

### شبیه‌سازی سه‌بعدی تاثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل - مطالعه موردی خط ۲ مترو شیراز

مجتبی نعمت الهی<sup>۱\*</sup>؛ حامد ملاداودی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.6313.1327

واژگان کلیدی	چکیده
مدل‌سازی سه‌بعدی با <i>FLAC<sup>3D</sup></i>	به علت نیاز گسترده شبکه حمل‌ونقل شهری، ساخت خطوط ریلی زیرزمینی با روش تونل‌سازی مکانیزه
خط دو مترو شیراز	سپری در کلان‌شهرها رو به افزایش است. ساخت تونل دوقلوی مترو شیراز یکی از نمونه‌های این توسعه
تونل‌سازی مکانیزه سپری	شبکه حمل‌ونقل است. در مقاله حاضر، یک مدل عددی سه‌بعدی برای بررسی رفتار لاینینگ و زمین
شبیه‌سازی لاینینگ سگمندی	دربرگیرنده تونل‌های خط دو مترو شیراز ایجاد شده است. تمامی مراحل حفاری <i>EPB-TBM</i> (دستگاه
مفاصل سگمندی مورب	حفاری تونل با فشار تعادلی زمین) با روش تفاضل محدود شبیه‌سازی شده است. علاوه بر این، یک روش
فاصله طولی بین جبهه کار -	نوین برای مدل‌سازی شکل مخروطی سپر دستگاه پیشنهاد شده است. در بیشتر مدل‌سازی‌های عددی،
تونل‌های دوقلو	مفاصل سگمندی به‌طور موازی با محور تونل فرض می‌شود، علی‌رغم این حقیقت که مفاصل طولی با یک
	زاویه مورب نسبت به تونل قرار دارند. سه الگوی لاینینگ در نظر گرفته شده است: لاینینگ پیوسته، با مفاصل طولی مستقیم و مفاصل مورب.
	نتایج شبیه‌سازی ضرورت استفاده از الگوی مفاصل طولی مورب برای حصول یک ارزیابی دقیق از نیروهای ساختاری در لاینینگ سگمندی را
	نشان داد. در این مقاله، تاثیر فاصله طولی بین جبهه کار تونل دوقلو بر جابجایی زمین دربرگیرنده تونل و نیروهای ساختاری القایی مورد بررسی
	قرار گرفت. در شبیه‌سازی مفاصل سگمندی به‌صورت مستقیم، نیروهای محوری و طولی القایی در مقایسه با مقادیر متناظر در لاینینگ با مفاصل
	مورب کمتر نشان داده می‌شود. با افزایش فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل‌های دوقلو، نشست سطحی زمین کاهش و مقادیر حداکثر نیروهای
	ساختاری القا شده در لاینینگ هر دو تونل افزایش یافته است.

#### ۱- پیشگفتار

مستقیم مفاصل طولی با استفاده از روش‌های عددی سه‌بعدی نموده‌اند ( *lee et al., 2001; Blom, 2002; Ding et al., 2004; Hefny and Chua, 2006; Naggari and Hinchberger, 2008; Do et al., 2013; 2014* ). نتیجه این پژوهش‌ها این بود که مفاصل سگمندی تأثیر قابل توجهی بر جابجایی زمین و نیروهای ساختاری القایی لاینینگ تونل دارد. از سوی دیگر، در حین حفاری مکانیزه تونل دوقلو، فاصله طولی بین جبهه کارهای دو تونل نقش بسزایی بر نشست سطحی تونل، نیروهای ساختاری و تغییر شکل‌های لاینینگ تونل دارد. محققان بسیاری مطالعاتی را به‌منظور بررسی تأثیر حفاری یک تونل جدید بر تونل قدیمی انجام داده‌اند (*Ng et*

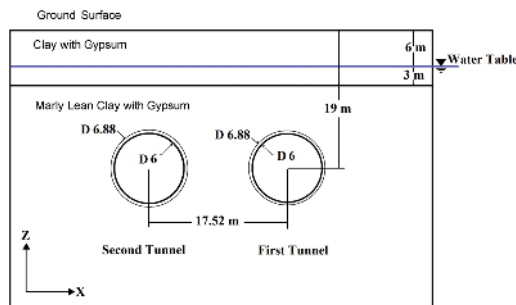
به سبب توسعه سریع کلان‌شهرهای ایران، شبکه حمل‌ونقل شهری گسترده‌ای مورد نیاز است. شیراز، یکی از مهم‌ترین شهرهای ایران، به تونل‌های دوقلوی کم‌عمق بسیاری برای خطوط مترو نیازمند است. بنابراین، پیش‌بینی تأثیر تونل‌سازی مکانیزه بر نشست سطحی از نظر طراحی و ساخت بسیار حائز اهمیت است.

در دهه‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در سراسر جهان به بررسی تأثیر تونل‌سازی مکانیزه سپری بر زمین دربرگیرنده تونل پرداخته‌اند. همچنین، بعضی مؤلفان سعی در مدل‌سازی

\* تهران؛ خیابان انقلاب؛ خیابان حافظ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ شماره تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۲۹۰۸؛ رایانامه:

[moji.nematollahi@aut.ac.ir](mailto:moji.nematollahi@aut.ac.ir)

تونل سمت راست (شکل ۱) ۶ ماه زودتر از تونل دیگر شروع شده است. مسیر تونل در زیر تراز آب قرار گرفته و عمدتاً در خاک رسی مارنی همراه با گچ می‌باشد (Tose-e, 2014).



شکل ۱- مقطع عرضی شماتیک تونل دوقلو خط ۲ مترو شیراز

مقطع عرضی تونل‌ها (در عمق ۱۹ متری از سطح زمین) پیش از ایستگاه عادل آباد برای شبیه‌سازی عددی انتخاب شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، قطر خارجی و داخلی تونل‌های دوقلو به ترتیب ۶ و ۶/۸۸ متر است. ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های خاک دربرگیرنده تونل‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- پارامترهای لایه‌های خاک برای مدل موهر کولمب (Tose-e, 2014) (MC)

مدل MC	رس	رس اشباع	رس مارنی لاغر
مدول یانگ (MPa)	۷۸٫۷۵	۷۱٫۰۶	۱۷۳٫۷۳
ضریب پواسون $\nu$	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵
زاویه اصطکاک داخلی $\phi$ (درجه)	۲۸٫۷	۲۵٫۸	۲۹٫۶
چسبندگی C (kPa)	۰٫۱۱	۰٫۰۵	۰٫۱۷
ضریب فشار زمین $K_0$	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵

لاینینگ سگمندی تونل از سگمنت‌های پیش‌ساخته با بتن پیش‌تنیده با طول ۱٫۴ متر ساخته شده است. هر رینگ دایره‌ای از ۴ سگمنت دوزنقه‌ای، یک سگمنت مقابل کلید و یک کلید با ضخامت ۰٫۳ متر تشکیل شده است. مشخصات

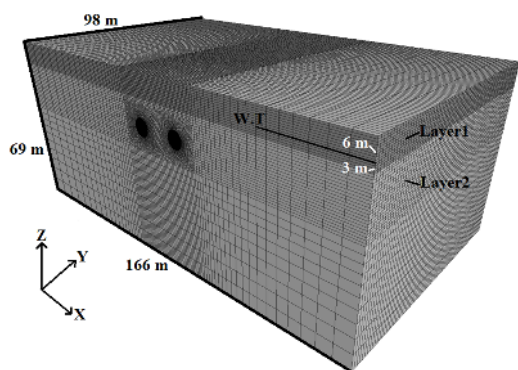
al., 2004; Li et al., 2010; Afifipour et al., 2011; Chakeri et al., 2011; Hasanpour et al., 2012; Do et al., 2014; 2016). این مؤلفان اذعان کردند که فاصله عرضی بین دو تونل تأثیر چشمگیری بر جابجایی زمین و نیروهای ساختاری القایی لاینینگ تونل دارد.

هدف از شبیه‌سازی عددی تونل سازی مکانیزه سپری، در نظر گرفتن تعداد زیادی از فرآیندهای صورت گرفته در حین تونل سازی مکانیزه با TBM است. مهم‌ترین المان‌های تونل سازی مکانیزه که بایستی شبیه‌سازی شوند عبارت‌اند از: شکل مخروطی سپر، فشار سینه کار، فشار دوغاب تزریقی وارد بر سینه کار و لاینینگ در پشت انتهای سپر، سخت شدن دوغاب، نیروی جک‌ها، وزن سپر ماشین و تریلر آن. یک مدل عددی سه‌بعدی ایجاد شده که قادر به شبیه‌سازی حفاری TBM و در نظر گرفتن تمامی المان‌ها و مراحل که اتفاق می‌افتد، می‌باشد.

در پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققان، تأثیر شبیه‌سازی مفاصل سگمندی به صورت مورب مورد توجه قرار نگرفته است. توجه به این امر می‌تواند در پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر مقادیر القایی نیروهای ساختاری و جابجایی‌های ایجاد شده در لاینینگ سگمندی تونل مؤثر باشد. علاوه بر مطالعه انجام شده توسط Do et al 2016 که تمرکز آن بر تأثیر فاصله طولی بین دو سینه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل می‌باشد، تحقیق دیگری در این زمینه صورت نگرفته است و در مطالعات موجود تنها تأثیر فاصله عرضی بین دو تونل بر نشست سطحی و رفتار سازه تونل بررسی شده است. در مقاله حاضر، از روشی ساده برای شبیه‌سازی شکل مخروطی سپر TBM استفاده شده است. همچنین، الگوی مفاصل سگمندی (مستقیم و مورب) نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر بر رفتار لاینینگ تونل و نشست سطح زمین است. علاوه بر این، تحلیل حساسیتی بر فواصل مختلف بین دو جبهه کار در تونل‌های دوقلو انجام شده است.

## ۲- پروژه خط ۲ مترو شیراز

خط ۲ مترو شیراز با طول ۱۵ کیلومتر و ۱۳ ایستگاه، از ایستگاه کلبه سعدی در شمال شهر آغاز و در ایستگاه شکوفه در جنوب شهر به پایان می‌رسد. برای حفاری دو تونل دوقلو از دو دستگاه حفاری EPB-TBM استفاده می‌شود. حفاری



شکل ۲- مدل عددی سه‌بعدی تونل‌های خط ۲ مترو شیراز

### ۲-۳- فرآیندهای شبیه‌سازی تونل‌سازی مکانیزه

به‌منظور شبیه‌سازی تونل‌سازی مکانیزه سپری، بعضی از مهم‌ترین فاکتورها باید در شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شوند. در این مدل، جنبه‌های مربوط به تونل‌سازی سپری با *TBM* مورد توجه قرار گرفته است.

#### ۳-۲-۱- فشار سینه کار

فشار سینه کار *TBM* با استفاده از اعمال یک توزیع دوزنقه‌ای تنش‌های افقی بر سطح جبهه کار شبیه‌سازی شده است (Do et al., 2014; 2015, Kasper and Meschke, 2004; 2006). مقادیر فشار اعمال شده برابر با فشار وارده در بالا، مرکز و پایین صفحه حفار در هر مرحله حفاری در خط ۲ مترو شیراز است. میانگین فشار در بالا، مرکز و پایین در ۷۰ مرحله حفاری به ترتیب برابر با ۰٫۱۲، ۰٫۱۴۴ و ۰٫۱۸ مگا پاسکال است.

#### ۳-۲-۲- سپر مخروطی

در سال‌های اخیر، شکل مخروطی سپر *TBM* به‌صورت یک سپر فرضی که توسط Dias et al., 2000; Mollon et al., 2013; Do et al., 2015-2013 انجام شده، شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، روشی ساده برای شبیه‌سازی شکل مخروطی سپر با المان‌های پوسته‌ای در نرم‌افزار *Flac<sup>3D</sup>* ارائه شده است. در این روش، سپر به سه قسمت مساوی با مدول‌های الاستیک متفاوت تقسیم می‌شود. نمایی از این سپر سه‌تکه در شکل ۳ نشان داده شده است.

ساختاری لاینینگ سگمنتی خط ۲ مترو شیراز در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای لاینینگ خط ۲ مترو شیراز (Tose-e, 2014)

مقدار	پارامتر
۳۱٫۲	مدول یانگ (GPa)
۰٫۲۲	ضریب پواسون
۲۶۴۷	دانسیته لاینینگ بتنی ( $kg/m^3$ )
۰٫۳	ضخامت لاینینگ (m)
۶٫۸۸	قطر خارجی لاینینگ (m)
۱٫۴	طول رینگ لاینینگ (m)

### ۳- شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی

#### ۳-۱- هندسه، شرایط مرزی و اولیه

به‌منظور ایجاد یک مدل عددی سه‌بعدی، ابعاد مدل عددی به‌اندازه‌ای بزرگ انتخاب شده‌اند تا از تأثیر مرزها جلوگیری شود. حداقل ابعاد مدل بر اساس قوانین زیر انتخاب شده است (Medina Rodriguez, 2000):

- $(H+4D)$ ، برای ارتفاع مدل
- $(H+3D)$ ، برای طول مدل
- $(3H)$ ، برای نصف عرض مدل

$H$  عمق تونل و  $D$  قطر تونل است.

مدل کاملاً سه‌بعدی تونل‌های دوقلوی خط ۲ مترو شیراز با نرم‌افزار *Flac<sup>3D</sup>* ایجاد شده که ابعاد آن در شکل ۲ نشان داده شده است. نمایی از این مدل در شکل ۲ نشان داده شده که از ۹۱۲۱۰۰ گره و ۹۰۷۲۰۰ زون تشکیل شده است.

تمامی گره‌ها در اطراف مدل در جهت نرمال و گره‌های واقع در کف مدل ( $Z=-50$ ) در راستای قائم تثبیت شده‌اند. به‌منظور افزایش دقت و سرعت در محاسبات، دانسیته مش بندی با دور شدن از دیواره تونل، افزایش یافته است. تمامی محاسبات در شرایط زهکشی شده انجام شده است.

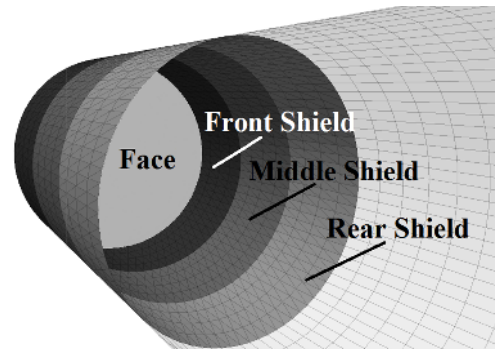
شبیه‌سازی سه‌بعدی تاثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل، ... : ص ۸۲-۹۵

آخرین رینگ نصب‌شده توسط جک‌های تراست برای هل دادن دستگاه به سمت جلو اعمال می‌شوند.

این نیرو در تحقیقات پیشین با استفاده از اعمال نیروهای متمرکز به گره‌های قرار گرفته در لبه رینگ نصب‌شده شبیه‌سازی شده است. به‌علاوه، توزیع نیروی جک‌ها به‌طور خطی از بالا تا پایین تونل افزایش می‌یابد ( JSCE, 1996; Maidl et al., 1996; Takano, 2000; Do et al., 2014; Do et al., 2015). در این مقاله، نیروی جک‌های هیدرولیکی با اعمال توزیع نیروی افقی به گره‌های انتهایی رینگ تازه نصب‌شده شبیه‌سازی شده است. میانگین نیروی جک‌ها بر اساس داده‌های مانیتورینگ دستگاه حفاری خط ۲ مترو شیراز برابر ۷/۱ مگا پاسکال تعیین شد. شمای نیروی جک‌های هیدرولیکی وارد بر رینگ نصب‌شده در شکل ۴a نشان داده شده است.

### ۳-۲-۴- تزریق دوغاب

تزریق دوغاب در پشت انتهایی سپر با روش بسیار ساده‌ای با اعمال توزیع فشار مرزی در زمان تزریق شبیه‌سازی شده است ( Do et al., 2014; Melis and Medina Rodriguez, 2002; Mollon, 2010; Mollon et al., 2013). برای سادگی کار، توزیع فشار تزریق در انتهای سپر به‌طور خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا تأثیر دانسیته دوغاب نیز در نظر گرفته شود. به‌علاوه، لایه بسیار نازکی بین لاینینگ و خاک با المان‌های زون ایجاد شد تا اندرکنش بین دوغاب-لاینینگ و دوغاب-خاک از آغاز تزریق دوغاب در نظر گرفته شود. در این مدل، بر اساس داده‌های مانیتورینگ دستگاه، میانگین فشار تزریق دوغاب برابر با ۲۳۸ کیلو پاسکال در کف و بالای مدل تعیین شده است. فشار دوغاب تازه اعمال شده بر تونل و لاینینگ در شکل ۴a نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمای سه‌بعدی از سپر مخروطی

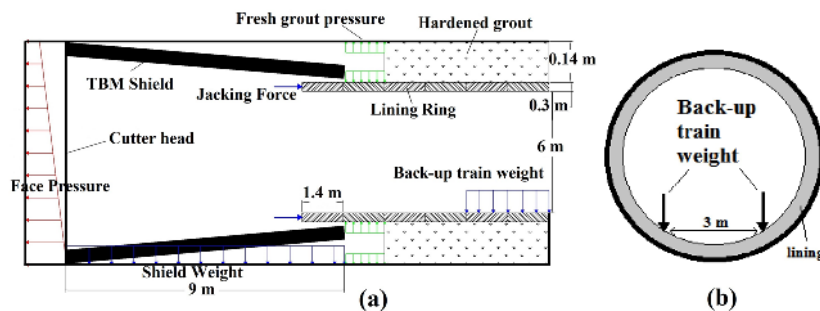
در نتیجه، خاک اطراف سپر انتهایی می‌تواند بیشتر از زمین اطراف سپر جلویی به داخل تونل حرکت کند. مدول یانگ بخش جلویی برابر با ۲۰۰ گیگا پاسکال تعیین شده، اما مدول الاستیک بخش میانی و انتهایی سپر بر مبنای تحلیل حساسیت انجام‌شده (مدول یانگ کمتر از سپر جلویی) مشخص شده است. در این مدل، مدول یانگ بخش میانی و عقبی سپر به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲ گیگا پاسکال تعیین شده است (جدول ۳).

جدول ۳- پارامترهای مکانیکی سپر مدل‌سازی شده خط ۲

پارامتر	مترو شیراز		
	سپر جلویی	سپر میانی	سپر عقبی
مدول الاستیک (GPa)	۲۰۰	۲۰	۲
ضریب پواسون	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۵
ضخامت سپر (m)	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱

### ۳-۲-۳- جک‌های هیدرولیکی

نیروی جک‌های هیدرولیکی، بارهای خارجی هستند که بر



شکل ۴- مدل عددی سه‌بعدی تونل‌های خط ۲ مترو شیراز

### ۳-۲-۵- سخت شدن دوغاب

به‌طور کلی، برای مدل‌سازی سخت شدن دوغاب از مدل خطی الاستیک استفاده می‌شود (Mollon, 2010; Mollon et al., 2013; Phienweij et al., 2006; Dias and Kastner, 2012). لامبرگی و همکارانش (Lambrugh et al., 2012) قوانینی را تدوین نمودند که افزایش تدریجی مدول یانگ دوغاب را در طی زمان تشریح می‌کند.

در این مطالعه، پس از هر مرحله پیوسته حفاری و نصب لاینینگ، خواص دوغاب تازه به مشخصات فیزیکی دوغاب سخت شده ارتقا داده می‌شود (یعنی  $E_{cg}=17.73 \text{ MPa}$  و  $\nu_{cg}=0.22$  که به ترتیب مدول الاستیک و ضریب پواسون دوغاب سخت شده می‌باشد). دوغاب سخت شده در این مدل عددی در شکل ۴a نشان داده شده است.

### ۳-۲-۶- وزن سپر و تریلر دستگاه

وزن سپر از طریق اعمال نیروهای قائم که بر کف تونل با طول برابر با طول سپر در یک قطاع ۹۰ درجه از کف تونل وارد می‌شود (Do et al., 2014; Hasanpour, 2014) در این مدل عددی، طول سپر ۹ متر و وزن آن ۳۸۴۶ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. توزیع وزن سپر وارد شده بر کف تونل در شکل ۴a نمایش داده شده است.

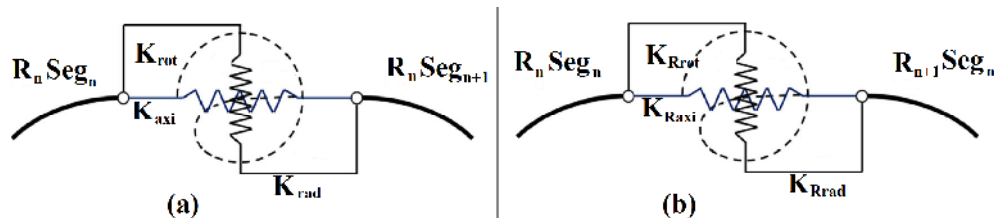
درحالی‌که تریلر دستگاه به داخل تونل وارد می‌شود، بار اضافی بر قسمت کف لاینینگ تونل اعمال می‌شود. دو و همکارانش (Do et al., 2014) تأثیر وزن تریلر را با اعمال نیروهای قائم با توزیع قطاع ۹۰ درجه در قسمت کف لاینینگ در طول تریلر شبیه‌سازی نموده‌اند. اگرچه، در این مقاله، وزن تریلر TBM با اعمال نیروهای قائم رو به پایین بر دو خط موازی با فاصله عرضی ۳ متر در کف لاینینگ تونل شبیه‌سازی شده است (شکل ۴b).

### ۳-۳- لاینینگ سگمنتی

در مدل تونل‌سازی مکانیزه EPB-TBM، لاینینگ سگمنتی و مفاصل بین آن اهمیت بسزایی دارند. دو و همکارانش (Do et al., 2013) از المان ساختاری با نام لاینر جاسازی شده برای مدل‌سازی سگمنت‌ها و مفاصل استفاده کرده‌اند. المان لاینر جاسازی‌شده برای هر گره، دو اتصال را فراهم می‌کند که می‌توان از آن برای اتصال گره-گره و گره-زون به ترتیب برای شبیه‌سازی اندرکنش سگمنت-سگمنت و دوغاب-سگمنت استفاده کرد. در این مقاله نیز از المان‌های لاینر جاسازی‌شده استفاده شده است. تأثیر اندرکنش دوغاب-لاینینگ با استفاده از سختی فنر نرمال ( $Kn$ ) و سختی فنر برشی ( $Ks$ ) در نظر گرفته شده است. مقادیر  $Kn$  و  $Ks$  را می‌توان با قانون سرانگشتی محاسبه کرد که این مقادیر را برابر با صد برابر سختی زون مجاور فرض می‌کند (Itasca, 2012). سختی ظاهری زون مجاور در جهت نرمال را می‌توان از حداکثر مقدار رابطه  $\left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{min}} \right]$  به دست آورد که  $K$  و  $G$  به ترتیب مدول بالک و مدول برشی هستند.  $\Delta Z_{min}$  نیز کوچک‌ترین بعد نرمال زون مجاور است.

### ۳-۳-۱- مدل‌سازی مفاصل طولی و محیطی

همان‌طور که تشریح شد، مفاصل سگمنتی را می‌توان با اتصال گره به گره با شش درجه آزادی که با شش فنر نشان داده می‌شود، شبیه‌سازی کرد. برای هر فنر می‌توان یکی از چهار شرایط زیر را اختصاص داد: (۱) آزاد، (۲) صلب، (۳) خطی و (۴) دوخطی. در این مدل، سفتی مفاصل سگمنتی با سه فنر شامل فنر محوری ( $K_{axi}$ )، فنر شعاعی ( $K_{rad}$ ) و فنر چرخشی ( $K_{rot}$ ) مشخص شده است (شکل ۵a).



شکل ۵- فنرهای مفاصل؛ (a) مفاصل سگمنتی، (b) مفاصل محیطی

شبیه‌سازی سه‌بعدی تاثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل، ... : ص ۸۲-۹۵



شکل ۶- الگوی لاینینگ؛ (a) پیوسته، (b) مفاصل مستقیم، (c) مفاصل مورب

مفاصل محیطی همانند مفاصل طولی با استفاده از اتصال گره-گره با سه فنر (فنر محوری  $(K_{Raxi})$ ، فنر شعاعی  $(K_{Rrad})$  و فنر چرخشی  $(K_{Rrot})$ ) با ضرایب سفتی برابر با مفاصل سگمندی در شکل ۶b شبیه‌سازی شده‌اند. پارامترهای مفاصل سگمندی و محیطی در جدول ۴ خلاصه شده‌اند.

### ۳-۴- سناریوهای حفاری تونل دوقلو

مترو شیراز از دو تونل دوقلو تشکیل شده است. به منظور بررسی تأثیر فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل‌ها بر جابجایی زمین دربرگیرنده تونل و بر نیروهای داخلی لاینینگ، سناریوهای حفاری زیر در نظر گرفته شده‌اند:

(۱)  $L_D=0$ ، هر دو تونل در یک مقطع عرضی یکسان حفاری می‌شود؛

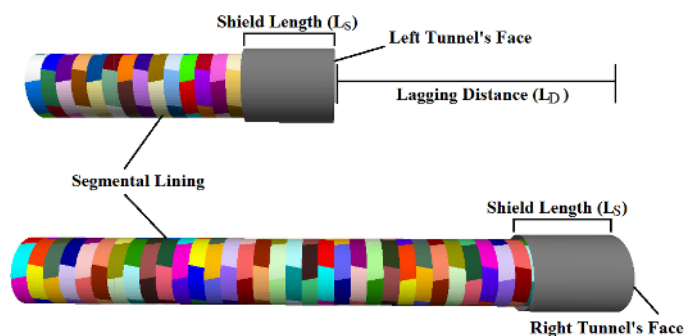
(۲)  $L_D>0$ ، تونل سمت راست با فاصله طولی معین ( $L_D$ ) از جبهه کار تونل سمت چپ حفاری می‌شود.

در سناریوی دوم ( $L_D>0$ )، فاصله طولی ( $L_D$ ) می‌تواند برابر با  $1L_S$ ،  $3L_S$ ،  $5L_S$  و  $8L_S$  باشد که  $L_S$  برابر با طول سپر است. در مترو شیراز، حفاری تونل سمت چپ شش ماه پس از تونل سمت راست آغاز شد که نماینده وضعیت  $8L_S$  می‌باشد. نمای شماتیک فاصله طولی بین دو تونل دوقلو در شکل ۷ نشان داده شده است.

کاوالارو و آگادو (*Cavalaro and Aguado, 2011*) بدین نتیجه رسیدند که رفتار فنر محوری تقریباً خطی است، بنابراین می‌توان با یک ضریب ثابت نشان داد. درحالی‌که سفتی شعاعی و چرخشی دارای شرایط اتصال دوخطی هستند که با پارامترهای مدول سفتی و حد تسلیم مشخص می‌شوند. به سبب تماس مستقیم سگمندی‌های بتنی در مفاصل سگمندی بدون پکر، رفتار خطی برای فنر شعاعی در نظر گرفته شده است. شرایط اتصال فنرهای دیگر صلب فرض شده است. سفتی فنر بکار رفته در شبیه‌سازی بر مبنای روش ساده معرفی شده توسط تینت و پالسفرت (*Thienert and Pulsfort, 2011*) و دو و همکاران (*Do et al., 2013*) محاسبه شده است (جدول ۴). اگرچه مفاصل سگمندی در تحقیقات پیشین شبیه‌سازی شده است (*Ding et al., 2016-2013; Do et al., 2004*)، برای سادگی، مفاصل طولی را موازی با محور تونل فرض کرده‌اند. اگرچه، در این حقیقت، مفاصل سگمندی به صورت مورب هستند. در این مطالعه، سه نوع الگوی لاینینگ شامل لاینینگ پیوسته، با مفاصل مستقیم و با مفاصل مورب مدل‌سازی شده است. نمای سه‌بعدی این سه نوع الگوی لاینینگ مدل شده در شکل ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای مفاصل لاینینگ

مقدار	پارامتر
۵۵۰	سفتی محوری $K_{axi}$ (MN/m)
۳۹۶۰	سفتی شعاعی $K_{rad}$ (MN/m)
۸۳	سفتی چرخشی $K_{rot}$ (MNm/rad/m)
۱۱۵	حداکثر ممان خمشی در مفصل سگمندی $Myield$ (KN.m/m)



شکل ۷- نمای سه‌بعدی فاصله طولی بین تونل دوقلو

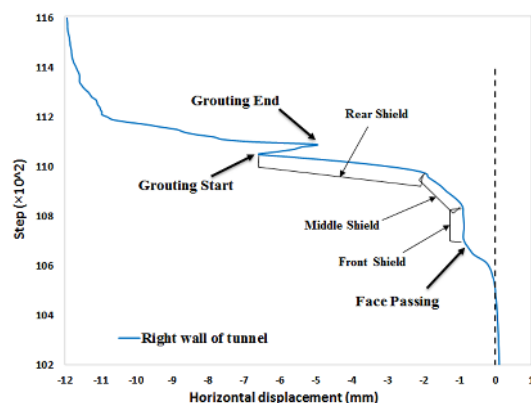
#### ۴- نتایج عددی و بحث

برای بررسی قابلیت مدل عددی ایجادشده، مقایسه‌ای با داده‌های مانیتورینگ نشان داده خواهد شد. سپس تأثیر الگوی مفاصل و فاصله طولی بین جبهه کار دو تونل ( $L/D$ ) مورد بحث قرار خواهد گرفت.

#### ۴-۱- تأثیر روش ساده‌شده برای شکل مخروطی

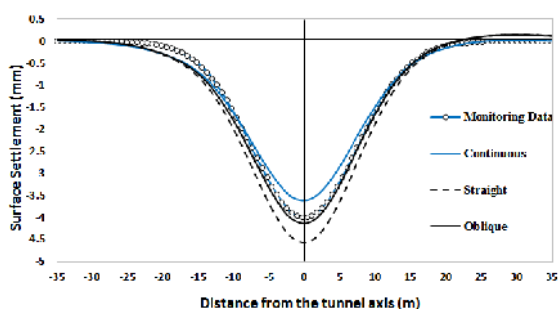
##### سپر

به منظور ارزیابی دقت روش ساده‌شده پیشنهادی برای مدل‌سازی شکل مخروطی سپر  $EPB-TBM$ ، جابجایی‌های افقی یک نقطه مانیتورینگ که در خط مرکزی دیواره سمت راست تونل (رینگ شماره ۳۵) مورد بررسی قرار گرفته است. جابجایی افقی زمین دربرگیرنده در فازهای مختلف حفاری مکانیزه در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸- جابجایی افقی در فازهای مختلف حفاری مکانیزه تونل

مفاصل مستقیم و مورب که در شکل ۶ نمایش داده شده است. هدف از این بخش، تأکید بر تأثیر چشمگیر مفاصل سگمندی مورب بر رفتار لاینینگ سگمندی در مقایسه با مفاصل مستقیم که معمولاً در شبیه‌سازی‌های عددی فرض می‌شود، است. تمامی نتایج نشان داده شده در این بخش مربوط به رینگ شماره ۳۵ در حین نصب رینگ شماره ۵۰ در مدل عددی است. شکل ۹ نشان‌دهنده نشست سطح زمین در بالای تونل مدل شده با استفاده از انواع مختلف لاینینگ است. بر مبنای شکل ۹، حداکثر و حداقل نشست اتفاق افتاده به ترتیب مربوط به تونل‌های با مفاصل سگمندی مستقیم و لاینینگ پیوسته است. این پدیده را می‌توان ناشی از صلبیت بالای لاینینگ پیوسته و صلبیت پایین لاینینگ با مفاصل مستقیم دانست. روند کلی نشست سطحی زمین شبیه‌سازی شده با مفاصل مورب بسیار نزدیک‌تر به داده‌های مانیتورینگ نشست سطحی خط ۲ مترو شیراز است.



شکل ۹- نشست سطح زمین در انواع مختلف الگوهای لاینینگ

شکل ۱۰ تغییرات جابجایی طولی ناشی از رینگ مرجع (رینگ ۳۵) برای انواع لاینینگ را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مفاصل محیطی بین دو رینگ پی‌درپی باعث کاهش انتقال بار و جابجایی لاینینگ می‌شود (*Do et al., 2014*). همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، جابجایی‌های طولی القایی در لاینینگ پیوسته بالاتر از مقادیر مشابه برای انواع دیگر لاینینگ سگمندی است. علاوه بر این، الگوی مفاصل مورب باعث ایجاد جابجایی‌های طولی بیشتری نسبت به نوع مفاصل مستقیم می‌شود. موقعیت مفاصل سگمندی بر روی شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ مشخص شده است.

با توجه به شکل ۸، جابجایی افقی تدریجی خاک دربرگیرنده به سمت تونل را می‌توان از ابتدای رسیدن جبهه کار به نقطه مانیتورینگ تا انتهای سپر دید که در نتیجه شکل مخروطی سپر است. شکل ۸ توانایی روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی عددی شکل مخروطی سپر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، جابجایی رو به بیرون خاک نیز در نتیجه فشار تزریق دوغاب در پشت سپر عقبی است.

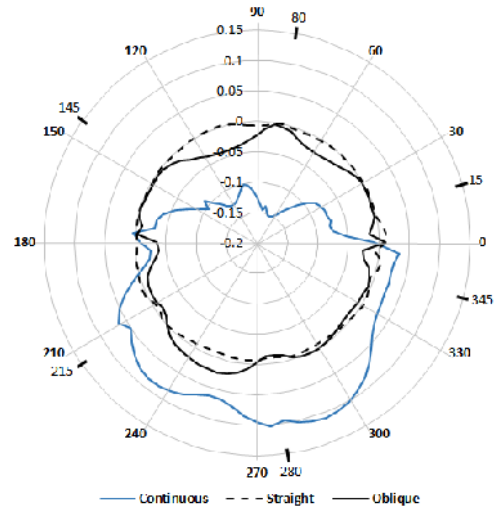
#### ۴-۲- تأثیر الگوی لاینینگ سگمندی

سه نوع الگوی لاینینگ در نظر گرفته شده است: پیوسته،

شبه‌سازی سه‌بعدی تأثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل، ... : ص ۸۲-۹۵

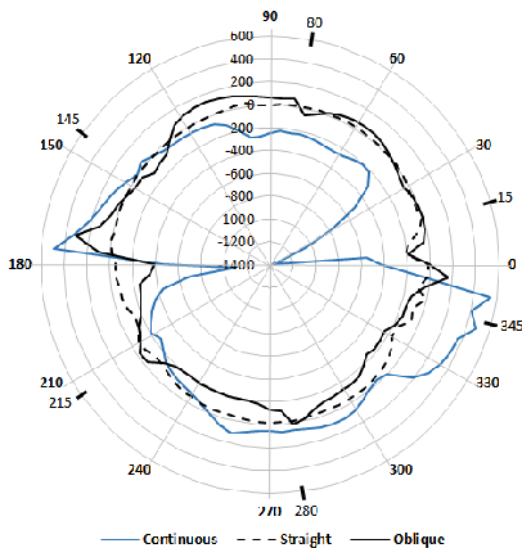
تغییرات نیروهای طولی وارد بر لاینینگ پیوسته و لاینینگ های سگمندی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، انتقال بار بین رینگ‌های پی در پی در لاینینگ سگمندی پایین‌تر از نوع پیوسته است. بنابراین، مقادیر نیروهای طولی در لاینینگ پیوسته بالاتر از مفاصل سگمندی نیروهای طولی بالاتری را نسبت به مفاصل مستقیم القا می‌کند.

به‌علاوه، مفاصل مورب مقدار ممان خمشی را در مقایسه با مفاصل مستقیم افزایش می‌دهد که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

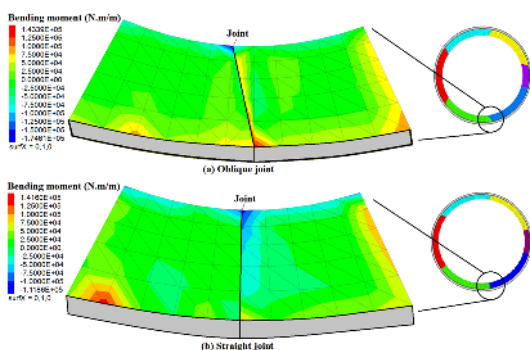


شکل ۱۰- جابجایی طولی (mm) القایی در لاینینگ تونل

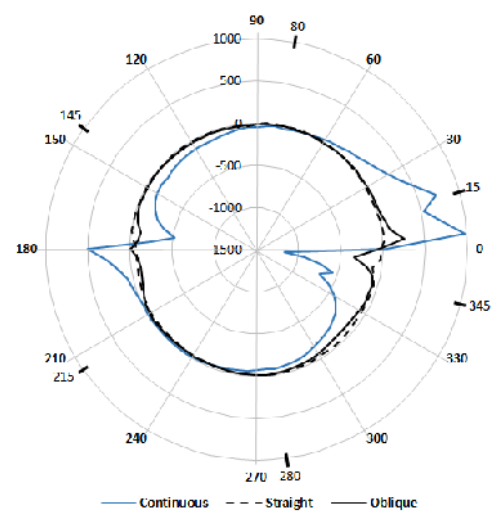
شکل ۱۱ نیروهای محوری وارد بر سه الگوی لاینینگ را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که نیروهای محوری در لاینینگ پیوسته بالاتر از لاینینگ با مفاصل مستقیم و مورب است. با توجه به شکل ۱۱، در لاینینگ با مفاصل مورب، مقادیر حداکثر نیروهای محوری در دیواره‌های لاینینگ رخ می‌دهد. این را می‌توان ناشی از تبدیل نیروی طولی به محوری به سبب شکل دوزنقه‌ای سگمندی‌های کلید و ضد کلید در دیواره‌های تونل دانست. جدا از دیواره‌ها، مقادیر نیروهای محوری در هر دو نوع لاینینگ سگمندی تقریباً مشابه است.



شکل ۱۲- نیروی طولی (kN/m) القایی در لاینینگ تونل



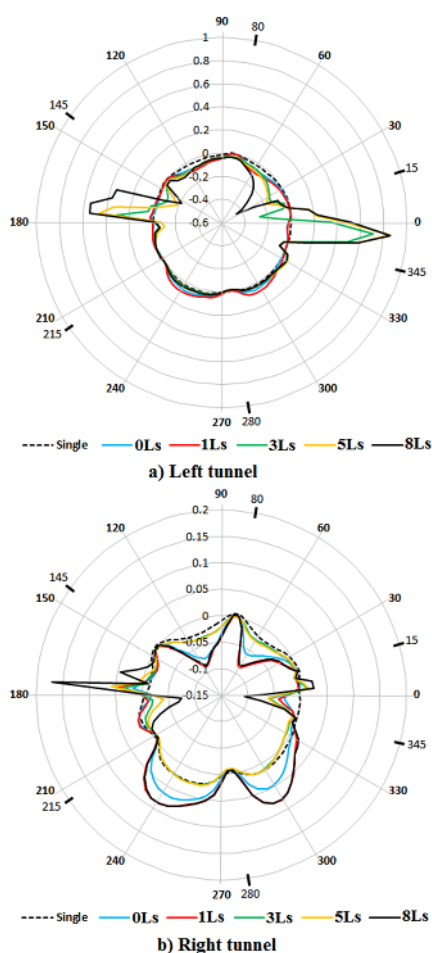
شکل ۱۳- ممان خمشی القایی در مفصل نزدیک به کف تونل (۲۸۰ درجه) در لاینینگ با مفاصل (a) مورب، (b) مستقیم



شکل ۱۱- نیروی محوری (kN/m) القایی در لاینینگ تونل



دانست. تأثیر چشمگیر فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل دوقلو بر جابجایی‌های طولی القاشده در لاینینگ را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده کرد. محل مفاصل سگمندی در شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ مشخص شده است.

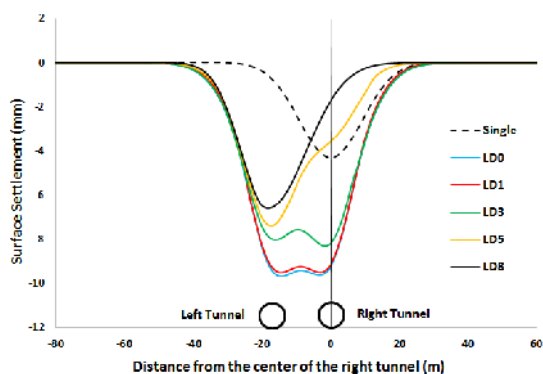


شکل ۱۵- جابجایی طولی القایی (mm) در لاینینگ تونل (a) چپ، (b) راست

به‌طورکلی، جابجایی‌های طولی در تونل جدید (چپ) بیشتر از تونل سمت راست است (شکل ۱۵). می‌توان این نتیجه را ناشی از تأثیر تونل قدیمی بر رفتار تونل جدید دانست. در تونل سمت چپ، با افزایش فاصله طولی، مقادیر جابجایی طولی در هر دو دیواره تونل بخصوص در سناریوهای 3Ls تا 8Ls افزایش می‌یابد که در شکل ۱۵a نشان داده شده است. در تونل سمت راست، جابجایی طولی در دیواره چپ

### ۳-۴- تأثیر فاصله طولی

در شکل ۱۴، نشست سطح زمین در فواصل طولی مختلف بین دو جبهه کار تونل ( $L_D$ ) نشان داده شده است. با افزایش فاصله طولی از  $L_D=0$  تا  $8L_S$ ، گودی نشست به تدریج از مرکز به سمت چپ متمایل می‌شود. همچنین، حداکثر مقدار نشست نیز کاهش می‌یابد. در سناریوی  $8L_S$ ، نشست تونل سمت چپ بیشتر از تونل راست است که به این دلیل است که حفاری تونل اول (راست) باعث اغتشاش در وضعیت اولیه می‌شود که منجر به توزیع مجدد تنش و تغییر زمین در حین حفر تونل سمت چپ می‌گردد. در نتیجه، نشست سطح زمین در سناریوی  $8L_S$  نامتقارن است که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.



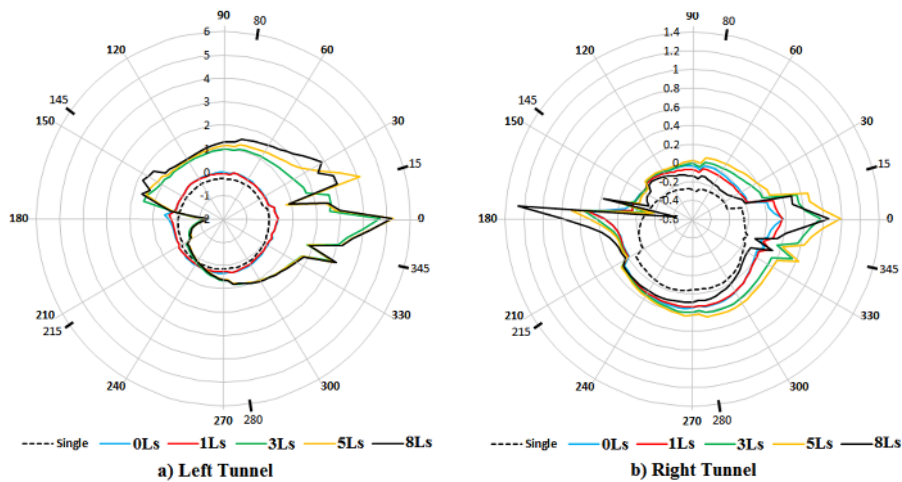
شکل ۱۴- گودی نشست برای فواصل طولی مختلف

این نتیجه همانند نتایج عددی به‌دست‌آمده توسط آدنبروک و پاتس (*Addenbrooke & Potts, 2001*) و چاپمن و همکارانش (*Chapman et al., 2007*) است. اگرچه، در تحقیق صورت گرفته توسط *Do et al., (2016)*، هنگامی که فاصله طولی به اندازه کافی زیاد است ( $8L_S$ )، گودی نشست سطح زمین نسبت به فواصل طولی کمتر افزایش یافته و حداکثر مقدار نشست به سمت تونلی که زودتر حفاری شده متمایل می‌گردد. آن‌ها این پدیده را بدین گونه توجیه می‌کنند که در وضعیت  $8L_S$ ، حفاری تونل جدید باعث ایجاد جابجایی‌های جانبی خاک واقع در زون بین دو تونل به سمت تونل جدید می‌شود و در ادامه موجب بروز جابجایی قائم خاک در بالای تونل قدیمی می‌گردد. این تفاوت رفتاری را می‌توان ناشی از نوع خاک و مدل ساختاری متفاوت در این دو پژوهش

شبه‌سازی سه‌بعدی تاثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل، ... : ص ۸۲-۹۵

یکسان است. اگرچه، در فواصل طولی بیشتر، جابجایی نرمال در لاینینگ تونل افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، جابجایی نرمال در خط مرکزی دیواره لاینینگ هر دو تونل، خصوصاً برای فواصل طولی بزرگ‌تر،  $3L_S$  تا  $8L_S$ ، بیشتر است. در دیواره سمت راست تونل قدیمی (راست)، جابجایی بزرگی به سبب وجود سگمنت کلید رخ می‌دهد.

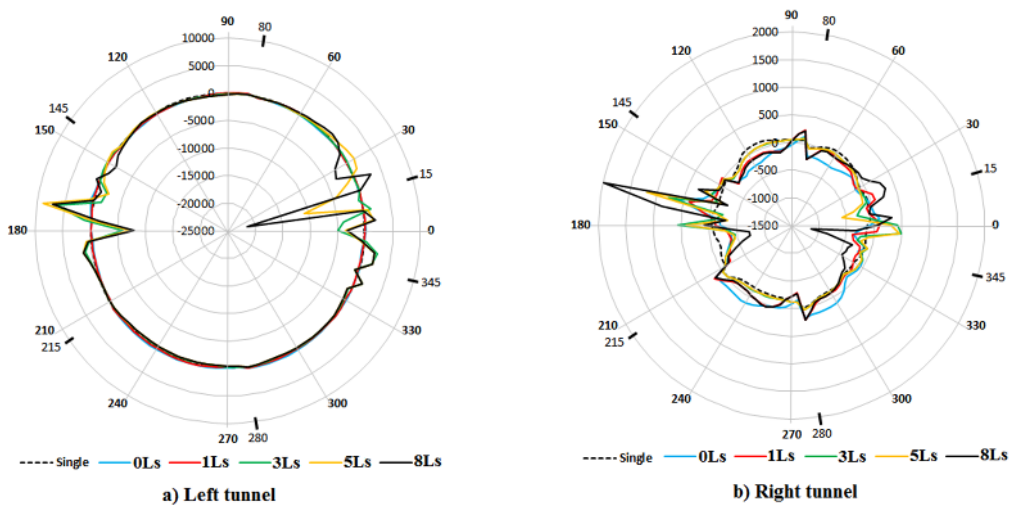
لاینینگ تونل بیشتر تحت تأثیر فاصله طولی است که در شکل ۱۵b دیده می‌شود. این پدیده به سبب اندرکنش تونل‌هاست که منجر به جابجایی بالاتر خاک در دیواره نزدیک به زمین بین دو تونل می‌شود. شکل ۱۶، جابجایی نرمال لاینینگ تونل برای سناریوهای مختلف فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل را نشان می‌دهد. به علت تقارن نشست سطح زمین در  $0L_S$  و  $LL_S$ ، نمودار جابجایی نرمال در هر دو لاینینگ تونل تقریباً



شکل ۱۶- جابجایی نرمال القایی (mm) در لاینینگ تونل (a) چپ، (b) راست

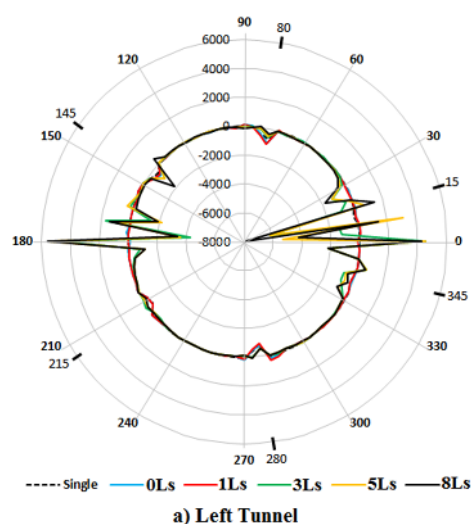
$8L_S$  بخصوص در دیواره سمت چپ اتفاق می‌افتد. به‌علاوه، نیروی طولی ایجادشده در دیواره راست لاینینگ با افزایش فاصله طولی، افزایش می‌یابد.

شکل ۱۷ نیروی طولی القایی در لاینینگ تونل دوقلو در فواصل طولی مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۱۷a، حداکثر نیروی طولی در تونل سمت چپ از سناریوی  $3L_S$  تا



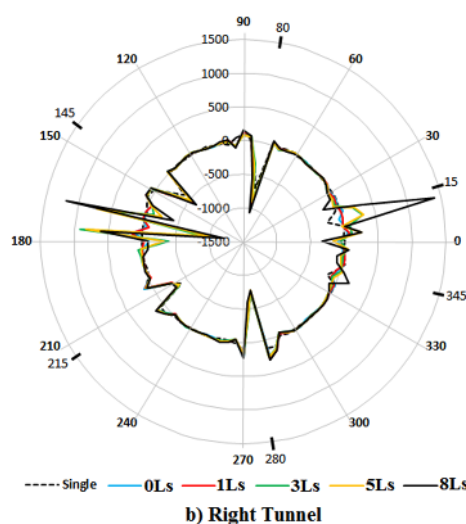
شکل ۱۷- نیروی طولی القایی (kN/m) در لاینینگ تونل (a) چپ، (b) راست

با توجه به شکل ۱۸، حداکثر نیروی نرمال در لاینینگ هر دو تونل مربوط به سناریوی  $8L_S$  است. می‌توان در شکل ۱۸b دید که دیواره سمت چپ تونل سمت راست بسیار حساس به تغییرات فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل دوقلو است. علاوه بر این، لاینینگ تونل جدید (چپ) مقادیر بالای نیروی نرمال را تجربه می‌کند، به‌ویژه در دیواره سمت راست که به علت جابجایی افقی خاک به طرف داخل تونل سمت چپ است. این پدیده نشان می‌دهد که تونل جدید بارهای خارجی بیشتری را در مقایسه با تونل قدیمی خصوصاً در فواصل طولیه بیشتر تحمل می‌کند.



نتایج مشابه را نیز می‌توان در لاینینگ تونل سمت راست مشاهده کرد (شکل ۱۷b). به‌عبارت‌دیگر، لاینینگ تونل در خط مرکزی دیواره تونل در مقایسه با قسمت‌های دیگر نسبت به فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل‌ها بسیار حساس‌تر است. نیروی طولی القایی در لاینینگ دو تونل در سناریوهای  $L_D=0$  و  $1L_S$  تقریباً مشابه با نیروی طولی در لاینینگ تونل منفرد هستند.

شکل ۱۸ تأثیر قابل توجه حفاری یک تونل جدید را بر توزیع نیروی نرمال در هر دو لاینینگ تونل نشان می‌دهد. به‌علاوه، افزایش فاصله طولی بین جبهه کارهای دو تونل منجر افزایش نیروی نرمال در دیواره‌های لاینینگ تونل‌ها می‌شود.



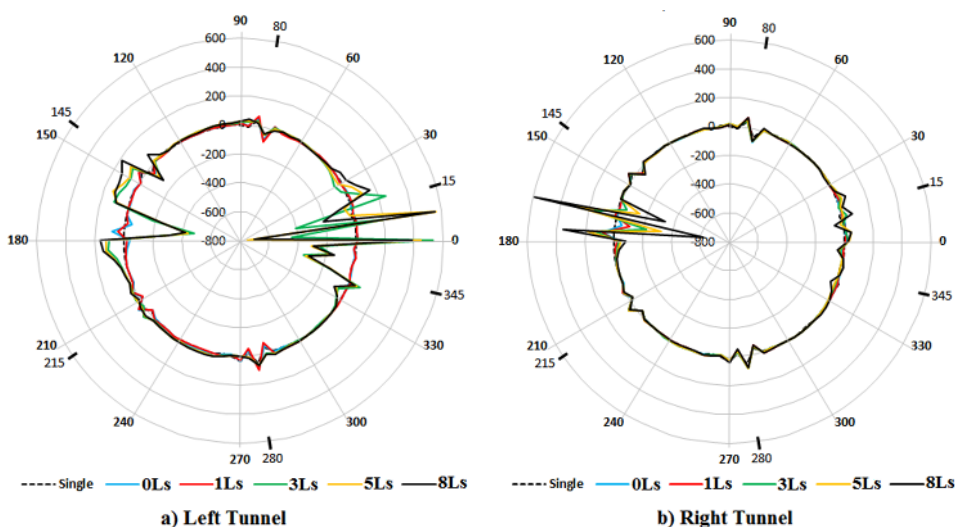
شکل ۱۸- نیروی نرمال القایی (kN/m) در لاینینگ تونل (a) چپ، (b) راست

طولی بسیار زیاد بین دو جبهه کار منجر به افزایش جابجایی‌های طولی و نرمال در لاینینگ تونل، افزایش نیروهای داخلی القاشده در لاینینگ سگمندی و کاهش نشست سطح زمین در بالای تونل‌ها می‌شود. با افزایش فاصله طولی بین جبهه کارها از  $L_D=0$  تا  $8L_S$ ، نیروهای ساختاری و جابجایی لاینینگ‌ها بخصوص در خط مرکزی دیواره‌های لاینینگ تونل‌ها، افزایش می‌یابد. به‌علاوه، با کاهش فاصله طولی بین دو جبهه کار، مقدار بیشینه نشست سطحی افزایش می‌یابد و گودی نشست به سمت خط میانی بین تونل دوقلو متمایل می‌شود.

شکل ۱۹ نشان‌دهنده توزیع ممان خمشی در لاینینگ تونل‌های دوقلو در فواصل طولی مختلف بین جبهه کار تونل‌هاست. با توجه به شکل ۱۹a، فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل دوقلو تأثیر بسزایی بر مقدار ممان خمشی القایی در دیواره‌های تونل جدید (چپ) دارد. با افزایش فاصله طولی، ممان خمشی در لاینینگ تونل‌ها نیز افزایش می‌یابد. ممان خمشی توزیع شده در لاینینگ تونل‌ها برای سناریوهای  $0L_S$  و  $1L_S$  تقریباً مشابه است، متفاوت با سناریوهای دیگر است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که حفاری یک تونل جدید در نزدیکی یک تونل قدیمی با فاصله

شبیه‌سازی سه‌بعدی تاثیر مفاصل سگمندی مورب و فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو بر رفتار تونل، ... : ص ۸۲-۹۵



شکل ۱۹- ممان خمشی (kN.m/m) توزیع شده در لاینینگ تونل (a) چپ، (b) راست

بیشتر بین سگمندی‌ها در الگوی مفاصل مورب نسبت به مفاصل مستقیم دانست. نتایج یادشده در بالا به‌روشنی ضرورت استفاده از الگوی مفاصل مورب در شبیه‌سازی عددی را برای حصول ارزیابی دقیق نیروهای داخلی در لاینینگ سگمندی را نشان می‌دهد.

۳. با افزایش فاصله طولی بین جبهه کار تونل‌های دوقلو، حداکثر نشست سطحی کاهش یافته و گودی نشست به سمت تونل جدید (چپ) متمایل می‌شود. برای سناریوهای فاصله طولی مختلف، مقادیر جابجایی‌های نرمال و طولی به‌دست‌آمده از لاینینگ تونل قدیمی کمتر از مقادیر متناظر در تونل سمت چپ است. افزایش فاصله طولی بین دو جبهه کار منجر به افزایش جابجایی نرمال و طولی، افزایش نیروهای داخلی در لاینینگ و کاهش نشست سطحی می‌شود.

#### ۶- سپاس‌گزاری

مؤلفان بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات بی‌دریغ جناب آقای پرفسور دنیل دیاس (Daniel Dias) در مراحل انجام شبیه‌سازی عددی تشکر و قدردانی نمایند.

#### ۷- سیاهه‌ی نمادها

تمامی نمادهای مورداستفاده در متن در جدول ۵ آورده شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌های عددی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی حفاری مکانیزه تونل با TBM ایجاد شد و تأثیر الگوی مفاصل سگمندی و فاصله طولی بین جبهه کار تونل دوقلو بررسی شد. پارامترهای مورد مطالعه از این جهت حائز اهمیت هستند که بر نیروهای ساختاری و تغییر شکل لاینینگ تونل تأثیرگذار است. به همین دلیل، مفاصل در لاینینگ سگمندی بایستی مطابق با شرایط واقعی شبیه‌سازی شوند تا از دقت ارزیابی نیروهای ساختاری برای تعیین مناسب‌ترین طراحی لاینینگ سگمندی مطمئن شد. بر مبنای نتایج عددی، نتایج پیش رو را می‌توان یادآور شد:

۱. جابجایی افقی تدریجی خاک دربرگیرنده به سمت تونل، قابلیت و دقت استفاده از روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی عددی شکل مخروطی سپر را نشان می‌دهد.
۲. الگوی مورب مفاصل سگمندی در لاینینگ تونل تأثیر چشمگیری بر نیروهای داخلی القایی و تغییر شکل‌های لاینینگ تونل به‌ویژه جابجایی محوری و طولی دارد. به‌علاوه، ممان خمشی بیشینه در لاینینگ با الگوی مفاصل مورب، بیشتر از مقدار متناظر در لاینینگ سگمندی با الگوی مفاصل مستقیم است. استفاده از الگوی مفاصل مستقیم باعث کاهش نیروهای محوری و طولی در مقایسه با الگوی مفاصل مورب می‌شود. این رفتارها را می‌توان ناشی از تماس و اندرکنش

جدول ۵- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
مدول یانگ	MPa	$E$
ضریب پواسون	-	$\nu$
زاویه اصطکاک داخلی	Degree	$\phi$
چسبندگی	kPa	$C$
ضریب فشار زمین	-	$K_\theta$
دانسیته لاینینگ بتنی	Kg/m <sup>3</sup>	$\gamma_c$
ضخامت لاینینگ بتنی	m	$t_l$
قطر خارجی لاینینگ	m	$D_e$
طول رینگ لاینینگ	m	$L$
عمق تونل	m	$H$
قطر تونل	m	$D$
ضخامت سپر	m	$t_s$
مدول الاستیسیته دوغاب سفت شده	MPa	$E_{cg}$
ضریب پواسون دوغاب سفت شده	-	$\nu_{cg}$
سختی فنر نرمال	MN/m	$K_n$
سختی فنر برشی	MN/m	$K_s$
مدول بالک	MPa	$K$
مدول برشی	MPa	$G$
کوچک‌ترین بعد نرمال زون مجاور	m	$\Delta Z_{min}$
سختی محوری مفصل طولی	MN/m	$K_{axi}$
سختی شعاعی مفصل طولی	MN/m	$K_{rad}$
سختی چرخشی مفصل طولی	MNm/rad/m	$K_{rot}$
حداکثر ممان خمشی در مفاصل	kN.m/m	$M_{yield}$
سختی محوری مفصل محیطی	MN/m	$K_{Raxi}$
سختی شعاعی مفصل محیطی	MN/m	$K_{Rrad}$
سختی چرخشی مفصل محیطی	MNm/rad/m	$K_{Rrot}$
فاصله طولی بین دو جبهه کار تونل	m	$L_D$
طول سپر TBM	m	$L_S$

## ۸- مراجع

- Addenbrooke TI, Potts DM (2001). Twin tunnel interaction surface and subsurface effects. Int J Geomech. 1(2):249-71.
- Afifipour M, Sharifzadeh M, Shahriar K, JamshidiH(2011). Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran. Tunnell. Underground Space Technol. 26, 356-363.
- Blom CB (2002). Design philosophy of concrete linings for tunnel in soft soils. Ph.D. Dissertation, Delft University, Netherlands

- Cavalaro S, Aguado A (2011). Packer behavior under simple and coupled stresses. *Tunn Undergr Space Technol* 28:159–173
- Chakeri H, Hasanpour R, Hindistan M.A, Ünver B (2011). Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70, 439–448.
- Chapman DN, Ahn SK, Hunt DVL (2007). Investigating ground movements caused by the construction of multiple tunnels in soft ground using laboratory model tests. *Can Geotech J.* 44(6):631–43.
- Dias D, Kastner R (2012). The movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields—analysis of monitoring and numerical modelling results. *Eng Geol* 152: 17–25.
- Dias D, Kastner R, Maghazi M (2000). Three dimensional simulation of slurry shield tunnelling. In: Kusakabe O, Fujita K, Miyazaki Y (eds) *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Balkema, Rotterdam, pp 351–356.
- Ding W.Q, Yue Z.Q, Tham L.G, Zhu H.H, Lee C.F, Hashimoto T (2004). Analysis of shield tunnel. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 28, 57–91.
- Do N, Dias D, Oreste P (2016). 3D numerical investigation of mechanized twin tunnels in soft ground—Influence of lagging distance between two tunnel faces. *Engineering Structures*, 109, 117-125. doi:10.1016/j.engstruct.2015.11.053.
- Do NA, Dias D, Oreste PP (2015). 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground. *Environ Earth Sci*; 73 (5): 2101–13.
- Do NA, Dias D, Oreste PP, Djeran-Maigre I (2014). Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunn Undergr Space Technol*; 42:40–51.
- Do NA, Dias D, Oreste PP, Djeran-Maigre I et al (2013). 3D modelling for mechanized tunneling in soft ground - Influence of the constitutive model. *Am J Appl Sci* 10 (8): 863–875
- Hasanpour R (2014). Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM. *Computers and Geotechnics*, 57, 37-52.
- Hasanpour R, Chakeri H, Ozcelik Y, Denek H (2012). Evaluation of surface settlements in the Istanbul metro in terms of analytical, numerical and direct measurements. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 71, 499–510.
- Hefny A, Chua H (2006). An investigation into the behaviour of jointed tunnel lining. *Tunn Undergr Space Technol* 21:428.
- Itasca Consulting Group (2012). *FLAC fast Lagrangian analysis of continua, version 5.0. User's manual*.  
FLAC fast Lagrangian analysis of continua, version 5.0. User's manual
- JSCE (1996). Japanese standard for shield tunneling, Tunnel Engineering Committee English Edition of the Japanese Standard for Tunneling, Subcommittee Japan Society of Civil Engineers, the third edition, Tokyo
- Kasper T, Meschke G (2004). A 3D finite element simulation model for TBM tunneling in soft ground. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 28:1441–1460

- Kasper T, Meschke G (2006). A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunneling. *ComputGeotech* 33 (4–5): 234–247
- Lambrughli A, Rodriguez LM, Castellanza R (2012). Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanized excavations. *ComputGeotech* 40:97–113
- Lee K.M, Hou X.Y, Ge X.W, Tang Y(2001). An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 25, 365–390.
- Li X, Du S, Zhang D(2010). Numerical simulation of the interaction between two parallel shield tunnels. In: *Proceeding of ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better, Life*, pp. 1521–1533.
- Maidl B, Herrenknecht M, Anheuser L (1996). *Mechanized shield tunneling*. Ernst and Sohn, Berlin
- Medina Rodriguez L (2000). *Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras en los túneles de Madrid*. Ph.D. Dissertation, University of La Coruña (in Spanish)
- Melis M, Medina L, Rodriguez J (2002). Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunneling in the Madrid Metro Extension. *Can Geotech J* 39:1273–1287
- Mollon G (2010). *Etude déterministe et probabiliste du comportement des tunnels*. Ph.D. Dissertation, INSA de Lyon. N° d'ordre 2010ISAL0110
- Mollon G, Dias D, Soubra A (2013). Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. *ActaGeotech* 8:181–199.
- Naggar H.E, Hinchberger S.D(2008). An analytical solution for jointed tunnel linings in elastic soil or rock. *Canadian Geotechnical Journal* 45, 1572–1593.
- Ng C.W.W, Lee K.M, Tang D.K.W (2004). Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions. *Can. Geotech. J.* 41, 523–539.
- Phienweij N, Hong CP, Sirivachiraporn A (2006). Evaluation of ground movements in EPB-shield tunneling for Bangkok MRT by 3D-numerical analysis. *TunnUndergr Space Technol* 21(3–4):273.
- Takano Y (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. *TunnUndergr Space Technol* 15 (3): 303–331.
- Thienert C, Pulsfort M (2011). Segment design under consideration of the material used to fill the annular gap. *Geomech Tunn* 4: 665–679.
- Tose-e Consulting Engineers (2014). *Geotechnical Engineering Services Report of Shiraz Metro Line 2*.