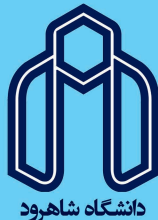


- ۱ بررسی پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع با روش تحلیل حدی
محمد امین نوذری؛ محمد ملکی؛ بهنام یوسفی
- ۱۷ بررسی و تحلیل علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری قراردادهای طرح و ساخت عمرانی پروژه‌های زیرزمینی کشور
هادی تلخایی؛ مجید پرچی جلال؛ محمود گلابچی
- ۳۵ ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه-مطالعه‌ی موردی: قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران
مجید تاجیک؛ امید فروغ؛ حمیدرضا توکلی
- ۴۹ بررسی عددی تاثیر اندرکنش تونل - سازه‌ی سطحی بر نشست سطح زمین
صبا قره‌داش؛ میلاد برزگر
- ۶۵ برآورد عرض مناسب فضای استخراجی در روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)
مهدی نجفی؛ سید محمد اسماعیل جلالی؛ رضا خالوکاکایی
- ۷۷ برآورد مقدماتی هزینه‌های ساخت تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی با کیفیت متوسط تا خوب
میثم نجف‌زاده؛ احمد رضا صیادی؛ جعفر خادمی حمیدی



به نام پروردگار دانش



مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

پایگاه‌های نمایه‌کننده

ISC - SID - CIVILICA - Magiran

سرفصل‌های پذیرش مقاله

پایش و رفتارسنجی	حفر فضاها	مطالعات میدانی
ملاحظات ایمنی و زیست‌محیطی	سامانه‌های نگهداری	مدلسازی، طراحی و تحلیل پایداری
سامانه‌های آب‌بندی	تاسیسات و خدمات فنی	تعمیر و نگهداشت
مدیریت ساخت	قابلیت اطمینان	تحلیل مخاطرات

اعتبار علمی - پژوهشی

اعتبار علمی - پژوهشی نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی در تاریخ ۲۰ دی ۱۳۹۱، در نامه‌ی شماره‌ی ۳/۱۸/۲۱۲۱۳۲ از کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری) دریافت شده است.

مجوز انتشار

انتشار نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی در جلسه‌ی هیات نظارت بر مطبوعات در تاریخ ۲ بهمن ۱۳۹۱ مورد موافقت قرار گرفته و وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی (معاونت امور مطبوعاتی و اطلاع‌رسانی)، مجوز انتشار نشریه در گستره‌ی ملی را در نامه‌ی شماره‌ی ۹۱/۳۴۷۱۸ در تاریخ ۱۶ بهمن ۱۳۹۱ صادر نموده است.

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی حاصل همکاری مشترک دانشگاه شاهرود و انجمن تونل ایران است.

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی در ویرایش فنی و ادبی مقاله‌ها آزاد است.

مسئولیت صحت علمی و اصالت مقاله‌ها به عهده‌ی نویسندگان است.

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

دوره ۳- شماره ۱ / تابستان ۱۳۹۳

سردبیر: سید محمد اسماعیل جلالی
مدیر مسوول: احمد رمضانزاده
دبیر تخصصی: سیامک هاشمی
ویراستار انگلیسی: ابوالقاسم کامکار روحانی
ویراستار پارسی و کارشناس فنی: ملیحه داودآبادی
صاحب امتیاز نشریه: دانشگاه شاهرود و انجمن تونل ایران

گروه دبیران

محمد جواد جعفری (دانشگاه شهید بهشتی)	سید محمد اسماعیل جلالی (دانشگاه شاهرود)
حسین جلالی فر (دانشگاه شهید باهنر کرمان)	احمد رمضانزاده (دانشگاه شاهرود)
ژان ژائو (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne)	فرهنگ سرشکی (دانشگاه شاهرود)
مصطفی شریفزاده (Curtin University)	کوروش شهریار (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
محمد فاتحی مرجی (دانشگاه یزد)	احمد فهیمی فر (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
مرتضی قارونی نیک (دانشگاه علم و صنعت ایران)	سیامک هاشمی (انجمن تونل ایران)

گروه داوران این شماره

مرتضی اسماعیلی (دانشگاه علم و صنعت ایران)	مهرداد امامی (دانشگاه صنعتی سهند)
امیرعبدالله ایرانزاده (شرکت مشاورین)	علیرضا باغبانان (دانشگاه صنعتی اصفهان)
علیرضا جان نثاری (شرکت سپاسد)	میثم جلالی (دانشگاه دامغان)
حسین جلالی فر (دانشگاه شهید باهنر کرمان)	جعفر خادمی حمیدی (دانشگاه تربیت مدرس)
محمد خسرو تاش (شرکت سایبر)	رضا رحمان نژاد (دانشگاه شهید باهنر کرمان)
مسعود زارع نقدهی (دانشگاه صنعتی همدان)	مصطفی شریفزاده (Curtin University)
کوروش شهریار (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)	محمد صافی (دانشگاه صنعت آب و برق)
محمد فاتحی مرجی (دانشگاه یزد)	امید فروغ (Pennsylvania State University)
فرزین کلانتری (دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی)	ابوالقاسم مظفری شمس (انجمن تونل ایران)
حسین میرزائی نصیرآباد (دانشگاه شاهرود)	هرمز ناصرینیا (سازمان نظام مهندسی معدن ایران)
مجید نیکخواه (دانشگاه شاهرود)	سیامک هاشمی (انجمن تونل ایران)

نشانی: شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه ۱ سوم

کد پستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱ - صندوق پستی: ۳۱۶

شماره همراه: ۰۹۳۳ ۷۴۴ ۲۶۷۷

تلفن و دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹ ۶۲ ۲۰ - سامانه پیامک: ۳۰۰۰۵۲۷۳۳۳

تارنما: tuse.shahroodut.ac.ir

رایانامه: tuse@shahroodut.ac.ir

فهرست

۱	بررسی پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع با روش تحلیل حدی محمد امین نوذری؛ محمد ملکی؛ بهنام یوسفی	
۱۷	بررسی و تحلیل علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری قراردادهای طرح و ساخت عمرانی پروژه‌های زیرزمینی کشور هادی تلخایی؛ مجید پرجمی جلال؛ محمود گلابچی	
۳۵	ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه- مطالعه‌ی موردی: قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران مجید تاجیک؛ امید فروغ؛ حمیدرضا توکلی	
۴۹	بررسی عددی تاثیر اندرکنش تونل- سازه‌ی سطحی بر نشست سطح زمین صبا قره‌داش؛ میلاد برزگر	
۶۵	برآورد عرض مناسب فضای استخراجی در روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) مهدی نجفی؛ سید محمد اسماعیل جلالی؛ رضا خالوکاکایی	
۷۷	یادداشت فنی: برآورد مقدماتی هزینه‌های ساخت تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی ... میثم نجف‌زاده؛ احمد رضا صیادی؛ جعفر خادمی حمیدی	
۸۷	شیوه‌نامه‌ی نهایی نگارش مقاله برای ارسال به نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاها‌ی زیرزمینی سید محمد اسماعیل جلالی؛ احمد رمضان‌زاده؛ ملیحه داودآبادی	
	Instructions to Authors: Writing an English Extended Abstract for Submission ... S. E. Jalali; A. Ramezanzadeh; M. Davoodabadi	91
	Extended Abstract: Assessment of Tunnel Face Stability in Unsaturated Media ... M. A. Nozari; M. Maleki; B. Yousefi	92
	Extended Abstract: Analysis of the Causes of Contractor's Claims in the DB Contracts ... H. Talkhabi; M. Parchami Jalal; M. Golabchi	93
	Extended Abstract: Quality Assessment of Segmental Lining Installation ... M. Tajik; O. Frough; H. R. Tavakoli	94
	Extended Abstract: Numerical Analysis of the Effect of Tunnel- Building Interaction on ... S. Gharehdash; M. Barzegar	95
	Extended Abstract: Prediction of Suitable Panel Width in Coal Gasification Process ... M. Najafi; S. E. Jalali; R. Khalokakei	96
	Extended Abstract: Preliminary Construction Cost Estimation for Short Tunnels ... M. Najafzadeh; A. R. Sayadi; J. Khademi Hamidi	97

بررسی پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع با روش تحلیل حدی

محمد امین نوذری^۱؛ محمد ملکی^{۲*}؛ بهنام یوسفی^۳

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مکانیک خاک و پی؛ گروه مهندسی عمران؛ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

۲- دانشیار؛ گروه مهندسی عمران؛ دانشکده‌ی مهندسی؛ دانشگاه بوعلی سینا

۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد عمران؛ دانشکده‌ی مهندسی؛ دانشگاه بوعلی سینا

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۵/۰۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این پژوهش در چارچوب روش تحلیل حدی، با بکارگیری یک مکانیسم گسیختگی سه‌بعدی با شکل اسپیرال لگاریتمی یکپارچه، پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. برای استخراج معادلات سینماتیک حاکم از یک معیار گسیختگی خاک غیر اشباع استفاده شده است. پس از واردسازی پارامترهای غیر اشباع در معادلات حاکم و اکسترمم‌سازی، یک مجموعه تحلیل‌های پارامتری انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل، مکش بافتی تأثیر بسزایی در پایداری جبهه‌ی حفاری تونل دارد. با افزایش مکش بافتی، فشار حدی لازم برای تأمین پایداری جبهه کاهش یافته که این موضوع می‌تواند در موارد کاربردی، مد نظر مهندسین قرار گیرد. در انتها با شبیه‌سازی عددی مسئله، نتایج حاصل از روش‌های تحلیل حدی و عددی مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده روش تحلیل حدی، هر چند که روند گسیختگی برای هر دو روش شبیه است، فشار بیشتری را برای تأمین پایداری جبهه‌ی حفاری پیش‌بینی می‌کند. بعلاوه اثرات مکش موجب تغییر در شکل گوه‌ی گسیختگی بخصوص در قسمت تاج می‌شود.</p>	<p>تحلیل حدی گسیختگی اسپیرال مکش بافتی جبهه‌ی حفاری خاک غیر اشباع</p>

۱- پیشگفتار

بالا پرکاربردترین روش است. تحلیل حد بالا، روشی مستقیم برای محاسبه‌ی بار حدی و گسیختگی در سازه‌ها محسوب می‌شود. در این روش یک مکانیسم گسیختگی مشخص فرض می‌شود. در قدم بعد یک میدان تغییر مکان مجازی که پیوسته، یکبار مشتق‌پذیر و برآورده‌کننده‌ی شرایط مرزی است در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، معادله‌ی کار مجازی نوشته می‌شود که از برابری کار حاصل از نیروهای خارجی با انرژی داخلی تلف شده روی سطوح لغزشی بدست می‌آید. در محاسبه‌ی انرژی تلف شده نیاز به لحاظ کردن معیار تسلیم خمیری است که در بیشتر موارد از معیار گسیختگی کولمب استفاده می‌شود. به علاوه جهت کرنش‌های خمیری نیز اهمیت دارد که در اکثر مسائل قانون جریان متحد بکار

در مسائل باربرداری همچون گودبرداری‌ها و حفاری تونل‌ها پس از اجرای باربرداری در مدت زمان نه چندان زیادی عملیات نصب تکیه‌گاه صورت می‌پذیرد. به این ترتیب در فاصله‌ی زمانی حفاری تا اجرای سیستم‌های نگهدارنده به نحو مقتضی می‌توان از قوانین مکانیک خاک‌های غیر اشباع بهره برد. از آن‌جا که تعیین صحیح فشار جبهه‌ی حفاری تونل مسئله‌ای حیاتی در حفاری ایمن است؛ روش‌های تحلیلی متفاوتی برای تعیین آن ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی کلی روش تعادل حدی (Limit Equilibrium)، روش تحلیل حدی (Limit Analysis) یا حد بالا و پائین و روش عددی تقسیم کرد. روش تحلیل حد

* همدان؛ چهار راه پژوهش؛ دانشگاه بوعلی سینا؛ دانشکده مهندسی؛ گروه مهندسی عمران؛ کدپستی: ۶۵۱۷۵۴۱۶۱؛ شماره‌ی تلفن: ۰۸۱-۳۸۲۹۲۵۰۵

رایانامه: Maleki@basu.ac.ir

خوبی با هم دارند [10]. آناگنوستو و کواری (*Anagnostou & Kovari*) نشان دادند اگر ضریب نفوذپذیری از $k = 10^{-6} m/s$ بزرگ‌تر باشد، بررسی در شرایط زهکشی شده، ملاک عمل بوده ولی در رس‌ها هر دو حالت زهکشی شده و نشده باید بررسی شود [11]. بررسی شرایط زهکشی نشده، اولین بار توسط هورن (*Horn*) به روش تعادل حدی صورت گرفت [12] و سپس جانسز و اشتاینر (*Jancsecz & Steiner*) آن را برای روش شیلد در خاک‌های سست توسعه دادند [13]. در ارتباط با مدل‌های تحلیلی خاک‌های اصطکاکی، آناگنوستو و کواری و بروئر (*Broere*) [14] الگوی ارائه شده توسط هورن را برای تعیین فشار بحرانی پیشانی تونل به روش تعادل حدی به کار بردند. آن‌ها این روش را کاربردی و ساده دانستند، اما در آن باید شکل گسیختگی و توزیع تنش نرمال وارد شده بر صفحات بلوک‌های لغزنده را فرض نمود. در انتها گسیختگی به شکل اسپیرال لگاریتمی در مقاطع قائم و بیضوی در راستای افقی بیان شد.

کلار و همکاران (*Klar, et al.*) پایداری تونل‌های مدور را با روش تحلیل حدی برای خاک‌های کاملاً چسبنده بیان کردند. نتایج آن‌ها برای تحلیل سه‌بعدی از آن چه دیویس و همکاران (*Davis, et al.*) برای مقادیر بالای C/D ارائه دادند، بهتر است که در آن C و D قطر تونل است [15] و عثمان و میر (*Osman & Mair*) نیز برای تحلیل پایداری جبهه‌ی تونل‌های مدور در خاک‌های چسبنده روابطی بر اساس روش تحلیل حدی ارائه کردند. میدان سرعت انتخابی در تعیین این روابط بر اساس نشست بحرانی گوشی شکل در نزدیکی سطح زمین بوده است [17].

آزمایش روی مدل فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ در زمینه‌ی پایداری جبهه‌ی حفاری تونل توسط محققانی چون شامبون و کرت (*Chambon & Corte*) نیز انجام گرفته است. هدف آزمایش‌های سانتریفیوژ شامبون و کرت نشان دادن الگوی گسیختگی و مقدار بحرانی فشار جبهه‌ی تونل بوده است. آن‌ها نشان دادند که توده‌ی خاک تحت گسیختگی شبیه به دودکشی است که لزوماً سطح زمین را قطع نمی‌کند [18].

سابرین و ونگ (*Subrin & Wong*) با استفاده از روش تحلیل حدی با ارائه‌ی یک گوه‌ی صلب با شکل اسپیرال لگاریتمی، مکانیسمی نزدیک به نتایج آزمایش‌های

گرفته می‌شود. پس از استخراج معادلات حاکم با اکسترمم‌سازی، بار حدی در مسئله به صورت مستقیم قابل محاسبه خواهد بود. هدف از اکسترمم‌سازی تعیین شکلی از مکانیسم گسیختگی است که بحرانی‌ترین بار را بدست می‌آورد [1].

پایداری جبهه‌ی حفاری تونل‌های دایره‌ای که با سپر فشاری حفر شده‌اند، توسط بسیاری از محققین مطالعه شده است. اولین تلاش‌ها برای تعیین فشار حداقل لازم برای پایداری جبهه‌ی حفاری تونل، در خاک‌های رسی صورت گرفت که در این خصوص می‌توان به کارهای کیمورا و مایر (*Kimura & Mair*)، همچنین برومز و بنرمارک (*Broms & Bennermark*) اشاره نمود [2] و [3]. الشتین (*Ellstein*) بیانی تحلیلی را به روش تعادل حدی برای خاک‌های چسبنده همگن ارائه کرد و نشان داد که نتایج این روش با آزمایش‌های کیمورا و مایر انطباق خوبی دارد [4].

با توجه به اهمیت موضوع در ادامه محققین دیگری مسئله پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در زمین‌های نرم را با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. سوبرا (*Soubra*) با استفاده از روش تحلیل حدی مکانیسمی متفاوت برای خاک‌های با چسبندگی کم ارائه داده است [5]. نتایج به دست آمده نسبت به آن‌چه لکا و دورمبو (*Leca & Dormieux*) ارائه کرده بودند، بهبود یافته بود [6]. لیامین و اسلون (*Lyamin & Sloan*) روش عددی تازه‌ای را برای یافتن فشار لازم پایداری به روش تحلیل حد بالا ارائه نمودند که از برنامه‌ریزی غیر خطی کمک می‌گرفت [7].

ورمیر و همکاران (*Vermeer, et al.*) بیان کردند که شکل حفاری اهمیت چندانی در تعیین ضرایب پایداری و بار گسیختگی ندارد؛ اما سبب زاویه‌ی اتساع و منحنی‌های تنش-کرنش متفاوت و مکانیسم‌های گوناگون می‌شود [8]. ورمیر و راس (*Vermeer & Ruse*) با چند تحلیل عددی نشان دادند که حداقل برای $\varphi = 20^\circ$ ضرایب پایداری از عمق مستقل هستند و با تغییر ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون K_0 و شرایط اولیه‌ی تنش، تاثیر آن بر تغییر شکل و عدم تاثیر بر فشار گسیختگی را نشان دادند [9].

لی و همکاران (*Li, et al.*) نتایج به دست آمده از تحلیل حد بالا و اجزاء محدود را برای یک نوع خاک مشخص مقایسه کردند و نشان دادند که این نتایج تقریب

تجربی توسط افراد مختلفی ارائه شده است. عبارت $\chi(u_a - u_w)$ مقدار مشارکت مکش بافتی در تنش موثر است. با استفاده از تعریف فوق در معیار موهر-کولمب گزاره‌ی (۲) حاصل شده است [27]:

$$\tau_f = c + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi \quad (2)$$

$$\tau_f = C_{app} + \sigma_{net} \tan \phi$$

که در آن $C_{app} = c + \chi(u_a - u_w) \tan \phi$ و σ_{net} تنش خالص و چسبندگی ظاهری است. در رویکرد متغیر وضعیت تنش مستقل، تنش نرمال خالص $\sigma - u_a$ و مکش بافتی $S = (u_a - u_w)$ نقشی مستقل در رفتار مکانیکی خاک دارند. در این رویکرد، مقاومت برشی به صورت گزاره‌ی (۳) نوشته می‌شود [27]:

$$\tau_f = c + (\sigma - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

ϕ^b زاویه‌ی اصطکاک برای در نظر گرفتن مشارکت مکش بافتی در مقاومت برشی است. بیانی مشابه برای تخمین تغییر حجم نیز ارائه شده است. سودمندی و اعتبار دو رویکرد فوق هنوز قطعی نیست؛ زیرا پارامتر $\chi(S_r)$ در آزمایش، رفتاری غیر یکنواخت از خود نشان می‌دهد. تعاریف مختلفی برای C_{app} ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کار شنگ و همکاران (*Sheng, et al.*) اشاره کرد که در این تحقیق، از آن استفاده شده است. آن‌ها گزاره‌ی (۴) را برای چسبندگی ظاهری ارائه کردند [28]:

$$S \geq S_{sat}: C_{app} = \left(S_{sat} + (S_{sat} + 1) \ln \left(\frac{S + 1}{S_{sat} + 1} \right) \right) \tan \phi \quad (4)$$

$S \leq S_{sat}: C_{app} = S_{sat} \tan \phi$
در این گزاره S_{sat} برابر با مکشی است که خاک در آن در شاخه‌ی ترشدگی به حالت اشباع می‌رسد.

آنچه که در تحلیل حدی دارای اهمیت است، رابطه‌ی تابع اتلاف انرژی ماکزیمم و رابطه‌ی قانون جریان متحد در خاک غیر اشباع است. کوزی (*Coussy*) قانون جریان متحد را برای خاک غیر اشباع به صورت گزاره‌ی (۵) بیان کرده است [29]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})} \quad (5)$$

$$d\phi^p = -d\lambda \frac{\partial F}{\partial (u_a - u_w)}$$

در این گزاره $F = F(\sigma_{ij}, u_w, u_a, S_w)$ تابع تسلیم پلاستیک خاک، λ ضریب خمیری، $(\sigma_{ij} - u_{ij} \delta_{ij})$ تنش

شامبون و کرت و ورمیر و راس ارائه دادند [19]. آگوارد و همکاران (*Augarde, et al.*) رویکرد جدیدتر و جالبی را که از روش اجزاء محدود و تحلیل حدی بر پایه‌ی تئوری پلاستیسیته‌ی کلاسیک بهره می‌برد، ارائه دادند که محدود به تحلیل دو بعدی است [20]. مولون و همکاران (*Mollon, et al.*) روش ارائه شده‌ی خود در سال ۲۰۰۹ را بهبود دادند و در شکل گسیختگی مقطع حفاری مدور را برای خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده به شکل غیر مدور و بیضوی در نظر گرفتند [21]. یاماموتو و همکاران (*Yamamoto, et al.*) با در نظر گرفتن شش مکانیسم گسیختگی، داده‌های به دست آمده از تحلیل حدی، روش اجزاء محدود و روش بلوک‌های صلب را با هم مقایسه نمودند و نشان دادند که در مقادیر پایین C/D مطابقت خوبی در نتایج وجود دارد [22].

تمام تحلیل‌های انجام گرفته برای یافتن فشار لازم برای پایداری تونل با استفاده از اصل تنش موثر ترزاقی بوده و برای خاک در شرایط اشباع نوشته شده است. تعریف گسترده‌ی مکانیک خاک کلاسیک شامل مجموعه‌ای از مهندسی مکانیک و خصوصیات خاک است. این تعریف طیف گسترده‌ای از انواع خاک را در بر می‌گیرد. تعداد زیادی از انواع خاک رفتاری ناسازگار با اصول و مفاهیم کلاسیک و خاک‌های اشباع دارند. خاک‌های غیر اشباع در حالت کلی ترکیبی از سه فاز آب، هوا و بخش جامد تعریف می‌شود. اضافه نمودن فاز چهارم (پوسته‌ی سطح تماس میان آب و هوا) تعریف جامع‌تری است. پیش از این تاثیر مکش در مسائل مختلفی چون پایداری شیروانی‌ها و سدهای خاکی بررسی شده است [23] تا [25]. با این همه، تا کنون در خصوص پایداری جبهه‌ی حفاری تونل با استفاده از روش تحلیل حدی در خاک غیر اشباع کاری صورت نگرفته است. توسعه‌ی بیان تنش موثر در خاک‌های اشباع به غیر اشباع با استفاده از یک متغیر وضعیت تنش آغاز شده است و بر این اساس، بی‌شاپ (*Bishop*) گزاره‌ی تجربی (۱) را برای تنش موثر ارائه کرده است [26]:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

که در آن u_a فشار هوای حفره‌ای و χ پارامتری متناسب با درجه‌ی اشباع خاک است. مقدار χ برای خاک اشباع برابر واحد و برای خاک کاملاً خشک برابر صفر است. در تحقیقات گذشته تغییرات χ بر حسب درجه‌ی اشباع S_r به صورت

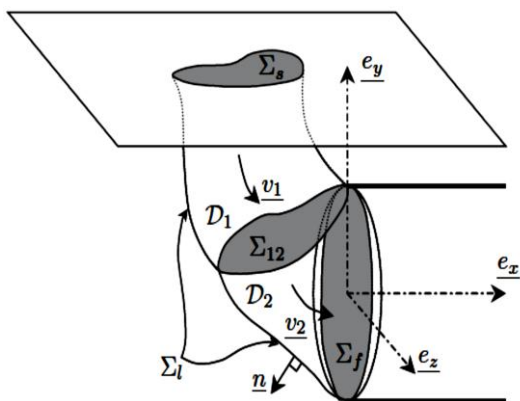
$$A: [-\xi_1 D, -\xi_2 D] \quad (7)$$

$$B: [-\xi_1 D, -\xi_2 (D + 1)]$$

$$\theta_A = \pi - \tan^{-1}(\xi_1 / \xi_2) \quad (8)$$

$$\theta_B = \pi - \tan^{-1}(\xi_1 / \xi_2 + 1)$$

در این گزاره‌ها، $P_{ext}(\vec{Q}, \vec{v})$ توان ناشی از نیروهای خارجی و $P_{in}^{sup}(\vec{v})$ توان انرژی اتلافی، \vec{n} بردار نرمال بر سطوح ناپیوستگی، $[[\vec{v}]]$ بردار سرعت در سطوح ناپیوستگی، \vec{v} بردار سرعت، Σ_i سطح ناپیوسته‌ی بیرونی مکانیسم، Σ_i سطح ناپیوستگی شماره‌ی i درون مکانیسم، \vec{Q} بار جسمی وارد بر مکانیسم و D قطر تونل است. در شکل ۲ مرزهای انتگرال‌گیری نشان داده شده است.



شکل ۲- مرزهای انتگرال‌گیری [19]

بسط گزاره‌های بالا با توجه به شکل ۲ به گزاره‌های

زیر، منتهی می‌شود:

$$N_\gamma \left(\vec{v}, \phi, \frac{C}{D} \right) = \frac{-\gamma \int_{\partial V} \gamma \vec{v} \cdot \vec{n} d\Sigma + \gamma \int_{\Sigma_i} y [[\vec{v}]] \cdot \vec{n} d\Sigma}{\int_{\Sigma_f} \vec{v} \cdot \vec{e}_x d\Sigma} \quad (9)$$

$$N_\gamma \left(\vec{v}, \phi, \frac{C}{D} \right) = \frac{-\int_{\Sigma_s} \vec{v} \cdot \vec{e}_y d\Sigma}{\int_{\Sigma_f} \vec{v} \cdot \vec{e}_x d\Sigma}$$

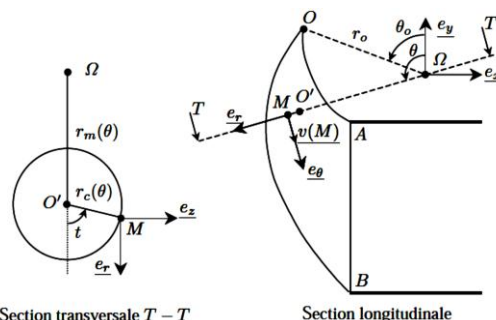
$$N_c = \frac{N_s - 1}{\tan \phi}$$

در این گزاره‌ها N_s ، N_γ و N_c ضرایب مشارکت مقاومت در محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی حفاری به ترتیب مربوط به بار سطحی، اثر وزن خاک و اثر چسبندگی و Σ_f سطح جبهه‌ی حفاری تونل است. در حالتی که سربار وارده بر سطح زمین صفر باشد، در این صورت N_s صفر است و معادله‌ی کار به

خالص، $d\varepsilon_{ij}^p$ جز کرنش خمیری و $d\varphi^p$ متغیر داخلی متناسب با تغییر شکل ناشی از تغییرات مکش است. این گزاره، مشابه رابطه‌ی قانون جریان متحد در خاک‌های اشباع است؛ با این تفاوت که جای تانسور تنش را تانسور تنش خالص می‌گیرد.

۲- انتخاب مکانیسم و معیار گسیختگی

در این تحقیق مکانیسم گسیختگی ساب‌رین و ونگ برای بررسی پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع استفاده شده است. مطابق شکل ۱ در این مکانیسم گوه‌ی صلب یکپارچه با حرکت دورانی اسپیرال لگاریتمی شکل در نظر گرفته شده است [19].



شکل ۱- هندسه‌ی مکانیسم گسیختگی یکپارچه [19]

این مکانیسم در واقع توسعه‌ی مکانیسم شامبون و کرت است (تبدیل حالت دو بعدی به سه بعدی) و با دو پارامتر مستقل ξ_1 و ξ_2 بر اساس گزاره‌های (۶)، (۷) و (۸) تعریف می‌شود. بهینه‌سازی ضرایب پایداری بر حسب این دو پارامتر مستقل انجام می‌شود و فشار حداقل لازم را در جبهه‌ی حفاری به دست می‌دهد. میدان سرعت و سطح گوه‌ی π در مختصات استوانه‌ای بر اساس $(\Omega, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ بیان می‌شود. Ω مرکز دوران و \vec{e}_r ، \vec{e}_θ و \vec{e}_z بردارهای یکه در مختصات استوانه‌ای هستند [18].

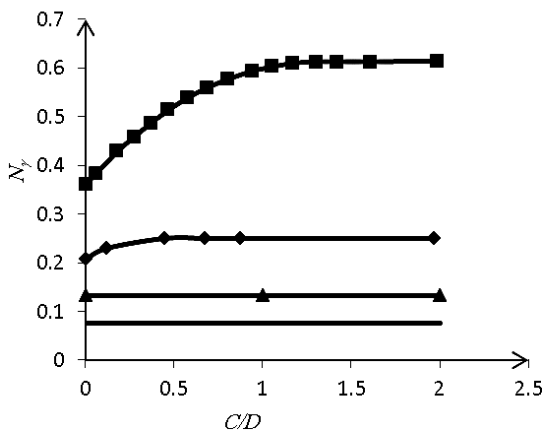
$$P_{in}^{sup}(\vec{v}) = \int_V \sigma_{ij} : \dot{\varepsilon}_{ij} dv + \int_{\Sigma_i \cup \Sigma_l} \frac{c}{\tan \phi} [[\vec{v}]] \cdot \vec{n} d\Sigma$$

$$P_{ext}(\vec{Q}, \vec{v}) = -\gamma \int_V \vec{v} \cdot \vec{e}_y dV - \sigma_s \int_{\Sigma_s} \vec{v} \cdot \vec{e}_y d\Sigma$$

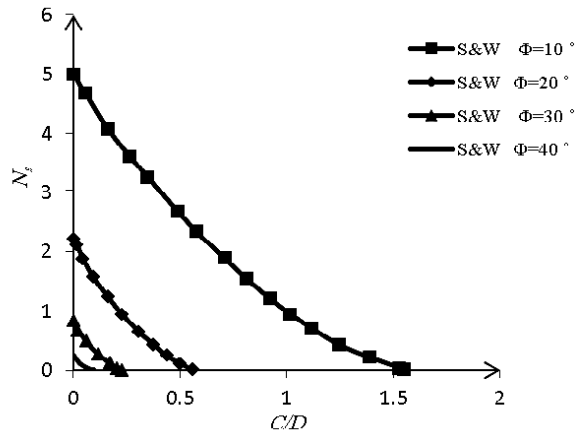
$$- \sigma_T \int_{\Sigma_f} \vec{v} \cdot \vec{e}_x d\Sigma$$

$$P_{ext}(\vec{Q}, \vec{v}) = P_{in}(\vec{v}) \quad (6)$$

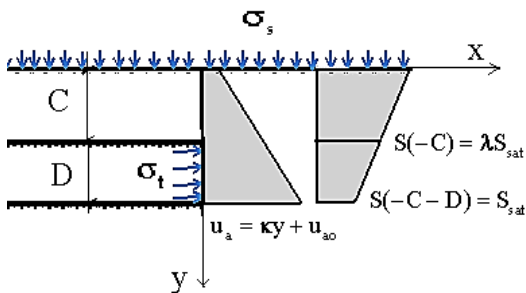
می‌شوند. جزئیات انتگرال‌ها در محاسبه‌ی سطوح و حجم در مطالعات ساب‌رین و ونگ آمده است [19]. شکل ۳ تغییرات N_s و N_γ به صورت تابعی از C/D برای مقادیر مختلف زاویه‌ی اصطکاک داخلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقادیر N_s و N_γ در مکانیسم ساب‌رین و ونگ [19]



بافتی در تاج تونل به مکش بافتی در کف تونل است.



شکل ۴- توزیع فشار هوای منفذی و مکش در عمق خاک

۴- مکش و فشار هوای منفذی ثابت

$$k = 0 \text{ \& } S(-C) = S(-C - D)$$

از آن‌جا که شار میدان ثابت در یک حجم بسته برابر با صفر است؛ فشار هوای منفذی که تانسوری همسان است و شیب تغییرات آن در هر یک از راستاهای محوره‌های مختصات صفر است، در مقدار N_γ بی‌تاثیر است. هم‌چنین با توجه به ثابت بودن مکش در توده‌ی خاک و ثابت در نظر گرفتن آن در حین حفاری، چسبندگی ظاهری C_{app} مانند چسبندگی C در حالت اشباع است.

۳- توسعه در حالت خاک غیر اشباع

با در نظر گرفتن رابطه‌ی فردلاند و مورگنسترن (Fredlund & Morgenstern) و آن‌چه در تحلیل حدی تونل ساب‌رین و ونگ آمد؛ انرژی اتلافی بیشینه‌ی خاک غیر اشباع در رابطه‌ی کار مجازی در این مکانیسم به صورت گزاره‌ی (۱۱) نوشته می‌شود [19]، [23] و [27]:

$$P_{in}^{sup}(\vec{v}) = \int_v (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) : \dot{\epsilon}_{ij} dv + \int_{\Sigma_i \cup \Sigma_t} \frac{C_{app}}{\tan \phi} [[\vec{v}]] \cdot \vec{n} d\Sigma \quad (11)$$

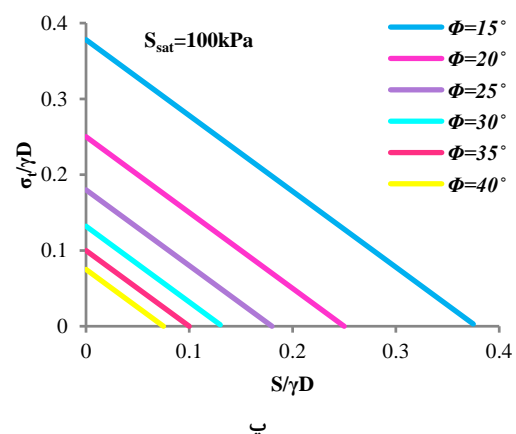
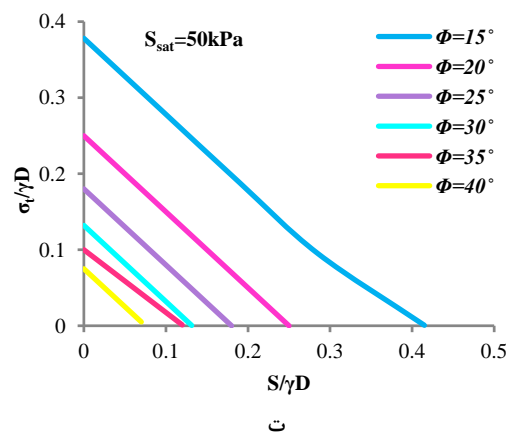
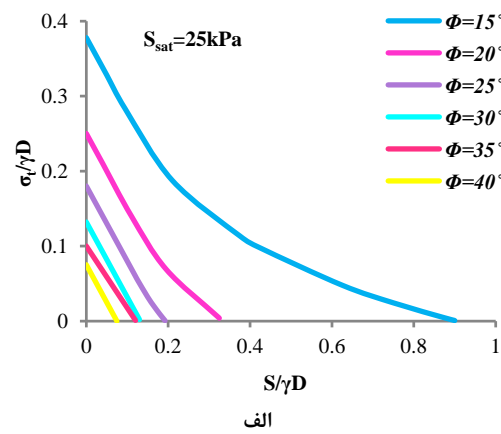
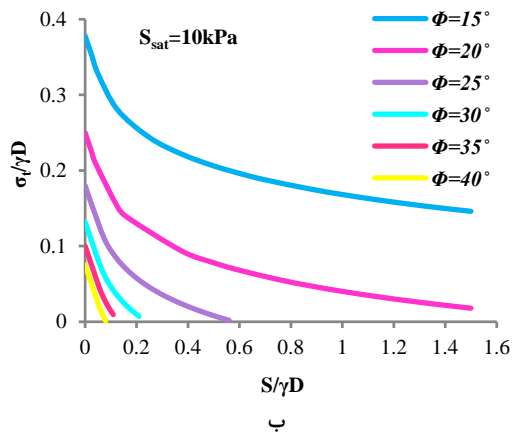
با توجه به فرض صلبیت گوهی گسیختگی عبارت نخست در سمت راست مطابق با حالت اشباع، برابر با صفر است. بدین ترتیب با داشتن مکانیسم گسیختگی و معادله‌ی حاکم کار مجازی در وضعیت غیر اشباع در حالات مختلف بر حسب نحوه‌ی تغییرات فشار هوا و مکش بافتی در پروفیل خاک، فشار حدی وارد بر جبهه‌ی حفاری تعیین شده است. در حالت کلی توزیع مکش بافتی و فشار هوای منفذی در این مطالعه، در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل u_{a0} فشار هوای منفذی در سطح زمین و K و λ به ترتیب شیب تغییرات فشار هوای منفذی در خاک و نسبت مکش

است. برای نمونه در بخش ب شکل ۵ برای شاخه‌ی $\emptyset = 15^\circ$ در مکش ۳۰۰ کیلو پاسکال بار گسیختگی ۳۰ کیلو پاسکال است؛ در حالی‌که برای $\emptyset = 30^\circ$ در مکش ۱۱۲ کیلو پاسکال دیگر نیازی به اعمال تنش نیست و بار ۳۰ کیلو پاسکال متناظر با مقدار مکش ۱۴۶ کیلو پاسکال است. این اختلاف در مقادیر بزرگ‌تر \emptyset کوچک‌تر است.

با مقایسه‌ی این شکل‌ها، می‌توان دریافت هر چه مکش S_{sat} بزرگ‌تر باشد، بار متناظر با یک مکش مشخص کوچک‌تر است. برای نمونه در مکش ۲۰ کیلو پاسکال و $\emptyset = 25^\circ$ و $S_{sat} = 10kPa$ بار به دست آمده ۱۸٫۹ کیلو پاسکال و در حالات دیگر ۱۶ کیلو پاسکال است. در قسمت ب شکل ۵ به ازای تمام مقادیر \emptyset به غیر از $\emptyset = 15^\circ$ تغییرات خطی است. در قسمت ت شکل ۵ به ازای تمام مقادیر \emptyset این رفتار مشاهده می‌شود.

شکل ۵ تغییرات فشار جبهه‌ی حفاری را نسبت به مکش بافتی در مقادیر مختلف چسبندگی ظاهری C_{app} و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، با فرض چسبندگی موثر صفر نشان می‌دهد. در تمامی این حالات شکل گوه‌ی گسیختگی مانند شکل آن در حالت اشباع و تنها تابعی از \emptyset است. در شکل ۵ با $\gamma D = 200kPa$ ، تغییرات بار گسیختگی نسبت به مکش بازای مقادیر مختلف زاویه‌ی اصطکاک داخلی و S_{sat} ارائه شده است. بخش ابتدایی هر شاخه از هر شکل خطی است. این رفتار تا مکش S_{sat} وجود دارد و ناشی از رفتار خطی مقاومت برشی در این محدوده از مکش است؛ سپس رفتار غیر خطی می‌شود. هر چه \emptyset بزرگ‌تر است، بار گسیختگی در مکش‌های کوچک‌تری به صفر می‌رسد.

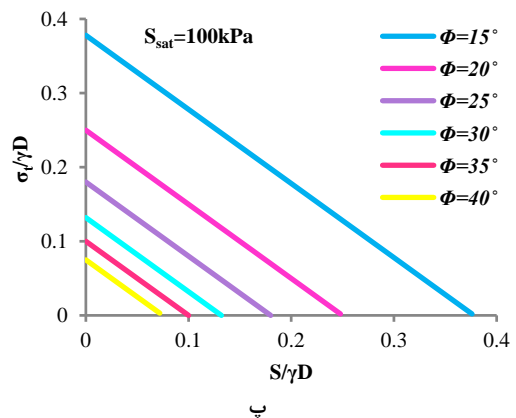
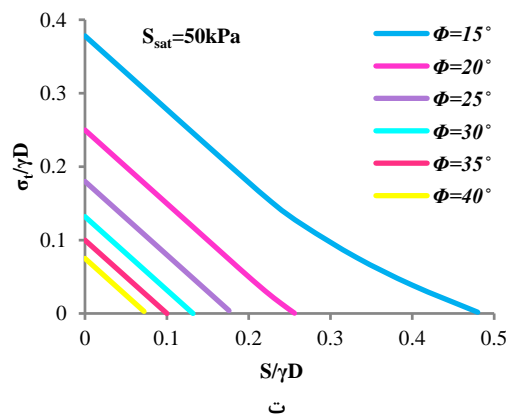
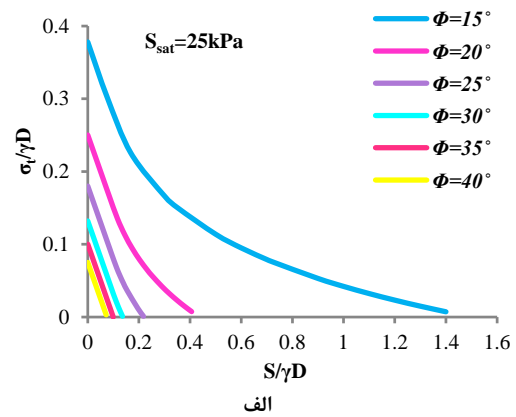
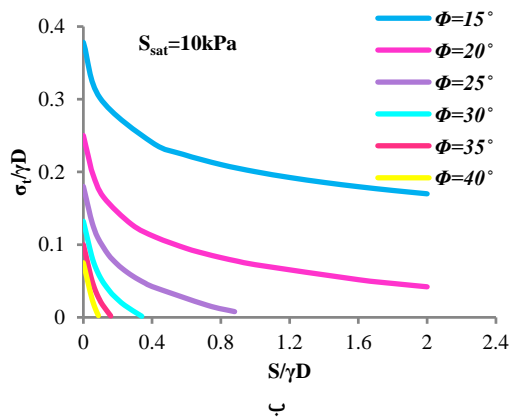
از آن‌جا که در مکش‌های بزرگ مقاومت برشی ناشی از مکش دارای مجانب است؛ بار گسیختگی نیز دارای مجانب



شکل ۵- تغییرات $\sigma_t/\gamma D$ در برابر $S/\gamma D$ بازای مقادیر مختلف S_{sat} و با فرض $\gamma D = 200kN/m^2$

کیلو پاسکال وقتی که $\gamma D = 250kPa$ است، فشار لازم در جبهه‌ی حفاری ۱۳ کیلو پاسکال و در وضعیت مشابه در $\gamma D = 200kPa$ این مقدار برابر با ۴ کیلو پاسکال است. این به آن معنی است که با افزایش γD نمودارها به سمت بالا حرکت می‌کنند. در مکش صفر این افزایش متناسب با افزایش γD است و با افزایش مکش این اختلاف بیش‌تر می‌شود.

در شکل ۶ با $\gamma D = 250kPa$ ، تمام موارد فوق صادق است. افزایش مقدار γD به معنای افزایش کار خارجی است و نتیجه‌ی مستقیم آن افزایش فشار لازم برای پایداری جبهه‌ی حفاری است. برای نمونه در $\phi = 25^\circ$ و $S_{sat} = 10kPa$ در مکش ۲۶۳ کیلو پاسکال دیگر نیازی به اعمال فشار نیست. این مقدار ۲/۳۵ برابر وضعیت مشابه در $\gamma D = 200kPa$ است. از طرفی در مقدار مکش برابر با ۸۰



شکل ۶- تغییرات $\sigma_t/\gamma D$ در برابر $S/\gamma D$ برای مقادیر مختلف S_{sat} و با فرض $\gamma D = 250kN/m^2$

بر حسب متغیرهای مستقل هندسی (ξ_1, ξ_2) است، توزیع خطی مکش نیز در همان دستگاه و برحسب همان متغیرها نوشته می‌شود. برای نوشتن یک رابطه‌ی خطی نیاز به دانستن دو مقدار مکش در دو عمق مختلف خاک است. با فرض مقدار S_{sat} در کف تونل و مقدار λS_{sat} در تاج تونل، رابطه‌ی مکش به صورت گزاره‌ی (۱۲) تعریف می‌شود. با انجام یک سری عملیات ریاضی بر روی روابط آورده شده در

۵- توزیع خطی مکش و فشار هوای منفذی

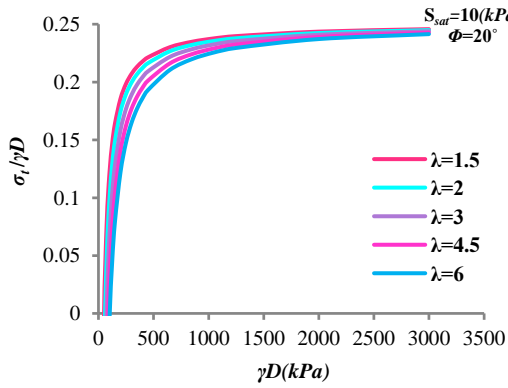
$$k \neq 0 \text{ \& } S(-C) = \lambda S(-C - D)$$

در این حالت توزیع مکش در توده‌ی خاک به صورت خطی در راستای عمق در نظر گرفته شده است. واضح است انرژی اتلافی در این حالت با حالت پیش برابر نیست؛ چرا که مقدار چسبندگی ظاهری در عمق‌های مختلف، متفاوت است. از آنجا که روابط کار مجازی در دستگاه مختصات استوانه‌ای و

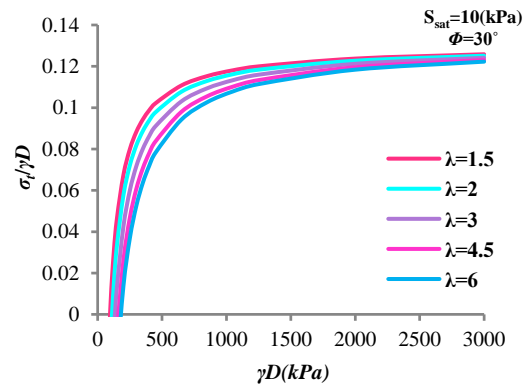
شکل ۷ تغییرات $\sigma_t/\gamma D$ به ازای γD در مقادیر مختلف ϕ به ازای $S_{sat} = 50 \text{ kPa}$ و $S_{sat} = 25 \text{ kPa}$ و $S_{sat} = 10 \text{ kPa}$ آمده است.

$$S(\theta, t) = (\lambda - 1)S_{sat} \cdot r(\theta, t) \cdot \cos(\theta) + [(1 + \xi_2)\lambda - \xi_2]S_{sat} \quad (۱۲)$$

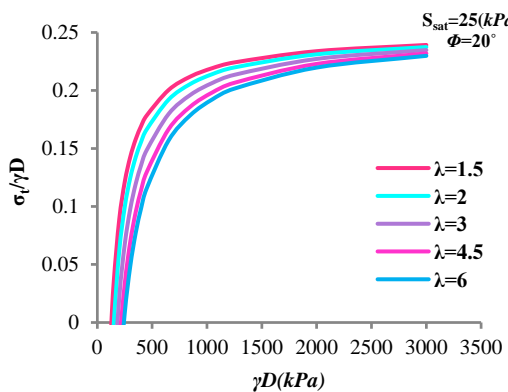
مختصات استوانه‌ای، مکانیسم گسیختگی ساین و ونگ حاصل می‌شود و با در نظر گرفتن هندسه‌ی مکانیسم گسیختگی، P_{in} در حالت غیر اشباع به دست می‌آید. اکنون می‌توان با بهینه‌سازی کم‌ترین فشار لازم در جبهه‌ی حفاری را برای پایداری بدست آورد. در نمودارهای ارائه شده در



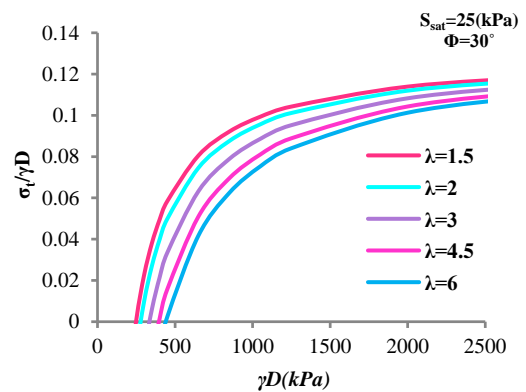
ب



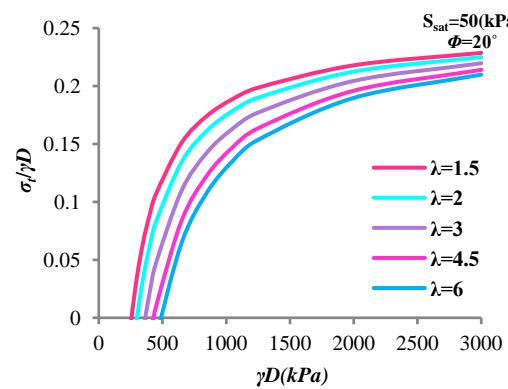
الف



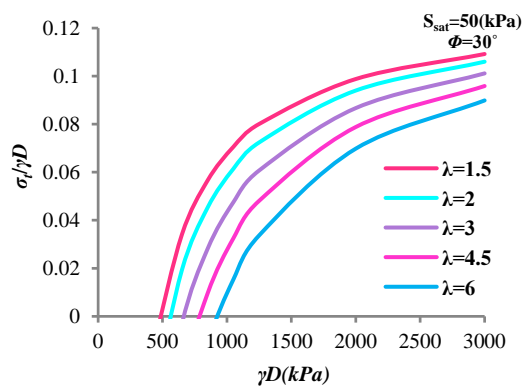
ت



پ



ج



ث

شکل ۷- تغییرات $\sigma_t/\gamma D$ در برابر γD بازای مقادیر مختلف S_{sat} و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در حالت مکش بافتی متغیر

در روابط تحلیلی ارائه شده از معیار گسیختگی موهر-کولمب در حالت غیر اشباع استفاده شد. در این قسمت از کد محاسباتی *PLAXIS 3D Tunnel* برای تحلیل تنش-تغییر شکل تونل با هدف مقایسه با روش تحلیل حدی از نظر فشار لازم بر جبهه‌ی حفاری و بررسی شکل مکانیسم گسیختگی استفاده شده است. از آن‌جا که مدل رفتاری موهر-کولمب از مدل‌های پایه‌ای و پیش فرض این کد است، صرفاً با تغییر در پارامترهای ورودی، مدل حالت غیر اشباع شبیه‌سازی شده است. در واقع بجای چسبندگی از چسبندگی ظاهری C_{app} و بجای تنش از تنش خالص استفاده شده است. تعیین C_{app} از روش تحلیل حدی استفاده شده است. خصوصیات خاک در حالت زهکشی شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر ثابت ورودی در روش عددی

E (kPa)	ν	φ °	C (kPa)	Tension Cut-off
۳۰۰۰۰	۰٫۳	۲۰	۰	۰

علاوه بر آن‌چه در جدول ۱ آمده است، در تمام حالات فشار هوای منفذی در سطح زمین صفر در نظر گرفته شده است. همچنین در وضعیت‌هایی که مکش وجود دارد، $\lambda = 2$ و مکش در کف تونل برابر با $S_{sat} = 25kPa$ است. همان‌طور که در روش تحلیل حدی آمد، λ نسبت مکش در بالای سطح مقطع تونل به مقدار آن در پایین سطح مقطع تونل و S_{sat} مقدار مکش ورود به حالت اشباع در شاخه‌ی تر شدگی منحنی مشخصه‌ی آب و خاک است. در حالاتی که فشار هوای منفذی در نظر گرفته شده، $K = 10kPa/m$ فرض شده است که شیب تغییرات فشار هوای منفذی در عمق است. در تمامی حالات چسبندگی موثر حالت اشباع $C = 0$ فرض شده است. در مدل رفتاری بکار گرفته شده قانون جریان متحد لحاظ شده است. هندسه و المان‌بندی مدل برای قطرهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر انجام شده است. از آن جهت $\theta = 20^\circ$ انتخاب شده است تا تغییرات بار گسیختگی و گوه‌ی گسیختگی را بتوان بررسی نمود؛ زیرا در تحلیل حدی چه در حالت اشباع و چه در حالت غیر اشباع این تغییرات در مقادیر کوچک‌تر زاویه‌ی اصطکاک داخلی واضح‌تر است.

برای بررسی روند کلی رابطه‌ی پایداری و ساده‌تر شدن مقایسه‌ی فشار جبهه‌ی حفاری در حالات مختلف، تغییرات در مقادیر بسیار بزرگ γD که واقعیت فیزیکی ندارند نیز رسم شده است. مطابق آنچه بررسی شد، در این حالت نیز چسبندگی موثر برابر با صفر در نظر گرفته شده است. در تمام بخش‌های شکل ۷، با افزایش ضریب λ فشار لازم در جبهه‌ی حفاری کاهش می‌یابد. این کاهش در مقادیر کوچک‌تر γD بسیار بیشتر است؛ زیرا با افزایش γD ، کار خارجی به همان نسبت افزایش می‌یابد و انرژی اتلافی با افزایش مکش به مقداری ثابت میل می‌کند. افزایش کار خارجی و ثابت ماندن انرژی اتلافی، فشار بحرانی را به سمت مقدار به دست آمده بدون در نظر گرفتن مکش سوق می‌دهد.

برای نمونه، در قسمت الف شکل ۷ در حالت $S_{sat} = 10kPa$ می‌توان دید در $\gamma D = 300kPa$ فشار بحرانی برای $\lambda = 1.5$ برابر با ۶۲ کیلو پاسکال و در $\lambda = 6$ برابر با ۴۹٫۵ کیلو پاسکال و ۰٫۸ مقدار قبلی است. در نمودار ب در حالت $S_{sat} = 25kPa$ می‌توان دید در $\gamma D = 300kPa$ فشار بحرانی برای $\lambda = 1.5$ برابر با ۴۳ کیلو پاسکال و در $\lambda = 6$ برابر با ۱۴٫۴ کیلو پاسکال و ۰٫۳۳ مقدار متناظر با حالت $\lambda = 1.5$ است. در نمودار پ در وضعیت مشابه در $\lambda = 6$ دیگر نیازی به اعمال فشار بر جبهه‌ی حفاری نیست. همچنین در $\lambda = 1.5$ فشار بحرانی برابر با ۱۰ کیلو پاسکال است. با مقایسه‌ی نمودارهای الف و ب می‌توان دریافت در $S_{sat} = 25kPa$ در مقادیر $\gamma D \leq 250kPa$ نیازی به فشار جبهه‌ی حفاری نیست؛ در حالی که در $S_{sat} = 10kPa$ زمانی که $\lambda = 6$ است نیز فشار بحرانی بزرگ‌تر از صفر است.

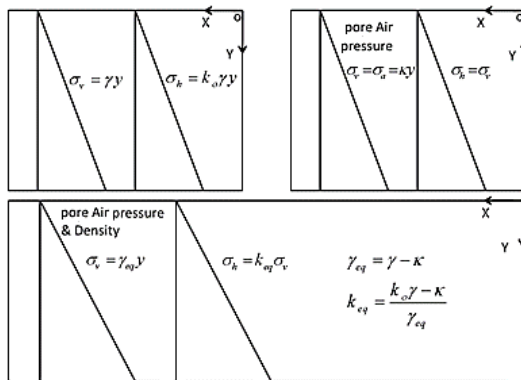
در نمودارهای ت تا ج، روند تغییرات فوق مشابه نمودارهای الف تا پ است. با افزایش θ کار خارجی کاهش می‌یابد و کاهش کار خارجی فشار بحرانی را کاهش می‌دهد. در تمام شکل‌ها واضح است که هرچه مقدار γD بزرگ‌تر است، درصد کاهش بر اثر افزایش γ کوچک‌تر است؛ این تغییرات میان مقادیر مشابه در وضعیت‌های یکسان بین دو حالت $\theta = 30^\circ$ و $\theta = 45^\circ$ نیز برقرار است. در حالت کلی افزایش λ و θ منجر به کاهش بار گسیختگی می‌شود.

۶- مدل‌سازی عددی

در این حالت علاوه بر تنش‌های ناشی از وزن خاک، فشار هوای منفذی نیز وجود دارد. همان طور که در شکل ۹ مشخص است، در این حالت تنش‌های ناشی از جمع تنش‌های ناشی از وزن و فشار هوای منفذی می‌تواند با انتخاب مقادیر متفاوت دانسیته و ضریب فشار خاک در حالت سکون مدل شود. به همین منظور به جای دانسیته‌ی خاک از دانسیته‌ی معادل و به جای ضریب فشار خاک در حالت سکون K_0 از مقدار معادل آن استفاده شده است گزاره‌های (۱۳) و (۱۴).

$$K_{eq} = \frac{K_0 \gamma - \kappa}{\gamma - \kappa} \quad (13)$$

$$\gamma_{eq} = \gamma - \kappa \quad (14)$$

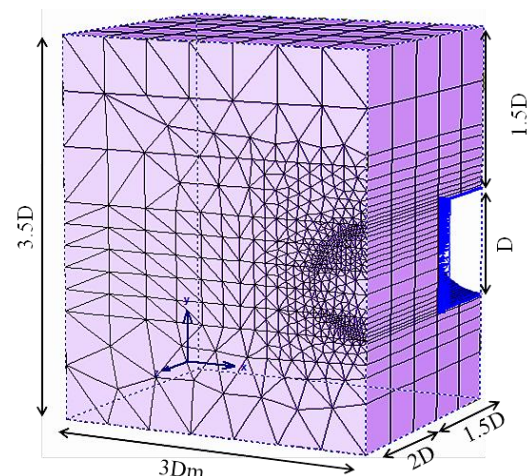


شکل ۹- معادل‌سازی توزیع هم‌زمان فشار هوای منفذی و تنش‌های ناشی از وزن

۳-۶- فشار جبهه‌ی حفاری در مکش و فشار هوای منفذی متغیر در راستای عمق

در این حالت $\lambda = 0$ و $K = 10 \text{ kPa/m}$ در نظر گرفته شده است. مکش در کف تونل برابر با ۲۵ کیلو پاسکال و در قسمت بالایی سطح حفاری برابر با ۵۰ کیلو پاسکال است. در حالتی که توزیع مکش وجود دارد، چسبندگی در هر عمق مقداری متفاوت دارد. خاک به چند لایه تقسیم و تغییرات چسبندگی در هر لایه خطی در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز برای نمونه، $St10 - 20 - 10 - S$ نشان‌گر قطر ۱۰ متر، دانسیته‌ی ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب و $K = 10 \text{ kPa/m}$ است. در همه حالات منظور از چسبندگی، همان چسبندگی ظاهری است.

شکل ۸ ابعاد هندسی و المان‌بندی مدل را برای قطر D نشان می‌دهد. تعداد المان‌ها در نزدیکی مقطع تونل بیشتر است و با دورتر شدن از مقطع، المان‌ها بزرگ‌تر و تراکم آن کم‌تر می‌شود. مختصه‌ی Y راستای عمق و مختصه‌ی Z محور عمود بر سطح مقطع تونل را نشان می‌دهد. در تمام حالات نسبت ابعاد هندسی به قطر ثابت در نظر گرفته شده و عمق سنگ بستر از کف تونل برابر با قطر تونل فرض شده است. با توجه به ثابت بودن متغیرهای جدول ۱، تحلیل عددی بر تاثیر توزیع مشخصی از مکش و فشار هوای منفذی در دانسیته‌های متفاوت و مقایسه‌ی آن با وضعیت خاک در مکش صفر متمرکز می‌شود. اضافه بر این تغییرات گوهی گسیختگی و جایجایی نیز به دست می‌آید. وضعیت‌های متفاوت بررسی شده در ۴ حالت کلی زیر جای می‌گیرد.



شکل ۸- هندسه و المان‌بندی مدل

۱-۶- فشار جبهه‌ی حفاری در حالت مکش و

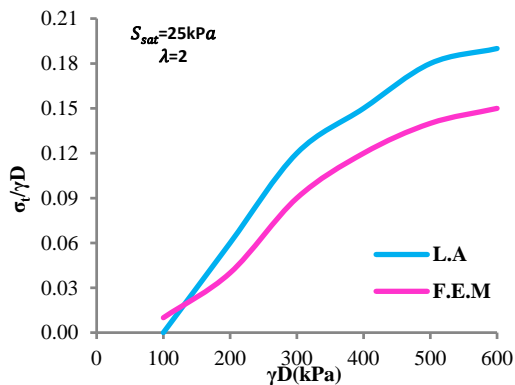
فشار هوای منفذی صفر (خشک)

در این حالت $K = 0$ و $C_{app} = 0$ است. تحلیل‌های عددی برای این حالت در γD ‌های مختلف انجام شده است. در جدول ۲ نتایج این تحلیل‌ها با عبارت NS (بدون مکش) مشخص شده است. برای نمونه، $St20 - 10 - 0 - NS$ نشان‌گر این وضعیت با قطر ۲۰ متر، دانسیته‌ی ۱۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب، مکش صفر و فشار هوای منفذی صفر و در نتیجه $K = 0$ است.

۲-۶- توزیع متغیر فشار هوای منفذی

جدول ۲- نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و مقادیر متناظر ورودی کد عددی

State	L. A	F. E. M	$\frac{\sigma_t(L. A)}{\sigma_t(F. E. M)}$	k_{eq}	$\gamma_{eq} \left(\frac{kN}{m^2}\right)$
	$\sigma_t/\gamma D$	$\sigma_t/\gamma D$			
St10-20-0-NS	۰٫۲۵	۰٫۲۱	۰٫۸۴	۰٫۶۶	۲۰
St15-20-0-NS	۰٫۲۵	۰٫۲۱	۰٫۸۴	۰٫۶۶	۲۰
St20-20-0-NS	۰٫۲۵	۰٫۲۱	۰٫۸۴	۰٫۶۶	۲۰
St25-20-0-NS	۰٫۲۵	۰٫۲۰	۰٫۸۰	۰٫۶۶	۲۰
St30-20-0-NS	۰٫۲۵	۰٫۲۰	۰٫۸۰	۰٫۶۶	۲۰
St10-10-0-S	-	۰٫۰۱	-	۰٫۶۶	۱۰
St10-20-0-S	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۶۷	۰٫۶۶	۲۰
St20-10-0-S	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۶۷	۰٫۶۶	۱۰
St15-20-0-S	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۷۵	۰٫۶۶	۲۰
St20-20-0-S	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۸۰	۰٫۶۶	۲۰
St25-20-0-S	۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۷۸	۰٫۶۶	۲۰
St30-20-0-S	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۷۹	۰٫۶۶	۲۰
St10-20-10-S	-	۰٫۰۱	-	۰٫۳۲	۱۰
St15-20-10-S	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۶۷	۰٫۳۲	۱۰
St20-20-10-S	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۷۵	۰٫۳۲	۱۰
St25-20-10-S	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۸۰	۰٫۳۲	۱۰
St30-20-10-S	۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۷۸	۰٫۳۲	۱۰



شکل ۱۰- مقایسه‌ی روند تغییرات بار گسیختگی در دو روش تحلیل حدی و روش اجزاء محدود

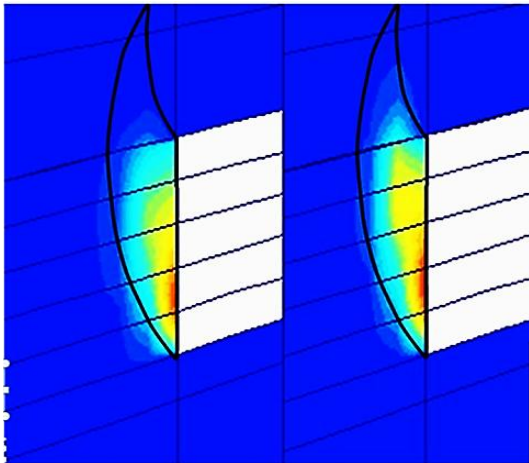
۸- گوهی گسیختگی

در تحلیل حدی، شکل گوهی گسیختگی تنها به زاویه‌ی اصطکاک داخلی وابسته است. بنا بر تحلیل حدی گوه‌های

۷- مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و حدی

نتایج به دست آمده از روش عددی را می‌توان در دو بخش بار گسیختگی و گوهی گسیختگی ارائه و تحلیل نمود. جدول ۲ بار گسیختگی را نشان می‌دهد. در این جدول $L.A$ نشانه‌ی تحلیل حدی و $F.E.M$ نشانه‌ی روش عددی اجزاء محدود است. در حالتی که هوای منفذی وجود دارد، از دانسیته‌ی معادل استفاده شده است. از اعداد به دست آمده مشخص است که بار به دست آمده از روش عددی دارای نسبتی بین ۰٫۶۷ تا ۰٫۸۴ بار به دست آمده از تحلیل حدی است. هم‌چنین بار به دست آمده از روش عددی زمانی که فشار هوای منفذی وجود دارد، تغییر نمی‌کند. این مسئله نشان می‌دهد تغییرات به وجود آمده در مقدار ضریب فشار خاک در حالت سکون تاثیری در بار گسیختگی ندارد. هم‌چنین روند تغییرات بار گسیختگی در صورت وجود مکش مانند نتایج تحلیل حدی است (شکل ۱۰).

شکل ۱۳ گوه‌ی گسیختگی را در بارهای گسیختگی متناظر با پاسخ روش عددی و متناظر با بار به دست آمده از روش تحلیل حدی نشان می‌دهد. نکته‌ی مهمی که از این شکل به دست می‌آید، شباهت کلی گوه در بار گسیختگی به دست آمده از روش عددی با مکانیسم گسیختگی به دست آمده از تحلیل حدی است.



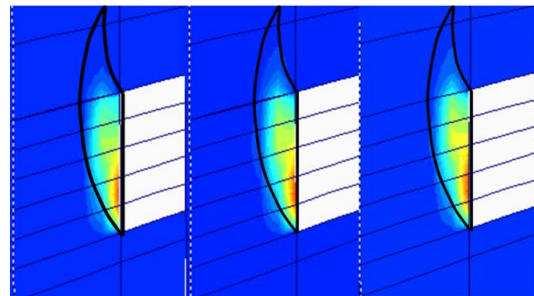
شکل ۱۳- گوه‌ی گسیختگی در بارهای گسیختگی متناظر با روش عددی و تحلیل حدی

با توجه به موارد ذکر شده، اگرچه در تحلیل حدی از کرنش‌های حجمی به دلیل فرض صلبیت گوه چشم‌پوشی شده است؛ گوه‌ی گسیختگی در هر دو روش دارای تطبیقی قابل قبول است. همچنین گوه‌ی گسیختگی بر اثر اعمال مکش و فشار هوای منفذی مانند آنچه در تحلیل حدی به دست آمد؛ تغییرات اندکی دارد و با تقریب قابل قبولی می‌توان آن را در $\theta = 20^\circ$ یکسان دانست.

۹- نتیجه‌گیری

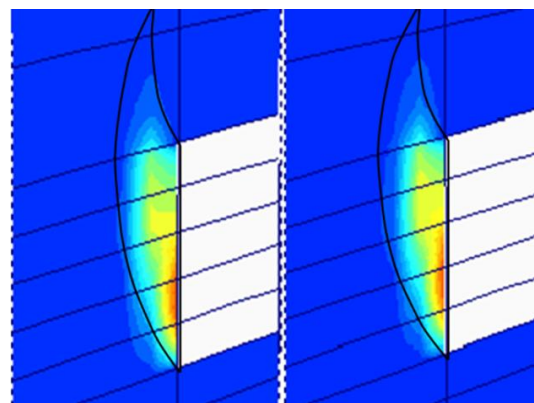
در این پژوهش، بکارگیری روش تحلیل حدی برای تخمین فشار لازم برای پایداری جبهه‌ی حفاری تونل در محیط غیر اشباع مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک مجموعه تحلیل عددی سه بعدی اجزاء محدود با هدف مقایسه با نتایج تحلیل حدی صورت گرفت. در ادامه نتایج حاصل از این مطالعه ارائه شده است.

گسیختگی در تمام حالات فوق باید شکلی واحد داشته باشد؛ زیرا در تمام این حالات زاویه‌ی اصطکاک داخلی برابر با 20° است. شکل ۱۱ گوه‌ی گسیختگی را در مکش صفر و نبود فشار هوای منفذی در γD های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش قطر، گوه‌ی گسیختگی اندکی به سمت سطح مقطع تونل حرکت می‌کند. همچنین تاج گوه‌ی گسیختگی به سمت بالا حرکت می‌کند؛ اما شکل گوه‌ی گسیختگی به طور نسبی ثابت می‌ماند.



شکل ۱۱- تغییرات گوه‌ی گسیختگی به ازای قطرهای متفاوت در مکش صفر و نبود فشار هوای منفذی

در شکل ۱۲ تاثیر مکش در گوه‌ی گسیختگی نشان داده شده است. وجود مکش تاج گوه‌ی گسیختگی را اندکی به سمت بالا حرکت می‌دهد. این نتیجه با آنچه از تحلیل حدی به دست آمد، تطابق نسبی دارد.



شکل ۱۲- تاثیر مکش در گوه‌ی گسیختگی در قطر ۳۰ متر و نبود فشار هوای منفذی

- افزایش مکش در خاک با افزایش چسبندگی ظاهری همراه است و توان اتلافی در گوه‌ی گسیختگی را افزایش می‌دهد. این امر باعث کاهش فشار لازم در سطح جبهه‌ی حفاری حدی است. هرچه مقدار مکش بزرگ‌تر شود، روند کاهش بار حدی کندتر است.
- هرچه اندازه‌ی مکش متناظر با ورود به حالت اشباع بزرگ‌تر باشد، بار حدی برای توزیع ثابت مکش در خاک کوچک‌تر است.
- زمانی که شیب تغییرات مکش در خلاف راستای عمق بزرگ‌تر از صفر است، با افزایش مقدار شیب بار حدی کوچک‌تر می‌شود. در این حالت اگرچه متغیرهای مستقل مکانیسم گسیختگی که از بهینه‌سازی هم‌زمان توان اتلافی و کار خارجی به دست می‌آید، مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرند؛ اما شکل گوه‌ی گسیختگی با تقریب بسیار خوب و قابل قبولی ثابت می‌ماند و می‌توان آن را تنها تابعی از زاویه‌ی اصطکاک داخلی دانست.
- زمانی که مقدار مکش و یا فشار هوای منفذی در تمام نقاط مکانیسم گسیختگی برابر است، شکل گوه‌ی گسیختگی تغییری نمی‌کند.
- بار به دست آمده از روش عددی دارای نسبتی بین ۰٫۶۷ تا ۰٫۸۴ مقدار بار به دست آمده از تحلیل حدی است. هم‌چنین بار به دست آمده از روش عددی زمانی که فشار هوای منفذی وجود دارد، تغییر نمی‌کند. روند تغییرات بار گسیختگی در صورت وجود مکش مانند نتایج تحلیل حدی است.
- وجود مکش تاج گوه‌ی گسیختگی را اندکی به سمت بالا حرکت می‌دهد. این نتیجه با آنچه از تحلیل حدی به دست می‌آید، مطابق است.
- تاثیر فشار هوای منفذی و مکش به طور هم‌زمان در گوه‌های گسیختگی ناچیز است و گوه‌های گسیختگی نشان داده شده را می‌توان با تقریب بسیار خوبی یکسان در نظر گرفت.
- شکل عمومی گوه‌ی گسیختگی از نظر کیفی در بار به دست آمده از روش عددی با گوه‌ی گسیختگی به دست آمده از تحلیل حدی یکسان است. اما گوه‌ی گسیختگی در بار متناظر با تحلیل حدی، با گوه‌ی گسیختگی در تحلیل حدی تفاوت آشکار دارد.

۱۰- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
\mathbf{u}_a	Pa	فشار هوای حفره‌ای	\mathbf{u}_w	Pa	فشار آب منفذی
σ	Pa	مولفه‌ای از تانسور تنش	σ'	Pa	مولفه‌ای از تانسور تنش موثر
τ_f	Pa	مقاومت برشی	\mathbf{C}	Pa	چسبندگی در حالت اشباع
\mathbf{C}_{app}	Pa	چسبندگی ظاهری	σ_{net}	Pa	تنش خالص
$\sigma - \mathbf{u}_a$	Pa	مولفه‌ی تنش نرمال خالص	\mathbf{S}	Pa	مکش بافتی
λ	-	ضریب خمیری	\mathbf{F}	-	تابع تسلیم
σ_{ij}	Pa	تانسور تنش	δ_{ij}	-	دلتای کرونکر
$(\sigma_{ij} - \mathbf{u}_{ij}\delta_{ij})$	Pa	تنش خالص	Ω	-	مرکز دوران
$\mathbf{P}_{ext}(\vec{Q}, \vec{v})$	J/s	توان ناشی از نیروهای خارجی	$\mathbf{P}_{in}^{sup}(\vec{v})$	J/s	توان مربوط به انرژی تلف شده
\vec{n}	-	بردار نرمال بر سطوح ناپیوستگی	$[[\vec{v}]]$	-	بردار سرعت در سطوح ناپیوستگی
\vec{v}	-	بردار سرعت	\sum_i	m^2	سطح ناپیوسته‌ی بیرونی مکانیسم
\sum_i	m^2	سطح ناپیوسته‌ی شماره‌ی i	i	-	شماره‌ی سطح درون مکانیسم
\vec{Q}	N	بار جسمی وارد بر مکانیسم	\mathbf{D}	m	قطر تونل
Σf	m^2	سطح جبهه‌ی حفاری تونل	\mathbf{K}_0	-	ضریب فشار خاک در حالت سکون
χ	-	شدت تاثیر مکش بافتی بر مقاومت برشی خاک			

زاویه‌ی اصطکاک برای مشارکت مکش در مقاومت برشی	Degree	ϕ^b
مکش بافتی اشباع (مکش ورودی هوا)	Pa	S_{sat}
بردار یکه‌ی شعاعی در مختصات استوانه‌ای	-	\vec{e}_r
بردار یکه‌ی مماسی در مختصات استوانه‌ای	-	\vec{e}_θ
بردار یکه در راستای قائم	-	\vec{e}_z
ضریب مشارکت مقاومت در محاسبه‌ی جبهه‌ی حفاری (مربوط به بار سطحی)	-	N_S
ضریب مشارکت مقاومت در محاسبه‌ی جبهه‌ی حفاری (مربوط به اثر چسبندگی)	-	N_c
ضریب مشارکت مقاومت در محاسبه‌ی جبهه‌ی حفاری (مربوط به اثر وزن خاک)	-	N_γ
تغییرات فشار هوای منفذی در راستای عمق	kPa/m	K

۱۱- منبع‌ها

- [1] Chen, W. F. (2007). *Limit Analysis and Soil Plasticity*. J. Ross Publishing. ISBN-13: 978-1932159738.
- [2] Kimura, T., & Mair, R. J. (1981). Centrifugal Testing of Model Tunnels in Soft Clay. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 319-322). A. A. Balkema.
- [3] Broms, B. B., & Bennermark, H. (1967). Stability of Clay at Vertical Openings. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(1), 71-94.
- [4] Ellstein, A. R. (1986). Heading Failure of Lined Tunnels in Soft Soils. *Tunnels and Tunnelling*, 18(6), 51-54. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)92603-3](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(86)92603-3).
- [5] Soubra, A. H. (2000). Three-Dimensional Face Stability Analysis of Shallow Circular Tunnels. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering* (pp. 1-6). Technomic. ISBN: 1587160676.
- [6] Leca, E., & Dormieux, L. (1990). Upper and Lower Bound Solutions for The Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material. *Geotechnique*, 40(4). 581-606. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1990.40.4.581>.
- [7] Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2002). Upper Bound Limit Analysis Using Linear Finite Elements and Nonlinear Programming. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(2), 181-216. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.198>.
- [8] Vermeer, P. A, Ruse, N., & Marcher, T. (2002). Tunnel Heading Stability in Drained Ground. *FELSBAU*, 20(6), 8-18. [http://www.ilf.com/Tunnel Heading Stability in Drained Ground.pdf](http://www.ilf.com/Tunnel%20Heading%20Stability%20in%20Drained%20Ground.pdf).
- [9] Vermeer, P. A., & Ruse, N. (2001). On the Stability of The Tunnel Excavation Front. *Proceeding of First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics* (pp. 521-523). Elsevier Science Ltd. ISBN: 0080439446.
- [10] Li, Y., Emeriault, F., Kastner, R., & Zhang, Z. X. (2009). Stability Analysis of Large Slurry Shield-Driven Tunnel in Soft Clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 472-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2008.10.007>.
- [11] Anagnostou, G., & Kovari, K. (1994). The Face Stability of Slurry-Shield-Driven Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(2), 165-174. [http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798\(94\)90028-0](http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(94)90028-0).
- [12] Horn, M. K., & Adams, J. A. S. (1966). Computer-Derived Geochemical Balances and Element Abundances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 30(3), 279-297. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(66\)90003-2](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(66)90003-2).
- [13] Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). Face Support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Conditions. *Tunnelling'94*, 531-550. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-2646-9_32.

- [14] Broere, W. (1998). Face Stability Calculation for a Slurry Shield in Heterogeneous Soft Soils. *Proceedings of the World Tunnel Congress'98 on Tunnels and Metropolises* (pp. 215-218). A. A. Balkema. ISBN: 9789054109365.
- [15] Klar, A., Osman, A. S., & Bolton, M. (2007). 2D and 3D Upper Bound Solutions for Tunnel Excavation Using Elastic Flow Fields. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(12): 1367-1374. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.597>.
- [16] Davis, E. H., Gunn, M. J., Mair, R. J., & Seneviratne, H. N. (1980). The Stability of Shallow Tunnels and Underground Openings in Cohesive Material. *Geotechnique*, 30(4), 397-416. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1980.30.4.397>.
- [17] Osman, A. S., Mair, R. J., & Bolton, M. D. (2006). On The Kinematics of 2D Tunnel Collapse in Undrained Clay. *Geotechnique*, 56(9), 585-595. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2006.56.9.585>.
- [18] Chambon, P., & Corte, J. F. (1994). Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(7), 1148-1165. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:7\(1148\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:7(1148)).
- [19] Subrin, D., & Wong, H. (2002). Tunnel Face Stability in Frictional Material: A New 3D Failure Mechanism. *Comptes Rendus Mecanique*, 330(7), 513-519. [http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0721\(02\)01491-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0721(02)01491-2).
- [20] Augarde, C. E., Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2003). Stability of an Undrained Plane Strain Heading Revisited. *Computers and Geotechnics*, 30(5), 419-430. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X\(03\)00009-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X(03)00009-0).
- [21] Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A. H. (2010). Face Stability Analysis of Circular Tunnels Driven by a Pressurized Shield. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 215-229. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000194](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000194).
- [22] Yamamoto, K., Lyamin, A. V., Wilson, D. W., Sloan, S. W., & Abbo, A. J. (2011). Stability of a Circular Tunnel in Cohesive-Frictional Soil Subjected to Surcharge Loading. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 504-514. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.02.014>.
- [23] Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), 447-466. http://www.soilvision.com/Stress_State_Variables_for_Unsaturated_Soils.pdf.
- [24] Zhang, L. L., Fredlund, D. G., Fredlund, M. D., & Wilson, G. W. (2014). Modeling the Unsaturated Soil Zone in Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12), 1384-1398. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2013-0394>.
- [25] Calo, E., Sako, K., Kitamura, R., & Tabata, M. (2012). Slope Stability Analysis with Change in Apparent Cohesion and Seepage. *Proceeding of 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils* (pp. 588-593). Bangkok: Geotechnical Engineering Research and Development Center. ISBN: 978-1-62276-264-4.
- [26] Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknik*, 106(39), 859-863. <http://geotekhne.com.co/EstructurasPDF/PrincipioEsfuerzosEfectivos.pdf>.
- [27] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321. <http://dx.doi.org/10.1139/t78-029>.
- [28] Sheng, D., Gens, A., Fredlund, D. G., & Sloan, S. W. (2008). Unsaturated soils: From Constitutive Modelling to Numerical Algorithms. *Computers and Geotechnics*, 35(6), 810-824. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.08.011>.
- [29] Coussy, O. (2007). Revisiting the Constitutive Equations of Unsaturated Porous Solids Using a Lagrangian Saturation Concept. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(15), 1675-1694. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.613>.

بررسی و تحلیل علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری قراردادهای طرح و ساخت عمرانی پروژه‌های زیرزمینی کشور

هادی تلخابی^{۱*}؛ مجید پرچمی جلال^۲؛ محمود گلابچی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مدیریت پروژه و ساخت؛ دانشکده‌ی معماری؛ دانشگاه تهران

۲- استادیار؛ گروه مدیریت پروژه و ساخت؛ دانشکده‌ی معماری؛ دانشگاه تهران

۳- استاد؛ گروه معماری؛ دانشکده‌ی معماری؛ دانشگاه تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۶/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
قرارداد طرح و ساخت علل ایجاد ادعا تحلیل ریسک شکست ادعا شاخص اهمیت پروژه‌های زیرزمینی	در اکثر پروژه‌ها، امکان بروز ادعاهایی از سوی عوامل مخصوصاً پیمانکاران وجود دارد. این ادعاها اثرات منفی بر اجرای پروژه می‌گذارد. اگرچه در هیچ پروژه‌ای نمی‌توان احتمال بروز این ادعاها را از میان برد، اما می‌توان با شناسایی علل اصلی ایجاد ادعاها، تا حد زیادی از وقوع آن‌ها در پروژه‌های آتی جلوگیری کرد. به همین دلیل در این پژوهش با استفاده از مطالعه‌ی کتابخانه‌ای، مصاحبه با خبرگان و بررسی دقیق اسناد و مدارک مرتبط، داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری و ۲۵۰ مورد علل مرتبط با ایجاد ادعا در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی شناسایی شده است. پس از تجزیه و تحلیل این موارد، پرسشنامه‌ی بسته شامل فراوانی و شدت تاثیر علل ایجاد ادعا در میان عوامل ایجاد آن شامل کارفرما و مشارکت طرح و ساخت که در انواع پروژه‌های زیرزمینی از جمله‌ی پروژه‌های تونلسازی شهری و غیر شهری فعالیت دارند، توزیع و بر اساس نظرهای جمع‌آوری شده، مهم‌ترین علل ایجاد ادعا شناسایی و بر اساس شاخص اهمیت مورد ارزیابی کمی قرار گرفته است.

۱- پیشگفتار

[2]. بر اساس تحقیق‌های انجام شده، هر مدیر به طور معمول حدود ۲۵ درصد از وقت خود را صرف حل و فصل تنش‌ها و اختلاف‌ها می‌کند و در همین راستا بسیاری از ذینفعان پروژه‌ها، ادعاها و اختلاف‌ها را از مخرب‌ترین اتفاق‌های پروژه‌های ساخت می‌دانند [۳].

در اکثر پروژه‌ها با سیستم‌های مختلف انجام پروژه (*Project Delivery Systems*)، امکان بروز ادعاهایی از سوی عوامل، مخصوصاً پیمانکاران وجود دارد. از یک طرف نیاز به بهره‌برداری سریع‌تر از طرح‌ها و به‌کارگیری دانش و تجربه‌ی اجرایی پیمانکاران، موجب نیاز به استفاده از روش طرح و ساخت در اجرای پروژه‌ها شده است [۴]؛ از طرف

در ارزیابی موفقیت طرح‌های عمرانی به عنوان یکی از مشخصه‌های توسعه‌ی اقتصادی هر کشور معمولاً از سه پارامتر اصلی زمان، هزینه و کیفیت به عنوان مثلث طلایی استفاده می‌شود؛ با این حال ممکن است عوامل دیگری که به نظر نامرئی می‌رسند نیز نقش مهم و برجسته‌ای در این میان داشته باشند. یکی از این عوامل نامرئی ادعاها (*Claims*) هستند [۱]. افزایش ادعاها در پروژه‌های ساخت با حصول اهداف اصلی سه‌گانه‌ی مدیریت پروژه (زمان، هزینه و کیفیت)، رابطه‌ی معکوس دارد؛ به‌طوری‌که افزایش ادعاها، سبب ایجاد اثر منفی در سه متغیر مذکور می‌شود

* تهران؛ خیابان انقلاب؛ دانشگاه تهران؛ پردیس هنرهای زیبا؛ دانشکده‌ی معماری؛ کدپستی: ۱۴۱۵۵۶۴۵۸۳؛ صندوق پستی: ۱۴۱۵۵۶۴۵؛ شماره‌ی تلفن:

۰۶۶۴۰۹۶۹۶ - ۰۲۱ - دورنگار: ۰۸۳ - ۶۶۹۷۲ - ۰۲۱، رایانامه: Hadi.talkhabi@yahoo.com

خدمات فنی مربوط به آن، ساخت، نصب، راه‌اندازی، آزمایش‌های کارایی و سایر خدمات جنبی مربوط به آن، به صورت توأم توسط یک پیمانکار طرح و ساخت انجام می‌شود [۴]. در این پروژه‌ها کارفرما با انتقال بخش بزرگی از مسئولیت‌ها و ریسک‌های پروژه به پیمانکار از مسئولیت‌های خود کاسته و به مسئولیت‌های پیمانکار می‌افزاید [۶].

اگرچه روش طرح و ساخت نسبت به روش سنتی انجام پروژه دارای مزایایی است که در ستون سوم جدول ۱ ذکر شده است؛ ولی شرط تحقق این مزایا در مرحله‌ی اول شناخت کامل روش طرح و ساخت و در مرحله‌ی دوم استفاده از آن در پروژه‌هایی است که معیارها و مبانی اولیه‌ی لازم برای مناسب بودن این روش را داشته باشد. بنابراین در جدول ۱، مبانی لازم برای انجام پروژه به روش طرح و ساخت ارائه شده است.

۳- فرایند انجام پروژه به روش طرح و ساخت

در روش طرح و ساخت مطابق شکل ۱ نخست کارفرما یا مشاور کارفرما باید حدود ۳۰ درصد از مطالعات (طراحی مفهومی یا طراحی پایه) را انجام داده و بر اساس آن اسناد فنی مینا (*RFP: Request For Proposal*) را تهیه نماید. مشاور کارفرما پس از تهیه‌ی اسناد فنی مینا و برگزاری مناقصه، پیمانکار طرح-سازنده (یا گروه مشارکت پیمانکار و مشاور) را انتخاب می‌کند و وظیفه‌ی تصویب طراحی‌ها و نظارت بر فعالیت‌های اجرایی او را بر عهده می‌گیرد [۸]. اجرای طرح به روش طرح و ساخت، با توجه به نوع طرح از نظر شناخته یا ناشناخته بودن عوامل، در قالب یکی از دو گزینه‌ی زیر انجام می‌شود:

۱- در صورتی که اطلاعات موجود طرح در پایان طراحی مفهومی، که توسط کارفرما یا مشاور او انجام می‌شود، برای تهیه‌ی اسناد مناقصه کافی باشد، ادامه‌ی کار از طراحی پایه به بعد، توسط پیمانکار طرح و ساخت، انجام می‌شود.

۲- در صورتی که اطلاعات موجود طرح در پایان طراحی مفهومی، برای تهیه‌ی اسناد مناقصه کافی نباشد و یا طرح متأثر از عوامل ناشناخته‌ی زیادی باشد، طراحی پایه توسط کارفرما یا مشاور وی انجام شده و ادامه‌ی کار شامل طراحی تفصیلی، تدارک و اجرا، به مناقصه گذاشته می‌شود [۴].

دیگر، اجرای پروژه‌ها به روش طرح و ساخت در کشور نو ظهور بوده و طرف‌های پیمان نیز آشنایی کمی با آن دارند، به همین دلیل بروز ادعا و اختلاف بین این عوامل به خصوص در پروژه‌های زیرزمینی که ماهیت پیچیده‌ای دارد، امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین در این پژوهش، علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های زیرزمینی اجرا شده با روش طرح و ساخت کشور مد نظر بوده و با توجه به این مطلب که هر پروژه یکتا و منحصر به فرد است و شرایط و ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارد و از طرفی ادعا نیز با توجه به ماهیت پرتنش آن ممکن است از یک پروژه و یا یک نوع از پروژه‌ها به نوع دیگر تغییر یابد، دامنه‌ی تحقیق محدود به پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی شده است تا نتایج تحقیق ملموس، واقعی و کاربردی‌تر باشد.

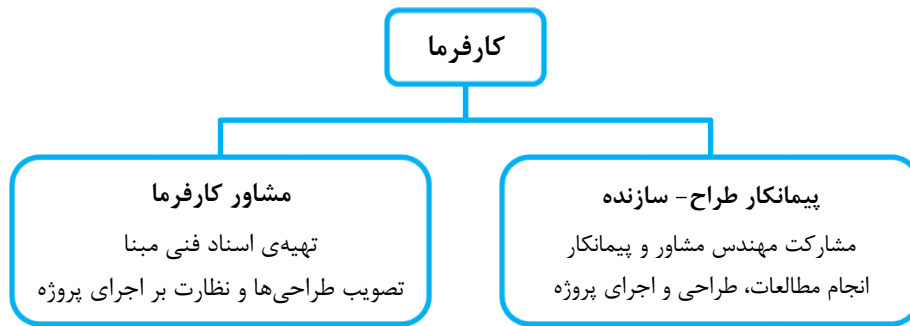
ادعاهای پیمانکاران، عمدتاً با هدف جبران خسارت وارده مطرح می‌شود؛ بنابراین هر عاملی که سبب بروز خسارت به سازمان پیمانکار شود و او را از دستیابی به اهداف خود از انجام پروژه باز دارد، می‌تواند سبب تشویق پیمانکار به طرح ادعاهای گوناگون شود [۵]. به طور حتم پیشگیری از بروز ادعا بسیار ساده‌تر و کم‌خرج‌تر از حل آن است. برخی مواقع پس از بروز ادعا ناگزیر زمان زیادی برای حل آن صرف خواهد شد و به دلیل سپری شدن زمان و کهنه شدن مشکل‌ها، جوانب مختلفی نیز به آن افزوده شده و پیچیدگی بیشتری به خود می‌گیرد. در نتیجه موجب تحمیل هزینه‌های بیشتری به پروژه می‌شود. در صورت شناخت عوامل بروز ادعا، راه‌های پیشگیری از آن‌ها نیز شناخته خواهد شد و در بسیاری از موارد با اتخاذ تدابیر ساده می‌توان از بروز بخش عمده‌ای از ادعاها جلوگیری نمود. بنابراین تلاش شده است تا مهم‌ترین علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی بر مبنای ماهیت این نوع پروژه‌ها تجزیه و تحلیل شود.

۲- معرفی پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی

اولین گام در این تحقیق شناخت و بررسی پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی کشور است که ادعاهای پیمانکاران در آن به وقوع می‌پیوندد. روش طرح و ساخت، یکی از سیستم‌های انجام پروژه است که طبق آن، طراحی (تمام یا بخشی از طراحی پایه و طراحی تفصیلی)، تامین مصالح و تجهیزات و

جدول ۱- مبانی، شاخص‌ها و مزایای در سیستم طرح و ساخت بر حسب اولویت [۷]

مزایای اجرای پروژه	شاخص‌های توفیق اجرای پروژه	مبانی لازم برای انجام پروژه
کوتاه کردن زمان	طبق بودجه‌ی پیش‌بینی شده	تعریف کامل پروژه
قطعیت دادن به هزینه	طبق انتظارهای بهره‌بردار	تفاهم دو جانبه در محدوده و هدف پروژه
کاهش هزینه	طبق برنامه‌ی زمان‌بندی	توانمندی مدیریت پروژه در کارفرما
ارتقا قابلیت ساخت و نوآوری	طبق مشخصات فنی	توانایی کارفرما در تعریف دقیق پروژه
کاهش ادعا	کیفیت بالای اجرا	بودجه و اعتبار تامین شده
قطعیت دادن به برنامه‌ی زمان‌بندی	حداقل درگیری برای کارفرما	موعد قطعی تکمیل پروژه
-	-	توانمندی طراح- سازنده
-	-	پرهیز کارفرما از ریسک
-	-	مشخصات فنی استاندارد



شکل ۱- ساختار کلی عوامل درگیر در انجام پروژه‌های طرح و ساخت

می‌شود [۸].

$$L = \frac{100C}{100 - i(100 - t)} \quad (۱)$$

در این گزاره i ضریب نمره‌ی فنی و عددی بین ۰٫۱ تا ۰٫۴ است که باید مقدار آن در RFP تعیین شده باشد. t نمره‌ی فنی پیمانکار و C قیمت پیشنهادی است. در نهایت L کمتر برنده‌ی مناقصه می‌شود.

۴- ادعاها و علت ایجاد آنها

استفاده از لغت ادعا باعث ایجاد یک نوع برخورد احساسی می‌شود که معمولاً با اتهام و تلافی همراه است. عواقب این ادعاها در بسیاری از موارد به صورت برهم خوردن روابط، مراجعه به داوری یا دادرسی قضایی با تمام تاخیرها و هزینه‌هایش است [۹]. واژه‌ی $Claim$ (که در این تحقیق و نیز سایر تحقیق‌ها به عنوان معادل فارسی ادعا در نظر گرفته می‌شود)، در فرهنگ واژگان نظام فنی و اجرایی کشور،

در هر دو گزینه، پس از تهیه‌ی اسناد فنی مبنا یا RFP توسط مشاور کارفرما فرایند ارجاع کار مطابق شکل ۲ انجام می‌گیرد. بدین ترتیب که نخست توسط فراخون عمومی از پیمانکاران دارای صلاحیت دعوت به آرایه‌ی مدارک برای ارزیابی توان انجام کار صورت می‌گیرد. سپس بر اساس مدارک و اطلاعات داده شده، پیمانکاران ارزیابی کیفی شده و بر اساس آن لیست کوتاه تهیه می‌شود. اسناد فنی تهیه شده یا RFP به پیمانکاران لیست کوتاه فروخته شده و مدت زمانی به عنوان دوره‌ی تهیه‌ی پیشنهاد در اختیار پیمانکاران لیست کوتاه قرار داده می‌شود تا پیشنهادهای خود را که معمولاً مشتمل بر حداقل سه پاکت ضمانت‌نامه شرکت در مناقصه، پیشنهاد فنی و قیمت است را آرایه نماید. در نهایت بر اساس روش و فرمول پیش‌بینی شده در RFP ، پیمانکار برنده بر اساس نمره پیشنهاد فنی و قیمت پیشنهادی طبق فرمول قیمت تراز شده‌ی گزاره‌ی (۱) تعیین

۱- عدم توافق بر اصل موضوع مورد اختلاف
 ۲- توافق در اصل موضوع ولی عدم توافق در خصوص میزان و حجم خواسته‌های مطرح شده به سبب موضوع مورد اختلاف

لازم به ذکر است که ادعاها در قراردادهای پیمانکاری ممکن است به علل مختلفی ایجاد شود. کوماراسوامی (Kumaraswamy) علل ایجاد ادعاها را به دو بخش علل مستقیم (علت ایجاد ادعا) و ریشه‌ای (منشا بروز ادعا) تقسیم کرده است. بر این اساس علل ایجاد ادعا آنهایی هستند که بلافاصله آشکار می‌شوند و کوماراسوامی این علل را از علل ریشه‌ای (یا منشا) جدا کرده است. نمونه‌ای از یک علت مستقیم (علت ایجاد ادعا)، تغییرات توسط کارفرما و نمونه‌ای از یک علت ریشه‌ای (منشا بروز ادعا)، عدم وجود اطلاعات برای کارفرما برای تصمیم‌گیری‌های مناسب است [12]. در این پژوهش نیز منشا بروز ادعا، متفاوت از علت ایجاد ادعا و منشا، پیش‌نیاز ایجاد علت ادعا در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ تفاوت‌های منشا و علت ایجاد ادعا آورده شده است.

مطالبه‌ی پیمانکار برای پرداخت اضافی، مطالبه‌ی خسارت در مقابل نقض پیمان، تمدید زمان اجرای کار یا خواسته‌ای دیگر که به اعتقاد وی بر اساس پیمان استحقاق آن را دارد، تعریف شده است [۱۰].

در یک تعریف جامع بر اساس کلیه‌ی تعریف‌های ارائه شده، ادعا مطالبه‌ی زمان و هزینه‌ی مازاد بر قرارداد است که بر اساس چهارچوب مفاد قرارداد یا قوانین و ضوابط بالادستی قرارداد مورد درخواست قرار می‌گیرد. در این حالت در اصل موضوع یا مقدار آن بین طرفین قرارداد اختلاف وجود دارد [۱۱]؛ بنابراین ادعا باید پایه‌ی قراردادی و قانونی داشته باشد.

به طور کلی می‌توان این طور بیان نمود که در جریان شکل‌گیری ادعا ابتدا اختلافی میان طرفین به وجود می‌آید. در صورت عدم توافق بر سر موضوع مورد اختلاف، ادعا مطرح می‌شود و در صورت عدم توافق مجدد در این مرحله، متعاقباً جرقه‌ی تضاد زده خواهد شد.

عدم توافق احتمال دارد در حوزه‌های زیر رخ دهد [۱]:

ارایه‌ی پیشنهاد (قیمت و فنی) و واگذاری	ارایه‌ی درخواست پیشنهاد (RFP) به پیمانکاران منتخب	تسلیم مدارک توسط پیمانکاران	ارایه‌ی دعوت‌نامه‌ی ارزیابی توان اجرای کار (RFQ) فراخوان نخست
تعیین برنده‌ی مناقصه	دوره‌ی تهیه‌ی پیشنهاد	ارزیابی پیمانکاران/ تهیه‌ی فهرست کوتاه	مراجعه‌ی پیمانکاران

شکل ۲- فرایند ارجاع کار در پروژه‌های طرح و ساخت

جدول ۲- تفاوت‌های منشا بروز ادعا و علت ایجاد ادعا

ردیف	منشا بروز ادعا	علل ایجاد ادعا
۱	پیش‌نیاز علت ایجاد ادعا	پس‌نیاز منشا و پیش‌نیاز ایجاد ادعا
۲	قبل یا در طول چرخه‌ی حیات پروژه	در طول چرخه‌ی حیات پروژه (مخصوصاً در دوره‌ی اجرا)
۳	محاسبه‌ی میزان ادعای صورت گرفته، ممکن نیست	امکان محاسبه‌ی میزان ادعای صورت گرفته، وجود دارد

اتخاذ راهکارهایی، می‌تواند مفید باشد [13]. در همین راستا، مطالعه‌های گوناگونی برای بررسی شناخت ادعا و علل ایجاد آن در کشورهای مختلف انجام شده است. برخی از این

اولین قدم برای غلبه بر مشکل ادعا، شناسایی آن است. درک این وقایع برای پیش‌بینی ادعاهای آینده و برای به حداقل رساندن تاثیر آنها در پروژه‌های مشابه آتی با

مطالعات، در این تحقیق جمع‌آوری و جمع‌بندی و نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- برخی علل شناسایی شده‌ی ایجاد ادعا در پروژه‌های عمرانی خارج از کشور

سال	کشور	علل ایجاد ادعا
۲۰۰۷	پرتغال	تسریع؛ تاخیر در نتیجه‌ی کار؛ بهای پرداخت‌ها و مقادیر؛ فورس مازور؛ تعلیق کار؛ خاتمه و فسخ قرارداد؛ شروع و پایان پروژه [13]
۲۰۰۶	کره	تغییر در موقعیت سایت؛ توقف در کارها؛ اختلاف نظر در ارزیابی و بررسی دستوره‌های تغییر؛ اشکال‌های طراحی؛ تغییرهای اضافی در احجام قرارداد؛ ابهام در مشخصات قرارداد [14]
۲۰۰۶	امارات	تغییرها؛ کارهای اضافی؛ تاخیر؛ شرایط مختلف سایت؛ تسریع؛ موارد مبهم قراردادی [15]
۲۰۰۵	تایلند	موارد قراردادی؛ موارد فراتر از قرارداد [16]
۲۰۰۴	چین	موارد قراردادی؛ موارد فرهنگی؛ موارد قانونی و قضایی [17]
۱۹۹۴	کانادا	شتاب و تسریع در کار؛ دسترسی محدود؛ آب و هوای سرد؛ افزایش در محدوده [18]

۵- روابط علی- معلولی میان علل ایجاد ادعا

علت ایجاد ادعاها متعدد و به هم وابسته بوده و تنها شناسایی علتی خاص با توجه به پیچیدگی پروژه‌های ساخت امکان‌پذیر نیست [12]. این موضوع تحت عناوینی از جمله پدیده‌ی موج‌برداری (*Ripple Effect*) و دعاوی ترکیبی نیز مطرح شده است [۱] و [۱۹]. یکی از ابزارهایی که برای درک بهتر رابطه‌ی علت و معلولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نمودار علی- معلولی (*Causal Diagram*) است [20]. بر اساس نمودار علی- معلولی ادعاها دیده می‌شود که مجموعه‌ای از متغیرها منجر به وقوع ادعا می‌شوند [۲۱].

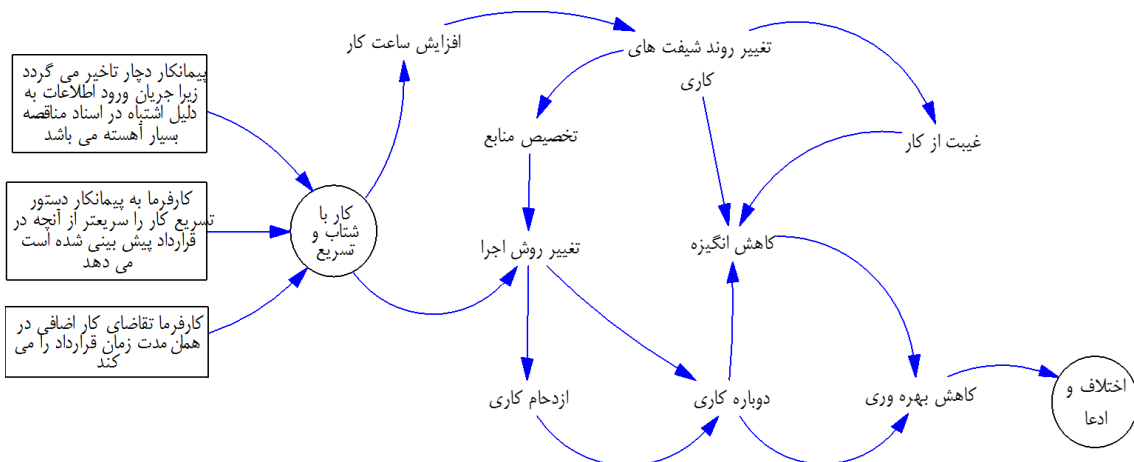
به عنوان مثال مطابق شکل ۳، اثرهای علی- معلولی ناشی از تقاضای انجام تسریع (*Acceleration*) در پروژه توسط کارفرما، بر روی ایجاد ادعاها نشان داده شده است. بنابراین طرح این موضوع که تقاضای تسریع در پروژه باعث بروز ادعا می‌شود، نگاه بسیار ساده به موضوع ادعا است [22]؛ در حالی که در واقعیت بین درخواست تسریع در پروژه تا طرح اختلاف و ادعا مطابق شکل ۳ نزدیک به ۱۰ علت و رابطه‌ی علی و معلولی وجود دارد. با توجه به بررسی جامع و موشکافانه‌ی ادبیات ادعا و روابط علی و معلولی آن که به صورت مختصر در فوق ارائه شده است، پیچیدگی، اهمیت شناخت و قدرت تجزیه و تحلیل علل ایجاد ادعاها و روابط آن‌ها (موضوع اصلی این پژوهش) را اثبات می‌نماید.

۶- روش‌شناسی تحقیق

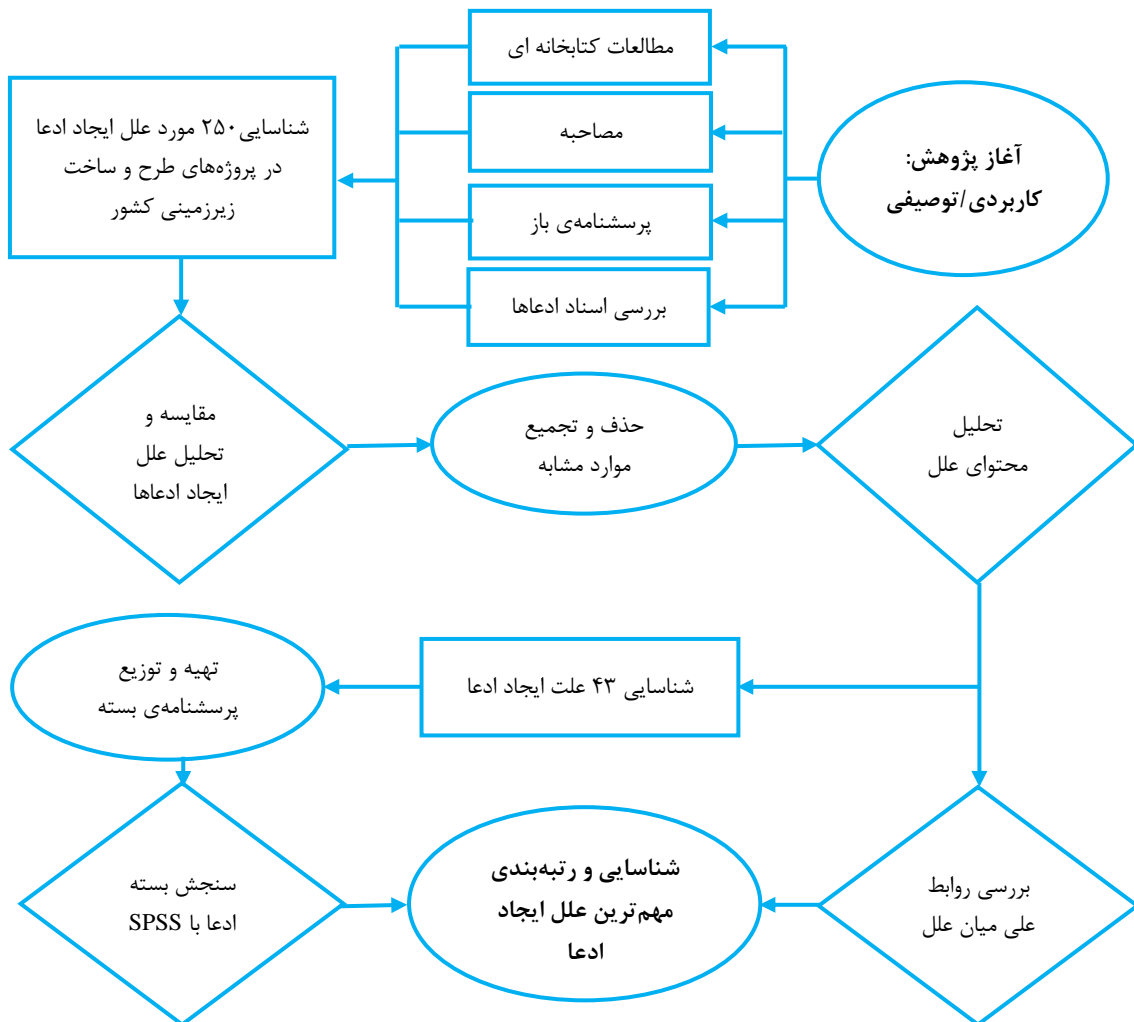
ساختار کلی این تحقیق مطابق شکل ۴ است. تحقیق حاضر

را می‌توان بر اساس هدف از نوع تحقیق‌های کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی به شمار آورد. اطلاعات توصیفی از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، پرسشنامه‌ی باز و مصاحبه جمع‌آوری شده است. روش به کار گرفته شده برای تحلیل داده‌های این تحقیق، تحلیل محتوا است. تحلیل محتوا به مطالعه‌ی دقیق منابع و اسناد بستگی دارد. این روش برای تحلیل محتوای آشکار (معنای سطحی متن) و همچنین لایه‌های عمیق‌تر معانی پنهان در اسناد نیز به کار می‌رود [۲۳].

در این مقاله، برای یافتن علل ایجاد ادعاها، پیمانکاری پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی کشور با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه‌ی نیمه‌ساختار یافته با خبرگان و بررسی اسناد و مدارک مربوط به ادعاها، واقعی چند پروژه‌ی طرح و ساخت زیرزمینی، داده‌های مرتبط جمع‌آوری شده است. در نتیجه ۲۵۰ مورد علل مرتبط با ایجاد ادعا از این پروژه‌ها به دست آمده است. پس از بررسی و تجزیه و تحلیل این موارد، پرسشنامه‌ی بسته شامل فراوانی و شدت تاثیر علل ایجاد ادعا در سه سطح (سطح اول شامل ۵ دسته، سطح دوم شامل ۱۶ گروه و سطح سوم شامل ۴۳ مورد علل ایجاد ادعا) میان عوامل ایجاد آن شامل کارفرما (و مشاور کارفرما) و مشارکت طرح و ساخت (شامل پیمانکار و مشاور پیمانکار) توزیع شده است و بر اساس آن، مهم‌ترین علل ایجاد ادعا بر اساس شاخص اهمیت در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی کشور مشخص و ارزیابی کمی شده است.



شکل ۳- نمایش اثرهای علی- معلولی تقاضای تسریع در انجام پروژه بر روی ایجاد ادعا



شکل ۴- ساختار کلی تحقیق

۶-۱- جامعه و نمونه‌ی آماری

جامعه‌ی آماری این تحقیق، کارشناسان خیره و مدیران شرکت‌ها و مدیران پروژه سازمان‌های کارفرما (که مشاور کارفرما نیز جز آن است) و مشارکت پیمانکار طرح و ساخت (که شامل پیمانکار و مشاور پیمانکار است) و سایر عواملی که در بحث ادعاها در پروژه‌های طرح و ساخت، صاحب نظر و دارای تجربه‌ی کافی هستند، بوده است. در حقیقت جامعه‌ی آماری این تحقیق دارای خصوصیت‌های زیر هستند:

- تجربه‌ی حضور در تیم کارفرما و یا مشارکت پیمانکار در سه پروژه‌ی طرح و ساخت زیرزمینی به مدت حداقل ۵ سال
 - آشنایی کافی با قراردادهای رایج در اجرای پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی
 - تجربه‌ی بررسی یا تنظیم ادعاها در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی کشور
- پیرو تحقیق‌هایی که در این زمینه با بررسی پرسنل شاغل در شرکت‌های فعال در پروژه‌های طرح و ساخت شامل کارشناسان امور قراردادی و مدیران شرکت‌ها و مدیران پروژه صورت گرفته است، مشخص شده است، تعداد خبرگان فعال در این زمینه ۶۳ نفر است. لازم به ذکر است با بررسی انجام شده، علاوه بر این تعداد، ۷ نفر نیز از اساتید دانشگاهی و وکلای دادگستری که در این حوزه فعالیت

دارند نیز جز جامعه‌ی آماری هستند و بنابراین جمع جامعه‌ی آماری در کل ۷۰ نفر است. برای محاسبه‌ی نمونه‌ی آماری از گزاره‌ی (۲) با نام کوکران استفاده شده است:

$$n = \frac{Nz^2pq}{Nd^2 + z^2pq} \quad (2)$$

در این گزاره، اشتباه مجاز (d) معادل ۰٫۱، برای ضریب اطمینان ۰٫۹۵، $z = 1.96$ و مقادیر p و q نیز هر کدام معادل ۰٫۵ و حجم جامعه‌ی آماری ۷۰ نفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار P برابر با ۰٫۵ در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا در این حالت، n حداکثر مقدار ممکن خود را پیدا می‌کند و این امر سبب می‌شود که نمونه به حد کافی بزرگ باشد. به این ترتیب نمونه‌ی آماری این تحقیق، تقریباً برابر با ۴۱ نفر به دست می‌آید. این بدان معنی است که زمانی نظر ۴۱ نفر (یعنی نمونه‌ی آماری) اخذ شود، بیانگر نظر کل جامعه‌ی آماری (۷۰ نفر) است. با توجه به محدودیت دسترسی به افراد متخصص واجد شرایط با در نظر گرفتن ضریب اطمینان، پرسشنامه برای ۵۰ نفر از اعضای واجد شرایط ارسال شد. لازم به ذکر است از ۵۰ پرسشنامه ارسالی، ۴۵ پرسشنامه بازگشت و از این تعداد نیز دو مورد آن به دلیل وجود جواب‌های تکراری (به هر دو عامل فراوانی و شدت تاثیر) یا پر نشدن توسط فرد خیره حذف شدند. تعداد پرسشنامه‌های ارسالی و دریافتی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- برخی علل شناسایی شده‌ی ایجاد ادعا در پروژه‌های عمرانی خارج از کشور

خبرگان	پرسش‌نامه‌های ارسال شده	پرسش‌نامه‌های دریافت شده	پرسش‌نامه‌های بررسی شده
بخش کارفرما	۲۳	۲۱	۲۰
بخش پیمانکار	۲۷	۲۴	۲۳
مجموع	۵۰	۴۵	۴۳

که ماهیت ادعاها ریسک‌های قراردادی هستند، بنابراین برای بررسی علل ایجاد ادعا از روش تحلیل ریسک، مطابق با استاندارد *PMBOK 2012* استفاده شده است. برای هر علت، احتمال وقوع و شدت تاثیر در مقیاس لیکرت (*Likert*) مطابق جدول ۵ سنجیده می‌شود و از حاصل ضرب آن‌ها شاخص اهمیت هر علت مطابق گزاره‌ی (۳) برای رتبه‌بندی نهایی به دست می‌آید.

با توجه به این‌که پروژه‌های مد نظر در این پژوهش، پروژه‌های طرح و ساخت و از نوع دوعاملی هستند و از آنجایی که موضوع مورد بحث، بررسی علل ایجاد ادعاها پیمانکاری است، بنابراین سعی شده است تا نظرهای هر دو طیف کارفرما (و مشاور کارفرما) و مشارکت طرح و ساخت (شامل پیمانکار و مشاور پیمانکار) به صورت تقریباً برابر در نظر گرفته شود تا نظرها، جانبدارانه و صنفی نشود. از آنجا

شناسایی و پس از تجزیه و تحلیل این علل، فراوانی و شدت تاثیر ۴۳ مورد در پرسش‌نامه‌ی بسته به معرض قضاوت خبرگان گذاشته شده است. برای انتخاب ۴۳ علت از ۲۵۰ علت موجود، معیارهای زیر در نظر گرفته شده است:

- حذف موارد نامرتب با پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی
- حذف یا تجمیع موارد مشابه
- استفاده از روابط علی و معلولی و حذف علت‌های متوالی
- استفاده از ساختار شکست علل ایجاد ادعا (CBS: Claim Breakdown Structure)

برای دسته‌بندی علل شناسایی شده، همانند ساختار شکست کار (WBS: Work Breakdown Structure)، ابزار جدیدی به نام ساختار شکست ادعا تدوین و پیشنهاد می‌شود که در آن علل ایجاد ادعا همانند ساختار شکست فعالیت‌ها، سطح‌بندی شده‌اند. لازم به ذکر است که در بخش‌بندی و سطح‌بندی علل ایجاد ادعاها، توجه به طبیعت پروژه‌های طرح و ساخت غیر صنعتی، مهم‌ترین ملاک پژوهشگران این تحقیق بوده است. شکل ۵ سطح اول و دوم ساختار شکست علل ایجاد ادعاها را نشان می‌دهد. در این شکل، توجه به طبیعت پروژه‌های طرح و ساخت غیر صنعتی به وضوح مشخص است.

لازم به ذکر است، بخشی از ادعاها مربوط به زیاده‌خواهی پیمانکاران و در واقع همان معنی منفی ادعا است. در جوامع مختلف و دین اسلام درخواست ادعا با این مضمون و عدم پایبندی به مفاد قرارداد بسیار ناپسند تلقی شده است (آیه‌ی ۱ سوره‌ی مائده، آیه‌ی ۳۳ سوره‌ی الاسراء، آیه‌های ۵۴ و ۵۵ سوره‌ی انفال) و در استانداردهای مدیریت پروژه از جمله PMBOK2012 نیز به آن‌ها اهمیت داده نشده و آن‌ها را جز ادعاهای قابل تعریف و پیگیری ندانسته است؛ بنابراین در این تحقیق و همچنین شکل ۵ نیز به آن‌ها پرداخته نشده است.

۸- تجزیه و تحلیل علل ایجاد ادعاها

علل ایجاد ادعا بر اساس طبیعت پروژه‌های طرح و ساخت در سطح اول به پنج دسته و در سطح دوم به ۱۶ گروه و در سطح سوم به ۴۳ علت تقسیم شده است که در این بخش به

$$RII_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \times E_i}{X} \quad (3)$$

در گزاره‌ی (۳)، RII_{ij} شاخص اهمیت علل ایجاد ادعا، F_i فراوانی هر علت ایجاد ادعا از ۱ تا ۵، E_i شدت تاثیر هر علت ایجاد ادعا از ۱ تا ۵، X نمونه‌ی آماری شامل تعداد تکمیل‌کنندگان پرسشنامه (۲۹ نفر) و i تعداد نمونه آماری از ۱ تا ۲۹، j تعداد سوال‌ها از ۱ تا ۴۳ هستند.

جدول ۵- مقیاس لیکرت

گزینه	امتیاز
خیلی	۱
کم	۲
متوسط	۳
زیاد	۴
خیلی زیاد	۵

۶-۲- روایی و پایایی پرسش‌نامه

در این پژوهش ابزار اصلی بررسی موارد شناسایی شده، پرسشنامه‌ی بسته است. برای تحلیل نهایی داده‌ها از نرم‌افزار SPSS و برای تعیین روایی پرسش‌نامه از روش روایی محتوا استفاده شده است. بدین منظور پیش از طراحی پرسش‌نامه از نظرهای متخصصان و اساتید صاحب‌نظر در این حوزه استفاده شده است و پس از طراحی پرسش‌نامه، با تایید این افراد از روایی پرسش‌نامه اطمینان حاصل شده است. نتایج حاصل از بررسی اعتبار و پایایی پرسش‌نامه (جدول ۶) نشان داده است ضریب آلفای کرونباخ در قسمت فراوانی برابر با ۰/۹۴۰ و در قسمت شدت تاثیر برابر با ۰/۹۵۳ است. با توجه به این‌که ضریب پایایی محاسبه شده از ۰/۷ بیشتر است، می‌توان نتیجه گرفت پرسشنامه‌ی مورد استفاده از پایایی تحقیقی لازم برخوردار است.

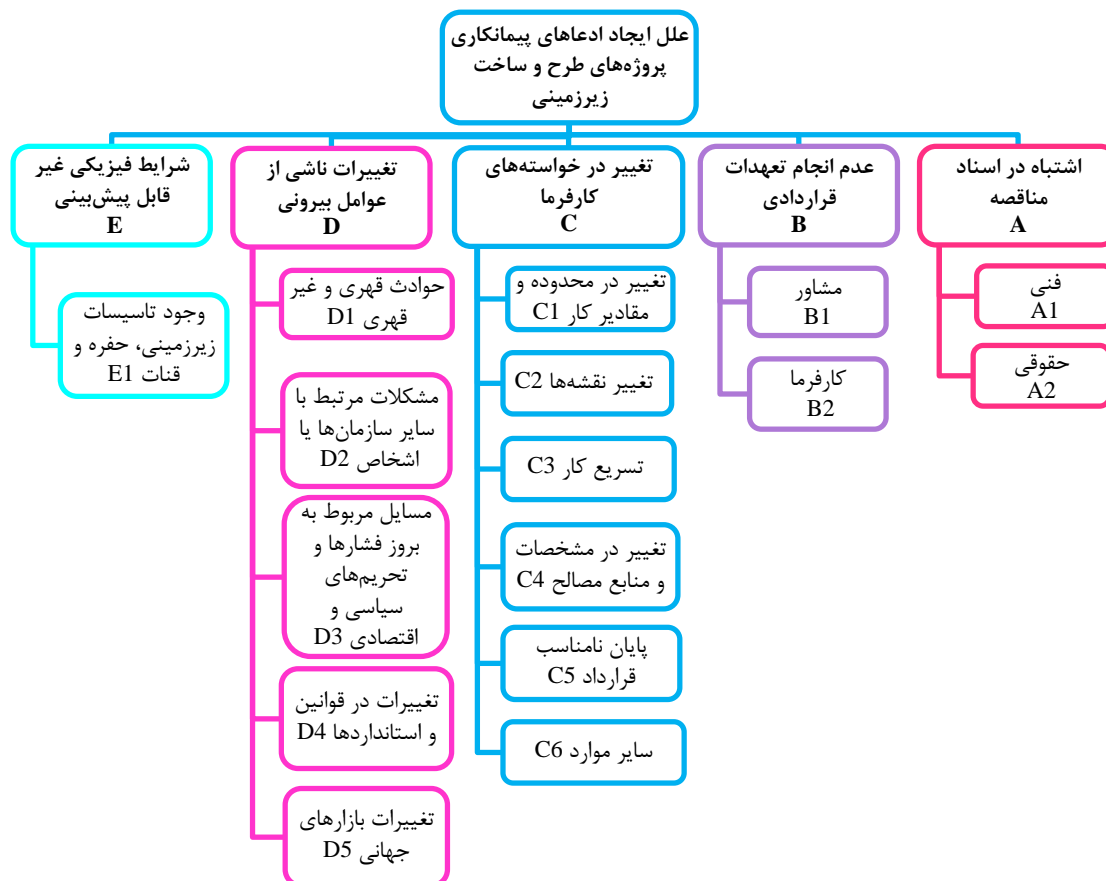
جدول ۶- ضریب آلفای کرونباخ برای علل ایجاد ادعا

فراوانی وقوع	شدت تاثیر
۰/۹۴۰	۰/۹۵۳

۷- سطح‌بندی علل ایجاد ادعا

همانطور که اشاره شد، در این پژوهش ۲۵۰ علل ایجاد ادعا

ترتیب به تجزیه و تحلیل این سطوح پرداخته می‌شود. اساس فاکتور شاخص اهمیت است. این فاکتور از حاصلضرب همانطور که گفته شد رتبه‌بندی داده‌های این قسمت بر دو فاکتور فراوانی و شدت تاثیر به دست می‌آید.



شکل ۵- ساختار شکست ادعا در پروژه‌های زیرزمینی قراردادهای طرح و ساخت کشور

۸-۱- سطح اول

سطح اول علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی با توجه به شکل ۶، جدول ۷ و جدول ۸ در سه قسمت فراوانی، شدت تاثیر و شاخص اهمیت طبق نظرهای خبرگان رتبه‌بندی شده است. با توجه به شکل ۶ و جدول ۸ مشخص می‌شود در سطح اول، بالاترین رتبه را اشتباه در اسناد مناقصه و تغییرهای ناشی از عوامل بیرونی با شاخص‌های اهمیت ۱۳/۵۱ و ۱۰/۶۷ به خود اختصاص داده‌اند. این موارد تفاوت زیادی با میانگین دسته‌ی اول دارد و نشان‌دهنده‌ی اهمیت این دسته است.

۸-۲- سطح دوم

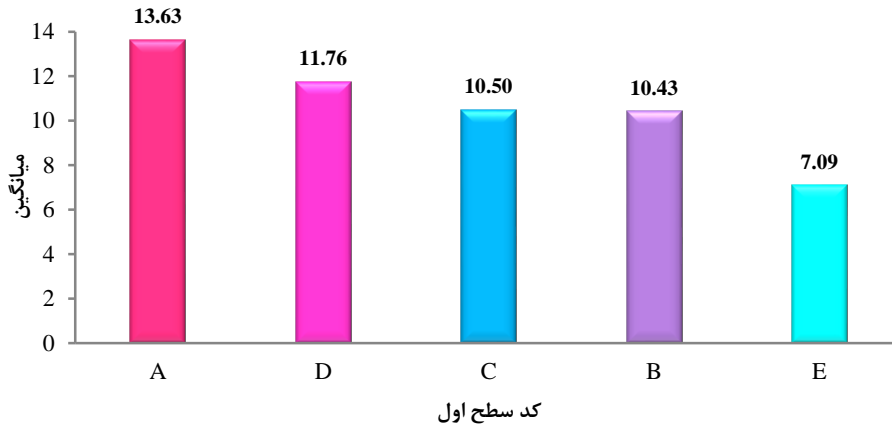
سطح دوم علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در پروژه‌های طرح

و ساخت زیرزمینی با توجه به جدول ۷، جدول ۹ و شکل ۷ در سه قسمت فراوانی، شدت تاثیر و شاخص اهمیت طبق نظرهای کل جامعه‌ی آماری رتبه‌بندی شده‌اند. با توجه به جدول ۹ و شکل ۷، در سطح دوم، بالاترین رتبه را مسائل مربوط به بروز فشارها و تحریم‌های سیاسی و اقتصادی و اشتباه در بخش فنی اسناد مناقصه با شاخص‌های اهمیت ۱۴/۵۴ و ۱۴/۱۱، به خود اختصاص داده‌اند که این امر نشان‌دهنده اهمیت این دو بخش است.

۸-۳- سطح سوم

در این بخش، ابتدا ۴۳ علت ایجاد ادعاهای پیمانکاری در سطح سوم ساختار شکست ادعاهای پروژه‌های زیرزمینی طرح و ساخت، مطابق جدول ۱۰ رتبه‌بندی شده‌اند و سپس

۱۰ علت برتر ایجاد ادعا در شکل ۸ و جدول ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای شاخص اهمیت سطح اول علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی

جدول ۷- رتبه‌بندی سطح اول و دوم علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های زیرزمینی طرح و ساخت غیرصنعتی

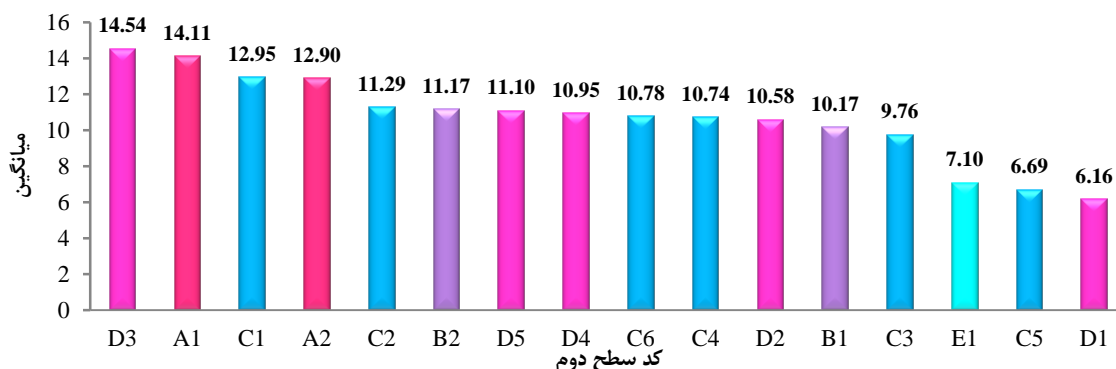
شاخص اهمیت		شدت تاثیر				فراوانی	
رتبه در بین سطوح ۱	رتبه در بین سطوح ۲	رتبه در بین سطوح ۱	رتبه در بین سطوح ۲	رتبه در بین سطوح ۱	رتبه در بین سطوح ۲	سطح ۱	سطح ۲
۱	۲	۱	۱	۱	۴	A	A1
	۴		۴		۳		A2
۴	۱۲	۴	۱۲	۲	۷	B	B1
	۶		۶		۶		B2
۳	۳	۳	۳	۳	۲	C	C1
	۵		۵		۵		C2
	۱۳		۱۳		۱۰		C3
	۱۰		۱۰		۱۱		C4
	۱۵		۱۵		۱۶		C5
	۹		۹		۱۲		C6
۲	۱۶	۲	۱۶	۴	۱۵	D	D1
	۱۱		۱۱		۸		D2
	۱		۲		۱		D3
	۷		۷		۱۳		D4
	۸		۸		۹		D5
۵	۱۴	۵	۱۴	۵	۱۴	E	E1

جدول ۸- رتبه‌بندی سطح اول علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های زیرزمینی طرح و ساخت غیرصنعتی

رتبه	کد سطح	شرح سطح اول	فراوانی	شدت تاثیر	شاخص اهمیت
۱	A	اشتباه در اسناد مناقصه	۴,۰۲	۳,۴۰	۱۳,۶۳
۲	D	تغییرهای ناشی از عوامل بیرونی	۳,۸۰	۲,۳۰	۱۱,۷۶
۳	C	تغییر در خواسته‌های کارفرما	۳,۳۰	۳,۰۵	۱۰,۵۰
۴	B	عدم انجام تعهدهای قراردادی کارفرما و مشاور	۳,۵۵	۳,۰۰	۱۰,۴۳
۵	E	شرایط فیزیکی غیر قابل پیش‌بینی	۳,۱۵	۲,۶۵	۷,۰۹

جدول ۹- رتبه‌بندی سطح دوم علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های زیرزمینی طرح و ساخت غیرصنعتی

رتبه	کد	شرح	فراوانی	شدت تاثیر	شاخص اهمیت
۱	D3	مسائل مربوط به بروز فشارها و تحریم‌های سیاسی و اقتصادی	۳,۴۸	۳,۷۱	۱۴,۵۴
۲	A1	اشتباه در بخش فنی مناقصه	۳,۳۲	۴,۰۳	۱۴,۱۱
۳	C1	تغییر در محدوده و مقادیر کار	۳,۴۸	۳,۵۵	۱۲,۹۵
۴	A2	اشتباه در بخش حقوقی مناقصه	۳,۳۸	۳,۶۰	۱۲,۹۰
۵	C2	تغییر نقشه‌ها	۳,۱۴	۳,۲۵	۱۱,۲۹
۶	B2	عدم انجام تعهدهای قراردادی کارفرما	۳,۰۵	۳,۳۳	۱۱,۱۷
۷	D4	تغییرهای در قانون‌ها و استانداردها	۲,۸۱	۳,۶۲	۱۱,۱۰
۸	D5	تغییرهای بازارهای جهانی	۲,۹۵	۳,۳۸	۱۰,۹۵
۹	C6	سایر تغییرها در خواسته‌های کارفرما	۲,۸۵	۳,۳۴	۱۰,۷۸
۱۰	C4	تغییر در مشخصات و منابع مصالح	۲,۹۰	۳,۱۷	۱۰,۷۴
۱۱	D2	مشکل‌های ایجاد شده توسط سایر سازمان‌ها یا اشخاص	۲,۹۶	۳,۰۹	۱۰,۵۸
۱۲	B1	عدم انجام تعهدهای قراردادی مشاور	۳,۰۳	۲,۴۹	۸,۳۵
۱۳	C3	تسریع در کار (به دستور کارفرما)	۲,۹۳	۲,۴۰	۸,۲۸
۱۴	E1	شرایط فیزیکی غیر قابل پیش‌بینی مثل وجود حفره	۲,۳۳	۲,۳۵	۷,۱۰
۱۵	C5	پایان نامناسب قرارداد (ختم یا فسخ پروژه)	۱,۸۳	۳,۱۲	۶,۶۹
۱۶	D1	حوادث قهری و غیر قهری	۱,۹۲	۲,۴۰	۶,۱۶



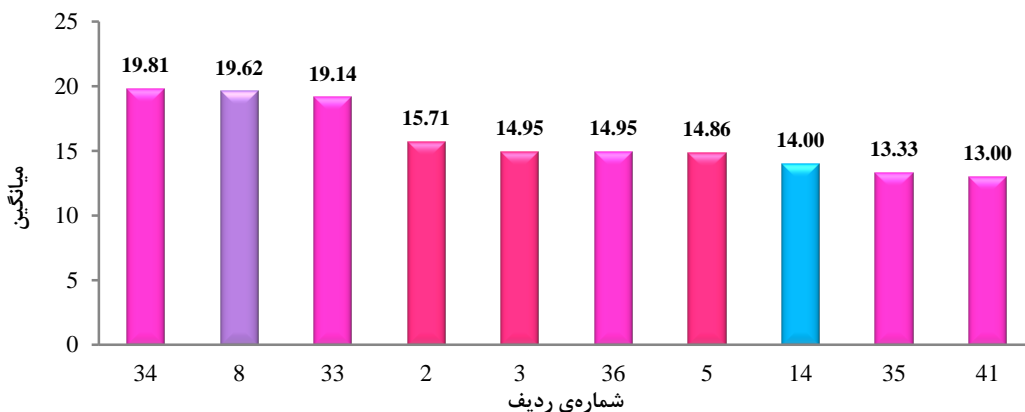
شکل ۷- نمودار مقایسه‌ای شاخص اهمیت سطح دوم علل ایجاد ادعاها در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی

جدول ۱۰- رتبه‌بندی علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در سطح سوم ساختار شکست ادعاهای پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی

رتبه	سطح ۱	سطح ۲	علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در سطح سوم	فراوانی	شدت تاثیر	شاخص اهمیت
۱	A	A1	اشتباه در خواسته‌های کارفرما	۲۲	۶	۱۵
۲			مشخص نبودن الزام‌های و مشخصات فنی	۵	۷	۴
۳			اشتباه در داده‌های تحویلی به پیمانکار مربوط به شرایط زیرزمینی و هیدرولوژیکی شامل جنس و نوع خاک و سطح آب‌های زیرزمینی	۶	۵	۵
۴	A2	A2	کاستی‌های قراردادی و مشخص نبودن و مسکوت ماندن تعهدهای قراردادی	۲۵	۲۲	۲۱
۵			تفسیرهای متفاوت، ابهام و تناقض در قرارداد	۱۳	۸	۷
۶	B	B1	تاخیر در تایید نقشه‌ها و اختلال حاصل در پروسه‌ی سفارش و خرید	۱۲	۱۹	۱۴
۷			عدم صدور مجوزهای لازم برای اجرای هر بخش	۲۷	۲۸	۲۹
۸		B2	B2	عدم پرداخت صورت وضعیت‌ها و پیش‌پرداخت‌ها یا سایر تعهدهای مالی کارفرما	۱	۱
۹	تاخیر کارفرما در عقد و ابلاغ قرارداد و عدم تحویل زمین			۱۷	۲۹	۲۲
۱۰	عدم یا تاخیر تحویل مصالح و ماشین‌آلات کارفرما و مصالح انحصاری دولت یا معیوب بودن آن‌ها			۳۶	۳۹	۳۶
۱۱	هرگونه ادعای ناشی از عدم انجام تعهدهای کارفرما			۳۰	۴۰	۳۵
۱۲	C1	C1	کارهای اضافی: ادعا به معنای اختلاف درباره‌ی قیمت و مقدار یا زمان لازم برای انجام کارهای اضافی	۱۴	۱۱	۱۲
۱۳			اضافه کارها: ادعا به معنای اختلاف درباره‌ی قیمت و مقدار یا زمان لازم برای انجام اضافه کارها	۱۰	۱۷	۱۱
۱۴	C2	C2	هر نوع تغییر در نقشه یا خواسته‌های کارفرما	۹	۱۸	۸
۱۵			تغییرهای مبنای طراحی	۲۳	۹	۱۷
۱۶			تغییر ضوابط کنترل طراحی نقشه‌ی پیمانکار	۳۵	۴۱	۳۳
۱۷	C3	C3	گسترش جبهه‌های کاری برای تسریع کار و افزایش منابع برای تحقق این تسریع	۱۹	۳۸	۳۱
۱۸			اتمام بخش خاصی از کار و کاهش جبهه‌های کاری	۲۸	۳۱	۲۸
۱۹	C	C4	تغییر در کیفیت و مشخصات کارها، مصالح و استانداردها	۲۴	۲۷	۲۴
۲۰			تغییر در منابع تهیه‌ی مصالح یا معدن	۲۹	۳۰	۲۶
۲۱		C5	C5	فسخ قرارداد (شامل مخارج بالاسری قابل انتساب به فسخ پروژه)	۴۰	۲۴
۲۲	ختم قرارداد (شامل مخارج بالاسری قابل انتساب به خاتمه‌ی پروژه)			۴۳	۳۲	۴۱
۲۳	C6	C6	تغییر مکرر محل استقرار زمین تجهیز کارگاه	۳۹	۳۳	۳۸
۲۴			استفاده از ماشین‌آلات، مصالح و ابزار توسط پیمانکار غیر از ماشین‌آلات و ابزار قید شده در قرارداد	۳۷	۳۵	۳۷
۲۵			تعلیق و توقف توسط کارفرما	۲۰	۱۲	۱۶
۲۶			تغییر روش اجرا به خاطر تغییر نقشه‌ها (ادعا در خصوص تغییر روش و جزییات اجرا و بروز ضرر و زیان تغییرهای سیستم اجرایی)	۱۵	۱۶	۱۸
۲۷			تغییر در برنامه‌ی زمان‌بندی	۳۱	۱۴	۲۳

ادامه‌ی جدول ۱۰-رتبه‌بندی علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در سطح سوم ساختار شکست ادعاهای پروژه‌های طرح و ساخت

شخص اهمیت	شدت تاثیر	فراوانی	علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری در سطح سوم	سطح	سطح	رتبه
				۲	۱	
۴۰	۲۰	۴۱	بروز حوادث طبیعی مانند زلزله، گردباد، طوفان یا فعالیتهای آتشفشانی و سیل	D1		۲۸
۴۳	۳۶	۳۸	مواجهه با شرایط استثنایی نامساعد آب و هوایی (اختلاف بر سر نامساعد بودن یا نبودن آب و هوا)			۲۹
۴۲	۴۲	۴۲	بروز حوادثی مانند جنگ، شورش، آشوب و اعتصاب یا خسارت بر اثر حریق، سرقت و خطرهای مشابه اگر حفظ کارها در موارد فوق به عهده‌ی پیمانکار نباشد.			۳۰
۱۳	۲۵	۴	وجود معارض در زمین تحویلی به پیمانکار	D2		۳۱
۳۰	۲۶	۳۳	توقف پروژه از سوی نهادها و سازمان‌های اداری، حقوقی و قانون‌گذار خارج از پروژه و قرارداد			۳۲
۳	۳	۳	تغییر زیاد در قیمت ارزهای خارجی و عدم توانایی خریدهای خارجی	D3	D	۳۳
۱	۲	۲	تغییر زیاد در قیمت ارزهای خارجی و عدم توانایی خریدهای داخلی (وارداتی یا داخلی)			۳۴
۹	۸	۷	تغییرهای نرخ تسعیر ارز در زمان واردات کالا			۳۵
۶	۱۳	۱۱	تعویق، تمدید یا افزایش LC به سبب تحریم‌ها			۳۶
۱۹	۱۵	۱۶	هزینه‌های ناشی از Third Party کردن منابع وارداتی پروژه ناشی از تحریم‌ها			۳۷
۳۲	۳۴	۳۲	تبدیل بخش ارزی قرارداد به ریالی			۳۸
۲۰	۲۳	۲۱	تغییر طراحی ناشی از تغییر تجهیزات یا وندورها و ایجاد علت‌های متعاقب آن مانند تغییر در محدوده، مقادیر کار و روش اجرا			۳۹
۲۵	۲۱	۲۶	تغییرهای بازارهای جهانی مانند تغییرات قیمت نفت و تغییر قیمت جهانی مس، آلومینیم، فولاد و سایر فلزات			۴۰
۱۰	۴	۸	تغییر در قوانین و استانداردها (یارانه‌ها، ارزش افزوده و سایر بخشنامه‌های صادره)			۴۱
۲۷	۳۷	۱۸	بروز مشکل‌های ناشی از وجود تاسیسات زیرزمینی	E1	E	۴۲
۳۴	۴۳	۳۴	وجود قنات‌ها که در نقشه‌های ارگان مربوطه نبوده و حفره‌های فراوان در زمین			۴۳



شکل ۸- نمودار مقایسه‌ای شاخص اهمیت ۱۰ علت برتر ایجاد ادعاهای پیمانکاری در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی

جدول ۱۱- رتبه‌بندی ۱۰ علت برتر ایجاد ادعاها بر اساس میانگین شاخص اهمیت

رتبه	شرح	فراوانی	شدت تاثیر	شاخص اهمیت
۱	تغییر زیاد در قیمت ارزهای خارجی و عدم توانایی خریدهای داخلی (وارداتی یا داخلی)	۴٫۲	۴٫۴	۱۹٫۸۱
۲	عدم پرداخت صورت‌وضعیت‌ها و پیش‌پرداخت‌ها یا سایر تعهدهای مالی کارفرما	۴٫۳	۳٫۱	۱۹٫۶۲
۳	تغییر زیاد در قیمت ارزهای خارجی و عدم توانایی خریدهای خارجی	۳٫۲	۴٫۲	۱۹٫۱۴
۴	مشخص نبودن الزام‌ها و مشخصه‌های فنی	۳٫۷	۴٫۵	۱۵٫۷۱
۵	اشتباه در داده‌های تحویلی به پیمانکار مربوط به شرایط زیرزمینی شامل جنس و نوع خاک زمین و سطح آب‌های زیرزمینی یا عدم تطابق نقاط نشانه با شرایط موجود	۳٫۶	۴٫۱	۱۴٫۹۵
۶	تعویق، تمدید یا افزایش LC به سبب تحریم‌ها	۳٫۵	۳٫۹	۱۴٫۹۵
۷	تفسیرهای متفاوت از قرارداد و ابهام و تناقض در قرارداد از جمله اختلاف در تفسیر عبارت "باتجربه بودن و قابل پیش‌بینی بودن" مندرج در شرایط عمومی	۳٫۴	۴٫۱	۱۴٫۸۶
۸	هر نوع تغییر در نقشه یا خواسته‌های کارفرما، حتی تغییر ردیف‌های هم قیمت در فهرست بها	۳٫۶	۳٫۵	۱۴
۹	تغییرهای نرخ تسعیر ارز در زمان واردات کالا	۳٫۶	۳٫۴	۱۳٫۳۳
۱۰	تغییرها در قانون‌ها و استانداردها (یارانه‌ها، نرخ ارزش افزوده و سایر بخشنامه‌های صادره)	۳٫۶	۳٫۷	۱۳

۹- نتیجه‌گیری

با توجه به جدول ۱۰ و جدول ۱۱ نکته‌های زیر درباره‌ی ادعاهای پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی قابل استنتاج است:

- علت‌های با رتبه‌ی ۱ و ۳ مربوط به شرایط فعلی کشور است و تقریباً در اکثر پروژه‌ها مشاهده شده است. این امر سبب ضرر و زیان فراوان پیمانکاران به سبب افزایش قیمت‌ها شده است؛ اما این علت‌ها در پروژه‌های طرح و ساخت و مخصوصاً پروژه‌های زیرزمینی آن، نمود بیشتری دارد؛ زیرا در این پروژه‌ها نیاز به تجهیزات خاصی مانند TBM برای حفاری است. بیشتر این ماشین‌آلات یا تجهیزات، یا از خارج وارد شده یا لوازم و متعلقات آن وارداتی هستند و در داخل مونتاژ می‌شوند. در نتیجه به سبب تحریم‌های وارد شده بر کشور، قیمت آن‌ها چند برابر یا واردات آن‌ها با مشکل مواجه شده است. علت با رتبه شماره‌ی ۹ هم این موضوع را تایید می‌کند. بنابراین توصیه می‌شود در قراردادهای آتی، تعدیل پیش‌بینی شده و از روش قیمت مقطوع بدون تعدیل اجتناب شود. همچنین فرمول خاصی برای تعدیل خریدهای خارجی بکار برده شود.

- علت با رتبه‌ی ۲ نه فقط در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی بلکه در اکثر پروژه‌های دیگر نیز یکی از مهم‌ترین علل ایجاد ادعا است؛ زیرا با عدم تزریق به موقع منابع مالی به پروژه، برنامه‌ریزی‌های اجرایی پیمانکار دچار مشکل‌های عدیده‌ای می‌شود. در این مورد اگر چه طبق ماده‌ی ۵۲۲ قانون آیین دادرسی مدنی و ماده‌ی ۲۲۸ قانونی مدنی، حاکم می‌تواند کارفرما را به جبران خسارت حاصل از تاخیر تادیه‌ی دین (تاخیر در پرداخت مطالبات پیمانکار) محکوم نماید، ولی عمده‌ی پیمانکاران از این موضوع مطلع نبوده یا تمایل به آن ندارند؛ چون اخذ خسارت منوط به پیگیری از طریق دادگاه است و به وجهه‌ی پیمانکار خسارت وارد می‌کند. همچنین این امر برای شرکت در مناقصه‌ی پروژه‌های بعدی نیز مشکل‌ساز خواهد بود. در این مورد، حداقل می‌توان به کارفرمایان توصیه نمود به رعایت مفاد ماده‌های ۹ و ۱۰ قانون مناقصات پایبند باشند و از برگزاری مناقصه و انجام پروژه‌هایی که در تامین مالی آن‌ها ابهام یا مشکل دارند، خودداری نموده و نحوه‌ی جبران خسارت ناشی از تاخیر در پرداخت‌ها را در قرارداد بگنجانند.
- با توجه به طبیعت پروژه‌های طرح و ساخت که

مخصوص پروژه‌های با عوامل ناشناخته کم هستند و باید با قیمت ثابت به مناقصه گذاشته شوند، بنابراین استفاده از این قراردادهای در پروژه‌های زیرزمینی که دارای کارهای ناشناخته زیادی هستند، سبب بروز ادعاهای فراوان از سوی پیمانکاران می‌شود.

در انتها با توجه به استخراج ۴۳ مورد علت ایجاد ادعا از میان ۲۵۰ علت و همچنین تعیین ۱۰ مورد از میان ۴۳ مورد به عنوان مهم‌ترین علل ایجاد ادعاهای پیمانکاران در قراردادهای طرح و ساخت پروژه‌های زیرزمینی و ارائه راهکارهای مختصر در مورد آن‌ها، در این تحقیق به مجریان و دست‌اندرکاران اجرای پروژه‌های مربوطه، این فرصت را ایجاد نموده است که قبل از شروع پروژه با تلاش برای حذف یا کاهش آن‌ها، از بروز ادعاها و متعاقب آن اختلاف‌های آتی در پروژه‌های طرح و ساخت زیرزمینی از جمله پروژه‌های مربوط به تونل‌های شهری همانند احداث مترو و پروژه‌های مربوط به تونل‌های غیر شهری همانند پروژه‌های مربوط به تونل‌های انحراف و آب‌بر در پروژه‌های سدسازی یا سایر پروژه‌های زیرزمینی جلوگیری نمایند. همچنین علاوه بر اهمیت دادن به عوامل فنی برای موفقیت یک پروژه، باید به سایر عوامل غیر فنی مانند ادعا در پروژه‌ها نیز توجه داشت و با اعمال تمهیدهای خاص و نیز شناخت آن‌ها و در نظرگرفتن این علل در شرایط پروژه، باعث موفقیت در اجرای پروژه، مطابق زمان، هزینه و محدوده‌ی مورد نظر پروژه شد.

در آن طراحی به عهده‌ی پیمانکار است، همانطور که توضیح داده شد این روش باید در پروژه‌هایی به کار رود که عوامل ناشناخته در آن کم باشد تا پیمانکار بتواند با مشخص بودن الزام‌ها و مشخصه‌های فنی پروژه، با کمترین ریسک، طراحی خود را انجام دهد. حال چون پروژه‌های زیرزمینی از جمله تونل‌های شهری و غیر شهری دارای عوامل ناشناخته‌ی فراوانی هستند، باید در این پروژه‌ها ریسک این عوامل را در قیمت پیشنهادی دید یا قیمت پیشنهادی را از مقطوع به فهرست‌بهایی و دارای تعدیل تغییر داد تا سبب ضرر و زیان پیمانکار و بروز ادعاهای متعاقب او نشود. در این تحقیق علت با رتبه‌ی ۴، نشان‌دهنده‌ی اهمیت این موضوع است.

• علت با رتبه‌ی ۵ مستقیماً به پروژه‌های زیرزمینی باز می‌گردد و اهمیت داده‌های تحویلی به پیمانکار را نشان می‌دهد. این علت می‌تواند سبب بروز ادعاهای فراوان در پروژه‌های زیرزمینی شود. به دلیل این‌که پیمانکار در زمان مناقصه فرصت کافی برای مطالعات مربوط به عوامل زیرزمینی را ندارد، بنابراین به داده‌های کارفرما بسنده می‌کند و با اشتباه بودن این داده‌ها، پیمانکار دچار ضرر و زیان فراوان شده و بدین سبب ادعاهای خود را مطرح می‌کند.

• علت با رتبه‌ی شماره‌ی ۷ مربوط به ضعف‌های قراردادی است و در اکثر قراردادهای پروژه‌های کشور وجود دارد. از آنجا که قراردادهای طرح و ساخت در ایران سابقه‌ی چندانی ندارد، با توجه به طبیعت این نوع قراردادهای که

۱۰- سباهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
i	-	ضریب نمره‌ی فنی	t	-	نمره‌ی فنی پیمانکار
C	\$	قیمت پیشنهادی	d	-	اشتباه مجاز
R_{II}	-	شاخص اهمیت	F_i	-	فراوانی علت
E_i	-	شدت تاثیر	X	-	نمونه‌ی آماری
i	-	تعداد نمونه‌ی آماری	j	-	تعداد سوال‌ها

۱۱- منبع‌ها

[۱] قربانی، ع. (۱۳۸۴). بررسی علل عمده و منشا ادعاهای مالی پیمانکاران و راه‌های کنترل آن در پروژه‌های عمرانی کشور. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد. دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- [2] Moura, H., & Teixeira, J. C. (2005). Claims in Railway Projects in Portugal. *Proceedings of the CIB W102-2005, International Conference on Information and Knowledge Management in a Global Economy: Challenges and Opportunities for Construction Organizations*. Delft: Conseil International du Bâtiment.
- [۳] کتابی، م. (۱۳۸۸). تحلیل علل طرح ادعاهای پیمانکاران با رویکرد پیشگیری در مرحله‌ی واگذاری قرارداد. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد. دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۴] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. (۱۳۸۴). ضوابط اجرای روش طرح و ساخت. شابک: ۲-۶۶۶-۴۲۵-۹۶۴. <http://swid.maj.ir/>
- [۵] آقاخانی، ح. (۱۳۹۱). ارائه‌ی الگوی پیشگیری و مدیریت ادعا در قراردادهای طرح و ساخت و EPC. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد. دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۶] شاکری، ا.، و سجادی، س. و. (۱۳۹۰). مقایسه‌ی تطبیقی بین سه شرایط عمومی سه‌عاملی، طرح و ساخت داخلی و طرح و ساخت صنعتی (۵۴۹۰) در حوزه‌ی تغییرات در پروژه. هفتمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه.
- [۷] امام جمعه‌زاده، م. (۱۳۸۳). مقایسه‌ی تطبیقی برخی از پژوهش‌های انجام شده در مورد سیستم‌های انجام پروژه. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه.
- [۸] پرچمی جلال، م. (۱۳۸۸). بررسی چالش‌های حقوقی و فنی استفاده از قراردادهای تیپ طرح و ساخت و EPC ایران و فیدیک. اولین کنفرانس ملی اجرای پروژه به روش EPC.
- [9] Vidogah, W., & Ndekugri, I. (1997). Improving Management of Claim: Contractor's Perspective. *Journal of Management in Engineering*, 13(5), 37-44. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1997\)13:5\(37\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1997)13:5(37)).
- [۱۰] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. (۱۳۸۳). فرهنگ واژگان نظام فنی و اجرایی کشور. http://www.trudo.ir/2576_orig.pdf.
- [۱۱] تلخایی، ه. (۱۳۹۲). بررسی علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری و تاثیر آن بر هزینه‌ی پروژه در پروژه‌های طرح و ساخت کشور. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد. دانشکده‌ی معماری. دانشگاه تهران.
- [12] Love, P. E. D., Davis, P. R., Kerry London, K., & Jasper, T. (2008). Causal Modelling of Construction Disputes. *Proceedings of the 24th Annual ARCOM Conference* (pp. 869-878). ARCOM: Association of Researchers in Construction Management. http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2008-869-878_Love_et_al.pdf.
- [13] Moura, H., & Teixeira, J. C. (2007). Types of Construction Claims: A Portuguese Survey. *Proceedings of the 23th Annual ARCOM Conference* (pp. 129-135). ARCOM: Association of Researchers in Construction Management. http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2007-0129-0135_Moura_and_Teixeira.pdf.
- [14] Acharya, N. K., Lee, Y. D., & Im. H. M. (2006). Conflicting Factors in Construction Projects: Korean Perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 13(6), 543-566. <http://dx.doi.org/10.1108/09699980610712364>.
- [15] Zanelidin, E. K. (2006). Construction Claims in United Arab Emirates: Types, Causes, and Frequency. *International journal of Project Management*, 24(5), 453-459. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.02.006>.
- [16] Tochaiwat, K., & Chovichien, V. (2006). A Survey of Thai Contractors' Construction Claim Management. *Proceedings of The Tenth National Convention on Civil Engineering* (pp. 7-11). https://scholar.google.com/scholar/A_Survey_of_Thai_Contractors'_Construction_Claim_Management.

- [17] Chan, E. H. W., & Suen, H. C. H. (2005). Dispute Resolution Management for International Construction Projects in China. *Management Decision*, 43(4), 589-602. <http://dx.doi.org/10.1108/00251740510593576>.
- [18] Semple, C., Hartman, F., & Jergeas, G. (1994). Construction Claims and Disputes: Causes and Cost/Time Overruns. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 785-795. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:4\(785\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(785)).
- [۱۹] فتحی، ز. (۱۳۸۷). دلایل موثر در بروز دعاوی در قراردادهای پروژه‌های شهری. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد. دانشکده‌ی مهندسی عمران. دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [20] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for A Complex World*. McGraw-Hill. ISBN: 0-07-231135-5. <http://web.boun.edu.tr/ali.saysel/Esc578/Sterman%2013.pdf>.
- [۲۱] مومنی، م.، و مروتی شریف‌آبادی، ع. (۱۳۸۵). مدل‌سازی پویایی سیستم صف با استفاده از رویکرد پویایی سیستم. دانشور رفتار. ۱۳ (۱۷)، ۱-۱۴. http://www.sid.ir/fa/VEWSSID/J_pdf/57913851705.pdf.
- [22] Love, P. E. D., Davis, P. R., Ellis, J. M., & Cheung, S. O. (2008). A Systemic View of Dispute Causation. *International Journal of Managing Projects in Business*, 3(4), 661-680. <http://dx.doi.org/10.1108/17538371011076109>.
- [۲۳] خاکی، غ. (۱۳۸۴). روش تحقیق با رویکردی به پایان‌نامه‌نویسی. تهران: کانون فرهنگی انتشاراتی بازتاب. شابک: ۷-۲۱-۶۳۷۰-۹۶۴.

ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه مطالعه‌ی موردی: قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران

مجید تاجیک^{۱*}؛ امید فروغ^۲؛ حمیدرضا توکلی^۳

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی؛ موسسه‌ی مهندسی‌ن مشاور ساحل
2- Post Doc fellow; Dept. of Energy and Mineral Eng.; Penn State University
۳- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ موسسه‌ی مهندسی‌ن مشاور ساحل

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در تونل‌هایی که با <i>D.S.TBM</i> ساخته می‌شوند، حفاری و سگمنت‌گذاری به صورت همزمان انجام می‌شود. از مهم‌ترین فواید این نوع پوشش می‌توان به کنترل کیفیت بتن در کارخانه‌ی تولید سگمنت و نصب سریع و دقیق رینگ توسط <i>TBM</i> اشاره نمود؛ اما باید در نظر داشت که خرابی‌های زمان ساخت و همچنین لب‌پریدگی (<i>Stepping</i>) و پله‌شدگی (<i>Spalling</i>) که از نقایص زمان نصب هستند، سبب کاهش کیفیت نصب پوشش نهایی تونل می‌شود. بررسی علل و شناخت مکانیزم وقوع این نواقص در بالا بردن کیفیت پوشش بتنی پیش‌ساخته‌ی تونل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران با طول تقریبی ۱۴ کیلومتر با استفاده از <i>D.S.TBM</i> احداث و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) همزمان با حفاری انجام شده است. در این تونل ۵+۱ سگمنت با ابعاد متفاوت و از نوع یونیورسال یک رینگ را تشکیل می‌دهند. در این مقاله نقایص زمان نصب سگمنت با توجه به انحرافات حفاری، نیروی وارده از طرف جک‌ها به سگمنت‌ها و دقت نصب مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی کیفی میزان پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت‌ها در ۱۰۲۴۲ رینگ نشان می‌دهد بیش‌ترین تعداد لب‌پریدگی در سگمنت‌های مجاور کلید و کمترین مقدار آن در سگمنت کلید رخ داده است. همچنین پله‌شدگی در سگمنت‌های مجاور کلید بیشتر از سایر سگمنت‌ها دیده شده است. ارزیابی شرایط سگمنت‌گذاری و میزان انحراف مسیر ماشین حفاری نشان می‌دهد در محدوده‌ی قوس، کیفیت سگمنت‌گذاری به شدت کاهش یافته و تعداد پله‌شدگی و مساحت لب‌پریدگی‌ها افزایش یافته است.</p>	<p>پوشش تونل سگمنت لب‌پریدگی پله‌شدگی تونل کرج</p>

۱- پیشگفتار
رابینز (*James Robbins*) در سال ۱۹۵۴ اولین ماشین حفاری تمام مقطع نسل امروزی را ساخت. ماشین‌های اولیه از نوع ماشین‌های حفر تونل باز بودند که با تغییراتی بر روی آن‌ها دستگاه‌های حفاری تمام مقطع از نوع سپردار ساخته شد. اولین ماشین حفاری دو سپره در سال ۱۹۷۲ به کار گرفته شد. ایده‌ی این ماشین توسط شرکت *Seli* ایتالیا مطرح و با همکاری شرکت رابینز ساخته شد. امروزه به طور

امروزه به طور چشمگیری از ماشین‌های حفاری تمام مقطع در حفر تونل‌های بلند استفاده می‌شود. ایده‌ی ساخت ماشین‌های حفاری تونل به قبل از سال ۱۸۵۰ بر می‌گردد. اولین ماشین حفاری تمام مقطع (*TBM*) که مشخصاتی مانند *TBM*‌های امروزی داشت توسط چارلز ویلسون (*Charles Wilson*) در سال ۱۸۵۱ ساخته شد [1]. جیمز

* تهران؛ بزرگراه رسالت؛ خیابان شهید اردکانی؛ بن‌بست مهابادی‌پور؛ پلاک ۷۸؛ موسسه‌ی مهندسی‌ن مشاور ساحل؛ بخش پروژه‌های زیرزمینی؛ کدپستی: ۱۵۹۵۹۵۴۶۱۱؛ صندوق پستی: ۳۴۶۵-۱۶۷۶۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۲۳۰۱۵۵۰۱؛ رایانامه: tajikm1@gmail.com

پوشش‌های سگمنتی تک‌لایه با ضخامت کم به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. استفاده از این نوع پوشش، معایبی نیز به همراه دارد که در این تحقیق به بررسی دو نقیصه‌ی پله‌شدگی و لب‌پریدگی در زمان نصب پرداخته می‌شود.

ایجاد پله در بین سگمنت‌ها، امری معمول در چیدمان رینگ بتنی است ولی مقدار مجاز پله‌شدگی در هر پروژه وابسته به اهداف پروژه، قطر تونل، خصوصیات *TBM* (ابعاد شیلد پستی)، نوع و ابعاد سگمنت، روش اتصال سگمنت‌ها، شرایط آب‌بندی (بکارگیری گسکت) و روش اجرای تزریق دوغاب است [5]. پله‌شدگی نسبت به رینگ قبل در نتیجه‌ی عدم قرارگیری مناسب سگمنت‌ها در امتداد درزهای محیطی (*Circumferential Joint*) است؛ در حالی‌که پله‌شدگی در رینگ در امتداد درزهای طولی (*Longitudinal joint*) رخ می‌دهد. بنابراین پله‌شدگی‌ها به دو گروه پله‌شدگی محیطی و طولی طبقه‌بندی می‌شود.

لب‌پریدگی نوعی شکستگی سگمنت است که در گوشه‌های سگمنت و تحت تاثیر بارهای موقت در زمان رینگ‌گذاری ایجاد می‌شود. توزیع خارج از مرکز نیروی جک‌های جلو برنده بر رینگ سگمنتی یکی از عوامل لب‌پریدگی است. این عامل در زمین‌های نرم و ناهمگن می‌تواند منجر به افزایش آرماتوربندی یا تغییر ابعاد سگمنت در طراحی پوشش تونل شود. علاوه بر آن شکستگی سگمنت دوام پوشش بتنی تونل را کاهش می‌دهد [5]. همچنین نشأت آب به تونل تحت تاثیر پله‌شدگی و لب‌پریدگی افزایش می‌یابد. در شکل ۱ نمونه‌ای از نواقص رخ داده در تونل انتقال آب کرج-تهران نشان داده شده است.

گسترده، انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نیازهای پروژه برای حفاری تونل‌ها در سنگ سخت و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند [2].

ماشین حفاری از نوع سپردار، سیستم نگهداری دائم تونل را نیز نصب می‌کند. این سیستم‌های نگهداری متشکل از تعدادی قطعات بتنی پیش‌ساخته (*Precast Concrete Segments*) هستند و توسط یکسری قالب‌های خاص تولید می‌شوند. اولین پوشش قطعه‌ای در سال ۱۸۶۰ میلادی به کار گرفته شد. این پوشش، شامل تعدادی قطعات چدنی قالب‌ریزی شده بود که در یک تونل بزرگراه در لندن استفاده شد [3]. استفاده از اولین پوشش قطعه‌ای بتنی به سال ۱۹۰۳ میلادی باز می‌گردد. این پوشش در گلاسکو (*Glasgow*) اسکاتلند توسط یک پیمانکار انگلیسی ساخته شد. در آن زمان انگیزه‌ی اصلی در گسترش پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته، کمبود مواد خام تولید چدن پیش از جنگ جهانی دوم بود. اکنون ثابت شده است که پوشش‌های متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته از نقطه‌نظر فنی و اقتصادی بسیار مناسب و جانسین خوبی برای پوشش‌های چدنی هستند. البته پوشش‌های چدنی هنوز هم در تونل‌های زیر سطح آب، استفاده می‌شوند [4].

از مهم‌ترین فواید پوشش‌های متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته، سهولت و تداوم کنترل کیفیت بتن در کارخانه تولید سگمنت، نصب سریع و دقیق رینگ توسط *TBM*، امکان تزریق دوغاب بلافاصله پس از نصب رینگ برای تثبیت پوشش نهایی و اعمال فشارهای ناشی از همگرایی تونل پس از تثبیت رینگ است. علاوه بر آن هزینه‌های پروژه در



شکل ۱- پله‌شدگی و لب‌پریدگی در سگمنت‌های نصب شده در تونل

جدول ۱- طبقه‌بندی برخی از پارامترهای حین ساخت موثر در ایجاد نواقص سگمنت [7]

علت	گروه	ف. ۴
زمین سخت زمین نرم فشار هیدرولیکی زیاد	شرایط زمین	ف. ۵
قوس با شعاع کم تغییر شیب ناگهانی	مسیر تونل	
مقدار فضای باز در شیلد مکانیسم غیر مفصلی	TBM	
شکل سگمنت تعداد سگمنت در رینگ مشخصات درزه‌های بین سگمنت مشخصات نوار آب‌بند	سگمنت	
افزایش فشار محوری چک‌ها توزیع متفاوت فشار اعمال شده تمایل صفحات بارگذاری در تماس با سگمنت فشار نامتقارن چک‌های تراست بر روی رینگ	چک‌های جلو برنده	ف. ۴
تماس سگمنت و شیلد دنباله	شیلد	
پله‌شدگی بازشدگی مهارت در نصب سگمنت	سگمنت گذاری	
فشار نامتقارن روغن فشار غیر یکنواخت تزریق دوغاب نیروی اضافی در بستن بولت‌ها تزریق پرکننده‌ی ناقص	سایر	

علاوه بر طبقه‌بندی JSCE، برخی از محققین نشان داده‌اند مقدار رواداری در ابعاد سگمنت‌های تولید شده، نصب نامناسب رینگ، فشار تزریق غیر یکنواخت، انحراف ماشین حفاری و نوع و تعداد سگمنت در رینگ می‌توانند در تغییر شکل و پله‌شدگی رینگ موثر باشند [8].

انحراف از مسیر حفاری به خصوصیات هندسی تونل (ابعاد، شیب، قوس و ...)، وضعیت زمین‌شناسی، شرایط حفاری و مهارت اپراتور حفر وابسته است. در حالی که رفتار رینگ سگمنتی تحت بارهای اعمال شده به تعداد قطعات

برای بررسی علل و اثرات نواقص مربوط به مرحله‌ی نصب سگمنت‌ها، تونل انتقال آب کرج مورد مطالعه قرار گرفته است، به طوری که پس از نصب و تکمیل هر رینگ و خروج آن از سپر انتهایی (Tail Shield)، وضعیت نواقص هر سگمنت با اطمینان از سلامت ظاهری آن در زمان بارگیری و انتقال به داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته و ثبت شده است. سپس نواقصی از قبیل لب‌پریدگی و پله‌شدگی با توجه به شرایط رینگ‌گذاری و میزان انحرافات TBM به تفکیک هر سگمنت برای تعیین راهکارهایی برای کاهش پله‌شدگی و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیرات ناشی از لب‌پریدگی سگمنت‌ها، مقایسه و ارزیابی شده است.

۲- نواقص پوشش سگمنتی

در حفاری مکانیزه، پوشش تونل باید توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. هرگونه افزایش تنش در جسم که فراتر از مقاومت آن باشد منجر به شکستگی می‌شود. در مورد سگمنت نیز افزایش بارهای وارده و ضربات ناگهانی می‌تواند سبب تمرکز تنش شده و صدماتی از قبیل ترک‌خوردگی، لب‌پریدگی و شکستگی را بوجود آورد. در موارد خاص، علاوه بر بارهای اعمال شده، پوشش بتنی باید در مقابل عواملی از قبیل واکنش شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فاضلاب‌ها، یخ‌زدگی‌های مکرر، بار ترافیک و آتش‌سوزی نیز مقاوم باشد که بررسی این عوامل در مرحله‌ی طراحی ضرورت دارد [6].

انجمن مهندسی عمران ژاپن (JSCE)، بارهای وارد بر سگمنت را به سه گروه اصلی بارهای اولیه، ثانویه و ویژه تقسیم می‌کند. بارهای ثانویه شامل بارهای وارد شده در حین و پس از ساخت تونل است. مطابق این طبقه‌بندی عواملی که در محدوده‌ی زمانی نصب سگمنت تا تکمیل رینگ می‌تواند صدماتی را به آن وارد کند، در جدول ۱ آورده شده است. بارهای حین ساخت وابسته به نوع پروژه، موقعیت و شرایط ساخت تونل است. این بارها به دو مرحله‌ی طراحی و ساخت طبقه‌بندی می‌شوند. در این طبقه‌بندی شرایط زمین‌شناسی، مشخصات تونل، ماشین حفاری و سگمنت از پارامترهای طراحی هستند. از بارهای مرحله‌ی ساخت می‌توان به بارهای ناشی از چک‌های تراست، فشار تزریق پرکننده، عملکرد ارکتور و مهارت اپراتور اشاره نمود [7].

قوس با شعاع ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۱۵۰ متر است. مشخصات هندسی و موقعیت آن‌ها در شکل ۳ و جدول ۳ آورده شده است [۱۰].

جدول ۲- مشخصات ماشین حفاری تونل انتقال آب کرج-تهران [2]

پارامتر	مقدار
قطر ماشین (m)	۴٫۶۶
قطر دیسک کاتر (mm)	۴۳۲
فاصله‌داری دیسک کاترها (mm)	۷۰
تعداد دیسک کاتر	۳۱
توان کاترهد (KW)	۱۲۵۰
سرعت کاترهد (RPM)	۱۱
گشتاور کاترهد (KN-m)	۲۵۰۰
حداکثر فشار پشت کاترهد (KN)	۱۷۰۰۰

قطعات بتنی بر اساس سطح خارجی به دو گروه قطعات توپر و قطعات حفره‌دار طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین بر اساس شکل هندسی، سگمنت‌هایی با اشکال مستطیل، متوازی‌الاضلاع، دوزنقه و شش‌وجهی رایج هستند. هر رینگ سگمنت قسمتی از پوشش استوانه‌ای شکل تونل است که سطوح آن می‌توانند به صورت موازی یا غیرموازی باشند. بر این اساس، طراحی هندسی سگمنت‌ها را می‌توان به دو گروه رینگ با سطوح موازی (مستقیم) و رینگ با سطوح غیر موازی طبقه‌بندی نمود که نوع دوم شامل رینگ یک طرف مخروطی (*Left or Right Tapered Ring*) و رینگ دو طرف مخروطی (*Universal Tapered Ring*) است [11].



سگمنتی در هر رینگ، نیروی اعمال شده بر هر سگمنت، پروفیل درزه‌ها، انتظار چرخش درزه‌ها تحت بارگذاری، کیفیت هندسی نصب رینگ و اندرکنش بین رینگ‌های متوالی مربوط می‌شود [9].

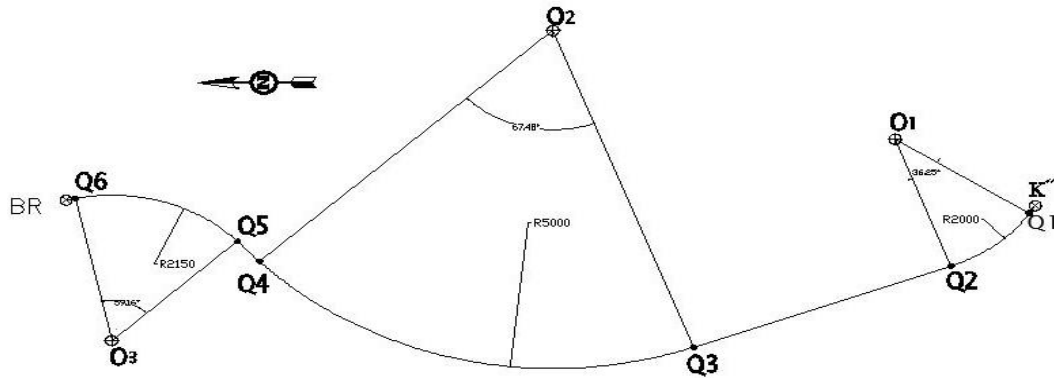
نیروهای موثر بر رینگ سگمنتی در دو گروه نیروهای عمودی (*Normal Force*) و مورب (*Transverse Force*) تقسیم‌بندی می‌شوند. نیروهای عمودی ناشی از فشار جک‌های تراست یا فشار آب در اطراف سگمنت است در حالی که نیروهای مورب در نتیجه‌ی استقرار نامناسب صفحات بارگذاری و پله‌شدگی رینگ‌ها بوجود می‌آید. بدیهی است پله‌شدگی سگمنت می‌تواند مقدار نیروهای مورب در حاشیه‌ی سگمنت را افزایش داده و منجر به لب‌پریدگی شود [6].

۳- معرفی پروژه‌ی مورد مطالعه

قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه‌ی شماره‌ی ۶ تهران با طول حدود ۱۴ کیلومتر بخش دیگری از پروژه‌ی آبرسانی به غرب تهران است (قطعه‌ی *BR''-K*). حفاری مکانیزه این تونل از حوالی روستای کندر (*K''*) با طول ۱۳۴۷۰٫۸ متر و شیب طولی ۰٫۰۱۳۷ با استفاده از *D.S.TBM* با قطر ۴٫۶۶۵ متر تا پایین دست سد تنظیمی کرج (*BR*) اجرا شده است. مشخصات *TBM* مورد استفاده در این پروژه در جدول ۲ آورده شده است [2]. در شکل ۲ نیز *TBM* مورد نظر در پرتال ورودی نشان داده شده است. حدود ۱۳۳ متر ابتدایی این تونل با قطر بیش‌تر و با استفاده از حفاری و آتشیاری احداث و از این فضا برای لجستیک تونل استفاده شده است [2]. مسیر تونل شامل ۳



شکل ۲- ماشین حفاری در تونل انتقال آب کرج-تهران و مقطع نهایی تونل



شکل ۳- نمای شماتیکی قوس‌ها در مسیر تونل [۱۰]

جدول ۳- مشخصات هندسی قوس‌ها در مسیر تونل [۱۰]

نام قوس	مترای شروع	مترای پایان	طول (متر)	شعاع (متر)	زاویه (درجه)
قوس ۱	۱۳۴ (Q1)	۱۳۹۹ (Q2)	۱۲۶۵	۲۰۰۰	۳۵٫۶۶
قوس ۲	۴۸۳۱ (Q3)	۱۰۷۲۰ (Q4)	۵۸۸۹	۵۰۰۰	۶۷٫۴۸
قوس ۳	۱۱۱۲۱ (Q5)	۱۳۳۴۰ (Q6)	۲۲۱۹	۲۱۵۰	۵۹٫۱۶

سگمنت‌ها ساعت‌گرد است؛ بنابراین نصب رینگ با قطعه‌ی T2 شروع و با نصب سگمنت K پایان می‌پذیرد. در شکل ۴ ابعاد و نحوه‌ی چیدمان یک رینگ سگمنتی نشان داده شده است.

برای اتصال سگمنت‌های یک رینگ و همچنین اتصال یک رینگ به رینگ قبلی از ۲۸ پیچ خمیده (Curve Bolt) استفاده می‌شود. فضای خالی پشت پوشش بتنی حدود ۱۳ سانتی‌متر است که به دلیل محدودیت‌های شیلد و روش سگمنت‌گذاری اپراتورها، معمولاً در کف تونل فاصله‌ی کمتری وجود دارد.

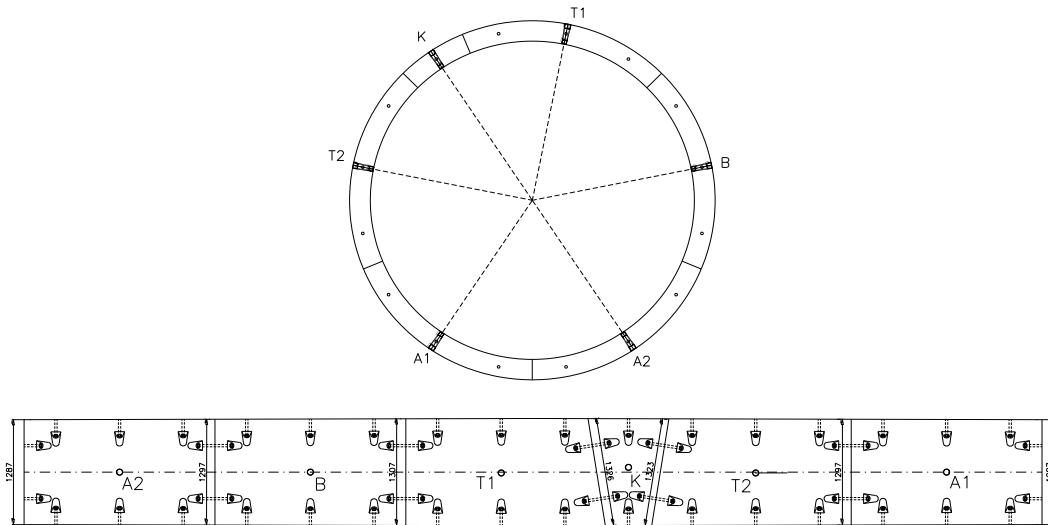
۴- تحلیل آماری نواقص

در طبقه‌بندی JSCE عوامل موثر بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی بیانگر شرایط کلی حفاری‌های مکانیزه تونل است. با توجه به این‌که در تونل مورد مطالعه خصوصیات TBM، نوع سگمنت و شرایط نصب آن برای تمامی مسیر یکسان است، پس تاثیر بسیاری از پارامترهای حین ساخت بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی یکسان خواهد بود. در چنین شرایطی می‌توان با صرف نظر از پارامترهای یکسان، مهم‌ترین پارامترهای موثر در ایجاد نواقص را مطابق با جدول ۴ تقسیم‌بندی نمود.

تفاوت عمده‌ی بین دو نوع رینگ ذکر شده، کاربری آن‌ها در داخل تونل است. رینگ‌های با سطوح موازی تنها در قسمت‌های مستقیم و بدون قوس تونل قابل استفاده هستند؛ در حالی‌که با استفاده از رینگ‌های با سطوح غیر موازی می‌توان مسیرهای منحنی با قوس‌های افقی و قائم را نیز ایجاد نمود. رینگ‌های یونیورسال به دلیل نیاز به قالب‌های کمتر، کارخانه‌ی تولید کوچک‌تر و کمتر بودن تنوع قفسه‌ی آرماتوری هزینه‌ی کمتری نسبت به رینگ‌های یک طرف مخروطی دارند [11].

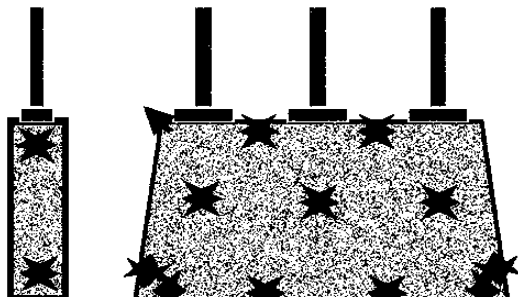
در سگمنت‌های یونیورسال درزه‌های طولی رینگ‌های مجاور به صورت متناوب قرار می‌گیرند تا قطعات پوشش در طول تونل حالت شطرنجی پیدا کند. این آرایش علاوه بر افزایش پایداری قطعات، مشکلات ناشی از مسایل آب‌بندی را نیز کاهش می‌دهد [12].

در این تحقیق، پوشش نهایی تونل با نصب ۵+۱ قطعه بتنی پیش‌ساخته از نوع یونیورسال با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و ابعاد متغیر تکمیل می‌شود. اگر چه در تونل‌های مکانیزه، تعداد و آرایش سگمنت‌ها متفاوت است ولی معمولاً نحوه‌ی چیدمان در تمام آن‌ها یکسان است و نصب سگمنت کلید در آخرین مرحله صورت می‌گیرد. در این پروژه نحوه‌ی چیدمان



شکل ۴- ابعاد و آرایش قرارگیری سگمنت‌ها در تونل [۱۳]

- رینگ می‌شود.
- مشکلات راهبری و انحراف *TBM* در حین عملیات حفاری سبب انحراف رینگ از مرکز و پله‌شدگی در سگمنت‌ها می‌شود.
- خطای اپراتور ارکتور در حین نصب سگمنت‌های رینگ موجب دشواری در نصب سگمنت کلید و افزایش پله‌شدگی در رینگ شده و اعمال ضربه ممکن است منجر به تشکیل ترک و لب‌پریدگی شود.
- در این پروژه مشاهدات حین نصب رینگ نشان می‌دهد نیروی عمودی جک‌های جلو برنده عامل اصلی لب‌پریدگی است و سایر عوامل بر روی شدت و نحوه‌ی توزیع فشار جک‌های جلو برنده تاثیر می‌گذارند. در شکل ۵ نیروی وارد بر سگمنت‌ها توسط جک‌های جلو برنده و محل‌هایی که ممکن است دچار آسیب شوند، نشان داده شده است.



شکل ۵- تاثیر فشار جک‌های جلو برنده بر لب‌پریدگی

سگمنت‌ها [14]

جدول ۴- دلایل ایجاد نواقص سگمنت‌گذاری در تونل انتقال آب کرج-تهران در مرحله‌ی ساخت

گروه	علت
جک‌های جلو برنده	افزایش فشار محوری جک‌ها توزیع متفاوت فشار اعمال شده تمایل صفحات بارگذاری در تماس با سگمنت
خطای تعیین مسیر	مسیر مستقیم/قوس‌دار مقدار فضای باز در شیلد تماس سگمنت و شیلد
سگمنت‌گذاری	مهارت در نصب سگمنت

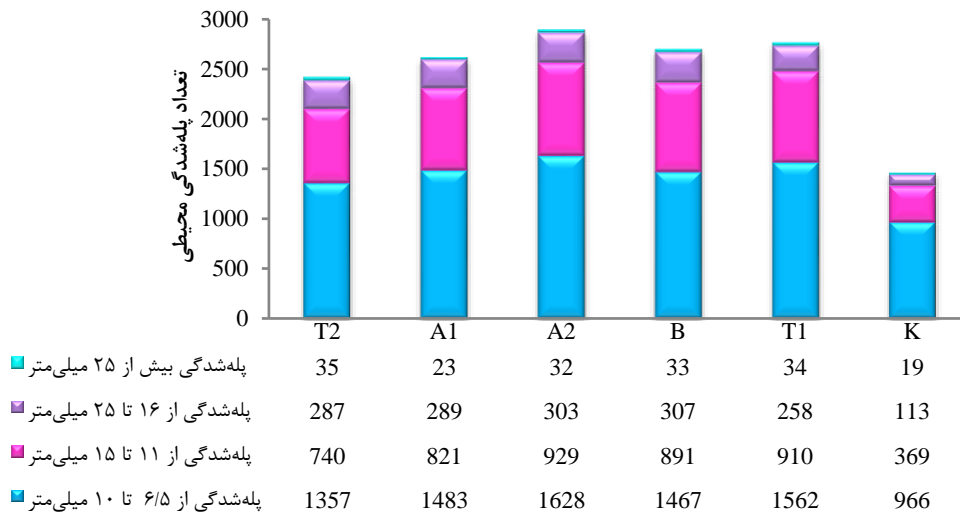
با توجه به جدول ۴، عوامل موثر بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت در حین ساخت رینگ به شرح زیر است:

- در زمان پیشروی یا جابجایی ماشین، جانمایی نامناسب صفحات بارگذاری جک‌های جلو برنده می‌تواند منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌ها شود.
- انحراف رینگ و اعمال فشار مضاعف بر رینگ‌ها برای قرارگیری آن‌ها به صورت هم‌مرکز با خط پروژه می‌تواند منجر به تغییر شکل رینگ و شکستگی سگمنت شود.
- تغییر شکل رینگ بعد از عبور از محدوده‌ی شیلد به علت حرکت جانبی رینگ‌ها در قوس تونل و بارگذاری بر روی رینگ‌ها که منجر به پله‌شدگی و شکستگی در

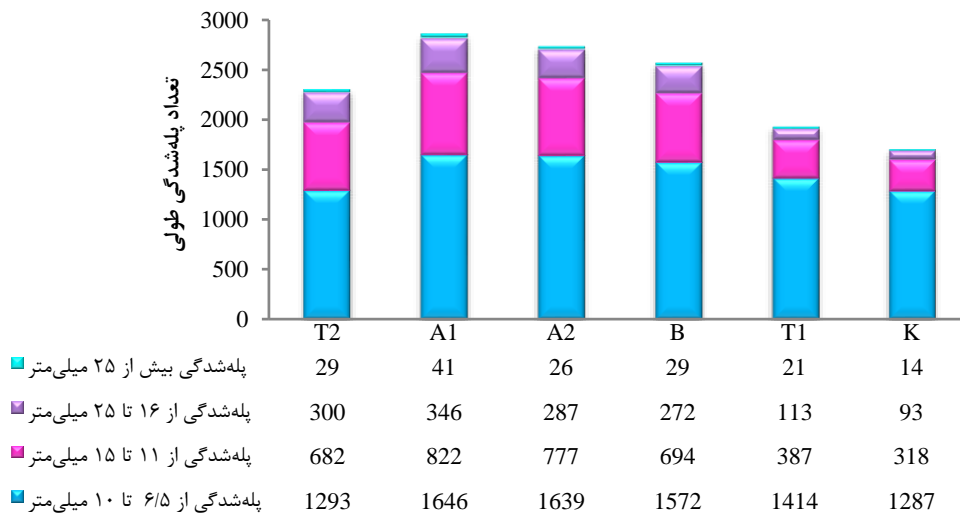
پله‌شدگی طولی با ترتیب چیدمان سگمنت‌ها کاهش می‌یابد. تجربیات سگمنت‌گذاری در این پروژه نشان می‌دهد قرارگیری مناسب اولین سگمنت ($T2$) در هر رینگ تاثیر به‌سزایی در کاهش پله‌شدگی طولی سایر سگمنت‌ها دارد. به عبارت دیگر انحراف رینگ نصب شده، کمبود فضای کافی در شیلد پستی و عدم دقت در نصب سگمنت $T2$ منجر به پله‌شدگی در سگمنت مجاور ($A1$) می‌شود. در چنین شرایطی اپراتور در حین تکمیل رینگ سعی می‌کند تعداد پله‌شدگی‌های طولی در رینگ را کاهش دهد و از ایجاد پله در سگمنت‌های بعدی جلوگیری نماید.

آمار به دست آمده از کیفیت ظاهری ۱۰۲۴۲ رینگ (۶۱۴۵۲ سگمنت) نصب شده نشان می‌دهد بیش‌ترین پله‌شدگی محیطی در سگمنت $A2$ و کمترین مقدار در سگمنت K وجود دارد. همچنین تشکیل پله‌های کوچک به مراتب بیش‌تر از پله‌های بزرگ (بیش از ۲۵ میلی‌متر) رخ می‌دهد (شکل ۶).

بیش‌ترین پله‌شدگی طولی در سگمنت $A1$ و کمترین تعداد پله‌شدگی طولی در سگمنت K ثبت شده است. در این شرایط نیز درصد بالایی از پله‌شدگی‌ها مربوط به پله‌شدگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر است. شکل ۷ نشان می‌دهد تعداد



شکل ۶- وضعیت پله‌شدگی محیطی در ۱۰۲۴۲ رینگ (۶۱۴۵۲ سگمنت)

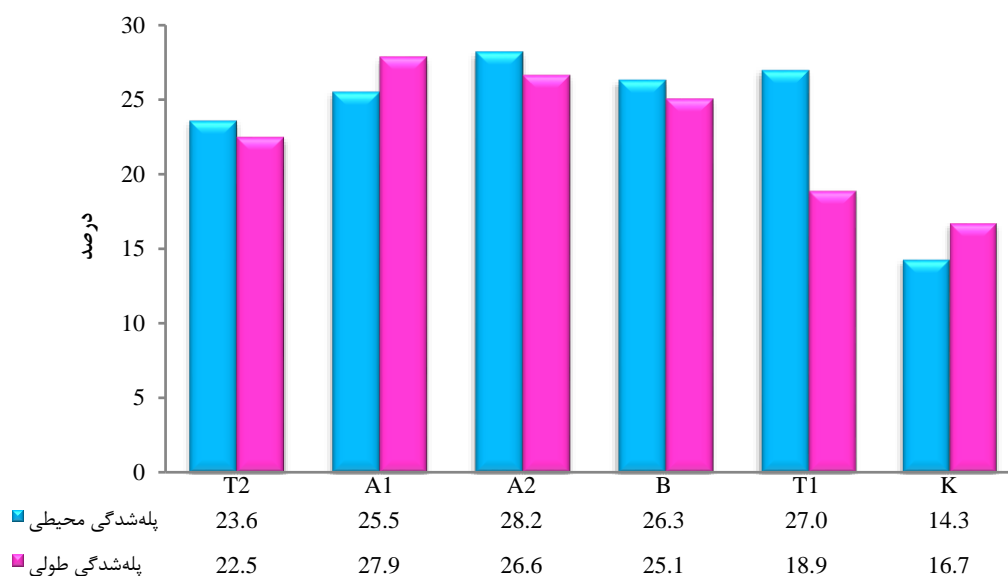


شکل ۷- وضعیت پله‌شدگی طولی در رینگ‌های نصب شده (۶۱۴۵۲ سگمنت)

مهارت اپراتور سگمنت‌گذاری، طول درزه عامل مهمی در تعداد پله‌شدگی است. طول بیشتر درزه‌های محیطی نسبت به درزه‌های طولی احتمال تشکیل پله‌های محیطی را افزایش می‌دهد. به عبارتی انطباق سگمنت‌ها بر روی درزه‌های محیطی دشوارتر است. در مورد سگمنت K به دلیل شکل گوه‌ای و عرض کوچک‌تر نسبت به سایر سگمنت‌ها، درزه‌ی محیطی کوچک‌تر از درزه‌ی طولی است؛ بنابراین تعداد پله‌شدگی طولی بیش‌تر از پله‌شدگی محیطی شده است.

در شکل ۸، وضعیت پله‌شدگی به تفکیک هر سگمنت نشان داده شده است. نگاهی اجمالی به این شکل نشانگر کاهش چشمگیر پله‌شدگی در سگمنت کلید است. سگمنت کلید آخرین قطعه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی یک رینگ است. پس به دلیل وجود تکیه‌گاه و وجود فشار از طرفین امکان جابجایی و تشکیل پله بعد از خروج از شیلد در آن کمتر است.

در شکل ۸، درصد پله‌شدگی محیطی در اکثر سگمنت‌ها بیش‌تر از پله‌شدگی طولی است؛ زیرا صرف نظر از



شکل ۸- مقایسه‌ی درصد پله‌شدگی طولی و محیطی در رینگ

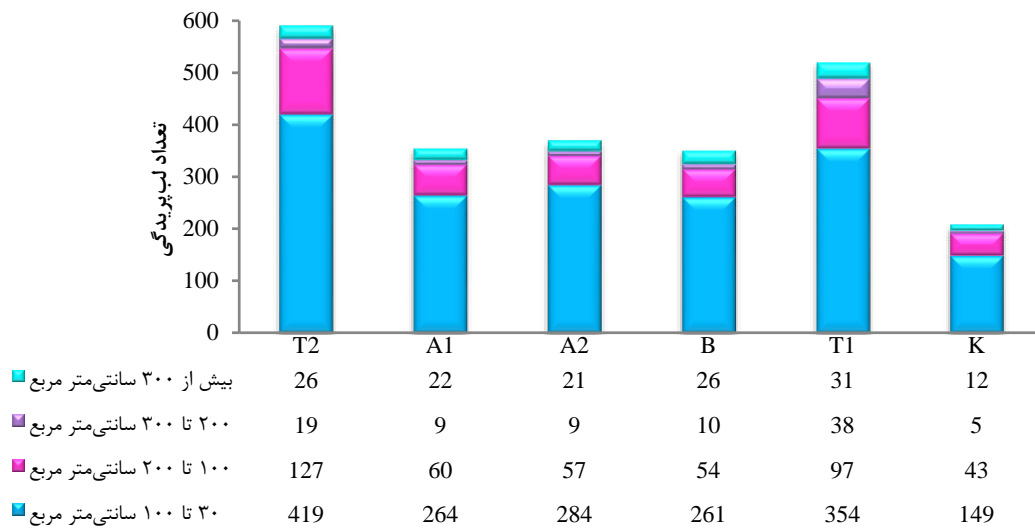
مربع دارند. علاوه بر آن سگمنت‌های T1 و T2 بیش‌ترین تعداد لب‌پریدگی و سگمنت کلید کمترین تعداد را نشان می‌دهد (شکل ۹).

مشاهدات حین نصب رینگ نشان می‌دهد که اکثر لب‌پریدگی‌ها در زمان نصب سگمنت کلید رخ می‌دهد؛ زیرا در زمان تکمیل رینگ، درزه‌ی محیطی حدود ۲۰-۳۰ میلی‌متر کوچک‌تر می‌شود. در این شرایط فضای کافی جهت نصب سگمنت کلید وجود ندارد، پس اپراتور با کمک جک‌های جلو برنده سعی می‌کند که سگمنت کلید را در موقعیت مناسب قرار دهد [15]. به دلیل این‌که در گوشه‌های سگمنت بتن غیر مسلح است، همچنین احتمال تماس گوشه‌های سگمنت کلید در مجاورت درزه‌های محیطی

یکی از عملکردهای مهم پوشش تونل در حفاری مکانیزه، تحمل اثرات بار پخش شده بر روی سگمنت از طریق کفشک‌های فشاردهنده‌ی جک‌های تراست است که برای جلو راندن سپر ماشین به پوشش وارد می‌شود. اگر چه بار وارده از طرف جک موقتی است؛ ولی مهم‌ترین و تاثیرگذارترین بار در حین حفاری است. در زمان جابجایی سیستم پشتیبان یا حفاری با کمک جک‌های جلوبرنده، عدم تقارن در بارگذاری یا قرارگیری کفشک‌های فشاردهنده در موقعیت نامناسب (معمولاً مرز بین دو سگمنت به دلیل تمرکز تنش بر گوشه‌های سگمنت) لب‌پریدگی رخ می‌دهد. آمار سطح لب‌پریدگی در سگمنت‌های نصب شده نشان می‌دهد اکثر لب‌پریدگی‌ها مساحتی کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر

ماشین حفاری مورد استفاده در این پروژه دارای ۱۶ جک جلو برنده است که به دلیل کوچک‌تر بودن سگمنت K همواره یک صفحه‌ی بارگذاری در مجاورت آن قرار می‌گیرد. علاوه بر این که بار وارده بر سگمنت کلید کمتر از سگمنت‌های دیگر است، ولی به دلیل انتقال نیرو توسط یک صفحه‌ی بارگذاری احتمال بارگذاری نامتقارن و ایجاد نیروهای مورب کمتر است. بنابراین امکان لب‌پریدگی در سگمنت K کمتر از سایر سگمنت‌ها است. این موضوع در شکل ۹ برای سگمنت K مشهود است.

بیش‌تر است، پس فشار اعمال شده توسط جک‌های تراست منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌های مجاور ($T1$ و $T2$) می‌شود. کاهش تعداد لب‌پریدگی در سگمنت کلید مربوط به صفحات بارگذاری جک‌های جلو برنده و نحوه‌ی تماس و زاویه‌ی آن‌ها با سگمنت است. در زمان پیشروی TBM ، انحراف محور جک‌های جلو برنده منجر به فشار اضافی روی سگمنت می‌شود؛ در چنین شرایطی اگر صفحات بارگذاری با گوشه‌ی سگمنت در تماس باشند تمرکز تنش بیش‌تری ایجاد شده و احتمال لب‌پریدگی افزایش می‌یابد [16].



شکل ۹- وضعیت لب‌پریدگی در سگمنت‌ها

لب‌پریدگی افزایش می‌یابد.

رفع این نقیصه در سگمنت‌های یونیورسال به دلیل شکل‌گوه‌ای سگمنت کلید، وجود $Taper$ در سگمنت‌ها و تغییر موقعیت نصب آن‌ها در هر رینگ بسیار مشکل است. حتی وقتی که نهایت دقت در نصب رینگ صورت می‌گیرد جابجایی در سگمنت‌ها و ایجاد پله بین ۵-۸ میلی‌متر غیر قابل اجتناب است [15].

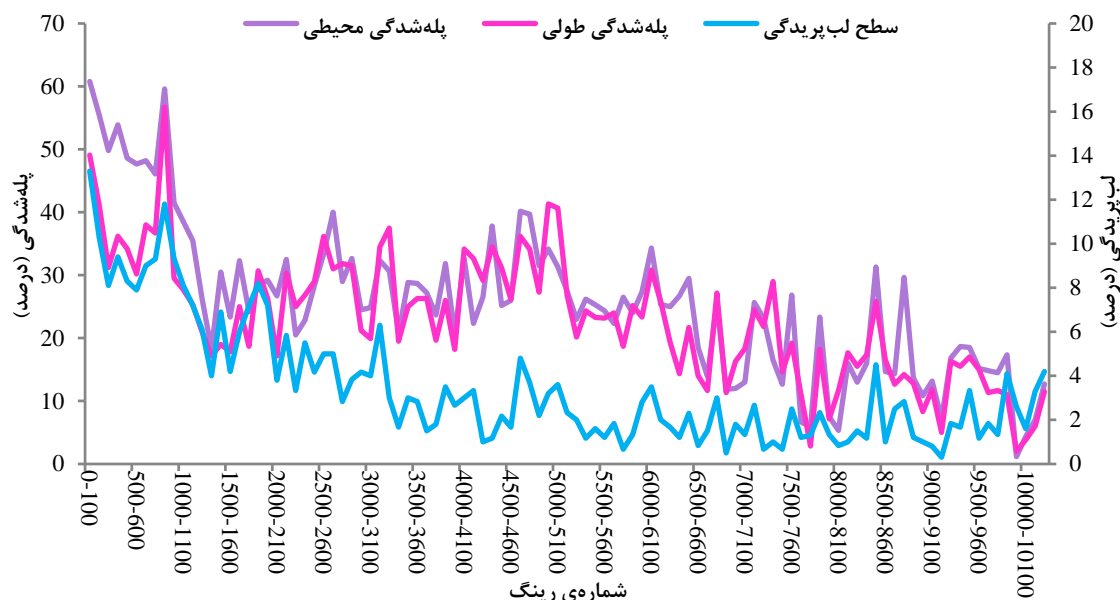
۴-۲- تاثیر انحراف مسیر حفاری در نواقص سگمنت‌گذاری

یکی از روش‌های مسیریابی و پردازش داده‌های نقشه‌برداری در حفاری مکانیزه با نصب سگمنت، استفاده از روش $SLS-T$ است. با تکیه بر این سیستم راهبری، تمامی اطلاعات مربوط به موقعیت ماشین حفاری از قبیل مختصات حفاری، انحراف

۴-۱- رابطه‌ی پله‌شدگی و لب‌پریدگی

برای مقایسه‌ی روند پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت‌ها در طول مسیر تونل، برای هر ۱۰۰ رینگ نمودار جداگانه‌ای ترسیم شده است. سپس متوسط داده‌ها در هر بازه‌ی ۱۰۰ رینگی به عنوان یک نقطه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود رابطه‌ی مناسبی بین پله‌شدگی طولی و محیطی و لب‌پریدگی وجود دارد. نحوه‌ی چیدمان سگمنت‌ها در کنار هم تشکیل یک رینگ را می‌دهد؛ بنابراین اگر در یک رینگ پله‌شدگی طولی رخ دهد، شکل رینگ از حالت دایره خارج شده و اثر آن در پله‌شدگی محیطی نمایان می‌شود. در هر صورت تغییر شکل رینگ و پله‌شدگی در سگمنت‌ها منجر به افزایش نیروهای برشی شده و تحت فشار عمودی جک‌های جلو برنده، احتمال

از مرکز شیلد، انحراف به طرفین و موقعیت نصب سگمنت‌ها به تفکیک هر رینگ ذخیره می‌شود. با در اختیار داشتن اطلاعات مسیر می‌توان تاثیر قوس‌های تونل و انحراف مسیر حفاری بر نواقص نصب سگمنت را بررسی نمود [17].



شکل ۱۰- رابطه‌ی افزایش کیفیت نصب سگمنت و وابستگی نواقص در رینگ‌های نصب شده

پله‌شدگی سگمنت‌ها قابل توجه است؛ اما با پیشروی تونل تعداد پله‌شدگی‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عامل در این روند نزولی افزایش مهارت و دقت اپراتور سگمنت‌گذار است. تاثیر این پارامتر می‌تواند کاستی‌های دیگر از قبیل خطای مسیریابی و فشار نامتقارن جک‌های جلو برنده را تا حد زیادی مرتفع کند. اپراتور ماهر می‌تواند تعداد و میزان پله‌شدگی را به کمترین مقدار کاهش دهد. کاهش پله‌شدگی در هر رینگ منجر به توزیع یکنواخت نیروی جک‌های جلو برنده می‌شود و احتمال لب‌پریدگی را از بین می‌برد.

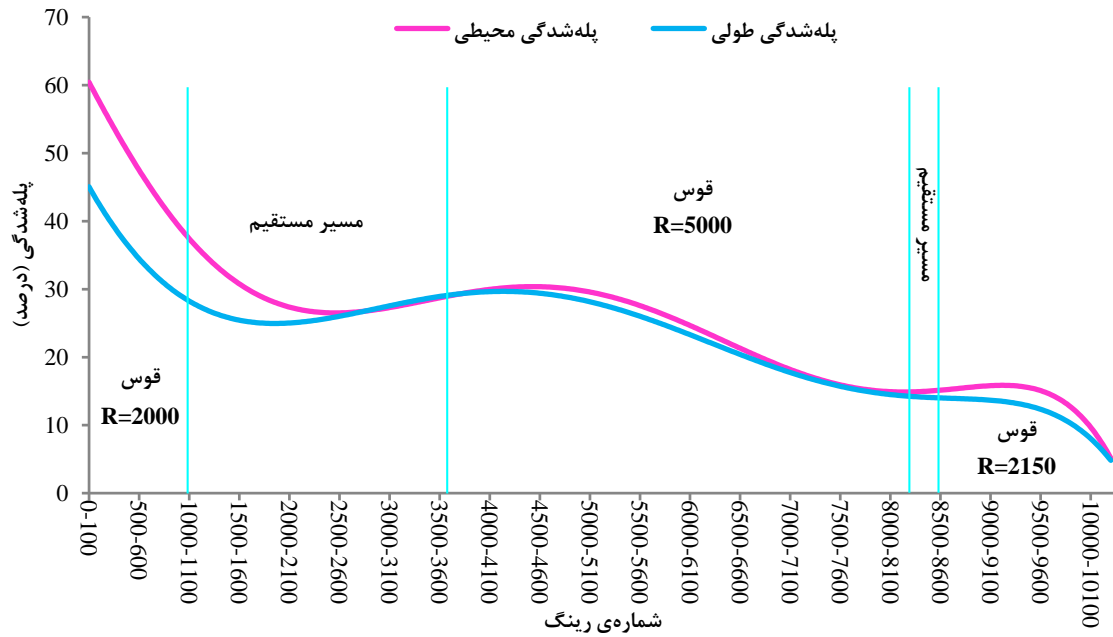
ثبت اطلاعات انحراف رینگ از محور تونل توسط پردازش نرم‌افزاری داده‌های نقشه‌برداری نشان می‌دهد در رینگ‌هایی که انحراف افقی رینگ از محور قابل توجه است، تعداد پله‌شدگی (طولی و محیطی) سگمنت‌ها نیز افزایش یافته است (شکل ۱۲). همان‌طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود تعداد پله‌شدگی طولی وابستگی بیشتری با قدر مطلق انحراف افقی رینگ دارد زیرا مقادیر بالای انحراف افقی می‌تواند فاصله‌ی بین رینگ و شیلد عقبی را به شدت

اگر *TBM* از مسیر حفاری منحرف شود در این صورت تاثیر آن بر انحراف رینگ از مرکز نمایان می‌شود. در قوس‌های تند (شعاع کمتر از ۵۰۰ متر) انحراف رینگ در امتداد درزهای محیطی رخ می‌دهد؛ با این توضیح که توزیع فشار جک‌ها در مسیرهای قوس‌دار یکنواختی کمتری داشته و جک‌های جلو برنده در حین انحراف از مرکز مقداری نیروهای مورب به صفحات بارگذاری منتقل می‌کنند [18]. نیروهای مورب آخرین رینگ نصب شده را به بیرون قوس هدایت کرده تا این‌که بولت‌های نگهدارنده‌ی رینگ در امتداد درزهای محیطی وارد عمل شده و انحراف را متوقف کنند [15]. در این شرایط رینگ نصب شده پس از خروج از شیلد تمایل به نشست دارد که می‌تواند منجر به افزایش پله‌شدگی و احتمال شکستگی در محل اتصال رینگ شود.

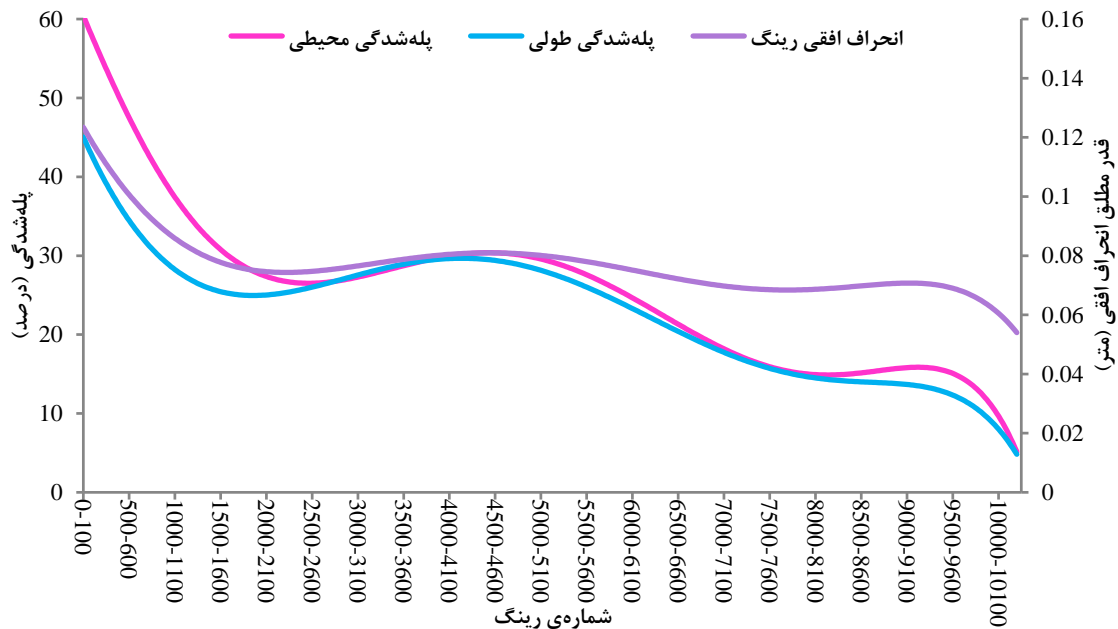
در این پژوهش، افزایش میزان انحراف *TBM* از مسیر طراحی در محدوده‌ی قوس‌های تونل (*Curve Alignment*) و کمبود فضای کافی در شیلد پشتی، درصد پله‌شدگی سگمنت‌ها را افزایش داده است (شکل ۱۱). در محدوده‌ی اولین قوس تونل (رینگ ۹۷۰-۱) با شعاع ۲۰۰۰ متر، تعداد

افقی شیلد پستی عملکرد اپراتور را تحت شعاع قرار داده و با محدودیت‌های ایجاد شده امکان اجتناب از پله‌شدگی طولی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین اپراتور ماهر، نصب سگمنت را با تبعیت از درزه‌های محیطی انجام می‌دهد.

کاهش دهد، به گونه‌ای که فضای کافی برای نصب سگمنت وجود نداشته و اپراتور بدون توجه به موقعیت رینگ، تلاش دارد با تماس سگمنت به شیلد، پله‌شدگی محیطی را کنترل کرده و تعداد آن را به حداقل برساند. به عبارت دیگر انحراف



شکل ۱۱- رابطه‌ی پله‌شدگی طولی و محیطی با مشخصات هندسی تونل



شکل ۱۲- تاثیر انحراف افقی رینگ در تعداد پله‌شدگی سگمنت‌ها

ایجاد پله‌شدگی می‌تواند منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌هایی شود که در این موقعیت نصب شده‌اند (شکل ۱۴). به عبارت دیگر انحراف شیلد به چپ و راست منجر به شکستگی‌های وسیع می‌شود و انحراف در راستای قائم در این‌گونه شکستگی‌ها تاثیر کمتری دارد.

۵- نتیجه‌گیری

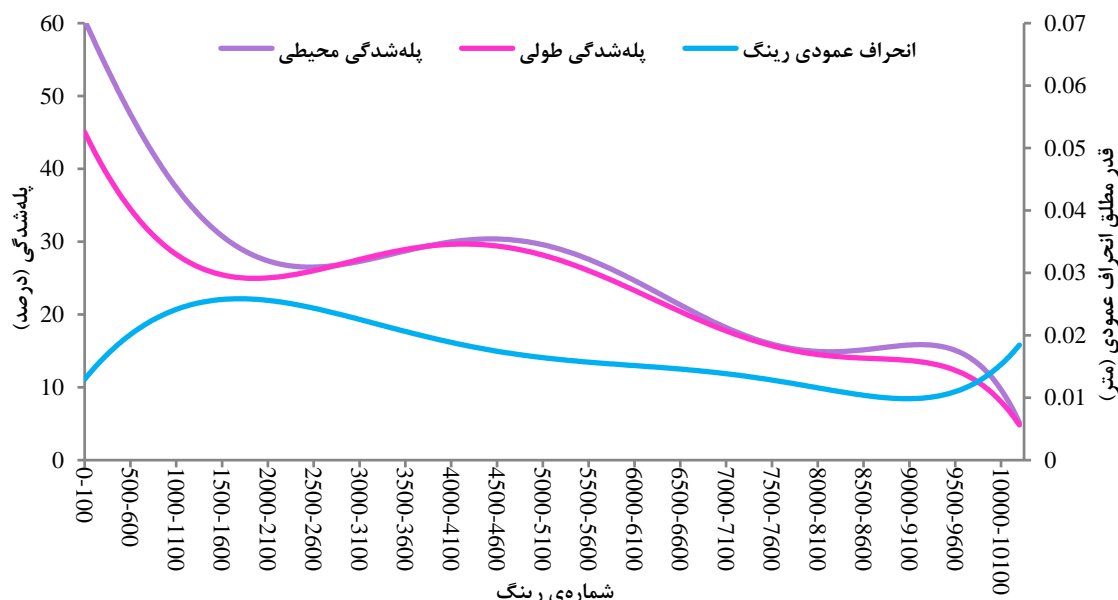
دو نقیصه‌ی مهم در زمان نصب سگمنت‌ها، پله‌شدگی و لب‌پریدگی است. ایجاد پله در بین سگمنت‌ها، امری معمول در چیدمان رینگ بتنی است که به دو گروه محیطی و طولی طبقه‌بندی می‌شود. لب‌پریدگی نوعی شکستگی سگمنت است که معمولاً در گوشه‌های سگمنت و تحت تاثیر بارهای موقت در زمان رینگ‌گذاری ایجاد می‌شود. از بررسی علل و اثرات نواقص مربوط به مرحله‌ی نصب سگمنت‌ها، در پروژه‌ی مورد نظر نتایج زیر به دست آمده است:

- طول و شکل درزه‌ها تاثیر بسزایی در ایجاد پله‌شدگی دارند. هر چه طول و شعاع انحنا سگمنت بیشتر باشد، در نتیجه خط اثر درزه‌ها بزرگ‌تر شده و امکان انطباق سگمنت‌ها دشوارتر می‌شود؛ بنابراین در شرایط یکسان با افزایش قطر تونل، احتمال تشکیل پله‌شدگی در سگمنت‌ها بیشتر می‌شود.

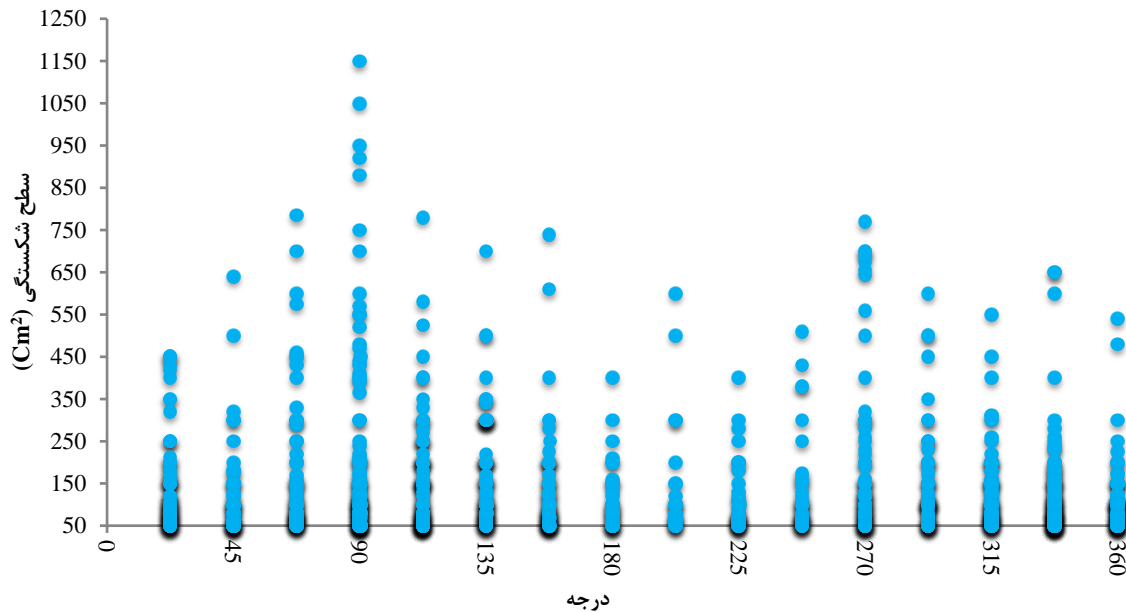
در این پروژه به دلیل قوس‌های متفاوت و شیب یکسان در مسیر تونل، انحراف افقی رینگ در دامنه‌ی بزرگ‌تری رخ داده است. در حالی که انحراف عمودی کاتر هد و رینگ از محور تونل ناچیز است. به نظر می‌رسد مقادیر کوچک انحراف عمودی نمی‌تواند در تعداد پله‌شدگی سگمنت تاثیرگذار باشد. بنابراین در شکل ۱۳ هیچ‌گونه رابطه‌ی منطقی بین پله‌شدگی و قدر مطلق انحراف عمودی رینگ از محور تونل مشاهده نمی‌شود.

با توجه به این‌که بیش‌ترین سطوح شکستگی در سگمنت‌های $T1$ و $T2$ رخ داده است، پس برای بررسی تاثیر انحراف رینگ بر سطح شکستگی سگمنت، موقعیت قرارگیری سگمنت K به عنوان معیار قضاوت انتخاب شده است. داده‌های استخراج شده از پردازشگر سیستم نقشه‌برداری نشان می‌دهد امکان نصب سگمنت K در ۱۶ موقعیت از رینگ وجود دارد. بنابراین می‌توان تعداد شکستگی‌ها را به ازای هر ۲۲/۵ درجه، چرخش ساعت‌گرد ارزیابی نمود.

ارزیابی سطوح شکستگی در موقعیت‌های متفاوت نشان می‌دهد بیش‌ترین شکستگی‌ها در موقعیت‌های ۹۰ و ۲۷۰ درجه رخ داده است. این بدان معنی است که انحرافات افقی رینگ و کمبود فضای کافی در شیلد پستی علاوه بر



شکل ۱۳- تاثیر انحراف عمودی رینگ در تعداد پله‌شدگی سگمنت‌ها



شکل ۱۴- افزایش سطوح شکستگی در دیواره‌های چپ و راست

شرایط نامساعد از قبیل مسیرهای قوس‌دار، انحراف مسیریابی و فشار نامتقارن جک‌ها، رینگ‌هایی با کمترین نواقص نصب شده است.

• اگر چه بیش‌ترین تعداد پله‌شدگی در سگمنت‌های A2 و A1 دیده می‌شود؛ اما بیش‌تر لب‌پریدگی‌ها در سگمنت‌های T1 و T2 رخ داده است. بنابراین نیروی عمودی جک‌های جلو برنده در مقایسه با افزایش تنش ناشی از پله‌شدگی، تاثیر بیش‌تری بر لب‌پریدگی دارد. در آخرین مرحله‌ی تکمیل رینگ با کنترل فشار جک‌های جلو برنده بر سگمنت کلید می‌توان لب‌پریدگی در سگمنت‌های T1 و T2 را کاهش داد.

• کنترل مسیر حفاری، تنظیم فشار جک‌های جلو برنده و افزایش مهارت سگمنت‌گذاری همراه با طراحی مناسب سگمنت (ابعاد و شکل هندسی، آرایش مناسب آرمان‌توربندی)، می‌تواند پله‌شدگی و لب‌پریدگی را بطور قابل توجهی کاهش دهد.

• در تونل‌هایی با قطر یکسان، اگر تعداد سگمنت در یک رینگ افزایش یابد، آنگاه درزهای محیطی در یک سگمنت کوچک‌تر شده و انطباق آن‌ها آسان‌تر می‌شود. در چنین شرایطی علی‌رغم کاهش پله‌شدگی محیطی به دلیل افزایش تعداد درزهای طولی، پله‌شدگی طولی افزایش می‌یابد.

• لب‌پریدگی‌ها اغلب تحت تاثیر نیروی جک‌های جلو برنده ایجاد می‌شوند؛ اما مشخصات قوس‌ها و انحراف مسیر حفاری می‌تواند در وسعت لب‌پریدگی‌ها موثر باشد. در اکثر مواقع با نصب سگمنت کلید در موقعیت مناسب می‌توان از انحراف رینگ جلوگیری نمود. بنابراین با کنترل مسیر حفاری مقدار پله‌شدگی و لب‌پریدگی به شدت کاهش می‌یابد.

• مهارت اپراتور نقش مهمی در نصب رینگ دارد و می‌تواند سایر عوامل تاثیرگذار در پله‌شدگی و لب‌پریدگی را کاهش دهد؛ به گونه‌ای که گاهی در

۶- منابع‌ها

- [1] Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock Tunnel Boring Machines*. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN: 9783433016763. <http://dx.doi.org/10.1002/9783433600122>.

- [2] Frough, O., Torabi, S. R., Tajik, M. (2012). Evaluation of TBM Utilization Using Rock Mass Rating System: A Case Study of Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lots 1 and 2). *Journal of Mining and Environment*, 3(2), 89-98. http://jme.shahroodut.ac.ir/article_86_11.html.
- [3] Wittaker, B. N., & Frith, R. C. (1990). *Tunnelling: Design, Stability and Construction*. London: Institution of Mining and Metallurgy. ISBN: 1870706196.
- [۴] فرخ، ا. (۱۳۸۶). قطعات بتنی پیش‌ساخته. تهران: جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر). شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۷۳۷-۸۳-۷.
- [5] Kolic, D., & Mayerhofer, A. (2009). Segmental Lining Tolerances and Imperfections. *ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunnelling for the City and Environment*. <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/O-09/O-09-03.pdf>.
- [6] Herrenknecht, M., & Bappler, K. (2003). Segmental Concrete Lining Design and Installation. *Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar*. Colorado School of Mines. http://emi.mines.edu/UserFiles/File/earthMechanics/seminar/06_segmental_concrete_lining_design_and_installation.pdf.
- [7] Sugimoto, M. (2006). Causes of Shield Segment Damages during Construction. *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling: Effect of Groundwater on Tunnel Stability* (pp. 67-74). Thailand.
- [8] Blom, C. B. M., van der Horst, E. J., & Jovanovic, P. S. (1999). Three-Dimensional Structural Analyses of the Shield Driven "Green Heart" Tunnel of the High-Speed Line South. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(2), 217-224. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(99\)00035-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(99)00035-8).
- [9] Mahajan. R. (2010). *3 Dimensional Structural Modelling of Segmental Tunnel Lining Using Finite Element Software*. Australasian Tunneling Society. http://www.ats.org.au/papers/Ritesh%20Mahajan_paper2010.pdf.
- [۱۰] موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل. (۱۳۸۸). گزارش طراحی مسیر قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران (قطعه‌ی K"-BR).
- [11] AFTES: French Association of Tunnelling and Underground Space. (2005). *The Design, Sizing and Construction of Precast Concrete Segments Installed at The Rear of a Tunnel Boring Machine (TBM)*. Recommendations on TBM, Shields, and Segments. Reference: GT18R1A1.
- [12] DAUB: German Committee for Underground Construction. (2000). *Concrete Linings for Tunnel Built by Underground Construction*. <http://www.daub-ita.de/fileadmin/media/daub/gtcrec08e.pdf>.
- [۱۳] موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل. (۱۳۸۸). گزارش طرح هندسی قطعات بتنی پیش‌ساخته در قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران.
- [14] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. CRC Press. ISBN: 9780415420105.
- [15] Gruebl, F. (2006). Segmental Rings-Critical Loads and Damage Prevention. *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling: Effect of Groundwater on Tunnel Stability* (pp. 9-19). Thailand.
- [16] Kasper, T., & Meschke, G. (2004). A 3D Finite Element Simulation Model for TBM Tunnelling in Soft Ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(14), 1441-1460. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.395>.
- [17] VMT GmbH. (2004). *Operators Manual SLS-T APD Guidance System in Segmental Lining*.
- [18] Chen, J. S., & Mo, H. H. (2006). Study on Effect of Segments Erection Tolerance and Wedge-Shaped Segment on Segment Ring in Shield. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 7(11), 1864-1869. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.A1864>.

بررسی عددی تاثیر اندرکنش تونل - سازه‌ی سطحی بر نشست سطح زمین

صبا قره‌داش^{۱*}؛ میلاد برزگر^۲

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد استخراج معدن؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۱۰/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
نشست سطحی	در احداث زیرساخت‌های زیرزمینی شهری، عبور تونل‌ها از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین پیش‌بینی و کنترل تغییر مکان‌های حاصل از حفاری، به ویژه نشست سطحی زمین، همواره باید پیش از حفاری مورد توجه قرار گیرد و در حین حفاری نیز بررسی شود. در این پژوهش یکی از ساختمان‌های مستعد تغییر مکان‌های بحرانی در مسیر عبور تونل خط ۲ متروی مشهد به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب و با روش عددی مدل‌سازی و تحلیل شده است. همچنین اثر تغییرات پارامترهای هندسی ساختمان بر نشست سطحی مطالعه شده است. پژوهش انجام گرفته، نشان داده است اثر تغییر عمق بیش‌تر از تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و سازه‌های سطحی بر نشست موثر است. همچنین ضمن بررسی نمودارهای تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان مهم‌ترین نکته این است که افزایش فاصله‌ی جانبی، ابتدا افزایش نشست سطح زمین و سپس تاج تونل را به دنبال داشته و مکانیسم تغییر شکل تونل و تغییرات تنش قائم، با فاصله گرفتن از ساختمان، بر روند تغییرات موثر است. همچنین اثر لحاظ کردن این عوامل بر تغییر شکل نقاط متفاوت ساختمان و مقایسه‌ی آن با نتایج تحلیل‌های زمین بکر نیز ارائه شده است.

۱- پیشگفتار

مناسب‌ترین روش توسعه‌ی پایدار در محیط‌های شهری استفاده از فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها برای کاربری‌های مختلف است. در این صورت عبور مستقیم تونل‌ها از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین نشست حاصل از حفاری و اثرات آن بر سازه‌های سطحی همواره نگرانی طراحان فضاهای شهری را به همراه داشته است. حفر تونل در زمین سبب تغییر میدان تنش شده و یک میدان تغییر مکان در زمین اطراف تونل به وجود می‌آورد. در این خصوص نه تنها سازه‌های مجاور تحت تاثیر عواقب ناشی از حفر تونل قرار خواهند گرفت، بلکه میدان تغییر مکان ایجاد شده و همچنین میدان تنش حاصل نیز، متاثر از سازه‌های

مجاور خواهد بود [1] تا [3].

برای حل این مسئله، روشی بر پایه‌ی سختی ساختمان و خاک پیشنهاد شده است که اثر سختی یک ساختمان را در هنگام محاسبه‌ی تغییر شکل و پتانسیل آسیب‌دیدگی آن به حساب می‌آورد. البته در مقابل ساده شدن مدل‌سازی رفتار پیچیده‌ی سیستم، مبحث برهمکنش تونل، خاک و سازه قرار دارد؛ زیرا نه تنها ساخت تونل سبب تغییر شکل ساختمان‌ها می‌شود، بلکه وجود ساختمان نیز بر جابجایی خاک اطراف تاثیر می‌گذرد [4].

با وجود اینکه حضور سازه‌های سطحی، بسته به فاصله‌ی سازه و تونل، بر توسعه‌ی حرکات زمین تاثیر گذار است، درک نحوه‌ی گسترش تغییر شکل‌ها و نشست‌های

* تهران؛ خیابان حافظ؛ شماره ۴۲۴؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵؛ شماره‌ی تلفن:

۰۶۴۵۴۰-۰۲۱؛ رایانامه: milisaba.46@gmail.com

مکان‌های ایجاد شده در زمین و نیز اثرات محتمل حفاری بر سازه‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی راه‌های کنترلی و نقاط حساس‌تر و مستعد سرمایه‌گذار، مطالعه‌ی پارامتری برای پارامترهای هندسی تونل و سازه‌ی سطحی صورت گرفته است.

۲- اهداف پژوهش و روش تحلیل

به طور کلی بررسی نشست و تغییر مکان سطح و سازه‌های روزمینی در اثر حفاری و ساخت تونل را می‌توان به دو بخش تحلیل‌های با روابط حل بسته برای حالت زمین بکر و تحلیل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی با لحاظ کردن شرایط ژئوتکنیکی و سازه‌ای تقسیم نمود. با توجه به اینکه در روش‌های عددی امکان مدل‌سازی شرایط واقعی امکان‌پذیر است، بنابراین استفاده از این روش‌ها با نیم‌نگاهی به نتایج روش‌های حل بسته می‌تواند نتایج قابل قبول‌تر و واقع‌بینانه‌تری ارائه دهد.

به دلیل ماهیت پیچیده‌ی برهمکنش ساختاری تا کنون رابطه‌ای مشخص و گویا برای بیان ارتباط بین سازه‌های سطحی مجاور و نشست زمین، یافت نشده است. فیزیک حاکم بر فرآیند برهمکنش بیانگر آن است که برهم‌نهی سازنده یا مخرب آن می‌تواند سبب افزایش یا کاهش نشست سطح زمین شود. از آن جایی که نشست از لحاظ اقتصادی نقش اساسی در فرآیندهای تونلسازی شهری دارد، بنابراین به نظر می‌رسد اطلاع از مکانیسم نشست و نحوه‌ی تاثیر آن بر سازه‌های مجاور سطحی ضروری است. همان‌گونه که اشاره شد تاکنون مطالعات کمی در ارتباط با تحلیل عددی برهمکنش سازه‌های مجاور و نشست زمین صورت گرفته و هر کدام از آن‌ها دارای نقاط ضعف و قوت خاص خود است. به همین دلیل در این مقاله با بهره‌گیری از تجارب حاصل از این مطالعات و سپس تلفیق و اصلاح آن‌ها، نگرشی ویژه در مورد برهمکنش‌ها ارائه شده است. در این پژوهش اثرات برهمکنش بین تونل و سازه‌های مجاور روزمینی با در نظر گرفتن سختی پی سازه‌ی سطحی و نیز اثرات وزن سازه‌ی احداث شده بر نشست مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- مدل‌سازی عددی

مطالعات انجام شده برای پروژه‌ی خط ۲ متروی مشهد

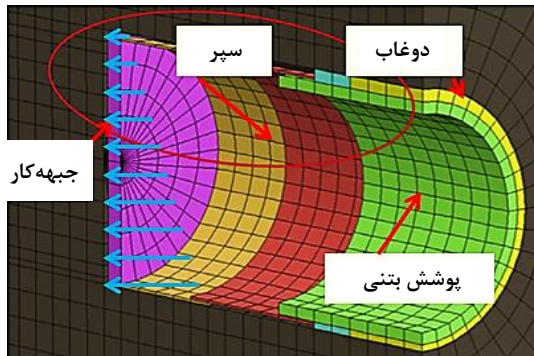
سطح زمین پیش از اضافه کردن پیچیدگی وجود سازه در حالت زمین بکر نیز اهمیت دارد [5] و [6]. رویکرد موجود در تحلیل برهمکنش تونل-سازه شامل محاسبه‌ی نشست‌های حالت میدان آزاد، ارزیابی پارامترهای تغییر شکل سازه مانند تغییر شکل نسبی، کرنش افقی و نشست‌های تفاضلی بر اساس موقعیت سازه و تونل و در نتیجه تخمین خسارت وارده به سازه است. بر همین اساس نشست‌ها همواره متقارن ارزیابی شده و پتانسیل خسارت به دست آمده با مشاهدات واقعی متفاوت است [7].

رویکرد سختی نسبی و تاثیر سختی سازه‌ی سطحی بر روی تغییر مکان سطح زمین ناشی از حفاری، توسط آتول (Attewell) بررسی شده است. در نظر نگرفتن خصوصیات پی سازه و پارامترهای حفاری از کاستی‌های این روش است. اثر برهمکنش تونل، خاک و سازه به روش کنترل تغییر مکان، برای بررسی یک ساختمان ۵ طبقه در مجاورت حفاری تونل‌های دوقلو به صورت سه‌بعدی و پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نیز حاکی از کاهش تغییر مکان‌های سطح ناشی از بکارگیری این روش در حضور سازه است و این تغییر مکان‌ها در اثر حفاری تونل‌های دوقلو در مجاورت پی‌ها به شدت افزایش یافته است [8].

پژوهشگرانی مانند کلر (Klar) در سال ۲۰۱۰ به بررسی برهمکنش تونل-سازه به روش مستقیم آزادسازی پرداختند. در این روش به مهندس طراح اجازه داده می‌شود با مسئله‌ی ژئوتکنیکی و سازه‌ای به صورت مجزا برخورد نمایند. در نهایت ماتریسی نسبتاً کوچک که می‌توان آن را به صورت مستقیم نیز حل نمود، تشکیل می‌شود [9].

در این تحقیق یکی از بخش‌های مستعد تغییر مکان‌های بحرانی در مسیر تونل خط ۲ متروی مشهد با نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به روش عددی تفاضل محدود مدل‌سازی شده است. روش تفاضل محدود برای تحلیل مهندسی انواع سازه‌های ژئوتکنیکی به کار برده می‌شود. با این روش می‌توان رفتار مصالح را در مرحله‌ی پس از تسلیم و با تغییر شکل‌های مومسان تجزیه و تحلیل نمود. عکس‌العمل هر المان متأثر از نیروهای وارده بر آن، شرایط مرزی و رابطه‌ی رفتاری آن (رابطه‌ی تنش-کرنش مصالح) است که برای آن المان تعریف شده است. در این مطالعه اثرات تغییر

برای مدلسازی فشار محفظه‌ی حفاری، جبهه‌کار حفاری با اعمال بار گسترده‌ی خطی نگهداری شده است. فشار نگهداری جبهه‌کار در تاج تونل برابر با ۳۵ کیلوپاسکال (بر اساس مقادیر طراحی) در نظر گرفته شده است. همچنین فشار تزریق پشت پوشش بتنی در سقف، ۰/۵ بار (۵۰ کیلوپاسکال) بیش‌تر از فشار نگهداری جبهه‌کار در تاج در نظر گرفته شده که با فرض وزن مخصوص ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب به صورت بار گسترده خطی، به طول ۱/۵ متر (طول یک حلقه‌ی پوشش بتنی) از سطح حفاری اعمال شده است. در شکل ۱ نحوه‌ی اعمال فشار نگهداری جبهه‌کار و فشار تزریق پشت پوشش بتنی در مدل نشان داده شده است.



شکل ۱- مدلسازی پوشش بتنی، فشار جبهه‌کار و تزریق پشت پوشش بتنی

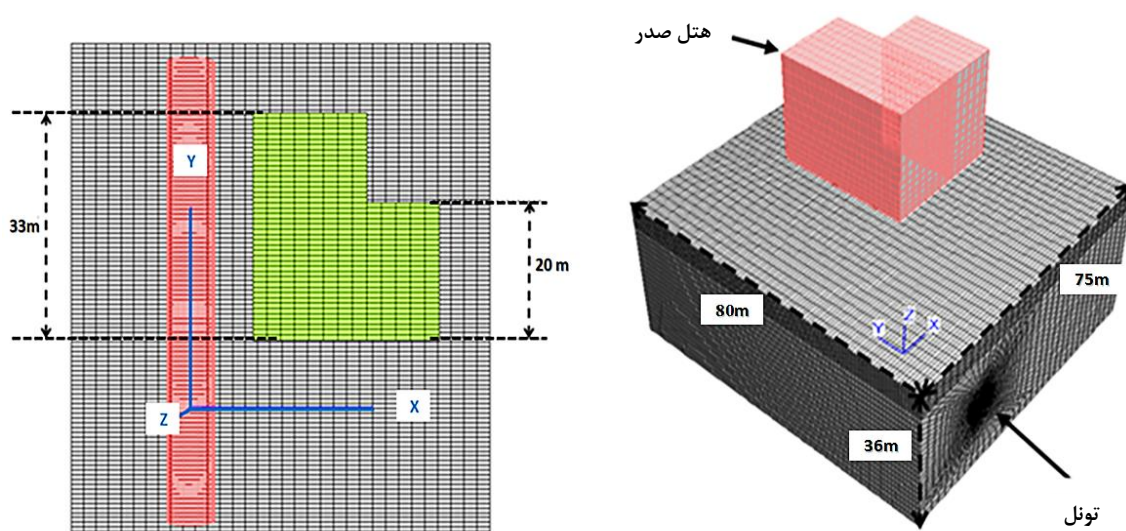
مقاطع بحرانی (با مد نظر قرار دادن روباره، قرارگیری زیر ساختمان‌های حساس مسیر و شرایط ژئوتکنیکی خاک) موجود در مسیر متروی مشهد مورد بررسی قرار گرفته و برای تمام آن‌ها مدلسازی سه‌بعدی انجام شده است. شکل ۲ نمای یکی از مقاطع مورد بررسی را نشان می‌دهد. این مقطع در کیلومتر ۸،۵۶۰ از مسیر تونل قرار داشته و در آن یک ساختمان ۸ طبقه به ارتفاع ۲۴ متر که ابعاد آن در شکل ۲ نشان داده شده است، روی مسیر تونل قرار دارد. با توجه به مطالعات انجام شده، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک درونگیر تونل در جدول ۱ ارائه شده است. برای انجام عملیات حفاری در متروی مشهد دستگاه *TBM* از نوع فشار تعادلی زمین (*EPB*) انتخاب شده است. قطر خارجی تونل ۹،۱۵ متر و قطر داخلی آن ۸،۶۸ متر طراحی شده است.

شامل حفر ۴۶ گمانه در مسیر شهری، بررسی‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی برای شناخت ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج است. اطلاعات موجود از داده‌های ژئوتکنیکی بدست آمده از گمانه‌های *DH-9* تا *DH-41* و پروفیل ژئوتکنیکی لایه‌بندی خاک در مسیر عبور از خیابان کوهسنگی گرفته شده است.

به دلیل پیچیدگی فرآیند برهمکنش، نمی‌توان به راحتی و تنها با استفاده از روابط تحلیلی نشست تونل و سازه‌ها را بررسی نمود. از طرفی آزمایش چنین مسائلی دشوار، هزینه‌بر و نیازمند تجهیزات پیشرفته است که به سادگی در مقیاس واقعی قابل کاربرد نیستند؛ بنابراین از تحلیل عددی، که قابلیت مدلسازی شرایط پیچیده برهمکنش از جمله پیچیدگی‌های هندسی، رفتار غیر خطی مواد و شرایط پیچیده‌ی مرزی را دارد، برای تحلیل و بررسی نشست استفاده شده است. تحلیل عددی حاضر را می‌توان به گام‌های زیر تقسیم نمود.

- تعریف هندسه‌ی تونل-سازه و مدلسازی آن‌ها
- انتخاب نحوه‌ی محاسبات، تعریف مدل ساختاری و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مواد
- تعریف شرایط اولیه و مرزی
- ایجاد تعادل اولیه قبل از حفر تونل
- حفاری تونل و دریافت نتایج تحلیل عددی
- اعمال شرایط مرزی شامل مرزهای داخلی تونل (فشار جبهه‌کار، دوغاب و وزن *TBM*)

ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا ضمن پیشگیری از تاثیر مرزهای مدل بر نتایج بدست آمده و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات شود. ابعاد مدل در راستای محورهای X ، Y و Z به صورت تابعی از قطر تونل مترو (D) و عمق آن (H) در نظر گرفته شده است. صفحات جانبی و تحتانی مدل به ترتیب در راستای افقی و عمودی ثابت شده است. بار سطحی ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان بار ترافیک به مرز فوقانی مدل اعمال شده است. فرآیند حفاری تونل مترو و نصب پوشش بتنی در گام‌های ۱/۵ متری مدلسازی شده است. برای مدلسازی فضای خالی میان سپر و جداره‌ی حفاری، این امکان فراهم شده تا نقاط شبکه‌ای واقع بر سطح حفاری حداکثر به اندازه‌ی اضافه‌ی حفاری ایجاد شده توسط کله‌ی حفار (۱۹ میلی‌متر)، جابجا شوند.



شکل ۲- نما و پلان تونل و ساختمان مورد بررسی

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی لایه‌های خاک درونگیر تونل متروی مشهد [۱۰]

K_0	E	ν	ϕ	C	γ_{bulk}	پارامتر	شماره‌ی لایه
						نوع خاک	
-	MPa	-	Degree	KPa	KN/m ³		
۰٫۵۶	۱۲	۰٫۳۴	۲۳	۳۰	۱۹٫۸	CL-ML (رس سیلتی)	I
۰٫۴۳	۷۰	۰٫۳	۳۵	۰	۱۹٫۶	SC-SM (ماسه‌ی رسی)	II
۰٫۵۳	۱۲٫۵	۰٫۳۴	۲۵	۳۰	۱۹٫۹	CL-ML (رس سیلتی)	III
۰٫۳۶	۸۰	۰٫۳	۳۶	۰	۲۰٫۹	GC-GM (شن رسی)	IV
۰٫۵۳	۳۰	۰٫۳۲	۲۵	۴۰	۲۱٫۴	CL-ML (رس سیلتی)	V

کف تونل بیش از ۱۰ متر فاصله است. همچنین بار ترافیک سطحی با استفاده از آیین‌نامه‌های حمل و نقل ترافیک شهری برآورد و در فاصله‌ای معادل عرض خیابان در مدل اعمال شده است.

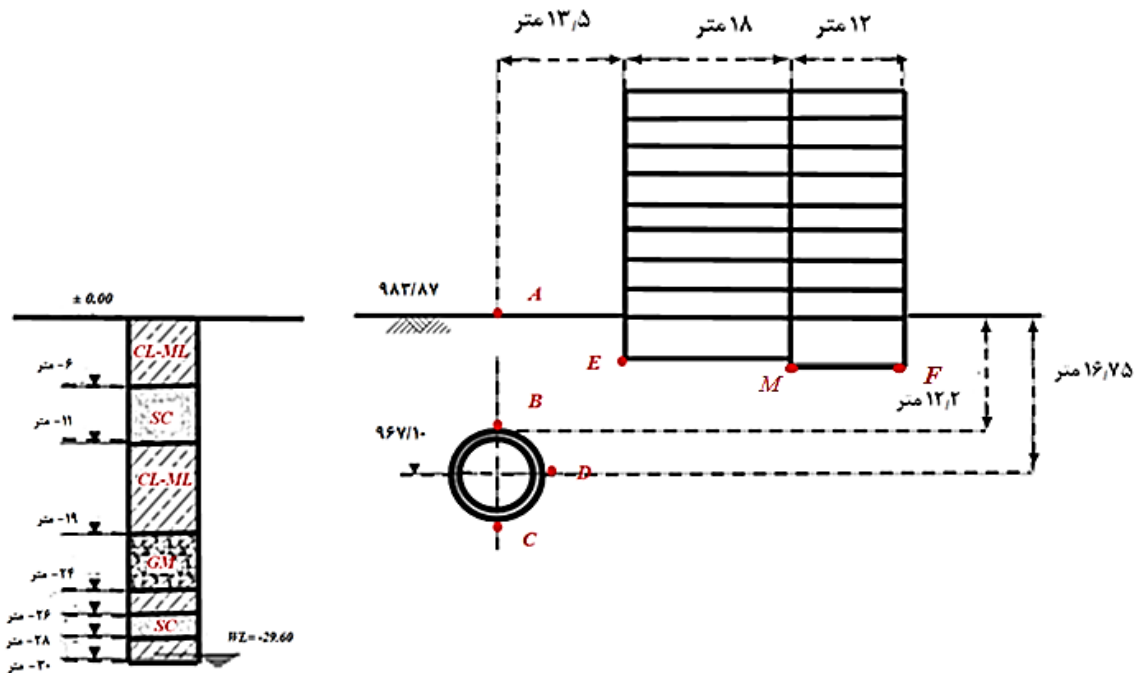
تغییرات نشست در نقطه‌ای واقع بر سطح زمین، روی تاج تونل به عنوان نشست حداکثر سطحی (نقطه‌ی A)، نشست در تاج تونل (نقطه‌ی B)، تورم در کف تونل (نقطه‌ی C)، تغییر مکان جانبی نقطه‌ی واقع بر جداره‌ی تونل (نقطه‌ی D) و نیز نشست نقطه‌ی واقع بر جداره‌ی پی سازه (نقطه‌ی E) و نقاط M و F نقاط میانی و انتهایی واقع بر جداره‌ی پی سازه ضمن تغییرات پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۳ نقاط بررسی نشست و تورم همراه با هندسه‌ی ساختمان و مشخصات لایه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در مدلسازی اضافه حفاری حداکثر ۱۲ سانتی‌متری بین پوشش بتنی و سقف تونل در نظر گرفته شده که با دوغاب و همزمان با حفاری تحت فشار معین پر خواهد شد. در جدول ۲ خواص فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده در اجزا مختلف مدل نشان داده شده است. با توجه به اینکه ساختمان با ابعاد واقعی مدل شده است، جرم سقف و دیواره‌های ساختمان بر اساس آیین‌نامه‌های موجود محاسبه و با توجه به حجم ساختمان، چگالی یکنواخت برای ساختمان محاسبه و هندسه‌ی سبب‌ساز ساختمان با مدل رفتاری مومسان شبیه‌سازی شده است.

در مقطع مورد بررسی سطح آب زیرزمینی بسیار پایین است (در عمق ۳۰ متری از سطح زمین)، به گونه‌ای که بر محیط اطراف دهانه‌ی حفاری بی‌تاثیر است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود بین سطح آب زیرزمینی و

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی المان‌های سپر، دوغاب، پوشش بتنی و ساختمان

thicknes	E	ν	ϕ	C	ρ_{bulk}	پارامتر	نوع المان
cm	MPa	-	Degree	KPa	Kg/m ³		
۱۰	۲۱۰۰۰۰	۰٫۱۷	-	-	۷۸۵۰		سپر
۱۲	۴۰	۰٫۲۵	۳۵	۶۰۰	۱۵۰۰		دوغاب
۳۵	۳۰۰۰۰	۰٫۲	-	-	۲۶۰۰		پوشش بتنی
-	۲۵۰۰۰	۰٫۲	-	-	۳۶۴		ساختمان
۴۵۰ - ۴۰۰	۲۵۰۰۰	۰٫۲	-	-	۲۴۰۰		پی



شکل ۳- نقاط اندازه‌گیری تغییر مکان

۴- تحلیل مدل زمین بکر

در حالت مدل پایه یعنی زمین بکر علاوه بر تحلیل‌های عددی، پروفیل نشست سطح زمین در مقطع عرضی با استفاده از روابط نیمه‌تجربی برای مقایسه با نتایج مدل عددی بدست خواهد آمد. در این روش با استفاده از تحقیقات پک (Peck) می‌توان منحنی نشست سطح زمین در اثر اجرای تونل را با منحنی توزیع گوسی مطابق گزاره‌ی (۱) زیر نمایش داد [11]:

$$S_v = s_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

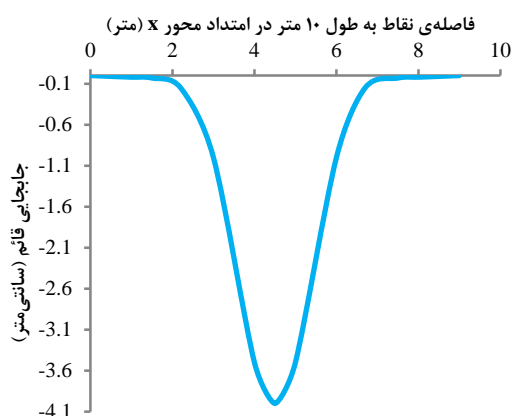
برای تعیین ضریب i در خاک‌های مختلف، مقادیری توسط

محققان پیشنهاد شده است. در تحقیق از مقدار عددی $i = (0.4 \approx 0.45) \times Z_0$ که برای خاک‌های ماسه‌ای است استفاده شده است. Z_0 (عمق محور تونل از سطح زمین) نیز ۲٫۵ برابر قطر حفاری (D) انتخاب شده است. حجم گودال نشست (V_s) پدید آمده در سطح زمین در واحد متر تونل، با انتگرال‌گیری از گزاره‌ی (۱) بصورت گزاره‌ی (۲) است. معمولاً این رابطه بر حسب درصدی از حجم خاک حفاری شده در داخل تونل بصورت گزاره‌ی (۳) بیان می‌شود [11]:

$$V_s = \sqrt{2\pi} i S_{max} \quad (2)$$

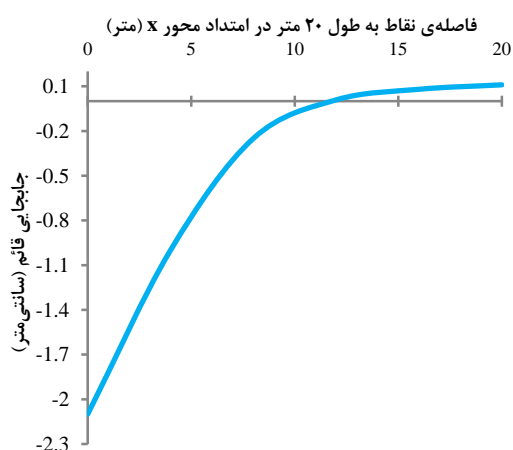
$$V_s = V_1 \pi \frac{D^2}{4} \quad (3)$$

پی‌های نواری (۲۵ میلی‌متر) می‌توان بیان نمود با این روش، مقادیر نشست ایجاد شده از مقادیر مجاز بیش‌تر است. بنابراین استفاده از این روش اجرا منجر به ایجاد خسارت در سازه‌های سطحی خواهد شد. در مطالعه‌ی موردی این تحقیق موقعیت پی ساختمان در بالای تونل نبوده بلکه با فاصله از محور تونل قرار گرفته است (شکل ۳).



شکل ۴- پروفیل نشست سطح در تحلیل عددی زمین بکر

شکل ۵، پروفیل نشست سطح زمین در موقعیت پی ساختمان ۸ طبقه را نشان می‌دهد. پروفیل نشست اختلاف تقریبی ۲۱ میلی‌متری را برای موقعیت قرارگیری پی در تحلیل زمین بکر نشان می‌دهد. برای ارزیابی پروفیل نشست کلی مدل که با روش عددی محاسبه شده، این پروفیل و مقادیر نشست حداکثر با روابط نیمه‌تجربی محاسبه می‌شود.



شکل ۵- پروفیل نشست در موقعیت پی در تحلیل عددی

ضریب کاهش حجم (V_i) وابسته به شرایط زمین و روش حفاری است. به عنوان مثال در روش‌های مکانیزه با اعمال فشار به جبهه‌کار با ماشین‌های حفار دوغابی و تعادل فشار زمین، آزادسازی تنش و ضریب V_i (کمتر از یک درصد) کاهش می‌یابد. در این تحقیق تحلیل‌ها در چهار گروه انجام شده است:

- تحلیل عددی زمین بکر: در این تحلیل، نشست سطح زمین و تغییر مکان محیط اطراف بدون حضور سازه‌ی سطحی و تنها در اثر حفاری تونل محاسبه شده است.
- تحلیل اندرکنشی تونل و پی سازه‌ی سطحی: در این تحلیل علاوه بر تونل، پی سازه‌ی سطحی نیز به مدل اضافه و پروفیل تغییر مکان سطح با در نظر گرفتن سختی پی محاسبه شده است.
- تحلیل برهمکنشی تونل و پی سازه با در نظر گرفتن اثر وزن سازه: در این تحلیل علاوه بر لحاظ کردن سختی پی، وزن سازه‌ی سطحی قبل از انجام تحلیل‌های حفاری تونل به پی اعمال شده و سپس پروفیل‌های نشست سطح زمین محاسبه شده است.
- تحلیل زمین بکر با استفاده از روابط نیمه‌تجربی: در این قسمت با توجه به روابط نیمه‌تجربی، پروفیل نشست سطح زمین محاسبه شده است.

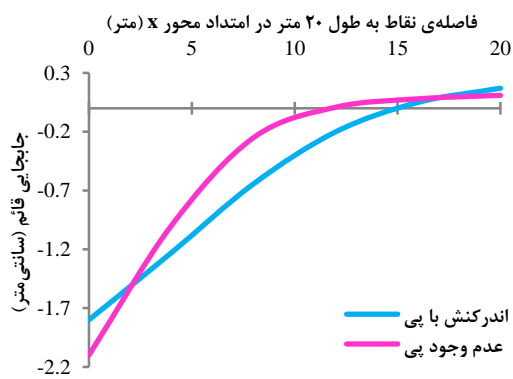
یکی از روش‌های ارزیابی خسارت‌های وارد شده بر سازه‌های سطحی ناشی از عملیات حفاری تونل، برآورد صدمات سازه بر اساس نشست‌های پیش‌بینی شده از تحلیل‌های زمین بکر است. این نوع تحلیل‌ها مستقل از نوع سازه و شرایط سطح زمین است؛ بنابراین برای تخمین اولیه بسیار کارآمد است. در این تحلیل‌ها، نشست‌های بدست آمده از تحلیل زمین بکر را در مدلی مجزا تحت تاثیر بار و ظرفیت سازه، اعمال و نشست‌ها تحت تاثیر عوامل سطحی ارزیابی می‌شود. نتایج عمومی تحلیل مدل برای حالت زمین بکر در ادامه ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین تغییر مکان سطح زمین برابر ۴۰ میلی‌متر در وسط مدل است. یعنی اگر سازه‌ای در بالای تونل قرار داشته باشد برای ارزیابی رفتار آن سازه در اثر حفاری تونل، باید در یک تحلیل مجزا تحت نشست برابر ۴۰ میلی‌متر قرار داده شود. با یک قضاوت کلی و مقایسه‌ی این مقدار با نشست مجاز

۵- نتایج تحلیل مدل‌های اندرکنشی

در مسائل ژئوتکنیکی لحاظ کردن برهمکنش سبب پیچیدگی بیش‌تر و همچنین واقعی‌تر شدن مدلسازی خواهد شد. با این وجود در مواردی که نیاز به دقت محاسباتی بالا نیست یا تحلیل‌ها برای امکان‌سنجی روش اجرا انجام می‌گیرد، مدل‌های غیر اندرکنشی برتری خواهد داشت. در محاسبات نهایی پروژه لحاظ کردن برهمکنش بین خاک و سازه و همچنین بین تونل و سازه‌ی سطحی از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا امکان پیش‌بینی واقعی نشست‌ها را فراهم می‌کند. برای انجام تحلیل‌های برهمکنشی به مدل زمین بکر، پی ساختمان نیز اضافه شده است. در این حالت اثر سختی پی بر پروفیل نشست سطح و نیز تغییر شکل پی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای بررسی بهتر اثر سختی پی بر تغییر شکل‌های حالت زمین بکر، پروفیل نشست خاک در زیر پی در دو حالت حضور پی و عدم حضور آن در شکل ۸ نشان داده شده است. وجود پی، باعث افزایش سختی خاک و کاهش جابجایی در فواصل کمتر از ۲ متر شده است و پس از تقاطع دو منحنی وجود پی سبب افزایش تنش‌های القایی و در نتیجه افزایش نشست شده است. از فواصل تقریبی ۱۶ متر به بعد تقریباً نشست زمین در دو منحنی مشابه است.



شکل ۸- پروفیل نشست در موقعیت پی

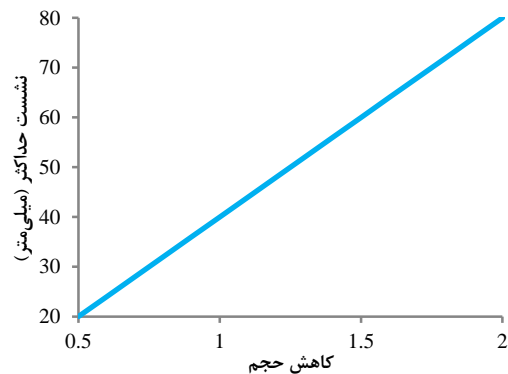
با لحاظ کردن سختی پی بر پروفیل نشست، دو تغییر در مقدار و نحوه‌ی تغییر شکل سطح به وجود آمده است. تغییر اول، کاهش نشست حداکثر در گوشه‌ی پی به اندازه‌ی ۲/۱ میلی‌متر است. همچنین نحوه‌ی نشست زیر پی نیز از

در شکل ۶ مقدار آزادشدگی نشست بر اساس همگرایی مدل صورت گرفته است. در این خصوص از روابط تجربی برای تعیین نسبت تغییر مکان به تغییر مکان کل با توجه به گام حفاری کمک گرفته شده است.

$$D = 9.15 M$$

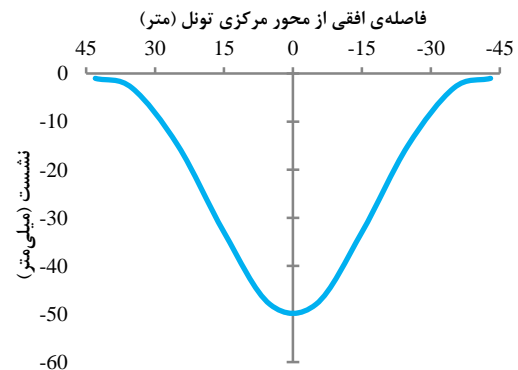
$$Z_0 = 2.5 \times D = 23$$

$$I = 0.45 \times Z_0 = 10.35$$



شکل ۶- تغییرات ضریب کاهش حجم با نشست حداکثر

ملاحظه می‌شود نشست حداکثر پیش‌بینی شده با روابط نیمه‌تجربی برابر ۵۰ میلی‌متر و در حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از مقادیر محاسبه شده با روش عددی است. علت این اختلاف را می‌توان در فرضیات روش‌های نیمه‌تجربی یافت. در این روش فرض بر آن است که هندسه‌ی تونل کاملاً دایروی است و در یک محیط همگن مومسان قرار گرفته است. اما نکته‌ی قابل توجه در مقایسه‌ی این دو روش این است که روش‌های تجربی بدلیل فرضیات به کار رفته، همواره نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهند (شکل ۷).



شکل ۷- پروفیل نشست کلی سطح در تحلیل نیمه‌تجربی

بر تغییر مکان زمین بررسی شده است. اثر تغییرات عمق پی ساختمان، عمق قرارگیری تونل و فاصله‌ی جانبی میان تونل و ساختمان به عنوان مهم‌ترین پارامترهای هندسی موثر مورد تحلیل قرار گرفته است. در این پروژه سطح مقطع و شکل تونل با مطالعات مهندسی انتخاب شده است؛ بنابراین بررسی این پارامترها برای این پروژه ضروری نیست.

در فضاهای شهری، عمق حفاری تونل به عوامل متعددی بستگی دارد. از طرفی، اعماق حفاری کمتر از حدی مشخص، به ویژه در روند حفاری مکانیزه، ناپایداری محیط و خساراتی جبران‌ناپذیر بر سازه‌های سطحی را به دنبال دارد. از طرف دیگر، اعماق حفاری بیش از حدود معمول، عدم امکان اجرا، مشکلات کارگاهی، افزایش هزینه‌ها و مشکلات دوره‌ی بهره‌برداری را به دنبال دارد.

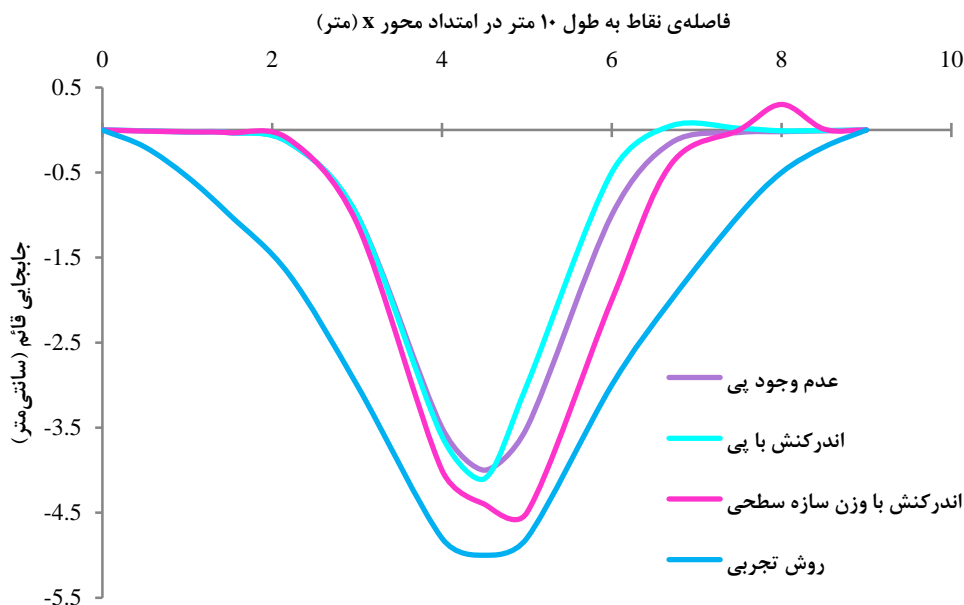
یکی دیگر از مشکلات مربوط به عمق حفاری حضور تاسیسات زیرزمینی است که گاه عدم حفاری در عمقی مشخص را تحمیل می‌نماید. در مسیر عبوری تونل خط ۲ متروی مشهد ساختمان‌های مرتفع با تعداد طبقات زیرزمینی مختلف حضور دارد. همچنین سازه‌های بسیاری نیز در حال ساخت هستند. بنابراین ضمن بررسی اثر تغییرات عمق پی سازه‌ها بر نشست حاصل از حفاری، شاید بتوان نتایج قابل تعمیم به طول مسیر را نیز یافت.

حالت منحنی گوسی خارج شده و حالت صاف‌تری به خود گرفته است. این تغییرات و همچنین کاهش نشست به سختی پی بستگی دارد؛ به طوری که هر چه پی سخت‌تر باشد، پروفیل نشست دارای انحنای کمتر بوده و از مقدار حداکثر نشست نیز کاسته می‌شود.

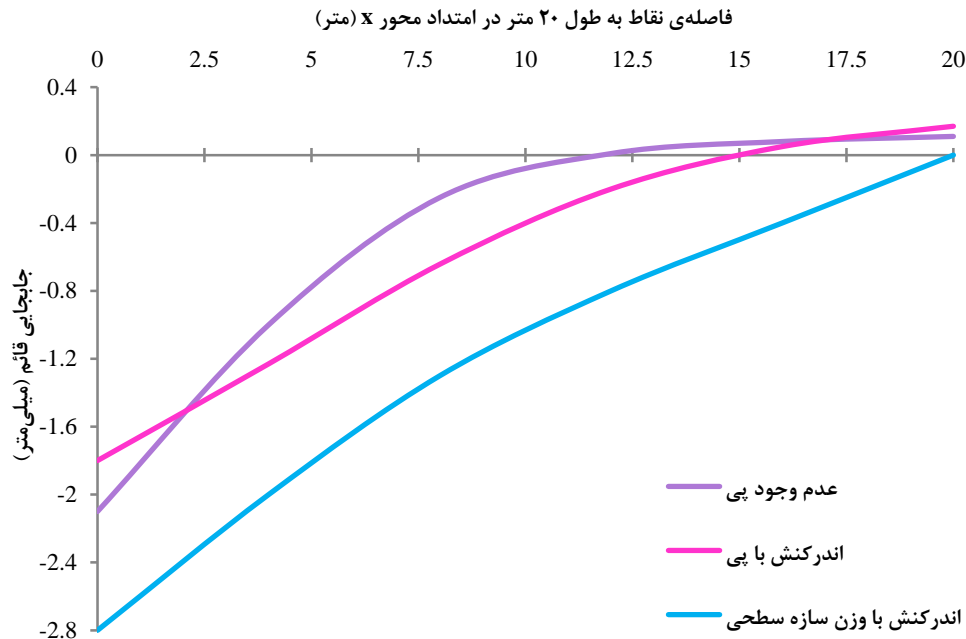
از دیگر مواردی که با حضور سازه‌ی سطحی و لحاظ کردن برهمکنش آن با تونل، منجر به بهبود شرایط محیط می‌شود، وزن سازه است. شکل ۹، پروفیل نشست سطح زمین را در این حالت در مقایسه با سایر تحلیل‌ها نشان می‌دهد. حداکثر نشست سطح در بالای تونل در حالتی که اثر وزن لحاظ شده است، برابر با ۴۴ میلی‌متر است. این مقدار در مقایسه با مدل قبل ۳ میلی‌متر افزایش را در محل حداکثر نشست نشان می‌دهد. همچنین در پی یعنی محل اعمال بار نیز نشست‌ها به طور محسوسی افزایش یافته است. شکل ۱۰، نشست سطح در مجاورت پی را نشان می‌دهد. اختلاف ۸ میلی‌متری نشست گوشه‌ی پی در هر دو حالت، نشانگر اهمیت وزن سازه‌ی سطحی به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار برهمکنش تونل و سازه‌ی سطحی است.

۶- تحلیل پارامتریک

در این پژوهش اثرات پارامترهای هندسی تونل و ساختمان



شکل ۹- پروفیل نشست در سطح زمین در تحلیل‌ها



شکل ۱۰- پروفیل نشست در موقعیت پی در تمام تحلیل‌ها

تغییر شکل، تفسیر روند تغییرات نمودار را میسر می‌کند. شکل ۱۲، تغییر شکل بیضی‌گون شماتیک با گسترش در جهت قطر افقی و شکل ۱۳ گسترش تغییر شکل بیضی‌گون در جهت قطر قائم را نشان می‌دهد.

برای بررسی رفتار نمودارهای تغییر مکان نقاط درونی زمین در برابر تغییرات عمق حفاری تونل توجه به نکات کلیدی زیر ضروری است:

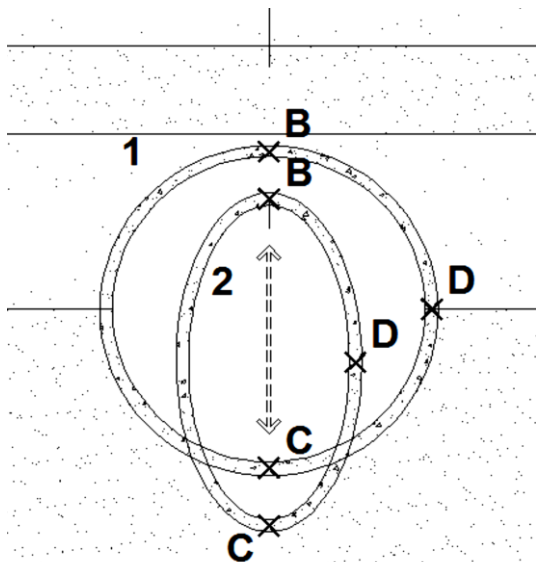
- به طور کلی افزایش عمق حفاری تونل، به دلیل افزایش فشار سربار، تغییر مکان‌های اطراف دهانه‌ی حفاری را افزایش می‌دهد. همچنین از آن‌جا که تغییر مکان‌ها از دهانه‌ی حفاری به سمت سطح زمین مستهلک می‌شود؛ بنابراین با افزایش عمق، نشست تاج تونل روندی افزایشی دارد.
- تغییر مکان‌های نقاط درونی زمین با محیط حفاری تونل متناسب است. یعنی آهنگ تغییر شکل‌های حاصل از حفاری در مصالح دانه‌ای و مصالح چسبنده متفاوت است. به طور کلی نشست در خاک‌های چسبنده به دلیل قوی‌تر بودن خاصیت شکل‌گیری گنبد فشار نسبت به خاک‌های دانه‌ای کمتر است. همچنین اگر دهانه‌ی حفاری شامل چند لایه خاک

پارامتری که از یک طرف بر پایداری سازه‌ی مجاور و از طرف دیگر بر نشست حاصل از حفاری موثر است، فاصله‌ی جانبی موجود بین دهانه‌ی حفاری و پی سازه‌ی مجاور است. در سازه‌های دارای پی عمیق (شمع)، گاه فاصله‌ی جانبی کم بین دهانه‌ی حفاری و سازه‌ی مجاور، خطرات زیادی به دنبال دارد. از طرف دیگر در محیط‌های شهری، محدودیت‌های زیادی برای دامنه‌ی فواصل مناسب حفاری وجود دارد و گاه فاصله نمی‌تواند از حدی مشخص بیشتر شود.

به دلیل عبور تونل خط ۲ متروی مشهد از مقابل سازه‌های با فواصل متفاوت، برای بررسی فواصل بحرانی، مقادیر تغییر مکان نقاط درونی و سطحی در مقابل تغییرات عمق حفاری تونل مورد بررسی قرار گرفته است. جهت‌های قراردادی تغییر مکان قائم و جانبی نقاط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نشست (در نقاط A, B, C و E) با علامت مثبت و تورم (نقطه‌ی D) با علامت منفی نشان داده شده است.

برای تفسیر رفتار نمودارهای تغییر شکل باید مکانیسم تغییر شکل تونل را شناخت. تغییر شکل تونل در حفاری مکانیزه معمولاً به صورت بیضی‌گون است و شناخت جهت

شود، وزن مخصوص خاک معادل، کمتر از وزن مخصوص لایه‌های پنج‌گانه خاک محل خواهد بود؛ بنابراین ضمن فاصله گرفتن از ساختمان، فشار قائم اعمالی بر تونل توسط لایه‌های فوقانی افزایش می‌یابد.



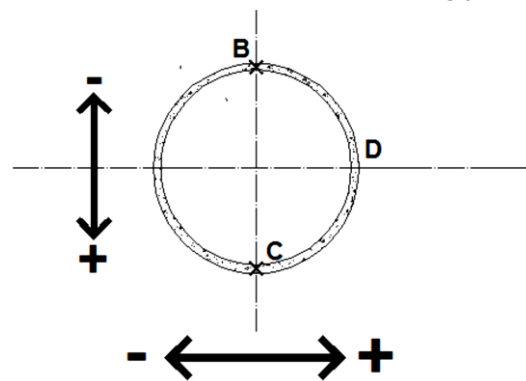
شکل ۱۳- تغییر شکل بیضی گون تونل با گسترش در جهت قطر قائم، حالت اولیه: (۱) و حالت تغییر شکل یافته: (۲)

تغییرات پارامتر عمق حفاری تونل در بازه‌ی ۵ تا ۲۵ متر مدلسازی شده و اثر تغییرات آن بر مقادیر تغییر مکان‌های نقاط درونی زمین مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در هنگام تغییر عمق تونل، فشار تزریق جبهه‌کار متناسب با عمق در مدل عددی افزایش یافته است. اعماق مذکور مربوط به تاج تونل است. عمق تاج تونل در مقطع مورد نظر تونل خط ۲ متروی مشهد ۱۲٫۲ متر است.

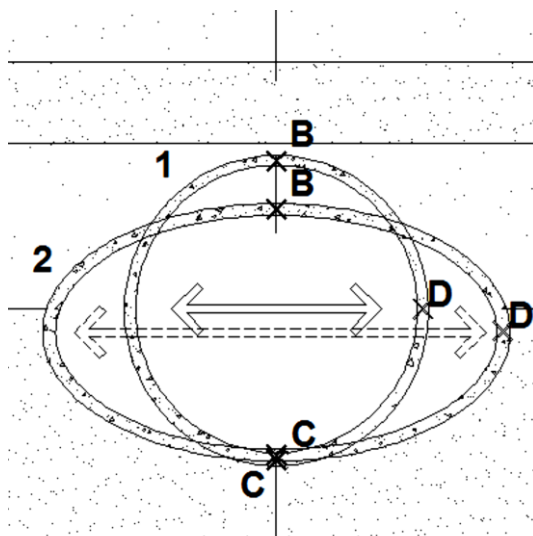
شکل ۱۴، مقادیر تغییر مکان قائم در برابر تغییرات عمق حفاری را در نقاط A, B, C و E نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضمن افزایش عمق حفاری به دلیل افزایش فشار سربار، نشست تاج تونل به طور کلی افزایش می‌یابد. در اعماق بیش‌تر از ۱۷ متر ابتدا کاهش نشست و سپس روند تقریباً ثابتی مشاهده می‌شود. دلیل اصلی کاهش نشست تغییر محیط حفاری از خاک دانه‌ای به خاک چسبنده است و به دلیل خاصیت گنبد فشار شدن خاک در تاج تونل، نشست تاج را به صورت موضعی کاهش می‌دهد.

باشد، توجه به این نکته که بخش عمده‌ی دهانه‌ی دانه‌ای است یا چسبنده، بر بررسی تغییر مکان‌های نقاط اطراف دهانه‌ی حفاری موثر است.

- باید توجه داشت در اغلب موارد حفاری تونل تغییر شکل‌های بیضی‌گون را به دنبال دارد؛ بنابراین لایه‌های اطراف دهانه‌ی حفاری می‌توانند بر روند تغییر شکل بیضی‌گون و گسترش آن در جهت قطر قائم یا افقی موثر باشد.



شکل ۱۱- جهت قراردادی تغییر مکان قائم و جانبی نقاط



شکل ۱۲- تغییر شکل بیضی گون تونل با گسترش در جهت قطر افقی، حالت اولیه: (۱) و حالت تغییر شکل یافته: (۲)

علاوه بر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین برج و تونل (به عنوان عامل موثر بر تغییرات مقادیر تغییر مکان نقاط درونی خاک)، اگر بار ساختمان با وزن خاکی هم حجم آن معادل

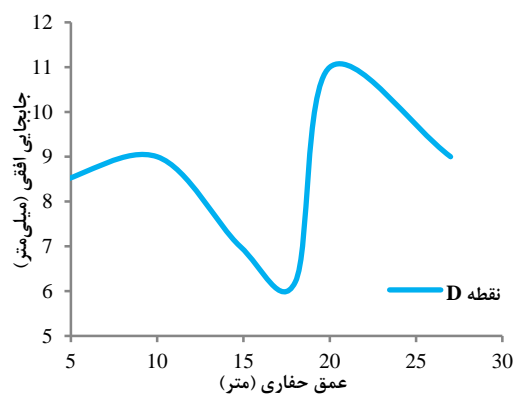


شکل ۱۴- تغییرات نشست در برابر تغییرات عمق حفاری برای نقاط A, B, C و E

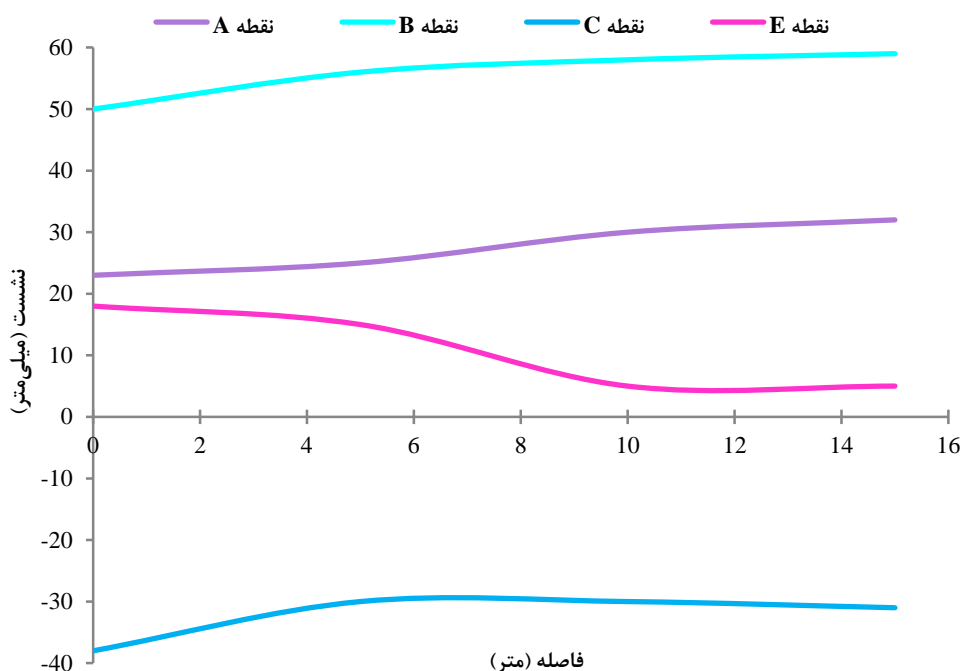
کمترین فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان ۱۳٫۵ متر است. از آنجا که تغییرات فاصله‌ی بین تونل و ساختمان تغییرات گسترش تنش زمین را به دنبال خواهد داشت، همواره یکی از عوامل موثر بر تغییرات مقادیر تغییر مکان‌های حاصل از حفاری است. از طرف دیگر در محیط‌های شهری حضور ساختمان‌های متعدد، محدوده‌ی قرارگیری تونل را محدود می‌کند، زیرا گاه نزدیک شدن به پی‌های عمیق ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان در بازه‌ی صفر تا ۲۰ متر مدلسازی و اثر آن بر تغییر مکان نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۶، مقادیر تغییر مکان قائم در نقاط A, B, C و E در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل را نشان می‌دهد. از آنجایی که نقطه‌ی E در ناحیه‌ی اعمال بار ساختمان است، به صورت همزمان با افزایش عمق حفاری، افزایش نشست در آن مشاهده شده است. نکته‌ی قابل توجه این است که آهنگ تغییرات برای اعماق حفاری کمتر از پی ساختمان که موضع اعمال بار ساختمان بر خاک است، کمتر از آهنگ تغییرات در اعماق بیش‌تر از عمق پی است که کاملاً بر تئوری گسترش تنش‌ها در خاک استوار است.

شکل ۱۵ تغییر مکان جانبی در برابر عمق حفاری را برای نقطه‌ی D نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضمن افزایش عمق حفاری، جابجایی افقی کاهش می‌یابد. در فاصله‌ی جانبی معادل ۲۰ و ۲۵ متر، افزایش نشست سطحی آهنگ بیشتری دارد. به این دلیل که در این فاصله، بخش عمده‌ی محیط حفاری خاک دانه‌ای است و خاک دانه‌ای در اعماق کم و با ضریب تغییر شکل کمتر نسبت به لایه‌های دیگر بوده است.



شکل ۱۵- تغییر مکان جانبی نقطه‌ی D در برابر تغییرات عمق حفاری



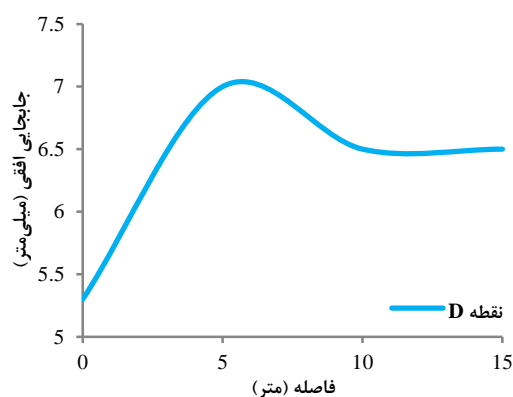
شکل ۱۶- تغییرات نشست در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل برای نقاط A، B و C و E

عمق پی ساختمان ۴ تا ۴٫۵ متر است. تغییرات عمق پی ساختمان نیز مشابه تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل بر گسترش تنش درونی زمین موثر است و همواره یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان نشست حاصل از حفاری است. در این پژوهش، تغییرات عمق پی سازه در بازه‌ی صفر تا ۳۰ متر یعنی از حالت استقرار ساختمان در سطح زمین تا فرض قرارگیری پی سازه در تراز پایین‌تر از کف تونل، مدلسازی و اثرات آن بر تغییرات مقادیر تغییر مکان نقاط درونی زمین مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۸ تغییرات نشست نقاط A، B، C و E در برابر تغییرات عمق ساختمان را نشان می‌دهد. تا زمانی که عمق پی ساختمان که موضع اصلی انتقال بار به خاک است کمتر از عمق تونل است، با افزایش عمق و در نتیجه نزدیک شدن ساختمان به تونل، روند تغییرات نشست در سطح زمین و تاج تونل و تورم کف تونل افزایشی است. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی تونل و در نتیجه تقویت تغییر شکل بیضی‌گون با گسترش در جهت قطر قائم است.

شکل ۱۹ تغییر مکان جانبی نقطه‌ی D در برابر تغییرات عمق ساختمان را نشان می‌دهد. آنگونه که مشاهده

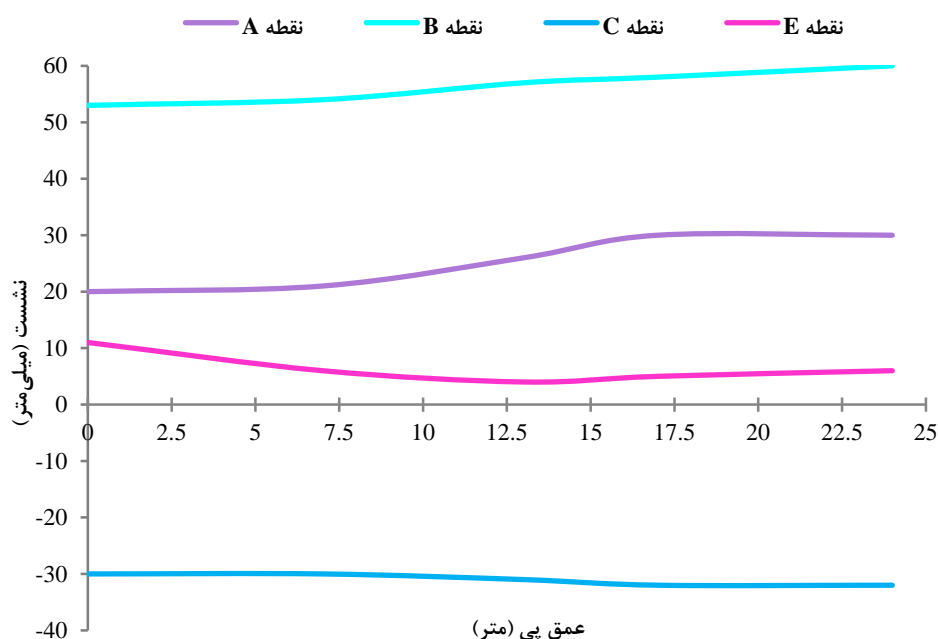
شکل ۱۷، نمودار مقادیر تغییر مکان جانبی نقطه‌ی D در برابر تغییرات فاصله‌ی بین تونل و ساختمان را نشان می‌دهد. ضمن بررسی نمودارهای تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان نکته‌ی قابل توجه این است که افزایش فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل، ابتدا افزایش نشست سطحی و نشست تاج تونل را به دنبال داشته و تقریباً پس از فاصله‌ای معادل یک قطر تونل به سطح ثابتی می‌رسد.



شکل ۱۷- تغییر مکان جانبی نقطه‌ی D در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل

کاهش نسبی فشار جانبی، روند تغییر شکل بیضی‌گون تونل به صورت نسبی در جهت قطر افقی گسترش می‌یابد. بنابراین کاهش نسبی نشست در سطح زمین و تاج تونل و نزدیک شدن نقطه‌ی D به ساختمان مشاهده شده است.

می‌شود، نقطه‌ی D از ساختمان دور می‌شود. البته موضع اصلی افزایش فشار بخش فوقانی تونل است، بنابراین آهنگ تغییرات تورم کف تونل کمتر از نشست در سطح زمین و تاج تونل است. پس از بیش‌تر شدن عمق پی از عمق تونل، با

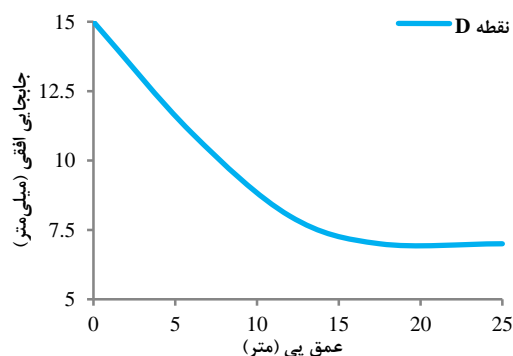


شکل ۱۸- تغییرات نشست در برابر تغییرات عمق پی ساختمان برای نقاط A ، B ، C و E

منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در شکل ۲۰ ارائه شده است. در این شکل، شیب منحنی تغییرات نشست ثابت است و به ازای افزایش مقدار ثابتی به وزن سازه، نشست نیز به صورت متناسب با آن زیاد می‌شود. بدین معنی که برای یک ساختمان ۵ طبقه نیز می‌توان از روی این منحنی میزان نشست را پیش‌بینی نمود. منظور از ساختمان صفر طبقه، حالت سطح آزاد (بدون حضور ساختمان) است. دلیل شکست منحنی افزایش سختی خاک است که با افزایش طبقات بیشتر شده و با بیش از ۲ طبقه‌ی ساختمان شیب تغییرات را کمتر کرده است.

نمودار منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین در شکل ۲۱، نشان داده شده است. مشخص است که متناسب با افزایش وزن ساختمان، جابجایی‌های افقی افزایش یافته و شکل منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین در خارج از محدوده‌ی پی ساختمان از منحنی جابجایی افقی در حالت

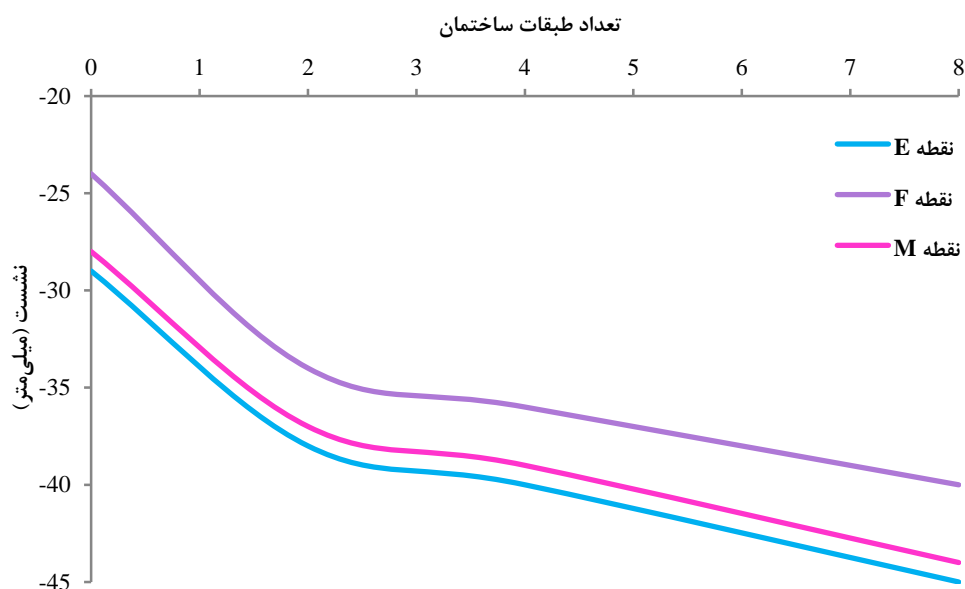
با مقایسه‌ی شکل‌های مربوط به تغییرات پارامترهای هندسی واضح است نشست نسبت به تغییرات عمق بیش از فاصله‌ی جانبی حساس است؛ زیرا تغییرات تنش درونی زمین در جهت قائم نسبت به جهت افقی بیش‌تر است.



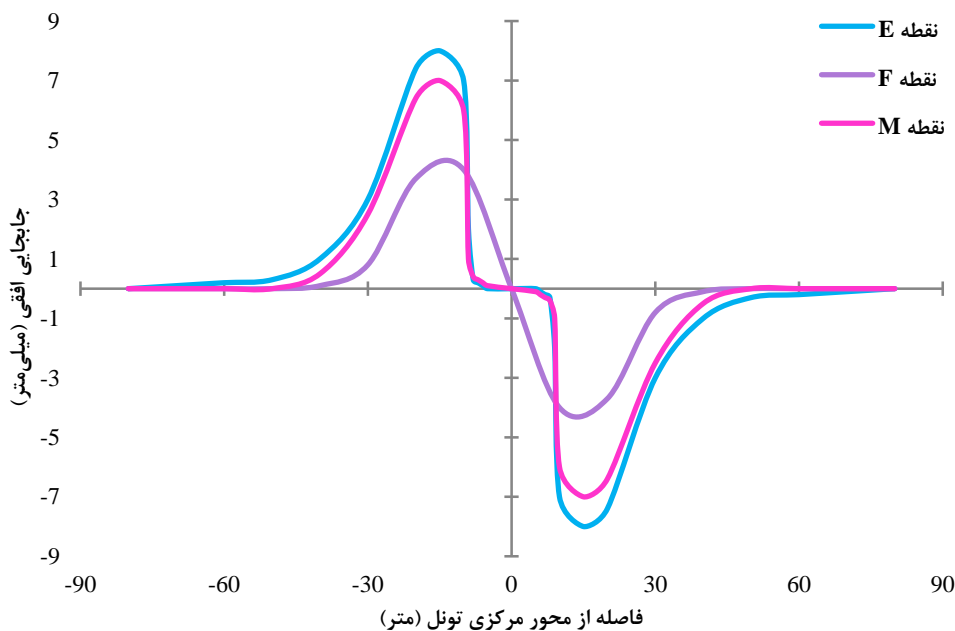
شکل ۱۹- تغییر مکان جانبی نقطه‌ی D در برابر تغییرات عمق پی ساختمان

ساختمان و دهانه‌ی حفاری، با افزایش عمق، روندی کاهشی در نشست نقطه‌ی E در مقابل افزایش عمق ساختمان مشاهده شده است. با افزایش عمق پی ساختمان در برابر عمق تونل، روند تغییرات به صورت نسبی نزولی شده است.

سطح آزاد پیروی می‌نماید. در محدوده‌ی پی به علت سختی آن، جابجایی‌ها به صفر نزدیک شده‌اند. در نمودارها با افزایش عمق، تا وقتی پی ساختمان بالاتر از تاج تونل است، به سبب افزایش فشردگی خاک بین



شکل ۲۰- منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با تعداد طبقات مختلف در نقاط E ، F و M



شکل ۲۱- منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین در نقاط E ، F و M

۷- نتیجه‌گیری

زمین و تاج تونل و تورم کف تونل روند افزایشی دارد. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی تونل و در نتیجه تقویت تغییر شکل بیضی‌گون با گسترش در جهت قطر قائم است.

تغییر عمق بیش از تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و سازه‌های سطحی بر نشست موثر است. لحاظ کردن اثر سختی پی سبب شده مقادیر نشست حداکثر در سطح زمین به اندازه‌ی ۲/۴ درصد و نیز مقادیر نشست در زیر پی ساختمان به مقدار ۱۰ درصد کاهش یابد. این نتایج بیانگر آن است که لحاظ کردن سختی پی باعث کاهش نشست‌ها در مقایسه با حالت زمین بکر می‌شود.

با اعمال وزن ساختمان به مدل، شکل پروفیل نشست تغییر کرده و انحنای کمتری به خود می‌گیرد. این تغییر شکل باعث افزایش چشمگیر مقادیر نشست به خصوص نشست‌های زیر پی تا حدود ۴۰ درصد شده است.

مقادیر نشست برآورد شده توسط روابط نیمه‌تجربی حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از نتایج روش عددی در حالت زمین بکر است که این اختلاف به دلیل فرضیات ساده‌کننده روش‌های نیمه‌تجربی است.

در پروژه‌ی متروی مشهد، حداکثر نشست پی ۲۸ میلی‌متر خواهد بود که نیازمند اتخاذ تدابیر خاص از جمله عملیات تحکیم چتری یا تزریق از سطح است.

در این پژوهش با توجه به تحلیل‌های انجام شده، مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- به دلیل افزایش فشار سربار، با افزایش عمق حفاری نشست تاج تونل افزایش می‌یابد. در اعماق بیش از ۱۲ متر ابتدا کاهش نشست و سپس روند تقریباً ثابتی مشاهده می‌شود. دلیل اصلی کاهش نشست تغییر محیط حفاری از خاک دانه‌ای به خاک چسبنده است که به دلیل خاصیت گنبد فشار شدن خاک در تاج تونل، نشست تاج را به صورت موضعی کاهش می‌دهد.
- آهنگ تغییرات نشست برای اعماق حفاری کمتر از پی ساختمان که موضع اعمال بار ساختمان بر خاک است، کمتر از آهنگ تغییرات در اعماق بیش‌تر از عمق پی ساختمان است.
- افزایش فاصله‌ی جانبی بین سازه و تونل، ابتدا افزایش نشست سطحی و نشست تاج تونل را به دنبال دارد و تقریباً پس از فاصله‌ای معادل یک قطر تونل روند ثابتی داشته است. بیش‌ترین افزایش نشست در بازه‌ی فاصله‌ی بین ۰ تا ۵ متر مشاهده شده است؛ زیرا در این بازه بیش‌ترین تغییرات فشار قائم و جانبی رخ داده است.
- تا زمانی که عمق پی ساختمان کمتر از عمق تونل است، ضمن افزایش عمق و در نتیجه نزدیک شدن ساختمان به تونل، روند تغییرات نشست در سطح

۸- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
V_l	%	ضریب کاهش حجم	y	m	فاصله‌ی افقی از محور تونل
V_s	m^3	حجم گودال نشست	D	m	قطر تونل
i	m	فاصله‌ی افقی از محور تونل تا نقطه‌ی عطف منحنی گودال نشست			
S_v	cm	نشست قائم در فاصله‌ی مشخص نسبت به محور تونل			
Z_0	m	فاصله‌ی محور مرکزی تونل از سطح زمین			
S_{max}	cm	حداکثر نشست قائم روی محور تونل			

۹- منبع‌ها

- [1] Bernat, S., & Combou, B. (1998). Soil-Structure Interaction in Shield Tunnelling in Soft Soil. *Computers and Geotechnics*, 22(3-4), 221-242. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X\(98\)00007-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X(98)00007-X).

- [2] Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B. (1996). Prediction of Ground Movements and Assessment of Risk of Building Damage due to Bored Tunnelling. *International Conference of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 713-718). London: CRC Press. ISBN: 9054108568.
- [3] Mroueh, H., & Shahrour, I. (2002). Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Interaction Between Tunneling and Pile Foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(3), 217-230. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.194>.
- [4] Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application*. London: Thomas Telford. ISBN: 9780727727831.
- [5] Potts, D. M., & Addenbrooke, T. I. (1997). A Structure's Influence on Tunnelling-Induced Ground Movements. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 125(2), 109-125. <http://dx.doi.org/10.1680/igeng.1997.29233>.
- [6] Burd, H. J., Houlby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G. (2000). Modelling Tunnelling-Induced Settlement of Masonry Buildings. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 143(1), 17-29. <http://dx.doi.org/10.1680/geng.2000.143.1.17>.
- [7] Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1-21. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:1\(1\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1)).
- [8] Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). *Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures*. London: Blackie. ISBN: 9780412009112.
- [9] Klar, A., & Elkayam, I. (2010). Direct and Relaxation Methods for Soil-Structure Interaction due to Tunneling. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 11(1), 9-17. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A0900069>.
- [۱۰] سازمان قطار شهری مشهد و حومه. (۱۳۸۷). گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیکی، حد فاصل ایستگاه منطقه‌ی طبرسی و محدوده‌ی پارک کوهسنگی.
- [11] Peck, R. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 225-290). Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos.

برآورد عرض مناسب فضای استخراجی در روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)

مهدی نجفی^{۱*}؛ سید محمد اسماعیل جلالی^۲؛ رضا خالوکاکایی^۳

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه یزد

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۴/۲۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
زغال سنگ پهنه‌ی استخراجی رگرسیون چند متغیره مزینو	تعیین عرض مناسب پهنه‌های استخراجی، یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی در تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (<i>UCG: Underground Coal Gasification</i>) است. این پارامتر تاثیر مستقیمی بر اقتصادی بودن طرح دارد. کوچک در نظر گرفتن عرض پهنه‌های استخراجی، سبب افزایش هزینه‌های حفاری شده و بزرگ در نظر گرفتن آن سبب می‌شود فرآیند <i>UCG</i> نه تنها از نظر ترکیب گازهای خروجی از کارایی مناسبی برخوردار نباشد، بلکه موجب خاموش شدن راکتور <i>UCG</i> نیز می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع تعیین عرض فضای استخراجی در روش <i>UCG</i> ، در این مقاله با شناسایی عوامل اثرگذار بر عرض فضای استخراجی، یک رابطه‌ی تجربی جدید با کاربرد رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی بر اساس داده‌های برگرفته شده از ۶ مجموعه‌ی <i>UCG</i> که به روش منبع احتراق قابل کنترل پسر و ارایه شده برای برآورد اولیه‌ی عرض مناسب پهنه‌های <i>UCG</i> را تایید می‌نماید. بکارگیری مدل آماری ارایه شده بر روی لایه‌ی زغالی <i>M2</i> مزینوی طبس بیانگر آن است که عرض اولیه‌ی پهنه‌های گاز کردن باید در حدود ۴۵ متر باشد.

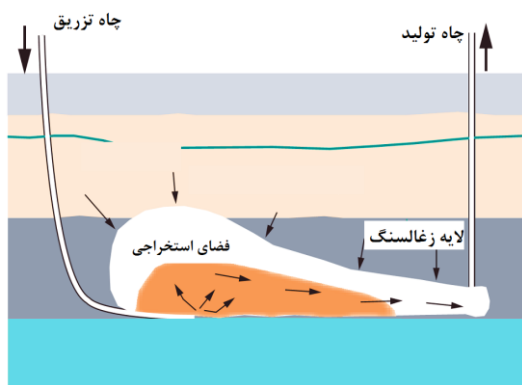
۱- پیشگفتار

پایه (*Room and Pillar*) و جبهه‌کار کوتاه (*Shortwall*) انجام می‌شود. در ایران که اغلب حوضه‌های زغال‌دار دارای ساختمان پیچیده‌ی زمین‌شناسی و هندسی هستند، اغلب معادن زغال سنگ به صورت زیرزمینی و با روش‌های پلکانی معکوس و جبهه‌کار طولانی استخراج می‌شوند. در دنیای امروزی تاکنون تلاش‌های فراوانی به منظور ابداع روش‌ها و فناوری‌های نوین برای استخراج کم‌هزینه‌تر، ایمن‌تر و استفاده‌ی بهینه از زغال سنگ صورت گرفته است. یکی از روش‌هایی که امروزه به دلیل افزایش بازیابی لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های متغیر و در اعماق زیاد، مورد

روش استخراج یک لایه‌ی زغال سنگ با توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین‌ساختی و هندسی لایه‌ی زغال سنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن، امکانات فنی، کاربری زغال سنگ و ملاحظات اقتصادی انتخاب می‌شود. به طور معمول کنسارهای زغال سنگ به روش روباز یا زیرزمینی یا ترکیبی از این دو روش استخراج می‌شود. انتخاب روش استخراج روباز و زیرزمینی وابسته به نسبت باطله‌برداری است. استخراج زیرزمینی زغال سنگ به طور معمول به روش‌های جبهه‌کار بلند (*Longwall*)، اتاق و

* یزد؛ صفاییه؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه یزد؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ اتاق ۳۰۲؛ صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵؛ شماره‌ی تلفن: ۳۱۲۳۲۸۳۴-۰۳۵، دورنگار: ۰۳۵-۳۸۲۱۰۹۹۵؛ رایانامه: mehdinajafi@vazd.ac.ir

تزریق و تولید، فضای استخراجی (*Cavity*) ایجاد می‌شود و با گذشت زمان در تمام جهات گسترش پیدا می‌کند. در بخشی از فضای استخراجی *UCG* که بخش فعال یا تولیدی نامیده می‌شود، عملیات سوختن و تبدیل زغال‌سنگ به گاز سنتزی انجام می‌پذیرد. بخش دیگر فضای استخراجی، منطقه‌ی غیر تولیدی است که باید تخریب شود. گازهای ترکیبی از فضای استخراجی ایجاد شده در لایه‌ی زغال‌سنگ به داخل چاه تولید منتقل شده و سپس به سطح زمین هدایت می‌شوند.



شکل ۱- فرآیند کلی روش *UCG* [2]

۲-۱- تکنولوژی اجرای *UCG*

تاکنون روش‌های متعددی برای اجرای *UCG* ارایه شده است، اما امروزه روش‌های مبتنی بر منبع احتراق قابل کنترل پسر (*CRIP: Controlled Retraction*) در *UCG* برای اجرای *UCG* مقیاس تجاری بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش *CRIP* در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور (*LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory*) آمریکا پیشنهاد شده است. در روش *CRIP* دو کاناله، دو چاه به طور موازی در کف لایه‌ی زغال‌سنگ حفاری می‌شود. یکی از چاه‌های افقی به عنوان چاه تزریق و دیگری به عنوان چاه تولید است.

فاصله‌ی بین این دو چاه افقی به عوامل متعددی از جمله ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ بستگی دارد. در این روش، مشعل به صورت پسر حرکت کرده و اکسیدان به صورت پیوسته و یکنواخت تزریق می‌شود. فاصله‌ی بین چاه‌های

توجه بسیاری از بهره‌برداران قرار گرفته، روش تبدیل به گاز زیرزمینی زغال‌سنگ است.

برای اجرای روش *UCG* همانند سایر روش‌های مرسوم معدن‌کاری معیارهایی باید در نظر گرفته شود. از جمله این معیارها می‌توان به ضخامت لایه (۱ تا ۳۰ متر)، شیب لایه (صفر تا ۷۰ درجه)، نوع زغال‌سنگ (*Coal Rank*) (همه انواع زغال‌سنگ‌ها)، خاکستر لایه (کمتر از ۶۰ درصد)، پراکندگی گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها و ذخیره‌ی لایه (بیش‌تر از ۳/۵ میلیون تن) اشاره نمود [1] و [2].

روش *UCG* نسبت به سایر روش‌های استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ دارای برتری‌های زیادی از جمله پایین بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و عملیاتی و کاهش قابل توجه خطرات ناشی از معدن‌کاری است. با وجود مزایای زیاد، این روش دارای معایبی است که می‌توان به پیچیدگی در طراحی و عملیاتی کردن آن اشاره نمود.

۲- فرآیند تبدیل به گاز زیرزمینی زغال‌سنگ

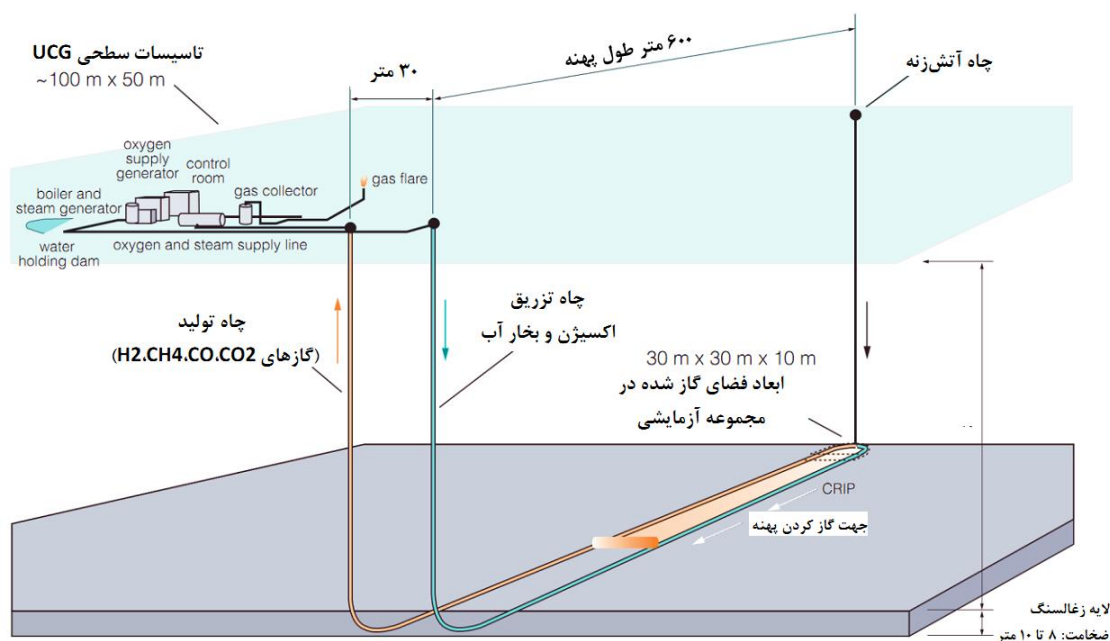
ایده‌ی روش *UCG* برای اولین بار توسط سر ویلیام زیمنس (*Sir William Siemens*)، دانشمند آلمانی، در سال ۱۸۶۸ میلادی پیشنهاد شده است [1]. علاقمندی به کاربرد روش *UCG* به عنوان یک روش جدید در تولید اقتصادی و ایمن انرژی در دهه‌ی اخیر رشد چشم‌گیری پیدا کرده است و اکثر کشورهای تولیدکننده‌ی زغال‌سنگ مانند ایالات متحده آمریکا، روسیه، استرالیا، انگلیس، چین، آفریقای جنوبی، هند، ایرلند، ژاپن، قزاقستان، برزیل، کانادا، نیوزلند، لهستان، اسلواکی، اسلونی، ویتنام، پاکستان، ترکیه، اندونزی و اکراین برنامه‌های گسترده‌ای شامل برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های نیمه‌صنعتی، صنعتی و نیز احداث نیروگاه‌های بزرگ تولید برق بر پایه‌ی *UCG* را در دستور کار خود قرار داده‌اند [1] و [2].

در فرآیند *UCG* همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، ابتدا چاه‌های تزریق (*Injection Well*) و تولید (*Production Well*) تا رسیدن به سطح لایه‌ی زغال‌سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند. سپس اکسیدان (مشمعل بر ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب) به داخل چاه تزریق ارسال می‌شود تا باعث سوختن زغال‌سنگ و تبدیل آن به گاز شود. با شروع عملیات گاز کردن بین چاه‌های

روش *CRIP* موازی دوکاناله در بلاوود کریک (*Bloodwood Creek*) استرالیا که بر روی یک لایه‌ی زغال‌سنگ به ضخامت ۸ تا ۱۰ متر در سال ۲۰۰۸ اجرا شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مشخص است که *UCG* به روش *CRIP* از نظر شکل پهنه‌ها و پایه‌ی زغال‌سنگ بر جای گذاشته شده بین پهنه‌ها شباهت‌های زیادی به روش جبهه‌کاربلند دارد [3].

تزریق یا تولید با چاه آتش‌زدن در روش دوکاناله می‌تواند بیش از ۶۰۰ متر باشد. بنابراین با افزایش فاصله‌ی بین چاه‌ها، مترای حفاری کاهش یافته و به دنبال آن هزینه‌های حفاری به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این روش برای پیشگیری از تاثیر کارگاه‌های مجاور بر روی هم، پایه‌ای بین کارگاه‌ها باقی گذاشته می‌شود [2].

شکل ۲، یکی از پیشرفته‌ترین مجموعه‌های *UCG* به



شکل ۲- شمایی از روش *UCG* از نوع *CRIP* دوکاناله در مجموعه‌ی بلاوود کریک [2]

نهایی پهنه‌های طراحی شده در این مجموعه برابر با ۱۶۰ متر و طول آن‌ها ۱۰۰۰ متر است که در عمق متوسط ۶۰۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است [2].

۲-۲- ملاحظات فنی-اقتصادی *UCG*

در روش *UCG* ابعاد فضای استخراجی و شکل محدوده‌ای که در اثر اجرای فرآیند *UCG* ایجاد می‌شود، بر اقتصادی بودن این روش تاثیر می‌گذارد. شکل فضای استخراجی ایجاد شده در اثر فرآیند *UCG* به شدت تحت تاثیر مجموعه‌ای از عوامل محیطی (عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل)، تنش‌های القایی، شکستگی‌ها، تخریب سقف و ملاحظات کنترل نشست زمین است [4] و [5].

فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید در روش *CRIP*

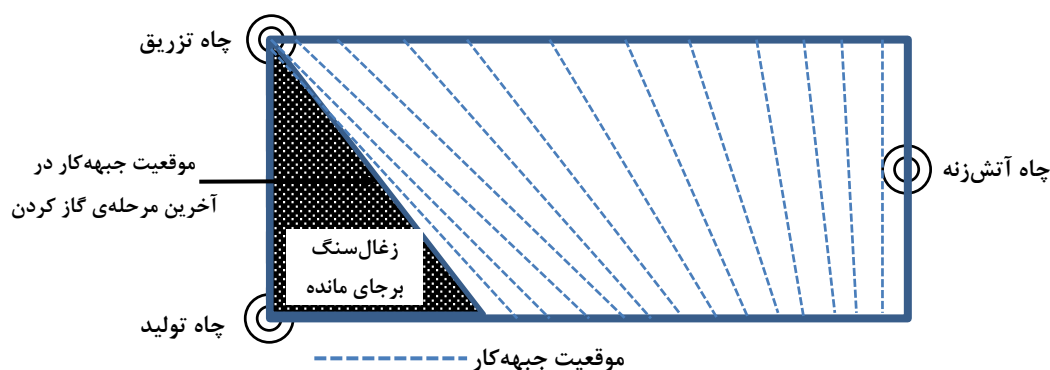
طرح استخراجی این مجموعه شامل سه ردیف چاه تولید و چهار چاه تزریق است. عرض پهنه‌های استخراجی بین هر کدام از چاه‌های تزریق و تولید ۳۰ متر تعیین شده است و پس از استخراج پهنه با عرض ۱۸۰ متر، بین پهنه‌ها یک پایه‌ی زغالی به عرض ۶۰ متر بر جای گذاشته می‌شود. به عبارتی دیگر طرح ارایه شده، مشابه روش *CRIP* سه کاناله است. تاکنون روش *UCG* در مقیاس تجاری به روش سه کاناله اجرا نشده است اما طراحی چند مجموعه‌ی *UCG* برای پیاده‌سازی این روش انجام شده یا در حال انجام است. از آن جمله می‌توان به مجموعه‌ی *Mecsek Hills* در مجارستان اشاره نمود که قرار است عملیات اجرایی آن در سال ۲۰۱۵ به روش *CRIP* سه کاناله آغاز شود. عرض

این روش کمتر از مقدار مناسب آن در نظر گرفته شود، بر اقتصادی بودن روش تاثیر بسزایی می‌گذارد. از مهم‌ترین پارامترهای هزینه‌ای در این روش، هزینه حفاری چاه‌های تزریق و تولید است که با کوچک‌تر در نظر گرفتن عرض پهنه این هزینه افزایش می‌یابد.

در صورتی که عرض پهنه بزرگ‌تر از مقدار مناسب آن در نظر گرفته شود، افت فشار در چاه تولید افزایش می‌یابد. با افزایش افت فشار، میدان سرعت در فضای استخراجی تغییر می‌کند و بر گسترش فضا در جهات مختلف اثر می‌گذارد. مجموعه این عوامل سبب می‌شود جبهه‌کار زغالی به صورت یکنواخت پیشروی نکرده و هر چه از مدت زمان فرآیند بگذرد، این غیر یکنواختی افزایش پیدا می‌کند. بدیهی است در این شرایط در انتهای زمان عملیات استخراج هر پهنه، مقدار زیادی از زغال‌سنگ در اطراف چاه تولید به گاز تبدیل نشود. این شرایط به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

بیانگر محدوده‌ی جبهه‌کار فعال استخراجی است که در آن زغال‌سنگ به گاز تبدیل می‌شود. برای این که همواره در این فاصله، زغال‌سنگ به گاز تبدیل شود، لازم است مقادیر کافی اکسیدان به داخل لایه‌ی زغال‌سنگ تزریق شود و دمای جبهه‌کار بالای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باقی بماند. این امر نیارمند آن است که نرخ تزریق اکسیدان با در نظر گرفتن نشت گاز به داخل طبقات سقف به صورت دوره‌ای تنظیم شود. در تعیین عرض مناسب پهنه‌ی استخراجی (فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید) پارامترهایی از جمله ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ (*Coal Calorific Value*) و میزان آب وارد شده به داخل فضای استخراجی تاثیرگذار هستند. هر چند مقدار آب ورودی به داخل فضای استخراجی توسط فشار تزریق اکسیدان و میزان تخلیه‌ی گازها قابل کنترل است [4] و [5].

تعیین عرض مناسب پهنه‌های *UCG* به روش *CRIP* از جهات زیر حایز اهمیت است: در صورتی که عرض پهنه در



شکل ۳- اثر بزرگ‌تر در نظر گرفتن عرض پهنه بر موقعیت جبهه‌کار استخراجی

ارایه‌ی یک رابطه‌ی جدید برای محاسبه‌ی عرض مناسب پهنه‌های استخراجی *UCG* به روش احتراق قابل کنترل پسرو (*CRIP*) است. این رابطه بر اساس مطالعات انجام گرفته بر روی مجموعه‌های *UCG* دنیا که با روش *CRIP* اجرا شده‌اند، بر حسب تابعی از نفوذپذیری لایه‌ی زغال‌سنگ، ضخامت لایه، عمق لایه، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق (فشار گاز داخل فضای استخراجی) با استفاده از رگرسیون غیر خطی ارایه شده است.

۳- هدف پژوهش

با توجه به مفاهیم بیان شده، تاکنون رابطه‌ی تجربی خاصی در دنیا برای تعیین عرض پهنه در روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ ارایه نشده است. مطالعاتی که در کشور انجام شده است نیز بیشتر در زمینه‌ی مدلسازی نشست گاز از کارگاه‌های استخراج *UCG* [۶]، بررسی پارامترهای موثر بر رشد فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ [۷] و تحلیل پایداری فضای استخراجی در روش *UCG* بوده است [۸]. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش،

Working Group)، برآورد نسبت عرض فضای استخراجی به طول آن در یک لایه‌ی زغال‌سنگ پیچیدگی‌های خاصی را دارد و برآورد آن به آسانی امکان‌پذیر نیست. بر اساس گزارش ارایه شده توسط این گروه، این نسبت تقریباً بین ۰/۰۶ تا ۰/۱ برآورد شده است [10].

جدول ۱- عرض بحرانی کارگاه استخراج *UCG* [9]

مجموعه <i>UCG</i>	نوع اکسیدان	ضخامت لایه (متر)	عرض بحرانی کارگاه استخراج (متر)
<i>Tula</i>	هوا و اکسیژن	۴	۳۶
<i>Lisichansk</i>	هوا	۳	۲۷
<i>Lisichansk</i>	اکسیژن	۳	۵۷
<i>Yuzhno-Abinsk</i>	هوا	۲	۱۴
<i>Newman-Spinney</i>	هوا	۱	۲۴

نتایج حاصل از اجرای مجموعه‌ی ال‌تری‌مدال (*El Tremedal*) اسپانیا نشان داده است عرض فضای استخراجی فعال *UCG* حداقل ۵ برابر ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ و ارتفاع آن بیش از ۲ برابر ضخامت لایه است [2]. مطالعات آزمایشگاهی داگوپاتی (*Daggupati*) و همکاران بر روی ۴۸ نمونه بلوک زغال‌سنگ منجر به ارایه‌ی یک رابطه‌ی تجربی در مورد عرض فضای استخراجی *UCG* بر اساس نرخ جریان ورودی، فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید و زمان عملیات گازکردن شده است و گزاره‌ی آن به صورت زیر است [11]:

$$W = 0.0019 \times D_w^{0.24} \times Q^{0.29} \times t^{0.22} \quad (1)$$

با توجه به مطالعات اندک پیشین و مطالب فوق، پارامترهای ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارتفاع روباره، نفوذپذیری زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق به عنوان عوامل موثر در تعیین عرض پهنه مد نظر قرار گرفته است. عوامل موثر بر تعیین عرض مناسب پهنه بر اساس جستجوی کتابخانه‌ای گردآوری و در جدول ۲ بیان شده است.

۵- روش پژوهش

از سال ۱۹۳۰ تا ۲۰۱۰ میلادی بیش از ۵۰ مجموعه *UCG*

۴- جمع‌آوری اطلاعات برای محاسبه‌ی عرض مناسب پهنه‌ی *UCG*

خوشبختانه اطلاعات بیشتر مجموعه‌های *UCG* انجام شده در دنیا به روش سنتی و *CRIP* به گونه‌ای است که می‌توان از آن‌ها برای بهینه‌سازی فرآیند در مجموعه‌های جدید استفاده نمود. با بررسی این اطلاعات می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

عرض پهنه‌های استخراجی در روش *UCG* با پدیده‌ی انتقال حرارت (*Heat Transfer*) کنترل می‌شود. بر این اساس سرعت تزریق اکسیدان نقش مهمی در افزایش عرض بحرانی فضای استخراجی دارد و در شرایط یکسان در صورتی که با افزایش عرض کارگاه استخراج، نرخ تزریق اکسیدان افزایش نیابد، واکنش‌های شیمیایی کمتری در داخل کارگاه استخراج به وقوع می‌پیوندد [9]. با توجه به این موضوع وارنر (*Warner*) و زکلی (*Szekely*) یک معادله‌ی انتقال حرارت برای پیش‌بینی عرض فضای استخراجی *UCG* ارایه کرده‌اند. در این مدل فرض شده است نصف عرض کارگاه استخراج تابعی از ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و ریشه‌ی دوم سرعت اولیه‌ی سوختن است.

عرض بحرانی فضای استخراجی *UCG* در مجموعه‌های اجرا شده در اتحاد جماهیر شوروی سابق و بریتانیا در جدول ۱ آورده شده است. نکته‌ی قابل توجه آن است که عرض بحرانی کارگاه استخراج به نوع اکسیدان و نوع زغال‌سنگ وابسته است و در حالتی که از هوا به عنوان اکسیدان استفاده شود، عرض بحرانی فضای استخراجی می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ برابر ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ باشد. این نسبت در حالتی که از اکسیژن استفاده شود، بیشتر است. به عنوان نمونه در مجموعه‌ی *UCG* هانا (*Hanna*) به دلیل کوچک در نظر گرفتن فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید (۲۰ متر)، عرض فضای استخراجی هیچ‌گاه به عرض بحرانی نرسیده است. نتایج حاصل از اجرای مجموعه‌های *UCG* در اتحاد جماهیر شوروی سابق نشان داده است به دلیل دمای پایین سوختن زغال‌سنگ در داخل کارگاه استخراج، نسبت عرض به ضخامت لایه در زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین، کم است [9].

بر اساس گزارش گروه کاری اروپا (*European*)

برنامه‌ریزی شده) انجام شده است. با توجه به نوع و حجم اطلاعات مندرج در جدول ۲ می‌توان از مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده نمود. در این مدل‌ها، عرض پهنه به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای ضخامت لایه، نفوذپذیری لایه، ارزش گرمایی زغال‌سنگ، ارتفاع روباره و فشار تزریق به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند.

در دنیا اجرا شده است. این مجموعه‌ها بیشتر در کشورهای آمریکا، اتحاد جماهیر شوروی سابق، استرالیا، چین و آفریقای جنوبی بوده است. اتحاد جماهیر شوروی سابق، کشوری پیش‌تاز در زمینه‌ی اجرای *UCG* بوده، ولی اطلاعات مجموعه‌های *UCG* آن به ندرت در دسترس است. این تحقیق بر اساس روش تجربی و تحلیل آماری اطلاعات مجموعه‌های *UCG* با روش *CRIP* (اجرا یا

جدول ۲- اطلاعات مجموعه‌های *UCG*

منبع	<i>W</i>	<i>CCV</i>	<i>CP</i>	<i>OP</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	پارامتر	مجموعه‌ی <i>UCG</i>
	متر	کیلوکالری بر کیلوگرم	داریسی	کیلوپاسکال	متر	متر	کشور	
[2], [4], [12], [13] & [14]	۵۰	۴۲۹۵٫۹۲	۰٫۰۰۱۹۶	۵۰۰۰	۵۸۰	۵	اسپانیا	<i>El Tremedal</i>
[2], [4], [12], [13] & [15]	۳۰	۴۱۴۱٫۲۳	۰٫۱	۵۰۰	۱۳۰	۷	آمریکا	<i>RMI</i>
[2]	۵۰	۴۰۳۰	۰٫۰۸	۱۴۰	۱۶۰	۳	آفریقای جنوبی	<i>Secunda</i>
[2]	۸۰	۵۳۴۶	۰٫۰۱	۵۱۰۰	۶۰۰	۷	مجارستان	<i>Mecsek Hills</i>
[1], [2], [12], [13]	۲۵	۴۳۶۷٫۵۲	۰٫۰۴	۱۱۰۰	۱۴۰	۱۰	استرالیا	<i>Chinchilla</i>
[1], [2], [12], [13] & [16]	۳۰	۴۹۴۰٫۳۱	۰٫۰۳	۱۱۲۰	۲۰۰	۹	استرالیا	<i>Bloodwood Creek</i>

ساده برای عرض پهنه با هر کدام از متغیرهای مستقل ارایه نمود. در صورتی‌که بیشتر از یک متغیر برای توصیف تغییرات یک متغیر وابسته وجود داشته باشد، باید از رگرسیون چند متغیره‌ی خطی (*Multiple Linear Regression*) یا غیر خطی (*Multiple Non-Linear Regression*) استفاده شود.

۶-۱- مدل رگرسیون چند متغیره‌ی خطی

مدل کلی رگرسیون چند متغیره‌ی خطی به صورت گزاره‌ی (۲) است:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + e \quad (2)$$

فاصله‌ی نقطه‌ی مشاهده شده از خط رگرسیون (مقدار پیش‌بینی شده)، مقدار باقیمانده نامیده می‌شود. مقادیر باقیمانده‌ی کمتر، نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بهتر است. برای قضاوت در مورد رابطه‌ی خطی چند متغیره‌ی خوب، از ضریب همبستگی استفاده می‌شود.

برای تعیین ضرایب مجهول رگرسیون می‌توان از

۶- مدل تجربی

در اولین مرحله از این تحقیق، مجموعه‌ای از تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار *SPSS21* بر روی داده‌های جدول ۲، بین هر مجموعه متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (عرض پهنه) انجام شده است. تحلیل اولیه‌ی رگرسیون بر اساس رگرسیون خطی (*Linear Regression*)، توانی (*Power*)، لگاریتمی (*Logarithmic*) و نمایی (*Exponential*) به منظور آگاهی از همبستگی جداگانه بین هر کدام از متغیرهای مستقل با عرض پهنه انجام شد. نتایج تحلیل رگرسیون ساده بین هر کدام از متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (عرض پهنه) در جدول ۳ نشان داده شده است.

حداکثر ضریب تعیین (*Determination Coefficient*) بین هر کدام از متغیرهای مستقل با عرض پهنه ۶۲ درصد است. بر این اساس با توجه به نتایج به دست آمده، نمی‌توان به تنهایی رابطه‌ی براساس رگرسیون خطی

به منظور آرایه‌ی یک مدل آماری برای برآورد عرض پهنه، از گزاره‌ی (۳) و داده‌های جدول ۲ استفاده شده است. رگرسیون غیر خطی با کمک نرم افزار SPSS21 انجام و نتایج تجزیه و تحلیل‌ها منجر به آرایه‌ی گزاره‌ی (۴) برای برآورد عرض پهنه شده است:

$$W = \frac{D \times CP^{0.361} \times OP^{0.09}}{\text{Log}(CCV)^{0.133} \times h^{0.49}} \quad (4)$$

نتایج رگرسیون انجام شده نشان دهنده‌ی آن است که ضریب همبستگی گزاره‌ی (۴) بیشتر از ۹۹ درصد است. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود عرض پهنه با فاصله‌ی اطمینان بالایی بر اساس متغیرهای مستقل قابل محاسبه است.

۶-۳- اعتبارسنجی مدل آرایه شده

برای اعتبارسنجی مدل آرایه‌ی شده، نتایج به دست آمده از بررسی آماری، در جدول ۴ آورده شده است. برای کنترل معنی‌داری مدل از آزمون F استفاده شده است. مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد کوچک‌تر از F به دست آمده از مدل است. بنابراین می‌توان فرضیه‌ی صفر (رابطه‌ی خطی بین متغیرهای وابسته و مستقل وجود ندارد) را رد کرد و نتیجه گرفت حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نیست. علاوه بر این مقدار سطح معنی‌داری محاسبه شده کمتر از ۰/۰۰۵ است که خود دلیل دیگری بر صحت مدل آرایه شده است.

در جدول ۵ مقادیر واقعی و برآورده شده‌ی عرض پهنه در مجموعه‌های UCG به همراه خطای نسبی آن‌ها ($Relative Error$) نشان داده شده است. خطای نسبی نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی نسبی هر داده از خط با شیب ۴۵ درجه است. لازم به ذکر است میانگین خطای نسبی محاسبه شده برابر با ۴ درصد است. مقدار خطای نسبی هر پارامتر از تقسیم قدرمطلق تفاضل مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی شده بر مقدار واقعی محاسبه شده است.

نرم‌افزارهای آماری مانند SPSS استفاده نمود. در این مطالعه از نرم افزار SPSS21 برای این هدف استفاده شده است. بر این اساس به منظور آرایه‌ی یک مدل آماری برای برآورد عرض پهنه با استفاده از گزاره‌ی (۲) و داده‌های جدول ۲، محاسبات گسترده‌ای انجام شده که روابط بدست آمده دارای ضریب همبستگی مناسبی نبودند. به علاوه نتایج تحلیل‌های انجام شده، نشان داده است خطای استاندارد ضرایب رگرسیون مقادیر بالاتری از مقدار تخمینی ضریب رگرسیون دارد که خود نشان‌دهنده‌ی اعتبار پایین مدل چند متغیره‌ی خطی بوده است. از این رو محاسبات با استفاده از رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی انجام شده است.

جدول ۳- ضریب همبستگی بین متغیر وابسته (عرض پهنه) و متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	واحد	مدل رگرسیون		
		خطی	توانی	لگاریتمی
ضخامت لایه	متر	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۱۴
عمق لایه	متر	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۳
نفوذپذیری لایه	دارسی	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۳۵
ارزش گرمایی زغال‌سنگ	کیلوکالری بر کیلوگرم	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۲۵
فشار تزریق	کیلوپاسکال	۰/۵۱	۰/۱۴	۰/۱۸

۶-۲- مدل رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی

مدل کلی رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی به صورت گزاره‌ی (۳) است:

$$Y = \alpha_0 (X_1^{\alpha_1}) (X_2^{\alpha_2}) \dots (X_n^{\alpha_n}) \quad (3)$$

جدول ۴- نتایج آماری مدل رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی برای برآورد عرض پهنه

مدل	مجموع مربعات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	F مدل	F جدول	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۱۳۸۱۲/۴	۴	۳۴۵۳/۱۰۶	۵۴۹	۶/۹۴۴	۰/۰۰۰
باقیمانده (۲)	۱۲/۵۷۴	۲	۶/۲۸۷			
مجموع	۱۳۸۲۵	۶				

جدول ۵- مقایسه‌ی نسبی عرض واقعی با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل ارایه شده

مجموعه‌ی UCG	عرض واقعی (متر)	عرض برآورد شده (متر)	خطای نسبی (درصد)
El Tremedal	۵۰	۵۰٫۳۳	۰
RMI	۳۰	۳۲٫۱۷	۷
Secunda	۵۰	۴۹٫۳۶	۱
Mecsek hills	۸۰	۷۹٫۳۸	۱
Chinchilla	۲۵	۲۲٫۴۱	۱۰
Bloodwood Creek	۳۰	۳۰٫۶۲	۲

غرب شهرستان طیس در استان یزد واقع شده است. در منطقه‌ی مزینو، ۷۵ لایه‌ی زغال‌سنگ شناسایی شده است [۱۷]. زغال‌سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت هستند و شیب لایه‌های زغالی آن کمتر از ۳۰ درجه است که خود نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن تمام لایه‌های زغالی برای اجرای UCG در این منطقه است. ضخامت لایه‌های زغالی در منطقه‌ی مزینو متفاوت است. از بین لایه‌های منطقه‌ی مزینو، لایه‌های M5، M26، M25، M4، M2 و M1 دارای ضخامت بیشتر از یک متر هستند و اولویت بالاتری برای اجرای UCG دارند.

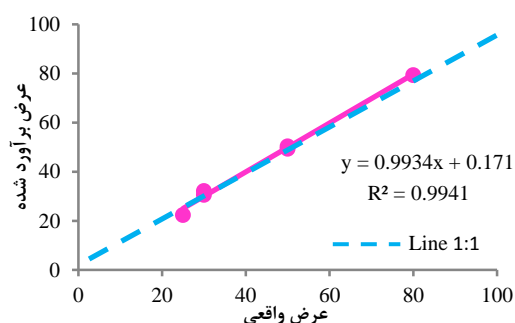
از آنجا که در این تحقیق هدف برآورد عرض مناسب فضای استخراجی (پهنه) UCG در روش CRIP دوکاناله است، دو پارامتر ضخامت لایه و ذخیره‌ی زغال‌سنگ دارای اهمیت زیادی هستند. از بین لایه‌های منطقه‌ی مزینو، لایه‌ی M2 به دلیل ضخامت بالا و ذخیره‌ی زیاد نسبت به سایر لایه‌های بررسی شده، دارای برتری قابل ملاحظه‌ای است و قادر است به مدت بیش از ۱۰۰ سال گاز سنتزی یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی را تامین نماید. با توجه به بررسی‌های Arvind و Shafirovich در سال ۲۰۰۹، میزان ذخیره‌ی مورد نیاز برای یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی در مدت ۲۰ سال در شرایطی که ارزش حرارتی برجای زغال‌سنگ در حدود ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم فرض شود، برابر با ۲۴ میلیون تن است [18]. بنابراین این لایه به عنوان لایه‌ی قابل کار برای استخراج به روش UCG انتخاب شده است. در جدول ۶ مشخصات لایه‌ی مورد نظر برای تعیین عرض پهنه نشان داده شده است.

جدول ۶- مشخصات لایه‌ی M2 در مزینوی طیس [۱۷]

عرض پهنه (m)	CCV (kCal/kg)	CP (دراستی)	OP (kPa)	D (m)	h (m)	لایه
۴۵	۵۰۶۶	۰٫۰۰۰۸	۵۰۰۰	۶۰۰	۳٫۵	M2

با کاربرد مدل آماری ارایه‌ی شده در این تحقیق، عرض پهنه‌های استخراجی UCG به روش CRIP در لایه‌ی M2 در منطقه‌ی زغالی مزینوی طیس، در حدود ۴۵ متر محاسبه شده است. روشن است عرض محاسبه شده یک

در شکل ۴ مقادیر عرض واقعی بر حسب مقدار پیش‌بینی شده آن ترسیم شده است. روشن است که خط با شیب ۴۵ درجه به نحوی است که نسبت مقادیر به صورت برابری در اطراف این خط قرار می‌گیرد. بر اساس موارد بیان شده برای اعتبارسنجی، اعتبار مدل آماری ارایه‌ی شده مورد تایید است و با کمک آن می‌توان عرض مناسب پهنه در مجموعه‌های جدید UCG که قرار است به روش CRIP به گاز تبدیل شوند، با قابلیت اعتماد بالایی برآورد نمود. از این رابطه برای تعیین عرض مناسب پهنه در روش CRIP دوکاناله در منطقه‌ی زغالی مزینوی طیس استفاده شده است.



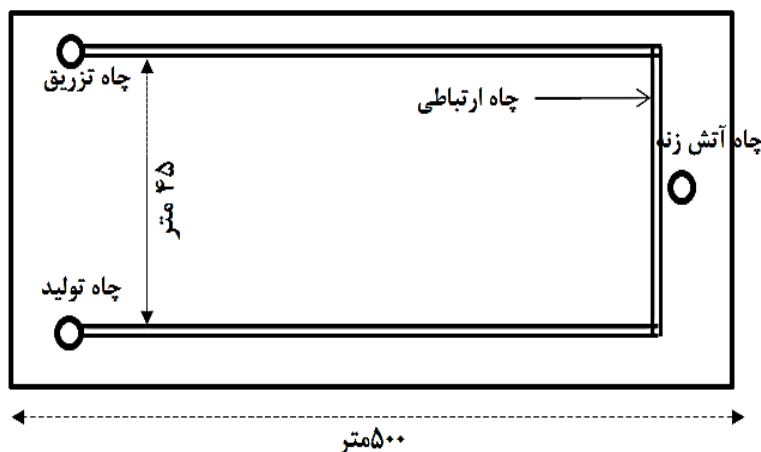
شکل ۴- نمودار مقایسه‌ی مقادیر واقعی عرض پهنه و مقادیر برآورد شده

۷- مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مزینوی طیس

ناحیه‌ی زغال‌سنگی مزینو، ۸۸۰۰ کیلومتر مربع از حوضه‌ی زغال‌دار طیس را در بر می‌گیرد. این ناحیه در ۸۵ کیلومتری

تصحیح است. بر این اساس ابعاد پیشنهادی پهنه‌های *UCG* در منطقه‌ی زغالی مزینوی طبس در شکل ۵ نشان داده شده است.

طرح اولیه است و همانند سایر روش‌های مرسوم معدن‌کاری که در آن با گذشت زمان و بدست آوردن اطلاعات تفصیلی و دقیق‌تر در حین استخراج، بروزرسانی می‌شود، نیازمند



شکل ۵- طراحی مجموعه‌ی *UCG* مزینوی طبس

مجموعه‌های *UCG* است.

بر اساس مدل ارایه شده، عرض پهنه‌ی استخراجی در منطقه‌ی زغالی مزینوی طبس برابر با ۴۵ متر برآورد شده است. برای پیاده‌سازی تجاری *CRIP* در این منطقه، پیشنهاد می‌شود در ابتدا مطالعات امکان‌سنجی با هدف تامین گازسنجی یک نیروگاه برق (به عنوان نمونه ۲۰۰ مگاواتی) انجام شود تا بتوان بر اساس آن تعداد پهنه‌های استخراجی که باید سالیانه به گاز تبدیل شود را تعیین نمود. سپس بر اساس آن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جاری پروژه را محاسبه و در مورد اقتصادی بودن آن تصمیم‌گیری نمود.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی آماری با رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی برای برآورد عرض پهنه‌های استخراجی *UCG* به روش *CRIP* ارایه شده است. این مدل بر اساس اطلاعات ۶ مجموعه‌ی *UCG* به روش *CRIP* توسعه داده شده و در آن عوامل موثر بر عرض پهنه شامل ضخامت و عمق لایه، نفوذپذیری و ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق گاز در نظر گرفته شده است. این مدل می‌تواند عرض پهنه را با قابلیت اطمینان بالایی برآورد نماید. مهم‌ترین کاربرد این مدل، طراحی عرض پهنه‌های استخراجی در

۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
h	m	ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ	OP	kPa	فشار عملیاتی تزریق
D	m	عمق لایه	β	-	ضریب رگرسیون (خطی)
CP	$Darcy$	نفوذپذیری زغال‌سنگ	x	-	متغیر مستقل (خطی)
CCV	$kCal/kg$	ارزش گرمایی زغال‌سنگ	y	-	متغیر وابسته (خطی)
Q	mm/min	نرخ جریان ورودی	e	-	خطای تصادفی (خطی)
W	m	عرض فضای استخراجی	Y	-	متغیر وابسته (غیر خطی)
t	min	زمان گاز کردن	α_0	-	ثابت اختیاری (غیر خطی)
D_w	cm	فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید	X_n	-	متغیر مستقل (غیر خطی)

۱۰- منابع

- [1] Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006). *Best Practices in Underground Coal Gasification*. US DOE Contract No. W-7405-Eng-48. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory. <https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/BestPracticesinUCG-draft.pdf>.
- [2] Couch, G. R. (2009). *Underground Coal Gasification*. IEA Clean Coal Centre. ISBN 978-92-9029-471-9. <http://www.coalonline.info/DocId=7790>.
- [3] Younger, P. L. (2011). Hydrogeological and Geomechanical Aspects of Underground Coal Gasification and its Direct Coupling to Carbon Capture and Storage. *Mine Water and the Environment*, 30(2), 127-140. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-011-0145-5>.
- [4] Perkins, G. M. P. (2005). *Mathematical Modeling of Underground Coal Gasification*. PhD Thesis: School of Materials Science & Engineering, Faculty of Science, The University of New South Wales. <http://handle.unsw.edu.au/1959.4/25518>.
- [5] Sarraf Shirazi, A., Mmbaga, J. P., Gupta, and Hayes, R. E. (2011). Modeling Cavity Growth during Underground Coal Gasification. *2011 COMSOL Conferences in Boston*. ISBN: 9780983968825. http://www.comsol.com/paper/download/83903/shirazi_paper.pdf.
- [۶] لطفی آزاد، ع. ا. (۱۳۹۱). برآورد میزان نشت در کارگاه‌های استخراج UCG. مطالعه‌ی موردی معدن زغال‌سنگ مزینوی طبس. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۷] نجفی، م.، جلالی، س. م. ا.، و خالوکاکایی، ر. (۱۳۹۱). بررسی پارامترهای موثر بر رشد کلاواک ایجاد شده در اثر فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG). چهارمین کنفرانس مهندسی معدن. دانشگاه تهران.
- [۸] موسوی، م. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج UCG. مطالعه‌ی موردی معدن زغال‌سنگ تخت. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه یزد.
- [9] Dinsmoor, B., Galland, J. M., & Edgar, T. F. (1978). The Modeling of Cavity Formation during Underground Coal Gasification. *Journal of Petroleum Technology*, 30(5), 695-704. <http://dx.doi.org/10.2118/6185-PA>.
- [10] Creedy, D. P., Garner, K., Holloway, S., Jones, N., & Ren, T. X. (2001). *Review of Underground Coal Gasification Technological Advancements*. Harwell Laboratory, Coal R & D Programme. ASIN: B0018UFW04.
- [11] Daggupati, S., Mandapati, R. N., Mahajani, S. M., Ganesh, A., Mathur, D. K., Sharma, R. K., & Aghalayam, P. (2010). Laboratory Studies on Combustion Cavity Growth in Lignite Coal Blocks in The Context of Underground Coal Gasification. *Energy*, 35(6), 2374-2386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.015>.
- [12] Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2013). Underground Coal Gasification: from Fundamentals to Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1), 189-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2012.09.004>.
- [13] Sarraf Shirazi, A. (2012). *CFD Simulation of Underground Coal Gasification*. MSc Thesis: Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta. <http://hdl.handle.net/10402/era.28099>.
- [14] DTI. (2004). *Review of the Feasibility of Underground Coal Gasification in the UK*. Cleaner Fossil Fuels Programme. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file19143.pdf>.
- [15] Dennis, S. (2006). *Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Project Hanna, Wyoming*. Final Technical Report for the Period 1986 to 2006. U.S. Department of Energy. CN: DE-FC21-86LC11063.

[16] Mallett, C., & Burl, D. (2010). Bloodwood Creek UCG Pilot, 2008-2010. *International Pittsburgh Coal Conference* (pp. 250-253). Istanbul, Turkey. ISBN: 9781617823213.

[۱۷] شرکت زغال‌سنگ پروده طبس. (۱۳۷۹). خلاصه نتایج گزارشات عملیات اکتشاف مقدماتی منطقه‌ی ۱ مزینو.

[18] Shafirovich, E., Mastalerz, M., Rupp, J., & Varma, A. (2008). *The Potential for Underground Coal Gasification in Indiana*. Presentations of Phase I Report to Indiana Center for Coal Technology Research (CCTR). <http://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/ctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf>.

برآورد مقدماتی هزینه‌های ساخت تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی با کیفیت متوسط تا خوب

یادداشت فنی

میثم نجف‌زاده^۱؛ احمد رضا صیادی^{۲*}؛ جعفر خادمی حمیدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن؛ گرایش بررسی‌های فنی و اقتصادی؛ دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار؛ گروه مهندسی معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۲/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌های کوتاه راه برآورد هزینه تحلیل رگرسیون ارتفاع روباره <i>RMR</i>	مدل‌های تخمین هزینه از جمله ابزارهای مهم در به‌روزرسانی اطلاعات اقتصادی، انجام مطالعات امکان‌سنجی، بودجه‌بندی و تامین منابع مالی پروژه‌های ساخت است. در این تحقیق مدلی برای برآورد مقدماتی هزینه‌ی عملیات ساخت تونل‌های کوتاه راه به روش حفر چالزنی-انفجار با استفاده از تحلیل رگرسیون تک و چند متغیره به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های پارامتریک، ارائه شده است. بدین منظور از داده‌های ۱۲ مقطع از تونل‌های راه شمال غرب کشور استفاده شده است. مدل‌سازی تک متغیره با متغیر توضیحی <i>RMR</i> نشان داده است از میان توابع مختلف، تابع نمایی با حداقل نرخ خطای مطلق ۱۳ درصد بهتر از سایر توابع است. مدل‌سازی چند متغیره با در نظر گرفتن شاخص رده‌بندی توده‌سنگ <i>RMR</i> و ارتفاع روباره به عنوان متغیرهای مستقل نیز نشان داده است تنها مدل رگرسیونی خطی معنادار بوده و با حداقل نرخ خطای مطلق تقریبی ۱۱ درصد از اعتبار مناسبی برخوردار است.

۱- پیشگفتار

عملیات تونل‌سازی از جمله مهم‌ترین پروژه‌های ساخت بوده و عموماً به دو روش حفر سنتی (چالزنی- انفجار) و مکانیزه انجام می‌شود. مطالعات امکان‌سنجی، طراحی، انتخاب روش ساخت و در نهایت اجرای پروژه تابع عوامل متعددی به ویژه هزینه‌های ساخت است. پیچیدگی عملیات و کافی نبودن اطلاعات فنی و اقتصادی در مراحل اولیه‌ی مطالعات پروژه‌های تونل‌سازی، دسترسی به مدل‌های قابل اعتماد برآورد هزینه را ضروری می‌کند. مدل‌های متعددی در عرصه‌ی بین‌المللی در این زمینه توسعه داده شده‌اند که بیشتر آن‌ها در پروژه‌های داخل کشور قابل استفاده نیستند.

در این تحقیق، هدف، ارائه‌ی مدلی برای برآورد مقدماتی هزینه‌های حفر و پوشش‌گذاری تونل‌های کوتاه راه در محیط‌های سنگی با کیفیت متوسط تا خوب است که به روش چالزنی-انفجار اجرا می‌شوند. این مدل در قالب توابع رگرسیونی تک و چند متغیره به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های پارامتری مدل‌سازی ارائه شده است.

۲- سابقه‌ی تحقیق

برآورد هزینه‌های تونل‌سازی موضوع تحقیقاتی بسیاری از پژوهشگران بوده است. یکی از اولین مطالعات قاعده‌مند، مدل دانشکده‌ی منابع آب کالیفرنیا (*California*)

از شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI ، عمق روباره، فشار محیط زمین‌شناسی و مساحت مقطع حفر شده به عنوان متغیر مستقل برای برآورد سیستم‌های نگهداری اولیه و ثانویه استفاده و بر اساس آن میزان فولاد و سیمان به کار رفته، حجم بتن‌پاشی و متراژ پیچ‌سنگ محاسبه شده است. سپس از این پارامترها به عنوان متغیر مستقل در تعیین هزینه‌ی حفاری به عنوان متغیر وابسته استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۹ مدلی برای برآورد هزینه‌ی سیستم متروی شهری در ترکیه ارائه شد [6]. در این تحقیق، تکنیک‌های پارامتریک یعنی شبکه‌های عصبی و تحلیل‌های رگرسیونی خطی برای برآورد هزینه‌های ساخت در مطالعات امکان‌سنجی و طراحی پروژه‌ی متروی شهری بکار برده شده است. گوندوز و همکاران در سال ۲۰۱۱ به برآورد هزینه‌های سیستم حمل و نقل ریلی و سبک شهری و متروها با استفاده از روش‌های پارامتریک پرداختند [7]. این کار با اطلاعات مربوط به ۱۶ پروژه و ۱۷ پارامتر نظیر طول تونل‌ها و طول فضای باز و زیرسطحی با استفاده از روش‌های تحلیل رگرسیونی چند متغیره‌ی خطی و شبکه‌های عصبی ارائه شده است (گزاره‌ی (۱)).

$$Cost(US\$) = 52190 + 704LBF + 707LDF - 3860WR + 293SN + 325HPC \quad (1)$$

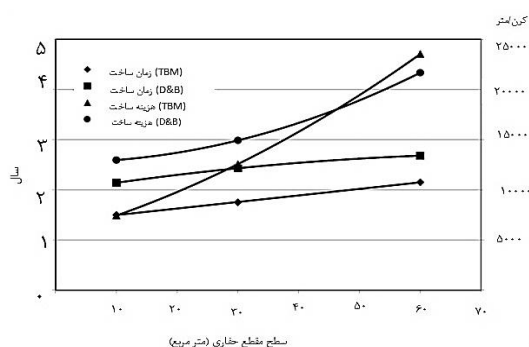
در سال ۲۰۱۳ رستمی و همکاران به برآورد هزینه‌های تونل‌سازی بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل‌های آماری چند متغیره داده‌های ۲۷۲ پروژه‌ی مختلف تونل‌سازی در آمریکا و کانادا پرداختند [8]. هدف اصلی، ارائه‌ی یک مدل برآورد هزینه برای ساخت تونل با کاربردهای مختلف در مراحل مقدماتی یک پروژه بوده است. توابع هزینه از نوع نمایی و بر حسب قطر و طول ارائه شده و آزمون مدل از راه مقایسه‌ی هزینه‌های واقعی با هزینه‌های پیش‌بینی شده، انجام شده است. به عنوان نمونه، تابع هزینه‌ی ارائه شده در خصوص ساخت تونل‌های بزرگراهی به روش سنتی چالزنی-انفجار مطابق گزاره‌ی (۲) است (تعداد داده‌ها ۱۲ مورد).

$$Cost(mUS\$) = 10^{(1.51 + 1.02 \log(L) - 0.374 \log(D))} \quad (2)$$

سابقه‌ی تحقیق در تخمین هزینه‌های تونل‌سازی در ایران چندان زیاد نیست. در سال ۱۳۸۰ تحقیقی برای برآورد هزینه‌های واحد حفاری و نگهداری اولیه در تونل‌های انتقال آب به روش حفر چالزنی- انفجار انجام شد [۹]. طی

$Department of Water Resource$ است که از قطر و شرایط زمین‌شناسی تونل به عنوان پارامترهای تاثیرگذار در هزینه‌ها استفاده شده است. این مدل تنها برای مناطق محدودی از ایالات متحده و فقط برای تونل‌های انتقال آب به روش حفر سنتی قابل استفاده بود، بنابراین مطالعات تکمیلی دیگری طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۰ با هدف توسعه‌ی پایگاه اطلاعاتی و بهبود و گسترش دامنه‌ی کاربرد مدل انجام شد. در سال ۱۹۷۱ نیز مدلی کامپیوتری بر مبنای مدل‌های پیشین ارائه شد. این مدل ضمن برآورد هزینه‌ها، امکان ارزیابی تکنیک‌هایی را که تا آن زمان برای حفاری ارائه شده بود، فراهم می‌ساخت. در سال ۱۹۷۶، مدل هزینه‌ای تونل (TCM) به عنوان یک سیستم شبیه‌ساز کامپیوتری برای برآورد هزینه و زمان ساخت تونل‌های سنگی ارائه شد [1] و [2].

از مطالعات مهم دیگر، برآورد هزینه‌های احتمالی تونل با استفاده از نرم افزار $SIMSUPER_5$ است [3]. این روش اصلاح شده‌ی روش TCM است. در سال ۱۹۹۹ مدلی برای تخمین هزینه و زمان دو نوع روش حفاری مکانیزه و سنتی بر اساس داده‌های ساخت ۲۵۰ کیلومتر تونل راه در نروژ و برخی دیگر کشورها توسعه یافت [4]. در این روش هزینه‌ی اقلام مختلف عملیات تونل‌سازی بر مبنای طول و قطرهای مختلف به صورت نمودارهایی ارائه شده است (شکل ۱).



شکل ۱- برآورد زمان و هزینه‌ی ساخت تونل در مدل برولند

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۶، مدلی با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۴۹ مورد از ۲۳ مقطع از ۴۲ کیلومتر تونل حفر شده به روش سنتی در بزرگراهی در یونان در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۴ ارائه شد [5]. در این مدل

این تحقیق پارامترهای موثر بر عملیات حفاری و نگهداری اولیه‌ی تونل در روند محاسبات لحاظ شده تا نتایج به دست آمده واقعی‌تر باشد. بررسی تاثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه‌های تونل‌سازی پروژه‌ی تونل دشت ذهاب به روش مونت‌کارلو موضوع مطالعه‌ی دیگری است که بر آن اساس متغیرهای نرخ تورم، مدت زمان اجرا، و نرخ برابری یورو به ترتیب به عنوان متغیرهای با بیشترین تاثیر در این پروژه معرفی شدند [۱۰].

در تحقیق دیگری در سال ۱۳۸۵ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی تونل انتقال آب البرز با استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه و سنتی مقایسه شده است [۱۱]. در سال ۱۳۸۶ نیز به تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت تونل انتقال آب دشت ذهاب به روش حفاری مکانیزه بررسی و مشخص شد حساسیت هزینه‌ی ساخت به نرخ تورم بیشتر از سایر عوامل عدم قطعیت است [۱۲]. بررسی پیشینه‌ی تحقیق، بیانگر ضرورت توسعه‌ی مطالعات برآورد هزینه‌ی عملیات تونل‌سازی در کشور بوده و در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

۳- عوامل موثر بر هزینه‌های تونل‌سازی

با بررسی روند مدل‌سازی هزینه‌ی عملیات تونل‌سازی در مطالعات قبلی که در قسمت دوم این تحقیق مرور شد و کسب نظر برخی از متخصصین و مدیران در اجرا و حفاری تونل می‌توان عوامل موثر بر هزینه را در دسته‌های زیر جای داد که بسته به نوع تونل و همچنین شرایط موجود، تاثیر هر یک از این عوامل متفاوت است.

۱- پارامترهای ژئومکانیکی، زمین‌شناسی و مخاطرات زمین‌شناسی در مسیر تونل: مقاومت فشاری و کششی ماده سنگ، ارتفاع روباره، شاخص‌های رده‌بندی توده‌سنگ مانند اندیس کیفی سنگ (RQD)، امتیازدهی توده‌سنگ (RMR)، کیفیت توده‌سنگ (Q) و اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، هوازدگی توده‌سنگ، نواحی گسلی، آب زیرزمینی، درصد کانی‌های ساینده مثل کوارتز، وضعیت تنش‌های برجا و کرنش دیواره‌ها و سقف تونل [3]، [4] و [6].

۲- پارامترهای فنی تونل: شکل و اندازه‌ی مقطع تونل، طول تونل و شیب و قوس در مسیر تونل [1]، [2]، [7] و [8].

۳- پارامترهای اقتصادی: روش‌های تامین منابع مالی،

نرخ مبادله‌ی ارز و نرخ تورم [۱۰] و [۱۲].

۴- پارامترهای مدیریتی: سابقه‌ی اجرایی مدیران، مهارت منابع انسانی، پشتیبانی و تدارکات.

۴- روش تحقیق

روش‌های متعددی برای توسعه‌ی مدل‌های برآورد هزینه ارائه شده است. در مراحل پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی عموماً از روش‌های پارامتریک استفاده می‌شود. در این روش همبستگی بین هزینه‌های واقعی و دیگر متغیرهای سیستم که ماهیت فنی یا اقتصادی دارد بررسی شده و یک یا چند رابطه‌ی هزینه (CER) ارائه می‌شود. رویکردهای متنوعی در این چهارچوب قابل استفاده است، اما بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که روش‌های تحلیل رگرسیونی به عنوان یکی از روش‌های اصلی برآورد هزینه‌ی پارامتریک به دلیل مبنای ریاضی قوی و سهولت استفاده از توابع هزینه بدست آمده، بسیار رایج است [13]، [14] و [15]. در این تحقیق نیز از این روش برای ارائه‌ی توابع هزینه استفاده شده است.

۴-۱- رگرسیون تک متغیره

در این روش، ضمن شناسایی موثرترین متغیر، روند تغییرات هزینه‌ها نسبت به آن متغیر با استفاده از داده‌های در دسترس بررسی شده و تابع هزینه در قالب رابطه‌ای ریاضی بین هزینه‌ها و مشخصه‌ها بدست می‌آید. ساختار مدل ارائه شده به تجارب پیشین در مدل‌سازی هزینه و همچنین به ملاحظات آماری داده‌ها و نتایج حاصله از اعتبارسنجی توابع وابسته است. در این تحقیق انواع توابع به صورت (ax^b) ، (ae^{bx}) و $(ax+b)$ به دلیل گستردگی کاربرد در سایر مدل‌های برآورد هزینه با هم مقایسه شده‌اند.

۴-۲- رگرسیون چند متغیره

شکل کلی توابع رگرسیون چند متغیره به صورت چند جمله‌ای خطی است که در گزاره‌ی (۳) نشان داده شده است.

$$Y_i = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n + \varepsilon_0 \quad (3)$$

البته از سایر توابع نظیر لگاریتمی و نمایی نیز برای مدل‌سازی استفاده شده است که نتایج بدست آمده معنا دار نبودند و تنها رابطه‌ی معنادار، تابع چند جمله‌ای خطی بوده است. برای ساخت مدل‌های چند متغیره، از نسخه‌ی ۷

ارتفاع روباره نیز به ترتیب ۲۴ و ۹۲ متر است، که این امر نشان می‌دهد تونل‌های مورد بررسی جزو تونل‌های کم عمق هستند.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌ها

متغیر وابسته (میلیون ریال بر متر)			متغیرهای مستقل		
هزینه کل	هزینه نگهداری	هزینه حفاری	RMR	طول (متر)	روباره (متر)
۵۱,۹۷	۲۴,۰۶	۲۲,۳۴	۳۵	۱۱۱	۲۴
۵۴,۹۸	۲۶,۲۱	۲۳,۷۰	۴۶	۳۲۵	۵۴
۵۸,۸۲	۲۸,۹۵	۲۳,۹۰	۶۱	۵۴۰	۹۲
۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۵۶	۹	۷۴	۲۵
تعداد داده ۱۲					

۶- مدل‌سازی

همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، در این تحقیق از روش رگرسیونی با توابع تک متغیره و چند متغیره برای برآورد هزینه استفاده شده است.

۶-۱- انتخاب متغیرهای مستقل

از آنجا که در مرحله مطالعاتی یک پروژه‌ی ساخت تونل، دسترسی به همه‌ی پارامترهای موثر بر هزینه‌ها بسیار مشکل و گاهی اوقات غیر ممکن است، بنابراین در اینجا پارامترهای با تاثیرگذاری بیشتر و در عین حال با دستیابی آسان‌تر در نظر گرفته شده است. این پارامترها شامل شاخص رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل (RMR) و ارتفاع روباره است. با توجه به یکسان بودن سطح مقطع تمامی تونل‌های مورد بررسی، پارامتر قطر تونل لحاظ نشده است. تغییرات هزینه‌های تونل‌سازی در طول تونل‌های موجود زیاد محسوس نبود، بنابراین هزینه‌های حفاری و نگهداری به ازای هر متر طول تونل محاسبه و به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده‌اند.

۶-۲- توابع رگرسیونی تک متغیره

توابع هزینه‌ی تک متغیره (ax^b) ، (ae^{bx}) و $(ax+b)$ برای

نرم‌افزار آماری *Statistica* استفاده شده است.

برای بررسی معنی‌داری کلی مدل از روش آزمون t ، F و مقدار p استفاده شده است. در آزمون F فرض صفر بودن همزمان تمامی ضرایب رگرسیون بررسی می‌شود. پس از بررسی معنی‌داری کلی تابع، معنی‌داری هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل با آزمون t بررسی می‌شود. در آزمون‌های t و F مبنای مقایسه، عددی است که در سطح معناداری تعریف شده و با لحاظ درجه‌ی آزادی رگرسیون مورد نظر از جدول مربوط به هر توزیع به دست می‌آید. اما راه ساده و سریع‌تر برای رد یا پذیرش فرض مورد بررسی، استفاده از مقدار p است.

۴-۳- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی هر دو نوع توابع هزینه‌ی تک متغیره و چند متغیره از میانگین نرخ خطای مطلق استفاده شده است [16]. در این روش میانگین اختلاف هزینه‌های واقعی و هزینه‌های تخمین زده شده بر اساس درصدی از مقدار هزینه‌ی واقعی ارزیابی می‌شود. این مقدار از گزاره‌ی (۴) قابل محاسبه است [17].

$$MAER = \frac{\sum \left(\frac{Ce - Ca}{Ca} \right) * 100}{n} \quad (4)$$

۵- داده‌های تحقیق

برای انجام تحقیق از اطلاعات هزینه‌ای، زمین‌شناسی، فنی و مکانیک‌سنگی مربوط به ۱۲ تونل از تونل‌های راه اصلی میانه سد شهریار استفاده شده است که با استفاده از روش سنتی حفر شده‌اند. نگهداری اولیه به روش بتن‌پاشی با توری فلزی و پیچ‌سنگ و نگهداری دائمی به روش بتن درجا انجام شده است. سطح مقطع حفاری تمام تونل‌های مورد استفاده از نوع نعل اسبی و یکسان است. طول تونل‌ها نیز از ۱۱۱ متر تا ۵۴۰ متر متغیر بوده (جدول ۱) که عمدتاً در دسته تونل‌های کوتاه توصیف می‌شوند. هزینه‌ها بر مبنای قیمت‌های پایه‌ی سه‌ماهه‌ی چهارم سال ۱۳۸۸ بر حسب ریال است.

این جدول نشان می‌دهد RMR محاسبه شده برای سنگ‌های مقطع تونل‌ها از ۳۵ تا ۶۱ متغیر بوده به طوری که براساس این شاخص، نوع سنگ‌های مسیر تونل جزو سنگ‌های با مقاومت متوسط هستند. کمترین و بیشترین

$$C_{SUP}(mRial/m) = 24.6 \times e^{(-0.006RMR)} \quad (۶)$$

$$C_{TOT}(mRial/m) = 48.2 \times e^{(-0.001RMR)} \quad (۷)$$

۶-۳- توابع رگرسیونی چند متغیره

شکل کلی توابع رگرسیون چند متغیره بکار رفته به صورت چند جمله‌ای خطی است. در جدول ۳ و جدول ۴ به ترتیب روابط بدست آمده برای برآورد هزینه‌های حفاری و نگهداری تونل‌سازی با استفاده از رگرسیون چند متغیره با متغیرهای توضیحی RMR و ارتفاع روباره (H) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده از آزمون‌ها مشاهده می‌شود، نتایج ارائه شده معنی‌دار هستند.

ساخت مدل‌های تک متغیره در جدول ۲ با هم مقایسه شده است. در این توابع از RMR به عنوان متغیر توضیحی استفاده شده است. مشاهده‌ی نتایج نشان می‌دهد تابع (ae^{bx}) از دیدگاه آماری، با توجه به R^2 بالا و MSE پایین برای داده‌های موجود مناسب‌تر است.

تغییرات هزینه‌ی حفاری و نگهداری تونل نسبت به RMR به ترتیب به صورت گزاره‌ی (۵) و (۶) بدست آمده است. به همین ترتیب تابع هزینه‌ی کل نیز مطابق با گزاره‌ی (۷) بدست آمده است. هزینه‌ها بر حسب میلیون ریال برای هر متر طول تونل است.

$$C_{EXC}(mRial/m) = 20.7 \times e^{(0.002RMR)} \quad (۵)$$

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تک متغیره

$Y=ax+b$		$Y=ax^b$		$Y=ae^{bx}$		
هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی حفاری	
۰.۶۶	۰.۶۵	۰.۶۹	۰.۶۷	۰.۷۳	۰.۷۰	R^2
۷.۱۵×۱۰.۵	۳.۱۱×۱۰.۵	۳.۲۶×۱۰.۵	۳.۲۵×۱۰.۵	۳.۰۲×۱۰.۵	۱.۲۵×۱۰.۵	$RMSE$
-۱.۶۱×۱۰.۵	۵.۱۸×۱۰.۴	۱.۸۷×۱۰.۷	۱.۵۷×۱۰.۷	۲.۴۶×۱۰.۷	۲.۰۷×۱۰.۷	a
۳.۳۶×۱۰.۷	۲.۰۷×۱۰.۷	۰.۱۴۰۱۷	۰.۱۰۱۸	-۰.۰۰۶۱۷	۰.۰۰۲۱۸	b

جدول ۳- نتایج بدست آمده برای هزینه‌های حفاری تونل

ضریب B	آزمون t	p -level	آزمون F کل	کل p -level	
۲۰.۵۷	۱۴.۹۵	۰.۰۰۰۱			عرض از مبدا
۰.۰۵۸	۲.۱۶	۰.۰۰۰۹	۹۲.۴	۰.۰۰۰۱	RMR
۰.۰۰۵۵	۲.۷۱	۰.۰۰۰۲			ارتفاع روباره

جدول ۴- نتایج بدست آمده برای هزینه‌های نگهداری تونل

ضریب B	آزمون t	p -level	آزمون F کل	کل p -level	
۳۲.۷۰	۷۴.۵۲	۰.۰۰۰۱			عرض از مبدا
-۰.۱۱۹	۸.۸۹	۰.۰۰۰۸	۱۴۵.۸	۰.۰۰۰۱۱	RMR
۰.۰۰۰۸	۵.۱۷	۰.۰۰۰۷			ارتفاع روباره

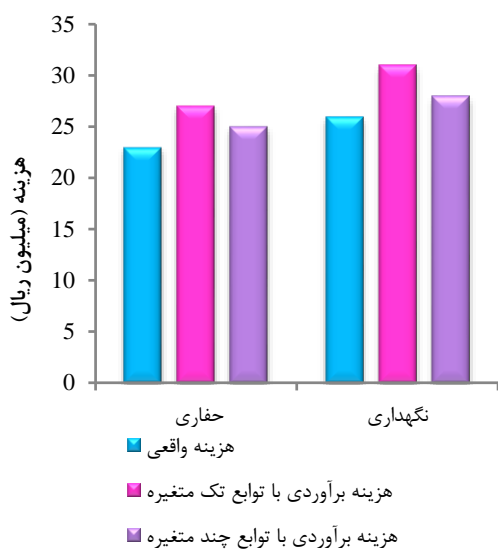
کلی می‌توان نتیجه گرفت کل مدل رگرسیون از معناداری قابل قبولی برخوردار است. توابع چند متغیره هزینه‌های حفاری و نگهداری تونل در گزاره‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. تابع هزینه‌ی کل نیز در قالب گزاره‌ی (۱۰) ارائه شده است. در این روابط هزینه‌ها به صورت میلیون ریال به

همان طور که مشاهده می‌شود، پایین بودن مقادیر p و بالا بودن مقادیر به دست آمده از آزمون t و F تحت فرضیه‌ی صفر (H_0) برای هر دو مولفه و عرض از مبدا، معنادار بودن این پارامترها را در هر سه تابع به خوبی نشان می‌دهد. همچنین با توجه به مقدار بالای به دست آمده از آزمون F

با خطای قابل قبول حدود ۲۰ درصد [18] از اعتبار کافی برخوردار است. علاوه بر این، دامنه‌ی اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده (شکل ۴)، بیانگر وجود سازگاری مناسبی است.

جدول ۵- مقادیر میانگین نرخ خطای مطلق (درصد)

تابع	هزینه‌ی حفاری	هزینه‌ی نگهداری	هزینه‌ی کل
$Y=ax^b$	۱۴,۵۶	۱۴,۴۵	۱۴,۲۳
$Y=ae^{bx}$	۱۳,۲۵	۱۲,۸۶	۱۲,۸۵
$Y=ax+b$	۱۴,۴۳	۱۴,۲۵	۱۴,۱۰
$Y=ax_1+bx_2$	۱۱,۰۴	۱۱,۱۲	۱۱,۳۷



شکل ۴- مقایسه‌ی مقادیر واقعی و تخمینی هزینه‌ها

۸- نتیجه‌گیری

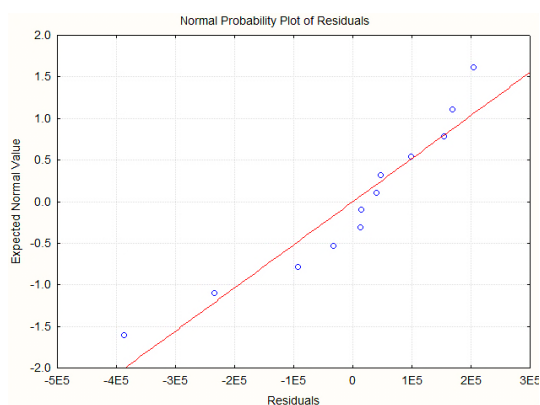
عملیات تونل‌سازی بخش عمده‌ای از پروژه‌های عمرانی کشور را به خود اختصاص داده و مستلزم صرف منابع مالی قابل توجهی است. طراحی و انتخاب روش اجرا در خلال مطالعات پیش‌امکان‌سنجی پروژه‌های تونل‌سازی مستلزم دسترسی به ابزاری سریع و با دقت کافی است. مدل‌های موجود و قابل استفاده در کشور بسیار محدود بوده و توسعه آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. هدف این مقاله ارائه‌ی مدل تخمین هزینه‌ی

ازای هر متر طول تونل بیان شده است. نمودار توزیع احتمال باقیمانده‌ها در و نشان دهنده‌ی روند نسبتاً نرمالی بوده و موید اعتبار توابع به دست آمده هستند.

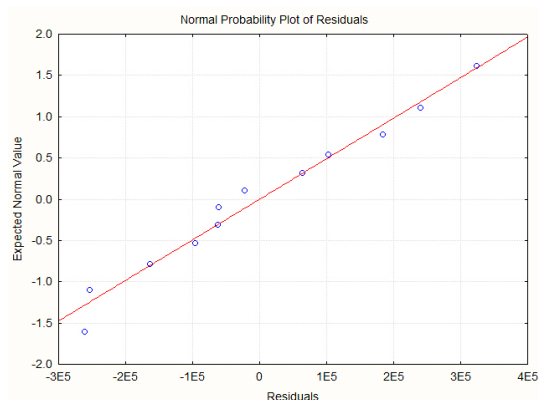
$$C_{EXC}(MR) = 20.577 + 0.0584RMR - 0.0005H \quad (8)$$

$$C_{SUP}(MR) = 32.707 - 0.119RMR - 0.0008H \quad (9)$$

$$C_{TOT}(MR) = 66.074 - 0.253RMR - 0.0005H \quad (10)$$



شکل ۲- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای تابع هزینه‌ی حفاری



شکل ۳- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای تابع هزینه‌ی

نگهداری

۷- آزمون مدل

مقادیر بدست آمده برای میانگین نرخ خطای مطلق (MAER) در جدول ۵ ارائه شده است. این مقدار برای تابع هزینه‌ی انتخاب شده ($Y=ae^{bx}$) کمتر از ۱۴ درصد بوده و در نتیجه این توابع در مرحله‌ی مطالعات پیش‌امکان‌سنجی

مطلق ۱۳ درصد بهتر از توابع نمایی و خطی، هزینه‌های تونل‌سازی را برآورد می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد هزینه‌های حفاری با تغییرات RMR نسبت مستقیم دارد. در حقیقت افزایش کیفیت توده‌سنگ به معنی بهبود خواص مقاومتی ماده‌سنگ یا مشخصات ساختاری توده‌سنگ است که در هر دو مورد انتظار افزایش هزینه‌های چالزنی و انفجار برای شکست سنگ وجود دارد. هزینه‌ی نگهداری تونل نیز با RMR نسبت عکس دارد. علت این امر آن است که با افزایش کیفیت توده‌سنگ سیستم نگهداری کمتر یا سبک‌تری نیاز خواهد بود.

از مدل‌های رگرسیونی خطی، لگاریتمی و نمایی نیز برای مدل‌سازی با توابع چند متغیره استفاده شده است که بررسی معناداری روابط با آزمون‌های F,t و مقدار P نشان داده است تنها مدل‌های رگرسیونی خطی $Y=ax_1+bx_2$ معنادار است. اعتبارسنجی مدل به روش حداقل نرخ خطای مطلق بیانگر دامنه خطای ۱۱ تا ۱۳ درصد بوده که مقدار قابل قبولی در مطالعات پیش‌امکان‌سنجی است. لازم به ذکر است که مدل‌های تجربی در دامنه‌ی داده‌های مورد استفاده معتبر بوده و مدل حاضر نیز در تونل‌های کم عمق (با حداکثر عمق ۱۰۰ متر) در توده‌سنگ با کیفیت متوسط تا خوب (RMR بین ۴۰ تا ۶۰) قابل استفاده است.

تونل‌سازی به روش حفر سنتی به عنوان یکی از شیوه‌های رایج در پروژه‌های تونل کشور است. بدین منظور، ضمن بررسی عوامل موثر بر هزینه، از روش رگرسیون به دلیل مبنای قوی ریاضی و کاربرد وسیع آن در برآورد هزینه استفاده شده است. توابع تک متغیره‌ی هزینه به صورت نمایی و توابع رگرسیون به صورت خطی ارائه شده است. متغیرهای مستقل شامل شاخص کیفیت توده‌سنگ (RMR) و ارتفاع روباره است. این مدل امکان تخمین سریع و دقیق هزینه‌های حفر و نگهداری تونل را برای انجام مطالعات پیش‌امکان‌سنجی پروژه‌های ساخت تونل فراهم می‌سازد.

در مدل‌های قبلی برآورد هزینه، از پارامتر قطر نیز استفاده شده است، اما تونل‌های مورد بررسی در این تحقیق سطح مقطع یکسانی دارند؛ بنابراین از این پارامتر صرف نظر شده است. پارامتر طول نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای موثر است. طول تونل‌های موجود از ۱۱۱ متر تا ۵۴۰ متر است و نتایج مدل‌سازی نشان داده است تغییرات طول تاثیر بسیار کمی بر روی هزینه‌ها دارد. در نتیجه، در روابط ارائه شده از شاخص کیفی سنگ و عمق روباره استفاده شده است.

بر اساس نتایج این پژوهش، از میان سه تابع تک متغیره‌ی مورد بررسی، تابع $Y=ae^{bx}$ با حداقل نرخ خطای

۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
LBT	m	طول کل بالاست گذاری شده	LDF	m	طول راه مستقیم
WR	$Tonne$	وزن ریل‌ها	SN	-	تعداد بلوک‌های سیمانی تکیه‌گاه
HPC	$passenger/h$	ظرفیت	x	-	متغیر مستقل
Y	-	متغیر وابسته	c_0	-	عرض از مبدا
c_n	-	ضریب متغیرهای مستقل	ϵ_0	-	باقیمانده
c_e	$mRial$	هزینه‌ی برآورد شده	c_a	$mRial$	هزینه‌ی واقعی
n	-	تعداد داده	C_{EXC}	$mRial$	هزینه‌ی حفاری
C_{SUP}	$mRial$	هزینه‌ی نگهداری	C_{TOT}	$mRial$	هزینه‌ی کل

۱۰- منبع‌ها

- [1] Lamb, T. J. (1971). *A Computer Model for Tunneling Costs*. MSc Thesis: Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1721.1/52910>.

- [2] Moavenzadeh, F. & Markow, M. J. (1976). Simulation Model for Tunnel Construction Costs. *Journal of the Construction Division*, 102(1), 51-66. <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?6534>.
- [3] Einstein, H. H., Salazar, G. F., Kim, Y. N., & Ioannou, P. S. (1987) Computer Based Decision Support Systems in Underground Construction. *Proceeding of Rapid Excavation and Tunneling Conference*. ISBN-13: 978-0873350655.
- [4] Bruland, A. (1998). *Hard Rock Tunnel Boring Advance Rate and Cutter Wear*. Doctoral Thesis: Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian Institute of Technology.
- [5] Petroutsatou, C., Lambropoulos, S., & Pantouvakis, J. P. (2006). Road Tunnel Early Cost Estimates Using Multiple Regression Analysis. *Operational Research*, 6(3), 311-322. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02941259>.
- [6] Sonmez, R., & Ontepeli, B. (2009). Predesign Cost Estimation of Urban Railway Projects with Parametric Modeling. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(4), 405-409. <http://dx.doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.405-409>.
- [7] Gunduz, M., Ugur, L. O., & Ozturk, E. (2011). Parametric Cost Estimation System for Light Rail Transit and Metro Trackworks. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2873-2877. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.080>.
- [8] Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Alavi, E., & Mojtabei, N. (2013). Planning Level Tunnel Cost Estimation Based on Statistical Analysis of Historical Data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 22-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.08.002>.
- [۹] علیزاده، ح. (۱۳۸۰). برآورد هزینه‌ی واحد حفاری و نگهداری اولیه‌ی شانکریت، شبکه‌ی فولادی و بولت‌زنی تونل. پنجمین کنفرانس تونل ایران. دانشگاه تهران. http://www.civilica.com/Paper-ITC05-010_2127792253.html
- [۱۰] همتی شعبانی، ع.، صیادی، ا. ر.، گشتاسبی، ک.، و امیری رودباری، ع. ر. (۱۳۸۵). بررسی تاثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه‌ی پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو- مطالعه‌ی موردی تونل انتقال آب دشت ذهاب. هفتمین کنفرانس تونل ایران. دانشگاه شریف. http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_081.html
- [۱۱] کنعانی‌مقدم، ح.، چنگانی، ح.، سالاری‌راد، ح.، و صالحی، ع. ر. (۱۳۸۵). بررسی مقایسه‌ای هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و اجرایی تونل سرویس البرز بر اساس دو روش حفاری سنتی (D&B) و حفاری مکانیزه (TBM). هفتمین کنفرانس تونل ایران. دانشگاه شریف. http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_089.html
- [۱۲] صیادی، ا. ر.، گشتاسبی، ک.، همتی شعبانی، ع.، و امیری رودباری، ع. ر. (۱۳۸۴). تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت تونل انتقال آب دشت ذهاب. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین. http://www.civilica.com/Paper-GSI24-GSI24_060.html
- [13] Smith, A. E., & Mason, A. K. (1997). Cost Estimation Predictive Modeling: Regression Versus Neural Network. *The Engineering Economist*, 42(2), 137-161. <http://dx.doi.org/10.1080/00137919708903174>.
- [14] Sayadi, A. R., Lashgari, A., Fouladgar, M. M., & Skibniewski, M. J. (2012). Estimating Capital and Operational Costs of Backhoe Shovels. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(3), 378-385. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.692705>.
- [15] Sayadi, A. R., Lashgari, A., & Paraszczak, J. (2011). Hard-Rock LHD Cost Estimation Using Single and Multiple Regressions Based on Principal Component Analysis. *Tunnelling and underground space technology*, 27(1), 133-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.08.006>.

- [16] Rudenno, V. (1998). *The Mining Valuation Handbook: Australian Mining and Energy Valuation for Investors and Management*. Australian Print Group.
- [17] Kim, G. H., An, S. H., & Kang, K. I. (2004). Comparison of Construction Cost Estimating Models Based on Regression Analysis, Neural Networks, and Case-Based Reasoning. *Building and Environment*, 39(10), 1235-1242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.013>.
- [18] O'Hara, A., & Suboleski, S. C. (1992). Chapter 6.3: Cost and Cost Estimation. *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 405-424), 2nd Edition, Volume 1.

شیوه‌نامه‌ی نهایی نگارش مقاله برای ارسال به نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی

سید محمد اسماعیل جلالی^{۱*}؛ احمد رمضان‌زاده^۲؛ ملیحه داودآبادی^۳
 ۱- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود
 ۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود
 ۳- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ کارشناس فنی نشریه

چکیده

واژگان کلیدی

این شیوه‌نامه برای یکسان‌سازی و ساده‌سازی فرآیند نگارش و ویرایش دست‌نوشته‌های (*Manuscripts*) این نشریه توسط پژوهشگران تهیه شده است. در متن شیوه‌نامه، ویژگی‌های بخش‌های اصلی دست‌نوشته، چیدمان صفحه (*Page layout*)، شکل‌ها، جدول‌ها، پیوست‌ها، منبع‌ها و دیگر موارد ضروری برای تدوین دست‌نوشته بیان شده است. در چکیده باید چگونگی، ضرورت، روش، ابزارها و دستاوردهای پژوهش در یک بند (*Paragraph*) تک ستونی به صورت روشن بیان شود. در چکیده نباید نمودار، جدول، شکل، گزاره یا نمادهای ریاضی دیده شود. چکیده‌ی پارسی می‌تواند تا ۲۰۰ واژه و چکیده‌ی بلند انگلیسی تا ۴۰۰ واژه باشد. توجه شود که چکیده‌ی بلند انگلیسی باید در یک فایل جداگانه و با رعایت موارد ارایه شده در شیوه‌نامه‌ی انگلیسی نوشته شود.

شیوه‌نامه‌ی نگارش مقاله
 نشریه‌ی علمی-پژوهشی
 فضاهاى زیرزمینی
 دانشگاه شاهرود
 انجمن تونل ایران

۱- پیشگفتار

در این دست‌نوشته، شیوه‌نامه‌ی نهایی تهیه‌ی مقاله‌های نشریه‌ی علمی-پژوهشی «مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی» تشریح شده است. این شیوه‌نامه بر اساس ویژگی‌های موجود در نرم‌افزار *Microsoft-Word* تهیه شده و به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود از نسخه‌ی ۲۰۱۳ این نرم‌افزار بهره‌گیرند. شیوه‌های (*Styles*) مورد نیاز برای تمامی بخش‌های دست‌نوشته، به صورت پیش‌فرض تعریف شده و پژوهشگران می‌توانند با استفاده از آن، دست‌نوشته‌ی خود را ویرایش نمایند. چیدمان صفحه و نکته‌های مهمی که باید در نگارش دست‌نوشته‌ها رعایت شود عبارت است از:
 الف- اندازه‌ی هر صفحه برابر با *A4* و حاشیه‌های بالا، پایین، راست و چپ آن‌ها به ترتیب برابر با ۴، ۴، ۳ و ۳ سانتی‌متر انتخاب شود (جدول ۱).

جدول ۱- حدود متن

مشخصات	اندازه (سانتی‌متر)
عرض ستون‌ها	۷
فاصله‌ی بین ستون‌ها	۱
فاصله از بالا	۴
فاصله از پایین	۴
فاصله از راست	۳
فاصله از چپ	۳

ب- تعداد صفحه‌های مقاله باید زوج باشد.

پ- پیکره‌ی اصلی دست‌نوشته به صورت دو ستونی با عرض ۷ سانتی‌متر و فاصله‌داری برابر با ۱ سانتی‌متر تهیه شود (جدول ۱).

ت- فاصله‌ی سطرها در تمام بخش‌ها، به صورت تک‌فاصله‌ای (*Single*) باشد.

در جدول ۲ آورده شده است.

۲- بخش‌های اصلی دست‌نوشته

هر دست‌نوشته به ترتیب باید دارای عنوان، نام و مشخصه‌های پژوهشگران، واژگان کلیدی، چکیده‌ی پارسی، پیشگفتار، پیکره‌ی اصلی پژوهش، نتیجه‌گیری و در نهایت منبع‌ها باشد. سایر بخش‌ها شامل سپاس‌گزاری، نمادگذاری و پیوست‌ها همگی در انتهای دست‌نوشته پس از نتیجه‌گیری و پیش از منبع‌ها قرار می‌گیرد. چکیده‌ی بلند انگلیسی نیز باید در یک فایل جداگانه تهیه و ارسال شود.

۲-۱- ویژگی‌های عنوان دست‌نوشته

عنوان دست‌نوشته تا حد امکان کوتاه و دربردارنده‌ی مفهوم اصلی پژوهش و روش انجام آن باشد. عنوان دست‌نوشته باید با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۵ نوشته شود (جدول ۲). پیش از عنوان دست‌نوشته و پس از آن باید یک سطر سپید مطابق با قلم عنوان دست‌نوشته قرار گیرد.

۲-۲- ویژگی‌های نام و مشخصه‌های پژوهشگران

نام نویسندگان با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۰ پس از عنوان دست‌نوشته نگاشته شود. رتبه‌ی علمی یا تحصیلات و نام سازمان متبوع پژوهشگران در زیر نام آن‌ها با قلم بی‌نازنین ۱۰ نوشته شود. چنانچه برخی از پژوهشگران دارای مشخصه‌های یکسانی باشند، لازم است مشخصه‌های ایشان تنها در یک سطر که دارای یک شماره‌ی مشترک با اسامی آن‌ها است، درج شود. پس از مشخصه‌های آخرین پژوهشگر باید یک سطر سپید قرار داده شود.

پژوهشگر عهده‌دار مکاتبات با قرار دادن نشان ستاره در بالای نام آن مشخص شود. نشانی کامل پستی، شماره‌ی تلفن ثابت و همراه، دورنگار و نشانی رایانامه این پژوهشگر باید در زیرنویس صفحه‌ی اول نوشته شود.

۲-۳- ویژگی‌های چکیده‌ی پارسی و انگلیسی

چکیده‌ی دست‌نوشته باید به دو زبان پارسی و انگلیسی نگاشته شود. چکیده‌ی پارسی در ابتدای دست‌نوشته و چکیده‌ی بلند انگلیسی باید در یک فایل جداگانه تهیه شود. توجه شود که در چکیده‌های پارسی و انگلیسی از آوردن شکل، جدول و نمودار پرهیز شود. پیکره‌ی چکیده‌ی پارسی در یک بند با قلم بی‌نازنین ۱۰ و پیکره‌ی چکیده‌ی انگلیسی با قلم *Times New Roman* و با اندازه‌ی ۱۰ نوشته شود.

ث- پیش از عنوان‌های سطح اول باید یک سطر سپید با مشخصات اولین بند (در بخش *Styles*) قرار گیرد. برای سایر زیرعنوان‌ها نیازی به درج سطر سپید یا فاصله نیست.

ج- از بکارگیری عکس‌های اسکن شده در دست‌نوشته پرهیز و شکل‌ها به صورت جداگانه و با کیفیت بالا به سامانه‌ی نشریه ارسال شود.

چ- تمامی نمودارها باید به صورت *Chart* و دارای پیوند با نرم‌افزار *Excel* در دست‌نوشته گنجانده شوند.

ح- دقت شود که مرجع‌گذاری (*Cross-Reference*) برای تمامی شکل‌ها، جدول‌ها، گزاره‌های ریاضی و منبع‌ها انجام شود و متن مرجع پارسی با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۰ و مرجع انگلیسی با قلم پرننگ *Times New Roman* و با اندازه‌ی ۹ نوشته شود (جدول ۲).

خ- برای نوشتار انگلیسی در پیکره‌ی دست‌نوشته از قلم *Times New Roman* کج، با اندازه‌ی ۱۰ استفاده شود.

جدول ۲- اندازه و نوع قلم‌ها

نام بخش	نام قلم	اندازه
عنوان دست‌نوشته	بی‌نازنین پرننگ	۱۵
نام پژوهشگران	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
مشخصه‌های پژوهشگران	بی‌نازنین	۱۰
عنوان چکیده	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
متن چکیده	بی‌نازنین	۱۰
عنوان واژگان کلیدی	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
واژگان کلیدی	بی‌نازنین پرننگ	۹
زیرنویس صفحه‌ی اول	بی‌نازنین	۹
پیکره‌ی دست‌نوشته	بی‌نازنین	۱۱
عنوان سطح اول	بی‌نازنین پرننگ	۱۳
عنوان سطح دوم	بی‌نازنین پرننگ	۱۲
عنوان سطح سوم	بی‌نازنین پرننگ	۱۱
عنوان جدول‌ها و شکل‌ها	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
متن جدول‌ها و شکل‌ها	بی‌نازنین	۱۰
منبع‌های پارسی	بی‌نازنین	۱۰
منبع‌های انگلیسی	<i>Times New Roman</i>	۹

د- برای نوشتن اعداد در بین عددهای پارسی علامت اعداد زیرنویس شده (*Subscript*) بکار برده شود.

ذ- اندازه و نوع قلم‌های مورد استفاده در دست‌نوشته



شکل ۱- نشان نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

۲-۴- ویژگی‌های واژگان کلیدی

واژگان کلیدی حداکثر تا هفت واژه در محل مشخص شده نوشته شود. واژگان کلیدی باید به گونه‌ای انتخاب شود که موضوع و فرآیند انجام پژوهش در ذهن خواننده تداعی شود. این واژگان می‌تواند به صورت یک عبارت تک‌واژه‌ای تا حداکثر سه‌واژه‌ای انتخاب شود.

۲-۵- ویژگی‌های پیشگفتار

در پیشگفتار ضرورت، اهداف و فرآیند کلی پژوهش انجام شده و نیز پیشینه‌ی موضوع به صورت کوتاه بیان شود. بطوری که خواننده پس از خواندن پیشگفتار آمادگی لازم برای ورود به موضوع اصلی پژوهش را بدست آورد.

۲-۶- ویژگی‌های پیکره‌ی اصلی پژوهش

پیکره‌ی دست‌نوشته باید شامل تعریف مفهوم‌ها، روش انجام پژوهش، بیان چالش‌ها و رهیافت‌های پیشنهادی باشد.

۲-۷- ویژگی‌های شکل‌ها و جدول‌ها

در طراحی جدول‌ها به درج خط در کناره‌ها یا بین سطرهای مشابه نیاز نیست. متن جدول با قلم بی‌نازنین ۱۰ نوشته شود. قلم سطر و ستون اول بی‌نازنین ۹ پررنگ باشد. بهتر است شکل‌ها با استفاده از ابزار *Picture Tools* بازبینی و ویرایش شوند. این ابزار با کلیک بر روی عکس فعال می‌شود. دقت شود که جانمایی شکل‌ها در پیکره‌ی دست‌نوشته بصورت *In line with text* است. تمامی نمودارها باید به صورت *Chart* در دست‌نوشته گنجانده شوند.

بین ابتدا و انتهای هر شکل یا جدول، یک سطر سپید با مشخصه‌ی اولین بند (در بخش *Styles*) قرار گیرد. اگر جدول یا شکل در ابتدای صفحه باشد، نیازی به درج سطر سپید در بالا و اگر در انتهای صفحه باشد، نیازی به درج سطر سپید در پایین صفحه نیست.

شماره‌گذاری شکل‌ها و جدول‌ها با ابزار *Caption* انجام شود. در موارد ویژه اگر شکل یا جدول در یک ستون نگنجد، می‌توان آن را در دو ستون قرار داد. برای این کار با استفاده از ابزار *Break Continuous*، چیدمان صفحه از وضعیت دوستونی به تک‌ستونی تبدیل شود.

لازم است توضیحات شکل در زیر آن و جدول در بالای آن نوشته و هر شکل یا جدول به شماره‌ی منبع مربوط به آن ارجاع داده شود. در شکل ۱ و جدول ۱ نمونه‌ای از چگونگی تنظیم‌های شکل و جدول، قابل مشاهده است.

۲-۸- ویژگی‌های گزاره‌های ریاضی

گزاره‌های ریاضی باید در یک جدول دو ستونه و با استفاده از ابزار گزاره‌نویسی (*Equation*) نوشته شود. توضیحات تمام نمادهای جدید مانند گزاره‌ی (۱)، باید در بخش نمادها در انتهای دست‌نوشته، پس از نتیجه‌گیری و پیش از منبع‌ها آورده شود. ذکر واحد هر نماد در سامانه‌ی بین‌المللی (*SI*) ضروری است.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

۲-۹- ویژگی‌های نتیجه‌ها

در بخش نتیجه‌گیری، مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش انجام شده به صورت کوتاه مرور می‌شود. بیان کاربری نتیجه‌های بدست آمده در توسعه‌ی دانش و فن‌آوری و رفع چالش‌های موجود و آرایه‌ی پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی نیز می‌تواند در این بخش افزوده شود.

۲-۱۰- ویژگی‌های منبع‌های پژوهش

برای نگارش منبع‌های پژوهش باید ابزار *References* بکار برده شود. الگوی مورد استفاده در نشریه‌ی «مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی» الگوی *APA* (به سبب سادگی آن) است. در بخش *Manage Sources* باید نوع منبع شامل کتاب، نشریه، همایش، گزارش یا یکی از سایر گزینه‌ها انتخاب و تمام بخش‌های پیشنهاد شده و ستاره‌دار برای آن تکمیل شود. نگارش شماره‌ی استاندارد برای کتاب‌ها و مقالات (*ISBN, ISSN & DOI*) الزامی است. سپس از بخش *Bibliography* سیاهه‌ی منبع‌های بکار برده شده در پیکره‌ی دست‌نوشته به ترتیب دیده شدن در یک بند تک‌ستونی جانمایی شود. هر منبع باید به اولین بخشی که در آن آمده است ارجاع داده شود. برای مثال شیوه‌ی درست نوشتن یک مقاله‌ی کنفرانسی، یک مقاله‌ی علمی-پژوهشی و یک کتاب با استفاده از الگوی *APA* به ترتیب در بخش منبع‌ها آورده شده است [1]، [2] و [3].

۳- قواعد نوشتاری

دست‌نوشته باید با جملات گویا، ساده و کوتاه نوشته شود. جداسازی بخش‌های گوناگون پیکره‌ی دست‌نوشته با استفاده از بند، کمک زیادی به روانی نوشتار می‌کند. یک بند می‌تواند ۱۰ تا ۱۵ سطر باشد. متن اولین بند دست‌نوشته نباید تورفتگی داشته باشد. سایر بندهای دست‌نوشته باید به اندازه‌ی ۰/۷ سانتی‌متر تورفتگی داشته باشد.

تا حد امکان تلاش شود برای واژگان بیگانه معادل پارسی آن بکار برده شود. برای واژگان تخصصی لازم است در اولین کاربرد واژه‌ی پارسی، منشا آن و برای واژگان مختصر شده (*Abbreviation*)، عبارت کامل آن درون هلالین (*Parentheses*) در مقابل آن واژه آورده شود. چنانچه معادل پارسی یا واژگان مختصر شده در چکیده آورده شده باشد، تعریف آن باید در همان چکیده نگاشته شود. نام‌های دارای ثبت تجاری (*TM*) می‌تواند به زبان اصلی نوشته شود. به جز صفحه‌ی اول دست‌نوشته در سایر بخش‌ها نباید از زیرنویس استفاده شود. نویسنده باید تلاش نماید تا حد امکان از بکارگیری واژگان عربی، تنوین و روش‌های جمع عربی مانند جمع مکسر، «ات» و «ین» در نگارش دست‌نوشته پرهیز نماید.

برای درج فاصله‌ی مجازی از ابزار "*ctrl+shift+2*" استفاده شود. بکارگیری فاصله‌ی مجازی برای افعال مضارع، واژگان مرکب و قبل از «ها»، «تر» و «بی» الزامی است. در انتهای واژگانی که به «ه» و «کسره» ختم می‌شوند، باید به جای درج نشان کسره از «ی» استفاده شود. دقت شود که نقطه، دونقطه، ویرگول و نقطه‌ویرگول باید به واژه‌ی قبل از خود بچسبند و از واژه‌ی بعدی یک حرف فاصله بگیرد. هلالین و قلاب (*Bracket*) باید به واژگان درون خود بچسبند و از واژگان پیش و پس از خود فاصله داشته باشد.

۸- منابع

- [1] Jalali, S. E., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. *Modern Management of Mine Producing, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference. ISBN: 9549181812.
- [2] Jalali, S. E., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>.
- [3] Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V. ISBN-13:978-0-08-044987-6.

۴- نتیجه‌گیری

در این نوشتار، شیوه‌ی نگارش و ویژگی‌های بخش گوناگون یک دست‌نوشته‌ی علمی- پژوهشی در نشریه‌ی «مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی» بیان شده است. با توجه به ابزارهای موجود در نرم‌افزار *Microsoft-Word 2013*، تمامی تنظیم‌های مورد نیاز برای نگارش یک دست‌نوشته‌ی جدید به آسانی قابل پیاده‌سازی است. نویسنده می‌تواند با وارد کردن متن دست‌نوشته در این فایل و استفاده از ابزار *Styles*، نوشتار خود را ویرایش نماید.

۵- سپاس‌گزاری

اگر در انجام پژوهش از کمک‌های معنوی، علمی، ویراستاری و مالی شخص، یک سازمان، پژوهشگاه یا نهاد استفاده شده است، در این بخش باید به آن اشاره شود.

۶- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
σ	Pa	تنش
F	N	نیرو
A	m^2	سطح اعمال نیرو

۷- پیوست‌ها

موضوع‌های مرتبط با دست‌نوشته که در یکی از گروه‌های زیر قرار می‌گیرد، در بخش پیوست آورده شود:

الف- فرآیندها یا اثبات گزاره‌ها
ب- الگوریتم برنامه‌ها
پ- داده‌های نمونه‌ی مورد مطالعه
ت- نتیجه‌ی پژوهش دیگران

Instructions to Authors: Writing an English Extended Abstract for Submission to the Journal of Tunneling and Underground Space Engineering (TUSE)

S. E. Jalali¹; A. Ramezanzadeh²; M. Davoodabadi³

1- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

2- Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

3- M.Sc. in Mining Engineering; Technical Editor of TUSE

Keywords

**Final extended abstract
Journal
Underground space
University of Shahrood (US)
Iranian Tunneling Association (IRTA)**

Final English Extended Abstract

Each submitted manuscript to the Journal should accompany an English extended abstract, which also needs to be uploaded on the website. In the following, the preparation process for an English extended abstract is explained. Each English extended abstract should be maximum 400 words in length (maximum one page) and should contain **four** sections of **Summary**,

Introduction, Methodology and Approaches, and **Results and Conclusions**. The abstract should contain no figures, tables, or equations as well as no citations to references. Please use the font Times New Roman for writing the English abstract. Furthermore, type the title by 14-pt Bold, for the authors by 9-pt Bold, the affiliations by 9-pt, the body of the abstract by 10-pt, and the keywords by 9-pt Bold. The body of the abstract should be aligned as justified and typed with single line spacing.

Summary

In this section, a concise and comprehensive summary of the process of research should be presented. It should concisely describe the content, subject, objectives, scientific logic or method(s), and the most important findings and conclusions of the research.

Introduction

The introduction of the English extended abstract should comprehensively present the basics of the research in short length and clear statements, so that the reader can obtain a general scope and sufficient information from the research. The necessities, general objectives and future perspectives, in addition to the challenges and extents, of the research should briefly be presented in this section.

Methodology and Approaches

The details, approaches, tools, software, computational or statistical methods and algorithms of the research should clearly and briefly be explained in this section.

Results and Conclusions

The observations, obtained experiences, findings, results, conclusions, and practical recommendations to continue the research should be presented in this section. If necessary, the stated points in this section can be classified and numbered.

Assessment of Tunnel Face Stability in Unsaturated Media Based on Limit Analysis Method

M. A. Nozari¹; M. Maleki²; B. Yousefi³

1- PhD Candidate in Geotechnical Engineering; Imam Khomeini International University

2- Associate Professor; Faculty of Engineering; Bu-Ali Sina University

3- M.Sc. in Geotechnical Engineering; Faculty of Engineering; Bu-Ali Sina University

Received: 30 Jul 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Limit analysis
Spiral failure
Matric suction
Tunnel face
Unsaturated soil

Extended Abstract

In this research, in the framework of limit analysis method with consideration of a 3-D continuous failure mechanism, stability of tunnel excavation face in unsaturated media was studied. Governing kinematic equations were adapted for unsaturated conditions with introducing unsaturated form of Mohr Coulomb failure criteria. Afterward, a set of parametric analyses, in

different form of suction distribution and tunnel geometry were performed. Based on obtained results, matric suction and its distribution considerably influence tunnel face stability. Therefore, increase in matric suction leads to decrease in limit pressure exerted on tunnel face. In the final section of paper, finite element numerical analyses in the same conditions of material and geometry were executed. The results indicate that limit analysis predict a limit pressure more than finite element method.

Introduction

There are numerous studies in the literature concerning application of upper bound limit analysis for evaluation of tunnel face stability in soft ground. These works have used conventional soil mechanics theory. However, a large part of surface soils are in unsaturated condition. For many engineering problems especially in construction phase, the principle of unsaturated soil mechanics can be used. This can be more efficient for unloading problems such as Tunnelling or excavation. This approach describes the role of unsaturated parameters on tunnel face stability using limit analysis method.

Methodology and Approaches

Governing kinematic equations were firstly adapted to the unsaturated condition. Then, parametric study was performed using direct calculations on kinematic equations. In the final step of paper PLAXIS3D was used for numerical analyses.

Results and Conclusions

- Increase of matric suction leads to more dissipated energy in sliding surfaces of failure mechanism (decrease in limit pressure).
- Presence of matric suction in the analysis do not change the general form of failure mechanism.
- Limit pressures exerted on tunnel face obtained from limit analysis method are less than those obtained from finite element methods.
- The continuous spiral logarithmic form of limit analysis are confirmed qualitatively by finite element method.

Analysis of the Causes of Contractor's Claims in the DB Contracts of Underground Projects in Iran

H. Talkhabi¹; M. Parchami Jalal²; M. Golabchi³

1- M.Sc. Student in Project Management and Construction; Faculty of Architecture; University of Tehran

2- Assistant Professor; Faculty of Architecture; University of Tehran

3- Professor; Faculty of Architecture; University of Tehran

Received: 21 Sep 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

DB contract
Causes of claims
Risk analysis
Importance criteria
Underground projects

Extended Abstract

In the most of projects, there is a possibility of claim occurrence between both contract sides especially by contractors. These claims negatively affect project utilization but can be prevented by perception of main causes of occurrence. In this regard, authors gathered 250 reasons related to claim in underground design-Build projects. After analyzing of these reasons, closed questionnaires including frequency and intensity of impact in three levels (first level consists of 5 groups, second level consists of 16 groups and third one including 43 groups) were prepared and distributed through relevant parts who are active in different sectors of underground projects. Then according to the result of this questionnaires the most important Causes of claims were determined.

Introduction

Growth of claims in construction projects has an inverse correlation with triangular goals of project management (time, cost and quality). In the one hand, the need for faster utilization of a project has caused using design-build method. In the other hand, lack of enough knowledge of design-build method in Iran makes claims occurrence inevitable, especially in underground projects that have a complex nature. If the factors of claim occurrence can be recognized, it might be a preventable issue. In this paper, the most important causes of claims in underground design-build projects have been studied and analyzed.

Methodology and Approaches

In this research, qualitative and quantitative data have been collected by literature review studies, conducting semi-structured interview with experts and examination of documents relevant to real claims of some underground design-build projects. After analysis of these cases, closed questionnaires were prepared and according to the completed questionnaires, claim causes base on importance criteria in underground design-build projects were determined.

Results and Conclusions

It is showed that, If causes considered before starting a project, claim occurrence and its subsequent future conflicts can be prevented. In addition, non-technical factors such as claims should have a similar degree of importance as technical factors in underground design-build projects.

Quality Assessment of Segmental Lining Installation in Mechanized Excavation (D.S.TBM) Case Study: Tehran-Karaj Water Conveyance Tunnel (lot II)

M. Tajik¹; O. Frough²; H. R. Tavakoli³

1- M.Sc. in Engineering Geology; Sahel Consultant Engineers institute

2- Post Doc fellow; Dept. of Energy and Mineral Eng.; Penn State University

3- M.Sc. in Rock Mechanics Engineering; Sahel Consultant Engineers institute

Received: 14 Sep 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Concrete lining
Segment
Spalling
Stepping
Karaj tunnel

Extended Abstract

Excavation and segment installation is simultaneous in D.S.TBM tunneling. Segmental quality control in production phase (in factory) and accuracy and rapidity of segment installation in implementation phase are considered amongst main advantages of segmental lining application in mechanized tunneling. But inherent defects of segments and stepping and spalling after installation decrease concrete lining quality. Recognition of cause and mechanism of segment defects is an important factor in quality improvement of precast concrete lining. In this paper, lining installation quality and causes of concrete damages have been studied using Tehran-Karaj water conveyance tunnel (lot II) site data.

Introduction

During segment installation some damages such as stepping and spalling might occur. There are different influencing factors, which can be categorized as manufacturing and installation related damages. In order to study the type and the cause of segment damages which were installed in different location of a ring, about ten thousand rings were analyzed in Tehran-Karaj water conveyance tunnel (lot II) with 14 km length, excavated by D.S.TBM.

Methodology and Approaches

Lining installation quality of this tunnel was studied using statistical approach. The effective parameters on segment damages classified in ground situation, tunnel alignment, machine parameters, concert characterizations, thrust of the jacks, tail shield situation, quality of installation and other parameters. In this tunnel, each concrete ring consists of 5+1 key universal segment that was assessed based on survey deviance, eccentric thrust jacks and accuracy of segment installation on amount and size of defects.

Results and Conclusions

This approach shows that minimum and maximum spalling occurs in key segment and its contiguous segments, respectively. In addition, stepping in key contiguous segments are more than other type of segments. Comparing segment installation condition and survey deviance in curve alignments shows a great reduction in installation quality and increase in number of stepping and spalling area.

Numerical Analysis of the Effect of Tunnel- Building Interaction on Surface Settlement

S. Gharehdash¹; M.Barzegar²

1- M.Sc. in Rock Mechanics; Dept. of Mining and Metallurgical Eng.; Amirkabir University of Technology
2- M.Sc. in Mining Exploitation Engineering; Dept. of Mining and Metallurgical Eng.; Amirkabir University of Technology

Received: 04 Jan 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Surface settlement
EPB-TBM
Parametric analysis
Building geometry
Mashhad metro
Finite difference method

Extended Abstract

In this research, the influence of tunnel construction of the 2nd line of Mashhad metro in the vicinity of Sadaf hotel has been chosen as a case study. It was aimed to investigate the ground displacements and surface settlement which has been induced by tunneling with Earth Pressure Balance-Shield Tunnel Boring Machine (EPB-TBM). FLAC-3D, as a finite difference software, has been used for numerical modelling.

Introduction

Construction of underground tunnels plays an important role in development of modern cities. One of the most important problems caused by the construction of tunnels is that underground excavations can cause large settlement of surface ground. Transportation developments in cities often involve tunneling, which inevitably leads to ground movements and Tunnel construction in urban areas may inevitably require crossing close to adjacent surface structures.

Methodology and Approaches

In this paper, influence of effective parameters are assessed. These factors are geometrical parameters such as tunnel overburden, depth of foundation of building and lateral distance between tunnel and building. Numerical method in this study was performed with FLAC-3D code. Moreover, 4 scenarios are analyzed: green field analysis with close form solution, green field analysis with numerical method, tunnel foundation interaction and tunnel interaction with weight of structure.

Results and Conclusions

In conclusion, the line graph in various analyses illustrates that the green field analysis even numerical or not are evaluated underestimated results especially on settlement with respect of real condition. Then it is better to consider at least weight of structure for initial settlement analysis. The results indicate that, variation of tunnel overburden is more effective than building depth and lateral distance on surface settlements.

Prediction of Suitable Panel Width in Underground Coal Gasification Process

M. Najafi¹; S. E. Jalali²; R. Khalokakei³

1- Assistance Professor; Faculty of Mining and Metallurgical Eng.; Yazd University

2- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics; Shahrood University

3- Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics; Shahrood University

Received: 12 Jul 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Underground coal gasification
Excavation panel
Multiple Regression
Mazino Coal Basin

Extended Abstract

Underground coal gasification (UCG) is a procedure in which in-situ coal is converted to gas. This process forms a cavity (panel) in the coal seam. The panel width will vary with thickness of the coal, energy in the coal and amount of groundwater that runs into the reactor. Unsuitable design of panel width directly impacts the economic and environmental factors. Therefore, in this research a new method for estimating panel width has been developed using non-linear regression analysis based on data gathered from the 6 UCG field trials which gasified by Controlled Retraction Injection Point (CRIP) method.

Introduction

There is currently no empirical equation for estimation of panel width in UCG design. In this study, at the first stage, a series of simple regression analysis between the independent variables and the dependent variable (panel width) using the data of 6 UCG field trials were implemented. Regression analysis was carried out using SPSS software. The result of this stage revealed that obtaining a reliable relation for the estimation of the panel width using a unique variable is almost impossible. At the second stage, the multiple linear regression analysis was implemented to obtain a relation between panel width and independent variable. Findings showed no reliable relation for estimation of panel width. Finally, the non-linear regression analysis was implemented for development of an empirical model. The results of this study showed a better relationship between independent variables and panel width.

Methodology and Approaches

In this study, non-linear regression analysis has been employed based on data gathered from the 6 UCG field trials and then empirical model has been developed. For this purpose the SPSS21 software has been used.

Results and Conclusions

In this paper, a new empirical model developed by non-linear multiple regression method for prediction of the panel width in UCG design. During the analysis, five possible independent variables coal seam thickness, coal seam depth, operation pressure, coal seam permeability and coal calorific value are used to predict the panel width in UCG. The results of this study show that the developed empirical model can reliably predict the panel width in UCG process. The most important application of this model is to predict panel width before the construction of a UCG pilot. Base on this model, the panel width is estimated 45 m in Tabas Mazino coal deposit.

Preliminary Construction Cost Estimation for Short Tunnels in Fair to Good Rock Mass Conditions

Technical Note

M. Najafzadeh¹; A. R. Sayadi²; J. Khademi Hamidi³

1- M.Sc. Student; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

2- Associate Professor; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

3- Assistant Professor; Mining Engineering Department; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University

Received: 05 May 2012; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Short road tunnels
Cost estimation
Regression analysis
Overburden
Rock Mass Rating (RMR)

Extended Abstract

Cost estimation is one of the most critical tasks in pre-feasibility studies and planning of tunnel construction projects. This paper presented a cost estimation model for excavation and support of short tunnels using uni-variate (UVR) and multi-variate regression (MVR) techniques. Hence, a database consisting of two explanatory variables including RMR and tunnel depth

along with tunnel support and excavation costs was compiled from 12 tunnel sections in the North-West of Iran. The statistical significance and validity of the obtained models was checked by using some statistical tests, which proved that this model provides the possibility of a fast and adequate cost estimation of the excavation as well as support cost of tunnels at the phase of pre-feasibility study in tunnel projects.

Introduction

In this research, the main purpose is to provide a reliable early cost estimating model for short tunnels which are constructed by drilling and blasting method. The structure of the proposed model is dependent on previous experiences in cost modeling as well as statistical considerations of data and the results of validation functions.

Methodology and Approaches

In this research, both uni-variable and multi-variable regression techniques were implemented because of their mathematical background and their wide applications in cost estimations.

Results and Conclusions

Based on the obtained results, among the three possible uni-variate functions, the form of $Y=ae^{bx}$, with a mean absolute error rate of 13% is better than others for estimation of the tunneling cost. The results showed that the costs of excavation increase with RMR. In addition, the cost of tunnel excavation showed a reverse relation with RMR. Linear, logarithmic and exponential regression techniques were applied for multi-variate modeling and it was concluded that only the linear regression model is significant. Validation of the model using MAER method indicated that the error changed in 11 to 13 percent provides an acceptable range in pre-feasibility study phase.



Journal of

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

Volume 3 - Issue 1\Summer 2014

Editor in Chief: Seyed-Mohammad Esmail Jalali

Director in Chief: Ahmad Ramezanzadeh

Associate Editor: Siamak Hashemi

English Literary Editor: Abolghasem Kamkar Rohani

Technical Editor & Coordinator: Maliheh Davoodabadi

License Holders: University of Shahrood (US) & Iranian Tunneling Association (IRTA)

Editorial Board

Mohammad Javad Jafari (Shahid Beheshti University)
Hossein Jalalifar (Shahid Bahonar University of Kerman)
Jian Jhao (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne)
Mostafa Sharifzadeh (Curtin University)
Mohammad Fatehi Marji (Yazd University)
Morteza Gharooni Nik (Iran University of Science & Tech.)

Seyed-Mohammad Esmail Jalali (University of Shahrood)
Ahmad Ramezanzadeh (University of Shahrood)
Farhang Sereshki (University of Shahrood)
Kourosh Shahriar (Amirkabir University of Tech.)
Ahmad Fahimifar (Amirkabir University of Tech.)
Siamak Hashemi (Iranian Tunneling Association)

Reviewers of This Issue

Alireza Baghbanan (Isfahan University of Tech.)
Morteza Esmaili (Iran University of Science and Technology)
Omid Frough (Pennsylvania State University)
Amir Abdollah Iranzadeh (Moshanir Co.)
Hossein Jalalifar (Shahid Bahonar University of Kerman)
Farzin Kalantari (K. N. Toosi University of Tech.)
Mohammad Khosrotash (Sabir Co.)
Abolghasem Mozaffari Shams (Iranian Tunneling Association)
Majid Nikkhhah (University of Shahrood)
Mohammad Safi (Power and Water University of Tech.)
Mostafa Sharifzadeh (Curtin University)

Mehrdad Emami (Sahand University of Tech.)
Mohammad Fatehi Marji (Yazd University)
Siamak Hashemi (Iranian Tunneling Association)
Meisam Jalali (Damghan University)
Alireza Jannesari (Sepasad Co.)
Jafar Khademi Hamidi (Tarbiat Modares University)
Hossein Mirzaee Nasirabad (University of Shahrood)
Hormoz Nasernia (Iranian Mining Engineering Organization)
Reza Rahmannedhad (Shahid Bahonar University of Kerman)
Kourosh Shahriar (Amirkabir University of Tech.)
Masoud Zare Naghadehi (Hamedan University of Tech.)

ISSN: 2322-3111

Address: Journal of Tunneling & Underground Space Engineering Office; Faculty of Mining Eng.,
Petroleum & Geophysics; University of Shahrood; University Boulevard; Shahrood; Iran

Zip Code: 3619995161 - **P.O.Box:** 316

Tel-fax: (+98)23- 3239 62 20

Web Site: tuse.shahroodut.ac.ir

Email: tuse@shahroodut.ac.ir

Journal of
**Tunneling and Underground Space
Engineering (TUSE)**



Volume 3 - Issue 1\ Summer 2014

ISSN 2322-3111

- Assessment of Tunnel Face Stability in Unsaturated Media Based on Limit Analysis Method** 92
Mohammad Amin Nozari; Mohammad Maleki; Behnam Yousefi
- Analysis of the Causes of Contractor's Claims in the DB Contracts of Underground Projects in Iran** 93
Hadi Talkhabi; Majid Parchami Jalal; Mahmood Golabchi
- Quality Assessment of Segmental Lining Installation in Mechanized Excavation (D.S.TBM)- Case Study: Tehran-Karaj Water Conveyance Tunnel (lot II)** 94
Majid Tajik; Omid Frough; Hamid Reza Tavakoli
- Numerical Analysis of the Effect of Tunnel- Building Interaction on Surface Settlement** 95
Saba Gharehdash; Milad Barzegar
- Prediction of Suitable Panel Width in Underground Coal Gasification Process** 96
Mehdi Najafi; Seyed Mohammad Esmail Jalali; Reza Khalokakei
- Preliminary Construction Cost Estimation for Short Tunnels in Fair to Good Rock Mass Conditions** 97
Meisam Najafzadeh; Ahmad Reza Sayadi; Jafar Khademi Hamidi



University of Shahrood