

طراحی سلول و ایجاد دستگاه آزمایش برای اندازه گیری نفوذ پذیری شعاعی در سنگها

مهدي حسيني^۱

چکیده

نفوذپذیری یک خصوصیت خیلی مهم در سنگها است و جریان سیال در داخل سنگها را کنترل می کند. در اکثر سلولهای موجود در آزمایشگاههای مکانیک سنگ آب در امتداد محور نمونه استوانه ای شکل حرکت می کند. این سلولها برای تعیین نفوذپذیری طولی سنگ مورد استفاده قرار می گیرد در حالی که سیال به صورت شعاعی در سنگهای اطراف چاههای آب و نفت نفوذ می کند. هدف از این تحقیق، طراحی سلول و کالیبره کردن دستگاهی است که برای تعیین نفوذپذیری شعاعی سنگ به کار می رود. برای بررسی عملکرد دستگاه آزمایش چندین آزمایش بر روی یک سنگ مصنوعی به نام CPIR09 و همچنین سنگ تراورتن انجام گردید. نتایج آزمایشها نشان می دهد دستگاه آزمایش از عملکرد خوبی برخوردار است. همچنین به کمک این دستگاه آزمایش امکان اندازه گیری مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ وجود دارد.

واژگان کلیدی: نفوذپذیری شعاعی، سلول آزمایش نفوذپذیری، سنگ

۱- مقدمه

سپس دبی جریان آب خارج شده از نمونه سنگ اندازه گیری می شود و با توجه به ابعاد نمونه، دبی جریان آب و فشار آب، نفوذ پذیری شعاعی سنگ تعیین می گردد. مطالعات کتابخانه ای نشان می دهد این آزمایش اولین بار توسط آقای Bernaix (۱۹۶۹) انجام شده است. برای بررسی عملکرد دستگاه آزمایش چندین آزمایش بر روی یک سنگ مصنوعی به نام CPIR09 و همچنین بر روی سنگ تراورتن (که از شهر آبگرم واقع در جاده قزوین - همدان برداشت شده است) انجام شده است. همچنین به کمک این دستگاه آزمایش امکان اندازه گیری مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ وجود دارد. اسکلت سنگها از دو قسمت که شامل مواد تشکیل دهنده سنگ و فضای خالی می باشد تشکیل شده است [۲]. در بررسی رفتار هیدرومکانیکی سنگهای متخلخل که سنگ تحت تأثیر فشار محصور کننده و فشار منفذی قرار دارد بر طبق تئوری پروالاستیک (Poroelastic) تنش مؤثر از رابطه ۱ به دست می آید [۳].

$$\sigma_{ef} = \sigma - \alpha P \quad (1)$$

نفوذپذیری یک خصوصیت خیلی مهم در سنگها است بدلیل آنکه جریان سیال را در داخل سنگها کنترل می کند. اکثر سلولهای موجود در آزمایشگاههای مکانیک سنگ طوری طراحی شده است که آب در امتداد محور نمونه استوانه ای شکل حرکت می کند. این سلولها برای تعیین نفوذپذیری طولی سنگ مورد استفاده قرار می گیرد در حالی که در چاههای آب و نفت سیال به صورت شعاعی در سنگ نفوذ می کند. هدف از این تحقیق، طراحی و کالیبره کردن دستگاهی است که برای تعیین نفوذپذیری شعاعی سنگ به کار می رود. در این نوع سلول آب به صورت شعاعی به داخل نمونه رسوخ پیدا می کند. در مرکز نمونه استوانه ای شکل یک حفره ایجاد شده است که جریان آب به صورت همگرا از حاشیه به سمت حفره مرکزی برقرار می گردد [۱].

مقاله در تاریخ ۸۶/۶/۳۱ دریافت و در تاریخ ۸۶/۹/۱۶ به تصویب نهایی رسید.

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن،

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، meh_hosseini@yahoo.com



شکل ۱ تصویر سلول آزمایش

درب سلول دارای قطر ۱۰ سانتیمتر است و بر روی آن دو سوراخ استوانه ای که ارتفاع و قطر قاعده هر یک ۱ سانتیمتر می باشد برای محکم کردن درب سلول بر روی بدنه، یک سوراخ برای ورود آب به قطر ۱ و عمق ۲ سانتیمتر و یک سوراخ برای خروج آب به قطر ۱ و عمق ۱ سانتیمتر ایجاد شده است. در روی درب سلول دو قطعه فلزی مستطیل شکل به طول ۴/۵ و عرض ۲ و ضخامت ۱ سانتیمتر وجود دارد. در روی هر قطعه فلزی دو سوراخ به فاصله ۱/۵ سانتیمتر از همدیگر و ۰/۵ سانتیمتر از لبه های قطعه، به قطر ۱ و عمق ۱ سانتیمتر ایجاد شده است. به وسیله این دو قطعه درب سلول بر روی بدنه ثابت می گردد. همچنین یک دستگیره برای باز کردن درب سلول تعبیه شده است. شکل ۲ درب سلول را نشان می دهد.

در طرف دیگر درب سلول یک سوراخ به قطر ۲ و عمق ۱ سانتیمتر ایجاد شده که در داخل آن یک پیچ شش گوش به قطر داخلی ۱، قطر خارجی ۲ و طول ۱ سانتیمتر قرار می گیرد (شکل ۳). در داخل این پیچ یک میله فولادی توخالی جهت خروج آب از نمونه سنگ محکم می گردد (شکل ۴). شکل ۵ شمای سلول آزمایش را نشان می دهد.

در این رابطه :

σ_{ef} : تنش مؤثر

σ : فشار محصور کننده

α : ضریب بیو (Biot's coefficient)

P : فشار منفذی

ضریب بیو (Biot's coefficient) از رابطه ۲ به دست می آید.

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s} \quad (2)$$

در این رابطه :

K_b : مدول حجمی زهکشی شده

K_s : مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ

برای به دست آوردن ضریب بیو (α) نیاز است ضرایب K_b و K_s تعیین گردد. K_b را به کمک یک آزمایش زهکشی شده تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) می توان تعیین کرد. K_s را به کمک این دستگاه آزمایش می توان به دست آورد.

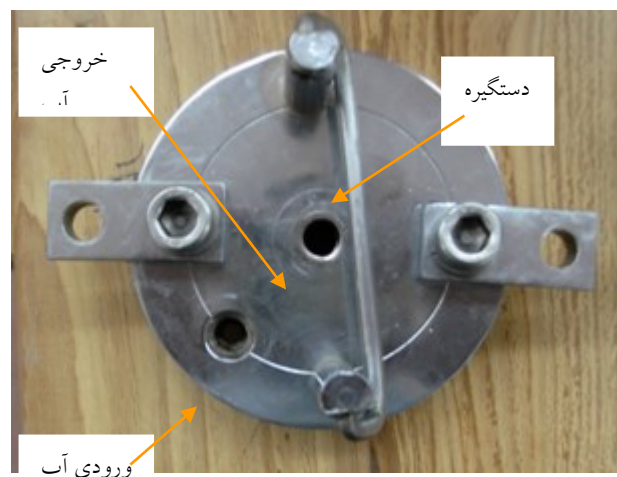
۲- طراحی سلول

هدف از انجام این طرح، طراحی سلولی است که برای تعیین ضریب نفوذ پذیری شعاعی سنگها به کار می رود. بدنه سلول، استوانه ای به قطر خارجی ۱۴ سانتیمتر، قطر داخلی در ۲ سانتیمتر بالای سلول ۱۰ و در بقیه قسمتها ۹ سانتیمتر می باشد. ارتفاع کلی سلول ۱۸ سانتیمتر و ارتفاع بخش توخالی آن ۱۵/۵ سانتیمتر است. همچنین دو سوراخ استوانه ای که ارتفاع و قطر قاعده هر یک ۱ سانتیمتر می باشد برای محکم کردن درب سلول بر روی بدنه ایجاد شده است. شکل ۱ بدنه سلول را نشان می دهد.





شکل ۴ تصویر نمونه سنگ به همراه میله فولادی توخالی جهت خروج آب از نمونه



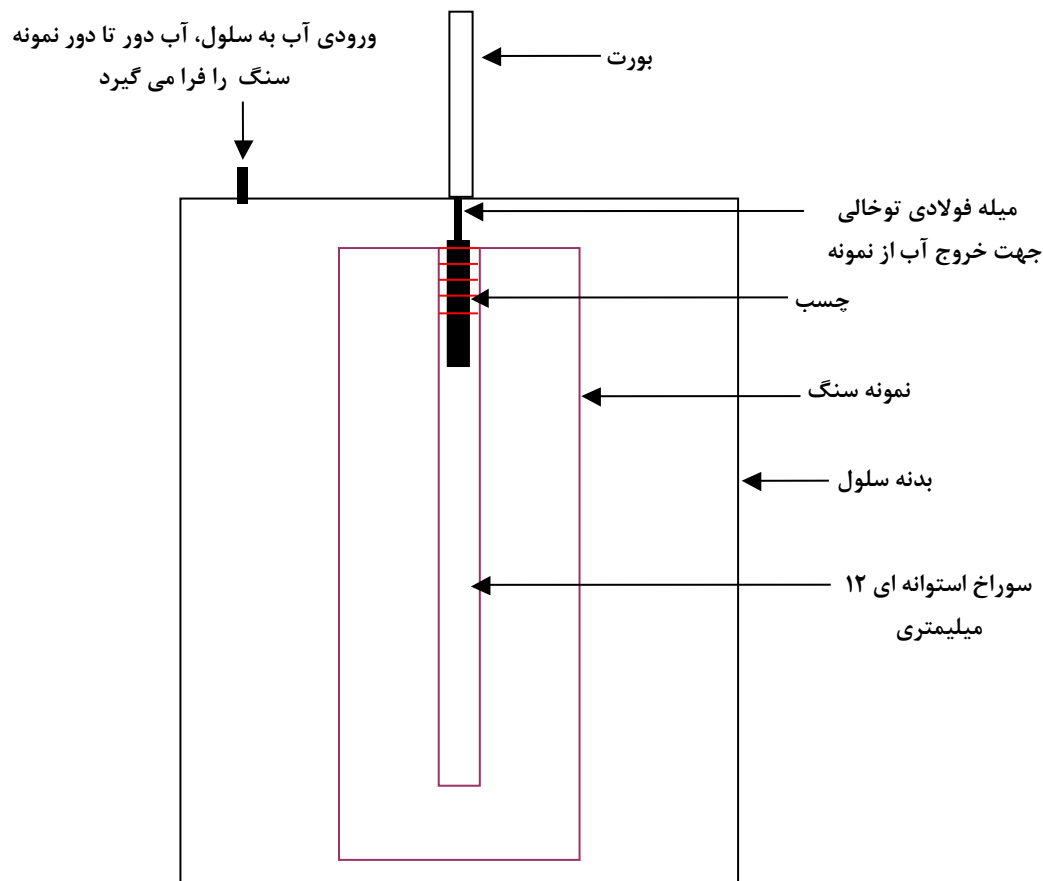
شکل ۲ تصویر درب سلول

۳- آماده سازی نمونه‌ها

هدف از انجام مرحله آماده سازی، تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۵۴/۷ mm است. این نمونه‌ها برای انجام آزمایشهای مورد نظر استفاده می‌شوند. برای تهیه این نمونه‌ها از دستگاه مغزه‌گیر (ساخت شرکت ELE) استفاده شده است (شکل ۶). در مرحله دوم باید سر و ته نمونه که ناصاف است بریده شود و نمونه‌ای با طول مناسب (بین ۱۰ تا ۱۱ سانتیمتر) برای انجام آزمایش آماده گردد. برای این کار از دستگاه برش سنگ استفاده می‌گردد. که حاوی یک دیسک گردان می‌باشد (شکل ۷). قبل از قراردادن نمونه در داخل دستگاه، به وسیله کولیس طول مناسب اندازه‌گیری شده و به وسیله مداد نقاطی که باید بریده شود علامت زده می‌شود.



شکل ۷ تصویر سر پیچ در درب سلول



شکل ۵ شمای سلول آزمایش



شکل ۷ دستگاه برش سنگ (ساخت شرکت ELE)



شکل ۶ دستگاه مغزه گیر (ساخت شرکت ELE)

۴- آزمایش نفوذ پذیری

۴-۱ تئوری آزمایش

نفوذپذیری قابلیت سنگ برای عبور دادن مایعات از خود می باشد. هنگامی که آب زیرزمینی از لایه ها و سنگهای متخلخل اشباع شده می گذرد، دبی جریان متناسب با سطح مقطع و شیب هیدرولیکی خواهد بود. این قانون اولین بار توسط هنری دارسی در سال ۱۸۶۵ عنوان شد و به قانون دارسی مشهور است. زمانی که سیال به صورت شعاعی به داخل یک نمونه استوانه ای شکل توخالی (در وسط استوانه یک سوراخ وجود دارد) وارد و از سوراخ

Q : دبی خروجی از نمونه سنگ بر حسب متر مکعب بر ثانیه

μ : ویسکوزیته دینامیکی سیال (برای آب 10^{-9}) بر حسب مگاپاسکال در ثانیه

r_e : شعاع خارجی نمونه

r_i : شعاع داخلی نمونه

L : طول مؤثر سوراخ مرکزی بر حسب متر

P_f : فشار سیال بر حسب مگاپاسکال

K : نفوذپذیری بر حسب متر مربع

در مرحله بعد یک حفره در مرکز مغزه استوانه ای شکل به قطر ۱۲ میلیمتر و طول ۹۰ میلیمتر ایجاد می گردد. بلوکهای سنگ تراورتن از شهر آبگرم برداشت شده است و سنگ مصنوعی CPIR09 (سازنده: شرکت CTI فرانسه) سنگی متخلخل است که مؤلف مقاله در تحقیقات دوره دکترایش در کشور فرانسه از آن استفاده کرده است. اساس ماده مورد نظر رس می باشد این رس با مواد ایجاد کننده تخلخل، آب و چسب مخلوط می شوند سپس این مخلوط، فشرده و خشک می شود و در درجه حرارت بالای $1300^{\circ}C$ پخته می شوند. در اثر پخته شدن به علت انبساط مواد ایجاد کننده تخلخل یک ماده متخلخل بدست می آید [۴]. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن سنگ مصنوعی CPIR09 در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. مرکزی از نمونه خارج می گردد این فرمول به صورت ذیل در می آید و نفوذپذیری از رابطه ۳ محاسبه می گردد [۵و۶]. آزمایش نفوذپذیری از طریق نفوذ سیال تا کنون توسط ISRM و یا ASTM استاندارد نشده است.

در این رابطه:

$$K = \frac{Q\mu \ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi L P_f} \quad (3)$$

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن

$\rho_{sat} (gr/cm^3)$	$\rho_{sec} (gr/cm^3)$	$\sigma_c (MPa)$	ν	$E(GPa)$
۲/۳۹	۲/۲۹۵	۱۲/۶	۰/۳۲	۲/۶۱

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مصنوعی CPIR09

$\rho_{sat} (gr/cm^3)$	$\rho_{sec} (gr/cm^3)$	$\sigma_c (MPa)$	ν	$E(GPa)$
۱/۳۶۷	۰/۸۹۹	۱۸/۶	۰/۱۸	۹



شکل ۸ سیستم تولید کننده فشار ثابت
(ساخت شرکت ELE)



شکل ۹ گیج فشار

۴-۳ نمونه های مورد آزمایش

نمونه هایی که برای آزمایش مورد استفاده قرار می گیرند نمونه های استوانه ای شکل به قطر ۵۴ میلیمتر می باشند که یک سوراخ به قطر ۱۲ میلیمتر در مرکز استوانه ایجاد شده است. طول نمونه بین ۱۰ تا ۱۱ سانتیمتر و طول سوراخ مرکزی بین ۸ تا ۹ سانتیمتر می باشد.

۴-۴ مراحل آزمایش

مراحل آزمایش عبارتند از:

- الف) اندازه گیری قطر خارجی، داخلی و طول سوراخ مرکزی نمونه
- ب) قراردادن میله فولادی توخالی در داخل سوراخ مرکزی و محکم کرن آن بوسیله چسب سیلیکون، این میله جهت خروج آب از نمونه سنگ به کار می رود.

همچنین K_s که برای تعیین ضریب بیولازم است را به کمک این دستگاه آزمایش می توان به دست آورد. برای تعیین مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ یک آزمایش سه محوری در شرایط تنش هیدرواستاتیک ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) بر روی نمونه بدون پوشش (membrane) انجام می گیرد [۷]. در این حالت فشار محصورکننده با فشار منفذی برابر است. در این آزمایش میزان کرنش حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ را که در اثر اعمال تنش هیدرواستاتیک به وجود می آید به کمک کرنش سنج نصب شده روی نمونه می توان اندازه گیری کرد (رابطه ۴).

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه:

ε_v : کرنش حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ

ε_1 ، ε_2 و ε_3 کرنشهای اصلی می باشند.

در صورت رسم منحنی فشار محصورکننده در برابر کرنش حجمی می توان مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ (K_s) را به دست آورد (رابطه ۵).

$$\sigma = K_s \cdot \varepsilon_v \quad (\text{رابطه ۵})$$

۴-۲ وسایل آزمایش

وسایل آزمایش عبارتند از:

الف) سلول آزمایش

ب) سیستم تولید کننده فشار ثابت: از سیستم فشار آب-روغن ساخت شرکت ELE استفاده شده است (شکل ۸).

ج) خطوط انتقال آب: شامل لوله های پلاستیکی مقاوم در برابر فشار آب

د) گیج فشار: جهت اندازه گیری فشار آب (شکل ۹)

ه) بورت مدرج: برای اندازه گیری حجم آب

و) زمان سنج



ج) بعد از خشک شدن چسب، میله فولادی در سوراخ خروجی آب که روی درب سلول قرار دارد محکم می گردد سپس سلول با آب پر شده و نمونه در آن قرار می گیرد.
 د) محکم کردن درب سلول روی بدنه سلول به کمک پیچ
 ه) متصل کردن لوله های ورودی و خروجی آب به سلول
 و) روشن کردن دستگاه تولید کننده فشار آب
 ز) اعمال فشار ثابت آب به نمونه سنگ
 ح) بعد از اینکه آب از نمونه خارج گردید، حجم آب خروجی در مدت زمان معینی اندازه گیری می شود. شکلهای ۱۰ تا ۱۳ مراحل ذکر شده را نشان می دهد.

شکل ۱۰ نمونه سنگ بعد از قراردادن میله فولادی توخالی در داخل سوراخ مرکزی و محکم کردن آن بوسیله چسب سیلیکون



شکل ۱۲ تصویر سلول بعد از محکم کردن درب سلول روی بدنه سلول به کمک پیچ و متصل کردن لوله های ورودی و خروجی آب.



شکل ۱۱ نمونه سنگ بعد از محکم کردن میله فولادی در سوراخ خروجی آب که روی درب سلول قرار دارد.



شکل ۱۳ تصویر دستگاه آزمایش

۴-۵ نتایج آزمایش

جهت تست کردن دستگاه روی سه نمونه استوانه ای شکل سنگ تراورتن و سه نمونه استوانه ای شکل سنگ مصنوعی CPIR09 آزمایش نفوذ پذیری انجام شده است. نتایج این آزمایشها را در جدول ۱ و ۲ مشاهده می کنید. با توجه به اینکه نمونه ها نفوذ پذیری بالایی دارند فشار سیال ۰/۰۴ مگاپاسکال انتخاب شد. سیستم تولید کننده فشار توانایی تولید فشار تا ۳/۵ مگاپاسکال را دارد.

جدول ۱ نتایج آزمایش روی سنگ تراورتن

شماره نمونه	r_i (mm)	r_e (mm)	L' (mm)	P_f (MPa)	K (m ²)
۱	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۷/۵۴ \times ۱۰^{-۱۲}$
۲	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۷/۸۲ \times ۱۰^{-۱۲}$
۳	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۷/۳۱ \times ۱۰^{-۱۲}$

جدول ۲ نتایج آزمایش روی سنگ مصنوعی

شماره نمونه	r_i (mm)	r_e (mm)	L' (mm)	P_f (MPa)	K (m ²)
۱	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۱۳}$
۲	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۱/۳۹ \times ۱۰^{-۱۳}$
۳	۱۲	۵۴	۹۰	۰/۰۴	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۱۳}$

۵- نتیجه گیری

نفوذپذیری یک خصوصیت خیلی مهم در سنگها است بدلیل آنکه جریان سیال را در داخل سنگها کنترل می کند. در چاههای آب و نفت سیال به صورت شعاعی در سنگ نفوذ می کند. سلول طراحی شده این امکان را فراهم می کند تا بتوان نفوذپذیری شعاعی سنگ را تعیین کرد. بعد از نصب دستگاه برای بررسی عملکرد آن چند آزمایش بر روی سنگ تراورتن و سنگ مصنوعی CPIR09 انجام شد. مؤلف مقاله در بخشی از تحقیقات دوره دکترایش در کشور فرانسه این آزمایش را توسط سلولی مشابه سلول طراحی شده انجام داده است لذا میزان نفوذپذیری نمونه ها قبل از آزمایش کردن دستگاه مشخص می باشد. نتایج آزمایشهای نفوذپذیری نشان می دهد دستگاه ساخته شده از عملکرد خوبی برخوردار است. همچنین به کمک این دستگاه آزمایش امکان اندازه گیری مدول حجمی مواد تشکیل دهنده سنگ (K_s) وجود دارد.

مراجع

- [۱] وتوکوری، وی. اس. و کاتسویاما، ک.، درآمدی بر مکانیک سنگ، ترجمه دکتر محمد فاروق حسینی، انتشارات مرکز خدمات فرهنگی سالکان، ۱۳۷۰.
- [2] Lion, M., Skoczylas, F. & Ledésert, B., Determination of the main hydraulic and poroelastic properties of a limestone from Bourgogne, France”, Int. J. Rock Mech. Sci Geomech., Vol. 41, 2004, pp. 915-925.
- [3] Warpinski, N.R., Teufel, L.W., Laboratory Measurements of the effective-stress law for carbonate rocks under deformation, ”, Int. J. Rock Mech. Sci Geomech., Vol. 30, 1993, pp. 1169-1172.
- [4] Hosseini, M., Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'une roche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation, Ph.D. Thesis, Univ. Grenoble 1, 2005.
- [۵] فهیمی فر، احمد، سروش، حامد، آزمایش های مکانیک سنگ، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۰.
- [6] Papamichos, E., Vardoulakis, I., Tronovlle, J. & Skjaerstein, A., Volumetric sand production model and experiment, Int. J. Num. Analy. Methods in geomech., Vol.25, 2001, pp. 789-808.
- [7] Fabre, D. & Gustkiewicz, J., Poroelastic properties of limestones and sandstones under hydrostatic conditions, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., Vol. 34, 1997, pp. 127-134.