصله دیوار از محور تونل، x (m)	0.7D, 1D
طول دیوار، l (m)	0.5D, C+1D, C+1.5D
مدول الاستیسیته دیوار، E (MPa)	30000, 72300
دانسیتته دیوار، ρ (kN/m^3)	2400, 3000
ضریب اصطکاک دیوار و خاک	0.1, $\tan \delta$, $\tan \varphi$

عامل تأثیرگذاری باشد [۱۰]. در شکل ۳ نمای شماتیک مدلسازیها در این مطالعه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱۱ مقادیر مفروض برای متغیرهایی که در این مطالعه در نظر گرفته شده، ارائه گردیده است.

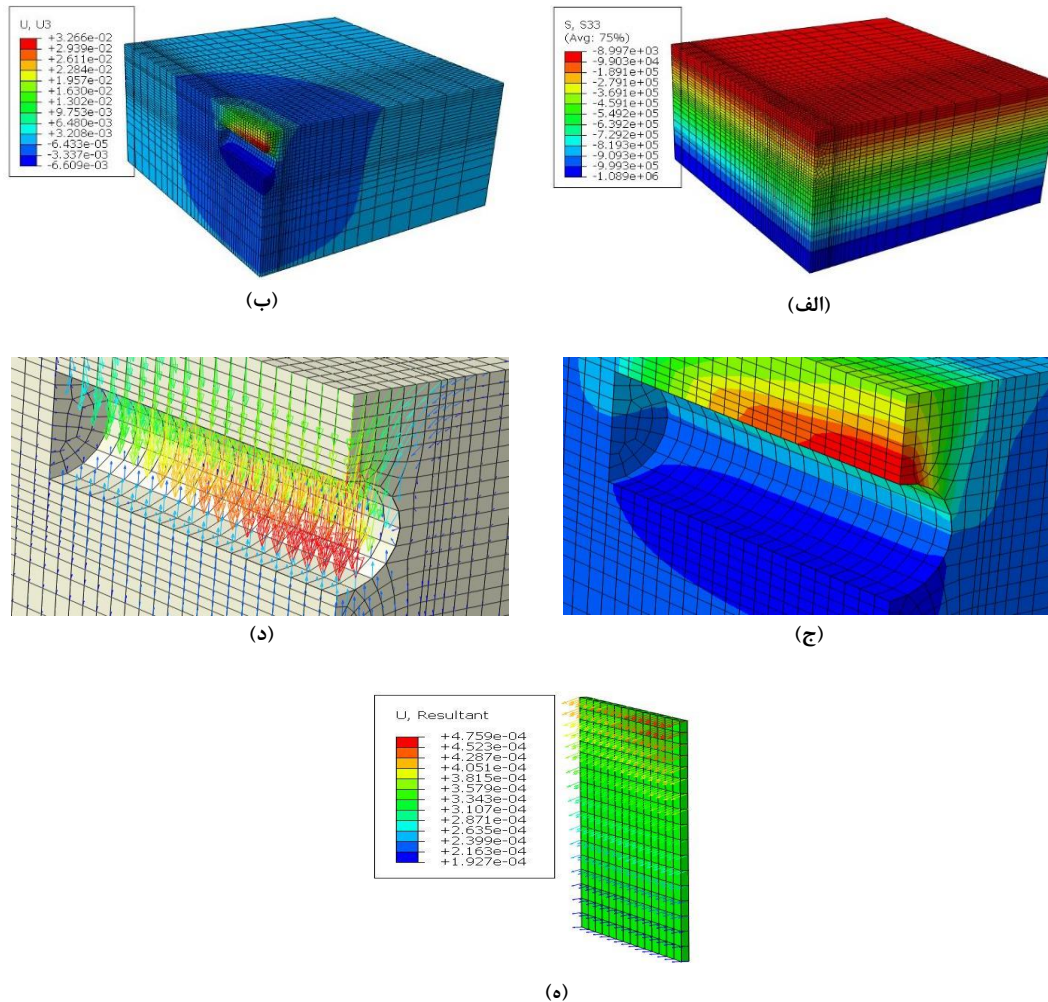
مدلسازی عددی باید نسبت به مرزهای مصنوعی و ابعاد مش بندی مستقل باشد، به عبارت بهتر مدل عددی باید نسبت به مرزهای مصنوعی و مش بندی حساسیت سنجی شود تا جایی که تغییرات هر چه بیشتر مرزهای مصنوعی و مش بندی دیگر بر نتایج حاصل تأثیرگذار نباشد. در این مطالعه حساسیت سنجی نسبت به مرزهای مصنوعی و مش بندی صورت گرفته و مرزهای مصنوعی به حد کافی بزرگ و ابعاد مش بندی به صورت بهینه انتخاب گردیده تا نتایج مستقل از تغییرات آنها باشد. در شکل ۴ وضعیت مدل پس از تعادل اولیه، کنترل تغییر شکل‌های قائم زمین در پایان ۳۰ متر حفاری و بردارهای تغییر مکان پیرامون تونل و دیوار دیافراگمی مربوط به یکی از مدلها ارائه گردیده است.

در ادبیات فنی زاویه اصطکاک بین خاک و سطح المانهای سازه‌های بتنی مانند شمع و دیوار دیافراگمی، δ ، در بازه $\frac{2}{3}\varphi \leq \delta \leq \frac{3}{4}\varphi$ در نظر گرفته شده است [۳۲ و ۳۱]. در این مطالعه برای بررسی هر چه دقیق تر تأثیر زاویه اصطکاک بین دیوار دیافراگمی و خاک در مهار نشستهای سطحی ناشی از حفاری تونل سه مقدار متفاوت برای آن انتخاب گردیده است. مقادیر $\tan \varphi$ و 0.1 به ترتیب به عنوان ماکزیمم و مینیمم ضرایب اصطکاک ممکن بین خاک و دیوار و $\delta = \frac{2}{3}\varphi$ به عنوان مقدار کاربردی متداول در نظر گرفته شده است.

برای طراحی بهینه و مؤثر المان‌های سازه‌ای مانند شمعه‌ها و دیوارهای دیافراگمی، تأثیر متغیرهایی مانند فاصله محور تونل از آنها، عمق نفوذ آنها، فاصله شمعه‌ها از یکدیگر، وزن، نوع سطح تماس و نوع خاک اطراف تونل می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. از طرف دیگر بحث هزینه‌های اجرا و محدودیت فضای در دسترس می‌تواند در هنگام استفاده از المانهای سازه‌ای



شکل ۴. الف) مش بندی زمین و دیوار، ب) زمین، اضافه حفاری، پوشش و گروت پس از ۱۸ گام حفاری
 Fig. 4. a. Ground and wall meshing, b. Ground, overcut, lining, and grout after 18 steps tunneling



شکل ۵. الف) مدل پس از تعادل اولیه در استپ ژئواستاتیکی، ب) کنتور تغییر شکل های قائم در پایان حفاری، ج) تغییر شکل های قائم در پیرامون تونل در پایان حفاری، د) بردار تغییر شکل های دیوار دیافراگمی

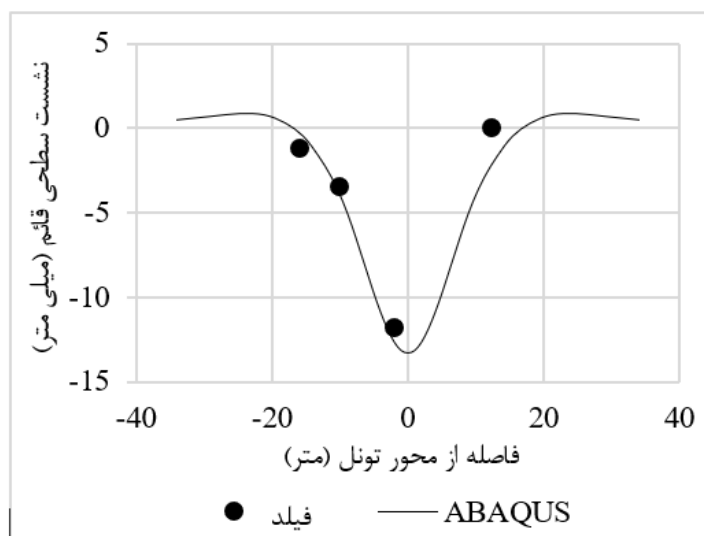
Fig. 5. a. Numerical model after establishing geostatic equilibrium, b. Vertical deformations contour, c. Vertical deformations around the tunnel, d. Vertical deformations vectors around the tunnel, e. Vertical deformations vectors of the wall

جدول ۱۲. جزئیات مقطع کیلومتر ۲+۵۲۶ متروی مادرید [۸]

Table 12. Specifications of the section 2+526

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)	
۱	خاک دستی	۲/۵۰	
۲	ترکیب ماسه و رس	۳/۵۰	
۳	ماسه آهکی	۱۰/۰۰	
۴	ترکیب ماسه و رس	۳۵/۵۲	
عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱۴/۰۰	۹/۳۸	-	۳۴۰/۰۰

مشخصات مکانیکی خاک	γ	E	ν	C'	ϕ'	ψ
	kN/m^3	MPa	-	kPa	$^\circ$	$^\circ$
خاک دستی	۱۸/۰	۱۰	۰/۳۵	۰	۲۸/۰	۵
ماسه آهکی	۲۰/۰	۸۰	۰/۳۰	۴۹	۳۸/۲	۵
ترکیب ماسه و رس	۲۰/۶۵	۱۲۱/۵۰	۰/۲۹	۱۰۸/۵	۳۲/۳۵	۵

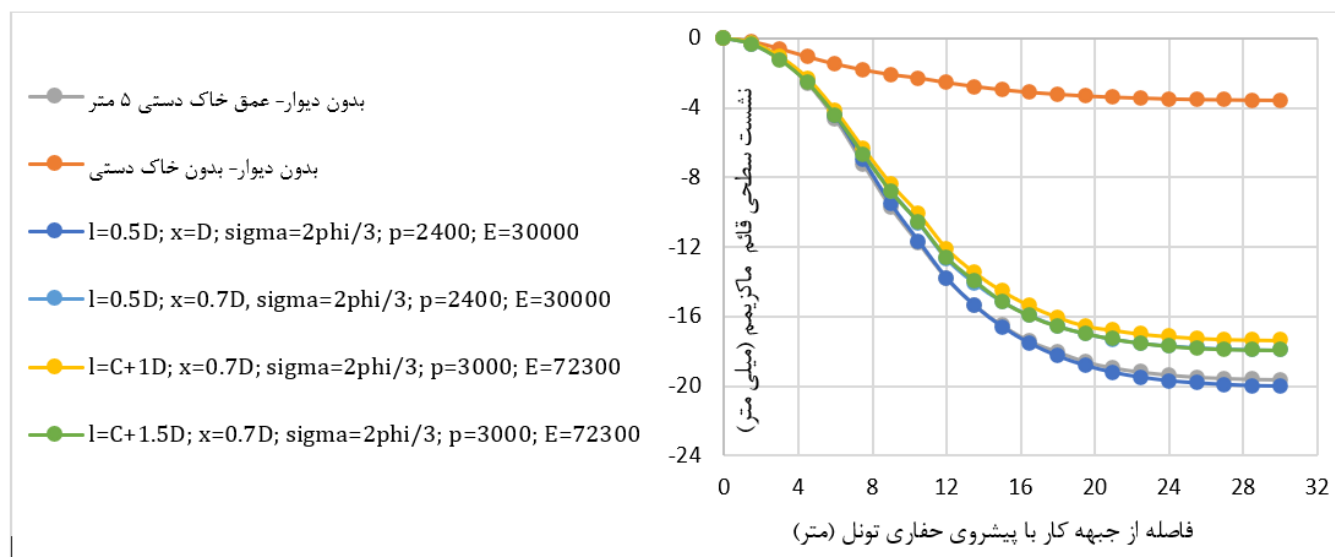


شکل ۶. صحت سنجی مدل سازی ABAQUS در مقطع کیلومتر ۲+۵۲۶ متروی مادرید

Fig. 6. Numerical modeling verification in section 2+526

مطالعه از قید tie برای اندرکنش زمین و اضافه حفاری، اندرکنش اضافه حفاری و سپر، اندرکنش زمین و گروت و اندرکنش گروت و پوشش استفاده شده است. این قید درجات آزادی متناظر را به همدیگر مینماید. همچنین برای اندرکنش زمین با دیوار دیافراگمی از تعریف برخورد سطح به سطح penalty با ضریب اصطکاک مماسی استفاده گردیده است.

در جدول ۱۲ مشخصات زمین و جزئیات تونل مربوط به کیلومتر ۲+۵۲۶ متروی مادرید نمایش داده شده است. این مقطع برای صحت سنجی فرآیند مدلسازی حفاری تونل انتخاب گردیده و نشستهای فیلد در آن به ۱۲ میلیمتر محدود بوده است. چنان که در شکل ۶ واضح است، مدلسازی عددی در ABAQUS تطابق بسیار خوبی با نشستهای فیلد داشته است. در این



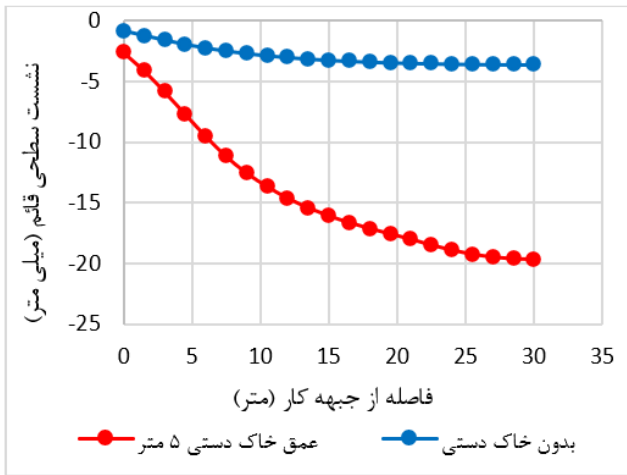
شکل ۷. تکامل نشست سطحی ماکزیمم در بالای تاج تونل همراه با پیش روی حفاری

Fig. 7. Development of maximum surface settlement above the tunnel crown

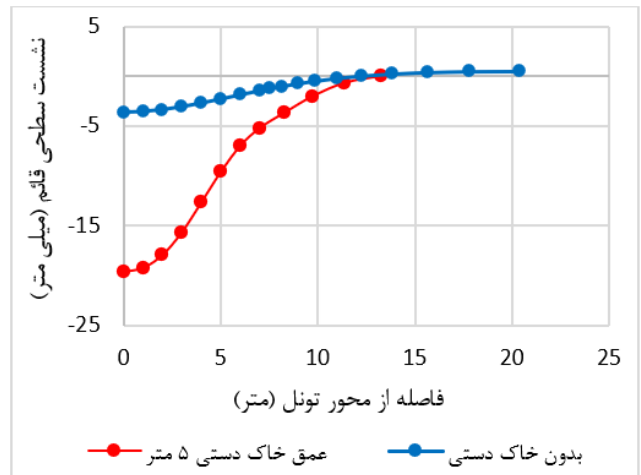
در شکل ۸ تأثیر وجود لایه خاک دستی با عمق ۵ متر بر نشستهای سطحی قائم عرضی، نشستهای سطحی قائم طولی، جابه‌جاییهای سطحی افقی و جابه‌جایی‌های افقی در عمق زمین در فاصله ۵ متر از محور تونل نمایش داده شده است. بر این اساس، وجود لایه خاک دستی با عمق ۵ متر، نشستهای سطحی ناشی از حفاری با TBM را به شدت افزایش داده و نشستهای سطحی قائم عرضی و طولی، جابه‌جاییهای افقی سطحی و جابه‌جاییهای افقی در عمق زمین، همگی با وجود لایه ضخیم خاک دستی افزایش بسیار زیادی پیدا کرده و اختلاف قابل توجهی بین منحنیهای بدون خاک دستی و منحنیهای با وجود خاک دستی ایجاد شده است. نشست سطحی قائم ماکزیمم در بالای محور تونل بدون وجود لایه خاک دستی حدود ۳/۶ میلی‌متر و با وجود لایه خاک دستی حدود ۱۹/۶ میلی‌متر بوده، یعنی تقریباً ۴/۵ برابر افزایش یافته است. وجود لایه ضخیم خاک دستی جابه‌جایی افقی سطحی را با افزایش تقریباً ۸ برابری از ۱/۲۷ میلی‌متر به حدود ۱۰ میلی‌متر رسانده است. همچنین روند نشستهای سطحی طولی در هنگام وجود خاک دستی دیرتر و با شیب بیشتری تکامل یافته و پیشروی حفاری تا فاصله ۲۷ متر از جبهه کار بر مقطع مورد نظر تأثیرگذار بوده است. بنابراین حساسیت به وجود لایه ضخیم خاک دستی و تأثیر شدید آن در گسترش نشستهای سطحی ناشی از حفاری منطقی است

۵- نتایج و بحث

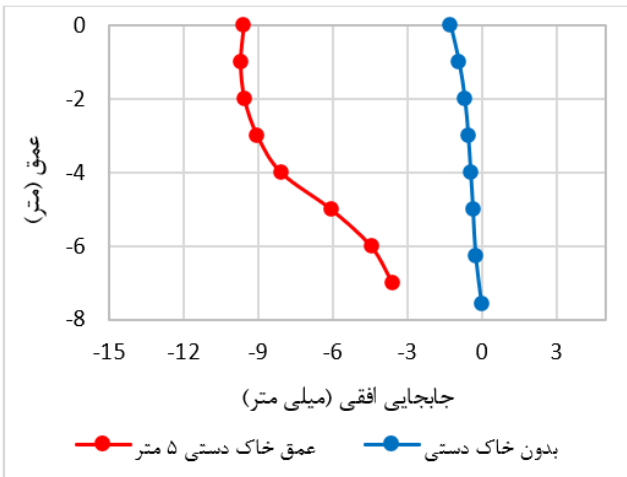
در شکل ۷ روند تکامل نشست سطحی ماکزیمم در بالای تاج تونل برای ۶ نمونه از مدلسازیهای عددی نشان داده شده است. در شکل‌های این بخش I طول نفوذ دیوار، x فاصله دیوار از محور تونل، D قطر تونل، C روباره تونل، sigma زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار، phi زاویه اصطکاک داخلی خاک، p دانسیته خاک بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و E مدول الاستیسیته دیوار بر حسب مگاپاسکال است. بر اساس نتایجی که در شکل ۷ ارائه گردیده است، پیشروی حفاری تونل با TBM در حالتی که خاک دستی وجود ندارد، پس از گذشت حدود ۱۲ گام حفاری (۱۸ متر) دیگر تأثیری در تکامل نشستها در مقطع مورد نظر ندارد. حال آن که وجود خاک دستی با مشخصات مکانیکی ضعیف باعث شده پیشروی حفاری تونل تا حدود ۱۸ گام حفاری (۲۷ متر) بر افزایش نشست سطحی قائم ماکزیمم در بالای محور تونل تأثیر بگذارد. همچنین بیشترین نشستها مربوط به حالتی است که دیوار دیافراگمی وجود نداشته یا دیوار دیافراگمی با مدول الاستیسیته ۳۰۰۰۰ مگاپاسکال در فاصله D از محور تونل بوده و افزایش مدول الاستیسیته و کاهش فاصله دیوار تا تونل به ۰/۷ D نشستها را کمتر کرده اما تأثیر چندانی بر روند تکامل نشستها نداشته است.



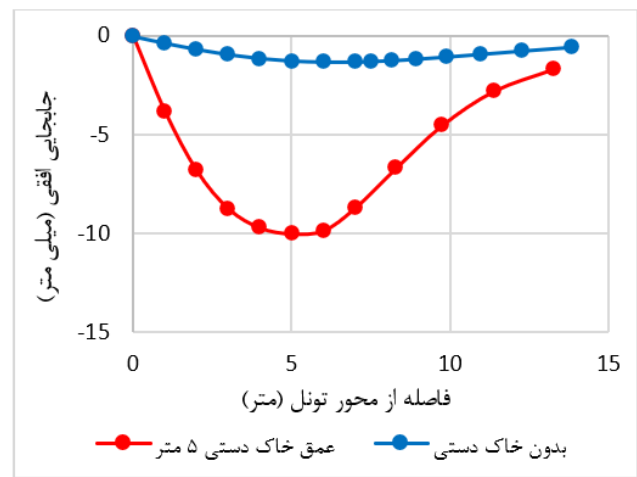
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

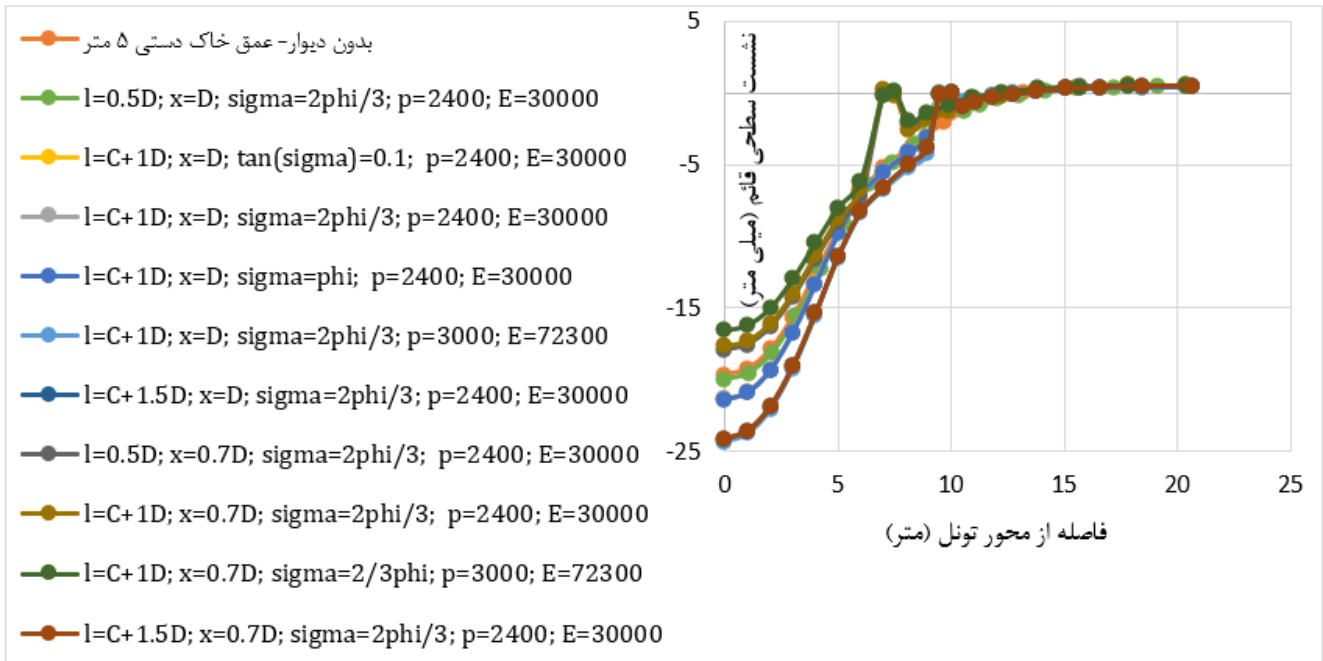
شکل ۸. الف. نشست های سطحی قائم عرضی، ب. نشست های سطحی قائم طولی، ج. جابه جایی های افقی سطحی، د. جابه جایی های افقی در فاصله ۵ متری محور تونل

Fig. 8. a. Transverse surface settlements, b. Longitudinal surface settlements, c. Horizontal surface displacements, d. Horizontal displacements in the distance of 5m from tunnel axis

بر اساس شکل‌های ۹ تا ۱۲ تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار یا به عبارت بهتر زبری دیوار تأثیری بر نتایج نگذاشته و نتایج به دست آمده برای سه حالت مختلف اصطکاک بین دیوار و خاک یعنی $\tan \delta = 0.1$ و $\tan \varphi$ تفاوت جزئی و قابل نظر با یکدیگر داشته است. در بین سایر پارامترهای متغیر، میتوان گفت پارامتر مدول الاستیسیته یا به عبارت بهتر سختی دیوار اهمیت بالایی داشته و در حقیقت عامل تأثیرگذار دیوار در کنترل نشستها همین پارامتر است. یعنی سختی فوق العاده زیاد دیوار مانع گسترش نشستها در ناحیه پشت دیوار می گردد و می تواند محافظ خوبی

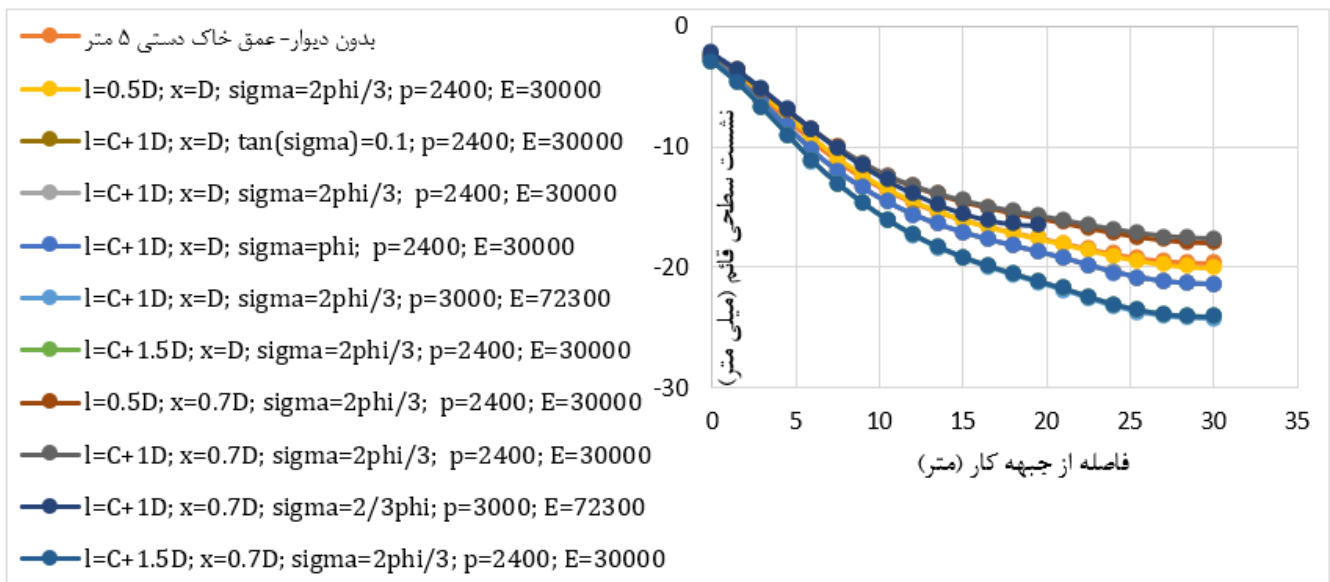
و در صورت عدم کنترل نشستها میتواند خطرآفرین باشد.

در شکل‌های ۹ تا ۱۲ منحنیهای نشستهای سطحی قائم عرضی، نشستهای سطحی قائم طولی، جابه جایی های سطحی افقی و جابه جاییهای افقی در عمق زمین در فاصله ۵ متری از محور تونل برای حالت‌های مختلف دیوار دیافراگمی ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که از ارائه بخشی از نتایج حاصل از مدلسازیها به خاطر محدودیت حجم مطالب و همچنین انطباق منحنیها بر روی یکدیگر، صرفنظر گردیده است.



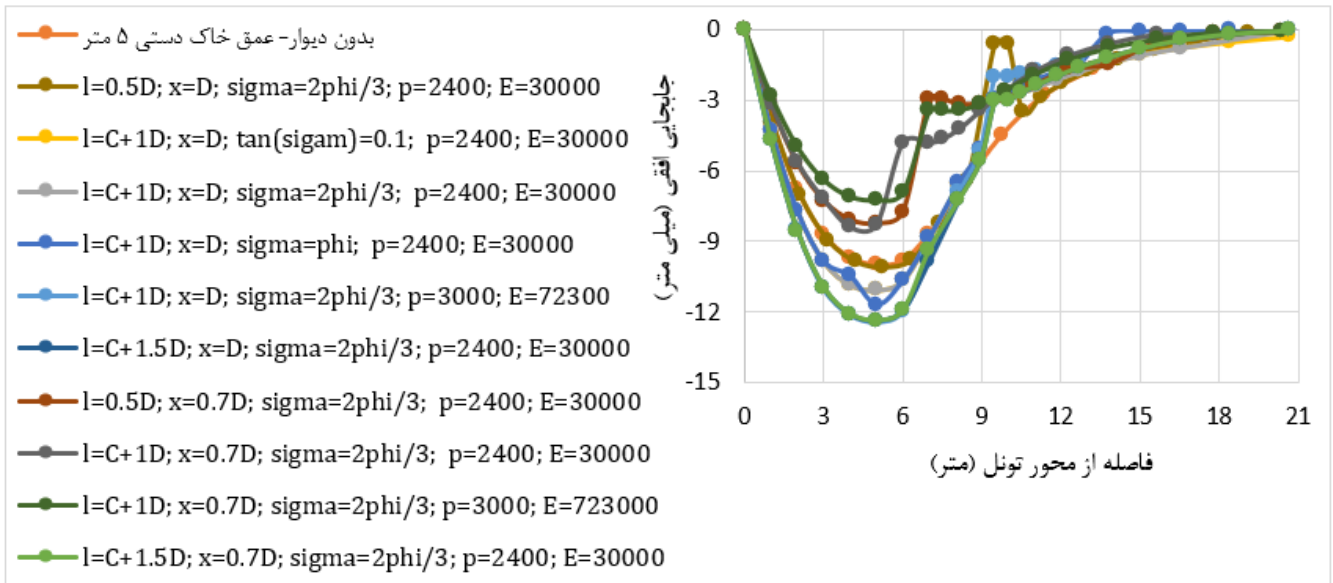
شکل ۹. منحنی های نشست های سطحی قائم عرضی

Fig. 9. Curves of transverse surface settlements



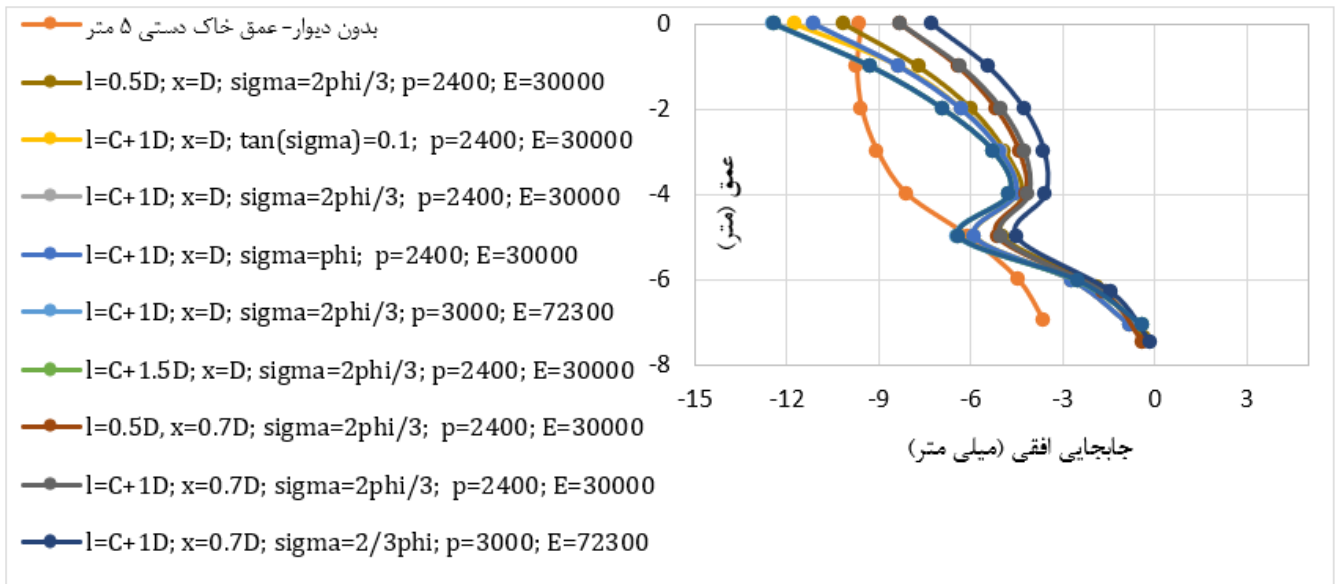
شکل ۱۰. منحنی های نشست های سطحی قائم طولی

Fig. 10. Curves of longitudinal surface settlements



شکل ۱۱. جابه‌جایی‌های سطحی افقی

Fig. 11. Curves of horizontal surface displacements



شکل ۱۲. جابه‌جایی‌های افقی در عمق زمین در فاصله ۵ متر از محور تونل

Fig. 12. Curves of horizontal displacements in the distance of 5m from tunnel axis

نفوذ $C+1D$ نداشته است. از این رو می توان گفت استفاده از طول D 0.5 یا $C+1D$ با توجه به اهمیت کنترل نشستها در بالای تاج تونل و در فواصل چند متری از محور تونل در طرفین گزینه مناسبی برای کنترل نشستهای ناشی از تونلسازی به شمار می آید اما افزایش طول نفوذ فراتر از عمق محور تونل یا همان $C+1D$ تأثیر منفی دیوار را تشدید می نماید.

توجه بیشتر در شکل ۹ نشان می دهد تاثیر پارامتر فاصله دیوار از محور تونل، X ، در کاهش نشستها بیشتر از پارامتر عمق نفوذ دیوار است و دیوارهای با عمق نفوذ D 0.5 و $C+1D$ در فاصله D 0.7 از محور تونل، نشستهای سطحی جلوی دیوار را نسبت به حالت بدون دیوار کاهش داده است. در حالتی که فاصله دیوار از محور تونل برابر D 0.7 و طول نفوذ دیوار برابر $C+1D$ است، نشستهای جلوی دیوار کمترین مقدار خود را دارد. افزایش دانسیته و مدول الاستیسته دیوار در این حالت، نشست سطحی قائم ماکزیمم را از $17/64$ میلیمتر به $16/55$ میلیمتر رسانده که تفاوتی چندانی ایجاد ننموده و مقرون به صرفه به نظر نمی رسد.

بر اساس شکل ۹ اگر نشستهای سطحی قائم را معیار قرار دهیم، بهینه ترین حالت دیوار آن است که در طول نفوذ آن D 0.5 ، فاصله آن از محور تونل D 0.7 یا D ، دانسیته 2400 کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسته 30000 مگاپاسکال باشد. ماکزیمم مقدار ضریب کارایی جدول ۱۳ که با توجه به تاثیر دیوار در کاهش جابه جایی سطحی افقی ارائه گردیده، این نتیجه گیری را تایید می نماید. بر اساس شکل ۱۰ کاهش فاصله دیوار از محور تونل از D به D 0.7 نشستهای سطحی قائم طولی را کاهش داده است.

شکل ۱۱ نشان می دهد در حالتی که عمق نفوذ دیوار دیافراگمی برابر D 0.5 است، کاهش فاصله از آن محور تونل از D به D 0.7 ، منحنی جابه جایی افقی را فشرده تر و کم عمقتر نموده و جابه جایی افقی ماکزیمم را با کاهش $18/22$ ٪ از $10/10$ میلیمتر به $8/26$ میلیمتر رسانده است. در فاصله D 0.7 میان دیوار و محور تونل، افزایش عمق نفوذ دیوار از D 0.5 به $C+1D$ جابه جایی افقی ماکزیمم را به $7/23$ میلیمتر کاهش داده است.

شکل ۱۲ جابه جایی های افقی را در فاصله ۵ متری از محور تونل در عمق زمین نشان میدهد. روند جابه جاییهای افقی در حالتی بدون دیوار و با وجود دیوار با افزایش عمق، کاهشی است. اما حضور دیوار سرعت کاهش جابه جایی ها را به سرعت کاهش می دهد. منحنی های این شکل در سطح زمین اختلاف قابل توجهی با یکدیگر دارند اما با افزایش عمق به یکدیگر

برای سازه های در معرض آسیب باشد. البته وجود دیوار دیافراگمی باعث افزایش نشستها در جلوی دیوار و به ویژه در بالای تاج تونل گردیده است. در حالت عادی بدون وجود دیوار نشستهای سطحی و جابه جایی های زمین از تاج تونل به سمت طرفین (مرزهای مصنوعی در مدل عددی) گسترش مییابد، اما وجود دیوار دیافراگمی با سختی بسیار زیاد از روند گسترش و پخش جابه جاییها ممانعت به عمل آورده و به همین دلیل در فضای نسبتا محدود جلوی دیوار و در بالای محور تونل نشستهای ناشی از حفاری تا حدودی افزایش پیدا میکند. به همین دلیل است که در ادبیات فنی با بحث انتخاب مقدار بهینه برای پارامترهای فاصله دیوار دیافراگمی از محور تونل، طول نفوذ دیوار، دانسیته و سختی دیوار مواجه هستیم.

بر اساس شکل ۹، در هنگامی که طول نفوذ دیوار دیافراگمی برابر D 0.5 است، با کاهش فاصله آن از محور تونل، از D به D 0.7 ، نشست سطحی قائم ماکزیمم $10/34$ ٪ کاهش پیدا یافته و از $20/01$ میلیمتر به $17/94$ میلیمتر رسیده است. در هنگامی که طول نفوذ دیوار برابر D است، افزایش مدول الاستیسته دیوار از 30000 مگاپاسکال به 22300 مگاپاسکال، نشستهای سطحی قائم را در جلوی دیوار تشدید کرده و نشست قائم ماکزیمم با افزایش $11/78$ ٪ از $21/42$ میلیمتر به $24/28$ میلیمتر رسیده است. در این حالت، کاهش فاصله دیوار از محور تونل از D به D 0.7 ، نشستها را به طرز قابل توجهی کاهش داده و نشست سطحی قائم ماکزیمم با کاهش $31/84$ ٪ از $24/28$ میلیمتر به $16/55$ میلیمتر کاهش پیدا کرده است. همچنین کاهش فاصله میان دیوار و تونل تاثیر گذاری متغیر مدول الاستیسته دیوار بر نشستها را کاهش داده است.

شکل ۹ نشان می دهد در حالتی که مدول الاستیسته و دانسیته دیوار یکسان است، افزایش عمق نفوذ دیوار، از D 0.5 به $C+1D$ و $C+1.5D$ با محدود کردن هر چه بیشتر امکان جابه جایی خاک و رشد تغییر شکلها، باعث افزایش نشست قائم ماکزیمم در بالای تاج تونل گردیده است. اما تاثیر مثبت دیوار در جلوگیری از رشد نشستها در پشت دیوار بستگی قابل توجهی به این پارامتر ندارد. طول نفوذ D 0.5 نشستها را در جلوی دیوار و بالای محور تونل کاهش داده است. افزایش طول دیوار به مقدار $C+1D$ تأثیر دیوار در کاهش نشستهای پشت آن را بیشتر نموده اما باعث افزایش نشستهای جلوی دیوار در مقایسه با حالت عدم استفاده از دیوار دیافراگمی گردیده است. استفاده از طول نفوذ $C+1.5D$ نیز افزایش نشستها را در جلوی دیوار تشدید کرده اما تأثیر مثبت بیشتری در کاهش نشستها در مقایسه با طول

جدول ۱۳. ضریب کارایی دیوار دیافراگمی در کاهش جابه‌جایی‌های سطحی افقی

Table 13. Efficiency parameter of the wall in mitigating horizontal displacements

x	l	ضریب اصطکاک	دانسیته (kg/m^3)	مدول یانگ (MPa)	ضریب کارایی جابه‌جایی سطحی افقی
D	0.5D	$\tan \delta$	2400	30000	0.546
D	C+1D	0.1	2400	30000	0.304
D	C+1D	$\tan \delta$	2400	30000	0.301
D	C+1D	$\tan \varphi$	2400	30000	0.362
D	C+1D	$\tan \delta$	3000	72300	0.552
D	C+1.5D	$\tan \delta$	3000	72300	0.503
0.7D	0.5D	$\tan \delta$	2400	30000	0.629
0.7D	C+1D	$\tan \delta$	2400	30000	0.412
0.7D	C+1D	$\tan \delta$	3000	72300	0.564
0.7D	C+1.5D	$\tan \delta$	3000	72300	0.545

ضریب کارایی (۰/۶۲۹ و ۰/۵۶۴) را دارد. در این حالت انتخاب بین طول نفوذ بیشتر یا دانسیته بیشتر دیوار تابع صرفه اقتصادی است.

۶- نتیجه گیری

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد در مطالعاتی که پیش از این در حوزه انجام شده، معمولاً حفاری تونل به صورت گام به گام انجام نگرفته و شرایط خاک و تونل کاملاً فرضی بوده است. حال آن که در این مطالعه حفاری تونل به صورت گام به گام و با رعایت جزئیات TBM صورت گرفته و از شرایط واقعی پروژه متروی مادرید استفاده شده و به حضور لایه عمیق خاک دستی در مسیر مترو توجه گردیده و برای کنترل و کاهش نشست‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از تونلسازی از دیوار دیافراگمی با پارامترهای متغیر مختلف استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد:

- وجود لایه ضخیم خاک دستی باعث افزایش شدید نشست‌های سطحی قائم و جابه‌جایی‌های افقی ناشی از تونلسازی گردیده است.

- وجود دیوار دیافراگمی با ممانعت از گسترش جابه‌جایی‌های زمین باعث کاهش نشست‌ها در پشت دیوار شده است. اما نشست‌های جلوی دیوار بسته به طول نفوذ دیوار و فاصله آن از محور تونل،

نزدیک شده اند و در عمق بیشتر از ۷ متر تقریباً بر روی هم افتاده اند. این امر نشان می‌دهد تغییرات پارامترهای مختلف دیوار در سطح زمین و در عمق کم تاثیر قابل توجهی بر جابه‌جایی‌ها دارد.

برای بررسی میزان تأثیرگذاری المانهای سازه‌ای در کنترل جابه‌جایی‌ها، از ضریب کارایی استفاده می‌گردد. این ضریب به صورت $\frac{U_0 - U_w}{U_0}$ محاسبه می‌شود که در آن U_0 جابه‌جایی اولیه بدون حضور دیوار و U_w جابه‌جایی در پشت دیوار است [۲۱]. همانگونه که در جدول ۱۳ نشان داده شده و در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز پیداست، مدول الاستیسیته دیوار و فاصله آن از محور تونل در کنترل جابه‌جایی‌های افقی ناشی از تونلسازی اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها داشته است. یعنی دیوار با سختی بالاتر و فاصله نزدیک‌تر جابه‌جایی‌ها را بهتر کنترل کرده و کاهش داده است. بر اساس جدول ۱۳ اهمیت فاصله دیوار از محور تونل بیشتر از طول نفوذ آن در زمین است. این نتیجه مهمی است، چرا که ممکن است بدون مدلسازی عددی و تحلیل نتایج چنین به نظر برسد که افزایش طول نفوذ، دانسیته و مدول الاستیسیته دیوار باعث همواره کاهش هر چه بیشتر جابه‌جایی‌ها و کارایی بیشتر باشند. حال آن که بر اساس نتایج مطالعه حاضر میتوان گفت فاصله ۰/۷ D دیوار از محور تونل و طول نفوذ ۰/۵ D یا C+۱D بالاترین

- Engineering. 19(2), 153-165.
- [6] Rezaei Farei, A., Katebi, H., Shirzeshagh, M. 2019. A Numerical Parametric Study on the Effects of Surface Structure on Tunneling Induced Settlements. Transportation Infrastructure Engineering, Semnan University. (in Persian).
- [7] Rezaei, A. H., Shirzeshagh, M. 2020. Determination of Face Pressure in EPB Tunneling Applying Empirical, Analytical and Numerical Methods (Case Study: Tabriz Underground Railway). Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University. 49(4), 21-32. (in Persian).
- [8] Lambrugh, A., Medina Rodriguez, L. Castellanza, R. 2012. Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavation. Computers and Geotechnics. 40, 97-113.
- [9] Rezaei Farei, A. R., Shirzeshagh, M., Katebi, H. 2018. Mechanized Tunneling-Induced Settlements in Urban Environment: the Case Study of Tabriz Underground Railway. Sharif Journal of Civil Engineering. 35(2), 131-140. (in Persian).
- [10] Pourreza, V. 2017. A Numerical Study & Economical Comparison of Mitigating Tunneling-Induced Ground Settlements in Urban Areas Using Piles and Micropiles. MSc Thesis. Tabriz University. (in Persian).
- [11] Moller, S. 2006. Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings. PhD thesis. University of Stuttgart.
- [12] Kasper, T., Meschke, G., 2006. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling. Computers and Geotechnics. 33, 234-247.
- [13] Fargnoli, V., Boldini, D., Amorosi, A. 2015. Twin tunnel excavation in coarse grained soils: Observations and numerical back-predictions under free field conditions and in presence of a surface structure. Tunnelling and Underground Space Technology. 49, 454-469.
- [14] Novozhenin, S.U., Vystrechil, M.G. 2016. New Method of Surface Settlement Prediction for Saint-Petersburg
- کاهش یا افزایش پیدا نموده است.
- در بین پارامترهای مختلف تأثیرگذار، مدول الاستیسیته دیوار و فاصله آن از محور تونل بیشترین تأثیر را در کنترل نشستهای قائم و جابه‌جایی‌های افقی ناشی از حفاری تونل داشته‌اند.
 - بر اساس بررسی منحنیهای نشستهای قائم و جابه‌جاییهای افقی و استفاده از ضریب کارایی برای جابه‌جاییهای افقی سطحی، دیوار با فاصله $0.7D$ از محور تونل و طول نفوذ $0.5D$ یا $C+1D$ بهینه‌ترین حالت دیوار دیافراگمی در مطالعه حاضر است.
 - استفاده از دیوار دیافراگمی بهینه نشست قائم سطحی ماکزیمم را $15/77\%$ و نشست افقی سطحی ماکزیمم را $17/4\%$ کاهش داده است. همچنین ضریب کارایی آن در کنترل نشست سطحی افقی پشت دیوار $629/0$ است.
 - تغییرات پارامتر زبری دیوار یا ضریب اصطکاک بین خاک و دیوار تأثیری در کنترل و کاهش نشستها و جابه‌جایی‌های زمین نداشته است.
- منابع**
- [1] Khalaj Zadeh, M. H., Azadi, M. 2019. The effects of tunnel excavation on the seismic response of ground surface using finite difference method. Amirkabir J. Civil Eng. 51(1), 99-108. (in Persian).
- [2] Nikakhtar, L., Zare, S., Mirzaei Nasirabad, H. 2020. Global Sensitivity Analysis in the Surface Settlement Prediction Caused by Mechanized Tunneling. Amirkabir J. Civil Eng. (in Persian).
- [3] Faraj Mohammadi, M., Behnamfar, F., Mohammadi, S. J. 2020. Effects of Urban Tunnel Excavation in Tehran in Response to Existing Static and Dynamic Structures in Terms of Soil And Structure Interaction. Amirkabir J. Civil Eng. (in Persian).
- [4] Farrokh, F. 2020. Face Pressure Evaluation in Serviceability Limit State. Amirkabir J. Civil Eng. (in Persian).
- [5] Rezaei, A., Shirzeshagh, M., Baghban Golpasand, M. R. 2019. EPB tunneling in cohesionless soils: A study on Tabriz Metro settlements. Geomechanics and

- [24] Tonks, D., Antonopoulos, I. 2015. Construction risks on soft ground. Proceedings of the 12th ANZ Conference on Geomechanics. Wellington, New Zealand.
- [25] Tonks, D., Gallagher, E., Nettleton, I. 2017. Grounds for concern: geotechnical issues from some recent construction cases. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering. 170(4), 157-164.
- [26] Charles, J. A. 2008. The engineering behaviour of fill materials: the use, misuse and disuse of case histories. *Geotechnique*. 58(7), 541-570.
- [27] Giordanelli, D., Levick, T., Pitcher, J. 2016. Foundation Works Risk Assessment: Stafford Western Access Route. Amey Consulting, London. UK.
- [28] Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajjalilue-Bonab, M. Tarifard, A. 2015. Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specification on shield tunnel lining loads (by FEM). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 49,67-78 .
- [29] Loganathan, N. 2011. An Innovative Method for Assessing Tunnelling-Induced Risks to Adjacent Structures. First Printing. Parsons Brinckerhoff Inc. New York, US.
- [30] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. 2008. *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: design methodology and construction control*. Taylor & Francis Group. London, UK.
- [31] Jozefiak, K., Zbiciak, A., Maslakowski, M., Piotrowski, T. 2015. Numerical modelling and bearing capacity analysis of pile foundation. *Procedia Engineering*. 111, 356-363.
- [32] Comodromos, E. M., Papadopoulou, M. C., Konstantinidis, G. K. 2013. Effects from diaphragm wall installation to surrounding soil and adjacent buildings. *Computers and Geotechnics*. 53, 106-121.
- Metro Escalator Tunnels Excavated by EPB TBM. *Procedia Engineering*. 150, 2266 – 2271.
- [15] Kastner, R., Kjekstad, O., Standing, J. 2003. Avoiding damage caused by soil structure interaction: lessons learnt from case histories. Chapter5: Tunnelling-induced ground movements and damage. ICE Virtual Library.
- [16] Cucino, P., Fucco, S., Maniezzo, D. 2010. Study for the Compensation Grouting: The Case of the Underground Railway of Florence. World Telecommunication Congress (WTC).
- [17] Zhang, L., Wu, X., Liu, H. 2016. Strategies to Reduce Ground Settlement from Shallow Tunnel Excavation: A Case Study in China. *J. Constr. Eng. Manage.* 142-155.
- [18] Mariano, D. A., Gens, A., Gesto, J., 2007. Ground deformation and mitigating measures associated with the excavation of new metro line. *Geotechnical Engineering in Urban Environments*. 1901-1906.
- [19] Bilotta, E., Bitetti, B., McNamara, A. M., Taylor, R. N. 2006. Micropiles to reduce ground movements induced by tunneling. *Physical Modeling in Geotechnics*. 1139–1144.
- [20] Bilotta, E., Russo, G., Viggiani, C. 2006. Numerical study of a measure for mitigating ground displacements induced by tunneling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 357–362.
- [21] Bilotta, E. 2008. Use of diaphragm walls to mitigate ground movements induce by tunneling. *Geotechnique*. 58(2), 143–155.
- [22] Fantera, L., Rampello, S., Masini, L. 2016. A mitigation technique to reduce ground settlements induced by tunnelling using diaphragm walls. *Procedia Engineering*. 158, 254-259.
- [23] Hafezi Moghaddas, N., Nicudel, M. R., Ghezi A. 2012. Evaluation of Man-Made Soil Ground Subsidence in West of Mashhad City. 6(1), 1373-1386. (in Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Shirzehghag, M. Oliaei, Numerical Study of using Diaphragm Wall to Mitigate Mechanized Tunneling Induced Settlements, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 5155-5174.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18674.6936



