مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۸۵-۹۲. (یادداشت فنی)

Research Note

تعیین مقادیر سختی قائم و برشی درزه‌های سنگی با استفاده از تحلیل برگشتی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه (مطالعه‌ی موردی: سد بختیاری)

محمود یزدانی * **(استادیار)**
عمار میرزایی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

تغییرشکل‌های به‌وجودآمده در یک توده‌ی سنگی را می‌توان به دو عامل سنگ بکر و درزه تقسیم کرد. در این دیدگاه ویژگی‌های درزه، اثرات مهمی مانند کاهش سختی و ناهمسانی در رفتار توده‌ی سنگی می‌گذارند. در این بین سختی قائم و برشی درزه، که در محاسبه‌ی تغییرشکل‌ها استفاده می‌شوند، در مدل‌سازی‌های عددی اهمیت زیادی دارند. در این پژوهش از تلفیق روش عددی و نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در سد بختیاری برای محاسبه‌ی سختی‌ها استفاده شده است. با تحلیل برگشتی و شبیه‌سازی سه آزمایش بارگذاری صفحه، مقدار عددی سختی قائم و برشی برای سه درزه‌ی مختلف محاسبه شده است. مقدار خطای تحلیل برگشتی براساس مقایسه‌ی مقدار مدول تغییرشکل و نمودارهای تغییرشکل ـ بارگذاری میان آزمایش و مدل‌سازی بررسی شده است. در نهایت، رابطه‌یی میان نوع پُرکنندگی درزه‌ها و سختی‌های آنها مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: توده‌ی سنگ، آزمایش بارگذاری صفحه، تحلیل برگشتی، سختی قائم و برشی.

myazdani@modares.ac.ir
ammar.mirzayee@gmail.com

۱. مقدمه

ناپیوستگی‌ها به‌عنوان یک عامل ضعف در سنگ، اثر قابل توجهی در رفتار توده‌ی سنگ دارند. با توجه به ماهیت طبیعی ناپیوستگی، شناسایی ویژگی‌های آن در مطالعات درجا بسیار پرهزینه، زمان‌بر و دشوار است.[۱] برخی از این ویژگی‌ها مانند زاویه‌ی جهت و شیب، زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی درزه‌ها با مطالعات و آزمایش‌های در محل شناسایی می‌شوند، ولی تعیین مقدار پارامترهایی مانند سختی قائم و برشی همواره با دشواری‌های زیادی روبرو بوده است.

سختی قائم و برشی، قسمتی از ویژگی‌های مکانیکی درزه‌ها هستند، که درکنار سایر ویژگی‌ها، رفتار توده‌ی سنگی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. اثر ناپیوستگی در رفتار توده‌ی سنگی، که شامل نحوه‌ی توزیع تنش و مقدار تغییرشکل‌های آن است، اهمیت زیادی در تحلیل و طراحی تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی دارد. در این نوشتار برای بررسی دقیق‌تر رفتار توده‌ی سنگ، مقدار سختی قائم و برشی سه دسته درزه‌ی خاص در ساخت‌گاه سد بختیاری با استفاده از تحلیل برگشتی آزمایش‌های بارگذاری صفحه، که در آن پروژه انجام شده محاسبه شده است. ویژگی روش انجام این پژوهش آن است که با استفاده از نتایج چند آزمایش صحرایی در ساخت‌گاه و مدل‌سازی عددی، یکی از پارامترهای اصلی موردنیاز در تحلیل توده‌ی سنگ‌های درزه‌دار، که همان سختی‌های قائم و برشی ناپیوستگی‌هاست، مستقیماً محاسبه شده است.

در آزمایش بارگذاری صفحه، یک بار گسترده بر قسمتی از توده‌ی سنگی اعمال و تغییرشکل‌های زیر صفحه‌ی بارگذاری اندازه‌گیری می‌شوند. ISRM روابط استانداردی را برای محاسبه‌ی مقدار مدول تغییرشکل پیشنهاد می‌کند. این روابط توده‌ی سنگی را یک محیط پیوسته، همگن، همسان و با رفتار خطی (CHILE)[۱] در یک فضای نیمه بی‌نهایت فرض می‌کند.[۲] بویل در پژوهش‌های خود نشان داده است که این فرضیات به همراه روش‌های محاسباتی ISRM از مواردی مانند ضریب پواسون، فضای نیمه بی‌نهایت و مقدار عمق اندازه‌گیری‌های تغییرشکل‌ها اثرپذیر است.[۳] یکی از مهم‌ترین فرضیات ISRM که باید به درستی از آن استفاده شود، فرض همسانی توده‌ی سنگی است. طبیعت توده‌ی سنگ به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها همواره فاصله‌ی بسیار زیادی با همسانی کامل دارد.

از یک دیدگاه رفتار توده‌ی سنگی به‌صورت کلی به مشخصات دو عامل اصلی

---

* *نویسنده مسئول*
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۲/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۱/۲۸، پذیرش ۱۳۹۲/۱۲/۱۸.

سنگ بکر و درزه بستگی دارد. در پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی معمول، با ثابت درنظرگرفتن مشخصات یکی از این دو عامل، اثر عامل دیگر را در پارامترهای رفتاری توده‌ی سنگ مانند مدول تغییرشکل بررسی می‌کنند. ویژگی‌های اصلی سنگ بکر در آزمایش‌های بسیاری بررسی و اطلاعات کافی در این مورد توسط پژوهشگران تهیه شده است.[۴] در مورد ویژگی‌های درزه‌ها نیز پژوهش‌های زیادی انجام و معیارهای متفاوتی برای وصف اثر درزه در توده‌ی سنگ ارائه شده است.[۵] دیدگاهی که در این پروژه بر آن اهمیت داده شده است، بررسی اثر هم‌زمان درزه و سنگ بکر یا همان رفتار توده‌ی سنگی است.

برای این‌کار از مطالعات شناسایی انجام‌شده در پروژه‌ی سد و نیروگاه بختیاری در سال‌های ۸۸-۱۳۸۶ استفاده شده است.[۶] علی‌رغم بی‌سابقه‌بودن حجم مطالعات شناسایی مکانیک سنگ این پروژه در ایران، فقط یک آزمایش برجا برای شناسایی مستقیم خواص مکانیکی درزه‌ها با عنوان آزمایش برش[۲] انجام شده است. نتایج این آزمایش به دلیل عدم انجام مجدد و شرایط خاص اجرای آن فاقد اعتبار کافی برای استفاده‌ی مستقیم است. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه در نقاط مختلف ساختگاه سد، که هر یک میانگین چندین آزمایش است، سختی درزه‌ها محاسبه شود. همچنین نتایج این آزمایش‌ها خود اثر ناپیوستگی‌ها در ناهمسانی توده‌ی سنگی را نمایش می‌دهند. برای انجام تحلیل برگشتی تابع هدف نهایی مشخص شده و آزمایش بارگذاری صفحه در نرم‌افزار Udec مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی‌های برای ۳ آزمایش اصلی برای زوایای دیپ مختلف انجام و مقدار مدول تغییرشکل محاسبه شده است.

۲. مطالعات مکانیک سنگ ساختگاه سد بختیاری

ساختگاه سد و نیروگاه بختیاری در دامنه‌های جنوب غربی کوه‌های زاگرس بر روی رودخانه‌ی بختیاری واقع شده است. ساختگاه در دره‌یی عمیق با بلندای دیواره‌های بالغ بر ۵۰۰ متر و با عرض کف ۳۵ متر و به طور عمده بر روی آهک سیلیسی سروک قرار گرفته است. ناپیوستگی‌های این ناحیه ناشی از چین‌خوردگی‌های رشته کوه زاگرس است، که در شکل ۱ در محل تکیه‌گاه نمایش داده شده است. برای شناسایی ویژگی‌های سنگ این ساختگاه حدود ۳۵۰۰ متر گالری اکتشافی و بیش از ۱۷۰۰۰ متر گمانه‌ی اکتشافی حفر شده است. در نهایت بر روی این ساختگاه سد از نوع بتنی دو قوسی با ارتفاع ۳۱۵ متر از پی و طول تاج ۴۳۴ متر و نیروگاه زیرزمینی به ظرفیت ۱۵۰۰ مگاوات ساخته خواهد شد.[۷]

آزمایش‌های زیادی بر روی مغزه‌های گرفته‌شده از نواحی مختلف انجام شده است، که نتایج آن‌ها نشانگر عدم وجود تفاوت زیاد بین خواص سنگ بکر میان نواحی مختلف بوده است. براساس نتایج ۱۶۲ آزمایش، مقاومت فشاری تک‌محوره برای نمونه‌های خشک ۴۰ ± ۱۲۵ مگاپاسکال و برای نمونه‌های اشباع ۳۰ ± ۱۱۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. همچنین مقدار میانگین مدول کشسانی برای سنگ بکر ۱۰ ± ۶۹ گیگاپاسکال محاسبه شده است. برای اندازه‌گیری مقدار مدول کشسانی سنگ بکر از اثرات اولیه‌ی تنش برجا بر نمودار تنش ـ کرنش صرف‌نظر و فقط ناحیه‌ی خطی در نظر گرفته شده است.[۷]

درزه‌های اصلی که با محور بدنه‌ی سد در ارتباط هستند، به ۳ دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند که شامل یک دسته درزه‌ی افقی و دو دسته درزه‌ی دیگر است که هر ۳ تقریباً یکدیگر را به زاویه‌ی قائم قطع می‌کنند. یک درزه‌ی دیگر نیز در برخی

تکیه گاه سمت راست

تکیه گاه سمت چپ

شکل ۱. درزه‌های قائم در محل ساختگاه سد.

نقاط مشاهده شده است، که به دلیل تکرار بسیار پایین، طراح آزمایش از اثر آن صرف‌نظر کرده است.

دسته‌ی درزه‌ی اول با صفحات افقی و ممتد، فاصله‌داری[۳] حدود ۶۰-۶۰۰ میلی‌متر و نام Bedding شناسایی شده‌اند. جهت شیب[۴] این درزه‌ها در پایین‌دست سد ۲۱۵ درجه و در بالادست سد ۳۰ درجه است. دسته‌ی درزه‌ی دیگر که در محور سد وجود دارد، J1 نام‌گذاری شده است که جهت شیب ۳۱۰ درجه و شیب[۵] آن ۴۰-۷۰ درجه است. تداوم این درزه‌ها از چندین متر تا ده‌ها متر تخمین زده شده است. دسته‌ی درزه‌ی سوم با نام J2 و جهت شیب ۱۲۵ درجه و شیب ۳۵-۷۵ درجه دارای طولی بین چندین سانتی‌متر تا چندین متر است. ویژگی‌های این ۳ دسته درزه در محل آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۱، برای مدل‌سازی آزمایش ارائه شده است.

ویژگی‌های تغییرشکلی و مقاومتی ناپیوستگی‌ها از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام‌شده بر هر ۳ دسته درزه به‌دست آمده است. مبنای اعداد محاسبه‌شده براساس ۸۶ آزمایش مستقیم آزمایشگاهی استوار است.

جدول ۱. میانگین پارامترهای هندسی درزه‌ها.

درزه	فاصله‌داری (cm)	جهت شیب (deg)	شیب (deg)	بازشدگی (mm)
Bedding	۴۰	۲۱۵	۰	۰٫۵
J۱	۴۰	۳۱۰	۵۵	۰٫۵
J۲	۳۰	۱۲۵	۵۵	۰٫۵

جدول ۲. پارامترهای مقاومتی درزه‌ها براساس میانگین نتایج آزمایشگاهی.

نوع درزه	بیشینه		پسماند	
	C (MPa)	Φ (deg)	C (MPa)	Φ (deg)
Bedding	۰٫۲۸	۴۴	۰	۳۳
J۱	۰٫۲۵	۳۵	۰	۳۲
J۲	۰٫۴۵	۳۸	۰	۳۶

نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت خطی میانگین گرفته شده و مقادیر آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه

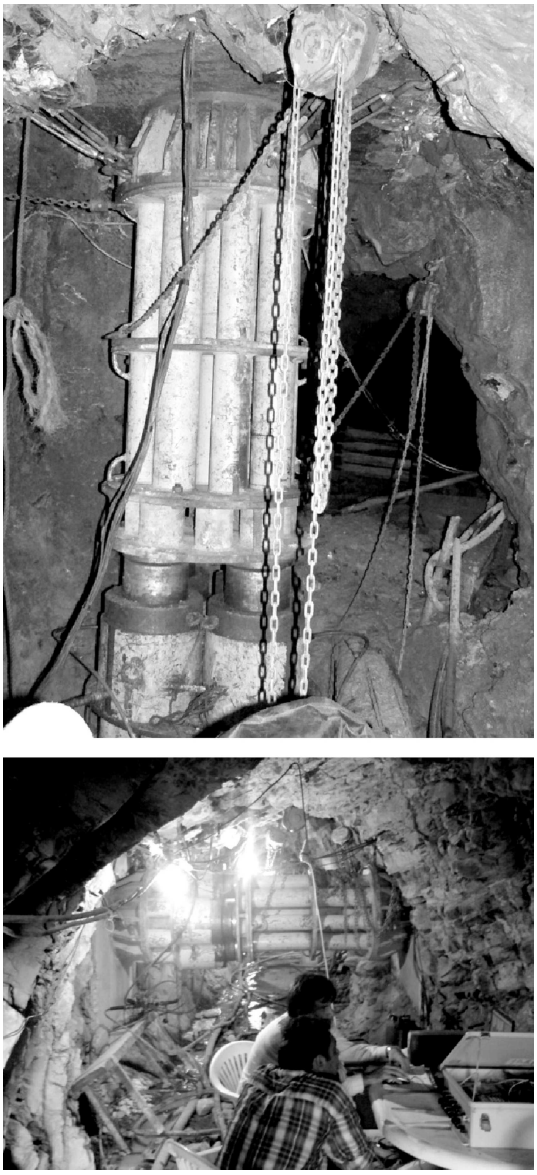
به‌منظور تعیین مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌ی سنگ، در این ساخت‌گاه آزمایش‌های برجای متنوعی انجام شده است، که عبارت‌اند از:[۷]

- آزمایش دیلاتومتر (۸۴ آزمایش)
- آزمایش بارگذاری صفحه‌یی (۳۶ آزمایش)
- آزمایش جک تخت (۹ آزمایش)

برای انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه از دستگاهی با صفحه‌ی صلب با ۳ قطر مختلف ۹۷۱، ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. از صفحه‌ی کوچک‌تر برای بارگذاری آزمایش با فشار بیشینه‌ی ۴۰ مگاپاسکال و از دو صفحه‌ی دیگر برای بارگذاری آزمایش با فشار بیشینه‌ی ۲۰ مگاپاسکال استفاده شده است. تغییرشکل‌های ناشی از انجام بارگذاری در سطح سنگ و ۴ نقطه‌ی دیگر در زیر صفحه‌ی بارگذاری تا عمق ۳ متری توسط ابزارهای کشش‌سنج[۶] اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایش با توجه به ۳ دسته درزه‌ی اصلی و جهت اعمال بار دسته‌بندی شده است. شکل ۲، نحوه‌ی اجرای آزمایش و چیدمان دستگاه بارگذاری در جهت‌های افقی و عمودی در گالری‌های اکتشافی را نمایش می‌دهد.

آزمایش‌ها به دو دسته‌ی کلی بارگذاری قائم بر درزه‌های افقی (Bedding و J۲) و بارگذاری مایل تقسیم شده است. این گروه‌ها به ترتیب NB، NJ۲ و SB۱۲ نام‌گذاری شده‌اند. آزمایش NJ۲ در محلی انجام شده است که دسته‌ی درزه‌ی J۲ حالت افقی پیدا کرده و بارگذاری به‌صورت عمود بر آن انجام شده است. همچنین چند آزمایش بر روی سنگ‌های بسیار خُردشده با درزه‌های زیاد انجام شده است، که در این پژوهش در نظر گرفته نشده‌اند. در جدول ۳، مقادیر مدول تغییرشکل محاسبه‌شده برای ۳ آزمایش انتخاب‌شده قابل مشاهده است.

نتایج آزمایش، نمایش‌گر اثر شدید هندسه‌ی ناپیوستگی در توده‌ی سنگی است، به طوری که مدول تغییرشکل محاسبه‌شده برای این توده‌ی سنگی با توجه به نوع ناپیوستگی و جهت بارگذاری از ۶ تا ۲۵ گیگاپاسکال متغیر است. این موضوع مجدداً اهمیت شناسایی خواص ناپیوستگی‌ها در بررسی ناهمسانی توده‌ی سنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. آزمایش بارگذاری صفحه در گالری‌های اکتشافی به‌صورت قائم و افقی.

۴. مدل‌سازی عددی

۱.۴. ویژگی‌های مصالح

همان‌طور که پیشتر گفته شده است، تغییرشکل‌های به‌وجودآمده در یک توده‌ی سنگی به ۲ دسته تقسیم می‌شوند: ۱. تغییرشکل‌های ناشی از سنگ بکر، که اغلب به‌صورت خطی فرض می‌شوند؛ ۲. تغییرشکل‌های ناشی از ناپیوستگی‌ها، که منجر به ایجاد ناهمسانی در رفتار توده‌ی سنگ می‌شود. برای مدل‌سازی کامل ویژگی‌های ناپیوستگی از نرم‌افزار Udec استفاده شده است. در این نرم‌افزار که از روش اجزاء مجزا بهره می‌برد، هندسه‌ی مسئله به بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر تقسیم و سطوح میان بلوک‌ها توسط نرم‌افزار به‌عنوان درزه در نظر گرفته می‌شود.[۸]

برای سنگ بکر مدول کشسانی ۷۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰٫۲ در نظر گرفته شده است. نرم‌افزار Udec مانند سایر نرم‌افزارهای شرکت Itasca، ثابت‌های کشسان را براساس دو عدد مدول بالک و برشی دریافت می‌کند که مقدار آنها برای

جدول ۳. مدول تغییرشکل محاسبه‌شده توسط روش پیشنهادی ISRM.

چرخه‌ی بارگذاری	تنش (MPa)	مدول تغییرشکل (GPa)		
		NB	NJ۲	SB۱۲
۱	۵	۶٫۷	۱۴٫۳	۷٫۶ ۱ ۱٫۲
۲	۱۰	۱۲٫۶	۲۲٫۳	۶ ۰٫۸ ۲
۳	۱۵	۱۲٫۹	۲۳٫۵	۷٫۳ ۰٫۹ ۲٫۷
۴	۲۰	۱۲٫۳	۲۵٫۳	۸٫۱ ۰٫۸ ۳
۵	۱۵	۱۲٫۶	۲۵٫۳	۸٫۲ ۲٫۴ ۳٫۵

این پروژه بدین صورت محاسبه شده است:

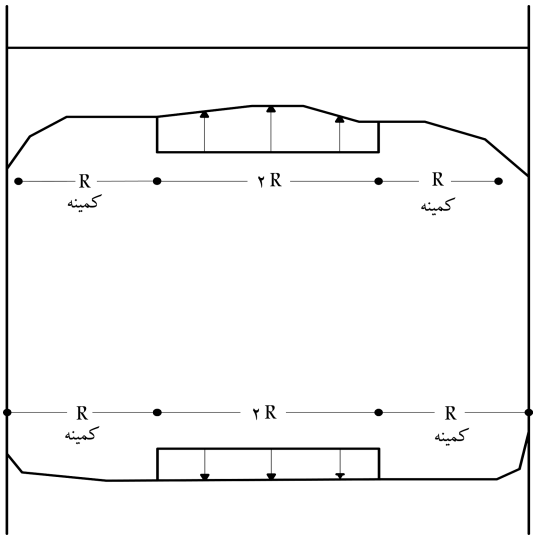
$$K = \frac{E}{3(1-2v)} = \frac{70 \times 10^9}{3 \times 0.6} \approx 3.9 \times 10^{10}\,Pa$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)} = \frac{70 \times 10^9}{3 \times 1.2} \approx 2.9 \times 10^{10}\,Pa$$

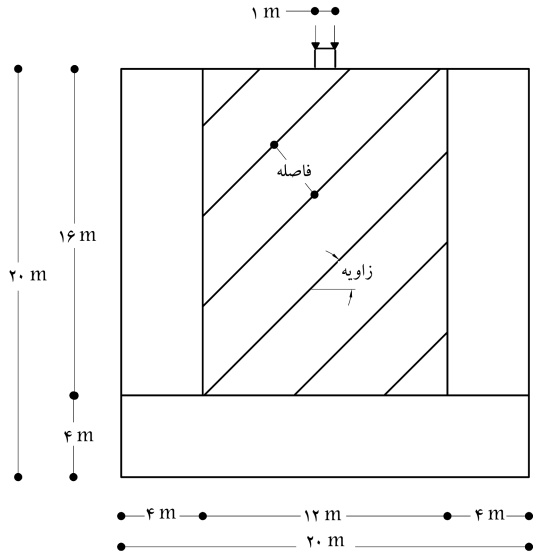
مقادیر به‌دست‌آمده‌ی مدول بالک و برشی برای سنگ بکر در حالت استاتیکی است، که در این پژوهش با توجه به نوع بارگذاری قابل استفاده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعات شناسایی، مقادیر مدول بالک و برشی برای تمامی مدل‌های ساخته‌شده ثابت هستند. برخی ویژگی‌های درزه‌ها، که در مطالعات شناسایی به‌دست آمده و در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شد و عیناً در مدل‌سازی به‌کار گرفته شده است.

۲.۴. شرایط مرزی

طرح کلی ASTM برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه در شکل ۳ نشان داده شده است. در این آیین‌نامه به این نکته اشاره شده است که برای جلوگیری از اثر لبه‌ها، صفحه‌ی بارگذاری باید دست‌کم به اندازه‌ی شعاع خود از دو لبه‌ی گالری اکتشافی فاصله داشته باشد.[۹] فاصله از لبه‌ی صفحه‌ی بارگذاری می‌تواند به اندازه‌ی عرض مؤثر توده‌ی سنگی درگیر در آزمایش باشد. عرض مؤثر توده‌ی سنگی درگیر در مدل‌سازی عددی بویل برای یک گالری به ارتفاع ۵ متر و عرض ۱۰ متر به اندازه‌ی ۲۱ متر انتخاب شده است.[۳] با توجه به ابعاد گالری‌های حفرشده در پروژه‌ی بختیاری که حدود ۲ × ۲ متر هستند، اندازه‌ی عرض مؤثر می‌تواند ۴ متر انتخاب شود. برای ایجاد دقت بیشتر در مدل‌سازی، اندازه‌ی عرض مؤثر ۶ متر از محور بارگذاری در نظر گرفته شده است.



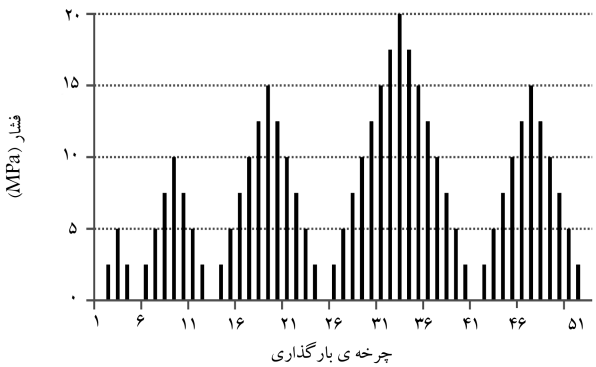
شکل ۳. محدودیت‌های هندسی بارگذاری صفحه در حالت قائم.[۹]



شکل ۴. شکل هندسی مدل ساخته‌شده برای شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه.

برای انتخاب میزان عمق مؤثر باید موارد مختلفی در نظر گرفته شود. بویل در پژوهش‌های عددی در انتخاب این معیار محدودیتی برای خود قائل نشده و عمق مدل‌سازی خود را ۱۱۰ متر انتخاب کرده است. ولی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مقدار اندازه‌گیری‌شده برای تغییرشکل‌ها فقط تا عمق ۶ متری زیر صفحه‌ی بارگذاری قابل اطمینان است و مقدار مدول تغییرشکل به‌دست‌آمده در عمق‌های زیاد قابلیت بهره‌برداری ندارند. هدف این پژوهش بررسی اثر عمق در مدول تغییرشکل نیست و فقط مقدار آن در عمق‌های اولیه، موردنظر است؛ بنابراین عمق مؤثر به مقدار ۱۶ متر انتخاب شده است. با توجه به توضیحات ذکرشده، محیط اصلی مدل‌سازی توده‌ی سنگی به ارتفاع ۱۶ متر و عرض ۱۲ متر مطابق شکل ۴ انتخاب شده است.

برای اعمال بارگذاری موردنظر از الگوی بارگذاری آزمایش واقعی استفاده شده است، که در شکل ۵ الگوی عمومی آن رسم شده است. بارگذاری‌های اصلی در ۵ دوره‌ی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و مجدداً ۱۵ مگاپاسکال انجام می‌شود و برای ایجاد دقت بیشتر در مدل‌سازی به بازه‌های کوچک‌تر ۲٫۵ مگاپاسکالی تقسیم شده است. به‌عبارت دیگر، برای هر افزایش یا کاهش بار اصلی به مقدار ۵ مگاپاسکال از دو گام



شکل ۵. سیکل‌های بارگذاری تعریف‌شده در مدل‌سازی عددی با گام‌های ۲٫۵ مگاپاسکال.

تغییر بار به اندازه‌ی ۲٫۵ مگاپاسکال استفاده شده است. در مجموع برای انجام کل بارگذاری از ۵۳ سیکل بارگذاری یا باربرداری به اندازه‌ی ۲٫۵ مگاپاسکال استفاده شده است.

برای اعمال این سیکل‌های ۲٫۵ مگاپاسکالی از یک بلوک صلب به وزن بسیار کم به عرض ۱ متر استفاده شده است. این بلوک صلب در حقیقت حکم صفحه‌ی بارگذاری را دارد. صفحه‌ی بارهای وارده را در نقاط بالایی خود دریافت می‌کند و همانند صفحه‌ی بارگذاری در آزمایش واقعی، نیرو را به سطح توده‌ی سنگ انتقال می‌دهد.

۵. تابع خطا

اولین گام در انجام یک تحلیل برگشتی مناسب تعریف یک تابع هدف است، که در آن پارامترهای تأثیرگذار به‌درستی مشخص شده باشند. در این مطالعه با توجه به در اختیارداشتن نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ی پروژه‌ی بختیاری، تابع هدف براساس این نتایج بنا شده است. این تابع هدف خود شامل دو تابع تغییرشکل‌های زیر صفحه‌ی بارگذاری و مدول تغییرشکل توده‌ی سنگ است. پارامترهای ورودی تعریف‌شده برای این دو تابع به این صورت هستند:

- مشخصات کشسان سنگ بکر (مدول کشسانی E و ضریب پواسون v)
- زاویه‌ی اصطکاک داخلی درزه‌ها (ϕ)
- چسبندگی درزه‌ها (c)
- فاصله‌داری درزه‌ها (d)
- زاویه‌ی شیب درزه‌ها (β)
- سختی قائم و برشی درزه‌ها (Jkn و Jks)

تمامی پارامترهای فوق به غیر از سختی برشی و قائم درزه‌ها در مطالعات شناسایی محاسبه می‌شوند و جزء ورودی‌های معلوم تابع هدف هستند. رابطه‌ی ۱، تابع هدف تغییرشکل‌های زیر صفحه‌ی بارگذاری را با پارامترهای مؤثر در آن نشان می‌دهد:

$$F_{deformation} = (E, v, \phi, \phi_r, c, d, \beta, J_{kn}, J_{ks})_{mm} \qquad (۱)$$

تابع هدف دوم، مدول تغییرشکل توده‌ی سنگی است، که خود با استفاده از روابط پیشنهادی ISRM براساس تغییرشکل‌ها محاسبه می‌شود. در این روابط مدول تغییرشکل علاوه‌بر پارامترهای تابع تغییرشکل به عامل عمق (z) نیز بستگی دارد.[۲] بنابراین رابطه‌ی تابع مدول تغییرشکل نیز به‌صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$E_{rockmass}(F_{deformation}, z) = E_{rock\,mass}(E, v, \phi, \phi_r, c, d, \beta, J_{kn}, J_{ks}, Z)_{GPa} \qquad (۲)$$

برای کاهش حجم روابط از E_{rm} به جای $E_{rock\,mass}$ استفاده می‌شود. تابع خطای تغییرشکل Err_{def} براساس اختلاف مقدار محاسبه‌شده‌ی $F_{defmodel}$ با مقدار واقعی $F_{defreal}$ در آزمایش‌های درجا تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۳):

$$Err_{def} = \frac{F_{defreal} - F_{defmodel}}{F_{defreal}} \times ۱۰۰ \qquad (۳)$$

همچنین مقدار تابع خطای مدول تغییرشکل Err_{rm} با استفاده از اختلاف مقدار محاسبه‌شده در مدل‌سازی عددی $F_{rm\,model}$ و نتایج آزمایش بارگذاری صفحه $E_{rm\,real}$ به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$Err_{rm} = \frac{F_{rmreal} - F_{rmmodel}}{F_{rmtral}} \times ۱۰۰ \qquad (۴)$$

بعد از ایجاد این دو تابع خطا می‌توان تابع هدف نهایی را برای انجام کمینه‌ساختن خطا تعریف کرد. این تابع به‌صورت برآیند دو تابع خطای پیشین به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$Err_{total} = \sqrt{Err_{rm}^2 + Err_{def}^2} \qquad (۵)$$

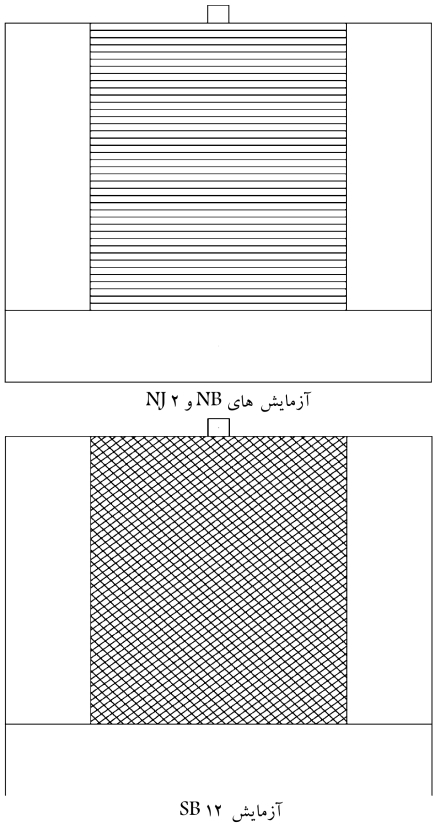
اکنون با استفاده از این تابع هدف می‌توان تحلیل برگشتی را با هدف کمینه‌ساختن مقدار تابع فوق توسط تغییر پارامترهای سختی قائم و برشی انجام داد. با توجه به بازه‌ی بسیار زیاد، که برای مقدار سختی قائم و برشی وجود دارد، ابتدا لازم است تا مدل‌سازی براساس حدس‌های اولیه با فواصل زیاد انجام شود. بعد از مشخص‌شدن حدود اولیه، مقدار دقیق‌تر براساس روش جستجوی مستقیم، که توسط ساکورایی پیشنهاد شده است، مشخص می‌شود.

در روش جستجوی مستقیم در هر گام رو به جلو فقط یک پارامتر قابل تغییر به‌صورت کاهشی یا افزایشی است.[۱۰] در گام‌های متوالی نیز نمی‌توان یک پارامتر را تغییر داد، تا اینکه تغییر پارامتر باعث افزایش تابع خطا شود. آنگاه می‌توان در جهت بر عکس (منفی) پارامتر را تغییر داد و در صورتی که باز هم منجر به کاهش مقدار تابع خطا نشد، باید پارامتر گام بعدی مجدداً تغییر کند. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که ایجاد هرگونه تغییر در پارامترها باعث افزایش مقدار تابع هدف نهایی شود. مقدار محاسبه‌شده برای پارامترها، مقدار بهینه و مقدار تابع هدف نهایی، خطای متناظر آنهاست.[۱۱]

۶. نتایج و تفسیر

روند انجام تحلیل برگشتی برای هر ۳ آزمایش موردنظر شامل دو قسمت اصلی است: ۱. شناسایی بازه‌ی اولیه، ۲. کمینه‌سازی تابع هدف. مطابق رابطه‌ی ۵، تابع هدف این پژوهش برآیند دو تابع خطای تغییرشکل و مدول تغییرشکل توده‌ی سنگی است، که به آن تابع خطای نهایی گفته می‌شود.

با توجه به بازه‌ی بسیار زیاد سختی قائم و برشی، ابتدا مقدار خطای تابع نهایی در بازه‌های تخمینی اولیه محاسبه می‌شوند. هدف این کار شناسایی بازه‌یی برای دو پارامتر است که منجر به خطای زیر ۵۰٪ بشود. برای محاسبه‌ی تابع خطا در



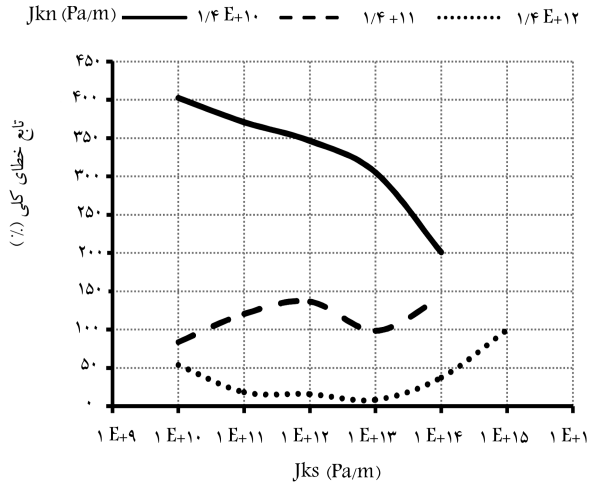
شکل ۶. هندسه‌ی مدل‌سازی.

هر مدل‌سازی مطابق با هندسه‌ی نمایش داده شده در شکل ۶، ابتدا تغییرشکل‌ها اندازه‌گیری و سپس توسط آن‌ها، مدول تغییرشکل با استفاده از روابط ISRM محاسبه می‌شود. با مقایسه‌ی این مقادیر با نتایج آزمایش‌های درجا، مقدار تابع خطای مدل‌سازی محاسبه می‌شود. این عملیات برای مقادیر مختلف سختی در آزمایش‌های مختلف انجام شده است.

در آزمایش NB بارگذاری به‌صورت عمود بر درزه‌های موازی و افقی لایه‌ی Bedding انجام شده است. بازه‌ی شناسایی اولیه برای سختی قائم بین 10^{10} تا 10^{12} Pa/m و برای سختی برشی از 10^{10} تا 10^{14} Pa/m در نظر گرفته شده است. مقدار تابع خطای نهایی در مدل‌سازی‌های انجام‌شده در شکل ۷ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۷، بازه‌ی مناسب برای انجام دقیق‌تر کمینه‌سازی تابع نهایی شناسایی شده و برای استفاده در روش جستجوی مستقیم قابل استفاده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، کمینه‌سازی مقدار تابع نهایی از عدد ۱۸٪ آغاز شده و در هرگام فقط یکی از پارامترهای مجهول تغییر پیدا کرده است. در انتها نیز روند کمینه‌سازی در عدد ۷٫۲۳٪ متوقف شده و با تغییر پارامترها مقدار تابع خطای نهایی افزایش پیدا کرده است. این نقطه به‌عنوان مقدار بهینه برای دو پارامتر سختی قائم و برشی با مقدارهای $1/8 \times 10^{11}$ و $1/4 \times 10^{11}$ Pa/m انتخاب شده است. این تحلیل برگشتی همچنین نشان می‌دهد که مقدار خطای بین مدل ساخته‌شده و واقعیت، کمینه‌ی ۷٪ است. این مقدار با توجه به استفاده از مقدار میانگین در تمامی آزمایش‌های صحرایی عددی قابل قبول است.

روند ذکرشده برای دو آزمایش NJ۲ و SB۱۲ نیز به همین ترتیب انجام شده است. در آزمایش NJ۲ هر دو مقدار سختی قائم و برشی برای درزه‌ی J۲ برابر



شکل ۷. نمودار درصد خطای نهایی بر حسب سختی برشی و سختی قائم (آزمایش NB).

1×10^{12} Pa/m محاسبه شده است. مقدار خطای این تحلیل برگشتی نیز حدود ۲٪ است، که با توجه به میانگین‌بودن نتایج آزمایش‌های اصلی مناسب است. شایان ذکر است که این عدد خطای بسیار پایین لزوماً دقت مدل‌سازی را نمایش نمی‌دهد و فقط گویای این امر است که مدل ساخته‌شده مشابه آنچه که در آزمایش اتفاق افتاده است، رفتار می‌کند. همچنین در مدل‌سازی عددی آزمایش SB۱۲، مقدار سختی قائم 10^{12} Pa/m و مقدار سختی برشی 10^{11} Pa/m با خطای حدود ۱۳٪ محاسبه می‌شوند. مانند سایر آزمایش‌های قبلی ذکر این نکته ضروری است که به دلیل میانگین‌بودن نتایج آزمایش واقعی، این مقدار خطا قابل قبول است.

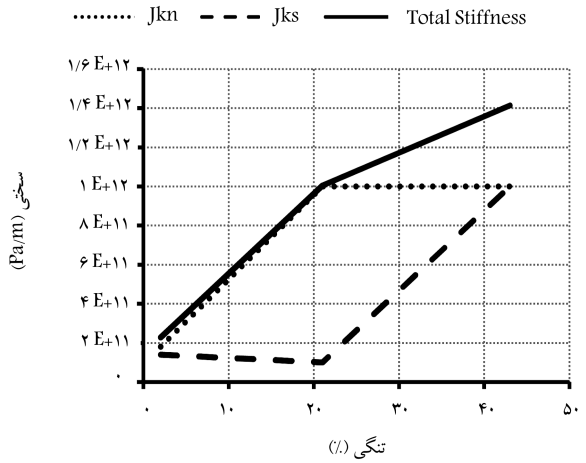
برای فهم بیشتر از اعداد سختی محاسبه‌شده، می‌توان مقادیر محاسبه‌شده برای سه درزه را با ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها، که در مطالعات شناسایی پروژه‌ی سد بختیاری جمع‌آوری شده‌اند، مقایسه کرد. جدول ۵، نوع پُرکنندگی، مقدار سختی قائم و برشی را برای هر درزه نمایش می‌دهد. مقدار پُرشدگی براساس درصدی از طول درزه است، که توسط نوعی از پُرکننده اشغال شده است و بر حسب درصد بیان می‌شود.

برای درنظرگرفتن هم‌زمان سختی قائم و برشی، پارامتر سختی کل، که برآیندی از سختی قائم و برشی است، تعریف شده است. سه نوع اصلی پُرکنندگی این درزه‌ها شامل: رس، کلسیت و قسمت تنگ[7] درزه‌ها است. منظور از قسمت تنگ درزه‌ها نوعی از ارتباط میان دو سطح درزه است، که هیچ نوع پُرکننده‌یی میان آنها نیست و البته دو سطح درزه کاملاً روی یکدیگر قرار دارند و این سطوح فاقد هرگونه هوازدگی است. دو پُرکننده‌ی اول به‌صورت موادی ریز در درزه‌ها یافت شده‌اند و مشاهده می‌شود که اثرگذاری مشخصی در سختی درزه‌ها ندارند و نمی‌توان رابطه‌یی میان سختی درزه‌ها و آنها مشاهده کرد. ولی با استفاده از شکل ۸ می‌توان رابطه‌یی میان سختی کل و میزان تنگی درزه مشاهده کرد. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که افزایش میزان تنگ‌بودن درزه به‌صورت کلی باعث افزایش سختی می‌شود. اما میزان افزایش سختی قائم یا برشی به سایر پُرکننده‌ها نیز بستگی دارد. با توجه به اینکه در درزه‌ها مقادیر مختلفی از سایر مواد پُرکننده یافت می‌شود و رفتار این مواد در برابر حالت برشی و قائم متفاوت است، این مسئله قابل قبول است.

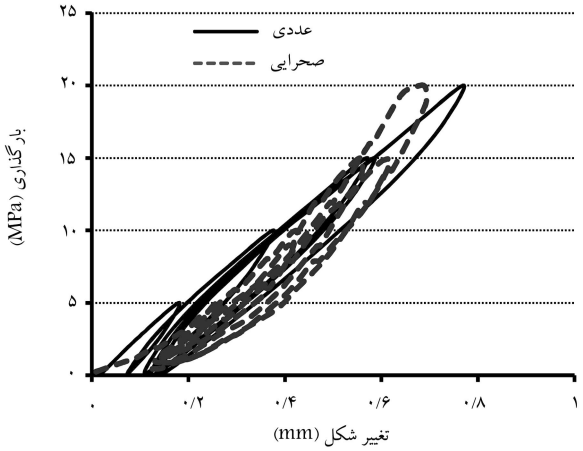
برای اطمینان بیشتر از صحت نتایج تحلیل برگشتی، نمودار تغییرشکل ـ بارگذاری مدل‌سازی با نتایج آزمایش‌های درجا در شکل‌های ۹ الی ۱۱ برای هر ۳ آزمایش مقایسه شده است. مهم‌ترین تفاوت میان آزمایش‌های NB و NJ۲ با آزمایش

جدول ۴. محاسبه‌ی مقدار تابع خطای نهایی (٪) با استفاده از روش جستجوی مستقیم (آزمایش NB).

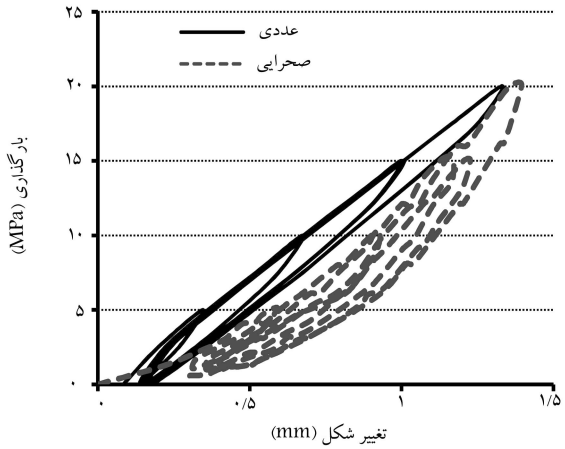
Jkn E_{+11} (Pa/m)	Jks E_{+11} (Pa/m)							
	۱	۱٫۱	۱٫۲	۱٫۳	۱٫۴	۱٫۵	۱٫۶	۱٫۷
۱٫۴	۱۸٫۰۷							
۱٫۵	۱۴٫۰۲	۱۳٫۷۲						
۱٫۶		۱۰٫۹۵	۱۰٫۳۲					
۱٫۷			۸٫۳۲	۸٫۵۶	۷٫۶۲	۷٫۵۶		
۱٫۸			۷٫۳۱	۷٫۲۸	۷٫۲۳	۷٫۲۳		
۱٫۹				۷٫۴۳	۷٫۷۷	۷٫۶۷		
۲								
۲٫۱								
۲٫۲								
۲٫۳								
۲٫۴								



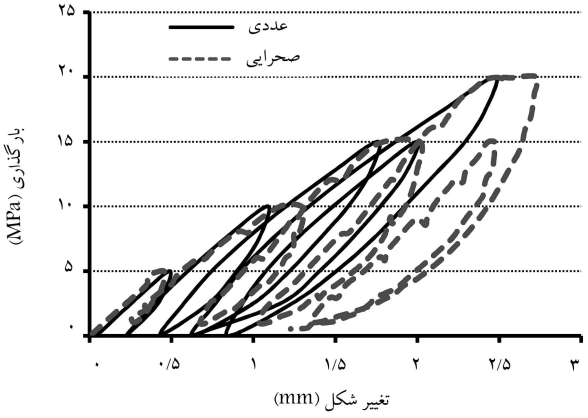
شکل ۸. نمودار سختی‌های قائم، برشی و کل محاسبه‌شده از تحلیل برگشتی نسبت به تنگی درزه‌ها.



شکل ۱۰. نمودار تغییرشکل ـ بارگذاری نتیجه‌ی نهایی برای تحلیل برگشتی آزمایش NJ۲.



شکل ۹. نمودار تغییرشکل ـ بارگذاری نتیجه‌ی نهایی برای تحلیل برگشتی آزمایش NB.



شکل ۱۱. نمودار تغییرشکل ـ بارگذاری نتیجه‌ی نهایی برای تحلیل برگشتی آزمایش SB۱۲.

جدول ۵. مقایسه‌ی مقادیر سختی و نوع پُرکنندگی درزه‌ها.

دسته‌ی درزه	Jkn (Pa/m)	Jks (Pa/m)	پُرشدگی اصلی (٪) رس	کلسیت	تنگ
B	۱٫۸۰E+۱۱	۱٫۴۰E+۱۱	۴۲	۴۶	۲
J۱	۱٫۰۰E+۱۲	۱٫۰۰E+۱۱	۱۰	۶۷	۲۱
J۲	۱٫۰۰E+۱۲	۱٫۰۰E+۱۲	۲	۵۵	۴۳

SB۱۲ وجود تغییرشکل‌های خمیری بیشتر در حالت وجود دو دسته درزه است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در مدل‌سازی‌های NB و NJ۲ میزان تغییرشکل‌های دائمی یا خمیری نسبت به حالت SB۱۲ بسیار کمتر است. علت وجود تغییرشکل‌های خمیری را می‌توان به انرژی جذب‌شده توسط درزه‌ها نسبت داد. در حالتی که تعداد درزه‌ها بیشتر باشد و یا درزه‌ها در جهت‌های مختلف و فاقد نظم خاصی باشند، انرژی بیشتری صرف جابجایی درزه‌ها می‌شود و در حالت باربرداری مقدار کمتری از تغییرشکل ایجادشده باز می‌گردد. این موضوع به خوبی توسط مدل‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار Udec قابل مشاهده است.

در این نمودارها مشاهده می‌شود که تغییرشکل‌ها در انتهای بارگذاری و مقدار شیب نمودار نیز با درنظرگرفتن دو نقطه‌ی ابتدا و انتهایی به درستی محاسبه شده‌اند. لیکن انحنایی در نتایج آزمایش درجا به خصوص دو آزمایش NB و NJ۲ وجود دارد، که در نمودارهای مدل‌سازی مشاهده نمی‌شود. با درنظرگرفتن فرض‌های انجام‌شده در این پژوهش علت این اختلاف را می‌توان به ثابت درنظرگرفتن مقدار سختی قائم در مدل‌سازی نسبت داد. در واقعیت، سختی قائم با افزایش تغییرشکل درزه بیشتر می‌شود؛[۱] که این موضوع با توجه به افزایش تعداد مجهولات تحلیل برگشتی در مدل‌سازی لحاظ نشده است. در آزمایش SB۱۲ این اختلاف کمتر است، که علت آن عدم بارگذاری عمود بر درزه‌ها و نقش کمتر سختی قائم است.

۷. نتیجه‌گیری

برای انجام تحلیل برگشتی از روش جستجوی مستقیم استفاده و مقدار خطای تحلیل برگشتی برای ۳ آزمایش ۷، ۲ و ۱۳ درصد محاسبه شده است، که با توجه به ماهیت پیچیده‌ی توده‌ی سنگ مقداری قابل قبول است. نتایج نشان داده است که افزایش مقدار تنگ‌بودن درزه‌ی مستقل از نوع سایر مواد پُرکننده‌ی درزه باعث افزایش سختی درزه می‌شود. همچنین مشخص شده است که میزان اثرگذاری تنگی درزه در سختی قائم و برشی به نوع سایر مواد پُرکننده بستگی دارد، که این موضوع می‌تواند با جزئیات بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد.

با مقایسه‌ی نمودارهای تغییرشکل ـ بارگذاری مدل‌سازی و آزمایش درجا مشخص شده است که مدل‌سازی توانسته تغییرشکل‌های نهایی و شیب نمودار را به درستی محاسبه کند، اما به دلیل فرض ثابت‌بودن مقدار سختی، انحنای منحنی‌ها کاملاً برهم منطبق نشده است. همچنین مدل‌سازی اگرچه مقدار تغییرشکل‌های دائم (پسماند) را کاملاً مطابق با آزمایش‌ها ارائه نکرده است، ولی توانسته است وجود یا عدم وجود آن را به‌خوبی پیش‌بینی کند. نتایج این پژوهش نشان‌گر وجود قابلیت استفاده‌ی هم‌زمان آزمایش‌های درجا و روش‌های عددی برای محاسبه‌ی پارامترهای مجهول توده‌ی سنگی است. مقادیر سختی قائم و برشی محاسبه‌شده می‌تواند در مکان‌های دیگر ساخت‌گاه برای طراحی سازه‌ها به‌صورت خاص مورد استفاده قرار گیرد.

پانوشت‌ها

1. continues, homogenous, isotropic and linear elastic
2. shear test
3. spacing
4. dip direction
5. dip angle
6. extensometer
7. tight

منابع (References)

1. Goodman, R.E., *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley and Sons (1989).
2. ISRM "Suggested method for determination of in situ deformability of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, pp. 143-146 (1979).
3. Boyle, W.J. "Interpretation of plate load test data", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **29**(2), pp. 133-141 (1992).
4. Gercek, H. "Poisson's ratio values for rocks", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**(1), pp. 1-13 (2007).
5. Ghazvinian, A. and Hadei, M.R. "Effect of discontinuity orientation and confinement on the strength of jointed anisotropic rocks", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **55**, pp. 117-124 (2012).
6. Harif, Z., Sadat, A.H., Navabi, H., "A report on hydraulic project in south of Iran", *Civil Magazine*, **41**, (1391).
7. Engineering Geology and Rock Mechanics Report-Site Investigation phase I & II, IWPCO, Rev 1 (2009).
8. Itasca Consulting Group, Inc, *UDEC, Universal Distinct Element Method*, Version 4.0, User's Manual (2004).
9. "Field testing and instrumentation of rock: A symposium presented at the seventy-sixth annual meeting ASTM Philadelhia", ASTM, pp.24-29 (1974).
10. Sharifzadehb, M., Kamrania, K. and Ghorbanib, M. "Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **28**, pp. 41-48 (2012).
11. Sakurai, S. "Lessons learned from field measurements in tunneling", *Tunnling and Underground Space Technology*, **12**(4), pp. 453-460 (1997).