Archive of SID

دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
کرمانشاه، ۹ و ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۳

ارزیابی مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی آهک‌های سروک در ساختگاه سد بختیاری

ساسان محمدی [۱]، ماشااله خامه‌چیان [۲]، مرتضی رحیمی دیزجی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Sasan.mohammadi23@gmail.com

خلاصه

امروزه استفاده از روش‌های دینامیکی برای برآورد دقیق و سریع ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ کاملا پذیرفته شده است و از آن‌جایی که این آزمایش‌ها غیرمخرب هستند مورد استقبال زیاد قرارگرفته‌اند. سد بختیاری یک سد بتنی دو قوسی است که عمده ساختگاه آن روی واحدهای آهکی سازند سروک قرار گرفته است. برای بدست آوردن مدول‌های تغییرشکل‌پذیری واحدهای سازند سروک در ساختگاه سد بختیاری هم آزمایش‌های آزمایشگاهی و هم آزمایش امواج التراسونیک انجام شده است. در این تحقیق داده‌های بدست آمده از هر دو روش مورد ارزیابی قرارگرفته است که نشان دهنده بیشتر بودن مدول الاستیسیته دینامیکی می‌باشد که به دلیل کرنش کم آن است. در این مقاله برای بدست آوردن مدول استاتیکی از مدول دینامیکی برای آهک‌های سروک در سد بختیاری رابطه‌ای ارائه شده است که این رابطه تخمین بسیار نزدیکی از مدول الاستسیته را می‌دهد.

کلمات کلیدی: مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی، آزمایش التراسونیک، سد بختیاری

۱. مقدمه

دانستن خصوصیات تغییر شکل پذیری سنگ از پیش نیازهای طراحی هر سازه در محیط‌های سنگی است. ویژگی‌های الاستیک سنگ به در روش استاتیکی و دینامیکی قابل اندازه‌گیری است. ثابت‌های الاستیک بدست آمده به روش استاتیکی و دینامیکی اغلب با هم متفاوت‌اند به عنوان مثال مدول یانگ استاتیک حدود سه برابر کوچکتر از مدول یانگ دینامیک است که بخش عمده این اختلاف به دلیل تاثیر پذیری بیشتر آزمایش اندازه‌گیری‌های استاتیکی از حفرات و ترک‌های موجود در سنگ است. عوامل دیگری نظیر سیال و فشار آب منفذی، نوع سیمان، نوع تنش و دامنه کرنش نیز در ایجاد این اختلاف تاثیر می‌گذارد[1]. از علت‌های دیگر این مساله کرنش کم در حالت دینامیکی است[2].

از تفاوت‌هایی که روش‌های استاتیکی و دینامیکی دارند این است که در آزمایش استاتیکی مقدار تنش تا چند ده مگاپاسکال می‌رسد در حالی که تنش در حالت دینامیکی به ندرت بیشتر از ۱۰۰ پاسکال می‌شود. در آزمایشات استاتیکی امکان بسته شدن ترک‌ها و میکرو ترک‌ها وجود دارد که این منجر به افزایش تغییرشکل و در نتیجه کاهش مدول الاستیسیته استاتیکی می‌شود. در عوض آزمایشات دینامیکی تغییری در ساختار نمونه سنگ ایجاد نمی‌کند که این بزرگترین مزیت این روش است. زمان اعمال تنش نیز متفاوت است. در حالت استاتیکی حدود چند دقیقه است در حالیکه در آزمایش دینامیکی حدود چند میکروثانیه است [3].

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی
[۲] دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی
[۳] کارشناس ارشد شرکت مهندسی سپاسد

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور اندازه‌گیری مدول‌های تغییر شکل‌پذیری آزمایش‌های تراکمی تک محوره و سه محوره روی نمونه‌های آزمایشگاهی بخشی از مطالعاتی است که انجام می‌شود. آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی همراه اندازه‌گیری تغییرشکل مثل مواردی که در بالا گفته شد زمان‌بر و پر هزینه‌اند. سرعت انتشار موج الاستیک در سنگ به خصوصیات تغییرشکل پذیری سنگ نیز وابسته است. روش‌های شناخته شده به منظور تعیین مدول‌های دینامیکی بر اساس این ارتباط به وجود آمده‌اند. تعیین مدول دینامیکی سنگ‌ها، حتی در مقیاس برجای بزرگ، سریع و ارزان است. علی رغم این، روش‌های دینامیکی در پروژه‌های مهندسی سنگ رایج نیست. روش‌های آزمایش دینامیکی، داده‌های ارزشمندی را ارائه خواهد داد اگر بتوان از طریق آن مدول‌های استاتیکی را تخمین زد. مطالعات زیادی به هدف برقراری رابطه بین مدول الاستیسته دینامیکی و استاتیکی انجام شده است. بیشتر نتایج به دست آمده در کتاب نوشته شده توسط Lama and Vutukuri (1978) گردآوری شده است. در کل این مطالعات نشان می‌دهند که E_d بزرگتر از E_S است و از ۰ تا ۳۰۰ درصد تغییر می‌کند[4]. برای ارتباط مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی روابط زیادی ارائه شده است که از بین این روابط به دو مورد که ارتباط بیشتری با کار این تحقیق دارد پرداخته شده است.

نجیبی و همکاران (۱۳۹۰) ارتباط بین مدول الاستیسیته دینامیکی(E_d) و استاتیکی(E_s) با مطالعه داده‌های بدست آمده از آزمایشات استاتیکی و التراسونیک برای سنگ آهک‌های مناطق نفت خیز جنوب به صورت زیر ارائه کرده اند:

$$E_s = 0.352 E_d^{1.149} \quad (۱)$$

Van Heerden (1987) در مقاله‌ای تحت عنوان رابطه‌ی کلی بین مدول استاتیکی(E_S) و دینامیکی (E_d) در سنگ‌ها، با بررسی ۱۰ نوع سنگ مختلف که مدول یانگ آنها در بازه ۷ تا ۱۵۰ مگاپاسکال قرار داشت، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و التراسونیک انجام داد و در فشارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، رابطه بین مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی به صورت رابطه ۲ ارائه کردند.

$$E_S = a E_d^b \quad (۲)$$

که در رابطه فوق a و b، پارامترهای وابسته به تنش‌اند.

در ادامه داده‌های آزمایش انجام شده در ساختگاه سد بختیاری با روابط ارائه شده (روابط ۱ و ۲) مورد بررسی قرار گرفت تا در صورت هم پوشانی رابطه مذکور برای منطقه بررسی شده، در این تحقیق پیشنهاد شود. نتایج مربوط به داده های بدست آمده با این روابط در جدول ۱ آمده است.

جدول۱- نتایج به دست آمده داده‌های تحقیق با روابط ۱ و ۲

واحدهای سازند سروک	E_d (GPa)	مقدار E_s تخمین زده شده با رابطه ۱		مقدار E_s تخمین زده شده با رابطه ۲			
		E_s (GPa)	مقدار خطا ٪	a	b	E_s (GPa)	مقدار خطا ٪
Sv1	۶۴	۴۱/۸۶	۴۳	۰/۱۷	۱/۳۶	۴۹/۸۵	۳۱
Sv2	۷۲	۴۷/۹۳	۳۱	۰/۱۸	۱/۳۳	۵۳/۱	۲۴
Sv3	۷۴	۴۹/۴۶	۲۶	۰/۱۹	۱/۳۲	۵۵/۷	۱۶
Sv4	۷۶	۵۱	۲۳	۰/۱۷	۱/۳۶	۶۱/۴۲	۸
Sv5	۷۵	۵۰	۲۸	۰/۱۹	۱/۳۲	۵۶/۷	۱۹
Sv6	۷۵	۵۰	۲۳	۰/۱۸	۱/۳۳	۵۶/۱	۱۳
Sv7	۶۸	۴۴/۸۸	۲۸	۰/۱۶	۱/۳۷	۵۱/۸	۱۷

رابطه ۲ تخمین بهتری نسبت به رابطه ۱ ارائه می‌دهد با این حال این تخمین خیلی با واقعیت اختلاف دارد.

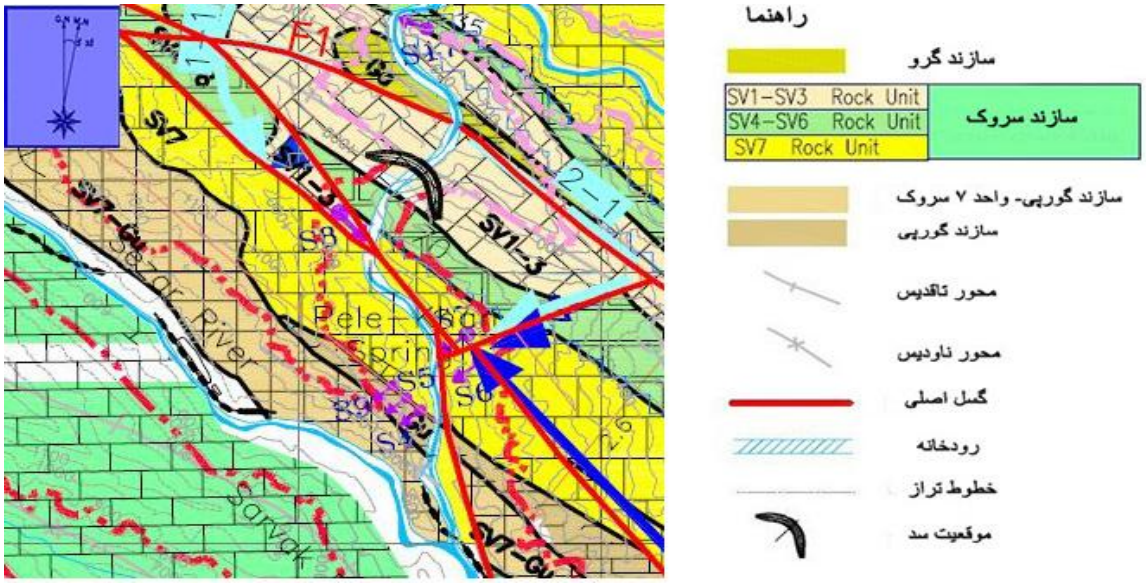
هدف اصلی این مطالعه این است که رابطه‌ای درست و نسبتا دقیق بین مدول استاتیکی و دینامیکی برای تخمین دقیقی از مدول الاستیسیته استاتیکی در سنگ‌های آهکی سازند سروک در ساختگاه سد بختیاری ارائه شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۲. خصوصیات زمین شناسی

سد بختیاری بلندترین سد بتنی دو قوسی جهان است که بر روی رودخانه بختیاری واقع شده است. محل سد از دیدگاه زمین شناسی در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. در نقشه‌های زمین‌شناسی، لایه‌های سنگی محدوده ساختگاه سد تحت عنوان گروه بنگستان نامگذاری شده است. مجموعه لایه‌های سنگی این گروه در محدوده ساختگاه و مخزن رخنمون دارند و اغلب واحدهای ساختگاه از آهک‌های ریزدانه، تیره‌رنگ، گاه با گرهک‌های چرتی و گاه میان لایه‌های چرتی سازند سروک، دارای هفت واحد (Sv1-Sv2) به سن کرتاسه میانی تشکیل شده‌اند. شکل ۱ نشان دهنده سد و قرارگیری آن در واحدهای مختلف سازند سروک است[5].



شکل۱- سد و محل قرار گیری آن در واحدهای مختلف سروک

۳. روش آزمایش و نتایج

اندازه‌گیری مدول‌های الاستیسیته و خصوصیات شاخص نمونه‌های برداشت شده از واحدهای مختلف سازند سروک در آزمایشگاه انجام شده است.

۱.۳ روش آزمایش استاتیکی در آزمایشگاه

برای بدست آوردن مدول الاستیسیته به روش استاتیکی، آزمایش تراکم تک محوره روی تمام نمونه‌های بدست آمده از واحدهای سازند سروک در حالت خشک و اشباع انجام شده است سپس مدول الاستیسیته استاتیکی با استفاده از رابطه زیر بدست آمد:

$$E_S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \qquad (۳)$$

که در رابطه بالا $\Delta\sigma$ تغییرات تنش و $\Delta\varepsilon$ تغییرات کرنش است. نتایج مربوط به مدول الاستیسیته استاتیکی بدست آمده برای واحدهای مختلف سازند سروک در جدول ۲ آورده شده است. داده‌های ارائه شده نماینده کل داده‌های مربوط به هر واحد از سازند سروک است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲- نتایج بدست آمده از مدول الاستیسیته واحدهای مختلف سازند سروک

	شرایط	واحدهای سازند سروک						
		Sv1	Sv2	Sv3	Sv4	Sv5	Sv6	Sv7
مقاومت تک محوره (MPa)	خشک	–	۱۲۳	۱۳۰	۸۶	۱۳۲	۱۲۱	۷۷
	اشباع	–	۹۵	۱۱۹	۸۴	۹۴	۱۱۹	۷۵
E_S (GPa)	خشک	–	۷۰	۶۷	۶۷	۷۰	۶۵	۶۳
	اشباع	–	۶۶	۶۸	۶۸	۶۹	۶۸	۵۸

۲.۳ روش آزمایش دینامیکی در آزمایشگاه

این آزمایش با دستگاه امواج التراسونیک به این صورت که در یک سمت نمونه فرستنده موج و در طرف دیگر دریافت کننده قرار دارد انجام شده است. با داشتن طول نمونه (d) و زمان عبور موج از آن (t)، بسته به نوع موج برشی یا طولی، سرعت انتشار (υ) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v = \frac{d}{t} \qquad (٤)$$

اگر مقادیر دانسیته (ρ) مشخص باشد به راحتی می‌توان مدول الاستیسیته دینامیکی را از رابطه ۵ تعیین کرد[2]:

$$E_d = \rho.\mathrm{v}_s^2 \frac{\left(3v_p^{\,2} - 4v_s^{\,2}\right)}{v_p^{\,2} - v_s^{\,2}} \qquad (۵)$$

که در رابطه بالا v_s سرعت موج برشی و v_p سرعت موج طولی است. نتایج مربوط به آزمایش التراسونیک در جدول ۳ آمده است. سروک ۱ به علت این که در ساختگاه سد رخنمون ندارد بررسی نشده است.

جدول ۳- نتایج مربوط به آزمایش التراسونیک

	شرایط	واحدهای مختلف سازند سروک						
		Sv1	Sv2	Sv3	Sv4	Sv5	Sv6	Sv7
ρ (Kg/m^3)	خشک	–	۲۶۴۰	۲۶۵۰	۲۶۳۰	۲۶۳۰	۲۶۵۰	۲۶۴۰
	اشباع	–	۲۶۴۰	۲۶۶۰	۲۶۴۰	۲۶۴۰	۲۶۷۰	۲۶۵۰
n (%)	–	–	۰/۷۸	۱/۱۶	۰/۴۶	۰/۶۶	۱/۰۲	۱/۰۷
v_p (m/s)	خشک	–	۶۰۷۹	۶۰۵۶	۶۲۱۱	۶۲۱۳	۶۱۸۵	۶۱۰۴
	اشباع	–	۶۱۰۷	۶۲۳۹	۶۱۳۳	۶۳۴۸	۶۲۹۸	۶۰۷۶
v_s (m/s)	خشک	–	۳۲۲۴	۳۲۸۲	۳۳۰۰	۳۲۸۰	۳۲۷۵	۳۱۰۹
	اشباع	–	۳۲۶۴	۳۳۰۱	۳۳۸۸	۳۲۸۸	۳۲۸۴	۳۰۴۹
E_d (GPa)	خشک	–	۷۲	۷۴	۷۶	۷۵	۷۵	۶۸
	اشباع	–	۷۴	۷۶	۸۱	۷۶	۷۶	۶۶

۴. بحث

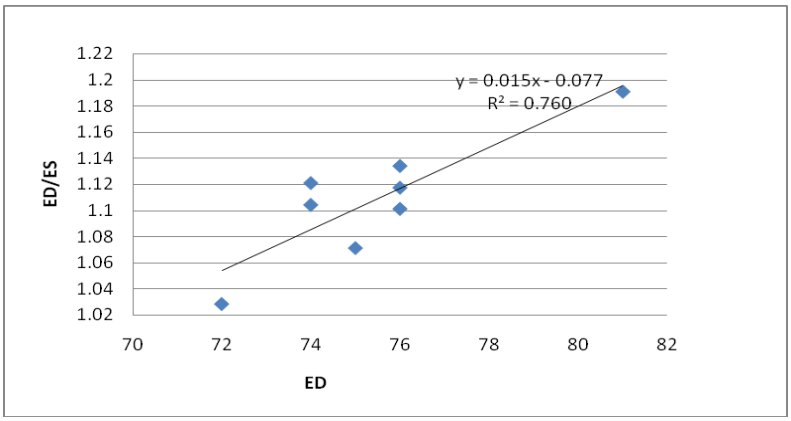
در تمام واحدهای سازند سروک، مقدار مدول الاستیسیته دینامیکی بیشتر از حالت استاتیکی است همانطور که در منابع به این مهم اشاره شده است. سرعت موج p با تخلخل رابطه عکس دارد و همچنین با چگالی نمونه هم رابطه مستقیم دارد که این مهم از جدول ۳ پیداست. از آن‌جا که خصوصیات سنگ‌ها وابسته به ریزترک‌ها و میزان تخلخل است بنابراین طبیعی است خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی آن‌ها در مناطق مختلف با توجه به تاریخچه

www.SID.ir

Archive of SID

زمین‌شناسی آن منطقه متفاوت باشد و روابط ارائه شده در ساختگاه سد دقت چندانی نداشته باشند. لذا با بررسی داده‌های موجود از آزمایش‌های انجام شده، رابطه ۶ را برای سازند سروک در ساختگاه سد بختیاری ارائه کردیم.

$$\frac{E_d}{E_s} = 0.015\,\mathrm{E}_d - 0.077 \qquad (۶)$$
$$R^2 = 0.76$$



شکل۲- ارتباط بین مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی

رابطه ۶ با R^2=0.76 به نظر می‌رسد دقت بالایی داشته باشد اما برای صحت سنجی رابطه ارائه شده از داده‌های واحد ۶ سازند سروک استفاده شده است که نشان می‌دهد با رابطه ارائه شده با تخمین نسبتا خوبی می‌توان مقدار مدول الاستیسیته استاتیکی را تقریب زد.

جدول ۴ - مقادیر بدست آمده از رابطه ۶ برای واحد ۶ سازند سروک

شرایط	E_d (GPa)	مقدار بدست آمده از رابطه ۶	
		E_s(GPa)	مقدار خطا (٪)
خشک	۷۵	۷۱	۹
اشباع	۷۶	۷۱/۵	۵

۵- نتیجه گیری

۱- مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی در اکثر موارد با هم اختلاف دارند و این اختلاف بیشتر به خاطر سطح کرنش پایین در حالت دینامیکی است ولی اگر سنگ تخلخل و ریزترک‌های کمی داشته باشد مدول استاتیکی می‌تواند با مدول دینامیکی برابری کند.

۲- در این تحقیق روابط ارائه شده توسط برخی از محققین بررسی شد و نتایج نشان داد که روابط ارائه شده دقت بالایی در تعیین مدول استاتیکی نداشتند لذا رابطه‌ای جدید برای آهک‌های منطقه مورد نظر ارائه شد.

۳- رابطه ارائه شده دقت خوبی در تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی دارد.

۴- رابطه ارائه شده را می‌توان به آهک‌های سازند سروک تعمیم داد.

۵- تعیین مدول الاستیسیته بسته به هدف و مدت بارگذاری متفاوت است. برای بارگذاری‌های بلند مدت مانند معادن و پایداری محیط کار و غیره، مدول الاستیسیته استاتیکی بهتر است اندازه‌گیری شود و برای بارگذاری‌های کوتاه مدت مانند انفجار و یا بارگذاری دینامیکی بهتر است از مدول الاستیسیته دینامیکی استفاده شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۶. منابع

۱. نجیبی، ع. اجل‌لوئیان، ر. صفیان، غ. ع. (۱۳۹۰)، *" تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیک،"* نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد پنجم، شماره ۱، ص. ۱۱۵۹-۱۱۷۶

۲. فهیمی فر، ا. سروش، ح. (۱۳۸۰)، " آزمایش‌های مکانیک سنگ؛ مبانی نظری و استانداردها،" جلد اول، مرکز نشر پروفسور حسابی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد تفرش

3. Mockovciakov, A. Pandula, B. (2003), "Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks", Metabak, 42(1), pp 37-39.

4. Van Heerden, W. L. (1987), "*General relations between Static and dynamic moduli of rocks*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr, 24(6), pp 381-385.

۵. گزارش سنتز مطالعات امکان پذیری به روز شده ساختگاه سد بختیاری، (۱۳۹۰)

6. Lama, R. D., and Vutukuri, V. S. (1987), "*Handbook on mechanical properties of rocks*", Vol, II Trans Tech Publications, Clausthal Germany.

www.SID.ir