ارائه مدلی بین مدول دینامیکی و استاتیکی سنگ آهک در سازند آسماری براساس آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا

آکو دارای*؛ دانشگاه سوران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، کردستان، عراق،
شکراله زارع؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکدهٔ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

تاریخ: دریافت ٩٥/٠٣/٢٥ پذیرش ٩٦/٠٥/٢٩

چکیده

آگاهی از مدول تغییرشکل سنگ برای طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی و مدل‌سازی مخازن نفتی اهمیت زیادی دارد. در حالت کلی برای تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری سنگ دو روش مخرب یا استاتیکی و غیرمخرب یا دینامیکی وجود دارد، لیکن باتوجه به زمان‌بر بودن و هزینهٔ زیاد روش‌های مخرب نسبت به افزایش عمق، استفاده از روش‌های غیرمخرب متداول‌تر است. از آن‌جاکه سازند آسماری به‌طور گسترده‌ای در بخش چشم‌گیری از غرب و جنوب‌غرب کشور رخنمون داشته و پروژه‌های مهندسی زیادی در این سازند اجرا و در دست بررسی است، بررسی خصوصیات ژئومکانیکی آن اهمیت خاصی دارد. ارائهٔ عمده روابط تجربی در زمینهٔ ارتباط مدول‌های استاتیکی و دینامیکی با توجه به پژوهش‌های انجام شده در مناطق دیگر جهان و پراکندگی و مستقل بودن پژوهش‌های انجام شده بر سازند آسماری به‌دلیل وسعت زیاد آن از یک طرف و اهمیت سازند مذکور از نظر پروژه‌های نفتی و عمرانی از طرف دیگر، لزوم ارائه معیاری فراگیر حاصل از تمامی بررسی‌های انجام شده روی سازند آسماری که بتواند بیان‌کننده ارتباط بین مدول‌های استاتیکی و دینامیکی در آن باشد را نمایان‌تر کرده است. در این راستا در مقالهٔ حاضر با استفاده از مدول‌های به‌دست آمده از روش ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای و مدول‌های استاتیکی به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی سنگ سالم در تونل قلاجه واقع در سازند آسماری در استان ایلام، ارتباط بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی ساختگاه تعیین و سپس با بررسی تحقیقات و معیارهای ارائهٔ شده قبلی در این سازند، رابطه‌ای فراگیر برای بیان ارتباط بین مدول‌های استاتیکی و دینامیکی ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: مدول استاتیکی، مدول دینامیکی، سازند آسماری، تونل قلاجه

*نویسنده مسئول Daraii2004@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

مقدمه

امروزه یکی از روش‌های برآورد سریع و کم‌هزینه تعیین ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ، به‌ویژه در پروژه‌های عمرانی و نفتی استفاده از روش‌های دینامیکی است. هر چند آزمون‌های استاتیکی نتایج واقع بینانه‌تری نسبت به روش‌های دینامیکی به‌دست می‌دهند لیکن هزینهٔ انجام آن بیش‌تر است و اندازه‌گیری‌ها به نقاط دارای مغزه محدود می‌شود [۱]. مدول الاستیک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی، بیان‌گر صلبیت و میزان ظرفیت باربری مواد است به‌طوری‌که جزء اصلی‌ترین پارامترهای تحلیل و طراحی قلمداد می‌شود که تعیین آن تقریباً در تمامی پروژه‌های ژئومکانیکی غیرقابل اجتناب است [۲]. برای به‌دست آوردن مدول تغییرشکل دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش‌های مستقیم یا مخرب که روش استاتیکی نیز نامیده می‌شوند، نمونه سنگ تخت بارگذاری آزمون مقاومت فشاری تک محوری یا سه‌محوری قرار گرفته و با استفاده از شیب خط منحنی تنش محوری-کرنش محوری مقدار مدول تغییرشکل تعیین می‌شود. لیکن در روش غیرمستقیم یا غیرمخرب که به روش‌های دینامیکی نیز معروف هستند، امواج فشاری و برشی به محیط میزبان (نمونه سنگ یا توده سنگ برجا) ارسال و با استفاده از سرعت امواج برگشتی ثبت شده به‌وسیلهٔ ژئوفون‌ها و به‌کارگیری روابط (۱) و (۲) مقادیر مدول‌های تغییرشکل را محاسبه می‌کنند به‌طوری‌که در این حالت مدول‌های الاستیک سنگ اصطلاحاً مدول‌های الاستیک دینامیکی نامیده می‌شود [۳].

$$E_d = \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \qquad (۱)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E_d = \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \qquad (۲)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \qquad \text{V}$$

V_p: سرعت موج فشاری، V_s: سرعت موج برشی، E_d: مدول الاستیک دینامیکی، ρ_{bulk}:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

دانسیتهٔ سنگ، ν: ضریب پواسون محیط

در حالت کلی پارامترهای الاستیک به‌دست آمده از روش‌های استاتیکی و دینامیکی اغلب با هم متفاوت و در عمده حالات مقادیر مدول‌های دینامیکی بیش‌تر از استاتیکی هستند [٤]. مقادیر این اختلاف تحت تاثیر ناپیوستگی‌ها، تخلخل، درجهٔ سیمانی شدن و فشار آب منفذی متغیر است [٥]. اولین بررسی‌ها در ارتباط با ارائهٔ مدلی بین مدول دینامیکی و استاتیکی را کوجوندازیک[1] و گروجیک[2] (١٩٦٦) براساس بررسی پی تعدادی سد در یوگسلاوی سابق انجام شده است. در ادامه تحقیقات، بلیکو[3] و همکاران (١٩٧٠)، وان هیردن[4] (١٩٧٨)، کینگ[5] (١٩٨٣)، عیسی[6] و قاضی[7] (١٩٨٨)، مک‌کین[8] و انتویسل[9] (١٩٩٢)، لاکی[10] (١٩٩٧)، نور[11] و وانگ[12] (١٩٩٩)، موکوویکاکو[13] و همکاران (٢٠٠٣) و امین[14] و همکاران (٢٠٠٩)، فی[15] و همکاران (٢٠١٦) معیارهایی مطابق جدول ١ ارائه دادند [٦]–[١٥]. تحقیقات در این زمینه را در ایران از اوایل دهه ٨٠ شمسی واحدی (١٣٨٠) شروع کرده و با تحقیقات فولادچی و همکارانش (١٣٨٥)، زارعی و داودی (١٣٨٨)، صالحی و همکارانش (١٣٨٩)، نجیبی و همکارانش (١٣٩٠)، کریم‌نژاد (١٣٩٢) و علی‌زاده و همکارانش (١٣٩٣) ادامه یافته است [١٦]–[٢٢]. سازند آسماری در ایران که عمدتاً از آهک‌های مقاوم تشکیل شده است به‌دلیل ذخایر نفتی زیاد و نیز محیط میزبان پروژه‌های بزرگ عمرانی در ایران از قبیل سدهای کارون ٣، کارون ٤، سیمره، سلمان فارسی، بازفت و ... اهمیت خاصی دارد. از آن‌جاکه عمدهٔ طراحی‌ها در فازهای اولیه پروژه با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از روابط تجربی و جدول‌های معتبر انجام می‌گیرد، تعیین روابط تجربی بین پارامترهای مختلف در سازندهای

1 Kujundazic
2 Grujic
3 Belikov
4 Van Heerden
5 King
6 Eissa
7 Kazi
8 McCann
9 Entwisle
10 Lacy
11 Nur and Wang
12 Nur and Wang
13 Mockovciakov et al.
14 Ameen
15 Fei

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

مهم کشور می‌تواند بانک اطلاعاتی مناسبی برای استفاده در تحلیل پروژه‌های آتی به‌شمار رود. علیرغم ارائه نتایج ارزشمند از عمده بررسی‌های مذکور، لیکن مستقل بودن مطالعات موردی و انجام آن در مناطقی خاص، منجر به ارائهٔ مدل‌های مختلف شده که کاربر را در انتخاب معیار مناسب با مشکل مواجه می‌کند. برای دست‌یابی به رابطهٔ فراگیر به‌منظور تخمین پارامترهای استاتیکی سنگ بر اساس داده‌های پتروفیزیکی، هر چه تعداد مطالعات موردی بیش‌تر باشد، بانک اطلاعاتی گسترده‌تر می‌شود که این مهم به ارائهٔ دیدگاه وسیع‌تر و رابطهٔ جامع‌تری می‌انجامد. اهمیت سازند آسماری از نظر پروژه‌های عمرانی و نفتی از یک سو و آگاهی از پارامترهای ژئومکانیکی در مراحل اولیه پروژه‌های عمرانی از سوی دیگر، بررسی هر چه بیش‌تر و ارائه معیاری فراگیر در این سازند را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این راستا در مقاله حاضر به‌کمک نتایج آزمون‌های برجای ژئوفیزیکی لرزه‌ای درون چاهی سطح به عمق و آزمون استاتیکی آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های به‌دست آمده از حفاری سه‌گمانه در تودهٔ سنگ تونل قلاجه واقع در استان ایلام، علاوه بر بیان مدل ارتباطی مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در پروژه مذکور، با استفاده از مدل‌های ارائه شده در تحقیقات قبلی در سازند آسماری (جدول ۲)، معیاری جدید با در نظرگیری سنجش پراکندگی و میزبان دقت آن نسبت به مدل‌های قبلی، ارائه می‌شود.

جدول ۱. روابط تجربی میان مدول‌های تغییرشکل دینامیکی و استاتیکی ارائه شده در مناطق دیگر

مرجع	نوع سنگ	رابطه
Belikov et al.(۱۹۷۰)	گرانیت	$Es = 1.137\ Ed - 9.685$
Van Heerden(۱۹۷۸)	سنگ‌های مختلف	$Es = aE_d^b$
King(۱۹۸۳)	سنگ‌های آذرین و دگرگونی	$Es = 1.263\ Ed - 29.5$
Eissa & Kazi(۱۹۸۸)	انواع سنگ‌های رسوبی	$Es = 0.74\ Ed - 0.82$
McCann et al.(۱۹۹۲)	گرانیت	$Es = 0.64\ Ed + 6.4$
Lacy(۱۹۹۷)	ماسه سنگ، شیل، دولومیت، آهک	$Es=0.018E_d^2+0.422E_d$
Nur &Wang (۱۹۹۹)	سنگ سخت (Es>1.5 GPa)	$Es=1.15E_d-15.2$
Mockovciakov et al. (۲۰۰۳)	سنگ‌های مختلف	$Es = 0.77\ Ed + 5.85$
Ameen et al.(۲۰۰۹)	سنگ آهک	$Es=0.541E_d+12.852$
Fei et al. (۲۰۱٦)	ماسه سنگ	$Es=0.564E_d-3.4941$

واحدها گیگاپاسکال است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

جدول ۲. روابط ارائه شده بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در سازند آسماری

مرجع	موقعیت	رابطه	نوع سنگ
واحدی (۱۳۸۰)	سد سیمره	$Ed = 0.845\ Es+18.5$	سنگ آهک
زارعی و داودی (۱۳۸۸)	سد رودبار	$Ed = 0.969\ Es+32.73$	آهک دولومیتی
صالحی و همکارانش (۱۳۸۹)	سد بازفت	$Es = 0.581\ Es-4.71$	آهک و آهک مارنی
نجیبی و همکارانش (۲۰۱۵)	مناطق نفتی جنوب	$Es = 0.014\ Ed^{1.96}$	سنگ آهک

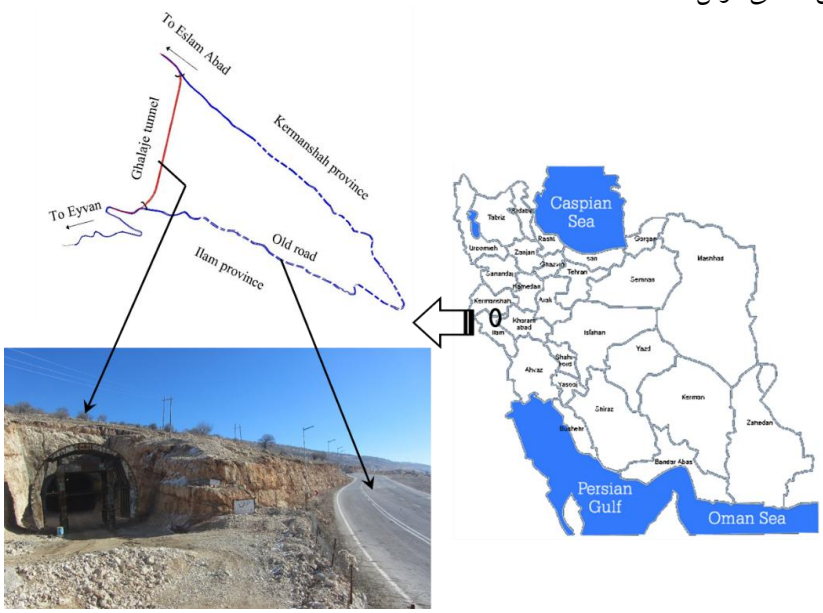
واحدها گیگاپاسکال است.

زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی مسیر پروژه

تونل قلاجه با طول ۲۵۰۰ متر و سطح مقطع حفاری ۹۸ مترمربع به شکل نعل‌اسبی اصلاح شده به‌منظور حذف گردنهٔ صعب‌العبور قلاجه و کاهش میزان تلفات جاده‌ای در محور اسلام آباد - ایوان، حد فاصل استان‌های کرمانشاه و ایلام در غرب ایران در حال ساخت است. کوتاه نمودن مسیر طرح به‌طول ۱۲ کیلومتر، کاهش تلفات جاده‌ای، مطلوب کردن راه دسترسی به شهرستان ایلام و نیز پایانه مرزی مهران از اهداف مهم این پروژه است (شکل ۱). محدودهٔ قلاجه از نظر تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی-ساختاری در بخش زاگرس چین‌خورده قرار گرفته که به‌علت فشارهای جانبی از دو سوی شمال شرقی-جنوب غربی، تاقدیس‌ها و ناودیس‌های متعددی در محدوده تشکیل شده‌اند. این محدوده از نظر زمین‌شناسی در سازند آسماری قرار گرفته، به‌طورکه از نظر لیتولوژی از سنگ‌های آهکی کرم تا قهوه‌ای رنگ تشکیل شده است. سازند آسماری جوان‌ترین سنگ مخزن پهنه زاگرس است و به‌دلیل اکتشاف نفت برای اولین بار در خاورمیانه در آن، معروفیت جهانی دارد [۲۳]. به‌دلیل مقاومت زیاد توده سنگ‌های محیط میزبان، زمان خود ایستایی تونل زیاد است که این مهم منجر به طراحی سیستم نگه‌داری سبک به‌صورت اجرای ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت همراه با نصب موضعی راک بولت‌های ۶ متری با آرایش ۱/۵×۱/۵ متر با قطر ۲۵ میلی‌متر شده است. به‌دلیل هزینه‌بر بودن انجام آزمایش‌های برجا، خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ‌های مسیر تونل‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگ سالم حاصل از سه گمانه حفاری شده در مسیر تونل با اعماق ۸۵، ۶۰ و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

۱۱۰ متری تعیین و سپس پارامترهای توده سنگ با استفاده از کد *RocData* مطابق جدول ۳ به‌دست آمد [۲٤]. باتوجه به مشخصات ژئومکانیکی محیط میزبان، مسیر تونل به سه بلوک *I*، *II* و *III* تقسیم‌بندی شد که در این بین بلوک *III* ضعیف‌ترین و بلوک *II* قوی‌ترین مشخصات ژئومکانیکی را دارد. در شکل ۲ بلوک‌بندی و محل‌های حفر گمانه‌ها روی پروفیل طولی زمین‌شناسی تونل نشان داده شده است.

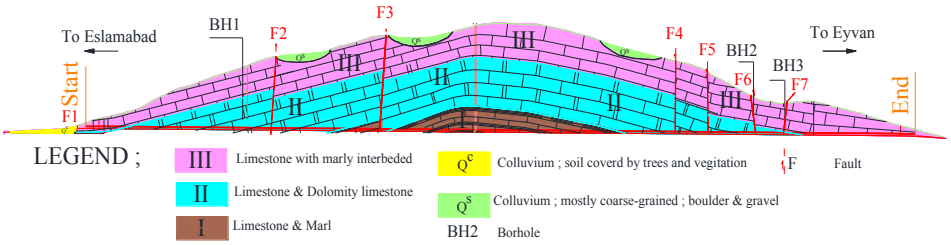


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و کوتاه کردن طول مسیر تونل قلاجه

جدول ۳. خصوصیات مکانیک سنگی توده سنگ میزبان تونل قلاجه در زون‌های مختلف

زون	لیتولوژی	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول یانگ (GPa)	RMR
I	سنگ آهک و مارن	۱/۲۵	۳۵	۵/۷	۵۲-۵۷
II	سنگ آهک و آهک دولومیتی	۱/۹	٤۰	۹	۵۲-۵۷
III	سنگ آهک با میان لایه‌های مارنی	۱/۵	۳۹	۷	٤۲-٤۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]



شکل ۲. پروفیل طولی زمین‌شناسی تونل قلاجه

آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا

آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مدول الاستیک

برای بررسی و تعیین پارامترهای الاستیک تودهٔ سنگ میزبان تونل قلاجه، آزمون‌های استاتیکی مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری روی ۱۳ نمونه سنگ سالم انتخابی از مغزه‌های به‌دست آمده از سه گمانه *BH1*، *BH2* و *BH3* حفاری شده در محور طولی تونل براساس استاندارد *ISRM* انجام گرفت. در این آزمایش پس از آمادسازی نمونه‌ها و نصب کرنش سنج‌های محوری و جانبی روی آن‌ها، نمونه‌ها در داخل دستگاه قرارگرفته و سپس با میزان بارگذاری ثابت ۱ مگاپاسکال بر ثانیه، مقاومت فشاری تک‌محوری آن‌ها از نسبت حداکثر بارمحوری در لحظه شکست بر سطح مقطع نمونه تعیین شد. هم‌چنین با در نظرگیری شیب خط مماس در ۵۰ ٪ مقاومت حداکثر بر نمودارهای ترسیم شده تنش محوری-کرنش محوری برای هر نمونه سنگ، مدول استاتیکی مماسی نیز تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در جدول ٤ ذکر شده است.

آزمایش‌های برجا برای تعیین مدول دینامیکی

در حالت کلی روش‌های لرزه‌ای برمبنای انتشار امواج مکانیکی در محیطی الاستیک استوار هستند. اساس کار تولید و ارسال امواج فشاری و برشی به محیط میزبان و دریافت سرعت امواج برگشتی به‌وسیلهٔ ژئوفون‌ها است. موج تولید شده به‌وسیلهٔ چشمهٔ لرزه‌ای به گیرنده (ژئوفون)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

جدول ٤. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

شمارهٔ نمونه	گمانهٔ محل نمونه	عمق نمونه (m)	*UCS (MPa)	*Es (GPa)	تصویر نمونه‌ها
١	BH1	٨ –٨/٦	٤٥/٤	٣٧/٥	
٢	BH1	٢٥ – ٢٥/٦	٤٤/٥	٣٠/٣	
٣	BH1	٥٢/٦ – ٥٣	٧٤/٥	٥٢/٨	
٤	BH1	٧٧ – ٧٧/٤	٥١/٣	٥٠/٤	
٥	BH2	١٨ – ١٩	٢٢/١	٣٦/٨	
٦	BH2	٤٨ – ٤٦	٢٥/٥	٤١/٥	
٧	BH2	٦٥ – ٦٦	٢٣/٥	٣٩/١	
٨	BH3	٣/٥ – ٣/٨	٣١/١	٣١/٣	
٩	BH3	– ١٥/٦ ١٥/٤	١٩/٧	١٦/٦	
١٠	BH3	٢٢/٨ – ٢٣	٢٠/٧	٣٠/٣	
١١	BH3	– ٣٥/٦ ٣٥/٤	٢٣/٣	٤١/٨	
١٢	BH3	٥١/٦ – ٥٢	١٨	٢٤	
١٣	BH3	– ٥٩/٧ ٥٩/٣	١٨/٧	٣١/٧	

* UCS : مقاومت فشاری تک‌محوری، Es : مدول استاتیکی مماسی

رسیده و سپس با دستگاه لرزه‌نگار تقویت و ثبت می‌شود. بدین‌منظور در تونل قلاجه برای بررسی روند تغییرات محیط میزبان، پوشش سطح وسیع‌تر محدوده برای کسب اطلاعات کامل‌تر ژئومکانیکی و آگاهی از وجود محدوده‌های خرد شده، آزمون لرزه‌ای به‌روش سطح به عمق در دو حلقه از گمانه‌های حفاری شده استفاده شد. برای برداشت پروفیل لرزه‌ای از دستگاه لرزه‌نگار *ABEM RAS 24* و ژئوفون‌های سه مؤلفه‌ای درون گمانه‌ای استفاده شد. در تونل قلاجه برای تولید امواج برشی از ضربه پتک به دو سر یک میز مخصوص استفاده شد. بدین‌منظور برای تعیین سرعت امواج تراکمی، چشمه لرزه‌ای موج تراکمی (چکش) در فاصله

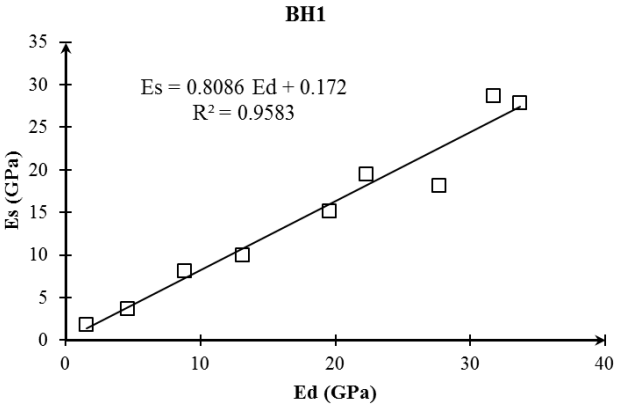
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

۲/۵ متر از دهانه گمانه و به‌منظور تعیین سرعت امواج برشی چشمه لرزه‌ای امواج برشی (پتک و میز مخصوص) در فاصلهٔ ۳ متری از دهانهٔ گمانه قرار گرفته که در هر دو حالت گیرنده امواج تمام عمق مفید گمانه از سطح تا عمق موردنظر را پوشش می‌دهد (شکل ۳). پس از انجام آزمایش‌ها و با استفاده از سرعت امواج طولی و دانسیتهٔ سنگ میزبان، مدول تغییرشکل‌پذیری دینامیکی با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد. مطابق با محاسبات انجام گرفته، نمودار ارتباط مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در گمانه‌های *BH1* و *BH3* به‌صورت شکل‌های ٤ و ٥

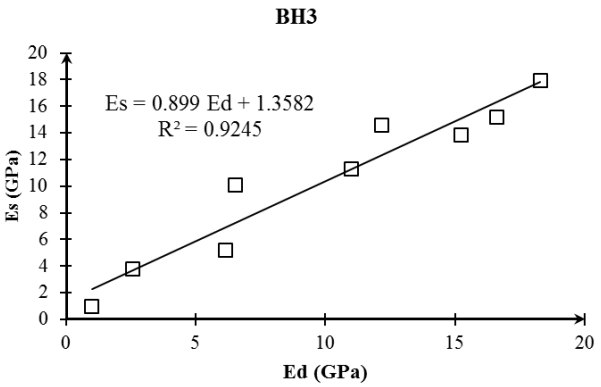


شکل ۳. انجام آزمایش ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای در گمانه BH1 در تونل قلاجه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]



شکل ٤. ارتباط بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی در گمانه BH1



شکل ٥. ارتباط بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی در گمانه BH3

ترسیم شد. باتوجه به نمودارها می‌توان مشاهده کرد که پراکندگی نتایج در روش‌های استاتیکی بالاتر از دینامیکی بوده است و مقادیر به‌دست آمده از روش‌های دینامیکی بیش‌تر از روش استاتیکی است. دلیل این مهم را می‌توان به بسته شدن میکروترک‌ها در حین بارگذاری نسبت داد، به‌طوری‌که این تفاوت در سطوح پایین تنش مشهودتر است. دلیل این امر، ناشی از افزایش رفتار پسماند در بارگذاری و باربرداری درزه‌ها است. هم‌چنین نمودارها نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای دینامیکی در یک عمق یک‌سان در گمانه *BH1* بیش‌تر از *BH3* بوده است که این مهم به‌دلیل خصوصیات ژئومکانیکی بالاتر تودهٔ سنگ‌های میزبان گمانه اولی نسبت به گمانه سوم است، به‌طوری‌که تأثیرپذیری مقادیر مدول‌های استاتیکی از شرایط ناپیوستگی،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

هوازدگی و تورق کم‌تر از مدول‌های دینامیکی است و به‌دلیل رفتار متفاوت ناپیوستگی‌ها در آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی، مقادیر مدول‌ها نیز متفاوتند [۲].

در حالت کلی برای بیان اختلاف مقادیر مدول‌های استاتیکی و دینامیکی می‌توان ضریب تصحیح را به‌صورت نسبت مدول دینامیکی به استاتیکی به‌صورت رابطهٔ (۳) تعریف کرد. *Ciccotti & Mulargia* (۲۰۰٤) ضریب تصحیح را بین ۱ تا ۱/۳ و *Al-Shaya* (۲۰۰٤) آن‌را بین ۰/۸۵ تا ۱/۸۵ گزارش کرده‌اند[۲۵]،[۲٦]. با درنظرگیری این مهم، مقدار مدول استاتیکی را با استفاده از روابط دینامیکی می‌توان با استفاده از رابطهٔ (٤) محاسبه کرد.

$$K = E_d \big/ E_s \qquad (۳)$$

$$E_s = \frac{1}{K}\rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \qquad (٤)$$

با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده، ضریب تصحیح در تونل قلاجه بین ۱/۲۲ تا ۱/۲٦ متغیر است. این مهم بدان معنی است که در محدودهٔ تونل قلاجه، مدول دینامیکی حداکثر ۱/۲٦ برابر مدول استاتیکی است. هم‌چنین برای سنجش پراکندگی و بیان دقت مقدار محاسبه شده از روابط تجربی با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده می‌توان از شاخص‌هایی از قبیل مقدار قدر مطلق خطا و حساب واریانس (روابط ۵ و ٦)، استفاده کرد به‌طوری‌که هر چه مقدار قدرمطلق خطا و حساب واریانس به‌ترتیب به‌سمت صفر و ۱۰۰ میل کند مقدار پیش‌بینی شده و اندازگیری شده برهم منطبق می‌شود [۲۷]. با محاسبهٔ این مهم در تونل قلاجه مقدار قدرمطلق خطا ۱/۷ و مقدار حساب واریانس ۹۵/۳ به‌دست می‌آید که بیان‌گر انطباق خوب بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده از رابطهٔ پیشنهادی در تونل قلاجه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y-y')^2} \qquad (۵)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{Var(y-y')}{Var(y)}\right] \times 100 \qquad (٦)$$

RMSE: قدرمطلق خطا، VAF : حساب واریانس؛ y : مقدار اندازه‌گیری شده، y' مقدار پیش‌بینی شده

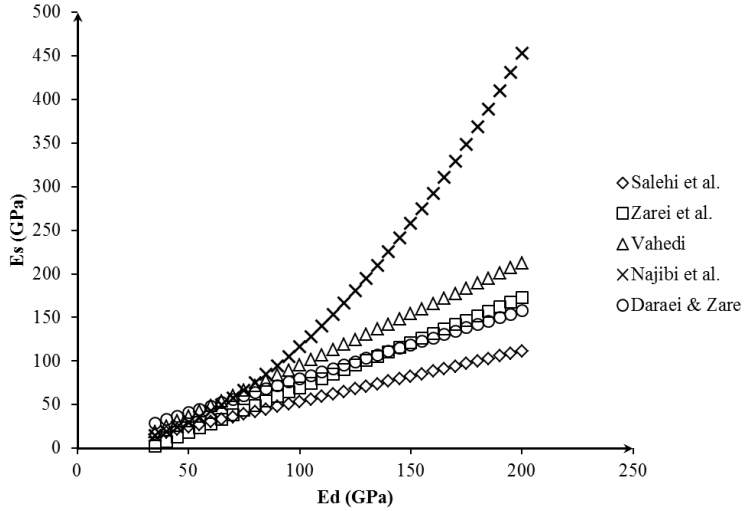
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

مدل کلی بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در سازند آسماری

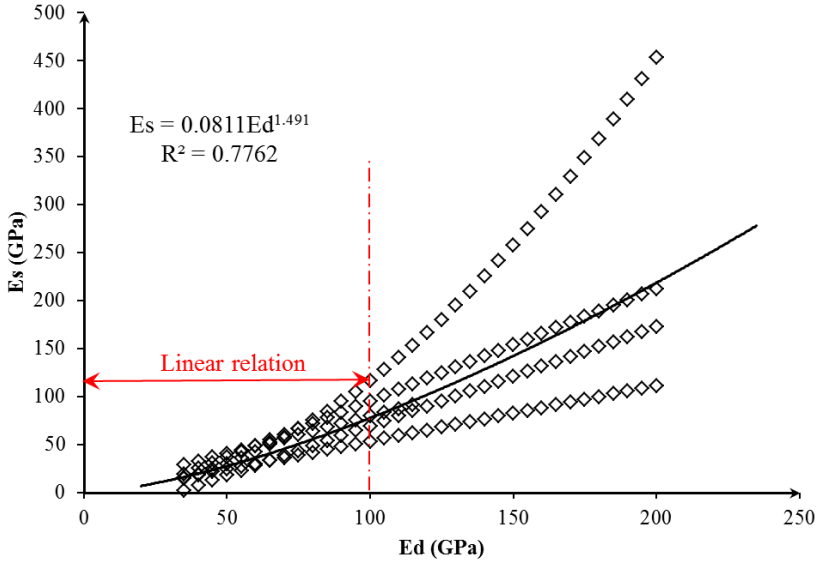
از آن‌جا که با تغییر ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل سنگ‌دانه، درجهٔ سیمان‌شدگی و ناهمگنی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ نیز تغییر می‌کند، ایجاد یک رابطهٔ کلی بین مدول‌های دینامیکی با استاتیکی مشکل است [۲۸]. برای بیان مدل فراگیر در سازند آسماری باتوجه به پژوهش‌های انجام شده تاکنون، نمودار همهٔ روابط ارائه شده حاصل از تحقیقات قبلی مطابق شکل (٦) ترسیم شد. با بررسی نمودار ترسیم شده می‌توان بیان کرد که علی‌رغم استفاده از آزمون برجای ژئوفیزیکی به‌وسیلهٔ نویسندگان، مقادیر مدول‌های دینامیکی در سطوح کاربردی مهندسی سنگ، تفاوت چندانی با نتایج حاصل از آزمون‌های دینامیکی فراصوتی بر نمونه‌های سنگ سالم نداشته که این مهم بیان‌گر تاثیر کم‌تر ناپیوستگی‌ها و اثر مقیاس روی نتایج آزمون‌های غیرمخرب نسبت به‌روش‌های استاتیکی یا مخرب است. هر چه محدودهٔ بررسی شده خردشده‌تر و خصوصیات ژئومکانیکی ضعیف‌تر بوده است، ارتباط بین مدول‌ها در سطح پایین‌تری قرار گرفته‌اند. این در حالی است که مدول‌های الاستیک پایین تلویحاً بیان‌گر سنگ‌هایی با ترک‌های مویی زیاد یا خرد شده است زیرا خصوصیات مکانیکی از قبیل مدول الاستیک به‌شدت تابع اندازه، امتداد و توزیع آماری ناپیوستگی‌ها است [۲۹]. با در نظرگیری همهٔ بررسی‌های انجام شده در سازند آسماری، مقدار ضریب تصحیح بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی ۰/۸ تا ۲/٤ به‌دست می‌آید. در صورتی‌که داده‌های حاصل از روابط مختلف به‌دست آمده از سازند آسماری در مناطق مختلف را در یک نمودار واحد ترسیم شود، رابطهٔ بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در سازند مذکور به‌صورت شکل ۷ به‌دست می‌آید که باتوجه به جامعهٔ آماری دخیل، می‌توان آن‌را رابطه‌ای فراگیرتر برای به‌کارگیری در سازند آسماری قلمداد کرد با توجه به شکل ۷ می‌توان بیان کرد که رابطهٔ بین مدول‌ها تا یک محدوده مشخص، خطی و سپس از روند توانی تبعیت کرده به‌طوری‌که مرز این دو رفتار را می‌توان مقدار مدول تغییر شکل استاتیکی ۱۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفت. به‌منظور تعیین دقت مدل فراگیر پیشنهادی، مقدار خطای مطلق و حساب واریانس هر یک از مدل‌ها با محاسبه مقدار به‌دست آمده (y') از مدل فراگیر و اقتباس مقادیر واقعی (y) از مدل‌های ارائه شده قبلی، مطابق جدول ۸ محاسبهٔ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

شد. با توجه به مقادیر تعیین شده از شاخص‌های مذکور، دقت مدل پیشنهادی قابل قبول است و می‌تواند سطح وسیعی از سازند آسماری را تحت پوشش قرار دهد.



شکل ٦. مدل‌های ارائه شده بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی مطابق تحقیقات انجام شده در سازند آسماری



شکل ۷. رابطهٔ بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در سازند آسماری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

جدول ۸. سنجش پراکندگی و دقت معیار فراگیر پیشنهادی نسبت به مدل‌های ارائه شده در سازند آسماری

مدل	قدر مطلق خطا (RMSE)	حساب واریانس (VAF)
دارای و زارع (۱۳۹٤)	۸/٥٦	۷٦/۳۲
نجیبی و همکارانش (۲۰۱٥)	٥/٥٤	۸۱/۳۳
صالحی و همکارانش (۱۳۸۹)	۰/٦۸	۹۳
زارعی و همکارانش (۱۳۸۸)	۲/٥۲	۹۹/۳
واحدی (۱۳۸۰)	۳/۸۹	۹۳/۹۲

در حالت کلی می‌توان اثر مقیاس (*scale factor*) را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل اختلاف معیار مذکور با سایر معیارها عنوان کرد. زیرا همهٔ معیارهای ارائه شده در سازند آسماری تاکنون مبتنی بر تحقیقات آزمایشگاهی بوده است به‌طوری‌که تأثیر پارامترهایی از قبیل ناپیوستگی‌ها، میزان رطوبت و خطای انسانی با شرایط انجام آزمایش در حالت برجا بسیار متفاوت است. پارامترهای مذکور تاثیر به‌سزایی در اختلاف مقدار مدول اندازه‌گیری شده در دو حالت آزمایشگاهی و برجا ایجاد می‌کند به‌طوری‌که در برخی موارد، مدول برجا تا ۵۰٪ نسبت به حالت آزمایشگاهی کم‌تر است. محدوده اعتبار مدول ارائه شده به منبع ایجاد لرزه مصنوعی یا همان چشمه انفجار بستگی دارد. در صورتی‌که به‌منظور ایجاد امواج ارسالی از چشمه انفجاری استفاده شود، سطح کرنش عمدتاً در رده متوسط با میزان $۱۰^{-۲}$ تا ۱۰ قرار دارد. ایجاد لرزه به‌وسیله وسایل مکانیکی، میزان کرنش را در ردهٔ کم با میزان $۱۰^{-٤}$ تا $۱۰^{-۲}$ قرار می‌دهد. در پروژهٔ مذکور محدودهٔ اعتبار مدول ارائه شده در ردهٔ میزان کرنش کم قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی استاتیکی و دینامیکی برجا در پروژهٔ تونل قلاجه و تعیین مقادیر مدول‌های تغییر شکل استاتیکی و دینامیکی، رابطه‌ای بین آن‌ها ارائه شد. سپس با در نظرگیری مدل‌های بررسی شدهٔ قبلی در سازند آسماری که عمدتاً از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده بودند، معیار فراگیری برای کاربرد گسترده‌تر در سازند مذکور ارائه شد که باتوجه به مقادیر خطای مطلق و حساب واریانس محاسبه شده، مقادیر پیش‌بینی شده با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

مدل فراگیر پیشنهادی شامل دقت قابل قبولی است. در این بین ضریب تصحیح بین مدول‌های دینامیکی و استاتیکی در سازند آسماری بین ۰/۸ تا ۲/٤ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی ارتباط بین مدول‌های استاتیکی و دینامیکی تا یک محدودهٔ مشخص (مقدار مدول استاتیکی ۱۰۰ مگاپاسکال) خطی و بعد از آن از روند توانی تبعیت کرده به‌طوری‌که در کاربری‌های رایج مهندسی سنگ ارتباط بین مدول‌ها را عمدتاً می‌توان خطی در نظر گرفت.

منابع

1. Najibi Ali Reza., Ghafoori Mohammad, Lashkaripour Gholam Reza, Asef Mohammad Reza, "Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran", Journal of Petroleum Science and Engineering, 126, (2015) 78-82.
2. Martı´nez-Martı´nez J., Benavente D., Garcı´a-del-Cura M. A., "Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks", Bull Eng Geol Environ, 71: (2012) 263-268.
3. Goodman R. E., "Introduction to Rock Mechanics", Wiley (1989).
4. Chang C., Zoback M. D., Khaksar A., "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks", J.Pet.Sci.Eng. 51(3), (2006) 223-237.
5. Lama R. D., Vutukuri V. S., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol. II. Clausthal Germany Trans Tech Publications (1978).
6. Belikov B. P., Alexandrov K. S., Rysova T. W. "Uprugie svoistva porodoobrasujscich mineralov I gomich porod", Izdat. Nauka, Moskva, (1970).
7. Van Heerden W. L., "General relations between Static and dynamic moduli of rocks", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 24 (6) (1987).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

381-385.

8. King M. S., "Static and dynamic elastic properties of rock from the Canadian Shield", Int.J.Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 20(5) (1983) 237-241.
9. Eissa A., Kazi A., "Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 25 (6) (1988) 479-482.
10. McCann D. M., Entwisle D. C. "Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs", Geological Applications of Wireline Logs II, Eds: Hurst, A., Griffiths, C. M. & Worthington, P. F., Geological Society Special Publication No. 65, (1992) 317-325.
11. Lacy L. L., "Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs", SPE Paper 38716 (1997).
12. Nur A.,Wang Z., "Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks: Recent Developments", Vol.10, Society of Exploration Geophysicists, (1999).
13. Mockoviakova A., Pandula B. "Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks", Metalurgija 42, (2003) 37-39.
14. Ameen M. S., Smart B. G. D.,Somerville J. M. C.,Hammilton S., Naji N. A., "Prediction rock mechanical properties of carbonated from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghavar field, Saudi Arabia)", Int. J. Rock. Mech. Min Sci., 26 (2009) 430-444.
15. Fei W, Huiyuan B., Jun Y., Yonghao Z., "Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock", EJGE, Vol. 21, Bund. 04, (2016) 1551-1560.

۱٦. واحدی علی‌اکبر، "ارتباط بین پارامترهای الاستیک استاتیکی و دینامیکی سنگ آهک در ساختگاه سد سیمره"، اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، (۱۳۸۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

۱۷. فولادچی سروش، حسینی محمد فاروق، گنجی مجتبی، " بررسی آزمایشگاهی تأثیر اندازهٔ نمونه بر ویژگی‌های الاستیک دینامیک و استاتیک سنگ آهک نکا"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دورهٔ اول، شمارهٔ ۱ (۱۳۸۵).

۱۸. زارعی وحید، داودی جاجرم امید، "ارتباط بین پارامترهای استاتیکی و دینامیکی سنگ آهک دولومیتی تا دولومیت آهکی در ساختگاه سد رودبار لرستان"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، یزد، (۱۳۸۸).

۱۹. صالحی مسعود، اجل لوئیان رسول، هاشمی محمود، "مقایسهٔ مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی سنگ‌های ساختگاه سد بازفت"، چهارمین همایش ملی زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور مشهد (۱۳۸۹).

۲۰ نجیبی علیرضا، آصف محمدرضا، اجل لوئیان رسول، صفیان غلام عباس، "تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ج پنجم، شمارهٔ ۱، (۱۳۹۰).

۲۱. کریم نژاد مسعود، "تعیین مدول یانگ استاتیک سنگ‌ها با استفاده از مدول یانگ دینامیک" هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، (۱۳۹۲).

۲۲. علی‌زاده مجتبی، خداپرست مهدی، رجبی علی‌محمد، "بررسی ارتباط مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی مطالعه موردی آبرفت‌های شهر قم"، دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، کرمانشاه، (۱۳۹۳).

23. Koleini M., "Engineering Geological Assessment and Rock Mass Characterization of the Asmari Formation", Ph.D. thesis, University of Pretoria (2012).

24. Rocsciences Inc., "RocData Ver.3.013", user manual, (2004).

25. Ciccotti M., Mulargia F., "Differences beween static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock", Geophys J Int 157: (2004) 474-477.

26. Al-Shayea N. A., "Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock", Eng Geo 74: (2004) 139-156.

27. Yilmaz I.,"Influence of water content on the strength and deformability

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]

of Gypsum", International journal of rock mechanics & mining science, (2010).

٢٨. آصف محمدرضا، "سرعت موج در سنگ پارامتر کلیدی برای حل مسایل ژئومکانیک نفت" اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، مرکز همایش‌های بین‌المللی پژوهشگاه صنعت‌نفت، تهران، (١٣٩٤).

29. Brotons V., Toma´s, R., Ivorra S., Grediaga A., "Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julia´n's stone", Bull Eng Geol Environ, (2014).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.2.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.617]