



مدلسازی حفاری تونل در فضاهای شهری جهت بهینه سازی پارامترهای مرتبط با حفاری

علی کمک پناه

دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، تهران

پریسا رضایی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، تهران

چکیده: هدف اصلی این مقاله بررسی تاثیر پارامترهای مختلف ساخت تونل بر نشست های سطحی در بالای تونل که مهمترین بحث مطرح در حفاری زمین های نرم است، می باشد. برنامه المان محدود "PLAXIS 3D Tunnel" برای تحلیل عددی روش تونلسازی پوسته ای با ماشین حفار EPB در خاک رس سیلتی در شرایط اشباع و نرمال تحکیم یافته، استفاده شده است. دو پارامتر حفاری، فشار اعمالی بر هد دستگاه و فشار تزریق برای مقادیر مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مقدار بهینه هرکدام با توجه به حداقل جابجایی کل، با استفاده از نمودارهای حاصل از مدلسازی، تعیین شده است. برای مسئله انتخاب شده جهت حفاری، مقدار فشار هد برابر ۲۴۵ کیلوپاسکال مطابق با فاکتور سربار ۱ و مقدار فشار تزریق برابر ۲۵۰ کیلوپاسکال مطابق با نسبت تزریق ۰/۹۵ برای حداقل جابجایی کل بدست آمده است. جهت کمینه سازی جابجایی کل و بدست آوردن مقادیر بهینه فاکتور سربار و نسبت تزریق بطور دقیق، از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با نتایج حاصل از نمودارها مطابقت داشته و مقدار بهینه فاکتور سربار ۰/۳۰۹ و نسبت تزریق ۰/۹۴۹۹ را نتیجه می دهد.

کلمات کلیدی: حفاری، بهینه سازی، زمین نرم، مدلسازی عددی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی.

Modeling of tunnel excavation in urban area for optimization of parameters related to excavation

Ali Komakpanah

Associate Professor, Tarbiat Modares University, Faculty of Engineering, Tehran

Parisa Rezaie

M.Sc Student, Tarbiat Modares University, Faculty of Engineering, Tehran

Abstract: The main target of this article is to analyze the influence of different tunneling parameters on the surface settlements above the tunnel which is the most important topic in the soft ground tunneling. Finite element software, "PLAXIS 3D Tunnel", has been used for the numerical analysis of the shield tunneling with EPB in silty clay in saturated and normal consolidated conditions. Two tunneling parameters, Face pressure and Grout pressure, are analyzed with different values and the optimum value of each is determined according to minimum total displacement using diagrams resulted from the simulation. For the problem selected for tunneling, the value of face pressure and grout pressure for minimum total displacement were obtained 245 kPa relevant to overload factor of 1 and 250 kPa relevant to grout ratio of 0.95, respectively. Neural network and genetic algorithm have been utilized for minimizing the total displacement and obtaining the exact optimum values of overload factor and grout ratio. Results from genetic algorithm is consistent with the results from the diagrams and gives the optimum value of 0.309 for overload factor and 0.9499 for grout ratio.

Keywords: Tunneling, Optimization, Soft ground, Numerical simulation, Genetic Algorithm, Neural network.

۱ مقدمه

تونل های شهری معمولاً در مجاورت سازه های موجود و نسبتاً نزدیک به سطح زمین ساخته می شوند. از مهمترین اهداف، حفاظت سازه های مجاور از خرابی ناشی از نشست های زیاد، چه نشست های کلی و چه تفاضلی، و همچنین دوران های بزرگ می باشد. گسترش تکنیک تونلسازی پوسته ای^۱ تا حدی جهت حداقل کردن نشست های سطحی بوده است. بخصوص، روش تعادل فشار زمین (EPB) یکی از پر کاربردترین روش های تونلسازی در زمین های نرم طی سال های اخیر بوده است. از دلایل استفاده فراوان این روش، می توان به تطبیق پذیری، اقتصادی بودن و کارایی آن در حداقل کردن نشست های سطحی در شرایط بد مانند زمین های نامرغوب اشاره کرد (Loganathan & Poulos, 1998).

در این مقاله با تهیه یک مدل عددی از فرآیند ساخت تونل های پوسته ای سعی شده است تا پارامترهای مرتبط، با روش بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک طوری استخراج گردند که بتوان یک فرآیند بهینه از حفاری را در ارتباط با متغیرهای طراحی پیش بینی نمود.

۲ مدل سازی تونل با نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel

۱-۲ هندسه مسئله

جهت مدل سازی مسئله، تونلی به قطر داخلی و خارجی $7/8$ و $8/5$ متر انتخاب گردیده است. عمق تونل از سطح زمین تا مرکز آن برابر $14/75$ متر می باشد.

فضای مدل سازی، زمینی که تونل در آن قرار می گیرد، دارای ارتفاع 29 متر، طول 30 متر و جهت پیشروی 80 متر می باشد. عمق آب زیرزمینی $1/5$ متر پایین تر از سطح زمین می باشد. در مدل کردن حفاری تونل، برای اجتناب از تاثیر مرزهای صفحات ابتدایی و انتهایی فضای مدل، فرض شده است که 25 متر ابتدایی مدل، حفاری و لاینینگ گذاری شده و حفاری از فاصله 25 تا 55 متر مدل شده است. 25 متر انتهایی نیز به دلیل اجتناب از تاثیرگذاری مرزهای صفحه انتهایی بر روی نتایج، بدون تغییر باقی می ماند. زمین مورد نظر در مدل سازی به صورت دو لایه رسی-سیلتی در نظر گرفته شده است. لایه بالایی به عمق $1/5$ متر و لایه پایین تر از آن بطور همگن کل مقطع تونل را فرا می گیرد.

۲-۲ مش بندی

تعداد المان ها در هر صفحه برابر 170 و در کل مدل سه بعدی برابر 4760 عدد می باشد.

۳-۲ مشخصات مصالح

مشخصات مصالح برای مسئله انتخاب شده جهت مدل سازی به شرح جدول ۱ می باشد.

۴-۲ بارها

فشار اعمالی بر هد دستگاه حفاری و فشار تزریق در مدل سازی تغییر می کنند. علاوه بر فشار اعمالی بر هد دستگاه حفاری و فشار تزریق، فشار جک ها نیز بر لاینینگ تونل وارد می شود. تحقیقات قبلی انجام شده، روابط بین تنش های وارد بر هد ماشین حفاری و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک را برای یک تونل دایروی

^۱ Shield tunneling

در خاک همگن رس پلاستیک ارائه داده اند (Peck, 1969, Leca, 2000). فاکتور سربار (N) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_T}{S_u} \quad (1)$$

σ_s = بار سرباره

γ = وزن مخصوص خاک

H = عمق مرکز تونل

σ_T = فشار نگهدار وارد بر هد ماشین حفار

S_u = مقاومت برشی زهکشی نشده خاک

البته بایستی ذکر گردد، به دلیل فرض کردن رفتار مصالح بصورت زهکشی شده در مدل بررسی شده، مقدار S_u برابر با مقدار مقاومت چسبندگی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح خاک مدل

واحد	لایه رس سیلتی پایین	لایه رس سیلتی بالا	پارامتر
-	مور کولمب	مور کولمب	مدل مصالح
-	زهکشی شده	زهکشی شده	رفتار مصالح
KN/m ^۳		۱۶	γ_{unsat} وزن مخصوص
KN/m ^۳	۱۸		γ_{sat} وزن مخصوص اشباع
KN/m ^۲	۸/۰۰E+۳	۸/۰۰E+۳	E مدول یانگ
-	۰/۳۵	۰/۳۵	N نسبت پواسن
KN/m ^۲	۱۰	۱۰	C چسبندگی
°	۲۰	۲۰	Φ زاویه اصطکاک
°	۰	۰	Ψ زاویه اتساع

به گفته Peck (1969)، N نبایستی از حدود ۶ تجاوز کند و تونلسازی در رس های پلاستیک با N کمتر از ۵ بدون مشکل خاصی انجام می شود. او همچنین ذکر کرد که در تونلسازی پوسته ای، N بزرگتر از ۵ در خاک های رس پلاستیک ممکن است سبب نفوذ بسیار سریع خاک به حفره دنباله شود و حفره نتواند بطور رضایت بخش با مواد تزریق پر گردد. علاوه بر این، برای مقادیر نزدیک به ۷، به علت تمایل به کج شدن تونل، پیشرفت تونل همراه با مشکل و کند خواهد شد. در مدل بررسی شده در این تحقیق، مقادیر N بین ۵+ تا ۶- انتخاب شده است که با توجه به روبار تونل، معادل با فشار ۱۵۵ KPa تا ۳۹۸ KPa بدست می آیند.

فشار جک ها نیز با توجه به مقادیر σ_T ، برای هر N با استفاده از فرمول های زیر بدست می آید:

$$F_{Jack} = F_{Friction} + F_{Face} \quad (2)$$

$$F_{Friction} = \mu \cdot N_{Friction} = \sigma_{Jack} \cdot A_{Lining} - \sigma_T \cdot A_{Face} \quad (3)$$

$$N_{Friction} = L \cdot D_e \cdot \frac{\pi}{2} \left[\sigma_{EV} + \frac{\gamma D_e}{2} + K_0 \left(\sigma_{EV} + \frac{\gamma D_e}{2} \right) \right] \quad (4)$$

^۲ Overload factor

$$\sigma_{EV} = \frac{b(\gamma - 2C)}{2K_0} \tan \delta [1 - e^{-2K_0 \tan \delta (h/b)}] \quad (5)$$

$$b = D_e [1 + 2 \tan(45 - \frac{\phi}{2})] \quad (6)$$

فشار تزریق نیز به صورت نسبت تزریق (M)، با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$M = \frac{P_G}{\sigma_{v_0}} \quad (7)$$

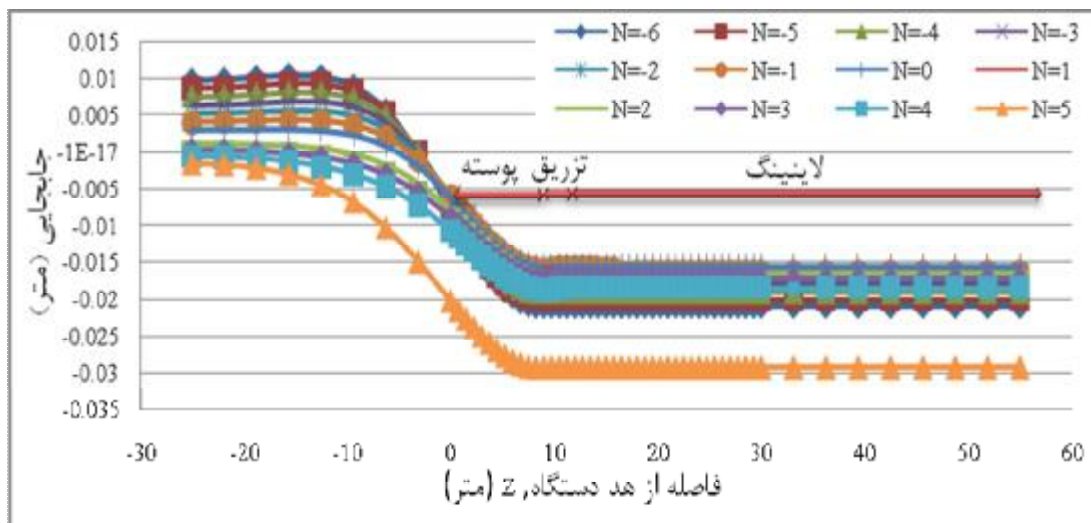
P_G = فشار تزریق متوسط در مرکز تونل

σ_{v_0} = تنش قائم در تاج تونل

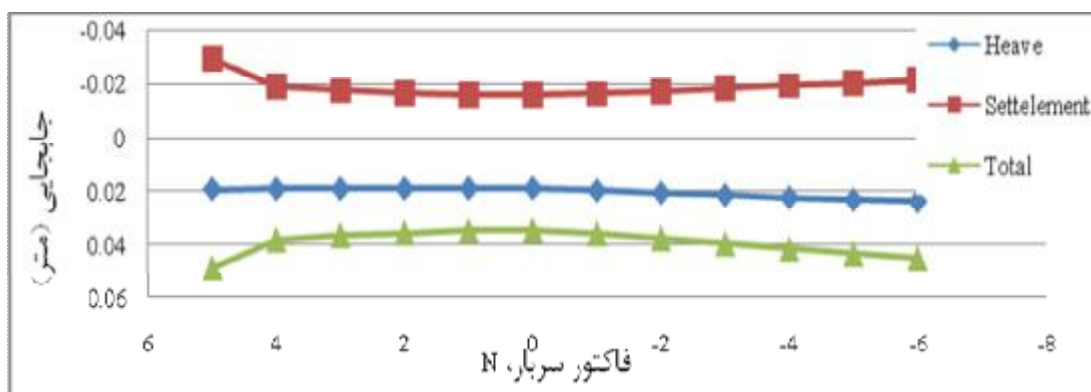
نسبت تزریق (M)، بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ معادل با فشار ۲۱۰ KPa تا ۲۵۰ KPa در نظر گرفته شده است.

۲-۵ نمودارها

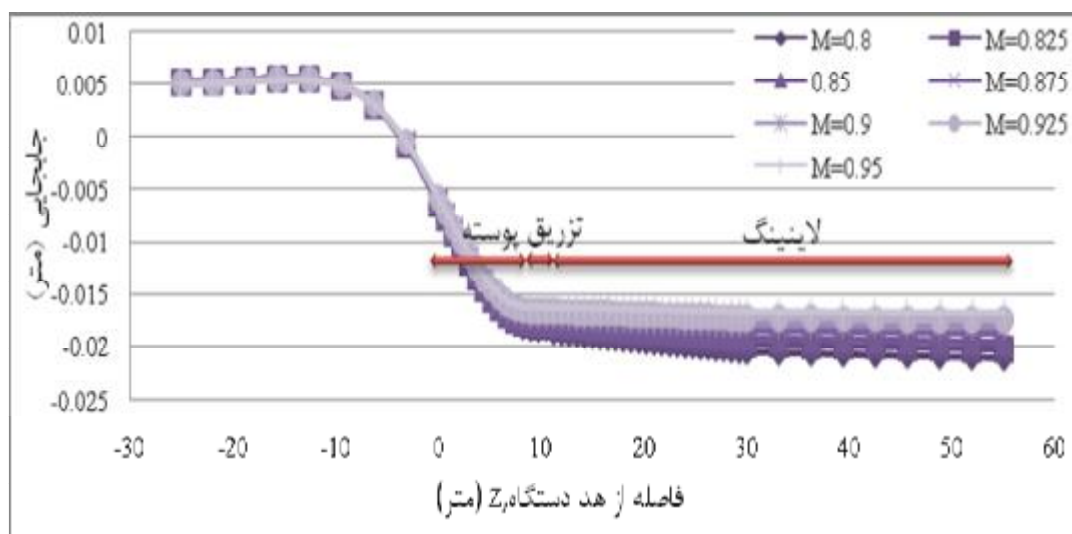
مسئله انتخاب شده در این تحقیق برای ۱۲ مقدار N در محدوده ۵+ تا ۶- مدل شده است. با متوسط گیری در مقادیر M، مقدار آن در تمامی این ۱۲ حالت برابر ۰/۹ قرار داده شده است. علاوه بر این، ۷ حالت برای مقدار M بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است و با متوسط گیری در مقادیر N، مقدار آن در تمامی این ۷ حالت برابر ۲- قرار داده شده است. شکل های ۱ تا ۴، نمودارهای نشست سطحی و جابجایی کل (مجموع نشست سطحی حداکثر و مقدار تورم حداکثر) را از نتایج مدلسازی برای این ۱۹ حالت نشان می دهد. مقادیر منفی فاصله، بیانگر فاصله از هد دستگاه حفاری به سمت جلو (بخش حفر نشده) می باشد.



شکل ۱- نشست های سطحی در مقابل فاصله از هد دستگاه حفاری (برای مقادیر مختلف N)



شکل ۲- نشست سطحی و تورم و نشست کل قائم در مقابل فاکتور سربار



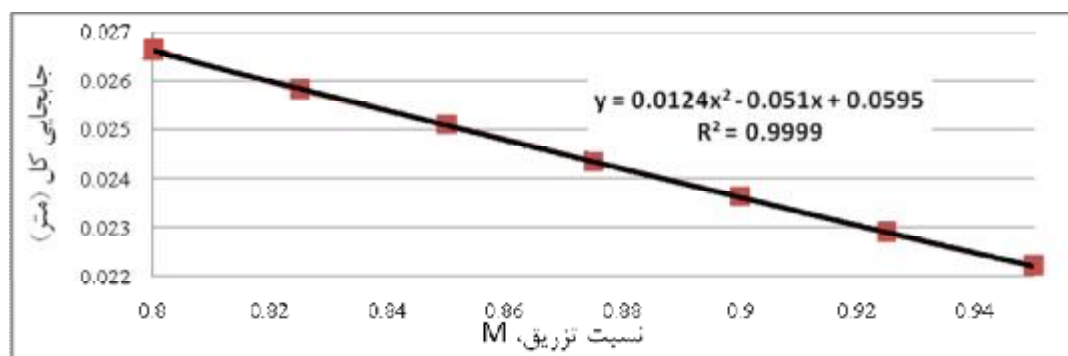
شکل ۳- پروفیل های نشست طولی بر حسب مقادیر مختلف نسبت تزریق

۶-۲ نتایج

• در شکل ۲ می توان مشاهده نمود که حداقل جابجایی کل، مربوط به N بین ۰ و ۱ است که جابجایی کل در هر دو نقطه تقریباً برابر است. بنابراین، فاکتور سربار مربوط به حداقل جابجایی کل، در محدوده ۰ تا ۱ و معادل با فشار هد متوسط 250 KPa است.

• علاوه بر مقادیر جابجایی قائم کل مربوط به فشارهای هد متفاوت، مایل شدن سطح زمین نیز مسئله مهمی است. شکل ۱ نشان می دهد که فاکتورهای سربار زیاد و کم، منحنی هایی با شیب بیشتری را در حین عبور پوسته نتیجه می دهد. شیب بیشتر، منجر به زاویه میل (کج شدن) بیشتر سازه های سطحی می شود. از آنجا که شیب نمودار جابجایی - فاصله از هد دستگاه، در $N = 1$ از سایر نمودارها کمتر است، $N=1$ (معادل با فشار هد متوسط 245 KPa) به عنوان فاکتور سربار در نظر گرفته می شود.

• در شکل ۴ می بینیم که جابجایی قائم کل، با افزایش M کاهش می یابد. مقدار M متناظر با حداقل جابجایی کل، برابر 0.95 بدست آمده است.



شکل ۴- جابجایی قائم کل در مقابل فشار تزریق

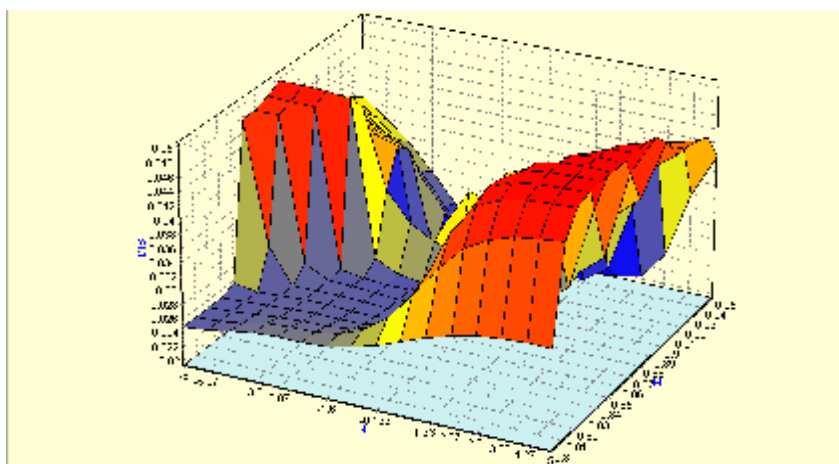
۳ مطالعه موردی

تونل Second Heinenoord در هلند، در سال ۱۹۹۸ حفاری شده است. این تونل توسط Jedediah Drury Greenwood (2003) در دانشگاه Minnesota، با برنامه PLAXIS 3D Tunnel مدل شده است. هندسه آن مشابه آنچه ما فرض کرده ایم، بوده و مقدار نسبت تزریق بین ۰/۸ تا ۰/۹ معادل با فشار تزریق ۲۱۲ KPa تا ۲۳۹ KPa و فاکتور سربار بین ۴+ تا ۳- معادل با فشار هد ۱۶۹ KPa تا ۳۳۸ KPa در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده برای این تونل، مقدار بهینه N را برابر ۱ معادل با فشار ۲۴۱ KPa نشان می دهد. لیکن در مطالعات ایشان بهینه سازی انجام نگرفته است.

۴ بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

همانطور که ذکر شد، در مسائل حفاری پارامتر جابجایی کل بسیار مهم است، از اینرو در این جا بهینه سازی بر اساس کمینه کردن این پارامتر انجام شده است. جهت نیل به این هدف در این تحقیق، ابتدا زوج های مرتبی از مقادیر نسبت تزریق (M) و فاکتور سربار (N) تشکیل داده شده و به هر یک، مقدار جابجایی کل مربوط به آن زوج (بدست آمده از نتایج مدلسازی تونل با برنامه PLAXIS)، اختصاص داده شده است.

این مقادیر به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شده است. شبکه عصبی با ۳ لایه پنهان میانی و یک خروجی، به ترتیب با تعداد گره های ۱۰ و ۷ و ۵ و ۱ با تابع فعال سازی Sigmoid و خطای 10^{-6} مدل شده است. مقادیر ورودی مسئله، آموزش داده شده است. سپس مقدار M در بازه ۰/۸ تا ۰/۹۵ با نرخ ۰/۰۰۵ و مقدار N در بازه ۶- تا ۵ با نرخ ۰/۲۵ افزایش داده شده و بر اساس آموزش انجام شده بر روی ورودی های اولیه، رویه ای مطابق شکل ۵ به عنوان خروجی شبکه عصبی بدست آمده است. این رویه به عنوان دسته ای از جواب های تابع تطابق، به الگوریتم ژنتیک وارد شده و بهینه سازی انجام گرفته است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در ادامه آورده شده است.



شکل ۵- رویه مربوط به خروجی شبکه عصبی

۴-۱ پارامترهای الگوریتم ژنتیک

جمعیت نسل برابر ۵۰ و انتخاب کروموزوم ها برای تولید نسل بعد به روش چرخ رولت در نظر گرفته شده است. همچنین، عملگر تقاطعی با احتمال تقاطع ۰/۹ برای هر کروموزوم و عملگر جهشی با احتمال جهش ۰/۱ برای هر ژن بکار گرفته شده است. برای ایجاد محدودیت نیز تعداد تکرارها برابر ۵۰۰,۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۵ نتیجه گیری

با توجه به ورودی ها و پارامترهایی که برای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد، حداقل جابجایی کل پس از ۵۰۰,۰۰۰ تکرار، برابر ۰/۰۱۹۳ متر بدست آمده است. مقادیر بهینه نسبت تزریق (M) و فاکتور سربار (N) برای این مقدار جابجایی، به ترتیب برابر ۰/۹۴۹۹ و ۰/۳۰۹ بدست آمده است.

با در نظر گرفتن نتایج حاصله در بخش مدلسازی با PLAXIS، می توان انتظار داشت که جوابی که از الگوریتم ژنتیک بدست می آید، مطابق رویه ای باشد که کمترین جابجایی کل را در نسبت تزریق های نسبتا بالا و فاکتور های سربار بین ۰ تا ۱ نشان دهد. همانطور که دیدیم، رویه بدست آمده از شبکه عصبی در شکل ۵ این خصوصیات را داراست.

در نتیجه می توان گفت، نتایج حاصل از این دو بخش با یکدیگر مطابقت دارد. در حالی که الگوریتم ژنتیک مقادیر دقیق نشست کل، فاکتور سربار و نسبت تزریق را مطابق آنچه در بالا گفته شد، ارائه می دهد.

۶ مراجع

Jedediah Drury Greenwood. "Three-Dimensional Analysis of Surface Settlement in Soft Ground Tunneling", Thesis, June 2003, Massachusetts Institute of Technology.

Loganathan, N. and Poulos, H. G. "Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 124, no.9, pp.846-856, 1998.

PLAXIS Products, [Online document], 2008, Available HTTP: www.plaxis.com

Thomas Kasper, Gu'nther Meschke. "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling," Journal of Tunnelling and Underground Space Technology 21, ELSEVIER, no.21, pp.160-171, 2006.