

مدلسازی عددی تأثیر پی‌های گسترده سطحی در نشست زمین، ناشی از تونل‌سازی در خاک ماسه‌ای

پویا آقابگی، وحید شهامت، محمد ابراهیمزاده

۱- مقدمه

با توسعه روزافزون فضاهای شهری نیاز به استفاده از فضاهای زیرزمینی از جمله تونل بیش از پیش احساس می‌شود. ساخت تونل در زمین‌های نرم باعث جابجایی زمین اطراف آن می‌شود که ممکن است باعث بروز آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی مجاور گردد. این موضوع در نواحی شهری به دلیل تراکم زیاد سازه‌ها اهمیت بیشتری خواهد داشت. بنابراین تخمین شکل و اندازه دقیق منحنی نشست زمین و تعیین پارامترهای موثر بر روی آن در محیط‌های شهری از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش تأثیر پی‌های گسترده متعارف شهری در شرایط مختلف (بر روی محور تونل و با خروج از مرکزیت) در منحنی نشست زمین در خاک ماسه‌ای به صورت عددی بررسی می‌شود.

۲- مروری بر ادبیات فنی

روش تجربی پک (۱۹۶۹) رایج‌ترین روش برای تخمین منحنی نشست سطح زمین می‌باشد [۱]. در مورد زمین‌های ماسه‌ای به دلیل اتساع و انقباض خاک، بعضاً اختلاف‌هایی بین منحنی گاوسی پک و مشاهدات گزارش شده است. میرحبیبی و سروش (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر وزن سازه، سختی سازه و عمق تونل در منحنی نشست زمین به صورت عددی (دو-بعدی) پرداختند و گراف‌های نظیر را برای منحنی نشست ارائه دادند و سختی سازه را تأثیرگذارترین عامل در منحنی نشست دانستند [۲]. جیانگ و همکاران (۲۰۱۴) مواردی نظیر پاسخ زمین و سازه‌های بر روی آن حین تونل‌سازی را در یک مطالعه موردی، مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که پاسخ زمین به عواملی نظیر سختی، وزن، نوع و کاربرد پی بستگی دارد [۵]. بیلوتا و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اندرکنش بین سازه و تونل‌سازی، به صورت عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند نشست زمین در حد مجاز بوده است. مدل‌سازی‌های فیزیکی به دلیل لحاظ رفتار واقعی تر خاک معمولاً نتایج بهتری را ارائه می‌دهند و می‌توان صحت تئوری‌های ارائه شده را بررسی نمود [۷]. به این ترتیب نشست زمین در اثر تونل‌سازی در محیط‌های شهری بر روی سازه‌های سطحی و زیرسطحی مجاور تأثیر می‌گذارد. این امر می‌تواند باعث به وجود آمدن نشست‌های نامتقارن در پی‌های سطحی و عمیق و در نتیجه کج شدگی ساختمان و ایجاد ترک در آن شود. از این رو تخمین شکل و اندازه دقیق منحنی نشست و تعیین پارامترهای موثر بر آن در محیط‌های شهری از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

۳- مدل‌سازی عددی

هندسه مسئله به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای نشان داده شده در هندسه مدل شامل قطر تونل، عمق لایه خاک ماسه‌ای، عمق تونل (فاصله مرکز تونل از سطح زمین)، طول بارگذاری و خروج از مرکزیت آن در جدول ۱ آورده شده است. طول و عمق لایه ماسه‌ای به ترتیب ۴۰ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. برای تعریف شرایط مرزی، مقادیر جابجایی افقی لایه‌های قائم لایه ماسه‌ای و همچنین جابجایی قائم و افقی در عمق ۲۰ متری آن در مدل صفر اعمال شده است. با توجه به اینکه تونل در محیط شهری در عمق کمتری نسبت به سطح زمین بوده و قطر کمتری نیز دارند، مقادیر قطر و عمق تونل به ترتیب ۶ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. طول موثر سربار با توجه به اندازه متعارف سازه‌های سطحی، ۱۰ متر فرض شده استبرای بررسی تأثیر مقدار سربار، خروج از مرکزیت آن و افت ناشی از تونل‌سازی بر نشست زمین ۱۰ مدل به شرح آورده شده در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌های ۱ تا ۴ تأثیر افت ناشی از تونل‌سازی، در مدل‌های ۵ تا ۷ تأثیر مقدار سربار و در مدل‌های ۸ تا ۱۰ تأثیر خروج از مرکزیت سربار بر نشست زمین در نرم‌افزار Plaxis شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی مدل‌سازی عددی

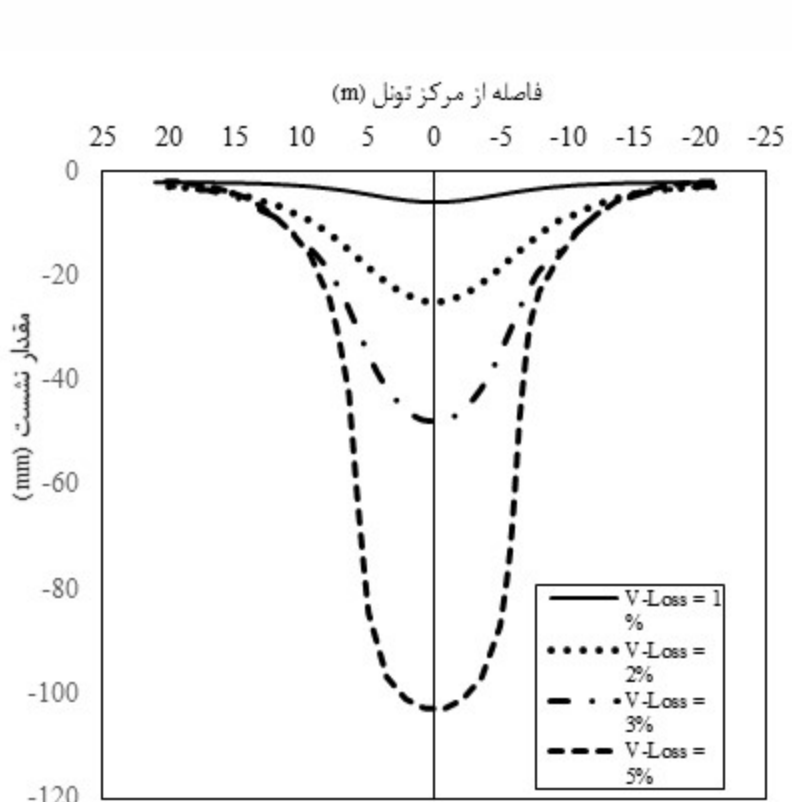
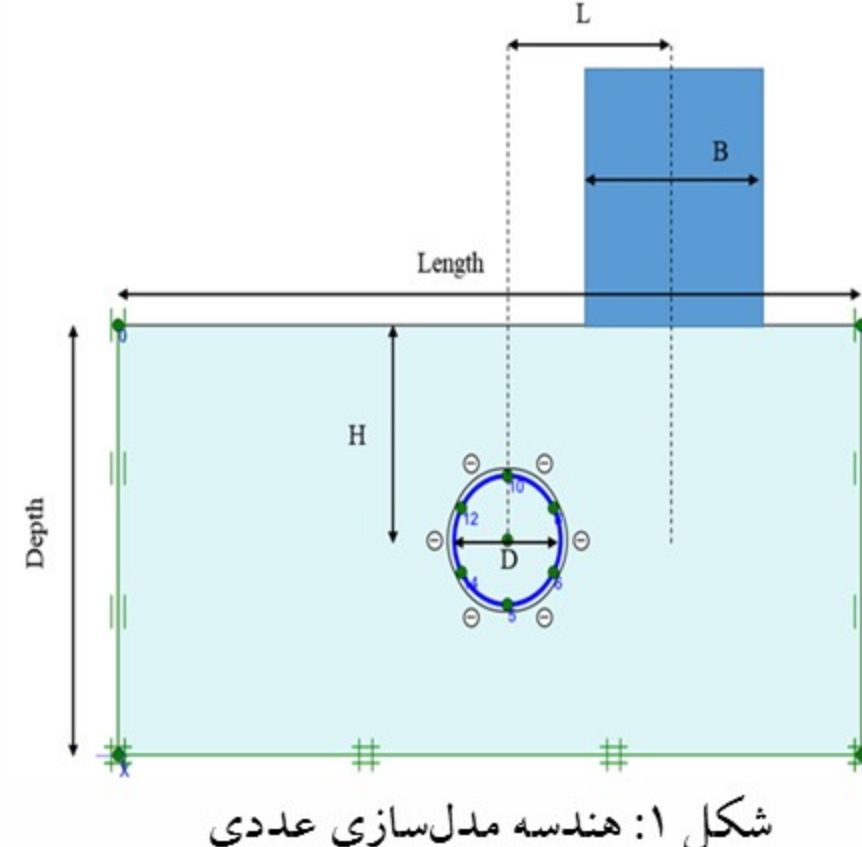
مشخصه هندسی	واحد	نماد	مقدار
قطر تونل	متر	D	۶
عمق تونل	متر	H	۱۰
طول تونل	متر	Length	۴۰
عمق لایه خاک	متر	Depth	۲۰
طول موثر سربار	متر	B	۱۰

جدول ۲: مقادیر فشار سربار، خروج از مرکزیت آن و افت ناشی از تونل‌سازی در مدل‌های مختلف

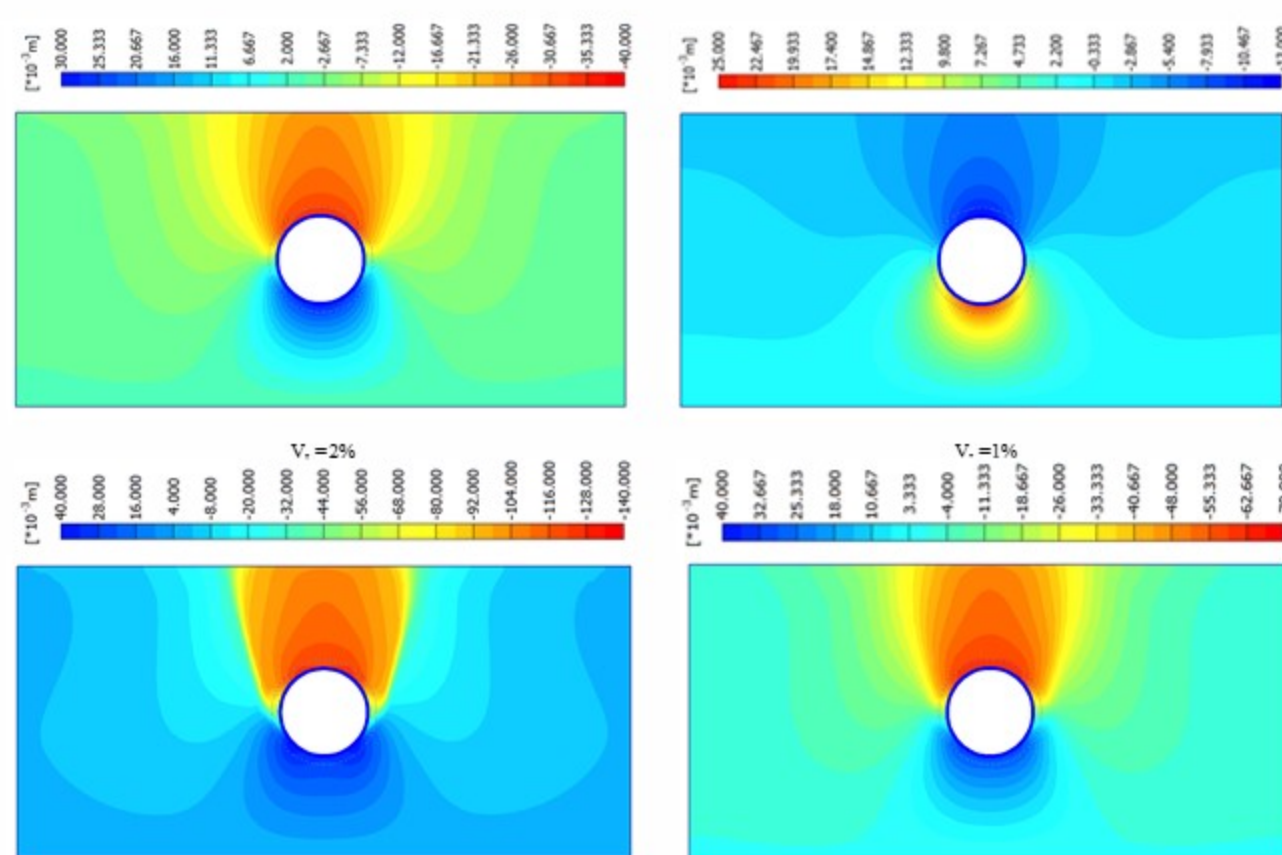
مدل	فشار سربار B_p kN/m^2	L متر	V_L درصد
1	0	0	1
2	0	0	2
3	0	0	3
4	0	0	4
5	80	0	5
6	150	0	6
7	200	0	7
8	80	5	8
9	80	8	9
10	80	12	10

۴- نتایج مدل‌سازی عددی

در این بخش به بحث و بررسی نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک مدل‌های عددی ساخته شده توسط نرم افزار المان محدود Plaxis پرداخته می‌شود. در این مطالعه با در نظر گرفتن یک مدل به عنوان مدل اصلی و پایه، پارامترهای موردنظر را در مدل پایه تغییر داده و تأثیرات ناشی از این تغییرات بر روی منحنی نشست حاصل از حفاری تونل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه میزان افت ناشی از تونل‌سازی، وزن سازه و فاصله سربار از مرکز تونل معرف شکل و حالت منحنی نشست به وجود آمده در سطح زمین در اثر حفاری تونل می‌باشد، در این مطالعه تأثیر هر یک از آن‌ها بر روی منحنی نشست بررسی گردیده است. نتایج تأثیر افت ناشی از تونل‌سازی بر تغییر شکل لایه ماسه‌ای و تونل در شکل ۲، تأثیر وزن سازه در شکل ۳ و تأثیر خروج از مرکزیت سربار در شکل ۶ نشان داده شده است.

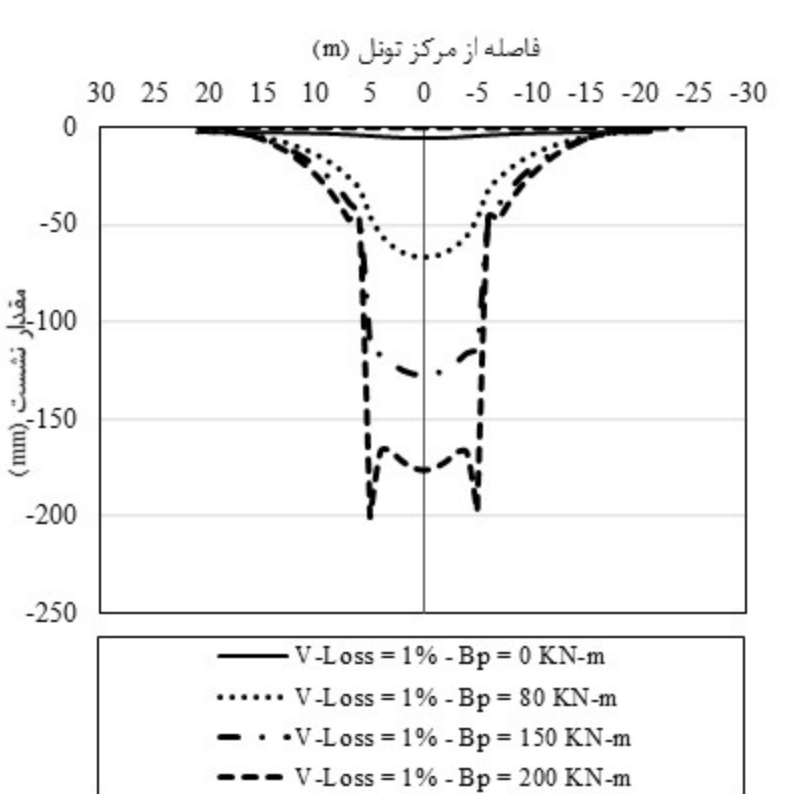


شکل ۳: نمودار تأثیر افت ناشی از تونل‌سازی بر نشست زمین

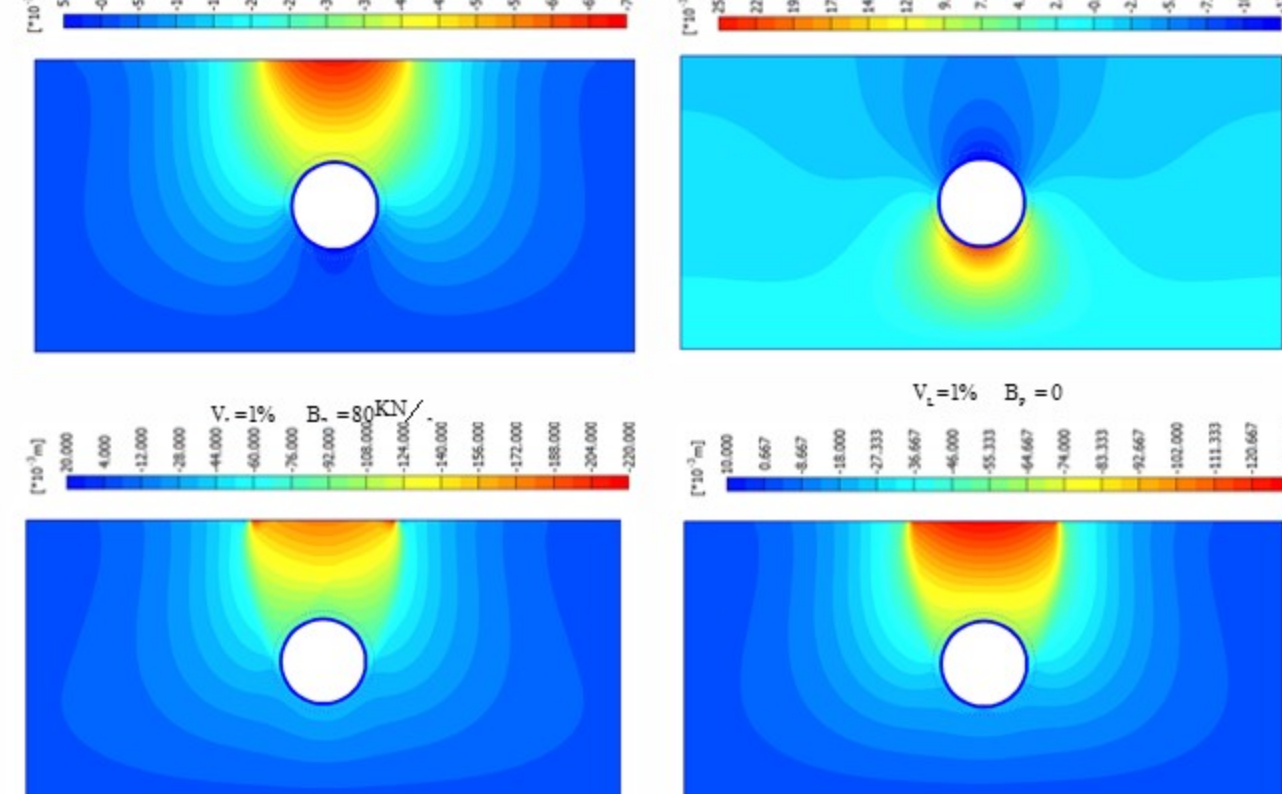


شکل ۴: تأثیر سربار بر نشست زمین ناشی از تونل‌سازی

منحنی نشست زمین به‌ازای مقادیر مختلف در شکل ۳ ترسیم شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش افت ناشی از تونل‌سازی از ۱٪ به ۵٪ مقدار نشست ماکزیمم ۱۸ برابر شده است. همچنین با افزایش V_L شیب منحنی نشست زمین بیشتر شده است.

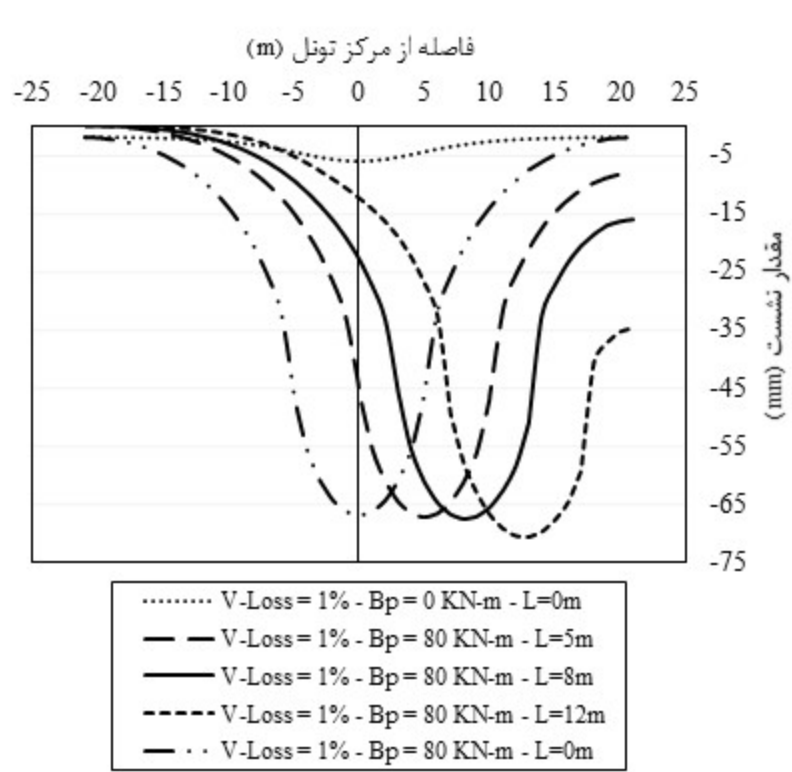


شکل ۵: نمودار مقدار نشست زمین بر حسب تغییرات مقدار سربار

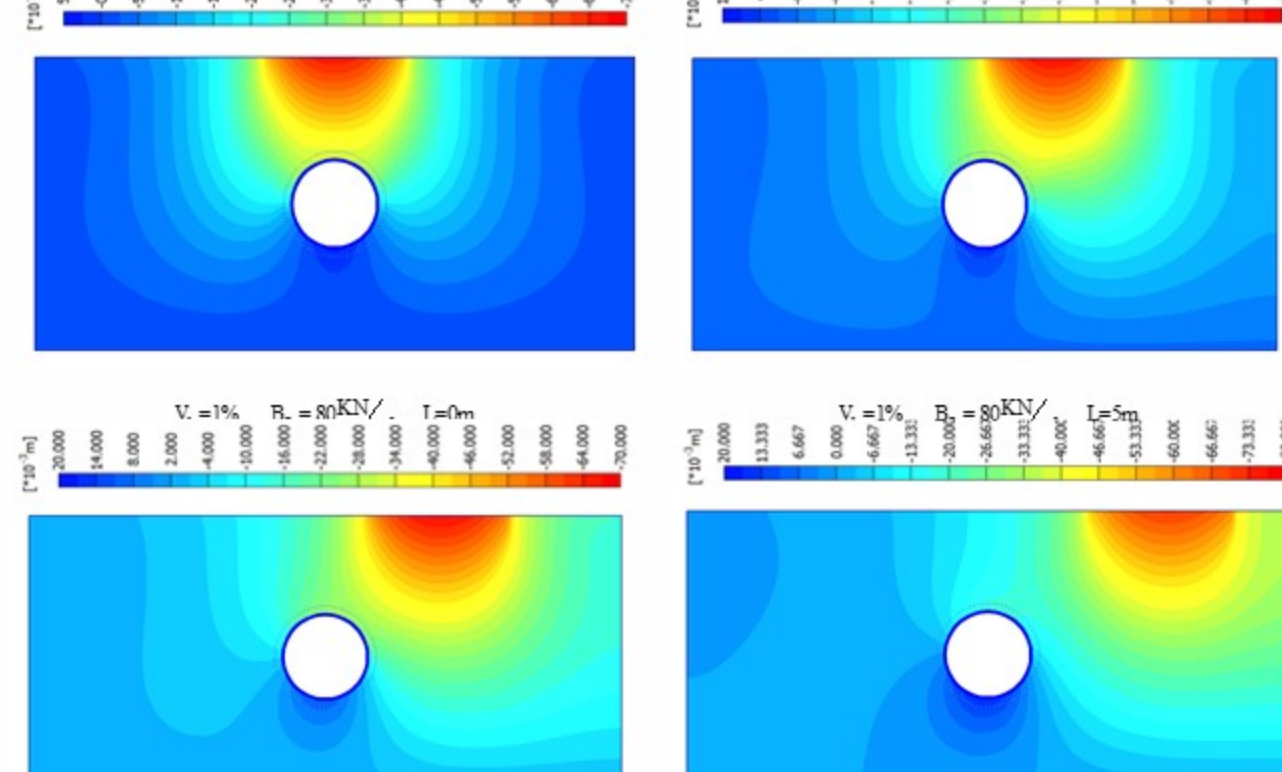


شکل ۶: نشست زمین بر حسب فاصله سربار از مرکز تونل

منحنی نشست زمین به‌ازای مقادیر مختلف سربار در شکل ۵ ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سربار، نشست ناشی از تونل‌سازی در سطح زمین بیشتر می‌شود به طوری که با اعمال سربار مقدار نشست در آکس تونل حدود ۳۰ برابر شده است.



شکل ۷: نمودار نشست زمین بر حسب فاصله سربار از مرکز تونل



شکل ۸: نشست زمین بر حسب فاصله سربار از مرکز تونل

منحنی نشست زمین به‌ازای مقادیر مختلف خروج از مرکزیت سربار در شکل ۷ ترسیم شده است. با افزایش خروج از مرکزیت بار، نشست زمین در آکس تونل کاهش یافته است ولی مقدار نشست ماکزیمم تغییر نمی‌کند به جز در حالتی که خروج از مرکزیت ۱۲ متر است. در این حالت مقدار نشست به دلیل عدم ارضای شرط محیط نیمه بی‌نهایت، اندکی بیشتر شده است.

۵- نتیجه‌گیری

- با افزایش افت ناشی از تونل‌سازی از ۱٪ به ۵٪ مقدار نشست ماکزیمم ۱۸ برابر شده است. همچنین با افزایش V_L شیب منحنی نشست زمین بیشتر شده است.
- با افزایش سربار، نشست ناشی از تونل‌سازی در سطح زمین بیشتر می‌شود به طوری که با اعمال سربار مقدار نشست در آکس تونل حدود ۳۰ برابر شده است.
- با افزایش خروج از مرکزیت بار، نشست زمین در آکس تونل کاهش یافته است ولی مقدار نشست ماکزیمم تغییر نمی‌کند به جز در حالتی که خروج از مرکزیت ۱۲ متر است. در این حالت مقدار نشست به دلیل عدم ارضای شرط محیط نیمه بی‌نهایت، اندکی بیشتر شده است.

۶- مراجع

[1] R. Peck, "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground," 7th Conf Soil Mech. Found. Eng. City, 1969.
 [2] A. Mirhabibi and A. Soroush, "Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 29, pp. 40-51, 2012.