

برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند آسماری (زاگرس، باختر شیراز) با تلفیق آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی

اله حاجی‌زاده نداف^{۱*}، بهنام اویسی^۲، محمدرضا قاسمی^۳ و محمد جواد بلورچی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران؛ گروه زمین‌ریاضی، مرکز پژوهش‌های کاربردی کرج، کرج، ایران
^۲ دکتر، گروه لرزه‌زمین‌ساخت و زلزله‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۳ دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۴ کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۰

چکیده

در مکانیک سنگ مدل‌هایی که از راه جبری قابل حل و تفسیر هستند، تحلیل مناسبی از تغییر شکل و شرایط شکست برای نمونه‌هایی که هندسه و ویژگی مکانیکی ساده ای دارند ارائه می‌کنند. امروزه روش‌های متفاوت مدل‌سازی عددی، همچون روش تفاضل محدود (FD: Finite Difference) در تحلیل رفتار پیوسته، ناپیوسته و شبه پیوسته، در کنار مدل‌های تحلیلی کاربرد بسیار دارد. در این نوشتار تلاش شده است تا با کاربری از نتایج آزمایش‌های سه محوری روی نمونه‌های دست نخورده (Intact rock samples) و همچنین با به کار بردن روش تفاضل محدود، برآوردی منطقی از ویژگی‌های ژئومکانیکی بخش بالایی واحد آهکی آسماری ارائه شود. برای این منظور، مدل‌هایی با شرایط مرزی ساده و تنها یک واحد رنولژیکی طراحی و تحلیل شده است. برای شبیه‌سازی شرایط شکست در نمونه‌ها، مدل‌ساز ژئومکانیکی Flac 2D به کار برده شده است. شرایط تنش تجربه شده در هنگام شکست نمونه‌ها در آزمایشگاه از داده‌های اصلی برای شبیه‌سازی شرایط شکست توسط روش تفاضل محدود بوده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب چسبندگی و مقاومت تک محوری کششی از متغیرهای حساس در کنترل شرایط شکست هستند. از این رو اگر ضریب چسبندگی و مقاومت کششی به ترتیب 26MPa و 29MPa اختیار شود، آن‌گاه برای بخش بالایی سازند آسماری در گستره باختری شیراز مقدار ضریب یانگ و ضریب بالک به ترتیب 260GPa و 23GPa برآورد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی عددی، آهک آسماری، زاگرس، ویژگی‌های ژئومکانیکی.

*نویسنده مسئول: اله حاجی‌زاده نداف

E-mail: hajjzadehnaddaf@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

در طول چند دهه گذشته دانشمندان توانسته‌اند با روش‌های مدل‌سازی عددی (Numerical Modeling) فرایندهایی را شبیه‌سازی و تحلیل کنند که فرآیند (Uplift) و یا بازآراست (Rearrange) ساختارهای چین‌خورده و یا گسل‌خورده را کنترل می‌کنند (برای نمونه Van der Beek et al., 2002). این چنین مدل‌های عددی کمک مؤثری برای درک بهتر فرایندهای زمین‌ساختی هستند.

مدل‌های عددی طیفی گسترده‌ای از مقیاس را دربرمی‌گیرند که برای نمونه در یک سو، مقیاس نمونه دستی (10×20 cm) و در سوی دیگر مقیاس ناحیه‌ای فرایند فرورانش (100×10 km) است. در این پژوهش شرایط شکست برای نمونه‌های سیلندری بخش بالایی واحد آسماری شبیه‌سازی شده که هدف از این شبیه‌سازی ارائه برآورد منطقی از شرایط ژئومکانیکی این بخش از سازند مورد بررسی است. همچنین محدوده مقادیر برخی از متغیرهای ژئومکانیکی برای سنگ آهک به طور عمومی و بدون توجه به ویژگی‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است.

سازند آسماری با سن الیگومیوسن، مهم‌ترین سنگ مخزن میدین نفتی جنوب باختر ایران است. با وجود اینکه مطالعات بی‌شماری روی سازند آسماری انجام شده است ولی هنوز اطلاعات جامعی از شرایط فیزیکی، چگونگی تکوین حوضه رسوبی مربوط، چگونگی فرگشت آن در طول زمان و ویژگی‌های مکانیکی این سازند در دسترس نیست. همچنین در این سازند به دلیل گوناگونی ویژگی‌های سنگ‌شناسی، شرایط مساعدی برای گسترش عوارض سنگ زایش ایجاد شده است که خود عاملی در تنوع رفتار مکانیکی است.

اولین مقاله منتشر شده که اشاره به سازند آسماری می‌کند، Busk & Mayo (1918) است. آنها، ردیفی از سنگ‌های آهکی دربرگیرنده کرتاسه تا اوسن را سری آسماری نام نهادند. Thomas (1948) مطالعه جامعی روی سازند آسماری انجام داد و سن سازند آسماری را از الیگوسن تا بوردیگالین بیان کرد.

Lacassagne (1963) فاز رسوبی در الیگوسن و ۳ فاز دیگر در میوسن برای این سازند تشخیص داد. Wells (1967) ویژگی‌های سنگ رخساره‌ای سازند آسماری را مطالعه کرد و نشان داد که این سازند در ۳ زیرحوضه رسوب‌گذاری شده است. سازند آسماری در بخش‌های بالایی خود ترکیبات تبخیری دارد و این در حالی است که این سازند در بخش‌های پایین، دربردارنده ترکیبات دولومیتی است که گاه با اندریت در شکل سیمان و یا گرگک همراه می‌شود (مطبعی، ۱۳۷۲ به نقل از امیدپور، ۱۳۸۳). بررسی‌های تازه‌تر (برای نمونه Wennberg et al., 2007) نشان می‌دهد که دولومیتی شدن از عامل‌های مهم در کیفیت واحد آسماری به عنوان سنگ مخزن ذخایر نفت است. روشن است که فرایند دولومیتی شدن خود در تغییر ویژگی مکانیکی این واحد نیز مؤثر است. این به گونه‌ای است که در طول این فرایند، میزان روزنگی (Porosity) نیز افزایش و چگالی نمونه کاهش می‌یابد. سازند آسماری به دلیل گسترش قابل توجه در زاگرس نقشی کلیدی در برش‌های ساختاری دارد (Blanc et al., 2003; McQuarrei, 2004; Sherkati et al., 2006). این سازند آهکی بر پایه میزان ترکیبات مارنی دارای گوناگونی رفتار مکانیکی از شرایط نزدیک به کم‌قوام تا پر قوام است. هر چند به دلیل تغییر در ویژگی سنگ‌شناختی واحد آسماری می‌توان انتظار تغییر در رفتار مکانیکی این سازند را در مقیاس منطقه‌ای داشت ولی می‌توان با برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند برای یک ساختار، اطلاعات مفیدی را در زمینه نقش سازند در کنترل پراکنندگی تغییر شکل‌ها به دست آورد. از همین رو در این پژوهش تلاش شده است تا با کاربری از نتایج آزمون‌های سه محوری روی نمونه‌های آهکی سازند آسماری و با شبیه‌سازی شرایط شکست به روش عددی و بررسی نتایج به دست آمده، برآوردی منطقی از ویژگی‌های ژئومکانیکی بخش بالایی این سازند در گستره باختری شیراز (تاقدیس دراک) به دست آورد. برای این منظور ابتدا به چگونگی نمونه‌برداری برای آزمون‌های آزمایشگاهی و نتایج آن

اشاره خواهد شد و سپس با اشاره به مدل‌سازی عددی به چگونگی برآورد ویژگی ژئومکانیکی سازند مورد بررسی پرداخته می‌شود.

۲- آزمون‌های سه محوری روی نمونه‌های سازند آسماری

گسترش چین‌خوردگی‌ها در گستره زاگرس نتیجه همگرایی فعال میان صفحه عربی و ایران مرکزی است. این چنین همگرایی در کنار حضور واحدهای کم‌قوام (همچون گچساران و یا سری هرمز) عاملی در تنوع مقیاس ساختارهای چین‌خورده و همچنین ایجاد شیب سطح محوری چین‌خوردگی‌هاست. در این میان، سازند آسماری به عنوان سازند پرقوام (Competent) در برابر تنش‌های زمین‌ساختی، حضوری قابل توجه در تغییر شکل‌ها دارد. بسیاری از بررسی‌های مکانیکی روی نمونه‌های سنگی نشان می‌دهند که گوناگونی در الگوی اعمال تنش سبب می‌شود که در بسیاری موارد مدل پیچیده از شرایط شکست در طبیعت ایجاد شود. بنابراین شرایط کشش، برش و یا خمش و فشارش می‌توانند شرایط شکست را در مدلی پیچیده ایجاد کنند. آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند که خردشدگی و یا شکست برآمده از فشارش در طول فرایندهای پیچیده شکل می‌گیرد که خود می‌تواند در بردارنده ترک‌های کششی و تداخل آنها با برش و خمش در قطعات خرد شده باشد. هر چند برای آزمون‌های سه محوری انجام شده روی نمونه‌های بخش بالایی سازند آسماری اشاره به وجود این چنین ترک‌های کششی و تداخل آنها با برش شده است، ولی در این مطالعه تنها از مدل ساده شکست برای بخش بالایی واحد آسماری در شرایط آزمون سه محوری استفاده و به مقایسه آن با شرایط ایجاد شکست در طی مدل‌سازی رقومی پرداخته شده است.

برای انجام آزمون‌های تک محوری و سه محوری ۳ نمونه دست نخورده صحرایی به ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر از رخنمون بخش بالایی واحد آسماری در باختر شیراز برداشت شده است (شکل ۱). بخش بالایی واحد آسماری در منطقه اشاره شده در بردارنده آهک ماری است که گاه با گرهک‌های (نودول‌های) آهن سه ظرفیتی همراه می‌شود. این آهک‌های ماری رنگ کرم روشن دارند و تغییر رخساره کمی به سوی مناطق پیرامون نشان می‌دهند. این به‌گونه‌ای است که به سوی مناطق شمال باختر، بخش بالایی واحد آسماری ترکیبات تبخیری سولفات‌های دارد و به سوی مناطق جنوبی این واحد بیشتر آهکی است تا آهک ماری. نمونه‌های آهک ماری که در جایگاه نمونه‌برداری‌ها گزینش شده‌اند، در آزمایشگاه به ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر بریده و سپس به کمک تجهیزات حفاری ELE CD-100 نمونه‌های سیلندری به طول ۱۲ و قطر ۵/۴ سانتی‌متر تهیه شده است. بنابراین نمونه‌ها نسبت عرض به طول ۰/۵ دارند. تست‌های سه محوری روی این نمونه‌ها توسط ماشین EL70-510 انجام شده است (Oveisi, 1993). این ماشین به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان اعمال فشار ۳/۵ تا ۷۰ مگاپاسکال را در یک شرایط اولیه هیدرواستاتیک مهیا می‌کند. برای آزمون سه محوری، ابتدا نمونه‌های سیلندری در یک محافظ لاستیکی (Jacket) و سپس نمونه در سیلندر فشار قرار گرفته است. پس از آن فشار روغن در پیرامون محافظ لاستیکی تنظیم شد و سپس با ثابت نگاه داشتن تنش همه‌جانبه ($\sigma_1 = \sigma_3$) و افزایش تدریجی σ_2 نمونه متمایل به شرایط شکست می‌شود. شکل ۲ نمونه‌ای از آهک آسماری است که زیر آزمون سه محوری دچار شکست شده است.

در جدول ۲ نتایج ۳ آزمون سه محوری بر روی نمونه‌های سیلندری آسماری آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که آهک ماری آسماری زیر فشار همه‌جانبه ۱۰ مگاپاسکال می‌تواند بیشینه فشار ۲۰۰/۹ مگاپاسکال را تحمل کند. زاویه θ برای این چنین شرایط شکست ۶۰ درجه است. مقدار آستانه تحمل بیشینه فشار ۱۷۸/۴ و ۱۹۰/۶ مگاپاسکال برای این چنین نمونه در شرایطی است که فشار همه‌جانبه به ترتیب ۶-۴ و ۹ مگاپاسکال باشد. زاویه اصطکاک درونی (ϕ) برای تست‌های انجام شده ۳۸/۵ درجه و چسبندگی حدوداً ۳۲ مگاپاسکال برآورد شده است (شکل ۳).

در بخش بعدی تلاش شده است تا با شبیه‌سازی شرایط شکست نمونه آسماری، پاره‌ای از ویژگی‌های مکانیکی این سازند برآورد شود.

۳- مدل عددی دوبعدی شکست برای بخش بالایی واحد آسماری

تفاوت در ویژگی‌های مکانیکی واحدهای سازگار و ناسازگار در توالی پوشش رسوبی زاگرس از نکات مهم در مدل‌سازی عددی تغییر شکل‌های فعال در زاگرس است. در چنین مدل‌سازی‌ها باید اطلاعات کافی در زمینه متغیرهای ژئومکانیکی واحدهای درگیر با تغییر شکل‌ها موجود باشد.

برای شبیه‌سازی شرایط شکست و برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی بخش بالایی آهکی سازند آسماری در گستره مورد بررسی، نرم‌افزار مدل‌ساز Flac 2D به کار برده شده است. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی رفتار یک ساختار و یا نمونه خاکی و سنگی را در شرایط دست‌یابی به نقطه تسلیم و یا جریان پلاستیک دارد. برای آزمون‌های سه محوری انجام شده، بیشینه بارگذاری در حالتی است که $\sigma_1 = P/A$ و $\sigma_2 = \sigma_3 = P$ باشد، در شرایطی که P بیشترین فشار به موازات نمونه مدل شده و فشار، همه‌جانبه است. این شبیه‌سازی در ۲ بعد و برپایه روش تفاضل محدود بوده و از معیار موهر - کلمب استفاده شده است. این معیار شرایط شکست برای سنگ را با مدلی خطی ارائه می‌کند. برای انجام مدل‌سازی تلاش شده تا شرایط نمونه آزمایشگاهی بررسی و این شرایط در مدل دو بعدی تعریف شود. تعریف شرایط مرزی نمونه به شکل برشی دو بعدی از نمونه سیلندری و از ماده‌ای همگن است (شکل ۴).

نسبت طول به عرض مدل با نمونه‌هایی که در آزمایشگاه تحت آزمون سه محوری قرار گرفته‌اند یکسان است. مدل مکانیکی تنها یک واحد رئولوژیکی است و فرض بر این است که نمونه در مقیاس مورد بررسی از مدل الاستیک پیروی می‌کند. گفتنی است که نتایج مدل‌سازی عددی که برای شبیه‌سازی توپوگرافی جوان در منطقه زاگرس مرکزی انجام شده است (Oveisi, 2007) نشان می‌دهد که در صورت پذیرفتن شرایط ویسکوالاستیک برای سازند گچساران ($\gamma \approx 2E21$)، سازند آسماری به عنوان واحد بلافضل زیرین باید در طول تغییر شکل‌ها، درگیر با رفتار الاستوپلاستیک باشد. این رفتار در شرایطی است که یا ترکیب ماری سازند آسماری تا اندازه‌ای است که این واحد را آهک ماری می‌نامند، و یا می‌توان شبکه‌ای فشرده از خردشدگی و شکستگی را در آن ردیابی کرد. بنابراین هرچند انتظار می‌رود که در مقیاس منطقه‌ای واحد آسماری به دلیل اثر مقیاس، در شکل واحدی الاستوپلاستیک رفتار کند ولی با توجه به مقیاس نمونه‌های مورد بررسی، تمایل به رفتار پلاستیک در آن صفر فرض شده است و فرض بر این است که ایجاد شکست در مدل در شرایط الاستیک انجام پذیرفته است. اعمال تنش به پیرامون مدل عمود بر سطح و بدون هرگونه شیب تغییر در تنش است (شکل ۴). در چنین شرایطی برای برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی بخش آهکی سازند آسماری تلاش شده تا شرایط شکست برای شرایط مرزی تعریف شده با ایجاد شرایط اعمال تنش آزمایشگاهی شبیه‌سازی شود. برای بررسی و نمایش بهتر شرایط شکست در مدل، از منحنی‌ها و یا نمایش تغییر در میزان تنش استفاده شده است (شکل ۵).

این چنین تغییری گویای ایجاد شرایط صفحه برشی، ناشی از اعمال شرایط تنش است. با توجه به در اختیار داشتن نتایج ۳ آزمون آزمایشگاهی سه محوری، امکان مقایسه این نتایج با نتایج هر مرحله از شبیه‌سازی‌ها فراهم شد که خود عاملی در کاهش عدم قطعیت برآوردهاست. در پایان میانگین نتایج عددی برآورد شده به عنوان برآورد پایانی از ویژگی ژئومکانیکی بخش بالایی واحد آسماری پیشنهاد شده است (جدول ۲). نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که چسبندگی (C) حساس‌ترین متغیر ژئومکانیکی در کنترل شرایط شکست برای مدل است. از این رو در ایجاد شرایط شکست برای مدل (همخوان با شرایط تنش) که به شکست در

$\sigma_3 - \sigma_3'$ با افزایش ترکیبات مارنی در واحد آسماری و یا افزایش رفتار پلاستیکی سازند افزایش می‌یابد. این در حالی است که در طول مدل‌سازی عددی، فرض بر رفتار محض الاستیک و تغییر نکردن مقدار σ_3 در طول آزمون بوده است. با آگاهی از وجود این چنین خطاهایی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در شرایط تنش شناخته شده می‌توان به گونه‌ای نسبی شرایط شکست را به ویژگی ژئومکانیکی بخش بالایی سازند آهکی آسماری مربوط دانست.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در صورتی که σ_1 و σ_3 برای هر مرحله از آزمون‌های عددی ثابت فرض شود، تغییر در مقدار چسبندگی بیشترین نقش کنترلی را در میل به شرایط شکست دارد. در مدل عددی، مقاومت تک محوری کششی به عنوان متغیر دوم اعمال می‌شود که این به دلیل ارتباط میان تغییر در مقدار چسبندگی و مقاومت تک محوری نمونه است. الگوی تغییرات میان چسبندگی و مقاومت تک محوری کششی به کمک رابطه $\sigma_1 = m/n$ به دست آمده است که $m = 2C(\cos\phi)$ و $n = 1 + \sin\phi$ است.

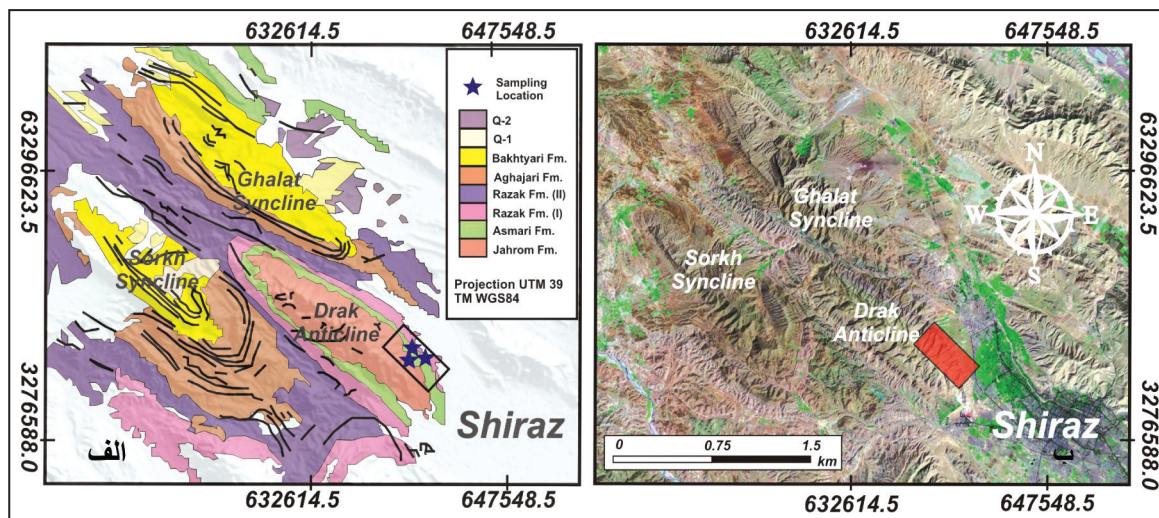
گفتنی است که هر چند دیگر متغیرهای ژئومکانیکی نیز در میل به شرایط شکست نمونه مؤثر بوده ولی نقش کم‌اهمیت‌تری در کنترل این شرایط داشته‌اند. جدول ۳ مشخصات ژئومکانیکی برآورد شده به روش مدل‌سازی عددی و جدول ۴ برخی از این مقادیر برای دو نمونه سنگ آهک را نشان می‌دهد.

بر پایه نتایج به دست آمده برای بخش پایین (بخش بالایی) واحد آسماری در گستره باختری شیراز، ضریب بالک و برشی برابر با $2.3E10$ و $2.6E11$ پاسکال پیش‌بینی می‌شود. این برآورد در شرایطی است که مقدار چسبندگی و مقاومت تک محوری کششی این واحد به ترتیب $0.25E6$ و 222891.6 پاسکال فرض شود. همان‌گونه که اشاره شد پیش‌بینی می‌شود که ویژگی ژئومکانیکی منطقه‌ای بخش آهکی سازند آسماری به دلیل اثر مقیاس و تأثیر رفتار الاستیکی با برآوردهای انجام شده که بر پایه کاربری از شرایط شکست نمونه‌های دستی است، با پاره‌ای از اختلاف‌ها همراه باشد.

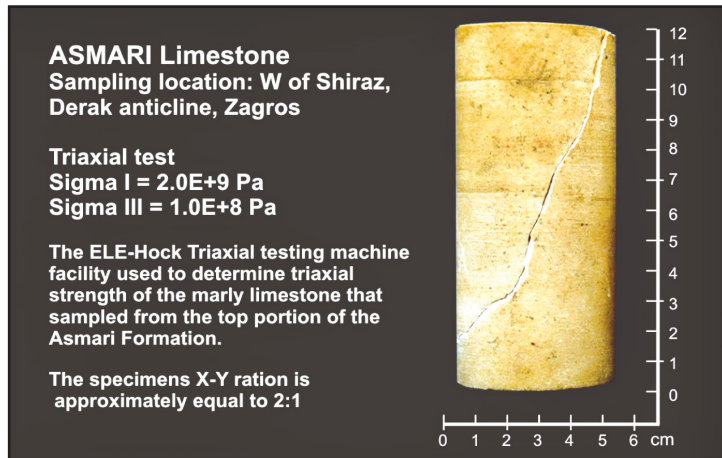
آزمایشگاه می‌انجامد، تلاش شده است تا متغیر چسبندگی و مقاومت تک‌محوری کششی به عنوان متغیرهای اصلی به شمار آیند. آشکار است که دیگر متغیرهای ژئومکانیکی همچون مدول بالک و یا مدول برشی نیز در تغییر شرایط شکست مؤثر هستند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که اشاره شد، هدف از این پژوهش معرفی روشی برای برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی نامشخص یک واحد زمین‌شناختی با تلفیقی از کاربری آزمون سه محوری در آزمایشگاه مکانیک سنگ و مدل‌سازی عددی است. گوناگونی در الگوی اعمال تنش سبب می‌شود که در بسیاری موارد مدل پیچیده‌ای از شرایط شکست در طبیعت ایجاد شود. بنابراین شرایط کشش و یا خمش و یا فشارش می‌تواند شرایط شکست را در مدلی پیچیده ایجاد کنند. آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند که خردشدگی و یا شکست ناشی از فشارش در طول فرایندی پیچیده شکل می‌گیرد و می‌تواند در بردارنده ترک‌های کششی و تداخل رشد این چنین ترک‌هایی با برش و خمش در قطعات خرد شده باشد. این در حالی است که در شبیه‌سازی شرایط شکست بسیاری از این پیچیدگی‌ها حذف شده است. روشن است که طراحی و تعریف شرایط مرزی برای آزمون‌ها باید به گونه‌ای باشد تا کمترین خطا در نتایج به دست آید. این در حالی است که از عامل‌های خطا برای مدل‌های آزمون شده در این پژوهش شیب ناگهانی در نسبت تنش به واکنش در لبه‌های تیز نمونه است که برای کاهش اثر آن، تراکم شبکه (Mesh Density) افزایش یافته است. از سوی دیگر از خطاهای شناخته شده در طول آزمون‌های سه محوری در آزمایشگاه، نبود شرایط صد در صد ثابت فشار در طول آزمایش بوده است (Oveisi, 1993). این بدان گونه است که با افزایش تنش σ_1 به دلیل تغییر چگالی پیش از شکست، مقدار در سلول فشار دستگاه سه محوری افزایش می‌یابد و به مقدار σ_3' می‌رسد. مقدار

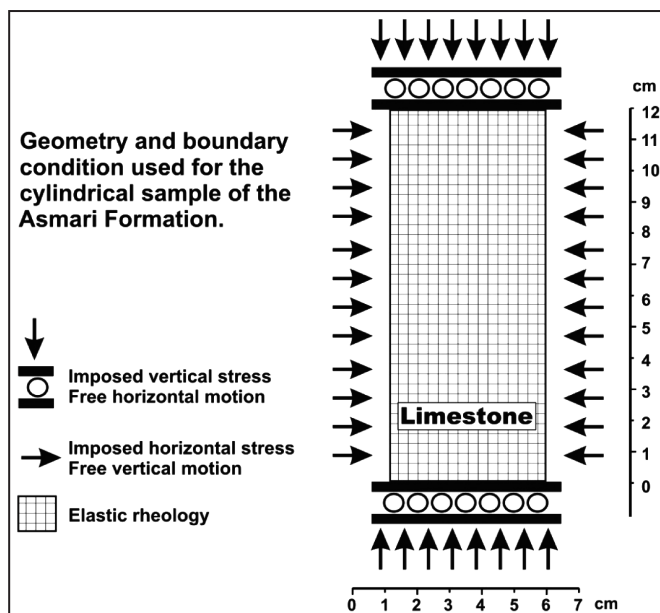
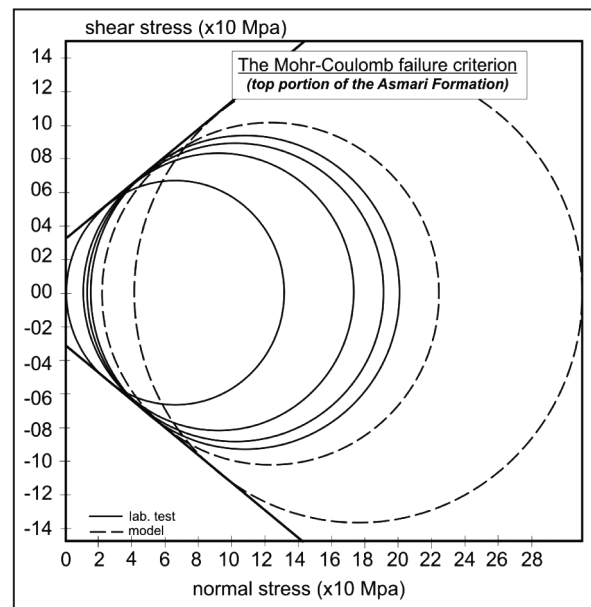


شکل ۱- جایگاه نمونه‌برداری برای انجام آزمون‌های سه محوری در گستره باختری شیراز. الف) تلفیقی از مدل توپوگرافی و نقشه زمین‌شناسی. نشانه‌های ستاره جایگاه نمونه‌برداری‌ها را نشان می‌دهند؛ ب) تصویر Landsat از گستره شیراز و پهنه بلافضل شمال-شمال باختری. کادر توپر قرمز محل نمونه‌برداری از بخش بالایی واحد آسماری را نشان می‌دهد.

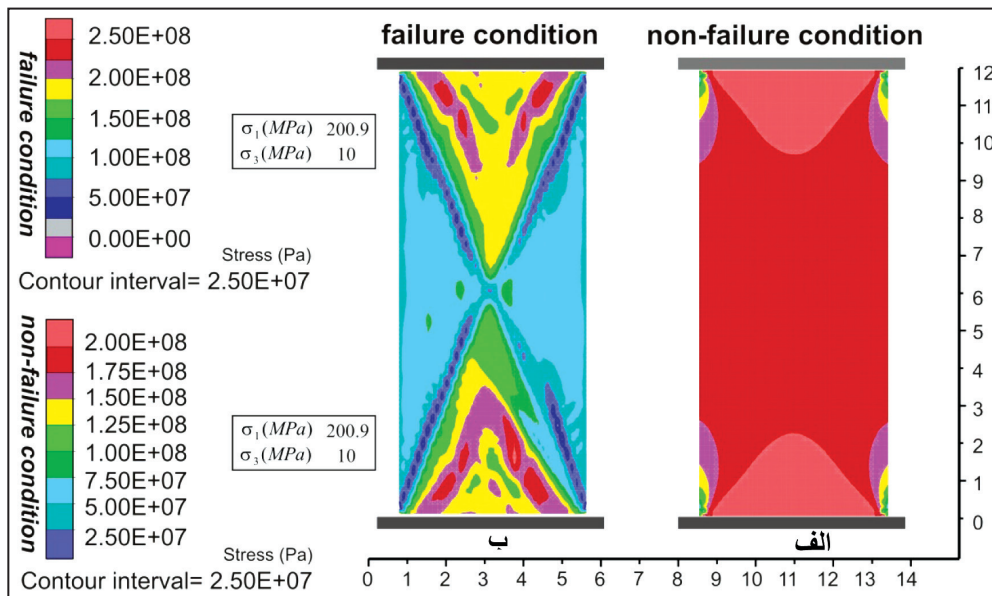


شکل ۲- نمونه‌ای از آهک آسماری که تحت آزمون سه محوری دچار شکست شده است. در این آزمایش از سلول فشار سه محوری ELE-Hock که بخشی از تجهیزات آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی بخش علوم زمین دانشگاه شیراز است استفاده شده است (Oveisi, 1993).

شکل ۳- دایره موهر برای بخش بالایی سازند آسماری که بر پایه آن زاویه اصطکاک داخلی ۳۸/۵ و چسبندگی ۳۲ مگاپاسکال است. دایره خط‌چین بر پایه معیار شکست به دست آمده پیش‌بینی شده‌اند.



شکل ۴- شرایط مرزی طراحی شده برای شبیه‌سازی شرایط شکست در نمونه‌های سیلندری آهک آسماری. شرایط رئولوژیکی در نظر گرفته شده الاستیک و همه مرزها دارای آزادی حرکت به موازات مرز است.



شکل ۵- مدل‌های شبیه‌سازی شده از نمونه‌های سیلندری در آزمون‌های سه محوری در ۲ وضعیت الف) بدون شکست و ب) با شکست. در هر ۲ مدل شرایط تنش یکسان است.

جدول ۲- نتایج آزمون‌های سه محوری روی نمونه استوانه‌ای سازند آسماری (Oveisi, 1993).

$\sigma_1 (MPa)$	200.9	190.6	178.4
$\sigma_3 (MPa)$	10	9	4-6
$\theta (^\circ)$	60	59	60
$\phi (^\circ)$	38.5		
$C (MPa)$	32		

جدول ۱- مقادیر ژئومکانیکی که برای سنگ آهک به طور عمومی اعلام شده است.

$\rho (kg/m^3)^{\text{£}}$	$K_\mu (Pa)$	$\phi (^\circ)^{\text{¥}}$	$C (Pa)^{\text{¥}}$	$Sh_\mu (Pa)^{\text{£}}$
2620-2300	0.04-14E+10	33-37	0.25E+6	9.8-49E+6
$\nu^{\text{©}}$	$E (Pa)^{\text{©}}$	$D (^\circ)$	$\sigma_t (Pa)^{\text{©}}$	
0.08-0.39	1-92E+9	0	48-210E+6	

£ Lama & Vutukuri (1978)

¥ Hoek (1970); Hoek & Bray (1974)

© kulhawy (1975); Lama & Vutukuri (1978)

$\rho (kg/m^3)$	$K_\mu (Pa)$	$\phi (^\circ)$	$C (Pa)$	$Sh_\mu (Pa)$
2700	2.3E+10	42	0.25E+6	1.1E+10
ν	$E (Pa)$	$D (^\circ)$	$\sigma_t (Pa)$	
0.16	2.6E+11	0	222891.6	

جدول ۳- ویژگی‌های ژئومکانیکی پایانی به دست آمده برای مدل در بخش بالایی سازند آسماری (σ_1 : مقاومت تک محوری کششی، K_μ : مدول بالک، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی، D : زاویه آماس، E : مدول تغییر شکل قطری، ν : ضریب پواسون، Sh_μ : مدول برشی، ρ : چگالی یا جرم حجمی، C : مقاومت چسبندگی)

جدول ۴- دو نمونه سنگ آهک برای مقایسه با برخی متغیرهای ژئومکانیکی به دست آمده.

Name	$C(MPa)$	$\phi (^{\circ})$	$\sigma_3(MPa)$	Reference
Wolp Camp Limestone	23.6	34.8	0-23	¥
Indiana Limestone	6.7	42	0-9.6	£

¥ Handin & hager (1957)
£ Schwartz (1964)

کتابنگاری

امیدپور، آ.، ۱۳۸۳ - سکانس استراتیگرافی سازند آسماری و بررسی دیاژنز و محیط رسوبی آن در میدان نفتی کوپال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
مطیعی، ه.، ۱۳۷۲ - زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی زاگرس، سازمان زمین‌شناسی کشور، طرح تدوین کتاب، تهران.

References

- Blanc, E. J. P., Allen, M. B., Inger, S. & Hassani, H., 2003- Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran, *J. Geol. Soc. Lond.*, 160, 401-412.
- Busk, H. G. & Mayo, H. T., 1918- Some notes on the geology of the Persian oilfields; *Journ. Inst. Of Petrol. Tech.*, V. 5, No. 17.
- Handin, j. & hager, R. V., 1957- , *Bull. A. A.P.G.*, 41:1-50.
- Hoek, E. & Bray, J. W., 1974- *Rock Slope Engineering*, institution of mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., 1970 - *Rock Slope Engineering*, institution of mining and Metallurgy, London.
- Kulhawy, F. L., 1975- Stress Deformation/ properties of Rock and Rock Discontinuities, *Engineering Geology*, Vol. 9, pp. 327-350.
- Lacassagne, R. M. A., 1963- Asmari sedimentary environments, IOOC Report NO. 1041 (unpub.).
- McQuarrie, N., 2004- Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran, *J. Struct. Geol.*, 26, 519-535.
- Oveisi, B., 1993- Failure criteria and mechanical properties of some geological formation (Zagros), *BSc Thesis*. 310 P, University of Shiraz, Shiraz.
- Oveisi, B., 2007- Rates and processes of active folding in the central Zagros—Iran, *PhD thesis*. 216 p., Universit'e Joseph Fourier, Grenoble.
- Schwartz, A. E., 1964- Pro. 6th Symp. On Rock Mech., Rolla, Missouri, PP. 109-15.
- Sherkati, S., Letouzey, J. & Frizon de Lamotte, D., 2006- Central Zagros fold-thrust belt (Iran): new insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling, *Tectonics*, 25, doi:10.1029/2004TC001766.
- Thomas, A. N., 1948- The Asmari Limestone of southwest Iran. AIOC Report, no. 706, unpub.
- Van der Beek, P., Champel, B. & Mugnier, J., 2002- Control of detachment dip on drainage development in regions of active fault-propagation folding, *Geological Society of America*, v. 30; no. 5; p. 471-474; DoI : 10.1130/0091 - 7613(2002) 030<0471:CODDOD>2.0.CO;2.
- Vutukuri, V. S. & Lama, R. D., 1978- *Handbook on mechanical properties of rocks*. Trans Tech Publications.
- Wells, A. J., 1967- Lithofacies and Geological history of lower Tertiary sediments in Southwest Iran IOOC Report No. 1108(unpub.).
- Wennberg, O. P., Azizzadeh, M., Aqravi, A. A. M., Blanc, E., Lyslo, K. B., Pickard, N., Salem, L. D. & Brockbank, P., 2007- The Khaviz Anticline: an outcrop analogue to giant fractured Asmari Formation reservoirs in SW Iran, *Geological Society, London, Special Publications*; 2007; v. 270; p. 23-42; DOI: 10.1144/GSL.SP.2007.270.01.02

Evaluation of Geomechanical Properties of the Asmari Formation (Zagros, W Shiraz) with Incorporation of Laboratory Tests and Numerical Modeling

E. Hajizadeh Naddaf^{1*}, B. Oveisi², M. R. Ghasemi³ & M. J. Bolurchi⁴

¹ M.Sc., Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran; Geo-Math Group, Applied Geological Research Center of Karaj, Karaj, Iran

² Ph.D., Seismotectonic Group, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁴ M.Sc., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2010 January 27

Accepted: 2012 February 29

Abstract

The analytical models in rock mechanics represent suitable analysis of deformation and failure conditions of the samples bearing simple geometry and mechanical properties. Nowadays different methods of numerical modeling, like finite difference method (FDM), are used for analysis of continuous, non- and quasi- continuous behavior. This paper represents logical estimate of geomechanical properties of the Asmari formation with usage of the results of triaxial tests on intact rock samples of the upper limy part of this formation and also the finite difference methods. For this purpose, we designed some models containing simple boundary condition and only one rheological unit. To simulate the failure conditions of the samples, a geomechanical simulative software (Flac 2D) was used. The failure of samples under the experienced stress conditions in laboratory were of basic data for simulation of failure conditions by finite difference method. The results show that the cohesion coefficient and uniaxial tensile strength are of sensitive parameters in controlling the failure conditions. This study suggests that the values of Young's and Bulk modulus are 260GPa, 23GPa, respectively, when the uniaxial tensile strength and cohesion coefficient are considered 29MPa and 26MPa, respectively.

Keywords: Numerical modeling, Asmari formation, Zagros, Geomechanical properties

For Persian Version see pages 57 to 62

*Corresponding author: E. Hajizadeh Naddaf; E-mail: hajizadehnaddaf@yahoo.com