

# ارائه‌ی رابطه‌ی جدید برای مقایسه‌ی تغییر شکل اطراف تونل در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی

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 سه‌بعدی 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 سه‌بعدی است، اما در توده‌سنگ‌های درزه‌دار مقدار تغییرمکان اطراف تونل در حالت دوبعدی کمتر از حالت سه‌بعدی است. همچنین نتایج حاصل از پژوهش حاضر، از طریق تونل سد گاوشان تأیید شده است.

واژگان کلیدی: تونل، تغییرمکان، روش‌های عددی، تحلیل دوبعدی، تحلیل سه‌بعدی.

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

## ۱. مقدمه

امروزه ایجاد فضاهای زیرزمینی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، روز به روز در حال افزایش است.<sup>[۱]</sup> 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 سه‌بعدی از دیرباز مورد توجه بوده است. تحلیل‌های عددی به ۲ دسته‌ی دوبعدی و سه‌بعدی 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 سه‌بعدی ضروری است. مطالعه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در اطراف جبهه‌ی کار تونل، برای پژوهشگران مکانیک سنگ همیشه چالش‌برانگیز 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 سه‌بعدی، تحلیل‌های عددی دوبعدی متعددی در اواسط دهه‌ی ۱۹۷۰ آغاز شده و در دهه‌ی جدید نیز همچنان ادامه یافته است.<sup>[۲]</sup>

روشی مشابه با روش سه‌بعدی پیشنهاد شده است، که نتایجی نزدیک به آنالیز سه‌بعدی داشته و نتایج حاصل حاکی از کارآمدتر بودن روش تحلیل سه‌بعدی نسبت به روش دوبعدی و همچنین کاهش هزینه‌های طراحی بوده است.<sup>[۳]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۲، رفتار کشسان‌خمیری دوبعدی و سه‌بعدی یک پروژه‌ی برق آبی در یکی از مناطق هند با ۴ دهانه‌ی زیرزمینی بررسی شده است.<sup>[۴]</sup> مطالعه‌ی بی (۲۰۰۶) نیز حول مقایسه‌ی تحلیل مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با کمک نرم‌افزار PLAXIS انجام و به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن‌ها پرداخته شده است.<sup>[۵]</sup> همچنین نوشتاری در سال ۲۰۰۸، با عنوان آنالیز دوبعدی و سه‌بعدی 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.<sup>[۶]</sup> در مطالعه‌ی اندرکنش خاک - سازه (۲۰۱۲)<sup>[۷]</sup> نیز براساس آنالیز اجزاء محدود دوبعدی و سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار GTS، تونل به‌صورت فتر و وزن خاک‌ها و سربار اطراف آن به‌صورت 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 سه‌بعدی، 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 تغییرمکان‌های 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.<sup>[۲]</sup> 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،<sup>[۸]</sup> تعریف می‌شوند:

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

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

$$\frac{u_r}{u_{r\infty}} = (0.22\nu + 0.19) + (-0.22\nu + 0.18) \left\{ 1 - \left[ \frac{0.39\nu + 0.65}{0.39\nu + 0.65 + \frac{x}{R}} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

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:

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

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

## ۲. مدل‌سازی و تحلیل عددی

### ۱.۲. مقایسه‌ی تغییرمکان در توده‌سنگ‌های بدون درزه و یا با

#### درزه‌های خیلی کم

مدل‌سازی به کار گرفته‌شده 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  $44 \times 44$  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 برجا در مدل اعمال می‌شوند. همچنین مرزهای قائم در جهت محور افق و مرز پایین در دو جهت افق 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 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.

### ۲.۱.۱.۲. تأثیر مدول کشسانی در تغییرمکان اطراف تونل

در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی با افزایش مدول یانگ، تغییرمکان اطراف تونل کاهش می‌یابد. در تحلیل‌های انجام‌شده برای بررسی تغییرمکان‌ها 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، تغییرمکان 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 ارائه‌شده برای هر یک، تغییرمکان 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 تغییرشکل‌ها می‌شود.

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

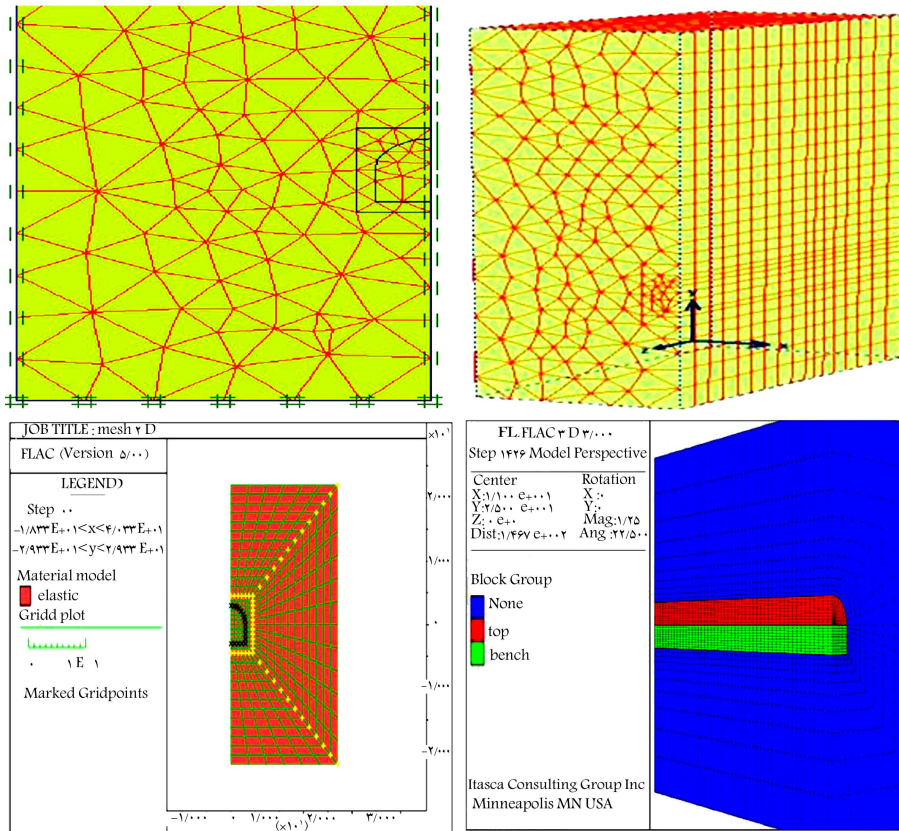
با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که تغییرمکان اطراف تونل در حالت دوبعدی بیش از حالت سه‌بعدی است.

### ۲.۱.۲. بررسی تغییرات نسبت پواسون و تغییرمکان اطراف تونل در حالت

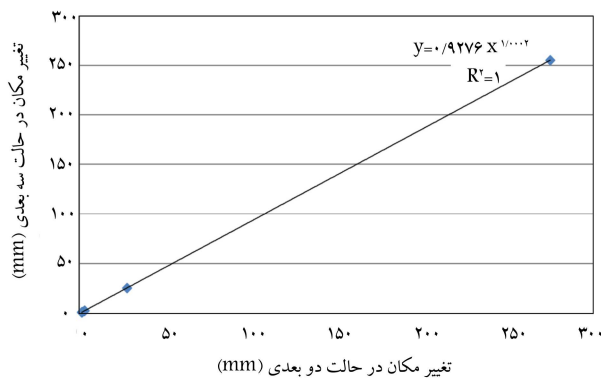
#### دوبعدی و سه‌بعدی

در شکل ۴، تغییرات نسبت پواسون و تغییرمکان اطراف تونل ترسیم شده است. با افزایش ضریب پواسون، مقدار تغییرمکان 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.

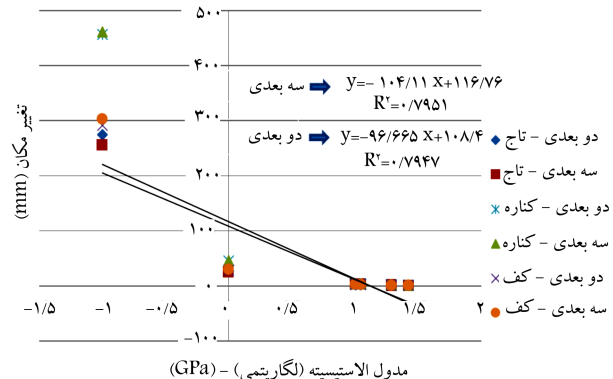
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در اثر افزایش نسبت پواسون مقدار تغییرمکان هم در حالت دوبعدی و هم در حالت سه‌بعدی بیشتر شده است. ولی مقدار تغییرمکان برای حالت دوبعدی بیشتر از سه‌بعدی است، که این موضوع اشاره به تأثیر وجود قسمت حفاری نشده و تأثیر آن در تغییرمکان سه‌بعدی دارد، چرا که هر



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



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



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

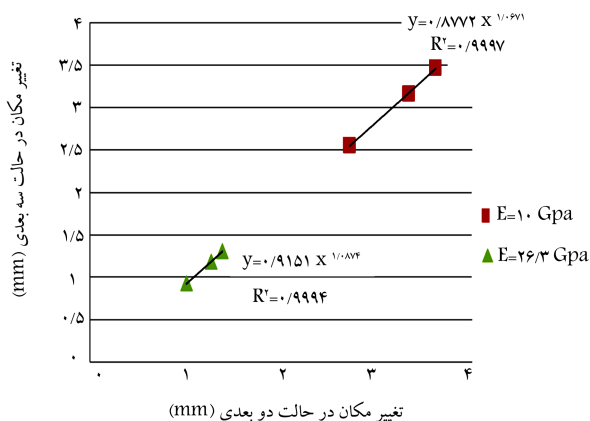
تندتری اتفاق افتاده است. در کناره ی تونل با افزایش  $k$  مقدار تغییر مکان بیشتر شده است، زیرا در تاج تنش افقی بیشتر و در کناره ها تنش قائم بزرگ تر است. در رابطه ی آنلو و گریک، [۱] تنش اعمال شده به صورت هیدرواستاتیک بوده است، ولی در نوشتار حاضر نسبت تنش ها علاوه بر ۱، برای مقادیر کمتر و بیشتر از ۱ نیز 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 دو بعدی و سه بعدی، نمودار تغییرات تغییر مکان اطراف تونل در حالت های دو بعدی و سه بعدی در شکل ۷ ارائه شده است، که مطابق آن مقدار تغییر مکان در حالت دو بعدی بیش از حالت سه بعدی است.

چه از جبهه ی کار دورتر و به حالت کرنش صفحه یی نزدیک ترمی 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 دو بعدی و سه بعدی در اثر تغییرات نسبت پواسون در شکل ۵ قابل مشاهده است، که مطابق آن، مقدار تغییر مکان دو بعدی برای توده سنگ های سالم و یا با درزه ی کم بیش از مقدار تغییر مکان سه بعدی است.

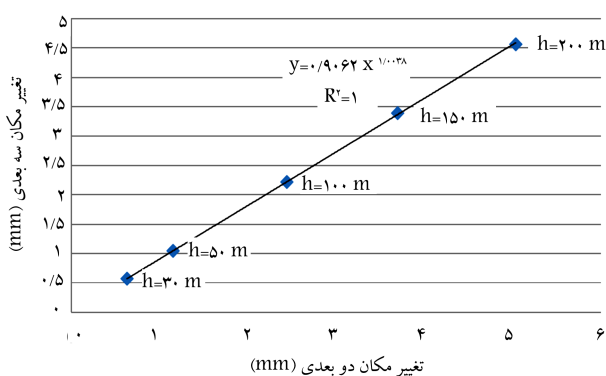
### ۳.۱.۲. بررسی تغییرات نسبت تنش و تغییر مکان اطراف تونل در

#### حالت های دو بعدی و سه بعدی

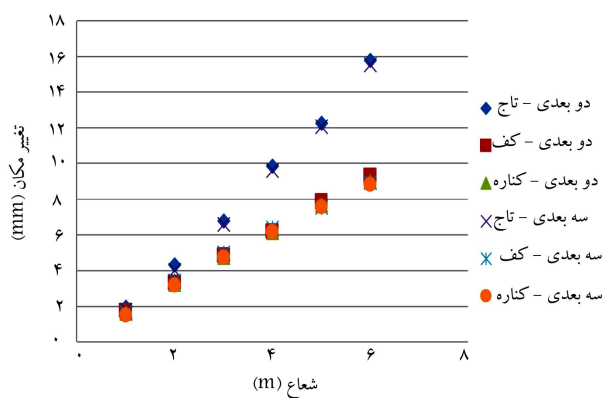
همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، تغییر مکان تاج تونل کاهش یافته است، ولی این کاهش در حالت سه بعدی با شیب



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



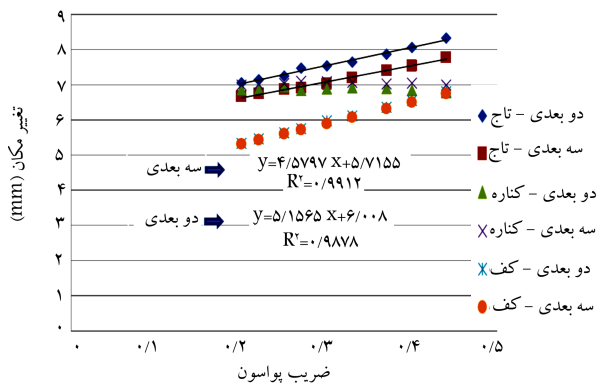
شکل ۸. تغییرات تغییر مکان در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در سر بارهای مختلف.



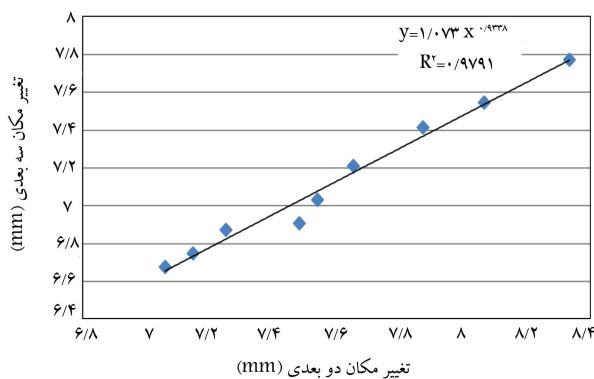
شکل ۹. تأثیر تغییرات شعاع در تغییر مکان‌های اطراف تونل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی.

تغییرات شعاع تونل دایره‌یی در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۹، هر چه قطر تونل بزرگ‌تر باشد، تفاوت تغییر شکل‌های 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.

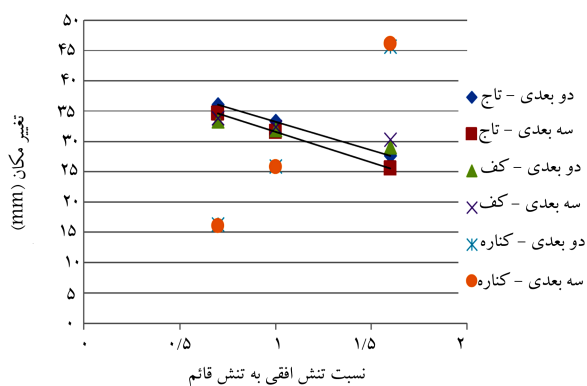
۶.۱.۲. جمع‌بندی تحلیل‌های انجام‌شده برای توده‌سنگ‌های سالم و یا با درزه‌ی کم طبق تحلیل‌های انجام‌شده در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی (که در بخش‌های اخیر



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	۹٫۳۴	۹٫۰۷	۱۱٫۳۲

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

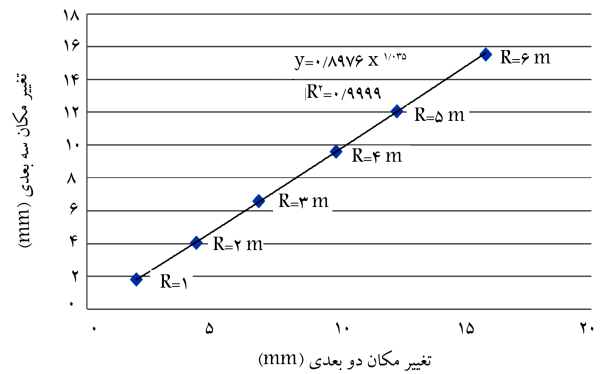
عموماً توده‌سنگ‌ها به صورت پیوسته، همگن، ایزوتروپ و کشسان خطی نیستند. برای تحلیل رفتار توده‌سنگ‌ها به علت درزه و شکاف فراوان، از تئوری محیط‌های ناپیوسته می‌توان استفاده کرد. اما به علت وجود ضعف ساختاری، تعیین موقعیت، ابعاد، و خواص مکانیکی همه‌ی درزه‌ها غیرممکن به نظر می‌رسد. لذا عملاً روش تحلیل محیط‌های 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.<sup>[۱۰]</sup> 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 اندازه‌گیری‌شده‌ی 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 پواسون 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.<sup>[۴]</sup> در پژوهش حاضر از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های محلی برجا در نوشتار حاضر استفاده شده است.

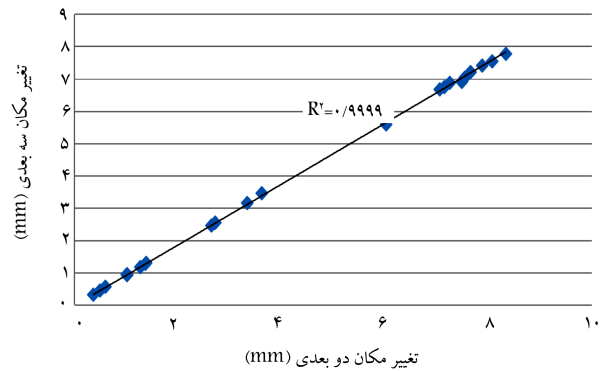
در سال ۲۰۰۶، تغییر شکل‌های محلی تونل دو قلو‌ی بلو در ترکیه با استفاده از کرنش‌سنج‌های محلی اندازه‌گیری شده است.<sup>[۵]</sup> تونل مذکور در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS دوبعدی مدل‌سازی شده است، که می‌توان بین نتایج دوبعدی و اندازه‌گیری محلی که در حالت سه‌بعدی است، ارتباط برقرار کرد. پژوهش 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،<sup>[۱۱]</sup> 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.

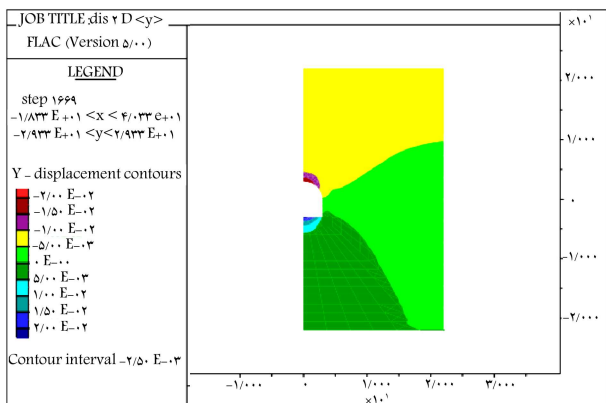
توضیح داده شده است)، نتایج تمام مدل‌سازی‌ها در نسبت پواسون‌های مختلف و مدول‌های کشسانی متفاوت و قطرهای مختلف و سربارهای متفاوت در شکل ۱۱ جمع‌بندی شده است.

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

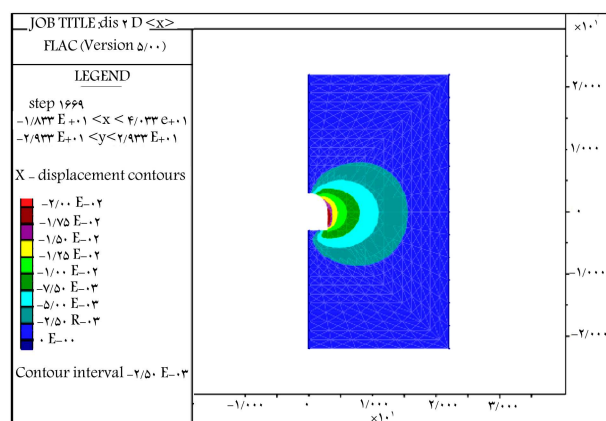
$$U_{FD} = 0,92 U_{2D}^{1,0008} \quad (4)$$

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 حفاری‌نشده‌ی 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 پواسون 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.

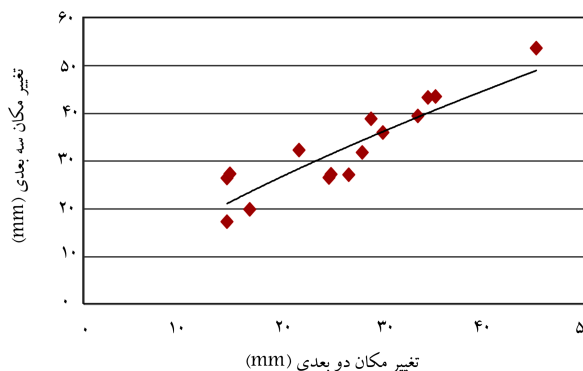
حال با توجه به رابطه پیشنهادی در پژوهش حاضر (رابطه ۵)، مقدار تغییر مکان در حالت سه بعدی محاسبه شده است. مثلاً برای تغییر مکان تاج تونل با استفاده از رابطه ۵ خواهیم داشت:

$$U_{rD} = 2.75 U_{rD}^A = 2.75 \times (20.317)^{0.8} = 27.81 \text{ mm}$$

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 ۲٫۵ 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.

$\Phi$	$C$	$K$	$G$	$\nu$	$E$
(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 مترمکعب 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 براساس 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.



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).