

## مروری بر توزیع تنش در تونل‌های دایره‌ای

### مقاله پژوهشی

واحد قیاسی\*، استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

شهاب والی راستی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

صفحه ۱۳۴-۱۱۳

### چکیده

در این مقاله مروری بر عملکرد توزیع تنش در تونل‌های دایره‌ای شکل ارائه گردیده است. با توجه به اینکه در خصوص نحوه توزیع تنش در اطراف تونل نظریه‌ها و روش‌های متعدد و متنوعی وجود دارد که بعضاً چالش برانگیز می‌باشند. این مسئله باعث گردید که مقایسه‌ای دقیق‌تر این خصوص صورت پذیرد. روش انجام پژوهش در این مقاله مبتنی بر بررسی و مقایسه روش‌های متعارف در مقالات پژوهشگران در این زمینه می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش در جداول مقایسه‌ای روش‌های مختلف نشان داده شده است. در حالت کلی، در توده‌های سنگی و خاکی موجود در اعماق زمین، تنش‌هایی موسوم به تنش‌های برجا اثر می‌کنند. عامل اصلی تنش‌های برجا، وزن طبقات بالا و فعالیت‌های تکنیکی منطقه است. واضح است که این امر یعنی اغتشاش در وضعیت تنش‌های برجا، فقط تا فاصله معینی از محور تونل ادامه دارد که این فاصله را شعاع تاثیر می‌گویند و در ماورای آن، وضعیت تنش‌ها همچنان دست نخورده باقی می‌ماند. بر همین اساس کنترل و بررسی تنش‌های القایی بسیار مهم خواهد بود. برای این منظور در این تحقیق پارامترهای شامل شکل و ابعاد تونل، شیوه و سرعت حفر تونل و همچنین مرحله بندی حفر اجزای مختلف مقطع (در مواردی که مقطع تونل در چند مرحله حفر می‌شود) نیز در آرایش تنش‌های القایی موثراند و سیستم حفاری باید به گونه‌ای طراحی شود که کمترین ناپایداری را در پی داشته باشد. در این پژوهش سعی شده است با بررسی روند توزیع تنش در اثر حفر تونل و نحوه عملکرد آن تحقیقات صورت گرفته در این زمینه را به طور مختصر شرح داده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شود. بصورت دقیق روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های برجا شامل شکاف هیدرولیکی و جک تخت و مغزه‌گیری دوباره، بصورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: تنش برجا، سازه تونلی، تنش‌های القایی، تونل‌های دایره‌ای

### ۱-مقدمه

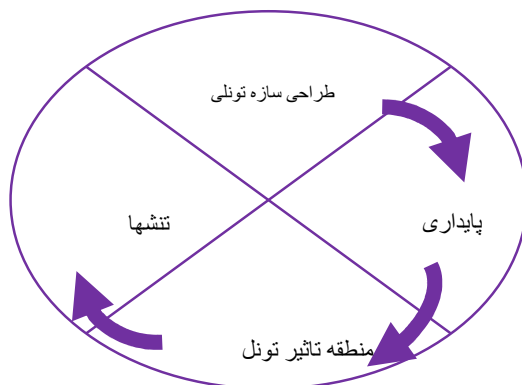
(خطرات برای افرادی که در مجاورت جاده هستند) و ایمنی در برابر خطرات داخلی (خطرات کاربران جاده) توجهات را به سمت استفاده از تونل‌ها و معابر زیر زمینی سوق می‌دهد. در بسیاری از جاده‌های کوهستانی و برون شهری از قبیل جاده هراز در شمال ایران به منظور کوتاه کردن زمان سفر و ایمن سازی جاده‌ها، تونل‌هایی ساخته شده و یا در حال ساخت می‌باشند (Kuesel، 2012). از طرفی با توجه به اهمیت تنش‌ها در طراحی و ارزیابی تونل‌ها و سازه‌های زیر زمینی در این

تونل یکی از مهمترین سازه‌های زیرزمینی است که کاربرد گسترده‌ای در حمل و نقل، مسیر انتقال آب و سایر کاربردها دارد. تونل‌ها گذرگاه‌های زیر زمینی برای وسایل نقلیه، قطارها و انتقال آب هستند که برای ذخیره‌سازی نیز بکار می‌روند. این سازه‌ها ممکن است در یک یا دو انتهای خود باز باشند، گذشت زمان ایده‌ی تبدیل جاده‌ها و بزرگراه‌ها به معابر زیر زمینی را کارآمدتر جلوه می‌دهد. رفع معضلاتی همچون کنترل سر و صدا، آلودگی هوا و ایمنی در برابر خطرات خارجی

بر تونل‌های دوقولو تحت بار هارمونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. بمنظور بررسی دقیق تحقیقات اخیر در حوزه عددی و تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه کاملی در فراهم خواهد شد. همانطور که در بخش ۱ بیان شد پارامترهای پایداری، حوزه تاثیر تونل و تنشها از در سازه‌های تونلی از اهمیت بالایی برخوردار هستند (شکل ۱ را ببینید). برای همین منظور این پارامترها بصورت مختصر مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

تحقیق ابتدا پارامترهای پایداری، حوزه تاثیر تونل، و تنشها مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس انواع تنشهای برجا معرفی و روش‌های اندازه گیری آنها بررسی می‌گردد. باتوجه به اهمیت تنش‌های در تونل‌های دایره‌ای در ادامه این مبحث مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر حفاری تونل های نعل اسبی بر نشست ماکزیمم سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در نهایت اثر روانگرایی خاک ها

## ۲- بررسی پارامترهای مهم در تونل



شکل ۱. پارامترهای موثر در طراحی تونل‌ها

مشخص کردن دقیق منطقه تاثیر در اطراف حفاریات، کوشش‌های زیادی انجام گرفته است. براساس یکی از این تعاریف، محدوده تاثیر حفاریات تا فاصله‌ای است که شرایط زیر برقرار باشد (Bell، 1994):

پایداری حفاری‌های زیرزمینی به شکل تونل، اندازه‌ی دهانه، تنشهای برجا، شرایط خاک و... بستگی دارد. آگاهی از منطقه تاثیر تونل، دومین پارامتر مهم در طراحی است. همانطور که می‌دانیم، منطقه تاثیر تونل‌ها به شکل تونل و محورهای اصلی تنش منطقه بستگی دارد (Bell، 1994). بنابراین، برای

$$|\sigma_z = p_{max}| > 0.05 p_{max} \quad (1)$$

$$|\sigma_z = p_{min}| > 0.05 p_{min} \quad (2)$$

با تمرکز بر رفتار خزشی سنگ انجام شده است که خود تحت تنشهای ثابت تعریف می‌شود که تغییرشکل وابسته به زمان با افزایش کرنش نشان داده می‌شود. بررسی این مورد به این دلیل اهمیت دارد که اگر مصالح دارای خاصیت اتساعی نباشد حجم طی تغییرشکل، ثابت خواهد ماند. البته تمرکز تنش نیز مورد توجه قرار خواهد

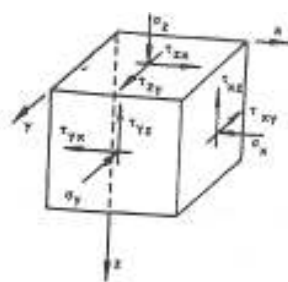
که در آن  $p_{min}$  و  $p_{max}$  تنشهای اصلی بر جای ماکزیمم و مینیمم محل‌اند که بسته به مقدار  $K$  ممکن است هر کدام  $P$  یا  $KP$  باشند. سومین پارامتر موثر و مهم در طراحی سازه‌های تونلی، تنش‌ها می‌باشند. بر همین اساس در سالهای اخیر بررسی رفتار رئولوژیکی سنگ مورد توجه گروه‌های تحقیقاتی داخل و خارج قرار گرفته و مطالعات

وضعیت و تاریخ زمین شناختی، فرسایش، ایزوستازی، سردشدن توده‌های مذاب و تبلور دوباره نیز در آن موثر خواهد بود. در بین این عوامل، عمق سنگ نسبت به سطح زمین، وضعیت توپوگرافی زمین، و وضعیت ساختاری، نقش اصلی را به عهده دارند. وجود ناپیوستگی‌ها در توده‌های سنگی نیز از جمله عوامل دیگری است که در آرایش تنشهای برجا نقش دارد و چه بسا که به علت متفاوت بودن شرایط ساختاری دو توده سنگی که در عمق یکسانی قرار دارند، وضعیت تنشهای برجا به کلی متفاوت باشد.

گرفت (Zareifard و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zou و همکاران، ۲۰۱۸). در بین پارامترهای بالا، تنشهای برجا از اهمیت بالایی برخوردار هستند که در ادامه بصورت مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱- بررسی تنش‌های برجا

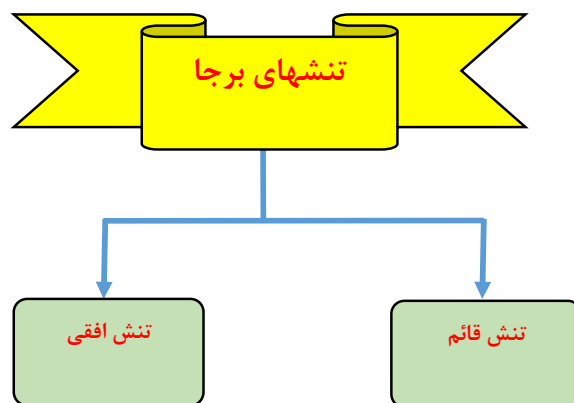
همانطور که در بخش ۲ بیان گردید، تنشها از اهمیت بالایی برخوردار هستند که پارامترهایی از جمله توده‌های سنگی،



شکل ۲. توجیه تنشهای برجا (هوک و براون، ۱۳۷۶)

نیز مشخص ساخت (شکل ۲) (مدنی، ۱۳۹۳). در ادامه همانطور که در نمودار زیر نشان داده شده است تنشهای برجا شامل دو نوع می‌باشد.

برای توجیه وضعیت تنشهای برجا، می‌توان مولفه‌های آنرا نسبت به یک دستگاه محورهاى مختصات سه بعدی مشخص کرد. با معلوم بودن این مولفه‌ها، می‌توان تنشهای اصلی برجا را

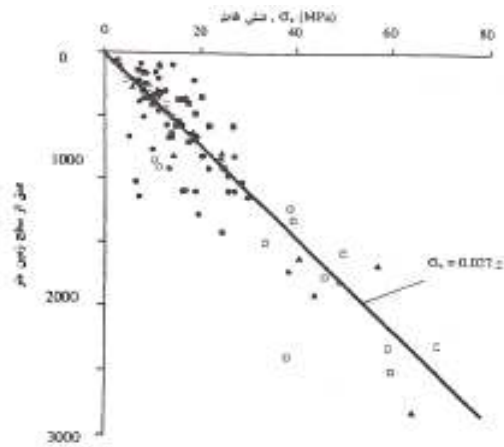


از آنجا که عامل اصلی تنشهای قائم، وزن سنگهای رویی (روباره) است لذا مقادیر این تنشها را می‌توان از رابطه ۳ پیش بینی کرد.

در ادامه بترتیب تنش قائم و افقی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

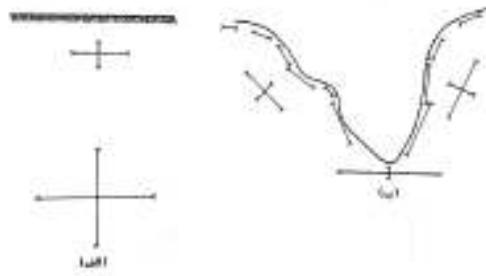
روباره آنرا  $t/m^3$  ۲/۷ فرض کنیم، اندازه تنشهای قائم معادل  $\sigma_z = \gamma z$  (۳)

که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ و  $Z$  عمق آن نسبت به سطح زمین است. به عنوان مثال اگر یک توده سنگی در عمق ۱۰۰۰ متری زمین واقع باشد و وزن مخصوص متوسط سنگهای



شکل ۳. تغییرات تنش قائم برجا نسبت به عمق (هوک و براون، ۱۳۷۶)

بمنظور ارزیابی دقیق تنشها نقش توپوگرافی در تنشهای برجا در شکل ۴ نشان داده شده است. گروه تحقیقاتی دکتر مدنی نیز نتایج مشابهی را بدست آورده اند (مدنی، ۱۳۹۳).



شکل ۴. نقش توپوگرافی در تنشهای برجا (Goodman، ۱۹۸۹)

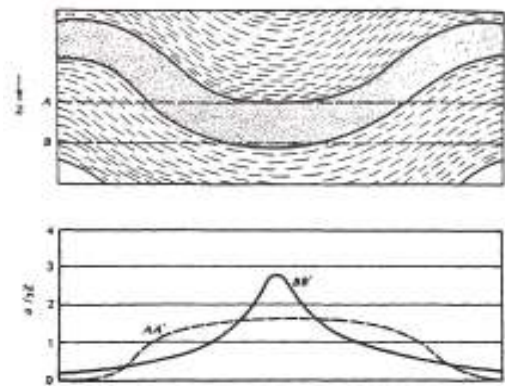
در مقابل در زمین های قائم (شکل ۴) چون سطح زمین (سطح اصلی) شیب دار است لذا یکی از تنشهای اصلی عمود بر سطح دره و معادل صفر است و دو تنش اصلی دیگر به حالت مورب قرار دارند (شکل ۴). نکته ای که مدنظر خواهد قرار گرفت با در نظر گرفتن رابطه ۳ در شرایطی که عمق سنگها کم و پدیده ساختاری مهمی نیز وجود داشته باشد، با وجود ثابت بودن عمق، ممکن است اندازه تنش

$$\frac{\sigma}{\gamma z}$$

قائم در نقاط مختلف یک سطح افقی تغییر کند. منحنی تغییرات نسبت در امتداد دو سطح افقی AA' و BB' در شکل ۵ نشان داده شده است. وجود یک ناودیس در ساختار، سبب خواهد شد نسبت اخیر ثابت نباشد. از طرفی، در امتداد سطح افقی AA' اندازه تنش

**YZ**

قائم از حدود ۶۰ درصد بیش از در حوالی محور ناودیس تا حوالی صفر تغییر می کند. اگر تونلی در امتداد BB' حفر شود، در محدوده شیل، با سنگهای کم تنش مواجه خواهد بود حال آنکه وقتی تونل به محدوده ماسه سنگ برسد، با سنگهایی که تحت تنشهای بالایی قرار دارند، روبرو خواهد شد.



شکل ۵. نقش ساختارهای زمین شناختی در تنش قائم (Goodman, ۱۹۸۹)

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad (۴)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

در این روابط  $\nu$  ضریب انقباض،  $E$  ضریب الاستیسیته و  $\epsilon$  ضریب پواسون است.

در نهایت رابطه بین تنشهای افقی و قائم برابر با:

$$\sigma_h = k\sigma_v$$

در ادامه تنش افقی مورد بررسی قرار می گیرد. تعیین تنشهای افقی برجا به سادگی تنشهای قائم نیست. رابطه بین تنشهای قائم و افقی مبتنی بر قوانین قوانین الاستیسیته پیش از این در سال ۱۹۵۲ میلادی، توسط ترزاقی و ریچارت مورد بررسی قرار گرفت. در واقع تنشهای جانبی از روابط زیر به دست می آیند (Morrison, 1976):

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

(۵)

$\sigma_v$

$\sigma_h$

در این رابطه تنش متوسط افقی، تنش متوسط قائم و  $K$  نسبت تنش افقی متوسط به تنش قائم متوسط است.

قانون هیم شناخته شده است. مطابق این قانون، طی دوره های زمین شناختی، وضعیت تنشهای موثر بر سنگ به گونه ای است که در اعماق، تنشهای افقی و قائم به حال تعادل می رسند و با هم برابر می شوند (هوک و براون، ۱۳۷۶).

بر همین اساس نسبت تنش افقی به تنش قائم توسط هوک و براون مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶ را ببینید). همانطور که مشاهده می شود، در اعماق کمتر از ۵۰۰ متر، تنشهای افقی بیش از تنشهای قائم است. در اعماق حدود ۱۰۰۰ متر، ضریب  $K$  به سمت واحد میل می کند. این نتیجه تحت عنوان



شکل ۶. تغییرات ضریب  $k$  نسبت به عمق در نقاط مختلف (هوک و براون، ۱۳۷۶)

$$k = 0/25 + 7E_{fr}(0/001 + \frac{1}{Z}) \quad (7)$$

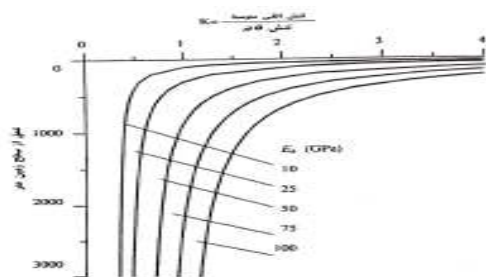
که در آن:  $K$  نسبت تنشهای افقی به قائم در هر نقطه،  $Z$  عمق نسبت به سطح زمین بر حسب متر و  $E_{fr}$ ، مدول تغییر شکل متوسط بخش بالایی پوسته زمین که در جهت افقی اندازه گیری می‌شود. باید توجه داشت که در این رابطه، جهت اندازه گیری  $E_{fr}$ ، به ویژه در مورد سنگهای رسوبی لایه‌ای مهم است زیرا امکان دارد که مقدار  $E$  در جهات مختلف متفاوت باشد.

در شکل ۷، منحنی تغییرات  $K$  نسبت به عمق، به ازای مقادیر مختلف  $E_{fr}$  نشان داده شده است.

قانون هیم در سنگهای ضعیف نظیر زغال سنگ و بعضی سنگهای تخییری نتایج خوبی به دست داده است و به نظر می‌رسد که در مورد سایر سنگها نیز در اعماق بیش از ۱۰۰۰ متر، معتبر باشد. شکل ۶، نشانگر آن است که ضریب  $K$  در محدوده‌ای قرار دارد که از رابطه زیر پیروی می‌کند (هوک و براون، ۱۳۷۶).

$$\frac{100}{Z} + 0/3 < k < \frac{1500}{Z} + 0/5 \quad (7)$$

همچنین شوری مدلی برای وضعیت تنشهای افقی و قائم در نقاط مختلف زمین ارائه داد که در آن انحنای پوسته و تغییرات ضرایب الاستیک، چگالی و ضرایب انبساط گرمایی در پوسته و گوشته زمین مدنظر قرار گرفته است. براساس این تئوری رابطه تعیین ضریب  $K$  در نقاط مختلف زمین بصورت زیر است (Hoek, 1995):



شکل ۷. منحنی تغییرات  $k$  نسبت به عمق به ازای مقادیر مختلف  $E_{fr}$  (هوک و براون، ۱۳۷۶)

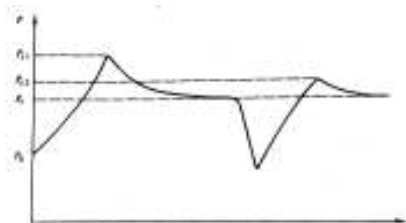
### ۳- بررسی روش‌های اندازه‌گیری تنشهای برجا

مغزه‌گیری دوباره وجود دارد که در ادامه این روشها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

برای اندازه‌گیری تنشهای برجا، بسته به امکانات موجود، روشهای متفاوتی شامل شکاف هیدرولیکی، جک تخت،

### ۳-۱- روش شکافت هیدرولیکی

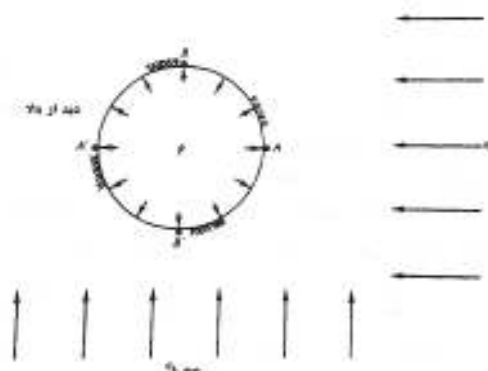
همانطور که در بخش ۲ بیان شد بررسی تنش ها با استفاده از گمانه ها امکان پذیر هست. با شکافت هیدرولیکی، می توان تنشهای برجای سنگ را در اعماق قابل توجه با استفاده از گمانه ها برآورد کرد. در این روش، آب به داخل بخشی از گمانه که با مجرابندهایی مجزا شده است، پمپاژ می شود. به موازات افزایش فشار آب، تنشهای فشاری اولیه موثر بر دیواره های گمانه کاهش می یابد و در بعضی نقاط به حالت کششی در می آید. وقتی که میزان تنش به  $T$ - می رسد، ترک خوردگی اتفاق می افتد و فشار آب در پایین گمانه در این نقطه،  $P_c$  است (شکل ۸). اگر پمپاژ آب به داخل گمانه ادامه یابد، این ترک گسترش می یابد و در نهایت فشار در قسمت پایین گمانه به میزان مقدار ثابت  $P_p$  که گاه آن را «فشار انسداد» می نامند، کاهش پیدا می کند (مدنی، ۱۳۹۳).



شکل ۸ تغییرات فشار نسبت به زمان در طول پمپاژ آب به داخل گمانه (گودمن، ۱۳۷۴)

یک مجرابنده نقش گذار، استفاده شود که در آن، مجرابنده یک آستر لاستیکی نرم را ضمن حفظ فشار داخلی بر دیواره می فشارد و نقش گسستگی را بر سطح لاستیک ثبت می کند. تنش مماسی موثر بر دیواره گمانه، در امتداد  $A$  و  $A'$  (شکل ۹) به کمترین مقدار خود می رسد که در اینجا چنین است (گودمن، ۱۳۷۴)

برای ارزیابی داده های این روش جهت یافتگی گسستگی حاصل از آب را تعیین کنیم. بیشترین مقدار اطلاعات از گسیختگی قائم حاصل می شود که از عمق حدود ۸۰۰ متر پایین تر است. جهت یافتگی یک گسستگی را می توان با عکسبرداری با تلویزیون در ته گمانه مشاهده کرد؛ اما ترکی که با کاهش فشار در گمانه برای وارد کردن دوربین بسته می شود، در عکس به سهولت قابل مشاهده نیست. بهتر آن است که از



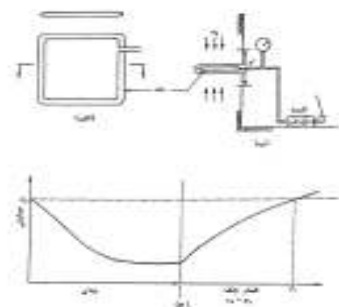
شکل ۹. موقعیت نقاط بحرانی در اطراف گمانه مورد استفاده برای آزمایش شکافت هیدرولیکی (گودمن، ۱۳۷۴)

در شکل ۹،  $\sigma_{n,max}$  و  $\sigma_{n,min}$  به ترتیب تنشهای ماکزیمم و مینیمم افقی در اطراف گمانه اند. وقتی که فشار آب در گمانه معادل  $P$  باشد، تنش کششی برابر با  $P$ - به کلیه نقاط اطراف گمانه افزوده می شود که از لحاظ جبری مساوی با فشار آب است. به عنوان نتیجه، روش شکافت هیدرولیکی را فقط می توان در داخل گمانه ها اجرا کرد.

### ۳-۲- روش جک تخت

اولیه‌ای عمود بر سطح شکاف واقع باشد، فاصله دقیق بین نقاط از  $d$  به مقادیر کوچکتری کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). پس از ایجاد شکاف جک تخت را در شکاف جاسازی و آن را با دوغاب سیمان در جای خود محکم می‌کنند و تحت فشار قرار می‌دهند. وقتی که نقاط نشانه به فاصله اولیه خود،  $d$  بازگشتند، فشار درون جک ( $P_c$ ) به تنش اولیه عمود بر سطح جک نزدیک می‌شود. از لحاظ تئوری، به خاطر تنش اولیه موازی با شیار و تفاوت‌های هندسی بین داخل جک و داخل شکاف، یک ضریب تصحیح مورد نیاز است. اما این تصحیح در بیشتر موارد، در محدوده عدم اطمینان قرار دارد، و چنانچه از شکاف‌هایی استفاده شود که با اره الماسه ایجاد شده‌اند، مقدار تصحیح مذکور در حد قابل چشم‌پوشی کم و کوچک می‌شود. بنابراین ( $P_c$ ) یعنی فشار درون جک، برآورد قابل قبولی از متوسط تنش اولیه موثر بر سطح شکاف است.

اگر جبهه کار سنگ، مٲ دیواره یک تونل قابل دسترسی باشد، می‌توان تنش برجا را با استفاده از روش ساده و مطمئن جک تخت برآورد کرد. در این روش جکهای هیدرولیکی تختی که از دو ورق فولادی جوشکاری شده از لبه و یک گریسخور برای ورود روغن به فضای میانی آنها تشکیل شده‌اند به کار می‌روند. با این جکها، می‌توان به فشاری معادل ۳۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع یا حتی بیشتر دست یافت. مرحله ابتدائی کار، برقراری یک یا چند مجموعه نقاط اندازه‌گیری (نشانه) در جبهه کار سنگ است. فاصله این نقاط معمولاً ۱۵ سانتیمتر است ولی به هر حال باید با طول کشیدگی سنجهای موجود مطابقت کند. سپس شکاف عمیقی، عمود بر سطح سنگ در بین نقاط مرجع ایجاد می‌شود (شکل ۱۰-ب). این شکاف عمیق را می‌توان با حفر چالهای مجاور هم به کمک چالزن، با به کارگیری یک شابلون برای هدایت مته و یا توسط اره الماسی ایجاد کرد. در نتیجه ایجاد این شکاف، اگر سنگ تحت فشارش



شکل ۱۰. آزمایش جک تخت (گودمن، ۱۳۷۴)

شوند و مقادیر  $\sigma_{\theta\alpha}$ ،  $\sigma_{\theta\beta}$ ،  $\sigma_{\theta\gamma}$  تنشهای مماسی سطح (تنشهای موازی با سطح تونل) در این نقاط باشند، تنشهای اولیه در صفحه عمود بر تونل را می‌توان از طریق ماتریس رابطه ۸ محاسبه کرد:

آزمون جک تخت روشی کلی، تقریبی و کم هزینه برای محاسبه یک مؤلفه تنش از تانسور تنش است. جهت مقابله با محدودیت مهم این روش، چنانچه تونل با دقت احداث شده باشد، این اختلال را می‌توان با اجرای یک بررسی مستقل تمرکز تنش، با استفاده از روشهای عددی (مثل روش اجزای محدود) محاسبه کرد. به طور کلی، چنانچه تنشهای عمود بر «صفحه» جک در سه نقطه واقع در اطراف مقطع تونل تعیین

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta A} \\ \sigma_{\theta B} \\ \sigma_{\theta C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

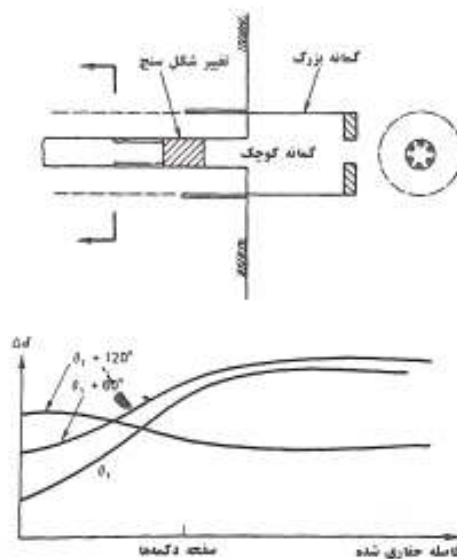
که در آن ضرایب  $a_{ij}$  از طریق بررسی‌های عددی تعیین می‌شوند (گودمن، ۱۳۷۴).



### ۳-۳- روش مغزه‌گیری دوباره

اگر سنگ در معرض فشارش اولیه قرار داشته باشد، تغییر شکل سنج، بزرگ شدگی را در دو جهت یا تمام جهات کنترل شده ثبت خواهد کرد. (مدنی، ۱۳۹۳). با در نظر گرفتن نسبت یک سوم تنش عمودی مینیمم به تنش عمودی ماکزیمم در سطح عمود بر گمانه، کلیه شعاعها گسترش و انبساط می‌یابند. در نتیجه این آزمایش، تغییر در قطر گمانه در امتداد سه قطر با فاصله ۶۰ درجه از یکدیگر مشخص می‌شود. (گودمن، ۱۳۷۴) در ادامه وضعیت تنش‌ها در تونل‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در این روش، ابتدا گمانه‌ای با قطر کم حفر و در انتهای آن ابزاری نصب می‌شود که نسبت به تغییرات قطر واکنش نشان می‌دهد. تغییر شکل سنج شش بازویی سازمان معادن ایالات متحد آمریکا نمونه‌ای از این قبیل وسایل به شمار می‌رود (شکل ۱۱). بعد از آنکه ابزار در کف گمانه جاسازی شد، سیم‌های خروجی از میان یک مته توخالی و محورگردان ته مته عبور داده می‌شوند و گمانه بزرگتری هم محور با گمانه اول حفر می‌شود (شکل ۱۱). این عمل مغزه‌ای از سنگ با دیواره ضخیم به وجود می‌آورد که از توده سنگ جدا می‌شود و بنابراین مستقل از تنش در واکنش به مغزه‌گیری دوباره است.



شکل ۱۱. روش مغزه‌گیری دوباره با استفاده از سنجنده سازمان معادن آمریکا (گودمن، ۱۳۷۴)

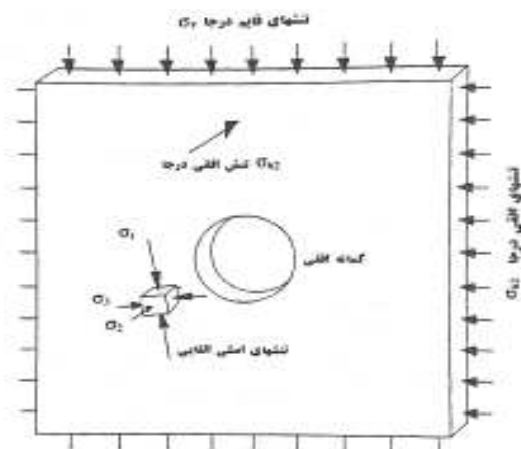
فرض می‌کنیم که در داخل یک توده سنگ متجانس و

$$\sigma_v \quad \sigma_h$$

همسانگرد که تحت تأثیر تنشهای افقی و قائم قرار دارد، یک گمانه افقی حفر شود. برای بررسی وضعیت تنشها، ورقه قائمی از این توده سنگی را به حالت عمود بر محور گمانه مطابق شکل ۱۲ در نظر می‌گیریم. (هوک و براون، ۱۳۷۶)

### ۴- وضعیت تنش‌ها پس از حفر تونل

وقتی که در داخل توده سنگی که تحت تأثیر تنشهای برجا قرار دارد، تونل یا هر حفره زیرزمینی دیگر احداث شود، وضعیت تنش موثر بر سنگها در مجاورت این تونل به هر می‌خورد و توزیع جدیدی می‌یابد. خارج قسمت تنش جدید در هر نقطه بر تنشی که قبل از احداث تونل در آن نقطه وجود داشت، به نام تمرکز تنش خوانده می‌شود. برای تشریح مسئله



شکل ۱۲. وضعیت تنشهای اصلی یک گمانه افقی (هوک و براون، ۱۳۷۶)

( ) سه برابر تنشهای قائم برجا ( ) باشد. در شکل ۱۳،

$\sigma_1$  خطوط بزرگتر در هر منطقه نشانگر تنش ماکزیمم و

$\sigma_3$  خطوط کوتاه نشانگر تنش مینیمم است. در این مثال

$\sigma_{h2}$   $\sigma_2$  خاص، تنش متوسط با تنش برجای موازی است اما

$\sigma_v$   $\sigma_{h2}$  تنشهای اصلی نسبت به و ، حالت مورب دارند.

همانطور که نشان داده شده است پس از حفر بخشی از

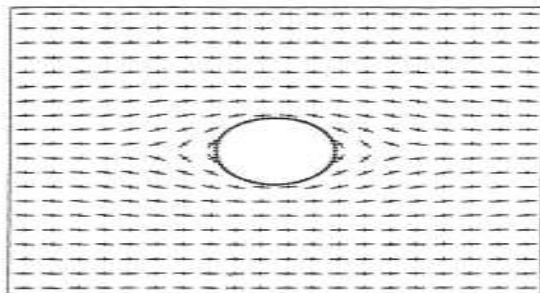
$$\sigma_{h2} \quad \sigma_{h1} \quad \sigma_v$$

سنگ، تنشهای برجای ، و از حالت یکنواخت خارج شده و تنشهای جدیدی در اطراف حفره به وجود می‌آید. هرگاه جزء کوچکی از ورقه را مطابق شکل ۱۲ در نظر

$$\sigma_3 \quad \sigma_2 \quad \sigma_1$$

گیریم، تنشهای اصلی موثر بر آن ، و خواهد بود.

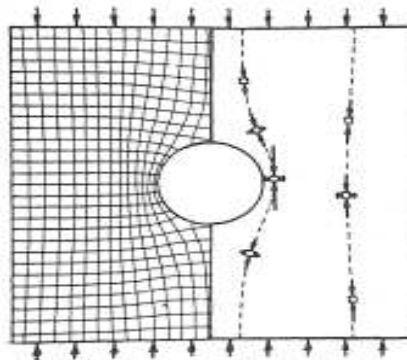
سه تنش اصلی موثر بر جزء مورد بررسی بر هم عموداند اما وضعیت آنها نسبت به تنشهای برجا ممکن است موازی با متمایل باشد. این امر در شکل ۱۳ تشریح شده و طی آن جهت تنشهای اصلی موثر بر سنگها در اطراف گمانه مورد نظر نشان داده شده است. در اینجا فرض شده که تنشهای افقی برجا



شکل ۱۳. جهت تنشهای اصلی در توده سنگ در اطراف یک گمانه افقی. (هوک و براون، ۱۳۷۶)

داده شده است. به طوری که دیده می‌شود، در فاصله کافی از محور تونل، مسیر تنشهای اصلی به حالت اولیه دست نخورده باقی‌مانده، حال آنکه در نزدیکی تونل، مسیر منحرف شده است.

در شکل ۱۴ مسیر تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در یک توده سنگی متجانس و همسانگرد که تحت تنش الاستیک تک محوری قرار دارد، نشان داده شده است. در سمت راست این شکل، دو امتداد مسیر تنشهای اصلی به صورت خطچین نشان

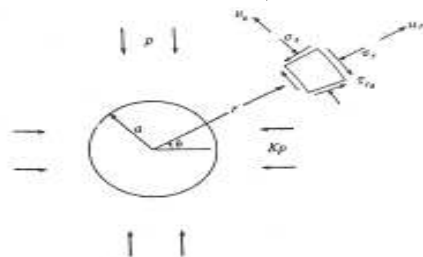


شکل ۱۴. وضعیت مسیر تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره ای در توده سنگی متجانس و همسانگرد که تحت تاثیر تنش یک محوره قرار دارد. (هوک و براون، ۱۳۷۶)

#### ۴-۱- وضعیت تنش در توده سنگ متجانس در تونل‌های دایره‌ای

بررسی تنش سنگ متجانس در تونل‌های دایره‌ای با مفروضات در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۱-۱۵، در نظر گرفته می‌شود که در داخل توده سنگی متجانس، همسانگرد و الاستیک، که تحت تاثیر تنشهای قائم شعاع  $a$  حفر شود.

بررسی تنش سنگ متجانس در تونل‌های دایره‌ای با مفروضات در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۱-۱۵، در نظر گرفته می‌شود که در داخل توده سنگی متجانس، همسانگرد و الاستیک، که تحت تاثیر تنشهای قائم

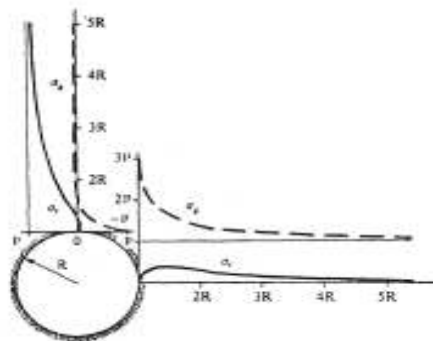


شکل ۱۵. تنش در اطراف تونلهای دایره‌ای (Bell, 1394)

#### ۴-۱- تنش تک محوره

تنش تک محوره در توده سنگهای تحت تاثیر بار قائم واقع می‌باشد. در این حالت  $K = 0$  و منحنی تغییرات تنش مطابق شکل ۱۶ خواهد بود (Budavari, ۱۹۸۳). در این شکل تغییرات مولفه‌های  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  در امتداد خطوط قائم و افقی نسبت به محور تونل نشان داده شده است. به طوری که دیده می‌شود، در این حالت مولفه شعاعی تنش ( $\sigma_r$ ) در محیط

تونل در امتداد هر دو خط قائم و افقی صفر است و این وضعیت در مورد تمام نقاط محیطی تونل مصداق دارد. در فواصل کاملاً دور از محور تونل، اندازه تنش  $\sigma_r$  در امتداد محور افقی به سمت صفر و در امتداد محور قائم به سمت  $P$  میل می‌کند.



شکل ۱۶. توزیع تنش در اطراف یک تونل دایره ای در حالت تنش یک محوره (Budavari, ۱۹۸۳)

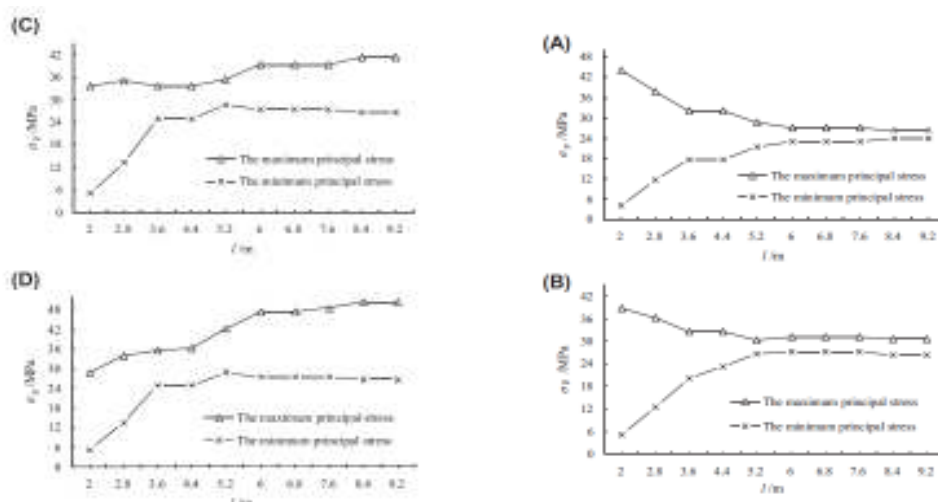
از سوی دیگر، اگرچه مولفه‌های تنش مماسی ( $\sigma_{\theta}$ ) نیز با افزایش فاصله، به سوی مقادیر اولیه خود تمایل می‌یابند اما در امتداد افقی و مجاورت تونل، اندازه آن به حدود  $3p$  یعنی سه برابر تنشهای اولیه می‌رسد و در طول این خط به تدریج کاهش می‌یابد تا به حد  $P$  یعنی اندازه اولیه تنش برسد. در امتداد قائم نیز مقدار این تنش در مجاورت تونل  $-P$  است و با افزایش فاصله از محور تونل، مقدار آن به صفر می‌رسد. به طوری که دیده می‌شود، احداث تونل سبب تغییرات مهمی در این تنش، نسبت به تنشهای اولیه شده است. (مدنی، ۱۳۹۳). با توجه به مطالب یاد شده، چنین نتیجه‌گیری می‌توان کرد که تمرکز تنش ایجاد شده در محدوده تونل، با افزایش فاصله از محور آن، به سرعت کاهش می‌یابد و حداکثر تنشهای مثبت و منفی ایجاد شده به ترتیب  $3p$  و  $-P$  است که در دیوار تونل اعمال می‌شود. بنابراین اندازه تنش مماسی در دیواره تونل از نقطه نظر پایداری آن بسیار اهمیت دارد. (مدنی، ۱۳۹۳)

حداکثر و حداقل تنش در تونلها دارای اهمیت می باشد. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌کنید حفظ تنش عمودی در سنگ مجاور در تغییرات طولی و خطی در ۲۵ مگاپاسکال و به عنوان تنش افقی در سنگ مجاور به میزان ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. تنش اصلی  $\sigma_p$  تولید شده از سنگ مجاور همراه با تغییر فاصله‌اش از دیوار داخلی در تونل دایره‌ای تغییر می‌کند. حداکثر تنش اصلی در سنگ کم عمق به تدریج کاهش می‌یابد (فاصله تا لبه تونل کمتر از ۵ متر) و در سنگ عمیق افزایش می‌یابد. (فاصله از دیوار تونل بیش از حدود ۵ متر). در ضمن، حداقل تنش اصلی تغییر کمی دارد. (Abdellah و همکاران، ۲۰۱۸). می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تدریجی و تمرکز بیشتر تفاضل تنش اصلی از فاصله نزدیک به دیوار خودش در سنگ مجاور آن تونل حفاری شده یک سری عوامل مستقیم بالقوه برای ایجاد ترکش سنگ است. در ادامه تنظیم تنش در تونل های دایره ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تنظیم تنش دینامیکی و آسیب ناشی از سنگ در اطراف یک تونل دایره‌ای که در سنگ‌های دگرگونی حفاری شده‌اند از طریق محاسبات تحلیلی با روش تبدیل لاپلاس بدست می‌آید. در پژوهش‌های صورت گرفته نشان داده شده است که تخلیه بار گذرا در محدوده کاوش که با انفجار ایجاد شده، نوسانات تنش اضافی را ایجاد می‌کند و موجب ایجاد منطقه آسیب برشی فشرده وسیع تر نسبت به توزیع تنش استاتیک می‌شود. مقدار تنش اضافی به تنش اولیه‌ای که باید آزاد شود، مدت زمان تخلیه، ابعاد مرزی حفاری و خواص سنگ بستگی دارد. همچنین تأیید می‌کند که برای حفاری انفجار عملی با تاخیر میلی ثانیه‌ای در تونل‌های عمیق، فرضیه تکامل یک مرحله‌ای در برخی ادبیات نمی‌تواند تنوع و توزیع

وضعیت تنش در تونل‌های دایره‌ای وضعیت تنش در چهار ربع یک تونل دایره‌ای حالت متقارن دارد. به بیان دیگر محورهای تونل، محورهای تقارن تنش‌ها نیز هستند و بنابراین بررسی در یکی از ربع‌ها به ازای مقادیر  $\theta=0$  تا  $\theta=90$  کافی است تا اطلاعات کاملی از وضعیت تنشها به دست دهد. از طرفی اگر سنگهای اطراف تونل الاستیک فرض شوند، توزیع تنش مستقل از جنس آنها است. باید توجه داشت که این تعبیر فقط در موردی که سنگها همگن، همسان‌گرد و الاستیک فرض شده‌اند، اعتبار دارد و در عمل که سنگها این خواص را ندارند، قابل تعمیم نیست (Zou, J و همکاران،

مناطق مختلف تونل‌ها با استفاده از تابع موج روش انبساط بیان می‌شود و ضرایب گسترش یافته با رضایت شرایط مرزی با اثر واسط ناقص تعیین می‌شود. نتیجه این تئوری این است که اثر متقابل بین دو تونل به ویژه هنگامی که در مجاورت همدیگر قرار دارند تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش دینامیکی در اطراف تونل‌ها دارد. بارگذاری با فرکانس بالا منجر به تنش دینامیکی پایین‌تر می‌شود و اثر سطح مشترک ناقص به دلیل اثر متقابل افزایش می‌یابد. در منطقه با فرکانس بالا، اثر تعاملی بزرگ می‌شود و اثر ناقص حاصل از تعامل بین دو تونل نیز افزایش می‌یابد (Kuesel و همکاران، 2012 Kouretzis و همکاران، 2014). تعامل در کنار تنش‌ها، اثر حفاری و رونگرایی در سازه‌های تونلی در تحقیقات اخیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تنش صحیح را به دست آورد. همچنین مشخص شده که بارگیری قبل از انفجار و تخلیه تنش در محل، باعث ایجاد جهت‌های ماکزیمم و حداقل تنش‌های اصلی می‌شود تا در طول فرآیند تنظیم تنش تغییر کند (Yang و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله نتایج تنش دینامیکی تحت امواج تخلیه متمرکز، ارتعاشات شدید می‌باشد. علاوه بر این، آسیب در پیرامون یک تونل موجود نیز می‌تواند در یک دوره تخلیه بار کوتاه تحت سطح بالایی از استرس اولیه و با تونلهای نزدیک به هم قرار گیرد. بنابراین، هنگام طراحی و پشتیبانی از غارها و تونلهای زیرزمینی مجاور هم در مناطق مشخص شده با سطوح بالای تنش، باید از اختلالات تخلیه بار استفاده شود (Guan و همکاران، 2019؛ Zhou و همکاران، 2016). در ادامه تعامل بین تونل‌های دایره‌ای شکل مجاور و تأثیر آن بر توزیع تنش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نظریه الاستودینامیک، تعامل بین دو تونل دایره‌ای با سطح مشترک ناقص تحت امواج P به صورت تئوری بررسی شده است. راه‌حل‌های تحلیلی در



شکل ۱۷. حداکثر و حداقل توزیع تنش اصلی در تونل دایره‌ای (Abdellah و همکاران، 2018)

بدست آمده که شامل اثرات مختلف بر نشست زمین و نیروهای داخلی حین حفاری می‌باشد به شرح زیر است: با افزایش چسبندگی، نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. بعنوان مثال در تونل تکی با افزایش چسبندگی به میزان ۱۰۰٪، نشست ۶٫۵ درصد کاهش یافته که این نتیجه در مورد تونلهای دو قلو و سه قلو نیز صادق است. همچنین نیروی محوری افزایش

اثر حفاری تونل‌های نعل اسبی بر نشست ماکزیمم سطح

زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل

در هنگام حفر تونل پارامترها مختلفی بر مقادیر نشست سطح زمین تأثیر گذار است که از جمله می‌توان به چسبندگی، مدول الاستیسیته، قطر تونل و عمق قرار گیری تونل و فاصله تونل‌ها از یکدیگر اشاره نمود. در پژوهش صورت گرفته نتایج

تغییر شکل‌ها و نشست‌های سطحی نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است. در این مطالعه اثر روانگرایی خاک اطراف تونل بر نیروهای داخلی پوشش نونل و نت سطحی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ذیل حاصل گردیده است. در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، با اعمال بار دینامیکی در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای حدود ۲۰ افزایش یافته و با کاهش تنش موثر بین ذرات، مقاومت برای از بین رفته و خاک بصورت روان در می‌آید. با افزایش زاویه اصطکاک، میزان نیروهای داخلی افزایش یافته است و نشست سطحی نیز حدود ۲۵٪ افزایش پیدا کرده است. علت این امر کاهش نیروی افقی خاک با افزایش زاویه اصطکاک است و در نتیجه تنش افقی کم می‌شود. با افزایش قطر حفاری، مقدار نیروهای داخلی افزایش و نشست سطحی ۴۰٪ کاهش یافته است. این تغییرات بعلت افزایش قطر حفاری، توزیع تنش بر محیط تونل افزایش پیدا کرده است (Azadi and Jam Sahar, 2016). در انتهای این طرح جهت بررسی روش‌های عددی و تحلیلی و آزمایشگاهی یک مقایسه دقیقی بین تحقیقات گروه‌های علمی انجام شده است.

#### مقایسه عددی و تحلیلی و آزمایشگاهی تحقیقات اخیر

جهت دستیابی به نتیجه دقیق نسبت به طرح‌های تحقیقاتی گروه‌های اخیر بر روی پارامترهای مهم طراحی سازه‌های تونلی برخی از تحقیقات یک دهه اخیر در جدول زیر فراهم شده است.

یافته ولی تاثیر زیادی بر نیروی برشی و لنگر خمشی ندارد و با افزایش فاصله تونلها از هم، در تونل دوقلو و سه قلو نشست سطح زمین کاهش می‌یابد که مقدار کاهش نشست در تونل دو قلو ۶٪ و در تونل سه قلو ۱۲٪ بوده است ولی تاثیر زیادی بر نیروهای داخلی ندارد. با افزایش عمق قرار گیری تونل تا ۴۵ متر، در تونل‌های تکی همانند دوقلو و سه قلو نشست سطح زمین به میزان ۱۰۰٪ کاهش می‌یابد ولی نیروی محوری ۸۳٪ و لنگر خمشی ۸۵٪ بدلیل افزایش سربار افزایش می‌یابند. در تونل تکی با افزایش زاویه اصطکاک به میزان ۸۰٪ نشست ۲۹٪ افزایش و نیروی محوری ۴٪ کاهش یافته همچنین نیروی برشی ۲۸٪ و لنگر خمشی ۵۰٪ افزایش یافته‌اند که این روند در تونل‌های دوقلو و نیز به همین صورت بوده است (Azadi and Alamdar, 2016).

**اثر روانگرایی خاک‌ها بر تونل‌های دوقلو تحت بار هارمونیک**  
روانگرایی از جمله پدیده‌های مخربی است که هر ساله باعث وارد شدن خسارات‌های زیادی به سازه‌های موجود در منطقه می‌شود. از جمله سازه‌های مهندسی، تونل‌ها می‌باشند که امروزه یکی از مهمترین و ضروری‌ترین نیازهای شهرنشینی مدرن هستند. این سازه‌ها بسته به صلیب آنها نسبت به خاک اطرافشان متاثر از تغییر شکل‌های متفاوتی می‌باشند. در خاک‌های ماسه‌ای اشباع با اعمال بار دینامیکی در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای افزایش تنش موثر بین ذرات کاهش و مقاومت برشی از بین رفته و خاک بصورت روان در می‌آید. در این حالت نیروهای داخلی وارد بر پوشش تونل،

جدول ۱. بررسی روش‌های مختلف ارزیابی تنش‌ها با روشهای عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی

ردیف	نام نویسنده و سال	پارامترهای مورد مطالعه	روش انجام پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۱	Scott W. Sloan John P. Carter Konstantinos I. Andrianopoulo 2013	تئوری الاستودینامیک	تحلیل تئوری (ریاضی و عددی)	یک مجموعه جدید از حالت‌های تحلیلی در این مطالعه ارائه شده‌است تا تاثیر انتشار موج برشی P لرزه‌ای بر روی پوشش نهایی تونل را کمی ارزیابی کند. نتایج عددی نشان می‌دهند که جدایی تحت تنش نرمال کششی در فصل مشترک لایه توده سنگ، توسعه نیروهای حلقه کششی در آستر را حذف می‌کند.	در نهایت، تحلیل‌های عددی شبه استاتیکی یک واکنش لرزه‌ای تونل اطلاعات مفید زیادی ارائه نمی‌دهند چون آن‌ها قادر به شبیه‌سازی اثرات انعکاس و انکسار موج نیستند. در واقع، واضح است که تحلیل‌های عددی دینامیک دقیق‌تر، برای طراحی تونل‌ها تحت شرایط میدانی ضروری هستند.
۲	Miao-Fei-Xua Shun-Chua-Wu Yong-Tao Gao 2019	معیار موهر کولمب نرم افزار FLAC 2D	تحلیلی با استفاده از نظریه متغیر پیچیده	با ترکیب روش متغیر پیچیده با معیار موهر کولمب، یک راه‌حل تحلیلی برای ناحیه پلاستیک اطراف یک فضای آزاد تحت تنش میدان دور ناهمسانگرد به دست آمد. برای تنش‌های منفی در نزدیکی تقاطع، تنش‌های اولیه با مقادیر مطلق جایگزین شدند و خطا در توده سنگ کم‌عمق به سرعت افزایش یافت، چون عمق سنگ افزایش یافت.	این احتمال وجود دارد که تعداد زیادی از شکست‌های ناشی از حفاری از جمله انفجار سنگ در یک میدان تنش در محل بسیار ناهمسانگرد فعال شوند. فناوری‌های کاهش‌دهنده فشار، به عنوان رویکردهای موثر برای درمان شکست‌های ناشی از فشار، به کار گرفته می‌شوند و بر روی ساز و کار آن‌ها از نظر اثر توزیع تنش منطقه پلاستیک وجود دارد.
۳	Mohammad Reza Zareifard Ahmad Fahimifar 2016	معیار موهر کولمب معیار شکست هوک و براون	تحلیلی مدل‌های ریاضی (راه حل فرم بسته)	در این پژوهش، راه‌حل‌های تحلیلی ساده از جایجایی‌ها و تنش‌ها برای تحلیل الاستیک - پلاستیک یک تونل دایره‌ای در سنگ با معیار موهر - کولمب ایجاد شده، به روشی نظری سازگار معرفی شدند. در روش پیشنهادی، اثر یک منطقه آسیب‌دیده همگن و ایزوتروپیک ناشی از اثر حفاری (عمدتاً ناشی از انفجار) در اطراف تونل در نظر گرفته شده‌است.	نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از راه‌حل پیشنهادی نشان می‌دهد که یک ناحیه آسیب‌دیده از انفجار تاثیر قابل توجهی بر روی تنش‌ها و جایجایی‌های در توده سنگ دارد، زمانی که اختلال و شعاع منطقه آسیب‌دیده نسبتاً بالا باشد.

<p>طبق نتایج هر چه شعاع تونل دوم بزرگتر باشد، جابجایی بیشتر توسط تونل اول به طور فضایی تغییر می‌کند. با این حال، میدان جابجایی نهایی در اطراف دو تونل وجود دارد. از نظر کیفی بسیار شبیه هم هستند و میدان جابجایی در امتداد مرز تونل دوم پس از اتمام حفاری، بسیار شبیه به یک تونل منفرد است.</p>	<p>یک راه‌حل تحلیلی کلی برای تنش‌های سنگ و تغییر شکل‌های مربوط به کشش سنگ و حفاری متوالی برای اولین بار برای تونل‌های دوقلو به صورت موازی که در عمق بزرگی حفاری شده‌اند، به دست آمده است. برای تایید راه‌حل تحلیلی به دست آمده، یک تحلیل اجزا محدود برای یک مورد نمونه اجرا شد و یک توافق خوب بین راه‌حل‌های تحلیلی و نتایج FEM به نمایش گذاشته شد.</p>	<p>عددی (روش عناصر محدود)</p>	<p>مدل الاستوپلاستیک</p>	<p>H.N. Wang G.S. Zeng S. Utili 2017</p>	<p>۴</p>
<p>بر اساس تئوری الاستودینامیک، تعامل بین دو تونل با رابط‌های ناقص تحت امواج P به لحاظ نظری مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای تحلیلی در حوزه‌های مختلف این تونل‌ها با استفاده از روش بسط تابع موج بیان شد و ضرایب بسط داده شده با برآورده کردن شرایط مرزی با اثر رابط ناقص تعیین شدند.</p>	<p>یک روش نیمه تحلیلی برای مشخص کردن اثرات متقابل رابط‌های ناقص در اطراف دو تونل حلقوی در زیر امواج P استوانه‌ای شکل مورد استفاده قرار گرفت. مدل رابط فترتی که تونل‌ها را از توده سنگ جدا می‌کند برای تحلیل اثر فصل مشترک معرفی شده است و ضرایب تمرکز تنش دینامیک در اطراف تونل‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.</p>	<p>تحلیلی</p>	<p>تئوری الاستودینامیک بسط تابع موج</p>	<p>Xue-QianFang He-XinJin Bao-LinWang 2015</p>	<p>۵</p>
<p>نتایج به دست آمده از اجزا محدود در سنگ بکر بسیار به راه‌حل تحلیلی (راه‌حل دقیق) در مقایسه با نمونه‌های به دست آمده توسط المان محدود نزدیک‌تر هستند. همچنین لازم به ذکر است که از آنجا که المان مرزی یک روش نیمه تحلیلی است، ابعاد مساله می‌تواند اثرات مرزهای نامحدود را در نظر بگیرد و تنش‌های مماسی کششی و فشاری در مرز تونل دایروی افزایش می‌یابد چون فاصله مشترک کاهش می‌یابد.</p>	<p>در این مطالعه، با مقایسه نتایج به دست آمده از سه روش عددی جدید یعنی روش المان محدود، روش اجزا مجزا و روش المان مرزی اثرات فاصله مشترک و شیب مشترک بر توزیع تنش در اطراف تونل‌های صخره‌ای به صورت عددی مشخص شده است. این تحلیل‌ها همچنین نشان می‌دهند که برای یک محیط نیمه پیوسته، روش المان مرزی نتایج دقیق تری را در مقایسه با نتایج المان محدود و روش‌های عناصر مجزا ارائه می‌دهد.</p>	<p>عددی المان محدود اجزا محدود</p>	<p>فرمولاسیون نایبوستگی جابجایی</p>	<p>Nooraddin Nikadat Mohammad Marji Fatehi Reza Rahmannejad 2016</p>	<p>۶</p>



<p>مثال‌های مطرح شده در این مقاله نشان می‌دهند که راه‌حل تحلیلی با نتایج عددی سازگار است. اگر عمق مدفون در تونل به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌توان آن را به عنوان یک مساله دامنه بی‌نهایت در نظر گرفت و افزایش کرنش در مقایسه با تونل باز را نادیده گرفت.</p>	<p>نتایج محاسبات نشان می‌دهد که راه‌حل الاستوپلاستیک سنگ در اطراف یک تونل دایره‌ای به مقدار عرضی در تنش برجا و تنش در محل بستگی دارد و هر دو تنش‌ها در سطح مشترک بین ناحیه پلاستیک داخلی و سطح خارجی و در فصل مشترک الاستیک - پلاستیک، پیوسته هستند.</p>	<p>تحلیل عددی</p>	<p>معیار موهر کولمب نرم افزار FLAC 3D</p>	<p>Gui-sheng Xu Feng Sun Wan-Quan Sun 2010</p>	<p>۷</p>
<p>در این مقاله تصحیح و اثربخشی روش‌های پیشنهادی و تکنیک‌های محاسباتی برای تونل‌های دایره‌ای کم‌عمق با راه‌حل‌های منتشر شده اثبات شده‌است، که شامل اعتبار ثنوری و مقایسه نتایج و محدوده پلاستیک محاسبه‌شده با استفاده از FEM است. نتایج نشان می‌دهند که اثر گرانشی بر روی تنش در سنگ‌های اطراف الاستیک قابل توجه است، در حالی که تاثیر گرانش بر روی مدل الاستوپلاستیک به کم‌تر از ۱۰٪ به خاطر نیروی جسم که کوچک‌تر از بارگذاری سطحی است، محدود می‌شود.</p>	<p>بر اساس سیستم مختصات دوقطبی و معیار شکست و با در نظر گرفتن اثر گرانشی، روش‌های الاستوپلاستیک و روش‌های محاسباتی مربوطه برای توزیع تنش، شعاع پلاستیکی، فشار پشتیبان داخلی بحرانی و ناحیه پلاستیک تونل‌های دایره‌ای کم‌عمق در فضای نیمه بی‌نهایت در این مطالعه برای اولین بار توصیف شد. راه‌حل‌های جدید الاستوپلاستیک می‌تواند نشان‌دهنده اثر گرانشی تونل کم‌عمق باشد که در مطالعات قبلی گنجانده نشده است.</p>	<p>عددی (المان محدود)</p>	<p>معیار موهر کولمب</p>	<p>Jin-Feng Zou An Wei Tao Yang 2018</p>	<p>۸</p>
<p>نتایج نشان داد که خطا با توجه به داده‌های نظارتی به طور عمده با مدل مدول یانگ وابسته به فشار کاهش یافته است که لزوم توجه به توزیع غیر یکنواخت مدول یانگ را نشان می‌دهد. از آنجا که مدول یانگ به فشار محدود بستگی دارد، لازم است که تغییر میدان تنش در توده سنگ اطراف حفاری برای پیش‌بینی دقیق پاسخ زمین به ویژه در حفاری‌های عمیق مدفون مورد توجه قرار گیرد.</p>	<p>نتایج تجربی نشان داد که تاثیر فشار محدود بر مدول یانگ بسیار قابل توجه است. این مقاله سعی داشت تا تاثیر محدود کردن مدول یانگ در تحلیل‌های واکنش تونل را نشان دهد و با در نظر گرفتن اثر فشار جانبی بر روی مدول الاستیسیته، تنش و تغییر شکل توده سنگ در اطراف تونل با دو روش تحلیلی و عددی محاسبه کند. تاثیر محدود کردن مدول یانگ وابسته به فشار در سنگ اطراف به صورت کمی تخمین زده شد.</p>	<p>تحلیلی</p>	<p>روش fourth – Kutta مدول یانگ</p>	<p>Xuezhen Wua Yujing Jianga Zhenchang Guan 2019</p>	<p>۹</p>

<p>مطابق نتایج به دست آمده بیشترین تنش در تقاطع یک گسل ۶۰ درجه و در سقف تونل رخ می‌دهد. و حداکثر تنش فشاری در فصل مشترک یک گسل ۳۰ درجه و دیواره تونل دیده می‌شود و گوشه‌های یک تونل مستطیلی باعث اتساع عمودی در جهت تنش در محل می‌شود.</p>	<p>تاثیر رفتار ناپیوستگی های بزرگ (گسل‌ها) بر روی محیط درزه دار در اطراف تونل‌های مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای مطالعه توزیع تنش در اطراف تونل‌های حفر شده در توده سنگ درزه دار، یک کد عناصر مرزی غیر مستقیم به نام TFSDDM (روش ناپیوستگی تغییر مکان تنش فرضی) مورد استفاده قرار گرفته است. این کد از مزایای هر دو روش تنش و ناپیوستگی جابجایی برای تحلیل دقیق‌تر اثرات ناپیوستگی ها استفاده می‌کند.</p>	<p>عناصر مرزی</p>	<p>روش ناپیوستگی تغییر مکان تنش فرضی</p>	<p>Nooraddin Nikadat Mohammad Fatehi, Abolfazl Abdollahipour 2015</p>	<p>۱۰</p>
<p>این مقاله نتایج تحلیل پایداری پارامتریک را برای بررسی تاثیر برخی پارامترهای حیاتی بر عملکرد تونل‌های کم‌عمق ارائه می‌کند. در این مطالعه، تنها دو عامل مورد بررسی قرار گرفته، یعنی شکل تونل (دایره‌ای، نعل اسب و مربع) و حضور درزه‌های سنگی در ماتریس توده سنگ.</p>	<p>تحلیل پایداری پارامتریک برای سه شکل تونل متفاوت (به عنوان مثال دایره‌ای، مربعی و نعل اسب) با/ بدون اتصال انجام شده‌است. چهار نقطه مرجع در محیط تونل (به عنوان مثال دیواره‌های کناری و کف) به منظور پایش وضعیت تنش - جابجایی در توده سنگ اطراف آن‌ها تعیین شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد ضعیف یک دهانه تونل با یک بازشدگی مربعی رخ می‌دهد.</p>	<p>عددی المان محدود</p>	<p>معیار موهر کولمب مدل های الاستوپلاستیک نرم افزار مورد استفاده RS2</p>	<p>Wael R. Abdellah Mahrous A. Ali Hyung-Sik Yang 2018</p>	<p>۱۱</p>
<p>نتایج مقایسه نشان می‌دهد که وقتی جفت شدن هیدرولیکی - مکانیکی در نظر گرفته می‌شود، تنش افزایش و هم‌گرایی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اثرات نسبت پواسون و ضریب جفت شدگی هیدرولیکی - مکانیکی در کنترل هم‌گرایی سنگ‌های اطراف ناچیز است، در حالی که تاثیرات نیروی نفوذ، پارامترهای مقاومت به کرنش، مدول الاستیسیته و زاویه اتساع قابل توجه هستند.</p>	<p>مطالعات پارامتریک برای تاکید بر تاثیر جفت شدگی هیدرولیکی - مکانیکی بر تنش و جابجایی انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت، تسخیر تنش کم‌تر و هم‌گرایی تونل‌ها بیشتر از تنش‌های متناظر و تغییر شکل‌های به‌دست‌آمده زمانی است که این فاکتورها در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین شعاع جابجایی نیز بزرگ‌تر از آن است که کوپلینگ هیدرولیکی - مکانیکی در نظر گرفته نشود</p>	<p>عددی</p>	<p>معیار شکست هوک و براون نرم افزار مورد استفاده FLAC</p>	<p>ZOU JinFeng LI ShuaiShuai 2015</p>	<p>۱۲</p>

<p>نتایج حاصل از روش تحلیلی، استفاده از سیستم نگهداری راک بولت با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتیمتر را پیشنهاد می‌دهد. تمرکز تنشهای اصلی حداکثر و حداقل در اطراف تونل به ترتیب ۴ و صفر مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به اینکه تنش حداقل در اطراف تونل صفر است لذا خطر تسلیم مصالح وجود دارد.</p>	<p>با استفاده از دو روش تجربی طبقه بندی RMR و Q سنگ ورودی تونل واقع در سازند تارپور در رده خوب و توده سنگ مسیر و خروجی تونل واقع در سازندهای امیران و گورپی در رده متوسط قرار گرفته است. سیستم نگهداری پیشنهادی با استفاده از دوروش تجربی برای توده سنگ مسیر تونل شامل شاتکریت به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتیمتر و سیستم منظم راک بولت به فاصله داری ۲ و طول ۴ متر را پیشنهاد می‌شود.</p>	<p>تجربی عددی اجزای محدود</p>	<p>روش RMR روش Q نرم افزار مورد استفاده RocSupport</p>	<p>بهزاد سیزواری ده کبود امین فلاح محمد رضا مشرفی فر ۱۳۹۶</p>	<p>۱۳</p>
<p>در آنالیز حساسیتی که نسبت به ضخامت و سختی نسبی بتن صورت گرفت مشخص گردید که با افزایش ضخامت نسبی و سختی بتن میزان تنش مماسی فشاری در دیواره داخلی، کاهش یافته و جای خود را به تنش کششی می‌دهد. از طرفی دیگر در سختیهای نسبی بالا (بزرگتر از ۱۰) میزان فاکتور تمرکز تنش برای ضخامت نسبی کمتر از ۰.۵/۰ بالا است، بنابراین در طراحی میبایست از ضخامت‌های نسبی بیش از ۰.۵/۰ در این شرایط استفاده نمود.</p>	<p>در این مقاله راه حلی الاستیک، با استفاده از توابع پتانسیل مختلط موسخلیشویلی و کولوسف، برای محاسبه مؤلفه های تنش در اطراف تونلهای دایره ای شکل همراه با لاینینگ بتنی با ضخامت ثابت ارائه شده است. راه حل ارائه شده دارای این مزیت است که جواب بسته ای ارائه میکند که به سادگی میتوان از آن در مسائل آنالیز برگشتی و یا به عنوان مبنا برای ارائه فرمولهای تجربی استفاده کرد. مقادیر تنشهای پیش بینی شده از راه حل مذکور همبستگی خوبی را با جواب راه حل کرش، هنگامیکه ضخامت نسبی نگهداری به صفر میل کند، نشان داد.</p>	<p>عددی اجزای محدود</p>	<p>توابع پتانسیل مختلط موسخلیشویلی و کولوسف نرم افزار مورد استفاده ABAQUS</p>	<p>علیرضا کارگر رضا رحمان نژاد ۱۳۹۴</p>	<p>۱۴</p>
<p>در این پژوهش با کوچک شدن زاویه انحنای گوشه‌های تونل و تیز گوشه تر شدن آن، تمرکز تنش اطراف تونل افزایش می‌یابد، همچنین تنش تک محوری افقی باعث ایجاد کشش در دیواره تونل و تنش تک محوری قائم باعث ایجاد کشش در سقف تونل می‌شود.</p>	<p>میدان تنش مماسی در ناحیه مرز تونل براساس توابع موسخلیشویلی در سه حالت نگاشت دو جمله ای سه جمله ای و چهار جمله ای و همچنین در شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. توده سنگ به صورت محیطی با رفتار الاستیک خطی و ایزوتروپ فرض شده است. در حالت تنش تک محوری افقی تمرکز تنش روی دیواره ها منفی است. و باعث ایجاد کشش و نهایتا ترک در آن ناحیه می‌شود. که مستلزم داشتن نگهدارنده بیشتری برای تونل است.</p>	<p>تحلیلی</p>	<p>روش پتانسیل مختلط</p>	<p>مهدی زمانی ساناز مجدیان ۱۳۹۴</p>	<p>۱۵</p>

## ۵- نتیجه گیری

در نظر گرفتن این مطلب مرور یک تحقیق جامع در رابطه با تحقیقات یک دهه اخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. از طرفی لزوم بررسی روش‌های مختلف در جهت پیدا

تحقیقات گروه‌های تحقیقاتی داخل و خارج کشور نشان داد که تحلیل توزیع تنش‌ها در اثر طراحی سازه‌های تونلی به دلیل تاثیرات مخرب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هست. با

— گودمن، رای، (۱۳۷۴)، "مکانیک سنگ"، (ترجمه م. دانش)، تهران، صنعت فولاد.

— علمدار، م.ر.، آزادی، م.، (۱۳۹۵)، "مطالعه پارامتریک اثر حفاری تونل‌های نعل اسبی بر نشست ماکزیمم سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل"، نشریه جاده ۱۰۳، ص. ۱۵۲-۱۴۳.

— جام سحر، ا. و آزادی، م.، (۱۳۹۷)، "بررسی اثر روانگرایی خاک‌ها بر تونل‌های دوقلو تحت بار هارمونیک"، نشریه جاده شماره ۱۰۵، ص. ۹۴-۲۶.

-Abdellah, W. R., Ali, M. A., & Yang, H. S., (2018), "Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels", *Journal of Sustainable Mining*, 17(1), pp.20-33.

-Bell, F., (1994), "Engineering in rock Masses. Butter worth Heinemann Ltd.

-Budavari, S., (1983), "Rock mechanics in Mining Practice", The South African Institute.  
-Fang, X. Q., Jin, H. X., & Wang, B. L., (2015), "Dynamic interaction of two circular lined tunnels with imperfect interfaces under cylindrical P-waves", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, pp.172-182.

-Feldgun, V. R., Karinski, Y. S., & Yankelevsky, D. Z., (2014), "The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, pp.42-55.

-Goodman, R., (1989), "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley & Sons Inc.

-Kargar, A., Rahmangebaj, R., Abasi, H., & Ali, M., (2015), "Investigation of stress field around circular tunnels with concrete lining using complex potential functions", *Modares Mechanical Engineering*, 15(1), pp.267-276.

-Kouretzis, G. P., Andrianopoulos, K. I., Sloan, S. W., & Carter, J. P., (2014), "Analysis of ircular tunnels due to seismic P-wave propagation", with emphasis on unreinforced

کردن نقاط ضعف و قوت طراحی سازه‌های تونلی علی الخصوص تونل‌های دایره‌ای ضروری می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق تنشهای برجا و القایی به عنوان پارامترهای مهم در ارزیابی طراحی تونل‌ها و سایر سازه‌های زیرزمینی مورد بررسی دقیق قرار گرفت. جهت تحقق این فرآیند، پارامترهای شامل شکل و ابعاد تونل، شیوه و سرعت حفر تونل و همچنین مرحله بندی حفر اجزای مختلف مقطع مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. در این تحقیق با بررسی روند توزیع تنش در اثر حفر تونل و نحوه عملکرد آن تحقیقات کاملی صورت گرفت و نتایج گروه‌های تحقیقاتی مختلف با یکدیگر مقایسه شد. بصورت دقیق روش‌های اندازه گیری تنش‌های برجا شامل شکاف هیدرولیکی و جک تخت و مغزه گیری دوباره، بصورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۱) با توجه به تحقیقات صورت گرفته در پیشینه تحقیق بخش ۱-۷ فاصله تونل‌های مجاور هم به طور قابل توجهی بیشتر از تنش‌ها، جابجایی‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و زمانیکه حفاری تونل دوم شروع می‌شود، جابجایی‌های کمتری در مرز تونل اول صورت می‌گیرد.

۲) باتوجه به تحقیق صورت گرفته به روش حل عددی در جدول شماره ۱، در بیشتر مواقع شعاع تونل دوم بزرگتر است و بیشترین جابجایی که توسط اولین تونل تجربه می‌شود، فضایی متفاوت است.

۳) باتوجه به بررسی دقیق پیشینه تحقیق و همچنین جدول شماره ۱، میدان‌های جابجایی نهایی اطراف دو تونل از نظر کیفی بسیار مشابه هستند.

۴) در نهایت با بررسی مقالات اخیر نشان داده شد، میدان جابجایی‌ها در امتداد مرز تونل دوم فضایی ایجاد می‌کند که پس از تکمیل حفاری آن، بسیار شبیه به یک تونل است.

## ۶- مراجع

— مدنی، ح.، (۱۳۹۳)، "تونلسازی"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

— هوک، بی.، (۱۳۷۶)، "سازه‌های زیرزمینی در سنگ"، (ترجمه ا. فهیمی‌فر). تهران، مکانیک خاک، وزارت راه و شهرسازی. (سال انتشار به زبان اصلی ۱۹۹۵).

- Xu, M. F., Wu, S. C., Gao, Y. T., Ma, J., & Wu, Q. L., (2019), "Analytical elastic stress solution and plastic zone estimation for a pressure-relief circular tunnel using complex variable methods", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, pp.381-398.
- Yang, J. H., Jiang, Q. H., Zhang, Q. B., & Zhao, J., (2018), "Dynamic stress adjustment and rock damage during blasting excavation in a deep-buried circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, pp.591-604.
- Yi, C., Zhang, P., Johansson, D., & Nyberg, U., (2014), "Dynamic response of a circular lined tunnel with an imperfect interface subjected to cylindrical P-waves", *Computers and Geotechnics*, 55, pp.165-171.
- Zareifard, M. R., & Fahimifar, A., (2016), "Analytical solutions for the stresses and deformations of deep tunnels in an elastic-brittle-plastic rock mass considering the damaged zone", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 58, pp.186-196.
- Zou, J. F., Wei, A., & Yang, T., (2018), "Elasto-plastic solution for shallow tunnel in semi-infinite space", *Applied Mathematical Modelling*, 64, pp.669-687.
- Zou, J., & Li, S. (2015), "Theoretical solution for displacement and stress in strain-softening surrounding rock under hydraulic-mechanical coupling", *Science China Technological Sciences*, 58(8), pp.1401-1413.
- concrete liners. *Computers and Geotechnics*, 55, pp.187-194.
- Kuesel, T. R., King, E. H., & Bickel, J. O., (2012), "Tunnel engineering handbook", Springer Science & Business Media.
- Li, X., Cao, W., Tao, M., Zhou, Z., & Chen, Z., (2016), "Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, pp.10-24.
- Lu, A. Z., Xu, G. S., Sun, F., & Sun, W. Q., (2010), "Elasto-plastic analysis of a circular tunnel including the effect of the axial in situ stress", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1), pp.50-59.
- Nikadat, N., Fatehi Marji, M., Abdollahipure, A., (2015), "Numerical modelling of stress analysis around rectangular tunnels with large discontinuities (fault) by a hybridized indirect BEM. *J. Cent.*", *South Univ.* 22, pp.4291-4299.
- Nikadat, N., Marji, M. F., Rahmamejad, R., & Bafghi, A. Y., (2016), "Effect of joint spacing and joint dip on the stress distribution around tunnels using different numerical methods", *Journal of African Earth Sciences*, 123, pp.193-209.
- Wang, H. N., Zeng, G. S., Utili, S., Jiang, M. J., & Wu, L., (2017), "Analytical solutions of stresses and displacements for deeply buried twin tunnels in viscoelastic rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93, pp.13-29.
- Wu, X., Jiang, Y., Guan, Z., & Gong, B., (2019), "Influence of confining pressure-dependent Young's modulus on the convergence of underground excavation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, pp.135-144.

# A Review of Stress Distribution in Circular Tunnels

*Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Malayer University,  
Malayer, Iran.*

*Shahab Valirasti, M.Sc., Student, Department of Engineering, Malayer University,  
Malayer, Iran.*

*E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir*

Received: March 2021-Accepted: July 2021

## **ABSTRACT**

In this paper, a review of stress distribution in circular tunnels is presented. Given that there are many different theories and methods on how to distribute stress around the tunnel, some of which are challenging. This led to a more accurate comparison. The research method in this article is based on reviewing and comparing conventional methods in the articles of researchers in this field. The results of this research are shown in comparative tables of different methods. In general, in the rocky and soil masses in the depths of the ground, stresses called in situ stresses act. The main cause of in situ stresses is the weight of the upper classes and the tectonic activities of the region. Understanding the status of inductive and inductive stresses is one of the essential requirements of tunnel design and other underground structures because in many cases the inductive stresses may exceed the rock resistance level and, if not thought through, may damage the structure. This perturbation of the in situ stress condition only extends to a certain distance from the tunnel axis, which is called the radius of impact, and beyond that, the stress situation remains intact. In addition to the shape and dimensions of the tunnel, the manner and velocity of tunnel digging as well as the staging of the various sections (in cases where tunnel sections are dug in several steps) are also effective in arranging the induced stresses and the drilling system must be designed to minimize instability.

**Keywords:** Stress, Tunnel, Induction Stresses