

ارائه‌ی رابطه‌ی جدید برای مقایسه‌ی تغییر شکل اطراف تونل در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی

محمد حاجی‌عزیزی* (دانشیار)

مینا هاشمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۳۸-۳۱)
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۲، ص. ۳۸-۳۱

به دست آوردن تغییرمکان‌های اطراف تونل، یکی از موضوعات مهم در تونل‌سازی است. در نوشتار حاضر، به کمک روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود و همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده به ارائه‌ی روابطی جدید برای مقایسه‌ی تغییرشکل تونل در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی و برای توده‌سنگ‌های سالم و درزه‌دار پرداخته شده است، که نتایج متفاوت آنها قابل توجه است. با توجه به اینکه در بسیاری از تحلیل‌های عددی، مدل‌سازی دوبعدی انجام می‌شود، روابط ارائه شده در نوشتار حاضر می‌تواند منجر به نتایج واقعی شود. مطابق با نتایج حاصل از تحلیل‌های مختلف در توده‌سنگ‌های سالم، مقدار تغییرمکان اطراف تونل در حالت دوبعدی بزرگ‌تر از حالت سه بعدی است، اما در توده‌سنگ‌های درزه‌دار مقدار تغییرمکان اطراف تونل در حالت دوبعدی کمتر از حالت سه بعدی است. همچنین نتایج حاصل از پژوهش حاضر، از طریق تونل سد گاوشان تأیید شده است.

واژگان کلیدی: تونل، تغییرمکان، روش‌های عددی، تحلیل دوبعدی، تحلیل سه بعدی.

mhazizi@razi.ac.ir
minahashemi.1168@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه ایجاد فضاهای زیرزمینی در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، روز به روز در حال افزایش است.^[۱] ایجاد تونل‌های زیرزمینی تغییرات قابل ملاحظه‌ی در تنش‌های توده‌سنگ‌ها ایجاد می‌کند، به همین دلیل برای رسیدن به پایداری ضروری است تا تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در توده‌سنگ‌ها به دقت مورد بررسی قرارگیرد. در این بین، تحلیل پایداری تونل در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی از دیرباز مورد توجه بوده است. تحلیل‌های عددی به ۲ دسته‌ی دوبعدی و سه بعدی قابل تقسیم‌اند. در بعضی از موارد فرض دوبعدی برای بررسی تنش - کرنش در اطراف تونل کفایت می‌کند، اما از آنجایی که در بسیاری از موارد، تحلیل دوبعدی در پیچیدگی‌های هندسی و زمین‌شناسی کافی نیست، انجام تحلیل سه بعدی ضروری است. مطالعه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در اطراف جبهه‌ی کار تونل، برای پژوهشگران مکانیک سنگ همیشه چالش برانگیز بوده است. یکی از دلایل می‌تواند این باشد که مطالعه‌ی توزیع تنش و تغییرمکان، اطلاعات ارزشمندی را در مورد پایداری تونل به پژوهشگر می‌دهد. با توجه به عدم دست‌یابی به راه‌حل‌های تحلیلی برای مسائل پیچیده‌ی سه بعدی، تحلیل‌های عددی دوبعدی متعددی در اواسط دهه‌ی ۱۹۷۰ آغاز شده و در دهه‌ی جدید نیز همچنان ادامه یافته است.^[۲]

روشی مشابه با روش سه بعدی پیشنهاد شده است، که نتایجی نزدیک به آنالیز سه بعدی داشته و نتایج حاصل حاکی از کارآمدتر بودن روش تحلیل سه بعدی نسبت به روش دوبعدی و همچنین کاهش هزینه‌های طراحی بوده است.^[۳] همچنین در سال ۲۰۰۲، رفتار کشسان‌خمیری دوبعدی و سه بعدی یک پروژه‌ی برق آبی در یکی از مناطق هند با ۴ دهانه‌ی زیرزمینی بررسی شده است.^[۴] مطالعه‌ی بی (۲۰۰۶) نیز حول مقایسه‌ی تحلیل مدل‌های دوبعدی و سه بعدی با کمک نرم‌افزار PLAXIS انجام و به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن‌ها پرداخته شده است.^[۵] همچنین نوشتاری در سال ۲۰۰۸، با عنوان آنالیز دوبعدی و سه بعدی دهانه‌های زیرزمینی در توده‌سنگ‌های ناهمگن ارائه شده است، که مربوط به پروژه‌ی سد مسجد سلیمان در جنوب غربی کشور ایران در استان خوزستان بوده است.^[۶] در مطالعه‌ی اندرکنش خاک - سازه (۲۰۱۲)^[۷] نیز براساس آنالیز اجزاء محدود دوبعدی و سه بعدی به کمک نرم‌افزار GTS، تونل به صورت فتر و وزن خاک‌ها و سربار اطراف آن به صورت بار وارد بر فتر مذکور مدل و نتایج آنالیز براساس ممان‌های عرضی و نیروی برشی در دال بالا، دیوارها، و دال کف ارائه شده است، که نتایج حاصل عبارت بوده است از:

۱. در آنالیز اجزاء محدود سه بعدی، مقادیر نیروها و ممان‌ها کمتر از مقادیر آنالیز اجزاء محدود دوبعدی بوده است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۷/۲۲، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۲۸.

۲. سازه‌های زیرزمینی می‌توانند با دقت بالاتر و اطمینان بیشتری توسط اجزاء محدود سه‌بعدی طراحی شوند.

در واقع، رفتار تنش‌ها و تغییر مکان‌های اطراف تونل به صورت سه‌بعدی بوده است. بنابراین مطلوب آن است که روش‌های سه‌بعدی برای تحلیل رفتار تونل مورد توجه قرار گیرد، اگرچه بسیاری از تحلیل‌ها در حالت دوبعدی انجام می‌گیرد. عمده‌ترین بخش‌هایی که در یک سازه‌ی زیرزمینی برای تحلیل سه‌بعدی ضروری‌تر است، قسمت‌های ورودی، تقاطع‌ها، و جبهه‌ی کار تونل هستند. با توجه به محدودیت‌های روش‌های تحلیلی در هندسه‌های پیچیده و شرایط مرزی، روش‌های عددی و اندازه‌گیری‌های محلی، راه‌حل‌های مناسبی برای تحلیل رفتار تنش - کرنش هستند.^[۲] در مطالعات عددی، رفتار مصالح به صورت کشسان (ایزوتروپیک یا غیرایزوتروپیک)، کشسان-خمیری، و ویسکو - کشسان در نظر گرفته می‌شود. جابه‌جایی‌های کشسان در حالت کرنش صفحه‌یی، که در اطراف یک تونل دایره‌یی اتفاق می‌افتد، طبق رابطه‌ی ۱،^[۸] تعریف می‌شوند:

$$u_r = -\frac{p_v R^v (1 + \nu)}{2Er} \left\{ \frac{(1 + K) - \left[4(1 + \nu) - \frac{R^v}{r^v} \right] \cos 2\theta}{(1 - K)} \right\} \quad (1)$$

که در آن، u_r جابه‌جایی شعاعی تونل، p_v مؤلفه‌ی عمودی تنش بر جای اصلی، K نسبت تنش بر جای افقی به قائم v ، E به ترتیب نسبت پواسون و مدول کشسانی هستند. در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۳،^[۲] برای یک تونل دایره‌یی در محیط کشسان و همگن با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود ۳D FLAC،^[۹] رابطه‌ی ۲ برای تغییر مکان‌های اطراف تونل پیشنهاد شده است:

$$\frac{u_r}{u_{r\infty}} = (0,22v + 0,19) + (-0,22v + 0,81) \left\{ 1 - \left[\frac{0,39v + 0,65}{0,39v + 0,65 + \frac{x}{R}} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

که در آن، x فاصله از جبهه‌ی کار تونل و $u_{r\infty}$ جابه‌جایی شعاعی کشسان نهایی که در فاصله‌ی دوری از جبهه‌ی کار اتفاق می‌افتد و از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$u_{r\infty} = \frac{P_v R (1 + \nu)}{E} \quad (3)$$

در نوشتار حاضر، روابطی جدید برای ارتباط بین تغییر مکان‌های دوبعدی و سه‌بعدی در توده‌سنگ‌های سالم و ضعیف ارائه شده است، تا بتوان در تحلیل‌های دوبعدی، مقدار تغییر مکان‌های واقعی را پیش‌بینی کرد، که همان تغییر مکان سه‌بعدی است.

۲. مدل‌سازی و تحلیل عددی

۱.۲. مقایسه‌ی تغییر مکان در توده‌سنگ‌های بدون درزه و یا با

درزه‌های خیلی کم

مدل‌سازی به کار گرفته شده در این بخش، مطابق با این مراحل انجام شده است:

۱. ابعاد هندسی مدل: با توجه به اینکه اگر ابعاد مدل بیش از حدود ۵ برابر شعاع تونل باشد، تأثیر شرایط مرزی در نتایج به میزان کمیته‌ی ممکن می‌رسد، ابعاد هندسی مدل برای تونل مورد بررسی 44×44 متر انتخاب و بقیه‌ی سر بار به صورت بار مرده بر سطح مدل در نظر گرفته شده است.

۲. مدل رفتاری: مدل رفتاری برای سنگ همگن، کشسان خطی و برای توده‌سنگ‌های ضعیف و ناهمگن، موهر - کولمب در نظر گرفته شده است. مدل موهر - کولمب، یک مدل رفتاری کشسان خمیری کامل است، که سطح تسلیم آن در فضای تنش‌های اصلی ثابت است و تحت تأثیر کرنش قرار ندارند.

۳. شرایط اولیه و مرزی مدل: تنش‌های ثقلی بر جا در مدل اعمال می‌شوند. همچنین مرزهای قائم در جهت محور افقی و مرز پایین در دو جهت افقی و قائم گیردار می‌شوند.

توده‌سنگ در تحلیل دوبعدی با المان‌بندی ۸ گره‌یی و در حالت کرنش صفحه‌یی مدل می‌شود و برای تحلیل سه‌بعدی، المان‌های مکعبی در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی و شرایط مرزی برای هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۱ ارائه شده است.

مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود PLAXIS و تفاضل محدود ۳D FLAC و برای انواع مختلفی از پارامترها از جمله: دامنه‌ی گسترده‌یی از مدول کشسانی، نسبت پواسون، تغییرات شعاع، تغییرات سر بار و تغییرات نسبت تنش در مدل رفتاری کشسان انجام شده است.

۱.۱.۲. تأثیر مدول کشسانی در تغییر مکان اطراف تونل

در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی با افزایش مدول یانگ، تغییر مکان اطراف تونل کاهش می‌یابد. در تحلیل‌های انجام شده برای بررسی تغییر مکان‌ها در اثر تغییرات مدول یانگ، از ۱۱ مقدار مختلف استفاده شده است. همچنین بررسی‌ها برای نقاط معین و مدل‌سازی‌های مذکور نیز برای نسبت تنش‌های مختلف انجام شده است (در مدل‌سازی‌ها، مقدار نسبت تنش: بزرگ‌تر، کوچک‌تر، و مساوی ۱ در نظر گرفته شده است).

مطابق شکل ۲، هم در حالت دوبعدی و هم در حالت سه‌بعدی با افزایش مدول کشسانی، تغییر مکان کاهش یافته است؛ زیرا با افزایش مدول کشسانی، مقاومت توده‌سنگ افزایش یافته است. اگرچه نمودار برای هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی تقریباً بر هم منطبق است، ولی مطابق با معادله‌ی ارائه شده برای هر یک، تغییر مکان برای حالت دوبعدی با شیب بیشتری کاهش می‌یابد، که بدین دلیل است که در حالت سه‌بعدی قسمت حفاری نشده‌ی جلوی جبهه‌ی کار با افزایش مدول کشسانی مقاومت بیشتری پیدا می‌کند، و در واقع عهده‌دار تحمل مقداری از تغییر شکل‌ها می‌شود.

با جمع‌بندی موارد ذکر شده می‌توان شکل ۳ را برای ارتباط بین تغییر مکان‌های دوبعدی و سه‌بعدی پیشنهاد کرد.

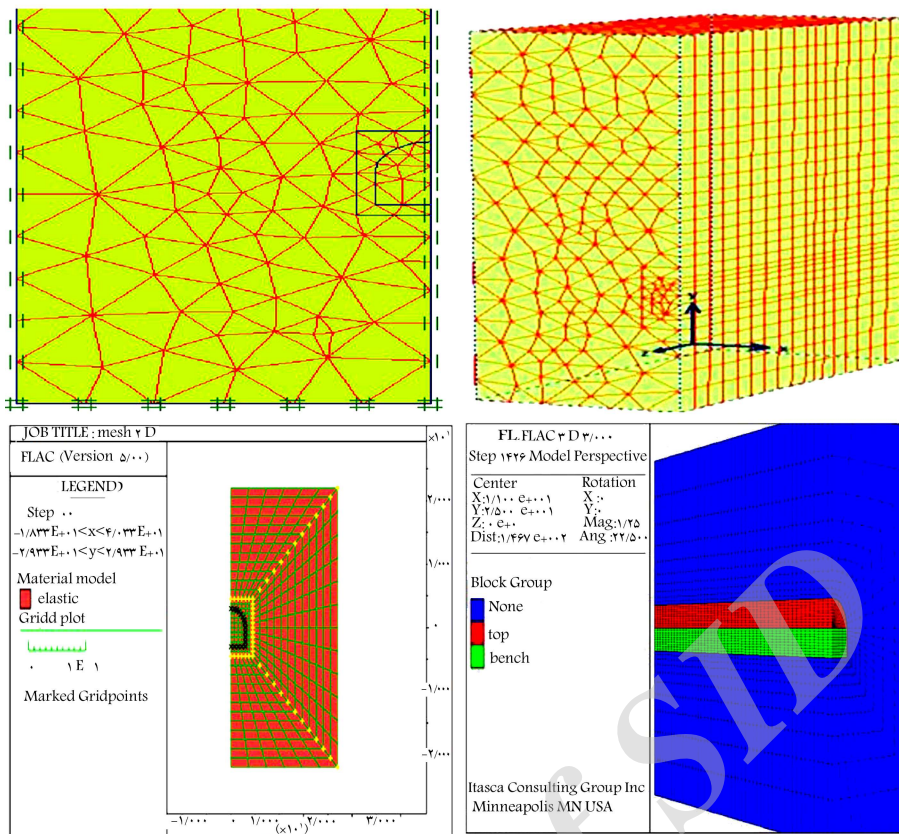
با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که تغییر مکان اطراف تونل در حالت دوبعدی بیش از حالت سه‌بعدی است.

۲.۱.۲. بررسی تغییرات نسبت پواسون و تغییر مکان اطراف تونل در حالت

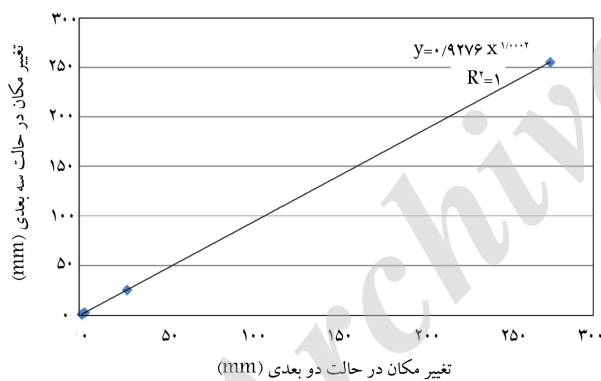
دوبعدی و سه‌بعدی

در شکل ۴، تغییرات نسبت پواسون و تغییر مکان اطراف تونل ترسیم شده است. با افزایش ضریب پواسون، مقدار تغییر مکان در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی در اطراف تونل بیشتر شده است. این مدل‌سازی برای ۹ مقدار متفاوت نسبت پواسون: ۰,۲، ۰,۲۲، ۰,۲۵، ۰,۲۷، ۰,۳، ۰,۳۳، ۰,۴، ۰,۴۴ انجام شده است.

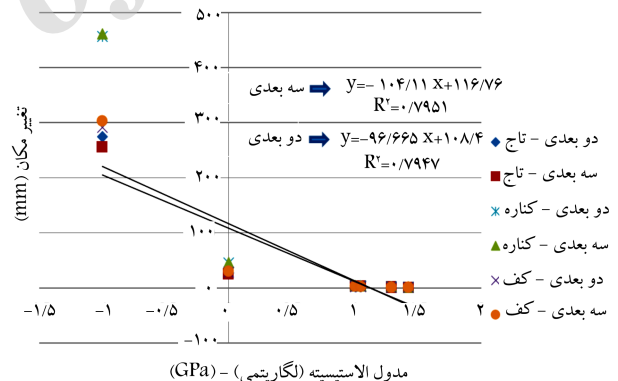
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در اثر افزایش نسبت پواسون مقدار تغییر مکان هم در حالت دوبعدی و هم در حالت سه‌بعدی بیشتر شده است. ولی مقدار تغییر مکان برای حالت دوبعدی بیشتر از سه‌بعدی است، که این موضوع اشاره به تأثیر وجود قسمت حفاری نشده و تأثیر آن در تغییر مکان سه‌بعدی دارد، چرا که هر



شکل ۱. شبکه بندی و شرایط مرزی در حالت های دوبعدی و سه بعدی تقاضل محدود و اجزاء محدود.



شکل ۳. رابطه ی بین تغییر مکان در حالت های دوبعدی و سه بعدی به ازاء مدول های کشسانی مختلف.



شکل ۴. اثر تغییرات مدول کشسانی در تغییر مکان اطراف تونل در حالت های دوبعدی و سه بعدی.

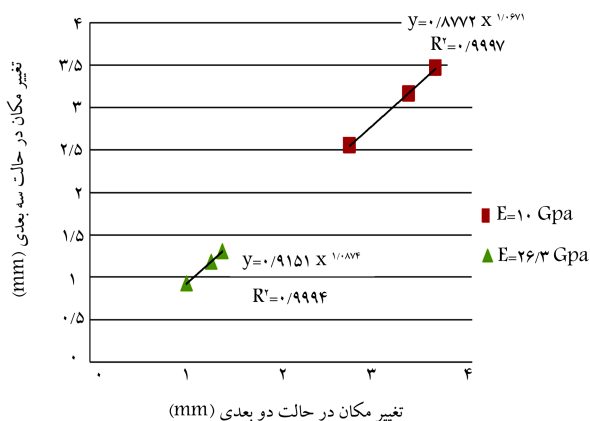
تندتری اتفاق افتاده است. در کناره ی تونل با افزایش k مقدار تغییر مکان بیشتر شده است، زیرا در تاج تنش افقی بیشتر و در کناره ها تنش قائم بزرگ تر است. در رابطه ی آنلو و گریک، [۱] تنش اعمال شده به صورت هیدرواستاتیک بوده است، ولی در نوشتار حاضر نسبت تنش ها علاوه بر ۱، برای مقادیر کمتر و بیشتر از ۱ نیز در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل های لازم برای نسبت های مختلف K (۱، ۰.۷، ۰.۱) و ۱/۶ به ازاء مقادیر مختلف مدول کشسانی انجام شده است. با جمع بندی نتایج حاصل از تغییرات نسبت تنش در حالت های دوبعدی و سه بعدی، نمودار تغییرات تغییر مکان اطراف تونل در حالت های دوبعدی و سه بعدی در شکل ۷ ارائه شده است، که مطابق آن مقدار تغییر مکان در حالت دوبعدی بیش از حالت سه بعدی است.

چه از جبهه ی کار دورتر و به حالت کرنش صفحه یی نزدیک تر می شویم، شیب خط ها بیشتر می شود و تغییر نسبت پواسون اثر کمتری در تغییر شکل های نزدیک جبهه ی کار تونل خواهد داشت. رابطه ی بین تحلیل های دوبعدی و سه بعدی در اثر تغییرات نسبت پواسون در شکل ۵ قابل مشاهده است، که مطابق آن، مقدار تغییر مکان دوبعدی برای توده سنگ های سالم و یا با درزی کم بیش از مقدار تغییر مکان سه بعدی است.

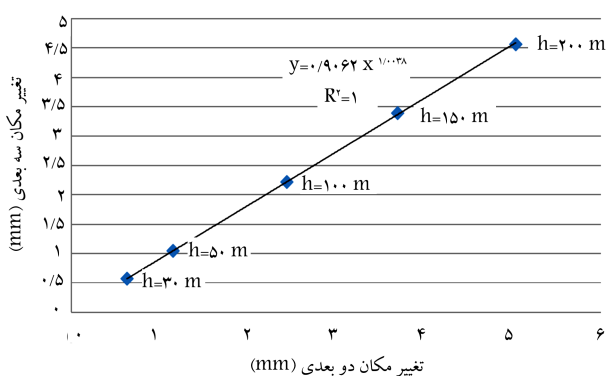
۳.۱.۲. بررسی تغییرات نسبت تنش و تغییر مکان اطراف تونل در

حالت های دوبعدی و سه بعدی

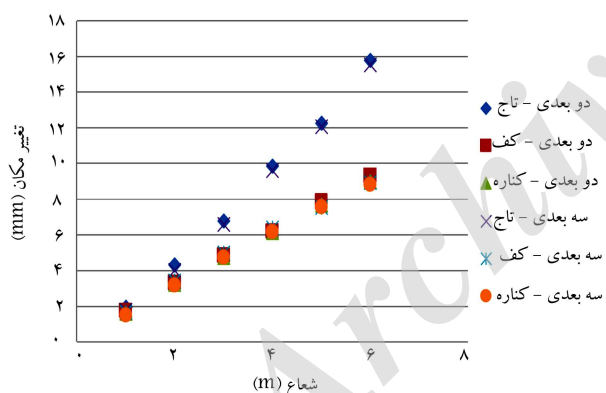
همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، تغییر مکان تاج تونل کاهش یافته است، ولی این کاهش در حالت سه بعدی با شیب



شکل ۷. رابطه‌ی تغییر مکان در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در اثر تغییرات نسبت تنش افقی به قائم.



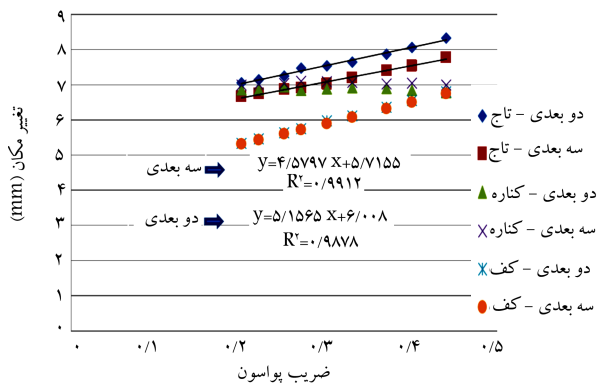
شکل ۸. تغییرات تغییر مکان در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در سر بارهای مختلف.



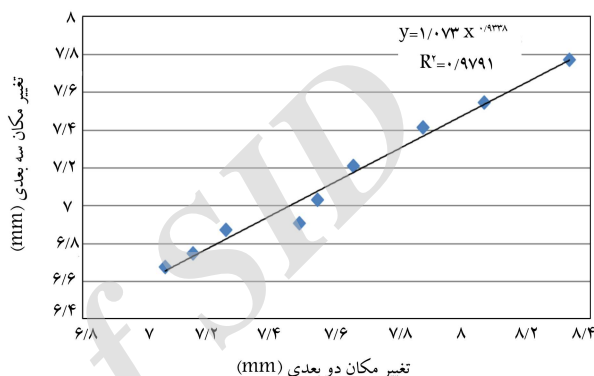
شکل ۹. تأثیر تغییرات شعاع در تغییر مکان‌های اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی.

تغییرات شعاع تونل دایره‌یی در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۹، هر چه قطر تونل بزرگ‌تر باشد، تفاوت تغییرشکل‌های دو بعدی و سه بعدی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۰، ارتباط تغییرات تغییر مکان اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی برای قطرهای مختلف تونل دایره‌یی مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۰، مقدار تغییر مکان دو بعدی بیش از تغییر مکان سه بعدی است.

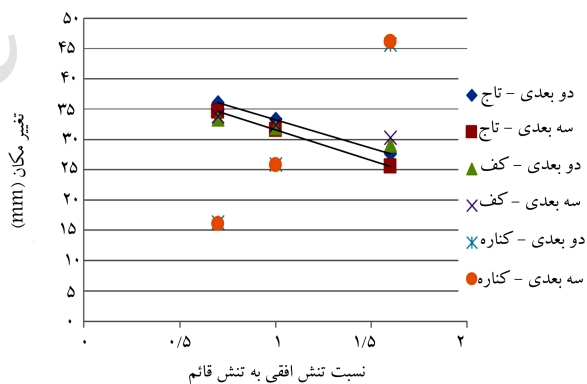
۶.۱.۲. جمع‌بندی تحلیل‌های انجام‌شده برای توده‌سنگ‌های سالم و یا با درزه‌ی کم
طبق تحلیل‌های انجام‌شده در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی (که در بخش‌های اخیر



شکل ۱۰. اثر تغییرات نسبت پواسون در تغییر مکان اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی.



شکل ۱۱. رابطه‌ی بین مقدار تغییر مکان‌های دو بعدی و سه بعدی در اثر تغییرات ضریب پواسون.



شکل ۱۲. اثر تغییرات نسبت تنش در تغییر مکان اطراف تونل.

۴.۱.۲. اثر تغییرات ارتفاع سربار در تغییر مکان اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی

شکل ۸، تغییرات تغییر مکان اطراف تونل را در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی ناشی از تغییرات ارتفاع سربار نشان می‌دهد، که مطابق آن مقدار تغییر مکان دو بعدی بیش از سه بعدی است.

۵.۱.۲. بررسی تغییرات قطر تونل و تغییر مکان اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی

برای بررسی تأثیر شعاع تونل در تغییر مکان‌های رخ داده در اطراف تونل به ازاء ۶ شعاع مختلف مدل‌سازی انجام شده است. در شکل ۹، رابطه‌ی بین تغییر مکان و

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج عددی پیشین با نتایج رابطه‌ی پیشنهادی در پژوهش حاضر و تحلیل عددی انجام شده.

تغییر مکان در آنالیز عددی با FLAC ۳D سه بعدی (میلی متر)	تغییر مکان (میلی متر)		
	رابطه‌ی ۱	رابطه‌ی ۲	رابطه‌ی ۴
۱۲٫۰۷	۱۱٫۳۲	۹٫۰۷	۹٫۳۴

۲.۲. بررسی تغییر مکان اطراف تونل در توده‌سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار

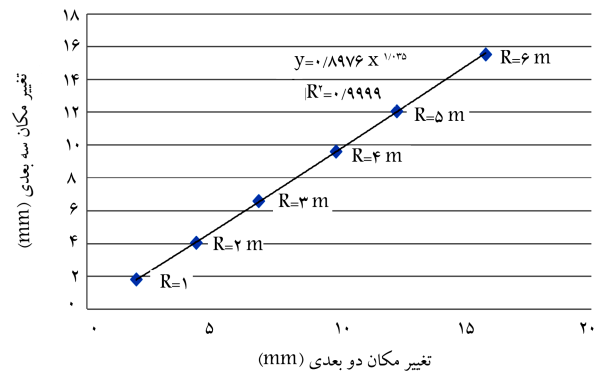
عموماً توده‌سنگ‌ها به صورت پیوسته، همگن، ایزوتروپ و کشسان خطی نیستند. برای تحلیل رفتار توده‌سنگ‌ها به علت درزه و شکاف فراوان، از تئوری محیط‌های ناپیوسته می‌توان استفاده کرد. اما به علت وجود ضعف ساختاری، تعیین موقعیت، ابعاد، و خواص مکانیکی همه‌ی درزه‌ها غیرممکن به نظر می‌رسد. لذا عملاً روش تحلیل محیط‌های ناپیوسته برای تحلیل رفتار این نوع محیط‌ها کاربرد عملی نخواهد داشت. با توجه به اینکه توده‌سنگ‌های مذکور تا حدی شبیه به محیط‌های پیوسته رفتار می‌کنند، لذا از تئوری محیط‌های پیوسته برای تحلیل رفتار آن‌ها می‌توان استفاده کرد.^[۱۰] ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها تأثیر اساسی در طراحی و ساخت فضاهای بزرگ زیرزمینی دارند. طی بررسی مدل‌سازی‌هایی که برای محیط سنگی ضعیف و درزه‌دار و ناهمگن با معیار موهر - کولمب در قطرهای مختلف انجام شده است و همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی محلی در ادبیات تغییر شکل تونل و جمع‌بندی‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان رابطه‌ی ۵ را مطابق با داده‌های شکل ۱۲ برای این توده‌سنگ‌ها ارائه داد و برای به‌دست‌آوردن نمودار داده‌های مذکور، از چند مدل مختلف که در آن‌ها مقدار چسبندگی و نسبت بواسون و قطر تغییر کرده، استفاده شده است. در ادامه، به ادبیات اندازه‌گیری‌های محلی پرداخته شده است.

در سال ۲۰۰۲، مطالعه‌ی بر روی چند دهانه‌ی زیرزمینی انجام شده و توده‌سنگ مورد حفاری ضعیف فرض شده است. مقایسه‌ی بین تغییر مکان‌ها در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی با کمک برنامه‌ی اجزاء محدود انجام شده است.^[۴] در پژوهش حاضر از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های محلی برجا در نوشتار حاضر استفاده شده است.

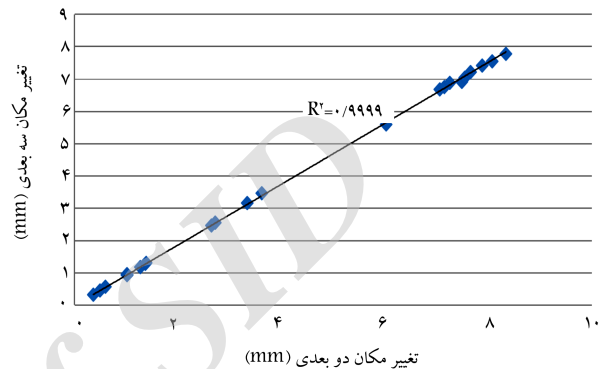
در سال ۲۰۰۶، تغییر شکل‌های محلی تونل دو قلو‌ی بلو در ترکیه با استفاده از کرنش‌سنج‌های محلی اندازه‌گیری شده است.^[۵] تونل مذکور در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS دوبعدی مدل‌سازی شده است، که می‌توان بین نتایج دوبعدی و اندازه‌گیری محلی که در حالت سه‌بعدی است، ارتباط برقرار کرد. پژوهش دیگری که از نتایج آن در پژوهش حاضر استفاده شده است، مقایسه‌ی تحلیل پایداری عددی دوبعدی و سه‌بعدی با مطالعه‌ی موردی تونل در سال ۲۰۰۵،^[۱۱] است. با جمع‌بندی نتایج دوبعدی و اندازه‌گیری‌های محلی، ارتباط بین آن‌ها را می‌توان به صورت شکل ۱۲ نشان داد. در نتیجه ارتباط بین تغییر شکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی را می‌توان مطابق با رابطه‌ی ۵ در توده‌سنگ‌های درزه‌دار و ضعیف پیشنهاد کرد.

$$U_{FD} = 2,5 U_{2D}^A \quad (5)$$

مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که برای توده‌سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار، تغییر مکان‌ها در حالت سه‌بعدی بیشتر از حالت دوبعدی است.



شکل ۱۰. رابطه‌ی تغییر مکان‌های دوبعدی و سه‌بعدی در شعاع‌های مختلف تونل.



شکل ۱۱. جمع‌بندی تغییرات تغییر مکان اطراف تونل در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی.

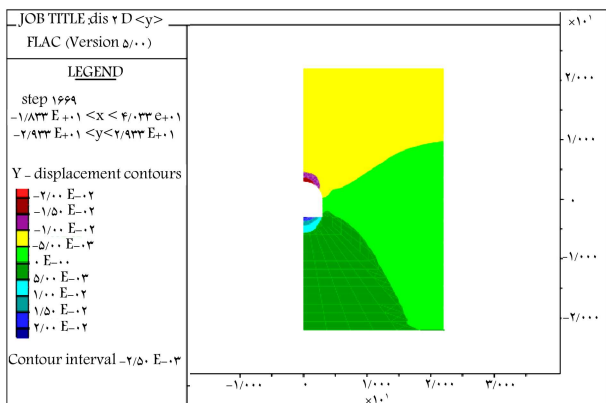
توضیح داده شده است)، نتایج تمام مدل‌سازی‌ها در نسبت بواسون‌های مختلف و مدول‌های کشسانی متفاوت و قطرهای مختلف و سربارهای متفاوت در شکل ۱۱ جمع‌بندی شده است.

بنابراین رابطه‌ی ۴ را می‌توان برای ارتباط بین تغییر مکان‌های دوبعدی و سه‌بعدی برای توده‌سنگ‌های سالم و یا با درزه‌ی کم پیشنهاد کرد:

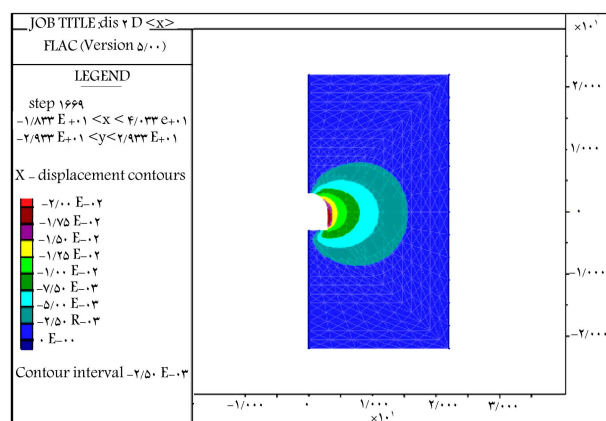
$$U_{FD} = 0,92 U_{2D}^{1,0008} \quad (4)$$

مطابق رابطه‌ی مذکور، تغییر مکان‌ها در حالت دوبعدی بیشتر از حالت سه‌بعدی است، زیرا وقتی تحلیل به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود، بخشی از تغییر مکان‌های رخ داده در اطراف تونل را قسمت حفاری نشده‌ی جلوی جبهه‌ی کار، که خصوصیات مکانیکی و مقاومتی بالایی دارد، متحمل می‌شود؛ ولی برای حالت دوبعدی که محیط نامحدود در نظر گرفته می‌شود، این ویژگی وجود ندارد و مقدار تغییر مکان بیشتر است، و علت اندک بودن این اختلاف در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی، ماهیت کشسانی بودن و سخت و قوی بودن رفتار سنگ است، که تأثیر پیشروی سینه‌ی کار خیلی در آن محسوس نیست.

به جهت صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی در پژوهش حاضر، روابط ۱ و ۲ با نتایج به‌دست‌آمده از رابطه‌ی ۴ مقایسه شده‌اند. روابط ۱، ۲ و ۴ روابطی هستند که تغییر مکان را برای حالت کشسان محاسبه می‌کنند. برای مقایسه‌ی نتایج هر یک از روابط مذکور، تونلی به شعاع ۵ متر که در محیط هیدرواستاتیکی با ارتفاع سربار ۲۵۰ متر، مدول یانگ و ضریب بواسون که به ترتیب ۴٫۶ گیگا پاسکال و ۰٫۳ هستند، در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از روابط ۱، ۲ و ۴ و نتیجه‌ی حاصل از تحلیل سه‌بعدی برنامه‌ی FLAC ۳D در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱۳. تغییر مکان‌های قائم برای حالت دوبعدی در آنالیز کشسان خمیری.



شکل ۱۴. تغییر مکان‌های افقی برای حالت دوبعدی در آنالیز کشسان خمیری.

حال با توجه به رابطه پیشنهادی در پژوهش حاضر (رابطه ۵)، مقدار تغییر مکان در حالت سه بعدی محاسبه شده است. مثلاً برای تغییر مکان تاج تونل با استفاده از رابطه ۵ خواهیم داشت:

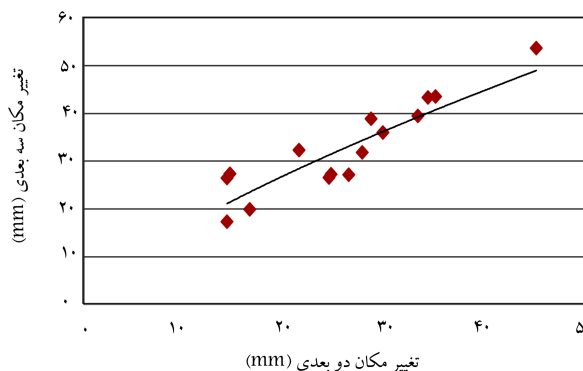
$$U_{rD} = 2,75 U_{rD}^A = 2,75 \times (20,317)^{0,8} = 27,81 \text{ mm}$$

همچنین تغییر مکان در جهت افقی برای کناره تونل و تغییر مکان قائم برای کف تونل به ترتیب ۲۶,۸۲ و ۲۹,۰۵ میلی متر است. نتایج مدل سازی در نرم افزار ۳D FLAC برای تونل مورد نظر در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.

مطابق شکل ۱۵، در مقطع مورد بررسی که به اندازه‌ی کافی و بیش از ۲,۷۵ برابر قطر تونل از جبهه فاصله دارد، مقدار تغییر مکان ۲۶,۶۵ میلی متر و برای کف تونل این تغییر مکان به اندازه‌ی ۲۷,۱۲ میلی متر است، که با توجه به فرمول پیشنهادی مشاهده می شود که با خطای کمتر از ۸٪ جواب مطلوب حاصل شده است. مطابق جدول ۴، بین نتایج پژوهش و تحلیل عددی انجام شده با استفاده از نرم افزار ۳D FLAC، اختلاف اندکی وجود دارد.

جدول ۳. جابه جایی‌های به دست آمده در سقف و دیواره‌ی تونل در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی در آنالیز کشسان خمیری.

شبه سه بعدی			دوبعدی			تحلیل موقعیت
کف	کناره	تاج	کف	کناره	تاج	
۲۱,۷۳	۲۳,۲۷	۱۹,۱۹	۲۳,۷۶۹	۲۲,۸۸	۲۱,۳۵	تغییر مکان با نرم افزار PLAXIS (میلی متر)
۲۳,۵	۱۸,۲۳	۲۰,۸۷	۲۱,۴۵۵	۱۹,۴۱۴	۲۰,۳۱۷	تغییر مکان با نرم افزار ۳D FLAC (میلی متر)



شکل ۱۲. رابطه‌ی بین مدل سازی‌های دوبعدی و سه بعدی با استفاده از اندازه گیری‌های برجا و مدل‌های عددی.

جدول ۲. مشخصات توده سنگ مورد حفاری در تونل سد گاوشان.

Φ	C	K	G	ν	E
(درجه)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)		(Mpa)
۳۳,۵	۰,۷۱۷	۳۸۴,۰۸	۱۷۷۲,۷	۰,۳	۴۶۰۹

۳. مثال: مطالعه‌ی موردی - تونل سد گاوشان

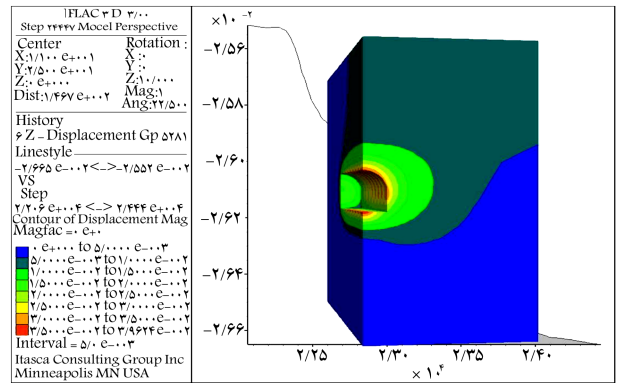
سد مخزنی گاوشان در استان کردستان، با گنجایش مخزن ۵۵۰ میلیون متر مکعب و تونل انتقال آب و نیروی برق آبی به ظرفیت ۱۱ مگاوات احداث شده است. جهت صحت سنجی نتایج پژوهش مذکور و روابط پیشنهادی در پژوهش حاضر، تونل سد گاوشان با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی با نرم افزارهای ۳D FLAC و PLAXIS، در تحلیل کشسان خمیری بررسی شده است. مقطع مورد بررسی تونل، که بر اساس مشخصات کلی تونل انتقال آب سد گاوشان است، در عمق تقریبی ۲۵ متر و به صورت نعل اسبی است، که شعاع قسمت منحنی آن ۳ متر و ارتفاع قسمت مستطیلی آن نیز ۳ متر است. تنش‌های عمودی با توجه به وزن روپاره محاسبه شده‌اند. در نهایت، مقدار ۱,۶ برای نسبت تنش در این منطقه انتخاب شده است.

با استفاده از نرم افزارهای ۳D FLAC و PLAXIS، مقادیر تغییر مکان برای تونل مورد نظر در حالت‌های دوبعدی و سه بعدی محاسبه و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جهت صحت سنجی نتایج تحلیل دوبعدی از تحلیل شبه سه بعدی استفاده و با توجه به نزدیک بودن نتایج به حالت دوبعدی، نتایج تحلیل مورد نظر تأیید شده است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، مقدار تغییر مکان قائم و افقی، در حالت دوبعدی در نرم افزار ۳D FLAC نشان داده شده است. در ادامه، برای پیدا کردن جابه جایی در مدل سازی سه بعدی، از روابط پیشنهادی پژوهش حاضر استفاده شده است. سپس جهت صحت سنجی نتایج حاصل، مدل سازی سه بعدی با کمک نرم افزار ۳D FLAC انجام شده است.

در توده سنگ به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در پژوهش حاضر، تحلیل های دوبعدی و سه بعدی به کمک برنامه های رایانه ای تفاضل محدود ۳D FLAC و اجزاء محدود PLAXIS برای بررسی اثر پارامترهای مختلف در محیط های سنگی سالم و ضعیف در تغییر مکان های اطراف تونل انجام شده است.

از مقایسه ی تحلیل های انجام شده در حالت های دوبعدی و سه بعدی مشاهده می شود که در توده سنگ های سالم، تغییر مکان در حالت دوبعدی بیشتر از حالت سه بعدی است. این بدین علت است که در توده سنگ های بدون درزه، مقاومت بعد سوم سنگ، عامل مؤثری در کاهش تغییر مکان اطراف تونل می شود. ولی در توده سنگ های ضعیف و درزه دار، بعد سوم سنگ به عنوان نقش منفی در کاهش تغییر مکان اطراف تونل نسبت به حالت دوبعدی است. اگرچه مبنای بسیاری از تحلیل ها در حالت دوبعدی است، اما توجه به نتایج سه بعدی و اعمال اثر سه بعدی، منجر به نتایج واقعی و قابل اعتماد خواهد شد، که می توان از روابط پیشنهادی در نوشتار حاضر استفاده کرد. به همین منظور دو رابطه برای مرتبط کردن تغییر مکان های دوبعدی و سه بعدی در توده سنگ های سالم و درزه دار پیشنهاد شده است، که می توان با انجام تحلیل دوبعدی، تغییر مکان های سه بعدی را تقریب زد. به منظور صحت سنجی روابط پیشنهاد شده، تونل انحراف آب سد گاوشان در استان کردستان بررسی شده است. تغییر مکان تاج تونل در تحلیل دوبعدی برابر ۲۰/۳۱۷ میلی متر شده است. با استفاده از رابطه ی پیشنهادی در نوشتار حاضر، برای توده سنگ های درزه دار، مقدار تغییر مکان تاج تونل در حالت سه بعدی برابر با ۲۷/۸۱ میلی متر به دست آمده است، که در حدود ۴/۴٪ با نتایج حاصل از تحلیل عددی سه بعدی اختلاف دارد. تغییر مکان تاج تونل در تحلیل عددی سه بعدی برابر با ۲۶/۶۵ میلی متر شده است. بنابراین روابط پیشنهادی می توانند علاوه بر کاهش هزینه های محاسباتی، منجر به نتایج واقعی شوند.



شکل ۱۵. تغییر مکان های قائم برای حالت سه بعدی در آنالیز کشسان خمیری.

جدول ۴. نتایج تغییر مکان ها در آنالیز عددی و نتایج حاصل از پژوهش حاضر در نقاط شاخص تونل.

موقعیت نقاط شاخص	رابطه ی پیشنهادی (میلی متر)	نتایج تحلیل عددی با کمک ۳D FLAC (میلی متر)
تاج	۲۷/۸۱	۲۶/۶۵
کناره	۲۶/۸۲	۲۲/۸۷
کف	۲۹/۰۵	۲۷/۱۲

۴. نتیجه گیری

ایجاد تونل های زیرزمینی، تغییرات قابل ملاحظه یی در تنش های توده سنگ ایجاد می کند، به همین دلیل برای رسیدن به پایداری ضروری است تا تنش ها و تغییر شکل ها

منابع (References)

- Hajiazizi, M. and Khatami, R.S. "Seismic analysis of the rock mass classification in the Q-system", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **62**, pp. 123-130 (2013).
- Unlu, T. and Gercek, H. "Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **18**(5), pp. 547-553 (2003).
- Pariseau, W.G. and Sorensen, W. K. "3D mine pillar design information from 2D FEM analysis", *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, **3**(2), pp. 145-157 (1979).
- Dhawan, K.R., Singh, D.N. and Gupta, I.D. "2D and 3D finite element analysis of underground openings in an inhomogeneous rock mass", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **39**(2), pp. 217-227 (2002).
- ÜÇER, S. "Comparison of 2D and 3D finite element models of tunnel advance in soft ground, a case study on bolu tunnels", A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University (2006).
- Ahmadi, M., Goshtasbi, K. and Ashjari, R. "2-D And 3-D analyses of underground openings in an inhomogeneous rock mass", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction of Civil Engineering (IJSTC)*, **32**(2), pp. 161-166 (2008).
- Liaqat, A., Qureshi, K. and Tahir, V. "Comparison of 2D & 3D finite element analysis of tunnels based on soil-structure interaction using GTS", *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (2012).

8. Brady, B.H.G. and Brown, E.T., *Rock Mechanics for Underground Mining*, 2ed Chapman and Hall, London (1993).
9. Itasca Consulting Group, Inc., *FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 4, User's Manual (2010).
10. Olyaei, M. and Naeimifar, O. "Evaluation of nonlinear behavior of circular tunnels under static and dynamic loading", *Civil Engineering Sharif*, **2-29**(4), pp. 45-53 (2013).
11. Dehghani Moghadam, M. and Ahmadi, M. "Design and stability analysis of railway tunnels Shibly", Ms Thesis, University of Tarbiat Modares (2005).

Archive of SID