نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره نهم، شماره۳، پاییز ۱۴۰۴، صفحه ۹۷ تا ۱۱۶
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2025.550181.1070

تحلیل عددی رفتار تغییرشکلی تونل و نشست سطحی در خاک‌های رسی لایه‌ای با تمرکز بر نسبت روباره به قطر تونل

محمد پوریا آقائی[1*]؛ صادق طریق ازلی[2]؛ آرمین مقبلی[3]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی‌شریف، تهران، ایران.

۲- مدیرعامل شرکت مهندسین مشاور رهسازطرح، تهران، ایران.

۳- مدیر بخش سازه شرکت مهندسین مشاور رهساز طرح، تهران، ایران.

دریافت : ۱۴۰۴/۰۸/۰۲؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

(*نویسنده مسئول: pooria.aghaie401@sharif.edu)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر نسبت روباره به قطر تونل (*H/D*) بر رفتار تغییرشکلی زمین و پاسخ پوشش اولیه در خاک‌های رسی لایه‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد. قطر تونل ثابت در نظر گرفته شد و نسبت *H/D* در بازه ۰/۵ تا ۳/۵ انتخاب گردید تا شرایط تونل‌های کم‌عمق تا عمیق شبیه‌سازی شود. تحلیل‌ها با روش اجزای محدود و با به‌کارگیری مدل رفتاری *Hardening Soil* انجام شد و فرآیند حفاری و اجرای پوشش اولیه شاتکریتی به‌صورت مرحله‌ای مدل‌سازی گردید تا توالی اجرایی به‌طور واقع‌بینانه لحاظ شود. برای ارزیابی پاسخ سیستم، شاخص‌هایی شامل بیشینه نشست سطح زمین، پهنای حوضه نشست، همگرایی قائم و افقی مقطع، بیضوی‌شدن تونل و اتلاف حجم دوبعدی محاسبه شد و منحنی‌های نشست با تابع گاوسی پک برازش داده شدند. نتایج نشان داد رفتار نشست به‌شدت تحت تأثیر لایه‌بندی و سختی خاک است. با افزایش *H/D* در لایه‌های سطحی سخت‌تر، پهنای حوضه نشست حدود ۳۰٪ کاهش یافت، در حالی‌که با ورود تونل به لایه نرم‌تر میانی این مقدار حدود ۳۰٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده گسترش جانبی تغییرشکل‌ها در خاک نرم‌تر است. در مقابل، نشست بیشینه سطح زمین حدود ۳۰٪ افزایش نشان داد و اتلاف حجم دوبعدی بیش از ۱۰۰٪ رشد داشت که بیانگر توسعه ناحیه پلاستیک در روباره‌های بیشتر است. همچنین بیضوی‌شدن مقطع تونل حدود ۷۵٪ و همگرایی قائم حدود ۸۵٪ افزایش یافت، در حالی‌که همگرایی افقی ناچیز باقی ماند. تغییرمکان شعاعی تاج و کف تونل نیز به‌ترتیب حدود ۷۱٪ و ۲۷۵٪ افزایش نشان داد که بیانگر تشدید تغییرشکل‌ها با افزایش روباره است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت *H/D* موجب تشدید تغییرشکل‌های تونل و زمین می‌شود و حضور لایه‌های نرم‌تر می‌تواند الگوی حوضه نشست را از حالت متمرکز به گسترده‌تر تغییر دهد. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن لایه‌بندی زمین و تحلیل عددی مرحله‌ای را در طراحی مبتنی بر کنترل تغییرشکل تونل‌های شهری برجسته می‌کند.

واژگان کلیدی نشست سطحی تونل، حوضه نشست، مدلسازی عددی، روش *NATM*، *PLAXIS 2D*

۱- مقدمه

نشست سطح زمین و تغییرشکل‌های اطراف تونل از مهم‌ترین موضوعات در مهندسی ژئوتکنیک شهری به شمار می‌آیند. این تغییرشکل‌ها می‌توانند موجب آسیب به سازه‌های سطحی، تأسیسات زیرزمینی و یا تغییر پایداری تونل شوند. پارامترهای متعددی بر میزان نشست تأثیرگذارند که از میان آن‌ها، نسبت روباره به قطر تونل (H/D) نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای دارد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران مختلف با استفاده از مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های سانتریفیوژ و داده‌های ابزار دقیق، تلاش کرده‌اند روابطی کمّی و تجربی میان نسبت H/D، نوع خاک و الگوی نشست سطح زمین ارائه کنند تا طراحی تونل‌ها با دقت و ایمنی بیشتری انجام گیرد.

در یکی از پژوهش‌های بنیادی، وو، بروئر و بوش به‌صورت نظام‌مند تأثیر نسبت پوشش به قطر را بر رفتار نشست زمین در تونل‌های کم‌عمق بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت H/D، مقدار نشست سطحی کاهش می‌یابد، اما پهنای ناحیه نشست گسترش پیدا می‌کند. همچنین برای تونل‌هایی با H/D کمتر از ۱/۲۵، نشست از حدود مجاز فراتر می‌رود. این محققان نسبت بحرانی H/D بین ۱/۲ تا ۱/۵ را برای خاک‌های چسبنده پیشنهاد کردند که تعادلی بین پایداری و صرفه‌جویی اقتصادی ایجاد می‌کند[۱].

در ادامه، وو با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ و مدل‌سازی عددی دوبعدی، تأثیر این نسبت را بر میزان اتلاف حجم خاک[1] و شکل‌گیری پروفیل نشست بررسی نمود. نتایج نشان داد که کاهش نسبت H/D از ۴ به ۱ باعث افزایش قابل‌توجه اتلاف حجم می‌شود؛ به‌طوری‌که در رس نرم، مقدار VL از ۰/۵ درصد به بیش از ۳ درصد افزایش یافت. وی رابطه‌ای تجربی به شکل $VL = ۲/۵e^{-۰/۶(C/D)}$ ارائه کرد که برای طراحی اولیه بسیار کاربردی است. همچنین نسبت بحرانی H/D بین ۱/۵ تا ۲ به‌عنوان مرز بین رفتار ایمن و بحرانی معرفی شد[۲].

در رساله دکتری وو در دانشگاه صنعتی دلفت، تحلیل جامعی از اثر کاهش نسبت H/D بر پایداری تونل‌های کم‌عمق در خاک‌های نرم ارائه گردید. یافته‌ها نشان دادند که برای مقادیر H/D کمتر از ۱، ناحیه پلاستیک خاک تا سطح زمین گسترش یافته و خطر شکست موضعی افزایش می‌یابد. وی نتیجه گرفت که نسبت بهینه H/D در حدود ۱/۲ تا ۱/۵ است که در آن تغییرشکل‌ها و نشست در محدوده‌ی مجاز قرار دارند[۱].

در پژوهشی دیگر، اسلام و همکاران با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار *PLAXIS* رفتار تونل‌های دوقلو در شرایط مختلف نسبت H/D را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش H/D از ۱ به ۳، نشست سطحی به میزان زیادی کاهش یافته و توزیع آن یکنواخت‌تر می‌شود. در تونل‌های کم‌عمق (H/D کمتر از ۱/۵) تغییرشکل‌ها غیرمتقارن و غیریکنواخت بوده و شدت نشست به نوع خاک وابسته است. در این تحقیق نسبت H/D بین ۲ تا ۳ به‌عنوان محدوده‌ی مناسب برای تونل‌های شهری پیشنهاد شد[۴].

در مطالعه‌ی ما و همکاران، داده‌های ابزار دقیق پروژه‌های تونل‌سازی شهری برای اصلاح معادله کلاسیک پک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب K در رابطه‌ی تجربی $i = Kz_0$ تابعی از نسبت H/D است و با افزایش این نسبت، پهنای ناحیه نشست افزایش یافته ولی مقدار نشست بیشینه کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، تونل‌های عمیق‌تر نشست ملایم‌تر اما گسترده‌تری ایجاد می‌کنند[۵].

در مقاله‌ای دیگر از ما، شی و همکاران ، اثر لغزش لایه‌های خاک و ایجاد ترک‌های لغزشی در معادله پک لحاظ گردید. با استفاده از نظریه ترک لغزشی، زاویه لغزش β به‌عنوان تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک و هندسه تونل تعریف شد و روابطی اصلاح‌شده برای محاسبه پهنای ناحیه نشست ارائه گردید. نتایج نشان داد که زاویه لغزش واقعی در خاک‌های چسبنده حدود ۲۰ درجه بیشتر از مقدار کلاسیک است و این پدیده سبب افزایش فشار جانبی و نشست می‌شود. مدل اصلاحی پیشنهادی توانست داده‌های واقعی ۱۸ پروژه تونل شهری را با دقت بالا بازتولید کند[۶].

در پژوهش کلاسیک یانگ، لیو و وانگ ، از نظریه محیط تصادفی برای مدل‌سازی نشست ناشی از حفاری تونل استفاده شد. این مدل بر اساس زاویه تأثیر (β) و میزان همگرایی تونل (ΔA) توانست پروفیل نشست سطحی را در شرایط مختلف هندسی و خاکی پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد که زاویه β بین ۳۱ تا ۵۶ درجه متغیر بوده و با کاهش نسبت H/D، مقدار آن کاهش یافته و نشست افزایش می‌یابد. این مدل پایه‌ای

[1] Volume Loss

برای توصیف تحلیلی نشست در خاک‌های مختلف ایجاد کرد[۷].

شیائو و سمز نیز با بهره‌گیری از روش عددی اختلاف محدود (*FLAC*) ارتباط بین اتلاف حجم و نشست سطحی در خاک‌های چسبنده نرم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش نسبت *H/D* باعث افزایش غیرخطی در مقدار *VL* و نشست حداکثر (*Smax*) می‌شود. همچنین پارامتر پهنای حوضه نشست (*ix*) متناسب با عمق تونل افزایش می‌یابد. این پژوهش روابط بدون بعدی میان پارامترهای *γD/su*، *E/su* و *H/D* (که در آن *E* مدول الاستیسیته و *D* عمق تونل و *su* مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک می‌باشد) ارائه کرد که می‌تواند در طراحی اولیه تونل‌ها بدون نیاز به تحلیل عددی دقیق به‌کار رود[۸].

در مطالعه‌ای دیگر، فرانزا و مارشال با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ بر روی خاک‌های ماسه‌ای، روابط تجربی جدیدی برای تعیین پهنای نشست (*i*) و اتلاف حجم (*VL*) متناسب با نسبت *H/D* توسعه دادند. نتایج آنان نشان داد که در خاک‌های دانه‌ای، افزایش *H/D* موجب گسترش ناحیه نشست می‌شود ولی تمرکز تغییرشکل در تاج تونل رخ می‌دهد؛ در حالی‌که در خاک‌های چسبنده، جابجایی‌ها عمدتاً در اطراف دیواره تونل متمرکز است[۹].

در جمع‌بندی مطالعات فوق می‌توان گفت نسبت پوشش به قطر تونل (*H/D*) یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی مؤثر بر رفتار تغییرشکل زمین است. کاهش این نسبت اگرچه از نظر اجرایی مقرون‌به‌صرفه است، اما موجب افزایش چشمگیر در نشست سطحی، اتلاف حجم خاک و گسترش ناحیه پلاستیک می‌شود. بر اساس نتایج مطالعات متعدد، برای خاک‌های چسبنده نرم نسبت بحرانی *H/D* در محدوده ۱/۲ تا ۱/۵ و برای خاک‌های دانه‌ای بین ۲ تا ۳ قرار دارد. به‌طور کلی، افزایش *H/D* علاوه بر کاهش نشست، باعث می‌شود الگوی تغییرشکل از حالت متمرکز به حالت گسترده تبدیل شود. این یافته‌ها مبنای توسعه مدل‌های طراحی جدید برای تحلیل تغییرشکل تونل و کنترل نشست سطح زمین در پروژه‌های تونل‌سازی شهری محسوب می‌شوند. در این پژوهش، رفتار تونل در یک محیط خاکی لایه‌بندی‌شده با تمرکز بر نقش نسبت روباره به قطر تونل (*H/D*) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، فرایند حفاری و نصب پوشش با استفاده از مدل رفتاری *Hardening Soil* و شبیه‌سازی مرحله‌ای در نرم‌افزار *PLAXIS 2D* تحلیل شده است. ویژگی برجسته این مطالعه، پرداختن هم‌زمان به پاسخ سطح زمین و تغییرشکل‌های پوشش اولیه تونل است؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر نشست سطح زمین، شاخص‌های کلیدی تغییرشکل تونل نظیر بیضوی‌شدن مقطع (*Ovality*)، الگوی همگرایی قائم و افقی و نیز جابه‌جایی‌های جانبی دیواره به‌صورت سیستماتیک بررسی شده‌اند. این رویکرد یکپارچه، که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است، دید جامع‌تری از سازوکارهای تغییرشکلی تونل در محیط‌های لایه‌ای فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای تحلیل رفتار و کنترل ریسک‌های اجرایی در پروژه‌های مشابه باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت بررسی اثر نسبت روباره به قطر تونل (H/D)بر تغییرشکل پوشش و نشست سطح زمین، یک تونل دایره‌ای با قطر ثابت $D = ۱۰\ m$در اعماق مختلف از سطح زمین مدل‌سازی شد. فاصله روباره (C)در شش مقدار ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ متر در نظر گرفته شد. بدین ترتیب عمق محور تونل $H = C$ بوده و بازه تغییرات H/D از حدود ۱ تا ۳/۵را شامل می‌شود. این بازه به‌گونه‌ای انتخاب شد تا رفتار تونل در شرایط کم‌عمق، نیمه‌عمیق و عمیق قابل ارزیابی و مقایسه باشد.

مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار *PLAXIS* انجام شد. حوزه مدل به‌گونه‌ای انتخاب شد که اثر مرزها بر میدان تنش و تغییرشکل ناچیز باشد. مرز پایینی به‌صورت مقید در جابه‌جایی قائم و افقی تعریف شد، مرزهای جانبی تنها در راستای افقی مقید بوده و سطح زمین آزاد در نظر گرفته شد. تونل در مرکز افق مدل قرار گرفته و به‌روش مرحله‌ای، با حذف خاک و فعالسازی سختی پوشش، شبیه‌سازی شد.

به‌منظور بازنمایی واقع‌بینانه رفتار سازه‌ای و ژئوتکنیکی تونل، انتخاب‌های زیر در مدل‌سازی عددی صورت گرفته است. پوشش تونل به‌صورت عضو صفحه‌ای (*Plate*) مدل شد زیرا این المان قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان سختی خمشی و محوری پوشش‌های بتن مسلح را داراست و رفتار مقطع دایروی لاینینگ را با دقت مناسبی بازتاب می‌دهد. برای محیط خاک، مدل رفتاری *Hardening Soil* به دلیل توانایی آن در لحاظ کردن سخت‌شدگی تنش–کرنش، وابستگی

مدول به سطح تنش، و تفاوت مدول‌های بارگذاری و باربرداری انتخاب شد؛ این موارد خصوصاً برای تحلیل تغییرشکل‌های اطراف تونل و رفتار غیرخطی خاک اهمیت دارند. همچنین، شبکه‌بندی با ریزشدگی موضعی در اطراف تونل اجرا شد تا ناحیه‌ای که تمرکز بیشترین تغییرشکل‌ها و گرادیان‌های کرنش در آن رخ می‌دهد، با دقت عددی کافی مدل شود و پاسخ مدل نسبت به جزئیات هندسی تونل و گسترش تغییرشکل‌ها حساسیت و دقت لازم را داشته باشد.

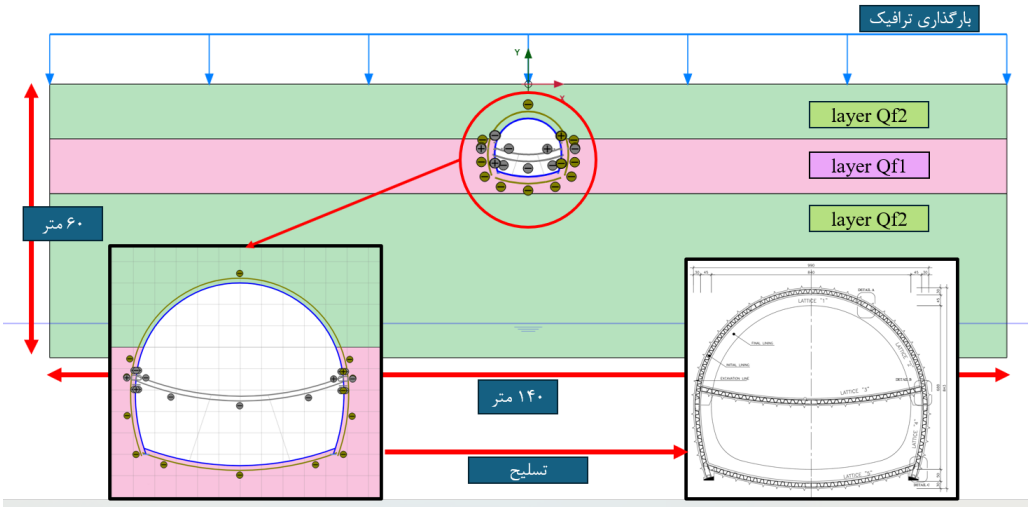
از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری این پروژه، شهر قم در پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی قرار دارد. این شهر در دشتی وسیع با راستای عمومی شمال‌غرب–جنوب‌شرق و عرضی در حدود ۴ تا ۱۰ کیلومتر توسعه یافته است. در جنوب‌غربی این دشت، رشته‌ارتفاعاتی با همین راستا قرار دارد که عمدتاً از توالی‌های رسوبی الیگوسن تا میوسن تشکیل شده و شامل سازند قرمز تحتانی، سازند قم و سازند قرمز فوقانی است. در شمال‌غرب دشت قم نیز تاقدیس البرز قرار گرفته که در شمال شهر موجب ایجاد ارتفاعات شده است، در حالی که در شمال‌شرق شهر این ارتفاعات تدریجاً کاهش یافته و به دشت منتهی می‌شود. رودخانه قم با راستای جنوب‌غرب–شمال‌شرق از این دشت عبور کرده و جریان آن به سمت شمال‌شرق ادامه می‌یابد.

واحدهای سنگی گستره مورد مطالعه عمدتاً به دو سازند زمین‌شناسی اصلی، یعنی سازند قم و سازند قرمز فوقانی تعلق دارند. سازند قم غالباً شامل رسوبات آهکی است، در حالی که سازند قرمز فوقانی عمدتاً از رسوبات آواری و تبخیری تشکیل شده است.

مسیر خط A متروی قم عمدتاً در نهشته‌های آبرفتی دشت قم جانمایی شده است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که در بخش‌هایی از مسیر، به‌ویژه در شمال‌غرب مسیر مترو در امتداد جاده جعفریه، رسوبات آبرفتی شامل ذراتی در دامنه دانه‌بندی سیلت و رس تا قلوه‌سنگ‌هایی با ابعاد حدود ۱۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. این دانه‌های درشت عموماً گردشدگی قابل توجهی داشته و از نظر لیتولوژی شامل طیفی از سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی منشأ گرفته از پهنه سنندج–سیرجان هستند. در مقابل، در بخش‌هایی از دشت، به‌ویژه در محدوده‌های نزدیک به مسجد جمکران، رسوبات ریزدانه شامل سیلت و رس غالب است. با توجه به شیب عمومی دشت قم به سمت جنوب‌شرق، می‌توان استدلال کرد که سیلاب‌های رودخانه قم در گذشته تا فواصل قابل توجهی در این جهت گسترش یافته و موجب نهشته‌شدن لایه‌های نسبتاً ضخیم رس در بخش‌های جنوب‌شرقی دشت شده‌اند.

رودخانه قمرود به عنوان اصلی‌ترین رودخانه استان قم، از عناصر مهم در شکل‌گیری رسوبات آبرفتی این دشت به شمار می‌آید. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌های گلپایگان و خوانسار در پهنه زمین‌شناسی سنندج–سیرجان شکل می‌گیرد و پس از عبور از نواحی مختلف زمین‌شناسی، وارد دشت قم شده و در نهایت به دریاچه نمک می‌ریزد. عبور این رودخانه از واحدهای سنگی گوناگون سبب شده است که رسوبات آواری با ترکیب لیتولوژیکی متنوع، در دامنه دانه‌بندی سیلت، ماسه و قلوه‌سنگ، در بستر و دشت سیلابی آن نهشته شوند. این رسوبات به طور کلی از بلوغ بافتی و کانی‌شناسی مناسب و میزان گردشدگی نسبتاً بالایی برخوردارند که با ویژگی‌های رسوبات حمل‌شده در یک رودخانه طویل سازگار است.

از نظر تکتونیکی، شکل‌گیری ساختاری کنونی نهشته‌های حوضه قم نتیجه سازوکارهای برشی راست‌بر همراه با مؤلفه فشاری دانسته شده است . این فرایندها موجب چین‌خوردگی و گسلش در سنگ‌بستر منطقه شده‌اند. با این حال، از آنجا که بخش عمده مسیر تونل متروی قم در رسوبات آبرفتی دشت قرار دارد، نقش مستقیم ساختارهای زمین‌شناسی سنگ‌بستر در رفتار ژئوتکنیکی مسیر تونل نسبتاً محدود است.



شکل ۱: نمایی از مدلسازی عددی

جدول ۱تحلیل شدند تا امکان ارزیابی تفاوت مکانیزم تغییرشکل در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده فراهم گردد. پارامترهای ژئوتکنیکی هر خاک مطابق مقادیر متداول در پروژه‌های تونل‌سازی شهری انتخاب و در تمام مدل‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر خالص تغییر H/Dمورد بررسی قرار گیرد. به‌منظور شفاف‌سازی بیشتر، لازم به ذکر است که لایه میانی ($Qf1$) نسبت به لایه‌های بالا و پایین ($Qf2$) دارای مقاومت برشی مؤثر کمتر است که این موضوع از طریق مقادیر پارامترهای مقاومتی در جدول ۱ قابل مشاهده است. به‌طور مشخص، مقدار چسبندگی مؤثر (c') در لایه $Qf1$ برابر $۳۷kN/m^2$ در نظر گرفته شده، در حالی‌که این مقدار برای لایه $Qf2$ برابر $۴۲kN/m^2$ است. با وجود آن‌که مدول‌های تغییرشکل در هر دو لایه در این مطالعه ثابت فرض شده‌اند، کاهش پارامتر مقاومتی لایه میانی موجب می‌شود این لایه نسبت به لایه‌های مجاور مستعدتر برای تمرکز تغییرشکل‌ها باشد. این تفاوت در پارامترهای مکانیکی یکی از عوامل مؤثر در رفتار تغییرشکل مشاهده‌شده در مدل‌های عددی، به‌ویژه در نسبت‌های میانی H/D، تلقی می‌شود.

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار پوشش اولیه، این بخش به‌صورت المان صفحه‌ای با رفتار الاستیک خطی مدل شد؛ زیرا پوشش شاتکریت در مراحل اولیه بارگذاری معمولاً در محدوده تغییرشکل‌های کوچک عمل می‌کند و فرض رفتار الاستیک تقریب مناسبی برای آن فراهم می‌کند. ضخامت پوشش برابر ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در محدوده مقادیر متداول در تونل‌سازی به روش $NATM$ قرار دارد. برای مدل‌سازی اندرکنش خاک–پوشش از ضریب تماس۰/۶۷ استفاده شد تا کاهش مقاومت برشی در فصل مشترک و امکان لغزش نسبی بین خاک و پوشش در نظر گرفته شود. سطح آب زیرزمینی در عمق ۶۰ متری از سطح زمین فرض گردید و وزن مخصوص آب برابر $\gamma_w = ۹/۸۱\ kN/m^3$ در نظر گرفته شد. تمامی تحلیل‌ها تحت شرایط زهکشی‌شده (*Drained*) انجام شدند تا رفتار غیرخطی خاک و تغییرات مدول وابسته به تنش به‌طور مناسب در تحلیل تغییرشکل‌ها بازتاب یابد.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد استفاده در مدلسازی عددی

پارامتر	واحد	لایه Qf2	لایه Qf1	توضیحات
عمق لایه	m	(۰ تا ۸ متر) و (۱۶ تا ۴۰ متر)	(۸ تا ۱۶ متر)	–
مدل رفتاری	–	Hardening Soil	Hardening Soil	–
E_{50r}^{ef}	kN/m^2	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	مدول الاستیک سه‌محوری
E_{oer}^{ef}	kN/m^2	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	مدول تحکیم محوری
E_{urr}^{ef}	kN/m^2	۷۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	مدول باربرداری
ν_u^r	–	۰/۳	۰/۳	نسبت پواسون باربرداری
m	–	۰/۵	۰/۵	پارامتر سخت‌شوندگی
$P_{rc}f$	kN/m^2	۱۰۰	۱۰۰	فشار مرجع
c′	kN/m^2	۴۲	۳۷	چسبندگی موثر
φ′	°	۳۰	۳۰	زاویه اصطکاک
ψ	°	۰	۰	زاویه اتساع
e_{init}	–	۰/۵	۰/۵	تخلخل اولیه
γunsat	kN/m^3	۱۹/۳۰		
γsat	kN/m^3	۲۰		

جدول ۲: مشخصات مکانیکی پوشش اولیه تونل

گروه پارامتر	پارامتر	نماد	مقدار	واحد	توضیح
ویژگی کلی (General)	نوع مصالح	–	شاتکریت (Shotcrete)	–	پوشش اولیه تونل
	ضخامت پوشش	(t)	۰/۳	m	مطابق طراحی اولیه
	نوع مدل رفتاری	–	الاستیک (Elastic)	–	المان صفحه‌ای (Plate element)
ویژگی‌های صلبیت (Stiffness Properties)	سختی محوری	$(EA_1 = EA_2)$	$۵/۶۴ \times ۱۰^۶$	kN/m	سختی در راستای طولی و محیطی
	سختی خمشی	(EI)	$۱/۴۸ \times ۱۰^۴$	$kN·m^2/m$	برای رفتار خمش در پوشش
	ضریب پواسون	(ν)	0	–	رفتار خطی فرض شده
ویژگی‌های هندسی (Geometry)	قطر تونل (میانگین)	(D)	۳/۵۵	m	-
	شعاع مؤثر	(r)	۱/۷۷۵	m	نصف قطر تونل
ویژگی‌های بارگذاری (Loading)	وزن واحد طول پوشش	(w)	۷/۵	kN/m/m	بر اساس چگالی مصالح شاتکریت

برای هر مقدار روباره، جابه‌جایی گره‌های واقع بر پیرامون پوشش تونل و گره‌های نزدیک سطح زمین استخراج شد. داده‌ها به‌فرمت *Excel* ذخیره و سپس با استفاده از زبان برنامه‌نویسی *Python* پردازش شد. روند پردازش شامل مراحل زیر بود:

- تعیین موقعیت تاج، کف و کناره‌های تونل
- محاسبه مؤلفه شعاعی جابه‌جایی و استخراج همگرایی قائم و افقی
- محاسبه بیضوی‌شدن مقطع
- استخراج پروفیل نشست سطح زمین $(w(x))$
- برازش منحنی نشست بر اساس رابطه گاوسی پک
- محاسبه پارامترهای کلیدی شامل:

$$S_{\max}, i, VL = \frac{1}{D}\int w(x)\,dx \qquad (1)$$

با توجه به تفاوت تعداد نقاط شبکه در مدل‌ها، الگوریتم پردازش به‌گونه‌ای طراحی شد که بدون نیاز به یکنواخت‌سازی گره‌ها، قادر به خوانش و تحلیل داده‌ها باشد.

برای تغییرشکل پوشش تونل، شاخص‌های زیر محاسبه شد. ر این مطالعه، جابجایی‌های رو به داخل تونل (*Convergence*) به‌عنوان مقدار مثبت در نظر گرفته شده‌اند و جابجایی‌های رو به بیرون تونل مقدار منفی دارند. بنابراین در محاسبه تغییر قطر قائم از رابطه:

$$\Delta D_v = U_{\text{crown}} + U_{\text{invert}} \qquad (2)$$

اگر هر دو مقدار U_{crown} و U_{invert} مثبت باشند، نتیجه‌ی ΔD_v مثبت بوده و نشان‌دهنده کاهش قطر قائم است. همین قرارداد علامت برای همگرایی افقی نیز به‌کار گرفته شده است:

$$\Delta D_h = U_{\text{left}} + U_{\text{right}} \qquad (3)$$

بر همین اساس، مقدار بیضی‌شدگی مقطع تونل مطابق رابطه:

$$Ovality = \frac{\Delta D_h - \Delta D_v}{D} \qquad (4)$$

برای نشست سطح زمین، علاوه بر S_{max}و i، مقدار اتلاف حجم VLبه‌عنوان معیار کلیدی مورد استفاده قرار گرفت. سپس تمام پارامترها به‌صورت بی‌بعد در قالب روابط زیر تحلیل شدند:

$$\frac{S_{\max}}{D}, \frac{i}{D}, \frac{i}{H} \qquad (5)$$

نتایج عددی با روابط کلاسیک پک مقایسه و صحت مدل‌سازی ارزیابی گردید.

روش اجرای تونل برای اعمال در نرم‌افزار پلکسیس دوبعدی مطابق

شکل ۲ به صورت زیر است:

مرحله ۱: شرایط اولیه

در این مرحله، شرایط ژئواستاتیکی خاک تحت وزن مخصوص خود شبیه‌سازی شد تا تنش‌های اولیه در محیط خاک به تعادل برسند. لایه‌های مختلف خاک با مشخصات مکانیکی مربوطه تعریف و میدان تنش اولیه بر اساس نسبت تنش افقی به قائم) محاسبه گردید.

مرحله ۲: اعمال بار ترافیکی سطحی

در این مرحله، بار یکنواخت ترافیکی بر سطح زمین اعمال شد تا اثرات اولیه‌ی این بار بر نشست‌ها و تغییرشکل‌های سطحی قبل از آغاز حفاری بررسی گردد. این بارگذاری نمایانگر شرایط بهره‌برداری واقعی جاده‌ی بالای تونل است.

مرحله ۳: حفاری بخش تاج تونل

حفاری اولیه در قسمت فوقانی مقطع (تاج تونل) با ضریب آزادسازی تنش انجام گرفت. این مرحله بیانگر آزادسازی نسبی تنش‌های قائم و افقی در ناحیه تاج پیش از اجرای پوشش اولیه است. در این مرحله پوششی نصب نگردید تا تغییرشکل‌های آزاد خاک به‌طور کامل ارزیابی شوند.

مرحله ۴: اجرای پوشش اولیه در تاج و کف‌بند میانی

در این مرحله، پوشش اولیه (شاتکریت) در بخش تاج و کف‌بند میانی تونل نصب گردید. ضخامت این پوشش ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هدف از این مرحله، افزایش سختی موضعی در تاج تونل و کنترل تغییرشکل‌های اولیه بود.

مرحله ۵: حفاری نیم‌مقطع سمت چپ پایین

در ادامه، عملیات حفاری در نیمه‌ی پایین سمت چپ تونل با ضریب آزادسازی انجام شد. این گام با هدف شبیه‌سازی توالی واقعی پیشروی در تونل و جلوگیری از ناپایداری موضعی صورت گرفت.

مرحله ۶: اجرای پوشش اولیه در دیواره‌ی سمت

چپ پایین

پس از تکمیل حفاری بخش چپ پایین، پوشش اولیه در این ناحیه اجرا گردید. اجرای شاتکریت در این مرحله موجب افزایش سختی جانبی تونل کنترل همگرایی افقی گردید.

مرحله ۷: حفاری نیم‌مقطع سمت راست پایین

در گام بعدی، حفاری در نیمه‌ی پایین سمت راست تونل مشابه سمت چپ و با ضریب آزادسازی انجام شد. این مرحله در واقع تکمیل‌کننده‌ی عملیات حفاری مقطع کامل تونل است.

مرحله ۸: اجرای پوشش اولیه در دیواره‌ی سمت راست پایین

در این مرحله، پوشش اولیه در دیواره‌ی سمت راست پایین اجرا گردید تا حلقه‌ی نگهداری اولیه تونل کامل شود. بدین ترتیب، تمامی بخش‌های شاتکریت شامل تاج، دیواره‌ها و کف‌بند میانی به یک سیستم پیوسته و مقاوم تبدیل شدند.

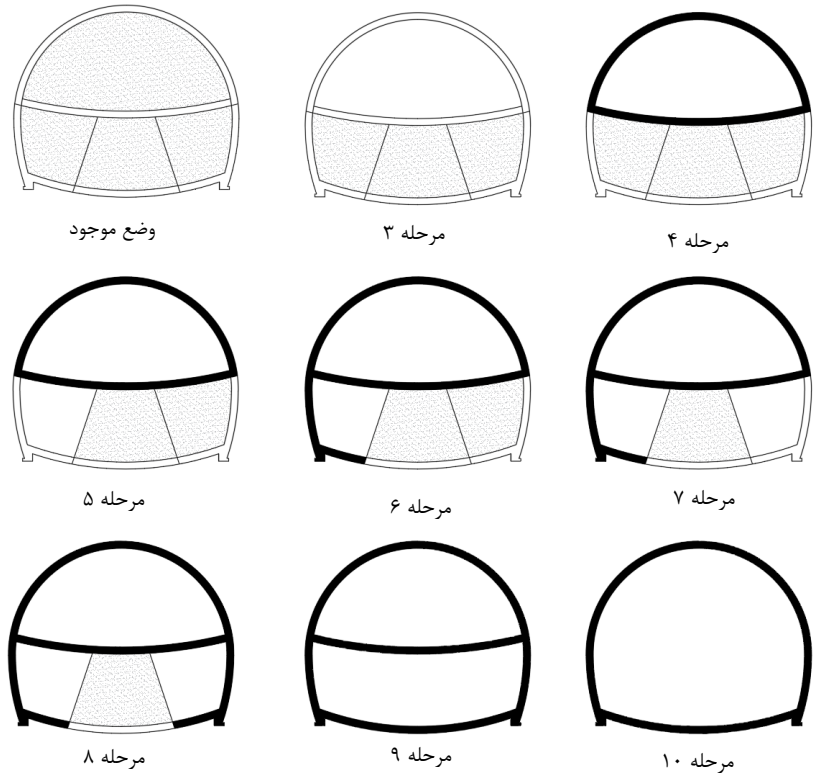
مرحله ۹: اجرای کف‌بند تحتانی

در این مرحله، کف‌بند تحتانی تونل اجرا گردید تا دو دیواره‌ی جانبی به یکدیگر متصل شوند و حلقه‌ی بسته‌ی نگهداری تشکیل گردد. اجرای این بخش موجب کاهش محسوس تغییرشکل‌های قائم و افقی و افزایش پایداری کلی تونل شد.

مرحله ۱۰: تخریب کف‌بند تحتانی

در گام نهایی، کف‌بند تحتانی موقت حذف گردید تا شرایط واقعی بهره‌برداری شبیه‌سازی شود. حذف این بخش با هدف آزادسازی مسیر تونل و بازتوزیع تنش‌ها در سامانه‌ی نگهداری انجام گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که حذف کف‌بند تأثیر ناچیزی بر تغییرشکل تاج و دیواره‌ها داشته و سیستم نگهداری اولیه از پایداری کافی برخوردار است.

در پایان این توالی، سیستم نگهداری تونل به پایداری نهایی خود رسیده و توزیع تنش‌ها در اطراف مقطع به حالت تعادل درآمده است. این رویکرد مرحله‌ای، امکان بررسی دقیق اثر مدول الاستیسیته خاک، رفتار نشست سطحی و همگرایی مقطع تونل را در شرایط بارگذاری واقعی فراهم می‌سازد.



شکل ۲: مرحله‌بندی روش اجرای تونل

۳- بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی ارائه و بررسی می‌شود. هدف، ارزیابی اثر تغییر عمق قرارگیری تونل بر الگوی تغییرشکل سطح زمین و بدنه تونل است. نتایج شامل توزیع نشست، پهنای حوضه نشست، درصد از دست‌رفتگی حجم خاک، و الگوی تغییرشکل مقطع تونل بوده و برای نسبت‌های مختلف H/D گزارش می‌شوند. نمودارها و مقادیر عددی حاصل از مدل‌سازی عددی، به‌منظور مقایسه با روابط تجربی متداول (ازجمله روابط پک[۱۰]) تحلیل شده‌اند تا رفتار مدل عددی در برابر روابط کلاسیک بررسی گردد.

به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که افزایش عمق قرارگیری تونل سبب کاهش مقدار نشست سطحی، افزایش پهنای حوضه نشست و کاهش میزان تمرکز تغییرشکل در اطراف تاج تونل می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که رفتار بدون بعدشده نشست و پهنای حوضه با روندهای تجربی گزارش‌شده در ادبیات فنی سازگاری قابل توجهی دارد.

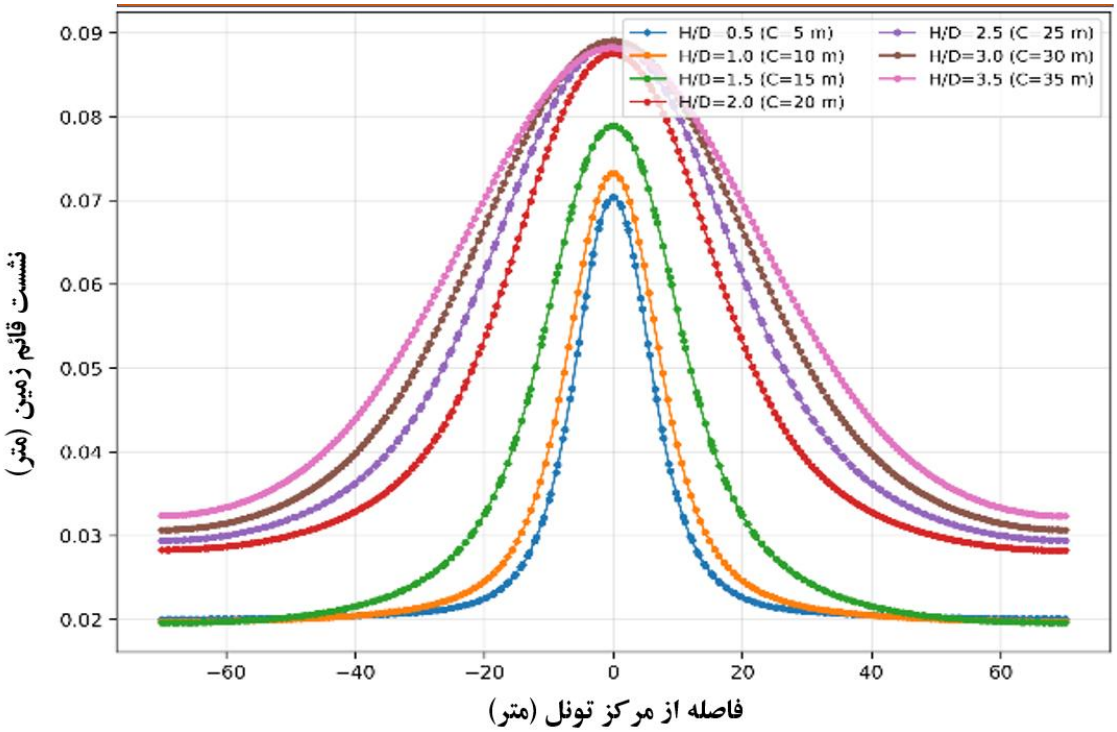
در ادامه یافته‌ها در دو بخش اصلی ارائه می‌شوند:

(الف) تغییرشکل سطح زمین

(ب) تغییرشکل بدنه تونل

الف) سطح زمین

شکل ۳، پروفیل نشست سطح زمین را برای نسبت‌های مختلف روباره به قطر تونل (H/D)پس از حفاری نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع نشست در تمامی حالت‌ها به‌صورت متقارن پیرامون محور تونل بوده و فرم کلی منحنی‌ها مشابه توزیع گاوسی است که با مطالعات کلاسیک پک[۱۰] نیز همخوانی دارد. افزایش عمق قرارگیری تونل موجب افزایش پهنای ناحیه نشست و کاهش شدت نشست در نقطه حداکثر می‌گردد.



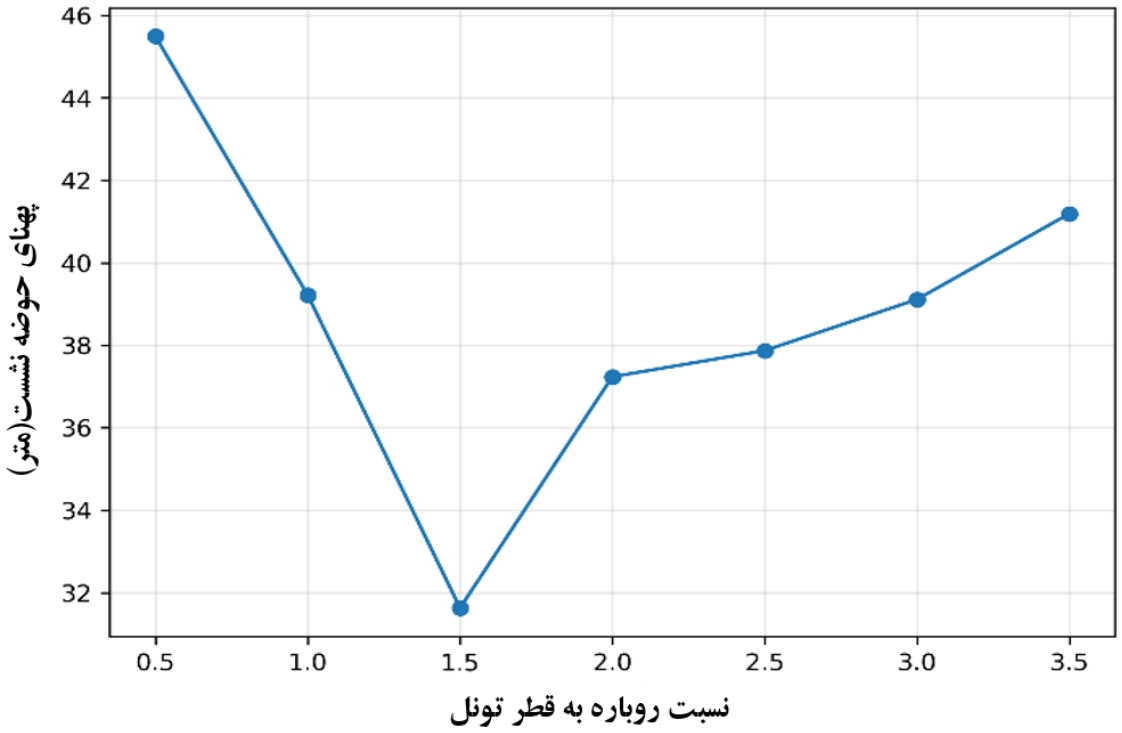
شکل ۳: پروفیل نشست سطح زمین برای نسبت‌های مختلف H/D .با افزایش عمق تونل

برای حالت‌های با H/Dکوچک‌تر، منحنی نشست باریک‌تر بوده و مقدار نشست بیشینه در ناحیه تاج تونل افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر حفاری بر سطح زمین در تونل‌های کم‌عمق است. در مقابل، در شرایط افزایش پوشش‌رویی، منحنی نشست گسترده‌تر شده و شیب افت نشست کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، اثرات حفاری در سطح زمین ملایم‌تر و در گستره وسیع‌تری توزیع می‌شود. این رفتار با اصول مکانیک محیط های پیوسته تطابق داشته و ناشی از انتقال تنش‌ها در جرم خاک و اتساع ناحیه تاثیر حفاری با افزایش عمق می‌باشد.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت H/D، نشست بیشینه کاهش یافته و پهنای ناحیه نشست افزایش می‌یابد که این روند همخوان با روابط تجربی شناخته‌شده و دیدگاه‌های تحلیلی در مهندسی تونل است.

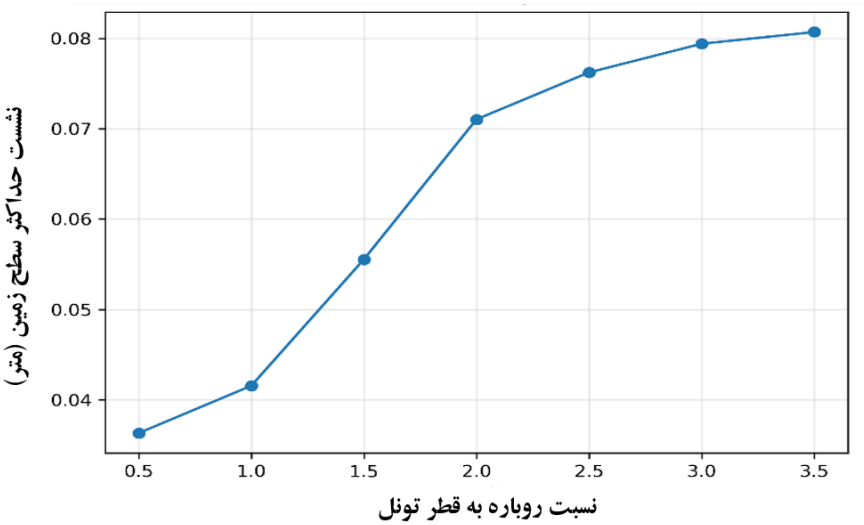
شکل ۴ تغییرات پهنای حوضه نشست i بر حسب نسبت عمق به قطر تونل (H/D)را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت H/D، روند کلی افزایش پهنای حوضه نشست(۳۰ درصد) برقرار است؛ به‌طوری‌که در تونل‌های عمیق‌تر، اثر نشست در سطح زمین در محدوده‌ای گسترده‌تر توزیع می‌شود و منحنی نشست پهن‌تر می‌گردد. این رفتار با تئوری‌های انتقال تنش و مدل‌های تجربی نظیر پک [۱۰] مطابقت دارد.

با این وجود، در نسبت $H/D = ۱/۵$یک افت ۳۰ درصدی قابل توجه در مقدار i مشاهده می‌شود. این افت ناشی از تغییر جنس خاک در اعماق حدود ۸ تا ۱۶ متری است؛ به‌گونه‌ای که لایه دوم دارای چسبندگی کمتری نسبت به لایه‌های بالایی و پایینی بوده و سختی کمتر خاک در این ناحیه موجب تمرکز بیشتر تغییر شکل و کاهش پهنای حوضه نشست شده است. درواقع، ورود جبهه حفاری به لایه‌ای با سختی کمتر و سپس خروج از آن، سبب تغییر رژیم تغییرشکل و ایجاد این رفتار غیرخطی در منحنی $i - H/D$ شده است.



شکل ۴: تغییرات پهنای حوضه نشست iبر حسب نسبت عمق به قطر تونل H/D .افزایش مقدار i

شکل ۵ تغییرات نشست حداکثر سطح زمین S_{max}بر حسب نسبت عمق به قطر تونل H/D را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق قرارگیری تونل، مقدار نشست حداکثر تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش سربار موجب تشدید تنش‌های عمودی و تغییرشکل‌های اطراف تونل شده و در نتیجه نشست بیشتری در سطح زمین ایجاد می‌شود. روند افزایش نشست در نسبت‌های بزرگ‌تر H/Dملایم‌تر شده و نشان‌دهنده گرایش به پایداری نسبی در تونل‌های عمیق‌تر است.

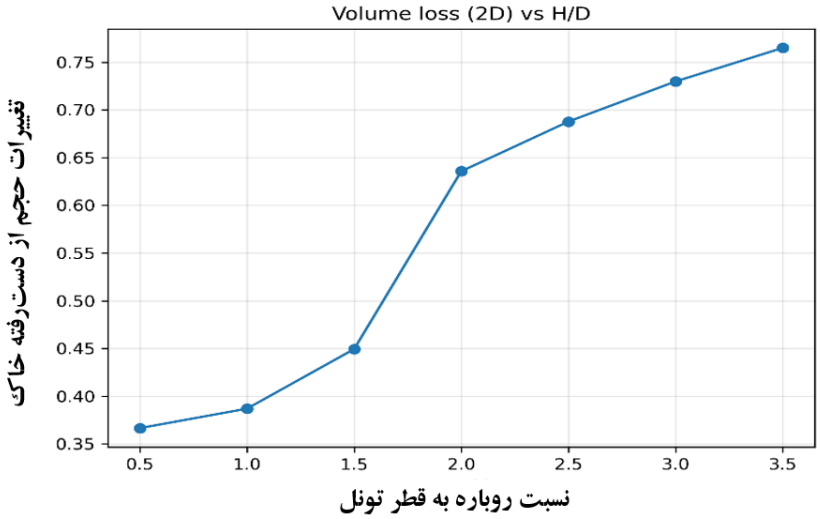


شکل ۵: تغییرات نشست حداکثر سطح زمین S_{max}بر حسب نسبت H/D

شکل ۶، تغییرات حجم از دست‌رفته‌ی زمین VLرا بر حسب نسبت پوشش به قطر تونل H/Dنشان می‌دهد. مقدار VLبه صورت دوبعدی با انتگرال‌گیری از منحنی نشست سطح زمین و بر مبنای رابطه‌ی زیر محاسبه شده است:

$$VL = \frac{1}{D}\int_{-\infty}^{+\infty} w(x)\,dx \qquad (۶)$$

که در آن $w(x)$پروفیل نشست سطح زمین و Dقطر تونل است. این تعریف معادل نسبت حجم تغییرشکل یافته‌ی سطح زمین به سطح مقطع تونل در تحلیل دوبعدی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که حجم از دست‌رفته با افزایش H/Dبه طور قابل توجهی تا ۲ برابر مقدار نشست در کمترین H/D افزایش می‌یابد. در واقع، در تونل‌های کم‌عمق، خاک بالاسری مقاومت جانبی و محصورشدگی کمتری دارد و نشست به شکل متمرکزتری در سطح رخ می‌دهد، در نتیجه حجم تغییرشکل سطحی کمتر است. با افزایش عمق تونل، محصورشدگی خاک افزایش یافته و انبساط جانبی محدود می‌شود؛ در نتیجه نشست سطح زمین گسترده‌تر و حجم تغییر شکل تجمعی بیشتر ثبت شده است. این روند با مفهوم رفتار تدریجی تنش و سخت‌شوندگی خاک و انتقال الگوی تغییرشکل از موضعی به گسترده سازگار است.

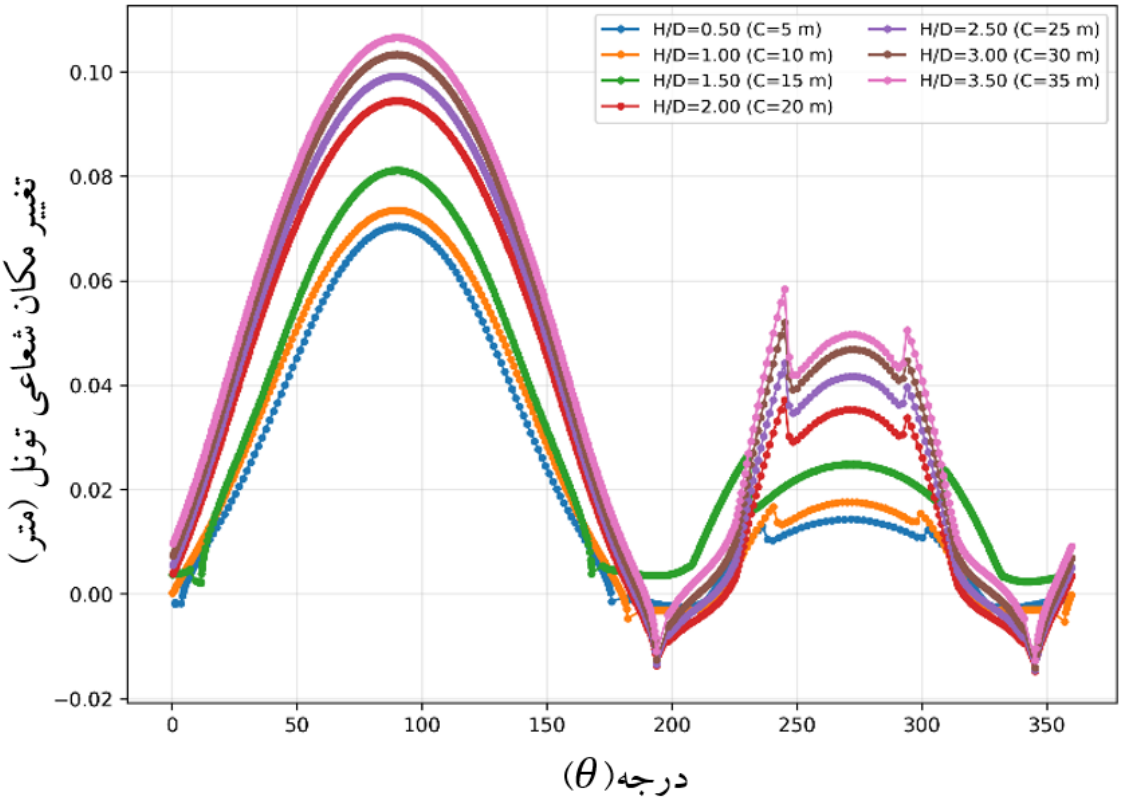


شکل ۶: تغییرات حجم از دست‌رفته VLبر حسب نسبت H/D.

ب) بدنه تونل

شکل ۷ الگوی تغییرشکل شعاعی پوشش تونل را برای تمامی نسبت‌های روباره به قطر H/Dنشان می‌دهد. به‌طور کلی، توزیع $u_r(\theta)$رفتار مشخصی از تمرکز تغییرشکل در ناحیه تاج تونل ($\theta \approx ۹۰^\circ$)و کمینه آن در ناحیه کف ($\theta \approx ۱۸۰^\circ$)را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت H/D، میزان نشست و تغییرشکل شعاعی افزایش یافته است که ناشی از افزایش تنش قائم مؤثر و توسعه میدان تنش پیرامون تونل در عمق‌های بیشتر می‌باشد. همچنین، در ناحیه دیواره‌ها ($\theta \approx ۲۵۰^\circ - ۳۰۰^\circ$)یک ناحیه فرورفتگی و بیرون‌زدگی نسبی مشاهده می‌شود که بیانگر تغییر در مکانیزم انتقال تنش از تاج به پهلوهای تونل است. این رفتار می‌تواند ناشی از ویژگی‌های غیرخطی مدل *Hardening Soil* و تفاوت مدول‌های سختی در مسیر بارگذاری و باربرداری باشد.

به‌طور خاص، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق، دامنه تغییرشکل در تاج افزایش و در کف تونل اندکی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده عملکرد قوسی بهتر و انتقال نیرو از ناحیه تاج به جداره‌های تونل در شرایط روباره بالاتر است.



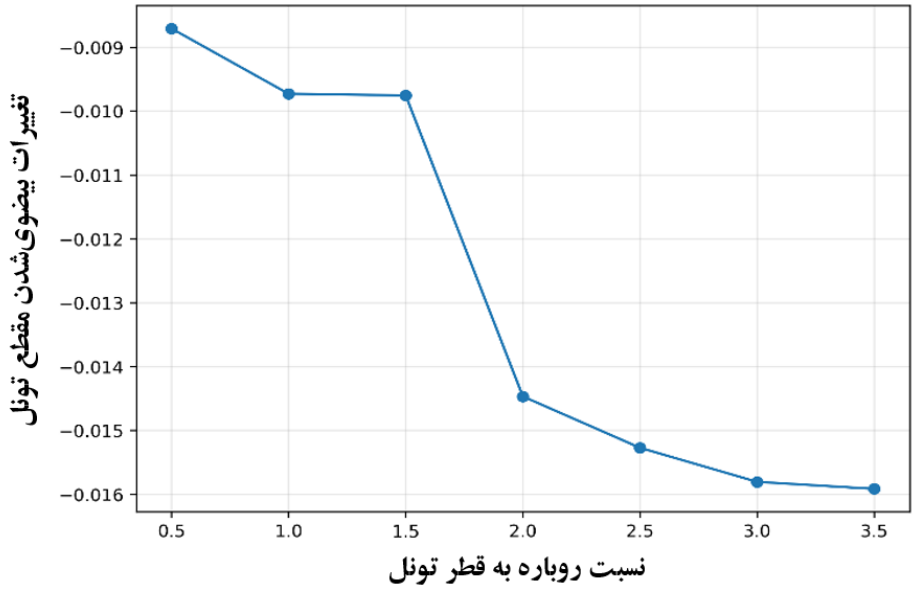
شکل ۷: توزیع تغییرشکل شعاعی پوشش تونل $u_r(\theta)$برای نسبت‌های مختلف روباره به قطر H/D.

شکل ۸ تغییرات بیضوی‌شدن مقطع تونل *(Ovality)* را نسبت به نسبت روباره به قطر H/Dنشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، مقدار بیضوی‌شدن منفی بوده و با افزایش عمق قرارگیری تونل، میزان بیضوی‌شدن افزایش یافته است.(تا ۷۵ درصد) (مقدار مطلق کرنش شکل‌پذیری بزرگ‌تر می‌شود).

این رفتار نشان‌دهنده آن است که در تونل‌های عمیق‌تر، تمرکز تنش قائم باعث افزایش تغییرشکل در تاج و کاهش نسبی تغییرشکل در کف تونل شده و در نتیجه مقطع از حالت دایره‌ای به شکل بیضوی با کاهش قطر قائم تغییر می‌یابد. این روند با مکانیزم قوس‌بندی تنش در اطراف تونل و سخت‌شدگی تدریجی خاک در مدل *Hardening Soil* سازگار است.

افت ناگهانی مقدار بیضوی‌شدن بین $H/D = ۱/۵$ و $H/D = ۲$نیز با تغییر لایه خاک در عمق (وجود لایه میانی با سختی کمتر) قابل توجیه است؛ در این حالت، خاک نرم‌تر

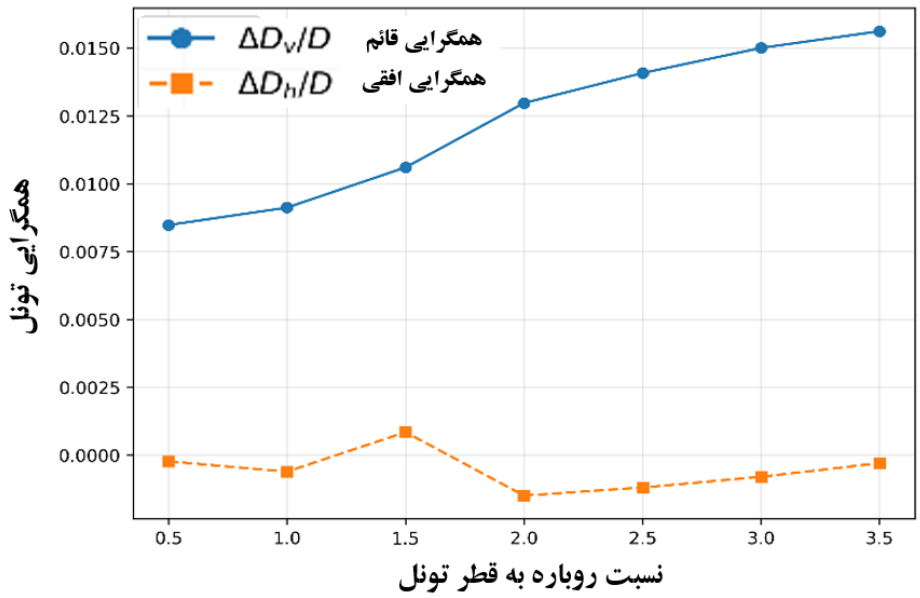
در عمق میانی منجر به تمرکز بیشتر تغییرشکل و افزایش بیضوی‌شدن تونل در عمق‌های بیشتر شده است.



شکل ۸: تغییرات بیضوی‌شدن مقطع تونل نسبت به نسبت روباره به قطر H/D.

شکل ۹ میزان همگرایی تونل را در راستای قائم و افقی به صورت بی‌بُعد $(\Delta D/D)$در نسبت‌های مختلف روباره به قطر H/Dنشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که همگرایی قائم تونل با افزایش عمق قرارگیری (افزایش H/D) به‌طور یکنواخت تا حدود ۸۵ درصد افزایش یافته است. این روند نشان‌دهنده غلبه تدریجی تنش قائم و تمرکز آن در تاج و کف تونل بوده و نشان می‌دهد در عمق‌های بیشتر، مقطع تونل بیشتر تمایل به تغییر شکل عمودی و بسته‌شدن در جهت قائم دارد. در مقابل، همگرایی افقی تونل بسیار ناچیز بوده و مقدار آن حول صفر نوسان دارد. این موضوع تأیید می‌کند که دیواره‌های جانبی تونل به دلیل قوس‌بندی تنش و زاویه محصورشدگی جانبی در مدل *Hardening Soil* نسبت به تغییرشکل افقی مقاومت بیشتری نشان می‌دهند.

افت و خیز جزئی در تغییرشکل‌ها در حوالی $H/D \approx$ ۱/۵نیز با تغییر سختی لایه میانی خاک (عمق ۸–۱۶ متر) مرتبط است که همان طور که پیش‌تر اشاره شد، لایه میانی با چسبندگی کمتر نسبت به لایه‌های بالایی و پایینی، باعث افزایش حساسیت تغییرشکل تونل در آن عمق شده است.



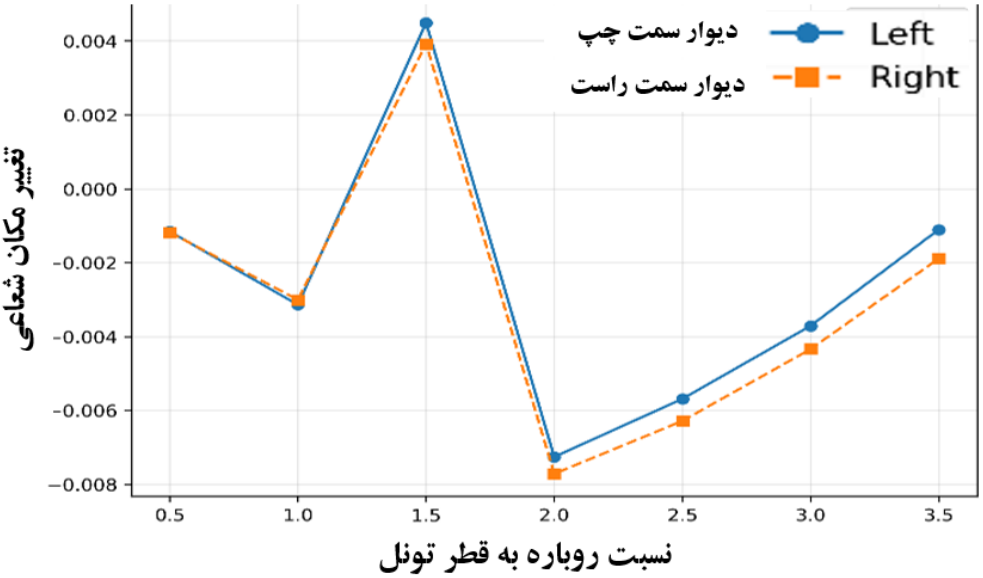
شکل ۹: تغییرات همگرایی قائم و افقی تونل نسبت به نسبت روباره به قطر H/D.

شکل ۱۰ تغییرمکان شعاعی دیواره چپ و راست تونل را در عمق‌های مختلف (نسبت H/D) نشان می‌دهد. مقادیر مثبت بیانگر جابجایی به سمت داخل تونل و مقادیر منفی نشان‌دهنده جابجایی به سمت بیرون یا رانش خاک به سمت دیواره می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که:

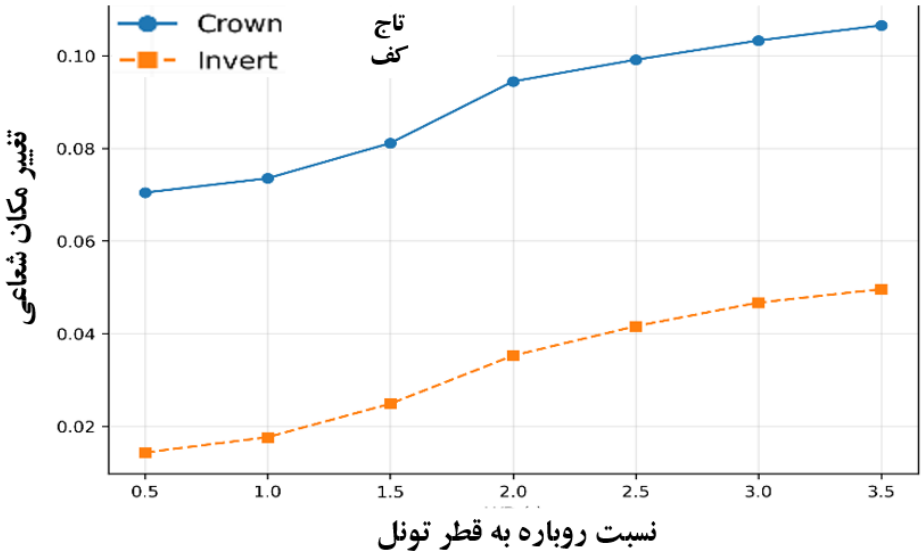
- رفتار دیواره چپ و راست تونل بسیار متقارن بوده و اختلاف بسیار کمی با هم دارند؛ این موضوع صحت مدل‌سازی و شرایط متقارن بارگذاری را تأیید می‌کند.
- در نسبت‌های کوچک H/D(عمق کم)، تغییرشکل‌ها کوچک‌تر بوده و در محدوده‌ای نزدیک به صفر قرار دارند.
- در $H/D = ۱/۵$یک افزایش قابل توجه تغییرمکان به سمت داخل مشاهده می‌شود. این رفتار با حضور لایه خاک با سختی کمتر در عمق ۸–۱۶ متر مرتبط است که منجر به تمرکز تغییرشکل‌ها در بدنه تونل می‌شود.
- در عمق‌های بیشتر $(H/D > ۲)$ تغییرشکل شعاعی مجدداً افزایش یافته اما مقدار آن کمتر از حالت $H/D = ۱/۵$. علت این امر آن است که با افزایش روباره، فشار قائم بیشتر شده اما قوس‌بندی تنش و محصورشدگی جانبی نیز تقویت شده و مانع از تغییرشکل بیش از حد جانبی می‌شود.

به طور کلی، مقدار تغییرمکان در راستای افقی نسبت به تغییرشکل قائم تونل بسیار کمتر بوده و نشان‌دهنده پایداری جانبی مناسب تونل در خاک‌های لایه‌ای مدل‌شده است.



شکل ۱۰: تغییرمکان شعاعی دیواره چپ و راست تونل نسبت به نسبت روباره به قطر H/D.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد با افزایش نسبت H/D، میزان جابه‌جایی شعاعی تونل افزایش می‌یابد که بیانگر نقش اثرگذار تنش‌های سربار بر تغییرشکل پوشش است. در تمامی حالت‌ها، تغییرمکان تاج تونل بیشتر از کف تونل است؛ این امر به دلیل تمرکز تنش‌های قائم در ناحیه تاج و محصورشدگی بالاتر خاک اطراف کف تونل می‌باشد. همچنین افت محسوس سختی در لایه میانی خاک موجب افزایش بارز تغییرمکان در نسبت $H/D = ۲$شده است. این رفتار تأکیدی بر حساسیت تغییرشکل تونل نسبت به تغییرات لایه‌بندی و مشخصات ژئومکانیکی خاک دارد.



شکل ۱۱: تغییرمکان شعاعی تاج و کف تونل در برابر نسبت روباره H/D.

۴- تفسیر نتایج

نتایج تحلیل عددی نشان داد با افزایش نسبت روباره H/D، میزان نشست سطح زمین و تغییرشکل‌های بدنه‌ی تونل روند افزایشی دارد. منحنی‌های نشست سطحی در شکل‌های مربوطه فرم زنگوله‌ای متعارف را نشان می‌دهند که با الگوی کلاسیک پک [۱۰]و روابط تجربی نیو [۱۱] همخوانی دارد. این افزایش را می‌توان ناشی از رشد تدریجی قوس تنشی (*Stress Arching*) و توسعه‌ی ناحیه‌ی پلاستیک در اطراف تونل دانست. با افزایش عمق، تنش‌های محصورکننده در خاک پیرامون تونل افزایش یافته و باعث تمرکز کرنش‌های پلاستیک در حجم بیشتری از خاک می‌شوند؛ در نتیجه انتقال تنش گسترده‌تر شده و مقدار نشست حداکثر($Smax$)و پهنای حوضه‌ی نشست i افزایش می‌یابد.

با این حال، رفتار i غیرخطی بوده و در محدوده‌ی $۲ - ۱/۵ \approx H/D$ کاهش موضعی دارد. این افت ناشی از عبور تونل از یک لایه‌ی میانی با مدول سختی کمتر است، جایی که تمرکز کرنش‌ها باعث کاهش کارآیی انتقال تنش به تراز سطح زمین می‌شود. چنین پدیده‌ای پیش‌تر توسط پک[۱۰] و اوریلی و نیو[۱۱] برای خاک‌های لایه‌دار گزارش شده و بیانگر وابستگی شدید هندسه‌ی حوضه‌ی نشست به تغییرات سختی خاک است.

تحلیل تغییرشکل بدنه‌ی تونل نشان می‌دهد تاج تونل بیشترین جابجایی شعاعی را تجربه می‌کند (شکل *Crown–Invert*). در تونل‌های کم‌عمق، تمرکز تنش قائم در تاج بیشتر است و فشار محصورکننده در کف تونل ضعیف‌تر می‌باشد؛ بنابراین رفتار پلاستیک زودتر در تاج فعال می‌شود و *Ovality* مقطع افزایش می‌یابد. با افزایش عمق، فشار محصورکننده به‌تدریج باعث متعادل‌شدن میدان تنش می‌شود، اما همزمان کرنش پلاستیک در تاج همچنان غالب باقی می‌ماند. این روند با گزارش میر [۱۲] و سازگار است.

در مقابل، تغییرشکل‌های افقی دیواره‌های چپ و راست (شکل دیوارها) دامنه‌ی بسیار کم و رفتار تقریباً متقارن دارند. این موضوع بیانگر پایداری جانبی و عملکرد هماهنگ سیستم خاک–پوشش است. تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده را می‌توان به ناهمگنی موضعی خاک و تغییرات کوچک در تنش اولیه نسبت داد؛ وجود این نوسانات نشان‌دهنده‌ی تأثیر واقعی لایه‌بندی غیرایکنواخت خاک بر توزیع تنش پیرامون تونل است.

مکانیزم بیضوی‌شدن تونل نیز با افزایش عمق تشدید شد، که در نمودار همگرایی قائم و افقی دیده می‌شود. همگرایی قائم تقریباً یک مرتبه بزرگ‌تر از افقی است و روندی کاملاً افزایشی دارد، در حالی که همگرایی افقی بسیار ناچیز است. نسبت این دو مؤلفه نشان‌دهنده‌ی تبدیل مقطع دایره‌ای به حالت بیضوی با تغییر قطر عمودی غالب بر افقی است که این امر در نتیجه‌ی مستقیم افزایش تنش قائم مؤثر در تاج و نقش محدود تنش افقی جانبی در اعماق بیشتر به وجود آمده‌است.

توزیع تغییرشکل‌های شعاعی در پیرامون محیط تونل (شکل $u_r(\theta)$) نشان می‌دهد که نواحی تاج و کف بیشترین تغییر مکان‌های شعاعی را دارند، در حالی که بخش‌های جانبی تقریباً خنثی‌اند. با افزایش عمق و تغییر شرایط محصورشدگی، ناحیه‌ی پلاستیک پیرامون تاج گسترش یافته و باعث افزایش ناگهانی جابجایی درونی در این بخش می‌شود. این رفتار غیرخطی را می‌توان نتیجه‌ی تعادل بین فشار جانبی فعال در تاج و فشار غیرفعال در کف دانست که با افزایش روباره تغییر می‌کند.

مقدار حجم از دست‌رفته‌ی خاک VL که از انتگرال نشست سطحی محاسبه شد، روندی افزایشی با عمق دارد. هرچند مقادیر عددی آن از داده‌های میدانی سه‌بعدی کمتر است، اما جهت و روند تغییر منطبق با مشاهدات میدانی و مدل‌های تحلیلی میر[۱۳] است. همان‌طور که در این پژوهش ذکر شد، تحلیل دوبعدی منجر به برآورد عددی متفاوتی نسبت به واقعیت سه‌بعدی می‌شود و تفسیر VLباید به‌صورت نسبی انجام شود.

در مجموع، افزایش روباره علاوه بر تشدید نشست، موجب تغییر محسوس در توزیع تنش و شکل ناحیه‌ی پلاستیک شده است. در عمق‌های کم، تمرکز تنش‌ها به تاج محدود بوده و پهنای حوضه‌ی نشست کوچک‌تر است؛ با افزایش عمق، فشار محصورکننده و توسعه‌ی قوس تنشی منجر به توزیع یکنواخت‌تر کرنش‌ها و افزایش پهنای i گردید. از سوی دیگر، وجود لایه‌ی ضعیف در میانه‌ی پروفیل سبب شکست روند کلاسیک و بروز تغییرات موضعی در *Ovality* و i شد که اهمیت شناخت دقیق ساختار زمین‌شناسی و مدول سختی لایه‌ها را در طراحی تونل‌های شهری برجسته می‌کند.

از نظر محدودیت، ماهیت دوبعدی مدل نمی‌تواند تمام اثرات سه‌بعدی پیشروی و ساخت تونل را منعکس کند، و رفتار مدل *Hardening Soil* به پارامترهای ورودی حساس است؛ در نتیجه عدم قطعیت در مشخصات لایه‌ی نرم می‌تواند بر پاسخ

غیرخطی مشاهده‌شده تأثیرگذار باشد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از مدل‌سازی سه‌بعدی مرحله‌ای همراه با کالیبراسیون آزمایشگاهی دقیق‌تر استفاده شود تا امکان مقایسه‌ی کمی‌تر با پروژه‌های واقعی فراهم گردد.

در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که رفتار تغییرشکلی تونل و الگوی نشست سطح زمین در خاک‌های لایه‌دار تابعی قوی از فشار محصورکننده، سختی نسبی لایه‌ها و توسعه‌ی قوس تنشی است. اگرچه نتایج در مجموع با روابط تجربی کلاسیک همخوانی دارند، مشاهده‌ی انحرافات موضعی نشان می‌دهد تحلیل عددی مبتنی بر مدل رفتاری پیشرفته ابزار ضروری برای درک صحیح پاسخ تونل در چنین محیط‌هایی است.

۵- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر نسبت روباره به قطر تونل H/Dبر رفتار تغییرشکل سطح زمین و بدنه تونل در خاک‌های لایه‌بندی‌شده با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد. تحلیل‌ها نشان دادند که افزایش عمق قرارگیری تونل منجر به افزایش نشست سطح زمین و تغییرشکل پوشش تونل می‌شود. در حالت کلی، با افزایش H/D، مقدار نشست حداکثر سطحی S_{max}و پهنای حوضه i افزایش یافته و فرم پروفیل نشست مطابق الگوی کلاسیک تونل‌های شهری رفتار کرد. با این حال، وجود لایهٔ میانی با سختی کمتر موجب تغییر موضعی در روند نشست و کاهش مقدار i در حدود $H/D \approx ۲ - ۲/۵$شد؛ موضوعی که اهمیت لایه‌بندی خاک را در ارزیابی تغییرشکل‌های ناشی از حفاری تونل برجسته می‌سازد.

رفتار بدنه تونل نیز نشان داد که تاج تونل بیشترین تغییرمکان شعاعی رو به داخل را تجربه می‌کند در حالی که کف تونل به‌دلیل محصورشدگی بیشتر خاک اطراف، تغییرشکل کمتری دارد. همچنین بیضوی‌شدن مقطع تونل *(Ovality)* با افزایش عمق افزایش یافت که با تمرکز تنش قائم و کاهش قابل توجه مقاومت جانبی خاک در عمق‌های بیشتر قابل توجیه است. محاسبهٔ حجم از دست‌رفته خاک *(VL)* نیز روند افزایشی با عمق را نشان داد، هرچند مقدار مطلق آن باید با توجه به ماهیت دوبعدی تحلیل تفسیر شود.

مقایسهٔ نتایج با روابط تجربی پک و مطالعات مشابه نشان داد که رفتار کلی مدل عددی با اصول کلاسیک نشست تونل سازگار است؛ بااین‌وجود، تأثیر لایه‌بندی خاک موجب انحراف نسبی از روابط ساده‌شده تجربی گردید. ازاین‌رو، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از تحلیل‌های عددی به‌همراه شناخت دقیق شرایط ژئوتکنیکی محل، به‌ویژه در خاک‌های لایه‌بندی‌شده، برای پیش‌بینی واقع‌بینانه نشست و تغییرشکل تونل ضروری است.

به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه می‌تواند در مراحل طراحی تغییرشکل‌محور تونل‌های کم‌عمق و نیمه‌عمیق به‌کار گرفته شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با درنظرگرفتن تحلیل سه‌بعدی، مدل‌سازی مرحله‌ای حفاری، و کالیبراسیون پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و ابزار دقیق انجام گیرد تا امکان مقایسهٔ کمی‌تر و دقیق‌تر با رفتار واقعی پروژه‌های تونلی فراهم شود.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از شرکت مهندسین مشاور رهسازطرح به‌سبب فراهم نمودن زمینه‌های لازم برای انجام این پژوهش و همکاری‌های ارزشمند در طول مراحل آن، اعلام می‌دارند.

۷- منبع‌ها

[1] X. Wu, M. Broere, and E. Bus, “Surface settlement caused by shallow tunnelling in clay: Centrifuge tests and FE analysis,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 49, pp. 9–22, 2015.
[2] X. Wu, “Ground response of shallow tunnels in soft soil,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 60, pp. 135–146, 2016.
[3] M. N. Vu, *Geotechnical Aspects of Urban Tunnelling in Soft Ground*, Ph.D. dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands, 2016.
[4] S. Islam, A. Bhowmik, and M. I. Hossain, “Numerical investigation of tunnelling effects on ground deformation for different tunnel cover-to-diameter ratios,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5802, pp. 1–19, 2022.
[5] Z. Ma, X. Xie, H. Jia, J. Zhao, S. He, and X. Wang, “Prediction and application of surface settlement

of shallow buried tunnels taking into account strata slip cracks," *Processes*, vol. 11, p. 1575, 2023.
[6] J. Shi, Z. Ma, X. Xie, and H. Jia, "Analysis of slip surfaces and settlement trough characteristics for shallow-buried tunnels in clay," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 126, p. 104611, 2023.
[7] Y. Yang, Z. Liu, and H. Wang, "A random medium model for predicting ground settlement induced by shallow tunnelling," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 437–448, 2004.
[8] Z. Xiao and A. Sems, "Correlation between volume loss and surface settlement in soft clay using FLAC," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 83, pp. 145–152, 2019.
[9] A. Franza and A. Mair, "Centrifuge modelling of ground movements induced by shallow tunnels in sand," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 86, pp. 112–127, 2019.
[10] Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunnelling in soft ground." Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., Mexico City, Vol. 2, pp. 225–290.
[11] M.P. O'reilly, B.M. New, settlements above tunnels in the united kingdom - their magnitude and prediction, in: Tunnelling 82. Papers presented at the third International Symposium, organized by the Institution of Mining and Metallurgy., 1982, pp. 173-181.
[12] Mair, R. J., Taylor, R. N., and Burland, J. B. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. Géotechnique, 43(2), 315–320.
[13] Mair, R. J. (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling. In *Proceedings of the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Rotterdam: Balkema Press, pp. 713–718.

JOURNAL OF ROCK MECHANICS

Numerical Analysis of Tunnel Deformation Behavior and Surface Settlement in Layered Clayey Soils with Emphasis on the Cover-to-Diameter Ratio

1st. Mohammad Pouria Aghaei[1]; 2nd. Sadegh Tarigh Azali[2]; 3th. Armin Moghbeli[3]
1- M.Sc. in Civil Engineering – Geotechnical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
2- Ceo, Rahsaz Tarh Consulting Engineers, Tehran, Iran.
3- Head of Structural Department, Rahsaz Tarh Consulting Engineers, Tehran, Iran.

Received: 24 October 2025 Accepted: 21 December 2025
(*Corresponding author: pooria.aghaie401@sharif.edu)

Keywords

Tunnel Surface Settlement, Settlement Trough, Numerical Modeling, NATM Method, PLAXIS 2D

Final English Extended Abstract

This study investigates the effect of the cover-to-diameter ratio (H/D) on ground deformation and the response of the initial tunnel lining in layered clay soils using numerical modeling. The tunnel diameter was kept constant, and the H/D ratio was varied from 0.5 to 3.5 to simulate shallow to deep tunneling conditions. The analyses were performed using the finite element method with the Hardening Soil constitutive model. The excavation process and installation of the shotcrete primary lining were simulated in stages to realistically represent the construction sequence. The system response was evaluated using several indicators, including maximum surface settlement, settlement trough width, vertical and horizontal tunnel convergence, tunnel ovalization, and two-dimensional volume loss. In addition, settlement profiles were fitted using Peck's Gaussian function to quantitatively evaluate settlement parameters.

The results indicate that settlement behavior is strongly influenced by soil layering and stiffness variations. With increasing H/D within the stiffer upper layers, the settlement trough width decreased by about 30%, indicating a more concentrated settlement zone. As the tunnel entered a softer intermediate layer, the trough width increased by approximately 30%, reflecting greater lateral spreading of ground deformation. In contrast, the maximum surface settlement increased by about 30%, while the volume loss increased by more than 100%, indicating a greater development of the plastic zone with increasing cover. Tunnel structural response also intensified with increasing H/D: tunnel ovalization increased by about 75% and vertical convergence increased by about 85%, whereas horizontal convergence remained negligible. Radial displacement at the tunnel crown and invert increased by approximately 71% and 275%, respectively, indicating intensified deformation with increasing cover.

Overall, the results demonstrate that increasing the H/D ratio amplifies both ground and tunnel deformations. Moreover, the presence of softer soil layers can significantly alter the settlement pattern by promoting wider settlement troughs. These findings highlight the importance of considering soil stratification and staged numerical analysis in the deformation-based design of urban tunnels.

Summary

This study numerically investigates the influence of the cover-to-diameter ratio (H/D) on ground deformation and tunnel lining response in layered clayey soils. A circular tunnel with constant diameter was analyzed under varying cover depths representing shallow to deep conditions. Finite element modeling with the Hardening Soil constitutive model was employed, and the excavation and shotcrete lining installation were simulated in staged construction to realistically capture stress redistribution. Key response indicators including maximum surface settlement, settlement trough width,

vertical and horizontal convergence, tunnel ovality, and two-dimensional volume loss were evaluated. Results indicate that increasing H/D leads to wider settlement troughs and greater lining deformation, while local deviations from general trends occur due to soil layering effects. The findings emphasize the importance of considering both geometric ratios and stratigraphic conditions in deformation-based tunnel design.

Introduction

Surface settlement and tunnel deformation are critical concerns in urban geotechnical engineering, as excessive ground movement may endanger surface structures and underground utilities. Among geometric parameters, the cover-to-diameter ratio (H/D) plays a decisive role in controlling the magnitude and distribution of ground movements. Although empirical relationships suggest general trends between H/D and settlement characteristics, layered soil conditions may significantly alter these responses. This research aims to quantify the effect of H/D on both surface and lining deformations in stratified clay deposits and to evaluate how soil layering may cause deviations from classical settlement predictions

Methodology and Approaches

A two-dimensional finite element model was developed using PLAXIS to simulate a circular tunnel excavated in layered clay soils. The tunnel diameter was kept constant while cover depth varied to represent different H/D ratios. Soil behavior was modeled using the Hardening Soil model under drained conditions, and the lining was simulated as an elastic plate element representing shotcrete. Excavation and lining installation were modeled through a staged NATM-based sequence including stress release and sequential support activation. Surface settlements were extracted and fitted with a Gaussian distribution to determine settlement parameters. Tunnel response indicators such as vertical and horizontal convergence, radial displacement distribution, ovality, and normalized deformation indices were calculated. Two-dimensional volume loss was obtained from the integrated settlement profile.

Results and Conclusions

The results show that increasing H/D generally increases maximum surface settlement and lining deformation while widening the settlement trough and reducing its gradient. Vertical convergence was significantly greater than horizontal convergence, indicating dominant vertical stress effects. Tunnel ovality increased with depth due to stress arching and higher confinement pressures. A local reduction in settlement trough width was observed within an intermediate H/D range, attributed to the presence of a softer soil layer. Volume loss exhibited an increasing trend with depth in the two-dimensional framework. Overall, while numerical results follow classical settlement patterns, stratification effects may cause localized deviations. The study highlights the necessity of staged numerical analysis combined with accurate geotechnical characterization for reliable deformation-controlled tunnel design in layered urban soils