

طراحی و ساخت دستگاه هیدروپنوماتیکی خزش و بررسی رفتار خزشی توف های شمال قزوین (مطالعه موردی)

محمد حسین قبادی*^۱، محمدرضا نیکودل^۲، علیرضا طالب بیدختی^۳

۱-استاد گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا

* مسئول مکاتبات: amirghobadi@yahoo.com

چکیده

آگاهی از رفتار وابسته به زمان سنگ ها در طراحی و اجرای پروژه های مهندسی بخصوص وقتی که پایداری سازه ها در دراز مدت مطرح است اهمیت دارد. این مقاله به معرفی دستگاه آزمایشگاهی می پردازد که برای تعیین رفتار خزشی سنگ ها به کار می رود. یکی از روش های بررسی رفتار خزشی سنگ ها، اعمال بار ثابت مشخص بر روی نمونه و قرائت کرنش های تابع زمان در طول مدت اعمال بار می باشد. در دستگاه طراحی شده برای اولین بار از سیستم هیدرولیک- پنوماتیک برای اعمال بار محوری و جانبی بر روی نمونه استفاده شده است. با توجه به سیستم تامین بار طراحی شده، این دستگاه قادر به اعمال بار ثابت برای دوره های طولانی مدت می باشد. لذا برای ارزیابی رفتار خزشی نمونه ها در دراز مدت مناسب می باشد. همچنین با توجه به ظرفیت بالای بارگذاری دستگاه امکان ارزیابی رفتار خزشی سنگ های سخت نیز فراهم گردید. علاوه بر این با طراحی سلول فشار، انجام آزمایش خزش سه محوری بر روی نمونه ها تا فشار جانبی ۳۰ مگاپاسکال مقدور می باشد. در این تحقیق نتایج آزمایش خزش تک محوری بر روی توف های جوش خورده منطقه اباذر قزوین ارائه گردید و با استفاده از مدل کلونین- ویت ثابت های ویسکو الاستیک این سنگ تعیین گردید.

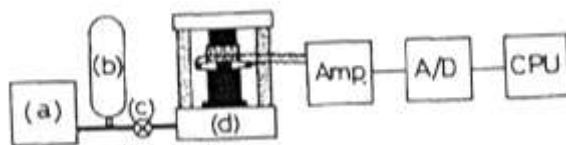
کلمات کلیدی: توف، شمال قزوین، دستگاه هیدروپنوماتیکی، خزش

۱- مقدمه

یکی از نیازهای اساسی در طراحی مهندسی سازه های سنگی، مدل کردن صحیح کرنش تابع زمان است. موارد مختلفی از نشست سازه های سنگین، جابجائی پوشش بتنی در مخازن گاز و تونل های تحت فشار، ریزش سقف در تونل ها و مغارهای سنگی بزرگ، شکستن سیستم نگهداری در معادن و تونل ها و غیره گزارش شده است که دلیل اصلی آنها رفتار خزشی سنگ تحت تاثیر گذشت زمان بوده است. این تجربیات و نیز موفقیت آمیز بودن طراحی هایی که تاثیر زمان در محاسبات آنها وارد شده است نشان می دهد که زمان عامل بسیار مهمی در پایداری سازه های سنگی بوده و به خصوص باید در مورد سازه های دائمی یا با طول عمر زیاد به عنوان یک پارامتر اصلی طراحی مد نظر قرار بگیرد (Husson J.A, 1993).

روش اصلی برای بررسی رفتار مکانیکی تابع زمان سنگ، انجام آزمایشات مکانیکی است که همراه با انجام آزمایشات طولانی مدت و مشاهدات و کنترل های دقیق در شرایط ثابت آزمایشگاهی می باشد. آزمایش خزش می تواند در شرایط مختلف بار گذاری در آزمایشگاه تحت بار فشاری، برشی و خمشی انجام شود. مطالعات آزمایشگاهی در طول هفت دهه گذشته بر روی رفتار مکانیکی خزش در سنگها حاکی از آن است که بررسی مساله خزش هنوز به پایان راه نرسیده است و مطالعات مستمری را نیاز دارد. پدیده خزش عمدتاً در سنگ های غیر شکننده و نرم از اهمیت ویژه ای برخوردار است و در سنگ های سخت فقط در شرایط خاصی این پدیده ظاهر می شود. هر چند که در سنگهای سختی چون گابرو و گرانیت هم ممکن است قابل مطالعه باشد. اکثر مطالعات صورت گرفته بر روی رفتار خزشی سنگ ها تحت بار فشاری و در شرایط اعمال بار تک محوری و سه محوری می باشد. بدین منظور محققین مختلف از دستگاههای متفاوتی برای مطالعه رفتار خزشی سنگ ها استفاده نموده اند که در ذیل به آن اشاره می گردد.

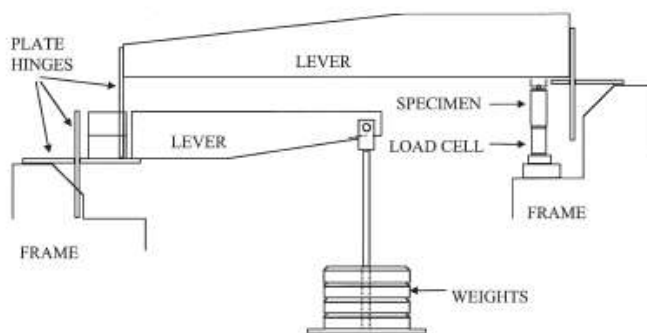
۱- دستگاههای آزمایشگاهی برای انجام آزمایش که از سیستم بار هیدرولیکی برای اعمال بار بر روی نمونه استفاده شده است. نقشه شماتیکی این دستگاه در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱ - دیاگرام شماتیکی دستگاه هیدرولیکی خزش (Okubo S. et al., 1991)

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می گردد این دستگاه شامل سیستم پاور پک برای تامین بار هیدرولیکی مورد نیاز (a) و اکومولاتور برای ثابت نگه داشتن بار در طول زمان آزمایش (b)، شیر قطع کن برای کنترل بار اعمالی و از بدنه بار گذاری (d) تشکیل شده است.

۲- دستگاه آزمایشگاهی که برای انجام آزمایش از سیستم اعمال بار وزنی استفاده می گردد. این دستگاه برای اولین بار توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۶ مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲ تصویر شماتیکی از دستگاه را مشاهده می نمایید.



شکل ۲- تصویر شماتیکی از دستگاه خزش به روش اعمال بار وزنی (Beniawski Z.T., 1967)

۳- استفاده از دستگاه‌های سروکنترل از قبیل INSTRON و MTS برای مطالعه رفتار مکانیکی تابع زمان سنگ‌ها که با توجه به هزینه بالای دستگاه، انجام آزمایش خزش با این دستگاه در طولانی مدت مقرون به صرفه نیست.

در ایران نیز در طی چند سال اخیر محققین مختلف برای مطالعه رفتار خزشی سنگ‌ها، اقدام به طراحی و ساخت دستگاه خزش در شرایط سه محوری نموده‌اند که می‌توان به دستگاه ساخته شده توسط محققین دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر اشاره نمود. در این دستگاه برای بار اعمال بار محوری و جانبی از دو سیستم پاورپک استفاده شده است و بار اعمالی توسط یک جک هیدرولیکی بر روی نمونه اعمال می‌گردد. روش ماندن سیستم پاورپک برای مدت طولانی یکی از مشکلاتی است که برای تامین بار ثابت بر روی نمونه برای این دستگاه مطرح می‌باشد. همچنین این دستگاه ظرفیت اعمال بار محدودی دارد. در شکل ۳ تصویری از این دستگاه مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- دستگاه هیدرولیکی خزش

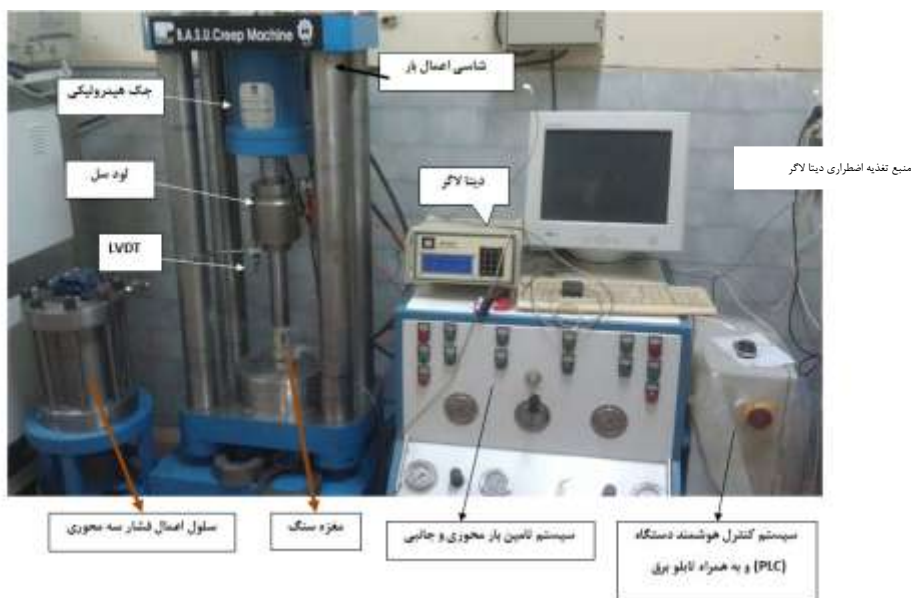
۲- دستگاه آزمایش

دستگاه مورد آزمایش که در گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا به عنوان بخشی از کار پژوهشی رساله دکتری طراحی و ساخته شده است و با عنوان BASU Creep Machine به جامعه علمی کشور ارائه شده است. این دستگاه شامل هفت بخش اصلی ذیل می‌باشد.

۱- سیستم تامین کننده بار محوری ۲- سیستم تامین کننده بار جانبی ۳- شاسی اعمال بار ۴- سلول فشار سه محوری

۵- سیستم کنترل هوشمند ۶- سیستم قرائت و ثبت داده‌ها شامل لود سل، LVDT و دیتا لاگر ۷- کمپرسور هوا

در شکل ۴ تصویری از این دستگاه مشاهده می‌شود.



شکل ۴- تصویر دستگاه هیدروپنوماتیک خزش در شرایط سه محوری ساخته شده در دانشگاه بوعلی سینا

بار اعمالی بر روی نمونه ابتدا توسط سیستم هیدرولیک اعمال می شود و سپس با خارج شدن سیستم هیدرولیک از مدار و خاموش شدن پاور پک ها، بار اعمالی توسط سیستم پنوماتیک بر روی نمونه اعمال می گردد. انجام آزمایش خزش بر روی نمونه های استوانه ای تحت دو شرایط زیر امکان پذیر است:

۱- آزمایش خزش تک محوری ۲- آزمایش خزش در شرایط فشار سه محوری با استفاده از سلول فشار طراحی شده

در هر دو حالت امکان اعمال بار پله ای وجود دارد. در این مقاله با شرایط اول آزمایش انجام شده است.

مزایای دستگاه خزش هیدروپنوماتیک به شرح ذیل می باشد:

- ۱- ارزیابی رفتار خزشی سنگ به طور پیوسته و طولانی مدت امکان پذیر است و هیچ محدودیتی برای اعمال بار دراز مدت وجود ندارد و بار اعمالی بر روی نمونه حتی می تواند تا چندین سال به طور پیوسته اعمال شود.
- ۲- عملکرد دستگاه در هنگام قطع جریان برق دچار اختلال نمی شود و تا هنگامی که فشار خروجی هوا از کمپرسور وجود داشته باشد امکان انجام آزمایش مهیا است.
- ۳- توانایی انجام آزمایش خزش بر روی سنگ های سخت در شرایط تک محوری و سه محوری با اعمال بار محوری ۶۰۰ کیلو نیوتن و ۳۰ مگا پاسکال فشار جانبی وجود دارد.
- ۴- در طراحی شاسی اعمال بار از آلیاژهای با صلیبیت بالا استفاده شده است که در نتیجه دقت اندازه گیری کرنش های ثبت شده بر روی نمونه مورد آزمایش افزایش می یابد.

۵- امکان ثبت بار اعمال شده و میزان کرنش های محوری و جانبی بر روی نمونه مورد آزمایش در طول مدت آزمایش توسط سیستم دیتا لاگر که متشکل از لود سل، LVDT و استرین گیج می باشد فراهم شده است.

توسط این دستگاه کمیت های ذیل در طول مدت آزمایش خزش اندازه گیری می شوند:

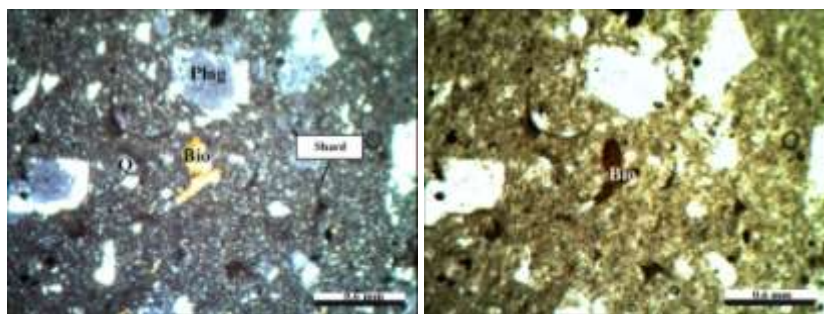
جدول ۱- کمیت های مورد اندازه گیری در طول مدت آزمایش خزش

کمیت	وسیله اندازه گیری
کرنش محوری	LVDT و استرین گیج
کرنش جانبی	استرین گیج
بار اعمالی	لود سل
فشار جانبی در آزمایش خزش سه محوری	مانومتر

۳- خصوصیات نمونه مورد مطالعه

در این بخش نتایج آزمون خزش در شرایط تک محوری بر روی سنگ ایگنمبریت که از منطقه اباذر در ۶ کیلومتری شمال شرق قزوین نمونه برداری شده است، ارائه می شود. ایگنمبریت ها یا توف های جوش خورده (Welded Tuff) سنگ های آذر آواری می باشند که در اثر انباشت ذرات و خاکسترهای آتشفشانی بر روی زمین بعد از فعالیت آتشفشانی ایجاد شده و به دلیل حرارت زیاد این نهشته ها، جوش خوردگی در ذرات آنها بوجود آمده و توف های جوش خورده تشکیل می شوند. پس از بازدید مقدماتی از منطقه شمال قزوین و تعیین رخنمون های توف های جوش خورده اقدام به نمونه برداری بلوکی از این نوع توف گردید. پس از حمل نمونه ها به دانشگاه بوعلی سینا اقدام به تهیه مغزه های سنگی و تهیه مقاطع میکروسکوپی و انجام آزمایشات تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مغزه ها شد.

مطالعه مقطع میکروسکوپی نشان می دهد که در این نمونه بلورهای فلدسپات، کوارتز، بیوتیت، هورنبلند و کانی های اوپک در خمیره شیشه ای متشکل از شیشه و خرده قطعات کانی های نامبرده و قطعات شیشه آتشفشانی (شارد) قرار دارند. فراوانی بلورها در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد است که فراوانی کوارتز در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد و فراوانی پلاژیوکلاز در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد می باشد. فراوانی بیوتیت، هورنبلند و کانی های اوپک نیز کمتر از ۱۰ درصد است. بافت این نمونه جوش خورده و شاردها سالم می باشند که نشان دهنده این است که این نمونه دچار دیاژنز و جریان پس از نهشته شدن نشده است (شکل ۵). از نظر سنی این نمونه ها جوانتر از توف های سازند کرج (الیگوسن - میوسن) می باشند.



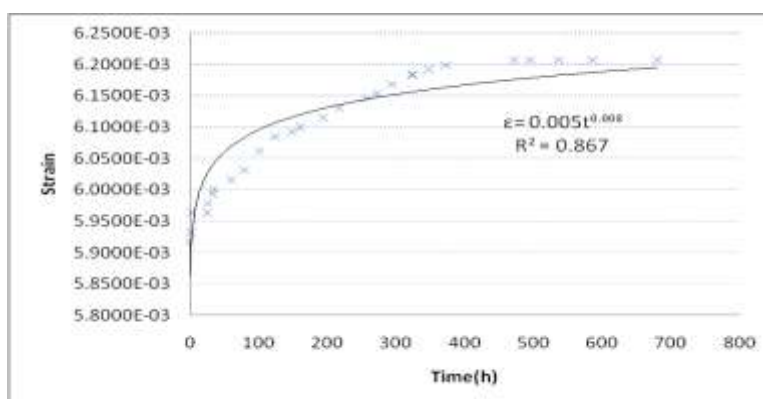
شکل ۵- تصویر مقطع میکروسکوپی Abz-2 در نور PPL (سمت راست) و XPL (سمت چپ) با بزرگنمایی ۴۰ (Plag: پلاژیوکلاز، Q: کوارتز، Cl: کلریت، Li: لیتیک)

آزمایش های که در این پژوهش جهت تعیین ویژگی های مهندسی نمونه مورد مطالعه انجام شده است عبارتند از آزمایشهای تعیین خصوصیات فیزیکی که شامل درصد جذب آب، درصد تخلخل، دانسیته خشک و سرعت امواج طولی در حالت خشک و اشباع می باشد. همچنین خصوصیات مکانیکی نمونه ها نیز با انجام آزمایش برزیلین و مقاومت فشاری تک محوری بر اساس استاندارد ISRM,1979 مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ - ویژگی های مهندسی سنگ های مورد مطالعه

شماره نمونه	درصد جذب آب	درصد تخلخل	دانسیته خشک (gr/cm ³)	دانسیته اشباع (gr/cm ³)	سرعت موج P در حالت خشک (m/s)	سرعت موج P در حالت اشباع (m/s)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مدول یانگ E(GPa)	ضریب پواسون ν	مدول بالک K(GPa)
Abazar	۱۳/۵	۲۵	۱/۷۲	۱/۹۸	۲۵۶۸	۲۱۱۲	۳۰	۴/۵	۰/۳۸	۶/۲۵

به منظور مطالعه رفتار خزشی این نمونه، آزمایش خزش در شرایط بارگذاری تک محوری انجام شد. میزان بار اعمالی بر روی نمونه برابر ۲۰/۴ مگاپاسکال می باشد که تقریباً در حدود ۷۰ درصد مقاومت تراکمی این سنگ می باشد. در مدت ۶۸۰ ساعت میزان تغییرات کرنش محوری سنگ تحت بار اعمالی مورد قرائت قرار گرفت. تغییرات کرنش محوری با زمان در طول آزمایش در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار کرنش محوری با زمان در طول مدت آزمایش در فشار محوری ۲۰/۴ مگاپاسکال بر روی نمونه مورد آزمایش

همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می گردد میزان جابجائی خزشی نمونه مورد مطالعه بر اساس تغییرات کرنش و در نظر گرفتن طول اولیه نمونه (۱۳۱/۴۹ میلی متر) برابر با ۰/۳۹ میلی متر در طول مدت آزمایش می باشد. همچنین تابع توانی بر روی داده های آزمایشگاهی شکل ۶ برازش شده است و تابع برازش شده مطابقت خوبی با توابع توانی دارند.

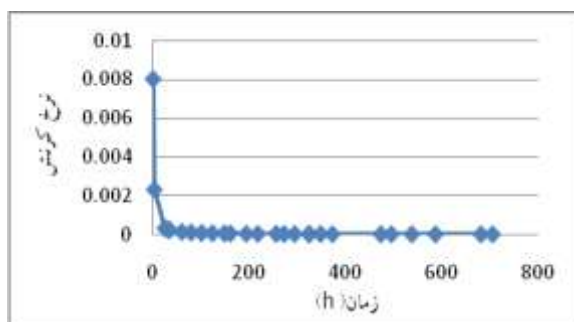
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + at^\beta \quad (1)$$

ε_0 کرنش اولیه و α و β ثابت های مواد هستند. معادله نمودار شکل ۶ از رگرسیون غیر خطی توانی در نرم افزار اکسل بدست آمده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود معادله تابع برازش شده از ضریب همبستگی R^2 بالایی برخوردار است که نشان دهنده آن است که داده ها مطابقت خوبی با توابع توانی دارند.

اگر از معادله (۱) نسبت به زمان مشتق بگیریم نرخ کرنش به صورت زیر بدست می آید.

$$\varepsilon' = \beta \times t^{\beta-1} \quad (2)$$

با استفاده از رابطه ۲ نرخ کرنش برای آزمایش فوق بدست آمده و تغییرات نرخ کرنش نسبت به زمان در شکل ۷ نشان داده شده است.

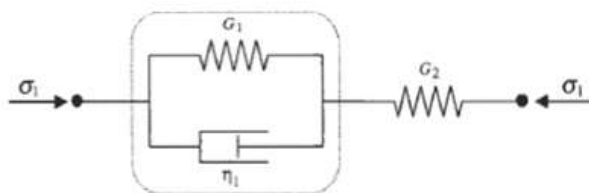


شکل ۷- نمودار تغییرات نرخ کرنش نسبت به زمان

همانطور که شکل ۷ مشاهده می گردد با افزایش زمان، نرخ کرنش کاهش می یابد و در نهایت به مقدار ثابتی می رسد. نقطه ای که در آن نرخ کرنش به مقدار ثابتی می رسد نشان دهنده پایان خزش اولیه است. برای بدست آوردن ثابت های مختلف ویسکو الاستیک این سنگ از مدل کلون-ویت استفاده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود این مدل از ترکیب دو فنر و یک میراگر تشکیل شده است. معادله این مدل در تنش تک محوری به شرح زیر می باشد.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{3} \left\{ \frac{2}{3k} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2 t}{\eta_1}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

که در این رابطه σ_1 میزان تنش اعمالی بر روی نمونه، k مدول بالک نمونه و G_1, G_2, η_1 ثابت های ویسکو الاستیک نمونه می باشند.



شکل ۸- مدل رئولوژیک کلونین-ویت

اگر معادله ۳ را برای $t = \infty$ باز نویسی نمائیم، معادله زیر بدست می آید.

$$\varepsilon_1(\infty) = \frac{\sigma_1}{3} \left[\frac{2}{3k} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_1} \right] \quad (۴)$$

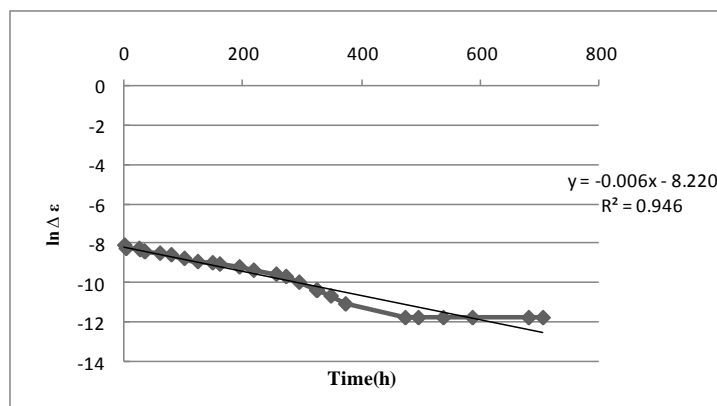
اختلاف بین کرنش دراز مدت و کرنش در زمان t از رابطه زیر بدست می آید:

$$\varepsilon_1(\infty) - \varepsilon_1(t) = \Delta\varepsilon = \frac{\sigma_1}{3} \left\{ \frac{1}{G_1} \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right\} \quad (۵)$$

و در نهایت با باز نویسی رابطه فوق رابطه ۶ بدست خواهد آمد.

$$\ln(\Delta\varepsilon) = -\frac{G_1}{\eta_1} t + \ln\left(\frac{\sigma_1}{3G_1}\right) \quad (۶)$$

بنابراین اگر تغییرات کرنش را نسبت به زمان رسم نمائیم. خطی بدست می آید که شیب آن برابر با $-\frac{G_1}{\eta_1}$ و عرض از مبدا $\ln\left(\frac{\sigma_1}{3G_1}\right)$ می باشد (شکل ۹). با توجه به این مقادیر مدول های G_1 و η_1 قابل محاسبه است.



شکل ۹- نمودار تغییرات $\ln \Delta\varepsilon$ در مقابل زمان

بر این اساس مقدار G_1 و η_1 از رابطه زیر بدست می آید.

$$G_1 = \frac{\sigma_1}{3\Delta\varepsilon} = 20.4 \times 10^6 / (3 \times 2.97 \times 10^{-4}) = 22.8 \text{ GPa}$$

$$\eta_1 = \frac{G_1}{0.006} = \frac{22.8 \times 10^9}{0.006} = 3815 \text{ GPa.h}$$

و در نهایت اگر معادله ۳ را در زمان $t=0$ بازنویسی نمائیم می توانیم مقدار G_2 را بدست آوریم.

$$\varepsilon_1(0) = \frac{\sigma_1}{3} \left\{ \frac{2}{3K} + \frac{1}{G_2} \right\} \quad (7)$$

$$G_2 = \frac{1}{3 \frac{\varepsilon_1(0)}{\sigma_1} - \frac{2}{3K}} \quad (8)$$

در این رابطه $\varepsilon_1(0)$ میزان کرنش الاستیک آنی در شروع آزمایش خزش می باشد که برابر با 5.91×10^{-3} است. با جاگذاری مقادیر معلوم در معادله فوق مقدار G_2 برابر با $1/31$ گیگا پاسکال محاسبه می گردد.

۴- نتیجه گیری

۱- مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که دستگاه طراحی شده مورد بحث از عملکرد مناسبی برای انجام آزمایش های خزش برخوردار است و دارای قابلیت اعمال بار دراز مدت می باشد. همچنین به دلیل توان اعمال بار بالا می تواند برای مطالعه رفتار خزشی سنگ های سخت نیز بکار رود.

۲- نمونه مورد مطالعه در فشار تک محوری $20/4$ مگاپاسکال که معادل با 70% مقاومت فشاری تک محوری سنگ می باشد در مدت 680 ساعت، $0/39$ میلی متر جابجائی خزشی داشته است.

۳- یا توجه به شکل ۷ نمونه مورد آزمایش بیست ساعت بعد از اعمال بار محوری ($20/4$ مگاپاسکال) وارد مرحله ثانویه خزش شده است.

۲- مقادیر ثابت های ویسکو الاستیک توف های جوش خورده شمال قزوین بر اساس مدل کلوین-ویت $G_1 = 22/8$ GPa، $G_2 = 1/31$ GPa و η_1 برابر 3815 GPah برآورد شده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از ریاست محترم دانشگاه بوعلی سینا همدان جناب آقای دکتر زلفی گل و مدیر دفتر هدایت استعداد درخشان دانشگاه جناب آقای دکتر فیضی که منابع مالی ساخت دستگاه را فراهم نموده اند کمال تقدیر و تشکر را می نمایند.

منابع

- Beniawski, Z.T. (1967). "Mechanism of brittle fracture of rock". International Journal Rock Mechanic & Mining Sciences, 4, pp.425-430.
- Hudson, J.A. (1993). "Comprehensive Rock Engineering, principles practice & projects: Rock testing and site characterization", Vol. 3, Pergamon Press, Oxford.
- ISRM, (1979). "Commission on Standardization of Laboratory and Field tests, suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties", International journal rock mechanic mining science, Vol. 16, pp. 48-156.
- Okubo, S., Nishimatsu Y., Fukui, K. (1991). "Complete creep curves under uniaxial compression", International Journal Rock Mechanic and Mining Sciences & Geomechanics, 28(1), pp.77-82.