

محاسبه فشار پایداری جبهه کار دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین

به روش تحلیل حدی المان محدود سه بعدی

(مطالعه موردی: تونل خط یک مترو اهواز)

مقاله علمی - پژوهشی

محمد رضا انتظارمرنه، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
*عباس اسلامی حقیقت (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

محسن حاجی حسنی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.eslami@urmia.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

صفحه ۴۰۶-۳۹۳

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه مانند دستگاه متعادل کننده فشار زمین، برای حفاری تونل بطور گسترده‌ای رواج یافته است. طراحی مناسب این دستگاه‌ها نیازمند مطالعه و بررسی دقیق توده خاک اطراف محل حفاری می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در این مطالعات، فشار پایداری جبهه کار لازم برای جلوگیری از گسیختگی توده خاک اطراف محل حفاری ناشی از فروریزش و بالازدگی خاک می‌باشد که توسط دستگاه حفاری به توده خاک اعمال می‌شود. در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود و مدلسازی سه بعدی، فشار پایداری جبهه کار تونل خط یک مترو اهواز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این روش، ترکیبی از روش آنالیز حدی و مش بندی المان محدود می‌باشد. نتایج بدست آمده از این روش در حالت فروریزش از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده به نحوی که میانگین کران بالا و پایین بدست آمده را می‌توان تقریبی مناسب از بار واقعی در نظر گرفت. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش آنالیز حدی المان محدود سه بعدی جهت بررسی فشار پایداری جبهه کار، ناهمگنی موجود در توده خاک را بخوبی مدلسازی نموده و از نقطه نظر عملیاتی محدوده ایمنی که فشار جبهه کار می‌تواند تیرانس داشته باشد را مشخص می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حدی المان محدود، فشار پایداری جبهه کار، آنالیز حدی، حد پایین، حد بالا

۱- مقدمه

همچنین، امکان احداث این وسایل در زیرزمین در کلان‌شهرها یک مزیت ارزشمند است، چراکه می‌توان از تخریب بافت شهری موجود و هزینه‌های ناشی از آن پرهیز کرد. در سال‌های اخیر، حفر تونل‌های مورد نیاز جهت احداث مترو توسط دستگاه حفاری

با توجه به گسترش جمعیت، نیاز به وسایل حمل و نقل عمومی به طور گسترده‌ای افزایش پیدا کرده است. مترو با توجه به ظرفیت بالا در گنجایش مسافر و طی مسافت منتخب در زمان کمتر نسبت به سایر وسایل حمل و نقل عمومی، یک گزینه مناسب می‌باشد.

دو دستگاه EPB با قطر کاترهد ۶/۷۸ متر مورد استفاده قرار گرفته است. در حد فاصل بین ایستگاه ساعت و ایستگاه نادری، مترو از زیر رودخانه کارون عبور نموده که شرایط ژئوتکنیکی ویژه آن، مانند چند لایه بودن خاک‌های تشکیل دهنده زمین و فشار بالای آب حفره‌ای، مطالعه فشار پایداری جبهه‌کار در این محدوده را حائز اهمیت نموده است. با توجه به گزارشات ژئوتکنیک موجود، زمین اطراف این ناحیه از سه لایه خاک دستی، ماسه سیلت‌دار و رس سیلت‌دار تشکیل شده است. قابل ذکر است که با توجه به این گزارشات، خاک در قسمت‌های زیر رودخانه دارای پارامترهای متفاوتی نسبت به خاک اطراف رودخانه می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات خاک تشکیل دهنده زمین در زیر رودخانه و اطراف آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات خاک در زیر رودخانه کارون و اطراف آن

γ	$\gamma(\text{sat})$	c	ϕ	انواع خاک
(kN/m^3)	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	
۰/۱۹	-	۰/۰	۰/۳۰	خاک دستی
۰/۲۰	۵/۲۰	۰/۷	۰/۲۷	رس سیلت دار
۰/۲۰	۵/۲۰	۰/۰	۰/۳۵	ماسه سیلت دار
۰/۱۹	۵/۱۹	۰/۱۳	۵/۳۰	رس سیلت دار زیر رودخانه
۵/۱۸	۰/۱۹	۰/۵	۵/۲۹	ماسه سیلت دار زیر رودخانه

شکل ۲ برشی از مسیر حرکت دستگاه حفاری که از زیر رودخانه کارون عبور می‌کند را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، دستگاه در ابتدای مسیر از ساحل غربی با شیب تقریبی منفی ۲/۵ درصد و در انتها با شیب مثبت ۴ درصد به سمت ساحل شرقی حفاری می‌کند.

مکانیزه^۱ صورت می‌گیرد. این دستگاه‌ها از سرعت و ایمنی بالایی برخوردار می‌باشند و دارای قابلیت نصب پوشش جداره‌های تونل، بلافاصله پس از حفاری می‌باشند. البته استفاده از این دستگاه‌ها نیازمند نیروی متخصص و مطالعات دقیق منطقه بوده بطوریکه طراحی و ساخت آن‌ها زمان‌بر می‌باشد.

دستگاه‌های حفاری مکانیزه شامل انواع گوناگونی می‌باشند که می‌توان به دستگاه حفاری تک سپر و دوسپر، دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین^۲، دستگاه حفاری دوغابی و ترکیبی اشاره کرد. از دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین در زمین‌های ناپایدار متشکل از رس و سیلت، ماسه یا شن، استفاده می‌شود. در هنگام حفاری با استفاده از این دستگاه‌ها، جبهه‌کار توسط صفحه‌ای خمیری تشکیل شده از خاک حفاری و مواد افزودنی، محافظت می‌شود. این صفحه‌ی خاک خمیری با اعمال فشار به جبهه‌کار از گسیختگی آن هنگام حفاری، جلوگیری می‌کند که به این فشار، فشار پایداری جبهه‌کار گفته می‌شود. این فشار توسط مقدار خاک ورودی و خروجی به نوار نقاله ماریپیچی و سرعت این نقاله، که از اجزای تشکیل دهنده دستگاه حفاری می‌باشد، قابل تنظیم است.

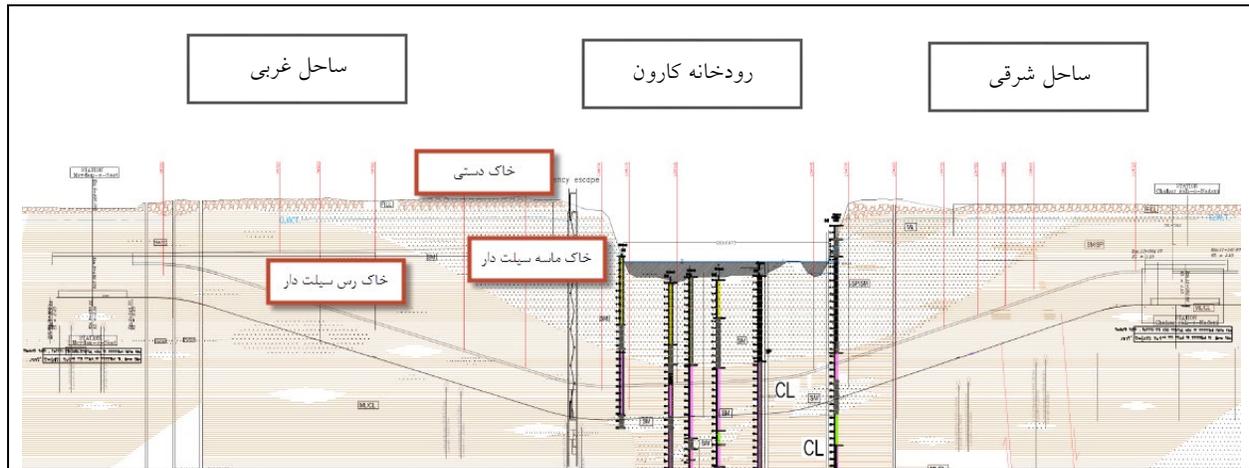
فشار پایداری جبهه‌کار یکی از پارامترهای مهم در هنگام حفاری با استفاده از دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین می‌باشد. اگر در هنگام اعمال این فشار از حد تعادلی کمتر اعمال شود، سبب ریزش جبهه‌کار می‌شود و اگر فشار اعمالی بیش از حد باشد ممکن است سبب بالازدگی در سطح زمین شود. گسیختگی ناشی از اعمال فشار کم، فروریزش و گسیختگی ناشی از اعمال فشار بیش از حد، بالازدگی نامیده می‌شوند. بنابراین محاسبه دقیق این فشار از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این مقاله فشار پایداری جبهه‌کار تونل خط یک مترو اهواز با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود^۳ و مدل‌سازی سه‌بعدی محاسبه شده است.

۲- خط یک مترو اهواز

خط یک متروی اهواز شامل ۲۴ ایستگاه زیرزمینی می‌باشد که از ایستگاه بیمارستان شهید بقایی آغاز شده و تا ایستگاه زرگان در شمال شرق شهر با طول تقریبی ۲۳ کیلومتر ادامه دارد. مدت زمان لازم جهت طی این مسافت با سرعت حداکثر ۷۰ کیلومتر بر ساعت، برابر ۴۰ دقیقه برآورد شده است. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های خط یک مترو اهواز را نشان می‌دهد. بمنظور حفر تونل‌های مترو اهواز



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های خط یک مترو اهواز



شکل ۲. مسیر حرکت دستگاه حفاری از زیر رودخانه کارون

(مهندسين مشاور ستيران ۱۳۸۶ و Ahwaz Urban Railway Project, Line 1, 2015)

این تغییرات شیب باعث تغییر عمق قرارگیری تونل در خاک می‌شود. با توجه به این تغییرات و گزارشات موجود، ضخامت لایه‌های خاک و عمق قرارگیری تونل در قسمت‌های مختلف حرکت دستگاه در جدول ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۲. جزئیات عمق قرارگیری تونل و ضخامت لایه‌ها در مسیر زیر رودخانه کارون

مقطع	عمق قرار گیری مرکز تونل C + D/2 (m)	نسبت روبار به قطر C/D	عمق تر از آب زیرزمینی (m)	آب رودخانه	ضخامت خاک دستی (m)	ضخامت خاک ماسه (m)	ضخامت خاک رس (m)
۱	۳۹/۱۳	۴۷/۱	۰۰/۳	-	۵۰/۱	-	۵۰/۲۵
۲	۹۱/۱۷	۱۴/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۰۰/۱	۵۰/۳۰
۳	۵۰/۱۹	۳۸/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۸۴/۲	۶۶/۲۸
۴	۶۲/۲۱	۶۹/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۰۸/۶	۴۲/۲۸
۵	۰۸/۲۵	۲۰/۳	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۳۵/۱۱	۱۵/۲۶
۶	۶۷/۲۶	۴۳/۳	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۷۸/۱۳	۷۲/۲۵
۷	۳۹/۲۰	۵۱/۲	۵۰/۷	۵۰/۲	-	۰۸/۱۳	۴۲/۲۸
۸	۳۹/۲۰	۵۱/۲	۵۰/۷	۵۰/۲	-	۵۷/۱۲	۴۳/۲۱
۹	۳۹/۲۰	۵۱/۲	۵۰/۷	۵۰/۲	-	۰۰/۱۵	۰۰/۱۹
۱۰	۳۹/۲۰	۵۱/۲	۵۰/۷	۵۰/۲	-	۰۰/۱۵	۰۰/۱۹
۱۱	۳۹/۳۰	۹۸/۳	۵۰/۷	-	۵۰/۱	۴۰/۲۰	۶۰/۲۳
۱۲	۵۶/۲۷	۵۶/۳	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۵۴/۱۶	۹۶/۲۳
۱۳	۷۲/۲۴	۱۵/۳	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۴۵/۱۰	۰۵/۲۷
۱۴	۳۲/۲۴	۰۹/۳	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۵۷/۹	۹۳/۲۷
۱۵	۷۰/۲۲	۸۵/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۰۹/۶	۴۱/۲۹
۱۶	۰۸/۲۱	۶۱/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	۶۱/۲	۸۹/۳۰
۱۷	۴۶/۱۹	۳۷/۲	۰۰/۳	-	۵۰/۱	-	۵۰/۳۲
۱۸	۳۹/۱۳	۴۷/۱	۰۰/۳	-	۵۰/۱	-	۵۰/۲۶

۳- تحلیل حدی المان محدود سه بعدی

مرزی تنش و معیار تسلیم باشد، بار خارجی این میدان تنش از بار گسیختگی واقعی بیشتر نخواهد بود. اما در تحلیل حد بالا شرایط سینماتیک بر مسأله اعمال می‌شود. بدین ترتیب که هر میدان سرعتی که از لحاظ سینماتیکی مجاز بوده^۵ و شرایط مرزی سرعت، معیار تسلیم و معادلات سازگاری را ارضا نماید، بار گسیختگی بدست آمده حاصل از آن از بار واقعی گسیختگی بیشتر خواهد بود. نکته اصلی هنگام مطرح نمودن این روش توسط اسلوان در خطی سازی معیار تسلیم موهر-کلمب بود. اسلوان محاسبات خود را

می‌توان اسلوان را اولین محقق دانست که روش تحلیل حدی المان محدود را بصورت کاربردی و منسجم در اواخر قرن نوزدهم میلادی مطرح نمود. اسلوان با استفاده همزمان از روش آنالیز حدی و مش بندی المان محدود توانست با تقریب مناسبی حد بالا و پایین ظرفیت باربری پی نواری را در خاک صرفاً چسبنده محاسبه نماید (Sloan, 1988 و Sloan, 1989). در تحلیل حد پایین می‌توان اثبات نمود که هر میدان تنش فرض شده‌ای که از لحاظ استاتیکی مجاز بوده^۴ و معادلات تعادل را ارضا و همچنین پاسخگوی شرایط

در سال‌های اخیر نیز محققان زیادی از روش تحلیل حدی المان محدود در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند که از بین آن‌ها می‌توان به Shiau و AI-Assadi اشاره کرد. این محققین با استفاده از این روش و مدل‌سازی سه‌بعدی اثر فاصله محوری دو تونل کنار هم و ضرایب پایداری برای این تونل‌ها را محاسبه نمودند (Shiau & AI-Assadi, 2020) و (AI-Assadi, 2021). این محققین نتایج خود را با استفاده از نرم‌افزار Optum G3 که از روش تحلیل حدی المان محدود بهره می‌برد، محاسبه نمودند. در این تحقیق نیز بمنظور محاسبه فشار پایداری جبهه‌کار تونل خط یک مترو اهواز از نرم‌افزار Optum G3 که توان مدل‌سازی سه‌بعدی را داشته و روش تحلیل حدی المان محدود جزء روش‌های قابل انتخاب آن می‌باشد، استفاده شده است.

صحت‌سنجی

نرم‌افزار Optum G3 نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه جدید می‌باشد. بمنظور اطمینان از صحت نتایج، مقادیر بدست آمده توسط این نرم‌افزار را با نتایج دیگر محققین (Shiau & AI-Assadi, 2020) مقایسه شده است. این محققین عدد پایداری را برای دو تونل با فاصله محوری مختلف برای خاک چسبنده و زهکشی نشده رسی در عمق‌های گوناگون محاسبه نمودند. با توجه به شکل ۴ که مقایسه این نتایج را نشان می‌دهد، عدد پایداری برای دو حالت گسیختگی فروریزش و بالازدگی در نسبت روباره به قطر برابر ۳ و ۶ برای فاصله‌های محوری مختلف محاسبه شده است.

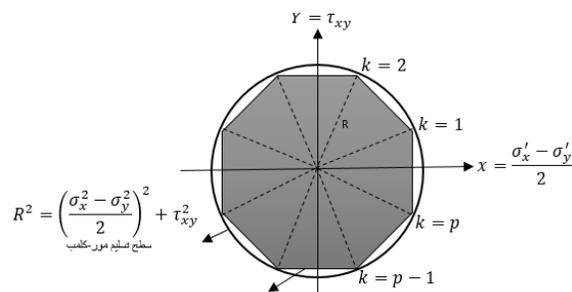
حدود بالا و پایین بدست آمده از نرم‌افزار دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد به نحوی که به طور متوسط این حدود با حدود بالا و پایین بدست آمده توسط (Shiau & AI-Assadi, 2020) دارای اختلاف ۱/۱۵ درصد هستند که اختلاف بسیار ناچیزی می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، هرچه دو تونل فاصله محوری کمتری داشته باشند، عدد پایداری کمتر است و با افزایش این فاصله از یک حدی، تغییرات عدد پایداری ثابت می‌ماند که نشان از عدم تأثیرگذاری تونل‌ها بر یکدیگر می‌باشد.

تحت شرایط کرنش صفحه‌ای انجام داد و در این محاسبات تنش‌های کششی را مثبت فرض نمود که در چنین شرایطی معیار موهر-کولومب بصورت زیر قابل نوشتن است:

$$F = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2 - (2c \cos \varphi - (\sigma_x + \sigma_y) \sin \varphi)^2 = 0$$

در این رابطه، σ_x ، σ_y و τ_{xy} مؤلفه‌های تنش، c چسبندگی و φ زاویه اصطکاکی داخلی خاک می‌باشند.

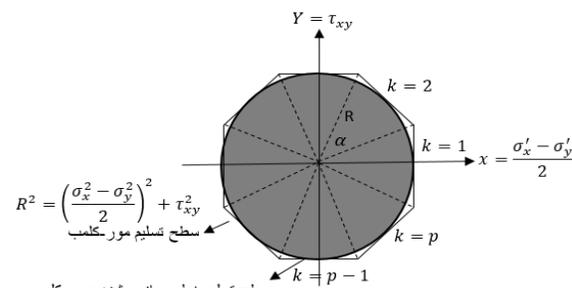
اسلوان با اعمال محدودیت‌های مختلف، خطی سازی رابطه بالا را بنحوی انجام داد که در تحلیل حد پایین، سطح تسلیم خطی توسط دایره موهر-کولومب محیط شده باشد و بالعکس در تحلیل حد بالا دایره موهر-کولومب توسط سطح تسلیم خطی احاطه شده باشد (شکل ۳).



$$\alpha = (2k-1)\pi/p$$

$$R = c' \cos \varphi' - \left(\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \right) \sin \varphi'$$

(الف)



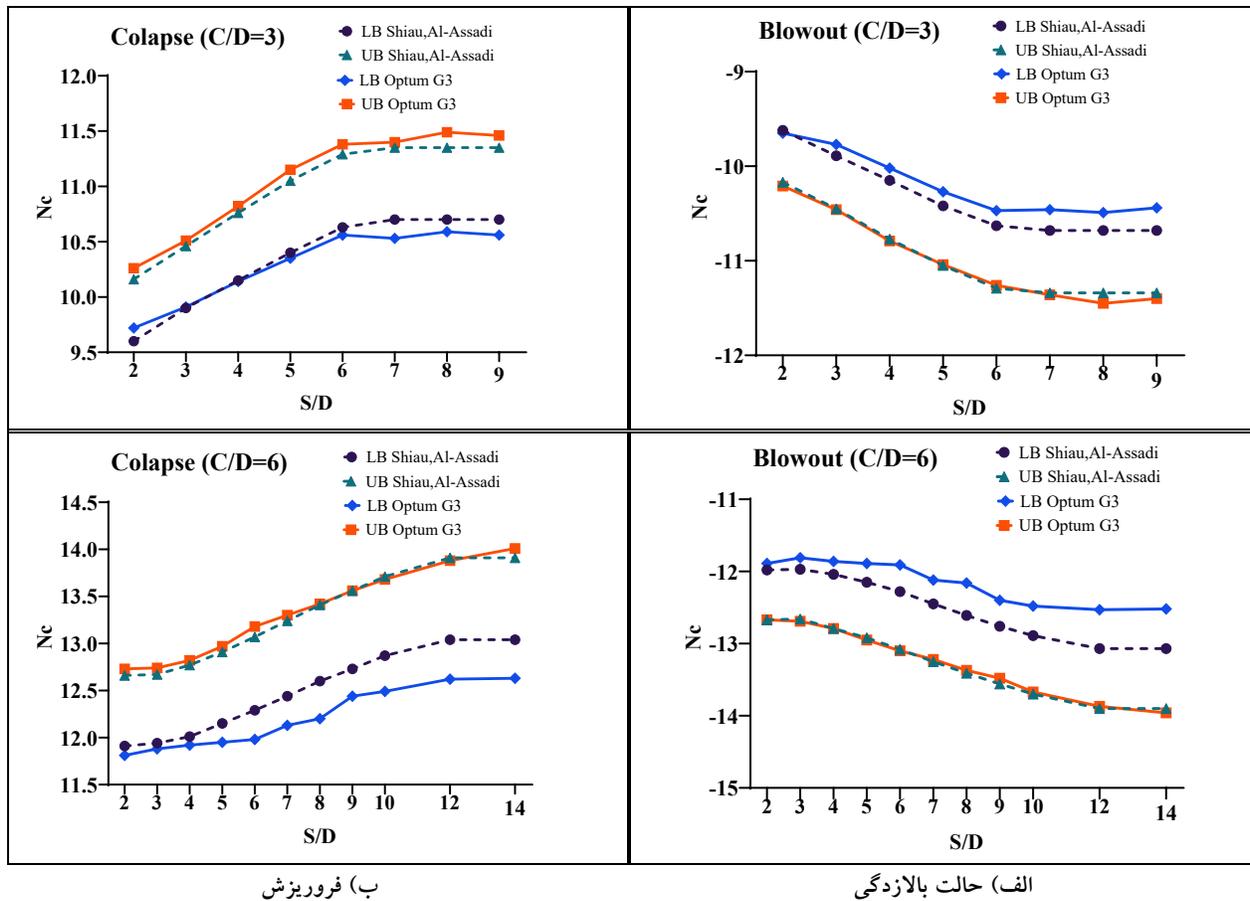
$$\alpha = (2k-1)\pi/p$$

$$R = c' \cos \varphi' - \left(\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \right) \sin \varphi'$$

(ب)

شکل ۳. معیار موهر-کولومب و سطح تسلیم خطی سازی شده

(الف) حد پایین (Sloan, 1988) (ب) حد بالا (Sloan, 1989)



ب) فروریزش

الف) حالت بالازدگی

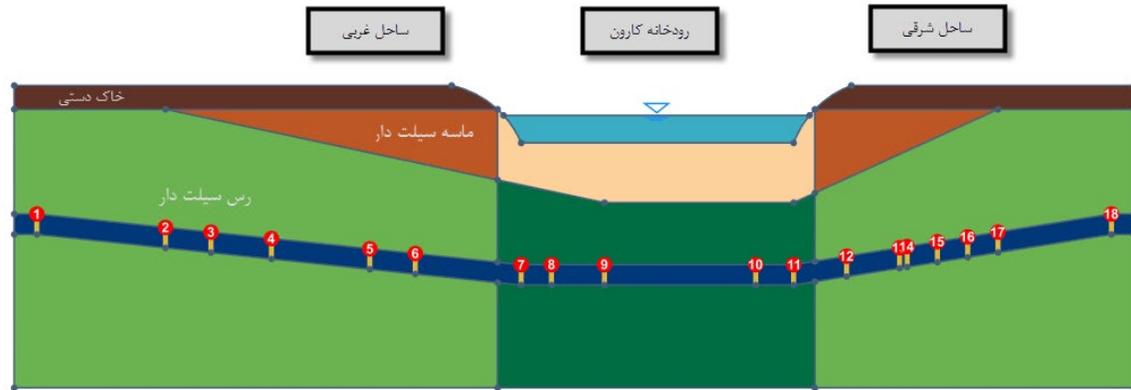
شکل ۴. مقایسه نتایج نرم افزار Optum G3 و نتایج (Shiau & Al-Asadi, 2020)

۴- شبیه سازی و نتایج

گرفته شده در این حالت بیشتر است. این نرم افزار بمنظور مش بندی المان ها، از ویژگی خاصی به نام مش انعطاف پذیر^۱ استفاده می کند بدین مفهوم که در نواحی تمرکز تنش، مش ریزتری انتخاب می شود. بدین منظور با انجام آنالیز در دو مرحله یا بیشتر، بهترین مش بندی برای محاسبات انتخاب می شود. شکل ۷ نمونه ای از مش بندی انعطاف یافته در مقطع ۱۰ را نشان می دهد.

قابل ذکر است که تعداد بهینه المان ها جهت مش بندی با سعی و خطا به میزان ۵۰۰۰ المان در نظر گرفته شده است. در ادامه هم از آنالیز حد پایین و هم آنالیز حد بالا بمنظور محاسبه فشار پایداری جبهه کار استفاده شده است. قابل ذکر است که هر مقطع چهار بار مورد تحلیل قرار می گیرد یعنی تحلیل های حد بالا و حد پایین فشار جبهه کار و هر یک از این آنالیزها در دو حالت فروریزش و بالازدگی مورد بررسی قرار گرفته است.

بمنظور محاسبه فشار پایداری جبهه کار تونل مترو اهواز در قسمتی از مسیر دستگاه حفاری که از زیر رودخانه کارون عبور می کند، زمین منطقه در ۱۸ مقطع مختلف در طول این مسیر مدل سازی می شود که مقاطع مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده اند. با توجه به قابلیت مدل سازی سه بعدی نرم افزار Optum G3 و اعمال لایه بندی خاک منطقه، مسأله مورد نظر، مشابه با واقعیت شبیه سازی می شود. برای تحلیل هر مقطع نیاز به انتخاب محدوده ای در اطراف جبهه کار می باشد که گستردگی این محدوده با سعی و خطا مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است. سعی و خطا بدین منظور صورت می گیرد که شرایط مرزی گیرداری، تأثیری بر روی کانتورهای تنش موجود در توده خاک نداشته باشد. همانطور که در ادامه نشان داده خواهد شد، در حالت بالازدگی نسبت به حالت فروریزش، محدوده گسترده تری از خاک تحت تأثیر قرار می گیرد، لذا گستره در نظر



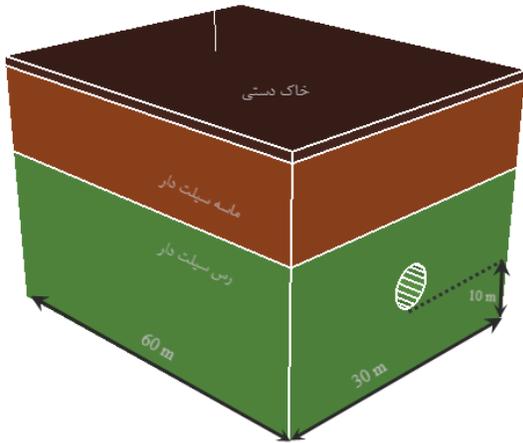
شکل ۵. مقاطع انتخابی جهت بررسی فشار پایداری جبهه کار

جدول ۳. فشار آب حفره‌ای جبهه کار در مقاطع مختلف

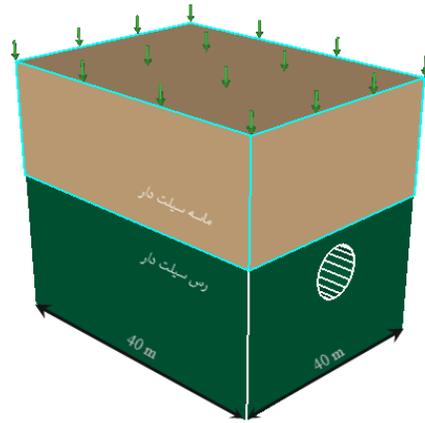
مقطع	فشار آب (kPa)		میانگین
	بالای جبهه کار	پایین جبهه کار	
۱	۶/۶۸	۰/۱۳۵	۸/۱۰۱
۲	۹/۱۱۲	۳/۱۷۹	۱/۱۴۶
۳	۵/۱۲۸	۹/۱۹۴	۷/۱۶۱
۴	۳/۱۴۹	۷/۲۱۵	۵/۱۸۲
۵	۱/۱۸۳	۵/۲۴۹	۳/۲۱۶
۶	۸/۱۹۸	۱/۲۶۵	۹/۲۳۱
۷	۱/۱۹۱	۵/۲۵۷	۳/۲۲۴
۸	۱/۱۹۱	۵/۲۵۷	۳/۲۲۴
۹	۱/۱۹۱	۵/۲۵۷	۳/۲۲۴
۱۰	۱/۱۹۱	۵/۲۵۷	۳/۲۲۴
۱۱	۱/۱۹۱	۵/۲۵۷	۳/۲۲۴
۱۲	۴/۲۰۷	۹/۲۷۳	۷/۲۴۰
۱۳	۷/۱۷۹	۱/۲۴۶	۹/۲۱۲
۱۴	۷/۱۷۵	۲/۲۴۲	۹/۲۰۸
۱۵	۸/۱۵۹	۳/۲۲۶	۱/۱۹۳
۱۶	۰/۱۴۴	۴/۲۱۰	۲/۱۷۷
۱۷	۱/۱۲۸	۵/۱۹۴	۳/۱۶۱
۱۸	۶/۶۸	۰/۱۳۵	۸/۱۰۱

یکی از مشکلات اساسی این نرم‌افزار در حالت سه بعدی، تعریف تراز آب زیرزمینی می‌باشد. به عبارت دیگر، امکان آنالیز نشست وجود نداشته و بمنظور اعمال فشار آب حفره‌ای در لایه‌ها، این فشار بصورت مجزا در پایین و بالای جبهه کار و نیز میانگین آن‌ها با فرض توزیع هیدرواستاتیک محاسبه شده است. فشار آب برای مقاطع مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. پس از هر آنالیز، فشار آب حفره‌ای محاسبه شده به فشار پایداری بدست آمده از نرم‌افزار، اضافه می‌گردد. همچنین فشار آب موجود در رودخانه بصورت یک بار یکنواخت و گسترده در بالای مدل اعمال می‌شود که در شکل ۶-الف نشان داده شده است.

پس از تحلیل و بررسی‌های لازم، مقادیر حدود بالا و پایین فشار پایداری جبهه کار در دو حالت فروریزش و بالازدگی در جدول ۴ آورده شده است. در حالت فروریزش، محاسبه حداقل فشار لازم جهت جلوگیری از ریزش توده خاک اطراف جبهه کار به داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته و در حالت بالازدگی، حداکثر فشاری که توسط دستگاه حفاری به خاک اعمال شده و موجب بالازدگی در توده خاک مقابل جبهه کار نگردد، محاسبه می‌شود. همانطور که در جدول ۴ نیز نشان داده شده است، واضح است که فشار جبهه کار بدست آمده در حالت بالازدگی بسیار بیشتر از فشار جبهه کار حالت فروریزش بوده بطوریکه اختلاف بین فشار بدست آمده در این دو حالت بطور متوسط برابر ۱۸۸ درصد می‌باشد.

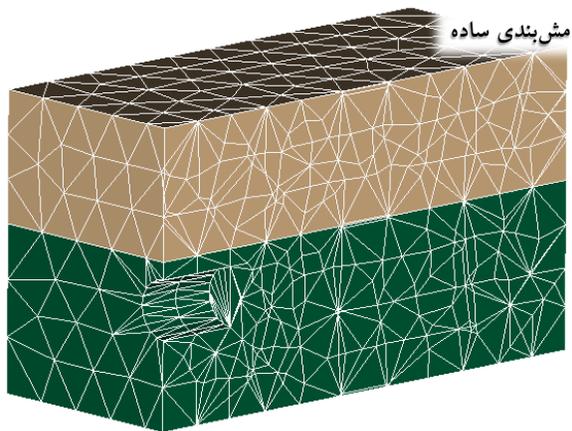


(ب) حالت بالازدگی

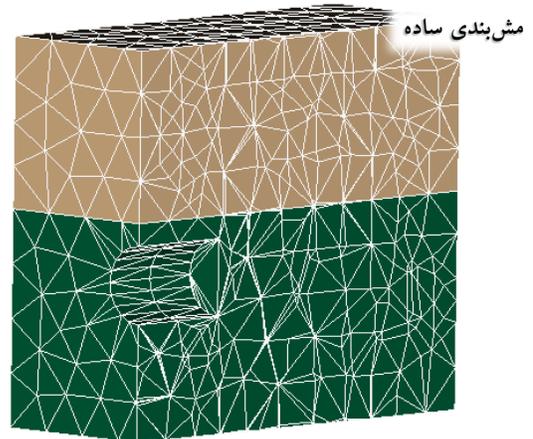


(الف) حالت فروریزش

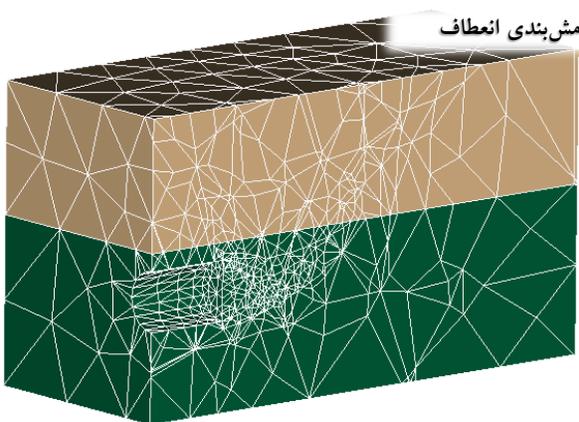
شکل ۶. محدوده انتخابی جهت مدلسازی سه بعدی در حالات فروریزش (الف) و بالازدگی (ب)



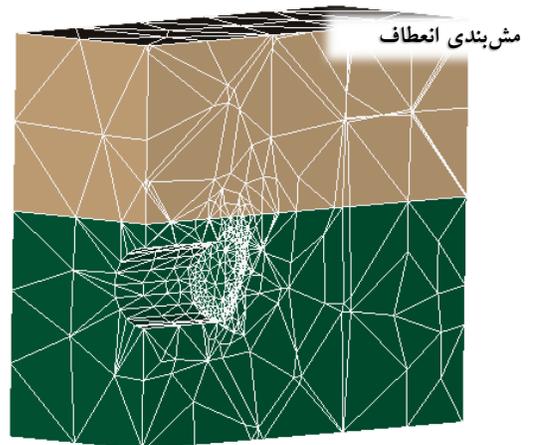
مش بندی ساده



مش بندی ساده



مش بندی انعطاف



مش بندی انعطاف

(ب) حالت بالازدگی

(الف) حالت فروریزش

شکل ۷. نمونه ای از مش بندی ساده و انعطاف یافته در حالات فروریزش (الف) و بالازدگی (ب) در مقطع ۱۰

جدول ۴: فشار پایداری جبهه کار تونل مترو اهواز در حد فاصل بین ایستگاه نادری و ساعت

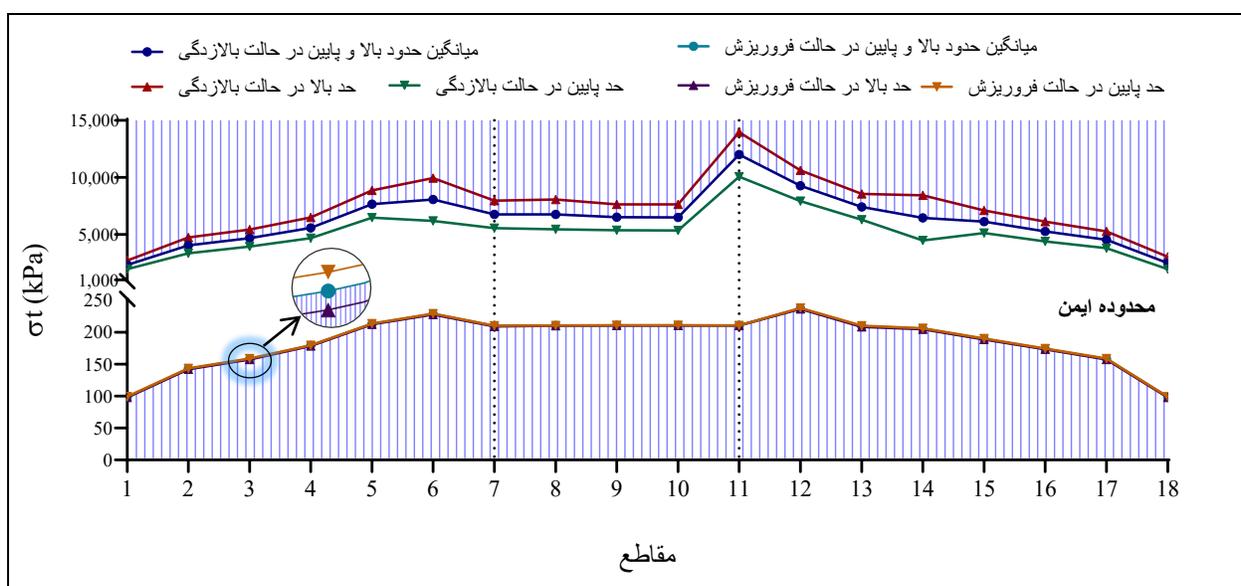
مقطع	حالت فروریزش (کیلوپاسکال)			حالت بالازدگی (کیلوپاسکال)		
	حد پایین	حد بالا	درصد اختلاف	حد پایین	حد بالا	درصد اختلاف
۱	۳۲/۹۹	۹۲/۹۷	۴۲/۱	۱۹۵۰	۲۷۰۷	۵۱/۳۲
۲	۴۷/۱۴۳	۱۴/۱۴۲	۹۳/۰	۳۳۳۲	۴۷۲۶	۶۰/۳۴
۳	۰۸/۱۵۹	۵۷/۱۵۷	۹۵/۰	۳۹۲۶	۵۴۱۹	۹۶/۳۱
۴	۹۱/۱۷۹	۵۹/۱۷۸	۷۴/۰	۴۶۶۶	۶۴۷۹	۵۳/۳۲
۵	۸۰/۲۱۳	۵۶/۲۱۲	۵۸/۰	۶۴۶۰	۸۸۶۰	۳۳/۳۱
۶	۳۵/۲۲۹	۹۳/۲۲۷	۶۲/۰	۶۱۸۱	۹۹۵۱	۷۴/۴۶
۷	۴۱/۲۱۰	۳۶/۲۰۹	۵۰/۰	۵۵۳۹	۷۹۵۴	۷۹/۳۵
۸	۹۲/۲۱۰	۵۸/۲۱۰	۱۶/۰	۵۴۴۲	۸۰۵۵	۷۲/۳۸
۹	۰۷/۲۱۱	۵۹/۲۱۰	۲۳/۰	۵۳۶۷	۷۶۳۷	۹۱/۳۴
۱۰	۰۷/۲۱۱	۵۹/۲۱۰	۲۳/۰	۵۳۳۸	۷۶۳۷	۴۴/۳۵
۱۱	۹۴/۲۱۰	۶۰/۲۱۰	۱۶/۰	۱۰۰۵۸	۱۳۹۶۶	۵۳/۳۲
۱۲	۰۸/۲۳۸	۶۸/۲۳۶	۵۹/۰	۷۹۲۱	۱۰۶۱۴	۰۶/۲۹
۱۳	۳۶/۲۱۰	۷۵/۲۰۸	۷۷/۰	۶۲۷۵	۸۵۵۷	۷۷/۳۰
۱۴	۴۳/۲۰۶	۹۵/۲۰۴	۷۲/۰	۴۴۵۸	۸۴۲۸	۶۲/۶۱
۱۵	۴۶/۱۹۰	۰۲/۱۸۹	۷۶/۰	۵۱۲۸	۷۱۰۵	۳۲/۳۲
۱۶	۵۷/۱۷۴	۴۱/۱۷۳	۶۷/۰	۴۳۸۷	۶۱۲۸	۱۱/۳۳
۱۷	۸۷/۱۵۸	۳۹/۱۵۷	۹۴/۰	۳۷۹۹	۵۲۵۸	۲۲/۳۲
۱۸	۲۷/۹۹	۱۰/۹۸	۱۹/۱	۱۹۴۳	۳۰۳۹	۰۰/۴۴
میانگین	-	-	۶۷/۰	-	-	۱۲/۳۶

بدست آمده به طور متوسط حدود ۳۶ درصد بوده که نسبت به حالت فروریزش مقدار قابل توجهی می‌باشد. در هر حال اگر میانگین حد بالا و حد پایین بدست آمده از حالت بالازدگی را به عنوان تقریبی از فشار واقعی در نظر گرفته شود، حداکثر خطای تقریب، نصف تفاضل این حدود یعنی ۱۸ درصد خواهد بود. قابل ذکر است که با در نظر گرفتن تعداد المان‌های بیشتر می‌توان دقت اعداد محاسبه شده را تا حدی بالا برد اما با افزایش تعداد

با توجه به جدول ۴ فشار پایداری جبهه کار محاسبه شده با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود در حالت فروریزش از دقت بسیار بالایی برخوردار است. بنحوی که اختلاف حدود بالا و پایین بدست آمده به طور متوسط برابر ۰/۶۷ درصد است که بسیار ناچیز می‌باشد. همچنین از آنجا که این حدود، دربرگیرنده جواب واقعی‌اند، بنابراین میانگین این حدود را عملاً می‌توان برابر با فشار پایداری واقعی در نظر گرفت. اما در بررسی حالت بالازدگی، همانطور که از جدول ۴ پیداست، اختلاف بین حدود بالا و پایین

دستگاه حفاری می‌تواند به حفاری بپردازد و از هر نوع گسیختگی توده خاک مقابل جبهه‌کار پیشگیری کند. همچنین هرچه دستگاه حفاری با فشار کمتری به حفاری ادامه دهد، آسیب به سپر و سایر قطعات در اثر سایش کاهش می‌یابد و از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. بنابراین در پروژه‌های عملی اصل بر انتخاب کمترین فشار ممکن می‌باشد. بنابراین پیشنهاد گردید که فشار اعمالی توسط دستگاه حفاری در تونل مترو اهواز نزدیک به فشار جبهه‌کار بدست آمده در حالت فروریزش انتخاب گردد. محدوده ایمن فشار پایداری جبهه‌کار در شکل ۸ نشان داده شده است.

المان‌ها با توجه به سه‌بعدی بودن مدل، زمان اجرای هر آنالیز بطور چشمگیری افزایش خواهد یافت. قابل ذکر است که فشار پایداری اعمالی توسط دستگاه حفاری باید به نحوی انتخاب گردد که از فشار بدست آمده در حالت فروریزش کمتر نباشد تا از گسیختگی در این حالت جلوگیری شده و نیز از فشار پایداری بدست آمده در حالت بالازدگی بیشتر نباشد تا بالازدگی توده خاک صورت نگیرد. بنابراین محدوده بین فشار حالت بالازدگی و حالت فروریزش به عنوان محدوده ایمن در نظر گرفته می‌شود و با انتخاب فشار جبهه‌کار در این محدوده،



شکل ۸. محدوده ایمن فشار پایداری جبهه‌کار در مقاطع مختلف

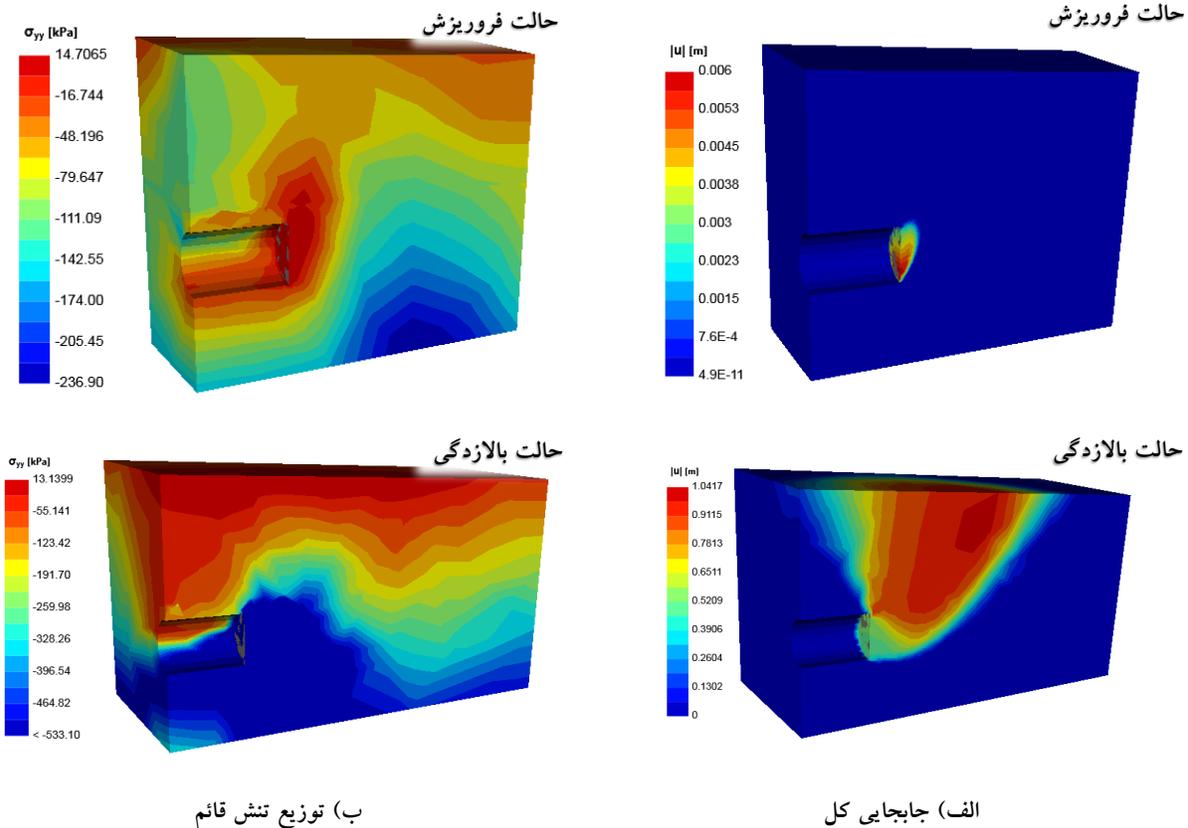
درصد حفاری کرده و در انتها با شیب مثبت ۴ درصد به حفاری ادامه می‌دهد که این حرکات در عمق سبب افزایش و کاهش عمق قرارگیری تونل در خاک می‌گردد. بدین ترتیب با افزایش عمق قرارگیری تونل، ارتفاع روباره و فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابند که بنوبه خود سبب افزایش فشار جبهه‌کار می‌گردد. بالطبع با کاهش عمق قرارگیری تونل، شاهد کاهش فشار جبهه‌کار خواهیم بود. قابل ذکر است که دستگاه حفاری در محدوده بین مقطع ۷ الی ۱۱ دقیقاً از زیر رودخانه عبور می‌کند. بنابراین علی‌رغم ثابت ماندن عمق قرارگیری تونل، با توجه به کاهش عمق روباره و جایگزینی حجم

نکته قابل توجه در این شکل، بیشتر بودن حد بالا نسبت به حد پایین در حالت بالازدگی است که طبیعی است اینگونه باشد. اما در حالت فروریزش، فشار جبهه‌کار در حد بالا از حد پایین کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر در این حالت، حد پایین بگونه‌ای نسبت به جواب واقعی قرار می‌گیرد که در محدوده ایمن قرار داشته باشد. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۸، تغییرات ناگهانی فشار پایداری جبهه‌کار در مقاطع ۷ و ۱۱ بوده که ناشی از تغییر در زاویه حفاری دستگاه می‌باشد. همانطور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، دستگاه در ابتدای مسیر عبور از زیر رودخانه کارون با شیب منفی ۲/۵

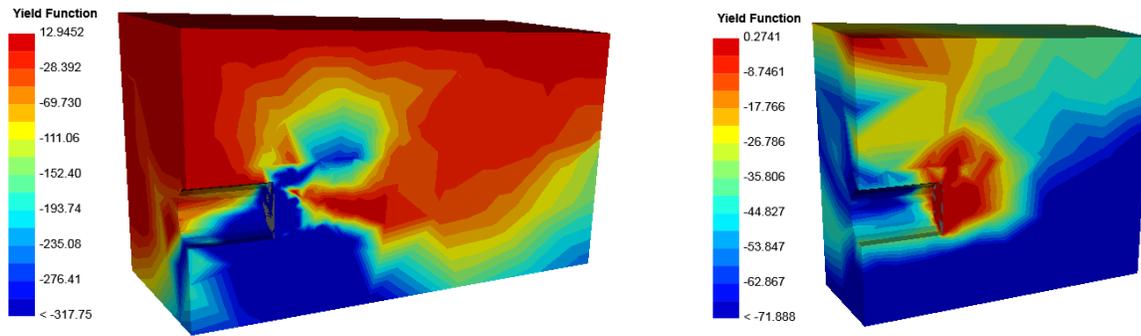
تونل یکنواخت نبوده و در حالت فروریزش در محدوده پایین جبهه کار بیشتر گردیده است که معرفی تجمع توده خاک در پای جبهه کار در اثر گسیختگی می باشد. قابل ذکر است که جابجایی های بدست آمده از آنالیز حد بالا نسبی بوده و واقعی نمی باشند زیرا بمنظور آنالیز حدی، توده خاک در حالت پلاستیک قرار گرفته است.

شکل ۱۰ محدوده پلاستیک شدگی خاک در حالات فروریزش و بالازدگی را در محیط اطراف تونل در مقطع ۱۰ نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در حالت فروریزش نواحی کاملاً پلاستیک که با رنگ قرمز نشان داده شده (شکل ۱۰-الف)، در محدوده پشت جبهه کار قرار دارد. اما در حالت بالازدگی نواحی پلاستیک شدگی بسیار گسترده می باشد (شکل ۱۰-ب).

کمتر آب بجای توده خاک، فشار پایداری محاسبه شده در این محدوده نسبت به مقاطع اطراف، کمتر می باشد. در شکل ۹ توزیع جابجایی کل در محدوده جبهه کار و نیز توزیع تنش های قائم تونل اهواز را در حالت فروریزش و بالازدگی برای نمونه در مقطع ۱۰ نشان داده شده است. از آنجا که تنش ها در حد بالا و جابجایی ها در حد پایین دخیل نمی باشند، کانتور جابجایی کل در شکل ۹-الف حاصل از حد بالا و توزیع تنش قائم در شکل ۹-ب از آنالیز حد پایین بدست آمده است. همچنین با توجه به این شکل، حفر تونل، تنش قائم برجا را کاملاً دستخوش تغییر کرده و آن را از حالت توزیع خطی در عمق خارج می کند. بطوریکه در نزدیکی جبهه کار، تمرکز تنش بیشتر از سایر نقاط در همان عمق می باشد. همانطور که در شکل الف-۹ نشان داده شده، مقدار جابجایی در جبهه کار



شکل ۹. نتایج آنالیز مقطع ۱۰



ب) حالت بالازدگی

الف) حالت فروریزش

شکل ۱۰. محدوده پلاستیک شدگی خاک در مقطع ۱۰

۵- نتیجه گیری

ایمن محاسبه شده از دقت بالایی برخوردار بوده و با اطمینان در عمل می‌توان از آن استفاده نمود.

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود سه‌بعدی، فشار پایداری جبهه‌کار تونل خط یک متروی اهواز محاسبه شده است. فشار پایداری برای دو نوع حالت گسیختگی شامل فروریزش و بالازدگی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق دقت روش آنالیز حدی در محاسبه فشار پایداری جبهه‌کار مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس درصد اختلاف کران بالا و کران پایین به طور متوسط برای حالت فروریزش برابر ۰/۶۷ درصد حاصل شد. لذا میانگین حدود بالا و پایین تقریباً کاملاً مناسبی از جواب واقعی است. اما برای حالت بالازدگی این اختلاف با مقدار متوسط برابر ۳۶/۱۲ درصد بدست آمد که از دقت کمتری برخوردار می‌باشد. لذا میانگین حدود در حالت فرو ریزش حداکثر تقریباً ۱۸ درصدی را داشته که مقدار قابل توجهی است. همچنین نتایج این بررسی، رابطه مستقیم بین فشار پایداری جبهه‌کار و عمق قرارگیری تونل را نشان می‌دهد. از این نتایج می‌توان دریافت که زاویه حفاری توسط دستگاه نیز بر فشار پایداری جبهه‌کار تأثیر گذار می‌باشد. بدین ترتیب که هرچه دستگاه نسبت به افق با شیب منفی یا مثبت به حفاری بپردازد به ترتیب باعث افزایش و کاهش فشار پایداری جبهه‌کار می‌شود. در پایان در این تحقیق محدوده مابین حدود پایین فروریزش و بالازدگی که محدوده ایمن فشار جبهه‌کار می‌باشد برای هر ایستگاه محاسبه گردید. تغییرات فشار جبهه‌کار در این بازه، محدوده عملکردی فشار دستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به مدلسازی سه بعدی صورت گرفته و اعمال پستی بلندی‌های سطحی و نیز لایه بندی توده خاک در آنالیز، محدوده

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Tunnel Boring Machine (Tbm)
2. Earth Pressure Balance (Epb)
3. Finite Element Limit Analysis (Fela)
4. Statically Admissible Stress Field
5. Kinematically Admissible Velocity Field
6. Mesh Adaptively

۷- مراجع

- Ahwaz urban railway project, line 1, *Amberg Engineering Ltd.* (2015).
- B.Arabzade, (1386). Geotechnical report of Ahwaz city train line 1. (in persian).
- Shiau, J., & Al-Asadi, F. (2020). Three-Dimensional Heading Stability of Twin Circular Tunnels. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 2973–2988.
- doi.org/10.1007/s10706-020-01201-z

-Shiau, J., & Al-Asadi, F. (2021). Twin Tunnels Stability Factors F_c , F_s and F_γ . *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(1), 335–345. doi.org/10.1007/s10706-020-01495-z

-Sloan, S. W. (1988). Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12(1), 61–77.

doi.org/10.1002/nag.1610120105

-Sloan, S. W. (1989). Upper Bound Limit Analysis Using Finite. *International Journal for Numerical and Analytical*, 13 (November 1987), 263–282.

[doi/10.1002/nag.1610130304/full](https://doi.org/10.1002/nag.1610130304/full)

Calculation of the Stability Pressure of the Working Face of the Earth Pressure Balancing Drilling Machine Using the 3D Finite Element Limit Analysis Method (Case Study: Ahvaz Metro Line 1 Tunnel)

Mohammad Reza Entezr marne, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

Abbas Eslami Haghigat, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

Mohsen Haji Hassani, Associate Professor, Mining Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

E-mail: a.eslami@urmia.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

In recent years, the use of mechanized drilling equipment, such as earth pressure balancing equipment, for tunnel excavation has become widespread. The proper design of these devices requires a careful study and examination of the soil mass around the excavation site. One of the important parameters in these studies is the working face stability pressure required to prevent the rupture of the soil mass around the excavation site due to collapse and uplift of the soil, which is applied to the soil mass by the drilling device. In this research, using the finite element limit analysis method in three-dimensional condition, the stability pressure of the tunnel working face of Line 1 of Ahvaz metro has been analyzed and investigated. This method is a combination of limit analysis and finite element meshing. The results obtained from this method in the collapse case are very accurate, so that the average of the upper and lower bounds obtained can be considered a good approximation of the actual load. These results show that the use of the 3D finite element limit analysis method to investigate the stability pressure of the working face well models the heterogeneity in the soil mass and, from an operational point of view, determines the safety range that the working face pressure can tolerate.

Keywords: Finite Element Limit Analysis, Working Face Stability Pressure, Limit Analysis, Lower Bound, Upper Bound