

## ارزیابی عددی و آماری پدیده مچاله‌شوندگی در تونل غرب کرمانشاه

واحد قیاسی\*<sup>۱</sup>، علی‌گذاری همت<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

### چکیده

در این پژوهش به پدیده مچاله‌شوندگی توسط روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی و تحلیلی-تئوریک پرداخته شده، سپس مقطع بحرانی از نظر بیشترین پتانسیل مچاله‌شوندگی تعیین شده و در نهایت مدل‌سازی عددی و بررسی آماری این پدیده انجام شده است. در این تحقیق براساس نتایج حاصل از روش‌های تجربی و تحلیلی توده‌های سنگی مقاطع گوربی (Gu) و خرد شده (Cz) به عنوان مقاطع مچاله‌شونده شناسایی شدند. سپس مدل‌سازی این مقاطع توسط نرم‌افزار عددی تفاضل محدود پیوسته FLAC2D با مدل برگر به مدت ۳۰ روز (درازمدت) انجام شد. نتایج این مدل‌سازی جابجایی‌های بسیار بزرگی را نشان داد که ناشی از کیفیت بسیار پایین توده سنگ و روباره زیاد در این پهنه‌ها از تونل است. نتایج مدل‌سازی عددی کوتاه مدت، نشان داد که سپر TBM در این مقاطع گیر نخواهد کرد. همچنین مدل‌سازی این مقطع در درازمدت، پایداری سگمندی را نشان می‌دهد ولی تأثیر این پدیده در دو مقطع مشکلی ایجاد نخواهد کرد. بررسی روش دیفرانسیل محدود پدیده مچاله‌شوندگی و آماری این تونل از نوآوری‌های مهم این پژوهش می‌باشد. پدیده مچاله‌شوندگی تونل می‌تواند پایداری و بهره‌برداری آن را به خطر بیندازد. پیش‌بینی میزان جابجایی، کرنش شعاعی، کرنش برشی و گسترش ناحیه پلاستیک به عنوان تابعی از درجه مچاله‌شوندگی و عوامل تشدیدکننده آن یکی از نیازهای اساسی حفر و نگهداری تونل است. مچاله‌شوندگی رفتاری در رابطه با تغییر شکل توده سنگ ضعیف و ویژگی‌های مقاومتی آن می‌باشد. این پدیده با تغییر شکل‌های بزرگ و همگرایی‌های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی، تنش موجود از حد مقاومت برشی گذشته و توده سنگ به داخل محدوده حفرشده رانده می‌شود. این تغییر شکل‌ها ممکن است در طی حفر تونل یا در دوره زمانی طولانی مدت ادامه داشته باشد. تونل انتقال آب با طولی حدود ۸۵۵۰ متر و قطر ۶/۸۸۴ متر در غرب ایران و استان کرمانشاه واقع است. بخش اعظمی از مسیر تونل از سنگ‌های آهکی به همراه شیل و مارن تشکیل شده و در آن چندین زون گسل به همراه ساختار تاقدیسی به چشم می‌خورد و حداکثر روباره در مسیر تونل ۵۷۰ متر می‌رسد. این موضوع شرایط را برای وقوع پدیده مچاله‌شوندگی مهیا می‌کند. به همین منظور به ارزیابی، مدل‌سازی و تحلیل این پدیده در تونل پرداخته شد.

کلمات کلیدی: پدیده مچاله‌شوندگی، خزش، تونل انتقال آب WKTC، FLAC<sup>2D</sup>، روش‌های تجربی و تحلیلی، روش آماری

### ۱- مقدمه

زیاد، تغییر شکل مقطع تونل در اثر کرنش‌های زیاد، تورم و در نهایت خزش وابسته به زمان. تونل‌سازی در سنگ‌های با پتانسیل مچاله‌شوندگی اغلب سبب ایجاد تأخیرات طولانی در احداث پروژه و تحمیل هزینه‌های زیاد می‌گردد. از این رو انتخاب روش حفاری مناسب و نصب سیستم نگهداری متناسب و به موقع نقش عمده‌ای در کنترل این پدیده و آثار نامطلوب آن خواهد داشت که مستلزم شناخت این پدیده و عوامل مؤثر بر آن و میزان تأثیر هر یک از این پارامترها می‌باشد. حفاری تونل موجب آزادسازی تنش‌های بر جای خاک شده است که تغییر شکل‌های زمین ناشی از نتایج

• اصطلاح مچاله‌شوندگی سنگ از نخستین روزهای احداث تونل در کوه‌های آلپ متداول شد و تاکنون برای آن تعاریف متعددی ارائه شده است. مچاله‌شوندگی به طور کلی به تغییر شکل‌ها و همگرایی‌های بزرگ وابسته به زمان تونل‌ها در خلال و بعد از حفاری گفته می‌شود. این پدیده هنگامی روی می‌دهد که تنش‌های القایی به وجود آمده در اثر حفاری زیرزمینی بیشتر از مقاومت برشی توده سنگ‌های در برگیرنده حفره باشد. به این ترتیب خزش سنگ به داخل حفره ایجاد شده آغاز می‌شود [۱، ۲]. برخی از آثار این پدیده عبارتند از: ناپایداری در سینه کار، شکست پوشش تونل تحت اثر بارهای

کرج است [۱۲]. در سال‌های اخیر، علاقه زیادی به این موضوع وجود داشته است. رفتار فشرده‌سازی توده سنگ ضعیف همراه با تغییر شکل‌پذیری و خاصیت استحکام توسط محققین متعددی توصیف شده است. [۱۰، ۱۱، ۱۳]. از بررسی رفتار زمین در اثر حفر تونل‌ها علاوه بر ایجاد دید کلی از تغییر شکل‌های کلی باعث جلوگیری از خسارات احتمالی به سازه‌های موجود می‌گردد.

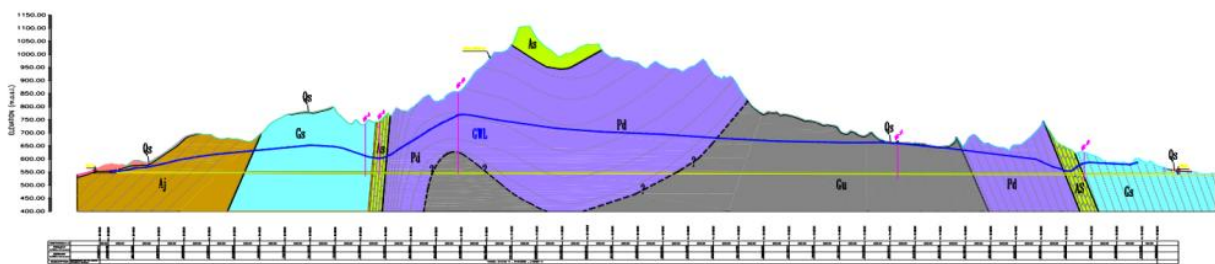
غیرقابل اجتناب در ساخت تونل‌هاست. [۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹]. مطالعه قیاسی و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که حدود ۳ کیلومتر از قسمت دوم تونل انتقال آب غرب کرمانشاه WKTC (West Kermanshah tunnel convey) و ۲ کیلومتری تونل کرج از فشار بالایی برخوردار هستند. این تحقیق نه تنها مروری بر روش‌های به کار رفته در شناسایی و تعیین کمیت مچاله‌شوندگی به همراه رویکردهای تجربی و نیمه‌تجربی است که در حال حاضر در دسترس است، بلکه همچنین مطالعات موردی

## مواد و روش‌ها

### معرفی پروژه

خروجی حفاری) در تراز حدودی ۵۴۷/۱۱ متر از سطح دریا و در نزدیکی سرپل‌ذهاب و خروجی هیدرولیکی تونل (شروع حفاری تونل) در تراز حدودی ۵۴۰/۴۰ متر طریق جاده گیلان‌غرب - قصرشیرین قابل دسترسی است. در شکل ۱ پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل آمده است.

تونل انتقال آب غرب کرمانشاه با طولی حدود ۸۵۵۰ متر بخشی از طرح گرمسیری است که حد فاصل سرپل‌ذهاب و قصرشیرین واقع شده است. قطر حفاری این تونل ۶/۸۸۴ متر بوده و حداکثر ظرفیت انتقال آب آن ۴۲ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. ورودی هیدرولیکی تونل



شکل ۱- پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل [۱، ۲]

### مدل‌سازی دو بعدی پدیده مچاله‌شوندگی در توده سنگ‌گورپی تونل

جدول ۱ وضعیت مچاله‌شوندگی پهنه گورپی این تونل براساس روش‌های متعدد بررسی پتانسیل مچاله‌شوندگی و همچنین قضاوت مهندسی را نشان می‌دهد.

پهنه زمین‌شناسی گورپی (Gu) در مسیر این تونل بیشترین پتانسیل مچاله‌شوندگی را داراست. که در جدول ۱ دیده می‌شود این پهنه در معرض مچاله‌شوندگی شدید قرار دارد لذا این سازند مورد تحلیل عددی قرار گرفته است، در

جدول ۱- وضعیت مجاله‌شوندگی پهنه گورپی تونل براساس معیارهای مختلف و قضاوت مهندسی

شماره سازند	واحد زمین‌شناسی	مترائز	هوک (۲۰۰۰)	جتوا (۱۹۸۴)	گوئل (۱۹۹۴)	سینگ (۱۹۹۲)	قضاوت مهندسی
۹	گورپی (Gu)	۲۶۹+۴ الی ۷۸۹+۶	مچاله‌شوندگی خیلی زیاد	مچاله‌شوندگی سنگین	مچاله‌شوندگی متوسط	مچاله‌شوندگی زیاد	مچاله‌شوندگی زیاد

در جدول شماره ۲ پارامترهای مورد نیاز سازند شماره ۹ که شامل واحد زمین‌شناسی گورپی می‌باشد برای تحلیل عددی مورد نیاز است آورده شده است:

جدول ۲- نتایج برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های پهنه گورپی تونل

سازند	واحد	$\nu$	c (MPa)	$\Phi$ (°)	$\psi$ (°)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$\sigma_{tcm}$ (MPa)	عمق (m)
۹	Gu	۰/۲۶	۰/۴	۳۶	۲	۲/۵	۲۴	۲۴/۵	۱/۲۵	۴۳۵

مدل‌سازی دو بعدی پدیده مجاله‌شوندگی در توده سنگ زون‌های خرد شده تونل

علاوه بر پهنه گورپی در مسیر این تونل که بیشترین پتانسیل مجاله‌شوندگی را داراست، توده سنگ دیگری در مسیر تونل، واقع در یک زون خرد شده (Cz) دارای خواص مقاومتی پایینی می‌باشد که در مترائز ۴+۴۶۹ الی ۴+۴۹۲ متری قرار دارد که یک سازند بحرانی محسوب می‌شود. این مشخصات در جدول شماره ۳ دیده می‌شود.

جدول ۳- وضعیت مجاله‌شوندگی پهنه توده سنگ خرد شده تونل براساس معیارهای مختلف و قضاوت مهندسی

شماره سازند	واحد زمین‌شناسی	مترائز	هوک (۲۰۰۰)	جتوا (۱۹۸۴)	گوئل (۱۹۹۴)	سینگ (۱۹۹۲)	قضاوت مهندسی
۱۰	Cz	۴۶۹+۴ الی ۴۹۲+۴	مچاله‌شوندگی خیلی زیاد	مچاله‌شوندگی متوسط	مچاله‌شوندگی متوسط	مچاله‌شوندگی زیاد	مچاله‌شوندگی زیاد

در جدول شماره ۴ پارامترهای مورد نیاز سازند شماره ۱۰ که شامل واحد زمین‌شناسی زون خرد شده می‌باشد برای تحلیل عددی مورد نیاز است آورده شده است.

جدول ۴- نتایج برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های پهنه زون خرد شده تونل

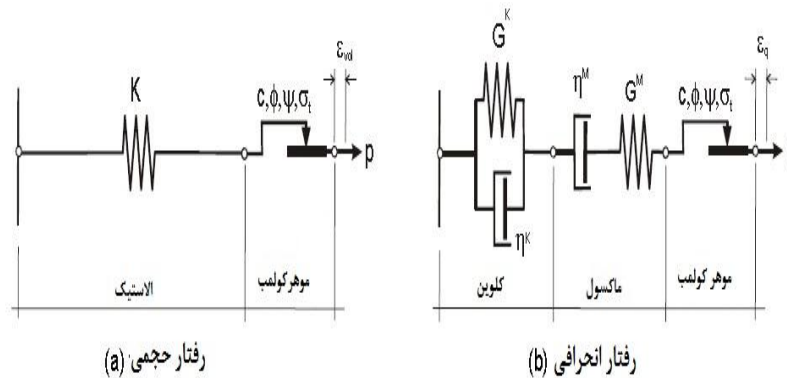
سازند	واحد	$\nu$	c (MPa)	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$\sigma_{tcm}$ (MPa)	عمق (m)
۱۰	Cz	۰/۲۴	۰/۱	۲۰	۰	۲/۲	۱/۵	۸/۲	۱/۲	۱۹۵

### مدل‌سازی عددی پدیده مچاله‌شوندگی در تونل

در مدل‌سازی عددی دو بعدی پدیده مچاله‌شوندگی در تونل از مدل الاستو ویسکوپلاستیک برگر خزشی (CVISC) در نرم افزار FLAC2D استفاده شد. از دلایل استفاده از این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مدلی مناسب برای توصیف رفتار مچاله‌شوندگی که در برگیرنده تمام مراحل الاستیک، ویسکوز و پلاستیک می‌باشد.
- دارای پارامترهای متناسب و منطقی تری نسبت به دیگر مدل‌ها برای این تحلیل دارا می‌باشد.
- در موارد مورد مطالعاتی جواب منطقی و مناسبی ارائه داده و نسبت به دیگر مدل‌ها به روزتر می‌باشد.

مدل الاستو ویسکوپلاستیک برگر خزشی یک مدل قیاسی می‌باشد که از پیوستن سری مدل ویسکوالاستیک (شکل ۲(a)) برگر (مدل کلونین و ماکسول به طور سری شکل ۲(b)) با یک بلوک لغزنده المان پلاستیک ایجاد می‌شود و براساس معیار شکست موهر کولمب می‌باشد. شماتیک این مدل در شکل ۲ آورده شده است. برای مدل‌سازی با مدل الاستو ویسکوپلاستیک نیاز به پارامترهایی می‌باشد که در جدول ۵ و ۶ آمده است.



شکل ۲- مدل الاستو ویسکوپلاستیک برگر خزشی (CVISC) [۴]

و هم انحرافی هستند و بستگی به تنش کلی مطابق با (قانون جریان) انتخاب شده دارد [۴]. در جدول شماره ۵ پارامترهای مورد مطالعه مدل الاستو ویسکوپلاستیک برگر خزشی ارائه گردیده است. در جدول شماره ۶ مقادیر ویسکوالاستیک توده سنگ موجود در پهنه گورپی و پهنه سنگ‌های خرد شده ارائه گردیده است.

رفتار حجمی تنها الاستو پلاستیک می‌باشد و از قانون الاستیک خطی (قانون جریان پلاستیک) تبعیت می‌کند. در حالی که تنها رفتار انحرافی ویسکوالاستیک - پلاستیک است و از مدل برگر و مدل پلاستیک به وجود می‌آید. شکل ۲ به این معناست که کرنش‌های ویسکوالاستیک انحرافی هستند و تنها بستگی به حالت تنش انحرافی دارند. در عوض کرنش‌های پلاستیک هم حجمی

جدول ۵- پارامترهای مورد نیاز مدل CVISC [۴]

نمایه در FLAC	نمایه	خصوصیات
b	K	مدول الاستیک بالک
C	c	چسبندگی
de	$\rho$	دانسیته
di	$\psi$	زاویه اتساع
f	$\phi$	زاویه اصطکاک داخلی
k-s	$G^k$	مدول برشی کلونین
k-v	$\eta^k$	ویسکوزیته کلونین
sh	$G^M$	مدول برشی الاستیک
t	$\sigma_t$	حد کششی
Vis	$\eta^M$	ویسکوزیته ماکسول

جدول ۶- مقادیر ویسکو الاستیک توده سنگ موجود در پهنه گورپی و پهنه سنگ‌های خردشده

مقادیر ثابت‌های ویسکو الاستیک		
$\eta^k$ (Pa.Sec)	$\eta^k$ (Pa.Sec)	$G^k$ (Pa)
$۲/۵ \times ۱۰^{۱۴}$	$۲/۳ \times ۱۰^{۱۳}$	$۲/۵ \times ۱۰^{۱۱}$

## مدل‌سازی دو بعدی پدیده میچاله‌شوندگی در پهنه گورپی با نرم‌افزار FLAC2D

(۲) اعمال مدل و خصوصیات بالا به توده سنگ برای رسیدن به تعادل اولیه بوده است. در این مدل‌سازی برای تمامی مقاطع مدل الاستیک با خصوصیات مقاومتی بالا در نظر گرفته شده است.

(۳) اعمال شرایط مرزی و اولیه و شتاب ثقلی زمین به مدل بوده است. پایین مدل ثابت و در بالا تنش روباره اعمال گردید و به علت عمق زیاد تونل، تنش‌های افقی با گرادیان تنش اعمال نشده است.

(۴) اجرای مدل برای رسیدن به تعادل اولیه بوده است.

(۵) اعمال مدل CVISC و خصوصیات واقعی توده سنگ به مدل بوده است. در این مدل‌سازی برای سازند گورپی در کیلومتراژ ۴+۲۶۹ الی ۶+۷۸۹ از مدل الاستو ویسکوپلاستیک برگر خزشی (CVISC) استفاده شده است.

مدل‌سازی دو بعدی پدیده میچاله‌شوندگی این است که تأثیر بعد سوم یعنی پیشروی جبهه کار روی رفتار و جابجایی‌های مدل در نظر گرفته نمی‌شود. به همین منظور در مدل‌سازی دو بعدی فرض می‌شود در حالی که مقطع مورد مطالعه به اندازه کافی (۳ تا ۴ برابر قطر تونل) از جبهه کار دور باشد به طوری که متأثر از پیشروی جبهه کار نباشد.

این مقاطع، از نرم‌افزار عددی پیوسته تفاضل محدود FLAC2D<sup>7.00</sup> استفاده می‌شود که مراحل ساخت و اجرای مدل بطور خلاصه در زیر آورده شده است:

(۱) تعیین ابعاد و مش‌بندی مناسب با محیط تونل و توده سنگ. در این مدل‌سازی ابعاد مدل ساخته شده ۵۰×۵۰ متر و مش‌بندی مورد نظر از نوع استوانه شعاعی ۶۰×۶۰ می‌باشد که تراکم مش‌ها در تونل و اطراف آن بیشتر است.

۸) تجزیه و تحلیل مقادیر پارامترهای خروجی از اجرای مدل بوده است.

یک متغیر تأثیرپذیر باشد، آن‌گاه، ضریب مسیر آن برابر با ضریب همبستگی است. ضریب مسیر را با حرف (P اختصار Path) بر روی یک پیکان و شماره متغیرها را نیز به صورت اندیس زیر  $p$  نشان می‌دهند. یعنی به صورت  $P_{ij}$  که در آن، اندیس‌ها، بیانگر شماره متغیرهایی است که با پیکان به هم وصل شده‌اند، بدین صورت که،  $i$  انتهای پیکان و متغیر وابسته و  $j$  ابتدای پیکان و متغیر مستقل است و همیشه نیز  $i > j$  می‌باشد.

در تحلیل مسیر، برای ارزیابی مدل از آماره  $R^2$  استفاده می‌شود. این آماره مقدار واریانس متغیر وابسته را نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل در مدل توانسته‌اند آن را تبیین کنند. در واقع،  $R^2$  نشان می‌دهد که مدل تا چه اندازه برازنده مجموعه‌ای داده‌ها است. بنابراین، هر چه مقدار  $R^2$  بالاتر باشد مدل قوی‌تر است و بر عکس مقدار پایین‌تر  $R^2$  دلالت بر ضعف مدل دارد که باید مدل دیگری با ترتیب دیگری بین متغیرها بسازیم که تبیین‌کننده واریانس بیشتر باشند. همچنین، در کنار  $R^2$  از طریق کمیت خطا  $e$  نیز می‌توانیم مناسب بودن مدل را ارزیابی کنیم. کمیت یا میزان خطا ( $e$ ) که عبارت از  $1 - R^2$  می‌باشد، نشان‌دهنده میزانی از واریانس متغیر است که متغیرهای مقدم آن را تبیین نکرده‌اند. با مجذور کردن کمیت خطا (یعنی،  $e^2$ ) واریانس تبیین نشده هر متغیر بدست می‌آید. به عنوان مثال، اگر مقدار  $R^2$  برابر با  $0/40$  باشد در آن صورت مقدار  $e^2$  برابر با  $0/60$  خواهد بود که نشان می‌دهد  $40$  درصد از واریانس متغیر وابسته را مدل تبیین کرده و  $60$  درصد باقیمانده آن را مدل نتوانسته است تبیین کند.

... Analyze > Regression > Linear دستور را اجرا می‌کنیم. متغیر وابسته (squeezing) را وارد کادر Dependent و تمامی متغیرهای مستقل (یازده متغیر دیگر) را وارد کادر Independent کرده و بر روی دکمه Ok

۶) حفاری چند مرحله‌ای تونل در مدل برای شبیه‌سازی پیشروی دستگاه تمام حفار TBM و اعمال سیستم نگهداری بوده است.

۷) اجرای نهایی مدل و بدست آوردن پارامترهای مجهول در مدل برای تحلیل رفتار مچاله‌شوندگی توده سنگ بوده است.

### بررسی روش آماری پدیده مچاله‌شوندگی در تونل WKTC

در تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره قصد بر این بوده است رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کنیم. اما موضوعی که در اجرای روش تحلیل رگرسیون مطرح است، این است که در آن ما فقط می‌توانستیم تأثیر مستقیم هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را پیش‌بینی کنیم و امکان شناسایی تأثیرات غیرمستقیم متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته فراهم نبود. در چنین حالتی، نمی‌توانیم مدل مفهومی و نظری تحقیق را که معمولاً یک مدل نظری متشکل از ساخت روابط بین متغیرهای مستقل است، مورد آزمون قرار دهیم.

مهم‌ترین بخش از تحلیل مسیر طراحی و آزمون نمودار مسیر است که از چند جزء اساسی تشکیل شده است. نمودار مسیر در واقع، یک مدل ساختاری پیشین یا پیش تجربی با مجموعه معادله ساختاری است که روابط ممکن بین متغیرها را توصیف می‌کند. این نمودار مسیر، همواره پس از مرور بر مبانی نظری و تدوین چارچوب نظری انتخابی تحقیق توسط محقق طراحی می‌شود که در نهایت در تحلیل مسیر مورد آزمون تجربی قرار می‌گیرد. نمودار مسیر ترکیبی از مجموع مسیرها است که به صورت پیکان‌های یک طرفه، متغیرهای مستقل را به متغیر وابسته وصل می‌کند. هر کدام از این مسیرها، با یک ضریب مسیر مشخص می‌شوند. ضریب مسیر، همان بتا (Beta) است که بیانگر سهم یا وزن هر متغیر مستقل در تبیین واریانس متغیر وابسته است. در نمودار مسیر، هر متغیر مستقل یک ضریب مسیر دارد که مقدار تغییر مورد انتظار در متغیر وابسته را در نتیجه یک واحد تغییر در متغیر مستقل را نشان می‌دهد. یعنی نشان می‌دهد که به ازای یک واحد از متغیر مستقل، چه مقدار تغییر در متغیر وابسته ایجاد می‌شود. بنابراین در چنین تأثیری متغیر اول علت و متغیر دوم را معلول نام دارد. در تحلیل مسیر، اگر متغیری فقط از

خطی میان دو متغیر را مشخص می‌کند، کواریانس نام دارد. دو نوع وابستگی خطی ( $Y=a+bx$ ) وجود دارد یکی مثبت و دیگری منفی. اگر با افزایش  $X$  مقدار  $Y$  نیز افزایش پیدا کند ( $b$  مثبت) آن گاه وابستگی مثبت است. ولی اگر مقادیر  $X$  و  $Y$  در دو جهت مختلف حرکت کنند آن گاه در رابطه ۱ وابستگی بین  $X$  و  $Y$  منفی است. ( $b$  منفی)

$$Cov_{xy} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{(n-1)} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{(n-1)} \quad (1)$$

حال به بررسی آزمون فرضیات می‌پردازیم: و جهت انجام همبستگی بین متغیرها نیز از فرضیه زیر جهت آزمون فرضیات استفاده می‌کنیم رابطه ۲:

$$\begin{cases} H_0: \rho = 0 \\ H_1: \rho \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

روز نشان داده شده است. در سازند توده سنگ گورپی این نیرو پس از ۳۰ روز (۷۲۰۰ ساعت) به صفر رسیده است و در اینجا می‌توان اطمینان حاصل کرد که مدل به تعادل رسیده است.

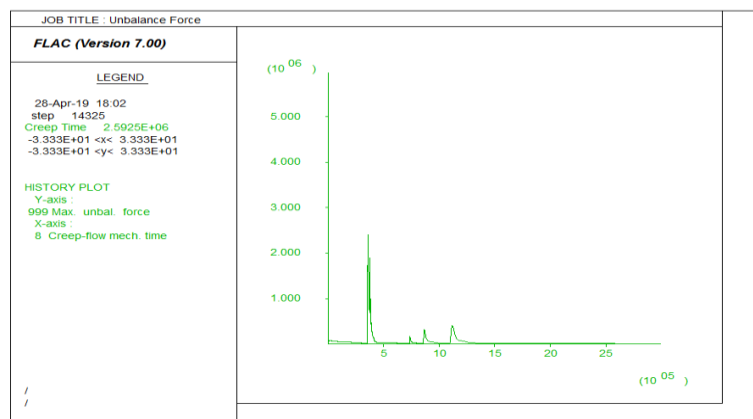
کلیک می‌کنیم. پس از اجرای دستور رگرسیون خطی چند متغیره و به عبارتی روش تحلیل مسیر براساس مراحل فوق، نتایج صفحات بعدی را در خروجی spss خواهیم داشت که با رعایت ملاحظات زیر می‌توانیم به نتیجه‌گیری مناسبی از آنها دست بزنیم. البته خروجی تحلیل مسیر، همانند تحلیل رگرسیون، بیشتر از جدول ۷ است اما در اینجا تنها به خروجی اصلی که برای تفسیر نتایج تحلیل مسیر اهمیت دارد، اشاره می‌شود. کواریانس رابطه‌ای میان دو متغیر را بررسی می‌کند. اگر دقت کنید که کواریانس تنها در مورد رفتار (جهت) حرکت دو صفت خاصه صحبت می‌کند. کواریانس دامنه‌ی تغییرات دو متغیر نسبت به همدیگر است. اگر دو متغیر تصادفی  $X$  و  $Y$  مورد بررسی باشد، همواره علاوه بر اینکه می‌خواهیم بدانیم آیا این دو متغیر وابسته هستند یا خیر، علاقه‌مندیم که شدت وابستگی آن دو را نیز بدانیم. اگر دو متغیر تصادفی  $X$  و  $Y$  از یکدیگر مستقل نباشند باید به گونه‌ای با همدیگر در ارتباط باشند یکی از شاخص‌هایی که وابستگی

## نتایج و بحث

### نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی پدیده مچاله‌شوندگی در پهنه گورپی

#### نیروی نامتعادل‌کننده در پهنه توده سنگ گورپی

در شکل ۳ نمودار نیروهای نامتعادل آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود نمودار نیروی نامتعادل‌کننده به یک مقدار ثابت رسیده است. برای اطمینان از تعادل، وضعیت سرعت نقاط گرهی بررسی شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودار نیروهای نامتعادل‌کننده در زمان ۳۰

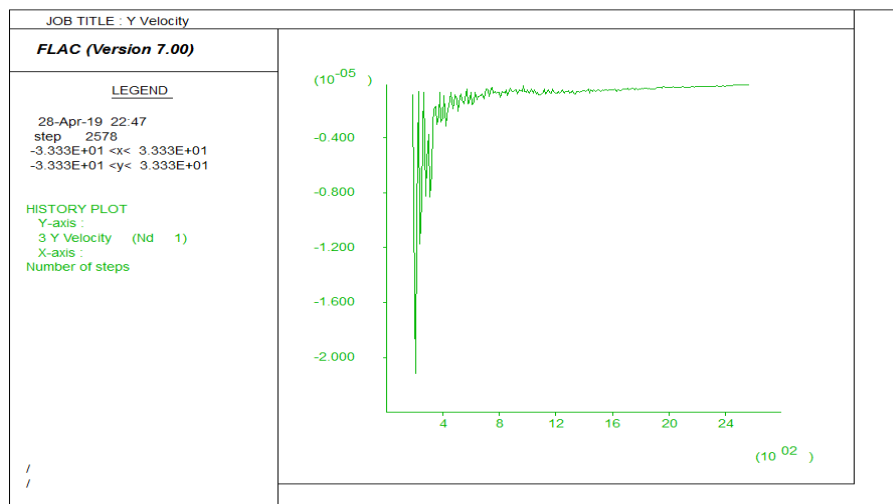


شکل ۳- نسبت نیروی نامتعادل‌کننده نسبت به زمان خزش برای پهنه گورپی در زمان ۳۰ روز

### سرعت نقاط گرهی در پهنه توده سنگ گورپی

که مدل به تعادل کامل رسیده است و دیگر جابجایی و کرنشی نداریم.

در شکل ۴ سرعت در راستای عمودی (Y) برای نقطه ای در سقف تونل برای پهنه گورپی در زمان ۳۰ روز نشان داده شده است که پس از ۱۵ روز (۳۶۰ ساعت) به صفر نزدیک شده و در نهایت صفر می‌رسد و بیانگر این است

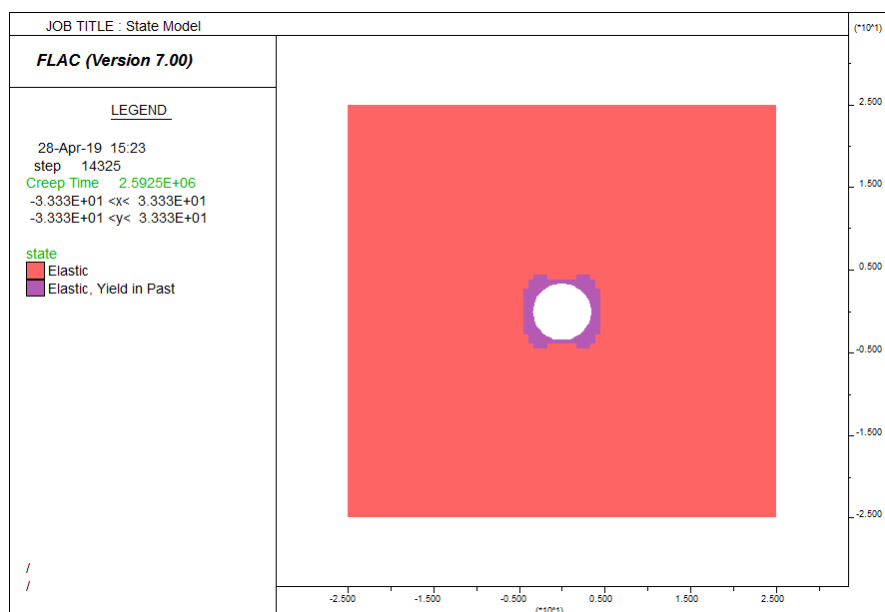


شکل ۴- جابجایی در راستای Y نقطه‌ای در سقف تونل برای پهنه گورپی در زمان ۳۰ روز

### گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تونل در پهنه توده سنگ گورپی

شکل تمامی نواحی مدل در این زمان پلاستیک می‌باشد.

در شکل ۵ گسترش ناحیه پلاستیک برای سازند گورپی در زمان ۳۰ روز (۷۲۰ ساعت) نشان داده شده است. مطابق

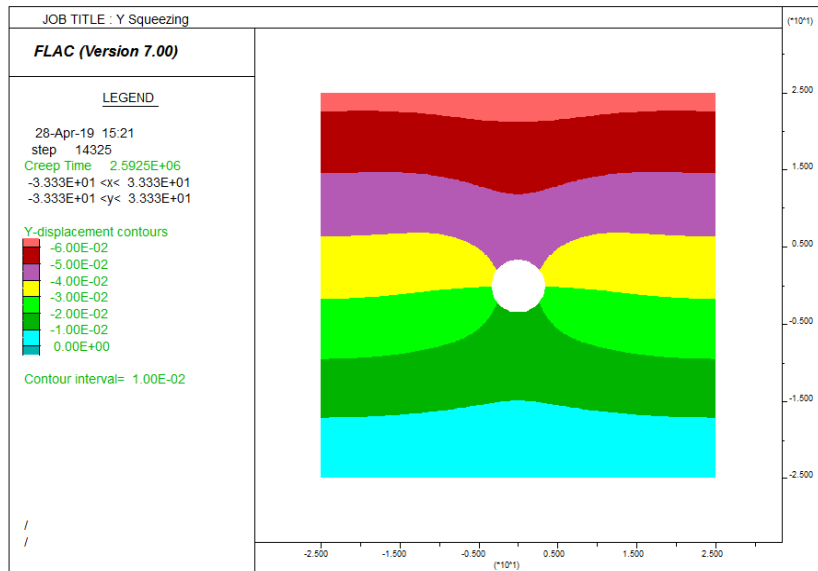


شکل ۵- گسترش ناحیه پلاستیک برای سازند گورپی در زمان ۷۲۰ ساعت (۳۰ روز)



### همگرایی تونل در راستای افقی (X) و عمودی (Y) در پهنه توده سنگ گورپی

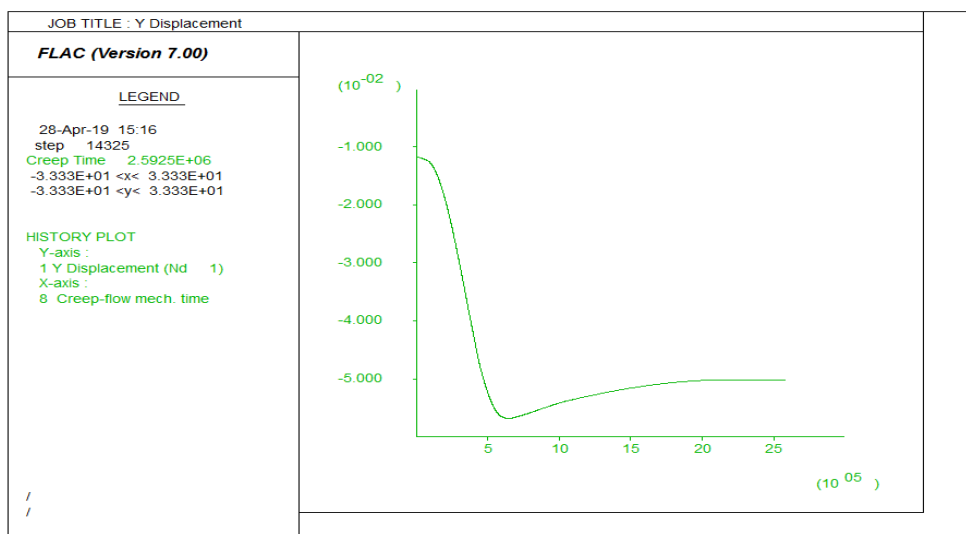
در شکل ۶ دامنه همگرایی تونل در راستای عمودی برای Y در محیط تونل، در سقف بیشترین، در دیواره متوسط و در کف تونل کمترین می‌باشد. سازند گورپی در زمان ۳۰ روز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، همگرایی عمودی در راستای



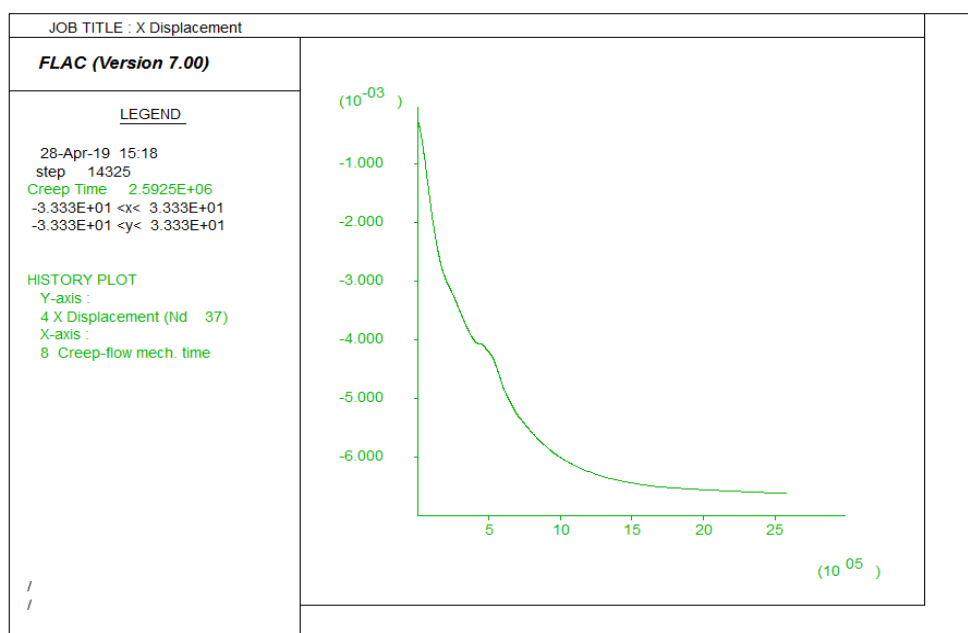
شکل ۶- دامنه همگرایی تونل در راستای عمودی برای سازند گورپی در زمان ۳۰ روز

### جابجایی‌های دیواره و سقف تونل در پهنه توده سنگ گورپی

در شکل ۷ جابجایی‌های افقی در دیواره تونل و در شکل ۸ جابجایی‌های عمودی در سقف تونل برای سازند گورپی در زمان ۳۰ روز (۷۲۰ ساعت) نشان داده شده است، که جابجایی‌های افقی دیواره ۶/۵ میلیمتر و جابجایی عمودی سقف ۴۹ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۷- جابجایی‌های عمودی در سقف تونل برای سازند گورپی در زمان ۳۰ روز



شکل ۸- جابجایی‌های افقی در دیواره تونل برای سازند گورپی در زمان ۳۰ روز

۳۰ روز کرنش‌های خزشی به پایان رسیده است. میزان جابجایی‌های رخ داده در سقف و دیواره‌های تونل بیانگر این است که این مقادیر چون کمتر از ۱ درصد قطر تونل می‌باشد توسط روش تحلیلی هوک و مارینوس در نتیجه در محدوده مجاز می‌باشند و می‌توان نتیجه گرفت که سیستم نگهداری طراحی شده تونل برای این مقطع مناسب است [۵].

در نهایت با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده بر روی نتایج مدل و مدل‌سازی‌های انجام شده با مدل‌های خزشی با مقادیر ثابت‌های ویسکوالاستیک و غیرخزشی، جدول ۷ شامل جابجایی‌های رخ داده در دیواره و سقف تونل برای سازند گورپی تهیه شده است. در جدول ۷ همانطور که مشاهده می‌کنید اختلاف جابجایی‌های کل و جابجایی الاستیک میزان جابجایی‌های خزشی را نشان می‌دهد. با تحلیل این سازند می‌توان نتیجه گرفت که بعد از

جدول ۷- جابجایی رخ داده در سقف و دیواره تونل پهنه گورپی، اجرا شده توسط مدل‌های مختلف دوبعدی

شماره اجرا	مدل	ثابت‌ها			جابجایی کل (میلی‌متر)		جابجایی خزشی (میلی‌متر)	
		$G^k (Pa)$	$\eta^k (Pa.Sec)$	$\eta^k (Pa.Sec)$	دیواره	سقف	دیواره	سقف
۱	الاستیک	-----	-----	-----	۱	۱۱/۲	۰	۰
۲	موهر-کولمب	-----	-----	-----	۱/۲	۱۲/۴	۰	۰
۳	CVISC	$۲/۵ \times ۱۰^{۱۱}$	$۲/۳ \times ۱۰^{۱۳}$	$۲/۵ \times ۱۰^{۱۴}$	۶/۵	۵۰	۵/۵	۳۸/۸

### نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی پدیده مچاله‌شوندگی در پهنه سنگ‌های خردشده در تونل WKTC

علاوه بر پهنه گورپی (Gu) در مسیر تونل WKTC بیشترین پتانسیل مچاله‌شوندگی را داراست، توده سنگ مسیر تونل WKTC واقع در یک زون خرد شده (Cz) و دارای خواص مقاومتی پایینی می‌باشد که در مترای ۴+۴۶۹ الی ۴+۴۹۲

علاوه بر پهنه گورپی (Gu) در مسیر تونل WKTC بیشترین پتانسیل مچاله‌شوندگی را داراست، توده سنگ مسیر تونل

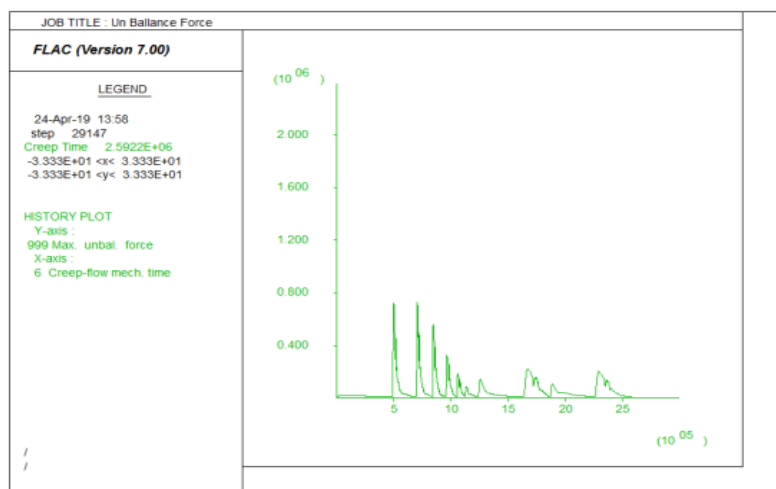
پهنه توده سنگ خرد شده را براساس قضاوت مهندسی را نشان می‌دهد این سازند مورد تحلیل عددی قرار گرفته است.

۳۰ روز نشان داده شده است. در سازند توده سنگ خرد شده این نیرو پس از ۳۰ روز (۷۲۰۰ ساعت) به صفر رسیده است و در اینجا می‌توان اطمینان حاصل کرد که مدل به تعادل رسیده است.

متری قرار دارد یک سازند بحرانی محسوب می‌شود. که در جدول ۳ دیده می‌شود این مقطع در معرض مچاله‌شوندگی شدید قرار دارد لذا در جدول ۴ وضعیت مچاله‌شوندگی

### نیروی نامتعادل‌کننده در پهنه توده سنگ خرد شده

در شکل ۹ نمودار نیروهای نامتعادل آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود نمودار نیروی نامتعادل‌کننده به یک مقدار ثابت رسیده است. برای اطمینان از تعادل، وضعیت سرعت نقاط گرهی بررسی شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار نیروهای نامتعادل‌کننده در زمان

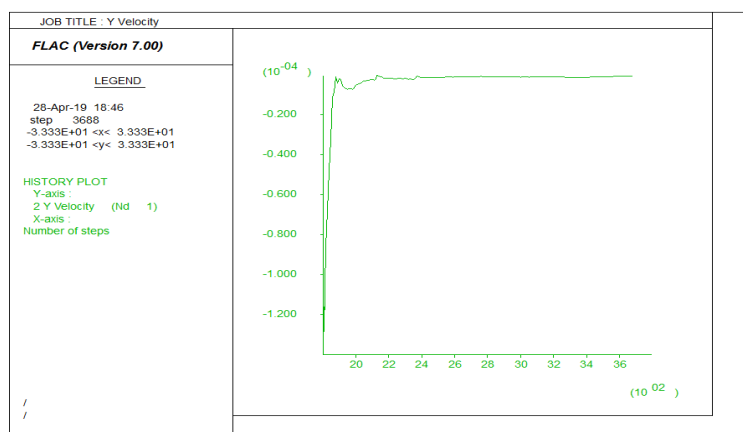


شکل ۹- نیروی نامتعادل‌کننده نسبت به زمان خزش برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز

### سرعت نقاط گرهی در پهنه توده سنگ خرد شده

۱۰ ساعت) به صفر نزدیک شده و در نهایت به صفر می‌رسد و بیانگر این است که مدل به تعادل کامل رسیده است و دیگر جابجایی و کرنشی نداریم.

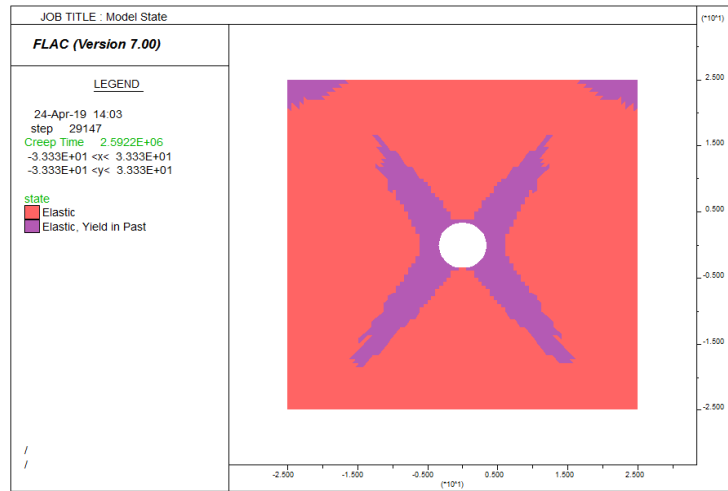
در شکل ۱۰ سرعت در راستای عمودی (Y) برای نقطه‌ای در سقف تونل برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز نشان داده شده است که پس از ۲۶/۵ روز (۱۵۹۰



شکل ۱۰- جابجایی در راستای Y نقطه‌ای در سقف تونل برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز

### گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تونل در پهنه توده سنگ خرد شده

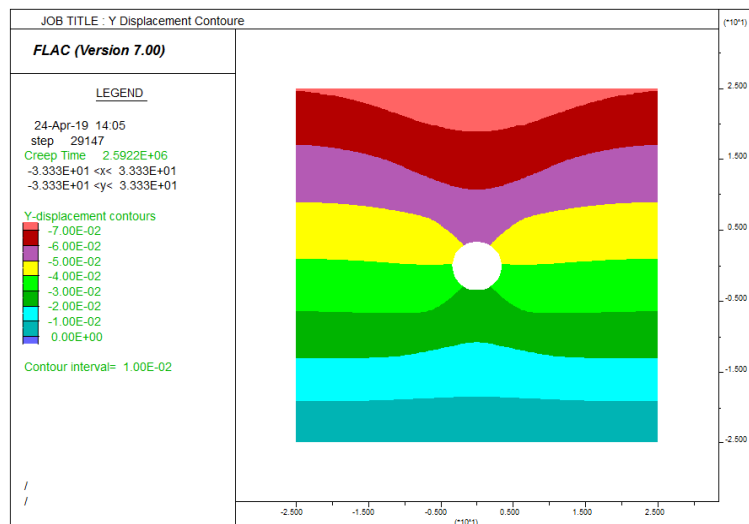
در شکل ۱۱ گسترش ناحیه پلاستیک برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز (۷۲۰ ساعت) نشان داده شده است. مطابق شکل تمامی نواحی مدل در این زمان پلاستیک می‌باشد.



شکل ۱۱- گسترش ناحیه پلاستیک برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز

### همگرایی تونل در راستای افقی (X) و عمودی (Y) در پهنه توده سنگ خرد شده

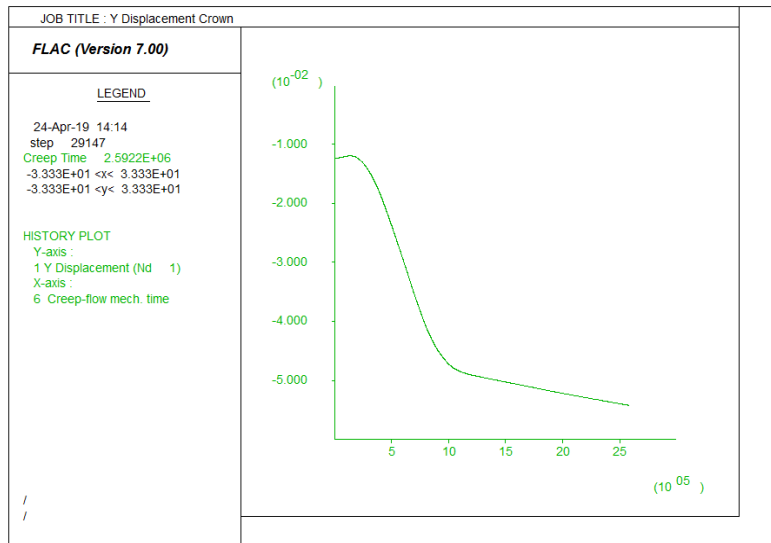
در شکل ۱۲ دامنه همگرایی تونل در راستای عمودی برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، همگرایی عمودی در راستای Y در محیط تونل، در سقف بیشترین، در دیواره متوسط و در کف تونل کمترین می‌باشد.



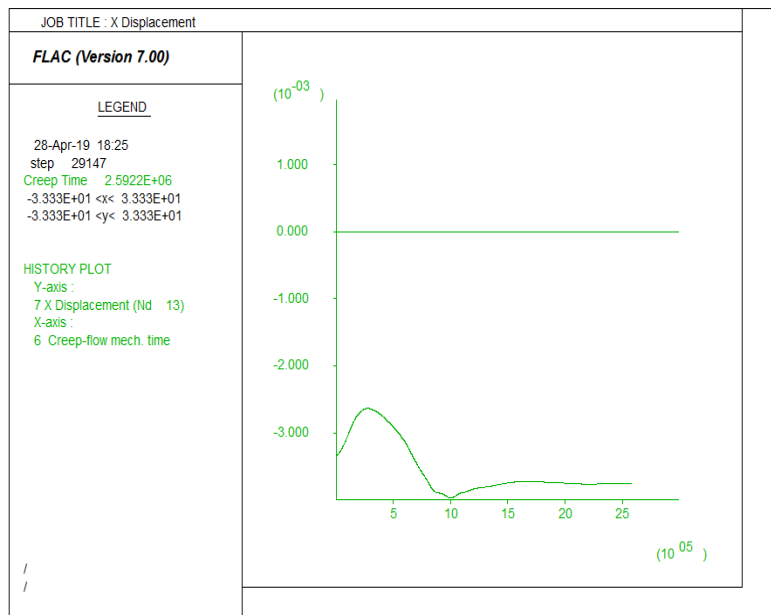
شکل ۱۲- دامنه همگرایی تونل در راستای عمودی برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز

### جابجایی‌های دیواره و سقف تونل در پهنه توده سنگ خرد شده

در شکل ۱۳ جابجایی‌های افقی در دیواره تونل و در شکل ۱۴ جابجایی‌های عمودی در سقف تونل برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز (۷۲۰ ساعت) نشان داده شده است، که جابجایی افقی دیواره ۲۵ میلیمتر و جابجایی عمودی سقف ۴۹ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۱۳- جابجایی‌های عمودی سقف تونل در پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز



شکل ۱۴- جابجایی‌های افقی در دیواره تونل برای پهنه توده سنگ خرد شده در زمان ۳۰ روز

بعد از ۳۰ روز کرنش‌های خزشی به پایان نرسیده ولی خزش با کرنش کمی رو به افزایش است که در طول زمان به پایان می‌رسد. میزان جابجایی‌های رخ داده در سقف و دیواره‌های تونل بیانگر این است که این مقادیر چون میزان همگرایی کمتر از ۱ درصد قطر تونل می‌باشد توسط روش تحلیلی هوک و مارینوس در نتیجه در محدوده مجاز می‌باشند و می‌توان نتیجه گرفت که سیستم نگهداری طراحی شده تونل برای این مقطع مناسب است [۵].

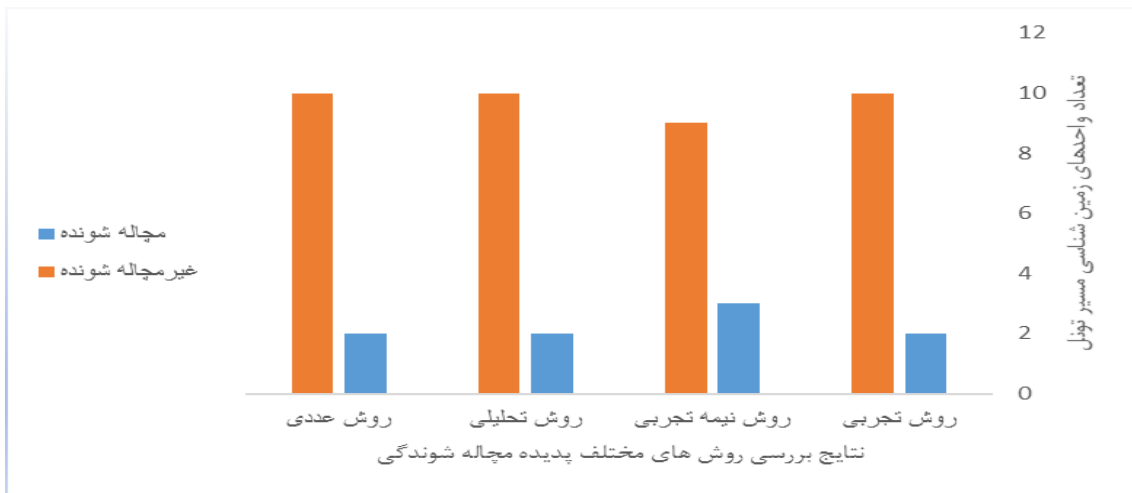
در نهایت با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده بر روی نتایج مدل و مدل‌سازی‌های انجام شده با مدل‌های خزشی با مقادیر ثابت‌های ویسکوالاستیک و غیرخزشی، جدول ۸ شامل جابجایی‌های رخ داده در دیواره و سقف تونل برای سازند توده سنگ خرد شده تهیه شده است. در جدول ۸ همانطور که مشاهده می‌کنید اختلاف جابجایی‌های کل و جابجایی الاستیک میزان جابجایی‌های خزشی را به دست می‌دهد. با تحلیل این سازند می‌توان نتیجه گرفت که

جدول ۸- جابجایی رخ داده در سقف و دیواره تونل سازند توده سنگ خرد شده، اجرا شده توسط مدل‌های مختلف دوبعدی

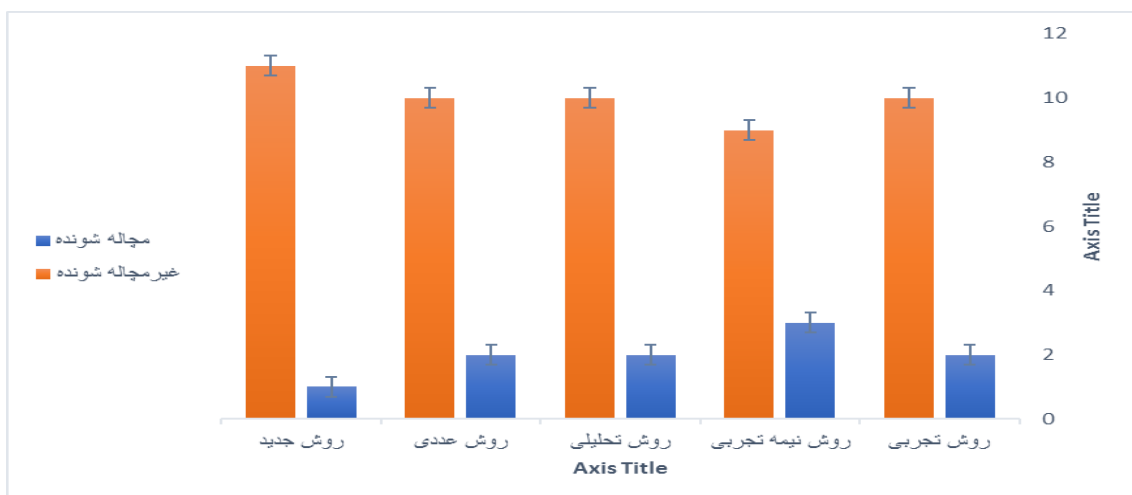
شماره اجرا	مدل	ثابت‌ها			جابجایی کل (میلی‌متر)		جابجایی خزشی (میلی‌متر)	
		$G^k (Pa)$	$\eta^k (Pa.Sec)$	$\eta^k (Pa.Sec)$	دیواره	سقف	دیواره	سقف
۱	الاستیک	-----	-----	-----	۲	۷/۳	۰	۰
۲	موهر- کولمب	-----	-----	-----	۱۰	۲/۱	۰	۰
۳	CVISC	$۲/۵ \times ۱۰^{۱۱}$	$۲/۳ \times ۱۰^{۱۳}$	$۲/۵ \times ۱۰^{۱۴}$	۳/۸	۵۴	۱/۸	۴۶/۷

نتایج روش‌های مختلف مچاله‌شوندگی در تونل WKTC در شکل ۱۶ ارائه گردیده است.

نمودار مقایسه نتایج روش‌های مختلف مچاله‌شوندگی در تونل WKTC در شکل ۱۵ و نمودار مقایسه روش جدید با



شکل ۱۵- نمودار مقایسه نتایج روش‌های مختلف مچاله‌شوندگی در تونل WKTC



شکل ۱۶- نمودار مقایسه روش جدید با نتایج روش‌های مختلف مچاله‌شوندگی در تونل WKTC

## نتایج پدیده مچاله‌شوندگی به روش آماری

فرضیه

جدول ۹ ضریب همبستگی بین مچاله‌شوندگی و فشردگی جداره و سقف تونل را نشان می‌دهد.

فرض  $H_0$ : بین مچاله‌شوندگی و فشردگی جداره و سقف تونل رابطه معنی‌داری وجود ندارد.

فرض  $H_1$ : بین مچاله‌شوندگی و فشردگی جداره و سقف تونل رابطه معنی‌داری وجود دارد.

جدول ۹- ضریب همبستگی بین مچاله‌شوندگی و فشردگی جداره و سقف تونل

متغیر	متغیر	
	مچاله‌شوندگی تونل	همبستگی پیرسون
جداره و سقف	۰/۴۹۳	معنی‌داری
	۰/۰۰۰	

مچاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف وجود دارد. پس فرضیه  $H_0$  رد و بنابراین فرضیه  $H_1$  پژوهش مورد تأیید می‌باشد و بین این دو متغیر رابطه خطی وجود دارد. همچنین ضریب همبستگی بین مچاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف همبستگی ۰/۴۹۳ است یعنی با افزایش مچاله‌شوندگی تونل فشردگی جداره و سقف افزایش می‌یابد.

برای آزمون این فرضیه از آزمون معنی‌داری پیرسون استفاده شده است، نتایج بدست آمده به شرح زیر توضیح داده می‌شود:

بین مچاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف، همبستگی معنی‌داری وجود دارد، چرا که سطح معنی‌داری ۰/۰۰۰ بدست آمده و کمتر از آلفای تحقیق یا مقدار خطا ( $\alpha=0.05$ ) می‌باشد، پس نتیجه کلی این است که در سطح ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری (همبستگی معنی‌داری) بین

### برازش مدل رگرسیونی

مچاله‌شوندگی تونل بر فشردگی جداره و سقف ارائه گردیده است.

$$\begin{cases} H_0 : b = 0 \\ H_1 : b \neq 0 \end{cases}$$

رابطه (۴)

جهت بررسی و ارائه مدل رگرسیونی بین مچاله‌شوندگی تونل (X) و فشردگی جداره و سقف (Y) در ابتدا به بررسی شاخص‌های کفایت مدل می‌پردازیم. در جدول ۱۰ شاخص کفایت مدل مچاله‌شوندگی تونل با فشردگی سقف و تونل و نیز در جدول ۱۱ آزمون معنی‌داری اثر مؤلفه

جدول ۱۰- شاخص کفایت مدل مچاله‌شوندگی تونل با فشردگی سقف و تونل

آمار دورین - واتسون	انحراف معیار خطا	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	ضریب همبستگی
۱/۷۵۲	۰/۳۱۵۵۳	۰/۲۳۵	۰/۲۴۳	۰/۴۹۳

Predictors: (Constant)

مچاله‌شوندگی تونل متغیر وابسته: سقف و تونل

نشان می‌دهد که ۲۴ درصد از فشردگی جداره و سقف تونل را می‌توان بوسیله مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل تبیین

همبستگی پیرسون بین متغیر مستقل و وابسته برابر ۰/۴۹۳ است. ضریب تعیین ۰/۲۴۳ به دست آمده و این مقدار

جای هیچ نگرانی برای استفاده از رگرسیون وجود ندارد که در اینجا چنین است).

نمود. همچنین آماره دوربین-واتسون نیز که در رگرسیون برای آزمون استقلال خطاها بکار می‌رود در اینجا تقریباً برابر ۱/۷۵ می‌باشد. (اگر این آماره بین (۱/۵ تا ۲/۵) باشد

جدول ۱۱- آزمون معنی‌داری اثر مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل بر فشردگی جداره و سقف

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
۰/۰۰۰	۳۰/۲۰۲	۳/۰۰۷	۱	۳/۰۰۷	رگرسیون
		۰/۱	۱۷۹	۳/۳۵۹	مقدار باقیمانده
		-	۱۸۰	۱۲/۳۶۶	جمع کل

Predictors: (Constant)

مچاله‌شوندگی تونل متغیر وابسته: سقف و تونل

فشردگی جداره و سقف تأثیر معنی‌داری دارد. در جدول ۱۲ نتیجه آزمون T ارتباط مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل با فشردگی جداره و سقف و نیز جدول ۱۳ ضرایب تأثیر متغیرهای وابسته بر متغیر مستقل (پدیده مچاله‌شوندگی) ارائه گردیده است.

با توجه به اینکه سطح معنی‌داری کوچکتر از مقدار خطای ۰/۰۵ می‌باشد بنابراین جدول ۱۱ از معنی‌دار بودن رگرسیون در سطح ۰/۹۵ می‌باشد. یعنی تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته معنی‌دار است و فرض  $H_0$  رد شده و فرض  $H_0$  قبول می‌شود. یعنی مچاله‌شوندگی تونل بر

جدول ۱۲- نتیجه آزمون T ارتباط مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل با فشردگی جداره و سقف

مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضریب استاندارد	T	Sig.
	B	خطای استاندارد	Beta		
ثابت	۲/۲۵۴	۰/۴۱۲	-	۵/۴۶۸	۰/۰۰۰
فشردگی جداره و سقف	۰/۴۹۱	۰/۰۸۹	۰/۴۹۳	۵/۴۹۶	۰/۰۰۰

متغیر وابسته: فشردگی جداره و سقف

بر مچاله‌شوندگی جداره و سقف تأثیرگذار است. ضریب رگرسیونی استاندارد شده یا Beta نیز برابر ۰/۴۹۳ شده که نشان‌دهنده میزان تأثیر متغیر مستقل (مچاله‌شوندگی تونل) بر متغیر وابسته (فشردگی جداره و سقف) می‌باشد.

معادله خط رگرسیونی به صورت رابطه ۵ می‌باشد:  
رابطه (۵):

(مچاله‌شوندگی تونل) =  $۲/۰ + ۲۵۴/۴۹۱$  = فشردگی جداره و سقف

که علامت مثبت بیانگر تأثیر مستقیم مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل بر فشردگی جداره و سقف می‌باشد. با توجه به  $p$  (سطح معنی‌داری) مقدار گزارش شده برای متغیر مستقل مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل، می‌توان نتیجه گرفت که این متغیر اختلاف معنی‌داری با صفر ندارد و ضریب ۰/۴۹۱ به این معنی است که به ازای یک واحد افزایش در متغیر مستقل مچاله‌شوندگی تونل، متغیر فشردگی جداره و سقف به اندازه ۰/۴۹۱ تغییر و افزایش خواهد یافت. نتیجه رگرسیون خطی نشان می‌دهد که مؤلفه مچاله‌شوندگی تونل



جدول ۱۳- ضرایب تأثیر متغیرهای وابسته بر متغیر مستقل (پدیده مجاله‌شوندگی)

مدل	ضرایب غیراستاندارد شده		ضرایب استاندارد شده	T	Sig.
	Beta	Std. Error	Beta		
$Q$	۰/۶۲۲	۰/۲۶۵	۰/۱۲۱	۰/۵۱۲	۰/۲۱۲
$GSI$	۰/۴۱۲	۰/۱۹۹	۰/۰۸	۰/۳۵۶	۰/۹۵۹
$RMR$	۰/۱۲۶	۰/۷۵۸	۰/۰۱۵۸	۰/۵۴۸	۰/۳۶۸
$\rho$	۰/۲۵۷	۰/۴۶۶	۰/۰۲۵	۰/۱۲۵	۰/۷۵۶
$RQD$	۰/۵۳۱	۰/۲۲۱	۰/۰۳۴	۰/۷۸۶	۰/۳۵۱
$UCS$	۰/۰۱۲	۰/۶۴۶	۰/۱۶۲	۰/۰۶۹۵	۰/۲۳۶
$H$	۰/۰۷۵	۰/۳۹۲	۰/۱۶۸	۰/۳۵۴	۰/۵۴۲
$C$	۰/۲۲۲	۰/۸۴۵	۰/۰۹	۰/۲۱۵	۰/۶۵۲
$\varphi$	۰/۳۸۹	۰/۱۱۱	۰/۰۸	۰/۵۴۳	۰/۸۹۶
$E$	۰/۲۵۹	۰/۴۱۲	۰/۰۶۶	۰/۶۵۸	۰/۸۴۵
$\psi$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

## نتیجه‌گیری

$H_1$  پژوهش مورد تأیید می‌باشد و بین این دو متغیر رابطه خطی وجود دارد. همچنین ضریب همبستگی بین مجاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف همبستگی ۰/۴۹۳ است یعنی با افزایش مجاله‌شوندگی تونل فشردگی سقف و جداره تونل افزایش می‌یابد.

همبستگی پیرسون بین متغیر مستقل و وابسته برابر ۰/۴۹۳ است. ضریب تعیین ۰/۲۴۳ به دست آمده و این مقدار نشان می‌دهد که ۲۴ درصد از فشردگی جداره و سقف تونل را می‌توان بوسیله مؤلفه مجاله‌شوندگی تونل تبیین نمود. همچنین آماره دوربین-واتسون نیز که در رگرسیون برای آزمون استقلال خطاها به کار می‌رود در اینجا تقریباً برابر ۱/۷۵ می‌باشد. (اگر این آماره بین ۱/۵ تا ۲/۵) باشد جای هیچ نگرانی برای استفاده از رگرسیون وجود ندارد که در اینجا چنین است).

با توجه به اینکه سطح معنی‌داری کوچکتر از مقدار خطای ۰/۰۵ می‌باشد بنابراین جدول ۱۳ از معنی‌دار بودن رگرسیون در سطح ۰/۹۵ می‌باشد. یعنی تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته معنی‌دار است و فرض  $H_0$  رد شده و فرض  $H_0$  قبول می‌شود. یعنی مجاله‌شوندگی تونل بر فشردگی جداره و سقف تأثیر معنی‌داری دارد. در جدول ۱۲ نتیجه آزمون T ارتباط مؤلفه مجاله‌شوندگی تونل با فشردگی جداره و سقف و نیز جدول ۱۳ ضرایب تأثیر متغیرهای وابسته بر متغیر مستقل (پدیده مجاله‌شوندگی) ارائه گردیده است.

پدیده مجاله‌شوندگی، پدیده‌ای پیچیده‌ای است که به عوامل زیادی وابسته است که می‌تواند هم در عین پیشروی و هم پس از اتمام پروژه خسارات جبران‌ناپذیری به تونل‌ها وارد کند. از میان روش‌های موجود، روش‌های نیمه تجربی و تحلیلی نتایج دقیق‌تری نسبت به روش تجربی همچون سینگ و گوئل تنها فاکتورهای کیفیت سنگ و ارتفاع روباره را در نظر می‌گیرند، ارائه می‌دهند و تطابق بیشتری با یکدیگر دارند. روش‌های تجربی تنها قادر به تشخیص پتانسیل مجاله‌شوندگی می‌باشند در حالی که شدت آن را نمی‌توانند تشخیص دهند.

با تحلیل این دو مقطع می‌توان نتیجه گرفت که بعد از ۳۰ روز میزان همگرایی رخ داده در تونل از مجموع همگرایی‌های الاستیک ناشی از پیشروی جبهه کار و همگرایی‌های خزشی ناشی از گذشت زمان حاصل می‌شود، بیشتر از مجاز نمی‌باشد و کرنش‌های خزشی رو به کاهش است و با گذشت زمان منجر به شکست تونل نمی‌شود و نیازی نیست که در این مقاطع سیستم نگهداری با مقاومت بیشتری نصب شود.

بین مجاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف، همبستگی معنی‌داری وجود دارد، چرا که سطح معنی‌داری ۰/۰۰۰ بدست آمده و کمتر از آلفای تحقیق یا مقدار خطا ( $\alpha=0.05$ ) می‌باشد، پس نتیجه کلی این است که در سطح ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری (همبستگی معنی‌داری) بین مجاله‌شوندگی تونل و فشردگی جداره و سقف وجود دارد. پس فرضیه  $H_0$  رد و بنابراین فرضیه

## قدردانی

دانشگاه ملایر که سبب فراهم کردن شرایط لازم در این تحقیق شدند، سپاسگزارم.

در اینجا لازم می‌دانم از کلیه کسانی که در انجام این پروژه مرا یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌کنم و همچنین از

## منابع

- Singh, B., Jethwa, J.L. and Dube, A.K., (1992), "Correlation between observed support pressure and rock mass quality", Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 7, pp. 59-74.
- Hoek, E. (2000), "Big tunnels in bad rock", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Terzaghi Lecture, Seattle.
- Jethwa, J.L. and Singh, B., (1984), "Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach", in Brown, E.T. and Hudson, J.A. (Eds), Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge, pp. 231-8.
- Goel, R.K., (1994); Correlations for Predicting Support Pressures and Closures in tunnels. Ph.D. Thesis, Nagpur University, India
- مهندسين مشاور مهتاب قدس، گزارش مطالعات مکانیک سنگ تونل WKTC، خرداد ۱۳۹۳
- مهندسين مشاور ساحل، گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل WKTC، مرداد ۱۳۹۴
- قادری میبدی، رضا، خانلری، غلامرضا، (۱۳۹۱)، "ارزیابی پتانسیل لهیدگی در مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران با استفاده از روش کرنش بحرانی"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۶ (۲)، ص ۱۵۵۸-۱۵۴۵
- حسینی، سعید، شهریار، کورش، منجزی، مسعود، (۱۳۹۰)، "پیش‌بینی جابجایی‌های زمین اطراف تونل در اثر حفاری با ماشین‌های EPB (مطالعه موردی: خط ۳ متروی تهران)"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، سال ۵ (۲)، ص ۱۲۳۵-۱۲۵۰
- Barla G., (2002), "Tunneling under squeezing rock conditions" Department of Structural and Geotechnical Engineering, Polytechnic di Torino, pp.98.
- Itasca Inc. (1998), ñ *FLAC2D - Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Ver. 5.0.0, 4.User's manual
- Hoek, E., Marinos, P., (2000), Prediction tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunneling International, pp. 45-51: part one; pp. 33-36: part two.
- Ercelebi S. G., Copur H., Ocak I., (2011), "Surface settlement predictions for Istanbul metro tunnels excavated by EPB-TBM", Environ Earth Sci, 62(2), pp 357-365.
- Leca E., New B., (2007), "Settlements induced by tunneling in soft ground", Tunneling and Underground Space Technology, 22 (2), pp 119-149.
- Ghiasi, V, Ghiasi, S Prasad, A., (2012), Evaluation of tunnels under squeezing rock condition, Journal of Engineering Design and Technology, Emerald, 10,2, pp 168-179

# Numerical and Statistical Evaluation of Squeezing Potential of West Kermanshah Tunnel Convey

Vahed Ghiai<sup>1</sup>, Ali Godarihemat<sup>2</sup>,

1- Assistant Professor, Faculty of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir.

2- Master of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran. Email: aligodarihemat95@gmail.com

\*v.ghiasi@malayeru.ac.ir

ORCID ID [orcid.org/0000-0002-4192-8097](https://orcid.org/0000-0002-4192-8097)

## Abstract

In this paper, based on the results of experimental and analytical methods, crushed zone and gurdy rocks masses were identified as the squeezing sections. Then crushed zone and gurdy sections creep parameters at the Bruger model were obtained in the laboratory. Then crushed zone and gurdy sections modelling using the software Flac2D with burgers model for 30 days (long-term) were performed. Our numerical modelling results show the large displacements due to very low quality of the rock mass and high overburden in this sections of the tunnel. The results of the numerical modelling in the short-term, that TBM shield would be stuck in this section of tunnel. Also modeling this section in the long-term showed that stability and not seen failure of the segmental support system. But effect squeezing in two sections is not critical. Among the important phenomena that makes problem for tunneling, support and tunnel usage is squeezing which is a type of problems that takes place in weak rocks. Squeezing of the rock is time dependent large convergence, which occurs around the tunnel, and is essentially associated with creep caused by exceeding limiting shear strength. Squeezing is one of the important phenomena in the tunneling industry so drilling in the squeezing cases can be causing serious problems. Predicting the amount of displacement, radial strain, shear strain and plastic zone increment as functions of the squeezing degree resonator factors is one of the basic needs in drilling and tunnel maintenance. Squeezing is behavior that related with weak rock mass deformation and strength properties. This phenomenon is associated with large deformations and time dependent convergence during tunnel excavation. It takes place when a particular combination of induced stresses and material properties pushes some zones around the tunnel beyond the limiting shear stress at which creep starts. Deformation may terminate during construction or continue over a long period of time. West Kermanshah tunnel conveyance (WKTC), with about 8550 meters long and 6.884 m in diameter in the west of Iran is located in Kermanshah province. Mainly parts of the tunnel pass through weak rock make is including types of argillaceous, sandstone and shale, with high 570 meters overburden and will be probably under squeezing condition. Duets in this project the effect of experimental methods, analytical and semi-analytical are evaluated. Then critical section of the squeezing potential presented and finally numerical modelling of this phenomenon is done.

## Keywords:

Phenomena squeezing, TBM, creep, WKTC water conveyance tunnel, FLAC2D

