

## طراحی و ساخت دستگاه آزمایش برای بررسی پایداری حفریات زیرزمینی

مهدی حسینی\*

استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، E-mail: meh\_hosseini@yahoo.com

(دریافت ۵ خرداد ۱۳۸۷، پذیرش ۲۹ فروردین ۱۳۸۸)

### چکیده

در طی حفاری فضاهای زیرزمینی از قبیل تونل، مغار و چاه‌ها تمرکز تنش در نزدیکی این بازکننده‌ها افزایش می‌یابد و مسئله ناپایداری در این حفریات زیرزمینی اتفاق می‌افتد. آزمایش روی استوانه‌های توخالی جدار ضخیم سنگ یک روش ساده، اقتصادی و واقعی برای بررسی پایداری و مکانیزم شکست فضاهای زیرزمینی است. در این مقاله این دستگاه آزمایش توضیح داده شده است. به منظور بررسی عملکرد دستگاه جدید و نمایش قابلیت‌های آن، یک سری آزمایش بر روی یک سنگ مصنوعی متخلخل انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها بر روی ماده CRIR09 نشان می‌دهد که بعد از شکست، یک جفت صفحه شکست شعاعی مشاهده می‌شود. این باندها در اثر مکانیزم تراکمی (compacting failure mechanism) تشکیل شده است بدلیل آنکه صفحه شکست عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر می‌باشد. این نوع شکست معمولاً در مواد خیلی متخلخل اتفاق می‌افتد.

### کلمات کلیدی

استوانه توخالی، آزمایش سه محوری، حفریات زیرزمینی و پایداری

## ۱- مقدمه

در طی حفاری فضاهای زیرزمینی از قبیل تونل، مغار و چاه‌ها تمرکز تنش در نزدیکی این بازکننده‌ها افزایش می‌یابد و مسئله ناپایداری در این حفاریات زیرزمینی اتفاق می‌افتد. آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی با دیواره‌های ضخیم یک روش ساده، اقتصادی و واقعی برای بررسی پایداری و مکانیزم شکست فضاهای زیرزمینی است.

این پژوهش بر روی یک ماده متخلخل مصنوعی که CPIR09 نامیده می‌شود انجام شده است. با این دستگاه امکان انجام آزمایش در شرایط خشک و در شرایط وجود جریان شعاعی همگرای سیال منفذی وجود دارد. محققین متعددی روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم سنگ آزمایش انجام داده‌اند ولی عمده تحقیقات انجام شده در گذشته روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی سنگ با تخلخل کم یا متوسط انجام شده است در حالی که این تحقیق روی یک سنگ متخلخل انجام می‌شود. برخی از این تحقیقات انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است. دستگاه‌های آزمایش که توسط آقایان سانترلی<sup>۱</sup> و براون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۷، آقایان اوی<sup>۳</sup> و کوک<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۰ و آقایان وانگ<sup>۵</sup> و وو<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۱ مورد استفاده قرار گرفته است برای بررسی پایداری حفاریات زیرزمینی بعد از حفاری در شرایط خشک کاربرد دارد در حالی که دستگاه آزمایش طراحی شده علاوه بر قابلیت فوق برای بررسی پایداری حفاریات زیرزمینی در حین حفاری نیز کاربرد دارد. در ضمن در شرایطی که جریان شعاعی سیال منفذی وجود دارد امکان بررسی تغییرات نفوذپذیری با تغییرات تنش مؤثر نیز وجود دارد. در این مقاله فقط نتایج آزمایش در شرایط خشک ارائه می‌شود. به منظور بررسی عملکرد دستگاه جدید و نمایش قابلیت‌های آن برای مدل کردن حفاری حفاریات زیرزمینی در شرایط خشک، یک سری آزمایش بر روی یک سنگ مصنوعی متخلخل انجام شده است. به کمک این دستگاه امکان به دست آوردن منحنی تغییرات تنش- کرنش در هنگام حفاری فضای زیرزمینی وجود دارد.

## ۲- دستگاه آزمایش

این دستگاه آزمایش برای انجام آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم تحت دو شرایط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

(۱) آزمایش بدون سیال منفذی (۲) آزمایش با جریان شعاعی همگرای (convergent) سیال منفذی.

ولی در این مقاله فقط به آزمایش‌هایی پرداخته شده که تحت شرایط بدون سیال منفذی انجام شده است. در این حالت نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم (شعاع خارجی استوانه  $r_e$  و شعاع داخلی آن  $r_i$  است) تحت یک فشار خارجی (فشار در  $r=r_e$ ) ثابت و یک فشار داخلی کاهشی (فشار در  $r=r_i$ ) قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها برای مدل کردن حفاری حفاریات زیرزمینی در شرایط خشک انجام می‌گیرد.

قسمت‌های اصلی این دستگاه آزمایش شامل [۱]:

۱- سلول سه محوری ۲- وسیله اندازه‌گیری فشار خارجی و فشار داخلی (ساخت شرکت RDP Electronics) ۳- وسیله اعمال کننده فشار جانبی و داخلی (مدل WF40080 ساخت شرکت ویکهام فرانس<sup>۷</sup> ۴- وسیله‌ای برای ثبت<sup>۸</sup> (مدل Fieldpoint ساخت شرکت National Instruments). اطلاعات خروجی وسایلی که فشار و کرنش نمونه را اندازه می‌گیرند.

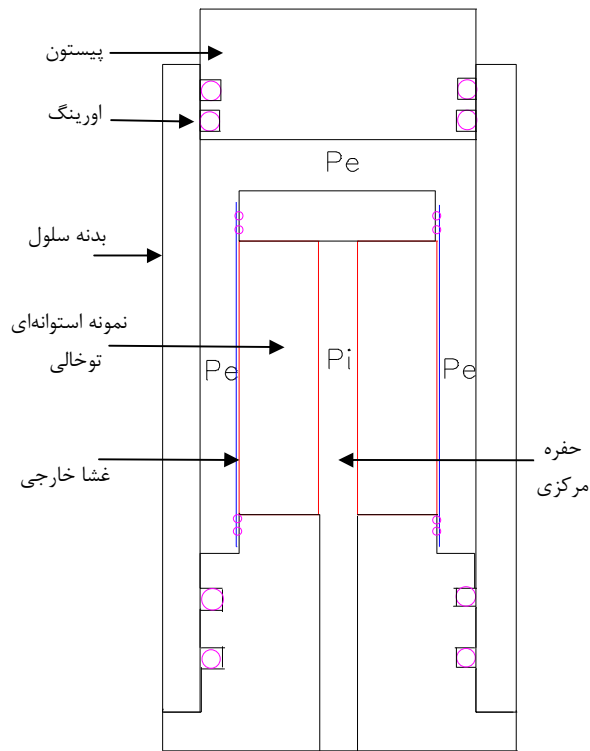
جدول ۱: برخی از تحقیقات انجام شده روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم سنگ [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]

نام محقق	سال	نوع سنگ مورد مطالعه
آقایان سانترلی و براون	۱۹۸۷	دولومیت گبدیک <sup>۹</sup> و ماسه سنگ کربونفر <sup>۱۰</sup> و دودینگتن <sup>۱۱</sup>
آقایان اوی و کوک	۱۹۹۰	ماسه سنگ برا <sup>۱۲</sup> و سنگ آهک ایندیانا <sup>۱۳</sup>
آقایان چن <sup>۱۴</sup> ، تان <sup>۱۵</sup> ، وو (Wu) و حیرفیلد <sup>۱۶</sup>	۱۹۹۸	شیل مصنوعی
آقایان وانگ و وو	۲۰۰۱	ماسه سنگ سمرسبای <sup>۱۷</sup>

در این مقاله فقط سلول سه محوری که مهم‌ترین قسمت دستگاه آزمایش است توضیح داده می‌شود.

## ۲-۱- سلول سه محوری

این سلول برای آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سلول سوراخ‌هایی برای عبور سیم‌های کرنش‌سنج‌ها تعبیه شده است به طوری که امکان نصب ۴ کرنش‌سنج در حفره مرکزی روی سطح داخلی و ۴ کرنش‌سنج روی سطح خارجی نمونه وجود دارد. یکی از کاربردهای این سلول استفاده از آن برای مدل کردن حفاری حفاریات زیرزمینی در شرایط خشک می‌باشد. شکل‌های ۲، ۱ و ۳ تصویر سلول سه محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲: سلول سه محوری بعد از مونتاژ شدن



شکل ۳: دستگاه آزمایش بعد از مونتاژ کردن

در این شکل‌ها  $P_i$  فشار داخلی ( فشار در حفره مرکزی) و  $P_e$  فشار خارجی (فشار در سطح خارجی نمونه) می‌باشد. برای ایزوله کردن نمونه‌های استوانه‌ای توخالی در مقابل سیالی (روغن) که برای اعمال فشار داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد از غشاهای لاستیکی استفاده شده است (جدول ۲). در این آزمایش پارامترهایی که در جدول ۳ ارائه شده است کنترل و اندازه‌گیری می‌شود. ظرفیت سلول ۷۰ مگاپاسکال می‌باشد. مشخصات قسمت‌های دستگاه در جداول ۴، ۵ و شکل ۴ ارائه می‌گردد.



شکل ۱: سلول سه محوری

جدول ۲: مشخصات غشاها

نوع غشا	قطر (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)
غشا خارجی	۹۵	۲۸۰	۱
غشا داخلی	۲۵	۳۳۰	۱/۲

۳- خصوصیات نمونه مورد مطالعه

ماده مورد استفاده به عنوان نمونه آزمایش ماده‌ای با تخلخل بالا ست. با توجه به اینکه مطالعات اندکی بر روی چنین موادی انجام شده است. حصول نتایج از این سری آزمایش می‌تواند بسیار مفید باشد.

ماده مورد مطالعه CPIR09 نامیده می‌شود (ساخت شرکت CTI فرانسه). اساس ماده مورد نظر رس می‌باشد این رس با مواد ایجاد کننده تخلخل، آب و چسب مخلوط می‌شود سپس این مخلوط فشرده و خشک شده و در درجه حرارت بالای  $1300^{\circ}C$  پخته می‌شود. در اثر پخته شدن به علت انبساط مواد ایجاد کننده تخلخل یک ماده متخلخل بدست می‌آید [۱]. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این ماده در جدول ۶ ارائه شده است. رفتار این ماده تا نقطه شکست الاستیک است و بعد از آن نقطه رفتار شکننده دارد.

۴- برنامه آزمایش

در این مقاله برنامه آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم که تحت یک فشار خارجی ثابت و یک فشار داخلی کاهشی قرار دارد، انجام می‌شود در این مقاله، آزمایش روی نمونه‌ها برای حالتی انجام شده است که وضعیت تنش هیدرواستاتیک ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) است. این وضعیت برای مدل کردن تونلهایی که در اعماق زیاد است قابلیت کاربرد دارد. سلول برای مدل کردن سایر شرایط تنش غیر از وضعیت تنش هیدرواستاتیک نیز قابل استفاده است.

آزمایش شامل دو مرحله است:

۱- فشار خارجی و فشار داخلی به طور همزمان تا مقدار  $P_{max}$  افزایش داده می‌شود.

۲- فشار خارجی در مقدار  $P_{max}$  ثابت نگه داشته می‌شود در حالی که فشار داخلی کاهش می‌یابد تا نمونه دچار شکست شود این آزمایش‌ها برای مدل کردن حفاری حفاریات زیرزمینی در شرایط خشک انجام می‌گیرد. شکل ۵ مراحل انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۶: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده مورد مطالعه

n (%)	$P_{sat}$ (g/Cm <sup>3</sup> )	$P_{sec}$ (g/Cm <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	$\nu$	E (GPa)
۴۶/۴۸	۱/۳۶۷	۰/۸۹۹	۱۸/۶	۰/۱۸	۹

جدول ۳: پارامترهای کنترل شده و اندازه گیری شده

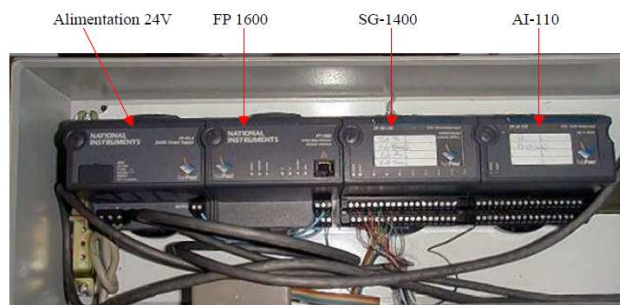
پارامتر	اندازه گیری شده	کنترل شده	وسيله اندازه گیری
کرنش محوری	*		کرنش سنج مقاومت الکتریکی
کرنش مماسی	*		کرنش سنج مقاومت الکتریکی
فشار خارجی	*		مبدل فشار
فشار خارجی		*	دستگاه تولید کننده فشار
فشار داخلی	*		مبدل فشار
فشار داخلی		*	دستگاه تولید کننده فشار

جدول ۴: مشخصات مبدل‌های فشار دستگاه

مدل	ظرفیت مبدل (مگاپاسکال)	شدت جریان خروجی (میلی آمپر)	دقت (%)
TP-14	۷۰	۴-۲۰	۰/۱

جدول ۵: مشخصات دستگاه تولید کننده فشار

مدل	ظرفیت مخزن (لیتر)	ماکزیمم دبی پمپ (سانتی متر مکعب بر دقیقه)	ظرفیت (مگاپاسکال)
WF40080	۱۲	۷۵	۱۴۰

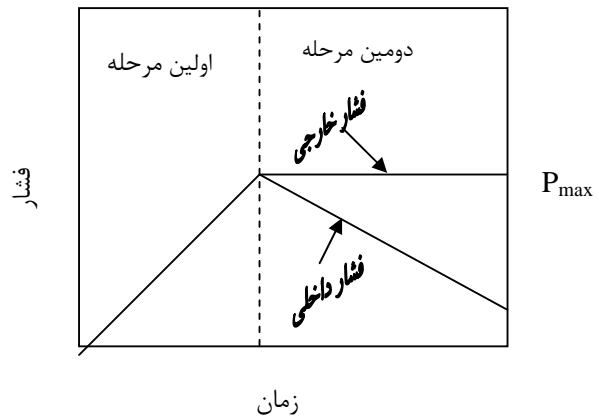


شکل ۴: دستگاه ثبت داده‌ها

قطر خارجی :  $98/90\text{ mm}$ ، قطر داخلی :  $25/38\text{ mm}$  و ارتفاع نمونه  $200\text{ mm}$ .

در این آزمایش در اولین مرحله فشار خارجی و فشار داخلی به طور همزمان تا مقدار  $16/50$  مگاپاسکال افزایش داده می‌شود. اگر فشار بیش از  $18$  مگاپاسکال افزایش یابد در نمونه ترک‌های ریز ایجاد می‌شود. به همین علت فشار تا مقدار  $16/50$  مگاپاسکال افزایش داده شده است. در دومین مرحله فشار خارجی در مقدار  $16/50$  مگاپاسکال ثابت نگه داشته می‌شود در حالی که فشار داخلی کاهش می‌یابد و نمونه در  $3/50$  مگاپاسکال دچار شکست می‌شود.

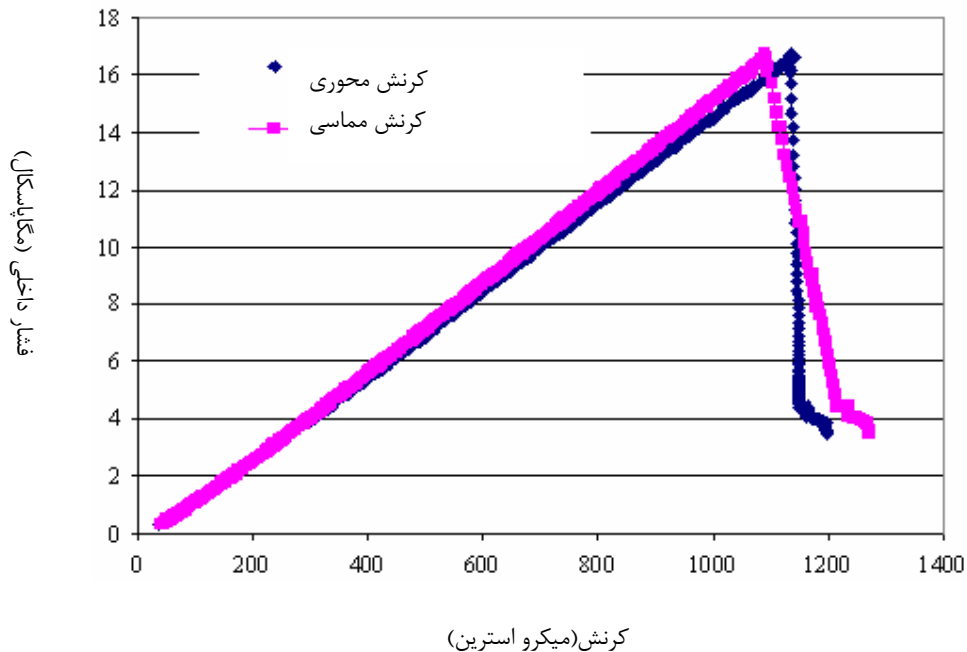
اشکال ۶ و ۷ نتایج یکی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. بعد از شکست نمونه یک جفت صفحه شکست شعاعی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. دو مقطع نازک از نمونه تهیه شده است که تصاویر میکروسکوپی آنها را مشاهده می‌کنید (شکل ۸).



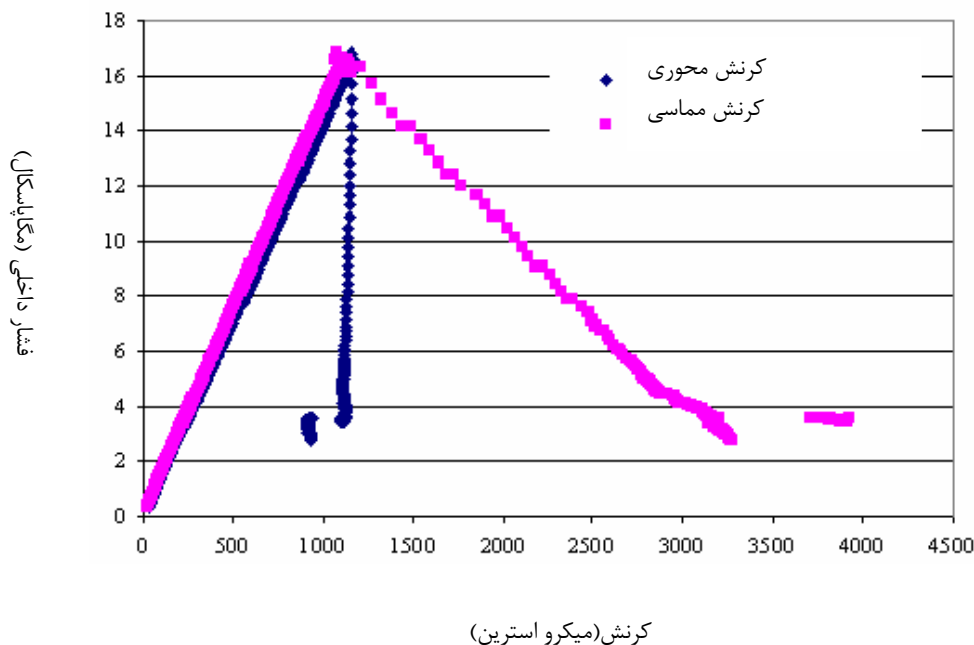
شکل ۵: مراحل آزمایش

### ۵- نتایج آزمایش

در این بخش نتیجه یکی از آزمایش‌ها ارائه می‌شود. مشخصات هندسی نمونه آزمایش عبارت است از:

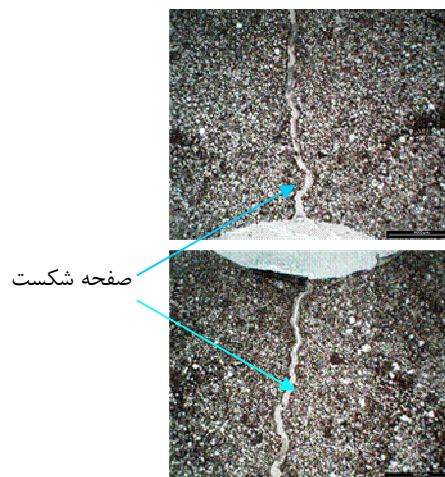


شکل ۶: منحنی فشار داخلی در برابر کرنش روی سطح خارجی نمونه



شکل ۷: منحنی فشار داخلی در برابر کرنش در روی دیواره داخلی

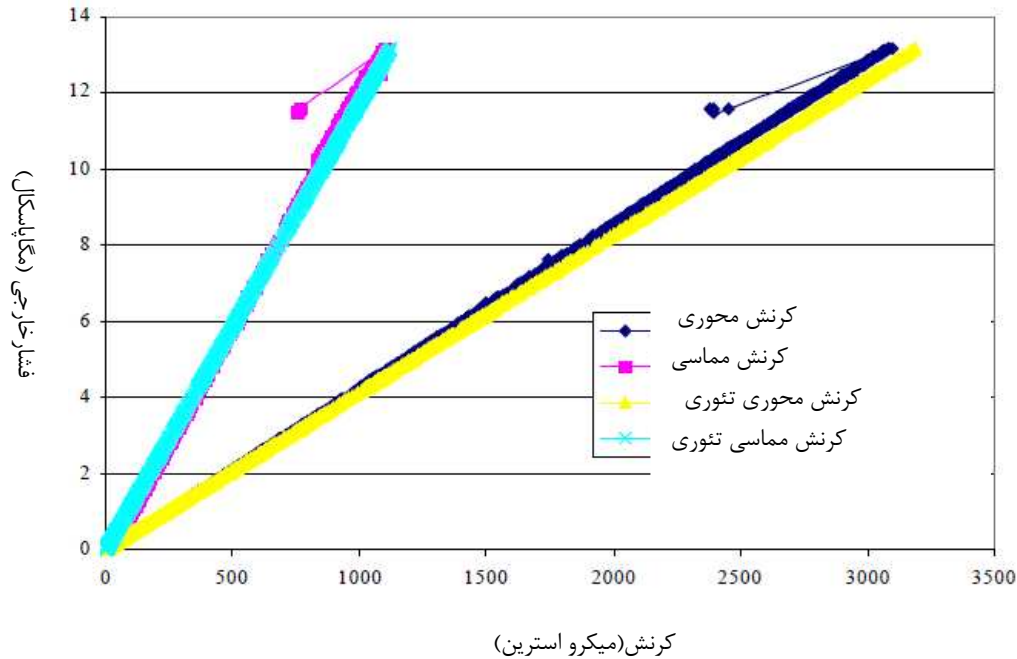
مماسی در دیواره فضای زیرزمینی در هنگام حفاری (شکل ۷ در دومین مرحله آزمایش) وجود دارد. در این آزمایش همانطور که مشاهده می‌کنید رفتار نمونه‌ها تا نقطه شکست الاستیک است (شکل ۷). نتایج آزمایش‌ها بر روی ماده CRIR09 نشان می‌دهد که بعد از شکست، یک جفت صفحه شکست شعاعی مشاهده می‌شود. این باندها در اثر مکانیزم تراکمی<sup>۱۸</sup> تشکیل شده است بدلیل آنکه صفحه شکست عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر می‌باشد. این نوع شکست معمولاً در مواد خیلی متخلخل اتفاق می‌افتد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که به کمک این دستگاه آزمایش امکان بررسی پایداری حفاری حفاریات زیرزمینی در شرایط خشک، و همچنین به دست آوردن منحنی تغییرات فشار در مقابل کرنش و بررسی مکانیزم شکست وجود دارد. با این دستگاه آزمایش همچنین می‌توان در شرایط وجود جریان شعاعی همگرای سیال منفذی نیز آزمایش انجام داد. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از آزمایش‌ها با توجه به اینکه نمونه مورد مطالعه دارای رفتار الاستیک است نتایج آزمایش با نتایج حاصل از روابط تئوری که برای استوانه توخالی جدار ضخیم وجود دارد مقایسه گردیده است این مقایسه اعتبار نتایج را تایید می‌کند (شکل ۹). در این آزمایش فشار داخلی صفر است و فشار خارجی تا شکست نمونه افزایش می‌یابد.



شکل ۸: الگوی شکست

### ۶- بحث و نتیجه گیری

وضعیت تنش در اطراف نمونه‌ها هیدرو استاتیک است این وضعیت برای مدل کردن تونل‌هایی کاربرد دارد که در اعماق زیاد حفر شده است. همانطور که در اشکال ۶ و ۷ مشاهده می‌کنید در اولین مرحله آزمایش مقدار کرنش محوری و مماسی یکسان است که نشان می‌دهد رفتار نمونه‌ها ایزوتروپ است. همانطور که قبلاً ذکر شد به کمک این دستگاه امکان به دست آوردن منحنی تغییرات فشار داخلی در مقابل کرنش



شکل ۹: منحنی فشار خارجی در برابر کرنش

[6] Wang, Y. and B. Wu, B.; 2001; "Borehole Collapse and Sand Production Evaluation: Experimental Testing, Analytical Solutions and Field Implications", 38<sup>th</sup> U.S. Rock Mech. Symp., Washington DC.

#### منابع

[1] Hosseini, M.; 2005; "Etude Experimental du Comportement Hydro-mecanique d'une Roche Poreuse en Relation avec les Problemes d'excavation", Ph.D thesis, Univ. Grenoble 1.

[2] Chen, X., Tan, C.P. and Haberfield, C.M.; 2000; "Numerical Evaluation of the Deformation Behaviour of Thick Walled Hollow Cylinders of Shale", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 37, pp. 947-961.

[3] Chen, X., Tan, C.P. and Haberfield, C. M.; 2000; "Modelling of the Undrained Behaviour of Thick Walled Hollow Cylinders of Shale", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 37, pp. 947-961.

[4] Ewy, R.T. and Cook, N.G.W.; 1990; "Deformation and Fracture around Cylindrical Opening in Rock"; 1990; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol 27, No. 5, pp. 387-417.

[5] Santarelli, F.J. and Brown, E.T. ; 1989; "Failure of Three Sedimentary Rocks in Triaxial and Hollow Cylinder Compression Tests", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 26, No. 5, pp. 401-413.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1 - Santarelli
- 2 - Brown
- 3 - Ewy
- 4 - Cook
- 5 - Wang
- 6 - Wu
- 7 - Wykeham Farrance
- 8 - Data acquisition
- 9 - Gebdykes
- 10 - Carboniferous
- 11 - Doddington
- 12 - Berea
- 13 - Indiana
- 14 - Chen
- 15 - Tan
- 16 - Haberfield
- 17 - Somersby
- 18 - Compacting Failure Mechanism

