ارزیابی صحت بر آورد 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

چکیدہ

مطالعه درزدها و تاثیر آنها بر رفتار تودهسنگ زمینه تحقیقاتی فعالی در ژئومکانیک فراهم آورده است. تغییرشکل پذیری یک تودهسنگ حاوی دسته درزدهای سیستماتیک ممتد به طور بالقوه ناهمسانگرد بوده و به صورت عمده به وسیله خصوصیات مکانیکی و هندسی درزدها کنترل میشود. خصوصیات تغییرشکل سنگها به طور معمول با استفاده از آزمونهای آزمایشگاهی و برجا تعیین میشوند. آزمایشات برجا بر اساس بارگذاری تودهسنگ و اندازه گیری تغییرشکل حاصله استوار هستند. از روشهای عددی و تحلیلی میتوان به عنوان جایگزین آزمایشهای برجای پر هزینه و وقت گیر برای مطالعه خصوصیات تغییرشکل سنگها استفاده کرد. در مدلهای تحلیلی، فرضیاتی مانند تعامد دسته درزدها موجب سادهسازیهایی میشوند که ممکن است از واقعیت به دور باشند. روشهای عددی در مقایسه با خط مشیهای تحلیلی دارای این مزیت هستند که در استنتاج خواص تودهسنگ میتوان تاثیر نامنظم بودن هندسه سیستم درزدهاری را به طور مستقیم در مدلسازی دخیل نمود. در این مقاله، مدلهای عددی میتوان تاثیر نامنظم بودن هندسه سیستم درزدهاری را به طور مستقیم در مدلسازی دخیل نمود. در این مقاله، مدلهای عددی منظور اطلاع از نحوه پراکندگی دادهها انجام شده است. سپس، میزان انحراف تغییرشکل بر آمری نتایج عددی حاصل به ساختاری شامل مدلهای پیشنهادی (۱) آمادیی و گودمن و (۲) هوانگ و همکاران نسبت به مدلهای عددی جهت ار زیابی صحت منظور اطلاع از نحوه پراکندگی دادهها انجام شده است. سپس، میزان انحراف تغییرشکل برآورد شده با استفاده از روابط ساختاری شامل مدلهای پیشنهادی (۱) آمادیی و گودمن و (۲) هوانگ و همکاران نسبت به مدلهای عددی جهت ار زیابی صحت منظور اطلاع از نحوه پراکندگی دادها انجام شده است. سپس، میزان انحراف تغییرشکل در بیشتر موارد بیانگر تاثیر ساختاری شامل مدلهای پیشنهادی (۱) آمادیی و گودمن و (۲) هوانگ و همکاران نسبت به مدامهای عددی جهت ار زیابی صحت موابط مذکور در شرایط هندسی مورد مطالعه در روند تغییرات است. این نتایج برای بررسی صحت روابط مذکور در بر آورد میدان تغییرشکل تودهسنگهای درزدوار غیرمتعامد ار ایه شده است.

كليدواژهها

توده سنگ درزهدار، تغییرشکل پذیری، محیط پیوسته معادل، روش اجزای مجزا

^{*}ayده دار مکاتبات: mmlee@aut.ac.ir

۱– مقدمه

خصوصیات تودهسنگها در مقیاس بزرگ اغلب از طریق اندازه گیریهای مستقیم به دلیل هزینه گزاف، زمانبر بودن و محدودیت نتایج آزمونهای برجا در دست نیست. از طرف دیگر، پیشبینی رفتار تغییرشکل تودهسنگ درزهدار به وسیله مدلسازی عددی به منظور مطالعه تاثیر بارگذاری، 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 می گردد. 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 نمی توانند 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 می شود [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 آمادیی و گودمن با هدف ارایه رابطهای ساختاری برای تشریح رفتار غیرخطی یک حجم همگن ناهمسانگرد ناپیوسته از سنگ که دارای حداکثر سه

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 متوسط گیری 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 می گیرد، روش عددی است. در این روش با ترکیب خواص مقاومتی و تغییر شکل سنگ بکر و درزهها، رفتار متناظر تودهسنگ محاسبه می شود. این روش اجازه مشارکت هر نوع شبکهای از درزهها (از جمله شبکه شکستگی مجزا) را در تودهسنگ داده و همچنین برهم کنش بین درزهها و سنگ بکر را نیز در نظر می گیرد. 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 می کنند 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

محدود در سه بعد پرداختند [۱۲]. آنها روشی برای مطالعه تاثیر هندسه شبکه شکستگیها از جمله چگالی درزهداری، ابعاد درزهها و جهت گیری 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 تغییرشکل پذیری سنگهای درزهدار با استفاده از روش اجزای مجزا را در ادامه کارهای انجام شده توسط مین و جينگ [١۴] و باغبانان [١۵] ارائه كردند. آنها بيان مي كنند که اگر ابعاد مدل کوچکتر از ابعاد حجم معرف اولیه (تودهسنگ مورد مطالعه باشد، نتایج نشاندهنده تاثیر شگرف مقیاس مدل تحت مطالعه بر رفتار مقاومتی و تغییر شکل سنگهای درزهدار خواهد بود و هنگامی که ابعاد مدل به مقدار حجم معرف مورد نظر مىرسد اين تغييرات حداقل می شوند. وو و کولاتیلاک [۱۶] از 3DEC برای تعیین حجم معرف و خواص مکانیکی و تحلیل تنش تودهسنگ واقع در ساختگاه سدی در چین استفاده کردند. آنها از تئوری تانسور شکاف برای ترکیب تأثیر تعداد دسته درزهها، شدت و توزیع جهت یابی و اندازه دسته درزهها بهره گرفته و از روشی که كولاتيلاك پيشنهاد كرده بود براى تعيين 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 تودهسنگهای درزهدار استفاده کردند و نتیجه گرفتند که برای هر تودهسنگ یک کرنش بحرانی وجود دارد که عمدتاً توسط مقاومت فشارى تكمحوره أن كنترل مي شود. ألشكان و همکاران[۱۷] روشی برای پیشبینی مقاومت و تغییرشکلپذیری تودهسنگهای درزهدار با استفاده از UDEC ارائه کردند. آنها تودهسنگ 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 تعیینشده بلغزد. لقایی و همکاران [۱۸] از روش عددی برای تعیین تانسور ثابتهای الاستیک و حجم معرف اولیه بر اساس تغییر شکل پذیری و مقاومت تودهسنگ حاوی شکستگیهای نامنظم و تصادفی در سه بعد استفاده کر دند.

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

مقاومت و تغییر شکل آنها بوده است. هر چند این مطالعات نتایج ارزشمندی ارایه نموده است، اما به دلیل مفروضات اوليه شامل سادهسازيهايي مي شوند. به عنوان مثال، الگوي درزهداری متعامد مورد استفاده در این مدلها بیان میکند که می توان از تقاطع بین دسته درزهها صرفنظر نمود. از طرف دیگر، هیچیک از مطالعات عددی تا کنون به بررسی میزان صحت نتایج مدل های محیط پیوسته معادل در شرایط درزهداری پیچیده نپرداخته اند. از آنجایی که مدل تحلیلی ارایه شده توسط آمادیی 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 تغييرشكل محاسبه شده به وسيله روابط محيط پيوسته معادل مطالعه نشده است. در این مقاله مطالعهای در این زمینه با استفاده از مدلهای پیشنهادی آمادیی و گودمن و هوانگ (که می توان آن را حالت تعمیم یافته مدل آمادیی 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 می گردد. این ماده فرضی رفتاری مشابه رفتار الاستیک و غیرالاستیک ماده ناپیوسته اولیه نشان میدهد.

۲-۱- محیط پیوسته معادل یک تودهسنگ درزهدار ار تو ترو پیک

آمادیی 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. تودهسنگ مورد نظر دارای سه دسته $\varepsilon_y = -\frac{v}{E}\sigma_V$

 θ اگر تنشی مطابق شکل ۱ در جهت z اعمال شده و

زاویه شیب دسته درزه J_1 باشد، مولفههای کرنش به صورت

 $\varepsilon_{x} = \left(\frac{\sin^{2} 2\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{n1}S_{1}} + \frac{1}{k_{n2}S_{2}} - \frac{1}{k_{s1}S_{1}} - \frac{1}{k_{s2}S_{2}}\right) - \frac{\nu}{E}\right)\sigma_{V}$

دو دسته درزه متقاطع

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

رابطه (۱) حاصل خواهند شد:

درزه متعامد است ($lpha=90^\circ$). 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.

(1)



[۴] (σ_v و $P_c = 0$ و P_c

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

مدولهای یانگ درزه (E_x و E_y ، E_x و مدولهای برشی درزه (G_{zx} و G_{yz} ، درزه (G_{zx} و G_{yz} ، درزه (G_{zx}) درزه (G_{zx} خصوصیات سنگ بکر در ماتریس نرمی رابطه (۲) با استفاده از مدول یانگ (E_{\circ})، مدول برشی (G_{\circ}) و نسبت یواسون (v_{\circ}) نشان داده شده است. خصوصیات درزهها با

$$\gamma_{xz} = \left(\sin 2\theta \left(\frac{\cos^2 \theta}{k_{n1}S_1} + \frac{\sin^2 \theta}{k_{n2}S_2} \right) - \frac{\sin 4\theta}{4} \left(\frac{1}{k_{s1}S_1} + \frac{1}{k_{s2}S_2} \right) \right) \sigma_V$$
and the second sec

رابطههای حل دقیق مدولها با صرف نظر از تاثیر اتساع درزه به صورت رابطه (۲) تعریف می شوند:

 $\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_x} - \frac{v_0}{E_0} - \frac{v_{yx}}{E_y} - \frac{v_0}{E_0} - \frac{v_{zx}}{E_z}$

 $-\frac{v_0}{E_0} - \frac{v_{xy}}{E_x} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_y} = -\frac{v_0}{E_0} - \frac{v_{yz}}{E_z}$

 $\begin{vmatrix} -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_0}{E_0} - \frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_z} \end{vmatrix}$

0 0 0

0

0

0

0 0 0

 $\left[\Delta \varepsilon_{xx}\right]$ $\Delta \varepsilon_{yy}$

 $\Delta \varepsilon_{zz} \Big|_{=}$ $\Delta \gamma_{xy}$

 $\Delta \gamma_{yz}$ $[\Delta \gamma_{zx}]$

متفاوت است، یکسان فرض می شود. فاصله داری دو دسته درزه ابتدایی یکسان و برابر با S فرض شده است؛ فاصلهداری

دسته درزه سوم برابر با S_3 در نظر گرفته می شود.

هوانگ و همکاران ثابتهای ساختاری را برای تودهسنگی

 $\frac{1}{G_0}$

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_x} &= 2\sin^2(\alpha/2) \left(\frac{\cos^2(\alpha/2)K_n + \sin^2(\alpha/2)K_s}{K_n K_s S} \right) \\ \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{K_{n3}S_3} \\ \frac{1}{E_z} &= 2\cos^2(\alpha/2) \left(\frac{\sin^2(\alpha/2)K_n + \cos^2(\alpha/2)K_s}{K_n K_s S} \right) \\ \frac{1}{G_{xy}} &= \frac{1}{K_{s3}S_3} + \frac{2\sin\alpha\cos^2(\alpha/2)}{K_s S} \\ \frac{1}{G_{yz}} &= \frac{2\sin\alpha\cos^2(\alpha/2)}{K_n K_s S} \end{aligned}$$
(7)
$$\begin{aligned} \frac{1}{G_{zx}} &= \frac{1}{K_{s3}S} + \frac{2\sin\alpha\sin^2(\alpha/2)}{K_s S} \\ \frac{\gamma_{xz}}{E_z} &= \frac{v_{zx}}{E_y} = \frac{K_n - K_s}{2K_n K_s S} \sin^2 \alpha \\ \frac{v_{xy}}{E_z} &= \frac{v_{yz}}{E_y} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{yz}}{E_x} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{yz}}{E_x} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{zx}}{E_x} = 1 \\ \frac{v_{zy}}{E_x} &= \frac{v_{zx}}{E_x} = 1 \\ \frac{v_{zy}}{E_x} &= \frac{v_{zx}}{E_y} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{zz}}{E_x} = 0 \\ \frac{v_{zy}}{E_z} &= \frac{v_{zz}}{E_x} = 1 \\ \frac{v_{zy}}{E_x} &= 1 \\ \frac{v$$

۳- مدلسازی به روش المان مجزا

همان طور که گفته شد روابط ساختاری آمادیی 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 I e g e g 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 آمادیی 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

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

جدول ۱: خصوصیات سنگ بکر

مقدار	خصوصيات
77	چگالی (<i>Kg/m</i> ³)
۳۵	مدول يانگ (GPa)
۰/۲۵	نسبت پواسون
۲۳/۳۳	مدول بالک (GPa)
14	مدول برشی (GPa)

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی و هندسی درزههای مدل اولیه

مقدار	خصوصيات مكانيكي
11.	سختی نرمال (GPa/m)
١.	سختی برشی (GPa/m)
•/۵۵	چسبندگی (MPa)
٣٣	زاویه اصطکاک داخلی (°)
٢	فاصلەدارى (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 تکیه گاه 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 مرود بررسی در تمام صفحات عمود بر جهت تنش اعمالی و

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 هریک 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



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.





۴- برآورد ابعاد حجم معرف

در صورتی که تعداد دسته درزه ها 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 بیان کننده رفتار ترکیبی سنگ و دسته درزه ها است، محیط درزه دار را به صورت یک ماده پیوسته معادل ایده آلسازی نمود. خصوصیت پیکره سنگ فراتر از یک حجم حداقل معین نسبت به تاثیر شکستگی ها فراتر از یک حجم حداقل معین نسبت به تاثیر شکستگی ها است به عنوان اندازه المان جهت نمایش رفتار معادل حجمی از توده سنگ که از دید آماری همگن بوده و شامل تعداد قابل توجهی شکستگی است، به کار رود. این حجم به عنوان حجم معرف اولیه نامگذاری می شود. به منظور به دست آوردن

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 می کند. این نمودار نشان میدهد که میانگین نسبت پواسون در ابعاد بلوک ۵ تا ۳۰ متر متغیر بوده و پس از آن ثابت باقی می ماند. از این رو بلوکی با طول ضلع ۳۰ متر را می توان 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.



شکل ۳: خطوط هم تراز 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 45heta= heta



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



شکل ۶: مقایسه مقادیر تغییرشکل 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



شکل ۷: مقایسه مقادیر تغییرشکل 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 $\theta = 45$ 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 x_3 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 ۲ (الف) سه مقدار متفاوت برای θ در نظر گرفته شده و مقادیر z_3 برای آنها در برابر زوایای تقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این شکل بیان گر تأثیر قابل توجه θ در تغییرشکل تودهسنگهای حاوی درزههای متقاطع است. بیشترین

نیز مشهود است. این شکل مبین ضعف رابطه پیشنهادی J_1



۵–۲– بررسی آماری دادهها

تشکیلدهنده زمین ضروری است. خواص تودهسنگ مدلسازی شدہ با توجه به خطاهای اندازہ گیری می تواند متغیر باشد. هدف از این بخش بررسی نحوه توزیع دادههای به دست آمده است. به کمک تعیین انحراف معیار می توان بازه تغییرات دادهها را به دست آورد. شکل ۸ توابع چگالی

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

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 برازششده مقایسه می گردد. آماره مربوط به این آزمون از رابطه (۴) محاسبه می شود: $\chi^2 = \sum (O_i - e_i)^2 / e_i$ (۴)

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 برازششده است. همچنین، درجه آزادی دادهها^۳ (df) معادل تعداد دستهها منهای یک تعریف می شود. بر این اساس، یک آزمون فرض برای عدم پیروی دادهها از توابع توزیع برازششده 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 توزيع برازششده) رد خواهد شد [۱۹]. لازم به ذکر است که

برابر با ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درجه است. نمودار تغییر شکل محوری مدل های 45 A10 و A15 در بازه تغییرات زاویه

شیب دسته درزه J_1 (heta) از صفر تا ۹۰ درجه در کنار مقادیر

تحلیلی به دست آمده از روش پیشنهادی آمادیی 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 پیشفرض روش تحلیلی با خطوط منقطع و نتایج A10 A5 و A15 با استفاده از نقاط نشان داده شده

اند. همان گونه که اشاره شد، مشاهده می گردد که نتایج مدل

عددی پیشفرض تطابق خوبی با رابطه تحلیلی دارد. این

شكلها نشان دهنده تاثير انحراف زاويه تقاطع دسته درزههاي

عنوان شده از حالت تعامد بر تغییر شکل محوری توده سنگ هستند. شکل ۹ (د) درصد اختلاف کرنش های محوری

عددی از مقادیر متناظر تحلیلی به دست آمده در حالت

متعامد را برای مدلهای مذکور با هم مقایسه میکند.

وابستگی مقدار \mathcal{E}_{Z} به جهتیابی درزهها در این شکل به

خوبی نمایان است. از آنجایی که فاکتورهای هندسی و

ژئومكانيكى متفاوتى بر رفتار تغييرشكل تودەسنگ

تاثیر گذارند، مقادیر به دست آمده برای درصد اختلاف را

نمى توان به عنوان شرايط كلى پذيرفت اما الكوى انحراف

کرنش در مدلهای گوناگون قابل بررسی است.

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

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 می کنند. 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 می شود که همین امر سبب عدم تطابق آن با تابع توزیع برازش شده گردیده است.

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

مدل سازی عددی در شرایط مختلف قرارگیری دسته درزهها مطابق با جدول f و با در نظر گرفتن خواص ژئومکانیکی عنوان شده در جدولهای I و T به منظور برآورد میزان خطای روابط حل دقیق انجام گرفته است. توجه شود که زاویه α به عنوان زاویه تقاطع I_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

	γ	xz			i	ε _y				ε_x				ε _z	
χ_i^2	ei	0i	بازه	χ_i^2	ei	<i>O</i> _{<i>i</i>}	بازه	χ_i^2	e_i	0i	بازه	χ_i^2	e_i	0i	بازه
•	۵	۵	١	٠/۵	۰/۵	١	١	۳٠/٨	۱۳	٣٣	١	۰/۵	۰/۵	١	١
٣	11	۱۸	٢	٠/۵	۰/۵	•	٢	٩/۴	۱۸	۵	٢	۱۷	۱۵	۳١	٢
۳/۵	۱۳	14	٣	٣	٣	•	٣	۲/۷	۱۸	11	٣	٠/٢	۴۳	49	٣
٠/٢	۲۷	۲۵	۴	۵	۴۵	۶.	۴	۶/۷	۱۵	۵	۴	•/ A	۲۰	18	۴
۲/۲	77	۲۹	۵	٠/٣	۳۲	۳۵	۵	۲/۳	11	18	۵	۲/۲	۴	١	۵
١	٩	۶	۶	٠/٣	٣	۴	۶	۲۰/۶	٧	۱۹	۶	۰/٣	•/۶	١	۶
۱/٨	۳/۵	١	٧	٢	٢	·	٧	۱/۸	۵	٨	۷	۴/۵	٠/۵	٢	۷
٢	٢	•	٨	١	١	•	٨	٢	٢	•	٨				
•/۵	۰/۵	•	٩	۰/۵	۰/۵	•	٩	١	١	•	٩				
14/2	1.4	٩٨	مجموع	۱۳/۱	۸۷/۵	۱۰۰	مجموع	۷۷/۲	٩٠	٩٧	مجموع	۲۵/۶	۸۳	٩٨	مجموع
	۱۶/۹		CHIINV		۱ <i>۶</i> /۹		CHIINV		۱ <i>۶</i> /۹		CHIINV		14/1		CHIINV

جدول ۳: نتایج آزمون نکویی برازش کای دو

جدول ۴: تعریف مدلهای مختلف بلوک درزهدار

انحراف <i>α</i> از حالت اوليه					
۱۵ درجه افزایش	۱۰ درجه افزایش	۵ درجه افزایش			
A15	A10	A5			



شکل ۹: نمودار تغییرات کرنش محوری تحلیلی و مدل عددی (الف) A5 (ب) A10 (ج) A15 و (د) درصد تغییرات $arepsilon_z$ عددی نسبت به $\boldsymbol{\theta}$ تحليلي در برابر

نمودار تغییرشکل جانبی مدلهای عددی A15 در جهت نیز به ازای تغییرات زاویه شیب J_1 در فشار 4 MPa در xکنار مقادیر تحلیلی در شکل ۱۰ (الف) ارایه شده است. شکل (ب) میزان انحراف از نتایج تحلیلی \mathcal{E}_{x} را برای مدل های \mathcal{E}_{x} A10 ،45 و A15 با يكديگر مقايسه مي كند. اين نمودار نشان

1.4 A15 X 0.0001 ex-analytical 1.2 ex-numerical ĩ 0.8 ex 0.6 0.4 0.2 0 0 20 40 60 80 Theta (degree) (الف)

(ب)

Theta (degree)

■A5 ■A10 □A15

میدهد که هرچه انحراف از ۹۰ درجه بیشتر می شود، از

اعتبار رابطه ریاضی در تخمین \mathcal{E}_{x} در این حالت کم می شود.

درصد اختلاف در بازههای ابتدا و انتهای heta مثبت و در

50

40

30

10

0

-10

-20 -30

ex difference (%) 20 محدوده میانی آن منفی است.

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

نمودار قطبی شکل ۱۱ نتایج تغییرشکل در راستای Y را برای هر سه مدل A15 و A15 و A15 نشان می دهد. مقادیر v_y در A5، A10 و A15 پراکندگی محدودی در بازه تغییرات θ دارند. این شکل بیان گر تاثیر ناچیز انحراف زاویه تقاطع از $^{\circ}00 = \alpha$ بر روی تغییرشکل تودهسنگ در جهت موازی با امتداد است. از طرف دیگر نتایج سه مدل فوق بسیار نزدیک به کرنش به دست آمده از رابطه پیشنهادی آمادیی و گودمن بوده و این امر نشان از قابل قبول بودن دقت این رابطه در برآورد تغییر شکل جانبی v_3 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 A15 و A15 را در برابر تغییر زاویه θ در مختصات دکارتی نشان میدهد. نمودار درصد انحراف از نتایج تحلیلی دکارتی مدلهای A15 و A15 در شکل ۱۲ (د) قابل مشاهده است. با توجه به این نمودار مشخص است که در









بازههای ابتدایی، میانی و انتهایی θ به دلیل مقادیر اندک تغییرشکل 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.









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

همان طور که پیش تر عنوان شد رفتار تغییر شکل مدل های درزهدار به شدت غیر خطی و وابسته به جهت یابی درزه است. به منظور بررسی میزان صحت کاربرد روابط حل دقیق برای تودهسنگ هایی با شرایط تعریف شده در جدول ۵، مدلسازی عددی با در نظر گرفتن خواص ژئومکانیکی عنوان شده در جدول های ۱ و ۲ انجام گرفت.

جدول ۵: تعریف مدلهای مختلف بلوک درزهدار

	نحراف $oldsymbol{eta}$ از حالت اوليه	1
۱۵ درجه افزایش	۱۰ درجه افزایش	۵ درجه افزایش
H15	H10	H5

 J_2 و J_1 متداد J_1 و J_1 توجه شود که زاویه β به عنوان زاویه بین امتداد J_1 و J_1 تعریف شده و در حالت پیش فرض مقدار آن برابر با صفر H5 است. بر این اساس، زاویه β به ترتیب در مدل های H5 است. بر این اساس، زاویه 10 به ترتیب در میاشد. نمودار H10 و H10



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

تغییرشکل محوری مدل های H10 ،H5 و H15 در بازه تغییرات زاویه تقاطع J_1 و J_2 (α) از \cdot تا ۹۰ درجه در کنار مقادیر تحلیلی به دست آمده از مدل پیشنهادی هوانگ و همکاران بهترتیب در شکل ۱۳ (الف)، (ب) و (ج) ارایه شده است. این اشکال نشان میدهند که انحراف زاویه امتداد از حالت اولیه تاثیر چندانی بر روی مقدار \mathcal{E}_{z} حاصل از روش عددی اجزای مجزا ندارد. با این وجود، اختلاف فاحشی میان مقادیر تغییرشکل محوری عددی و تحلیلی در نیمه پایانی بازه تغییرات α در شرایط مورد بررسی مشاهده می گردد. ۴۵ میزان این اختلاف در حالتی که زاویه شیب J_1 برابر با درجه منظور شده بود، کمترین مقدار را دارد. این امر آشکار می سازد که رابطه ریاضی برآورد تغییر شکل محوری هوانگ برای حالتی که $heta = 45^\circ$ باشد، بیشترین کارایی را دارد. شکل ۱۳ (د) میزان انحراف \mathcal{E}_{Z} عددی از تحلیلی را برای سه heta مدل فوقالذکر در بازه تغییرات lpha و در حالتی که °10بودہ است را نشان میدھد.



Alpha (degree)

(د)

■H5 ■H10 □H15

ଷ -30

-40

همانطور که در این شکل واضح است تفاوت مقادیر به دست آمده برای H15 و H16 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 $^{\circ}01 = \theta$ 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) ارایه 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.



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) ارایه شده است. شکل ۱۵ (ب) نیز درصد اختلاف این پارامتر را در مدل های مذکور از مقادیر تحلیلی آنها نمایش میدهد. مطابق با این شکل در شرایط مورد بررسی، تغییر زاویه امتداد دسته درزه J_2 تاثیر شرایط مورد بررسی، تغییر زاویه امتداد دسته درزه این بازارند. بنابراین با توجه به تطابق نتایج روش هوانگ و این مدل ها مدل های مدل ها این مدل ها از توتروپیک فاصله داشته باشند نیز این رابطه فارغ از نحوه امتداد در زهها تا ۱۵ درجه از حالت میتوان نتیجه گرفت در صورتی که در یک تودهسنگ، زاویه امتداد و یا زاویه شیب دسته درزهها تا ۱۵ درجه از حالت میتوان نتیجه گرفت در صورتی که در یک تودهسنگ، زاویه امتداد و یا زاویه شیب دسته درزهها تا ۱۵ درجه از حالت میتوان نتیجه گرفت در صورتی که در یک تودهسنگ، زاویه امتداد در بازی با توجه این مدل ها این رابطه فارغ از نحوه امتداد درزهها قابل کاربرد است. شرایط برای میزان انحراف امتداد درزهها قابل کاربرد است. شرایط برای میزان انحراف امتداد درزهها قابل کاربرد است. شرایط در راستای انحراف این β بایستی بر رسی شوند.







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

۶- مطالعه موردی

۳۱۵ پروژه سد بتنی و نیروگاه برق آبی بختیاری با ارتفاع ۳۱۵ متر و ساختار دو قوسی و نیروگاهی زیرزمینی با ظرفیت تولید یک هزار و پانصد مگاوات در رشته کوه زاگرس در جنوب غربی ایران واقع است. لایه های سنگ آهک سازند سَروَک در بر گیرنده رسوبات رودخانه ای کرتاسه میانی، توده سنگ ساختگاه سد و نیروگاه را تشکیل می دهند. در این بخش با هدف اعتبار سنجی و مقایسه، نتایج به دست آمده برای مدل های عددی توده سنگ ساختگاه سد بختیاری با نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه ای انجام شده در ساختگاه این سد مورد مقایسه قرار می گیرد. بلوک های توده سنگ در این سد مورد مطالعه از تقاطع یک دسته درزه (1) و صفحات لایه بندی به وجود آمده اند. خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه در جدول ۶ ارائه شده است.

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

مقدار	پارامتر
780.	چگالی (<i>Kg/m</i> ³)
۶۵	مدول یانگ سنگ بکر (GPa)
• / ٢	نسبت پواسون
۳۶/۱	مدول بالک (GPa)
۲۳/۲	مدول برشی (GPa)

طبق عملیات برداشت درزه انجام شده در گالریهای اکتشافی، بازشدگی لایهبندی و J_1 در بازه ۱/۱ 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 لايهبندي و J_1 ، سختي برشي آنها معادل ۷۵ درصد سختی نرمال هر دو در نظر گرفته شد. در نهایت، با توجه به محدودیت روابط پیشنهادی هوانگ و همکاران با میانگین گیری 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

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 می گردد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. جهت بارگذاری صفحهای گزینش شده به ترتیب با صفحات لایهبندی و دسته درزه J_1 زاویه θ و $\theta - 90$ تشکیل می دهد.

جدول ۲: خواص مکانیکی دسته درزه و لایهبندی

میانگین حسابی	مقدار عددي	پارامتر			
6 4	۳۷/۵	$(GPa/m) k_{nb}$			
11	48/9	$(GPa/m) k_{nj}$			
* \ / \	۲۸/۱	$(GPa/m) k_{sb}$			
1 1/ V	۳۵/۲	$(GPa/m) k_{sj}$			
	٠/۴	فاصلهداری دسته درزه (<i>m</i>)			
•// /	•/74	فاصلەدارى لايەبندى (m)			
٠/٣	چسبندگی (MPa)				
٣٣	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 بهره گیری از نرمافزار 3DEC شبیه سازی شد. شرایط مرزی مشابه مدل های عددی پیشین بر توده سنگ اعمال شد با این تفاوت که تحلیل تغییر شکل برای این مدل در تراز تنش ۱۴ مگاپا سکال انجام گرفت. این میزان از تنش با هدف مقایسه نتایج عددی و تحلیلی با نتایج آزمون های بارگذاری صفحه ای انجام شده در محدوده الاستیک توده سنگ انتخاب شده است.

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

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 دسته درزههای نامتعامد 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 تودهسنگ ساختگاه سد بختیاری

جدول ۸: تعریف مدل های مختلف دارای خواص تودهسنگ ساختگاه

ايا	رابطه مورد استفاده		
وليه			
۱۵ درجه	۱۰ درجه	۵ درجه	آمادیی و
افزايش	افزايش	افزايش	گودمن
AB15			
وليه			
۱۵ درجه	۱۰ درجه	۵ درجه	هوانگ و
افزايش	افزايش	افزايش	همكاران
HB15	HB10	HB5	

با توجه به این که دادههای بهدست آمده از آزمونهای برجا تنها دربرگیرنده مقادیر کرنشهای محوری تودهسنگ بودند، تنها بررسی نتایج حاصل از روشهای عددی و تحلیلی در راستای محور بارگذاری امکان پذیر 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 آمادیی و گودمن و اندازه گیریهای برجا در شکل ۱۸ (الف) ارائه شده اند. مقایسه نتایج تحلیلی با اندازه گیریهای برجا و همچنین

نتایج مدل های عددی نشان از دقت قابل قبول این روش در تخمین کرنش محوری در شرایط مورد بررسی دارد. نمودار درصد انحراف نتایج ϵ_z برای مدل های AB5 ، AB5 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 تغییرشکل محوری مدلهای HB5، HB10 و HB15 را در کنار مقادیر کرنش محوری هوانگ و همکاران نشان میدهد ($(15^\circ) = \theta$). نتایج آزمایشهای برجای بارگذاری صفحهای در این شکل تنها برای حالت در دسترس بوده است. نکته جالب توجه تغییر $lpha=90^\circ$ روند ε_z در زوایای پایین heta است. لازم به ذکر است که تأثیر تغییر پارامترهای مکانیکی درزهها با مقایسه شکلهای ۱۶ و ۱۷ مشهود می گردد. به طور خاص می توان عنوان کرد که در سختیهای برشی کم، نقش زاویه شیب دسته درزه اول تعیین کننده است.

۷- نتیجهگیری

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

محیط پیوسته معادل آمادیی و گودمن

- ✓ اختلاف تغییرشکل محوری تحلیلی و عددی نسبت به تغییر زاویه تقاطع حساسیت بالایی دارد اما روند مشخصی در نحوه تغییرات آن دیده نمی شود.
- ✓ 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 بیان گر 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 تغییرشکل در این جهت با دقت خوبی همراه خواهند بود.

تغییرشکل مدلهای عددی ندارد اما کاربرد روابط

مذکور در برخی از موارد نیازمند بررسی بیشتری است.

تغییر زاویه دسته درزه اول نقش کنترل کنندهای

جهت عمود بر امتداد درزههای اول و دوم نیز در شرایط

شرايطي مشابه مدل محيط پيوسته معادل آماديي و

✓ استفاده از رابطه تخمین کرنش محوری در مواقعی که

✓ رابطه تحلیلی پیشنهادی برای برآورد تغییرشکل در

مورد مطالعه از دقت كافي برخوردار نبوده است.

✓ رابطه تخمین کرنش جانبی موازی امتداد درزهها از

گودمن پیروی کرده و دقت قابل قبولی دارد.

داشته باشد، توصيه نمى شود.

۲. محیط پیوسته معادل هوانگ و همکاران

- روابط ارایه شده توسط هوانگ و همکاران برخلاف مدل محیط پیوسته معادل آمادیی و گودمن تاثیر تغییر زاویه شیب دسته درزه اول را در رفتار تغییرشکل در نظر نمی گیرند. به طور کلی، نتایج حاصل بیانگر تاثیر قابل توجه تغییر این زاویه بر اختلاف مقادیر تحلیلی و عددی است.
- ✓ اختلاف نتایج تغییر شکل های تحلیلی و عددی نشان
 میدهد که تغییر زاویه امتداد تاثیر چندانی بر



شکل ۱۸: نمودار تغییرات کرنش محوری تحلیلی، برجا و عددی برای (الف) *AB1 مB15 و AB15 و (ج) HB10 او HB1* و HB1*4 درصد* تغییرات کرنش محوری عددی نسبت به تحلیلی در برابر α برای (ب) AB1 م*B10 مB15 و AB15 و (د) HB1 HB1 و HB1*

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. مراجع

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

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 masse. 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 onterlocked 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