

مطالعه اثر مراحل حفاری روی پارامتر کاهش تنش در روش همگرایی همجواری در تونل‌های سطحی در زمین نرم - مطالعه موردی: خط ۲ متروی کرج

محسن موسیوند^۱؛ محمد ملکی^{۲*}؛ مسعود نکویی^۳؛ محمد رضا منصوری^۲

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- دانشیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۱۲/۱۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2017.5428.1303

واژگان کلیدی	چکیده
روش همگرایی همجواری	در این تحقیق به مطالعه اثر نوع مراحل حفاری روی پارامتر کاهش تنش پرداخته شده است. به این منظور در ابتدا، با استفاده از مقطعی از تونل خط ۲ متروی کرج و تحلیل بازگشتی، کالیبراسیون پارامترهای مدل انجام گرفت. سپس با در نظرگیری مراحل حفاری متداول در صنعت تونل سازی و مترو با استفاده از یک سری شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزارهای تفاضل محدود <i>FLAC 2D</i> و <i>FLAC 3D</i> به مطالعه ضریب آزادی تنش در هر گام از مراحل حفاری متداول در تونل حفاری شده مرحله‌ای (<i>NATM</i>) پرداخته شد. در انتها به منظور بررسی در نظرگیری ضریب آزادی تنش متناسب با هر گام حفاری در روش همگرایی همجواری به محاسبه نشست‌های زمین اطراف تونل، با در نظر گرفتن متغیرهای فوق، پرداخته شد. نتایج تحلیل‌ها نشان‌دهنده اثرات غیرقابل‌اجتناب مراحل حفاری روی ضریب کاهش تنش در روش همگرایی همجواری است؛ و لحاظ نمودن این متغیر در تعیین ضریب کاهش تنش می‌تواند منجر به خطاهای زیادی در تحلیل و طراحی تونل شود.
تحلیل بازگشتی	
مراحل حفاری	
تونل سطحی	
زمین نرم	
تونل غیر دایره‌ای	

۱- مقدمه

در بین لایه‌های نرم زمین احداث می‌شوند؛ این موضوع موجب ایجاد شرایط ناهمسان تنش و تغییر شکل در مناطق اطراف تونل می‌شود که تحلیل آن را مشکل‌تر می‌سازد. این تغییر شکل‌ها می‌توانند موجب ناپایداری‌های سازه‌های مجاور سطحی یا زیرسطحی خود شوند. علت این امر آن است که مشخصات زمینی که تونل در آن ساخته می‌شود به واسطه عمق آبرفت، لایه‌بندی پیچیده خاک‌ها، عدم قطعیت در پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری آن، حضور سازه‌های زیرسطحی و سطحی و یا حضور آب می‌تواند به شدت متغیر باشد (Koukouts & Sofianos, 2015). پارامترهای مختلفی روی میزان نشست و باز توزیع تنش در نواحی که حفاری تحت‌الارضی به وقوع پیوسته است اثرگذار هستند که از آن جمله می‌توان به میزان آزادی تنش، فاصله جبهه حفاری

سازه‌های زیرزمینی از دیرباز در مناطق شهری در جهت کاهش حجم ترافیک ساخته شده‌اند. هر سازه زیرزمینی نیازمند یک سیستم سازه نگهبان است که بتواند در مقابل بارهای وارده ناشی از باربرداری از خود مقاومت نشان دهد. تعیین نیروهای اعمال شده در سازه نگهبان جهت تحلیل و طراحی پوشش تونل امری حیاتی است. با این حال پیش‌بینی توزیع تنش در این نوع تونل‌ها همچنان جزء چالش‌های بزرگ مهندسان طراح محسوب می‌شود (Vu, Sulem, Subrin, & Monin, 2012; Ghotbi Ravandi & Rahmancejad, 2013; Do, Dias, Oreste, & Djerran-Maigre, 2013) تونل‌ها در مناطق شهری معمولاً در عمق کم (تونل سطحی)

* همدان؛ خیابان مهدیه؛ دانشگاه بوعلی سینا؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ شماره تلفن: ۰۸۱-۳۸۳۸۱۶۰۱؛ دورنگار: ۰۸۱-۳۸۲۵۷۴۰۰؛ رایانامه: maleki.ac.ir

سابعدی در تحلیل اولیه تونل‌ها هستند (Karakus, 2007; Vlachopoulos & Diederichs, 2014). مدل‌های عددی دوبعدی متعددی جهت شبیه‌سازی حفاری تونل در ادبیات مهندسی ارائه شده‌اند که از این میان می‌توان به روش‌های گپ (Karakus, 2007; Lee, Rowe, & Lo, 1992; Rowe, Lo, & Kack, 1983) همگرایی - همجواری (Sadeghiyan, Hashemi, & Moloudi, 2016; Mahdevari & Torabi, 2012; Dias, 2011; Panet M., 2001; González-Nicieza, Álvarez-Vigil, Menéndez-Díaz, & González-Palacio, 2008) کنترل افت حجم (Potts & Zdravkovic, 2001)، نرم شوندگی تدریجی (Swoboda, 1979; Swoboda, 1979) و محاسبه دیسک (Marencé, & Mader, 1994) اشاره کرد. در این میان روش همگرایی همجواری مناسب‌ترین روش جهت تعیین نیروهای اعمال شده به پوشش تونل با دقت مناسب است. در این روش با در نظرگیری اثرات همگرایی تونل قبل از نصب پوشش و در نظر گرفتن تأخیر زمانی به وقوع پیوسته از زمان حفر تا نصب پوشش، قابلیت مدل‌سازی اثرات بعد سوم تونل را در تحلیل دوبعدی کرنش مسطح به‌خوبی دارد. این روش می‌تواند به‌خوبی اثرات اندرکنش تونل-پوشش - زمین اطراف آن را نیز شبیه‌سازی نماید (Dias, 2011; González-Nicieza, Álvarez-Vigil, Menéndez-Díaz, & González-Palacio, 2008; Panet M., 2001). بعد سوم تونل در این روش به‌وسیله آزادی تنش به وقوع پیوسته (ضریب بدون بعد λ) در زمین اطراف تونل در حین حفاری قابل مدل‌سازی است. این ضریب به پارامترهای مختلفی از جمله جنس زمین، عمق و شکل مقطع عرضی تونل و موقعیت نقطه اطراف تونل بستگی دارد. تونل‌های حفاری شده به روش مرحله‌ای (NATM) با استفاده از حفر مرحله‌ای و آزادسازی تنش در هر مرحله قابل مدل‌سازی در تحلیل‌های دوبعدی است. مقادیر λ در هر گام حفاری به علت میزان حجم مختلف خاک‌برداری شده، شکل متفاوت آن و نیز اندرکنش مراحل مختلف حفاری بر هم باید به‌صورت متفاوت در نظر گرفته شود؛ این در حالی است که در تحقیقات پیشین به‌عمل آمده توسط محققین، این ضریب به‌صورت یک عدد ثابت در کلیه مراحل حفاری در نظر گرفته شده است (Karakus, 2007; Dias, 2011; González-Nicieza, Álvarez-Vigil, Menéndez-Díaz, & González-Palacio, 2008; Carranza-Torres & Fairhurst, 2000; Pruška &

تا محل نصب لاینینگ، نوع پوشش تونل، جنس خاک، نحوه حفاری تونل و ... اشاره نمود (Attewell, 1977; Bloodworth, 2002; Higgins, Potts, Mair, & Taylor, 1996). به همین علت محققان متعددی به بررسی تعیین تغییر شکل‌های اطراف تونل و سطح زمین در طی ساخت و در زمان سرویس‌دهی تونل پرداخته‌اند که می‌توان از این میان به کارهای (Maleki & Mousivand, 2014; Potts D., 1977; Mair, Taylor, & Bracegirdle, 1993) اشاره نمود.

روش‌های مختلفی جهت تحلیل و طراحی تونل ارائه شده‌اند که از این میان می‌توان به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی دو یا سه‌بعدی اشاره کرد (Alejano, Rodriguez, 2009; Higgins, Potts, Mair, & Taylor, 1996; Potts & Zdravkovic, 2001). روش‌های تجربی و تحلیلی برای شرایط همسان و همگن تونل‌های دایره‌ای قابل استفاده هستند (Chen & Tonon, 2010; Fang, Zhang, Zhou, & Wong, 2013; Cai, Djmaluddin, Iura, & Esaki, 2015). به علت

پیچیدگی‌های موجود در مساله حفاری تونل، ناهمسانی شرایط تنش، لایه‌بندی بودن خاک و مقاطع غیر دایره‌ای تونل، روش‌های تجربی و تحلیلی به‌خوبی قادر به بیان تمام جنبه‌های رفتاری تونل نیستند. با این حال روش‌های عددی می‌توانند با مدل‌سازی شرایط مختلف حفاری و نصب پوشش تونل به‌خوبی وضعیت اندرکنش خاک-تونل-پوشش را شبیه‌سازی نمایند (Cui, 2015; Houhou, Emeriault, & Vanoudheusden, 2016; Vlachopoulos & Diederichs, 2014; Do, Dias, & Oreste, 2014). نزدیکی جنبه حفاری رفتار سه‌بعدی حاکم؛ و اثرات جنبه حفاری به‌شدت در تحلیل اثرگذار می‌باشد. مدل‌های سه‌بعدی قابلیت شبیه‌سازی رفتار نواحی حفاری شده اطراف تونل را به‌صورت واقع‌بینانه‌ای دارند (Ng & Lee, 2005; Burd, 2000; Houslby, Augarde, & Liu, 2000; Ng, Lee, & Tang, 2004). این در حالی است که این تحلیل‌ها نیازمند به زمان بیشتری جهت شبیه‌سازی تونل هستند؛ و هنوز هم نمی‌توانند به‌خوبی جنبه‌های اساسی تونل‌سازی را مدل نمایند و بنابراین نیازمند فرضیاتی هستند. به‌علاوه مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده جهت تحلیل تونل‌ها را به‌راحتی نمی‌توان به کار برد. این بدان معنا است که مدل‌های دوبعدی به جهت سادگی استفاده و سرعت تحلیل بالا هنوز هم متداول‌تر و رایج‌تر از مدل‌های

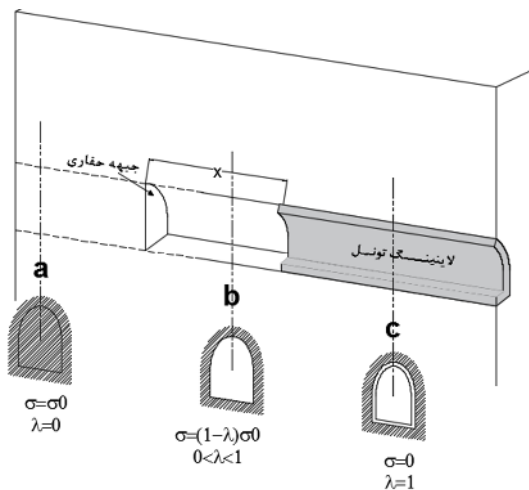
جهت مدل‌سازی بعد سوم تونل در تحلیل دوبعدی به روش همگرایی-همجواری، تونل را می‌توان به سه حالت مختلف تقسیم نمود (شکل ۲) (Bernat & Cambou, 1998; González-Nicieza, Álvarez-Vigil, Menéndez-Díaz, & González-Palacio, 2008)

الف- مقطع جلوی جبهه حفاری (شکل ۲a)

ب- مقطع پشت جبهه حفاری بین جبهه حفاری و لاینینگ (شکل ۲b)

ج- مقطع به فاصله زیادی پشت جبهه حفاری (شکل ۲c)

مقادیر مختلف ضریب کاهش تنش λ و تنش موجود در دیواره تونل برای این سه حالت در شکل ۲ ارائه شده است. پارامتر σ تنش در جای زمین است.



شکل ۲ - آزادی تنش در تونل (بر اساس González-Nicieza, Álvarez-Vigil, Menéndez-Díaz, & González-Palacio, 2008; Bernat & Cambou, 1998)

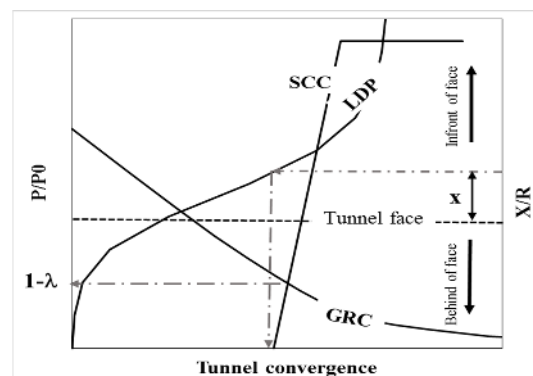
پیش‌تر ترسیم سه منحنی مورد نیاز جهت تعیین ضریب کاهش تنش (GRC ، SCC و LDP) به وسیله معادلات تحلیلی به دست می‌آید. این معادلات تحلیلی عموماً برای تونل‌های با مقطع دایره‌ای و در شرایط تنش همسان ارائه شده‌اند. حل تحلیلی این منحنی‌ها نواقصی دارد که موجب محدودیت استفاده از آن شده است (Mitaim & Detournay, 2005). با پیشرفت نرم‌افزارهای کامپیوتری تعیین منحنی مشخصه زمین توسط کامپیوتر منجر به دقیق‌تر

Šejnoha, 2008; Vlachopoulos & Diederichs, 2009؛ حال آنکه این مقدار تأثیر مستقیمی روی مقادیر تنش و تغییر شکل‌های اطراف تونل دارد.

در این تحقیق به منظور تدقیق روش تحلیل دوبعدی همگرایی-همجواری در تونل سطحی در زمین نرم، با استفاده از یک مطالعه پارامتریک، به بررسی اثر نوع الگوی حفاری روی ضریب آزادی تنش و میزان باز توزیع تنش حاصل از آن پرداخته شده است. مقطعی از تونل خط دو متروی کرج به عنوان مطالعه موردی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای مدل با استفاده از تحلیل بازگشتی به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC\ 3D$ به دست آمده است. در ادامه با استفاده از الگوهای حفاری متعارف در صنعت تونل سازی به بررسی الگوی حفاری در تعیین ضریب آزادی تنش پرداخته شده است.

۲- روش همگرایی-همجواری

روش همگرایی-همجواری بیانگر یک روش کارآمد برای مطالعه تونل و طراحی سیستم پوشش است. ضریب کاهش تنش در نزدیکی جبهه حفاری (λ) را می‌توان توسط سه منحنی زیر، همچنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، به دست آورد (Carranza-Torres & Fairhurst, 2000; Fairhurst & Carranza-Torres, 2002)



شکل ۱ - پارامترهای پایه جهت تعیین مقدار آزادی تنش (بر اساس Carranza-Torres & Fairhurst, 2000)

- (Fairhurst & Carranza-Torres, 2002)
- (۱) منحنی مشخصه سطح زمین (GRC)
 - (۲) منحنی تغییر شکل طولی (LDP)
 - (۳) منحنی مشخصه پوشش (SCC)

شدن پاسخها و در نظریه‌های متغیرهای مختلف در آن شد
(Shin, Song, Lee, & Cho, 2011).

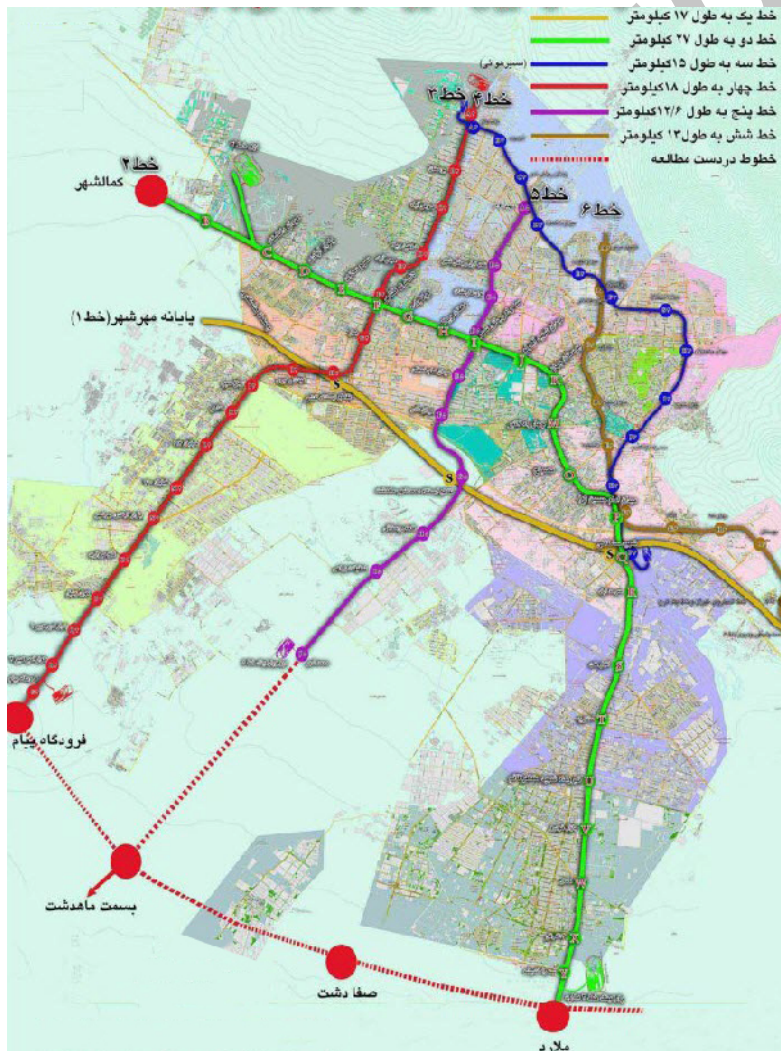
۳- تعیین پارامترهای مدل

۳-۱- مشخصات پروژه و روش تونل کاری خط ۲

متروی کرج

مشکل حمل و نقل موجود در کلان شهر کرج تنها از طریق بهره‌گیری از راه‌کارهای مبنی بر اصول علمی و حمل و نقل ریلی قابل حل است. مطابق آخرین اطلاعات موجود ۵ خط

مترو برای شهر کرج در نظر گرفته شده است که در حال حاضر خط ۲ با طولی در حدود ۲۷ کیلومتر در دو فاز در حال اجرا است. این خط از محدوده کمال شهر در غرب شروع شده و در امتداد خیابان شهید بهشتی ادامه داشته و پس از بلوار طالقانی و ایستگاه کرج به سمت ملارد ادامه می‌یابد. این مسیر شامل ۲۷ ایستگاه است که در حال حاضر فاز اول آن از سمت غرب (دپوی کمال شهر) به سمت ایستگاه کرج به طول حدود ۱۴ کیلومتر تحت احداث است (Mirzeinali, Baziar, Hashemi, & Rabeti Moghadam, 2010) در شکل ۳ پلان مسیرهای مختلف متروی شهر کرج ارائه شده است.



شکل ۳ - پلان مسیرهای مختلف مترو کرج (Hasanipناه, ;Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005) (Khamesi, 2016 & Noorian-Bidgoli, Armaghani)

سه‌بعدی تفاضل محدود *FLAC 3D* بهره گرفته شده است. در تمام مقاطع مورد بررسی در این بخش، ضخامت سرباره بین ۹-۱۲ متر است که تنها از یک نوع خاک تشکیل یافته است. البته در این لایه خاک زیر لایه‌هایی که از لحاظ دانه‌بندی و خواص مقاومتی متفاوت بودند، قابل تشخیص بود؛ اما به علت تفاوت کم پارامترهای مقاومتی لایه‌ها به صورت یک لایه فرض شد. گزارش‌های ارائه شده، نشان‌دهنده عدم وجود آب در لایه‌های مختلف خاک (تا عمق ۶۰ متری از سطح زمین) بوده است. در نتیجه مدل‌سازی خاک در این تحلیل به صورت خشک صورت پذیرفته است (*Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005*).

در این تحقیق از مدل رفتاری مور کولمب که در نرم‌افزار *FLAC* موجود است، بهره گرفته شده است. این مدل، رفتار مصالح را به صورت ارتجاعی-خمیری کامل در نظر می‌گیرد. این مدل به پنج پارامتر (c : چسبندگی خاک، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، ψ : زاویه اتساع، K : مدول حجمی و G : مدول برشی خاک) برای تحلیل نیازمند است (*Itasca, 2002*). محدوده پارامترهای مقاومتی لایه‌بندی خاک و مصالح پوشش تونل که از مطالعات آزمایشگاهی و برجا به دست آمده است در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است (*Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005*).

جدول ۱- مشخصات مکانیکی اولیه خاک (*Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005*)

γ (kN/m^3)	C (kPa)	ϕ ($Deg.$)	E (MPa)	ν	ψ ($Deg.$)
18-19.75	22-33	18-27	20-50	0.3-0.4	0

جدول ۲- مشخصات پوشش بکار رفته در تحلیل تونل (*Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005*)

مدول ارتجاعی (MPa)	نسبت پواسون	ضخامت (m)	مقاومت مشخصه (MPa)
26.5E+03	0.2	0.3	250

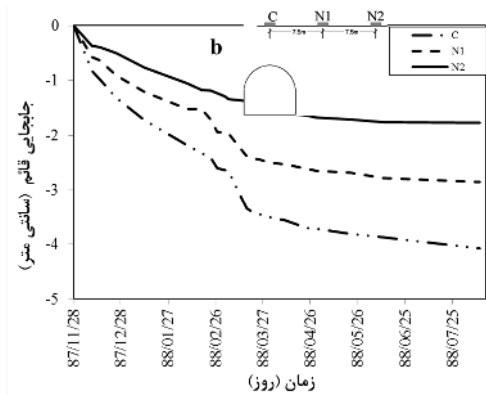
به منظور اندازه‌گیری، کنترل حرکات و تغییر شکل‌های زمین و سازه‌های سطحی در اثر حفاری و اجرای تونل متروی کرج، یک سیستم رفتار سنجی گسترده با دقت بالا در طول مسیر تونل و در محل ساختمان‌ها و سازه‌های حساس واقع در

با توجه به مطالعات و آزمایش‌های صورت گرفته روی گمانه‌های موجود در مسیر پروژه، حفاری تونل‌ها به روش سنتی و بر اساس فلسفه *NATM* انجام گرفته است. نحوه حفاری تونل در دو مرحله فوقانی و تحتانی صورت پذیرفته است. در حفاری قسمت فوقانی تونل از چکش‌های بادی و در زمین‌های سخت‌تر از چکش هیدرولیکی استفاده گرفته است. بلافاصله بعد از خاک‌برداری و بسترسازی، قاب‌های مشبک به همراه توری فلزی نصب و پس از تنظیم نهایی و قرار دادن لایه دوم مش، پاشش شاتکریت انجام گرفته است. در حفاری قسمت تحتانی ابتدا با ایجاد باکس میانی حفاری شروع شده و پس از ایجاد فضای کار مناسب، نسبت به حفاری لقمه‌های جانبی اقدام و بلافاصله لنتیس‌ها به همراه توری فلزی نصب و عملیات شاتکریت انجام گرفته است. سیستم نگهداری اولیه در تونل‌ها متشکل از قاب‌های مشبک با آرماتورهای قطر ۲۰ میلی‌متر، دو لایه مش فلزی و ۳۰ سانتیمتر شاتکریت است. صرف نظر از منبع و منشأ رسوبات تشکیل‌دهنده شهر کرج، مشخصات مهندسی ژئومکانیکی مصالح درشت‌دانه زیاد بوده و مطابق مطالعات اکتشافی و آزمایشی محدوده مسیر خط ۲ مترو این مصالح بنا به طبقه‌بندی متحد خاک‌ها جزو رده خاک‌های *GC, GW, GP, GM, SC, SM* قرار داشته و مصالح ریزدانه این محدوده شامل رس، رس ماسه‌ای لای و لایه ماسه و رسی (*ML, CL, SC*) است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که جنس لایه‌های تحتانی محدوده غربی، مرکزی و تقریباً کل بافت خاک محدوده شرقی ساختگاه از لایه‌های درشت‌دانه اغلب گرد گوشه شن و ماسه رس دار و گاهی لای دار با تراکم متوسط تا بسیار متراکم به رنگ خاکستری و گاهاً قهوه‌ای تشکیل شده است. ضخامت این لایه که در تمام گمانه‌ها مشاهده شده است حداقل ۱۰ متر بوده و از نظر دانه‌بندی و خصوصیات مکانیکی دارای تغییرات کوچکی است (*Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005; Hasanipanah, Noorian-Bidgoli, Armaghani, & Khamesi, 2016*).

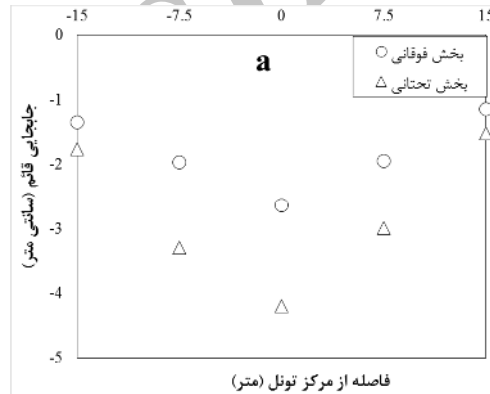
۳-۲- پارامترهای اولیه مدل

جهت انجام تحلیل بازگشتی، باید شرایط خاک، مراحل حفاری، مدت زمان حفاری، طول (گام) پیشروی حفاری، ضخامت شاتکریت و همین‌طور فاصله بین اجرای شاتکریت و اجرای پوشش در نظر گرفته شود که به این منظور از نرم‌افزار

قرارگیری ابزار نگاری‌های بکار رفته در سطح زمین و نقاط اطراف تونل در شکل ۴ ارائه شده است. نشست‌سنج‌ها به فاصله ۵،۷ متری از هم در جهت عمود بر تونل قرار دارند و همگرایی سنج‌های بکار رفته در این تونل در تاج تونل و دیواره‌ها قرار دارد (Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005) نمونه‌ای از اطلاعات ابزار دقیق نشست سطح زمین در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ مربوط به نشست سطح زمین در هر یک از مراحل حفاری تونل بوده و شکل ۴ b منحنی‌های تابع زمان نشست سطح زمین در زمان‌های مختلف حفر و نصب پوشش تونل است (Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005).



مسیر تونل پیش‌بینی و پیاده‌سازی شده است. این سیستم رفتار سنجی با هدف کنترل ایمنی و پیش‌بینی مخاطرات احتمالی عملیات اجرایی حین مراحل مختلف حفاری و ساخت تونل طراحی و اجرا شده است. به این منظور به طور متوسط در هر ۴۰ متر از مسیر تونل یک ایستگاه رفتار سنجی پیش‌بینی گردیده که به طور منظم در هر یک، تغییر شکل‌های حاصل از عملیات حفاری شامل تغییر شکل‌های دیواره‌های تونل (همگرایی)، نشست سطح زمین و تغییر شکل‌های ساختمان‌های حساس واقع در مسیر، اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزارهای خاص بلافاصله پردازش شده و تحلیل شده‌اند تا در صورت مشاهده هرگونه تغییرات غیرعادی تمهیدات اجرایی مناسب به کار گرفته شود. موقعیت



شکل ۴- منحنی‌های نشست سطح زمین (ابزار نگاری) متروی کرج؛ (a) نشست سطح زمین در مراحل مختلف حفاری، (b) نشست تابع زمان سطح زمین (Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers, 2005)

تحلیل‌های آزمایشی و کنترل میزان نشست در مرزها به‌دست‌آمده است؛ این بدان معنی است که آنقدر مرزها از محل قرارگیری تونل دور شده است که اثر حفر تونل روی آنها به صفر رسیده است (شکل ۵). مرزهای قائم آن‌قدر دور شده‌اند که تغییر مکان‌های افقی خاک تحت اثر تغییرات تنش برابر با صفر شده است. این مرزها به دلیل داشتن تغییر مکان‌های قائم به صورت غلتک مدل شده‌اند. مرزهای افقی باید به اندازه‌ای پایین‌تر از تونل در نظر گرفته شود که تأثیر حفاری بر مرزها دیده نشود. در این صورت می‌توان با فرض سنگ بستر، میزان نشست‌ها را در این مرزهای افقی برابر با صفر در نظر گرفت؛ در شبیه‌سازی تونل این مرزها با مفصل مدل شده است.

۳-۳- شرایط مرزی

همواره در تحلیل‌های عددی، انتخاب پارامترهای هندسی مدل، شامل موقعیت مرز ناحیه تحت تحلیل، مشخص کردن وضعیت تکیه‌گاه‌ها، تعداد و نحوه توزیع المان‌ها بر دقت نتایج تأثیرگذار است. اصولاً شبکه باید در نواحی خاص مثل نواحی تمرکز تنش، نواحی ضعیف و نواحی هدف ریزتر از سایر نواحی باشد. در زمان حفر تونل تغییرات تنش در این ناحیه زیاد است، به این منظور باید شبکه نزدیک تونل تا حد امکان ریز اختیار شود. با افزایش فاصله از تونل می‌توان چگالی شبکه را کاهش داد. موقعیت تونل و خاک اطراف آن، مش بندی و مرزهای جانبی مدل جهت تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۵ ارائه شده است. ابعاد مدل با استفاده از یک سری

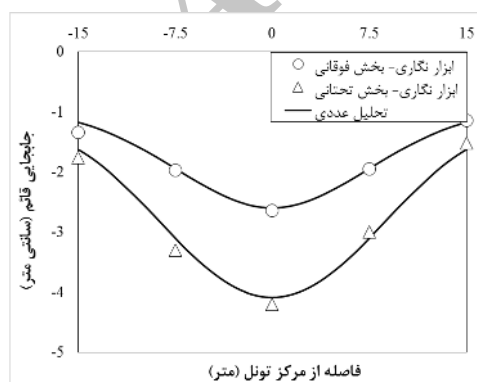
$$(1) \quad \text{خطای موجود در تحلیل} = \frac{\sum_{k=1}^n [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^n u_k^*}$$

که در این رابطه u_k جابجایی محاسبه شده و u_k^* جابجایی اندازه‌گیری شده در نقطه مفروض است. تحلیل بازگشتی تونل متروی کرج جهت تعیین پارامترهای دقیق خاک در دو بخش حفاری فوقانی و تحتانی تونل انجام گرفت. پس از یک سری تحلیل‌های عددی توسط نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC 3D* و مطابقت آن با نتایج ابزار دقیق، پارامترهای دقیق خاک تعیین شدند که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

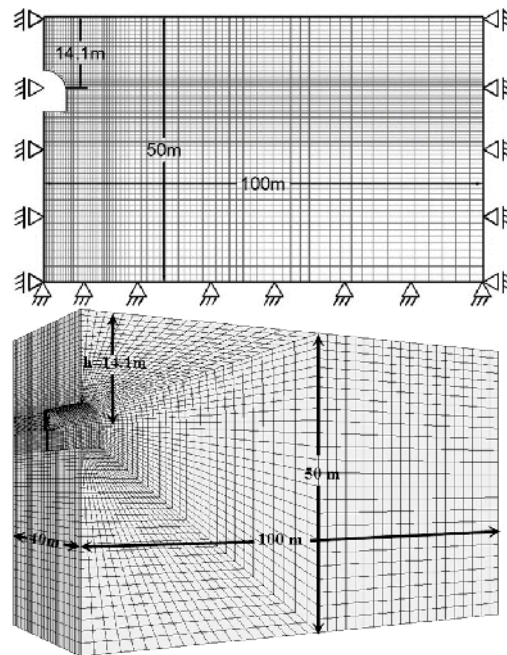
جدول ۳ - مشخصات ژئوتکنیکی خاک به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل بازگشتی

γ (kN/m^3)	C (kPa)	ϕ ($Deg.$)	E (MPa)	ν
18.6	22	20	30	0.3

مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل بازگشتی و نتایج ابزار دقیق در دو مرحله حفاری بخش فوقانی و تحتانی تونل متروی کرج که توسط نرم‌افزار *FLAC 3D* انجام گرفته در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود شبیه‌سازی سه‌بعدی و نشست‌های به‌دست‌آمده از ابزار دقیق مشابهت بسیار خوبی با هم دارند که این موضوع دقت خوب پارامترهای مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی کالیبراسیون پارامترهای مدل مور کولمب در مرحله حفاری بخش فوقانی و تحتانی تونل متروی کرج



شکل ۵ موقعیت قرارگیری، مش بندی دوبعدی و سه‌بعدی و مرزهای جانبی (اندازه‌ها به متر است)

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱- تحلیل بازگشتی جهت تعیین پارامترهای

مدل

جهت انجام تحلیل بازگشتی از یک روش رفت و بازگشتی تک متغیره متناوب استفاده شد. در این روش پس از انتخاب مدل رفتاری، پارامترهای اولیه مدل تخمین زده شد. برای جلوگیری از تکرار زیاد، از پارامترهای به‌دست‌آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی موجود در پروژه بهره گرفته شد (جدول ۱). در این روش، چند متغیر موجود در مدل بصورت متغیر در نظر گرفته شد. سپس با مدل‌سازی عددی، شرایط حفر تونل به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. با توجه به داده‌های ابزار دقیق موجود در گزارش‌های ژئوتکنیک، نتایج نشست سطحی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار با نتایج ابزار دقیق مقایسه شد (Mousivand, 2014 & Maleki). در ادامه با تکرار تحلیل، مقدار بهینه پارامترهای مورد نظر را با توجه به رابطه (۱) به صورتی بدست آمد که میزان خطا به نزدیک صفر میل نماید (Shang, Cai, Hao, ;Yang, 2004 & Jeon & Li, 2002 & Wu).

مرحله‌ای در این پروژه انتخاب شده است (Ng, Simons, & Menzies, 2004; Karakus & Fowell, 2004; de Farias, Moraes Júnior, & de Assis, 2004; Karakus & Fowell, 2003; Kovari, 1993)

در این بخش مراحل حفاری مختلف متعارف در حفاری تونل در مناطق شهری جهت بررسی اثرات مراحل حفاری روی ضریب کاهش تنش بهره برده شده است. به منظور بررسی اثر مراحل حفاری روی مقدار ضریب آزادی تنش، برای هر مرحله از حفاری به تعداد گام‌های حفاری، نمودارهای سه‌گانه (GRC، SCC و LDP) ترسیم شد و از تقاطع آنها پارامتر λ به دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۴- بررسی اثر الگوی حفاری در روش همگرایی-

همجواری

حفاری تونل در مناطق شهری در زمین نرم با مشکلات زیادی از جمله ناپایداری جبهه حفاری، نشست سطح زمین و خرابی‌های سازه‌های سطحی و زیرسطحی مواجه است. یکی از روش‌های متعارف در طراحی و ساخت تونل در مناطق شهری روش جدید اتریشی (NATM) است. این روش در شرایط نامناسب و پیچیده ژئولوژیکی زمین بسیار مناسب و کارا است. با در نظرگیری شرایط مقاومت پایین زمین در مناطقی که تونل متروی کرج حفر گردیده است، حفاری تمام مقطع امکان‌پذیر نبوده است؛ بنابراین روش حفاری

جدول ۴ - ضریب کاهش تنش (λ) برای الگوهای حفاری مختلف

Pattern A		Pattern B			Pattern C				Pattern D					
	F	W	C	F	W	C	F	Wi	Wo	C	F	Wi	Wo	C
I	0.70	0.67	0.72	0.58	0.61	0.82	0.58	0.61	0.61	0.82	0.58	0.61	0.61	0.82
II	-	-	-	0.81	0.92	-	0.65	0.89	0.20	-	0.50	0.45	0.60	-
III	-	-	-	-	-	-	0.31	-	-	-	0.30	0.39	0.37	-
IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.40	-	-	-

Pattern E				Pattern F				Pattern G				
	F	Wi	Wo	C	F	Wi	Wo	C	F	Wi	Wo	C
I	0.45	0.35	0.58	0.20	0.45	0.35	0.58	0.20	0.32	0.40	0.35	0.50
II	0.33	-	0.69	0.55	0.41	0.33	0.44	-	0.42	0.50	0.38	0.55
III	0.43	0.35	0.50	-	0.35	-	0.84	0.81	0.83	-	-	0.80
IV	0.38	-	0.28	-	0.60	-	0.33	-	0.47	-	-	-

جهت تعیین آزادی‌های تنش مربوط به این الگوی حفاری در سه نقطه تاج، دیواره و کف تونل برای هر دو مرحله حفاری در شکل ۸ ارائه شده است.

در جدول فوق پارامتر F : کف تونل، Wi : دیواره داخلی تونل، Wo : دیواره خارجی تونل و C : تاج تونل است که موقعیت آن برای مراحل حفاری B که مشابه تونل متروی کرج است در شکل ۷ ارائه شده است. منحنی‌های مورد نیاز

همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، ضریب آزادی تنش در مراحل حفاری مختلف، مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرند. با این حال در تحقیقات به‌عمل‌آمده پیشین با استفاده از روش همگرایی همجواری، ضریب کاهش تنش (λ) مستقل از نوع مراحل حفاری، یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شده است (Cai, Djmaluddin, Iura, & Esaki, 2015; Cui, 2015; Dias, 2011; Carranza-Torres & Fairhurst, 2000; Farrokh, Mortazavi, & Shamsi, 2006; Lombardi, 1980; Panet & Guenot, 1983) حال آنکه مقادیر لامبدا مستقیماً وابسته به نوع مراحل حفاری است.

۴-۲-۱- اثر موقعیت نقطه اطراف مقطع عرضی تونل

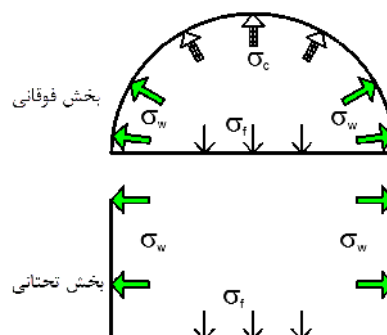
روی ضریب کاهش تنش

به منظور بررسی اثر موقعیت نقطه مورد بررسی روی مقطع عرضی تونل بر ضریب آزادی تنش، با در نظرگیری یک لامبدای واحد (به‌دست‌آمده از تونل با حفاری تمام مقطع) (λ_m)، و لامبدهای متغیر در گام‌های حفاری مختلف (λ_m)، مطالعه جامعی صورت گرفت که نتایج آن برای یک مراحل حفاری ثابت (مراحل حفاری f) برای چهار نقطه مختلف اطراف تونل (کف، دیواره داخلی، دیواره بیرونی و تاج تونل) در شکل ۹ ارائه شده است. محور افقی در این نمودار موقعیت قرارگیری نقطه در روی مقطع عرضی تونل بوده و محور قائم پارامتر بدون بعد $\chi = \frac{r}{\lambda_m}$ همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقادیر χ برای تاج و دیواره خارجی تونل به ترتیب، ۳،۶ و ۱،۲ است که حداکثر و حداقل مقدار را در میان نقاط مختلف اطراف مقطع عرضی تونل دارا می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به این موضوع مرتبط دانست که تاج تونل حساسیت بیشتری نسبت به سایر نقاط اطراف مقطع عرضی به باربرداری خاک در حین حفر تونل دارد.

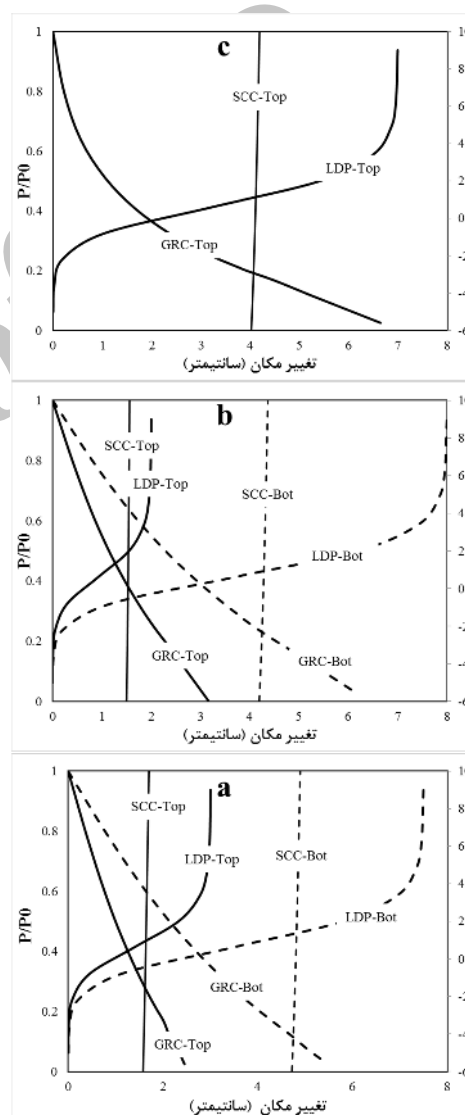
۴-۲-۲- اثرات مراحل حفاری مختلف روی ضریب

کاهش تنش

مطالعاتی در زمینه بررسی اثرات نوع مراحل حفاری روی ضریب آزادی تنش در تاج تونل صورت پذیرفت که نتایج آن برای گام نخست حفاری در شکل ۱۰ ارائه شده است. محور افقی در این نمودارها نوع مراحل حفاری و محور قائم پارامتر



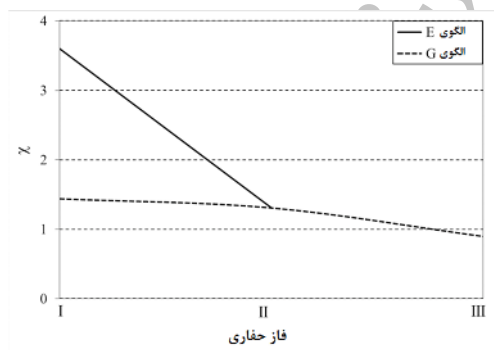
شکل ۷- اعمال نیرو در روش حفاری B



شکل ۸ - منحنی‌های SCC، GRC و LDP مربوط حفاری

بخش فوقانی و تحتانی تونل در روش حفاری B

افقی نمودارها گام حفاری بوده و محور قائم χ است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با ثابت در نظر گرفتن مراحل حفاری، پارامتر آزادی تنش در گام‌های حفاری مختلف، مقادیر متفاوتی را به خود می‌گیرد؛ این موضوع در مراحل حفاری مختلف مشاهده می‌شود. تغییرات این ضریب در گام‌های ابتدایی به شدت زیاد بوده ولی با افزایش گام حفاری، به عدد واحدی نزدیک می‌شوند. علت این امر را می‌توان آزاد شدن تنش در طی مراحل اولیه حفاری دانست. این موضوع بدان معناست که پارامتر لامبدا در گام‌های نخست حفاری مقادیر متفاوتی داشته و با بزرگتر شدن سطح مقطع مورد نظر و آزاد شدن بیشتر تنش خاک، نوع مراحل حفاری تقریباً اثری روی این ضریب ندارد. ولاچپولوس و دیدریچ نشان دادند که پروفیل طولی نشست تونل (LDP) برای حفاری‌های مرحله‌ای مقادیر متفاوتی دارد که تأییدی بر کار انجام شده در این تحقیق است (Vlachopoulos & Diederichs, 2009). مقادیر این موضوع در حالی است که در مطالعات پیشین مقادیر آزادی تنش در گام‌های مختلف حفاری یکسان لحاظ شده است (Pruška & Šejnoha, 2008; Karakus, 2007). در این حالت مقادیر آزادی تنش در مراحل ابتدایی بسیار بیشتر از نتایج واقعی ارائه داده است.



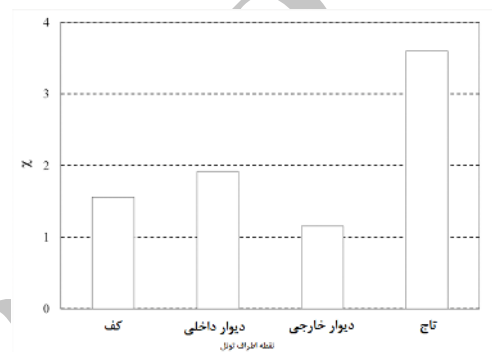
شکل ۱۱- نسبت ضریب آزادی تنش در حفاری تمام مقطع به حفاری مرحله‌ای در تاج تونل

۳-۴- اثر مراحل حفاری روی تغییر مکان

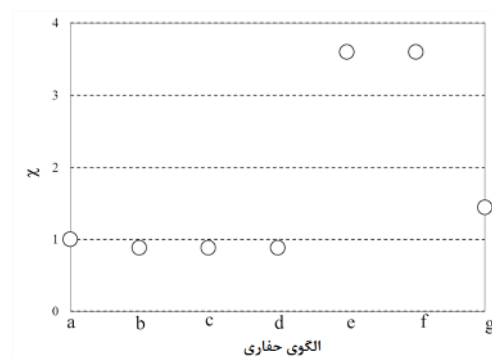
۳-۴-۱- نشست سطح زمین

به منظور بررسی اثر یکسان در نظرگیری آزادی تنش در مراحل مختلف حفاری بر تحلیل و طراحی دوبعدی تونل، مطالعه‌ای در این زمینه صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل

بدون بعد χ است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تغییرات آزادی تنش به شدت به نوع مراحل حفاری بستگی دارد. بیشترین تغییرات را مراحل حفاری e و f از خود نشان می‌دهند ($\chi = 3.6$)؛ این در حالی است که این تغییرات در مراحل حفاری دیگر (a, b, c, d) مقادیر بسیار ناچیزی به خود می‌گیرد ($\chi = 1.5$). تفاوت‌های موجود در روش‌های حفاری مختلف به وضوح نشانگر اهمیت زیاد و اثرگذار متغیر نوع حفاری مرحله‌ای روی تعیین ضریب کاهش تنش است.



شکل ۹- نسبت ضریب آزادی تنش در حفاری تمام مقطع به حفاری مرحله‌ای در نقاط مختلف اطراف تونل در گام اولین حفاری



شکل ۱۰- نسبت ضریب آزادی تنش در حفاری تمام مقطع به حفاری مرحله‌ای در تاج تونل

۳-۲-۳- اثر گام حفاری روی ضریب کاهش تنش

نسبت آزادی تنش تونل در حفاری تمام مقطع به حفاری مرحله‌ای در گام‌های مختلف حفر تونل برای دو مراحل حفاری e و g در موقعیت تاج تونل در شکل ۱۱ ارائه شده است. محور

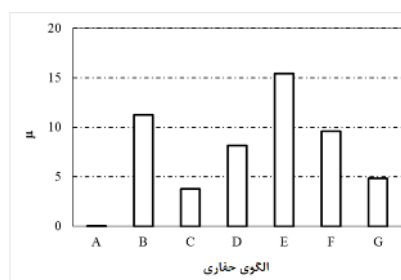
مختلف اطراف مقطع عرضی تونل، مطالعاتی صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. در این شکل محور افقی مراحل حفاری مختلف بوده و محور قائم درصد اختلاف‌های تغییر مکان در دو حالت با ضریب کاهش ثابت و متغیر در گام‌های مختلف حفاری (μ) است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مقادیر μ در نقاط مختلف اطراف تونل، متفاوت است. تغییرات آن در دیواره سمت راست نسبت به نقاط دیگر اطراف تونل بیشتر است. حداکثر مقدار آن تا حداکثر ۳۳ درصد است. این در حالی است که تغییرات آن در کف و دیواره سمت چپ تونل ناچیز است.

موضوع دیگر اثر مراحل حفاری روی میزان خطاهای موجود در مسئله است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مراحل حفاری C و G کمترین اختلاف‌ها را در بین روش‌های حفاری از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که روش‌های حفاری E و D بیشترین اختلاف‌ها را بخصوص در تاج و دیواره سمت راست از خود نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات مراحل حفاری بر روی ضریب کاهش تنش واقعی در روش همگرایی - همجواری پرداخته شد. به منظور افزایش دقت روش همگرایی - همجواری در تحلیل دوبعدی و بهبود توان آن در مدل‌سازی دقیق بعد سوم تونل، با استفاده از یک سری تحلیل‌های پارامتریک، مراحل حفاری متعارف در روش حفاری NATM را برای مقطعی از تونل متروی کرج مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه به تعیین پارامتر آزادی تنش در هر گام حفاری پرداخته شد. سپس به بررسی اثر مقطع باربردی شده در هر مراحل حفاری روی پارامتر آزادی تنش پرداخته شد و معلوم شد که مقادیر آزادی تنش در هر مقطع حفاری شده در یک مراحل حفاری خاص، باهم متفاوت است. این ضریب در حالت حفاری مرحله‌ای ممکن است در برخی از مراحل حفاری تا حدود دو برابر حالتی باشد که حفاری تمام مقطع صورت گیرد. این ضریب در نقاط مختلف اطراف تونل نیز با هم متفاوت است؛ بطوریکه بیشترین مقادیر μ در تاج تونل و کمترین آن در دیواره‌ها صورت گرفت. این نکته نشان‌دهنده بیشترین اثر پذیری تاج تونل به نوع مراحل حفاری است. در حالی که ضریب کاهش تنش در دیواره‌ها کمترین تأثیر را از مراحل حفاری دارند.

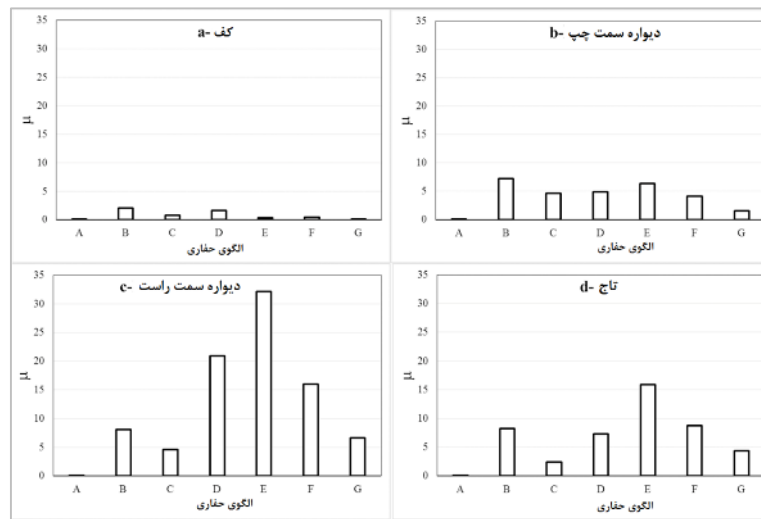
۱۲ ارائه شده است. محور افقی در این شکل، نوع مراحل حفاری و محور قائم خطای ایجاد شده ناشی از در نظرگیری آزادی تنش یکسان به آزادی تنش متغیر در گام‌های مختلف حفاری است که با ضریب بدون بعد μ نشان داده می‌شود. در این رابطه $\mu = \frac{(y_{df} - y_{dm})}{y_{dm}} \times 100$ ، تغییر مکان حداکثر سطح زمین در حالتی است که آزادی تنش در گام‌های مختلف حفاری یکسان در نظر گرفته شود و y_{dm} تغییر مکان حداکثر زمین در حالتی است که آزادی تنش در گام‌های حفاری مختلف متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود درصد اختلاف‌های موجود در مراحل حفاری مختلف متفاوت است. این مقادیر در بیشترین حالت خود به ۱۵ درصد در مراحل حفاری E می‌رسد. این در حالی است که در مراحل حفاری C ، این میزان خطا حداقل مقدار را دارد ($\mu = 4\%$). شریف‌زاده و همکاران در سال ۱۳۸۹ نشان دادند که مراحل حفاری (حفاری تمام مقطع و یا حفاری مرحله‌ای) اثرات قابل توجهی بر نشست سطح زمین دارد. آن‌ها به منظور بررسی نوع مراحل حفاری بر نشست تونل، آزادی تنش یکسان در مراحل مختلف حفاری لحاظ نمودند (Sharifzadeh, Afifi-Pour, & Tasouji Zadeh, 2010). این در حالی است که نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در نظر گرفتن آزادی تنش یکسان خطاهای زیادی تا حدود ۱۵ درصدی را می‌تواند ایجاد نماید.



شکل ۱۲- نسبت حداکثر نشست سطح زمین در حالت در نظرگیری ضریب کاهش تنش یکنواخت به ضریب کاهش تنش متغیر

۴-۳-۳- دیواره اطراف تونل

جهت مطالعه اثر تغییرات به وجود آمده در ضریب کاهش تنش بر میزان تغییر شکل‌های به وقوع پیوسته در نقاط



شکل ۱۳ - نسبت تغییر مکان در حالت در نظرگیری ضریب کاهش یکنواخت به تنش متغیر در گام‌های حفاری مختلف در نقاط مختلف اطراف مقطع عرضی تونل: (a) کف تونل، (b) دیواره سمت چپ، (c) دیواره سمت راست، (d) تاج تونل

جدول ۵- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
ضریب آزادی تنش	-	λ
منحنی مشخصه زمین	-	GRC
منحنی مشخصه پوشش تونل	-	SCC
منحنی نشست سطح زمین	-	LDP
فاصله بین جبهه حفاری و پوشش تونل	m	X
شعاع تونل	m	R
تنش موجود در دیواره تونل	kPa	P
تنش درجا	kPa	$P0$
کف تونل	-	F
دیواره داخلی تونل	-	Wi
دیواره خارجی تونل	-	Wo
تاج تونل	-	C
جابجایی محاسبه شده	m	u_k
جابجایی اندازه گیری شده	m	u_k^*
مدول ارتجاعی	MPa	E
نسبت پواسون	-	ν
چسبندگی	kPa	C
زاویه اصطکاک داخلی	Deg	ϕ
زاویه اتساع	Deg	ψ
وزن مخصوص	kN/m^3	γ

در صورت استفاده از ضریب آزادی تنش در حالت حفاری تمام مقطع نسبت به ضریب آزادی تنش در حالت حفاری مرحله‌ای، خطاهای زیادی مشاهده شد. این موضوع در برخی از مراحل حفاری، برای نشست‌های حداکثر سطح زمین تا حدود ۱۶ درصد است. تغییر مکان‌های اطراف مقطع عرضی تونل نیز در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که کمترین خطاها در کف تونل و بیشترین خطاها در دیواره سمت راست و تاج تونل به وقوع پیوسته است. مقادیر خطاها تا حداکثر ۳۳ درصد در دیواره سمت راست و ۱۷ درصد در تاج تونل مربوط به مراحل حفاری E بود. در اینجا می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که جهت استفاده دقیق از روش همگرایی همجواری، باید نوع حفاری تونل نیز توجه ویژه‌ای نمود؛ به این منظور برای هر گام حفاری در حفاری‌های مرحله‌ای مقدار آزادی تنش تعیین شود. در این صورت دقت تحلیل دوبعدی همگرایی همجواری به‌شدت به نتایج واقعی آن نزدیک خواهد بود.

۶- سیاهه‌ی نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در این مقاله در جدول ۵ ارائه شده است.

۷- منابع

- Alejano, L. R., Rodriguez-Dono, A., Alonso, E., & Fdez.-Manín, G. (2009). Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68-75.
- Attewell, P. (1977). Ground movements caused by tunnelling in soil. *Large Ground Movements and Structure*. Cardiff.
- Bernat, S., & Cambou, B. (1998). Soil-structure interaction in shield tunnelling in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 221-242.
- Bloodworth, A. (2002). *Three-dimensional analysis of tunneling effects on structures to develop design methods*. (Ph.D. Thesis), Oxford University, UK, UK.
- Burd, H. K., Houslby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G. (2000). Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings. *Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (pp. 17-30).
- Cai, Y. J., Djamaluddin, I., Iura, T., & Esaki, T. (2015). . (2015). An analytical model considering interaction behavior of grouted rock bolts for convergence–confinement method in tunneling design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 112-126.
- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 187-213.
- Chen, R., & Tonon, F. (2010). Closed-Form Solutions for a Circular Tunnel in Elastic-Brittle-Plastic Ground with the Original and Generalized Hoek–Brown Failure Criteria. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 169-178.
- Cui, L. Z. (2015). A numerical procedure for the fictitious support pressure in the application of the convergence–confinement method for circular tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 336-349.
- Darya-Khak-Pey-Consulting-Engineers. (2005). *The final report of geotechnical studies of the approved rout of the Karaj subway second part*. Karaj.
- de Farias, M. M., Moraes Júnior, Á. H., & de Assis, A. P. (2004). Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 283-293.
- Dias, D. (2011). Convergence-confinement approach for designing tunnel face reinforcement by horizontal bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 517-523.
- Do, N.-A., Dias, D., & Oreste, P. (2014). Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 896-913.
- Do, N.-A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 2D Tunnel Numerical Investigation: The Influence of the Simplified Excavation Method on Tunnel Behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43-58.
- Fairhurst, C., & Carranza-Torres, C. (2002). Closing the circle. *50th Annual Geotechnical Engineering*

Conference.

- Fang, Q., Zhang, D., Zhou, P., & Wong, L. N. (2013). Ground reaction curves for deep circular tunnels considering the effect of ground reinforcement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 401-412.
- Farrokh, E., Mortazavi, A., & Shamsi, G. (2006). Evaluation of ground convergence and squeezing potential in the TBM driven Ghomroud tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 504-510.
- Ghotbi Ravandi, E., & Rahmamejad, R. (2013). Wall displacement prediction of circular, D shaped and modified horseshoe tunnels in non-hydrostatic stress fields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 54-60.
- González-Nicieza, C., Álvarez-Vigil, A. E., Menéndez-Díaz, A., & González-Palacio, C. (2008). Influence of the depth and shape of a tunnel in the application of the convergence–confinement method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25-37.
- Hasanipanah, M., Noorian-Bidgoli, M., Armaghani, D. J., & Khamesi, H. (2016). Feasibility of PSO-ANN model for predicting surface settlement caused by tunneling. *Engineering with Computers*, 1-11.
- Higgins, K. G., Potts, D. M., Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1996). Numerical modelling of the influence of the Westminster Station excavation and tunnelling on the Big Ben clock tower. *Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Un.*
- Houhou, M., Emeriault, F., & Vanoudheusden, É. (2016). Three-Dimensional Back-Analysis of an Instrumented Shallow Tunnel Excavated by a Conventional Method. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Itasca, F. (2002). *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0 User's Guide*. Thrasher Square East: Itasca Consulting Group. Inc.
- Jeon, Y. S., & Yang, H. S. (2004). Development of a back analysis algorithm using flac. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 447-453.
- Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47-56.
- Karakus, M., & Fowell, R. (2004). An insight into the new austrian tunnelling method (NATM). *Rock Mechanics*.
- Karakus, M., & Fowell, R. J. (2003). Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 513-523.
- Koukoutas, S. P., & Sofianos, A. I. (2015). Settlements Due to Single and Twin Tube Urban EPB Shield Tunnelling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 487-510.
- Kovari, K. (1993). Erroneous concepts behind NATM. *the Rabcewicz-Geomechanical Colloquium in Salzburg*.
- Lee, K. M., Rowe, R. K., & Lo, K. Y. (1992). Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 929-940.

- Lombardi, G. (1980). Some comments on the convergence–confinement method. *Underground Space*, 249-258.
- Mahdevari, S., & Torabi, S. (2012). Prediction of tunnel convergence using Artificial Neural Networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 218-228.
- Mair, R., Taylor, R., & Bracegirdle, A. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique*, 315-320.
- Maleki, M., & Mousivand, M. (2014). Safety evaluation of shallow tunnel based on elastoplastic-viscoplastic analysis. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 1480-1492.
- Mirzeinali, S., Baziar, M., Hashemi, H., & Rabeti Moghadam, M. (2010). Effect of Blast Loading on Shallow Depth Tunnels using FLAC Software: Case Study of Karaj Subway. *1st Conf. on Passive Defense and Resistant Structures*. Babol: Noshirvani Babol University.
- Mitaim, S., & Detournay, E. (2005). Determination of ground reaction curve for hyperbolic soil model using the hodograph method. *Canadian Geotechnical Journal*, 964-968.
- Ng, C. W., Lee, K. M., & Tang, D. K. (2004). Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. *Canadian Geotechnical Journal*, 523-539.
- Ng, C., & Lee, G. (2005). Three-dimensional ground settlements and stress-transfer mechanisms due to open-face tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 1015-1029.
- Ng, C., Simons, N., & Menzies, B. (2004). *A short course in soil-structure engineering of deep foundations, excavations and tunnels*. Thomas Telford Services Limited.
- Panet, M. (2001). Recommendations on the convergence-confinement method. *AFTES report*, 1-11.
- Panet, M., & Guenot, A. (1983). Analysis of convergence behind the face of a tunnel: Tunnelling 82. *3rd international symposium*, . Brighton.
- Potts, D. (1977). *Behavior of Lined and Unlined Tunnels in Sand*. UK.
- Potts, D., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: application (Vol. 2)*. UK: Thomas Telford.
- Pruška, J., & Šejnoha, M. (2008). Numerical modelling of a tunnel Turecký VRCH in GEO MKP. *Paper presented at the World Tunnel Congress*. India.
- Rowe, R., Lo, K., & Kack, G. (1983). A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 11-22.
- Sadeghiyan, R., Hashemi, M., & Moloudi, E. (2016). Determination of longitudinal convergence profile considering effect of soil strength parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 10-21.
- Schikora, K., & Ostermeier, B. (1988). Two-dimensional calculation model in tunneling-verification by measurement results and by spatial calculation. *Sixth international conference on numerical methods in geomechanics*. Innsbruck, Austria.

- Shang, Y. J., Cai, J. G., Hao, W. D., Wu, X. Y., & Li, S. H. (2002). Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling. *Tunnelling and underground space technology*, 17(4), 381-389.
- Sharif zadeh, M., Pour, A., & Tasouji Zadeh, M. (2010). The effect of step length and excavation pattern on the surface of the Earth settlement in Tehran Metro Line 4. *Journal of mining engineering*, 39-46.
- Shin, Y., Song, K., Lee, I., & Cho, G. (2011). Interaction between tunnel supports and ground convergence- Consideration of seepage forces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 394-405.
- Swoboda, G. (1979). Finite element analysis of the new austrian tunnelling method (NATM). *3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*. Aachen.
- Swoboda, G., Marenc, M., & Mader, I. (1994). Finite element modelling of tunnel excavation. *International Journal of Engineering Modelling*, 51-63.
- Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 131-146.
- Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. (2014). Appropriate Uses and Practical Limitations of 2D Numerical Analysis of Tunnels and Tunnel Support Response. *Geotechnical and Geological Engineering*, 469-488.
- Vu, T., Sulem, J., Subrin, D., & Monin, N. (2012). Semi-Analytical Solution for Stresses and Displacements in a Tunnel Excavated in Transversely Isotropic Formation with Non-Linear Behavior. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 4(13), 213-229. Retrieved from http://jice.atu.ac.ir/article_852_202.html