

ارزیابی صحت برآورد تغییر شکل توده‌سنگ در فرضیه محیط پیوسته معادل تحت شرایط مختلف هندسی درزه‌ها

مسعود مزرعه لی^{*}، حسین سالاری راد^۳، هادی فتحی پور آذر^۴

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

مطالعه درزه‌ها و تاثیر آنها بر رفتار توده‌سنگ زمینه تحقیقاتی فعالی در ژئومکانیک فراهم آورده است. تغییر شکل پذیری یک توده‌سنگ حاوی دسته درزه‌های سیستماتیک ممتد به طور بالقوه ناهمسانگرد بوده و به صورت عمده به وسیله خصوصیات مکانیکی و هندسی درزه‌ها کنترل می‌شود. خصوصیات تغییر شکل سنگ‌ها به طور معمول با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا تعیین می‌شوند. آزمایشات برجا بر اساس بارگذاری توده‌سنگ و اندازه‌گیری تغییر شکل حاصله استوار هستند. از روش‌های عددی و تحلیلی می‌توان به عنوان جایگزین آزمایش‌های برجا در هزینه و وقت‌گیر برای مطالعه خصوصیات تغییر شکل سنگ‌ها استفاده کرد. در مدل‌های تحلیلی، فرضیاتی مانند تعامد دسته درزه‌ها موجب ساده‌سازی‌هایی می‌شوند که ممکن است از واقعیت به دور باشند. روش‌های عددی در مقایسه با خط‌مشی‌های تحلیلی دارای این مزیت هستند که در استنتاج خواص توده‌سنگ می‌توان تاثیر نامنظم بودن هندسه سیستم درزه‌داری را به طور مستقیم در مدلسازی دخیل نمود. در این مقاله، مدل‌های عددی اجزای مجزا فارغ از ساده‌سازی‌های هندسی مفروض در روش‌های حل دقیق اجرا شده‌اند. بررسی آماری نتایج عددی حاصل به منظور اطلاع از نحوه پراکندگی داده‌ها انجام شده است. سپس، میزان انحراف تغییر شکل برآورد شده با استفاده از روابط ساختاری شامل مدل‌های پیشنهادی (۱) آمادبی و گودمن و (۲) هوانگ و همکاران نسبت به مدل‌های عددی جهت ارزیابی صحت روابط مذکور در شرایط هندسی واقعی درزه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مولفه‌های تغییر شکل در بیشتر موارد بیانگر تاثیر قابل توجه پارامترهای هندسی مورد مطالعه در روند تغییرات است. این نتایج برای بررسی صحت روابط مذکور در برآورد میدان تغییر شکل توده‌سنگ‌های درزه‌دار غیرمتعامد ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها

توده سنگ درزه‌دار، تغییر شکل پذیری، محیط پیوسته معادل، روش اجزای مجزا

*عهده دار مکاتبات: mmlee@aut.ac.ir

۱- مقدمه

دسته درزه متعامد است، انجام گرفت. در این مدل فرض بر این است که سنگ بکر رفتار الاستیک خطی و حداکثر تا ۳ صفحه تقارن متعامد موازی دسته درزه‌ها داشته باشد [۴]. در ادامه تحقیقات مذکور، هوانگ و همکاران ثابت‌های ساختاری را مبتنی بر فرمولاسیون محیط پیوسته برای توده‌سنگ‌های حاوی سه دسته درزه متقاطع استنتاج کرده‌اند. آنها سختی‌های نرمال و برشی و فاصله‌داری ثابتی را برای دو دسته درزه متقاطع در نظر گرفتند [۸]. ژانگ جهت تعیین خواص تغییرشکل الاستیک یک توده‌سنگ به شدت درزه‌دار، یک روش متوسط‌گیری هندسی ساده پیشنهاد کرد. فرض وی بر این است که تمامی دسته درزه‌ها دارای فاصله‌داری، سختی نرمال الاستیک و سختی برشی یکسان بوده و نقش هر دسته ناپیوستگی در ماتریس نرمی توده‌سنگ تنها به جهت‌یابی آن وابسته است [۷].

روش دیگری که به منظور مطالعه غیرمستقیم رفتار توده‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش عددی است. در این روش با ترکیب خواص مقاومتی و تغییرشکل سنگ بکر و درزه‌ها، رفتار متناظر توده‌سنگ محاسبه می‌شود. این روش اجازه مشارکت هر نوع شبکه‌ای از درزه‌ها (از جمله شبکه شکستگی مجزا) را در توده‌سنگ داده و همچنین برهم‌کنش بین درزه‌ها و سنگ بکر را نیز در نظر می‌گیرد. روش‌های المان محدود و تفاضل محدود از پرکاربردترین روش‌های عددی محیط پیوسته در زمینه مطالعه رفتار مکانیکی ژئومتریال‌ها شناخته می‌شوند. با این وجود، در کاربرد این روش‌ها، مش‌بندی المان محدود ساختارهای حاوی درزه‌هایی با چگالی بالا، یکی از اساسی‌ترین مشکلات در راه مدلسازی صحیح است [۹]. از طرف دیگر، روش المان مجزا به دلیل مزیتش در مدلسازی صریح هندسه شبکه ناپیوستگی و مدل‌های رفتاری شکستگی‌ها و سنگ بکر، شیوه‌ای قدرتمند برای تحلیل تنش توده‌سنگ‌های بلوکی درزه‌دار است [۱۰]. کریستنسن و همکاران [۱۱] خواص مقاومتی و تغییرشکل مواد سنگی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی آزمون‌های آزمایشگاهی سه محوره، تک محوره و کششی در محیط نرم‌افزار UDEC مورد مطالعه قرار داده و پارامترهای معادل معیارهای شکست موهر کولمب و هوک براون را برای این مواد به دست آوردند. آنها بیان می‌کنند که مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی از روند مشابهی برخوردار هستند. کولاتیلاک و همکاران در سال ۱۹۹۳ به بررسی و تعیین پارامترهای دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ با درزه‌های

خصوصیات توده‌سنگ‌ها در مقیاس بزرگ اغلب از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم به دلیل هزینه گزاف، زمان‌بر بودن و محدودیت نتایج آزمون‌های برج‌در دست نیست. از طرف دیگر، پیش‌بینی رفتار تغییرشکل توده‌سنگ درزه‌دار به وسیله مدلسازی عددی به منظور مطالعه تاثیر بازگذاری، رفتار ماده، درزه‌ها و توده‌سنگ مفید واقع شده و کاربردهای امیدبخش بسیاری دارد.

مدلسازی پاسخ توده‌سنگ درزه‌دار به دلیل وجود ناپیوستگی‌های ذاتی و خواص مکانیکی وابسته به هندسه، امر بسیار مهم و چالش برانگیزی است. هنگامی که تعداد درزه‌ها در یک مدل افزایش می‌یابد، تعریف صریح تمامی آنها دشوار و حتی در برخی از موارد غیرممکن می‌گردد. علاوه بر این، اندازه یک مدل ناپیوسته به دلیل وابستگی مجزاسازی عددی به فاصله‌داری و جهت‌یابی درزه‌ها، با افزایش تعداد درزه‌های مدل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از این‌رو، مدل‌های محیط پیوسته معادل را می‌توان به عنوان جایگزین مدل‌های ناپیوسته در تحلیل تغییرشکل توده‌سنگ‌های درزه‌دار به کار گرفت.

راه‌حل‌های تحلیلی فرم دقیق بسیار خلاصه و ساده هستند و اغلب برای حالت‌هایی که سیستم هندسی درزه‌ها منظم، متعامد و کاملاً پیوسته باشد، قابل استفاده اند. این راه‌حل‌ها برای درزه‌های نامنظم موجود در طبیعت نمی‌توانند به کار گرفته شوند. تنها استثنا در این نوع تحلیل‌ها، تئوری تانسور شکاف است که برای پیدا کردن خواص ناهمسانگردی کشسانی سیستم‌های درزه‌داری نامنظم که دارای خواص مکانیکی، جهت‌یابی، ابعاد و اندازه‌های مختلف هستند، به کار برده می‌شود [۱].

تلاش برای یافتن راه‌های تحلیلی در ارزیابی خواص معادل توده‌سنگ‌های درزه‌دار تاریخچه‌ای طولانی دارد و چندین روش تحلیلی برای حالت‌های هندسی ساده درزه‌داری همچون سنگ‌های دارای لایه‌بندی [۲]، مجموعه درزه‌های شطرنجی شکل [۳]، توده‌سنگ‌های با درزه‌های متعامد [۴]، صفحات لایه‌بندی ارتورومبیک [۵]، درزه‌های تصادفی [۶] و توده‌سنگ به شدت درزه‌دار [۷] ارایه شده است. تحقیقاتی توسط آمادی و گودمن با هدف ارایه رابطه‌ای ساختاری برای تشریح رفتار غیرخطی یک حجم همگن ناهمسانگرد ناپیوسته از سنگ که دارای حداکثر سه

مقاومت و تغییرشکل آنها بوده است. هر چند این مطالعات نتایج ارزشمندی ارائه نموده است، اما به دلیل مفروضات اولیه شامل ساده‌سازی‌هایی می‌شوند. به عنوان مثال، الگوی درزه‌داری متعامد مورد استفاده در این مدل‌ها بیان می‌کند که می‌توان از تقاطع بین دسته درزه‌ها صرف‌نظر نمود. از طرف دیگر، هیچ‌یک از مطالعات عددی تا کنون به بررسی میزان صحت نتایج مدل‌های محیط پیوسته معادل در شرایط درزه‌داری پیچیده نپرداخته‌اند. از آنجایی که مدل تحلیلی ارائه شده توسط آمادبی و گودمن پر کاربردترین روش در برآورد مولفه‌های تغییرشکل محیط‌های حاوی سه دسته درزه پایاست، بررسی میزان صحت نتایج آن در شرایط هندسی حقیقی درزه‌ها حائز اهمیت فراوانی است. با این وجود، در هیچ کدام از مطالعات انجام شده، تاثیر انحراف زاویه شیب و امتداد دسته درزه‌ها در صحت مولفه‌های تغییرشکل محاسبه شده به وسیله روابط محیط پیوسته معادل مطالعه نشده است. در این مقاله مطالعه‌ای در این زمینه با استفاده از مدل‌های پیشنهادی آمادبی و گودمن و هوانگ (که می‌توان آن را حالت تعمیم یافته مدل آمادبی و گودمن دانست) انجام و نتایج روش‌های تحلیلی مذکور با روش عددی اجزای مجزا مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- رویکرد محیط پیوسته معادل

روش محیط پیوسته معادل برپایه تکنیک همگن‌سازی قرار گرفته است که در آن ماده اولیه ناپیوسته با یک ماده پیوسته جایگزین می‌گردد. این ماده فرضی رفتاری مشابه رفتار الاستیک و غیرالاستیک ماده ناپیوسته اولیه نشان می‌دهد.

۲-۱- محیط پیوسته معادل یک توده سنگ درزه‌دار

ارتوتروپیک

آمادبی و گودمن در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد کرده‌اند که برای یک حالت کلی از جسمی که دارای سه دسته درزه متعامد است و هریک از دسته درزه‌ها موازی یک صفحه تقارن الاستیک هستند می‌توان جسم درزه‌دار را با یک محیط پیوسته معادل ارتوتروپیک جایگزین نمود. روش‌های تحلیلی در این حالت برای آزمایش‌های بارگذاری تک محوره جهت اثبات قابلیت کاربرد رابطه ساختاری پیشنهادی استنتاج شده است [۴]. سنگ بکر میان درزه‌ها در این مدل همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. توده سنگ مورد نظر دارای سه دسته

محدود در سه بعد پرداختند [۱۲]. آنها روشی برای مطالعه تاثیر هندسه شبکه شکستگی‌ها از جمله چگالی درزه‌داری، ابعاد درزه‌ها و جهت‌گیری آنها تحت عنوان مولفه‌های تانسور شکستگی ارائه دادند. در این روش درزه‌های مصنوعی ساخته شدند که از تقاطع با درزه‌های واقعی بلوک‌های مجزا را تشکیل می‌دادند. بیدگلی و همکاران [۱۳] یک روش عددی سیستماتیک دو بعدی برای پیش‌بینی مقاومت و تغییرشکل‌پذیری سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از روش اجزای مجزا را در ادامه کارهای انجام شده توسط مین و جینگ [۱۴] و باغبانان [۱۵] ارائه کردند. آنها بیان می‌کنند که اگر ابعاد مدل کوچک‌تر از ابعاد حجم معرف اولیه^۱ توده سنگ مورد مطالعه باشد، نتایج نشان‌دهنده تاثیر شگرف مقیاس مدل تحت مطالعه بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل سنگ‌های درزه‌دار خواهد بود و هنگامی که ابعاد مدل به مقدار حجم معرف مورد نظر می‌رسد این تغییرات حداقل می‌شوند. وو و کولاتیلاک [۱۶] از 3DEC برای تعیین حجم معرف و خواص مکانیکی و تحلیل تنش توده سنگ واقع در ساختگاه سدی در چین استفاده کردند. آنها از تئوری تانسور شکاف برای ترکیب تاثیر تعداد دسته درزه‌ها، شدت و توزیع جهت‌یابی و اندازه دسته درزه‌ها بهره گرفته و از روشی که کولاتیلاک پیشنهاد کرده بود برای تعیین ابعاد حجم معرف استفاده نمودند. جیان پینگ و همکاران [۹] از روش المان محدود برای مطالعه اثر مقیاس و خصوصیات ناهمسانگرد مقاومت فشاری تک محوره و مدول تغییرشکل توده سنگ‌های درزه‌دار استفاده کردند و نتیجه گرفتند که برای هر توده سنگ یک کرنش بحرانی وجود دارد که عمدتاً توسط مقاومت فشاری تک محوره آن کنترل می‌شود. آلشکان و همکاران [۱۷] روشی برای پیش‌بینی مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از UDEC ارائه کردند. آنها توده سنگ را به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر مدل‌سازی کردند که می‌تواند به عنوان یک ماده دست‌نخورده عمل کند و یا در امتداد یک ناپیوستگی از پیش تعیین شده بلغزد. لقایی و همکاران [۱۸] از روش عددی برای تعیین تانسور ثابت‌های الاستیک و حجم معرف اولیه بر اساس تغییرشکل‌پذیری و مقاومت توده سنگ حاوی شکستگی‌های نامنظم و تصادفی در سه بعد استفاده کردند.

هدف از مطالعات انجام شده در زمینه روش‌های تحلیلی، اغلب بررسی تاثیر فراوانی و جهت‌یابی دسته درزه‌ها بر روی

اگر تنش‌ی مطابق شکل ۱ در جهت z اعمال شده و θ زاویه شیب دسته درزه J_1 باشد، مولفه‌های کرنش به صورت رابطه (۱) حاصل خواهند شد:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \left(\frac{\sin^2 2\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{n1}S_1} + \frac{1}{k_{n2}S_2} - \frac{1}{k_{s1}S_1} - \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) - \frac{\nu}{E} \right) \sigma_V \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu}{E} \sigma_V \\ \varepsilon_z &= \left(\frac{\cos^4 \theta}{k_{n1}S_1} + \frac{\sin^4 \theta}{k_{n2}S_2} + \frac{\sin^2 2\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{s1}S_1} + \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) + \frac{1}{E} \right) \sigma_V \\ \gamma_{xz} &= \left(\sin 2\theta \left(\frac{\cos^2 \theta}{k_{n1}S_1} + \frac{\sin^2 \theta}{k_{n2}S_2} \right) - \frac{\sin 4\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{s1}S_1} + \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) \right) \sigma_V \end{aligned} \quad (1)$$

همکاران در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است که تعامد دسته درزه‌های J_1 و J_2 جزو فرضیات آن نیست. این مدل در بخش بعد شرح داده می‌شود.

۲-۲ روابط ساختاری الاستیک توده‌سنگ‌های دارای دو دسته درزه متقاطع

هوانگ و همکاران ثابت‌های ساختاری را برای توده‌سنگی شامل سه دسته درزه همانند آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده است مبتنی بر فرمولاسیون مکانیک پیوسته به طور صریح استنتاج کرده‌اند [۸]. سختی‌های دو دسته درزه ابتدایی (k_s و k_n) که از سختی‌های دسته درزه سوم متفاوت است، یکسان فرض می‌شود. فاصله‌داری دو دسته درزه ابتدایی یکسان و برابر با S فرض شده است؛ فاصله‌داری دسته درزه سوم برابر با S_3 در نظر گرفته می‌شود.

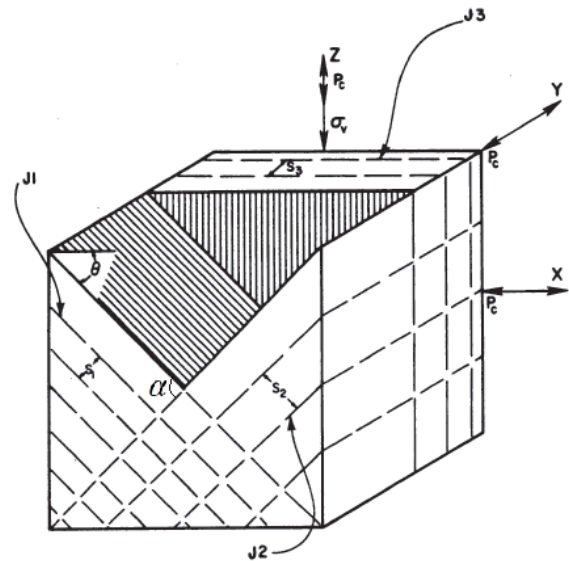
رابطه‌های حل دقیق مدول‌ها با صرف نظر از تاثیر اتساع

درزه به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{xx} \\ \Delta \varepsilon_{yy} \\ \Delta \varepsilon_{zz} \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_{xx} \\ \Delta \sigma_{yy} \\ \Delta \sigma_{zz} \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

مدول‌های یانگ درزه (E_x, E_y, E_z) و مدول‌های برشی درزه (G_{zx}, G_{yz}, G_{xy}) که تابعی از سختی، جهت‌یابی و

درزه متعامد است ($\alpha = 90^\circ$). امتداد دو دسته درزه در جهت y و امتداد دسته درزه سوم عمود بر آن بوده و هیچ تغییری در حالت تنش درون نمونه‌ها وجود ندارد.



شکل ۱: فشار تک محوره (σ_v و $P_c = 0$) [۴]

رابطه (۱) برای درزه‌هایی ارایه شده است که نسبت به هم حالت متعامد داشته باشند. مدل دیگری توسط هوانگ و

خصوصیات سنگ بکر در ماتریس نرمی رابطه (۲) با استفاده از مدول یانگ (E_0), مدول برشی (G_0) و نسبت پواسون (ν_0) نشان داده شده است. خصوصیات درزه‌ها با

شده است. مدل عددی پس از تخصیص اطلاعات مذکور اجرا و پس از به تعادل رسیدن آن، مقادیر مولفه‌های تغییر شکل ثبت شده است.

جدول ۱: خصوصیات سنگ بکر

مقدار	خصوصیات
۲۷۰۰	چگالی (Kg/m^3)
۳۵	مدول یانگ (GPa)
۰/۲۵	نسبت پواسون
۲۳/۳۳	مدول بالک (GPa)
۱۴	مدول برشی (GPa)

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی و هندسی درزه‌های مدل اولیه

مقدار	خصوصیات مکانیکی
۱۱۰	سختی نرمال (GPa/m)
۱۰	سختی برشی (GPa/m)
۰/۵۵	چسبندگی (MPa)
۳۳	زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)
۲	فاصله‌داری (m)

ساختار نرم‌افزار 3DEC حاوی چند مدل رفتاری مختلف برای سنگ بکر و درزه‌ها است که بسته به شرایط مساله می‌توان از یک یا چند نوع از آنها استفاده کرد. در پژوهش حاضر با توجه به فرضیه‌های حاکم بر مدل‌های ساختاری محیط پیوسته معادل مورد نظر، مدل رفتاری الاستیک همسانگرد برای سنگ بکر و مدل لغزش کولمب برای درزه‌ها منظور شده است. توجه شود که به دلیل اینکه هدف، مطالعه تغییرشکل الاستیک توده‌سنگ‌های درزه‌دار به صورت تحلیلی و عددی است از تغییرشکل پلاستیک درزه‌ها جلوگیری شده است.

شرایط مرزی مدل در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. جابجایی مرز پایین بلوک مورد نظر جهت تحلیل تغییرشکل در جهت z با تکیه‌گاه غلتکی محدود و جابجایی دیگر سطوح مدل آزاد است. مسیر تنش نشان داده شده در شکل ۲ (الف) جهت بارگذاری توده‌سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. بارگذاری با اعمال یک بار گسترده استاتیکی فشاری تک محوره به بزرگی ۴ مگاپاسکال در خلاف جهت محور z اعمال شد تا رفتار تغییرشکل بلوک در این تراز از تنش ثبت شود. هنگامی که بلوک در معرض بار استاتیکی مذکور قرار گرفت، جابجایی‌های محوری و یا جانبی نقاط مورد بررسی در تمام صفحات عمود بر جهت تنش اعمالی و

فاصله‌داری دسته درزه‌ها هستند، به صورت رابطه (۳) بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_x} &= 2\sin^2(\alpha/2) \left(\frac{\cos^2(\alpha/2)K_n + \sin^2(\alpha/2)K_s}{K_n K_s S} \right) \\ \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{K_n S_3} \\ \frac{1}{E_z} &= 2\cos^2(\alpha/2) \left(\frac{\sin^2(\alpha/2)K_n + \cos^2(\alpha/2)K_s}{K_n K_s S} \right) \\ \frac{1}{G_{xy}} &= \frac{1}{K_s S_3} + \frac{2\sin\alpha \cos^2(\alpha/2)}{K_s S} \\ \frac{1}{G_{yz}} &= \frac{1}{K_n K_s S} \\ \frac{1}{G_{zx}} &= \frac{1}{K_s S} + \frac{2\sin\alpha \sin^2(\alpha/2)}{K_n K_s S} \\ \frac{v_{xz}}{E_z} &= \frac{v_{zx}}{E_y} = \frac{K_n - K_s}{2K_n K_s S} \sin^2 \alpha \\ \frac{v_{xy}}{E_x} &= \frac{v_{yx}}{E_y} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{yz}}{E_x} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

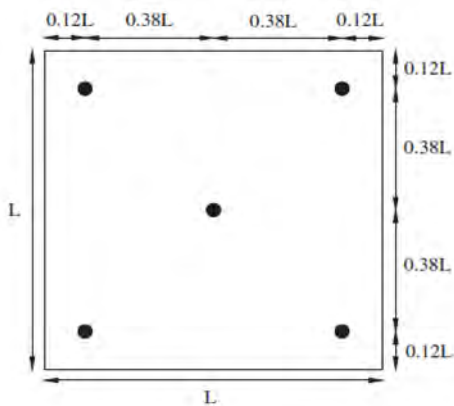
رابطه (۳) نشان می‌دهند که برای دسته درزه‌های غیر عمود جهت‌یابی درزه‌ها تاثیر چشمگیری بر مدول‌های توده‌سنگ دارد. یک توده‌سنگ با سنگ بکر همسانگرد با حضور درزه‌ها به شدت ناهمسانگرد می‌گردد.

۳- مدل‌سازی به روش المان مجزا

همان‌طور که گفته شد روابط ساختاری آمادگی و گودمن برای سه دسته درزه دو به دو متعامد و روش پیشنهادی هوانگ و همکاران برای دو دسته درزه متقاطع و دسته درزه سوم عمود بر آنها استنتاج شده است اما در حالت واقعی، توده‌سنگ‌هایی که برای تحلیل میدان تغییرشکل انتخاب می‌شوند اغلب دارای دسته درزه‌هایی هستند که از حالت تعامد انحراف دارند. این انحراف ممکن است چه در زاویه شیب دسته درزه‌های J_1 و J_2 و چه در زاویه امتداد این دسته درزه‌ها وجود داشته باشد. در مطالعه حاضر و در حالت انحراف زاویه امتداد دسته درزه‌ها، فرض بر این است که این دو دسته درزه نسبت به هم متقاطع باشند (شرایط مفروض هوانگ). در حالت تغییر زاویه شیب دسته درزه‌ها نیز فرض بر این است که این دو دسته درزه نسبت به حالت پیش فرض (شرایط مفروض آمادگی و گودمن) از حالت تعامد خارج شده باشند.

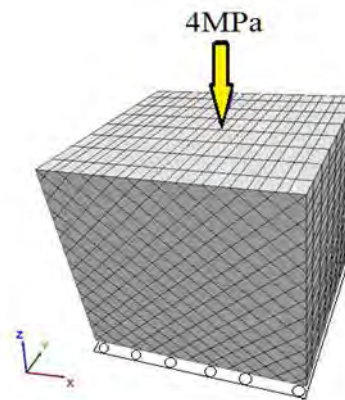
به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی توده‌سنگ حاوی سه دسته درزه نرم‌افزار 3DEC 5/0 مورد استفاده قرار گرفته است. خواص ژئومکانیکی مفروض در جدول‌های ۱ و ۲ آورده

محوری در صفحات عمود بر تنش اعمالی و میانگین دو مولفه جابجایی جانبی در سطوح جانبی بلوک در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر مربوط به خطوط هم‌تراز کرنش‌های محوری، جانبی و برشی پس از رسیدن به تعادل برای بلوکی به ابعاد ۳۰ متر در شرایط هندسی اولیه درزه‌ها تحت بار ۴ مگاپاسکال در شکل ۳ (الف)-(د) ارائه شده است.



(ب)

صفحات جانبی ثبت شدند. با توجه به نحوه توزیع جابجایی در بلوک، تعداد ۵ نقطه به شرح شکل ۲ (ب) به عنوان نقاط برداشت بر روی هر یک از وجه‌های بلوک انتخاب شدند. هنگامی که بلوک تحت بار اعمالی قرار گرفت، مقادیر جابجایی در این نقاط برای محاسبه مقدار متوسط مولفه‌های کرنش در بلوک ثبت شد؛ به نحوی که میانگین جابجایی



(الف)

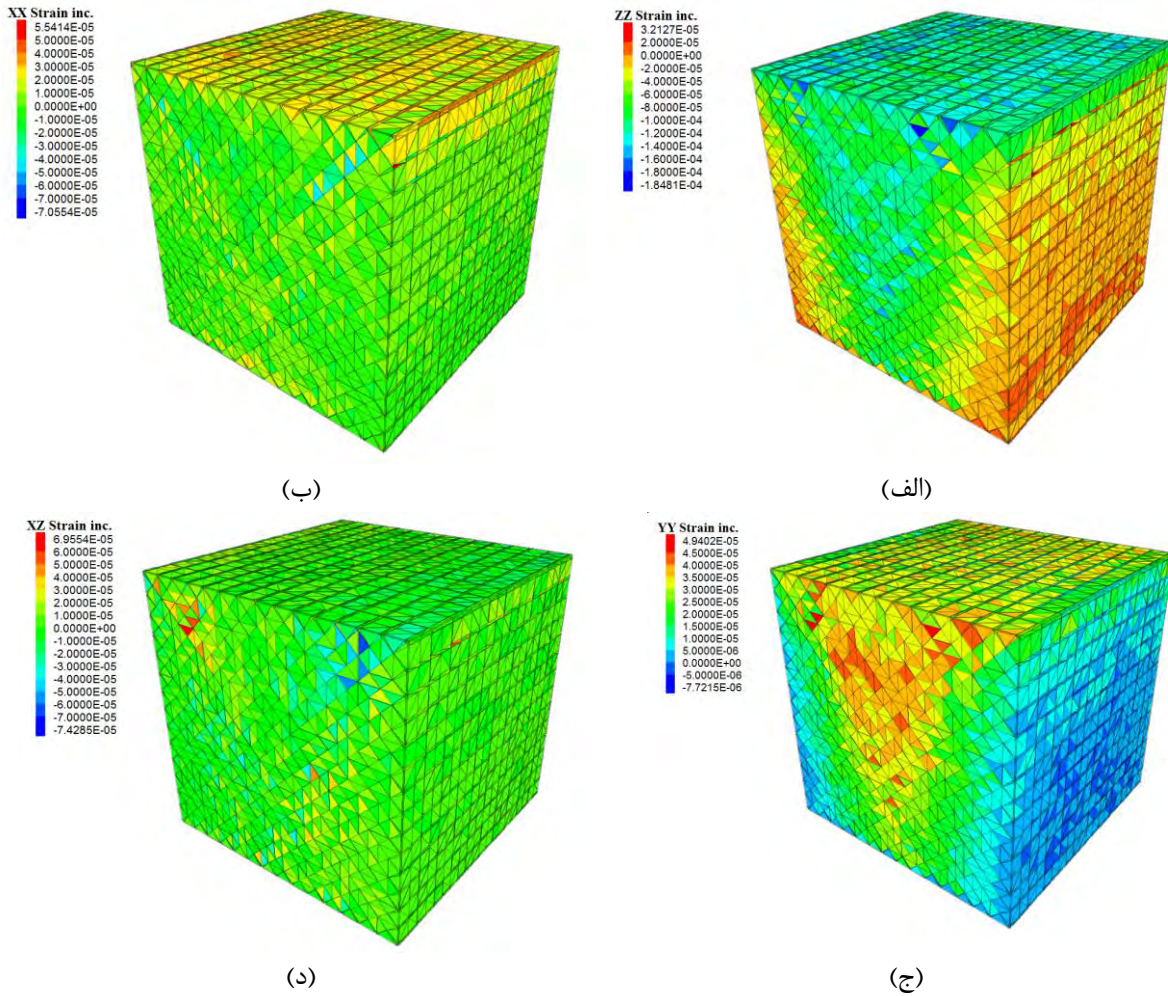
شکل ۲: (الف) شرایط مرزی بلوک؛ (ب) نقاط برداشت تنش و تغییرشکل

حجم معرف از رویکرد تحلیلی کولاتیلاک [۱۶] استفاده شده است. این تحلیل از بلوک‌های کوچک شروع شده و پس از عبور از بلوک‌های با اندازه متوسط به بلوک‌های بزرگ مورد نیاز می‌رسد. مطابق با شکل ۴، رویکرد مذکور در این پژوهش برای انتخاب اندازه‌های بلوک جهت نیل به ابعاد حجم معرف استفاده شده است.

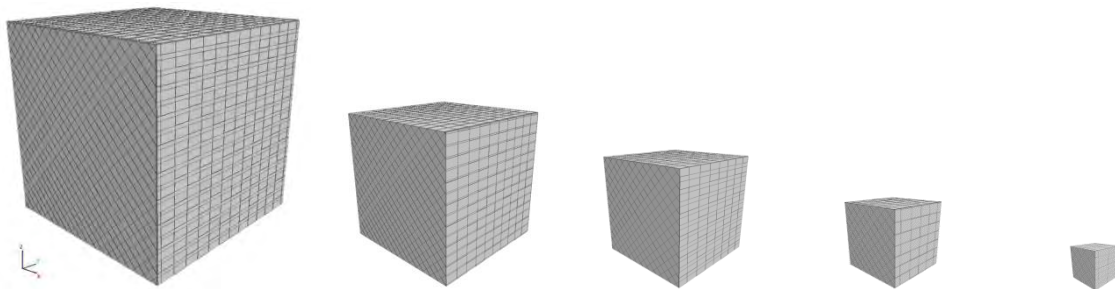
شکل ۵ نمودار مقادیر نسبت پواسون متوسط را به عنوان معیار انتخاب ابعاد مدل تحت تنش تک محوره 4 MPa اعمالی در این مطالعه، در برابر اندازه یال بلوک ارائه می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد که میانگین نسبت پواسون در ابعاد بلوک ۵ تا ۳۰ متر متغیر بوده و پس از آن ثابت باقی می‌ماند. از این رو بلوکی با طول ضلع ۳۰ متر را می‌توان به عنوان حجم معرف توده‌سنگ با خصوصیات مکانیکی و هندسی ذکر شده در جدول‌های ۱ و ۲ در نظر گرفت و برای مطالعات تغییرشکل مورد استفاده قرار داد.

۴- برآورد ابعاد حجم معرف

در صورتی که تعداد دسته درزه‌ها بیشتر از سه یا چهار دسته درزه باشد، امکان مطالعه رفتار آنها از طریق مدلسازی عددی وجود نخواهد داشت؛ در این حالت می‌توان با استفاده از یک قانون ساختاری که بیان‌کننده رفتار ترکیبی سنگ و دسته درزه‌ها است، محیط درزه‌دار را به صورت یک ماده پیوسته معادل ایده‌آل‌سازی نمود. خصوصیت پیکره سنگ فراتر از یک حجم حداقل معین نسبت به تاثیر شکستگی‌ها به طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. این حداقل حجم ممکن است به عنوان اندازه المان جهت نمایش رفتار معادل حجمی از توده‌سنگ که از دید آماری همگن بوده و شامل تعداد قابل توجهی شکستگی است، به کار رود. این حجم به عنوان حجم معرف اولیه نامگذاری می‌شود. به منظور به دست آوردن



شکل ۳: خطوط هم‌تراز کرنش: و (الف) کرنش محوری، (ب) کرنش در راستای x (ج) کرنش در راستای y ، (د) کرنش برشی در صفحه xz برای بلوکی به ابعاد ۳۰ متر و $\theta = 45^\circ$

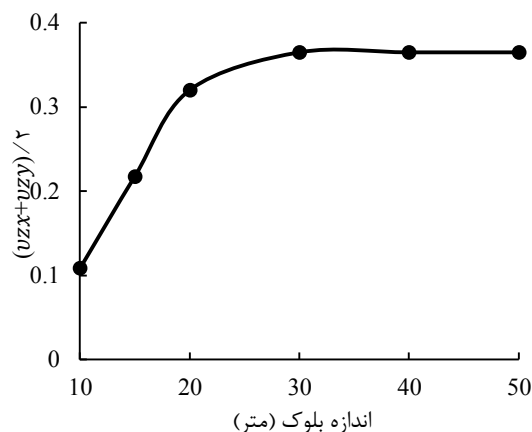


شکل ۴: بلوک‌های هم‌مرکز انتخابی به ترتیب با طول بعد ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ متر

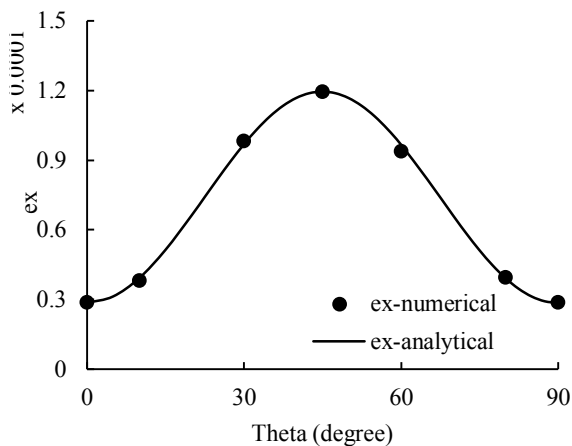
۵- تحلیل نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی مدل عددی

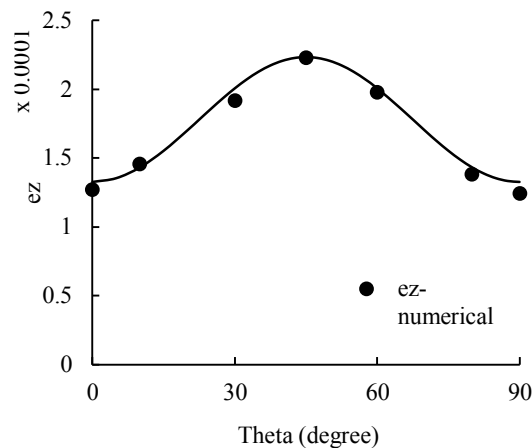
قبل از بررسی نتایج، نیاز است تا از دقت نتایج مدل عددی اطمینان حاصل شود. در این بخش مقادیر کرنش، حاصل از مدل‌سازی صریح نمونه‌های حاوی سه دسته درزه متعامد (شرایط پیش‌فرض) دارای خصوصیات مشروحه با نتایج بدست آمده برای همین خصوصیات از تحلیل محیط پیوسته معادل آمادایی و گودمن مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نمودار مقادیر کرنش ϵ_x ، ϵ_y و γ_{xz} در برابر تغییر زاویه شیب دسته درزه اول (θ) به ترتیب در شکل‌های ۶ (الف) تا (د) نشان داده شده است.



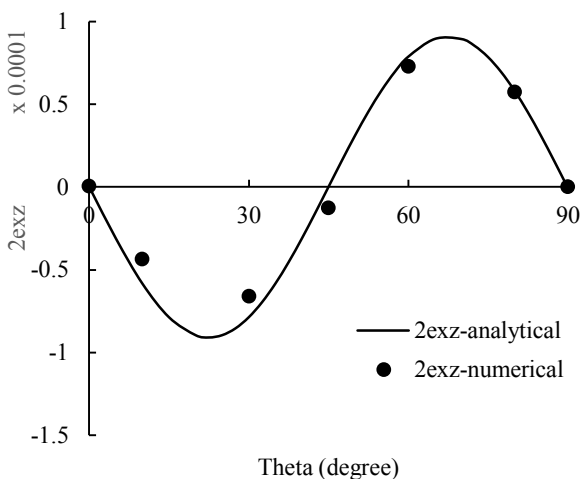
شکل ۵: رابطه بین معیار تغییر شکل و ابعاد بلوک



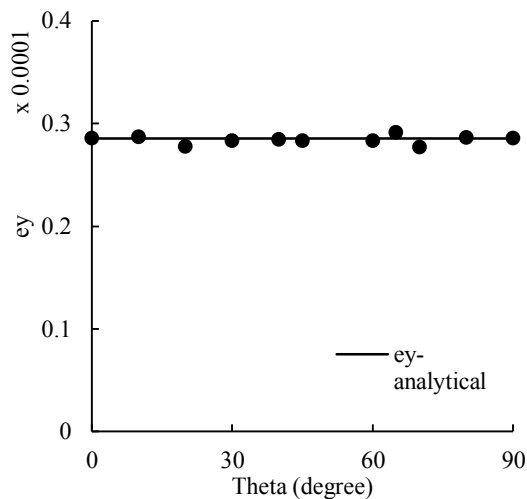
(ب)



(الف)



(د)

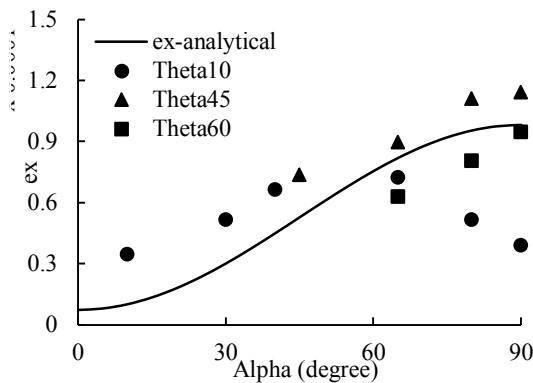


(ج)

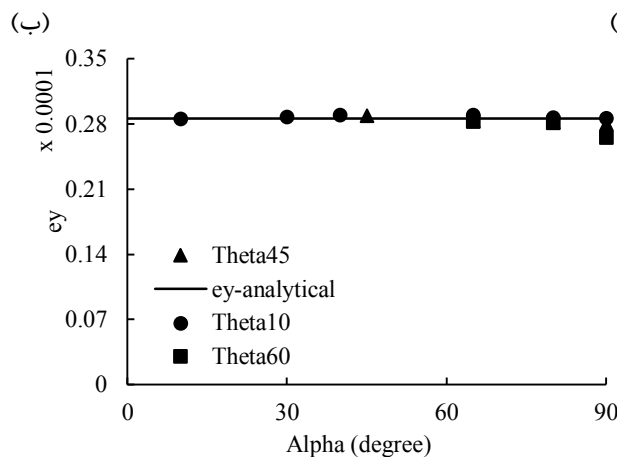
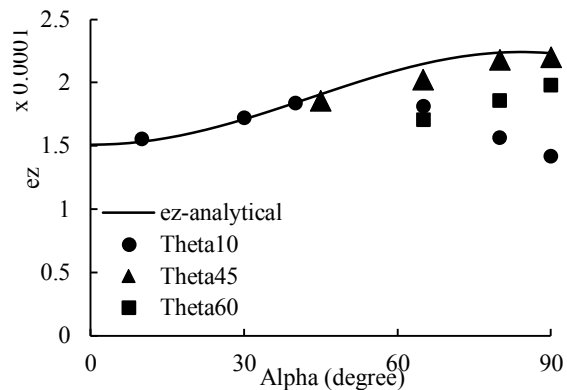
شکل ۶: مقایسه مقادیر تغییر شکل مدل عددی متعامد و (الف) کرنش محوری، (ب) کرنش در راستای x (ج) کرنش در راستای y ، (د) کرنش برشی در صفحه xz به دست آمده از رابطه ساختاری محیط پیوسته معادل

قابل قبولی است که مدل عددی در برآورد خواص تغییرشکل محیط‌های ارتوتروپیک دارند.

در مرحله بعد، تغییرشکل‌های حاصله برای مدل‌های عددی توده‌سنگ‌هایی که در آن‌ها دسته درزه‌های J_1 و J_2 نسبت به هم متقاطع هستند (شرایط پیش‌فرض) با نتایج بدست آمده برای همین خصوصیات و مفروضات از روابط هوانگ و همکاران مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نمودار مقادیر کرنش ϵ_x ، ϵ_y و ϵ_z در برابر تغییر زاویه تقاطع J_1 و J_2 (α) به ترتیب در شکل‌های ۷ (الف) تا (ج) نشان داده شده است.



نمودار روابط تحلیلی مذکور در صورت یکسان بودن خصوصیات هندسی و مکانیکی درزه‌ها شکل مقارنی خواهند داشت و هرچه خواص درزه‌ها از این حالت فاصله بگیرند، نمودارهای مذکور از حالت تقارن دور خواهند شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر خواص هندسی در تقارن نمودار بیشتر از خواص مکانیکی می‌باشد. این نمودارها بیان‌گر تطابق خوبی است که میان نتایج مدل‌های عددی متعامد و نتایج محیط پیوسته معادل وجود دارد. این امر نشان‌دهنده دقت



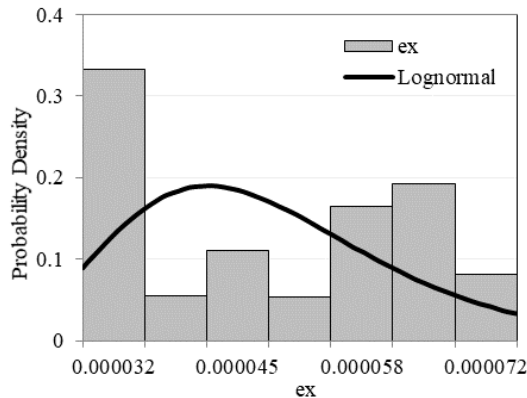
شکل ۷: مقایسه مقادیر تغییر شکل مدل عددی متقاطع و (الف) کرنش محوری، (ب) کرنش در راستای x (ج) کرنش در راستای y به دست آمده از رابطه ساختاری محیط پیوسته معادل

تطابق بین نتایج مدل اولیه متقاطع و نتایج رابطه پیشنهادی هوانگ و همکاران در $\theta = 45^\circ$ مشاهده می‌شود. برای اطلاع از نحوه تأثیرگذاری θ بر تغییرشکل این نوع سنگ‌ها در شرایط مختلف نیازمند بررسی‌های بیشتری است. شکل ۷ (ب) نتایج کرنش جانبی ϵ_x را برای روابط مذکور و مدل عددی متقاطع اولیه نشان می‌دهد. نمودار مقادیر کرنش جانبی حاصله از رابطه هوانگ و همکاران در فشار تک محوره روندی مشابه نمودار فوق از خود نشان می‌دهند. تأثیر شیب

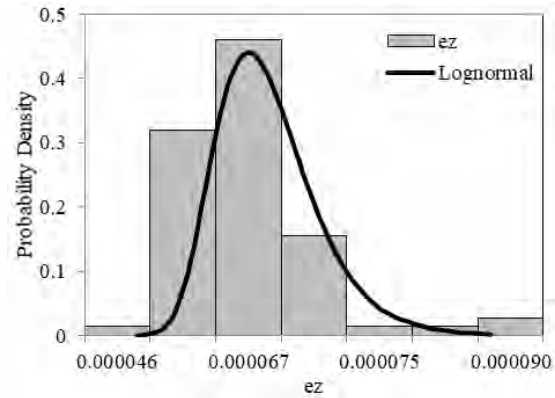
با توجه به این که وضعیت زوایای شیب ناپیوستگی‌ها در روابط پیشنهادی هوانگ و همکاران به وسیله زاویه α تعریف شده و تأثیر شیب دسته درزه اول (θ) در این روابط نادیده گرفته شده است، در نمودار شکل ۷ (الف) سه مقدار متفاوت برای θ در نظر گرفته شده و مقادیر ϵ_z برای آنها در برابر زوایای تقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این شکل بیان‌گر تأثیر قابل توجه θ در تغییرشکل توده‌سنگ‌های حاوی درزه‌های متقاطع است. بیشترین

۵-۲- بررسی آماری داده‌ها

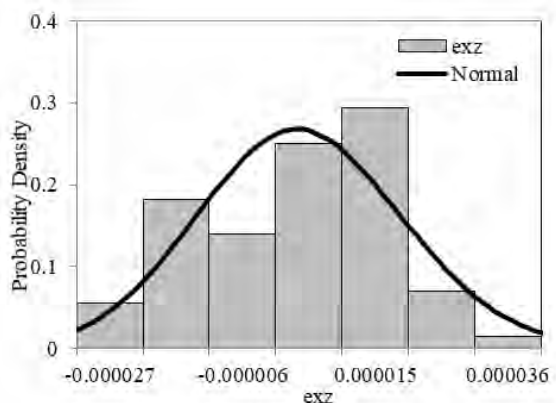
بررسی آماری جهت تخمین واقع‌گرایانه خواص اجزای تشکیل‌دهنده زمین ضروری است. خواص توده‌سنگ مدل‌سازی شده با توجه به خطاهای اندازه‌گیری می‌تواند متغیر باشد. هدف از این بخش بررسی نحوه توزیع داده‌های به دست آمده است. به کمک تعیین انحراف معیار می‌توان بازه تغییرات داده‌ها را به دست آورد. شکل ۸ توابع چگالی احتمال توزیع مولفه‌های کرنش را نشان می‌دهد.



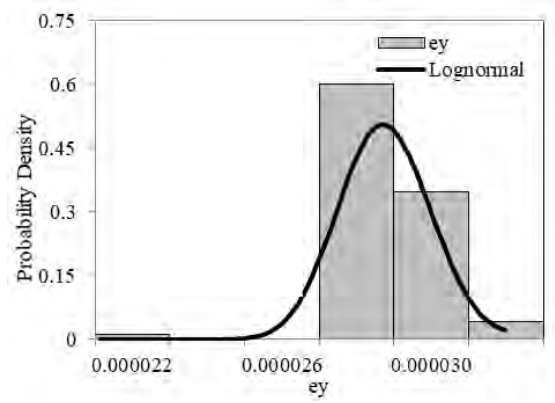
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸: نمودارهای توابع چگالی احتمال (الف) کرنش محوری، (ب) کرنش در راستای x ، (ج) کرنش در راستای y ، (د) کرنش برشی در

صفحه xz

در این رابطه O_i تعداد داده‌های واقعی قرار گرفته در دسته i و e_i تعداد داده‌های مورد انتظار در این دسته طبق تابع توزیع برازش شده است. همچنین، درجه آزادی داده‌ها^۳ (df) معادل تعداد دسته‌ها منهای یک تعریف می‌شود. بر این اساس، یک آزمون فرض برای عدم پیروی داده‌ها از توابع توزیع برازش شده تعریف می‌شود به طوری که در صورتی که مقدار آماره χ^2 برای داده‌ها از مقدار بحرانی آن در توزیع کای دو کمتر باشد، فرض صفر (عدم پیروی داده‌ها از توابع توزیع برازش شده) رد خواهد شد [۱۹]. لازم به ذکر است که

به منظور ارزیابی میزان تشابه توزیع داده‌ها با توابع توزیع برازش شده در این شکل از آزمون نکویی برازش کای دو^۲ استفاده شد. با استفاده از این آزمون فراوانی داده‌های واقعی در هر یک از دسته داده‌ها با فراوانی قابل انتظار متغیر مورد بررسی مطابق با تابع توزیع برازش شده مقایسه می‌گردد. آماره مربوط به این آزمون از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\chi^2 = \sum (O_i - e_i)^2 / e_i \quad (4)$$

برابر با ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درجه است. نمودار تغییرشکل محوری مدل‌های A5، A10 و A15 در بازه تغییرات زاویه شیب دسته درزه $J_1(\theta)$ از صفر تا ۹۰ درجه در کنار مقادیر تحلیلی به دست آمده از روش پیشنهادی آمادایی و گودمن و نیز مدل عددی در شرایط پیش فرض این روش به ترتیب در شکل‌های ۹ (الف)، (ب) و (ج) آمده است. به صورتی که نمودار نتایج تحلیلی با خط پیوسته، نمودار مربوط به مدل عددی در شرایط پیش فرض روش تحلیلی با خطوط منقطع و نتایج A5، A10 و A15 با استفاده از نقاط نشان داده شده اند. همان‌گونه که اشاره شد، مشاهده می‌گردد که نتایج مدل عددی پیش‌فرض تطابق خوبی با رابطه تحلیلی دارد. این شکل‌ها نشان‌دهنده تاثیر انحراف زاویه تقاطع دسته درزه‌های عنوان شده از حالت تعامد بر تغییرشکل محوری توده سنگ هستند. شکل ۹ (د) درصد اختلاف کرنش‌های محوری عددی از مقادیر متناظر تحلیلی به دست آمده در حالت تعامد را برای مدل‌های مذکور با هم مقایسه می‌کند. وابستگی مقدار ϵ_z به جهت‌یابی درزه‌ها در این شکل به خوبی نمایان است. از آنجایی که فاکتورهای هندسی و ژئومکانیکی متفاوتی بر رفتار تغییرشکل توده سنگ تاثیرگذارند، مقادیر به دست آمده برای درصد اختلاف را نمی‌توان به عنوان شرایط کلی پذیرفت اما الگوی انحراف کرنش در مدل‌های گوناگون قابل بررسی است.

مقادیر بحرانی مورد نظر با استفاده از کد دستوری $CHIINV(\alpha, df)$ در اکسل محاسبه شده است که در آن α یک مقدار پیش‌فرض مانند ۰/۰۵ است که سطح اطمینان تخمین را بیان می‌کند.

نتایج آزمون کای دو برای مقادیر کرنش به تفکیک در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق با این جدول داده‌های مربوط به کرنش جانبی در راستای Y و کرنش برشی در صفحه XZ به ترتیب از توزیع لاگ نرمال و نرمال برازش شده پیروی می‌کنند. از طرف دیگر، کرنش جانبی در راستای X کمترین تطبیق را با تابع توزیع برازش شده دارد. در مورد کرنش محوری نیز کمترین تشابه در دسته دوم داده‌ها مشاهده می‌شود که همین امر سبب عدم تطابق آن با تابع توزیع برازش شده گردیده است.

۳-۵- تاثیر انحراف زاویه شیب در اعتبار روابط پیشنهادی آمادایی و گودمن

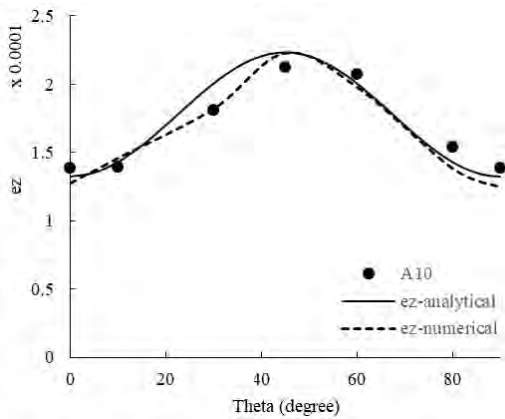
مدل‌سازی عددی در شرایط مختلف قرارگیری دسته درزه‌ها مطابق با جدول ۴ و با در نظر گرفتن خواص ژئومکانیکی عنوان شده در جدول‌های ۱ و ۲ به منظور برآورد میزان خطای روابط حل دقیق انجام گرفته است. توجه شود که زاویه α به عنوان زاویه تقاطع J_1 و J_2 تعریف شده و در حالت پیش‌فرض مقدار آن برابر با ۹۰ درجه است. بر این اساس، زاویه α به ترتیب در مدل‌های A5، A10 و A15

جدول ۳: نتایج آزمون نکویی برازش کای دو

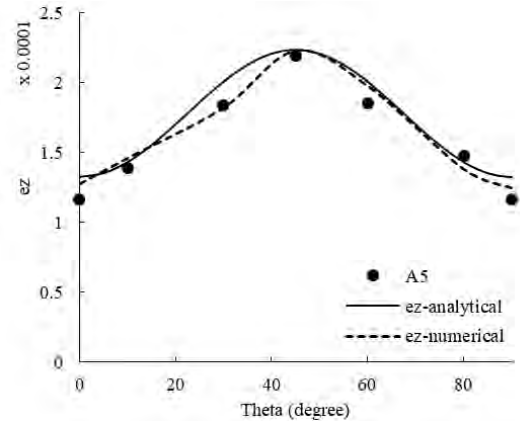
γ_{xz}				ϵ_y				ϵ_x				ϵ_z			
χ^2_i	e_i	O_i	بازه	χ^2_i	e_i	O_i	بازه	χ^2_i	e_i	O_i	بازه	χ^2_i	e_i	O_i	بازه
۰	۵	۵	۱	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۳۰/۸	۱۳	۳۳	۱	۰/۵	۰/۵	۱	۱
۳	۱۲	۱۸	۲	۰/۵	۰/۵	۰	۲	۹/۴	۱۸	۵	۲	۱۷	۱۵	۳۱	۲
۳/۵	۱۳	۱۴	۳	۳	۳	۰	۳	۲/۷	۱۸	۱۱	۳	۰/۲	۴۳	۴۶	۳
۰/۲	۲۷	۲۵	۴	۵	۴۵	۶۰	۴	۶/۷	۱۵	۵	۴	۰/۸	۲۰	۱۶	۴
۲/۲	۲۲	۲۹	۵	۰/۳	۳۲	۳۵	۵	۲/۳	۱۱	۱۶	۵	۲/۲	۴	۱	۵
۱	۹	۶	۶	۰/۳	۳	۴	۶	۲۰/۶	۷	۱۹	۶	۰/۳	۰/۶	۱	۶
۱/۸	۳/۵	۱	۷	۲	۲	۰	۷	۱/۸	۵	۸	۷	۴/۵	۰/۵	۲	۷
۲	۲	۰	۸	۱	۱	۰	۸	۲	۲	۰	۸				
۰/۵	۰/۵	۰	۹	۰/۵	۰/۵	۰	۹	۱	۱	۰	۹				
۱۴/۲	۱۰۴	۹۸	مجموع	۱۳/۱	۸۷/۵	۱۰۰	مجموع	۷۷/۲	۹۰	۹۷	مجموع	۲۵/۶	۸۳	۹۸	مجموع
	۱۶/۹		CHIINV		۱۶/۹		CHIINV		۱۶/۹		CHIINV		۱۴/۱		CHIINV

جدول ۴: تعریف مدل‌های مختلف بلوک درزه‌دار

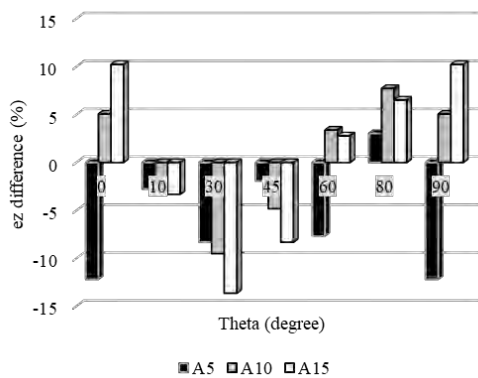
انحراف α از حالت اولیه		
۵ درجه افزایش	۱۰ درجه افزایش	۱۵ درجه افزایش
A5	A10	A15



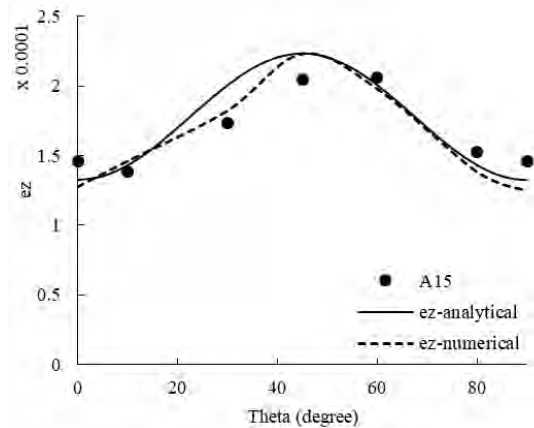
(ب)



(ف)



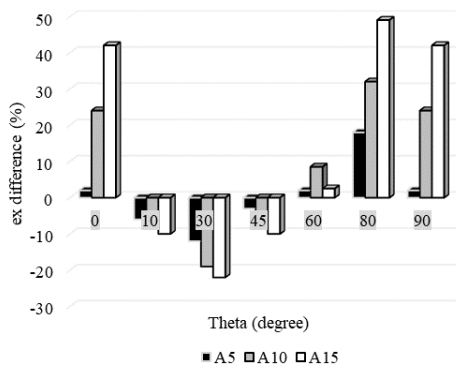
(د)



(ج)

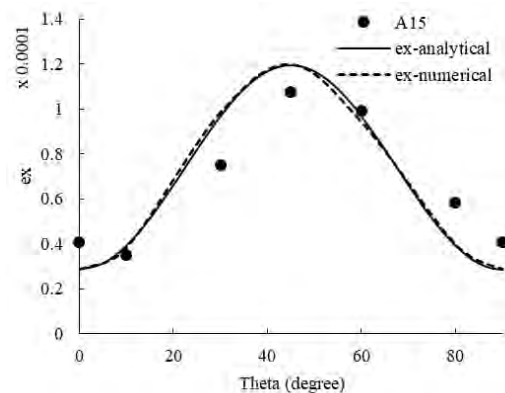
شکل ۹: نمودار تغییرات کرنش محوری تحلیلی و مدل عددی (الف) A5، (ب) A10، (ج) A15 و (د) درصد تغییرات ϵ_z عددی نسبت به تحلیلی در برابر θ

می‌دهد که هرچه انحراف از ۹۰ درجه بیشتر می‌شود، از اعتبار رابطه ریاضی در تخمین ϵ_x در این حالت کم می‌شود. درصد اختلاف در بازه‌های ابتدا و انتهای θ مثبت و در محدوده میانی آن منفی است.



(ب)

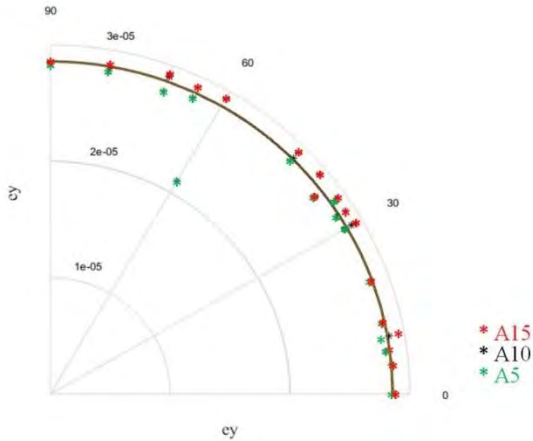
نمودار تغییرشکل جانبی مدل‌های عددی A15 در جهت x نیز به ازای تغییرات زاویه شیب J_1 در فشار 4 MPa در کنار مقادیر تحلیلی در شکل ۱۰ (الف) ارایه شده است. شکل ۱۰ (ب) میزان انحراف از نتایج تحلیلی ϵ_x را برای مدل‌های A5، A10، A15 با یکدیگر مقایسه می‌کند. این نمودار نشان



(الف)

شکل ۱۰: (الف) نمودار تغییرات کرنش در راستای x تحلیلی و مدل عددی A15 در برابر θ ، (ب) درصد تغییرات آن برای مدل‌های عددی در برابر θ

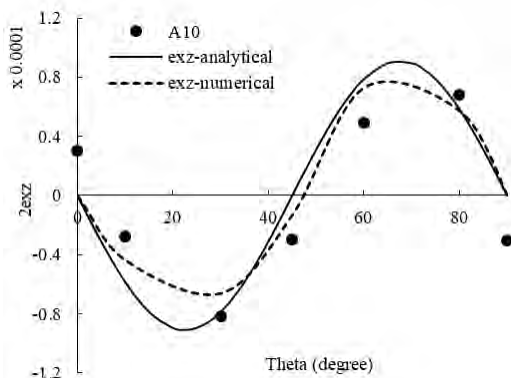
بازه‌های ابتدایی، میانی و انتهایی θ به دلیل مقادیر اندک تغییر شکل برشی مدل‌های متعامد، انحراف زاویه α در هر سه مدل تاثیر قابل توجهی بر اختلاف نتایج دارد. از طرف دیگر، تاثیر افزایش میزان انحراف زاویه تقاطع در دیگر مقادیر θ بارزتر است.



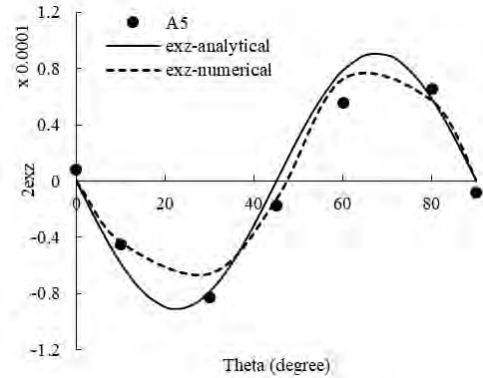
شکل ۱۱: نمودار قطبی تغییرات کرنش در راستای y در $A5$ و $A10$ نسبت به مقدار تحلیلی آن

نمودار قطبی شکل ۱۱ نتایج تغییر شکل در راستای y را برای هر سه مدل $A5$ ، $A10$ و $A15$ نشان می‌دهد. مقادیر ϵ_{xy} در $A5$ ، $A10$ و $A15$ پراکندگی محدودی در بازه تغییرات θ دارند. این شکل بیانگر تاثیر ناچیز انحراف زاویه تقاطع از $\alpha = 90^\circ$ بر روی تغییر شکل توده سنگ در جهت موازی با امتداد است. از طرف دیگر نتایج سه مدل فوق بسیار نزدیک به کرنش به دست آمده از رابطه پیشنهادی آمادگی و گودمن بوده و این امر نشان از قابل قبول بودن دقت این رابطه در برآورد تغییر شکل جانبی ϵ_{xy} با تغییر زاویه امتداد در شرایط مذکور دارد.

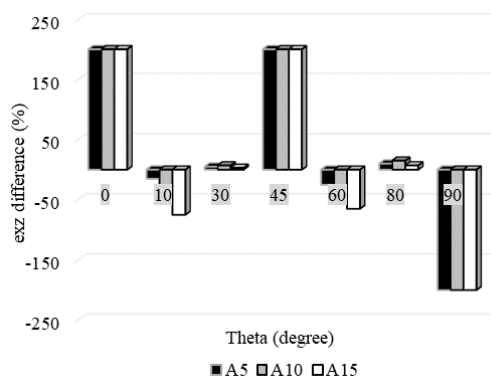
شکل‌های ۱۲ (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب نتایج عددی کرنش برشی γ_{xz} در کنار نتایج رابطه تحلیلی برای مدل‌های $A5$ ، $A10$ و $A15$ را در برابر تغییر زاویه θ در مختصات دکارتی نشان می‌دهد. نمودار درصد انحراف از نتایج تحلیلی مشاهده است. با توجه به این نمودار مشخص است که در



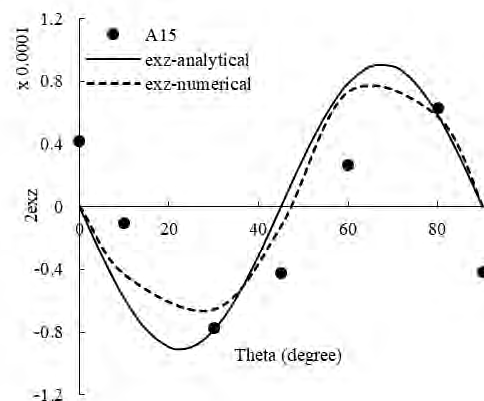
(ب)



(الف)



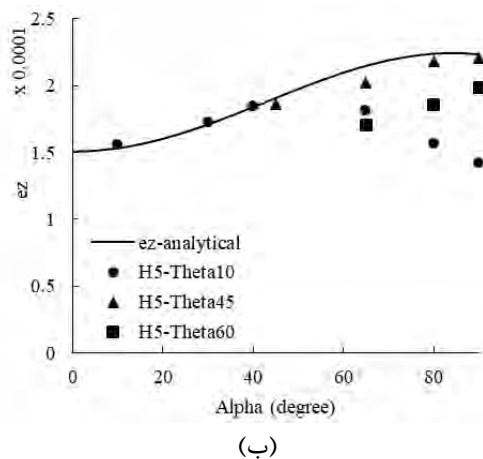
(د)



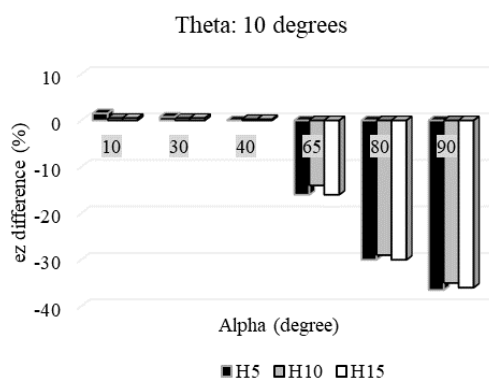
(ج)

شکل ۱۲: نمودار تغییرات کرنش برشی تحلیلی و عددی در صفحه xz برای (الف) $A5$ ، (ب) $A10$ ، (ج) $A15$ و (د) درصد تغییرات γ_{xz} عددی نسبت به تحلیلی در برابر θ

تغییر شکل محوری مدل‌های $H5$ ، $H10$ و $H15$ در بازه تغییرات زاویه تقاطع J_1 و J_2 (α) از ۰ تا ۹۰ درجه در کنار مقادیر تحلیلی به دست آمده از مدل پیشنهادی هوانگ و همکاران به ترتیب در شکل ۱۳ (الف)، (ب) و (ج) ارائه شده است. این اشکال نشان می‌دهند که انحراف زاویه امتداد از حالت اولیه تاثیر چندانی بر روی مقدار ε_z حاصل از روش عددی اجزای مجزا ندارد. با این وجود، اختلاف فاحشی میان مقادیر تغییر شکل محوری عددی و تحلیلی در نیمه پایانی بازه تغییرات α در شرایط مورد بررسی مشاهده می‌گردد. میزان این اختلاف در حالتی که زاویه شیب J_1 برابر با ۴۵ درجه منظور شده بود، کمترین مقدار را دارد. این امر آشکار می‌سازد که رابطه ریاضی برآورد تغییر شکل محوری هوانگ برای حالتی که $\theta = 45^\circ$ باشد، بیشترین کارایی را دارد. شکل ۱۳ (د) میزان انحراف ε_z عددی از تحلیلی را برای سه مدل فوق‌الذکر در بازه تغییرات α و در حالتی که $\theta = 10^\circ$ بوده است را نشان می‌دهد.



(ب)



(د)

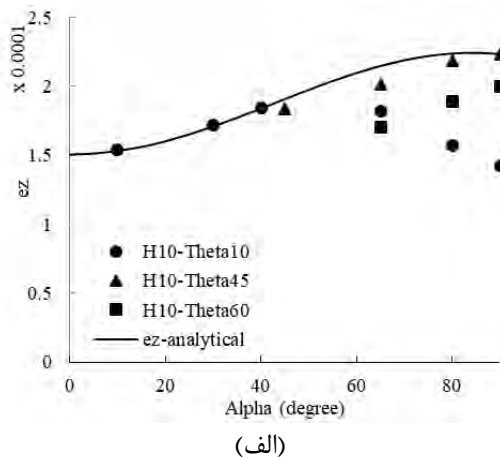
۴-۵- تاثیر انحراف زاویه امتداد در اعتبار روابط پیشنهادی هوانگ و همکاران

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد رفتار تغییر شکل مدل‌های درزه‌دار به شدت غیرخطی و وابسته به جهت‌یابی درزه است. به منظور بررسی میزان صحت کاربرد روابط حل دقیق برای توده‌سنگ‌هایی با شرایط تعریف‌شده در جدول ۵، مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن خواص ژئومکانیکی عنوان شده در جدول‌های ۱ و ۲ انجام گرفت.

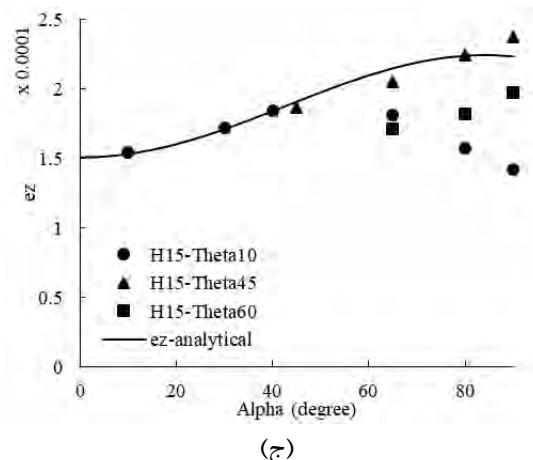
جدول ۵: تعریف مدل‌های مختلف بلوک درزه‌دار

انحراف β از حالت اولیه		
۵ درجه افزایش	۱۰ درجه افزایش	۱۵ درجه افزایش
$H5$	$H10$	$H15$

توجه شود که زاویه β به عنوان زاویه بین امتداد J_1 و J_2 تعریف شده و در حالت پیش‌فرض مقدار آن برابر با صفر است. بر این اساس، زاویه β به ترتیب در مدل‌های $H5$ ، $H10$ و $H15$ برابر با ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه می‌باشد. نمودار



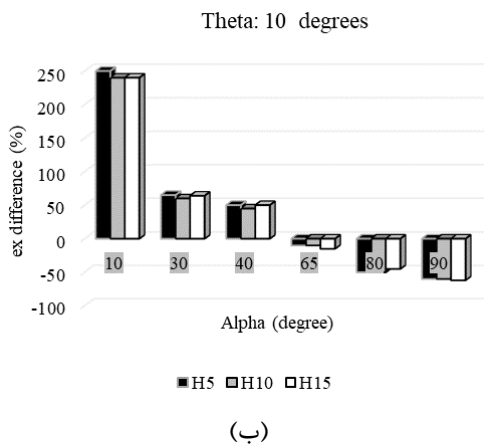
(الف)



(ج)

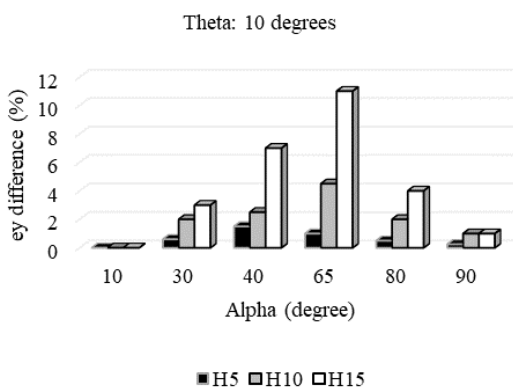
شکل ۱۳: نمودار تغییرات کرنش محوری تحلیلی و عددی برای (الف) $H5$ ، (ب) $H10$ ، (ج) $H15$ و (د) درصد تغییرات ε_z عددی نسبت به تحلیلی در برابر α

نمودار تغییر شکل جانبی مدل $H15$ در جهت y به ازای تغییرات زاویه تقاطع J_1 و J_2 در فشار 4 MPa در کنار مقادیر تحلیلی در شکل ۱۵ (الف) ارائه شده است. شکل ۱۵ (ب) نیز درصد اختلاف این پارامتر را در مدل‌های مذکور از مقادیر تحلیلی آن‌ها نمایش می‌دهد. مطابق با این شکل در شرایط مورد بررسی، تغییر زاویه امتداد دسته درزه J_2 تاثیر ناچیزی بر روی تغییر شکل توده سنگ در جهت y دارند. بنابراین با توجه به تطابق نتایج روش هوانگ و این مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که در یک توده سنگ، زاویه امتداد و یا زاویه شیب دسته درزه‌ها تا 15° درجه از حالت ارتوتروپیک فاصله داشته باشند نیز این رابطه فارغ از نحوه جهت‌یابی درزه‌ها همچنان در برآورد تغییر شکل در راستای امتداد درزه‌ها قابل کاربرد است. شرایط برای میزان انحراف بیشتر β بایستی بررسی شوند.



(ب)

شکل ۱۴: (الف) نمودار تغییرات کرنش در راستای x تحلیلی و مدل عددی $H15$ در برابر α ، (ب) درصد تغییرات آن برای مدل‌های عددی در برابر α

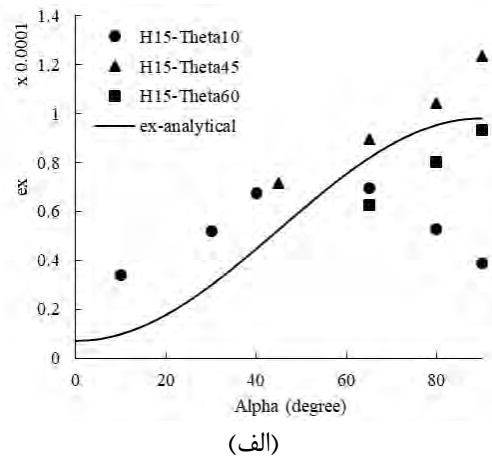


(ب)

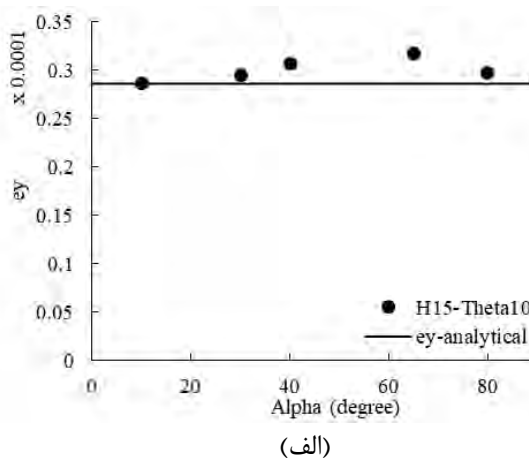
شکل ۱۵: (الف) نمودار تغییرات کرنش در راستای y تحلیلی و مدل عددی $H15$ در برابر α ، (ب) درصد تغییرات آن برای مدل‌های عددی در برابر α

همان‌طور که در این شکل واضح است تفاوت مقادیر به دست آمده برای $H5$ ، $H10$ و $H15$ از یکدیگر ناچیز است. اما تفاوت از نتایج تحلیلی هوانگ و همکاران قابل توجه بوده و به دلیل انحراف نتایج در مدل اولیه با زاویه $\theta = 10^\circ$ و نتایج تحلیلی بروز کرده است. این مقدار اختلاف ممکن است به دلیل تاثیر عوامل مختلفی از جمله پارامترهای مکانیکی دسته درزه‌ها و فاصله‌داری آنها باشد.

نمودار تغییر شکل جانبی تحلیلی و مدل عددی $H15$ در جهت x نیز به ازای تغییرات زاویه تقاطع J_1 و J_2 در فشار 4 MPa در کنار مقادیر تحلیلی به ترتیب در شکل ۱۴ (الف) ارائه شده است. در این مورد هم تاثیر انحراف امتداد درزه‌ها ملموس نیست اما همچنان میان نتایج تحلیلی و عددی اختلاف فاحشی وجود دارد. میزان اختلاف مدل‌های سه گانه در شکل ۱۴ (ب) به تصویر کشیده شده است.



(الف)

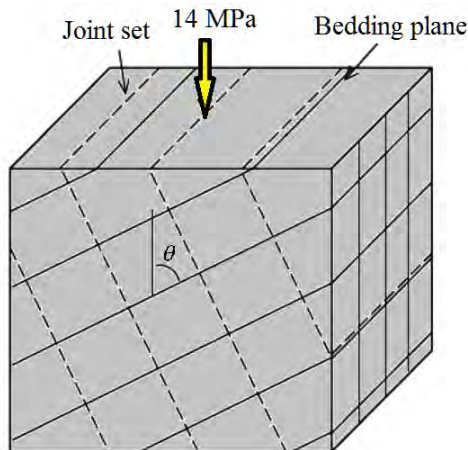


(الف)

درزه سوم در ساختگاه، فاصله‌داری آن در روابط تحلیلی معادل بی‌نهایت منظور شده است. نحوه قرارگیری فضایی لایه‌بندی و J_1 که توسط فاصله‌داری، شیب و جهت شیب مدل تعریف می‌گردد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. جهت بارگذاری آزمایشات بارگذاری صفحه‌ای گزینش شده به ترتیب با صفحات لایه‌بندی و دسته درزه J_1 زاویه θ و $90 - \theta$ تشکیل می‌دهد.

جدول ۷: خواص مکانیکی دسته درزه و لایه‌بندی

پارامتر	مقدار عددی	میانگین حسابی
$(GPa/m) k_{nb}$	۳۷/۵	۴۲
$(GPa/m) k_{nj}$	۴۶/۹	
$(GPa/m) k_{sb}$	۲۸/۱	۳۱/۷
$(GPa/m) k_{sj}$	۳۵/۲	
فاصله‌داری دسته درزه (m)	۰/۴	۰/۳۲
فاصله‌داری لایه‌بندی (m)	۰/۲۴	
چسبندگی (MPa)	۰/۳	۳۳
زاویه اصطکاک داخلی (°)		



شکل ۱۶: جهت بارگذاری و جهت یابی ناپیوستگی‌ها

یک مدل المان مجزا با خواص مکانیکی و هندسی مشروحه به طول یال پیش‌فرض جهت برآورد ابعاد حجم معرف با بهره‌گیری از نرم‌افزار 3DEC شبیه‌سازی شد. شرایط مرزی مشابه مدل‌های عددی پیشین بر توده‌سنگ اعمال شد با این تفاوت که تحلیل تغییرشکل برای این مدل در تراز تنش ۱۴ مگاپاسکال انجام گرفت. این میزان از تنش با هدف مقایسه نتایج عددی و تحلیلی با نتایج آزمون‌های بارگذاری صفحه‌ای انجام‌شده در محدوده الاستیک توده‌سنگ انتخاب شده است.

شکل ۱۷ میزان تغییرات نسبت پواسون متوسط را در ابعاد مختلف مفروض برای مدل به تصویر می‌کشد. مطابق با

۶- مطالعه موردی

پروژه سد بتنی و نیروگاه برق‌آبی بختیاری با ارتفاع ۳۱۵ متر و ساختار دو قوسی و نیروگاهی زیرزمینی با ظرفیت تولید یک هزار و پانصد مگاوات در رشته‌کوه زاگرس در جنوب‌غربی ایران واقع است. لایه‌های سنگ آهک سازند سرّوک در بر گیرنده رسوبات رودخانه‌ای کرتاسه میانی، توده‌سنگ ساختگاه سد و نیروگاه را تشکیل می‌دهند. در این بخش با هدف اعتبارسنجی و مقایسه، نتایج به دست آمده برای مدل‌های عددی توده‌سنگ ساختگاه سد بختیاری با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای انجام شده در ساختگاه این سد مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بلوک‌های توده‌سنگ در منطقه مورد مطالعه از تقاطع یک دسته درزه (J_1) و صفحات لایه‌بندی به وجود آمده‌اند. خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: خواص تغییرشکل سنگ بکر ساختگاه سد بختیاری [۲۰]

پارامتر	مقدار
چگالی (Kg/m^3)	۲۶۵۰
مدول یانگ سنگ بکر (GPa)	۶۵
نسبت پواسون	۰/۲
مدول بالک (GPa)	۳۶/۱
مدول برشی (GPa)	۲۳/۲

طبق عملیات برداشت درزه انجام شده در گالری‌های اکتشافی، بازشدگی لایه‌بندی و J_1 در بازه ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر (۹۰ درصد موارد برداشت شده) قرار دارد. صفحات لایه‌بندی شامل پرکننده رس، کلسیت و یا بدون پرکننده هستند [۲۰]. بر همین اساس، سختی نرمال دسته درزه ۱/۲۵ برابر سختی نرمال لایه‌بندی در نظر گرفته شد. شرایط سطح لایه‌بندی‌ها به صورت عموماً صفحه‌ای زبر (۱۷ درصد موارد)، صاف (۲۳ درصد) و صیقلی (۶۰ درصد موارد) ثبت شده است. شرایط سطوح J_1 نیز به صورت صفحه‌ای صاف (۴۸ درصد موارد) و زبر (۴۸ درصد) ثبت گردیده است. با توجه به بازشدگی اندک صفحات لایه‌بندی و J_1 ، سختی برشی آنها معادل ۷۵ درصد سختی نرمال هر دو در نظر گرفته شد. در نهایت، با توجه به محدودیت روابط پیشنهادی هوانگ و همکاران با میانگین‌گیری ریاضی از این مقادیر، یک مقدار واحد برای سختی نرمال، برشی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها استفاده شد (جدول ۷). لازم به ذکر است که به دلیل عدم وجود دسته

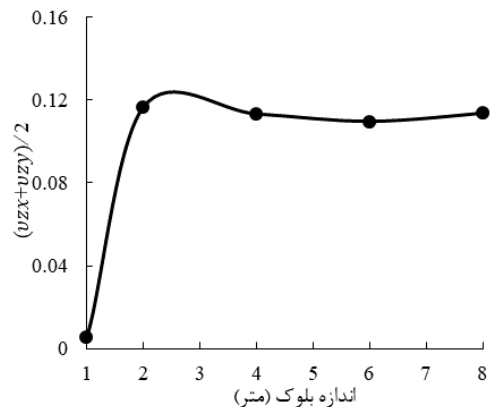
نتایج مدل‌های عددی نشان از دقت قابل قبول این روش در تخمین کرنش محوری در شرایط مورد بررسی دارد. نمودار درصد انحراف نتایج ϵ_z برای مدل‌های AB5، AB10 و AB15 از نتایج محیط پیوسته معادل نیز در شکل ۱۸ (ب) ارائه شده است. مقایسه این نمودار و شکل ۹ نشان می‌دهد که هر دو نمودار در زوایای θ برابر با ۳۰، ۴۵ و ۸۰ درجه دقیقاً از روند مشابهی پیروی می‌کنند اما درصد تغییرات بسته به خواص ژئومکانیکی و هندسی متفاوت است. شکل ۱۸ (ب) نیز مقادیر تغییر شکل محوری مدل‌های HB5، HB10 و HB15 را در کنار مقادیر کرنش محوری هوانگ و همکاران نشان می‌دهد ($\theta = 15^\circ$). نتایج آزمایش‌های برجای بارگذاری صفحه‌ای در این شکل تنها برای حالت $\alpha = 90^\circ$ در دسترس بوده است. نکته جالب توجه تغییر روند ϵ_z در زوایای پایین θ است. لازم به ذکر است که تأثیر تغییر پارامترهای مکانیکی درزه‌ها با مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشهود می‌گردد. به طور خاص می‌توان عنوان کرد که در سختی‌های برشی کم، نقش زاویه شیب دسته درزه اول تعیین‌کننده است.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی مورد مطالعه و مقایسه نتایج با مدل‌سازی‌های عددی، نکات زیر قابل استنتاج است:

۱. محیط پیوسته معادل آمادبی و گودمن
 - ✓ اختلاف تغییر شکل محوری تحلیلی و عددی نسبت به تغییر زاویه تقاطع حساسیت بالایی دارد اما روند مشخصی در نحوه تغییرات آن دیده نمی‌شود.
 - ✓ مقادیر ثبت شده برای تغییر شکل جانبی در جهت عمود بر امتداد درزه‌های اول و دوم در بازه تغییرات θ از ۰ تا ۹۰ درجه بیان‌گر افزایش میزان اختلاف مابین نتایج تحلیلی و عددی به ازای انحراف بیشتر زاویه تقاطع است.
 - ✓ از پراکندگی اندک نتایج کرنش‌های جانبی به دست آمده در جهت موازی امتداد دسته درزه‌های اول و دوم در مدلسازی عددی می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد روابط ساختاری محیط پیوسته معادل در برآورد تغییر شکل در این جهت با دقت خوبی همراه خواهند بود.

این شکل، میانگین نسبت پواسون در ابعاد ۱ تا ۴ متر متغیر بوده و پس از آن ثابت باقی می‌ماند. از این‌رو، مدلی با طول یال ۴ متر برای ادامه مطالعات انتخاب شد. پس از انتخاب حجم معرف، بلوک‌های حاوی دسته‌درزه‌های نامتعاد مطابق با شرایط هندسی مشروحه در جدول ۸ به منظور ارزیابی مقادیر تغییر شکل به صورت عددی مدلسازی شده و مورد مطالعه قرار گرفتند.



شکل ۱۷: تغییرات معیار تعیین حجم معرف با ابعاد بلوک توده سنگ ساختگاه سد بختیاری

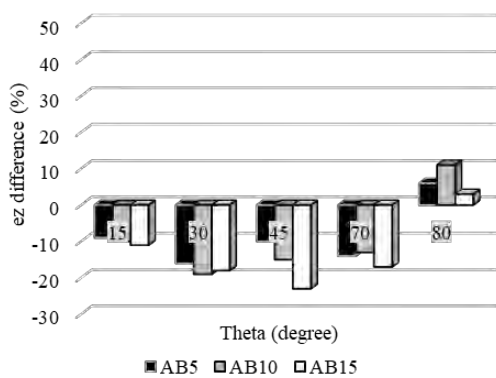
جدول ۸: تعریف مدل‌های مختلف دارای خواص توده سنگ

ساختگاه			رابطه مورد استفاده
مقدار انحراف زوایا			
انحراف α از حالت اولیه			
۱۵ درجه	۱۰ درجه	۵ درجه	آمادبی و گودمن
افزایش	افزایش	افزایش	
AB15	AB10	AB5	
انحراف β از حالت اولیه			
۱۵ درجه	۱۰ درجه	۵ درجه	هوانگ و همکاران
افزایش	افزایش	افزایش	
HB15	HB10	HB5	

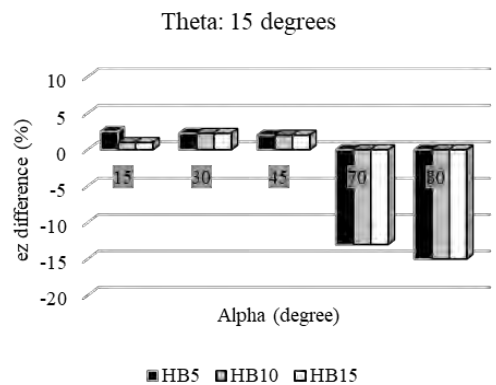
با توجه به این‌که داده‌های به دست آمده از آزمون‌های برجا تنها دربرگیرنده مقادیر کرنش‌های محوری توده سنگ بودند، تنها بررسی نتایج حاصل از روش‌های عددی و تحلیلی در راستای محور بارگذاری امکان‌پذیر بود. مقادیر کرنش محوری حاصل از مدلسازی صریح درزه‌ها برای نمونه‌های حجم معرف در حالت انحراف زاویه α از ۹۰ درجه به همراه نتایج تحلیل محیط پیوسته معادل آمادبی و گودمن و اندازه‌گیری‌های برجا در شکل ۱۸ (الف) ارائه شده اند. مقایسه نتایج تحلیلی با اندازه‌گیری‌های برجا و همچنین

تغییر شکل مدل‌های عددی ندارد اما کاربرد روابط مذکور در برخی از موارد نیازمند بررسی بیشتری است. ✓
 استفاده از رابطه تخمین کرنش محوری در مواقعی که تغییر زاویه دسته درزه اول نقش کنترل کننده‌ای داشته باشد، توصیه نمی‌شود.
 رابطه تحلیلی پیشنهادی برای برآورد تغییر شکل در جهت عمود بر امتداد درزه‌های اول و دوم نیز در شرایط مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نبوده است.
 رابطه تخمین کرنش جانبی موازی امتداد درزه‌ها از شرایطی مشابه مدل محیط پیوسته معادل آمادایی و گودمن پیروی کرده و دقت قابل قبولی دارد.

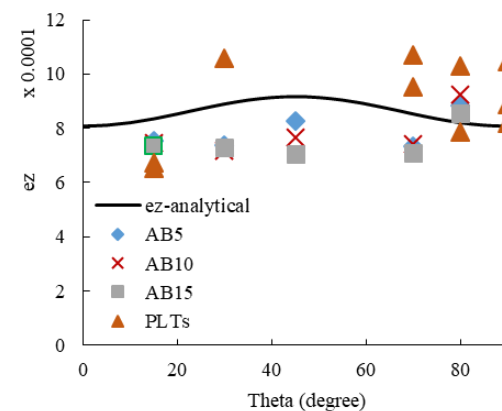
۲. محیط پیوسته معادل هوانگ و همکاران ✓
 روابط ارائه شده توسط هوانگ و همکاران برخلاف مدل محیط پیوسته معادل آمادایی و گودمن تاثیر تغییر زاویه شیب دسته درزه اول را در رفتار تغییر شکل در نظر نمی‌گیرند. به طور کلی، نتایج حاصل بیانگر تاثیر قابل توجه تغییر این زاویه بر اختلاف مقادیر تحلیلی و عددی است.
 اختلاف نتایج تغییر شکل‌های تحلیلی و عددی نشان می‌دهد که تغییر زاویه امتداد تاثیر چندانی بر



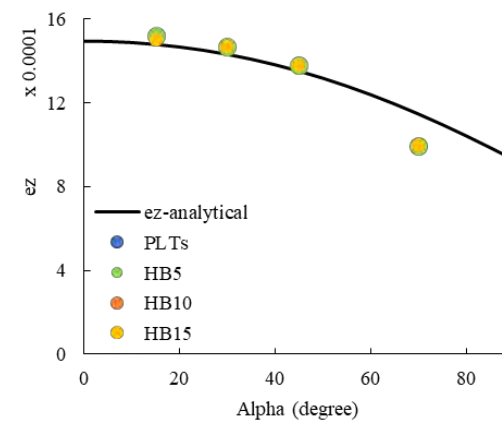
(ب)



(د)



(الف)



(ج)

شکل ۱۸: نمودار تغییرات کرنش محوری تحلیلی، برجا و عددی برای (الف) $AB5$ و $AB10$ و $AB15$ و (ج) $HB5$ و $HB10$ و $HB15$ درصد تغییرات کرنش محوری عددی نسبت به تحلیلی در برابر α برای (ب) $AB5$ و $AB10$ و $AB15$ و (د) $HB5$ و $HB10$ و $HB15$

and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 23(6): 387-397.

[2] Salamon, M. D. G. (1968, November). "Elastic moduli of a stratified rock mass." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 5(6): 519-527.

[1] Oda, M. (1986). "A crack tensor and its relation to wave velocity anisotropy in jointed rock masses." International Journal of Rock Mechanics

مراجع

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(5): 479-501.

[13] Noorian Bidgoli, M., Zhao, Z., and Jing, L. (2013). "Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5: 419-430.

[14] Min, K. -B., and 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 & Mining Sciences*, 40: 795-816.

[15] Baghbanan, A. (2008). Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock mass. PhD in Engineering Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

[16] Wu, Q., and Kulatilake, P. H. S. W. (2012). "REV and its properties on fracture system and mechanical properties, and an orthotropic constitutive model for a jointed rock mass in a dam site in China." *Computers and Geotechnics*, 43: 124-142.

[17] Alshkane, Y. M., Marshall, A.M., and Stace, L.R. (2017). "Prediction of strength and deformability of an interlocked blocky rock mass using UDEC." *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 9: 531-542.

[18] Laghaei, M., Baghbanan, A., Hashemolhosseini, H., and Dehghanipoodeh, M. (2018) "Numerical determination of deformability and strength of 3D fractured rock mass." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 110, pp. 246-256.

[19] Sari, M. (2009). "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, pp. 613-626.

[20] Sadd Tunnel Pars Engineering Co. (2008). "Bakhtiary dam site engineering geology and rock mechanics report-site investigations; Phase I & II." Tehran, Iran.

[3] Singh, B. (1973, July). "Continuum characterization of jointed rock masses: Part I—The constitutive equations." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 10(4): 311-335.

[4] Amadei, B., and Goodman, R. E. (1981). A 3-D Constitutive Relation for Fractured Rock Masses. In *International Symposium on the Mechanical Behavior of Structured Media*, Ottawa.

[5] Gerrard, C. M. (1982, February). "Equivalent elastic moduli of a rock mass consisting of orthorhombic layers." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 19(1): 9-14.

[6] Fossum, A. F. (1985, December). "Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(6): 467-470. Pergamon.

[7] Zhang, L. (2010). "Method for estimating the deformability of heavily jointed rock masses." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9): 1242-1250.

[8] Huang, T. H., Chang, C. S., and Yang, Z. Y. (1995). "Elastic moduli for fractured rock mass." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28(3): 135-144.

[9] JianPing, Y., WeiZhong, C., DianSen, Y., and JingQiang, Y. (2015). "Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling." *Computers and Geotechnics*, 64: 20-31.

[10] Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer.

[11] Christianson, M. C., and Board, M. P. (2006). UDEC Simulation of triaxial testing of lithophysal tuff. In 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS) and 50th Anniversary of the U.S. Rock Mechanics Association.

[12] Kulatilake, P., Wang, S., and Stephansson, O. (1993). "Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock on three dimensions."

³ Degree of Freedom

¹ Representative Elementary Volume (REV)

² Chi-squared goodness of fit test