

# مدلسازی عملکرد سیستم المان‌های مسلح کننده طولی فایبرگلاس جهت پایدارسازی جبهه حفاری تونل‌ها

زهرا باقری کلی<sup>۱</sup>، مسعود رنجبرنیا<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استادیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

\* m.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۲۸

## چکیده

در زمین‌های ریزشی برای حفاری ایمن سازه‌های زیرزمینی، سیستم‌های نگهداری متفاوتی می‌تواند استفاده شود. در چنین شرایطی پیش مسلح سازی با استفاده از داول‌های طولی یکی از روش‌های بسیار کارآمد است. این مطالعه به مدل‌سازی عددی رفتار سیستم نگهداری فایبرگلاس می‌پردازد که در آن تغییر مکان جبهه مسلح شده بدست می‌آید. ترکیب این سیستم با سیستم نگهداری شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری اصلی تونل و سیستم پیش برش مکانیکی (پریکاتینگ) به عنوان یکی دیگر از روش‌های پیش نگهداری تاج تونل نیز مطالعه شده است و نهایتاً مقدار بار معادل وارد شده بر این المان‌های طولی تعیین شد. این پژوهش، در شرایط مختلف تنش محیطی درجا و در عمق‌های متفاوت روی یک نوع خاک دانه‌ای (سنگ خرد شده و بشدت ضعیف) انجام گرفته است. با جمع‌بندی و پردازش نتایج، روابط تجربی برای تخمین تغییر مکان جبهه حفاری تونل‌های حفاری شده در سنگ ضعیف و تنش داول‌های مسلح کننده برحسب حفاری، تنش‌های برجای محیطی و همچنین چگالی (تعداد) داول‌ها ارائه شده است.

نتایج حاصل نشان داد که ضریب تنش غیر هیدروستاتیک باعث ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های غیر یکنواخت در جبهه حفاری می‌شود که بررسی و شناسایی بحرانی‌ترین ناحیه باعث مسلح سازی بیشتر آن می‌شود. به ویژه برای مقادیر تنش غیر هیدروستاتیک بزرگتر از یک، تنش نرمالیزه شده ماکزیمم داول‌ها و کرنش مرکز جبهه حفاری افزایش قابل توجهی می‌یابد. همچنین سیستم پیش برش مکانیکی، کارآمدترین روش فنی برای پایدارسازی جبهه حفاری است.

**واژگان کلیدی:** تونل، المان‌های مسلح کننده فایبرگلاس، جبهه حفاری، پیش برش مکانیکی، سنگ‌های ضعیف

## ۱- مقدمه

است. در این نوع زمین‌ها، گسیختگی و ریزش جبهه حفاری از مهمترین پدیده‌های وقوع ناپایداری و مسائل مربوط به حفاری است. در واقع، فشار و تنش ایجاد شده از حد مقاومت محیط

یکی از اساسی‌ترین موانع پیچیده در حفاری سازه‌های زیرزمینی، مواجهه با زمین‌های سست و دارای ویژگی‌های مکانیکی ضعیف

براون (Hoek-Brown) نیز توسط سالوادور سنت ۱۰ و همکاران [7] بررسی شد.

یکی از روش‌های موثر و بسیار کارآمد برای پایداری جبهه حفاری زمین‌های ریزشی استفاده از المان‌های مسلح کننده طولی فایبرگلاس (Longitudinal reinforcement elements (Fibreglass)) است. این سیستم با طول‌ها و جانمایی‌های مختلف بر اساس وضعیت جبهه کار و مساحت مقطع تونل استفاده می‌شود. سازوکار عملکردی این سیستم، تثبیت و نگهداری ناحیه مورد نظر قبل از هر گونه حفاری است. مقاومت محوری زیاد همراه با شکنندگی عرضی که موجب سادگی برش آنها (بدون اینکه تاثیری بر عملکرد طول باقیمانده داشته باشد) همگام با پیشروی تونل می‌شود؛ از مهمترین مزایای این سیستم است. علاوه بر موارد فوق، سادگی نصب، امکان ترکیب آن با سایر سیستم‌های نگهداری، قابلیت انعطاف پذیری زیاد آن و استفاده از آن در هر شکل مقطع حفاری و شرایط گوناگون زمین از دیگر امتیازات این سیستم است.

کاماتا ۱۱ و ماشیمو ۱۲ [8] از طریق مدل فیزیکی و فاناتسو ۱۳ و همکاران [9] از روش مدل‌سازی المان مجزا دریافتند که بولت-های فایبرگلاس در مقایسه با روش فورپولینگ برای پایداری جبهه کار تونل به مراتب موثرتر هستند. آکسوی ۱۴ و اونارگان ۱۵ [10] نشان دادند که با کاربرد این بولت‌ها علاوه بر کاهش جابجایی جبهه کار، از میزان جابه‌جایی‌های تاج و دیواره‌ها نیز کاسته می‌شود. کالولو ۱۶ و تیلور ۱۷ [11] و کاماتا و ماشیمو با مطالعات آزمایشگاهی مشاهده کردند که در صورت جانمایی بولت‌های فایبرگلاس به صورت محیطی، میزان جابه‌جایی جبهه‌کار به حداقل کاهش می‌یابد.

یو ۱۸ [12] و یو و شین ۱۹ [13] رفتار جبهه تونل کم عمق مسلح شده توسط المان‌های طولی فایبرگلاس را با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی المان محدود مطالعه کردند. این

سنگی یا خاکی در جبهه حفاری تونل بیشتر شده و همین امر سبب تغییرات مکان جبهه به سمت داخل تونل می‌شود که موجب ریزش جبهه کار تونل و مسدود شدن مسیر حفاری و یا نشست‌هایی در سطح زمین (در تونل‌های کم عمق) می‌شود.

در رابطه با کارایی روش‌های مختلفی پایداری جبهه حفاری، محمد اسد خان ۱ و همکاران با مدلسازی عددی نشان دادند که حفاری‌های مرحله به مرحله موجب کاهش قابل ملاحظه تغییرشکل جبهه حفاری نسبت به حالت حفاری تمام مقطع می‌شود [1]. ون ۲ و همکاران پایداری جبهه حفاری تونل را با استفاده از روش انجماد زمین مطالعه کردند [2]. احمد ۳ و اسکندر ۴ با استفاده از مدلسازی عددی به تحلیل پایداری جبهه کار در زمین‌های ریزشی و بدون چسبندگی پرداختند [3]. مطالعه فوق برای چندین عمق متفاوت با قطرهای مختلف تونل مختلف انجام شد که در آن اثر سیستم مسلح سازی جبهه کار به صورت نیروهای داخلی مدلسازی شد. کاهش مقادیر نیروهای داخلی جبهه کار تا آستانه گسیختگی ادامه داده شده و قوه گسیختگی در لحظه حدی نهایی مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که کمینه مقدار فشار داخلی برای پایداری جبهه حفاری برابر با ۱۰٪ از فشار قائم عمودی در پشت جبهه حفاری است.

در رابطه با شکل و چگونگی گسیختگی جبهه حفاری، چامبون و کورته ۶ [4] و ایدینگر ۷ و همکاران [5] پایداری جبهه کار را در تونل‌های کم عمق با مصالح خاکی بدون چسبندگی با استفاده از مدلسازی فیزیکی سانتریفیوژ مطالعه کردند و قوه گسیختگی تشکیل شده در مدل‌های عددی را مورد تایید قرار دادند. پن ۸ و دیاس ۹ نیز به سازوکار و شکل گسیختگی جبهه حفاری در تونل‌های غیر دایروی پرداختند [6]. پایداری و شکل گسیختگی جبهه حفاری با استفاده از معیار مقاومتی هوک و

11. Hirohisa Kamata  
12. Hideto Mashimo  
13. T. Funatsu  
14. C.O. Aksoy  
15. T. Onargan  
16. Calvello  
17. Taylor  
18. Chungsik Yoo  
19. Hyun-Kang Shin

1. Muhammad Asad Khan  
2. Kai Wen  
3. Mahmoud Ahmed  
4. Magued Iskander  
5. Pierre Chambon  
6. Jean-Francois Corte  
7. Gregor Idinger  
8. Qiuqing Pan  
9. Daniel Dias  
10. Salvador Senent

تغییرات مکان را ارائه کرد. پن ۳ و دیاس [17, 18] نیز به بررسی ضریب اطمینان پایداری تونل‌های حفاری شده با استفاده از داول‌های افقی پرداختند که در این مطالعه، تاثیر کاهش مقاومت سیستم‌های نگهداری در ارزیابی ضریب اطمینان از مهمترین اهداف مسئله بود.

لازم به ذکر است که تاثیر مسلح کننده‌های طولی جبهه حفاری توسط جیوانی بارلا؛ و مارکو بارلا [19]، وونگ و همکاران [20] استرپی و همکاران [21] با مدلسازی اثر مسلح کننده‌ها در پایداری جبهه حفاری‌های یکپارچه بررسی شده است.

در این پژوهش، به مطالعه و مدلسازی سه بعدی عملکرد المان‌های مسلح کننده طولی برای پایداری جبهه حفاری تونل‌های ریزشی پرداخته می‌شود. بدین ترتیب که کارآمدی این سیستم در کاهش تغییر مکان جبهه حفاری بررسی می‌شود. همچنین اثر وجود سیستم شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری تونل و یا تاثیر استفاده توام از سیستم پیش برش مکانیکی در عملکرد این سیستم، بررسی روی سیستم انجام می‌شود. برای این منظور، مطالعه پارامتریکی برای عمق تونل، ضریب تنش افقی درجا، شعاع تونل و چگالی المان‌های طولی انجام می‌گیرد. در نهایت، روابط تجربی برای تعیین کرنش جبهه حفاری در حضور انواع سیستم‌ها ذکر شده ارائه می‌شود.

## ۲- مدلسازی عددی

شکل (۱) شمای کلی از مدل شبیه‌سازی شده از تونل را در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> V5 نشان می‌دهد که با توجه به تقارن موجود، تنها یک چهارم از مقطع دایره‌ای در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل در جهت محور X، Y و Z به ترتیب برابر با 50، 35 و 40 متر است که بترتیب شامل 15، 70 و 25 المان می‌شوند (بطوریکه مدل نهایی از 42000 ناحیه کوچکتر تشکیل می‌شود). این ابعاد و تعداد المان‌ها پس بعد از انجام تحلیل حساسیت نسبت به جابه‌جایی جبهه حفاری انتخاب شده‌اند تا تاثیری بر نتایج نداشته باشند.

پژوهش در محدوده وسیعی از شرایط مرزی با تغییر ضخامت پوشش تونل، شرایط زمین و پارامترهای مسلح کننده‌ها مانند چگالی، طول و سختی محوری انجام شد. نتایج نشان داد که روش مسلح سازی جبهه حفاری با المان‌های طولی می‌تواند به طور قابل توجهی تغییر شکل جبهه حفاری را کاهش دهد و علاوه بر آن، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در نشست سطح زمین شود؛ به گونه‌ای که می‌توان به طور موثری به عنوان یک ابزار مثبت برای کنترل نشست‌های زمین در حفاری تونل‌های کم عمق استفاده کرد. همچنین ملاحظه شد که قوس زمین و شرایط تنش اولیه (مثل  $K_0$ ) باید در محاسبه طراحی نیروهای مسلح کننده‌ها مورد توجه قرار گیرند. بررسی رفتار تغییر شکل جبهه نشان داد که جابه‌جایی محوری جبهه به طور قابل توجهی با تغییر پارامترهای مسلح کننده تغییر می‌کند.

اورسته و همکاران [14, 15] یک روش تحلیلی جدیدی برای تجزیه و تحلیل المان‌های مسلح کننده فایبر گلاس در جبهه حفاری تونل‌های سطحی در شرایط تنش محیطی هیدروستاتیک ارائه نمودند. این روش براساس روش تعادل حدی بوده و به طور دقیق، اندرکنش بین هر المان مسلح کننده و زمین اطراف را ارزیابی می‌کند و بیشینه سهم استاتیکی هر المان مسلح کننده در پایداری جبهه حفاری مشخص می‌شود. همچنین آنها یک روش جدید، ساده و متفاوت برای تونل‌های عمیق ارائه نمودند که می‌تواند تنش‌ها و کرنش‌های توده سنگ را در حضور مسلح کننده‌های جبهه حفاری بدست آورد. نتایج محاسبات روش تحلیلی با نتایج بدست آمده از مدل عددی سه بعدی (FLAC<sup>3D</sup>) مقایسه شده و با استفاده از روش تحلیلی، معیاری برای تعیین ابعاد المان‌های فایبرگلاس و تعداد آنها با استفاده از تغییر شکل جبهه، بیشینه نیروی القا شده در داخل المان‌ها و بیشینه تنش برشی ایجاد شده در سطح مشترک بین المان‌ها و سنگ اطراف آن بدست می‌آید.

دیاس [16] با استفاده از روش همگرایی - همجواری برای جبهه حفاری تونل در اندرکنش با سختی داول، مقادیر نیروها و

5. Marco Barla  
6. H. Wong  
7. Donatella Sterpi

1. Oreste  
2. Daniel Dias  
3. Qiuqing Pan  
4. Giovanni Barla

ضریب تنش افقی برجا ( $K_0$ ) برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در هر دو جهت افقی به مدل اعمال گردیده و همچنین در مجموع ۱۸۰ مدل تحلیل انجام شد.

حفاری تونل در ۴ گام فاصله  $1.5D$  ( $D$  قطر تونل) از مقطع مورد مطالعه انجام می‌شود که این حفاری بصورت تدریجی جهت شبیه سازی حفاری واقعی مدل می‌شود. توضیح اینکه تغییر شکل‌های یک مقطع مورد نظر از تونل، با حفاری جبهه کار تا فاصله ۱/۵ برابر اندازه قطر تونل از آن مقطع اتفاق می‌افتد. بنابراین برای قطرهای مختلف تونل، گام‌های حفاری‌های متفاوتی بدست می‌آید. پارامترهای مورد اندازه‌گیری از جمله کرنش مرکز مقطع تونل ثبت شد. این حفاری در حضور سیستم مسلح کننده طولی جبهه حفاری در حالت تنها و سپس در ترکیب با انواع سیستم‌های نگهداری انجام گرفت و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه گردید.

در حالت اول، از المان‌های طولی مسلح کننده برای نگهداری جبهه حفاری استفاده شد تا میزان کاهش کرنش جبهه حفاری را در مقایسه با حالت بدون استفاده از آن ارزیابی نمود (شکل ۳). در حالت دوم، علاوه بر المان‌های طولی برای نگهداری جبهه حفاری، از سیستم شاتکریت نیز برای نگهداری جدار تونل استفاده شد (شکل ۳) و در حالت سوم، از سیستم پیش برش مکانیکی (precutting) [22-24] قبل از حفاری تونل با طول همپوشانی ۰/۵ متر و طول کل ۳/۵ متر نیز برای کاهش بیشتر کرنش جبهه حفاری استفاده شد (شکل ۴). لازم به ذکر است که سیستم پیش برش مکانیکی عبارت است از ایجاد یک شکاف که در پیرامون بخش حفاری نشده تونل بوده که بتن مسلح شده با الیاف و مواد مناسب برای گیرش سریع به داخل آن تزریق می‌شود. با ویژگی‌های مکانیکی مناسبی که این سیستم دارد، می‌تواند به مقدار کافی مانع از ریزش توده سنگ‌های اطراف آن شود.

جدول (۲) تعداد داوول‌های استفاده شده در هر مقطع برای تونل‌های مختلف را نشان می‌دهد. آرایش داوول‌ها در جبهه حفاری به صورت دایره‌های هم مرکز در محیط اطراف جبهه متمرکز شده‌اند (شکل ۳).

شکل ۱. هندسه اولیه مدل (فلک سه بعدی)

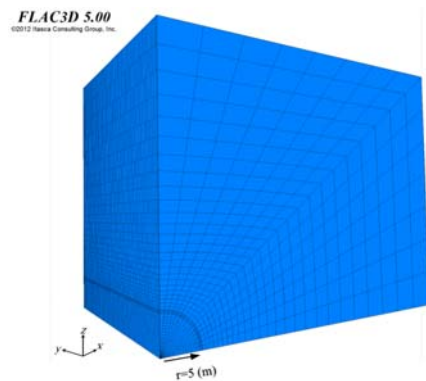


Fig. 1. Primary geometry of model (FLAC<sup>3D</sup>)

معیار خرابی محیط اطراف تونل الاستیک-پلاستیک موهر کولمب فرض شد؛ چرا که این معیار در نرم‌افزار فوق، رفتار تنش-کرنش توده‌سنگ را الاستیک پلاستیک کامل در نظر می‌گیرد و مناسب برای سنگ‌های ضعیف (در طبقه بندی بنیادیسکی ۱ در کلاس IV) است. در جدول (۱) مشخصات توده‌سنگ مورد مطالعه بعنوان نمونه و نمادی از توده‌سنگ ضعیف آورده شده است. لازم به ذکر است که چون از معیار مقاومتی مور-کولمب معادل معیار مقاومتی هوک براون استفاده می‌شود، پارامترهای آن متناسب با سطح تنش است (یعنی عمق تونل) و با تغییر سطح تنش، این مقادیر نیز تغییر می‌کنند (با استفاده از نرم افزار Roclab می‌توان آنها را بدست آورد).

این مسئله در سه عمق مختلف ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری و برای سه شعاع مختلف ۳، ۵ و ۷ متری تحلیل شد. در عمق‌های بیشتر از ۴۰ متر، تاثیر عمق با استفاده از اعمال تنش‌های خارجی به مدل انجام گرفت (شکل ۲)

شکل ۲. شکل شماتیک مدلسازی عمق‌های مختلف تونل با استفاده از

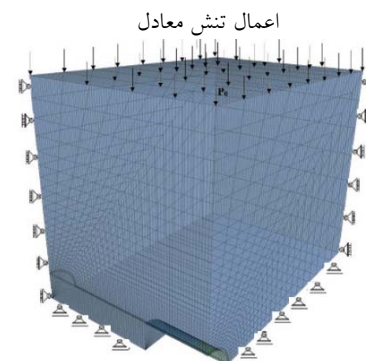


Fig. 2. Simulation of different tunnel depths with equivalent stress

برای شبیه سازی سیستم نگهداری شاتکریت و داول‌های جبهه حفاری به ترتیب از المان‌های پوسته ۱ و کابل ۲ استفاده شد و سیستم پیش برش مکانیکی ۳ نیز به صورت هندسه‌ی سی‌شل ۴ به صورت مجزا در نرم‌افزار ایجاد و با هندسه مدل ترکیب شد. جدول (۳) مشخصات سیستم‌های سازه‌ای مورد استفاده را نشان می‌دهد. مشخصات دوغاب استفاده شده برای سیستم پیش برش مکانیکی با مشخصات سیستم شاتکریت یکسان نیست و به ترتیب در جدول (۱ و ۳) ارائه شده است. ضخامت سیستم شاتکریت ۲۵ سانتی‌متر است. ضخامت سیستم پیش برش مکانیکی بصورت پیش فرض ۱۰ سانتی‌متر بوده و سپس برای بررسی تاثیر ضخامت این سیستم ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

پژوهش گفته شده به مطالعه رفتار داول‌های جبهه حفاری در صورت ترکیب با سیستم‌های نگهداری رایج در تونل‌سازی می‌پردازد. از این رو، مقادیر کرنش‌های جبهه حفاری و تنش‌های داول‌های جبهه حفاری در حضور سیستم‌های نگهداری و بدون حضور آنها بررسی قرار گرفته و در نهایت مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های جبهه حفاری ارزیابی می‌شود و عملکرد سیستم داول‌ها در حضور انواع سیستم‌های نگهداری مقایسه می‌شود.

نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج مدل تحلیلی اورسته [15] که برای داول‌های طولی در شرایط تنش هیدروستاتیکی ارائه شده مقایسه شده و مورد درستی‌آزمایی قرار گرفته است. این درستی‌آزمایی برای جابه‌جایی مرکز تونل انجام شد که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود و اختلاف ناچیزی بین نتایج وجود دارد.

جدول ۲. تعداد داول‌ها در یک چهارم سطح مقطع تونل

Tunnel radius (m)	3	5	7
Number of dowels	11	30	59

Table 2. Number of the dowels in the quarter of the tunnel section area

شکل ۳. مدلسازی المان‌های مسلح کننده طولی داول جبهه تونل و شاتکریت

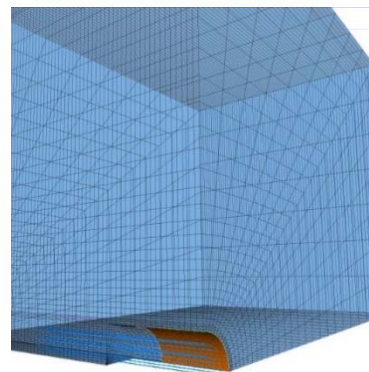


Fig. 3. Simulation of longitudinal dowels elements for tunnel face, and shotcrete

شکل ۴. مدلسازی سیستم پیش برش‌های مکانیکی

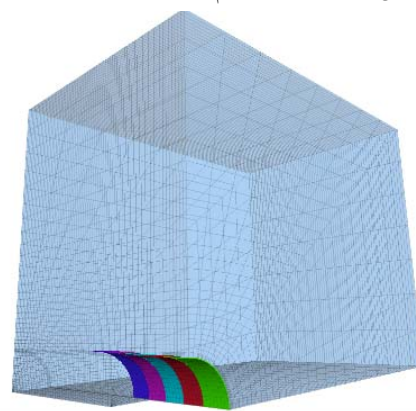


Fig. 4. Simulation of mechanical pre-cutting system

جدول ۱. مشخصات سنگ مدلسازی شده

Failure Criterion	density $\frac{kg}{m^3}$	Dilation angle $(\Psi)$	Cohe(C) sion <b>Mpa</b>	Fri( $\Phi$ ) ction angle <b>degree</b>	Shear modulus $\frac{MN}{m^2}$	Bulk modulus $\frac{MN}{m^2}$
Mohr - Coulomb criterion	2500	0	*0.1	*25	115.4	<b>250</b>
Elastic criterion	2500	-	-	-	75.21 $\times 10^8$	<b>104 <math>\times 10^8</math></b>

\* Corresponding to peak and residual resistance

Table 1. Rock mass properties around tunnel

چندانی بر آنها وارد نمی‌شود. لازم به ذکر است که، پارامتر  $d$  در محور قائم شکل‌های (۶) نشان دهنده تغییر مکان مرکز تونل است.

شکل ۶. کرنش طولی مرکز مقطع تونل با شعاع‌های مختلف در انواع سیستم‌های نگهداری

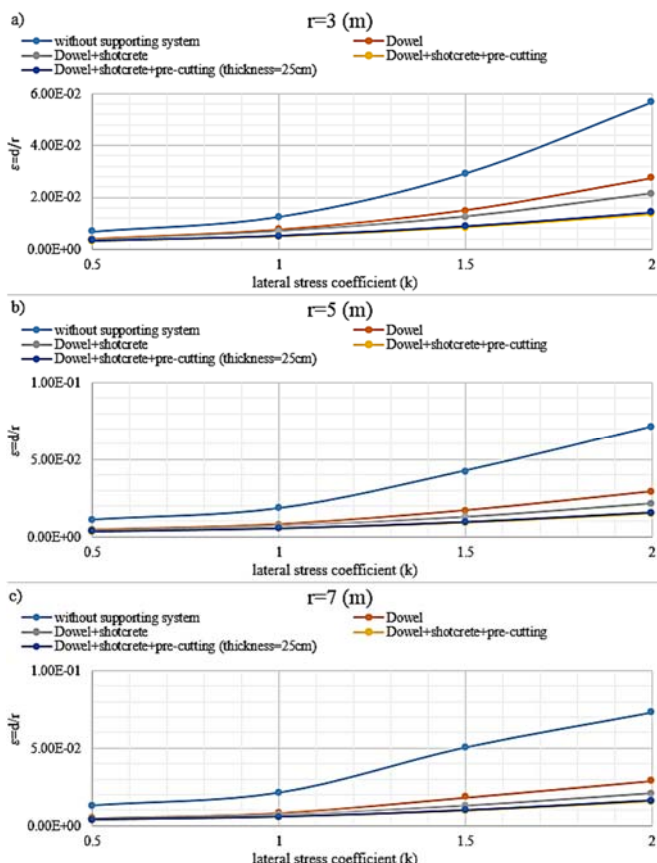


Fig. 6. Longitudinal Strain of tunnel center with different radii in different supporting systems

شکل‌های (۷ و ۸) تاثیر شعاع و دهانه تونل در میزان تغییر شکل مرکز جبهه حفاری و نیروی داول‌های طولی به ازای مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی در عمق ۴۰ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در ضرایب فشارهای جانبی بزرگتر، اثر افزایش شعاع تونل بر جابه‌جایی مرکز تونل و نیروی داول‌ها محسوس است.

شکل ۵. درستی آزمایشی مدلسازی عددی با نتایج مدلسازی تحلیلی [15]

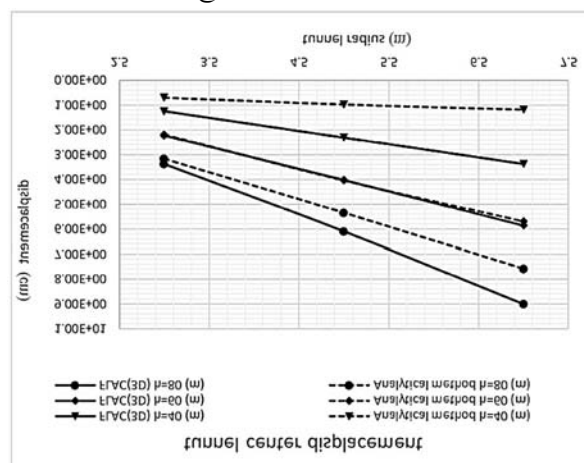


Fig. 5. Verification of the numerical simulation with analytical result [15]

جدول ۳. مشخصات سیستم‌های سازه‌ای استفاده شده

Supporting system specifications	shotcrete	Face dowel
Young modulus(Gpa)	12	40
Poisson ratio	0.2	-
Cross section(m <sup>2</sup> )	-	15.708 × 10 <sup>-4</sup>
Tensile strength(MN)	∞	∞
Compressive strength(MN)	∞	∞
Grout stiffness( $\frac{MN}{m^2}$ )	-	10000
thickness(m)	0.25	-
density( $\frac{kg}{m^3}$ )	2200	-

Table 3. Properties of different support systems

### ۳- نتایج تحلیل و بحث

نمودارهای شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فشار جانبی، کرنش مرکز جبهه حفاری بدون توجه به نوع سیستم نگهداری آن افزایش می‌یابد. از این رو، مقادیر تنش‌های نرمالیزه شده ماکزیمم داول‌ها (در صورت استفاده از آنها) نیز افزایش خواهد یافت. به ویژه در ضریب فشار جانبی بزرگتر از یک، این افزایش با شدت بیشتری همراه است و آهنگ افزایش آن نیز همواره بیشتر می‌شود. همچنین سیستم پریکاتینگ عملکرد بسیار بهتری نسبت به استفاده از داول‌های فایبرگلاس همراه با شاتکریت (یا بدون شاتکریت) برای نگهداری جبهه حفاری را دارد. در حضور سیستم پریکاتینگ، استفاده توأم از داول‌ها تاثیری در کاهش تغییر شکل جبهه حفاری ندارد و نیرویی

کاهش کرنش مرکز تونل با افزایش عمق و همچنین افزایش مقطع تونل عملکرد بهتری دارد. همچنین لازم به ذکر است که استفاده از سیستم پیش برش مکانیکی باعث کاهش قابل توجه کرنش ها شده است.

جدول ۴، درصد کاهش ماکزیمم کرنش مرکز تونل در سیستم های نگهداری مختلف

Depth (m)	H=80			H=60			H=40		
	r=7(m)	r=5	r=3	r=7(m)	r=5	r=3	r=7(m)	r=5	r=3
Supporting system									
Dowel	61.6	64.2	54.3	62.2	58.8	45.7	54.2	49.7	34.9
Dowel+shotcrete	69.8	72.5	61.3	70.1	66	52.5	60.4	55.5	40.4
Dowel+shotcrete+pre-cutting	77.8	79.6	72.9	75.5	73.1	64.1	65.9	62.8	51.3

Table 4. Reduced percent of maximum strain of tunnel center for different supporting systems

جدول (۵) مقادیر کاهش ماکزیمم تنش نرمالیزه شده داوول در مقایسه با حالاتی که سیستم نگهداری شاکریت و پیش برش مکانیکی استفاده می شود را نشان می دهد. ملاحظه می شود با افزایش عمق تونل تاثیر سیستم های نگهداری در کاهش تنش داوول ها افزایش می یابد. ملاحظه می شود که استفاده از هر سه سیستم به صورت مستقل باعث کاهش مقادیر تنش های نرمالیزه و جابه جایی جبهه حفاری می شود ولی استفاده از سیستم پیش برش مکانیکی باعث تاثیر ۳۰ درصدی بیشتری نسبت به سیستم فقط داوول دارد. دلیل این امر را می توان به حرکت قوه پشت جبهه حفاری نسبت داد و اینکه جلوگیری از حرکت توده خاک قسمت فوقانی تونل با توجه به تاثیر در پایداری کلی در جبهه حفاری، تاثیر کمتری در حرکت ناحیه پشت جبهه حفاری دارد. بنابراین استفاده از سیستم پیش برش مکانیکی در پایداری های حساس به جابه جایی توصیه می شود، لیکن نمی تواند در تمام پروژه ها مقرون به صرفه باشد.

همانطور که شکل (۱۰) نشان می دهد، دو ناحیه گسیختگی در پشت جبهه حفاری وجود دارد که ناحیه II نشان دهنده حرکت پشت جبهه حفاری و ناحیه III نشان دهنده حرکت گوه بالای جبهه حفاری است. همان گونه که پیشتر نیز اشاره شد، حرکت ناحیه سوم در حضور سیستم پیش برش مکانیکی متوقف می شود (به شرطی که موجب تسلیم و یا شکسته شدن آن نشود) که در این صورت، جابه جایی فقط گوه شماره ۲ است.

شکل ۷. کرنش مرکز تونل در مقابل شعاع مقطع تونل

$h=40$  (m)

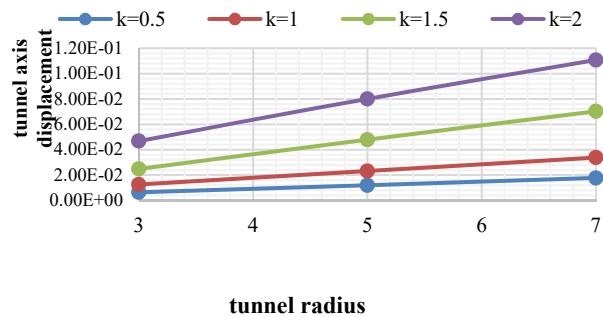


Fig. 7. Tunnel center strain for different tunnel radii

شکل ۸. ماکزیمم تنش نرمالیزه شده داوول در مقابل شعاع مقطع حفاری

$h=40$  (m)

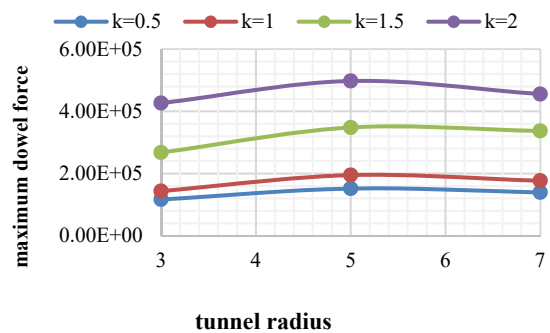


Fig. 8. The maximum normalized dowel stress for different tunnel radii

شکل (۹) حساسیت مقادیر کرنش در مرکز جبهه یکی از تونل مسلح به داوول را نسبت به عمق نشان می دهد.

شکل ۹. کرنش مرکز تونل در مقابل عمق های مختلف تونل

$(r=3$  m)

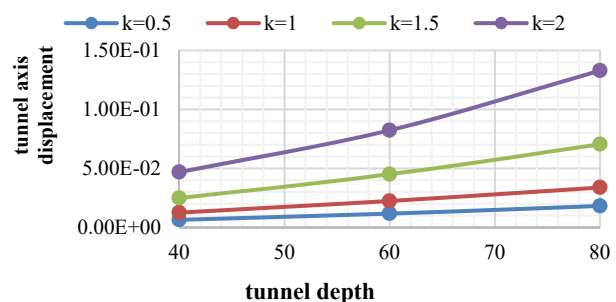


Fig. 9. Tunnel center strain against various tunnel depth

جدول (۴) نشان دهنده مقادیر درصد کاهش کرنش های مرکز مقطع جبهه حفاری تونل در عمق ها و مقاطع مختلف است. ملاحظه می شود که عملکرد سیستم های نگهداری جدار تونل در

جدول ۵. درصد کاهش ماکزیم تنش نرمالیزه شده داوول‌ها در سیستم‌های نگهداری مختلف

Supporting system	Depth (m)		
	H=80	H=60	H=40
Dowel in presence of shotcrete	16	13.8	13.1
Dowel in presence of shotcrete and pre-cutting	31.5	27.8	26.7

Table 5. Reduced percent of maximum normalized stress of dowels in presence of different supporting systems

شکل ۱۱. ماکزیم تنش داوول‌های جبهه حفاری تونل با شعاع‌های مختلف و انواع سیستم‌های نگهداری

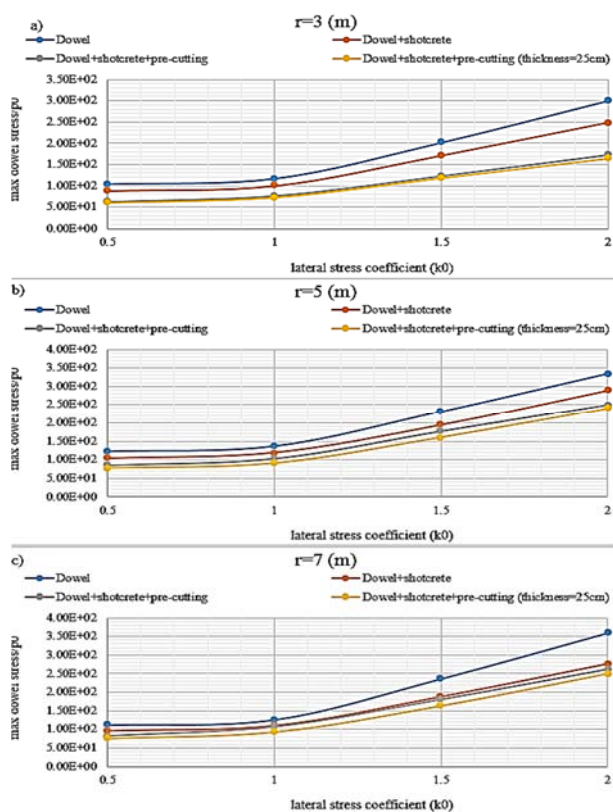


Fig. 11. The Maximum stress of dowels in different tunnel radii supported by different systems

در شکل (۱۲)، کانتورهای ناحیه پلاستیک و بردارهای جابه‌جایی گره‌ها در دو حالت شرایط غیرهیدروستاتیک ( $k_0=0.5$ ) و هیدروستاتیک ( $k_0=1$ ) نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمده‌ترین تمرکز این پژوهش روی ناحیه پشت جبهه حفاری است، بدون استفاده از داوول‌های جبهه حفاری، مقادیر ناحیه گسیخته شده بیشتر و در حضور داوول‌ها این ناحیه به شدت کاهش می‌یابد. این ناحیه در حضور سیستم نگهداری

شکل ۱۰. شکل شماتیک ناحیه گسیختگی پشت جبهه حفاری تونل

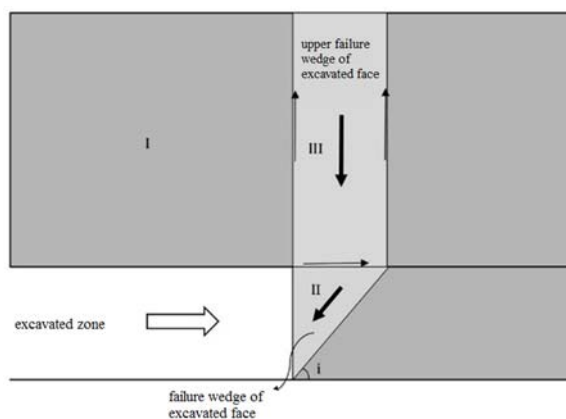


Fig. 10. The schematic of the failure wedge behind the tunnel face

بر این اساس، با توجه به اینکه پیش برش مکانیکی باعث جلوگیری از ایجاد گوه گسیختگی بالای تونل شکل (۱۰) می‌شود، ضخامت بیش از حد تاثیر بیشتری در پایداری گوه نخواهد داشت و فقط گوه گسیختگی پشت جبهه حفاری همواره موجب ایجاد تنش یکسان در داوول می‌شود (در این تحلیل‌ها، ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و ۲۵ سانتی‌متری نتیجه یکسانی می‌داد). در رابطه با میزان تنش‌های جانبی ملاحظه می‌شود که تاثیر سیستم‌های سازه‌ای با افزایش این ضریب محسوس تر می‌شود؛ به گونه‌ای که در مقادیر کوچک (مثلا برابر با ۰/۵)، تاثیر تمام سیستم‌ها تقریبا یکسان است. به عبارت دیگر، برای تمام حالات ضریب فشار جانبی، درصد کاهش کرنش‌ها و تنش‌ها برای یک نوع سیستم و در یک عمق مشخص برابر و یکسان است.

شکل (۱۱) بیشترین تنش نرمالیزه شده داوول را در ترکیب با سیستم‌های نگهداری متفاوت نشان می‌دهد. در واقع، هر چه کرنش طولی جبهه حفاری تونل بیشتر باشد، در این صورت نیروی بزرگتری بر داوول‌ها وارد خواهد شد. بر این اساس، نتیجه‌گیری‌های مربوط به کرنش طولی جبهه حفاری که در بالا اشاره شد را می‌توان در مورد ماکزیم نیروی داوول‌ها نیز تعمیم داد.



جریان جابه‌جایی ایجاد شده توسط قسمت فوقانی تاج تونل را مشاهده کرد.

شکل ۱۲. ناحیه پلاستیک پیرامون تونل در حضور سیستم‌های نگهداری

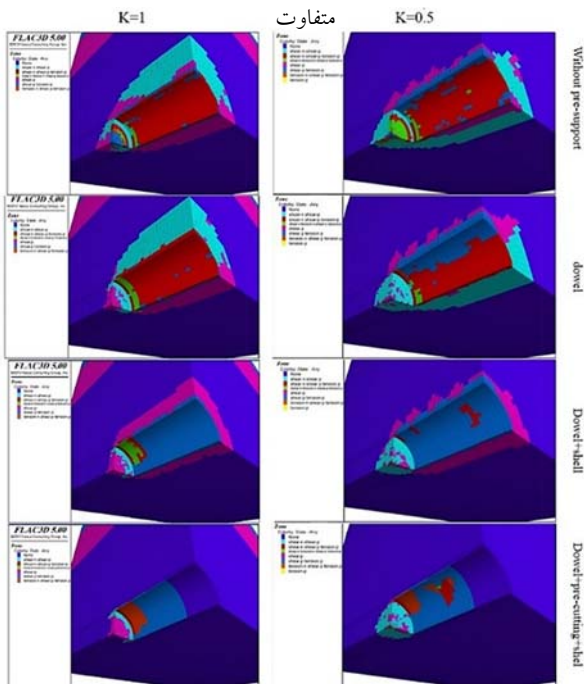


Fig. 12. Plastic zone around the tunnel supported by different systems

شاتکریت کمتر شده و در حضور سیستم پیش برش مکانیکی کاهش قابل توجهی می‌یابد که می‌توان دلیل این رفتار را به خاطر عملکرد سیستم شاتکریت برای کاهش کرنش جدار تونل که مستقیماً باعث بوجود آمدن جریان برشی روی جبهه حفاری می‌شود دانست. علاوه بر این، سیستم پیش برش مکانیکی جریان فوق را بر اساس نسبت سختی خود به صورت کامل قطع می‌کند و فقط جریان برش پشت جبهه حفاری حضور خواهد داشت. لازم به ذکر است که استفاده از سیم پیش برش مکانیکی باعث کاهش قابل توجه ناحیه پلاستیک جدار تونل نیز می‌شود. با توجه به ناحیه پلاستیک تشکیل شده در جدار و پشت ناحیه حفاری می‌توان به تمرکز تنش‌ها در جبهه حفاری پی برد و ناحیه با بیشترین تمرکز تنش را دسته بندی کرد. نواحی فوق نشان دهنده بیشترین توجه به آن قسمت بوده و نیازمند اضافه کردن سیستم نگهداری تقویتی یا تجمع بیشتر تعداد داول‌ها خواهد داشت که با توجه به مشکلات اجرایی، استفاده از آرایش منظم توصیه می‌شود چرا که استفاده از آرایش نامنظم تاثیر قابل توجهی در نتیجه نخواهد داشت. با توجه به شکل (۱۳) می‌توان

شکل ۱۳. بردارهای جابه‌جایی گرهی اطراف تونل و پشت جبهه حفاری با سیستم‌های نگهداری متفاوت

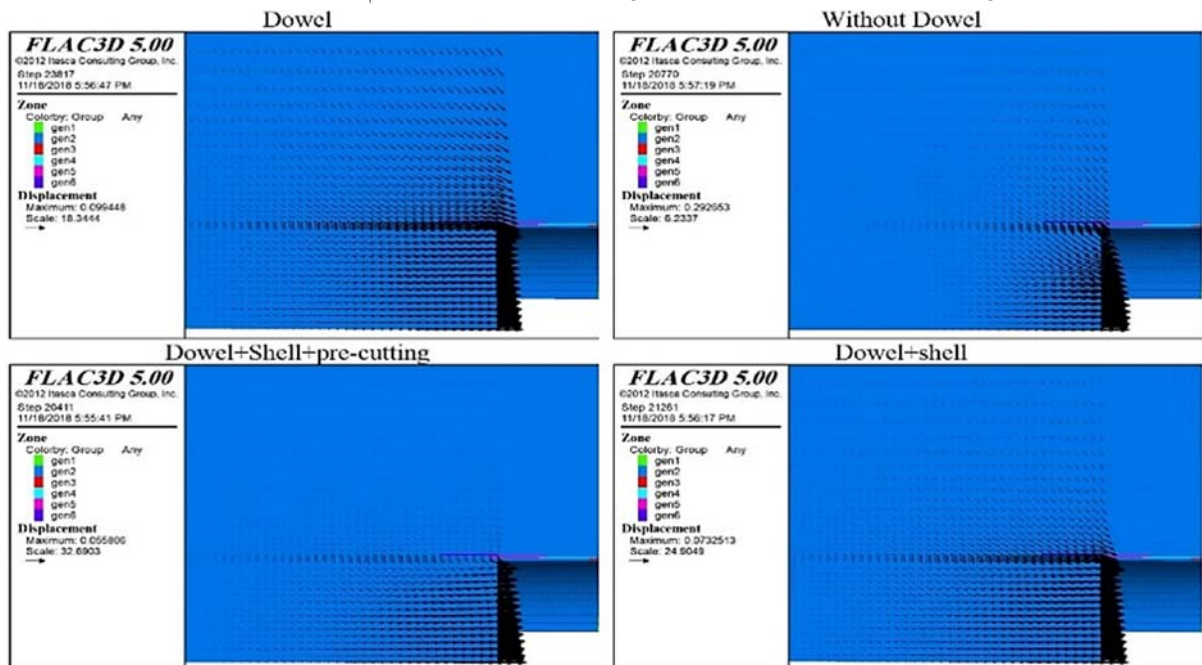


Fig. 13. Displacement vectors of around tunnel supported by different systems

#### ۴- ارائه روابط ریاضی برای تخمین کرنش طولی جبهه حفاری و تنش ماکزیمم داول‌های جبهه حفاری

##### ۴-۱- ماکزیمم تنش نرمالیزه شده داول

با توجه به نتایج به دست آمده و تعداد حالات مورد بررسی (۱۸۰ مورد) می‌توان نتیجه را برای سایر حالات نیز تعمیم داد. جدول (۶) مقادیر متغیرهای رابطه برای محاسبه ماکزیمم تنش‌های نرمالیزه شده داول‌ها در حضور سیستم‌های نگهداری مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر بدست آمده از این رابطه، مقدار تنشی است که بر اساس تنش در عمق مورد نظر نرمالیزه شده است و از اینرو برای محاسبه مقدار تنش نرمالیزه شده ماکزیمم داول‌ها، مقدار تنش در عمق مورد نظر در مقدار محاسبه شده از فرمول ضرب شده و مقدار نهایی نیز در سطح مقطع داول ضرب خواهد شد.

جدول ۶. متغیرهای تنش نرمالیزه شده ماکزیمم داول‌ها

Formula	$a \times x^b + c$	
Supporting systems		
Dowel	a=46.1 c=84.8 R-square=0.94	b=2.29
Dowel and shot	a=37.2 c=75.1 R-square=0.95	b=2.33
Dowel, shot and pre-cutting	a=36.88 c=56.9 A-square=0.85	b=2.15

Table 6. Variables of maximum normalized stress of dowels

شکل (۱۴) یکی از برآزش‌های انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر استخراج شده از نرم‌افزار با نقاط سیاه و برآزش پیش‌بینی شده متلب با خط نشان داده شده‌است.

شکل ۱۴. منحنی برآزش شده برای محاسبه ماکزیمم تنش داول

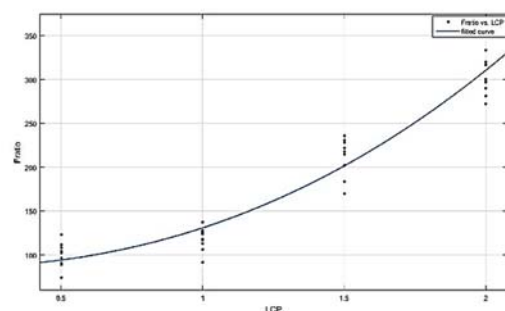


Fig. 14. Fitted curve for calculation of the maximum stress of dowels

##### ۴-۲- کرنش مرکز جبهه حفاری

در این بخش، نتایج حاصل از کرنش‌های مرکز تونل برای تمام اندازه‌های مقاطع تونل در اعماق مختلف توسط نرم‌افزار متلب ارزیابی و برآزش شده است. فرمول ارائه شده به صورت  $a \times X^b$  است که پارامتر  $X$  همان ضریب فشار جانبی می‌باشد. در این فرمول، برای محاسبه کرنش در تمام سیستم‌های نگهداری استفاده شده و عمق‌های مختلف، پارامترهای  $a$  و  $b$  محاسبه شده است که با قرار دادن ضریب فشار مورد نظر مقدار کرنش در عمق‌های ذکر شده بدست می‌آید (جدول ۷). در جدول بالا با توجه به اختلاف ناچیز در مقدار کرنش جبهه حفاری با حضور داول، شات کریت و پیش برش مکانیکی به ضخامت ۱۰ سانتی متر و ۲۵ سانتی متر، مقادیر پارامترهای فوق با تقریب قابل قبولی به صورت با هم محاسبه شده‌اند.

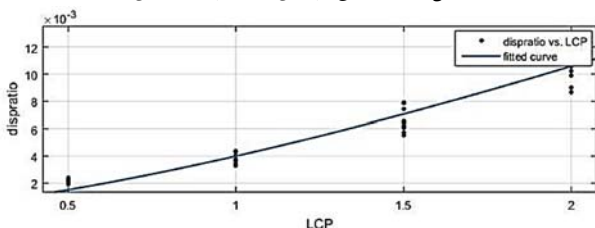
جدول ۷. مقادیر کرنش تونل در حضور انواع سیستم نگهداری

Depth (m)	H=80			H=60			H=40		
	r=7	r=5	r=3	r=7	r=5	r=3	r=7	r=5	r=3
Dowel	61.6	64.2	54.3	62.2	58.8	45.7	54.2	49.7	34.9
Dowel+shotcrete	69.8	72.5	61.3	70.1	66	52.5	60.4	55.5	40.4
Dowel+shotcrete+pre-cutting	77.8	79.6	72.9	75.5	73.1	64.1	65.9	62.8	51.3

Table 7. Strain values of tunnels supported by different systems

محور افقی در شکل (۱۵)، ضریب فشار جانبی و محور قائم کرنش مرکز تونل است که به ترتیب با علائم  $LCP$  و  $dispratio$  نشان داده شده است. نقاط سیاه رنگ مقادیر واقعی کرنش‌ها و خط آبی رنگ نشان دهنده برآزش انجام شده است.

شکل ۱۵. منحنی برآزش شده برای محاسبه



به پارامترهای کرنش مرکز تونل

Fig. 15. Fitted curve for calculation of the strain in tunnel center

##### ۴-۳- فرمول بندی کرنش‌های مرکز تونل

با توجه به اینکه متغیرهای  $a$  و  $b$  در بخش‌های قبلی برای عمق‌های خاصی از حفاری محاسبه شده است، از این رو برای محاسبه مقادیر دیگری از شکل‌ها، استفاده از شکل‌های (۱۶) و

### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه به مدلسازی عملکرد سیستم المان‌های طولی مسلح کننده فایبرگلاس برای مسلح کردن جبهه حفاری زمین-های ضعیف و ریزشی به عنوان تنها سیستم نگهداری و یا در حضور سیستم شاتکریت و پیش برش مکانیکی پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش ضریب تنش جانبی، مقادیر تنش نرمالیزه شده ماکزیمم داوول‌ها و کرنش‌های ماکزیمم نیز افزایش می‌یابد همچنین سیستم پیش برش مکانیکی به شکل کاملاً موثری باعث کاهش تنش نرمالیزه شده ماکزیمم داوول‌ها و کرنش در جبهه حفاری می‌شود. هنگامی که مقادیر ضریب تنش جانبی بیشتر از یک می‌شود، تغییر شکل جبهه حفاری و تنش ماکزیمم المان‌های طولی فایبرگلاس بطور محسوسی افزایش می‌یابد. شعاع ناحیه حفاری و عمق حفاری تونل‌ها از دیگر متغیرهای موثر بر مقادیر کرنش مرکز تونل و ماکزیمم تنش داوول است.

پیشنهاد می‌شود. شکل‌های مذکور از برازش مقادیر کرنش-ها در عمق‌های مختلف در نرم‌افزار متلب محاسبه شده است که متغیر **a** از شکل (۱۶) و متغیر **b** از شکل (۱۷) قابل محاسبه است. برای محاسبه مقادیر کرنش مرکز تونل در عمق‌های غیر از ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متری انتخاب شده در این پژوهش کفایت تا انتخاب شود و در رابطه (۱) قرار داده شود.

شکل ۱۶. نمودار پارامتر **a**

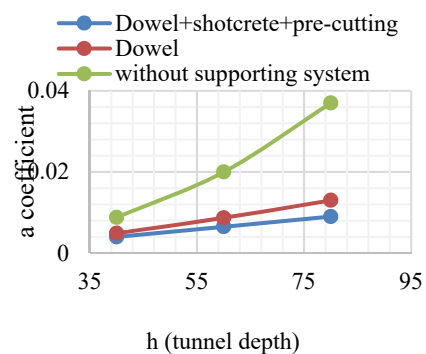


Fig. 16. Variations of parameter

شکل ۱۷. نمودار پارامتر **b**

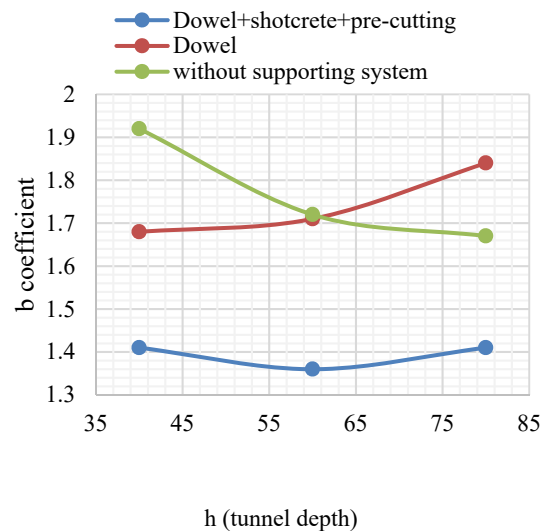


Fig. 17. Variations of parameter b

$$\frac{u}{r} = a \times LCP^b \quad (1)$$

### مراجع

- [1] Khan, R.M.A., Emad, Z. and Jo, B., 2017. Tunnel Portal Construction using Sequential
- [2] Wen, K., Shimada, H., Zeng, W., Sasaoka, T. and Hamanaka, A., 2017. Numerical Analysis of Face Stability of Slurry Pipe Jacking Tunnel in Frozen Ground. *Earth Science Research*, 6(2), p.1.
- [3] Ahmed, M. and Iskander, M., 2012. Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), pp.101-110.
- [4] Chambon, P. and Corte, J.F., 1994. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(7), pp.1148-1165.
- [5] Idinger, G., Aklik, P., Wu, W. and Borja, R.I., 2011. Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel. *Acta Geotechnica*, 6(2), pp.105-117.
- [6] Pan, Q. and Dias, D., 2017. Safety factor assessment of a tunnel face reinforced by horizontal dowels. *Engineering Structures*, 142, pp.56-66.
- [7] Senent, S., Mollon, G. and Jimenez, R., 2013. Tunnel face stability in heavily fractured rock masses that follow the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, pp.440-451.
- [8] Kamata, H. and Mashimo, H., 2003. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2-3), pp.205-212.

- bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(4), pp.517-523.
- [17] Pan, Q. and Dias, D., 2017. Safety factor assessment of a tunnel face reinforced by horizontal dowels. *Engineering Structures*, 142, pp.56-66.
- [18] Peila, D., Oreste, P.P., Pelizza, S. and Poma, A., 1996, May. Study of the influence of sub-horizontal fiber-glass pipes on the stability of a tunnel face. In *Proceedings of the Conference of North American Tunneling* (Vol. 96).
- [19] Barla, G. and Barla, M., 2004. Discussion on the full face method. *Felsbau*, 22(4), pp.26-30.
- [20] Wong, H., Trompille, V. and Dias, D., 2004. Extrusion analysis of a bolt-reinforced tunnel face with finite ground-bolt bond strength. *Canadian geotechnical journal*, 41(2), pp.326-341.
- [21] Sterpi, D., Rizzo, F., Renda, D., Aguglia, F. and Zenti, C.L., 2013. Soil nailing at the tunnel face in difficult conditions: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, pp.129-139.
- [22] Bougard, J.F., 1988. The mechanical pre-cutting method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3(2), pp.163-167.
- [23] Van Walsum, E., 1991. Mechanical pre-cutting, a rediscovered tunneling technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24(2), pp.65-79.
- [24] Song, K.I., Oh, T.M. and Cho, G.C., 2014. Precutting of tunnel perimeter for reducing blasting-induced vibration and damaged zone—numerical analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), pp.1165-1175.
- [9] Funatsu, T., Hoshino, T., Sawae, H. and Shimizu, N., 2008. Numerical analysis to better understand the mechanism of the effects of ground supports and reinforcements on the stability of tunnels using the distinct element method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), pp.561-573.
- [10] Aksoy, C.O. and Onargan, T., 2010. The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. *Tunnelling and underground space technology*, 25(5), pp.553-559.
- [11] Calvello, M. and Taylor, R.N., 1999. Centrifuge modelling of a pile-reinforced tunnel heading. *Proc. of Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, pp.313-8.
- [12] Yoo, C., 2002. Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes. *Computers and Geotechnics*, 29(1), pp.73-94.
- [13] Yoo, C. and Shin, H.K., 2003. Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes—laboratory and numerical investigation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(4), pp.303-319.
- [14] Oreste, P.P., 2009. Face stabilisation of shallow tunnels using fibreglass dowels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 162(2), pp.95-109.
- [15] Oreste, P., 2013. Face stabilization of deep tunnels using longitudinal fibreglass dowels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58, pp.127-140.
- [16] Dias, D., 2011. Convergence-confinement approach for designing tunnel face reinforcement by horizontal

# Simulation of longitudinal dowels performance in stability of tunnels face

??

??

## Abstract

For safe underground excavation, different supporting systems can be used in weak ground conditions. However, rock mass instability does not give opportunity to install an appropriate supporting system. Because, tunnel face collapses and moves suddenly toward into tunnel.

Different approaches and methods has been developed to prevail over this condition including sequential excavation of tunnel face, grouting of unstable and loose zones behind the face, using inclined longitudinal elements above tunnel crown prior to excavation known as arch umbrella elements methods, installing a pre-cutting system, and pre-reinforcement of tunnel face by fiber glass longitudinal elements. These methods may be employed either alone or together according to the severity of the problem.

Fiber glass dowels are one of the most efficient and economic methods of above mentioned approaches. Fast installation, flexibility in using with other supporting systems ... are the other advantages of this pre-reinforcement. Although numerous studies have been conducted to evaluate and quantify the effectiveness of this method, some aspects such as evaluation of the tensile force induced in the dowels has not been studied. In fact, a correct dimensioning and evaluation can be obtained through three-dimensional numerical modelling.

Hence, this paper studied numerically the behavior of the longitudinal fiber glass dowels installed uniformly at tunnel face along tunnel axis and may accompanied with the different supporting system i.e. with shotcrete layer as the main supporting system or with arch umbrellas or pre-cutting system as the other pre-support method. The analyses was carried out by FLAC <sup>3D</sup> in different weak ground condition, say the class IV in Binyavsky category, subjected to three different in-situ stresses implying tunnel depths. As well, four lateral stress coefficient were chosen in the analyses. The fiberglass forces as well as tunnel center displacements are the output of this simulation.

First of all, the obtained results from the numerical simulation in hydrostatic stress condition were verified by one of the previously presented analytical methods, then analyses were extended to non-hydrostatic stress condition.

The results showed non-hydrostatic stress causes non-uniform stress and displacements in the face. As a result, the location of critical zones developed in tunnel face. It leads to employ more dowels on those zones. On the other hand, as lateral coefficient increases, the maximum stress of the dowels and strain of tunnel center increases. The maximum strain and stress occur at  $k_0=2$ . However; critical zone can be developed at the tunnel crown at  $k_0=0.5$ . Therefore, with increasing the lateral coefficient, critical zone moves toward the tunnel sides. As well, the best result for the dowels could be seen when they were accompanied with pre-cutting system. It is more highlighted to notice that using dowels in more deep tunnels subjected to great lateral stress (say very squeezing condition) is not sufficient (because they yield) but must be accompanied with other system.

Finally, from the results of numerous analyses, mathematical formulations were presented to fast calculate the maximum stress of dowels and strain of the tunnel center in any different condition of weak ground condition.

**Keywords:** tunnel, fiber glass dowels, pre-reinforcements, tunnel face, pre-cutting, weak ground

