Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant 7th Year / No. 24 / June 2020

تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ آهک سازند دالان به روش عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشهای برجا (مطالعه موردی: نیروگاه تلمبه ذخیرهای رودبار لرستان)

مجتبی مصفّا^۱ علی عالیانوری*^۲

عباس کمالی بندپی^۳

چکیدہ

یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در طراحی سازههای مهندسی، قابلیت تغییر شکل تودهسنگ است. از آنجا که تعیین این مدول به روش مستقیم توسط آزمایشهای برجا زمانبر، پرهزینه و به لحاظ عملیات اجرایی مشکل است؛ لذا تخمین صحیح آن بهطور غیرمستقیم حائز اهمیت است. در این مطالعه بهمنظور تعیین غیرمستقیم مدول تغییر شکل تودهسنگ، نتایج حاصل از آزمایشهای دیلاتومتری در گالری اکتشافی پیرامون مغار نیروگاه تلمبه ذخیرهای رودبار لرستان با روش عددی شبیهسازی شده است. مغار نیروگاه در تودهسنگهای آهکی سازند دالان قرار گرفته است. در این محدوده، علاوه بر لایهبندی و سه دستهدرزه اصلی، مناطق خردشده ناشی از عملکرد گسلها نیز دیده میشود. ازاینرو با فرض برقراری محیط پیوستهی معادل در تودهسنگ مغار از روش تفاضل محدود برای مدلسازی عددی آزمایش دیلاتومتری استفاده شده است. بر این اساس، بررسی مقادیر جابجایی بهدستآمده از مدلسازی، مؤید این نکته است که با افزایش عمق، مدول تغییر شکل توده سنگ نیز افزایش مییابد. همچنین مقایسهی مدول تغییر شکل کلی بهدستآمده از شبیهسازیهای عددی در گمانههای 1-D و 2-D در محدوده مغار نیروگاه با مدول تغییر شکل کل میانگین حاصل از مجموع ۱۵ آزمایش دیلاتومتری در اطراف مغار نیروگاه نشاندهندهی ۲۶ درصد خطا است که این اختلاف میتواند ناشی از شرایش ریشاسی در اطراف مغار نیروگاه نشاندهنده میتری در اطراف مناری و تخلاف میتواند ناشی از شرایط زمینشناسی و تکتونیکی نشاندهنده میتره بر

واژەھاي كليدى:

مغار نیروگاه تلمبه ذخیرهای، مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ، آزمایش دیلاتومتری، مدلسازی عددی.

۳. دکتری مهندسی معدن، دانشگاه کبک، کانادا

علمى-پژوهشي

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/ ۱۳۹۸

^{ٔ.} کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

ali_aalianvari@kashanu.ac.ir ،استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

مقدمه

انجمن بینالمللی مکانیک سنگ' مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ را نسبت مابین تنش اعمالی به مجموع كرنشهاى الاستيك و پلاستيك ناشي از آن تعریف میکند. مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ در شرایط برجا یک پارامتر محلی است؛ چراکه در اعماق، راستاها و مقیاسهای مختلف تغییر میکند. می توان مطرح كرد كه تأثير اين عوامل بهترتيب به وضعيت تنشهای برجا، ناپیوستگیهای موجود در تودهسنگ و حجم نمونهی معرف برمی گردد. برآورد مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ بهصورت مستقیم با استفاده از آزمایشهای برجا علاوه بر زمانبر و پرهزینه بودن، به لحاظ عمليات اجرايي نيز مشكل است؛ ازاينرو تعيين اين پارامتر بهطور غیرمستقیم در طراحی سازههای درگیر با تودهسنگ ضروری به نظر می رسد (انجمن بین المللی مکانیک سنگ-ISRM).

در سالهای اخیر، مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ بهطور مستقیم توسط آزمایش های برجا و غیرمستقیم توسط روش های آماری، محاسبات نرم، عددی و تحلیلی تعيين شده است. نتايج بهدستآمده از اين روشها اعتبار یکسانی ندارد. معمولاً روشهای اندازهگیری مستقیم بهعنوان معتبرترین روش شناخته میشوند و سایر روشها را با نتایج بهدستآمده از اندازه گیریهای برجا مقایسه میکنند. محققان زیادی در خصوص برآورد غيرمستقيم مدول تغيير شكل پذيرى تودهسنگ فعاليت کردهاند که در جدول (۱) به برخی از این روشها اشاره شده است؛ که در این روابط، RQD شاخص کیفیت سنگ، RMR امتیاز تودهسنگ، Q شاخص کیفیت توده سنگ، GSI شاخص مقاومت زمین شناسی، RMi شاخص تودهسنگ، JH سیستم طبقهبندی بزرگراه ژاپن، UCS مقاومت فشاری تکمحوری سنگ بکر برحسب مگایاسکال، Is50 شاخص بارگذاری نقطهای در قطر ۵۰ میلیمتر، Ei مدول تغییر شکل پذیری سنگ بکر برحسب گیگایاسکال، EM مدول تغییر شکلیذیری تودهسنگ برحسب گیگاپاسکال، H عمق بر حسب متر، α ضریبی

¹. International Society for Rock Mechanics

برابر با ۰/۱۶ تا ۰/۳ (مقدار بیشتر برای سنگهای ضعیف)،WD درجهی هوازدگی بر حسب درصد و D فاكتور تخريب مىباشند.

جدول(۱): برخی از روشهای تخمین غیرمستقیم مدول تغییر

پدىرى ئودە سىك	سكل	
معادله	روش	محققان
$E_M = 2RMR - 100, RMR > 50$	ر گرسیون خطی	بينياويسكي ^٢
$E_M = 10Q_c^{\frac{1}{3}}, \qquad Q_c = \frac{Q.UCS}{100}$	رگرسيون	بارتن
	محاسبات برگشتی	هوک و همکاران
$E_M = 1.14 E_i e^{-\left(\frac{RMR-116}{41}\right)^2}$	ر گرسیون گوسی	شن ^۳ و همکاران
$E_M = E_i(0.000002e^{0.1392JH})$	ر گرسیون نمایی	صانعی و فرامرزی ^۴
$E_M = 0.058e^{0.0785RMR}$	ر گرسیون نمایی	المداگ ⁶ و همکاران
$E_M = Is_{50} \times 10^{0.01 RQD - 0.25}$	تحلیل آماری مقایسهی چندگانه	کارامان ² و همکاران

در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشهای برجا و روشهای عددی برای تعیین غیرمستقیم مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ در محدودهی مغار نیروگاه تلمبه ذخیرهای رودبار لرستان استفاده شده است.

اگرچه روشهای عددی در مسائل مختلف نسبتاً پیچیده هستند، اما با استفاده از آنها میتوان نقش عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ همچون تنشهای جانبی، ناهمسانگردی و مقیاس را در نظر گرفت. یکی از مهم ترین اطلاعات موردنیاز در مدسازی های عددی، دادههای آزمایشبرجا یا دادههای پایش^۷ منطقهی

- ².Karaman
- ^v.Monitoring

^r.Bieniawski

[&]quot;.Shen

^{*.}Sanei and Faramarzi

^a.Alemdag

موردمطالعه است. این تحقیق مبتنی بر آزمایشهای برجای تعیین مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ است. برای نخستین بار هیوز^۱ و همکاران در سال ۱۹۷۱ تحلیلهای عددی اجزای محدود را برای آزمایش قابلیت تغییر شکلپذیری جک گمانهای در سنگهای درزهدار به کار گرفتند. نتایج نشان داد که در تودهسنگ بدون درزه یا با درزهداری متوسط که ترکهای کششی بهمحض اعمال بارهای زیاد برای توسعه محتمل هستند، باید نتايج راهحلهاى الاستيك بهطور جديتجديدنظر شوند. همچنین در شرایط آزمایش جک گمانهای، بایستی مدول تغییر شکلپذیری واقعی سنگ ۲۹-۳۰ درصد بیشتر از مقدار راهحل الاستیک در نظر گرفته شود. هیوز (۱۹۷۱)، ایتو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش جدیدی را برای تعیین تنشهای برجا با استفاده از ابزار دیلاتومتر براساس سنجش رفتار ناپیوستگیها در طول مدت فشار گمانه پیشنهاد دادند. ایتو (۲۰۰۱) با استفاده از تحلیلهای روش اجزای محدود دوبعدی نشان داد که بازشدگی ناپیوستگیها، اثر نسبتاً ضعیفی بر تغییر شکل شعاعی دارد که این اثر، آشکارا بر تغییر شکل جانبی پدیدار می گردد. در این مطالعه، پیشبینی تحلیلها به کمک آزمونهای آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. بالاکوسکی^۳ در سال ۲۰۰۶ آزمایش دیلاتومتر تخت[†] را در خاک ماسهای با روش اجزای محدود شبیهسازی کرد. او تحلیلهای دوبعدی ساده شده را در حالت کرنش صفحهای برای تعبیهی تیغه و تورم غشای دیلاتومتر به کار گرفت. بالاچوسکی (۲۰۰۴) و آقاراضی^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۸ هندسهی حفاری را با ترکیب مدلهای عددی اجزای محدود برای آزمایش بارگذاری صفحهای بهعنوان عاملی برای احتساب تأثیرات هندسی بر جابجایی ها توصیه کردند. آقارضی (۲۰۰۸)، ایزیک⁸ و همکاران در سال ۲۰۰۸ آزمایش برجا را بهمنظور تعیین

- ^{*}.Flatdilatometer
- ^a.Agharazi
- ².Isik

اثرات هندسه، عمق آزمایش و ناحیهی اختلال بر مقادیر مدول تغییر شکلپذیری با روش تفاضل محدود شبیهسازی کردند. ایسیک (۲۰۰۸) با استفاده از مدلسازیهای دوبعدی نشان داد که نسبت طول به قطر پکر و عمق آزمایش بر مدول برشی محاسبه شده اثری ندارند. همچنین آنها با تغییر ضخامت ناحیهی اختلال در شبیهسازیها پی بردند که این ضخامت اثر ناچیزی بر مدول اندازه گیری شده دارد.

همان گونه که از جدول ۲) مشاهده می شود، برخی از محققین در کنار مدلسازی عددی، روش دیگری را به کار گرفتهاند تا رابطهای تجربی برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ ارائه کنند.

جدول (۲): روابط تجربی تخمین مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ بر اساس روشهای ترکیبی (قطبی راوندی، ۲۰۰۳)

رابطه	محققان
$E_M = 0.5E_i \left(1 - \cos\left(\pi \cdot \frac{RMR}{100}\right) \right)$	میتری ^۷
$\frac{E_M}{=}\frac{0.2\sigma_z(10.599k+9.355\nu-4.299k\nu-5.565)}{r.d}$	قطبی راوندی^

که در این روابط Ei مدول الاستیک مادهسنگ، RMR امتياز تودهسنگ، σz تنش قائم، k نسبت تنش افقی به قائم، v نسبت پواسون، r شعاع تونل و d جابجاییهای ديوارهي تونل مي باشد (ميتري ۱۹۹۴).

بەطور طبيعى سنگ مادەاى ناپيوستە، ناھمگن، ناهمسانگرد و غیر الاستیک^۹ (DIANE) است. در این پژوهش با استفاده از معیار شکست موهر- کلمب به همراه شبکهی ناپیوستگیهای مجزا^{۱۰} (DFN) و توزیع آماری خواص ژئومکانیکی تودهسنگ مدلسازی به ترتیب براساس غیر الاستیک بودن، ناهمسانگردی و ناهمگنی سنگ صورت گرفته است. همچنین به دلیل وجود چندین نوع ناپیوستگی در منطقهی موردمطالعه، تودهسنگ به عنوان محیطی شبه پیوسته در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود سازههای زیرزمینی

^v.Mitri

Elastic

¹.Discrete Fracture Network

[\].Heuze

[&]quot;.Ito

[&]quot; .Bałachowski

[^].GhotbiRavandi

⁹.Discontinuos, Inhomogeneous, Anisotropic, Non

بزرگمقیاس در آهکهای سازند دالان، در این مقاله به بررسی تعیین مدول تغییر شکلپذیری این سازند با استفاده از مدلهای عددی و تجربی پرداخته شده است.

معرفي مطالعه موردي و زمين شناسي منطقه

نيروگاه تلمبه ذخيرهاى رودبار لرستان، باهدف بهرهگیری از پتانسیل انرژی برقآبی بین مخزن سد رودبار لرستان در تراز پایین و یک مخزن مصنوعی در تراز بالا (چالحاتم) در حال احداث است. این طرح با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات در فاصلهی حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع شده است.

گسترهی موردبررسی در پهنهی زاگرس شمالی یا زاگرس بلند واقع شده که این زون درواقع یک نوار بهشدت خردشده به پهنای بین ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر است که از جنوب باختری به نوار چینخوردهی زاگرس و از شمال خاوری به گسلهی اصلی واژگون زاگرس۱ و پهنهی سنندج- سیرجان محدود شده است. این پهنه دارای روند شمال باختری جنوب خاوری N130° بوده و تحت تأثير حركات كرتاسه پسين و پليوسن قرار گرفته است. در کمربند تراستی زاگرس مرتفع گسلهای امتدادلغز و تراستی فراوانی به چشم میخورد. این ناحیه دارای برخاستگی است و بسیاری از گسلها بهعنوان گسل فعال یا واجد پتانسیل فعالیت در نظر گرفته می شوند. محل قرارگیری مغار نیروگاه را سنگهای آهکی- دولومیتی متعلق به سازند دالان به سن پرمین تشکیل داده است. این سازند از آهکهای بیومیکرایتی، آهکهای دولومیتی و دولومیت تشکیل شده است که دارای لایهبندی منظم ضخیم لایه تا متوسط لایه می باشند. شیب لایه بندی در این سازند عمدتاً نزدیک به قائم و در حدود ۶۵-۸۰ درجه به سوی شمال خاور است که در برخی قسمتها به سبب عملکرد گسلها و یا چرخش لایهها، شیب لايەبندى تغيير مىكند. در شكل(۱): مقطع زمينشناسى تهیهشده در گسترهی طرح و موقعیت مغار نیروگاه

نمایش داده شده است. با حفر گالری اکتشافی به عرض ۶ متر و طول ۱۲۰ متر در امتداد سقف مغار نیروگاه فرصت بسیار مناسبی برای برداشت زمینشناسی ناپيوستگيها و ساير مطالعات اكتشافي ژئوتكنيكي و مکانیک سنگ فراهمشده است. براساس ۳۲۰ ناپیوستگی برداشتشده در گالری اکتشافی به همراه درزهنگاری تونلها و گالریهای مجاور مغار نیروگاه مانند تونل دسترسی به زیر شفتهای آببر، تونل دسترسی به سقف مغار نیروگاه و تونل دسترسی به گالری تزریق چهار سیستم ناپیوستگی در محدودهی مغار نیروگاه شناسایی شده که مشخصات آنها در جدول(۳) آمده است(پویری ۲۰۱۴)راستای ناپیوستگیها به صورت شماتیک با رعایت متوسط فاصلهداری در شکل (۱(۲) ترسیم شده است.

مطالعات آزمایشگاهی و برجا

برای اندازه گیری خواص ژئومکانیکی سنگ بکر و تودهسنگ محدودهی مغار نیروگاه، برنامه مطالعاتی گستردهای شامل نمونه گیری از گمانه های اکتشافی برای انجام آزمونهای آزمایشگاهی و همچنین انجام آزمایشهای برجای دیلاتومتری و شکست هیدرولیکی به اجرا در آمده است.

موقعیت گمانههای D-1 و D-2 محل انجام آزمایش ديلاتومتري و گمانههاي HF-1 و BH-235 محل انجام آزمایش شکست هیدرولیکیدر داخل گالری اکتشافی در شکل (۳) مشخص شدهاند.

آزمونهای آزمایشگاهی

طی آزمایشهای فیزیکی، چگالی بر روی نمونههای سنگی اخذشده از گمانههای اکتشافی اندازهگیری و در أزمايش مقاومت فشارى نامحصور، مقاومت فشارى، مدول الاستيسيته و نسبت پواسون سنگها تعيين شده است. همچنین برای محاسبهی پارامترهای چسبندگی و زاویهی اصطکاک داخلی از نرمافزار Roclab کمک گرفته شده است. در این نرمافزار متناسب با بازهی تنش محتمل پيرامون مغار نيروگاه، معيار خطى موهر - كلمب

^{1.}Main Zagros Reverse Fault

بر منحنی غیرخطی هوک- براون برازش دادهشده و پارامترهای چسبندگی و زاویهی اصطکاک معادل برآورد شده است. در Unknown switch (۴)argument. پارامترهای حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی آمده است.



جدول(۳):مشخصات سیستم ناپیوستگیهای برداشتشده در گالری اکتشافی مغار نیروگاه (پویری ۲۰۱۴)

	-				
بازشدگی (<i>mm</i>)	پایایی (m)	فاصلەدارى (m)	جهت شيب (Deg)	شيب (Deg)	نوع ناپيوستگي
- ۲/۵	× F .	с с.	۳۹ -	$- \lambda \cdot$	
۰/۲۵	>1.	7 -7 •	٠٢٩	۶۵	لا يەبىدى
- ۲/۵	<u> </u>	۲. 6.	- ४११	- 47	دستەدرزە
۰/۲۵	< ٢	1 • -7 •	۲۷۳	۳۰	J1
- Υ/Δ	~ *	T. S.	- 174	- × ١	دستەدرزە
۰/۲۵	~ 1	1 • -7 •	178	۶۷	J2
- ۲/۵	~ *	Y. 9.	- ·λ·	$- \nu \Delta$	دستەدرزە
۰/۲۵		1 • -/ •	۰۶۵	۶.	J3



شکل (۱): طرح شماتیک راستای سیستم ناپیوستگیها آزمایش شکست هیدرولیکی

با ترکیب نتایج دو آزمایش شکست هیدرولیکی^۱(HF) و آزمایش هیدرولیکی در شکستگیهای از پیش موجود^۲(HTPF) در دو گمانه نسبتهای تنش افقی حداقل و حداکثر در محدودهی تراز مغار نیروگاه به شرح Error! Reference source not .*found*مىباشد

جدول(۴): پارامترهای ژئومکانیکی مادهسنگ(پویری، ۲۰۱۴)

زاویه اصطکا ک داخلی (Deg)	چسبندگی (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (gr/cm3)	کمیت آماری
40	۲/۳	•/77	۲۹/۱	۲/۷	میانگی ن
١	• /۶	•/• 1	۵/۵	•/•۴	انحراف معيار

جدول(۵): مقادیر و راستای تنشهای اصلی در تراز مغار

نیروگاه-8(پویری، ۲۰۱۴)

راستای تنش افقی حداکثر	نسبت تنش افقی حداکثر به قائم (kH)	نسبت تنش افقی حداقل به قائم (kh)	کمیت آماری
N 180-100°	•/۵ -•/۹	•/1۵ -•/۴	محدودەى تغييرات
N 140°	• /Y	۰/۲۷۵	میانگین

جدول(۶): نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری درمجموع دو

(Poyry, 2014) گمانه

(GPa				
کل دادەھا	حسگر ۳	حسگر ۲	حسگر ۱	تمیت اماری

'.Hydraulic fracture

^Y.Hydraulic Test on Pre-existing Fractures

۱٠/٣ 1.19 ۶/۴ ۱۱/۴ میانگین مقاومت برشي سطوح ناپيوستگيها برای تعیین مقاومت برشی سطح ناپیوستگیها در جدول از نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی (برش ارهبُر) و برداشتهای انجامشده در گالری اکتشافی استفاده شده است.

جدول (۲): پارامترهای مقاومت برشی سطوحناپیوستگیها-8

(Poyry, 2014)

زاویهی اصطکاک داخلی (Deg)	چسبندگی(MPa)	نوع ناپيوستگى
٣٣	•/• ۵	لايەبندى
۳۵	•/• \	درزەھا

فرآيند مدلسازي

به دلیل حضور ناپیوستگیهایی شامل لایهبندی، دستهدرزهها و نواحی گسله در منطقه ی گالری اکتشافی محل انجام آزمایش دیلاتومتری، مدلسازیها براساس فرض پیوستهی معادل^۱ صورت گرفته است که در فرض پیوستهی معادل تودهسنگ درزهدار بهصورت پیوسته و ناهمسانگرد تلقی میگردد. در محیطهای شبه پیوسته^۲ روابط غیرخطی در منطق کرنش بزرگ حاکم است. برای شبیهسازی آزمایش دیلاتومتر انعطاف پذیر در داخل گمانه، شبکهای با ۱۲۳۲۵ گره و ۱۱۰۰۸ مش که ابعاد آن در راستای محور X و محور V ۱۰ متر و در راستای محور Z (عمق) ۶۰ متر می باشد، ایجادشده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، به دلیل حساسیت پاسخ مدل در نزدیک به دیوارهی گمانهها و اعماق مورد آزمایش تراکم نقاط گرهی در این نواحی بیشتر از سایر سطوح شبکه است. برای مشبندی پیرامون دیوارهی گمانهها از شبکهی شعاعی قوسی در اطراف استوانه^۳ به ابعاد ۲m ×۶۰m و از آنجا به بعد از شبکهی مکعبی^۴ با ابعاد مش ۱ m در سه راستا

- .'.Equivalent Continuum
- .^vPseudo Continuum
- ".Radcylinder
- ^{*}.Brick





شکل(۳): موقعیت گمانههای اکتشافی و انجام آزمایشهای برجا در داخل گالری اکتشافی مغار نیروگاه

برای تأثیر ناهمسانگردی در خصوصیات مواد، شبکهی ناپیوستگیهای مجزا (DFN) تولیدشده است. همان گونه که در شکل ملاحظه می گردد، به دلیل استفاده از خصوصیات دستهدرزهی J1 در مدل رفتاری، تنها سه شبکهی ناپیوستگی ایجادشده که به لایهبندی، دستهدرزهی J2 و دستهدرزهی J3اختصاص دادهشده است. ویژگیهای ذکرشدهی ناییوستگیها در !Error Error! Unknown 9 Unknown switch argument. switch argument.نشان دادهشدهاند.



شکل (۴): نمای سهبعدی از هندسهی شبکه





برای تودهسنگ، مدل ناهمسانگرد درزه موجود در همهجا

منطبق بر معیار شکست موهر- کلمب در نظر گرفته شده که صفحات ضعیف را شامل میشود. شیب و جهت شیب در این مدل رفتاری براساس مشخصات دستهدرزهی غالب (J1) شناساییشده در محدودهی مغار نیروگاه انتخاب شده است. پارامترهای این مدل رفتاری

طبق جدول و(۸)جدول وارد که به علت تغییرات در ميزان آنها، پارامترهای ژئومکانيکی تودهسنگ و دستهدرزهی J1 با توزیع آماری نرمال به نرمافزار دادەشدەاند.

است. در رابطهی Error! Reference source not بهجای k متوسط نسبت تنش افقی حداکثر و found. حداقل به قائم در تراز مغار نیروگاه به کاررفته است تا نسبت پواسون به دست آيد.

$$K = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{1}$$

برای برآورد حداقل مقدار نسبت پواسون و مدول یانگ تودهسنگ در مقادیر فاصلهداریهای خیلی کم ناپیوستگیها از روابط (۲) و (۳)که در روش پیوستهی معادل برای تودهسنگ شامل ناپیوستگیهایی با جهتیابی تصادفی ارائهشده ، استفاده میشود.

$$E_M = \frac{2E_r(7 - 5\nu_r)}{3(1 - \nu_r)(9 + 5\nu_r)}$$
(r)

$$\nu_m = \left(\frac{1+5\nu_r}{9+5\nu_r}\right) \tag{(r)}$$

معرفی پارامترها بدین گونه با در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی بهصورت توزیع آماری نرمال و اعمال شبکه ناپیوستگیها در مدل رفتاری درزه موجود در همهجا بهترتيب مدلها بهصورت ناهمگن و ناهمسانگرد فرض شدهاند. توزیع آماری ویژگیهای ژئومکانیکی تودهسنگ در شکلهای (۶) و (۷) نمایش دادهشده است.

تودەسنگ	ژئومكانىكى	امترهای	(۸): بار	جدول
				· · ·

چگالی gr/cm3) (زاویه اصطکا ک داخلی (Deg)	چسبندگی (MPa)	نسبت پواسو ن	مدول یانگ (GPa) (کمیت آماری
۲/۷	۴۵	۲/۳	• /۲٧	۸/۷۳	میانگی ن
•/•۴	١	• /8	• / • ٣	۲/9۲	انحراف معيار

جدول (۹): پارامترهای صفحهی ضعیف

جهت شيب	شيب درزه	زاويهخانه	چسبندگی	كميت
درزه (Deg)	(Deg)	(Deg)	درزه (MPa)	آمارى
۳۲۶	88	۳۵	• / • A	ميانگين
14	c			انحراف
, ,		=	_	معيار

مدول یانگ و نسبت پواسون تودهسنگ درزهدار ناهمگن است و از فاصلهداری خیلی زیاد تا فاصلهداری خیلی کم ناپيوستگىھا كاھش مىيابد. براى توزيع ناھمگن مدول یانگ و نسبت پواسون در Error! Unknown از مقادیر حداکثر و حداقل switch argument. استفاده شده است. مقدار حداکثر مدول یانگ و نسبت پواسون تودهسنگ در فاصلهداری خیلی زیاد ناپیوستگیها معادل مدول الاستیک و نسبت پواسون مادهسنگ است درصورتی که تأثیر مقیاس در آن اعمال گردد. برای تخمین مقیاس معادل در مدول یانگ از متوسط محدودهی ۲۰-۶۰ درصدی که هیوز پیشنهاد داده و برای نسبت پواسون از رابطهی ترزاقی و ریچارت (رابطهی ترزاقی و ریچارت استفاده شده (Reference source not found.

راستای محور گالری(موازی محور X) به مرز بالایی شبکه واردشده است. محور گالری اکتشافی در راستای آزیموت ۲۶ درجه قرار دارد که کف گالری مطابق شکلهای سطح آزاد از تنشی به عرض ۶ متر در راستای محور آن به وجود آورده است. براساس طرح موقعیت گمانههای اکتشافی آزمایش دیلاتومتری، سطح آزاد طوری در نظر گرفته شده Error! است که در یکی از مدلها مشابه D-1 كمانهى Unknown switch argument. نزدیک به دیواره ی چپ گالری اکتشافی و در مدل دیگر مشابه شکل(۹) گمانهی D-2 نزدیک به دیوارهی راست گالری اکتشافی واقع شده باشد.





شکل (۹): محل حفر گمانهی D-2 در سمت راست گالری اکتشافی

پس از برقراری شرایط تعادل در مدلها، گمانههایی به قطر ۱۰۱ میلیمتر در مرکز مرز بالایی شبکه به طرف پائین حفاری می شوند. بعد از حفاری گمانه ها برای اینکه تنها تأثیر فشارهای وارده بر میزان جابجایی در دیوارهی گمانهها بررسی گردد، میزآن جابجاییها در نقاط گرهی واقع بر دیوارهی گمانه صفر میشود. سپس آزمایش دیلاتومتری در





شکل (۷): تغییرات مدول برشی نمایانگر ساختار ناهمگن تودەسنگ

شرایط اولیه که بیانگر تنشهای برجای طبیعی در منطقه هستند به صورت حاصل ضرب چگالی مواد در شتاب گرانش و ارتفاع در مدلها ایجادشده است. راستای تنش افقی حداکثر در محدودهی آزیموت ۱۴۰ درجه قرار دارد که امتداد تنش افقی حداقل در راستای محور X و امتداد تنش افقی حداکثر در راستای محور Y منظور شده است؛ بنابراین راستای شمال در شبکه با زاویهی ۴۰ درجه نسبت به جهت مثبت محور X، میان جهت مثبت محور X و محور Y قرار خواهد گرفت. با توجه به نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی در پیرامون مغار، نسبت تنش افقی حداکثر به تنش قائم برابر ۰/۷ و نسبت تنش افقی حداقل به تنش قائم برابر ۰/۲۷۵ استفاده شده است. همان طور که پیش از این مطرح شد، آزمایشهای دیلاتومتری درون گالری اکتشافی انجام میشوند؛ بنابراین روباره بهصورت تنش ثقلی ۲ به مرز بالایی شبکه اثر می گذارد. بیشینه و کمینه مقدار روباره در این محدوده برابر ۴۴۳ و ۴۲۷ متر می باشد که به صورت بار مثلثی (غیریکنواخت) در خلاف

^{&#}x27;.Gravitational Stress

اعماق موردنظر شبیهسازی شده که برای این مقصود تودهسنگ دیوارهی گمانهها مطابق تمامی چرخههای آزمایش در هر عمق بارگذاری و باربرداری می گردند. پس از اعمال فشار در هر مرحله برای حداکثر فشار در هر چرخه ۱۰۰ گام زمانی اضافه شده است تا بیشترین جابجاییها ثبت گردد. ۱۰۰ گام زمانی معادل ۱۰ مرحله ثبت جابجایی است؛ زیرا در حالت کرنش بزرگ نیروها در هر ۱۰ گام محاسبه میشوند. برای ثبت مقادیر جابجایی دیوارهی گمانهها نقاط پایشی مطابق راستای حسگرهای جابجایی دیلاتومتر در نظر گرفته شده است. اختلاف راستای یکی از حسگرها با متوسط امتداد تنش اصلی حداقل ۲۴ درجه می باشد (موازی محور گالری محل آزمایش) که دو حسگر دیگر با زاویهی ۱۲۰ درجه نسبت به آن بر روی دیوارهی گمانه قرار گرفتهاند. نتايج و بحث

برای بررسی پاسخ شبیهسازی آزمایش دیلاتومتری مقادیر جابجاییهای ثبتشده در طول بارگذاری و باربرداری در دیوارهی گمانهها با استفاده از رابطهی (۴)در محاسبهی مدول تغییر شکل تودهسنگ به کار گرفته مى شود. طبق اين رابطه مدول تغيير شكل پذيرى كل تودهسنگ در اعماق مورد آزمایش بهطور جداگانه محاسبه شده است. مدول کل در هر عمق از نسبت اختلاف حداکثر فشار در چرخهی اول و سوم بارگذاری به میزان تغییرات قطر گمانه ناشی از این افزایش فشار به دست میآید.

$$E_d = D. \frac{\Delta p_i}{\Delta D}. (1 + V_R) \tag{(f)}$$

تودهسنگ ناهمگن و ناهمسانگرد مدول تغییر شکل بهدست آمده از میز آن جابجایی های نشان داده شده در شکلهای (۱۰) و (۱۱) بهترتیب در جدول) 9

جدول) آورده شده است. ازآنجایی که در عمق ۸/۵ متر گمانهی D-1 آزمایش برجای دیلاتومتری در دوچرخه

انجامشده؛ لذا در مدل گمانهی D-1 در این عمق تنها دوچرخه شبیهسازی شده است که کاهش میزآنجابجایی در آن نسبت به دیگر اعماق مربوط به همین موضوع میباشد.





شکل (۱۱): نمودار جابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانەي D-2

میزان ناهمسانگردی مدول تغییر شکل که در نمودارهای شکلهای (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود؛ ناشی از ناهمسانگردی مدل رفتاری، شبکهی ناپیوستگیهای مجزا و وجود تنش افقى حداكثر و حداقل است.

جدول (۱۰): نتایجحاصل از مدلسازی عددی در گمانهی D-1

(GPa	م ارآ تر م			
کل دادەھا	حسگر ۳	حسگر ۲	حسگر ۱	لميت أهاري
۱۴/۵	۱۷/۵	۱۳/۱	۱۷/۳	ميانگين

جدول (۱۱): نتایج حاصل از مدلسازی عددی در گمانهی D-2

(GPa	م ارآ تر ح			
کل دادەھا	حسگر ۳	حسگر ۲	حسگر ۱	لميت أماري
۱۱/۵	۲/۳))	11/1	ميانگين

بنابراین میانگین مدول تغییر شکل کل حاصل از مدلسازی عددی در محدودهی مغار نیروگاه تلمبه ذخیرهای رودبار لرستان معادل ۱۳ گیگا پاسکال به دست می آید. مقایسه ی

میانگین مدول تغییر شکل کل بهدست آمده حاصل از مدلسازی عددی دو گمانه با میانگین کل نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری درجدول(، حدود ۲۶ درصد خطا را نشان میدهد.

برای بررسی تأثیر ناهمگنی بر نتایج مدلسازی، مدول یانگ و نسبت پواسون در مدل گمانهی $\mathrm{D} ext{-}1$ همگن در نظر گرفته شده است. با فرض مدول یانگ و نسبت پواسون همگن، مطابق شکل کاهش تغییر شکلپذیری در اثر افزایش عمق به چشم میخورد. با توجه به این شکل می توان اظهار کرد در حالتی که تغییراتی زیادی ناشی از ماهیت ژئومکانیکی و درزهداری در مدول یانگ و نسبت پواسون وجود نداشته باشد، مىتوان شاهد روند افزايش مدول تغییر شکل پذیری با افزایش عمق بود.



شکل (۱۲): نمودارجابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانهی D-1 بدون ناهمگنی مدول یانگ و نسبت پواسون

فرض عدم وجود سطح آزاد

همان گونه که در شکل مشاهده می گردد، در صورت عدم وجود سطح آزاد در مرز بالای شبکه از میزآنجابجاییهای کل کاسته شده و مطابق با آن مدول تغییر شکل کل نسبت به مدل گمانهی D-1 و D-2 که سطح آزاد در مرز بالای شبکه وجود دارد، مقدار بیشتری به دست میآید. با مقایسهی این دو نوع مدل می توان به تأثیر ایجاد فضای زیرزمینی در تغییر میزان تغییر شکلپذیری تودهسنگ پی برد. در حقیقت مدل بدون سطح آزاد کاهش مدول در نزدیکی سطح آزاد بیانگر تغییر شکلپذیری کم تودهسنگ در اطراف فضای زیرزمینی میباشد. مدول تغییر شکل در

پیرامون فضای زیرزمینی تا شعاعی تحت تأثیر به هم خوردگی تنشهای برجای طبیعی قرار دارد که بعد از این شعاع تغییرات مدول به مقدار اولیهی خود برمی گردد. در حقيقت پاسخهاى اين دو نوع مدل مبين افزايش قابليت تغییر شکلپذیری تودهسنگ در اثر ایجاد سازهی زیرزمینی در آن است. در این مدل، الگوی چرخههای بارگذاری و باربرداری در اعماق گمانه مطابق مدل گمانهی $\mathrm{D} ext{-}1$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۳): نمودار جابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانهی فرضی بدون سطح آزاد

نتایج نشان میدهد که شبیهسازیهای عددی می تواند به عنوان ابزاری کارآمد در کنار آزمایش های برجا استفاده تا تغییرات مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ در یک منطقه برآورد گردد. درصورتی که مدلسازی با درک شرایط حاکم بر محل تعیین مدول و عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ صورت گیرد، روشهای عددی می تواند برای تخمین مدول کلی تودهسنگ به کار گرفته شوند؛ اما بهدلیل ماهیت پیچیدهی تودهسنگ نمی توان تنها به شبیه سازی های عددی برای تعیین دقیق مدول تغییر شکلپذیری در تمام محیطها اکتفا کرد؛ زیرا چنین مدلهای عددی احتیاج به اطلاع دقیق از ساختار تودهسنگ دارند که این هدف با انجام مشاهدات صحرایی تودهسنگ در مقاطع و فضاهای زیرزمینی اکتشافی میسر می گردد. این در صورتی است که پارامترهای ژئومکانیکی تودهسنگ و تنشهای وارد بر آن با آزمایشهای برجا پیش از این تعیین شده باشند. International Journal of Rock Mechanics 3, 13–24.

- 2- Ito,T. Sato,A. Hayashi, K. (2001). Laboratory and field verification of a new approach to stress measurements using a dilatometer tool. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, 1173–1184.
- 3- Balachowski, L. (2006. April). Analysis of dilatometer test in calibration chamber,
- 4- Agharazi, A. Tannant, D. Jafari, A. (2008.). Stress and tunnel geometry effects on deformation modulus derived from plate load tests, GeoEdmonton'08, 601–608.
- 5- Isik, N.S. Ulusay, R. Doyuran, V. (2008). Deformation modulus of heavily jointed– sheared and blocky greywackes by pressuremeter tests: Numerical, experimental and empirical assessmentsEngineering Geology 101, 269–282.
- 6- Mitri, H.S. Edrissi, R. Henning, J. (1994). Finite element modeling of cable bolted stopes in hard rock ground mines. In: Presented at the SME annual meeting, New Mexico, Albuquerque, 94–116.
- 7- GhotbiRavandi, E. Rahmannejad, R. FeiliMonfared A.E. GhotbiRavandi E. (2013). Application of numerical modeling and genetic programming to estimate rock mass modulus of deformation. Int J Min Sci Technol;23(5), 733–737.
- 8- Poyry-MahabGhodss Joint Venture. (2014). RoudbarLorestan Pumped Storage Power Plant Second Phase Studies, Power Plant Design Rock Mechanics Report, Report Code: 3170-3390200.
- 9- Itasca Consulting Group Inc. (2012). FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D Dimensions, Users Manual), Version 5.0, Minneapolis: ICG.
- 10-Heuze, F. E. (1980).Scale Effects in the Determination of Rock Mass Strength and Deformability, Rock Mech. 12, 167-192.
- 11-Fossum, A. F. (1985).Technical Note: Effective Elastic Properties for a Randomly Jointed Rock Mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &Geomech. Abstr. 22(6), 467-470.
- 12-Ladanyi B. (1987). Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 24 (2), 123-134.

در این مطالعه مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ محدودهی مغار نیروگاه تلمبه ذخیرهای رودبار لرستان بهطور غیرمستقیم توسط روش عددی تفاضل محدود با تکیهبر نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری تعیین شده است. هدف از این تحقیق معرفی و به کارگیری روش های عددی هدف از این تحقیق معرفی و به کارگیری روش های عددی مدول تغییر شکل پذیری تودهسنگ است. مدلسازی ها با در نظر گرفتن ناهمگنی، ناهمسانگردی و مقیاس صورت گرفته که خلاصهی نتایج به شرح زیر می باشد.

- ۱- مقایسهی مدول تغییر شکل کلی بهدستآمده از شبیهسازیهای عددی در گمانههای D-1 و D-2 با مدول تغییر شکل کل میانگین حاصل از مجموع ۱۵ آزمایش دیلاتومتری در اطراف مغار نیروگاه نشاندهندهی ۲۶ درصد خطا است.
- ۲- با بررسی میزآنجابجاییهای بهدستآمده از مدلهای عددی میتوان در صورت همگن بودن، مدول یانگ و نسبت پواسون نشان داد که مدول تغییر شکل تودهسنگ با افزایش عمق افزایش مییابد.
- ۳- ایجاد فضای زیرزمینی در تودهسنگ منجر به افزایش قابلیت تغییر شکلپذیری و کاهش مدول تودهسنگ میشود.
- ۴- نحوهی توزیع تنشهای برجا در مقدار و تغییرات مدول تغییر شکلپذیری تودهسنگ اهمیت بسزایی دارد.

مراجع

 Heuze, F.E. Goodman, R.E. Bornstein, A. (1971). Numerical Analyses of Deformability Tests in Jointed Rock– Joint Perturbation and No Tension Finite Element Solutions,

نتىجەگىرى