

## مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اندرکنش تونل‌های TBM دوقلو

سید دانیال غفاریان<sup>۱</sup>، حسین گیتی‌نژاد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

ساخت تونل به روش TBM امروزه گسترش بسیاری یافته است. بخصوص در مناطق شهری، به دلیل حساسیت تغییرشکل‌های سطح زمین نسبت به حفاری‌های انجام گرفته در عمق زمین، استفاده از این روش امروزه بسیار متداول‌تر از روش‌های سنتی است. در ساخت تونل‌های شهری، به منظور ایجاد مسیرهای رفت و برگشت و یا گسترش شبکه راه‌های زیرزمینی، گاهی لازم است تونل‌ها در مجاورت یکدیگر حفر شوند. در بسیاری از مطالعات گذشته در خصوص بررسی اثرات اندرکنشی تونل‌های TBM دوقلو، به تحلیل‌های دوبعدی و ساده‌سازی شده اکتفا شده است. در این نوع تحلیل‌ها روند ساخت تونل‌های TBM به دلیل پیچیدگی‌های اجرایی و ماهیت سه‌بعدی آن، به شکل صحیحی قابل مدلسازی نیست. در مطالعه حاضر، با استفاده از تحلیل سه بعدی اجزاء محدود، به مدل‌سازی ساخت تونل‌های دوقلو TBM در فواصل و اعماق مختلف پرداخته شده است و اثرات اندرکنشی تونل‌ها روی نشست سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اعتبار استفاده از روش برهم‌نهی به منظور برآورد نشست سطح زمین، با داشتن پروفیل نشست در اثر حفر تونل تکی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات در مقاله حاضر نشان می‌دهد که افزایش فاصله تونل‌ها از یکدیگر و کاهش عمق استقرار آن‌ها باعث کاهش اثرات اندرکنشی تونل‌ها روی نشست سطح زمین می‌شود. همچنین استفاده از اصل برهم‌نهی در شرایطی که فاصله تونل‌ها از یکدیگر بیشتر از ۴ برابر قطر آن‌ها و عمق قرارگیری تونل‌ها بیشتر از ۳ برابر قطر آن‌ها باشد، می‌تواند جواب‌های قابل قبولی بدست دهد.

**واژه‌های کلیدی:** تونل TBM، اندرکنش تونل‌های دوقلو، نشست سطح زمین، مدل‌سازی ۳D اجزاء محدود، اصل برهم‌نهی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

## ۱. مقدمه

روش ساخت تونل با استفاده از تکنولوژی TBM امروزه بصورت گسترده در سراسر جهان، بخصوص در سایت‌هایی که دارای لایه‌بندی خاک سست و ضعیف هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، با توجه به جزئیات اجرایی، در تمام مراحل ساخت نیازی به پایدار سازی موقت نمی‌باشد که این موضوع باعث افزایش سرعت، بهره‌وری اقتصادی و افزایش ایمنی در حین ساخت می‌شود. با توجه به اینکه ساخت تونل با استفاده از روش TBM بسیاری از اوقات در مناطق شهری، به منظور ایجاد مسیرهای زیرزمینی انجام می‌شود، مطالعه تغییرشکل‌های ناشی از حفر تونل به این روش، و تاثیری که می‌تواند بر سازه‌ها و تاسیسات مجاور در امتداد مسیر حفر تونل داشته باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های عددی و تجربی زیادی برای تخمین نشست‌های حاصل از حفر تونل در ادبیات فنی موجود است. با این حال گاهی به دلایل مختلف، از جمله طرح مسیر و یا گسترش شبکه راه‌های زیرزمینی، نیاز به استفاده از تونل‌های دوقلو به فواصل مختلف از یکدیگر وجود دارد. با توجه به اینکه مطالعات محدودی در ادبیات فنی در زمینه مطالعه رفتار متقابل تونل‌های حفر شده با استفاده از TBM وجود دارد، و مطالعات موجود نیز عموماً با استفاده از تحلیل‌های ساده‌سازی شده دو بعدی انجام گرفته‌اند، نیاز به انجام مطالعات عددی سه بعدی که مراحل ساخت تونل‌های TBM را به نحو صحیحی شبیه‌سازی می‌کنند و بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی مختلف بر اندرکنش تونل‌های دوقلو حس می‌شود.

Choi et al. (2010) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس، به بررسی اثرات اندرکنشی ساخت تونل‌های جدید در مجاورت تونل‌های قدیمی موجود پرداخت و نتیجه گرفت که افزایش نشست در اثر ساخت تونل‌های جدید در محل تونل قدیمی، با افزایش فاصله تونل‌ها کاهش می‌یابد [۱]. Ercelebi et al. (2010) نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های با قطر ۶/۵ متر و فاصله مرکز به مرکز ۱۴ متر در ایستگاه Kirazli در استانبول را با استفاده از مدل‌سازی عددی، روش‌های نیمه تجربی و روش‌های تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis توانسته است بخوبی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های دوقلو TBM را پیش‌بینی نماید [۲]. Afifpour et al. (2011) با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود به بررسی اثرات اندرکنشی تونل‌های دوقلو TBM و پی زیرگذر زند در شهر شیراز پرداختند. آن‌ها اثر پارامترهای مختلف اجرایی تونل‌های TBM (فشار گل حفاری) را بر نیروهای داخلی اجزاء سازه‌ای زیرگذر مورد بررسی قرار دادند [۳]. Mirhabibi and Soroush (2012) نیز با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود، به بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های دوقلو در خط ۱ مترو شیراز پرداختند. آن‌ها در مطالعات خود اثر سازه‌های روی سطح زمین و سختی آن‌ها را نیز در برآورد نشست سطح زمین مورد بررسی قرار دادند [۴].

در این مقاله با استفاده از تحلیل عددی سه بعدی، به بررسی اندرکنش تونل‌های TBM دوقلو بر روی یکدیگر پرداخته شده است و نتایج بدست آمده از تحلیل‌های سه بعدی، با نتایج بدست آمده از روش برهم‌نهی (Superposition) مقایسه شده است. برای این منظور، یک بار نشست سطح زمین در شرایط Green field در اثر ساخت تونل‌های تکی مورد بررسی قرار گرفته است و سپس تاثیر ساخت تونل مجاور در فواصل و اعماق مختلف، روی پروفیل نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها، به بررسی اعتبار استفاده از اصل برهم‌نهی برای تعیین نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های دوقلو پرداخته شده است.

## ۲. مدل سازی عددی

## ۱.۲. کلیات

روش مورد استفاده برای انجام مطالعات روی اندرکنش تونل های دوقلو TBM در پژوهش حاضر، استفاده از مدل سازی عددی به روش اجزاء محدود می باشد. برای این منظور در مطالعه حاضر، با توجه به ماهیت سه بعدی مساله و پیچیدگی های مساله که شامل حفاری مرحله به مرحله، اعمال فشار گل حفاری و نصب پوشش نهایی می شود [۵]، از تحلیل عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار (Plaxis 3D (2017) [۶] بهره برده شده است. مدل سازی عددی در شرایط زهکشی شده و با فرض رفتار الاستوپلاستیک خاک انجام شده است. برای مدل سازی خاک و پوشش بتنی از المان های چهاروجهی ۱۰ گرهی (درون یابی درجه ۲ تغییرشکل ها) و دارای ۴ نقطه گوسی (درون یابی خطی تنش ها) استفاده شده است. همچنین از المان های صفحه ای Plate به شکل مثلثی و دارای ۶ نقطه گرهی (برای تغییرشکل ها) و سه نقطه گوسی (برای تنش ها)، برای مدل سازی ماشین TBM استفاده شده است.

از المان های interface در سطح مشترک خاک - سگمنت بتنی (پوشش نهایی تونل) و در سطح مشترک خاک - بدنه دستگاه TBM استفاده شده است. ضریب کاهش مقاومت برای هر دو این سطوح مشترک برابر با دو سوم مقاومت برشی خاک اطراف در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور مدل سازی شکل شیپوری دستگاه TBM و لحاظ کردن تغییرشکل های مرتبط با این موضوع، از ضریب contraction که در نرم افزار Plaxis برای همین منظور پیش بینی شده است استفاده می شود. کاربرد این ضریب به این صورت است که مقدار جمع شدگی قطر دستگاه TBM را در راستای طولی آن بصورت درصد کاهش قطر می توان معرفی کرد. این موضوع باعث بوجود آمدن فضای خالی (Gap) بین دستگاه TBM و خاک اطراف و در نتیجه بوجود آمدن تغییرشکل در خاک اطراف می شود که باعث تشابه هرچه بیشتر مدل سازی با واقعیت خواهد شد.

فشار گل حفاری که در جبه حفاری (TBM front) و همچنین در انتهای دستگاه (TBM tail) مابین بدنه TBM و آخرین سگمنت بتنی اجرا شده بصورت شعاعی، به منظور مقابله با فشار خاک اطراف و پایدارسازی آن، به خاک وارد می شود، در مدل های عددی توسط یک بار گسترده معادل سازی شده است. برای این منظور، تغییرات فشار گل حفاری با ارتفاع نیز در نظر گرفته شده است. برای این منظور، وزن مخصوص گل حفاری ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. محل اعمال فشار گل حفاری در شکل ۲ نشان داده شده است.

در شروع مطالعات، برای اطمینان از صحت مدلسازی، ابتدا فرآیند مدل سازی با استفاده از نتایج ابزارگذاری یک پروژه حفر تونل با استفاده از TBM مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است. کلیه مراحل مدل سازی و فرضیات بکار رفته در مدل های آتی که به منظور مطالعه اندرکنش تونل های دوقلو ساخته شده اند، مشابه مراحل و فرضیات بکار رفته در مدل صحت سنجی می باشد.

## ۲.۲. مراحل تحلیل

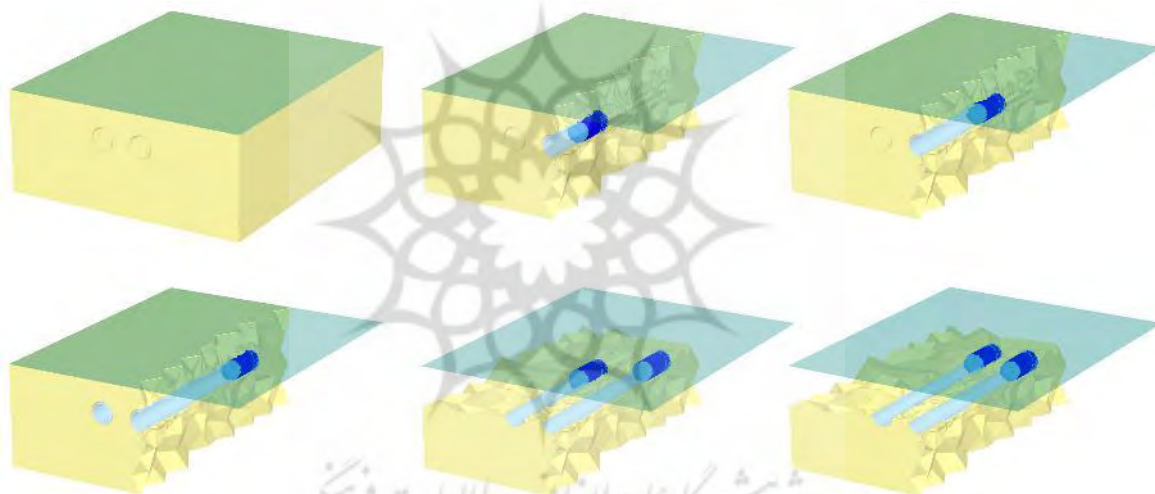
مراحل مدل سازی پیشروی تونل TBM (مورد استفاده در تحلیل های اعتبار سنجی و تحلیل های مورد استفاده در مطالعه حاضر) به شرح زیر است:

- ۱- تعیین تنش های برجای خاک قبل از ساخت خاکریز با فعال بودن تمام المان های خاک.
- ۲- تعیین افزایش تنش ها در داخل خاک بستر در اثر ساخت خاکریز با استفاده از فعال نمودن المان های مربوط به خاکریز.
- ۳- استقرار اولیه دستگاه TBM در ابتدای مدل با حذف المان های خاک در محدوده تونل، فعال نمودن المان های حجمی مربوط به پوشش نهایی بتنی در پشت دستگاه، فعال نمودن المان های Plate مربوط به دستگاه TBM در

محدوده قرارگیری دستگاه، فعال نمودن فشار گل حفاری در جبهه حفاری و همچنین فشار شعاعی گل حفاری در پشت دستگاه (در فاصله مابین دستگاه TBM و آخرین سگمنت بتنی اجرا شده)، حذف فشار آب حفره‌ای از محفظه داخل تونل (فرض آبکشی از داخل تونل حین حفاری)، اعمال ضریب contraction در طول دستگاه به منظور مدل‌سازی شکل شیپوری دستگاه TBM و در نهایت فعال کردن المان‌های interface در محل تماس دستگاه TBM و خاک و همچنین در محل تماس سگمنت‌های بتنی و خاک اطراف.

۴- انجام مرحله فوق بصورت گام به گام به منظور مدل‌سازی پیشروی دستگاه TBM بصورت مرحله به مرحله با طول پیشروی ۲ متر تا رسیدن به نقطه انتهایی.

مشابه چنین روندی برای مدل‌سازی مراحل پیشروی تونل TBM توسط سایر محققین نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۱۰]. در مورد تونل‌های دوقلو مورد مطالعه در پژوهش حاضر، نمی‌توان تنها بخشی از هندسه را مدل‌سازی نمود و لازم است هندسه مقطع تونل بصورت کامل مدل‌سازی شود. شکل ۱ مراحل پیشرفت تونل‌های دوقلو را از ابتدای شروع حفاری تونل سمت راست تا پایان حفاری تونل سمت چپ نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابتدا حفاری تونل سمت راست شروع شده و با به پایان رسیدن حفاری این تونل، حفاری تونل سمت چپ آغاز می‌شود. روند مدل‌سازی پیشروی تونل‌ها در تمام مدل‌ها یکسان و مشابه با مدل بکار رفته برای اعتبارسنجی بوده‌است.

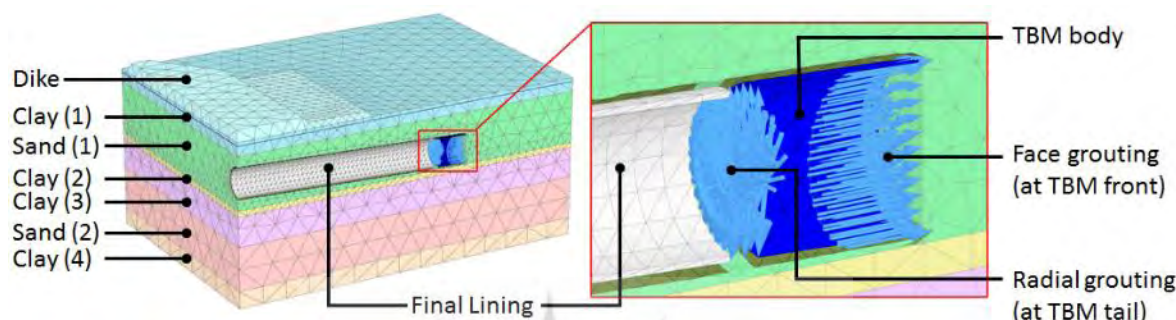


شکل ۱- مراحل پیشروی تونل‌های دوقلو.

### ۳.۲. اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی

به منظور بررسی اعتبار مدل‌سازی عددی در مطالعات حاضر، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های نشست که در حین حفاری تونل Western Scheldt انجام گرفته است، مورد بررسی قرار گرفته است. این تونل یک تونل با عمق کم برای احداث راه در زیر ورودی رودخانه Scheldt در کشور هلند ساخته شده است [۱۱]. لایه‌بندی خاک در محل احداث این تونل، شامل لایه‌های متناوب ماسه‌ای و رسی است. خصوصیات مکانیکی لایه‌های مختلف خاک توسط آزمایش‌های برجا و آزمایش‌گاهی اندازه‌گیری شده‌است. عمق سطح آب زیرزمینی در محل احداث تونل، عمدتاً تحت تاثیر دریای شمالی بوده و در حین حفاری تونل در حدود ۱/۵ متر در زیر سطح زمین قرار گرفته است. مدل‌سازی حفاری تونل در طول ۸۸ متر و قطر ۱۱/۳۳ متر و شیب ۴/۳ درصد انجام گرفته است. با توجه به وجود شرایط تقارن، به مدل‌سازی نصف مقطع تونل بسنده شده‌است. شکل ۲ هندسه تونل و لایه‌بندی خاک در محل مورد نظر را نشان می‌دهد. طول دستگاه TBM مورد استفاده در این پروژه ۱۲ متر بوده است.

پوشش داخلی تونل، از سگمنت‌های بتنی حلقوی پیش‌ساخته با طول ۲ متر تشکیل شده است. برای مدل‌سازی رفتار خاک در حین حفاری در این مدل‌سازی، از مدل رفتاری *Hardening soil model with small strain (HSS)* استفاده شده است. این مدل، یک مدل تعمیم یافته از مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS) [۱۲] است که علاوه بر در نظر گرفتن وابستگی سختی خاک به تنش‌های همه‌جانبه، سختی برشی خاک را بعنوان تابعی از کرنش‌های برشی لحاظ می‌کند. با توجه به اینکه پیشروی تونل کند بوده و از طرفی نفوذ پذیری لایه ماسه‌ای که تونل در آن حفاری شده است (Sand 1) نسبتاً زیاد است، تحلیل اجزاء محدود با استفاده از پارامترهای زهکشی شده خاک انجام گرفته است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای لایه‌های مختلف خاک، در جدول ۱ آمده است.



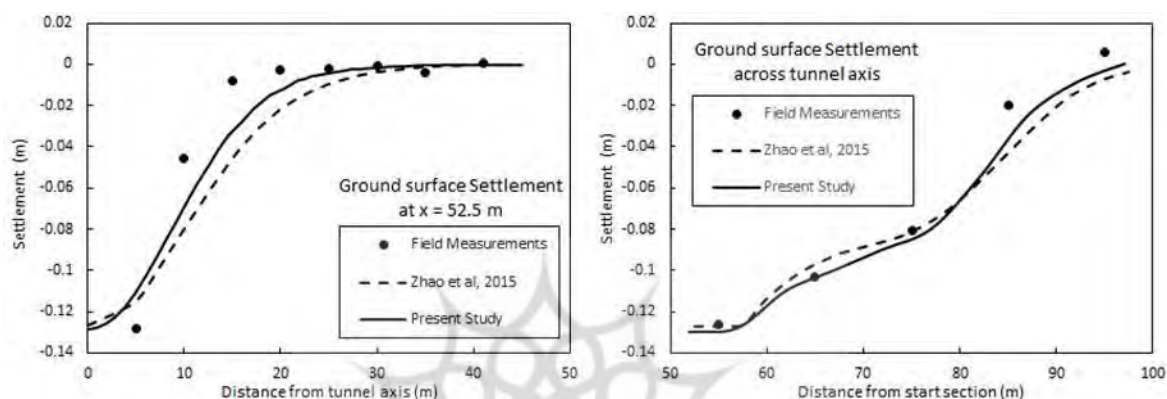
شکل ۲- هندسه مدل عددی تونل Western Scheldt مورد استفاده برای اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی.

جدول ۱- پارامترهای مدل رفتاری مربوط به لایه‌های مختلف خاک در محل تونل Western Scheldt.

Parameter	Soil Layers						
	Dike	Clay 1	Sand 1	Clay 2	Clay 3	Sand 2	Clay 4
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19	18	18	18	17	17	17
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	20	19	21	19.3	20.2	20
$\phi'$ (deg.)	28	22	30	28	28	34	30
$\psi$ (deg.)	0	0	0	0	0	4	0
$c'$ (kPa)	5	5	6.4	20	20	11.4	40
$K_0^{\text{nc}}$ (-)	0.53	0.63	0.50	0.53	0.53	0.40	0.36
$E_{50}^{\text{ref}}$ (MPa)	30	24	35	25	30	30	50
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	30	24	35	25	30	30	50
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	90	60	80	60	100	90	180
$\nu_{\text{ur}}$ (-)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
OCR (-)	1.0	1.0	1.0	2.7	2.8	2.5	3.0
$G_0^{\text{ref}}$ (MPa)	160	150	140	65	100	110	150
$\gamma_{\text{v}}$ (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.015
$p^{\text{ref}}$ (kPa)	100	100	100	100	100	100	100
$m$ (-)	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.5	0.7
$R_f$ (-)	0.90	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

تغییرات نشست سطح زمین بدست آمده از تحلیل، در راستای طولی تونل و در راستای عرضی (در محل مقطع مورد مطالعه که به فاصله ۵۲/۵ متر از شروع مدل قرار گرفته است)، با نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده توسط Zhao et al. (2015) با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۱۱]. شکل ۳ نشست سطح زمین در راستای طولی و عرضی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق نسبتاً مناسبی میان نتایج مدل‌سازی در مطالعه حاضر و مقادیر نشست اندازه‌گیری شده و همچنین مقادیر نشست بدست آمده از مدل‌سازی عددی

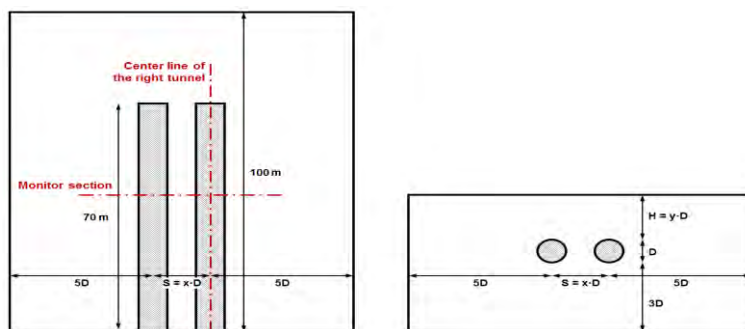
توسط محققین قبل وجود دارد. لازم به ذکر است که مقطع مورد مطالعه که در فاصله ۵۲/۵ متری از ابتدای مدل واقع شده است، به نحوی انتخاب شده است که تاثیرات ناشی از محل اولیه تونل تاثیری در مقادیر نشست در این نقطه نداشته باشد. عبارت دیگر وقتی در شروع حفاری دستگاه در ابتدای مدل قرار گرفته است، نشست در این نقطه تقریباً ناچیز باشد. همچنین تعداد مراحل پیشروی دستگاه پس از مقطع مورد مطالعه بایستی به گونه‌ای باشد که تاثیرات ناشی از پیشروی تونل بعد از این مقطع یکنواخت شده باشد. به این معنا که ادامه روند پیشروی تونل فراتر از مقدار در نظر گرفته شده، تاثیری روی مقادیر نشست در مقطع مورد مطالعه نداشته باشد. با توجه به اینکه صحت مدل سازی عددی با استفاده از مدل فوق، مثبت ارزیابی می‌شود، در مرحله بعد می‌توان با استفاده از فرضیات و روش مدل سازی بکار رفته در فوق، مدل های عددی مورد نیاز برای مطالعات مورد نظر را ایجاد نمود.



شکل ۳ - مقایسه نتایج نشست در راستای طولی (شکل سمت راست) و عرضی تونل (شکل سمت چپ) حاصل از تحلیل های عددی در مطالعه حاضر، با مقادیر اندازه گیری شده حین ساخت تونل و مقادیر بدست آمده از تحلیل های عددی (Zhao et al. (2015) [۱۱].

#### ۴.۲. پیکربندی تحلیل های عددی در مطالعه حاضر

هندسه مدل مورد مطالعه در پژوهش حاضر به شکلی انتخاب شده است که اثرات مرزی روی جواب مدل ها به حداقل برسد. بنابراین لازم است با توجه به قطر تونل ها، فاصله و عمق قرارگیری آنها ابعاد مدل تغییر کند. شکل ۵ ابعاد هندسی مدل را بصورت پارامتریک نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فاصله در نظر گرفته شده از محور هر تونل تا مرزهای جانبی مدل ۵ برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است. همچنین عمق قرارگیری سنگ بستر یا عمقی که تغییر شکل های ناشی از حفر تونل در آن به مقدار ناچیزی می‌رسد در فاصله ۳ برابر قطر پایین تر از کف تونل قرار گرفته است. بعد مدل در جهت محور تونل ها نیز برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

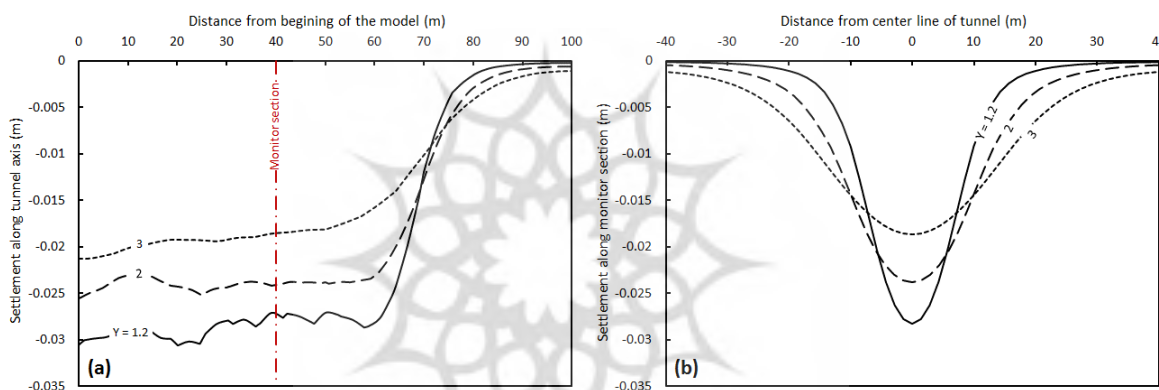


شکل ۴ - هندسه مدل های مورد مطالعه و محل مقاطع مورد استفاده برای مطالعه نشست سطح زمین: پلان (شکل سمت چپ) و نمای جانبی (شکل سمت راست).

## ۳. نتایج تحلیل های عددی

## ۱.۳. تاثیر عمق بر نشست سطح زمین در تونل های تکی

به منظور بررسی اثر عمق تونل ها بر نشست سطح زمین، نسبت عمق به قطر ( $y = H/D$ ) برابر با ۱/۲، ۲ و ۳ در نظر گرفته شده است. شکل ۵ نشست سطح زمین در راستای طولی محور تونل و در راستای عرضی در محل مقطع مورد مطالعه را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش نسبت عمق به قطر تونل، مقدار نشست حداکثر زمین کاهش می یابد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه با افزایش  $y$  حجم بیشتری از خاک در بالای تونل تا سطح زمین، حفاری تونل قرار می گیرد، عرض منحنی زنگوله ای شکل نشست بیشتر می شود؛ بعبارت دیگر، حفاری تونل سطح بیشتری از زمین را تحت تاثیر قرار می دهد. نکته ای که در این شکل قابل توجه است اینست که انتهای محل مقطع مورد مطالعه (monitor section) بگونه ای انجام گرفته است که نشست سطح زمین در محل این مقطع، به اندازه کافی از ابتدای مدل دور باشد تا حتی الامکان مقادیر نشست در این مقطع تحت تاثیر شرایط مرزی مدل نباشد؛ و از طرف دیگر به اندازه کافی از محل استقرار نهایی دستگاه TBM دور باشد که مقدار نشست در این مقطع نشان دهنده نشست نهایی در اثر حفاری برآورد شود.



شکل ۵ - تاثیر عمق تونل بر نشست سطح زمین (a) در راستای طولی تونل و (b) در راستای عرضی در محل مقطع مورد مطالعه.

## ۲.۳. تاثیر عمق و فاصله تونل های دو قلو بر نشست سطح زمین

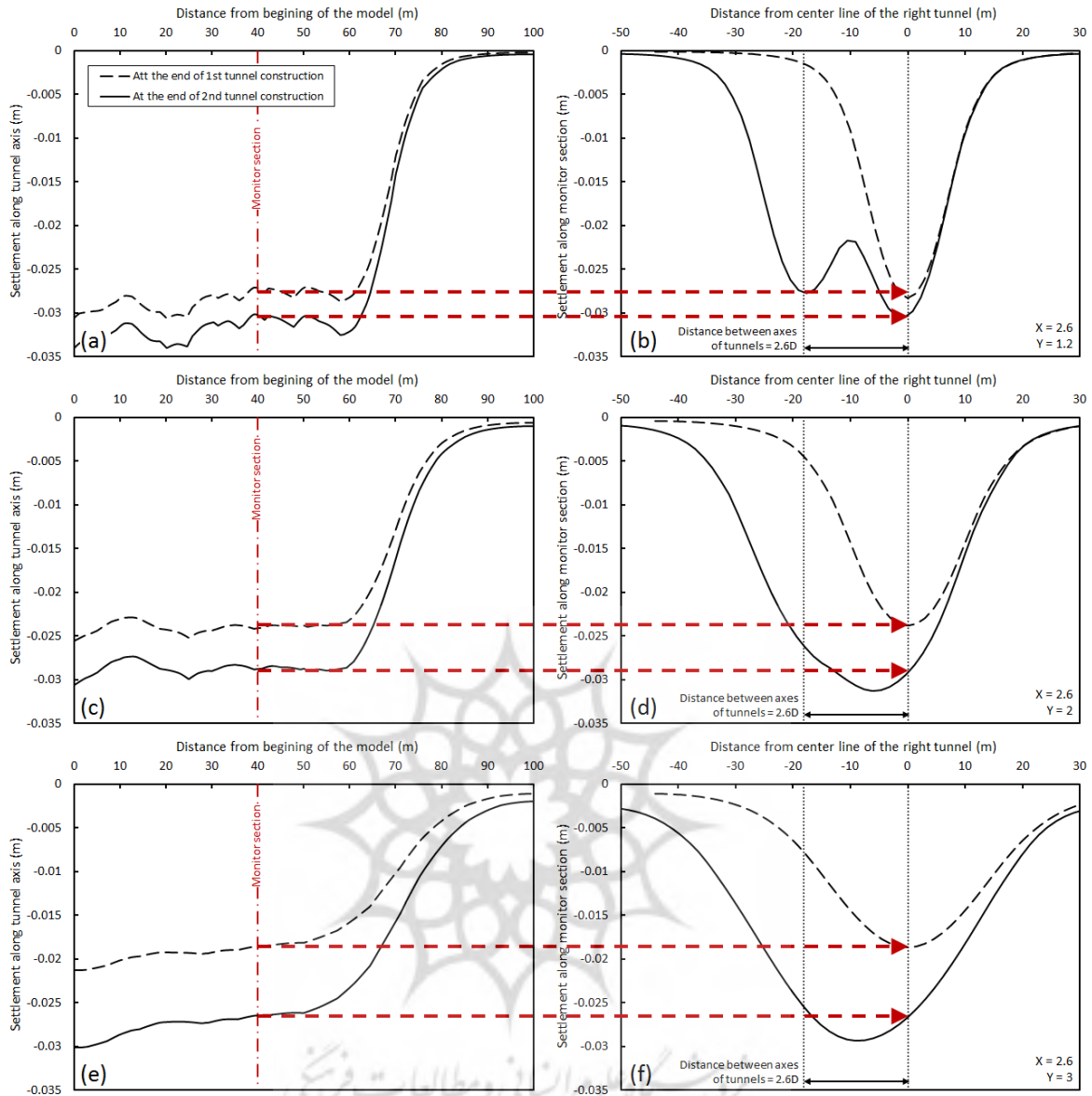
ساخت تونل مجاور، باعث افزایش نشست سطح زمین در فاصله بین دو تونل می شود. بسته به عمق و فاصله قرارگیری دو تونل نسبت به یکدیگر، مقدار نشست نهایی می تواند متفاوت باشد. شکل ۶ تاثیر عمق بر اندرکنش تونل های مجاور و نشست سطح زمین را مورد پروفیل های نشست ارائه شده در شکل ۵ نشان می دهد. در این شکل نسبت فواصل تونل های مجاور به قطر تونل ها ( $x = S/D$ ) برابر با ۲/۶ در نظر گرفته شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، حفاری تونل دوم باعث افزایش مقدار نشست سطح زمین در محل تونل اول (تونل سمت راست) می شود. پروفیل طولی نشست زمین در این شکل در راستای محور تونل اول ترسیم شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، با افزایش عمق تونل ها، اثرات اندرکنشی تونل ها روی نشست سطح زمین افزایش می یابد. بعبارت دیگر افزایش در مقدار نشست سطح زمین در راستای محور تونل اول، با افزایش عمق، افزایش می یابد. همچنین با ملاحظه پروفیل نشست سطح زمین در راستای مقطع مورد مطالعه، مشاهده می شود که در شرایطی که عمق تونل ها کم است، پروفیل نهایی نشست، شبیه به دو پروفیل زنگوله ای تقریباً مجزاست که حداکثر مقدار نشست در محل تونل اول قابل مشاهده است. با افزایش عمق تونل ها، پروفیل عرضی نشست سطح زمین، به سمت یک شکل زنگوله ای واحد پیش می رود و مقدار نشست حداکثر، در وسط فاصله دو تونل خواهد بود. به گونه ای که

منحنی پروفیل نشست عرضی در مورد  $y = 3$  کاملاً به شکل یک منحنی زنگوله‌ای واحد قابل تشخیص است. این موضوع، به نحو دیگری، بیانگر افزایش اثرات اندرکنشی تونل‌ها روی نشست سطح زمین، با افزایش عمق حفاری تونل‌ها می‌باشد.

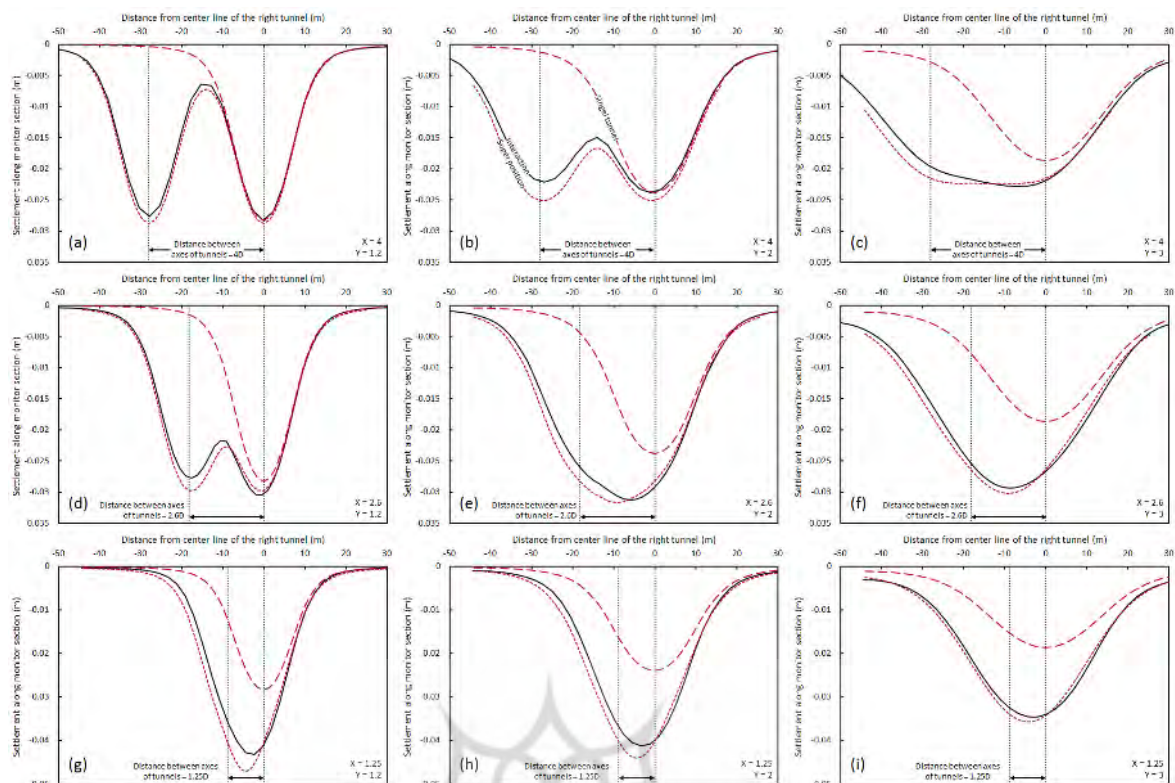
### ۳.۳. بررسی اعتبار اصل برهم‌نهی در تعیین پروفیل نشست تونل‌های دوقلو

با توجه به اصل برهم‌نهی، می‌توان مقدار نشست نهایی را از جمع مقادیر نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل تکی محاسبه نمود. بدین صورت که ابتدا پروفیل نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل منفرد را بدست آورد. سپس با شیفت این پروفیل به اندازه فاصله دو تونل مجاور، مقادیر نشست نهایی را با استفاده از جمع دو پروفیل نشست محاسبه کرد. به منظور بررسی اعتبار اصل برهم‌نهی به منظور تعیین پروفیل نشست عرضی تونل‌های دوقلو، در شکل ۷ پروفیل نشست عرضی تونل‌های TBM دوقلو با مقادیر  $x$  در محدوده  $1/25$  تا  $4$  و مقادیر  $y$  در محدوده  $1/2$  تا  $3$  رسم شده است (خط ممتد سیاه). در این شکل‌ها نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل تکی (خط چین قرمز) و نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های دوقلو با استفاده از اصل برهم‌نهی (نقطه چین قرمز) نیز ترسیم شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در حالتی که فاصله دو تونل از یکدیگر زیاد باشد و عمق قرارگیری تونل‌ها کم باشد (بعنوان مثال  $x = 4$  و  $y = 1.2$ )، تونل‌ها تا حد زیادی مستقل از یکدیگر عمل کرده و اثرات اندرکنشی آن‌ها روی نشست سطح زمین خیلی کم است. در این شرایط، پیش‌بینی نشست سطح زمین با استفاده از اصل برهم‌نهی، تا حد زیادی نتایجی نزدیک به تحلیل سه بعدی کامل به دست می‌دهد. با کاهش فاصله دو تونل از یکدیگر، شدت اثرات اندرکنشی افزایش یافته و خطای بوجود آمده در اثر استفاده از اصل برهم‌نهی برای پیش‌بینی پروفیل نشست نهایی سطح زمین افزایش خواهد یافت. بایستی توجه کرد که استفاده از اصل برهم‌نهی برای پیش‌بینی پروفیل نشست سطح زمین، باعث می‌شود که یک پروفیل متقارن بدست آید و مقدار حداکثر نشست سطح زمین در محل محور هر کدام از تونل‌ها و یا در وسط فاصله بین دو تونل باشد. درحالی‌که در برخی موارد در این شکل (بعنوان مثال در شکل ۷d) مشاهده می‌شود که پروفیل نشست سطح زمین متقارن نبوده و مقدار حداکثر نشست ممکن است در محل محور تونل سمت راست (تونل اول) باشد و یا دقیقاً در وسط فاصله مرکز به مرکز دو تونل مجاور واقع نشود (بعنوان مثال در شکل ۷e). بنابراین به نظر می‌رسد که به منظور برآورد واقع‌بینانه از نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های دوقلو، لازم است که ترتیب حفر تونل‌ها در یک مدل سه بعدی، در نظر گرفته شده و روند ساخت دو تونل مدلسازی شود. با این حال، در صورتی که فواصل دو تونل از یکدیگر بیشتر از  $4$  برابر قطر تونل‌ها باشد و یا عمق قرارگیری تونل‌ها بیشتر از  $3$  برابر قطر تونل‌ها باشد، استفاده از اصل برهم‌نهی برای تعیین پروفیل نشست عرضی سطح زمین، با داشتن پروفیل نشست در اثر حفاری تونل تکی، تقریب مناسبی از نشست نهایی در اثر حفر تونل‌های دوقلو به دست خواهد داد.





شکل ۶- تاثیر عمق تونل های دوقلو بر نشست سطح زمین در راستای طولی (a, c, e) و عرضی (b, d, f) در محل مقطع مورد مطالعه : نشست در اثر حفر تونل سمت راست (خط چین)، نشست نهایی پس از حفر تونل دوم (خط ممتد) - (a, b)  $y = 1.2$  (c, d)  $y = 2$  و (e, f)  $y = 3$



شکل ۷ - تاثیر عمق و فواصل تونل های دوقلو بر نشست سطح زمین در راستای عرضی در محل مقطع مورد مطالعه : نشست در اثر حفر تونل سمت راست (خط چین قرمز)، نشست نهایی پس از حفر تونل دوم (خط سیاه) و نشست بدست آمده با استفاده از برهم نهی (نقطه چین قرمز) - (a)  $x = 4$  و  $y = 1.2$  (b)  $x = 4$  و  $y = 2$  (c)  $x = 4$  و  $y = 3$  (d)  $x = 2.6$  و  $y = 1.2$  (e)  $x = 2.6$  و  $y = 2$  (f)  $x = 2.6$  و  $y = 3$  (g)  $x = 1.25$  و  $y = 1.2$  (h)  $x = 1.25$  و  $y = 2$  (i)  $x = 1.25$  و  $y = 3$

#### ۴. نتیجه گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود سه بعدی روند ساخت تونل های TBM، اثرات اندرکنشی تونل های دوقلو بر نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. در مدل سازی اجزاء محدود انجام شده در مطالعه حاضر، جزئیات اجرایی تونل های TBM بصورت دقیق مدل سازی شده است و پیش روی مرحله به مرحله دستگاه TBM در نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل سازی عددی، نتایج اندازه گیری های انجام شده به منظور تعیین نشست سطح زمین در محل تونل Western Scheldt در کشور هلند در نظر گرفته شده است و نتایج بدست آمده از تحلیل های عددی به روش مورد استفاده در مطالعات حاضر، با نتایج ابزارگذاری میدانی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مطالعات نشان می دهد که مقادیر نشست بدست آمده از تحلیل های عددی تا حد قابل قبولی نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده در سایت است و بنابراین روند مدل سازی در نظر گرفته شده در مطالعات حاضر، می تواند بخوبی مقادیر نشست را برآورد نماید.

در مطالعات حاضر فرض شده است که ابتدا حفاری یکی از خطوط تونل (تونل سمت راست) بصورت کامل انجام شده و سپس حفاری تونل دوم آغاز می شود. نشست سطح زمین در راستای محور طولی تونل اول و در محل مقطع عرضی مورد مطالعه (که فاصله کافی از ابتدای مدل و محل استقرار نهایی دستگاه TBM دارد و مقدار نشست در محل این مقطع بعنوان نشست نهایی سطح زمین در اثر حفاری تونل ها در نظر گرفته می شود)، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می دهد که:

با افزایش عمق استقرار تونل‌های تکی، نشست سطح زمین کاهش می‌یابد ولی محدوده وسیع‌تری از سطح زمین تحت تاثیر حفاری تونل‌ها قرار می‌گیرد.

در تونل‌های دوقلو، افزایش عمق استقرار تونل‌ها باعث افزایش اثرات اندرکنشی تونل‌ها بر نشست سطح زمین می‌شود. همچنین در مورد تونل‌های مستقر در عمق کم‌تر، پروفیل نشست سطح زمین متشکل از دو شکل زنگوله‌ای مجزا است که با افزایش عمق، پروفیل نشست سطح زمین به سمت شکل یک زنگوله‌ای پیش می‌رود.

محل وقوع نشست حداکثر در اثر احداث تونل‌های دوقلو، با افزایش عمق استقرار تونل‌ها، از محل محور تونل اول، به سمت وسط فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها حرکت می‌کند.

اندرکنش تونل‌ها با افزایش فاصله مرکز به مرکز تونل‌های مجاور و کاهش عمق استقرار آن‌ها کاهش می‌یابد.

استفاده از اصل برهم‌نهی برای تعیین نشست سطح زمین در اثر احداث تونل‌های دوقلو، در صورتی که فواصل دو تونل از یکدیگر بیشتر از ۴ برابر قطر تونل‌ها باشد و یا عمق قرارگیری تونل‌ها بیشتر از ۳ برابر قطر تونل‌ها باشد، نتایجی نزدیک به تحلیل‌های سه بعدی کامل به دست می‌دهد. در غیر این صورت استفاده از این روش، ممکن است با تقریب همراه باشد.

## مراجع

- [1] Choi JI, Lee SW. Influence of Existing Tunnel on Mechanical Behavior of New Tunnel. *KSCE J Civ Eng* 2010;14:773–83. doi:10.1007/s12205-010-1013-8.
- [2] Ercelebi SG, Copur H, Ocak I. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environ Earth Sci* 2011;62:357–65. doi:10.1007/s12665-010-0530-6.
- [3] Afifipour M, Sharifzadeh M, Shahriar K, Jamshidi H. Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran. *Tunn Undergr Sp Technol* 2011;26:356–63. doi:10.1016/j.tust.2010.11.006.
- [4] Mirhabibi A, Soroush A. Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements. *Tunn Undergr Sp Technol* 2012;29:40–51. doi:10.1016/j.tust.2011.12.009.
- [5] Pinto F, Whittle AJ. Ground Movements due to Shallow Tunnels in Soft Ground. I: Analytical Solutions. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 2014;140:04013040. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000948.
- [6] Brinkgreve RBJ, Kumarswamy S, Swolfs WM. *Plaxis 3D reference manual anniversary edition version 1*. Plaxis Bv, Delft 2015.
- [7] Zhao C, Alimardani Lavasan A, Barciaga T, Kämper C, Mark P, Schanz T. Prediction of tunnel lining forces and deformations using analytical and numerical solutions. *Tunn Undergr Sp Technol* 2017;64:164–76. doi:10.1016/j.tust.2017.01.015.
- [8] Do NA, Dias D, Oreste P, Djeran-Maigre I. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunn Undergr Sp Technol* 2014;42:40–51. doi:10.1016/j.tust.2014.02.001.
- [9] Miro S, Hartmann D, Schanz T. Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling. *Comput Geotech* 2014;56:80–8. doi:10.1016/j.compgeo.2013.11.003.

- [10] Mollon G, Dias D, Soubra AH. Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. Acta Geotech 2013;8:181–99. doi:10.1007/s11440-012-0182-7.
- [11] Zhao C, Lavasan AA, Barciaga T, Zarev V, Datcheva M, Schanz T. Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations – The Western Scheldt tunnel case. Comput Geotech 2015;69:601–14. doi:10.1016/j.compgeo.2015.07.003.
- [12] Duncan JM, Chang C-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. J Soil Mech Found Div 1970.

