

# تحلیل رفتارسنجی حفاری تونل مکانیزه در خاک‌های دانه‌ی (مطالعه‌ی موردی متروی تبریز)

امیرحسین رضایی\* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی، آذربایجان

مجتبی شیرزه حق (دانشجوی کارشناسی ارشد)

هوشنگ کاتبی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (درداشت فنی)  
دردی ۲ - ۳۵، شماره ۴/۲، ص. ۱۳۱-۱۴۰، یادداشت فنی

در مطالعه‌ی حاضر، نشست‌های ناشی از حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز در محدوده‌ی شفت غربی تا ایستگاه S۰۲ (از متراژ ۱۸۰۰ تا ۳۸۰۰) ارائه شده است. در محدوده‌ی ذکر شده‌ی تونل مترو با استفاده از دستگاه TBM-EPB در خاک با تناوب بالای آبرفت درشت‌دانه (SM) و درصد پایین ریزدانه (ML) در زیر سطح ایستایی حفاری شده است. از این رو با کمی اغماض می‌توان زمین را در محدوده‌ی اشاره شده، درشت‌دانه با چسبندگی کم در نظر گرفت. نشست‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از روابط گاوس تحویل برگشتی شده و جزئیات نشست‌ها در جهت طولی و عرضی، میزان تطابق روابط گاوس با واقعیت و روند تکامل نشست‌ها با پیشروی حفاری مفصلاً بررسی شده است. علاوه بر این، فشارهای اعمالی به جبهه‌ی کار و فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها نیز ارائه و تأثیر آن‌ها در نشست‌ها و پارامترافت حجم زمین بررسی شده است.

واژگان کلیدی: نشست‌های سطحی، افت حجم زمین، فشار جبهه‌ی کار، حفاری مکانیزه، متروی تبریز.

## ۱. مقدمه

نشست در نظر گرفته می‌شوند و مؤلفه‌ی سوم به دلیل اینکه با سازوکاری متفاوت و در بلندمدت اتفاق می‌افتد، به طور جداگانه بررسی می‌شود. البته در خاک عمدتاً درشت‌دانه و با چسبندگی پایین مسیر متروی تبریز<sup>۱</sup> می‌توان از بخش سوم نشست که به تحکیم رس مربوط می‌شود، صرف‌نظر کرد.

از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در نشست توده‌های خاکی ناهمگن، محاسبه‌ی فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌ی کار تونل است. در حالی که در دهه‌های اخیر، استفاده از دستگاه‌های سپردار TBM<sup>۲</sup> برای حفاری تونل در زمین‌های نرم زیر سطح ایستایی بسیار رایج شده است، پایداری جبهه‌ی کار تونل در دستگاه‌های TBM با روش‌های غیرمستقیم، از جمله استفاده از هوای فشرده<sup>۳</sup>، دوغاب بنتونیت<sup>۴</sup> و نیز استفاده از خود خاک حفاری شده<sup>۵</sup> تأمین می‌شود.<sup>۶</sup>

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که مطالعات پیشین عموماً بر مدل‌سازی‌های عددی و یا بررسی و توسعه‌ی روش‌های تجربی و تحلیلی متمرکز است،<sup>۷</sup> و جای مطالعه‌ی که به تحلیل و تفسیر حجم قابل توجهی از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل یک پروژه‌ی حفاری تونل مکانیزه بپردازد، خالی است. از این رو در نوشتار حاضر، داده‌های واقعی مربوط به نشست‌های سطحی، فشار جبهه‌ی کار و فشار تزریق دوغاب در طول ۲۰۰۰ متر از خط ۲ متروی تبریز (در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه S۰۲) مطالعه و با تحلیل برگشتی، میزان تطابق تخمین‌های اولیه مبتنی بر روابط تجربی با واقعیت بررسی شده است (شکل ۱).

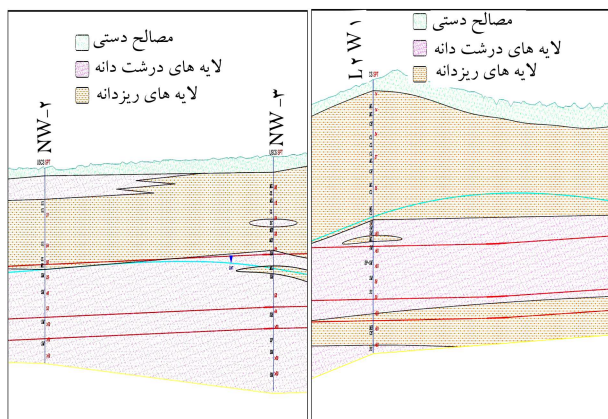
حفاری تونل در محیط‌های شهری، جابه‌جایی‌هایی را در زمین به وجود می‌آورد که ممکن است در سازه‌های موجود آثار منفی بگذارند. به ویژه هنگامی که حفاری زیرزمینی در خاک‌های سست و اشباع که به وفور در محیط شهری یافت می‌شود، انجام بگیرد.<sup>۱</sup> از این رو در گام طراحی تونل، از مدل‌هایی برای بررسی و پیش‌بینی خطرات ناشی از حفاری استفاده می‌شود. با وجود این، تحلیل برگشتی داده‌های حاصل از ابزارگذاری و رفتارسنجی در طول اجرای عملیات، محاسبات گام طراحی و حتی روش‌های کاهش نشست را به روزرسانی می‌کند.<sup>۲</sup> امروزه استفاده از روابط تجربی با فرم بسته، یکی از راه‌های متداول برای پیش‌بینی نشست‌های ناشی از تونل‌سازی در شرایط زمین آزاد (عدم وجود سازه‌های سطحی)<sup>۳</sup> است. البته روابط مذکور می‌توانند تخمین اولیه‌ی از نشست‌های سطحی را در صورت وجود ساختمان‌های سطحی و زیرساخت‌های شهری ارائه کنند.<sup>۴</sup> در یک مسئله‌ی واقعی، نشست‌های ناشی از حفاری مکانیزه‌ی تونل به سه مؤلفه‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: مؤلفه‌ی اول با پیشروی سپر رخ می‌دهد و مؤلفه‌های دوم و سوم به ترتیب به دلیل فضای خالی انتهایی سپر و تحکیم در خاک‌های رسی اتفاق می‌افتند.<sup>۵</sup> در هنگام تحلیل جابه‌جایی‌های ناشی از تونل‌سازی در زمین، دو مؤلفه‌ی اول و دوم برای

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۵، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۱، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۹.

DOI:10.24200/J30.2018.5692.2264

rezaei.ah@azaruniv.ac.ir  
mshirzeh94@ms.tabrizu.ac.ir  
katebi@tabrizu.ac.ir



شکل ۲. پروفیل زمین‌شناسی مسیر خط ۲ متروی تبریز، کیلومتر از تونل: (چپ) ۲+۴۵۰-۲+۸۵۰ و (راست) ۳+۲۰۰-۳+۶۰۰.

غربی تا ایستگاه S۰۱ برابر ۱۶/۶۹ متر و در حد فاصل ایستگاه S۰۱ تا ایستگاه S۰۲ با افزایش قابل توجه برابر با ۲۲/۱۳ متر است.<sup>[۹]</sup> پیشروی دستگاه TBM با استفاده از جک‌های هیدرولیکی که بر روی محیط بیرونی سپر دستگاه واقع شده‌اند، تأمین می‌شود. جک‌های مذکور با اعمال فشار بر روی سگمنت‌های پیشین نصب شده، دستگاه TBM را به پیش می‌رانند. فضای خالی پشت سگمنت‌ها (فضای بین قطر بیرونی حلقه‌ی نهایی پوشش تونل و مقطع حفاری) با تزریق دوغابی پر می‌شود که از سیمان و مایع شتاب دهنده تشکیل شده است. این دوغاب از انتهای سپر تزریق می‌شود.<sup>[۲]</sup>

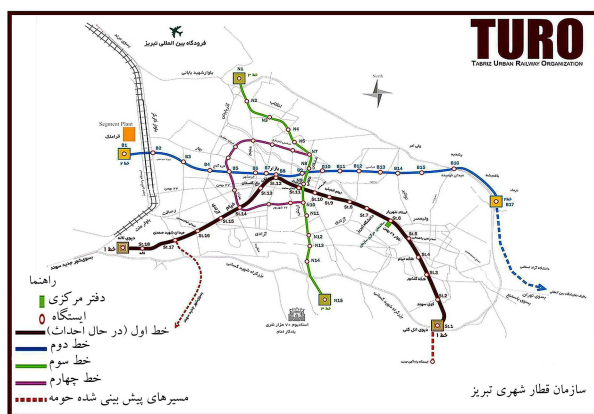
### ۳. روش تجربی برآورد نشست‌های ناشی از تونل‌سازی

مداول‌ترین روش تجربی برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های زمین مبتنی بر توزیع گاوس است. پک<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۶۹ برای اولین بار نشان داد که منحنی نشست‌های عرضی، پس از انجام عملیات تونل‌سازی در بسیاری از موارد با تابع گاوس تطابق خوبی دارد. بر این اساس در یک مقطع عمود بر محور تونل و در فاصله‌ی کافی از جبهه‌ی تونل، پروفیل نشست در حالت آزاد زمین با استفاده از منحنی توزیع گاوس (معادله ۱) برآورد می‌شود:

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \quad (1)$$

که در آن،  $S_{v,\max}$  نشست سطحی بیشینه در بالای محور تونل،  $x$  فاصله‌ی افقی از محور تونل،  $i_x$  فاصله‌ی افقی نقطه‌ی عطف منحنی نشست از محور تونل و  $S_v$  نشست در فاصله‌ی  $x$  از محور تونل است.<sup>[۱۰]</sup> همچنین فاصله‌ی نقطه‌ی عطف منحنی نشست از محور تونل است،  $i_x$  که عرض منحنی نشست را تعیین می‌کند و بارها مطالعه شده است. اوریلی<sup>۱۱</sup> و نیو<sup>۱۲</sup> (۱۹۸۲)، نیز نتایج تحلیل‌های متعدد رگرسیون خطی خود را که بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده در محل انجام شده بودند، ارائه دادند. بدین ترتیب مشخص شد که  $i_x$  رابطه‌ی مستقیمی با عمق تونل دارد. در این حال نتایج نشان داد رابطه‌ی مشخصی بین  $i_x$  و قطر تونل (به جز در تونل‌های بسیار کم عمق)، با نسبت سربار به قطر کمتر از ۱ برقرار نیست. از این رو، اوریلی و نیو، معادله‌ی ۲ را برای پارامتر  $i_x$  پیشنهاد داده‌اند:<sup>[۱۱]</sup>

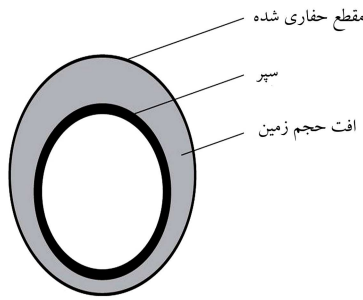
$$i_x = Kz \quad (2)$$



شکل ۱. شمای کلی خطوط قطار شهری تبریز.

### ۲. معرفی مشخصات خط ۲ متروی تبریز

خط ۲ متروی تبریز از اراضی غرب منطقه‌ی قراملک شروع شده و پس از عبور از مرکز شهر (سه راه محقق) به سمت شمال شرقی تبریز ادامه پیدا کرده و در نهایت، در نمایشگاه بین‌المللی تبریز به پایان می‌رسد. طول کل خط ۲ متروی تبریز، ۲۲/۵ کیلومتر است و در شکل ۱، مسیر آن با رنگ آبی نشان داده شده است. براساس گزارش مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده، محدوده‌ی مورد بررسی در نوشتار حاضر یعنی حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه S۰۲ (کیلومتر از ۱+۸۰۰ تا ۳+۸۰۰) را می‌توان به دو ناحیه‌ی کلی تقسیم کرد: ناحیه‌ی ۱: حد فاصل شفت غربی تا میدان ماشین‌سازی (از ابتدای مسیر تا کیلومتر از ۲+۵۰۰) تبریز بوده و خاک آن از جنس رسوبات آبرفتی ریزدانه در سطح و رسوبات شن و ماسه آب‌دار در عمق است. مسیر تونل در ناحیه‌ی یک، عمدتاً درون رسوبات آبرفتی درشت‌دانه با نفوذپذیری بالا قرار دارد. عمق آب زیرزمینی در محدوده‌ی ناحیه‌ی یک بین ۱۳ تا ۱۶ متر متغیر است. ناحیه‌ی ۲: حد فاصل میدان ماشین‌سازی تا ایستگاه S۰۲ (از کیلومتر از ۲+۵۰۰ تا کیلومتر از ۳+۸۰۰) خط ۲ متروی تبریز بوده و خاک آن از جنس رسوبات آبرفتی ریزدانه‌ی رسی و سیلتی است. در میان لایه‌های آبرفتی ریزدانه‌ی اشاره شده، اگرچه میان‌لایه‌هایی از رسوبات ماسه‌یی هم وجود دارد، اما مسیر تونل به طور عمده از درون رسوبات آبرفتی ریزدانه می‌گذرد. عمق آب زیرزمینی در محدوده‌ی ناحیه‌ی دو بین ۱۴ تا ۲۲ متر متغیر است. در شکل ۲، پروفیل زمین‌شناسی مسیر در کیلومترهای ۲+۴۵۰ تا ۲+۸۵۰ و ۳+۲۰۰ تا ۳+۶۰۰ مشاهده می‌شود. حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز با استفاده از دستگاه TBM-EPB انجام شده است. دستگاه TBM-EPB برای حفاری از کله‌ی حفار دورانی<sup>۷</sup> استفاده می‌کند و مصالح حفاری شده در چمبر<sup>۸</sup> تحت فشار نگهداری می‌شوند تا پایداری جبهه‌ی کار را تأمین کنند. فشار جبهه‌ی کار به طور کلی به عنوان تابعی از فشار جانبی زمین در حالت سکون در عمق محور تونل تنظیم می‌شود.<sup>[۱]</sup> قطر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز ۹/۴۹ متر، طول سپر دستگاه TBM-EPB ۹ متر، قطر خارجی سپر در جلوی آن ۹/۴۶ متر و در انتهای آن: برابر ۹/۴۴ متر (۲ سانتی‌متر مخروطی) است. وزن دستگاه TBM برابر ۶۵۰ تن و وزن بخش پشتیبان آن در حدود ۳۲۰ تن است. تونل پس از حفاری، با قطعات پیش ساخته‌شده‌ی بتنی (سگمنت<sup>۹</sup>) با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و طول ۱/۵ متر نگهداری می‌شود. قطر بیرونی و قطر درونی حلقه‌ی نهایی پوشش تونل به ترتیب برابر ۹/۱۸ و ۸/۴۸ متر است. عمق متوسط محور تونل خط ۲ متروی تبریز در حد فاصل شفت



شکل ۴. افت حجم زمین.

است. افت حجم زمین با استفاده از معادله ۵ محاسبه می‌شود (شکل ۴):

$$V_t = V_S / A_t \times \%100 \quad (5)$$

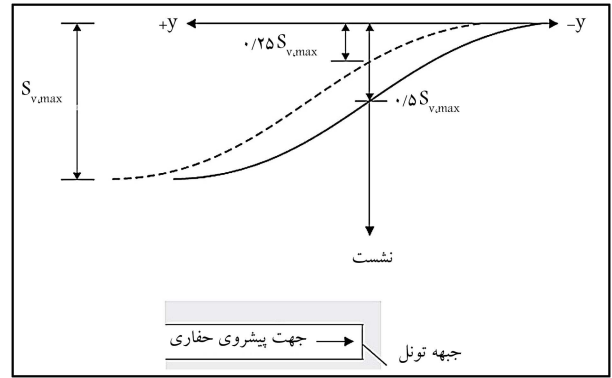
که در آن،  $V_S$  به معنای حجم منحنی نشست به ازاء ۱ متر از طول تونل است و مقدار آن از حل معادله ۶ به دست می‌آید:

$$V_S = \int_{+\infty}^{-\infty} S_v(x) dx = \sqrt{2\pi} i_x S_{v,max} \quad (6)$$

که در آن،  $S_{v,max}$  نشست بیشینه در بالای محور تونل و  $i_x$  نقطه‌ی عطف منحنی نشست‌های عرضی در مقطع موردنظر است.<sup>[۱۰]</sup>

#### ۴. جزئیات رفتار سنجی، ارائه و تفسیر نتایج

در طول عملیات حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز، بین‌های<sup>۱۵</sup> نشست‌سنجی استاندارد مطابق ضابطه‌ی ۶۹۵ معاونت امور فنی و توسعه‌ی امور زیربنایی برای قرائت و ثبت نشست سطحی در بالای محور تونل نصب شده است. فاصله‌ی طولی بین‌های مذکور، ۱۰ متر است. تا زمان نگارش نوشتار حاضر، داده‌های مربوط به نشست سطحی در ۱۸۰ بین در حد فاصل کیلومتر ۱+۸۰۰ تا ۳+۸۰۰ قرائت و ثبت شده است (جدول ۱). همچنین در کیلومتر ۲+۵۷۷ با نصب ۲ بین به فواصل ۱۴ و ۱۰ متری از محور تونل در طرفین آن، نشست‌های عرضی قرائت شده است. در تک‌تک سگمنت‌های نصب شده نیز به عنوان حلقه‌ی پوشش تونل، فشار اعمال شده به جبهه‌ی کار و در حلقه‌های نصب شده پس از ایستگاه S۰۱ (کیلومتر ۳+۱۴۰ به بعد) فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها در محل تاج تونل ثبت شده است. با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌های رفتارسنجی شده مربوط به خط ۲ تبریز و ضرورت اختصار در نوشتار حاضر، ۲۰ مقطع برای بررسی منحنی نشست‌های طولی انتخاب شده است. عنوان هر مقطع، متر ۱۰ هر مقطع یا به عبارت دقیق‌تر فاصله‌ی آن مقطع از نقطه‌ی شروع حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز را نشان می‌دهد. در هر کدام از مقطع‌های اشاره شده، نشست‌های ثبت شده در بازه‌ی ۴۰- تا ۵۰+ متری از جبهه‌ی حفاری تونل، بحث و بررسی شده‌اند. همچنین از کیلومتر ۱+۹۰۰ تا ۳+۷۰۰، در ۵۳ بین با فاصله‌ی بیشینه‌ی ۵۰ متری از یکدیگر، نشست سطحی بیشینه (نهایی) در هر بین، نشست در بالای جبهه‌ی تونل، افت حجم زمین، فشار جبهه‌ی کار و فشار تزریق دوغاب تحلیل و بررسی شده است. در جدول ۱، متر ۱۰ بین‌ها، نشست بیشینه (نهایی) و عمق محور تونل در آن‌ها ارائه شده است. در شکل ۵، نشست‌های اندازه‌گیری شده در مقطع کیلومتر ۲+۵۷۷ تونل در کنار منحنی‌های نشست‌های عرضی رسم شده با رابطه‌ی تجربی گاوس در آن



شکل ۳. منحنی نشست‌های طولی ناشی از حفاری تونل.

که در آن،  $K$  پارامتر عرض منحنی و  $Z$  عمق محور تونل است. پارامتر  $K$  به ذات خاک بستگی دارد و در ادبیات فنی، پیشنهاد‌های مختلفی برای مقدار آن توصیه شده است. در حالت کلی با افزایش مقدار  $K$ ، منحنی گاوس عریض‌تر می‌شود.<sup>[۱۰]</sup> همچنین رانکین (۱۹۸۸)، مقدار پارامتر  $K$  را برای خاک رسی ۰/۵ و برای خاک ماسه‌یی ۰/۲۵ پیشنهاد کرده است. میر و تیلور (۱۹۹۷) نیز مقدار پارامتر  $K$  را بدون توجه به قطر تونل و روش حفاری، برای خاک رس سفت بین ۰/۴ و ۰/۶، برای خاک رس نرم بین ۰/۶ و ۰/۷۵ و برای خاک‌های شن و ماسه بین ۰/۲ و ۰/۴۵ توصیه کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

تونل‌ها معمولاً در خاک‌هایی که شامل لایه‌های مختلف رسی و ماسه‌یی هستند، ساخته می‌شوند. برای تونل‌هایی که در خاک‌های چندلایه‌یی حفاری می‌شوند، اوریلی و نیو (۱۹۹۱)، معادله‌ی ۳ را معرفی کرده‌اند:

$$i_x = K_1 z_1 + K_2 z_2 \quad (3)$$

که در آن،  $K_1$  پارامتر عرض منحنی نشست لایه‌ی ۱ با ضخامت  $Z_1$  و  $K_2$  پارامتر عرض منحنی لایه‌ی ۲ با ضخامت  $Z_2$  است.<sup>[۱۰]</sup> معادله‌ی ۳، در حالتی که به‌عنوان مثال زمین دولایه‌یی باشد، نوشته شده و البته برای زمین‌های چندلایه‌یی نیز قابل تعمیم است.

در بررسی جابه‌جایی‌های ناشی از تونل‌سازی، علاوه بر نشست‌های عرضی، منحنی نشست‌های طولی نیز اهمیت خاصی دارد. همچنین اتول<sup>۱۳</sup> و وودمان<sup>۱۴</sup> (۱۹۸۲) نشان دادند که برای تعیین منحنی نشست‌های طولی، می‌توان تونل را به‌صورت مجموعه‌یی از مقاطع در راستای طولی آن در نظر گرفت و آثار نشست در هر یک از مقاطع مذکور را به‌صورت تجمعی با هم جمع کرد. بنابراین و با این فرض که منحنی نشست‌های عرضی در هر یک از مقاطع اخیر از تابع گاوس پیروی می‌کند، این نتیجه حاصل می‌شود که منحنی نشست‌های طولی هم از منحنی تجمعی احتمالی گاوس با معادله‌ی ۴ پیروی می‌کند:<sup>[۱۳]</sup>

$$S_v(y)_{x=0} = S_{v,max} \frac{1}{i_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2i_y^2}} dy \quad (4)$$

که در آن،  $y$  فاصله‌ی افقی از جبهه‌ی تونل است و  $i_y$  که فاصله‌ی نقطه‌ی عطف منحنی نشست‌های طولی از جبهه‌ی تونل را نشان می‌دهد، معمولاً برابر  $i_x$  فرض می‌شود (شکل ۳).

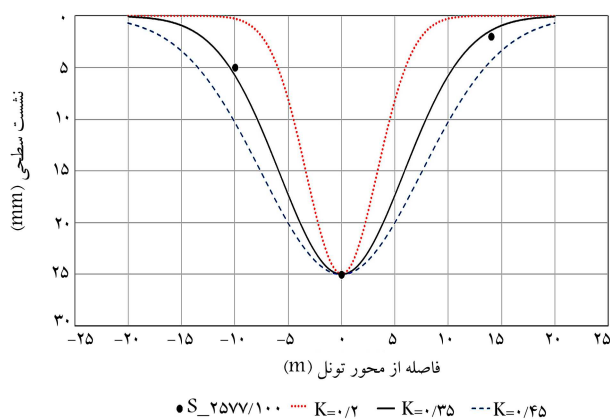
پارامتری که در حوزه‌ی تونل‌سازی اهمیت خاصی دارد، افت حجم زمین  $V_t$

جدول ۱. مقادیر نشست سطحی ماکزیمم (نهایی) و عمق محور تونل در مترهای منتخب ابزارگذاری شده (پین‌ها).

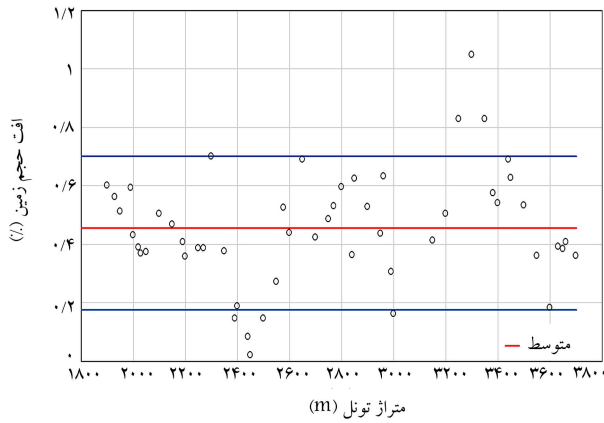
مترای (m)	عمق محور تونل (m)	عمق سطح ایستایی (m)	نشست سطحی بیشینه (mm)	مترای (m)	عمق محور تونل (m)	عمق سطح ایستایی (m)	نشست سطحی بیشینه (m)
۱۹۰۰	۱۶,۱۶۵	۱۳,۳	۳۰	۲۷۷۰	۱۷,۰۵۵	۲۱,۸	۲۵
۱۹۳۰	۱۶,۱۶۵	۱۳,۳	۲۸	۲۸۰۰	۱۷,۱۳۵	۱۹,۹	۲۸
۱۹۵۰	۱۵,۸۹۵	۱۳,۲	۲۶	۲۸۴۰	۱۷,۱۳۵	۱۹,۹	۱۷
۱۹۹۰	۱۵,۸۹۵	۱۳,۲	۳۰	۲۸۵۰	۱۷,۳۶۵	۱۸,۲	۲۹
۲۰۰۰	۱۶,۴۹۵	۱۳,۲	۲۱	۲۹۰۰	۱۷,۶۷۵	۱۸,۰	۲۴
۲۰۲۰	۱۶,۴۹۵	۱۳,۲	۱۹	۲۹۵۰	۱۷,۵۲۵	۱۷,۴	۲۰
۲۰۳۰	۱۶,۴۹۵	۱۳,۲	۱۸	۲۹۶۰	۱۷,۵۲۵	۱۷,۴	۲۹
۲۰۵۰	۱۶,۶۵۵	۱۳,۲	۱۸	۲۹۹۰	۱۷,۵۲۵	۱۷,۴	۱۴
۲۱۰۰	۱۶,۲۶۵	۱۳,۵	۲۵	۳۰۰۰	۱۸,۵۵۵	۱۷,۰	۷
۲۱۵۰	۱۶,۳۹۵	۱۴,۰	۲۳	۳۱۵۰	۲۰,۷۴۵	۱۸,۲	۱۶
۲۱۹۰	۱۶,۳۹۵	۱۴,۰	۲۰	۳۲۰۰	۲۲,۵۴۵	۱۷,۶	۱۸
۲۲۰۰	۱۴,۴۱۵	۱۴,۲	۲۰	۳۲۵۰	۲۴,۶۸۵	۱۷,۸	۲۷
۲۲۵۰	۱۶,۴۱۵	۱۴,۶	۱۹	۳۳۰۰	۲۶,۳۹۵	۱۷,۴	۳۲
۲۲۷۰	۱۶,۴۱۵	۱۴,۶	۱۹	۳۳۵۰	۲۵,۶۵۶	۱۷,۴	۲۶
۲۳۰۰	۱۶,۶۰۵	۱۴,۸	۳۴	۳۳۸۰	۲۵,۶۵۶	۱۷,۴	۱۸
۲۳۵۰	۱۶,۸۴۵	۱۵,۰	۱۸	۳۴۰۰	۲۴,۱۷۵	۱۷,۴	۱۸
۲۳۹۰	۱۶,۸۴۵	۱۵,۰	۷	۳۴۴۰	۲۴,۱۷۵	۱۷,۴	۲۳
۲۴۰۰	۱۶,۸۶۵	۱۵,۸	۹	۳۴۵۰	۲۱,۹۹۵	۱۷,۴	۲۳
۲۴۴۰	۱۶,۸۶۵	۱۵,۸	۴	۳۵۰۰	۲۱,۴۷۵	۱۶,۶	۲۰
۲۴۵۰	۱۶,۸۹۵	۱۶,۰	۱	۳۵۵۰	۲۰,۷۹۵	۱۵,۶	۱۴
۲۵۰۰	۱۶,۸۱۵	۱۷,۰	۷	۳۶۰۰	۲۱,۰۳۵	۱۴,۶	۷
۲۵۵۰	۱۶,۸۷۵	۱۸,۰	۱۳	۳۶۳۰	۲۱,۰۳۵	۱۴,۶	۱۵
۲۵۷۷	۱۶,۸۷۵	۱۸,۰	۲۵	۳۶۵۰	۲۰,۵۵۵	۱۴,۶	۱۵
۲۶۰۰	۱۶,۸۱۵	۱۹,۴	۲۱	۳۶۶۰	۲۰,۵۵۵	۱۴,۶	۱۶
۲۶۵۰	۱۶,۸۱۵	۲۰,۰	۳۳	۳۶۹۰	۲۰,۵۵۵	۱۴,۶	۱۶
۲۷۰۰	۱۶,۹۹۵	۲۱,۰	۲۰	۳۷۰۰	۲۰,۷۱۵	۱۴,۲	۱۴
۲۷۵۰	۱۷,۰۵۵	۲۱,۸	۲۳				

مقطع مشاهده می‌شوند. در هنگام ثبت نشست‌های ذکر شده، جبهه‌ی تونل به اندازه‌ی کافی از مقطع ۲+۵۷۷ دور بوده است. براساس شکل ۵ واضح است که تابع گاوس با فرض مقدار ۰٫۳۵ برای  $K$  که تقریباً متوسط بازه‌ی پیشنهادی در ادبیات فنی برای خاک‌های عمدتاً درشت‌دانه است، تطابق کاملی با واقعیت دارد.

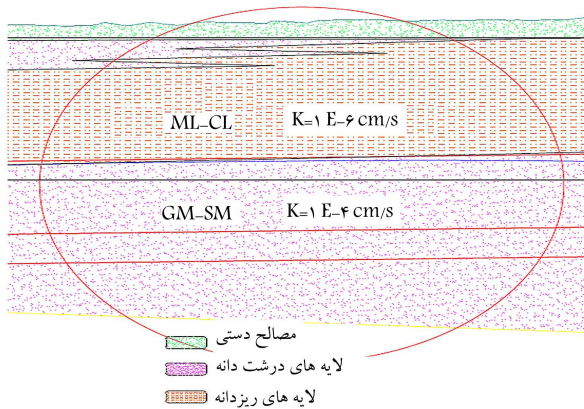
در شکل ۵، مقادیر محاسبه شده برای پارامتر عرض منحنی نشست،  $i_x$  به ازاء مقادیر مختلف  $K$  مشاهده می‌شود. عمق محور تونل در کیلومترهای ۳+۳۰ به مقدار بیشینه‌ی خود در محدوده‌ی مورد بررسی رسیده و  $i_x$  را به طرز قابل توجهی افزایش داده است. چنانکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میانگین نشست سطحی بیشینه در طول مسیر حدود ۲ میلی‌متر بوده و مقدار آن به استثناء ۳ مقطع در طول مسیر از ۳ میلی‌متر تجاوز نکرده است. در حد فاصل کیلومترهای ۲+۴۰ تا ۲+۵۰، نشست‌های بیشینه کمترین مقدار خود را داشته‌اند. براساس مطالعات



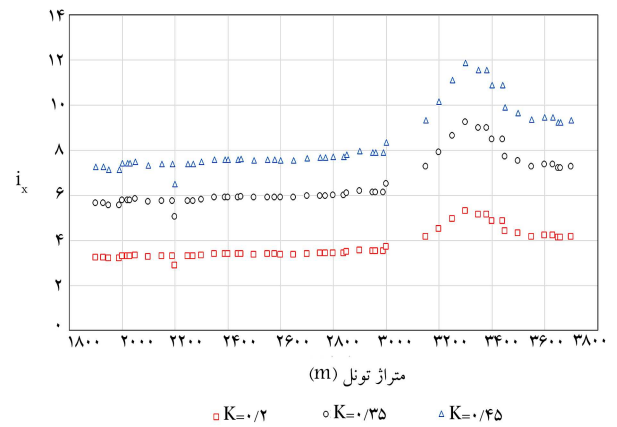
شکل ۵. منحنی نشست‌های عرضی در کیلومترهای ۲+۵۷۷.



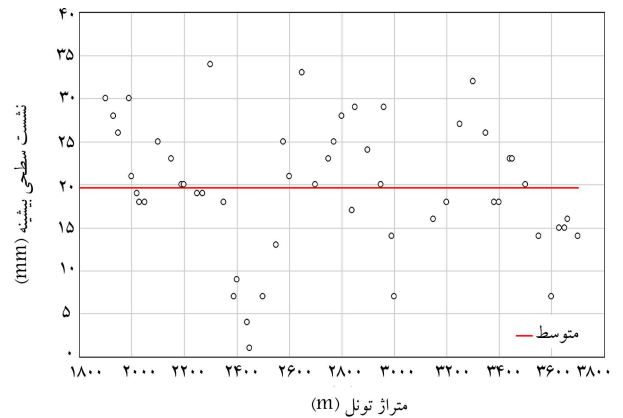
شکل ۸. افت حجم زمین با فرض مقدار  $K=0.35$  برای  $K$ .



شکل ۹. نقشه‌ی زمین‌شناسی مهندسی کیلومتر ۲+۷۰۰.



شکل ۶. مقادیر محاسبه شده برای پارامتر  $i_x$  در طول تونل.



شکل ۷. نشست‌های سطحی بیشینه در بالای محور تونل.

تا  $5^\circ$  (متر)، در پشت جبهه‌ی حفاری تونل به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. نشست‌های سطحی بیشینه در  $17$  مقطع از مقدار مجاز  $25$  میلی‌متر تجاوز نکرده است. در  $2$  مقطع فقط در یک نقطه در فاصله‌ی بیش از  $45$  متری از جبهه‌ی تونل، نشست بیشینه به صورت جزئی از  $25$  میلی‌متر بیشتر بوده و فقط در مقطع  $2706668-S$  نشست‌های سطحی از محدوده‌ی مجاز عبور کرده است. در حالت کلی، دامنه‌ی نشست‌های طولی از شفت غربی تا ایستگاه  $2-S$ ، بین نشست‌های طولی ثبت شده در مقطع  $3699-S$  از بالا و مقطع  $3318-S$  از پایین محدود بوده است. با تأمل بیشتر در شکل  $10$  مشخص می‌شود که مقدار نشست سطحی درست در بالای جبهه‌ی حفاری  $S_f$  در  $19$  مقطع، به  $5$  میلی‌متر محدود بوده است. از طرف دیگر، شیب تغییرات منحنی‌های نشست طولی تقریباً در فاصله‌ی  $10$  متری در پشت جبهه‌ی حفاری افزایش معناداری داشته است. یعنی نشست‌های سطحی درست در پشت سپر TBM افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. چنانچه بیشتر اشاره شد، لایه‌ی خاک ریزدانه پیرامون تونل در کیلومتر ۲+۵۰۰ بیشترین سختی خود را داشته است. از این رو کمترین مقادیر نشست طولی در هنگامی که جبهه‌ی حفاری در کیلومتر ۲+۵۵۹۶۸۷ قرار گرفته است، در فاصله‌ی  $4$  تا  $5$  برابر قطر تونل از جبهه‌ی حفاری (حوالی متر ۲۵۰) رخ داده است.

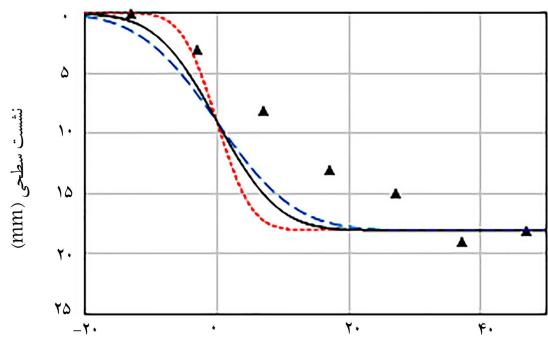
در شکل  $11$  الی  $14$ ، تکامل تدریجی نشست‌های سطحی با منحنی تجمعی احتمالی گاوس در  $4$  مقطع مختلف محاسبه و منحنی نشست‌های طولی با فرض اینکه  $i_x = i_y$  باشد، رسم شده است. مقطع‌های مذکور به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند. با توجه به شکل‌ها، منحنی‌های نشست‌های طولی به دست آمده از رابطه‌ی

ژئوتکنیکی گمانه‌ی  $2$  NW در کیلومتر ۲+۵۰۰، بیشترین مقادیر آزمایش SPT مربوط به لایه‌ی ریزدانه (CL) در بالای تاج تونل در محدوده‌ی مذکور ثبت شده است. به عبارت بهتر، مدول کشسانی زمین در کیلومتر ۲+۵۰۰، بیشینه‌ی مقدار خود را داشته است.<sup>[۹]</sup>

در حقیقت بزرگی افت حجم زمین به نوع خاک و روش تونل‌سازی بستگی دارد. به طور خاص در تونل‌سازی توسط دستگاه EPB با جبهه‌ی بسته در خاک‌های درشت‌دانه، یک مقدار محتمل برای میانگین افت حجم زمین برابر  $0.05\%$  مطرح شده است.<sup>[۱۴]</sup> با این توضیحات نتایج رفتارسنجی نشان می‌دهد عملیات حفاری خط  $2$  متروی تبریز در محدوده‌ی شفت غربی تا ایستگاه  $2-S$  (محدوده‌ی مورد مطالعه) به خوبی تحت کنترل بوده و افت حجم زمین با مقدار مجاز در ادبیات فنی و مطالعات پیشین کاملاً سازگار است.

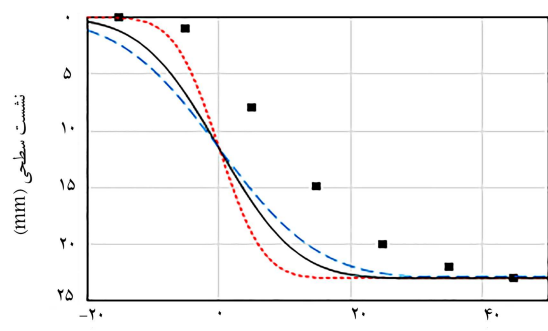
شکل  $7$  نشان می‌دهد که در حوالی کیلومتر ۲+۷۰۰، عمق لایه‌ی ریزدانه بالای تونل با سختی پایین افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که جبهه‌ی حفاری به کیلومتر ۲+۷۰۶۶۸۶۸ رسیده است، نشست‌ها در پشت آن به طور گسترده‌ی افزایش یافته و از محدوده‌ی نشست‌های طولی مسیر تجاوز کرده است.

در شکل  $8$ ، تکامل تدریجی نشست‌های سطحی اندازه‌گیری شده بر روی محور تونل (منحنی‌های نشست‌های سطحی طولی) در  $20$  مقطع مندرج در جدول  $2$  به صورت توابعی از فاصله از جبهه‌ی تونل  $y$  رسم شده است. با توجه به شکل  $10$  می‌توان گفت نشست‌های سطحی در فاصله‌ی  $5$  تا  $10$  متر (متر) در جلوی جبهه‌ی حفاری آغاز شده و تقریباً در فواصل  $4$  تا  $5$  برابر قطر تونل ( $40$



شکل ۱۳. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۳۲۱۷.

شکل ۱۳. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۳۲۱۷.

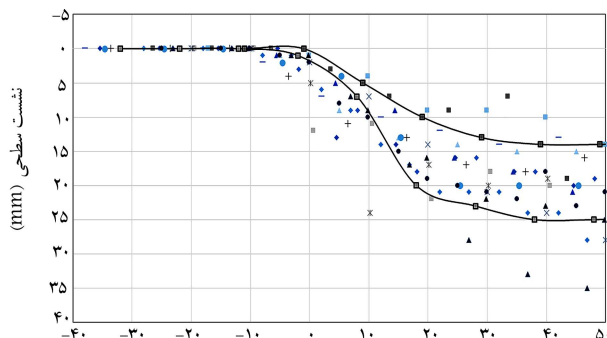


شکل ۱۴. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۳۴۸۵.

شکل ۱۴. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۳۴۸۵.

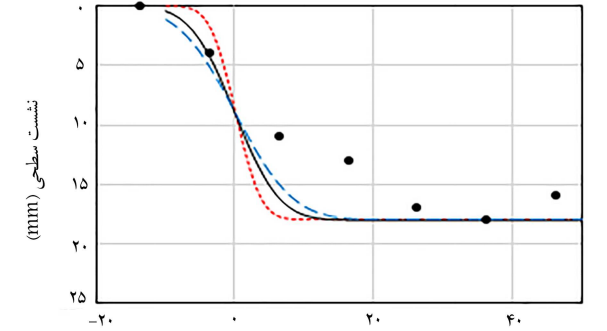
واقعیت رخ داده است، پیش‌بینی شده است. در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه S-۱، در محدوده‌ی مترای ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰، چسبندگی خاک به کمترین مقدار و در مترای ۲۷۹۰ تا ۲۸۳۰، سطح آب زیرزمینی به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. این عوامل می‌توانند باعث افزایش نشست‌های خاک در مقطع S-۳۴۸۵ (شکل ۱۴) و نیز عدم پیروی نشست‌های آن از پیش‌بینی‌ها شده باشند.

در مورد روند تکامل نشست‌های سطحی ناشی از حفاری با دستگاه TBM، اتول و همکاران (۱۹۸۶) فرض کرده‌اند که در حالت کلی، نشست در بالای جبهه‌ی تونل با ۵۰٪ نشست بیشینه برابر است. [۱۵] میر ۱۶ و تیلور ۱۷ (۱۹۹۷) نیز نتیجه گرفته‌اند که برای تونل‌سازی با جبهه‌ی بسته، نشست‌هایی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد نشست بیشینه در بالای جبهه‌ی تونل اتفاق می‌افتد. [۱۲] منحنی خط چین در شکل ۳ نتیجه‌گیری ذکر شده را نشان می‌دهد. همچنین کریگ ۱۸ و مویروود ۱۹ (۱۹۷۸) اعلام کردند درصدی از نشست بیشینه که در جلوی سپر، طول و پشت سپر اتفاق می‌افتد، در خاک‌های مختلف فرق می‌کند. جدول ۲، محدوده‌ی درصد‌های مذکور را در حالت کلی نشان می‌دهد. کریگ و مویرگزارش داده‌اند که در ۸۰ تا ۹۰ درصد موارد، نشست بیشینه هنگامی کاملاً اتفاق خواهد افتاد که جبهه‌ی حفاری تونل تا فاصله‌ی ۱ تا ۲ برابری قطر تونل از نقطه‌ی مورد نظر دور شده باشد. همچنین بر روی محور تونل، نشست‌ها در فاصله‌ی برابر با نصف عرض منحنی نشست‌های عرضی ( $\frac{B}{4}$ ) از جبهه‌ی تونل آغاز می‌شود. [۱۶]



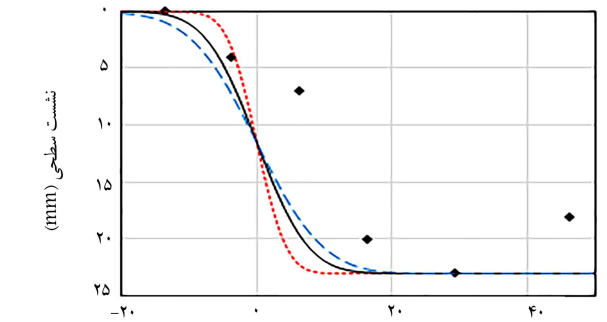
شکل ۱۰. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل.

شکل ۱۰. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل.



شکل ۱۱. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۲۱۵۶.

شکل ۱۱. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۲۱۵۶.

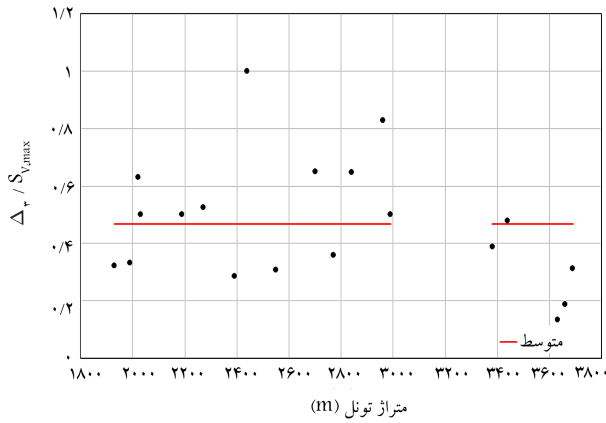


شکل ۱۲. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۲۶۰۶.

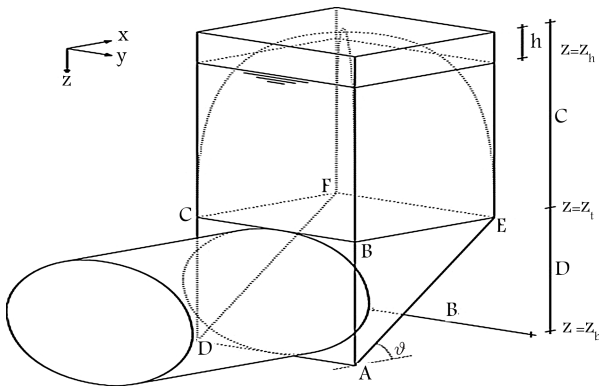
شکل ۱۲. نشست‌های سطحی طولی اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل و منحنی گaus در مقطع S-۲۶۰۶.

تجربی گaus با استفاده از مقدار ۰/۳۵ برای  $K$  تطابق زیادی با مقادیر نشست‌های طولی اندازه‌گیری شده ندارد.

براساس شکل ۱۱ الی ۱۴ می‌توان گفت تقریباً در فاصله‌ی  $\pm 2i$  از جبهه‌ی تونل تابع جمع‌ی گaus با استفاده از مقادیر مختلف  $K$  پیشنهادی در ادبیات فنی برای خاک‌های عمدتاً درشت‌دانه، نشست‌های بیشتری در قیاس با آنچه که در



شکل ۱۶. نسبت  $\Delta\tau$  به نشست نهایی.



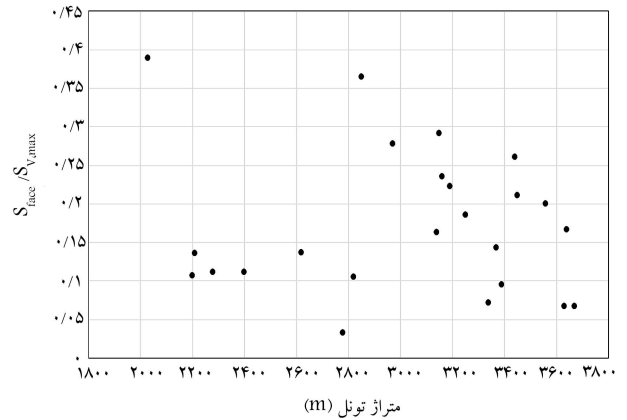
شکل ۱۷. مدل سطح گسیختگی گوهی فرضی جابوی جبهه‌ی کار.

مواقع بین ۰/۳ تا ۰/۶۵ بوده و میانگین ۰/۴۶ داشته است. به عبارت بهتر، به طور متوسط ۵۴٪ از مقادیر نشست‌های سطحی اتفاق افتاده در یک مقطع، به فضای خالی انتهای سپر و فرایند تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها مربوط بوده است.

برای بررسی‌های بیشتر تأثیر پارامترهای مهم EPB یعنی فشار جبهه‌ی کار و فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها در انتهای سپر، رابطه‌ی پارامترهای ذکر شده با نشست‌های مشاهده شده در خط ۲ متروی تبریز تحلیل شده است. در حفاری با دستگاه TBM-EPB جهت جلوگیری از تخریب جبهه‌ی کار و هجوم خاک به درون تونل به ویژه در زمین‌های نسیست که منجر به نشست قابل توجه زمین می‌شوند، مواد حفاری شده در کله‌ی حفاری باید متناسب با مقدار پیشروی دستگاه خارج شوند. این امر منجر به ایجاد فشاری در چمبر می‌شود که به آن فشار جبهه‌ی کار می‌گویند.<sup>[۱۷]</sup> یکی از روش‌های بررسی پایداری ساختار خاک استفاده از روش‌های تحلیلی است که به کمک آن‌ها می‌توان حدود ناپایداری را در ساختار خاک تعیین کرد. در مطالعه‌ی حاضر، برای تحلیل فشار جبهه‌ی کار، با توجه به شرایط عمدتاً درشت‌دانه با چسبندگی کم خاک در طول مسیر خط ۲ متروی تبریز، از روش جانسنز<sup>۲۱</sup> - اشتینز<sup>۲۲</sup> که برای خاک‌های غیرچسبنده ارائه شده است، استفاده شده است. جانسنز و اشتینز، مدل سه بعدی جبهه‌ی کار را براساس گوهی خاک ایجاد شده در جبهه‌ی کار ارائه داده‌اند (شکل ۱۷). در روش تحلیلی مذکور، نیروهای ممکن محتمل در مکانیزم شکست با استفاده از آنالیز تعادل حدی بررسی می‌شوند.<sup>[۱۸]</sup> براساس رابطه‌ی ارائه شده توسط جانسنز و اشتینز، میزان فشار جبهه‌ی کار از معادلات ۱۷ الی ۱۰ محاسبه می‌شود:

جدول ۲. روند کلی تکامل نشست‌های ناشی از حفاری با سپر به گزارش کریگ و مویر (۱۹۷۸).

درصدی از نشست نهایی که رخ داده است		نوع خاک
در جبهه‌ی کار (%)	در انتهای سپر (%)	
۳۰-۵۰	۶۰-۸۰	ماسه‌ی بالای سطح آب زیرزمینی
۳۰-۶۰	۵۰-۷۵	رس سفت
۰-۲۵	۵۰-۷۵	ماسه‌ی پایین سطح آب زیرزمینی
۰-۲۵	۳۰-۵۰	سیلت و رس نرم

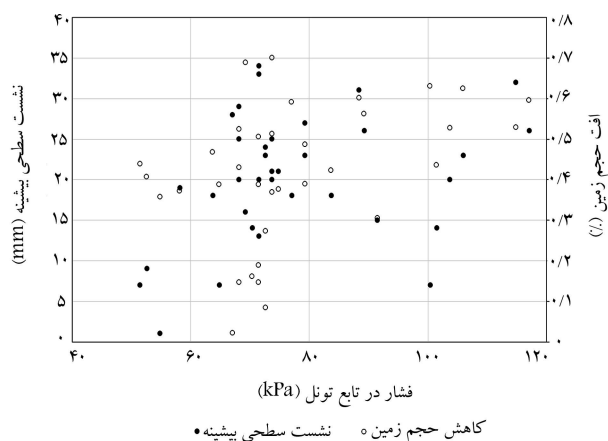


شکل ۱۵. نسبت نشست جبهه‌ی تونل به نشست نهایی.

مشاهدات میدانی<sup>۲۰</sup> مربوط به تونل‌سازی در ماسه‌ی سست، رس نرم، سیلت‌ها و در ماسه‌ی متوسط تا متراکمی که بر روی لایه‌ی رس قرار گرفته است، نشان می‌دهد که بخش بزرگی از نشست‌ها به فضای خالی انتهای سپر مربوط است. از این رو در حالت کلی، نشست سطحی در بالای جبهه‌ی تونل کمتر از ۵٪ نشست بیشینه (نهایی) است.<sup>[۲۱]</sup> شکل ۱۵ نشان می‌دهد در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه S۰۱ خط ۲ متروی تبریز، نشست در بالای جبهه‌ی تونل اغلب بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ نشست بیشینه (نهایی) و در حد فاصل ایستگاه S۰۱ تا ایستگاه S۰۲ کمتر از ۰/۳ نشست بیشینه (نهایی) بوده است. البته در دو نقطه از طول مسیر نسبت نشست جبهه‌ی تونل به نشست بیشینه (نهایی) بیشتر از ۰/۳ بوده است، اما هرگز از ۰/۴ تجاوز نکرده است. این امر نشان می‌دهد پایداری جبهه‌ی کار در طول حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز در حد مطلوبی کنترل شده است.

اگر این بحث با جزئیات بیشتری بررسی شود، نشست ناشی تونل‌سازی در یک مقطع به ۴ بخش تقسیم می‌شود: ۱. نشست‌هایی که در جابوی سپر روی می‌دهند و در حالت کلی قابل صرف‌نظر هستند ( $\Delta_1$ )؛ ۲. نشست‌های جزئی که زمان کوتاهی پیش از رسیدن سپر به آن مقطع رخ می‌دهند ( $\Delta_2$ )؛ ۳. نشست‌هایی که طی عبور سپر به وقوع می‌پیوندند ( $\Delta_3$ ) و در نهایت، ۴. نشست‌هایی که پس از عبور سپر و به دلیل فضای انتهایی خالی سپر اتفاق می‌افتند ( $\Delta_4$ ).<sup>[۲۲]</sup> اگر در یک مقطع، دقیقاً در هنگامی که جبهه‌ی حفاری تونل به اندازه‌ی طول سپر (۹ متر در پروژه‌ی خط ۲ متروی تبریز) از آن مقطع دور شده است، نشست‌ها اندازه‌گیری شوند، مقدار اندازه‌گیری شده در لحظه‌ی ذکر شده با  $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$  برابر است. البته با توجه به جزئی بودن  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$  می‌توان آن‌ها را متناظر با  $\Delta_3$  فرض کرد. بر همین اساس در برخی از بین‌های خط ۲ متروی تبریز، مقادیر مربوط به  $\Delta_3$  قرائت و در شکل ۱۶ در نسبت آن‌ها به نشست بیشینه‌ی نهایی ( $\Delta_3 / S_{v,max}$ ) مشاهده می‌شود که مطابق آن نسبت  $\Delta_3 / S_{v,max}$  در اغلب





شکل ۱۹. نشست سطحی نهایی و افت حجم زمین به‌عنوان تابعی از فشار اعمال شده به جبهه‌ی کار.

رابطه‌ی جانسز با فشار اعمال شده به جبهه‌ی کار در طول عملیات تطابق بیشتری دارد. البته در فاصله‌ی متر از ۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ که زمین کمترین مقدار چسبندگی را دارد، رابطه‌ی جانسز در جهت اطمینان نبوده و مقادیر کمتری نسبت به واقعیت پیش‌بینی کرده است. در حد فاصل ایستگاه ۵۰۱ S تا ایستگاه ۵۰۲ S و با افزایش عمق محور تونل و عمق لایه‌ی ریزدانه‌ی بالای تونل، رابطه‌ی جانسز تطابق کمتری با واقعیت داشته است، اما کاملاً در جهت اطمینان عمل کرده است. بنابراین در حالت کلی در پروژه‌ی حاضر می‌توان به رابطه‌ی جانسز نمره‌ی قبولی داد. بررسی‌هایی که در مطالعه‌ی حاضر انجام شده است، نشان می‌دهد رابطه‌ی مستقیمی بین فشار جبهه‌ی کار و نشست در جبهه‌ی تونل  $S_f$  (در بین‌هایی که نشست‌ها در جبهه‌ی تونل قرارت شده است) استخراج نمی‌شود. شکل ۱۹ برای بررسی رابطه‌ی احتمالی پارامترهای افت حجم زمین و نشست بیشینه (نهایی) با فشار اعمالی به جبهه‌ی کار رسم شده است. برای این منظور، در هر بین، میانگین فشارهای اعمالی به جبهه‌ی کار در ۴ سگمنت از پوشش تونل در طرفین آن بین محاسبه شده و در نهایت، این مقادیر به‌عنوان محور افقی شکل انتخاب شده‌اند. پراکندگی داده‌های شکل ۱۹ نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی بین فشار جبهه‌ی کار و پارامتر افت حجم زمین وجود نداشته است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که در طول عملیات حفاری، با توجه به شرایط زمین، فشار جبهه‌ی کار توری تنظیم شده است تا نشست‌های سطحی در محدوده‌ی مجاز باقی بمانند. مقایسه‌ی شکل ۷ با شکل ۱۸ نشان می‌دهد روند تغییرات فشار جبهه‌ی کار با نشست بیشینه‌ی نهایی در هر بین کاملاً متناسب بوده است؛ و در صورتی که شرایط زمین بهتر باشد، فشار کمتری به جبهه‌ی کار اعمال می‌شود. به عبارت بهتر، مقدار فشار اعمالی به جبهه‌ی کار برای نگه داشتن نشست بیشینه در حد مجاز تغییر یافته است، نه برای ممانعت از وقوع هرگونه نشست.

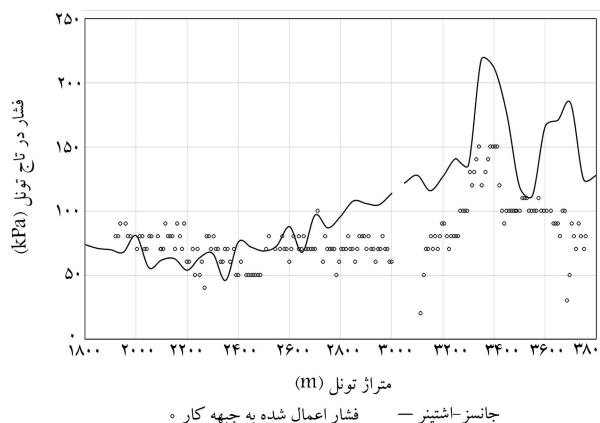
در عملیات تونل سازی با TBM، فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها نقش مستقیمی در بزرگی نشست (به ویژه  $\Delta z$ ) دارد. دوغاب با هدف پُر کردن فضای خالی انتهای سیر در پشت سگمنت‌ها، بلافاصله پس از عبور سیر تزریق می‌شود. در شکل ۲۰، مقادیر فشار تزریق دوغاب در حد فاصل ایستگاه ۵۰۱ S و ۵۰۲ S نشان داده شده است. چنانکه واضح است، تغییرات فشار تزریق در مقایسه با فشار اعمالی به جبهه‌ی کار، دامنه‌ی محدودتری داشته و تغییرات شدیدی را تجربه نکرده است. همچنین مقادیر فشار تزریق اندازه‌گیری شده با مقادیر فشار جبهه‌ی کار اندازه‌گیری شده به‌علاوه‌ی ۵/۵٪، بار، تطابق بسیار خوبی داشته است. در عمل معمولاً

جدول ۳. معرفی پارامترهای رابطه‌ی تحلیلی جانسز - اشتینر.

پارامتر	توضیح	واحد
$\varphi$	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	-
$K_{a\alpha}$	ضریب فشار سه‌بعدی خاک در حالت فعال	-
$\alpha$	ضریب عمق تونل	-
$C$	روباره‌ی تونل	$m$
$D$	قطر تونل	$m$
$\beta$	زاویه‌ی گسیختگی با سطح افق	$deg$

جدول ۴. تعیین زاویه‌ی لغزش گوهی گسیختگی (جانسز - اشتینر).

$\frac{C}{D}$	$K_{a\alpha}$			
	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$
۰	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵
۱	۰٫۱۵۹	۰٫۱۹۹	۰٫۲۴۸	۰٫۳۱۰
۲	۰٫۱۴۱	۰٫۱۷۷	۰٫۲۲۲	۰٫۲۷۹
۳	۰٫۱۳۸	۰٫۱۷۳	۰٫۲۱۷	۰٫۲۷۳
	۰٫۱۳۶	۰٫۱۷۱	۰٫۲۱۴	۰٫۲۷۱



شکل ۱۸. مقادیر فشار اعمال شده به جبهه‌ی کار در طول حفاری تونل و مقایسه‌ی آن‌ها با رابطه‌ی تحلیلی جانسز - اشتینر.

$$\sigma_T = K_{a\alpha} \sigma'_v \quad (7)$$

$$K_{a\alpha} = \frac{\sin \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \varphi - \frac{K \alpha \cos \beta \tan \varphi}{1.75}}{\sin \beta \cos \beta + \sin^2 \beta \tan \varphi} \quad (8)$$

$$K = \left( 1 - \sin \varphi + \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right) \quad (9)$$

$$\alpha = \left( 1 + \frac{3C}{D} \right) / \left( 1 + \frac{2C}{D} \right) \quad (10)$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه‌ی تحلیلی جانسز در جدول ۳ معرفی شده است. در رابطه‌ی اخیر، زاویه‌ی لغزش گوه با استفاده از جدول ۴ برای مقاطع مختلف محاسبه شده است که در آن زاویه‌ی لغزش به‌صورت تابعی از نسبت روپاره به قطر تونل و زاویه‌ی اصطکاک داخلی برای مقاطع مختلف تعیین می‌شود.<sup>[۱۹]</sup>

در شکل ۱۸، مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی فشار جبهه‌ی کار در فواصل ۹ متری (طول ۶ حلقه‌ی سگمنت) و همچنین مقادیر محاسبه شده توسط رابطه‌ی جانسز - اشتینر مشاهده می‌شود که مطابق آن در حد فاصل شفت غربی تا ایستگاه ۵۰۱ S،



۱. رابطه‌ی تجربی گاوس در محاسبه‌ی نشست‌های عرضی تطابق بهتری با واقعیت دارد و نشست‌های طولی را در حد فاصل  $\pm 2i$  با اختلاف مشهودی بیشتر از واقعیت محاسبه کرده است. همچنین فرض  $i_x = i_y$  چندان دقیق نیست.

۲. سهم فضای خالی انتهای سپر در تکامل نشست‌های بیشینه (نهایی) بیشتر از سایر مؤلفه‌های وقوع نشست بوده و به طور میانگین بیش از ۵٪ از مقدار نشست‌ها در انتهای سپر و هم‌زمان با تزریق دوغاب رخ داده است.

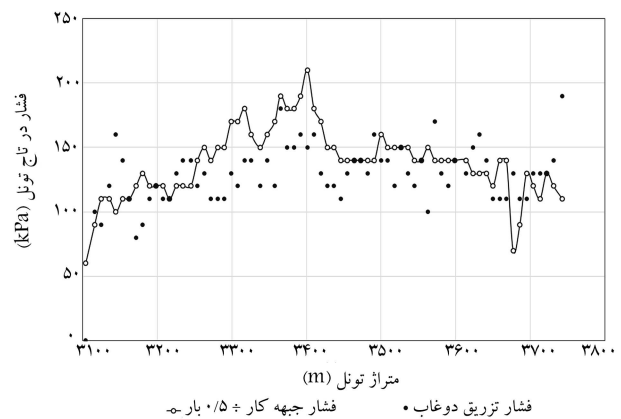
۳. در طول عملیات حفاری خط ۲ متروی تبریز، تغییرات فشار جبهه‌ی کار توسط اپراتور به گونه‌ی تنظیم شده است که نشست‌ها تقریباً از محدوده‌ی مجاز تجاوز نکنند و رابطه‌ی مشخصی بین مقادیر فشار اعمالی به جبهه‌ی کار و پارامترهای نشست بیشینه و افت حجم زمین استخراج نمی‌شود.

۴. با توجه به وجود چسبندگی اندک خاک در طول مسیر مورد بررسی متروی تبریز، رابطه‌ی جانسنز- اشتینر در محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی کار در جهت اطمینان عمل کرده و مقادیر بیشتری را نسبت به آنچه که عملاً اعمال شده، محاسبه کرده است.

۵. متوسط نشست بیشینه (نهایی) حدود ۲۰ میلی‌متر و متوسط افت خاک ۴۵٪ نشان می‌دهد که در اجرای پروژه‌ی خط ۲ متروی تبریز در حد فاصل شفت غربی با ایستگاه S۰۲، کنترل خوبی بر فرایند حفاری و نشست‌های ناشی از آن صورت گرفته است.

## تشکر و قدردانی

در نهایت از سازمان قطار شهری تبریز و مدیر محترم پروژه‌ی خط ۲ متروی تبریز که با همدلی و همکاری و در اختیار گذاشتن اطلاعات پروژه‌ی متروی تبریز اشتیاق وافر خود را جهت رشد پژوهش‌های علمی و کاربردی نشان دادند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.



شکل ۲. مقادیر فشار تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها در طول حفاری و در حد فاصل ایستگاه S۰۱ تا ایستگاه S۰۲.

فشار تزریق را برابر «فشار جبهه‌ی کار به علاوه‌ی ۰/۵ بار» فرض می‌کنند.<sup>[۲۰]</sup> نتایج خط ۲ متروی تبریز صحت این فرض را تأیید می‌کند. بر اساس شکل ۲ در حوالی متر ۳۳۰۰، فشار تزریق از «فشار جبهه‌ی کار به علاوه‌ی ۰/۵ بار» کمتر و تقریباً با فشار جبهه‌ی کار برابر بوده است. با مراجعه به شکل‌های ۷ و ۱۶ مشخص است که بیشترین مقادیر افت حجم زمین در متر ۳۳۰۰ و پیرامون آن اتفاق افتاده است. این در حالی است که کمترین مقدار نسبت نشست جبهه‌ی حفاری به نشست بیشینه (نهایی) نیز به متر ۳۳۰۰ مربوط است. بنابراین می‌توان گفت پایین بودن فشار تزریق در متر ۳۳۰۰، منجر به افزایش نشست و افت بیشتر حجم زمین شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، در حفاری تونل سطحی در خاک عمدتاً درشت‌دانه با چسبندگی کم، این نتایج به دست آمده است:

## پانویس‌ها

1. green-field
2. Turo line 2
3. tunnel boring machine
4. compressed air
5. slurry shield
6. earth pressure balanced
7. rotational cutter-head
8. Chamber
9. Segment
10. Peck
11. O'Reilly
12. New
13. Attewell
14. Woodman
15. pin
16. Mair

17. Taylor
18. Craig
19. Muir Wood
20. field observation
21. Jancsecz
22. Steiner

## منابع (References)

1. Lambrugh, A., Medina Rodriguez, L. and Castellanza, R. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavation", *Computers and Geotechnics*, **40**, pp. 97-113 (2012).
2. Fargnoli, V., Boldini, D. and Amorosi, A. "TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case study of the new underground line 5", *Tun-*

- nelling and Underground Space Technology*, **38**, pp. 336-347 (2013).
3. Peck, R.B. "Deep excavation and tunnelling in soft grounds", 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290 (1969).
  4. Potts, D.M. and Addenbrooke, T.I. "A structure's influence on tunnelling-induced ground movements", *Proceeding of institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **125**(2), pp. 109-125 (Apr., 1997).
  5. Moh, Z.C. and Hwang, R.N. "Ground movements around tunnels in soft ground", Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, Balkema, pp. 725-730 (1996).
  6. Eslami, B. and Golshani, A. "3D stability analysis of heterogeneous face excavation by TBM-EPB machine - case study line2 METRO of mashhad", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **33.2**(1.1), pp. 121-128 (2017).
  7. Heidari Sheiban, R., Zare, S., Mirzaei, H. and et al. "Numerical study of face pressure effect on surface settlement in soft ground mechanized tunneling-A case study: Tehran metro line 7", *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, **1**(1), pp. 57-67 (2013).
  8. Rahmancejad, R., Esfandiary, M., Namazi, E. and et al. "Numerical analysis of longitudinal and transverse surface settlement induced by EPB tunneling-A case Study: Shiraz subway tunnels", *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, **2**(2), pp. 87-100 (2014).
  9. Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajjalilue-Bonab, M. and et al. "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specification on shield tunnel lining loads (by FEM)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, pp. 67-78 (2015).
  10. Moeller, S. "Tunnel induced settlements and structural forces in linings", PhD Thesis, University of Stuttgart (2006).
  11. O'Reilly, M.P. and New, B.M. "Settlements above tunnels in United Kingdom-their magnitude and prediction", *Tunnelling '82 Symposium*, London IMM, pp.173-181 (1982).
  12. Mair, R.J. and Taylor, R.N. "Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment", *14th Int. Conf. on SMFE, Hamburg*, 4, pp. 2353-2385 (1997).
  13. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil", *Ground Engineering*, **15**(8), pp. 13-22 (1982).
  14. Mair, R.J. "Settlement effects of bored tunnels", Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, Balkema, pp. 43-53 (1996).
  15. Attewell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R. "Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures", Blackie, Glasgow (1986).
  16. Craig, R.N. and Muir Wood, A.M. "A review of tunnel lining practice in the United Kingdom", 335, Transport and Road Research Laboratory (1978).
  17. BAh, H., ZamZam, M. and Mousavi, E. "Evaluation face minimum pressure for urban tunneling using an EPB machine and analytical and numerical methods case study: Tunnel for line 7, Tehran subway (East-West)", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **31.2**(3.1), pp. 137-145 (2015).
  18. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and et al. "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control", Taylor & Francis Group, London, UK (2008).
  19. Jancsecz, S. and Steiner, W. "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", *Tunnelling'94*: Springer, pp. 531-550 (1994).
  20. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U. and et al. *Mechanised Shield Tunnelling*, 2nd Edition, Wiley (2012).