مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۲-۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۱۱-۱۷

Original Article

# مطالعه و مدل‌سازی اثرات همبسته‌ی هیدرومکانیک در علل و مراحل خرابی کتیبه‌ی بیستون

**مهدی کریم‌نیا*** **(دانشجوی دکتری)**
**سید عبدالعظیم امیر شاه‌کرمی (استاد)**
**دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر**

کتیبه‌ی بیستون یکی از مهم‌ترین آثار باستانی با قدمت ۲۵۰۰ تا ۲۶۰۰ سال است، که در فاصله‌ی حدود ۳۰ کیلومتری کرمانشاه و تحت عوامل مختلف مخرب از جمله جریان آب سطحی، انحلال ناشی از آب زیرزمینی، هوازدگی، و ناپایداری بلوک‌ها قرار گرفته است. با توجه به اثر مهم جریان آب روی تخریب‌ها، اثرات هیدرومکانیکی روی کتیبه‌ی بیستون مد نظر است. رفتار همبسته‌ی هیدرومکانیکی توده‌سنگ به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، که از آن جمله می‌توان به شرایط تنش، مدول کشسانی سنگ، سختی برشی و عمودی درزه، و اتساع درزه اشاره کرد، که در این مطالعه مرکز توجه قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ناهمگنی، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر روی خواص هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ است. ضمناً چگالی ترک، مشخصات مکانیکی، و شرایط تنش از دیگر عوامل مهم هستند.

**واژگان کلیدی:** ناپایداری، هیدرومکانیک، تنش، اتساع، سختی برشی، سختی عمودی، ناهمگنی، چگالی ترک، خواص مکانیکی، شکست هیدرولیکی.

mehd_kar@aut.ac.ir
amirshah@aut.ac.ir

## مقدمه

با توجه به اهمیت رفتار همبسته، خصوصاً در مهندسی عمران، توجه ویژه‌یی به این اثر در سال‌های اخیر وجود داشته است؛ که همین مسئله گواه آن است که مطالعات آینده در مسیر حل مسائل همبسته خواهد بود. تعداد زیاد آزمایش‌ها و مطالعات برجا شواهد خوبی هستند که حکایت از صحت این ادعا دارند. در این مطالعه، رفتار هیدرومکانیکی با توجه به مطالعه‌ی موردی روی کتیبه‌ی بیستون مورد بررسی قرار گرفته است.[۱] البته درک و تعیین دقیق مشخصات و مدل‌سازی کاملاً دقیق مشخصات توده‌سنگ قابل دسترسی نخواهد بود، اما پوشش همه‌ی جزئیات هندسی و اثرات مکانیکی در عمل مورد نیاز نیست. اینکه به چه میزان می‌خواهیم مدل‌سازی مفهومی از رفتار همبسته داشته باشیم، باید به اهداف مدل‌سازی مرتبط باشد. برای تعداد زیادی از کاربردها، آگاهی موجود و نرم‌افزارهای حاضر کافی هستند، در حالی که برای بسیاری از کاربردها، توسعه‌ی بیشتر آن‌ها مورد نیاز است.[۲] در این قسمت به‌طور مختصر به تاریخچه‌یی از کارهای انجام‌شده در گذشته اشاره می‌شود.

در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ به‌منظور مدل‌کردن اثرات همبسته‌ی هیدرومکانیک در سنگ‌های شکسته، اقدام به بررسی ارتباط بین تنش‌های برجا و نفوذپذیری شد. در سال ۲۰۰۳ نیز روشی به‌منظور تعیین خصوصیات هندسی مکانیکی توده‌های سنگی جهت بررسی و مدل‌سازی هیدرومکانیک ارائه شد که طی آن برای مشخصات ناپیوستگی‌ها، ناهمگنی و غیرکشسان‌بودن اصلاحات لازم انجام شد.[۱] همچنین در این سال، نسبت بازشدگی ترک به‌منزله‌ی پارامتری جدید برای ارزیابی هم‌زمان خواص هیدرولیکی و مکانیکی ساختارهای درز و ترک‌دار که تعداد زیادی ترک‌های باز را شامل می‌شوند پیشنهاد،[۲] و اثرات تنش و پارامترهای فیزیکی سنگ در نفوذپذیری ترک‌های سنگ بررسی شده است. در سال ۱۹۸۶ هم معیارهایی جهت بررسی و پیش‌بینی شکست هیدرولیکی ارائه شده است.[۳]

## معادلات حاکم

با توجه به پیچیدگی رفتار همبسته‌ی هیدرومکانیک و شناخت بهتر عوامل اصلی، نرم‌افزارهای Udec و Ansys مورد استفاده قرار گرفته‌اند.[۴] معمولاً محدودیت‌هایی در اغلب نرم‌افزارها برای مدل‌سازی دقیق رفتار هیدرومکانیک وجود دارد، بنابراین تعدادی کد برای رفع محدودیت‌های مذکور نوشته شده است. آنالیزها براساس این فرمولاسیون انجام شده‌اند:[۵] رئوس المان‌های مثلثی به‌منزله‌ی نقاط شبکه و معادلات حرکت برای هر گره‌ی شبکه به‌صورت روابط ۱ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند:[۶]

$$\ddot{U} = \left(\int_s \sigma_{ij} N_j ds + F_i^z + F_i^c + F_i^l\right) lm + g_i \qquad (۱)$$

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۰/۲۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱/۱۵.

$$F_i^z = \int_c \sigma_{ij} n_j ds \quad (۲)$$

چنان که $S$ مساحت تصویرشده‌ی جرم $m$ است. در روابط ۱ و ۲، $F_i$ ماتریس نیروها، $m$ جرم، $g_i$ گرانش، و $\sigma$ برابر با تنش‌های موجود هستند. اثرات زیر در Udec مدل شده‌اند (روابط ۳ و ۴):

$$\Delta P = k_w(\sum Q\Delta t - \Delta V)/V \quad (۳)$$

$$q = -k_j ۳\Delta p/l \quad (۴)$$

که در این روابط، $\Delta V$، برابر با تغییر حجم مکانیکی، $\sum Q$ برابر با جریان به داخل گره، $t$ زمان، $q$ دبی جریان، $L$ طول درزه، $k_j$ عامل نفوذپذیری، $k_w$ مدول حجمی سیال، و $p$ برابر با فشار درزه هستند.

جریان $q$ در اثر اختلاف فشار بین دو منطقه‌ی مجاور ایجاد می‌شود. جریان در واحد عرض را می‌توان با $q$ نمایش داد، که براساس سرعت متوسط از آنالیز به دست می‌آید.[۷]

قانون دارسی برای یک محیط متخلخل غیرایزوتروپ به‌صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$V_i = k_{ij}\partial p/\partial_{ij} \quad (۵)$$

که در این رابطه، $V_i$ برابر با بردار ویژه‌ی تراوش، $p$ فشار، و $k_{ij}$ برابر با تانسور نفوذپذیری هستند.

بردار تراوش مخصوص می‌تواند از رابطه‌ی تئوری گوس (رابطه‌ی ۶) استخراج شود:

$$\partial p/\partial_{xi} = \int_s pn_i\, ds/A \quad (۶)$$

اتساع درزه هنگامی که درزه در حال لغزش است، فعال می‌شود. تغییرات جابجایی عمودی، در اثر اتساع به‌صورت رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود.

$$\Delta u_n^d = tg(dil)\Delta u_s \sin(u_s) \quad (۷)$$

در روابط ۶ و ۷، $p$ برابر فشار، $A$ مساحت، $\Delta u_s$ تغییر جابجایی برشی، $\Delta u_n^d$ تغییر جابجایی عمودی، و $dil$ برابر با زاویه‌ی اتساع درزه هستند.

آنالیز عددی باید براساس درک صحیحی از عوامل اصلی صورت پذیرد و بنابراین نیاز به یک درک صحیح از اثرات همبسته برای دستیابی به بهترین نتیجه وجود دارد.

## توصیف عمومی

این کتیبه‌ی ۳٫۲×۱۸ متری، در یک توده‌سنگ آهکی با مجموعه‌یی از درزها و ترک‌ها قرار گرفته است.[۸] این شکستگی‌ها روی مقدار مدول کشسانی، مقاومت توده‌سنگ، نفوذپذیری، مسیر جریان آب و رسوب‌گذاری روی سطح کتیبه مؤثر هستند. بنابراین، مطالعه روی شبکه‌ی شکستگی و توسعه‌ی درزه ضروری است. کتیبه تحت تأثیر فرایندهای هیدرومکانیک و ترموشیمی قرار داشته است، که موجب ایجاد حفره‌های کارستیک و فرسایش سطحی شده است. این عوامل مهم‌ترین موارد در ایجاد خسارت‌ها هستند:

- جریان سطحی و اثر جریان‌های زیر سطحی بر روی سطح کتیبه،
- هوازدگی (شامل پروسه‌های فیزیکو شیمیایی)،
- گسیختگی در اثر دما،
- تغییر در هندسه‌ی سنگ.

توده‌سنگ شامل تعداد زیادی شکستگی می‌شود. با توجه به اثرات مهم ناپیوستگی‌ها روی رفتار توده‌سنگ، در این بخش مشخصات ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مطالعه حاکی از آن است که دو دسته درزه‌ی اصلی، دو دسته درزه‌ی فرعی، و یک سطح لایه‌بندی وجود دارد.[۹]

توده‌سنگ بیستون به‌وسیله‌ی آهک بیستون شکل گرفته و روی یک ناحیه‌ی تحت زلزله با تعداد زیادی گسل و شکستگی قرارگرفته است. گسل‌ها نشان‌دهنده‌ی شرایط تاریخچه‌ی تنش در این منطقه هستند. آب از سطح گسل کوچک که از تقاطع دو گسل ایجاد شده است، سرچشمه می‌گیرد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این سایت تحت تنش‌های لرزه‌ای قرار داشته است. به‌دلیل وجود شیب‌های تند و قله‌های بلند می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت سنگ نسبتاً بالاست.

با یک سطح لایه‌بندی، کتیبه به ۲ قسمت فوقانی و تحتانی تقسیم می‌شود که به‌دلیل شیب این سطح لایه‌بندی، آب به سمت سطح کتیبه هدایت می‌شود. فرسایش سطح قسمت فوقانی بیشتر از قسمت تحتانی است.[۱۰]

## بررسی‌های ژئوتکنیکی و نتایج آزمایش‌های میکروسکوپی

برای مطالعه‌ی مشخصات سنگ تعدادی آزمایش انجام شده است. نتیجه‌ی آزمایش‌ها نشان می‌دهد با توجه به حفره‌هایی که پر از کلسیت هستند، به دلیل فرسایش کلسیت، افزایش ضریب تخلخل غیر قابل اجتناب است.

توده‌سنگ تحت شرایط آب و هوایی و اثرات آب و حل‌شدن $Co_2$ خاک، هوا، و گیاهان قرار داشته است؛ بنابراین تبدیل به آب اسیدی شده است و قادر به انحلال کربنات کلسیم خواهد بود. بنابراین انحلال کلسیم در اثر این آب اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. به علاوه، توسعه‌ی درزه‌ها در قسمت فوقانی کتیبه، یک ناحیه‌ی کارستیک در آهک بیستون ایجاد کرده است.

مطالعه‌ی تکتونیک نشان می‌دهد که براساس ناحیه‌بندی لرزه‌یی در ایران، کوه بیستون در یک منطقه با ریسک بالا قرارگرفته است.[۱۱]

بیش از ۶ زلزله در طول ۴٫۵ سال در بیستون اتفاق افتاده است. سیستم لایه‌بندی، درزها، و شکاف‌های بیستون در علم زمین‌شناسی بی‌نظیر هستند. لایه‌های رسوبی تقریباً افقی و شبکه‌های شکستگی‌ها و گسل‌ها موازی با یکدیگر و عمود بر ضخامت لایه‌بندی هستند. بنابراین خسارت‌هایی در اثر ناپایداری شیروانی اتفاق می‌افتد و لغزش در طول صفحه ایجاد می‌شود. این موارد، مهم‌ترین خصوصیات ناپیوستگی‌های توده‌سنگ اطراف کتیبه‌ی بیستون هستند:

- **دسته درزه‌ی اصلی اول:**
  این دسته درزه خیلی مهم است. این دسته موازی با صفحه‌ی کتیبه بوده و به‌طور عمیقی درون توده‌ی آهکی نفوذ کرده است، بنابراین نقش عمده‌یی در هدایت آب به سمت اطراف کتیبه دارد.
- **دسته درزه‌ی اصلی دوم:**
  این دسته درزه تقریباً عمود بر دسته‌ی قبلی است و با کتیبه تقاطع دارد. این دسته برای هدایت هیدرولیکی دسته درزه اهمیت دارد. جائی که این دسته با

سطح کتیبه تقاطع می‌یابد، جریان آب و حفره‌های کارستیک ظاهر می‌شوند. تعداد شکستگی‌ها در این دسته کمتر از دسته‌ی اول است. تقاطع این دسته درزه با سطح لایه‌بندی، جریان کانالی آب را به سمت سطح کتیبه هدایت کرده است.

- **دسته درزه‌ی فرعی:**

این دسته درزه به‌طور قابل ملاحظه‌یی در داخل توده‌سنگ گسترده نشده است، بنابراین نقش عمده‌یی در هدایت آب زیرزمینی ندارد؛ گرچه از نظر انحلال و توسعه‌ی حفره‌های کارستیک درون توده‌ی آهکی اهمیت دارد.

- **سطح لایه‌بندی:**

این سطوح به‌عنوان عامل اصلی هدایت آب به سمت سطح کتیبه شناخته شده‌اند.

- **فاصله‌ی شکستگی‌ها:**

فاصله‌ی شکستگی‌ها در دسته درزه‌ی اصلی اول ۱ تا ۲ متر و در دسته درزه‌ی اصلی دوم ۳ تا ۵ متر است. با وجود آنکه فاصله‌ی صفحات لایه‌بندی ۱ متر است، فقط ۲ لایه به فاصله‌ی ۴۰ متر قابل رؤیت هستند. بنابراین، فاصله‌بندی صفحات لایه‌بندی ۴۰ متر در نظر گرفته می‌شود. فاصله‌بندی شکستگی‌های رندوم متغیر است.

- **طول شکستگی:**

دسته درزه‌های اصلی و فرعی، شامل برخی شکستگی‌های بسیار بزرگ می‌شوند که گاهی به ۴۰ متر می‌رسند. صفحات لایه‌بندی خیلی زیاد گسترده شده‌اند، اما دسته‌ی درزه‌های رندوم شامل شکستگی‌های کوتاه می‌شوند (حداکثر ۵ متر). بنابراین دسته‌ی درزه‌های اصلی و فرعی و صفحات لایه‌بندی در هدایت آب اهمیت دارند.

- **زبری سطح:**

مهم‌ترین دسته درزه‌ها زبرند. سطوح شکستگی، هوازده شده و بدون پرکننده هستند؛ لذا ja (ضریب زبری) برابر ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توانیم مقدار ضریب اصطکاک داخلی را به‌دست آوریم، که ۴۵ تعیین شده است. این شکستگی‌ها به‌طور گسترده‌یی در داخل توده سنگ پراکنده شده‌اند.

- **مقاومت دیواره‌ی شکستگی‌ها:**

با توجه به آزمایش‌های بر جای انجام‌شده، مقاومت دیواره‌ی شکستگی‌ها حدود ۲۴ mpa تعیین شده است.

- **بازشدگی درزه‌ها:**

مقدار بیشینه‌ی بازشدگی درزه‌ها ۱ تا ۲ mm مربوط به صفحات لایه‌بندی است که ۴۰ m با یکدیگر فاصله دارند. این بازشدگی فقط در سطح قابل تشخیص است و در مورد گسترش آن داخل توده‌سنگ هیچ اطلاعاتی در دسترس نیست. این بازشدگی در اثر انحلال آب ایجاد شده است. دو دسته درزه‌ی اصلی دارای بازشدگی کوچک‌تر از ۰/۱ mm هستند و دسته درزه‌ی فرعی تقریباً بسته است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که دسته درزه‌های اصلی، آب را به سمت سطح لایه‌بندی هدایت می‌کنند و از آن طریق آب به سمت سطح توده‌سنگ هدایت می‌شود.

- **مواد پرکننده:**

فقط شکستگی‌های کوچک و دسته درزه‌های رندوم با کلسیت پر شده‌اند، اما دیگر دسته درزه‌ها مصالح پرکننده ندارند. قابل توجه است که جریان آب به داخل توده‌ی سنگی باعث ایجاد شکستگی‌هایی در توده سنگ شده است.

## عوامل مؤثر در آنالیز عددی، مدل‌سازی و آنالیز عددی همبسته‌ی هیدرومکانیک

پایداری کتیبه‌ی بیستون به‌دلایل مختلف در حال تغییر است:

- بارگذاری تکتونیکی که می‌تواند به‌وسیله‌ی وزن و تغییر شرایط مرزی توضیح داده شود،
- بارگذاری حرارتی،
- بارگذاری و فرسایش در اثر مواد معلق در آب،
- انحلال در اثر آب زیرزمینی،
- تغییرات ریز ساختاری و هوازدگی.

این مطالعه یک متدولوژی با استفاده از شکست را بیان می کند. برای مطالعه‌ی آنالیز پایداری، نقاط بحرانی کتیبه‌ی بیستون و درک فیزیکی از دلیل ترک مورب در قسمت راست کتیبه، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS (از نرم‌افزارهای مناسب در این خصوص) انجام شده است. با توجه به بررسی‌های ژئوتکنیکی و آنالیز نتایج آزمایش‌ها، مشخصات مکانیکی توده‌ی سنگی به شرح جدول ۱ است.

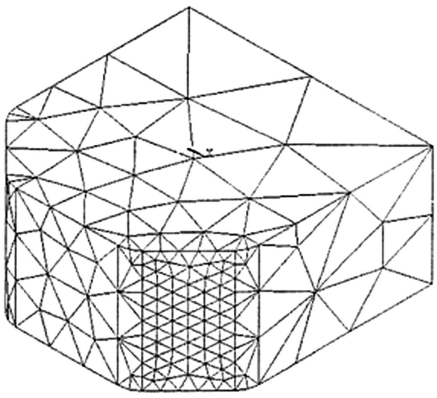
برای مطالعه‌ی رفتار هیدرومکانیک توده‌سنگ، نرم‌افزارهای Udec و Ansys مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۱).[۱۲]

این نرم‌افزارها جزء نرم‌افزارهای مناسب در مدل‌سازی ژئوتکنیکی هستند، اما دارای ضعف‌هایی در مدل‌سازی هیدرومکانیکی هستند. بنابراین این محدودیت‌ها با

جدول ۱. مشخصات مکانیکی توده سنگی.

| | سنگ بکر | توده‌سنگ |
|---|---|---|
| مقاومت فشاری (Mpa) | ۳۰ | ۴ |
| مقاومت کششی (Mpa) | ۴/۵ | ۰/۵۳ |
| مدول کشسانی (Gpa) | ۵/۷ | ۲ |
| نسبت پواسون | ۰/۱ | ۰/۳ |
| چسبندگی (Mpa) | ۸/۵ | ۱/۵ |
| زاویه‌ی اصطکاک | ۳۰ | ۲۵ |
| M | ۴/۸۹ | ۰/۲۲ |
| S | ۱ | ۰/۰۱۲ |

M و S پارامترهای بارتون هستند.



شکل ۱. مش‌بندی مدل.

استفاده از نوشتن چند کد برطرف شده است. از نرم‌افزار Ansys برای تحلیل‌های مکانیکی و از نرم‌افزار Udec برای انجام تحلیل‌های هیدرومکانیک استفاده شده است.[۱۳]

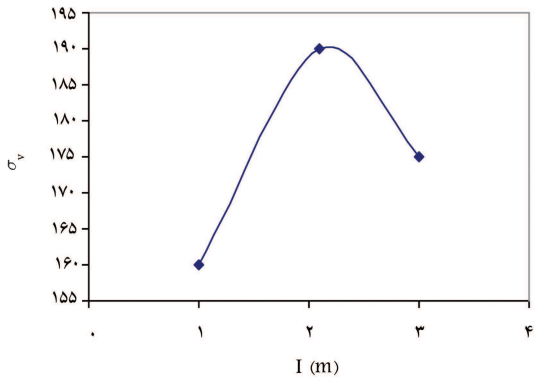
شرایط اولیه‌ی توده‌سنگ مورد بررسی قرارگرفته و آنالیز پایداری شیروانی در این مطالعه صورت پذیرفته است. در این مدل‌سازی، هندسه و خصوصیات مکانیکی درزه، خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ و شرایط مرزی با دقت در نظر گرفته شده‌اند، آنگاه حساسیت خصوصیات هیدرولیکی به خصوصیات مکانیکی، تغییرات تنش، شرایط مرزی مکانیکی، بازشدگی مکانیکی اولیه، و شبکه‌ی شکستگی هندسی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مطالعه روی رفتار توده‌سنگ، وضعیت تنش ـکرنش اطراف کتیبه‌صورت پذیرفته است. توده‌سنگ شامل دسته درزه‌های مختلف و سطح لایه‌بندی است که جزئیات کامل‌تر در این بخش معرفی شده‌اند.

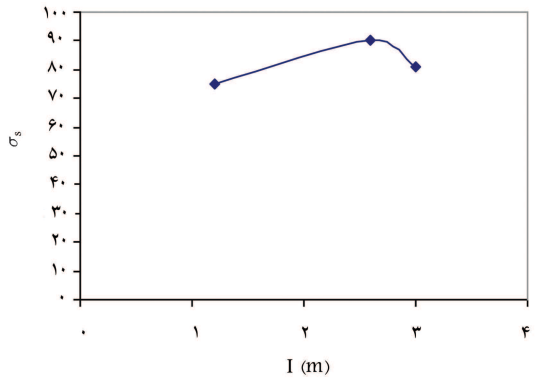
براساس نتایج آنالیز، توزیع تنش و کرنش ارزیابی شده است.[۱۴] توزیع تنش و کرنش نشان می‌دهد که توده‌سنگ اطراف کتیبه تحت تنش‌های قابل ملاحظه‌یی بوده است (شکل‌های ۲ و ۳).

تنش‌های القاءشده روی توده‌سنگ اطراف کتیبه در اثر فشار آب در نظر گرفته شده است. این فشار برابر با ۱۸ kpa است که مقدار قابل ملاحظه‌یی است (شکل ۴). نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که فشار هیدرولیکی pu نقش عمده‌یی در رفتار کتیبه داشته است.

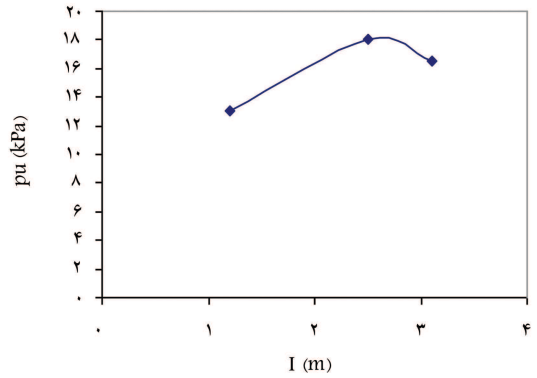
آنالیزهایی که برای تعیین ضریب ایمنی پایداری بلوک‌های اطراف کتیبه انجام شده‌اند، نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین ضریب ایمنی این آنالیزها ۲ است که می‌تواند مقدار قابل قبولی تلقی شود (شکل ۵).



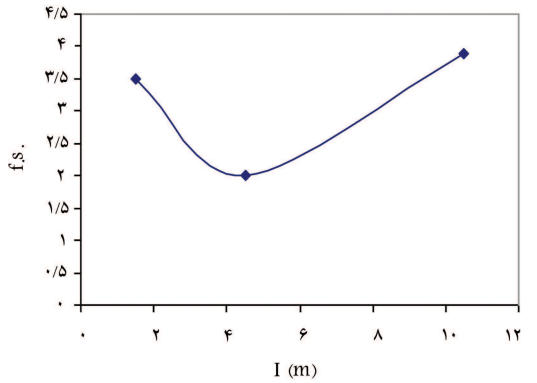

شکل ۲. تغییرات تنش قائم در امتداد کتیبه.



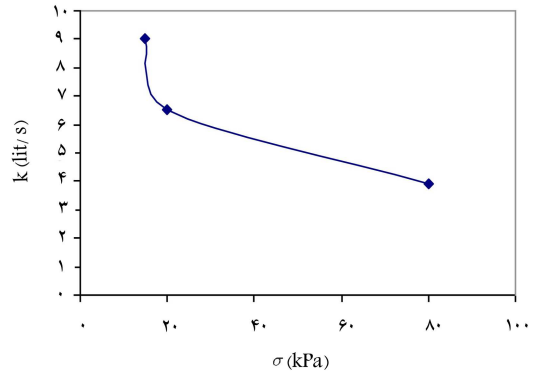

شکل ۳. تغییرات تنش برشی در امتداد کتیبه.




شکل ۴. فشار آب حفره‌یی در امتداد کتیبه.




شکل ۵. ضریب اطمینان پایداری بلوک‌ها در فواصل مختلف از کتیبه.



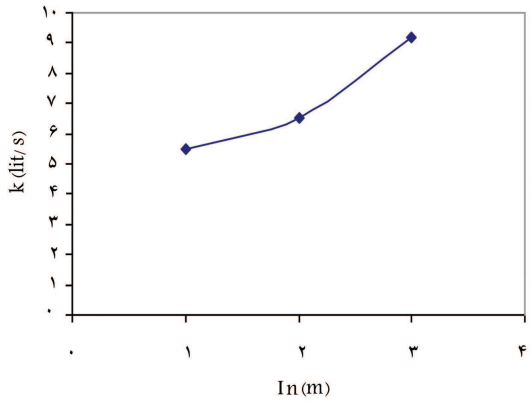

شکل ۶. تغییرات نفوذپذیری در اثر افزایش تنش جانبی.

با توجه به اهمیت تنش بر روی نفوذ پذیری، تعدادی مدل برای مطالعه این مسئله آنالیز شده‌اند. با توجه به نتایج افزایش تنش جانبی از ۲۰ kpa به ۸۰ kpa باعث کاهش حدود ۴۰٪ در نفوذپذیری شده است (شکل ۶).

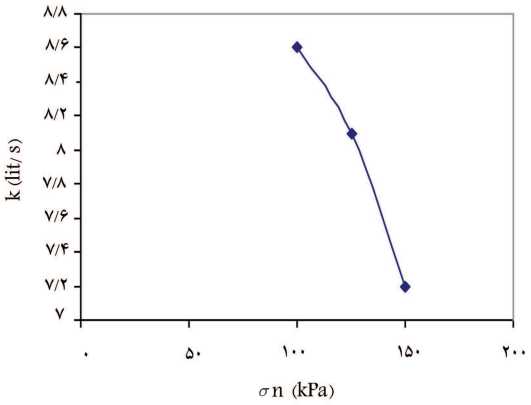
برای مطالعه‌ی اثرات چگالی درزه‌ها بر روی شرایط تراوش، آنالیزهای مختلفی انجام شده است. ابتدا دسته درزه‌های j۱ و j۲ با فاصله‌ی ۱ m و ۲ m، سپس دسته درزه‌ی j۳ رندوم در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که افزایش چگالی ترک باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود. همچنین نفوذپذیری در شکستگی‌های رندوم بیشتر از شکستگی‌های منظم است، که به‌دلیل ارتباط و اتصال بیشتر در این درزه‌هاست (شکل ۷).

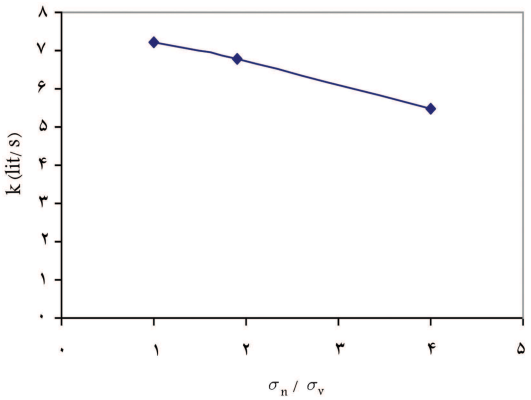
با توجه به اهمیت اثرات حالت تنش بر روی تراوش، نسبت تنش برشی درزه بر تنش نرمال درزه به‌منزله‌ی یک پارامتر اصلی در نظرگرفته شده است. اگر این نسبت



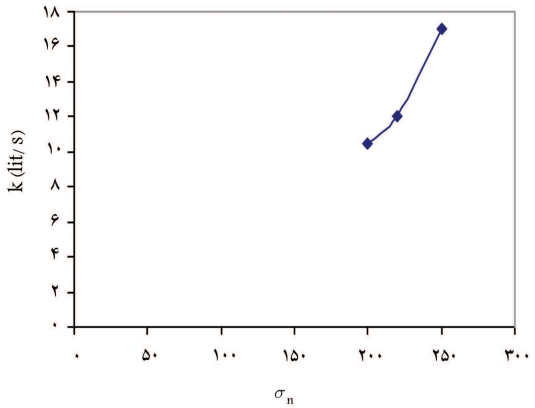

شکل ۷. تغییرات نفوذپذیری در اثر تغییر فاصله‌ی درزه‌ها.



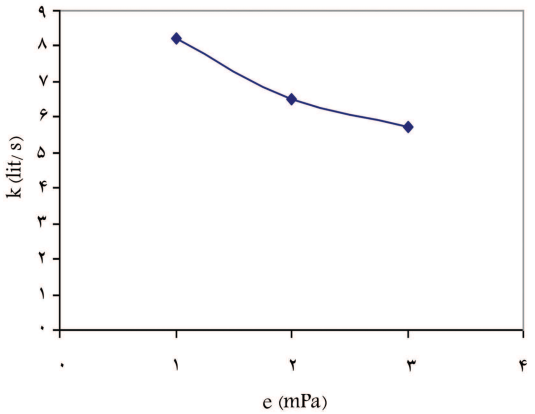

شکل ۸. تغییرات نفوذپذیری در اثر افزایش تنش عمودی (با فرض عدم وقوع لغزش).



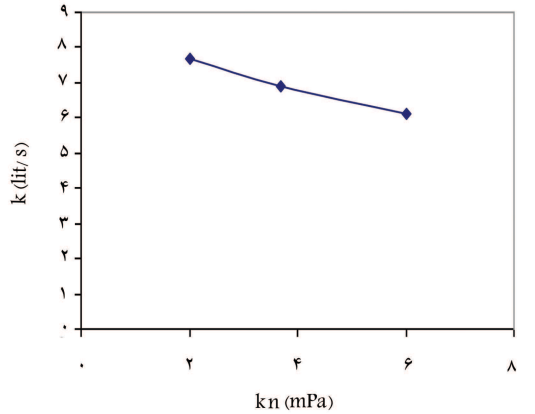

شکل ۹. تغییرات نفوذپذیری با افزایش نسبت تنش عمودی به تنش برشی (با فرض عدم وقوع لغزش).




شکل ۱۰. تغییرات نفوذپذیری در مقابل افزایش تنش عمودی (با فرض وقوع لغزش).




شکل ۱۱. تغییرات نفوذپذیری در مقابل تغییر مدول کشسانی.



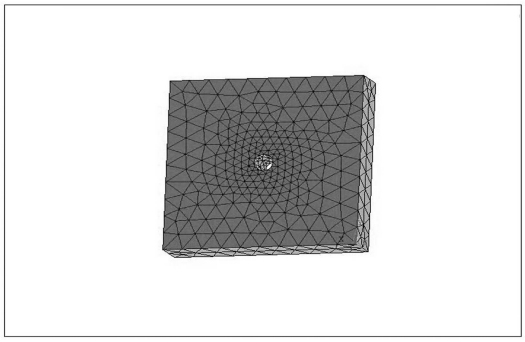

شکل ۱۲. تغییرات نفوذپذیری در مقابل تغییر ضریب سختی عمودی.

ثابت باقی بماند و لغزش درزه اتفاق نیفتد، افزایش تنش عمودی باعث کاهش تراوش می‌شود. اگر نسبت مذکور تغییرکند، ولی لغزش درزه اتفاق نیفتد؛ افزایش این نسبت باعث کاهش تراوش می‌شود. اگر افزایش نسبت مذکور موجب وقوع لغزش در درزه شود، تراوش افزایش می‌یابد (شکل‌های ۸ تا ۱۰). نتایج بررسی اثرات طول درزه بر روی مقدار تراوش نشان می‌دهند که با افزایش طول درزه، میزان تراوش افزایش می‌یابد.

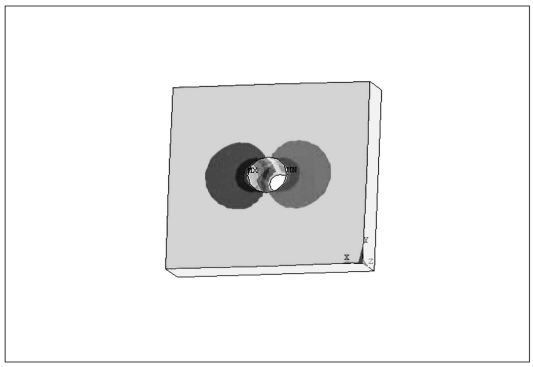
دو عامل مهم در میزان تراوش توده‌سنگ، مدول کشسانی و ضریب سختی عمودی توده‌سنگ هستند. کاهش مدول کشسانی توده‌سنگ باعث افزایش تراوش می‌شود، که دلیل آن افزایش بازشدگی درزه‌ها در اثر افزایش انعطاف‌پذیری است. همچنین کاهش ضریب سختی عمودی توده‌سنگ باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

## اصلاح شکستگی‌ها، درزها، و ترک‌ها

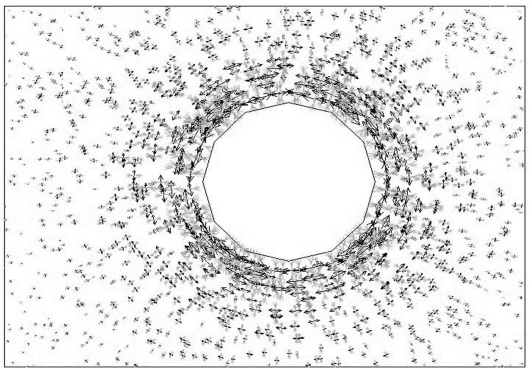
بهترین راهکار برای اصلاح شکستگی‌ها، درزها، و ترک‌های محیط اطراف کتیبه استفاده از تزریق است. به همین منظور باید از داخل گمانه‌هایی به قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر، اقدام به انجام عملیات تزریق داخل توده‌سنگ اطراف کتیبه کرد. با توجه



شکل ۱۳. المان‌بندی مدل تحلیل‌شده.



شکل ۱۴. نمایش وضعیت تنش‌ها در اطراف مدل گمانه.

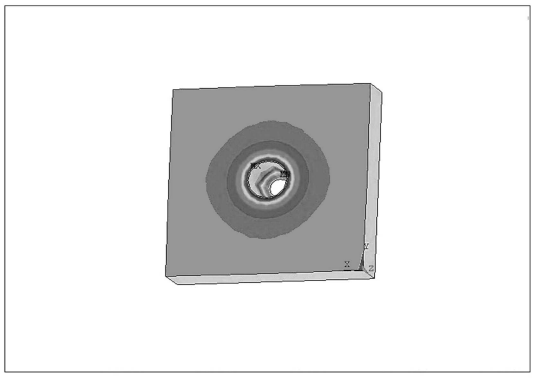


شکل ۱۵. نمایش بردارهای تنش در اطراف مدل.

به اهمیت پروژه و حساسیت آن، به ویژه به دلیل ارزش تاریخی این اثر، عملیات تزریق باید با دقت بسیار و کیفیت بالا همراه باشد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تزریق در این پروژه، فشار تزریق است که باید کاملاً تحت کنترل باشد و مقدار آن از طریق آنالیزهای عددی تعیین شود.[۱۵]

بنابراین آنالیزهای عددی جهت تعیین مشخصات و محدودیت‌های فشار تزریق انجام شده‌اند. المان‌بندی مدل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج آنالیزها نشان می‌دهند که برای اصلاح درزها و ترک‌ها در توده‌سنگ، مقادیر مربوط به فشار بیشینه‌ی تزریق باید حدوداً به ۵ بار محدود شود. نتایج آنالیزهای انجام‌شده در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده‌اند. چنانچه فشار تزریق به مقادیر بالاتر از ۵ بار برسد، ترک‌های هیدرولیکی شروع به ایجادشدن و رشدکردن می‌کنند. به بیان دیگر، فشار ۵ بار، مقدار فشار آغاز ترک هیدرولیکی است. بنابراین، فشار تزریق نباید از مقدار ۵ بار تجاوز کند.[۱۶]



شکل ۱۶. نمایش تغییرشکل‌های اطراف مدل.

## نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که به‌دلیل اثر درزه به‌عنوان مسیر متمرکز هدایت جریان آب، چگالی درزه پارامتر بسیار مؤثر در رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ است.

با توجه به ناهمگنی توده‌سنگ، بارگذاری مکانیکی باعث باز و بسته‌شدن درزه‌ها می‌شود. این مسئله می‌تواند تغییراتی را در ساختار سنگ و خصوصیات سیال ایجاد کند. اگر شرایط تنش در مدل تغییرکند و نسبت تنش برشی به تنش قائم ثابت بماند، افزایش تنش نرمال باعث کاهش تراوش خواهد شد. دلیل این موضوع می‌تواند با بسته‌شدن درزه‌ها که منجر به کاهش تراوش می‌شود، توجیه شود.

اگر تغییر حالت تنشی باعث لغزش درزه شود، آنگاه اتساع درزه اتفاق می‌افتد؛ که تغییرمکان قائم درزه و نتیجتاً افزایش تراوش را نتیجه خواهد داد.

اتساع درزه بعد از تنش برشی بحرانی ادامه پیدا نخواهد کرد، بنابراین در نسبت مشخص از تنش برشی به تنش قائم، مقدار نفوذپذیری ثابت خواهد بود.[۱۶]

بازشدگی درزه با تغییر طول درزه و اندازه‌ی بلوک‌ها تغییر می‌کند، اما حساسیت بازشدگی درزه به این پارامترها بسیارکمتراز پارامترهای مکانیکی و وضعیت تنش‌هاست.

مشخصات مکانیکی درزه و توده‌سنگ پارامترهای مهمی در نفوذپذیری توده‌سنگ هستند. این مطلب می‌تواند به این صورت توصیف شود که سختی ماتریس سنگ و درزه مستقیماً به انعطاف‌پذیری ماتریس سنگ و درزه بستگی دارند، بنابراین روی بازشدگی درزه و جریان سیال مؤثر خواهند بود. افزایش تنش همه‌جانبه، باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود که می‌تواند با بسته‌شدن درزه‌ها در اثر افزایش تنش همه‌جانبه توجیه شود.

کتیبه‌ی بیستون که بر روی توده‌سنگ آهکی قرارگرفته است، تحت تأثیر عوامل مختلف تخریب‌کننده قرار داشته است که جریان آب مهم‌ترین این عوامل بوده است. بنابراین رفتار همبسته‌ی هیدرومکانیک توده‌سنگ به‌منظور ارزیابی اثر این عوامل روی خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ در این مطالعه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که اثر مهم هندسی در فشار هیدرولیکی، چگالی درزه است. همچنین آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که اثرات همبسته‌ی هیدرومکانیک به‌طور قابل ملاحظه‌یی به مشخصات مکانیکی درزه‌ها و توده‌سنگ مرتبط است.

بنابراین درک خصوصیات مکانیکی درزه‌ها و توده‌سنگ و چگالی درزه، عواملی برای درک بهتر رفتار هیدرومکانیک توده‌سنگ هستند. سختی ماتریس سنگ و درزه‌ی سنگ و خصوصیات مکانیکی آن‌ها پارامترهای مهمی در نفوذپذیری توده‌سنگ هستند.

همچنین چنانچه تنش‌های وارده باعث افزایش تنش نرمال درزه شوند، آنگاه بسته‌شدن درزه اتفاق می‌افتد؛ که نتیجه‌ی آن کاهش نفوذپذیری خواهد بود. اما چنانچه لغزش درزه اتفاق بیفتد، آنگاه نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

## منابع (References)


1. Anderson, J. and Hudson, J.A. "T-H-M-C modelling of rock mass behavior", *Proceedings of the Geoproc.*, Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden (2003).
2. Sato, A., Hiragawa, Y. and Sugawara, K. "Analysis of mechanical and hydraulic properties of cracked structure by the ratio of crack opening dependancy (RCOD)", *Proceedings of the Geoproc*, Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden (2003).
3. Fransson, A., Tsang, C.F., Rutqvist, J. and Gustafson, G. "A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* **44**, pp. 1011-1021 (2007).
4. Desai, C.S. and Christian, J.T., *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Mc Graw Hill Book Company, New York (1997).
5. Itasca Consulting Group, Inc., *UDEC User Manual*, Minnesota, USA (1999).
6. Yifeng, C., Chuangbing, Z. and Yongqing, S. "Formulation of strain-dependent hydraulic conductivity for a fractured rock mass", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* **44**(7), pp. 981-996 (2007).
7. Zhu, Z., Xu, W., Zhang, A. and Wang,S."Coupled damage-seepage constitutive model of jointed rock masses and its engineering application", *Proceedings of the Geoproc.*, Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden (2003).
8. Karimnia, M. and Shahkarami, A. "Mechanical behavior effects on the bisotun epigraph damaging process", *7th international congress*, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (2006).
9. Wilson , E.L., *Finite Elements for Foundations , Joints and Fluids*, In A. G. Gudefius (ed), Finite Elements in Geomechanics, Chap. 10, Wiley, New York (1977).
10. Kanninen, M.F. and Popelar, C.H., *Advanced Fracture Mechanics*, Vol. 15 of the Oxford Engineering Science Series, Oxford University Press, UK (1985).
11. Mehdi Abadi, E., *Study of Water Effect on Dariyoush Epigraph*, Khak payeh Report (2003).
12. Ewalds, H.L. and Wanhill, R.J.H., *Fracture Mechanics*, Edward Arnold Publisher, London (1984).
13. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., *The Finite Element Method*, Fourth Edition, McGraw Hill (1985).
14. Alipour, M. and Bohloli, B. "Effect of injection fluid and confining stress on the performance of hydraulic fracturing", *The 2th Iranian Rock Mechanics Conference* (2004).
15. Jiang, Q.H. and Yeung, M.R. "Modelling groundwater pressure and thermal loading in 3D discontinues deformation analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, (2005).
16. Patzek, T.W. and Silin, D.B."Water injection into a low-permeability rock hydrofracture growth", *Earth and Environmental Science,* **68**, pp. 537-555 (2006).

# STUDY AND MODELING OF HYDROMECHANICAL EFFECTS ON THE BISOTUN EPIGRAPH DAMAGING PROCESS

**M. Karimnia**(corresponding author)
mehd_kar@aut.ac.ir
**A. Shahkarami**
amirshah@aut.ac.ir
**Dept. of Civil Engineering**
**Amirkabir University of Technology**

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 29, Issue 3, Page 11-17, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 19 April 2011; received in revised form 11 January 2012; accepted 3 April 2012.

**Abstract**

The 2500 to 2600 year old bisotun epigraph is one of the most important traditional monuments of the Hakhamaneshi period, which is located 30km from Kermanshah. This epigraph has been subjected to various damaging factors, such as surface erosion due to water flow, ground water dissolution, weathering and rock block instability. Regarding the important role of water flow in creating damage, the hydromechanical effects on the bisotun epigraph have been studied in this paper. Rock mass hydromechanical coupling behavior depends on various parameters; stress conditions, rock modulus of elasticity, joint shear and normal stiffness and joint dilation, which are at the center of this study .According to the results of this study, heterogeneity is one of the most significant factors in the hydraulic and mechanical properties of rock mass. Fracture density, mechanical properties and stress conditions are also significant factors.

One of the subjects studied and discussed in this paper is the best method of lessening fractures and cracks around the epigraph. According to investigations, the best method of improving fractures is injection. In this regard, hydromechanical coupling behavior related to borehole injection is studied. According to the importance and historical value of this epigraph, injection into the rock mass around the epigraph must be done with high quality and accuracy. One of the most important injection factors in this project is pressure, which must be fully under control, and whose value must be evaluated by numerical analysis, because high injection pressure will cause serious damage to this historical epigraph. In this regard hydromechanical behavior due to injection is studied in this paper, and the specifications and limitations of injection pressure are evaluated. A basic discussion evaluated in this paper is the control of injection pressure in such a range as to prevent hydraulic fracturing, and, in the last part of the paper, we have tried to study and evaluate hydromechanical behavior due to injection, such that hydraulic fracturing does not occur.

**Key Words:** Instability, hydromechanics, stress, dilation, shear stiffness, normal stiffness, heterogeneity, fracture density, mechanical properties, hydraulic fracturing.