

پیش‌بینی مدول تغییر شکل توده‌سنگ مبتنی بر روش‌های تحلیلی و عددی

محمد عبادی^۱، سعید کریمی نسب^{۲*}، حسین جلالی فر^۳

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Kariminasab@mail.uk.ac.ir

۳- دانشیار بخش نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت ۲۱ شهریور ۱۳۸۹، پذیرش ۱۷ مهر ۱۳۹۰)

چکیده

تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ یکی از ملزومات اساسی در انجام پروژه‌های مختلف، بویژه پروژه‌های عمرانی است. برای تعیین مدول تغییر شکل می‌توان از روش‌های اندازه‌گیری برجا همچون روش‌های دیلاتومتر، بارگذاری صفحه‌ای و جک تخت استفاده کرد. از طرف دیگر این روش‌ها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه هستند. یکی دیگر از راه‌های پیش‌بینی مدول تغییر شکل توده سنگ، استفاده از روش‌های تحلیلی است. با استفاده از این روش‌ها می‌توان به ارزیابی عوامل مؤثر بر تعیین مدول پرداخت. مبنای روش‌های تحلیلی بر اساس مجموع جابجایی ناشی از جابجایی ماده سنگ و جابجایی درزه‌ها است که در نهایت مدول توده سنگ را تشکیل می‌دهند. در روش‌های تحلیلی ارائه شده فشار جانبی در روابط دیده نشده است؛ بنابراین در این تحقیق به بررسی تأثیر فشار جانبی با استفاده از روش‌های تحلیلی در مقدار مدول توده سنگ پرداخته شده است. برای ارزیابی و کنترل روابط تحلیلی و محاسبه قابلیت اطمینان این روش‌ها، از آزمایش‌های انجام شده در این زمینه استفاده شده است. همچنین نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی با روش‌های عددی مقایسه شده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی با آزمایش‌های انجام شده و همچنین مدل‌سازی عددی، قابلیت اطمینان روش‌های عددی برای مقایسه با روش‌های تحلیلی مشخص شد. در نهایت مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و رابطه تعمیم یافته حاصل از روش‌های تحلیلی، همبستگی بالایی را نشان داد.

کلمات کلیدی

مدول تغییر شکل، توده سنگ، روش تحلیلی، مدل‌سازی عددی، تنش جانبی

۱- مقدمه

است [۱۳]. هومند^۱ و همکاران با استفاده از روش انتشار امواج در سلول آزمایش سه محوری نشان دادند که مدول الاستیک و مدول برشی تابع نمایی از $\sigma_3 + 1$ است و نتیجه تحقیق خود را با ارائه مدل ریاضی نشان داده‌اند [۱۴]. همچنین آزمایش‌های ناصری و همکاران که بر روی چهار نمونه سنگ متفاوت انجام شده بود، نشان دهنده افزایش غیرخطی مدول الاستیک مماسی در ۵۰٪ نقطه شکست با افزایش فشار جانبی در زوایای مختلف است [۱۵]. لی^۲ با استفاده از اصل برهم‌نهی آثار، روشی را برای تعیین مدول توده سنگ پیشنهاد کرده است. در این روش ابتدا مدول تغییر شکل برای تک درزه محاسبه می‌شود و سپس رابطه‌ای برای محاسبه بلوکی با یک دسته و چند دسته درزه ارائه می‌شود [۹]، اما در هیچ‌کدام از مدل‌های تحلیلی پیش‌گفته، اثر فشار جانبی در تخمین مدول توده سنگ لحاظ نشده است. در این تحقیق به پیش‌بینی مدول توده سنگ در محیط درزه‌دار با درزه‌های متعدد و شرایط فشارهای جانبی گوناگون با استفاده از روش‌های تحلیلی پرداخته شد و در نهایت روش تحلیلی ارائه‌شده با روش‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۱- جابجایی ناشی از تک درزه

شکل ۱، مدل بلوکی حاوی یک درزه را نشان می‌دهد. با اعمال تنش بر روی این بلوک درزه‌دار، تنش نرمال و برشی بر روی صفحه درزه ایجاد می‌شود که با محاسبه این تنش می‌توان مقدار جابجایی را محاسبه نمود. اگر افزایش بار اعمال‌شده با $\Delta\sigma$ نشان داده شود، افزایش تنش نرمال ($\Delta\sigma_n$) و افزایش تنش برشی ($\Delta\tau$) که بر صفحه‌ی درزه‌ی θ_i وارد می‌شود، از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است [۹].

$$\Delta\sigma_n = \Delta\sigma \cos^2 \theta_i \quad (1)$$

$$\Delta\tau = \Delta\sigma \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (2)$$

که در آن θ_i :

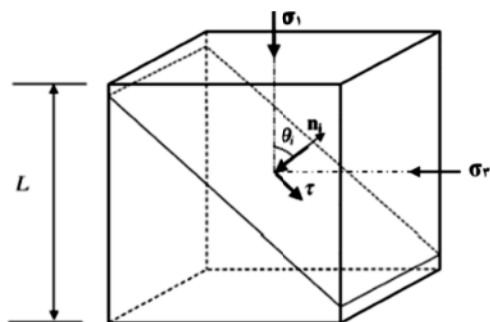
زاویه بین راستای اعمال بار σ_1 و نرمال صفحه درزه میزان جابجایی ناشی از تنش‌ها، حاصل جابجایی هر کدام از تنش‌های اصلی (تنش اصلی حداکثر و تنش جانبی) است که بر روی بلوک اعمال می‌شوند. در ادامه، جابجایی ناشی از این تنش‌ها محاسبه شده است.

یکی از روش‌های محاسبه مدول تغییر شکل توده سنگ استفاده از داده‌های هندسی توده سنگ (مجموع سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها) است. تاکنون به روش‌های تحلیلی متفاوتی برای محاسبه مدول سنگ‌های درزه‌دار با درزه‌های تصادفی [۱] و سنگ شکسته شده اشاره شده است [۲]. همچنین در این راستا تحقیقاتی برای محاسبه مدول تغییر شکل توده سنگ درزه‌دار با درزه‌های منظم انجام شده است. در این روش درزه‌های منظم در توده سنگ توسط یک محیط پیوسته همگن با خواص مقاومتی کمتر، جایگزین می‌شود [۳]. در تحقیق دیگری محاسبه مدول الاستیک برای یک، دو و سه دسته درزه قائم محاسبه شده است [۴]. استفانسون^۱ با استفاده از محاسبه جابجایی‌ها در روش انرژی کرنشی در ستون‌های سنگی، مدول تغییر شکل را برای چندین دسته درزه تعیین کرده است [۵]. سینگ^۲ محیط پیوسته‌ای را برای سنگ‌های درزه‌دار توصیف کرد و توصیفی از مدول الاستیک در محیط شبه پیوسته برای توده سنگ آنیزوتروپ ارائه کرده است [۶] و [۷]. سالامون^۳ راه حلی برای محاسبه مدول الاستیک توده سنگی با درزه‌های افقی و پرشدگی درزه‌ها پیشنهاد داده است [۸]. در تحقیقی که توسط لی^۴ انجام شده، در ابتدا مدول تغییر شکل برای تک درزه محاسبه شده و سپس رابطه‌ای برای محاسبه بلوکی با یک و چند دسته درزه بیان شده است [۹].

آزمون‌های آزمایشگاهی متعددی در زمینه بررسی تأثیر فشار جانبی بر روی مدول نمونه سنگ درزه‌دار، توسط محققین مختلف انجام شده است: یاجی^۵ بر روی نمونه‌های سنگ بکر و سنگ درزه‌دار از نوع سنگ‌های گچی پاریس، ماسه سنگ و گرانیت، آزمایش‌های متفاوتی انجام داده است. وی نتایج تحقیقات خود را در قالب منحنی‌های تنش-کرنش و منحنی شکست برای فشار جانبی متفاوت ارائه کرده و در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه مدول الاستیک با اعمال فشار جانبی روی سنگ بکر به‌دست آورده است [۱۰]. آرورا^۶ رابطه‌ای برای محاسبه‌ی مدول الاستیک سنگ درزه‌دار با استفاده از مدول الاستیک سنگ بکر و فشار جانبی (σ_3) ارائه کرد [۱۱].

کول‌هاوی^۷ پس از انجام طیف وسیعی از آزمایش‌ها، رابطه‌ای را برای محاسبه‌ی مدول الاستیک توده سنگ با استفاده از مدول الاستیک ماده سنگ و فشار جانبی (σ_3) ارائه کرده است [۱۲]. فهیمی‌فر با انجام آزمایش‌های سه محوری بر روی یک نمونه شیست، نمودار افزایش مدول سکانت در ۵۰٪ نقطه‌ی شکست برای زوایای مختلف و فشارهای جانبی متفاوت را به‌دست آورده

برای محاسبه‌ی میزان جابجایی درزه σ_1 در حال بارگذاری σ_3 ، میزان جابجایی Δd_i^{3y} در راستای تنش حداکثر از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. با توجه به این رابطه، نیروی برشی ناشی از فشار جانبی (با توجه به اعمال جابجایی به سمت بالا) عامل افزایش دهنده مدول و نیروی نرمال ناشی از فشار جانبی (با توجه به اعمال جابجایی به سمت بین)، عامل کاهش دهنده مدول توده سنگ درزه‌دار است. و در نهایت با جمع این دو مؤلفه و با توجه به این که $k_{si,\sigma}$ بزرگتر از $k_{ni,\sigma}$ است، همیشه میزان جابجایی ناشی از افزایش فشار جانبی باعث افزایش مدول توده سنگ درزه‌دار می‌شود.



شکل ۱: بلوک سنگ شامل یک درزه

۱-۱- محاسبه جابجایی ناشی از اعمال بار σ_1

افزایش جابجایی نرمال (Δd_{ni}) و افزایش جابجایی برشی (Δd_{si}) ناشی از اعمال تنش σ_1 ، با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود [۹].

$$\Delta d_{ni} = \frac{\Delta \sigma_n}{k_{ni,\sigma}} = \frac{\sigma_1}{k_{ni,\sigma 1}} \cos^2 \theta_i \quad (3)$$

$$\Delta d_{si} = \frac{\Delta \tau}{k_{si,\sigma}} = \frac{\sigma_1}{k_{si,\sigma 1}} \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (4)$$

به‌منظور محاسبه جابجایی کل ناشی از تنش‌های اصلی و محدود کننده، مقدار جابجایی ناشی از σ_3 با مقدار جابجایی ناشی از σ_1 در راستای تنش حداکثر جمع می‌شود (رابطه (۹)).

(۹)

$$\Delta d_i^y = \Delta d_i^{1y} + \Delta d_i^{3y} = \sigma_1 \cos \theta_i \left[\frac{1}{k_{ni,\sigma 1}} \cos^2 \theta_i + \frac{1}{k_{si,\sigma 1}} \sin^2 \theta_i \right] + \sigma_3 \sin \theta_i \cos^2 \theta_i \left[\frac{1}{k_{ni,\sigma 3}} - \frac{1}{k_{si,\sigma 3}} \right]$$

۲- محاسبه مدول توده‌سنگ حاوی یک سیستم درزه

مجموع جابجایی برای بلوک سنگی که شامل یک دسته درزه باشد، برابر با مجموع آثار ناشی از جابجایی سنگ بکر و جابجایی دسته درزه است. برای محاسبه جابجایی الاستیک می‌توان از رابطه (۱۰) استفاده کرد [۹].

$$\Delta d^e = \frac{\sigma_1}{E} L \quad (10)$$

که در آن E :

مدول یانگ سنگ بکر

: L

ارتفاع نمونه

همان‌طور که در رابطه (۱۱) مشاهده می‌شود، جابجایی نهایی در نمونه (Δd) برابر است با مجموع جابجایی ناشی از سنگ بکر (رابطه (۱۰)) و جابجایی ناشی از درزه‌ها (رابطه (۹)) [۹].

$$\Delta d = \Delta d^e + \sum_{i=1}^M \Delta d_i^y \quad (11)$$

با تصویر کردن مقدار جابجایی در صفحه برش (راستای نرمال و برشی) در راستای تنش حداکثر، مقدار جابجایی درزه σ_1 در حال بارگذاری σ_1 ، از رابطه (۵) بدست می‌آید [۹].

$$\Delta d_i^{1y} = \Delta d_{ni}^1 \cos \theta_i + \Delta d_{si}^1 \sin \theta_i = \sigma_1 \cos \theta_i \left[\frac{1}{k_{ni,\sigma 1}} \cos^2 \theta_i + \frac{1}{k_{si,\sigma 1}} \sin^2 \theta_i \right] \quad (5)$$

که در آن $k_{ni,\sigma}$ و $k_{si,\sigma}$: مقادیر سختی نرمال و برشی برای درزه‌ی σ_1 ناشی از تنش σ

لازم به ذکر است که سختی نرمال و برشی برای درزه‌های سنگ به‌وسیله پروفیل درزه حاصل از نتایج آزمایش، بدست می‌آید. این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تنش نرمال، مقادیر سختی نرمال و برشی افزایش می‌یابند [۱۶].

۲-۱- محاسبه جابجایی ناشی از اعمال بار σ_3

اگر تنش σ_3 عمود بر راستای درزه باشد، افزایش جابجایی نرمال (Δd_{ni}) و افزایش جابجایی برشی (Δd_{si}) ناشی از اعمال تنش σ_3 با استفاده از روابط (۶) و (۷) بدست می‌آید.

$$\Delta d_{ni} = \frac{\Delta \sigma_n}{k_{ni,\sigma}} = \frac{\sigma_3}{k_{ni,\sigma 3}} \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (6)$$

$$\Delta d_{si} = \frac{\Delta \tau}{k_{si,\sigma}} = \frac{\sigma_3}{k_{si,\sigma 3}} \cos^2 \theta_i \quad (7)$$

(۱۵)

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \frac{1}{S} \cos^2 \theta \left(\left[\frac{1}{k_{n,\sigma 1}} \cos^2 \theta + \frac{1}{k_{s,\sigma 1}} \sin^2 \theta \right] \right)$$

برای حالتی که بلوک دارای N دسته درزه باشد، جابجایی نهایی از مجموع جابجایی الاستیک ماده سنگ و جابجایی هر یک از دسته درزه‌ها محاسبه می‌شود. در این حالت و با در نظر گرفتن N دسته درزه، رابطه (۱۵) به رابطه (۱۶) تبدیل می‌شود.

(۱۶)

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \sum_{j=1}^N \left(\left(\frac{1}{S} \cos^2 \theta \right) \left(\left[\frac{1}{k_{n,\sigma 1}} \cos^2 \theta + \frac{1}{k_{s,\sigma 1}} \sin^2 \theta \right] + \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \sin \omega \sin \theta \cos^2 \theta \left[\frac{1}{k_{n,\sigma 3}} - \frac{1}{k_{s,\sigma 3}} \right] \right) \right)_j$$

در این رابطه با صرف نظر کردن از مقدار نیروی محصورکننده (σ_3) (حذف تنش جانبی) رابطه ارائه شده توسط "لی" بدست می‌آید (رابطه (۱۷)) [۹]، که نشان دهنده صحت محاسبات است.

(۱۷)

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \sum_{j=1}^N \left(\left(\frac{1}{S} \cos^2 \theta \right) \left(\left[\frac{1}{k_{n,\sigma 1}} \cos^2 \theta + \frac{1}{k_{s,\sigma 1}} \sin^2 \theta \right] \right) \right)$$

۴- کالبراسیون مدل تحلیلی

۴-۱- با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

به منظور تعیین قابلیت اعتماد و دقت مدل تحلیلی در تخمین مدول توده سنگ از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی که به وسیله پینتو^۱ بر روی سه نمونه شیست (جدول (۱)) انجام شده است، استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، نتایج حاصل از آزمایش بر روی قطعات شیست با نتایج پیش‌بینی شده به وسیله مدل تحلیلی (رابطه (۱۷)) مطابقت دارد.

در یک دسته درزه، m تک درزه وجود دارد که جابجایی کلی بلوک ناشی از جابجایی تک تک این درزه‌ها و جابجایی ماده سنگ می‌باشد. برای محاسبه تعداد درزه‌ها با توجه به شکل (۲) در طول نمونه (L) می‌توان از رابطه (۱۲) استفاده کرد [۹].

$$m = (L \cos \theta_i / S_i) \quad (12)$$

با محاسبه جابجایی در نمونه، مدول تغییرشکل بلوک سنگی با یک دسته درزه از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m \left(\cos \theta_i \left[\frac{1}{k_{ni,\sigma 1}} \cos^2 \theta_i + \frac{1}{k_{si,\sigma 1}} \sin^2 \theta_i \right] + \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \sin \theta_i \cos^2 \theta_i \left[\frac{1}{k_{ni,\sigma 1}} - \frac{1}{k_{si,\sigma 1}} \right] \right) \quad (13)$$

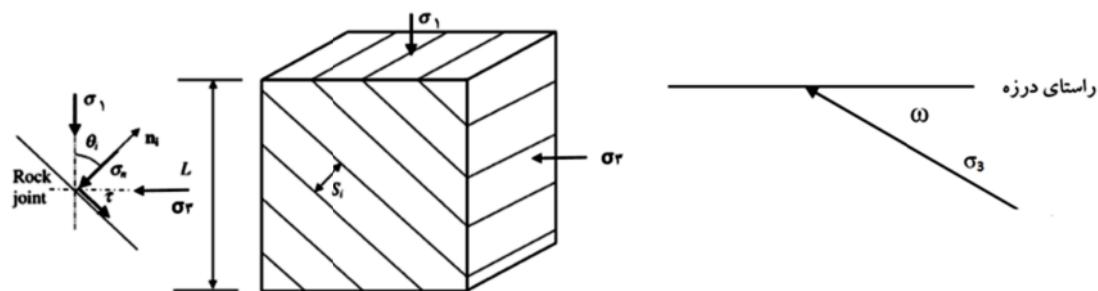
با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۳) برای یک دسته درزه با تعداد درزه مشخص و با فرض ثابت بودن خواص درزه و فاصله داری، رابطه (۱۴) حاصل می‌شود.

(۱۴)

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \frac{1}{S} \cos^2 \theta \left(\left[\frac{1}{k_{n,\sigma 1}} \cos^2 \theta + \frac{1}{k_{s,\sigma 1}} \sin^2 \theta \right] + \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \sin \varphi_1 \sin \theta_i \cos^2 \theta_i \left[\frac{1}{k_{n,\sigma 1}} - \frac{1}{k_{s,\sigma 1}} \right] \right)$$

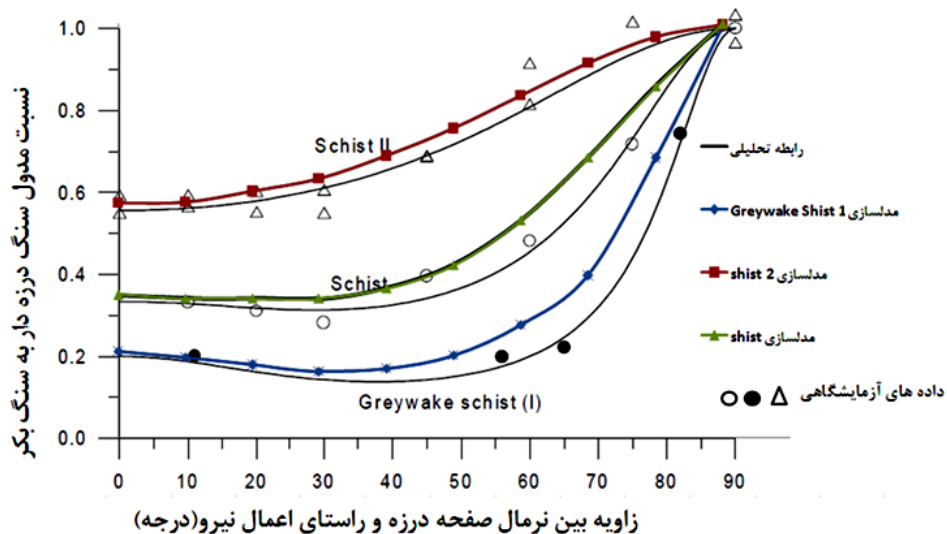
۳- محاسبه مدول توده سنگ حاوی چند سیستم درزه

برای محاسبه جابجایی دسته درزه، فرض بر این است که راستای اعمال نیروی محصورکننده (σ_3) عمود بر راستای درزه باشد (شکل (۲))، ولی در حالتی که چند دسته درزه در یک بلوک وجود دارد، زاویه بین راستای اعمال نیرو و راستای درزه (ω) عمود بر راستای درزه نیست و نیروی عمود بر راستای درزه در محاسبات وارد می‌شود (نیروی موازی با راستای درزه ایجاد جابجایی قائم ندارد). با وارد کردن زاویه ω در رابطه (۱۴) می‌توان آن را بصورت رابطه (۱۵) بازنویسی کرد.

شکل ۲: بلوکی با یک دسته درزه و نمایش راستای اعمال بار σ_3 و راستای درزه

جدول ۱: مشخصات شیست‌های مورد آزمایش [۱۷]

فاصله‌داری (m)	سختی برشی (GPa/m)	سختی نرمال (GPa/m)	مدول الاستیک (GPa)	نوع سنگ مورد آزمایش
۰/۰۵	۱۵۰۰	۱۸۷۵	۷۵	شیست نوع دوم
۰/۰۵	۲۳۱	۶۶۰	۶۶	شیست
۰/۰۵	۳۹	۱۹۵	۳۹	شیست گریوکی



شکل ۳: مقایسه داده‌های آزمایشگاهی برای قطعات شیست و نتایج رابطه تحلیلی و مدل‌سازی عددی داده‌های آزمایشگاهی [۱۷]

۴-۲- روش‌های عددی

۴-۲-۱ مدل‌سازی با یک دسته درزه

در مدل‌سازی‌های عددی با یک دسته درزه، مشخصات هندسی و مکانیکی درزه‌ها به شرح جدول ۳ در نظر گرفته شده است. شکل ۴ مدل بلوکی ساخته‌شده در تحلیل عددی سه بعدی را نشان می‌دهد. در این تحلیل، نسبت مدول توده سنگ به مدول

به‌منظور بررسی روابط ارائه‌شده توسط مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار 3DEC مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات ورودی نرم‌افزار در جدول ۲ آورده شده است. این اطلاعات برای یک شیست فرضی است.

۵- کالیبراسیون مدل تحلیلی تعمیم یافته

۵-۱- یک دسته درزه با تنش فشاری محدودکننده

برای مقایسه روابط تحلیلی با مدل سازی عددی حاصل از نرم افزار 3DEC، توده سنگی با نسبت تنش های اصلی و محصورکننده ۰/۶ و مشخصات یک نمونه شیبست (جدول ۴) در نظر گرفته شد.

مقایسه مدل سازی عددی شیبست (جدول ۴) با یک دسته درزه و حل رابطه (۱۶) که تحت نسبت تنش های اصلی و محصورکننده ۰/۶ و زاویه اعمال بار مینیمم با راستای درزه بصورت قائم قرار دارد، در شکل ۸ ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، حداکثر خطا ۷ درصد است که نشان از دقت محاسبات و قابلیت اطمینان بالای روابط تحلیلی دارد.

۵-۲- سه دسته درزه با تنش فشاری محدودکننده

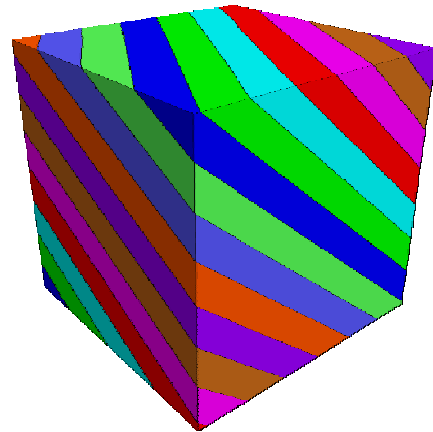
در این قسمت مدل سازی عددی سه بعدی در بلوک سنگی حاوی سه دسته درزه با راستای ۳۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه انجام شد. مقایسه نتایج تحلیلی حاصل از حل رابطه (۱۶) تحت نسبت تنش های اصلی و محصورکننده ۰/۶ با نتایج روش های عددی (شکل ۹)، تطابق خوبی (با حداکثر خطای ۱۴ درصد) را نشان می دهد (شکل ۱۰).

۶- تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکل توده سنگ و تأثیر هر یک از پارامترها بطور مستقل پرداخته شده است. با ثابت در نظر گرفتن تمام شرایط آزمایش و تغییر یکی از پارامترها، به تحلیل حساسیت کلیه عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکل یک نمونه شیبست با مشخصات مندرج در جدول ۴ و با شرایط آزمایشی $\sigma_3/\sigma_1=0/6$ و $\varphi=90^\circ$ پرداخته شد. در هر مورد، بهترین نمودار برازش شده بر داده ها نیز رسم شد.

ماده سنگ \dot{E}/E طبق رابطه (۱۷) محاسبه شده و تغییرات نسبت \dot{E}/E با تغییرات زاویه بارگذاری برای دو حالت رابطه ریاضی و مدل سازی ترسیم شده است (شکل ۵).

همان طور که در شکل مشخص است تطابق خوبی بین مدول حاصل از مدل پیشنهادی و روش های سه بعدی عددی بدست آمده و حداکثر خطای آن ۲/۵ درصد است که ناچیز است و نشان از دقت بالای مدل تحلیلی دارد.



شکل ۴: مدل سازی بلوک مکعبی شکل با یک دسته درزه

۴-۲-۲ مدل سازی با سه دسته درزه

شکل (۶) بلوک مشخصه نمونه (جدول (۳)) با سه دسته درزه در راستای ۳۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه را نشان می دهد. در این حالت، نسبت مدول توده سنگ به مدول ماده سنگ با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده (رابطه (۱۷)) و مدل سازی عددی محاسبه شده است. نتایج حاصل از این دو روش در شکل (۷) آورده شده و چنان که مشاهده می شود، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از مدل سازی عددی و مدل تحلیلی وجود دارد. حداکثر خطا در این حالت ۲/۲ درصد است. مقایسه نتایج حاصل از رابطه تحلیلی ارائه شده و مدل سازی عددی نشان از دقت بالای مدل تحلیلی داشته، قابلیت اعتماد بالای روش های عددی را نیز تأیید می کند.

جدول ۲: اطلاعات ورودی در مدل سازی

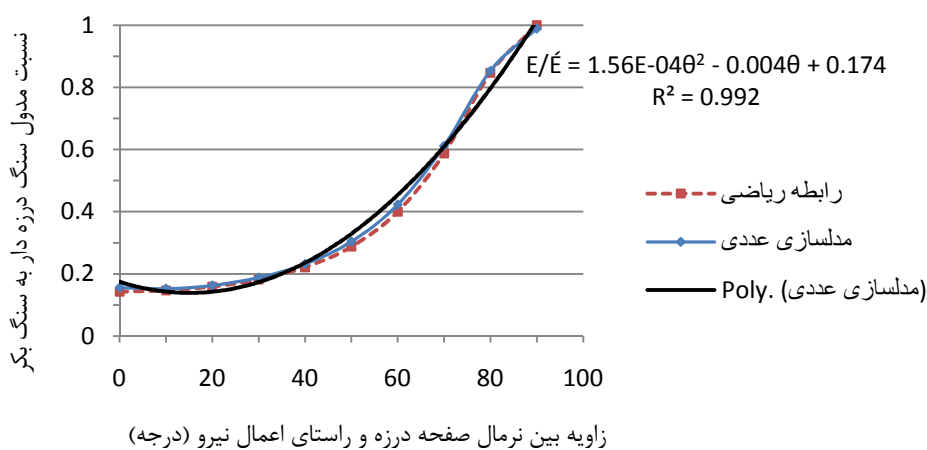
چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	معیار درزه	معیار مواد بکر
۰/۱	صفر	۰/۲۹	۲۷	موهر-کولمب	الاستیک

جدول ۳: مشخصات بلوک‌های مدل‌سازی شده

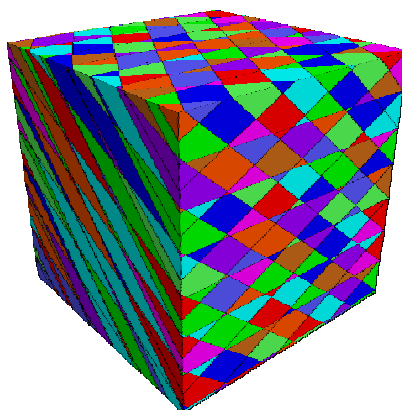
فاصله‌داری (m)	سختی برشی (GPa/m)	سختی نرمال (GPa/m)	مدول الاستیک (GPa)
۰/۰۵	۲۰	۲۰	۶۰

جدول ۴: مشخصات شیست [۱۷]

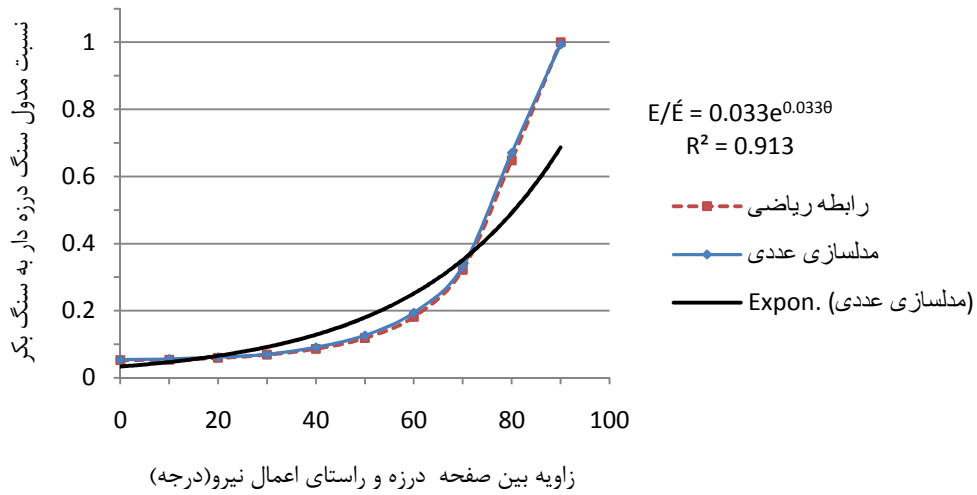
فاصله‌داری (m)	سختی برشی (GPa/m)	سختی نرمال (GPa/m)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
۰/۰۵	۲۳۱	۶۶۰	۶۶	۰/۲۹



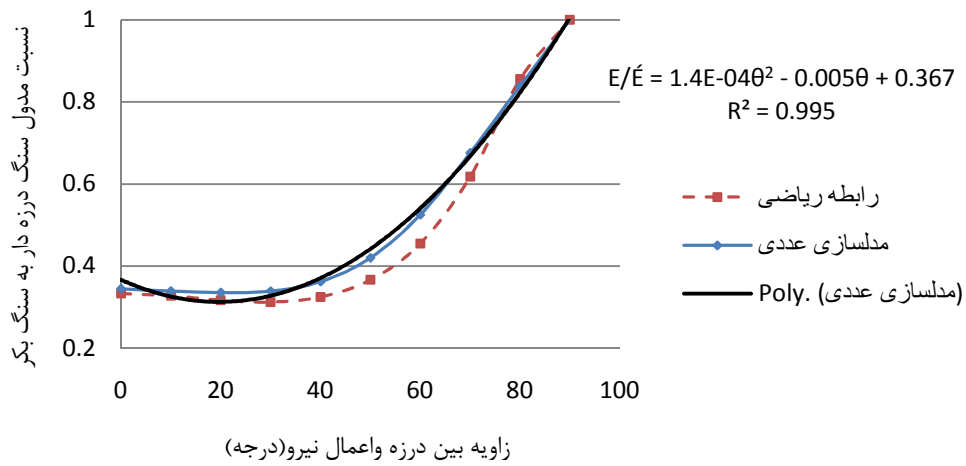
شکل ۵: نسبت مدول در زوایای مختلف برای یک دسته درزه



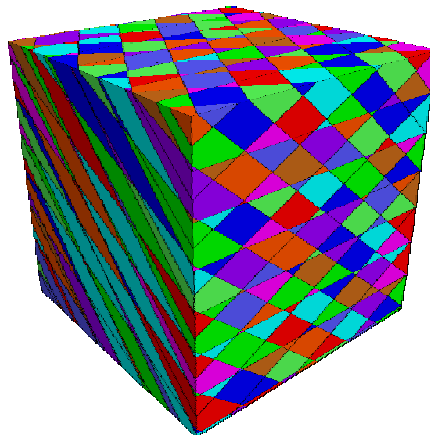
شکل ۶: بلوک مکعبی شکل با سه دسته درزه در راستاهای متفاوت



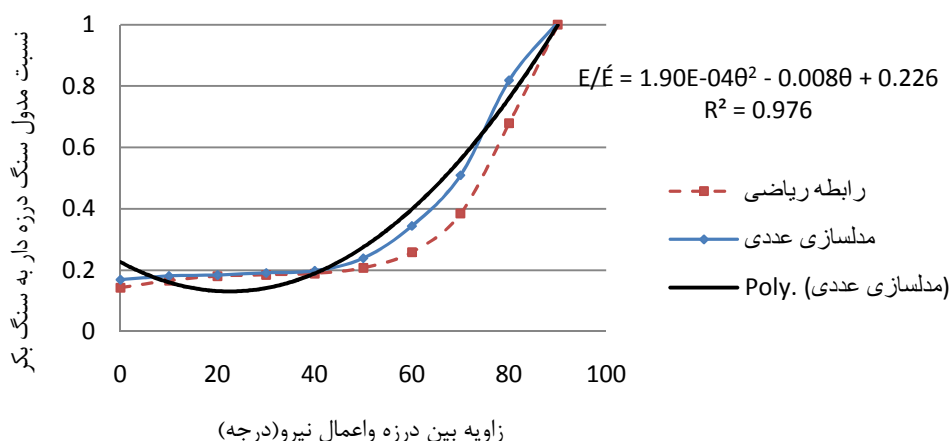
شکل ۷: نسبت مدول توده سنگ به سنگ بکر برای بلوکی با سه دسته درزه و اعمال فشار جانبی



شکل ۸: نسبت مدول برای نسبت زوایای متفاوت در $\omega=90^\circ$ و $\sigma_3/\sigma_1=0.6$ برای یک دسته درزه



شکل ۹: بلوک مکعبی شکل با سه دسته درزه با محورکننده



شکل ۱۰: نسبت مدول برای نسبت زوایای متفاوت در $\omega=90^\circ$ و $\sigma_3/\sigma_1=0.6$ برای یک دسته درزه

۱-۶- تغییر نسبت تنش‌ها

همان‌طور که می‌توان پیش‌بینی کرد، در شکل حاصل از تغییر نسبت تنش‌ها (شکل ۱۱)، با افزایش نسبت تنش، مقدار جابجایی در راستای قائم کاهش یافته، مقدار مدول افزایش می‌یابد.

۴-۶- سختی نرمال درزه (k_n)

با افزایش سختی نرمال درزه مقاومت در برابر جابجایی در جهت نرمال افزایش یافته، جابجایی کمتری در این راستا رخ می‌دهد و توده سنگ مدول بیشتری را از خود نشان می‌دهد (شکل ۱۴). لازم به ذکر است که در سختی‌های بالا، تاثیر سختی نرمال بطور چشم‌گیری کاهش خواهد یافت.

۲-۶- زاویه نرمال درزه با زاویه اعمال بار σ_1

در شکل ۱۲، نمودار نسبت مدول توده سنگ به ماده سنگ برای زوایای مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشخص است در زاویه صفر درجه، مقدار مینیمم نسبت مدول‌ها بدست می‌آید و برای زاویه ۹۰ درجه این نسبت به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۵-۶- سختی برشی درزه (k_s)

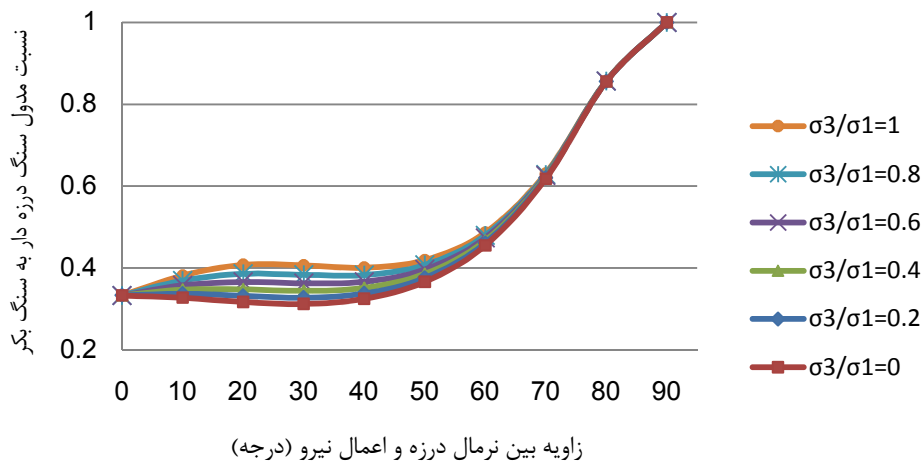
با افزایش سختی برشی درزه، مقاومت در برابر جابجایی برشی افزایش می‌یابد و جابجایی کمتری در راستای برش رخ می‌دهد و در نتیجه، توده سنگ مدول بیشتری از خود نشان می‌دهد (شکل ۱۵).

۶-۶- نسبت تنش‌های اصلی و محصورکننده

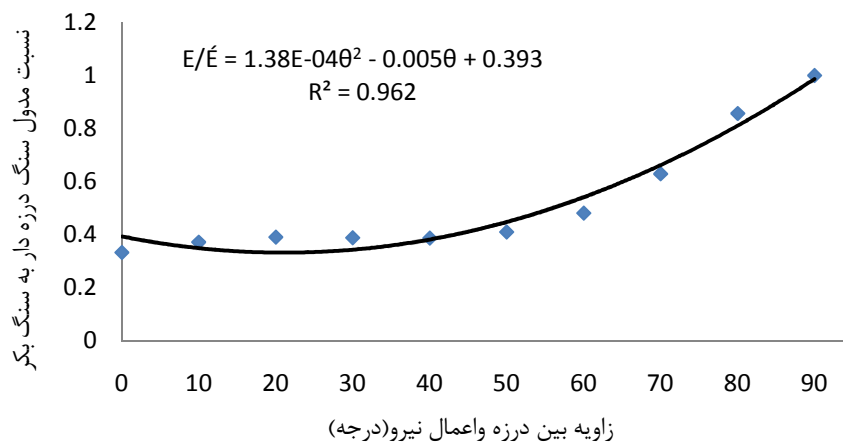
با افزایش نسبت تنش‌های اصلی و محدودکننده، تأثیر تنش σ_3 در روابط افزایش پیدا می‌کند و کرنش الاستیک و کرنش درزه‌ها که در جهت مخالف تنش اصلی حداکثر است، افزایش می‌یابد و در نهایت، مقدار مدول توده‌سنگ افزایش می‌یابد (شکل ۱۶).

۳-۶- فاصله‌داری درزه‌ها

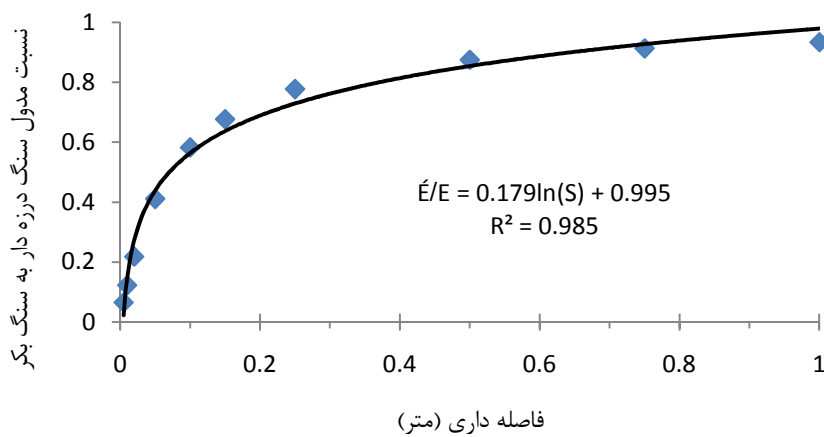
در این قسمت انتظار می‌رود که با افزایش مقدار فاصله‌داری درزه‌ها، خردشدگی کمتر شود و مدول توده سنگ افزایش یابد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، با افزایش مقدار فاصله‌داری، مدول توده سنگ و در نتیجه نسبت مدول توده سنگ به سنگ بکر افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت بعد از ۲۰ سانتیمتر، روند فزاینده کاهش یافته، نسبت مدول‌ها تقریباً ثابت خواهد ماند. در فواصل بیشتر، نسبت مدول‌ها به مقدار ۱ نزدیک و مدول‌ها برابر خواهند شد.



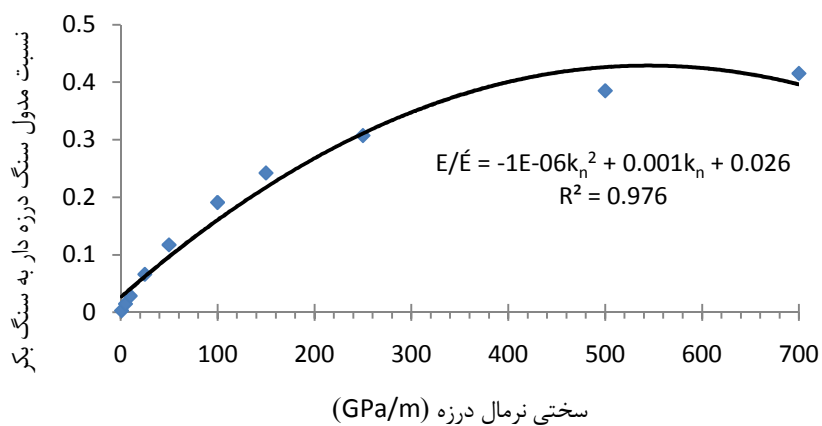
شکل ۱۱: نسبت مدول برای زوایای مختلف در نسبت تنش‌های متفاوت



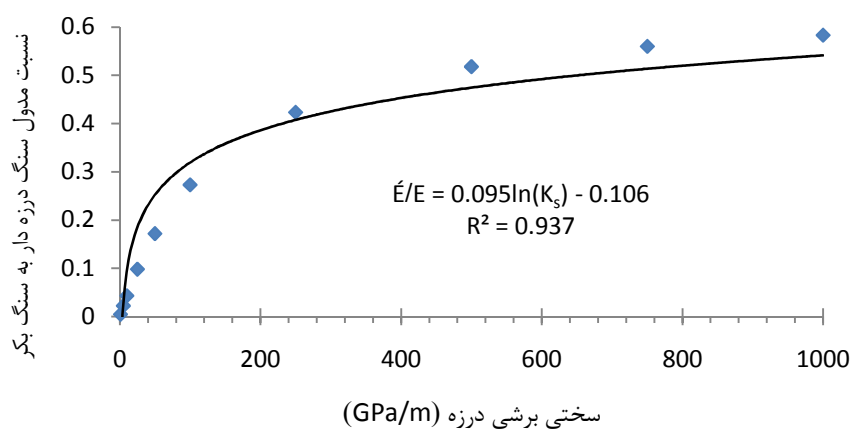
شکل ۱۲: نسبت مدول برای زوایای مختلف



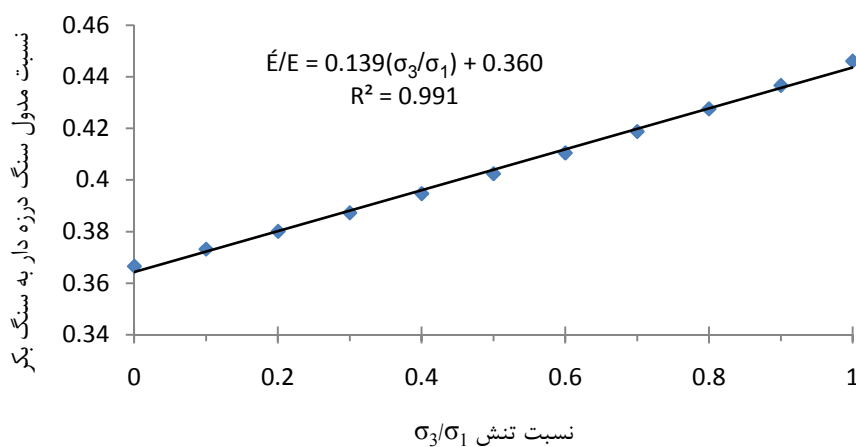
شکل ۱۳: نسبت مدول برای فاصله‌داری مختلف



شکل ۱۴: نسبت مدول برای مقادیر مختلف سختی نرمال



شکل ۱۵: نسبت مدول برای مقادیر مختلف سختی برشی



شکل ۱۶: نسبت مدول برای مقادیر متفاوت ضریب تنش

۷- نتیجه

- for a randomly jointed rock mass". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 22(6), pp. 467-470.
- [2] Huang, T. H.; Chang, C. S.; Yang, Z. Y.; 1995; "Elastic moduli for fractured rock mass". Rock Mech. Rock Engng. 28(3), pp. 135-144.
- [3] Amadei, B.; 1993; "Effect of joints on rock mass strength and deformability". Comprehensive Rock Engineering principles, practice and projects, Vol. 1. Pergamon Press, Oxford, pp. 331-365.
- [4] Gerrard, CM.; 1982; "Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints". Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 19, pp. 15-23. [5] Stephansson, O.; 1981; "The Nasliden project-rock mass investigations. Applications of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining", Edited by O. Stephansson & M. J. Jones, pp. 145-161, (I.M.M., London).
- [6] Singh, B.; 1973; "Continuum characterization of jointed rock masses Part I-the constitutive equations". Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr 10, pp. 311-35.
- [7] Singh, B.; 1973; "Continuum characterization of jointed rock masses Part II-significance of low shear modulus". Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr 10, pp. 337-49.
- [8] Salamon, M. D. G.; 1968. "Elastic moduli of a stratified rock mass". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 5. pp. 519-527.
- [9] Li, C.; 2001; "A Method for Graphically Presenting the Deformation Modulus of Jointed Rock Masses", Rock Mech. Rock Engng, vol 34 (1), pp. 67-75.
- [10] Yaji, R. K.; 1984; "Shear strength and deformation of jointed rocks". Ph. D. thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, India.
- [11] Arora, V. K.; 1987; "Strength and deformation behavior of jointed rocks". Ph. D. thesis, IIT Delhi, India.
- [12] Kulhawy, F. H.; 1975; "Stress deformation properties of rock and rock discontinuities". Engineering Geology, Vol.9, pp. 327-350.
- [13] Fahimifar, A.; 2004; "Strength and deformation properties of a schist rock in Isfahan", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Vol. 28, no. B5.
- [14] Homand, F.; Morel, E.; Henry, J.P.; CuxacP,
- با توجه به نتایج حاصل از مدل تحلیلی پیشنهادی و مقایسه نتایج با مدل سازی های عددی، نکات زیر قابل استنتاج است:
- ✓ نیروی برشی ناشی از فشار جانبی، عامل افزایش- دهنده مدول و نیروی نرمال ناشی از فشار جانبی، عامل کاهش دهنده مدول توده سنگ درزه دار است و در مجموع مدول کلی توده سنگ با افزایش فشار جانبی، افزایش خواهد یافت.
- ✓ افزایش فشار جانبی باعث افزایش مدول توده سنگ درزه دار می شود.
- ✓ افزایش زاویه نرمال درزه با زاویه اعمال بار σ_1 ، فاصله داری، سختی نرمال درزه (k_n)، سختی برشی درزه (k_s) و نسبت تنش های اصلی و محصورکننده باعث افزایش مدول توده سنگ درزه دار می شود. با افزایش این پارامترها از حد معینی، از سرعت افزایش مدول بطور چشم گیری کاسته خواهد شد تا مدول توده سنگ با مدول سنگ بکر نتایج تقریباً یکسانی ارائه نمایند.
- ✓ در مدل های بلوکی حاوی یک دسته درزه و سه دسته درزه، هماهنگی خوبی بین مدول حاصل از روابط ریاضی و مدل سازی های عددی بدست آمد. حداکثر خطا بترتیب $2/5$ و $2/2$ درصد بوده است.
- ✓ میزان خطای حاصل از مدل تحلیلی پیش بینی شده و نتایج حاصل از مدل سازی های عددی در مدل بلوکی حاوی یک دسته درزه و سه دسته درزه و با اعمال فشار جانبی، بترتیب 7 و 14 درصد محاسبه شده است.
- ✓ در حالت کلی، نتایج حاصل از نمونه های آزمایشگاهی، نتایج مدل سازی عددی و نتایج روابط تحلیلی مقایسه شد. تطابق بسیار خوب نتایج، نشان- دهنده دقت و صحت محاسبات و روابط تحلیلی است.
- مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی پیشنهادی با مدل- سازی های عددی و آزمون های آزمایشگاهی، همبستگی قابل قبولی را نشان داده که نشان دهنده دقت بالای مدل تحلیلی است.

منابع

[1] Fossum, A. F.; 1985; "Effective elastic properties

پی‌نوشت

1 Stephansson
2 Singh
3 Salamon
4 Li
5 Yaji
6 Arora
7 Kulhawy
8 Homand
9 Li
10 Pinto

Hammade, E.; 1993; "Characterization of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods". International journal of rock mechanics and mining science and geomechanical abstract, Vol.30, pp. 527-35.

[15] Nasser, M.H.B.; Rao, K.S.; Ramamurthy, T.; 2003; "*Anisotropics strength and deformational behavior of Himalayan schists*". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol.40, pp. 3-23.

[16] Bandis, S. C.; Lumsden, A. C.; Barton, N. R.; 1983; "Fundamentals of rock joint deformation". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 20(6), pp.249-268.

[17] Pinto, J. L.; 1970; "Deformability of schistous rocks". Proc., 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Beograd, Jugoslavija, Vol. 1, pp. 2-30.