

تعیین ثابت الاستیک توده سنگ با استفاده از مدلسازی عددی ناپیوسته و صحت سنجی نتایج آن با روابط تحلیلی

مرتضی جوادی اصطهباناتی^{۱*}، محمد دادرسی آبی بیگلو^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

چکیده

تعیین ویژگی‌های رفتاری توده سنگ همواره بعنوان یکی از موضوعات کلیدی در مهندسی سنگ کاربرد می‌شود. در این مقاله، تعیین ضرایب الاستیک توده سنگ‌های درزه دار با استفاده از روش عددی ناپیوسته مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، مدلسازی محیط ناپیوسته توده سنگ حاوی دسته درزه‌ها با آرایش‌های مختلف (یک دسته درزه افقی، یک دسته درزه قائم، دو دسته درزه افقی و قائم، دو دسته درزه متعامد چرخش داده شده و دو دسته درزه غیرمتعامد) با استفاده از نرم افزار یودک (UDEC) انجام شده و با اعمال نوع خاصی از شرایط مرزی (تنش‌های مرزی)، مقادیر کرنش‌های ایجاد شده در مدل محاسبه شد. سپس، این نتایج در ماتریس‌های انطباق محیط معادل جایگذاری شده و ضرایب الاستیک توده سنگ شامل مدول الاستیک در جهات مختلف و نسب پواسون بصورت برگشتی محاسبه شد. بمنظور صحت سنجی این فرآیند، نتایج حاصل از محاسبات برگشتی ضرایب الاستیک توده سنگ معادل با استفاده از مدل عددی محیط ناپیوسته برای آرایش‌های خاص ناپیوستگی‌ها با روابط تحلیلی مقایسه شد. در نهایت، این روش برای تعیین ضرایب الاستیک توده سنگ آنیزوتروپ تحت تنش محصور کننده (حالت فاقد راه حل تحلیلی) تحت زوایای مختلف و ابعاد مختلف دامنه بکار گرفته شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که برای عمده آرایش‌های ناپیوستگی‌ها، انطباق بسیار خوبی بین ضرایب الاستیک محاسبه شده با روش برگشتی مبتنی بر مدلسازی ناپیوسته و روش‌های تحلیلی وجود داشته و در عمده موارد، خطای نسبی بین این دو روش بین ۴ الی ۶ درصد است. این انطباق حاکی از کارایی محاسبات برگشتی مبتنی بر روش عددی ناپیوسته بوده و از این روش می‌توان برای تعیین ضرایب الاستیک توده سنگ معادل بویژه برای حالات فاقد روابط تحلیلی استفاده نمود. نتایج پیاده سازی این روش برای توده سنگ تحت تنش محصور کننده (حالت فاقد راه حل تحلیلی) حاکی از وابستگی شدید مقادیر ضرایب الاستیک توده سنگ به زاویه چرخش ناپیوستگی‌ها و تغییرات نسبت آنیزوتروپی توده سنگ است. همچنین، روش محاسبات برگشتی مبتنی بر روش عددی ناپیوسته توانایی بسیار خوبی در تعیین ضریب پواسون توده سنگ داشته که از این نظر بر روابط تحلیلی دارای برتری است.

کلید واژه‌ها: ضرایب الاستیک توده سنگ، مدلسازی عددی ناپیوسته، آنیزوتروپی، روابط تحلیلی، UDEC.

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود m.javadi@shahroodut.ac.ir

^۲ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد تونل و فضاها، زیرزمینی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران m.dadrasi@aut.ac.ir

۱. مقدمه

رفتار مکانیکی توده سنگ در بسیاری از پروژه‌های مرتبط با حوزه مهندسی سنگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های رفتار مکانیکی توده سنگ، مدول الاستیک بوده که این پارامتر نقش ویژه‌ای در پیش‌بینی رفتار شیروانی‌های سنگی، پی و تکیه‌گاه‌های سدها، کوله‌های پل و تونل‌های سنگی دارد (Wu et al., 2020). وجود انواع مختلفی از ناپیوستگی‌ها (درزه‌ها، لایه‌بندی و شکستگی‌ها) در ساختار توده سنگ باعث بروز پیچیدگی‌های بسیار زیاد در رفتار مکانیکی توده سنگ می‌شود (Laghaei et al., 2018; Yong et al., 2020; Zhang et al., 2018). به همین دلیل، برآورد مدول الاستیک توده سنگ بعنوان یکی از جنبه‌های رفتار مکانیکی همواره با چالش‌های متعددی همراه بوده و مطالعات بسیار زیادی در این خصوص انجام شده است.

از زمان پایه گذاری علم مکانیک سنگ در دهه ۶۰ میلادی، تلاش‌های بسیار زیادی بر روی موضوع تعیین مدول الاستیک توده سنگ‌ها انجام شده است. بر اساس مطالعات پیشین، مدول الاستیک توده سنگ را می‌توان به دو روش مستقیم و روش‌های غیر مستقیم تعیین نمود. در روش مستقیم، تعیین مدول الاستیک توده سنگ عمدتاً بر پایه آزمون و اندازه‌گیری مختلف شامل آزمون‌های آزمایشگاهی تک محوری یا سه محوره بر روی نمونه‌های سنگی حاوی درزه (Laghaei et al., 2019; Huang et al., 2018; al., 2018) و آزمون‌های برجا (Yang et al., 2018; Panthee et al., 2015; al., 2015) انجام می‌شود. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی غالباً با محدودیت‌های زیادی در رابطه با اختلال در تنش اولیه، تأثیرپذیری از اندازه نمونه و همچنین نمایش ناکافی ناپیوستگی‌ها مواجه هستند (Singh and Seshagiri Rao, 2005; Yang et al., 2015; Fattahi and VarmazyariBabanouri, 2019) که در نتیجه، تمایل به آزمون‌های برجا بسیار بیشتر از آزمون‌های آزمایشگاهی است. با این وجود، آزمون‌های برجا نیز با محدودیت‌های خاصی از قبیل سطح تاثیر محدود (Kayabasi and Gokceoglu, 2018)،

پراکندگی در نتایج بدلیل وجود ناپیوستگی‌های پنهان ذاتی و دقت پایین شرایط مرزی (Yang et al., 2015; Laghaei et al., 2018) همراه بوده و مهم تر آنکه این آزمون‌ها اغلب زمان‌بر و پرهزینه هستند (Kavur et al., 2015; Fattahi and VarmazyariBabanouri, 2019). به همین دلیل، توسعه روش‌های غیر مستقیم بعنوان یک روش کم هزینه تر و سریع‌تر بویژه برای برخی از کاربردهای خاص همواره مورد توجه محققان بوده است (Kulatilake et al., 1993; Min and Jing, 2003; Cui et al., 2016; Laghaei et al., 2018).

روش‌های غیرمستقیم تعیین مدول الاستیک توده سنگ را می‌توان از نظر کلی به سه دسته روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی دسته بندی نمود. روش‌های تحلیلی یا فرم بسته سابقه طولانی داشته و چندین راه حل تحلیلی مختلف برای توده سنگ با ناپیوستگی‌های ساده (از نظر هندسی و رفتاری) توسعه داده شده است (Salamon, 1968; Singh, 1973; Gerrard, 1982). راه حل‌های فرم بسته، نقش هر دو عارضه اصلی موثر در تغییر شکل پذیری توده سنگ (ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر) را با استفاده از رهیافت‌های ریاضی اعمال می‌کند (Min and Jing, 2003). بدلیل پیچیدگی ریاضیاتی، این نوع راه حل‌ها تنها برای سیستم ناپیوستگی‌های منظم (عمدتاً برای ناپیوستگی‌های ممتد و متعامد) محدود شده و فقط یک راه حل خاص مبتنی بر نظریه تانسور ترک (Oda, 1986) برای تعیین خواص الاستیک ناهمسانگرد توده سنگ با ناپیوستگی‌های نامنظم ارائه شده است. از طرف دیگر، روش‌های تحلیلی یا راه حل‌های فرم بسته عمدتاً بر مبنای اصل جمع آثار استوار بوده و در این روش، از برهم‌کنش بین ناپیوستگی‌ها صرف نظر می‌شود (Ebadi et al, 2011). صرف نظر کردن از برهم‌کنش بین ناپیوستگی‌ها بویژه در محل تقاطع ناپیوستگی‌ها (که اغلب محل وقوع بیشترین تغییرات تنش و تغییر شکل است) می‌تواند تاثیر قابل توجهی در رفتار کلی توده سنگ داشته باشد (Min and Jing, 2003). این دو محدودیت اساسی در توسعه راه حل‌های تحلیلی (محدودیت‌های هندسی و اثرات برهم‌کنشی) را می‌توان با

خاص از ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، نتایج روش عددی-ماتریس انطباق با نتایج روابط تحلیلی و با هدف اعتبار سنجی مقایسه شد. بعد از تایید اعتبار سنجی روش محاسبات برگشتی مبتنی بر مدل‌سازی عددی ناپیوسته، از این روش برای تعیین ضرایب الاستیک آنیزوتروپ توده‌سنگ درزه‌دار تحت تنش محصور کننده (حالت فاقد راه‌حل فرم بسته) و همچنین تاثیر زاویه چرخش ناپیوستگی‌ها بر روی مدول الاستیک جهتی توده‌سنگ استفاده شده است.

۲. تئوری و پیش زمینه

۲-۱. رفتار کلی مواد و مفهوم تقارن

در طبیعت، انواع مختلفی از مواد و مصالح با رفتارهای متفاوت یافت می‌شود. برخی از مواد دارای رفتار وابسته به جهت بارگذاری بوده که به اصطلاح تحت عنوان مواد آنیزوتروپ تعبیر می‌شوند. بطور کلی، واکنش تنش-کرنش هر ماده در طبیعت را می‌توان با استفاده از شکل کلی قانون هوک بصورت زیر بیان نمود

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (۱)$$

تانسور الاستیسیته مرتبه چهارم C_{ijkl} شامل تمام مدول‌های سختی الاستیک است. با معکوس کردن رابطه ۱، فرم معادله رفتاری به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$e_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (۲)$$

که در رابطه فوق S_{ijkl} تانسور انطباق الاستیک است. اعمال شرط تقارن $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}$ باعث کاهش ۸۱ ثابت الاستیک مستقل C_{ijkl} به ۲۱ ثابت الاستیک می‌شود (Sadd, 2009). بیشتر مواد واقعی دارای برخی از انواع تقارن (از قبیل صفحه تقارن، سه صفحه تقارن عمود برهم، محور تقارن و تقارن کامل) هستند که وجود تقارن باعث کاهش ثوابت الاستیک در رابطه ۱ و ۲ می‌شود. بطور مثال، برای مواد با سه صفحه تقارن متقابل عمود برهم (شکل ۱) یا ارتوتروپیک، تعداد ثوابت ماتریس الاستیسیته برای این نوع مواد به ۹ سختی مستقل کاهش می‌یابد (Sadd, 2009). برای مواد

بکارگیری روش‌های عددی بویژه روش‌های ناپیوسته تا حد قابل قبولی رفع نمود. روش‌های عددی ناپیوسته این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان نقش و تاثیر ناپیوستگی‌ها در رفتار توده‌سنگ را بصورت مستقیم در مدل‌های محاسباتی اعمال کرد (Jing, 2003). این قابلیت روش‌های عددی، باعث توسعه یک رویکرد جدید برای استخراج پارامترهای رفتاری توده‌سنگ شده و مطالعات بسیار زیادی در این خصوص و در مقیاس‌های مختلف انجام شده است (Khani et al., 2013; Laghaei et al., 2018; Min and Jing, 2003; Ma et al., 2019; Yang et al., 2014; Yang et al., 2015; Chen et al., 2022). این مطالعات عمدتاً بر روی تاثیر مقیاس و رفتار زاویه‌ای رفتار الاستیک توده‌سنگ بویژه برای شبکه شکستگی مجزا انجام شده‌اند. در حقیقت، عمده مطالعات پیشین در خصوص تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ با استفاده از مدل عددی ناپیوسته بر روی تعیین خواص محیط پیوسته معادل متمرکز شده است. با این وجود، مطالعات اندکی بر روی رفتار تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ حاوی ناپیوستگی‌های ممتد غیرمتعامد تحت تنش محصور کننده (حالت فاقد راه‌حل فرم بسته) و بویژه ارزیابی آنیزوتروپی این رفتار با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش ناپیوسته انجام شده است. این موضوع بعنوان هدف اصلی مطالعه پیش رو مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، بکارگیری روش محاسبات برگشتی مبتنی بر مدل‌سازی عددی ناپیوسته برای تعیین ضرایب الاستیک توده‌سنگ دارای ناپیوستگی‌های ممتد متعامد و غیرمتعامد مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا مدل‌های عددی ناپیوسته از توده‌سنگ با ناپیوستگی‌های ممتد برای حالات مختلفی ساخته شده و شرایط مرزی و مدل رفتاری به اجزای مدل تخصیص داده شد. در ادامه، نتایج حاصل از مدل عددی همراه با داده‌های ورودی مدل عددی در ماتریس انطباق جایگذاری شده و با حل ماتریس انطباق (با استفاده از کد توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب)، پارامترهای رفتار الاستیک توده‌سنگ بعنوان مجهولات مسئله محاسبه شد. این فرآیند برای چندین حالت مختلف از آرایش ناپیوستگی‌ها (حالت‌های متعامد و غیر متعامد) انجام شد. برای آرایش‌های

می‌شود (Wittke, 2014). در این بخش، برخی از مهم‌ترین روابط تحلیلی برای توصیف رفتار آنیزوتروپ سنگ درزه‌دار و محاسبه ثوابت الاستیک توده‌سنگ تشریح شده است.

معروف‌ترین رابطه تحلیلی برای محاسبه ثوابت الاستیک توده‌سنگ توسط آمادئی و گودمن (۱۹۸۱) و برای حالت سه دسته درزه متعامد (هر یک از دسته درزه‌ها موازی یک صفحه تقارن الاستیک) و در نظر گرفتن توده‌سنگ بصورت محیط پیوسته ارتوتروپیک معادل توسعه داده شده است. مدل آمادئی و گودمن (۱۹۸۱) مبتنی بر فرضیات اصلی شامل ۱- ضخامت ناچیز دسته درزه‌ها و عدم وقوع اثر پواسون، ۲- همسانگردی سنگ بکر با ثابت‌های E و ν (بترتیب مدول الاستیک و نسبت پواسون)، ۳- وجود سه دسته درزه متعامد (مطابق با شکل ۲) و ۴- عدم وجود تغییر در حالت تنش ارائه شده است. اگر یک تنش σ_v در جهت z به توده‌سنگ اعمال شود و θ زاویه شیب دسته‌درزه ۱ باشد (مطابق با شکل ۲)، مؤلفه‌های کرنش بشرح زیر محاسبه می‌شوند (Amadei and Goodman, 1981):

$$\varepsilon_x = \left(\frac{\sin^2 2\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{n1}S_1} + \frac{1}{k_{n2}S_2} - \frac{1}{k_{s1}S_1} - \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) - \frac{\nu}{E} \right) \sigma_v \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu}{E} \sigma_v \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \left(\frac{\cos^4 \theta}{k_{n1}S_1} + \frac{\sin^4 \theta}{k_{n2}S_2} + \frac{\sin^2 2\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{s1}S_1} + \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) + \frac{1}{E} \right) \sigma_v \quad (6)$$

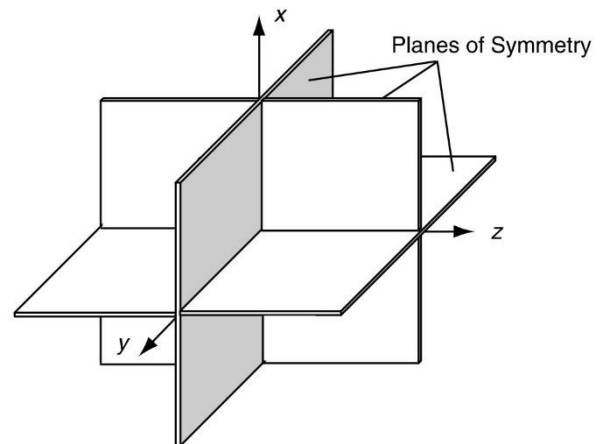
$$\gamma_{xz} = \left(\sin 2\theta \left(\frac{\cos^2 \theta}{k_{n1}S_1} - \frac{\sin^2 \theta}{k_{n2}S_2} \right) + \frac{\sin 4\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{s1}S_1} + \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) \right) \sigma_v \quad (7)$$

که در روابط فوق، ε_y ، ε_z بترتیب کرنش در راستای y و z و γ_{xz} کرنش برشی در راستای xz و k_{s1} ، k_{n1} و S_1 بترتیب سختی نرمال، سختی برشی دسته درزه ۱ و فاصله‌داری همان دسته درزه و k_{s2} ، k_{n2} و S_2 بترتیب سختی نرمال، سختی برشی دسته درزه ۲ و فاصله‌داری همان دسته درزه هستند. روابط فوق برای درزه‌هایی ارائه شده است که نسبت به هم حالت متعامد داشته باشند. در صورتی که دسته درزه ۱ و ۲ در شکل ۲ نسبت به هم دارای زاویه α باشند (دسته درزه‌های ۱ و ۲ متعامد نباشند)، روابط زیر برای محاسبه ثوابت آنیزوتروپ توده‌سنگ توسط هوآنگ و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شده است:

ارتوتروپیک، ماتریس انطباق با استفاده از نمادگذاری مربوط به نظریه همسانگردی و بصورت زیر بیان می‌شود:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

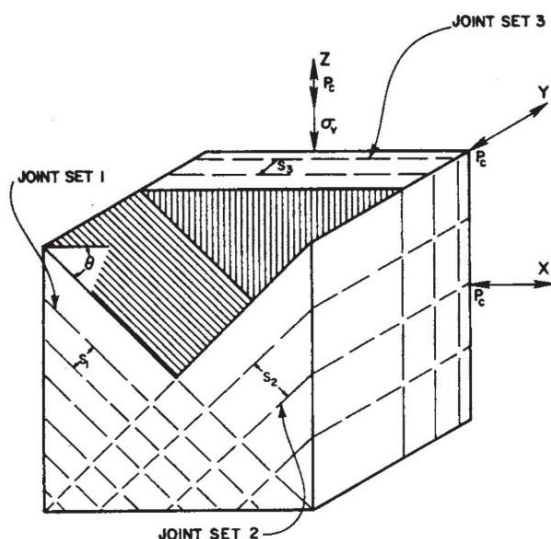
که در رابطه فوق، E_i مدول یانگ در سه جهت تقارن ماده، ν_{ij} نسبت پواسون است که توسط $-e_j/e_i$ برای تنش در جهت i تعریف می‌شود و μ_{ij} مدول برشی در صفحه i, j است (Sadd, 2009).



شکل ۱. سه صفحه تقارن برای یک ماده ارتوتروپیک (Sadd, 2009).

۲-۲. روابط تحلیلی تعیین ثوابت الاستیک توده‌سنگ درزه‌دار رفتار تنش-کرنش سنگ‌های درزه‌دار توسط تغییر شکل‌پذیری هر دو مؤلفه سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. در حقیقت، میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده ناشی از تنش اعمالی به توده‌سنگ برابر با حاصل جمع برداری تغییر شکل‌های حادث شده در سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها است. در عمده توده‌سنگ‌ها، میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در ناپیوستگی‌ها بسیار بیشتر از تغییر شکل‌های سنگ بکر بوده که این موضوع باعث ایجاد آنیزوتروپی شدید در رفتار توده‌سنگ

یانگ معادل درزه ها (E_z, E_y, E_x) و مدول برشی معادل درزه ها (G_{zx}, G_{yz}, G_{xy}) بر اساس توابعی از صلبیت، جهت داری و فاصله داری دسته درزه ها محاسبه شده اند (Huang et al., 1995).



شکل ۲. نمای شماتیک از توده سنگ با سه دسته درزه متعامد (Amadei and Goodman, 1981).

۳. چارچوب مدل سازی عددی

در این مطالعه از روش عددی ناپیوسته برای بدست آوردن ثوابت الاستیک سنگ درزه دار استفاده شده است. بدین منظور، مدل های عددی مختلفی از آرایش های هندسی دسته درزه ها تولید شده و مدل عددی حاصل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است (شکل ۳). مدل سازی عددی محیط ناپیوسته (سنگ درزه دار) با استفاده از نرم افزار UDEC انجام شده است. مدل سازی عددی نیز مطابق با مراحل ۱- ساخت هندسه مدل، ۲- انتخاب مدل رفتاری و تخصیص پارامترهای ورودی (ویژگی های مواد)، ۳- اعمال شرایط مرزی و اولیه و ۴- حل مدل عددی و بررسی نتایج انجام شده است.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{xx} \\ \Delta \varepsilon_{yy} \\ \Delta \varepsilon_{zz} \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_{xx} \\ \Delta \sigma_{yy} \\ \Delta \sigma_{zz} \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{1}{E_y} = 2 \sin^2(\alpha/2) \left(\frac{\cos^2(\alpha/2) K_n + \sin^2(\alpha/2) K_s}{K_n K_s S} \right) \quad (9)$$

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{K_{n3} S_3} \quad (10)$$

$$\frac{1}{E_z} = 2 \cos^2(\alpha/2) \left(\frac{\sin^2(\alpha/2) K_n + \cos^2(\alpha/2) K_s}{K_n K_s S} \right) \quad (11)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{K_{s3} S_3} + \frac{2 \sin \alpha \cos^2(\alpha/2)}{K_s S} \quad (12)$$

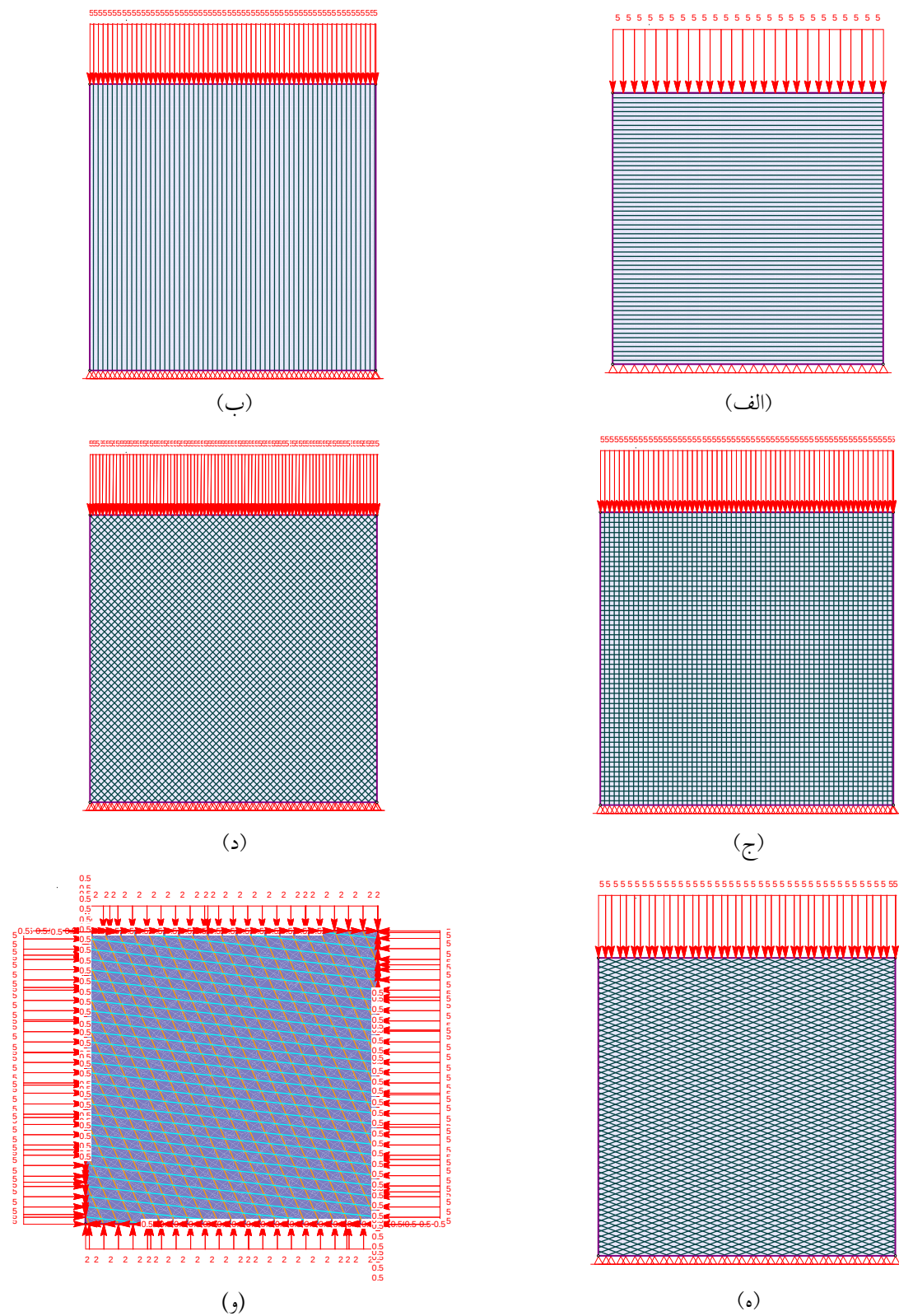
$$\frac{1}{G_{yz}} = \frac{2 \sin^2 \alpha (K_n + K_s)}{K_n K_s S} \quad (13)$$

$$\frac{1}{G_{zx}} = \frac{1}{K_{s3} S} + \frac{2 \sin \alpha \sin^2 \alpha (\alpha/2)}{K_s S} \quad (14)$$

$$\frac{\nu_{yz}}{E_z} = \frac{\nu_{zy}}{E_y} = \frac{K_n - K_s}{2 K_n K_s S} \sin^2 \alpha \quad (15)$$

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} = 0, \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x} = 0 \quad (16)$$

در روابط فوق، $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ بترتیب کرنش در راستای x, y و z و $\gamma_{yz}, \gamma_{xy}, \gamma_{zx}$ بترتیب کرنش برشی در راستای yz, xy و xz و $\Delta \sigma_{xx}, \Delta \sigma_{yy}, \Delta \sigma_{zz}$ بترتیب تنش در راستای x, y و z و $\Delta \tau_{xy}, \Delta \tau_{yz}, \Delta \tau_{zx}$ بترتیب تنش برشی در راستای xy, yz و xz و k_n, k_s و S بترتیب سختی نرمال، سختی برشی و فاصله داری دسته درزه را نشان می دهند. لازم به ذکر است، در روابط فوق، صلبیت های نرمال و برشی دو دسته درزه ۱ و ۲ (K_n و K_s) با هم یکسان در نظر گرفته شده و این مقادیر با صلبیت های دسته درزه سوم (K_{n3} و K_{s3}) متفاوت هستند. همچنین، فاصله داری دو دسته درزه ۱ و ۲ یکسان و برابر با S و فاصله داری دسته درزه سوم برابر با S_3 در نظر گرفته شده است. خصوصیات سنگ بکر با استفاده از مدول یانگ (E_0)، مدول برشی (G_0) و نسبت پواسون (ν_0) نشان داده و مدول



شکل ۳. شرایط مرزی و هندسه مدل‌های مورد استفاده برای تحلیل عددی: الف) یک دسته درزه افقی، ب) یک دسته درزه عمودی، ج) دو دسته درزه متعامد، د) دو دسته درزه متعامد چرخش داده شده، ه) دو دسته درزه غیرمتعامد و و) دو دسته ناپیوستگی غیرمتعامد تحت تنش محصور کننده.

۳-الف الی ۳-ه نشان داده شده است. همچنین، یک نوع شرایط مرزی خاص بصورت تنش محصور کننده نیز در نظر گرفته شد که برای این حالت، مقدار تنش نرمال در راستای y و x به ترتیب ۲- و ۵- مگاپاسکال و برای تنش برشی آن مقدار ۵/۰- مگاپاسکال در نظر گرفته شد (مطابق با شکل ۳-۳). بعد از اعمال شرایط مرزی به مدل، محاسبات عددی تا به تعادل رسیدن (همگرایی) مدل عددی انجام شد. در نهایت، خروجی های حاصل از مدل های عددی (عمدتا شامل جابجایی ها و کرنش ها در جهات مختلف) مورد تحلیل قرار گرفته که این نتایج در بخش بعد تشریح شده است.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. مقایسه مدلسازی عددی و روابط تحلیلی

پس از انجام مدلسازی عددی و حل مدل، نتایج حاصل را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار داد. در این مقاله، عمده نتایج حاصل از مدل عددی با دیدگاه استخراج پارامترهای معادل توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته که بدین منظور، خروجی محاسبات مدل عددی در قالب کرنش و جابجایی‌ها در راستاهای مختلف استخراج شده است. در ادامه، مقادیر حاصل از مدل‌های عددی در روابط تنش-کرنش قرار داده شده و پارامترهای معادل توده‌سنگ (مدول الاستیک و نسبت پواسون) محاسبه شده است. سپس، پارامترهای معادل توده‌سنگ حاصل از مدل عددی با مقادیر حاصل از روابط تحلیلی (روابط آمادئی-گودمن و روابط هوانگ و همکاران) مقایسه شده‌اند. در ادامه، این مراحل آرایش‌ها و مدل‌های مختلف تشریح شده است.

اولین قدم در تحلیل عددی، ساخت هندسه مدل است. در این مطالعه، از یک دامنه مربع شکل حاوی دو نوع ناپیوستگی (لایه‌بندی و دسته درزه) برای مدلسازی عددی استفاده شده است. مدل عددی با سه ابعاد مختلف شامل مربع‌های به طول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. در داخل دامنه عددی، ناپیوستگی‌های توده‌سنگ با الگوهای هندسی مختلف شامل یک دسته درزه افقی، یک دسته درزه قائم، دو دسته ناپیوستگی متعامد (افقی و قائم)، دو دسته ناپیوستگی متعامد چرخش داده شده و دو دسته ناپیوستگی غیرمتعامد ایجاد شد. نمای این مدل‌های هندسی برای ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر در شکل ۳ نشان داده شده است.

پس از ساخت مدل هندسی از ناپیوستگی‌ها در داخل دامنه محاسباتی، لازم است پارامترهای رفتار مکانیکی به اجزای مدل (سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها) اعمال شود. در این مطالعه، دو نوع ترکیب مختلف برای پارامترهای رفتار مکانیکی اجزای مدل در نظر گرفته شده که پارامترهای این دو ترکیب تحت عنوان الف و ب نامگذاری شده‌اند. مقادیر مورد استفاده برای هر یک از این ترکیب‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، برای کلیه اجزای تشکیل دهنده مدل عددی از رفتار موهر-کلمب استفاده شده است.

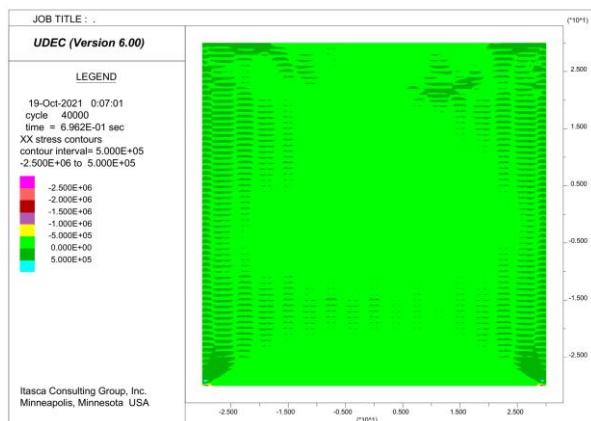
پس از ساخت مدل و تخصیص پارامترهای ورودی به اجزای مدل، شرایط مرزی به مدل اعمال شده است. بدین منظور، بارگذاری وارد بر مدل عددی بصورت معادل با تنش تک محوره به مرزهای مدل اعمال شده است. در عمده مدل‌های عددی، مقدار تنش محوری معادل با ۵ مگاپاسکال به مدل اعمال شده است. نحوه اعمال این نوع شرایط مرزی در شکل

جدول ۱. ویژگی‌های مکانیکی سنگ بکر، لایه‌بندی و دسته درزه‌ها به عنوان ورودی به مدل عددی

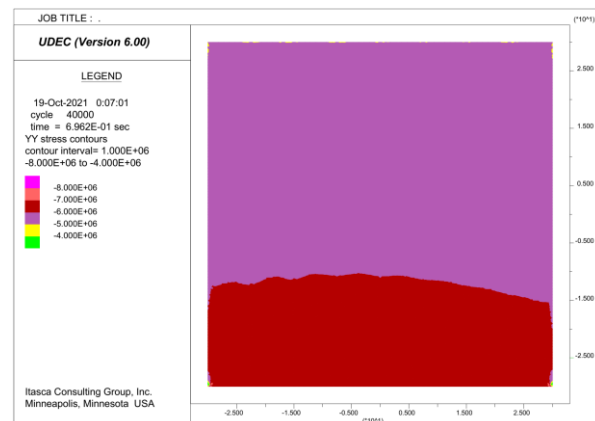
series	parameters	Density (kg/m ³)	bulk modulus (GPa)	shear modulus (GPa)	
a	intact rock	2500	18.52	12.2	
b		2350	13.20	8.30	
series	parameters	Normal Stiffness (GPa/m)	shear stiffness (GPa/m)	Cohesion (MPa)	friction angle (degrees)
a	joint sets	60	20	0	40
b	Layer	8.97	3.33	0.0125	32
	joint set	8.97	3.33	0	32

شکل ۴، بعد از حل مدل عددی، تنش‌های اعمالی به مدل با تنش‌های خروجی از حل عددی با هم انطباق نسبتاً زیادی داشته و می‌توان مقادیر تنش‌های اولیه (مقادیر مرزی) را برای محاسبات در نظر گرفت. مهم‌ترین خروجی حاصل از مدل عددی، کرنش‌های ایجاد شده در جهات مختلف ناشی از اعمال تنش به توده سنگ است. برای مدل عددی مورد بررسی با یک دسته درزه افقی، خروجی مدل عددی در قالب کانتورهای کرنش قائم (در راستای y) و کرنش افقی (در راستای x) در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۵، کرنش‌های قائم و افقی ایجاد شده در مدل دارای توزیع یکسان و مقدار ثابت است.

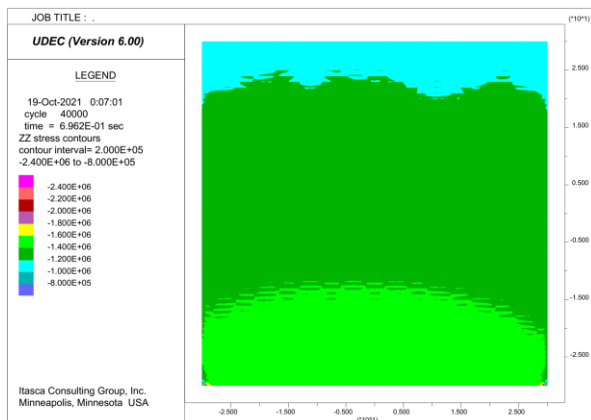
اولین آرایش هندسی از ناپیوستگی‌ها که برای تحلیل عددی انتخاب شده، در برگرنده یک دسته درزه افقی با فاصله‌داری یک متر و پارامترهای سری الف از جدول ۱ است. نمای کلی از مدل عددی ناپیوسته مورد استفاده برای تحلیل این حالت در شکل ۳-الف نشان داده شده است. شرایط مرزی تنش تک محوری شامل تنش قائم ۵ مگاپاسکال در راستای y (عمود بر دسته درزه) و تنش جانبی ناچیز به این مدل اعمال شده است. بعد از حل مدل عددی (با ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر)، نتایج حاصل در قالب کانتورهای تنش در جهات مختلف شامل تنش نرمال قائم (در راستای y)، تنش نرمال افقی (در راستای x)، تنش برشی (در جهت xy) و تنش عمود بر صفحه مدل (در راستای z) در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با



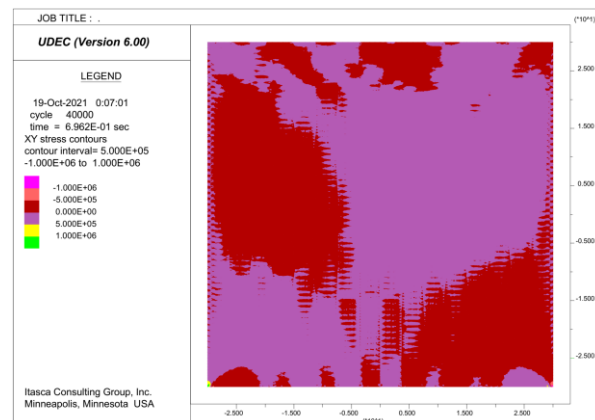
(ب)



(الف)

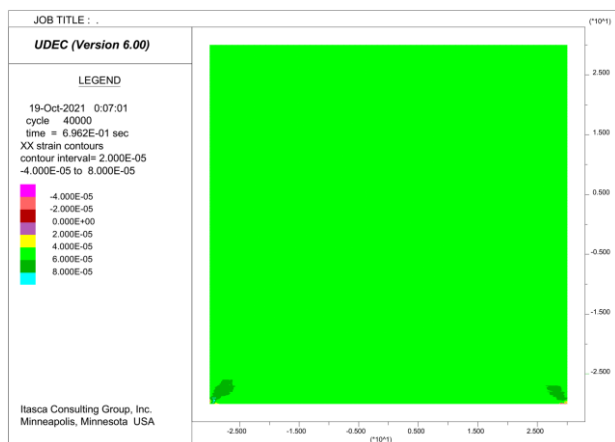


(د)

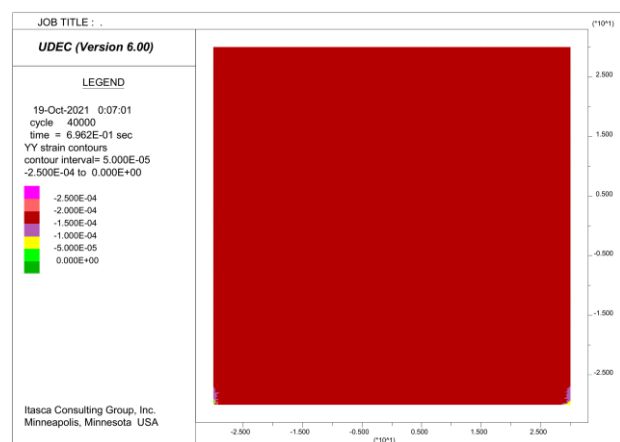


(ج)

شکل ۴. کانتور تنش‌های ایجاد شده در مدل عددی ناپیوسته با یک دسته درزه افقی در جهات مختلف: (الف) راستای y ، (ب) در راستای x ، (ج) در راستای xy و (د) در راستای z .



(ب)



(الف)

شکل ۵. کانتور کرنش حاصل از مدل عددی ناپیوسته با یک دسته درزه افقی: (الف) در راستای y (ب) در راستای x.

به روش آمادنی و گودمن برای مدل با یک دسته درزه افقی و بارگذاری عمود بر دسته درزه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، مقادیر مندرج در این جدول، در جهت بارگذاری محاسبه شده است. مقایسه مقادیر مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین نتایج حاصل از دو روش محاسبات تحلیلی و عددی وجود داشته و میزان خطای نسبی بین مقادیر در حدود ۴ الی ۶ درصد است.

بطور مشابه با فرآیند فوق، مدل‌سازی عددی محیط ناپیوسته برای توده‌سنگ با یک دسته درزه قائم و تحلیل نتایج آن انجام شد. نمای کلی از مدل عددی با ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر همراه با شرایط مرزی اعمالی (شامل تنش قائم ۵ مگاپاسکال در راستای y، تنش جانبی ناچیز، مرز پایین مدل بصورت کاملاً فیکس) به مدل برای توده‌سنگ با یک دسته درزه قائم در شکل ۳-ب نشان داده شده است. در این مدل عددی، فاصله‌داری درزه‌ها یک متر و پارامترهای مقاومتی و مکانیکی نیز از سری الف جدول ۱ در نظر گرفته شده است. پس از حل مدل عددی، نتایج حاصل از مدل عددی در قالب کرنش‌های ایجاد شده در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس، با قرار دادن مقادیر مولفه‌های تنش اولیه و مقادیر کرنش‌های حاصل از مدل عددی در معادله ۱۷ و ۱۸، ضرایب الاستیک توده‌سنگ بصورت برگشتی محاسبه شد. همچنین، ضرایب الاستیک توده‌سنگ با استفاده از روابط

بعد از حل عددی مدل ناپیوسته، می‌توان مقادیر کرنش‌ها در جهات مختلف را محاسبه نمود. با قرار دادن مقادیر کرنش حاصل از مدل عددی و همچنین مقادیر تنش اولیه در معادلات تنش-کرنش، می‌توان مقادیر مربوط به ضرایب الاستیک توده‌سنگ را محاسبه نمود. برای انجام این محاسبات، معادله تنش-کرنش به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (18)$$

با قرار دادن مقادیر مولفه‌های تنش اولیه و مقادیر کرنش‌های حاصل از مدل عددی در معادله فوق، می‌توان ضرایب الاستیک توده‌سنگ را بصورت برگشتی محاسبه نمود. بدین منظور، یک کد محاسباتی در محیط نرم‌افزار متلب توسعه داد شد که این محاسبات را انجام دهد (مطابق با پیوست). برای مدل عددی با درزه‌های افقی، این محاسبات انجام شده که خلاصه این نتایج در قالب مقادیر مدول الاستیک معادل توده‌سنگ و نسبت پواسون با دو روش محاسبات برگشتی حاصل از مدل‌سازی عددی و مقادیر حاصل از راه‌حل تحلیلی

بطور مشابه با سایر حالات قبل انجام شده است. پس از انجام مدلسازی عددی و بررسی نتایج آن (تعیین کرنش‌ها در جهات مختلف)، ضرایب الاستیک توده‌سنگ بصورت برگشتی محاسبه شد. همچنین، ضرایب الاستیک توده‌سنگ با استفاده از روابط تحلیلی آمادئی و گودمن محاسبه شد. خلاصه نتایج محاسبات مربوط به ضرایب الاستیک توده‌سنگ در جهت بارگذاری برای این آرایش هندسی از درزه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ با یک

دسته درزه افقی حاصل از روش تحلیلی آمادئی و گودمن و مدلسازی عددی ناپیوسته

parameters	analytical	Numerical	relative error (%)
Equivalent elastic modulus (GPa)	20	21	4.76
Equivalent Poisson's ratio	0.229	0.245	6.53

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ با یک

دسته درزه قائم حاصل از روش تحلیلی آمادئی و گودمن و مدلسازی عددی ناپیوسته

parameters	analytical	Numerical	relative error (%)
Equivalent elastic modulus (GPa)	30	29	3.45
Equivalent Poisson's ratio	0.23	0.22	4.55

جدول ۴. پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ با دو

دسته درزه متعامد چرخش داده شده برای دو روش مدلسازی عددی و حل حاصل از روش تحلیلی آمادئی و گودمن

parameters	analytical	Numerical	relative error (%)
Equivalent elastic modulus (GPa)	15	17	11.76
Equivalent Poisson's ratio	-	0.3	-

بررسی جدول ۴ نشان می‌دهد که برای مدل متعامد چرخش داده شده، اختلاف بین مدول الاستیک بدست آمده از دو روش تحلیلی و عددی به حدود ۱۱ درصد می‌رسد. این مقدار از خطای نسبی در مقایسه با سایر حالات از مقدار بیشتری برخوردار بوده که یکی از دلایل آن، بروز اندرکنش بین درزه‌ها و وجود اثر پواسون در این نوع از آرایش هندسی

تحلیلی آمادئی و گودمن محاسبه شد. خلاصه نتایج محاسبات مربوط به ضرایب الاستیک توده‌سنگ در جهت بارگذاری برای این آرایش هندسی از درزه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۳ مقدار مدول الاستیک و نسبت پواسون معادل در هر دو روش تحلیلی و عددی تقریباً یکسان بوده و مقدار خطای نسبی بین دو مقدار اندازه‌گیری شده بترتیب ۳/۴۵ و ۴/۵۵ درصد هستند.

در حالت دسته درزه قائم، بدلیل هم راستا بودن صفحه درزه‌ها با تنش محوری اعمالی به توده‌سنگ، درزه‌ها تغییر شکل چندانی را از خود نشان نداده که در نتیجه مدول الاستیک معادل همان مدول الاستیک ماده‌سنگ خواهد بود. این موضوع برای هر دو روش تحلیلی و عددی بطور مشابه در خروجی محاسبات منعکس شده و نتایج هر دو روش این موضوع را تصدیق می‌کند.

در مرحله بعد، مدل‌های شامل دو دسته درزه متعامد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مربوط به مدل با دو دسته درزه متعامد افقی-قائم با فاصله‌داری ۱ متر (مدل عددی شکل ۳-ج) با اعمال شرایط مرزی شامل تنش ۵ مگاپاسکال در راستاری Y و پارامترهای مقاومتی و مکانیکی نیز از سری الف جدول ۱ مشابه با جدول ۲ بدست آمده است. در این آرایش از درزه‌ها، یک دسته درزه افقی و یک دسته درزه قائم در مدل عددی حضور داشته که تغییر شکل‌ها عمدتاً در طول درزه‌های افقی حادث می‌شود. در این حالت، فقط دسته درزه‌های افقی نقش بازی کرده و بدلیل هم راستا بودن صفحه درزه‌های قائم با تنش محوری اعمالی به توده‌سنگ، درزه‌های قائم دچار تغییر شکل چندانی نمی‌شوند. به همین دلیل، نتایج محاسبات در این نوع آرایش درزه‌ها، با حالت فقط یک دسته درزه افقی شباهت بسیار زیادی خواهد داشت. با چرخش دادن این مدل (تغییر زاویه درزه‌ها نسبت به محور بارگذاری) نتایج تفاوت‌های زیادی پیدا می‌کند. بطور نمونه، مدل عددی حاوی دو دسته درزه متعامد با چرخش ۴۵ درجه درزه‌ها نسبت به یکی از محورهای مختصات در شکل ۳-د نشان داده شده است. برای این آرایش از ناپیوستگی‌ها، مدلسازی عددی

برای محاسبه ثوابت الاستیک توده‌سنگ بویژه برای حالاتی که راه‌حل‌های تحلیلی وجود ندارد، استفاده نمود. در بخش بعد، این موضوع با ذکر یک حالت فاقد راه‌حل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵. مقایسه پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ

در روش تحلیلی هوآنگ و همکاران و مدلسازی عددی

ناپیوسته			
parameter	analytical	Numerical	Relative error (%)
Equivalent elastic modulus (GPa)	28.43	29	1.97

۲-۴. تعیین مدول الاستیک توده‌سنگ در حالت تنش محصورکننده

معادلات تحلیلی ارائه شده برای محاسبه خواص الاستیک معادل توده‌سنگ از جمله معادلات آمادنی و گودمن (۱۹۸۱) و هوآنگ و همکاران (۱۹۹۵) برای شرایط بارگذاری تک محوری ارائه شده‌اند و برای سایر حالات بارگذاری بویژه برای توده‌سنگ تحت تنش محصورکننده و تنش برشی، نمی‌توان از این نوع روابط تحلیلی استفاده نمود. در چنین شرایطی، می‌توان از روش عددی ناپیوسته برای تعیین ضرایب الاستیک توده‌سنگ استفاده نمود. در این بخش، از چارچوب طی شده در بخش قبل (محاسبه برگشتی بر اساس نتایج مدل عددی ناپیوسته) برای تعیین ضرایب الاستیک توده‌سنگ حاوی ناپیوستگی‌های ممتد غیرمتعامد تحت تنش محصورکننده استفاده شده است. نتایج مربوط به این حالت بارگذاری در ادامه تشریح شده است.

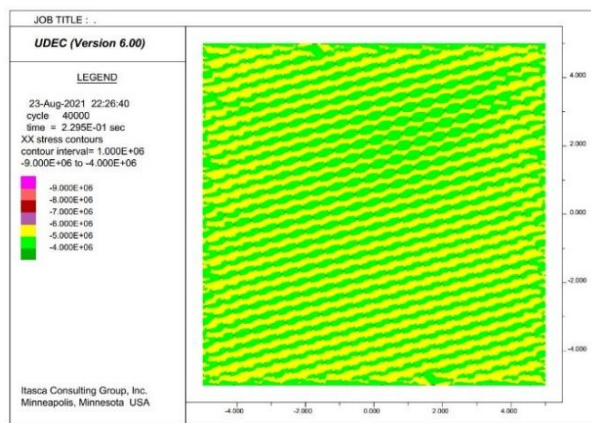
نمای کلی از مدل عددی ناپیوسته مورد استفاده برای تعیین ضرایب الاستیک توده‌سنگ در شکل ۳-و نشان داده شده است. ناپیوستگی‌های تشکیل دهنده این مدل شامل یک دسته درزه با فاصله‌داری یک متر و زاویه ۶ درجه نسبت به محور افقی (خطوط به رنگ آبی) و سطوح لایه‌بندی با زاویه ۶۶ درجه نسبت به محور افقی (خطوط به رنگ نارنجی) در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های اختصاص داده شده به این ناپیوستگی‌ها مطابق با سری ب جدول ۱ در نظر گرفته شده

درزه‌ها بوده که از این دو پدیده در روش تحلیلی صرف نظر شده ولی در نتایج عددی بطور مستقیم در محاسبات وارد شده است. لازم به ذکر است، در این حالت از آرایش ناپیوستگی‌ها، روش عددی قابلیت محاسبه نسبت پوآسون را داشته ولی این نسبت در روش تحلیلی قابل محاسبه نیست که از این نظر، روش عددی بر معادلات تحلیلی کارایی بیشتری را خواهد داشت.

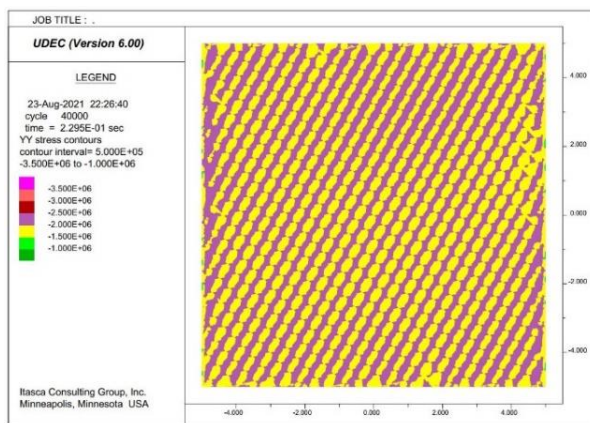
آخرین مقایسه بین نتایج مدل عددی ناپیوسته و راه‌حل‌های تحلیلی برای دو دسته درزه غیرمتعامد انجام شده است. بدین منظور، آرایش دسته درزه‌ها مطابق با شکل ۳-ه در نظر گرفته شده است. در این آرایش، دو دسته درزه با فاصله‌داری یک متر و با زاویه ۴۰ درجه نسبت به هم (حالت متقارن نسبت به محور قائم) در نظر گرفته شده است. برای مدل با ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر، شرایط تنش تک محوری در راستای y با مقدار تنش ۵ مگاپاسکال به مدل وارد شده است. بعد از حل مدل عددی، بطور مشابه با فرآیند انجام شده برای سایر مدل‌های عددی، مقادیر کرنش‌ها از خروجی مدل عددی ناپیوسته استخراج شده و سپس با استفاده از محاسبات برگشتی (رابطه ۱۷ و ۱۸)، مقدار مدول توده‌سنگ در جهت بارگذاری محاسبه شد. در ادامه، با استفاده از روابط تحلیلی هوآنگ و همکاران (روابط ۸ الی ۱۶)، مدول الاستیک توده‌سنگ محاسبه شد. خلاصه این محاسبات در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۵، مقدار مدول الاستیک محاسبه شده با دو روش تحلیلی و عددی بسیار نزدیک به هم بوده و خطای نسبی بین این دو مقدار کمتر از ۲ درصد است. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده برای آرایش‌های مختلف از درزه‌داری توده‌سنگ حاکی از انطباق بسیار خوب بین مقادیر مدول الاستیک پیش‌بینی شده با روش عددی و روش تحلیلی است. این تطابق هم برای حالت‌های ساده مثل تک دسته درزه افقی و قائم و هم برای دسته درزه‌های متعامد و غیر متعامد بدست آمده است. این تطابق تایید بسیار خوبی برای کارایی روش عددی ناپیوسته برای تعیین ثوابت الاستیک توده‌سنگ است. در نتیجه، می‌توان از روش عددی ناپیوسته

محل سطوح ناپیوستگی‌ها است. در ادامه، مقادیر جابجایی‌های حاصل از مدل عددی نیز مورد بررسی قرار گرفت. کانتور جابجایی‌های افقی و قائم ایجاد شده در توده‌سنگ در شکل ۷ نشان داده شده است. در ادامه، با میانگین‌گیری مقادیر جابجایی در راستاهای مختلف، مقدار کرنش متوسط ایجاد شده در جهات مختلف محاسبه شد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۱۷ و ۱۸، ضرایب الاستیک معادل توده‌سنگ در جهات مختلف محاسبه شد (نمونه کد این محاسبات در محیط متلب در پیوست نشان داده شده است).

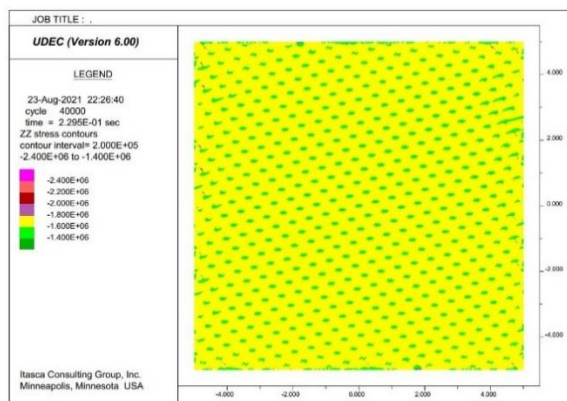
که بطور جداگانه به دسته درزه‌ها و لایه‌بندی تخصیص داده شده است. بعد از ساخت مدل هندسی، تنش نرمال در راستای y و x به ترتیب ۲- و ۵- مگاپاسکال و تنش برشی ۰/۵- مگاپاسکال بر روی مرزهای مدل اعمال شده است. برای بررسی مقیاس، مدل‌سازی عددی برای دامنه با ابعاد ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۳۰ متر انجام شده است. نتایج مدل اولیه با ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر (شکل ۳-و) در قالب کانتورهای تنش در جهات مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر تنش‌ها در هر یک از جهات بدلیل حضور درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی دارای تمرکز متفاوت در



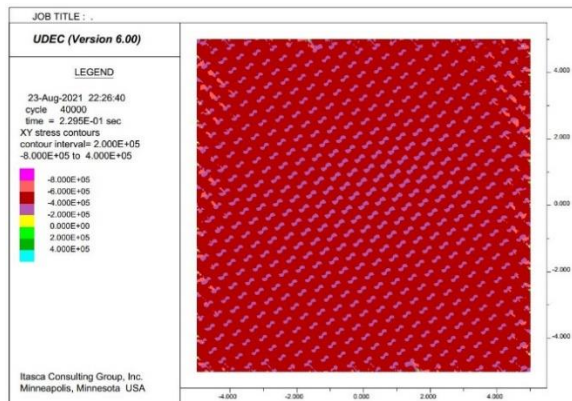
(ب)



(الف)

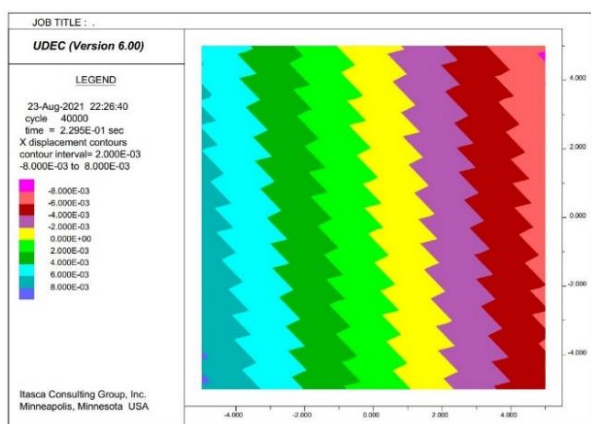


(د)

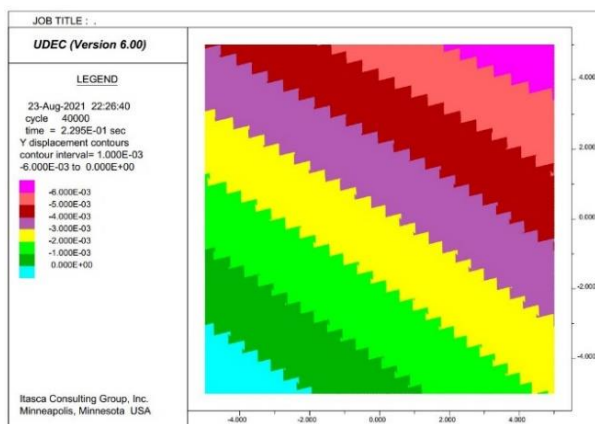


(ج)

شکل ۶. کانتورهای تنش در جهات مختلف: (الف) در راستای y ، (ب) در راستای x ، (ج) در راستای xy و (د) در راستای z (نتایج مربوط به مدل عددی تحت تنش محصور کننده).



(ب)



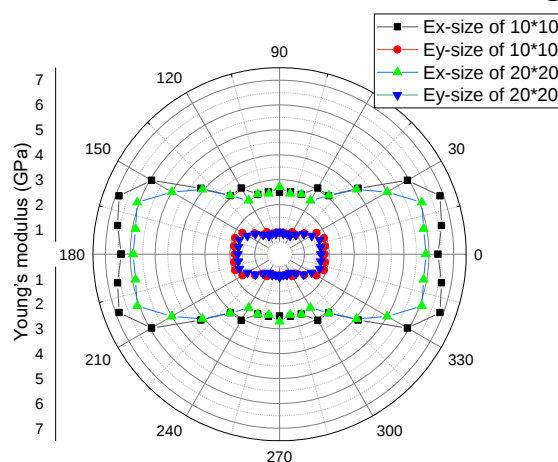
(الف)

شکل ۷. کانتور جابه‌جایی در جهات مختلف: (الف) در راستای Y و (ب) در راستای X.

علت چرخش و محاسبه عملیات تا زاویه ۹۰ درجه این است که بعد از زاویه ۹۰ درجه، موقعیت قرارگیری هندسه مدل تکرار می‌شود. فرآیند محاسبات در زوایای مختلف برای مدل با ابعاد ۱۰ متر در ۱۰ متر و همچنین مدل با ابعاد ۲۰ متر در ۲۰ متر انجام شده که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل ۸، نتایج مربوط به مدول الاستیک توده‌سنگ در جهات افقی و قائم برای ابعاد مختلف دامنه محاسباتی (مدل‌های ۱۰ متر در ۱۰ متر و ۲۰ متر در ۲۰ متر) بر روی نمودار قطبی نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۸، با چرخش آرایش ناپیوستگی‌های توده‌سنگ مدل، مقادیر مدول‌های الاستیک در جهت افقی و قائم دچار تغییرات می‌شود. بیشترین مقادیر مدول در زاویه چرخش ۲۰ درجه بدست آمده است. همچنین، برای زوایای چرخش بیش از ۳۰ درجه، مقادیر مدول یک کاهش حدود ۵۰ درصدی را تجربه کرده و در مقادیر چرخش ۶۰ درجه به بعد، مقادیر مدول الاستیک معادل توده‌سنگ کاهش شدیدی را نسبت به مقادیر مربوط به زوایای چرخش کم را نشان می‌دهد. الگوی تغییرات مقادیر مدول در جهات افقی و قائم دارای شباهت زیادی به هم هستند. همچنین، الگوی تغییرات مقادیر مدول برای ابعاد مختلف اندازه دامنه (برای مدل‌های با ابعاد ۱۰ متر و ۲۰ متر) از نظر کلی با یکدیگر شباهت زیادی دارد. با افزایش ابعاد دامنه از ۱۰ متر به ۲۰ متر، مقادیر مدول در

برای بررسی تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، آرایش ناپیوستگی‌های مورد استفاده با گام‌های ۱۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت (زوایای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰) چرخانده شده و سپس مجدداً مدل عددی مطابق با شرایط مرزی پیشین (نش نرمال در راستای Y و X به ترتیب ۲- و ۵- مگاپاسکال و تنش برشی ۰/۵- مگاپاسکال) حل شده است. برای هر یک از زوایای چرخش، محاسبات مربوط به تعیین مقادیر ضرایب الاستیک توده‌سنگ در جهات مختلف با استفاده از نتایج مدل عددی و رابطه ۱۷ و ۱۸ انجام شده و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار قطبی مدول الاستیسیته در راستای Y و X در اندازه‌های مدل ۱۰ و ۲۰ متری، در زاویه چرخش‌های به فاصله ۱۰ درجه.

جهت x (مدول افقی) تغییراتی را نشان داده ولی برای مدول های قائم تغییرات کمتری نسبت به تغییر مقیاس دیده می شود. بیشترین تغییرات در مدول افقس معادل توده سنگ در تغییر مقیاس دامنه (اندازه توده سنگ) برای زوایای چرخش کمتر از 30° درجه رخ داده است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، تعیین خواص مکانیکی الاستیک توده سنگ با استفاده از روش عددی ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، مدل سازی عددی برای طیف وسیعی از آرایش هندسی ناپیوستگی ها انجام و بعد از حل مدل عددی، مقادیر کرنش ها و تنش های ایجاد شده در جهات مختلف از مدل عددی استخراج شد. سپس، با قرار دادن خروجی های مدل عددی در روابط کلاسیک تنش-کرنش، مقادیر ضرایب الاستیک توده سنگ معادل محاسبه شد. مقادیر ضرایب الاستیک حاصل از محاسبات برگشتی نتایج مدل سازی عددی ناپیوسته برای ۵ آرایش هندسی مختلف (شامل یک دسته درزه افقی، یک دسته درزه قائم، دو دسته درزه متعامد افقی و قائم، دو دسته درزه متعامد چرخش داده شده و دو دسته درزه غیرمتعامد) با مقادیر حاصل از روابط تحلیلی مقایسه شد. این مقایسه بمنظور ارزیابی و صحت سنجی محاسبات برگشتی ضرایب الاستیک توده سنگ معادل با استفاده از مدل عددی محیط ناپیوسته انجام شد. در ادامه، روش پیشنهادی برای توده سنگ حاوی یک دسته درزه و سطوح لایه بندی غیرمتعامد تحت تنش محصور کننده (حالتی که فاقد روابط تحلیلی است) پیاده سازی شد. این فرآیند برای زوایای مختلف از چرخش ناپیوستگی ها و همچنین دو مقیاس مختلف از مدل عددی انجام شد. بر اساس ارزیابی های انجام شده در مراحل مختلف این تحقیق، نتایج زیر بدست آمده است:

نتایج خروجی پارامترهای مکانیکی معادل توده سنگ (مدول الاستیک معادل و نسبت پواسون معادل) در روش تحلیلی آمادگی و گودمن برای تمام حالت ها شامل ۱) یک دسته درزه افقی ۲) یک دسته درزه عمودی ۳) دو دسته درزه متعامد ۴) دو دسته درزه متعامد چرخش داده شده و همچنین روابط تحلیلی هوانگ و همکاران در مقایسه با روش مدل سازی عددی ناپیوسته مقدار تقریباً یکسانی را نشان دادند.

مقدار خطای نسبی بین دو مقدار اندازه گیری شده (مدول الاستیک معادل و نسبت پواسون معادل) به ترتیب برای حالت یک دسته درزه افقی $4/76$ و $6/53$ درصد، حالت یک دسته درزه عمودی $3/45$ و $4/55$ درصد، حالت دو دسته درزه متعامد $4/76$ و $6/53$ درصد بدست آمد. همچنین، خطای نسبی محاسبات برگشتی مدول الاستیک معادل در حالت دو دسته درزه متعامد چرخش داده شده $11/76$ درصد و حالت دو دسته درزه غیرمتعامد در حدود $1/97$ درصد محاسبه شد.

پایین بودن مقادیر خطای نسبی مقادیر خواص مکانیکی الاستیک توده سنگ حاکی از کارایی محاسبات برگشتی مبتنی بر روش عددی ناپیوسته بوده و از این روش می توان برای تعیین ضرایب الاستیک توده سنگ معادل استفاده نمود. بر این اساس، روش محاسبات برگشتی برای توده سنگ تحت تنش محصور کننده و فاقد راه حل تحلیلی پیاده سازی شد که نتایج حاصل نشان دهنده وابستگی شدید مقادیر ضرایب الاستیک توده سنگ به زاویه چرخش ناپیوستگی ها است. همچنین، بین مقادیر مدول الاستیک در جهات افقی و عمودی تفاوت بسیار زیادی وجود داشته که این موضوع بیانگر آنیزوتروپی شدید رفتار الاستیک توده سنگ است. همچنین، روش محاسبات برگشتی مبتنی بر روش عددی ناپیوسته توانایی بسیار خوبی در تعیین ضریب پواسون توده سنگ داشته که از این نظر بر روابط تحلیلی دارای برتری است.

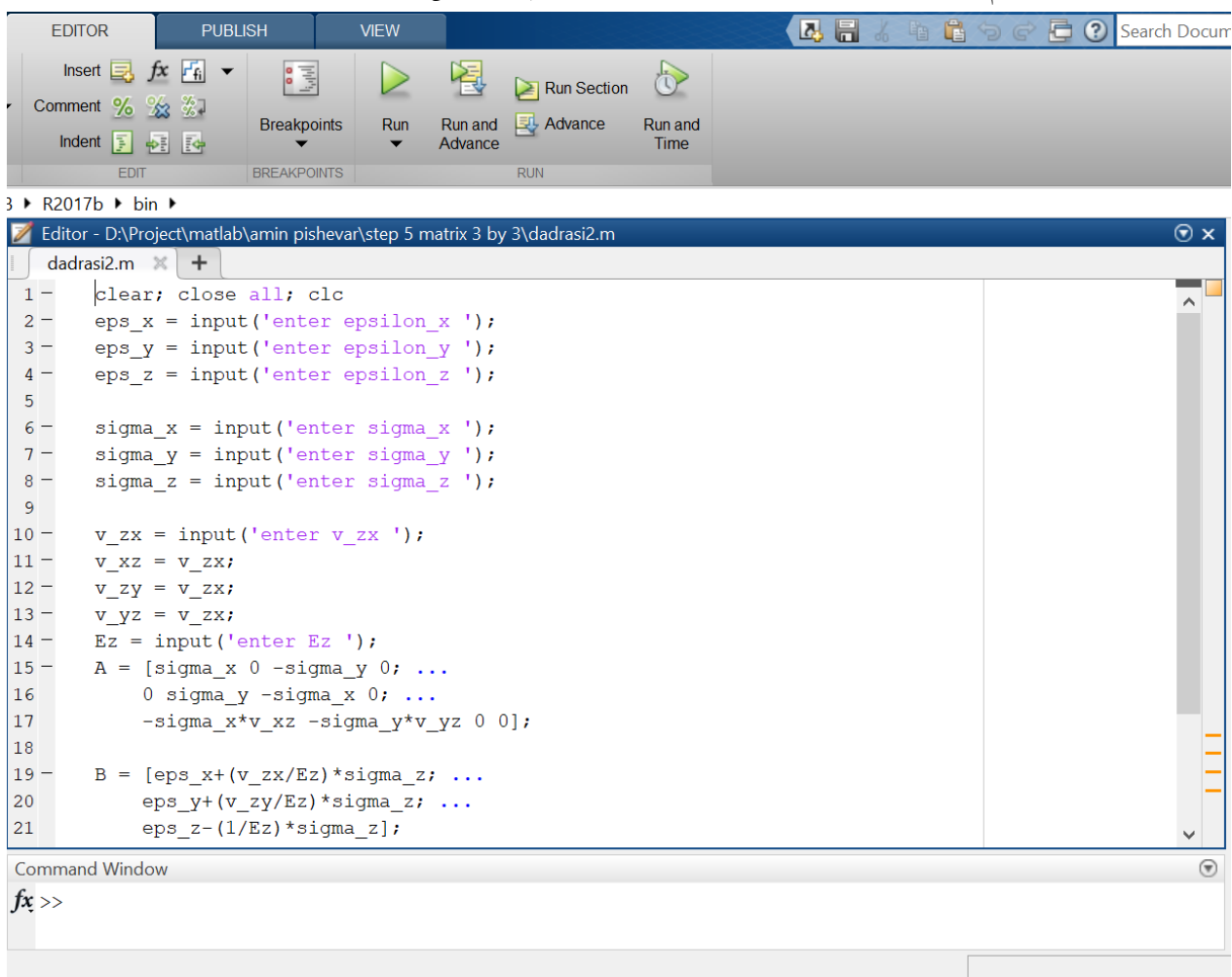
منابع

- Amadei, B., Goodman, R., 1981. A 3-D constitutive relation for fractured rock masses. *Proceedings of the international symposium on the mechanical behavior of structured media*, Ottawa. pp. 249-268.
- Chen, D.H., Chen, H.E., Zhang, W., Tan, C., Ma, Z.F., Chen, J.Y., Shan, B., 2020. Buckling failure mechanism of a rock dam foundation fractured by gentle through-going and steep structural discontinuities. *Sustainability* 12 (13), 5426.
- Cui, J., Jiang, Q., Feng, X.T., Li, S.J., Gao, H., Li, S.J., 2016. Equivalent elastic compliance tensor for rock mass with multiple persistent joint sets: exact derivation via modified crack tensor. *J. Cent. South Univ.* 23 (6), 1486e1507.
- Ebadi, M., Karimi Nasab, S., Jalaifar, H., 2011. Estimating the deformation modulus of jointed rock mass under multilateral loading condition using analytical methods. *J. Min. Environ* 2 (2), 146e156.
- Fattahi, H., Varmazyari, Z., Babanouri, N., 2019. Feasibility of Monte Carlo simulation for predicting deformation modulus of rock mass. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 89, 151e156.
- Gerrard, C.M., 1982. Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 19 (1), 15e23.
- Huang, T., Chang, C., Yang, Z., 1995. Elastic moduli for fractured rock mass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 135-144.
- Jing, L., 2003. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, no. 3, pp. 283-353.
- Kulatilake, P.H.S.W., Stephansson, O., 1993. Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock in three dimensions. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 30 (5), 479e501.
- Khani, A., Baghbanan, A., Norouzi, S., Hashemolhosseini, H., 2013. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 60, 345e352.
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., 2018. Deformation modulus of rock masses: An assessment of the existing empirical equations. *Geotech. Geol. Eng.* 36 (4), 2683e2699.
- Kavur, B., Stambuk Cvitanovi c, N., Hr zenjak, P., 2015. Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 73, 102e114.
- Laghaei, M., Baghbanan, A., Hashemolhosseini, H., Dehghanipoodeh, M., 2018. Numerical determination of deformability and strength of 3D fractured rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 110, 246e256.
- Ma, G., Li, M., Wang, H., Chen, Y., 2019. Equivalent discrete fracture network method for numerical estimation of deformability in complexly fractured rock masses. *Engineering Geology*, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105784>
- Min, K. B., Jing, L., 2003. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, no. 6, pp. 795-816.
- Oda, M., 1986. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses. *Water resources research*, vol. 22, no. 13, pp. 1845-1856.
- Panthee, S., Singh, P.K., Kainthola, A., Das, R., Singh, T.N., 2018. Comparative study of the deformation modulus of rock mass. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 77 (2), 751e760.
- Sadd, M. H., 2009. *Elasticity: theory, applications, and numerics*. Academic Press.
- Singh, M., Seshagiri Rao, K., 2005. Empirical methods to estimate the strength of jointed rock masses. *Eng. Geol.* 77 (1e2), 127e137.
- Salamon, M., 1968. Elastic moduli of a stratified rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 5, 519e527.
- Wittke, W., 2014. *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. Wilhelm Ernst & Sohn, Germany.
- Wu, F.Q., Deng, Y., Wu, J., Li, B., Sha, P., Guan, S.G., Zhang, K., He, K.Q., Liu, H.D., Qiu, S.H., 2020. Stress-strain relationship in elastic stage of fractured rock mass. *Eng. Geol.* 268, 105498.
- Yong, R., Ye, J., Li, B., Du, S.G., 2018. Determining the maximum sampling interval in rock joint roughness measurements using Fourier series. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 101, 78e88.

- Yang, J.P., Chen, W.Z., Yang, D.S., Yuan, J.Q., 2015. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Comput. Geotech.* 64, 20-31.
- Zhang, W., Zhao, Q.H., Huang, R.Q., Chen, J.P., Xue, Y.G., Xu, P.H., 2016. Identification of structural domains considering the size effect of rock mass discontinuities: A case study of an underground excavation in Baihetan Dam, China. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 51, 75e83.
- Zhang, W., Lan, Z.G., Ma, Z.F., Tan, C., Que, J.S., Wang, F.Y., Cao, C., 2020a. Determination of statistical discontinuity persistence for a rock mass characterized by non-persistent fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 126, 104177.

پیوست

برای انجام سریع محاسبات ماتریس انطباق توضیح داده شده در مدلسازی ناپیوسته، از نرم افزار متلب استفاده شد. در شکل (پ ۱) نمونه کد نوشته شده در نرم افزار متلب برای ماتریس انطباق استفاده شده در پروژه، قابل مشاهده است.



شکل پ ۱. نمونه کد نوشته شده در نرم افزار متلب برای ماتریس انطباق.