



مقاله پژوهشی

## مقایسه تاثیر مدل سازی دو بعدی و سه بعدی بر پاسخ لرزه‌ای تونل در توده سنگ‌های درزه‌دار به روش شبه استاتیک

مینا هاشمی<sup>۱</sup>، محمد حاجی عزیزی<sup>۱\*</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(دریافت: خرداد ۱۴۰۱، پذیرش: بهمن ۱۴۰۱)

### چکیده

در دو دهه اخیر، ساخت فضاهای زیرزمینی در جهان رشد فزاینده‌ای داشته است. توجه به این نکته ضروری است که پایداری نسبی این سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای دلیلی بر کم‌اهمیت بودن این مسئله نیست. امروزه اکثر تحلیل‌های لرزه‌ای صورت گرفته به دلیل سهولت با کمک روش‌های عددی دوبعدی انجام می‌شود اما تحلیل سه‌بعدی تونل، به‌ویژه در سنگ‌های درزه‌دار به جهت انتخاب سیستم نگهداری دقیق‌تر، در بعضی از پروژه‌ها می‌تواند یک گام اساسی در اجرای موفق و بهینه پروژه‌های تونل‌سازی و پایدارسازی توده سنگ اطراف تونل باشد. البته در برخی موارد دیگر، تحلیل دوبعدی کفایت می‌کند. از این رو در این پژوهش به مقایسه تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی تونل در حالت استاتیکی و لرزه‌ای (با کمک روش شبه استاتیکی) پرداخته شده است. در این مقاله ابتدا توده سنگ بدون درزه در حالت استاتیکی و لرزه‌ای مدل‌سازی می‌شود. سپس مرحله به مرحله با ضعیف‌تر کردن توده سنگ، جابه‌جایی‌های اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه‌بعدی در هر دو تحلیل استاتیکی و لرزه‌ای مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه برای سه نوع مدول یانگ متفاوت، تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در توده سنگ سخت و بدون درزه، عمدتاً نتایج حاصل از تحلیل‌های دوبعدی بزرگ‌تر است؛ اما با افزایش درزه‌ها در توده سنگ، تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل سه‌بعدی بیشتر از تحلیل دوبعدی است. اختلاف نتایج در تحلیل لرزه‌ای نسبت به تحلیل استاتیکی شدت می‌یابد. به‌طور مثال در توده سنگ با سه درزه افقی ماکزیمم تغییر مکان در اطراف تونل در حالت دوبعدی ۱/۵ میلی‌متر و در حالت سه‌بعدی ۵/۰۴ میلی‌متر است و در حالت استاتیکی این مقادیر به ترتیب ۱/۷۵ و ۲/۱۸ است. همچنین مشاهده می‌شود در تونل‌های عمیق، جهت شیب درزه و همچنین جهت اعمال شتاب به مدل، پارامترهای تأثیرگذار بر تغییر مکان‌های اطراف تونل محسوب نمی‌شوند. در آخر با یک مطالعه موردی مدل‌سازی و نتایج صحت‌سنجی می‌شود.

### کلمات کلیدی

تونل، توده سنگ درزه‌دار، تحلیل لرزه‌ای، مدل‌سازی دوبعدی، مدل‌سازی سه‌بعدی.

\*عهده‌دار مکاتبات: [mhazizi@razi.ac.ir](mailto:mhazizi@razi.ac.ir)

DOI:10.22034/ANM.2023.18536.1557

## ۱- مقدمه

مقطع تونل ناشی از امواج برشی که به صورت عادی یا عرضی به محور تونل منتشر می‌شوند، تمرکز دارد. نتایج حاصل از تعدادی تحلیل پارامتریک انجام شده، نشان می‌دهد که نوع شکل مقطع، نسبت سختی نسبی خاک به سازه، نسبت ارتفاع به دهانه و ضخامت دیواره میانی بر پاسخ تونل تأثیر فراوانی دارد.

بر اساس راه‌حل تحلیلی پیشنهادی توسط دوان و همکاران [۶] مطالعات پارامتری برای بررسی اثر برخی عوامل مهم بر پاسخ لرزه‌ای تونل از جمله زوایای برخورد، سختی تماس مماسی در سطح مشترک زمین و تونل و سختی نسبی بین زمین و تونل انجام شده است. این راه‌حل می‌تواند برای پیش‌بینی نیروهای داخلی تونل‌های دایره‌ای تحت امواج مایل P در طراحی لرزه‌ای، مفید واقع شود.

یوآی و همکاران [۷] با در نظر گرفتن آسیب‌های لرزه‌ای که یک تونل ممکن است در فرآیند طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ در مرحله بررسی‌های ژئوتکنیکی متحمل شود؛ اصلاحاتی در سیستم طبقه‌بندی Q انجام دادند. سپس سیستم نگهداری تونل را با این نتیجه طبقه‌بندی اصلاح شده طراحی کردند. نوآوری اصلی مطالعه آنها، اصلاح کمی شاخص دست‌نخورده سنگ،  $K_v$ ، در سیستم BQ با در نظر گرفتن پتانسیل آسیب زلزله، تحت سطوح مختلف پیک شتاب طراحی زمین است.

جیا و تانگ [۸] یک کد عددی به نام RFPA برای مطالعه تأثیر زاویه شیب مختلف درزه‌ای لایه‌ای و ضریب فشار جانبی بر پایداری تونل در توده سنگ درزه‌دار مورد استفاده قرار دادند. تجزیه و تحلیل عددی مطالعه آنها نشان می‌دهد که هم زاویه شیب درزه‌ها و هم ضریب فشار جانبی، تأثیر قابل توجهی بر حالت شکست و مشخصه‌های جابجایی تونل دارند.

در مطالعه‌ی دیگر که توسط آهولا و همکارانش [۹] انجام شده است، یک ارزیابی جامع از رفتار دینامیکی درزه سنگ در آزمایشگاه بر روی درزه سنگی طبیعی و شبیه‌سازی شده، مطابق با یک مطالعه موردی زیرزمینی واقعی که تحت شرایط مختلف بارگذاری قرار گرفته، ارائه شده است. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مقاومت برشی بسته به زبری درزه و ماهیت در هم قفل شدن سطوح درزه، می‌تواند به طور قابل توجهی بین جهت برشی روبه جلو و معکوس متفاوت باشد.

اگرچه طبق مطالعات بسیاری از پژوهشگران از جمله دودینگ و روزن [۱] در زمینه علم مهندسی تونل، سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با سازه‌های روی زمین نسبت به شدت لرزش معین، ایمن‌تر هستند و در آنها آستانه‌های آسیب محافظه‌کارتر است، اما این موضوع به معنای پایداری همیشگی این سازه‌ها نیست. چنانچه گزارش‌های زیادی مبنی بر خرابی یا آسیب‌های شدید به این سازه‌ها در اثر بار زلزله از گذشته‌های دور تا به اینک وجود دارد. طوری که ادیان و همکارانش [۲] اشکال مختلف آسیب به سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها، غارها، غارهای طبیعی و معادن رها شده را در طول زلزله‌های بزرگ توصیف می‌کنند. علاوه بر این، برخی معادلات تجربی برای ارزیابی آسیب به سازه‌های زیرزمینی را پیشنهاد کرده‌اند که ممکن است برای ارزیابی سریع آسیب احتمالی مفید باشند. لیو و همکارانش [۳] اشاره می‌کنند که در طول حفاری بسیاری از خرابی‌های سنگ اطراف حفره زیرزمینی، ارتباط نزدیکی با درزه‌ها دارند. مطالعه پایداری تونل برای توده سنگ درزه‌دار در مهندسی سنگ، به‌ویژه تونل‌زنی و توسعه فضای زیرزمینی حائز اهمیت است. وجود درزه‌ها بر انتشار امواج تنش تأثیرگذار است؛ که به نوبه خود بر اتلاف انرژی در توده سنگ مؤثر است. هنگامی که امواج تنش به سمت درزه‌ها منتشر می‌شوند؛ با انعکاس مواجه شده و هنگامی که امواج منعکس شده با امواج تنش بعدی و امواج منعکس شده جانبی برخورد می‌کنند، امواج تنش از امواج فشاری به امواج کششی تغییر می‌یابد و باعث ایجاد آسیب کششی در توده سنگ می‌شود.

بسیاری از سازه‌های سنگی بایستی در مقیاس بزرگ در توده‌سنگ درزه‌دار ایجاد شوند که این موضوع، سازه‌ی سنگی را برای طراحی و نگهداری دچار مشکل می‌کند. پایداری این نوع سازه‌ها به‌طور عمده تحت تأثیر توزیع و رفتار ناپیوستگی‌ها قرار می‌گیرد، رفتار توده‌سنگ نیز با مشخصه‌های ترکیب تشکیل‌دهنده‌ی سنگ بکر و هم با مشخصه نقاط ضعف داخل توده‌سنگ ارتباط دارد [۴] یو و چن [۵] تونل‌های عمیق با شکل مقطع‌های دلخواه با یک دیواره میانی در معرض بارگذاری لرزه‌ای را با کمک تحلیل شبه استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها در مطالعات خود یک راه‌حل تحلیلی ساده و یکپارچه برای این تونل‌ها ارائه کرده‌اند. این مقاله بر روی تغییر شکل‌های برشی

شهری انجام داده اند در نتایج خود به این موضوع دست یافته اند که تحلیل های عددی سه بعدی قابلیت نمایش دقیق تر تغییر مکان حداکثر نشست سطح را هم در یک مقطع قائم و هم در مقطع طولی تونل دارند.

حشاش و همکاران [۱۵] گزارش دادند که برای تونل های تک جعبه (Single Box Tunnel)، نتایج تحلیل های شبه استاتیک و دینامیکی تقریباً یکسان است. آرگیرودیس و پیتیلایکیس [۱۶] نیز گزارش کردند که تفاوت بین تحلیل های شبه استاتیک و دینامیک قابل ملاحظه نیست. در این پژوهش که با کمک تحلیل های عددی انجام شده از تحلیل شبه استاتیک برای مدل سازی لرزه ای استفاده شده است، زیرا در صورتی که نسبت طول موج به دهانه حفاری شده به قدر کافی بزرگ باشد، پاسخ لرزه ای سازه های زیرزمینی توسط تحلیل شبه استاتیک به اندازه کافی برای اهداف مهندسی دقیق برآورد می شود. وانگ و کای [۱۷] در تحقیقی که بر روی تونل های عمیق انجام داده اند؛ تأثیر طول موج به دهانه حفاری، بر روی حرکت زمین را بررسی کرده اند. از آنجایی که ابعاد مقطع تونل ها معمولاً بسیار کوچک تر از طول موج سرعت های پیک زمین است، سازه را می توان با استفاده از رویکرد شبه استاتیک طراحی کرد. از میان عوامل تأثیرگذار بر تشدید موج در اطراف دهانه زیرزمینی، نسبت طول موج به دهانه حفاری ( $\lambda/D$ ) است که تأثیر زیادی بر حرکت زمین دارد. با کاهش نسبت ( $\lambda/D$ ) ضریب تشدید در اطراف دهانه حفاری به طور قابل توجهی افزایش می یابد. زمانی که نسبت ( $\lambda/D$ ) بیشتر از ۲۰ باشد، دامنه های موج کمتر تحت تأثیر حفاری قرار می گیرد و بارگذاری موج لرزه ای را می توان «شبه استاتیک» در نظر گرفت. از آنجایی که سرعت موج برشی در توده سنگ مورد مطالعه در این تحقیق بیش از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است و با توجه به تعریف طول موج که مطابق رابطه (۱) بیان می شود.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1)$$

که در آن  $\lambda$ : طول موج (متر):  $V$ : سرعت موج (متر بر ثانیه)  $F$ : فرکانس موج (هرتز) است. چون در غالب مواقع فرکانس در سنگ بین ۱ تا ۸ هرتز است، بنابراین نسبت طول موج به دهانه حفاری (۱۶ متر)، برای فرکانس های کوچک تر از ۵، مقادیری بزرگ تر از ۲۰ را ارائه می دهد؛ بنابراین می توان برای آنالیز بارگذاری لرزه ای تونل در این مقاله از تحلیل شبه استاتیک بهره برد.

همچنین حاجی عزیزی و خاتمی [۱۰]، در تحقیق خود با کمک تحلیل عددی اثر لرزه خیزی (با روش شبه استاتیکی) روی تونل ها را بررسی کردند. نرم افزار مورد استفاده در تحلیل آن ها PHASE2 است. در ابتدا اثر درزه ها در لرزه خیزی در سنگ های خوب (رفتار الاستیک) و ضعیف (رفتار پلاستیک) در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی مورد توجه قرار گرفته است. سپس نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج سیستم تجربی معادل سازی شده و اثر لرزه خیزی در سیستم تجربی مورد بحث قرار گرفته است.

در مطالعه ای دیگر توسط وارما و همکاران [۱۱] برخی از ویژگی های مهم تونل های سنگی درزه دار در طی بارگذاری لرزه ای بررسی می شود. مدل عددی توسعه یافته برای انجام مطالعات پارامتری، به جهت درک تأثیر تنش درجا، زوایای درزه، سختی و زاویه اصطکاک درزه بر تغییر شکل و پایداری تونل تحت حرکت ورودی زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی استفاده می شود. مشاهده می شود که برخی از ترکیبات زوایای درزه یک گوه را تشکیل می دهند که تغییر شکل بیش از حد و متعاقباً شکست کامل را ایجاد می کند. کاهش چشم گیری در تغییر شکل اطراف تونل با افزایش سختی درزه رخ می دهد. همچنین مشخص شده است که تونل های کم عمق تحت تأثیر بارهای زلزله بیشتر مستعد آسیب می باشند.

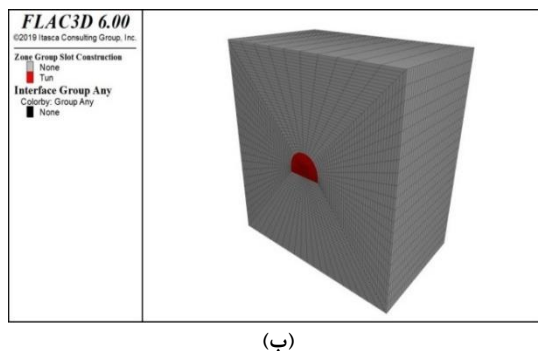
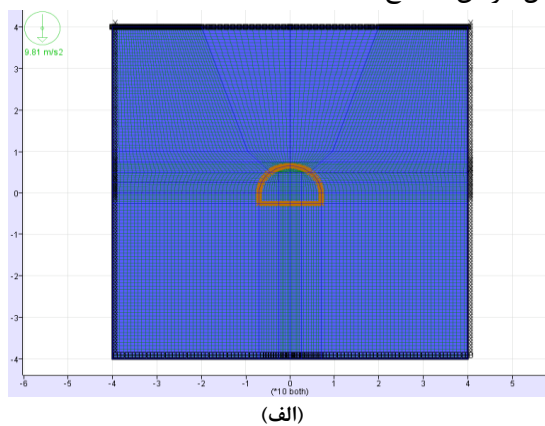
حاجی عزیزی و هاشمی [۱۲] به مقایسه مدل های دوبعدی و سه بعدی برای توده سنگ های سخت و بدون درزه در حالت استاتیکی پرداختند. آنها در مقاله خود به یک رابطه بین جابجایی اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه بعدی دست پیدا کردند. اسدی زاده و رحمان نژاد [۱۳] در تحقیق خود به کمک روش المان مجزا در حالت سه بعدی به کمک نرم افزار ۳DEC تغییرات مقاومت حداکثر نسبت به تغییرات شیب درزه ها و گام یا قفل شدگی مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از مدل سازی سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل سازی دوبعدی UDEC را مورد مقایسه قرار دادند، آنها در نتایج خود بیان کردند که متوسط، واریانس و انحراف از معیار خطا در مدل سه بعدی کمتر از مدل دوبعدی است. از آنجاکه مدل سه بعدی شرایط آزمایش مدل فیزیکی را به صورت کامل تری مدل می کند، می توان مشاهده کرد که نتایج این تحقیق نزدیک بودن نتایج مدل سه بعدی و آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج مدل دوبعدی را نشان می دهد. همچنین چنانچه طهماسبی و همکاران [۱۴] در مطالعه ای که به صورت موردی بر روی تونل های

## ۲- مدل‌سازی عددی

در روش تفاضل محدود هیچ نوع ماتریسی تشکیل نمی‌شود لذا محدودیت‌های کمتری در این روش وجود دارد. همچنین این روش، اجازه تحلیل جابه‌جایی بزرگ را به کاربر می‌دهد. از جمله نرم‌افزارهایی که بر اساس روش تفاضل محدود کار می‌کند، FLAC2D و FLAC3D است. در این تحقیق برای انجام مدل‌سازی‌های دوبعدی از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D ورژن ۸ و برای آنالیزهای سه‌بعدی از FLAC3D ورژن ۶ استفاده شده است [۱۹]. در شکل ۱ شرایط مرزی، دامنه‌های محاسباتی و سطح مقطع تونل در هر دو نرم‌افزار نشان داده شده است.

به‌منظور اطمینان از عدم تأثیر مرزها بر رفتار ناشی از حفاری توده سنگ، ابعاد مدل ایجاد شده بایستی مقداری از ابعاد پیشنهادی توسط رودریگز [۲۰] بیشتر باشد. ارتفاع مدل به اندازه  $(H + 4D)$  و طول مدل  $(H + 3D)$  و عرض مدل (نصف مدل)  $3H$  در نظر گرفته شده است که  $H$  عمق مرکز تونل و  $D$  قطر تونل است.

بنابراین در مدل سه‌بعدی، عرض، طول و ارتفاع مدل ساخته شده به ترتیب برابر با ۸۰، ۵۰ و ۸۰ متر است. درحالی‌که بعد حفاری تونل در مدل دوبعدی وجود ندارد و مدل کرنش مسطح است.



شکل ۱: مدل محاسباتی الف (مدل دوبعدی ب) مدل سه‌بعدی.

پایداری فضاهای بزرگ زیرزمینی از مسائل مهم مهندسی ژئوتکنیک است و چنانچه ملاحظات طراحی مناسبی به‌منظور پایداری این فضاها در نظر گرفته نشوند خسارات مالی و جانی بسیاری را تحمیل خواهند کرد. گاهی تونل‌ها در محیط‌هایی سنگی احداث می‌شوند که به علت ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود، مقاومت توده‌سنگ به‌طور چشمگیری افت کرده و پایداری تونل به خطر می‌افتد و بنابراین برای پایداری‌سازی تونل‌ها نیاز به روش‌ها و تجهیزات نگهداری است [۱۸]. بنابراین در این تحقیق، تأثیر مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در تحلیل‌های استاتیکی و لرزه‌ای در توده سنگ‌های درزه‌دار مورد مقایسه قرار می‌گیرد. تاکنون مطالعات عددی زیادی توسط پژوهشگران مختلف در زمینه تحلیل پایداری تونل در توده سنگ‌های بدون درزه و درزه‌دار انجام شده است. این تحلیل‌ها عموماً با توجه به امکانات و مهارت محقق یا در حالت دوبعدی و یا سه‌بعدی انجام شده است. در این تحقیق انتظار می‌رود خواننده متوجه اختلاف نتایج ارائه شده به کمک روش‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی بشود. چراکه علیرغم سادگی بیشتر در انجام تحلیل پایداری با کمک نرم‌افزارهای دوبعدی، اما تکیه بر نتایج این تحلیل در هر محیطی جوابگو نیست و انتخاب سیستم نگهداری با تکیه بر این نوع تحلیل، گاهی می‌تواند بسیار محافظه‌کارانه بوده و هزینه‌های گزافی برای پروژه در پی داشته باشد.

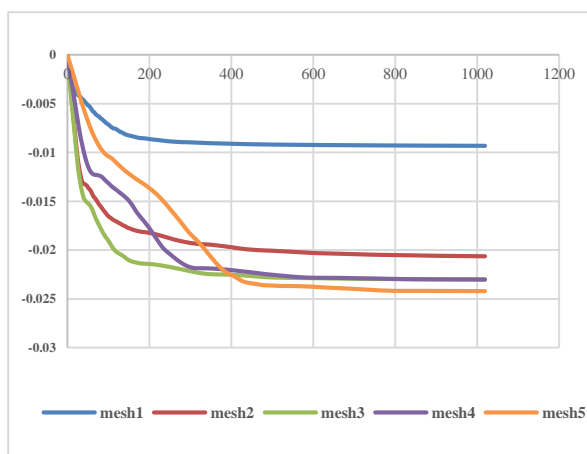
در این مطالعه با در نظر گرفتن رویکرد شبه استاتیکی، تأثیر زاویه شیب درزه، تأثیر تعداد درزه و اثر شتاب‌های لرزه‌ای افقی، عمودی و ترکیب این دو در تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی بررسی شده است. آنالیزها با استفاده از مدل‌سازی در محیط تفاضل محدود FLAC و FLAC3D انجام شده است. ابتدا تحلیل پایداری را در حالت استاتیکی برای توده سنگ‌های سخت و سپس با ایجاد درزه در جهت ضعیف‌تر کردن توده سنگ، مرحله به مرحله تأثیر وجود ناپیوستگی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی می‌شود. در ادامه، تحلیل لرزه‌ای برای شرایط ذکر شده در قبل تکرار می‌شود و در هر تحلیل تغییر مکان‌های اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه‌بعدی مقایسه می‌گردد. برای بررسی دقیق‌تر همراه با تغییرات مدول یانگ، اثر افزایش درزه‌ها در حالت دوبعدی و سه‌بعدی در بخش دیگری از این پژوهش، ارائه شده است. در بخش پایانی، یک مطالعه موردی جهت تصدیق نتایج انجام شده است.

درزه ها ایجاد نمی شود و محیط به صورت کاملاً پیوسته تا مرحله رسیدن به تعادل اولیه اجرا می شود. در مرحله بعد در محل درزه ها اینترفیس ایجاد می گردد و خواص مربوط به درزه به آنها اختصاص می یابد و در نهایت تا رسیدن به تعادل دوباره مدل اجرا می شود تا محیط درزه دار به تعادل اولیه برسد. تمامی این اجراهای اولیه با مدل موهر-کولمب انجام شده است.

## ۲-۱- تحلیل حساسیت مش

انتخاب دقیق اندازه، نوع و شکل مش ها یکی از اساسی ترین مراحل مدل سازی مش بندی مدل است که دقت نتایج به آن بسیار حساس است. در این پژوهش ۵ نوع مش بندی متفاوت تولید شده است و یک نقطه مانیتور در تاج تونل مدنظر قرار گرفته است. مقدار نهایی جابجایی تاج تونل در این تحلیل حساسیت، حائز اهمیت است. در مش شماره ۱، تعداد زون ها ۵۱۸ و تعداد گره ها ۱۰۷۶، در مش شماره ۲ مقادیر به ترتیب ۱۶۴۰ و ۳۳۳۶، برای مش شماره ۳، ۲۹۰۰ و ۵۸۷۲، در مش شماره ۴، تعداد زون ها ۶۱۶۰ و تعداد گره ها ۱۲۴۱۸ و در مش شماره ۵ این مقادیر به ترتیب ۱۴۶۰۰ و ۲۹۳۷۲ است.

مش شماره ۱ همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود خطای زیادی ایجاد می کند. با ریزتر کردن مش ها مشاهده می شود که مقادیر نهایی برای مش شماره ۳، ۴ و ۵ تقریباً به یک عدد میل می کند. شبکه بندی انتخاب شده در این تحقیق، مش شماره ۳ است که از نظر دقت نتایج و بهینه بودن ران تایم قابل قبول است.



شکل ۲: آنالیز حساسیت مش برای مش بندی به کار گرفته شده در این تحقیق.

اما سایر خصوصیات دو مدل باهم یکسان است. بایستی توجه داشت که روباره مدل ساخته شده به صورت دستی محاسبه شده و با اعمال بار سطحی گسترده به مرزهای بالای مدل وارد شده است. همچنین، کف مدل در جهت عمودی و مرزهای جانبی در جهت عمود بر سطح تثبیت شده است. هندسه تونل به صورت نعل اسبی، در مرکز مدل ارتفاع ۹ متر و عرض ۱۴ متر در نظر گرفته شده است.

از مدل الاستیک خطی برای مدل سازی سیستم نگهداری تونل و از مدل الاستوپلاستیک که از معیار گسیختگی موهر-کولمب تبعیت می کند؛ برای مدل سازی تونل استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات توده سنگ و سیستم نگهداری تونل آورده شده است. برای اینکه در مدل سازی ها، داده های واقعی به کار گرفته شود، از داده های تونل آزادراه خرم آباد- پل زال استفاده شده است. این داده ها از گزارش ژئوتکنیک تونل آزادراه خرم آباد- پل زال اتخاذ شده است [۲۱]. طبق این گزارش، داده های توده سنگ حاصل از خروجی نرم افزار راکلب است.

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی مدل موهر-کولمب بر مبنای گزارش زمین شناسی مهندسی تونل [۲۱].

سیستم نگهداری	توده سنگ	واحد	پارامتر
۲۶۰۰	۲۶۰۰	Kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص
۲۸	۲۸	GPa	مدول یانگ
۰٫۲۵	۰٫۲۵	-	ضریب پواسون
	۱۰	KPa	چسبندگی
	۳۵	degree	زاویه اصطکاک داخلی
	۱۰	cm	ضخامت شاتکریت

پارامترهای درزه به صورت سختی نرمال ۱۰ گیگا پاسکال، سختی برشی ۱ گیگا پاسکال، زاویه اصطکاک ۱۰ درجه و چسبندگی صفر کیلو پاسکال است. در همه مدل های انجام شده، فاصله بین درزه های مختلف، ثابت و برابر ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. به منظور شبیه سازی درزه ها با زوایا و تعداد مختلف، امتداد و شیب درزه ها به هنگام ساخت هندسه، به گونه ای اجرا می شود که محل تقاطع درزه با محیط تونل و وضعیت مش بندی دقیق باشد. تراکم مش در اطراف محیط تونل بیش از نقاط دور از تونل در نظر گرفته شده است. همچنین با اختصاص یک گروه مشخص به هر درزه، می توان در هنگام ایجاد درزه با المان اینترفیس راحت تر عمل کرد. در مرحله تعادل اولیه، هیچ گونه المان اینترفیسی برای

## ۳- نتایج مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل‌ها

## ۳-۱- تحلیل استاتیکی

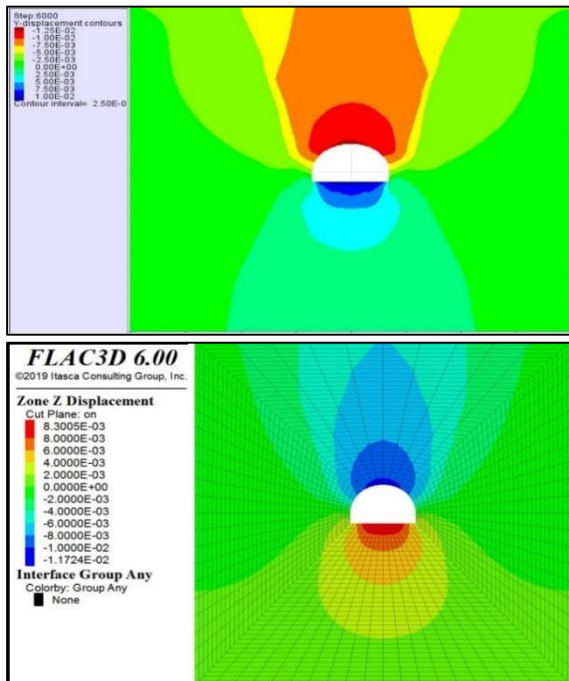
در این پژوهش ابتدا تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی استاتیکی، زمانیکه توده سنگ بدون درزه و ناپیوستگی است، انجام می‌شود. در شکل ۳، کانتور جابه‌جایی در اطراف تونل در هر دو مدل نشان داده شده و در جدول ۲، مقدار ماکزیمم جابه‌جایی در تاج، کناره و کف تونل ارائه شده است.

جدول ۲: ماکزیمم جابه‌جایی نرمال اطراف تونل (میلی‌متر) در تحلیل استاتیکی در توده سنگ سخت و بدون درزه.

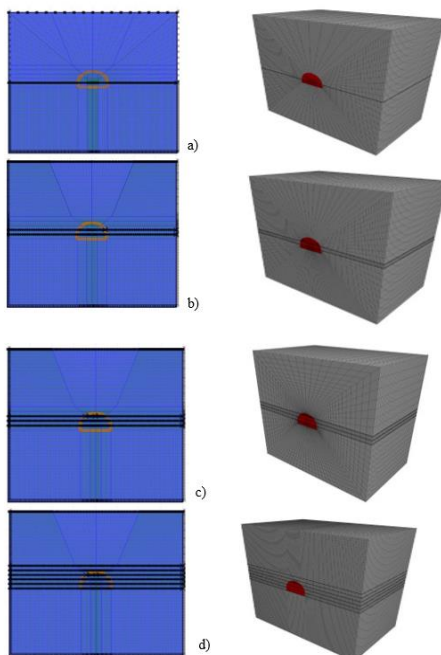
ردیف	نقاط تحلیل	تاج تونل	کناره تونل	کف تونل
۱	دوبعدی	۱۲٫۶	۹٫۸	۱۱٫۷۸
۲	سه‌بعدی	۱۱٫۷	۷	۸٫۱

در گام بعدی و در مدل‌سازی بعدی به جهت ضعیف کردن توده سنگ، یک عدد درزه تک در توده سنگ، مدنظر قرار می‌گیرد؛ اما از آنجایی‌که به جهت درزه نیز باید توجه شود و لازم است اثر نحوه قرار گرفتن درزه نیز مورد ارزیابی قرار گیرد از این‌رو در این بخش سه نوع درزه تک افقی، قطری و عمودی مدل‌سازی می‌شود و تأثیر هر کدام بر تغییر مکان‌های اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی می‌گردد. در حالت درزه افقی، درزه، موازی سطح افق و دقیقاً از مرکز تونل عبور می‌کند. در حالت درزه قطری، درزه با مشخصات درزه افقی اما با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق مدل‌سازی شده است. در یک حالت دیگر برای مقایسه تأثیر جهت درزه در توده سنگ یک درزه قائم نیز مدل‌سازی شده که تفاوت نتایج را در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی در جدول ۳، شاهد خواهیم بود.

در ادامه این پژوهش درزه‌ها به صورت افقی در مدل‌سازی مدنظر قرار می‌گیرند. برای بررسی تأثیر درزه در مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی، تعداد درزه‌ها را افزایش داده و روند تغییرات جابه‌جایی اطراف تونل ارزیابی می‌شود؛ بنابراین وقتی که توده سنگ دارای دو درزه افقی، سه درزه افقی و شش درزه افقی است نیز مدل‌سازی را انجام داده و نتایج در حالت دوبعدی و سه‌بعدی در جدول ۴ ارائه می‌شود.



شکل ۳: کانتور  $Y_{dis}$  در حالت دوبعدی (تصویر بالا) و سه‌بعدی (تصویر پایین) در توده سنگ بدون درزه.



شکل ۴: شماتیک درزه‌ها در حالت دوبعدی (تصاویر سمت چپ) و حالت سه‌بعدی (تصاویر سمت راست). (a) یک درزه، (b) دو درزه، (c) سه درزه و (d) شش درزه.

مقدار جابجایی در اطراف تونل بیشتر می شود. همچنین دیده می شود در حالتی که شش درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، از آنجایی که با افزایش تعداد درزه ها، توده سنگ ضعیف تر می شود و بعد حفاری تونل با وجود این درزه ها ضعیف تر عمل می کند و به تشدید نتایج تغییر مکان اطراف تونل در تحلیل سه بعدی کمک می کند.

جدول ۴: ماکزیمم جابه جایی نرمال (میلی متر) اطراف تونل در تحلیل استاتیکی در توده سنگ با دو، سه و شش درزه افقی.

تعداد درزه	نقاط تحلیل	تاج	کناره	کف
دو درزه	دوبعدی	۱۲٫۷	۱۰٫۹	۱۲٫۴
	سه بعدی	۱۳٫۱	۹٫۶	۸٫۶
سه درزه	دوبعدی	۱۷٫۵	۱۸٫۵	۱۲٫۵
	سه بعدی	۲۱٫۸	۲۱	۱۵٫۳
شش درزه	دوبعدی	۲۲٫۵	۱۸٫۶	۱۲٫۵
	سه بعدی	۲۶٫۲	۲۱٫۷	۱۶٫۸

برای مقایسه واضح تر، نمودار تغییرات ماکزیمم جابجایی نرمال در تاج تونل، در تحلیل دوبعدی و سه بعدی برای حالت های مختلف بدون درزه، یک درزه تا شش درزه افقی در شکل ۷، آورده شده است. در نمودار مربوط به حالت سه بعدی مشاهده می شود که ابتدا با افزایش تک درزه تغییر مکان با شیب ملایم افزایش می یابد اما به تدریج با بیشتر شدن درزه ها تغییر مکان ها نیز بیشتر می شود و تغییرات جابجایی برای محیط های بیشتر از دو درزه در حالت سه بعدی بیشتر از دوبعدی است. این نتایج حاکی از این است که مدل سازی سه بعدی تأثیر درزه ها را بهتر نشان می دهد. به عبارتی دیگر با ضعیف تر شدن توده سنگ و افزایش تعداد درزه ها، جبهه کار تونل ضعیف تر شده و جابجایی بیشتری در اطراف تونل رخ می دهد. در شکل های ۵ و ۶ کانتورهای جابجایی در درزه های مختلف در حالت دوبعدی و سه بعدی به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۳: ماکزیمم جابه جایی نرمال (میلی متر) اطراف تونل در تحلیل استاتیکی در توده سنگ با یک درزه تک (joint single) در جهات مختلف.

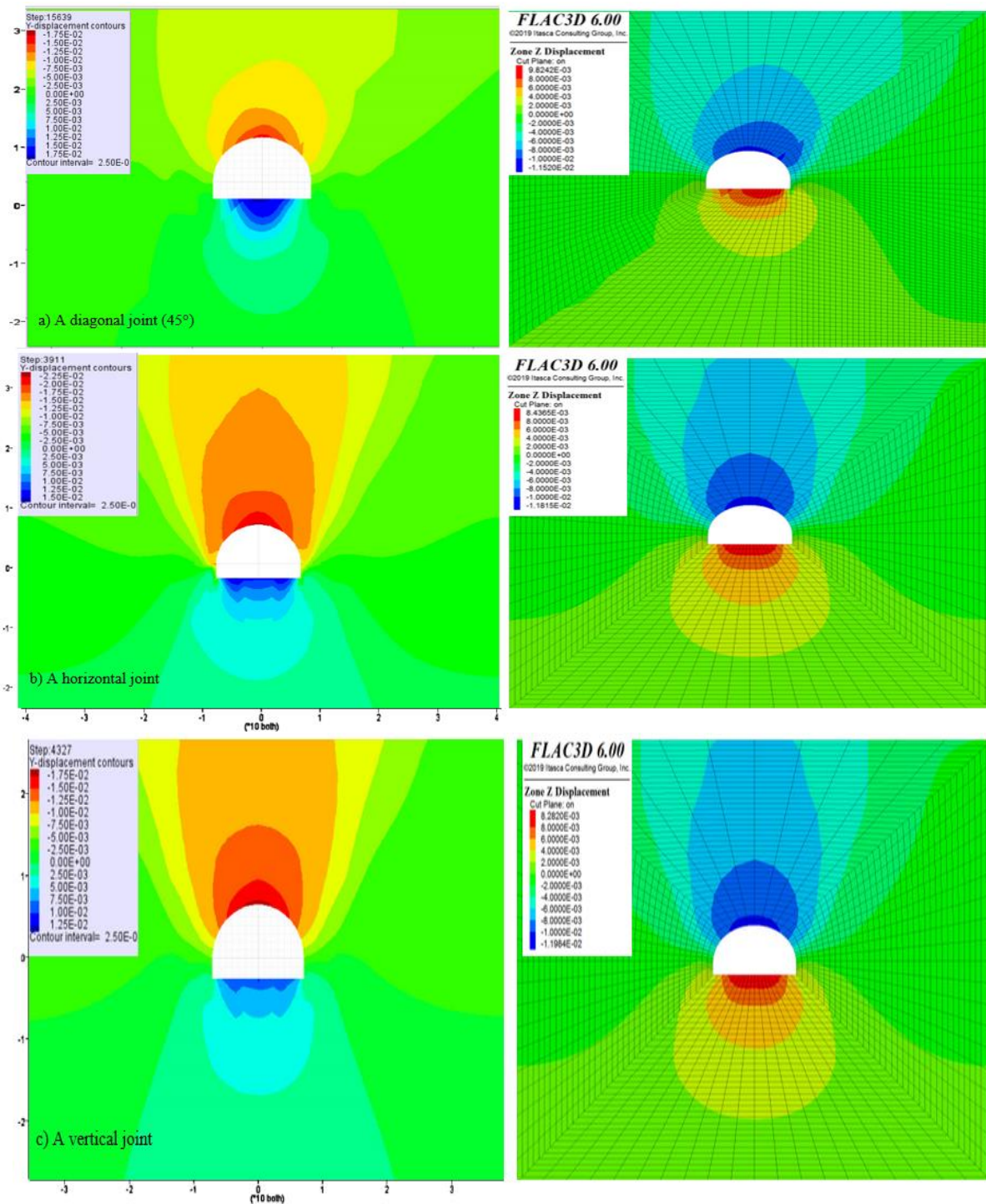
نوع درزه	مدل سازی	تاج تونل	کناره تونل	کف تونل
درزه افقی	دوبعدی	۲۲٫۳	۱۶	۱۳٫۶
	سه بعدی	۱۱٫۸	۷٫۷	۸٫۳
درزه قطری	دوبعدی	۱۷٫۶	۹٫۳۴	۱۸٫۳
	سه بعدی	۱۱٫۵	۹٫۴	۸٫۶
درزه قائم	دوبعدی	۱۸٫۷	۹٫۴	۹٫۵
	سه بعدی	۱۲	۷٫۱	۸٫۱

در جدول ۳ مشاهده می شود که در همه نقاط اطراف تونل، مقادیر جابجایی در تحلیل دوبعدی بیشتر از سه بعدی است. همچنین از نتایج تحلیل سه بعدی که تحلیل واقع بینانه تری ارائه می دهد، این نتیجه دریافت می شود که علیرغم تأثیر مهمی که جهت درزه می تواند بر تغییر مکان اطراف تونل داشته باشد اما در این مدل سازی ها به دلیل اینکه سربار تونل ۳۵۰ متر است و یک تونل های عمیق محسوب می شود؛ همچنین از آنجایی که در این مطالعه فقط یک درزه تک برای مطالعه اثر شیب درزه مدنظر قرار گرفته است، بنابراین جابجایی های اطراف تونل در هر سه جهت در تحلیل سه بعدی چندان متفاوت به نظر نمی رسد.

همان طور که از نتایج جدول های ۲ و ۳ مشخص است تغییر مکان اطراف تونل در حالت دوبعدی بیشتر از حالت سه بعدی است که خود دلیلی منطقی و قابل توجیه دارد. چراکه در حالت سه بعدی که جبهه کار تونل، یک توده سنگ سخت و بدون درزه یا با درزه خیلی کم است، همانند یک سازه نگهبان از ایجاد تغییر مکان های بیشتر جلوگیری می کند؛ بنابراین در مدل سازی دوبعدی به جهت اینکه درزه ای وجود ندارد؛ تغییر مکان های اطراف تونل بیشتر از حالت سه بعدی است.

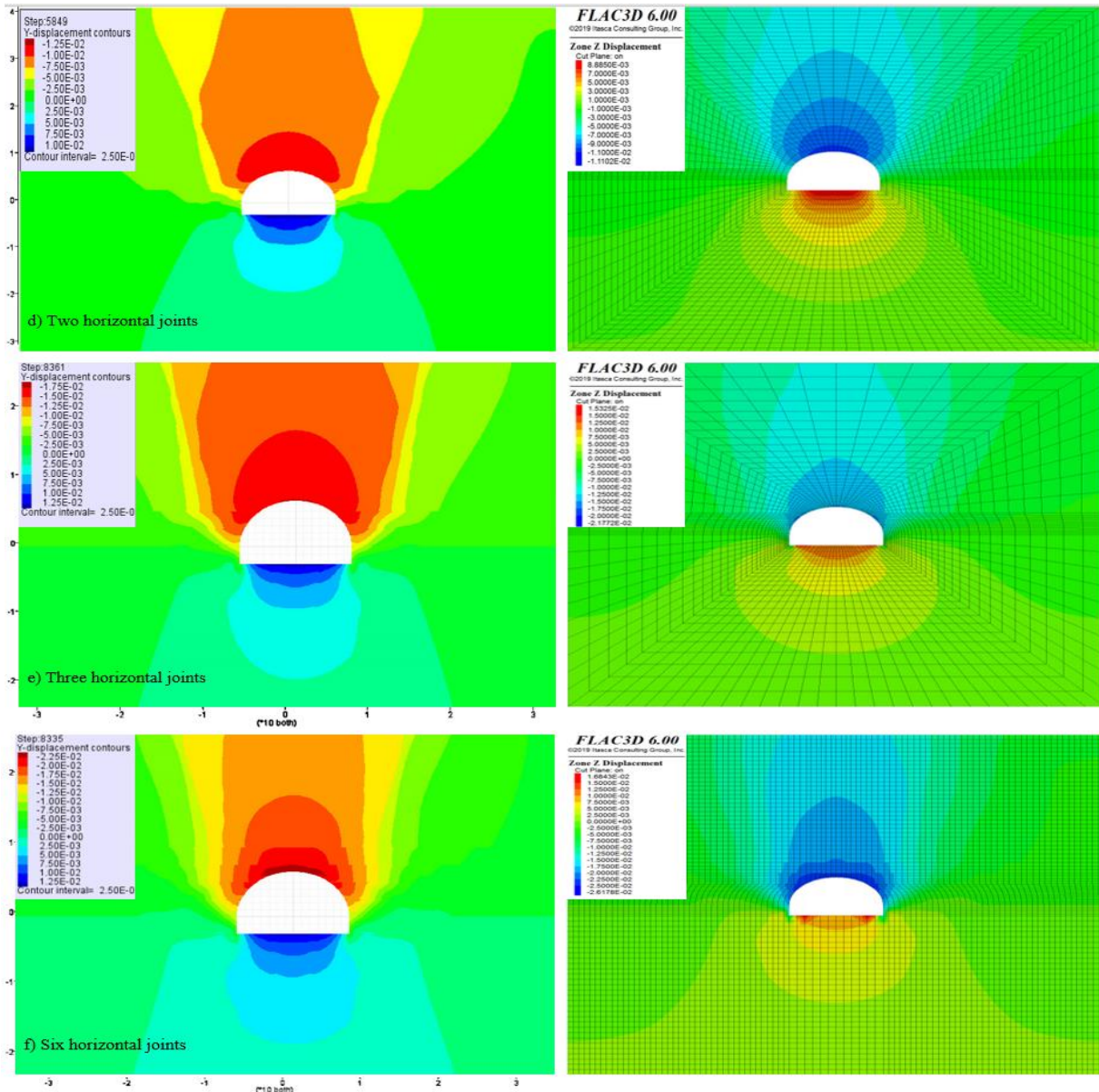
در جدول ۴، مدل سازی برای حالت دو، سه و شش درزه انجام شده است، مشاهده می شود که با افزایش تعداد درزه،



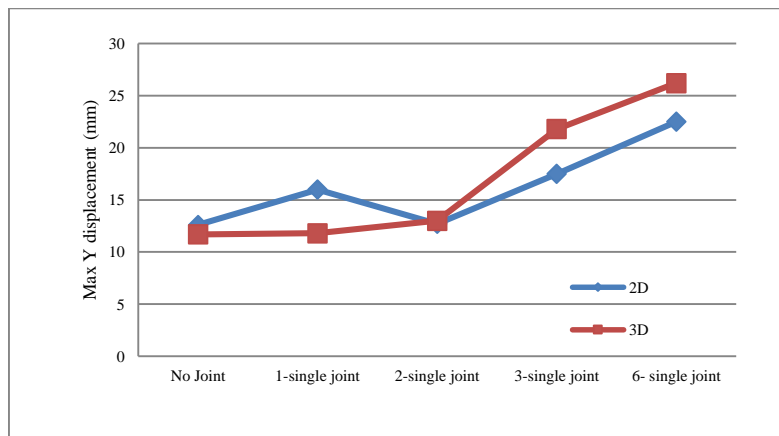


شکل ۵: کانتورهای جابجایی در آنالیز استاتیکی در حالت دوبعدی (تصاویر سمت چپ) و حالت سه‌بعدی (تصاویر سمت راست). (a) یک درزه قطری (b) یک درزه افقی، (c) یک درزه قائم.





شکل ۶: کانتورهای جابجایی در آنالیز استاتیکی در حالت دوبعدی (تصاویر سمت چپ) و حالت سه بعدی (تصاویر سمت راست). (a) دو درزه افقی (b) سه درزه افقی، (c) شش درزه افقی.



شکل ۷: ماکزیمم جابجایی سقف تونل در تحلیل استاتیکی در حالت دوبعدی و سه بعدی.

## ۳-۲- تحلیل لرزه‌ای

به‌طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهند که اگر شتاب افقی بیشینه تا  $0.2g$  باشد، آسیبی به تونل وارد نمی‌شود و چنانچه این شتاب بین  $0.2g$  تا  $0.5g$  باشد، صدمات خفیف و قابل تعمیر را شاهد خواهیم بود و از شتاب  $0.5g$  به بالا، انتظار آسیب‌های شدیدتری وجود دارد [۲۲]. در نرم‌افزار Flac به کاربران اجازه داده می‌شود که ضرایب زلزله را در جهت افقی یا عمودی مشخص نمایند. ضرایب زلزله بدون بعد هستند که ماکزیمم شتاب زلزله را به‌عنوان کسری از شتاب زمین ارائه می‌دهند. مقادیر ضرایب در محدوده‌های  $0.1$  تا  $0.3$  هستند. نیروی لرزه‌ای در مدل به‌عنوان یک نیروی حجمی اضافه برای هر المان است که به‌صورت برداری به نیروی حجمی در جهت پایین که مربوط به ثقل است، اضافه می‌شود؛ درحالی‌که آنالیزها با بارهای لرزه‌ای در حال انجام می‌باشند. آنالیز چندمنظوره با استفاده از ترکیبات و جهات مختلف افقی و عمودی ضرایب لرزه‌خیزی به‌منظور مطالعه اثر جهت نیروی لرزه‌ای روی نتایج آنالیزها به کار برده می‌شود [۲۳، ۲۴]. برای همه مدل‌ها آنالیز چندمنظوره به‌صورت زیر انجام شده است:

- ضریب زلزله در جهت افقی،  $H=0.3$
- ضریب زلزله در جهت قائم،  $V=-0.3$
- ضرایب زلزله در هر دو جهت افقی و قائم،  
 $V=-0.2, H=0.3$

مشابه تحلیل‌های انجام شده در حالت استاتیکی، در تحلیل شبه استاتیکی نیز آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی برای توده سنگ بدون درزه، یک درزه، دو درزه، سه درزه و شش درزه انجام شده است. برای بررسی تأثیر جهت بار لرزه‌ای، در سه جهت افقی، عمودی و ترکیبی (اعمال ضریب شتاب افقی و عمودی به‌طور هم‌زمان) ضریب شتاب به مدل اعمال می‌گردد و نتایج تغییرات جابجایی در دیواره، کف و تاج تونل برای هر یک از حالت‌ها در جدول ۵ جمع‌آوری شده است.

در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در صورتی که یک درزه افقی، قائم و قطری به‌صورت مجزا مدل‌سازی شود؛ تغییر مکان‌های اطراف تونل برای حالت دوبعدی بسیار باهم متفاوت بوده، طوری که در حالت درزه قطری مقدار جابجایی‌ها به‌ویژه در تاج و کف تونل با حالت درزه افقی و درزه قائم اختلاف واضحی دارد، اما در حالت سه‌بعدی در هر سه حالت (درزه افقی، درزه قائم و درزه قطری) تقریباً مقدار جابجایی‌ها مساوی بوده و اختلاف نتایج در حد دهم میلی‌متر

است. در این تحقیق از آنجایی که تونل عمیق است، انتظار می‌رود در حالتی که فقط یک درزه در توده سنگ وارد می‌شود؛ تغییرات شیب درزه تفاوت چندانی در مقادیر جابجایی‌های اطراف تونل ایجاد نکند؛ اما این موضوع در تحلیل‌های دوبعدی برآورده نمی‌شود که خود نشان از ضعف این نوع تحلیل در این رابطه است.

نتایج برای حالت دو درزه، سه درزه و شش درزه افقی در حالت لرزه‌ای نشانگر این موضوع است که با افزایش تعداد درزه‌ها جابه‌جایی اطراف تونل بزرگ‌تر می‌گردد؛ یعنی هر چه سنگ ضعیف‌تر (با بیشتر شدن تعداد درزه‌ها) می‌شود جابجایی اطراف تونل افزایش می‌یابد. در تحلیل لرزه‌ای که با کمک تحلیل شبه استاتیکی انجام شده است، نیز همانند تحلیل‌های استاتیکی، با افزایش تعداد درزه، جابجایی در تحلیل سه‌بعدی نسبت به حالت دوبعدی بزرگ‌تر است، ولی این اختلاف در مقادیر، برای تحلیل لرزه‌ای و به‌ویژه برای تحلیل سه‌بعدی فاحش‌تر است؛ زیرا انتقال موج در محیط، ماهیت سه‌بعدی دارد و تحلیل سه‌بعدی در این مورد عملکرد قوی‌تری دارد. در جدول ۵ همچنین نتایج جابجایی اطراف تونل برای سه ضریب شتاب که به‌صورت جداگانه و ترکیب آنها باهم در جهت افقی و قائم به مدل اعمال شده است نشان می‌دهد که در هر جهتی که شتاب اعمال می‌شود نتایج یکسانی حاصل شده است. برای درک بهتر روند تغییرات، ماکزیمم جابجایی سقف تونل را در هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی، در قالب شکل ۸ که مربوط به اعمال ضریب شتاب لرزه‌ای در جهت افقی است، ارائه شده است. تحلیل‌های فوق مشخص می‌کند، توده سنگ‌های سخت و بدون درزه حساسیت کمتری به اثرات لرزه‌ای نسبت به یک محیط درزه‌دار نشان می‌دهند. همچنین مشاهده می‌شود در توده سنگ بدون درزه اختلاف چندانی بین مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی نیست ولی در توده سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار این اختلاف محسوس و بین  $30$  تا  $50$  درصد است.

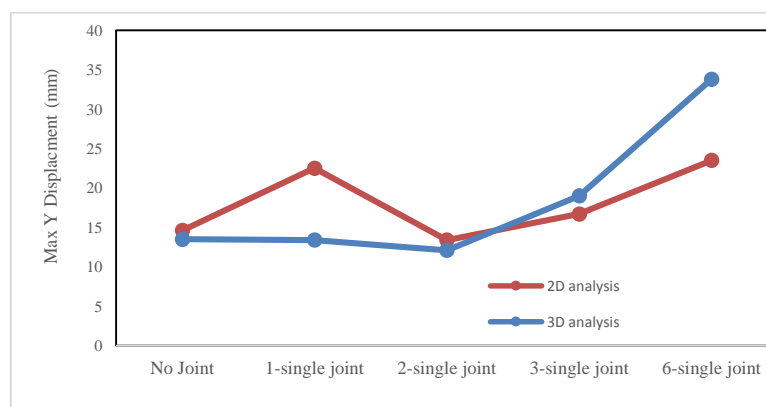
بنابراین به‌عنوان یک تفسیر کلی، از داده‌های حاصل از جداول ۳، ۴ و ۵ می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش تعداد درزه در هر دو حالت استاتیکی و لرزه‌ای، جابجایی اطراف تونل افزایش می‌یابد، زیرا درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها موجب تضعیف پارامترهای توده سنگ می‌شوند.

همچنین مشاهده می‌شود در توده سنگ‌های قوی و بدون درزه یا با درزه‌های کم، نتایج حالت استاتیکی با شبه استاتیکی چندان متفاوت نیست؛ اما با ضعیف‌تر شدن توده

سنگ و باوجود درزه های بیشتر، هم اختلاف نتایج تحلیل استاتیکی با شبه استاتیکی بیشتر می شود و هم اختلاف نتایج است.

جدول ۵: ماکزیمم جابه جایی نرمال (میلی متر) اطراف تونل در تحلیل لرزه ای در توده سنگ سخت و بدون درزه، یک درزه، دو درزه، سه درزه و شش درزه افقی.

تعداد درزه ها	دو بعدی			سه بعدی			نقاط / نوع شتاب
	تاج تونل	کناره تونل	کف تونل	تاج تونل	کناره تونل	کف تونل	
بدون درزه	۱۴،۶	۱۰،۶	۱۶،۵	۱۳،۵	۸،۸	۲۰	اعمال شتاب افقی
	۱۴،۸	۱۱،۲	۱۴،۶	۱۳،۸	۹،۴	۱۵،۵	ضریب شتاب قائم
	۱۴،۶	۱۰،۵	۱۵	۱۳،۷	۸،۶	۱۷،۳	ضریب شتاب ترکیبی
یک درزه قطری	۲۵	۱۰،۹	۱۹	۱۲،۱	۱۱،۳	۱۹	شتاب افقی
	۲۶	۱۱،۱	۱۸،۸	۱۲،۹	۱۲،۳	۱۵،۷	ضریب شتاب قائم
	۲۶،۸	۱۰،۹۷	۱۸،۹	۱۲،۶	۱۱،۳	۱۷،۲	ضریب شتاب ترکیبی
یک درزه قائم	۱۶،۷	۹،۵۸	۱۲،۳	۱۳،۸	۸،۷	۱۹،۸	اعمال شتاب افقی
	۱۷،۴	۹،۷	۱۱،۲	۱۳،۸	۴۵،۹	۱۵،۳	ضریب شتاب قائم
	۱۶،۹	۹،۵	۱۱،۵	۱۴	۸،۵	۱۷،۲	ضریب شتاب ترکیبی
یک درزه افقی	۲۲،۵	۱۶،۵	۲۵	۱۳،۴	۸،۷	۲۰	اعمال شتاب افقی
	۲۲،۷	۱۶،۸	۲۰،۹	۱۳،۸	۹،۷	۱۶	ضریب شتاب قائم
	۲۲،۶	۱۶،۲	۲۲،۵	۱۳،۷	۸،۷۸	۱۷،۷۸	ضریب شتاب ترکیبی
دو درزه افقی	۱۳،۴	۱۱،۴	۱۶،۲	۱۲،۱	۱۱،۳	۱۵	اعمال شتاب افقی
	۱۳،۸	۱۱،۷	۱۴،۵	۱۲،۸	۱۱،۹	۱۳،۶	ضریب شتاب قائم
	۱۳،۶	۱۱،۴	۱۵	۱۲،۶	۱۱،۱	۱۴،۲	ضریب شتاب ترکیبی
سه درزه افقی	۱۶،۷	۱۷،۸	۱۸	۱۸،۹۹	۲۹،۸	۱۹،۵	اعمال شتاب افقی
	۱۷،۵	۱۸،۴	۱۶،۲	۱۹،۹۸	۳۱،۵	۱۸،۳۸	ضریب شتاب قائم
	۱۷،۲	۱۹،۵	۱۶،۸	۱۹،۷	۳۰	۱۸،۸	ضریب شتاب ترکیبی
شش درزه افقی	۲۳،۵	۱۸،۸	۱۸،۳	۳۳،۸	۳۱،۴	۳۰	اعمال شتاب افقی
	۲۴،۲	۱۹،۳	۱۶،۲	۳۶،۵	۳۴،۳	۲۲،۶	ضریب شتاب قائم
	۲۳،۹	۱۸،۷	۱۷	۳۵،۵	۳۱،۳	۲۵،۹	ضریب شتاب ترکیبی



شکل ۸: ماکزیمم جابه جایی نرمال سقف تونل در حالت تحلیل لرزه ای با اعمال ضریب زلزله در جهت افقی.

جدول ۶: نتایج تغییر مکان اطراف تونل (سانتیمتر) در حالت دوبعدی و سه بعدی برای سه نوع سنگ با مدول یانگ متفاوت.

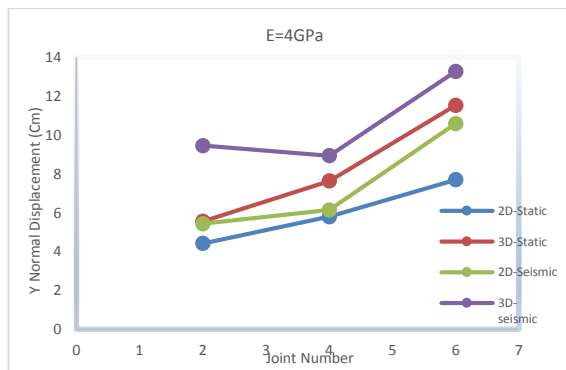
تحلیل شبه استاتیکی				تحلیل استاتیکی				تعداد درزه	مدلسازی عددی	مدول یانگ (Gpa)
دیواره چپ	دیواره راست	کف	تاج	دیواره چپ	دیواره راست	کف	تاج			
۳,۵۷	۴,۰۵	۶,۹۳	۵,۴۴	۲,۷۸	۲,۷۹	۵,۶۶	۴,۴۳	۲	E=۴	
۸,۳۱	۶,۸۷	۱۰,۱۱	۶,۱۵	۴,۶	۴,۶۲	۵,۱۹	۵,۸	۴		
۱۰,۹۲	۱۰,۵	۱۷,۲۶	۱۰,۶	۹,۲۸	۱۰,۱	۶	۷,۷۱	۶		
۲۰,۴۴	۱۳,۵۱	۱۷,۱۲	۹,۴۶	۴,۶۸	۳,۶۶	۱۱,۵۷	۵,۵۶	۲		
۸,۷	۷,۲۲	۱۶,۹۵	۸,۹۴	۵,۸	۵,۶۷	۱۲,۶۶	۷,۶۴	۴		
۲۸,۹۷	۲۵,۱	۳۷,۳۶	۱۳,۲۹	۱۲,۸۴	۱۲,۸	۲۲,۳۳	۱۱,۵۴	۶		
۷,۰۳	۸,۶۲	۵,۷۳	۳,۰۸	۲,۸۹	۲,۳۶	۲,۸۲	۲,۵۲	۲	E=۸	
۵,۳۸	۵,۰۶	۶,۳۳	۴,۸	۲,۹۹	۲,۹۹	۲,۶۳	۳,۴۷	۴		
۷,۶۹	۷,۰۵	۷,۷۶	۶,۷۲	۶,۸۲	۷,۳۴	۳,۰۴	۴,۴۶	۶		
۸,۶۳	۸,۷۲	۷,۰۸	۵,۴۱	۵,۹۸	۸,۱۴	۶,۷۰	۴,۳۹	۲		
۵,۵	۴,۵۷	۱۴,۸۹	۵,۷۷	۶,۱۴	۴,۵۶	۷,۲۱	۵,۰۲	۴		
۱۷	۱۴,۶	۱۸,۷۹	۷,۷۸	۷,۵۶	۷,۵۴	۱۰,۲۱	۷,۲۰	۶		
۳,۸۱	۴,۳۱	۳,۱۹	۲,۳۶	۱,۴۸	۱,۴۸	۱,۹۳	۱,۸۷	۲	E=۱۶	
۳,۴۷	۳,۴۸	۴,۲۹	۲,۹۸	۲,۳۵	۲,۳۵	۱,۷۶	۲,۶۲	۴		
۵,۱۶	۵,۱۳	۴,۹۸	۳,۹۷	۴,۵۹	۴,۸۶	۲,۰۴	۳,۲۴	۶		
۲,۲	۱,۸۷	۳,۸۴	۲,۲۲	۲,۷۹	۳,۷۷	۲,۰۲	۲,۱۹	۲		
۴,۲۲	۳,۵۵	۴,۸۶	۳,۶۱	۲,۸۴	۳,۱۴	۲,۴۸	۳,۰۸	۴		
۱۲,۶۴	۱۰,۷۸	۶,۶۰	۵,۸۲	۵,۶	۵,۵۲	۳,۱۹	۴,۰۹	۶		

استاتیکی و لرزه‌ای در حالت دوبعدی و سه بعدی برای تاج تونل، در هر سه سنگ ذکر شده در جدول ۶، جهت بررسی واضح‌تر به تصویر کشیده شده است.

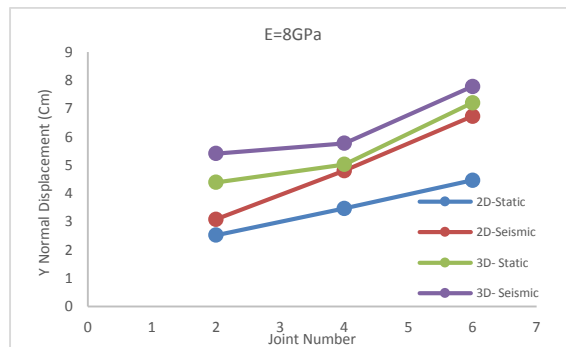
در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که نتایج تحلیل استاتیکی در حالت دوبعدی و سه بعدی برای درزه‌داری‌های متفاوت، اختلاف زیادی دارد و با افزایش تعداد درزه تغییر مکان اطراف تونل افزایش می‌یابد. در تحلیل لرزه‌ای اختلاف نتایج در مدل سازی دوبعدی و سه بعدی به مراتب بیشتر است؛ زیرا در این حالت جبهه کار تونل دارای خصوصیات مقاومتی ضعیفی بوده و جابجایی بیشتری را سبب می‌شود، اما در حالت دوبعدی که مدل سازی به صورت کرنش صفحه‌ای است و بعد حفاری وجود ندارد، تغییر مکان‌های اطراف تونل مقادیر کمتری اختیار می‌کنند. به طور مثال تغییر مکان تاج تونل در حالت استاتیکی برای مدول یانگ ۴ گیگاپاسکال، زمانی که چهار درزه در توده سنگ وجود دارد، در تحلیل دوبعدی ۵,۸

در ادامه تحقیق، برای سه نوع سنگ با مدول‌های یانگ ۴، ۸ و ۱۶ گیگاپاسکال که سایر خصوصیات درزه، پارامترهای توده سنگ و تونل در آنها مطابق مشخصات به کار رفته در مدل‌های ذکر شده در بالاست، مقایسه تغییر مکان‌های اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه بعدی انجام شده است.

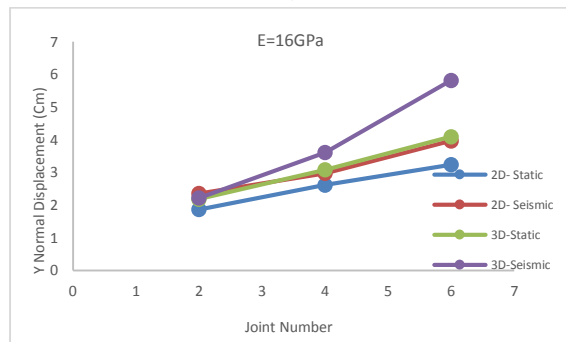
از نتایج جدول ۶ استنباط می‌شود که با افزایش تعداد درزه از ۲ به ۴ و ۶ درزه مقدار تغییر مکان اطراف تونل افزایش می‌یابد. که این نتیجه با نتایج حاصل از مدل سازی‌های ذکر شده در بخش قبلی این پژوهش مطابقت دارد؛ زیرا با افزایش تعداد درزه در توده سنگ، مقاومت سنگ تضعیف شده و جابجایی بیشتری در اطراف تونل ایجاد می‌کند. همچنین در این توده سنگ با مدول یانگ پایین، مشاهده می‌شود که تفاوت نتایج تحلیل لرزه‌ای که با کمک تحلیل شبه استاتیکی انجام شده است، با نتایج استاتیکی قابل ملاحظه است. در شکل‌های ۷.الف، ب و ج نتایج تحلیل



(الف)



(ب)



(ج)

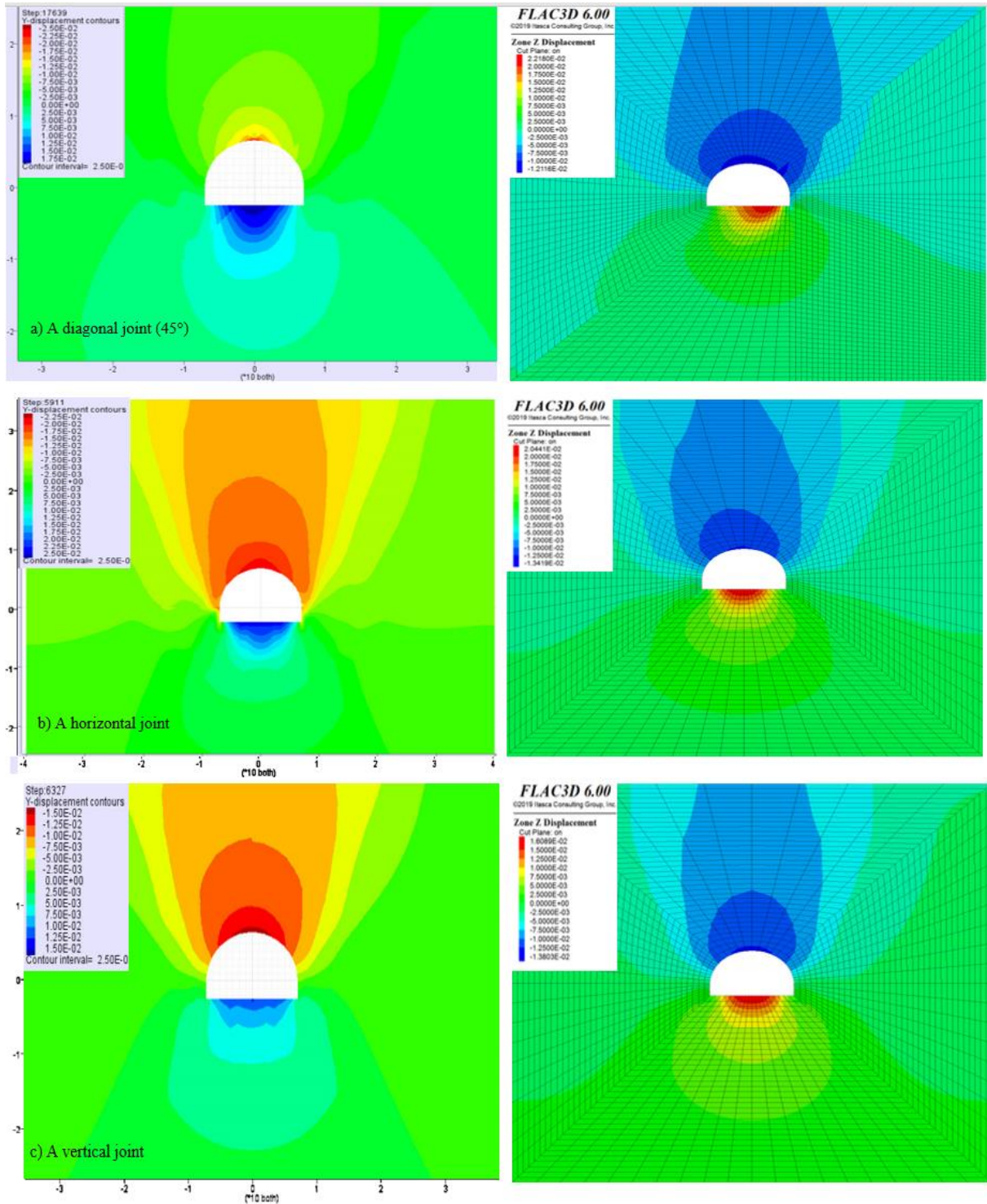
شکل ۹: جابجایی تاج تونل در اثر افزایش درزه در حالت استاتیکی و لرزه ای وقتی الف) مدول یانگ ۴، ب) مدول یانگ ۸ و ج) ۱۶ گیگاپاسگال است.

و در تحلیل سه بعدی ۷/۶۴ سانتی متر و در تحلیل لرزه ای این مقادیر به ترتیب ۶/۱۵ و ۸/۹۴ است.

وقتی مدول الاستیسیته توده سنگ به ۸ گیگاپاسگال می رسد، همان طور که در شکل ۹-ب، نشان داده شده است، مقادیر جابجایی اطراف تونل نسبت به حالت ۴ گیگاپاسگال کاهش یافته، زیرا مقاومت توده سنگ در مقابل تغییر شکل های اطراف تونل بیشتر شده و جابجایی کمتری رخ می دهد؛ اما روند تغییرات همانند شکل ۹-الف بوده و با افزایش تعداد درزه ها در تحلیل استاتیکی و لرزه ای، مقدار جابجایی ها بزرگ تر می شود. همچنین مشاهده می شود که نتایج حاصل از تحلیل سه بعدی، در حالت استاتیکی و لرزه ای بیشتر از مقادیر ارائه شده توسط مدل سازی دو بعدی است. برای نمونه در حالتی که چهار درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، جابجایی در تاج تونل در حالت استاتیکی برای تحلیل دو بعدی ۳/۴۷ و در تحلیل سه بعدی ۵/۰۲ سانتی متر است اما در همین نقطه برای آنالیز شبه استاتیکی این مقادیر به ترتیب ۴/۸ و ۵/۷۷ است که گواه اختلاف نتایج در هر دو تحلیل است.

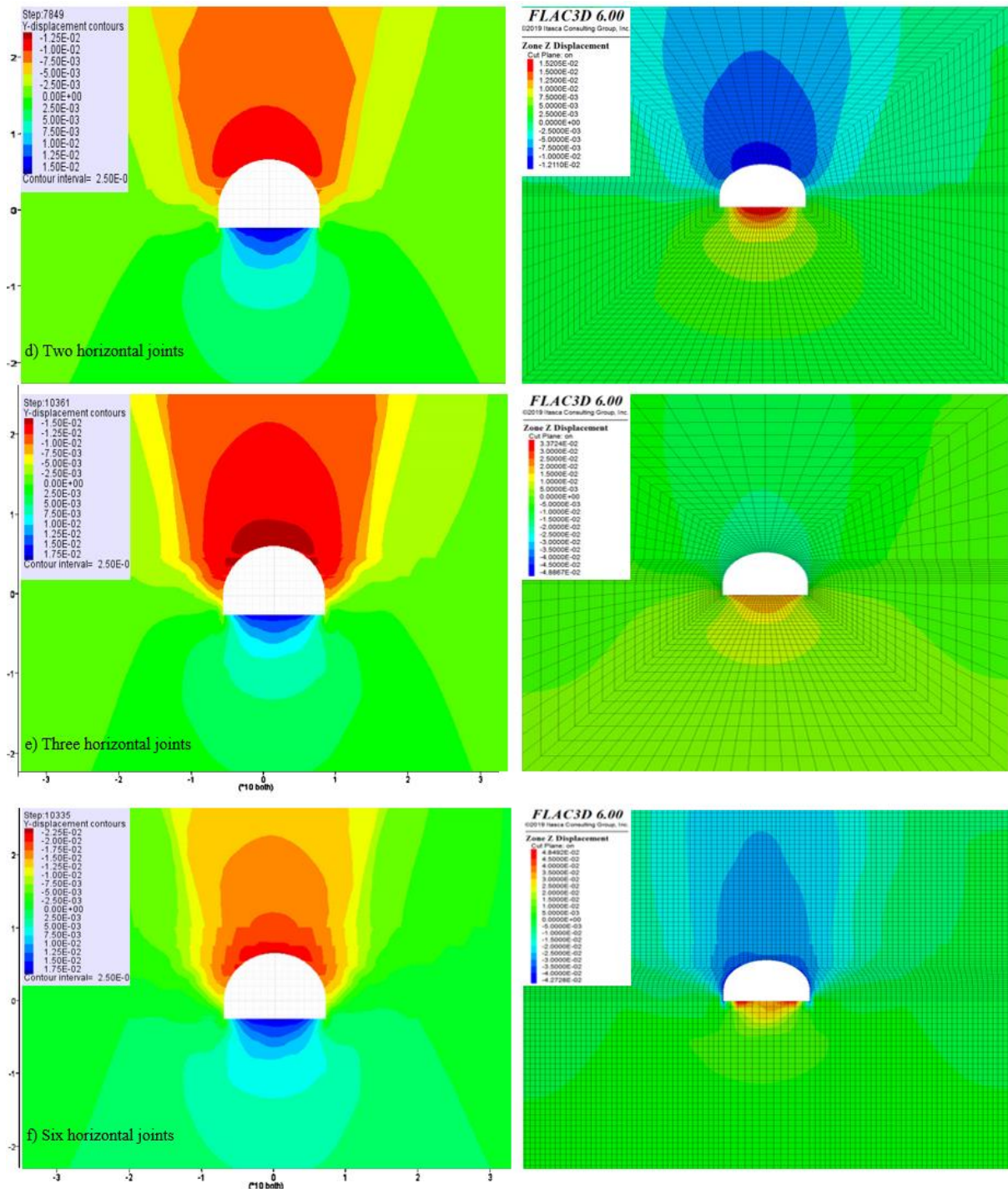
در شکل ۹-ج که مدول یانگ سنگ ۱۶ گیگاپاسگال است، جابجایی اطراف سنگ نسبت به دو حالت قبل کمتر است، زیرا سنگ مقاوم تر بوده و تغییر مکان کمتری حاصل می شود؛ اما همچنان مشاهده می شود با افزایش تعداد درزه در سنگ، تغییر مکان ها روند صعودی در همه حالات دارند؛ اما شیب تغییرات در این حالت کمتر است.





شکل ۱۰: کانتورهای جابجایی در آنالیز لرزه‌ای (شبه‌استاتیکی) در حالت دوبعدی (تصاویر سمت چپ) و حالت سه‌بعدی (تصاویر سمت راست). (a) یک درزه قطری (b) یک درزه افقی، (c) یک درزه قائم.





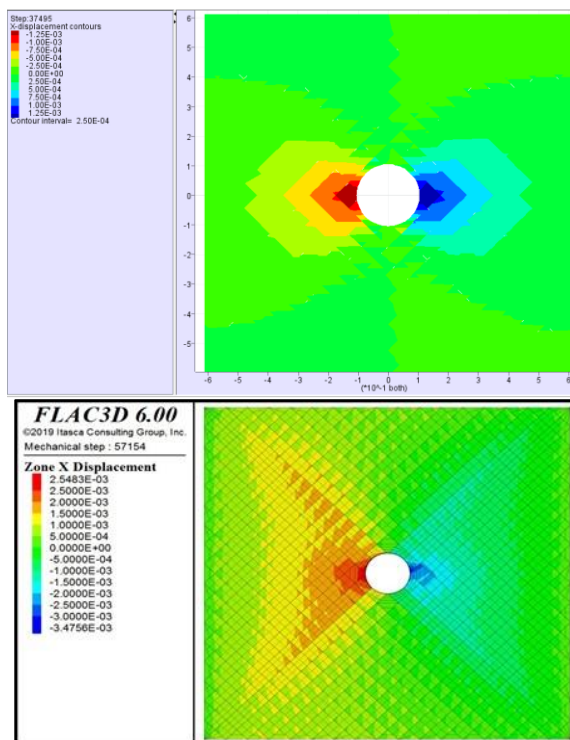
شکل ۱۱: کانتورهای جابجایی در آنالیز لرزه ای (شبه استاتیکی) در حالت دوبعدی (تصاویر سمت چپ) و حالت سه بعدی (تصاویر سمت راست). (a) دو درزه افقی (b) سه درزه افقی، (c) شش درزه افقی.

شده است. مدل شامل دودسته درزه بافاصله ۵ سانتیمتر که یکی ۴۵ درجه در جهت عقربه های ساعت و دیگری ۴۵ درجه در خلاف جهت عقربه های ساعت با افق زاویه دارند، است. تونل در مرکز مدل به قطر ۱۵/۲ سانتی است. ویژگیهای مدل در جدول ۷ آورده شده است. در پژوهش ایشان شرایط مدل میز لرزه با مدل سازی عددی که در حالت

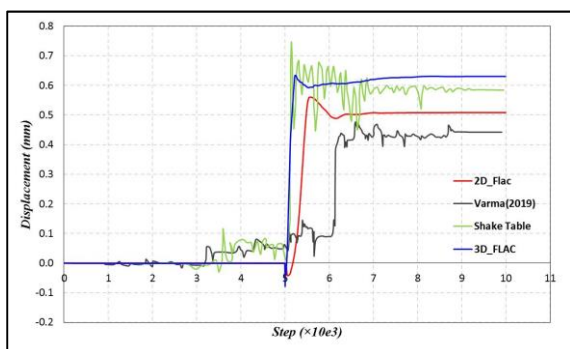
#### ۴- صحت سنجی

در این مطالعه برای صحت سنجی مدل سازی های انجام شده و نتایج حاصل شده از آن، از مطالعه وارما و همکاران [۱۱] استفاده شده است. مدل سازی ایشان مطابق با دستگاه میز لرزه به ابعاد ۶۱\*۱۲۲\*۱۲۲ سانتی متر است که پیشتر این مدل توسط آهولا و همکاران [۹] در آزمایشگاه مدلسازی

و نتایج مدل‌سازی وارما و همکاران تطابق خوبی دارد؛ اما نتایج تحلیل سه‌بعدی با آنالیز میز لرزه بسیار نزدیک است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که نتایج میز لرزه با نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی انجام شده در این تحقیق تطبیق نسبتاً خوبی دارد؛ اما در مقایسه با تحلیل وارما و همکاران که با استفاده از تحلیل دوبعدی انجام شده است اختلاف نتایج چشمگیر بوده و مشاهده می‌شود که تحلیل سه‌بعدی، نتایج واقع‌بینانه‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت میز لرزه را ارائه می‌دهد.



شکل ۱۳: کانتور جابه‌جایی نرمال در حالت دوبعدی و سه‌بعدی در جهت X در نرم‌افزار Flac (تصویر بالا مدل‌سازی دوبعدی و تصویر پایین مربوط به مدل‌سازی سه‌بعدی است).

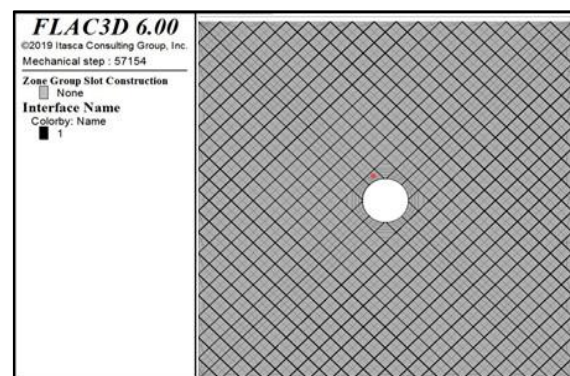


شکل ۱۴: مقایسه جابجایی در نقطه مدنظر در تحلیل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی برای سیکل ۱۳ ام.

دوبعدی برای تحلیل لرزه‌ای مدل با زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵ انجام داده‌اند همسان‌سازی و نتایج به صورت گراف ارائه شده است. یک نقطه که به رنگ قرمز در شکل ۱۲ مشخص شده است، در تحلیل‌های عددی وارما به عنوان نقطه مانیتورینگ در نظر گرفته شده است

جدول ۷: پارامترهای مکانیکی مدل [۱۱].

مقادیر	مشخصات
۱,۶۸۲	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰,۱۴۵	مدول پالک (GPa)
۰,۱۲۹	مدول برشی (GPa)
۰,۷	سختی نرمال درزه (GPa)
۰,۵	سختی برشی درزه (GPa)
۲۵,۵۶	زاویه اصطکاک درزه ( $^\circ$ )



شکل ۱۵: مش‌بندی مدل و موقعیت نقطه‌ای (به رنگ قرمز) که تغییر مکان‌ها در آن مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این پژوهش مدل‌سازی میز لرزه در حالت استاتیک با کمک نرم‌افزار Flac3D و Flac2D به تعادل رسید و بار لرزه‌ای به مدل اعمال شد و نتایج در قالب شکل ۱۳ ارائه گردید.

در شکل ۱۳ کانتورهای جابجایی در راستای x (در جهت افقی) در تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی استخراج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی‌های اطراف تونل در حالت سه‌بعدی بزرگ‌تر از جابجایی‌ها در حالت دوبعدی است که پیش‌تر در این تحقیق با ضعیف‌تر کردن توده سنگ این نتیجه حاصل شده بود. شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی میز لرزه در آزمایشگاه توسط آهولا و همکاران و نتایج مدل‌سازی این میز لرزه با نرم‌افزار دوبعدی یودک توسط وارما و همکاران و نتایج مدل‌سازی همین مدل در تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در این مقاله نمایش داده می‌شود.

همچنین نتایج مدل‌سازی این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی میز لرزه انجام شده توسط آهولا و همکاران [۹]

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به مقایسه تحلیل های دوبعدی و سه بعدی با کمک نرم افزار FLAC با تأکید بر تأثیر وجود درزه در سنگ پرداخته شده است. این تحلیل ها در حالت استاتیکی و لرزه ای (با روش شبه استاتیکی)، انجام شده است. در این مطالعه که برای تونل های عمیق در نظر گرفته شده است پارامتر مورد ارزیابی در حالت دوبعدی و سه بعدی، جابجایی اطراف تونل است. از آنالیزهای استاتیکی انجام شده که برای حالت های مختلف ارائه شده است می توان دریافت که در توده سنگ های بدون درزه و همچنین توده سنگ های قوی با شدت درزه داری کم، نتایج حاصل از تحلیل های دوبعدی جابجایی های بیشتری را نشان می دهد. به این معنی که استفاده از نتایج دوبعدی در عمل می تواند محافظه کارانه تر باشد؛ اما با افزایش شدت درزه داری و طبعاً ضعیف تر شدن سنگ، نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی کمتر از تحلیل سه بعدی می شود، زیرا با توجه به ماهیت سه بعدی درزه و تونل، در عمل استفاده از نتایج تحلیل سه بعدی دقیق تر و کارا تر است. در تحلیل لرزه ای روند نتایج همانند تحلیل استاتیکی است؛ اما اختلاف نتایج در حالت دوبعدی و سه بعدی با شدت بیشتری اتفاق می افتد. از آنجایی که ماهیت انتقال موج ناشی از زلزله در عبور از لایه های زمین سه بعدی است، بنابراین در تحلیل های لرزه ای نیز قویاً استفاده از تحلیل سه بعدی توصیه می شود؛ زیرا در صورتی که مدل سازی دوبعدی انجام شود تغییر مکان های اطراف تونل در توده سنگ ضعیف، کوچک تر از واقعیت گزارش شده و برای طراحی سیستم نگهداری تونل نتایج قابل اطمینان نیست.

مطمئناً تحلیل ۳ بعدی، تحلیلی با اعتماد بیشتری است؛ اما در مواردی که به دلایل مختلف امکان تحلیل ۳ بعدی وجود نداشته باشد، تحلیل ۲ بعدی و اصلاح آن می تواند نتایجی نزدیک به تحلیل ۳ بعدی دست دهد. مزیت سه بعدی آنجا نمود پیدا می کند که می توان تمام مراحل حفاری، آزادسازی تنش، شبیه سازی سه بعدی سیستم نگهداری و گام به گام بودن تونل زنی را به درستی شبیه سازی کرد. این فرایند در دوبعدی امکان پذیر نیست و بایستی ضرایب تصحیح برای این کار استفاده شود. در تحلیل دوبعدی نمی شود تأثیر جبهه کار را در پایداری تونل شبیه سازی کرد که در نتایج این تحقیق نیز دیده شد. از آنجایی که مدل سازی دوبعدی هنوز برای تحلیل مهندسی تونل مورد استفاده است؛

بنابراین نیاز به تصحیح تحلیل های دوبعدی، برای انجام تحلیل های دقیق تر و ساده تر احساس می شود. خلاصه نتایج به صورت موردی در زیر آورده شده است:

- ۱- مادامی که که هیچ درزه ای در توده سنگ وجود ندارد یا اصطلاحاً سنگ بدون درزه یا با یک درزه است تغییر مکان در حالت دوبعدی بیشتر از سه بعدی است، زیرا جبهه کار تونل در حالت سه بعدی که مقاومت بالایی دارد، مانع از تغییر مکان بیشتر توده سنگ می شود که در حالت دوبعدی این جبهه وجود ندارد.
- ۲- با زیاد شدن تعداد تک درزه ها (سه درزه و بالاتر) در توده سنگ (اصطلاحاً با ضعیف تر شدن توده سنگ) تغییر مکان های اطراف تونل افزایش پیدا می کند که برای حالت سه بعدی نسبت به حالت دوبعدی این افزایش شدت بیشتری دارد.
- ۳- در این تحقیق مشاهده شد که جهت درزه در مدل اثر مهمی برای موارد مختلف بارگذاری در توده سنگ های سخت و ضعیف ندارد که در این تحقیق چون سربار تونل زیاد است، تغییرات شیب درزه تأثیر چشمگیری در مقدار جابجایی های اطراف تونل ایجاد نمی کند.
- ۴- در تحلیل لرزه ای نسبت به تحلیل استاتیکی اختلاف تغییر مکان های اطراف تونل در حالت دوبعدی و سه بعدی چشم گیرتر است.
- ۵- جهت اعمال بار لرزه ای، اثر مهمی روی مقادیر جابه جایی در توده سنگ های قوی ندارد؛ که این نتیجه با نتایج وارما و همکاران [۱۱] که "تونل های کم عمق تحت تأثیر بارهای زلزله بیشتر مستعد آسیب هستند"، مطابقت دارد چرا که مطالعه انجام شده در این تحقیق بر روی تونل های عمیق است.
- ۶- در توده سنگ های قوی و فاقد درزه یا با درزه کم در تحلیل لرزه ای، نتایج تحلیل دوبعدی محافظه کارانه تر است.
- ۷- در توده سنگ های ضعیف و درزه دار به دلیل ماهیت سه بعدی درزه ها، تحلیل سه بعدی دقیق تر است.
- ۸- در توده سنگ های ضعیف در تحلیل لرزه ای به علت ماهیت سه بعدی بار زلزله مدل سازی سه بعدی توصیه می شود.



## مراجع

- [13] M. Asadizadeh, R. Rahmannejad, Comparison Study between Numerical and Physical Modelling of UCS of Jointed Rock Mass, Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering Vol. 3, No. 6, February 2014.
- [14] M. a.tahmasebi, R.Shirinabadi, S.E.Rahimi, E.Moosavi, A.Bangian Tabrizi, Investigating the 3D effect of spatial variability of Young modulus based on the probabilistic analysis of surface settlement in NATM tunneling (Case study), Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering (ANM), Volume 12, Issue 30 Serial Number 30 May 2022 Pages 63-78.
- [15] Hashash. Y.M.A., Karina. K., Koutsoftas. D., O'Riordan. N., (2010), "Seismic Design Considerations for Underground Box Structures", Earth Retention Conference (ER), 384(208): 620-637.
- [16] Argyroudīs SA, Pitilakis KD.,( 2012), "Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits", Soil Dyn Earthq Eng;35:1-12.
- [17] Xin Wang, Ming Cai, (2015), "Influence of wavelength-to-excavation span ratio on ground motion around deep underground excavations", Tunnelling and Underground Space Technology, 49, 438-453.
- [18] N.Senemarian Isfahani, A.Azhari, Alireza Baghbana, H.Hashemolhosseini, Evaluation of the optimal arrangement of rock bolts on the stability of jointed rockmass Using Three-Dimensional DFN-DEM Approach - Case study: Clab 2 cavern, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering (ANM), Volume 13, Issue 34 - Serial Number 34, April 2023, Pages 67-81.
- [19] Itasca Consulting Group, Inc., "FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions", Version 4, User's Manual.
- [20] Medina Rodríguez, L. (2000), "Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras en los suelos tosquizos de Madrid", Tesis Doctoral. University of La Coruna.
- [21] Iran OSton Consulting Engineering Company. (2006), "Report on the geological conditions of the Khorram Abad-Pol-E-Zal freeway tunnel" (In Persian).
- [22] C.A. Jaramillo, (2017), "Impact of Seismic Design on Tunnels in Rock – Case Histories", Underground Space.
- [23] Bhasin, R., Hoeg, K., Abokhalil, M. (2008), "Effect of seismicity on rock support in tunnels", Underground Facilities for Better Environment and Safety-India World Tunnel Congress.
- [24] Bhasin, Kaynia, Paul, Singh and Pal. (2006), "Seismic behavior of rock support in tunnels", 13<sup>th</sup> Symposium on Earthquake Engineering Indian Institute of Technology, Roorkee, 118.
- [1] Dowding, C. H., & Rozen, A. (1978). "Damage to rock tunnels from earthquake shaking". Journal Geotech Engineering Division, ASCE,GT2, 175-191.
- [2] Adyan, O'., Ohata, Y., Genis, M., Tokashiki, N., & Ohkubo, K. (2010). "Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes".Rock Mechanics Rock Engineering, 43, 857-875.
- [3] Liu,J., Song,Y.,Zhao, Y.,(2021) "Numerical Modeling on Dynamic Characteristics of Jointed Rock Masses Subjected to Repetitive Impact Loading", Shock and Vibration, Article ID 5274602, 13 pages.
- [4] N Nikadat , Alireza Yarahmadi Bafgh, Estimating Joint Normal and Shear Stiffness Coefficient Using Statistical Methods, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering (ANM), Volume 3, Issue 6 - Serial Number 6 December 2013, Pages 93-103.
- [5] Yu, H., Chen,G., (2021), " Pseudo-static simplified analytical solution for seismic response of deep tunnels with arbitrary cross-section shapes", Computers and Geotechnics 137-104306.
- [6] Duan. Y, Zhao. M, Huang. J, Li.H & Du. X, (2021), " Analytical Solution for Circular Tunnel under Obliquely Incident P Waves considering Different Contact Conditions", Shock and Vibration ,Article ID 1946184,23 pages.
- [7] Cui. Z, Sheng.Q, Zhang.G.m, Liu.H, (2021), "A modified rock mass classification considering seismic effects in the basic quality (BQ) system", Bulletin of Engineering Geology and the Environment 80:2249-2260.
- [8] Jia,P & Tang C.A. (2008). "Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass", Tunnelling and Underground Space Technology,23, 500-507.
- [9] Ahola, M. P., Hsuing, S. M., & Kana, D. D. (1996). "Experimental study on dynamic behavior of rock joints. Coupled 78 hermos-hydro-mechanical process of fractured media", Developments in Geotechnical Engineering, 79, 467-506.
- [10] Hajiazizi, Mohammad, Khatami, Razie Sadat, (2013), "Seismic analysis of the rock mass classification in the Q-system", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Pages 123-130.
- [11] Malavika Varma, V.B. Maji, A. Boominathan, (2019)," Numerical modeling of a tunnel in jointed rocks subjected to seismic loading", Underground Space 4 , 133-146.
- [12] Hajiazizi, M., & Hashemi, M. (2017). "Predicting three-dimensional displacement around the tunnel and its impact on the value of Q-system". International Journal of Mining and Geo-Engineering ,51(2), 133-138.