

تحلیل مدل ترک نامعین بر پایه نتایج آزمایشگاهی و به دست آوردن پارامترهای مربوط به آن

احمد فهیمیⁱ؛ اسدالله حسومیⁱⁱ؛ هومن شبیریⁱⁱⁱ

چکیده

سازه‌های زیرزمینی؛ مانند تونل‌ها و مغارها اهمیت و جایگاه خاصی در بین سازه‌های عمرانی دارند. به دلیل پیچیدگی‌های خاص این سازه‌ها به ویژه پیچیدگی رفتار توده سنگ اطراف این حفره‌ها و همچنین عدم توسعه مدل‌های دقیق در زمینه مکانیک سنگ، روش مطالعه و طراحی آنها با تقریب بالا و اعمال ضرایب اطمینان بزرگ صورت می‌گیرد که همین امر باعث به هدر رفتن سرمایه‌های زیادی شده است. با توجه به این موضوع، استفاده از نظریه مکانیک شکست، که قابلیت بالایی در زمینه مدل‌سازی خرابی و شکست دارد، ضروری است. در این مقاله، یکی از نظریه‌های پیشرفته مکانیک شکست مواد شبه‌ترد، به نام ترک نامعین در زمینه سنگ بررسی شده است. برای نشان دادن درجه صحت و اعتبار این نظریه از آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده شده و با نرم‌افزار OOFEM با قابلیت تحلیل براساس مکانیک شکست و نظریه ترک نامعین، شبیه‌سازی خرابی نمونه‌های سنگی تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای انجام شده است. بدین ترتیب، امکان لازم برای ارزیابی این مدل فراهم شد و میان نتایج ثبت شده در آزمایشگاه و نتایج تحلیل تطابق خوبی ملاحظه شد. از آنجاکه لازمه تحلیل، داشتن پارامترهای مرتبط با سنگ استفاده شده است، نخست با بررسی مفاهیم بنیادی این پارامترها و همچنین تحلیل حساسیت هر کدام از آنها در رفتار نمونه تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای، روش‌هایی برای محاسبه هر کدام از آنها ارائه شد. بدین منظور، علاوه بر آزمایش خمش سه نقطه‌ای از آزمایش برزلی نیز استفاده شده است.

کلمات کلیدی

مکانیک شکست، مکانیک سنگ، ترک نامعین، مدل باند ترک، غیرمحل‌سازی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش

برزلی، مواد شبه‌ترد

Smearred Crack Analysis based on Laboratory Test Results and Determination of Corresponding Parameters

A. Fahimifar ; A. Hasoomi ,H. Shobeiri

ABSTRACT

Underground structures, such as tunnels and caverns are of paramount importance among the civil structures. Due to the complexity of these structures and lack of advanced and accurate models in rock mechanics field, underground structures are designed approximately and with a high safety factors. Therefore, such projects become more expensive and less economics. Applying fracture mechanics models in this respect may be resulted in more benefits.

ⁱ استاد؛ دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر Fahim@aut.ac.ir

ⁱⁱ کارشناس ارشد گرایش خاک و پی؛ دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ⁱⁱⁱ دکترای گرایش خاک و پی؛ دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

In this paper, smeared crack model has been applied to predict rock failure. In order to illustrate the performance and integrity of the model three-point flexural tests were carried out on cylindrical rock specimens. OOFEM computer program with the ability of analyzing fracture mechanics models was used for test results analysis. The results show a very good agreement between the test results and the numerical analysis. To obtain the model parameters corresponding to the rock specimens tested, sensitivity analysis were performed on the each of the model parameters and a series of Brazilian tests were also carried out in this respect.

KEYWORDS

Fracture mechanic, Rock mechanic, Smeared crack, Crack band model, nonlocalization, Three-point bending test, Brazilian test, Quasibrittle material.

متشکل از N المان مطالعه شده و سپس برای تحلیل یک میله همگن با رفتار نرم‌شونده تعمیم داده می‌شود.

چنانچه مجموعه‌ای متشکل از N المان با رفتار نرم‌شونده مشابه (مطابق شکل ۱-الف) مورد نظر قرار گیرد، از آنجا که المان‌ها دقیقاً نمی‌توانند یکسان باشند، دست کم مقاومت (بار حداکثر قابل تحمل) یکی از آنها باید اندکی کوچکتر از بقیه باشد. با فرض اینکه المان ۱ ضعیف‌تر باشد، بار کششی P به تدریج به مجموعه وارد می‌شود، هر یک از المان‌ها بارشان افزایش می‌یابد تا اینکه به بار نهایی برای المان ۱ برسیم. با افزایش بار، المان ۱ شروع به نرم شدن می‌کند و بارش از روی مسیر نرم‌شونده کاهش می‌یابد. چون المان‌ها سری قرار گرفته‌اند بار همگی آنها یکسان است، بنابراین با کاهش بار روی المان ۱، بار المان‌های دیگر باید کاهش یابد؛ ولی چون آن المان‌ها به بار حداکثر خود نرسیده‌اند، برای کاهش بار بناچار به مسیر باربرداری وارد می‌شوند.

بدین ترتیب، به محض اینکه یک المان به بار حداکثر می‌رسد، کرنش بیشتر به نرم شدن این المان و باربرداری برای المان‌های دیگر منجر می‌شود. در چنین حالتی گفته می‌شود کرنش در یک المان به علت نرم‌شدگی متمرکز شده است. با توجه به این موضوع، کرنش متوسط برای مجموعه، به صورت تابعی از N بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} L_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^{i=N} L_i} = \varepsilon_h \quad (1)$$

برای شاخه سخت‌شونده

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} L_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^{i=N} L_i} \quad (2)$$

برای شاخه نرم‌شونده

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} L_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^{i=N} L_i} = \frac{(N-1)L\varepsilon_u + L\varepsilon_s}{N.L}$$

$$\varepsilon_u + \frac{1}{N}(\varepsilon_s - \varepsilon_u)$$

که ε_h ، ε_u و ε_s ، به ترتیب کرنش در شاخه سخت‌شونده،

۱- مقدمه

با توجه به کارایی بالای نظریه مکانیک شکست، استفاده از این نظریه برای دقیق کردن تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌ها ضروری است. سال‌هاست از مکانیک شکست برای سازه‌های فلزی بویژه در صنایع هوایی، زیردریایی‌ها و سازه‌های هسته‌ای استفاده می‌شود؛ ولی ظهور آن در سایر زمینه‌ها قدمت چندانی ندارد. با مطرح شدن نظریه مکانیک شکست برای مواد شبه‌ترد، فعالیت‌های زیادی در زمینه بتن صورت پذیرفت؛ ولی با گذشت زمان، استفاده از مکانیک شکست برای سایر مواد شبه‌ترد مانند سنگ نیز آغاز شد. در این زمینه، فعالیت‌های زیادی برای دقیق کردن مدل‌ها، فراهم آوردن ابزارهای قوی تحلیلی و عددی و همچنین توسعه روش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامترهای ورودی نظریه‌های مختلف، در حال انجام است.

با توجه به اهمیت و جایگاه خاص و مهم سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها، مغارها و فضاهای بزرگ زیرزمینی، سالانه هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در این بخش صورت می‌گیرد. متأسفانه به دلیل عدم توسعه مدل‌های دقیق در زمینه مکانیک سنگ، طراحی‌ها در این زمینه با تقریب بالا و با اعمال ضرایب اطمینان بزرگ صورت می‌گیرد که همین امر باعث هدر رفتن سرمایه‌های زیادی شده است.

در این تحقیق، یکی از نظریه‌های قوی در مکانیک شکست مواد شبه‌ترد به نام نظریه ترک نامعین (smeared crack) بر روی نمونه‌های سنگی بررسی و کارایی و توانایی‌های آن در پیش‌بینی واقعیت‌های رفتاری سنگ‌ها ارزیابی شد.

۲- مفهوم متمرکز شدن کرنش

هرگاه سازه شامل المان‌هایی باشد که رفتار نرم‌شونده از خود نشان دهند، پدیده متمرکز شدن کرنش می‌تواند اتفاق بیافتد. در این قسمت، این پدیده برای حالت ساده ولی مهم تک‌محوری بیان می‌شود. ابتدا این پدیده روی مجموعه‌ای

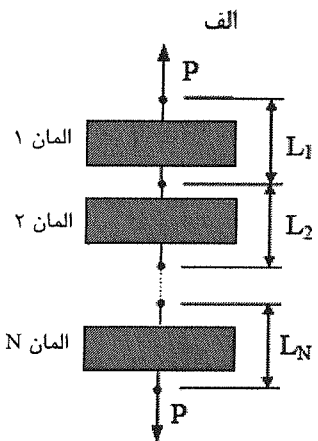
محدودکننده‌های متمرکز شدن گفته می‌شود. در این راستا مدل باند ترک را بازانت [۲] پیشنهاد کرد. ویژگی اساسی مدل باند ترک این است که روابط بنیادی نرم‌شوندگی کرنش در آن به باند ترک به عرض معین L_c ارتباط داده می‌شود، که این عرض از ویژگی‌های ماده بوده و برای آن ماده ثابت است.

روش ترک نامعین (smeared crack) که در این تحقیق بررسی شده یکی از مدل‌های مطرح در مدل باند ترک است. در این روش؛ که رشید [۴] آن را معرفی کرده است، فرض می‌شود تعداد نامتناهی ترک‌های موازی با بازشدگی خیلی کوچک به صورت پیوسته در یک عرض مشخص به نام عرض باند ترک توزیع شده‌اند. برای مدل‌سازی شکست برآحتی می‌توان از کاهش سختی و مقاومت مواد در جهت عمود بر ترک‌ها؛ وقتی که آن مواد به حداکثر مقاومت کششی خود رسیده‌اند، استفاده کرد.

۴- غیرمحل‌سازی مدل‌های با نرم‌شوندگی کرنش

مفهوم پیوستگی غیرمحل‌ی؛ که در آن، تنش در یک نقطه به کرنش‌ها در همسایگی آن نقطه و یا کرنش متوسط در همسایگی آن نقطه بستگی دارد، به دو دلیل استفاده می‌شود:

الف- دلیل ریاضی، همان مشکلی است که در بخش ۲ به آن پرداخته شد. در مدل‌های پیوسته با نرم‌شوندگی کرنش، ناپایداری‌های محلی کاذبی به وجود می‌آید که در آن، خرابی در یک حجم با اندازه صفر متمرکز می‌شود. این مورد باعث حساسیت کاذب به مش‌بندی می‌شود و در صورتی که مش‌بندی ریز شده و اندازه المان‌ها به سمت صفر میل کند این انرژی نیز به سمت صفر میل می‌کند.



شکل (۱): الف- مجموعه‌ای متشکل از N المان با رفتار نرم‌شونده مشابه؛ ب- منحنی تنش-کرنش برای N های مختلف [۱]

ب- دلیل فیزیکی، اندرکنش ریزترک‌هاست، تشکیل و رشد یک ریزترک در به وجود آمدن یا مانع شدن از تشکیل ریزترک‌های مجاور تأثیر می‌گذارد. دومین دلیل فیزیکی این است که ترک ابعاد ماکروسکوپیکی غیرقابل صرف‌نظر دارد که

یک میدان محلی با دامنه D را به طور ساده می‌توان به صورت تابع $\gamma = f(x)$ تعریف کرد، به طوری که مقدار γ در

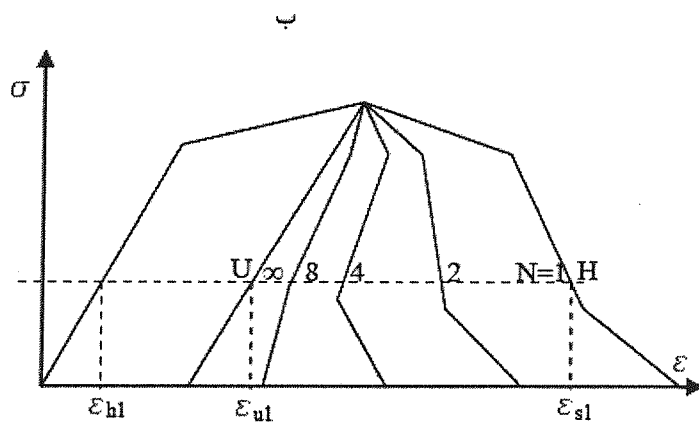
باربرداری و نرم‌شونده هر یک از المان‌هاست. نتیجه این روابط در شکل (۱-ب) برای N های متفاوت نشان داده شده است.

با توجه به این موضوع می‌توان یک میله همگن با طول اولیه L را در حالت تک‌محوری بررسی کرد. به خاطر همگن بودن، میله به N میله کوتاه‌تر مشابه تقسیم می‌شود (N اختیاری است)، بنابراین یک مجموعه متشکل از N المان مشابه متصل به هم به دست می‌آید که با توضیحات ارائه شده کرنش فقط در یکی از آنها متمرکز می‌شود، در نتیجه منحنی $\sigma-\epsilon$ مشابه شکل (۱-ب) می‌شود و نتیجه رفتار نرم‌شونده بعد از بار حداکثر در میله کاملاً به نحوه تقسیم‌کردن آن بستگی دارد. این مسأله دو نتیجه مستقیم دارد:

- (۱) از دیدگاه مکانیکی، نتیجه حاصله بی‌معنی است، زیرا رفتار فیزیکی نمی‌تواند به فرض تقسیم‌بندی میله وابسته باشد.
- (۲) از دیدگاه عددی نتیجه به دست آمده با استفاده از اجزای محدود به تعداد یا اندازه المان‌ها وابستگی کامل دارد، که این، یک انتخاب ذهنی در تحلیل بوده و عینی نیست که به وسیله بازانت [۲] در سال ۱۹۷۶ به آن اشاره شد. اگر از روابط براساس منحنی‌های تنش-کرنش با کرنش نرم‌شونده استفاده شود، لازم است آنها را با شرایطی تکمیل کرد که از متمرکز شدن کرنش در ناحیه‌ای با حجم صفر جلوگیری شوند [۳].

۳- مدل باند ترک و ترک نامعین

روشن است برای آنکه نرم‌شوندگی کرنش، روابط قابل قبولی داشته باشد، باید از متمرکز شدن کرنش نرم‌شونده در ناحیه‌ای کوچک جلوگیری شود. در حالت کلی به وسیله بعضی مفاهیم ریاضی می‌توان این کار را انجام داد که به آنها



هر نقطه تنها به مقدار x در همان نقطه بستگی داشته باشد. به شیوه‌های مختلف می‌توان یک میدان غیرمحل را بر بنیاد میدان محلی ایجاد کرد. یکی از این شیوه‌ها غیرمحل‌سازی از طریق انتگرال‌گیری است؛ یعنی به صورت:

$$\bar{f}(x) = \int_V \alpha(x, \xi) \cdot f(\xi) d\xi \quad (4)$$

$\bar{f}(x)$ یک میدان غیرمحل است که بر پایه میدان محلی $f(x)$ ساخته شده است. $\alpha(x, \xi)$ یک تابع وزن غیرمحل است. مقدار این تابع تنها به فاصله نقاط مرکز و پیرامونی؛ که با مختصات x و ξ نمایندگی می‌شوند، بستگی دارد. انتگرال‌گیری بر روی دامنه V انجام می‌شود که ناحیه‌ای شامل نقطه مرکزی x است.

یکی از اثرات غیرمحل‌سازی به شیوه انتگرال‌گیری یادشده بسط اثر پدیده‌های محدود و موضعی است. به‌عنوان مثال، چنانچه در مسأله متمرکز شدن کرنش، کرنش‌های بزرگ ناشی از خرابی، ترک و یا پلاستیک شدن در یک محدوده بسیار کوچک‌تر از طول مشخصه (Lc) متمرکز شوند، با تشکیل میدان غیرمحل با انتگرال‌گیری با دامنه انتگرال Lc اثر کرنش‌های بزرگ در محدوده‌ای به اندازه طول مشخصه گسترده می‌شود.

۵- روش انجام آزمایش‌ها

برای دستیابی به اهداف موردنظر در این تحقیق از دو آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و آزمایش برزلی استفاده شده است. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM C293-94 [۵] بر روی نمونه‌های مکعب‌مستطیلی و آزمایش برزلی مطابق استاندارد ASTM D3967 [۶] روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شد. به‌منظور بارگذاری نیز از دستگاه DARTEC9600 که دستگاهی خودکنترل بوده، استفاده شد. در این دستگاه، امکان ثبت داده‌ها با کمک رایانه و در فواصل زمانی دلخواه وجود دارد. آزمایش‌ها نیز روی نمونه‌های سنگی از جنس مرمریت و تا حد امکان بدون رگه صورت پذیرفت.

۶- فرضیات مدل‌سازی

با توجه به ضرورت در اختیار داشتن یک نرم‌افزار تحلیلی قدرتمند، با توانایی انجام تحلیل مکانیک‌شکست، از برنامه OOFEM در این تحقیق استفاده شد. این نرم‌افزار در سال ۲۰۰۱ در دانشکده عمران دانشگاه چک در شهر پراگ تهیه شد. این نرم‌افزار، قابلیت تحلیل با استفاده از نظریه‌های متنوع مکانیک‌شکست را دارد، که با توجه به نیاز این تحقیق، از مدل ترک نامعین برای تحلیل استفاده شد. از آنجاکه از این برنامه برای مدل‌سازی نمونه‌های تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

استفاده می‌شود با توجه به ضخامت کم نمونه‌های مکعب‌مستطیلی، از تحلیل دوبعدی و در شرایط تنش‌صفحه‌ای استفاده شد. مدل‌سازی با نظریه ترک چرخشی از مجموعه مدل‌های ترک نامعین انجام شده و رفتار ماده تا قبل از رسیدن به بار نهایی الاستیک خطی فرض شد. همچنین رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری مجدد الاستیک کامل فرض می‌شود؛ یعنی باربرداری در راستای یک خط به سمت مرکز انجام می‌شود. رفتار بعد از بار نهایی نیز به شکل نمایی در نظر گرفته شده و به‌منظور غیرمحل‌سازی کرنش از تابع وزن زنگوله‌ای (bell shape) مطابق رابطه (۵) استفاده شد [۱]:

$$\alpha(r) = \frac{15}{8R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2, \quad 0 \leq r \leq R = h_c \quad (5)$$

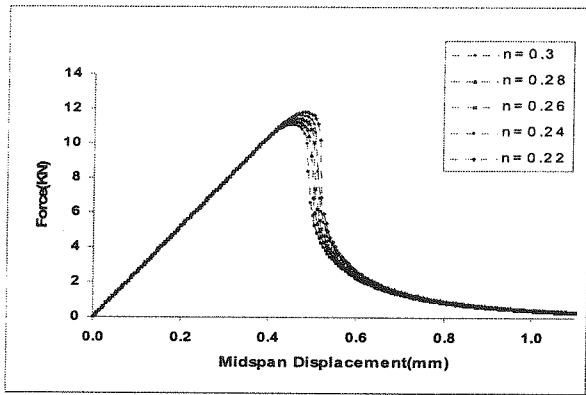
۷- محاسبه پارامترهای مکانیک‌شکست

از آنجاکه لازمه هر تحلیل داشتن پارامترهای مورد نیاز آن به‌عنوان ویژگی‌های ماده تحت بررسی است؛ لذا به‌دست آوردن این پارامترها اهمیت زیادی دارند. معمولاً روش‌های ارائه شده برای محاسبه این پارامترها پیچیدگی زیادی دارند که اندازه‌گیری کمیت‌ها و متغیرهای موردنیاز بسختی در آزمایشگاه میسر می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های امکانات آزمایشگاهی قابل دسترس، می‌توان به ضرورت استفاده از یک آزمایش ساده؛ که اندازه‌گیری‌های مربوط به آن براحتی در آزمایشگاه مقدور باشد، پی برد. نکته قابل توجه دیگر این است که تاکنون مدل‌های مکانیک‌شکست ارائه شده برای مواد شبه ترد اغلب برای بتن استفاده شده است؛ در نتیجه توسعه روش‌های آزمایشگاهی رویکردی به سمت بتن داشته‌اند. با توجه به اینکه در این تحقیق، نظریه ترک نامعین برای سنگ بررسی می‌شود لذا با دیدی متفاوت به محاسبه پارامترهای لازم پرداخته می‌شود.

پارامترهای مورد نیاز عبارتند از: مدول الاستیک (E)، ضریب پواسون (ν)، مقاومت کششی (f_t)، انرژی شکست (G_f) و عرض باند ترک (Lc). برای به‌دست آوردن این پارامترها و نحوه اثرگذاری آنها در نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی، در ابتدا به تحلیل حساسیت بر روی نمونه فرضی پرداخته و سپس راهکار لازم برای به‌دست آوردن آنها با توجه به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌شود.

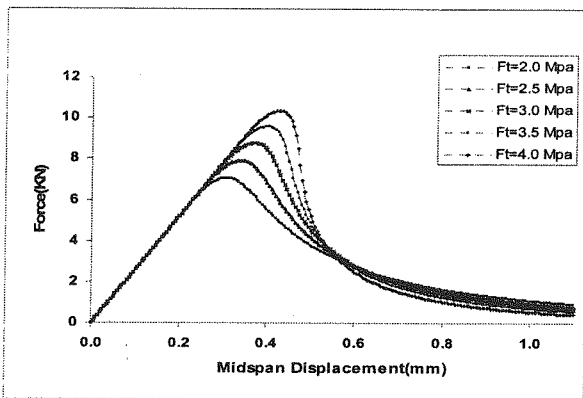
۷-۱- تحلیل حساسیت

نمونه‌ای مکعب مستطیلی به ابعاد ۳۰ (میلی‌متر) × ۱۵۰ (میلی‌متر) × ۲۵۰ (میلی‌متر) در نظر گرفته می‌شود. از آنجاکه در برنامه OOFEM قابلیت مش‌بندی وجود ندارد، برای ساختن



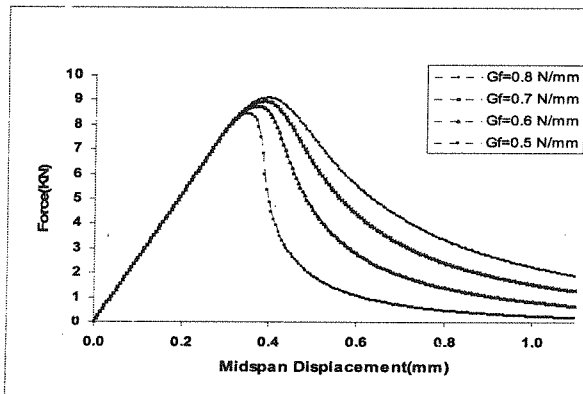
شکل (۴): منحنی نیرو-تغییر مکان برای مقادیر مختلف ضریب پواسون

۳- با تغییر مقدار مقاومت کششی، شکل منحنی بعد از پایان رفتار الاستیک تغییر می‌کند به طوری که با افزایش بار نهایی تحمل شده به وسیله نمونه افزایش می‌یابد (شکل (۵)).



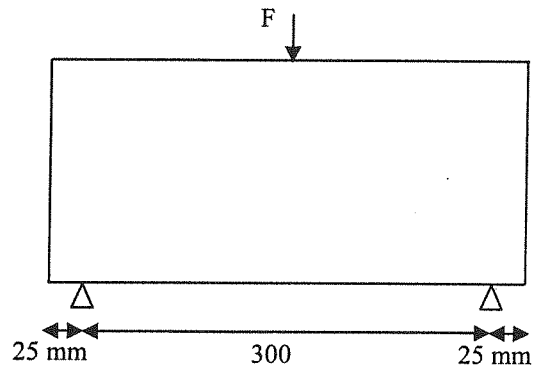
شکل (۵): منحنی نیرو-تغییر مکان برای مقادیر مختلف مقاومت کششی

۴- با تغییر انرژی شکست، مقدار بار نهایی و شکل منحنی نیرو-تغییر مکان بعد از بار نهایی دچار تغییر می‌شود، به طوری که با افزایش آن، بار نهایی افزایش می‌یابد و رفتار بعد از بار نهایی دارای درجه تردی کمتری می‌شود (شکل (۶)).



شکل (۶): منحنی نیرو-تغییر مکان برای مقادیر مختلف انرژی شکست

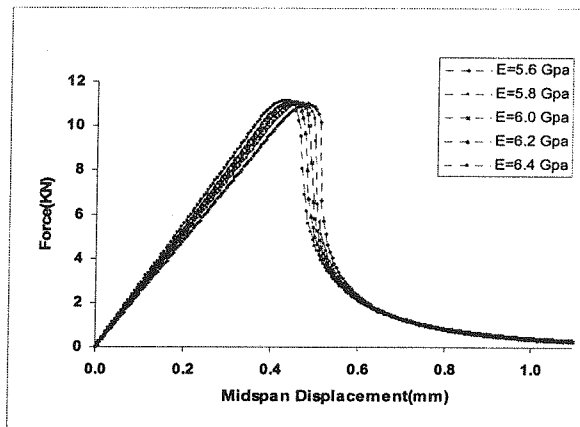
مش از نرم افزار ANSYS 5.4 استفاده شد. بدین منظور، محیط مستطیلی ذکر شده با استفاده از المان‌های مثلثی شش گوشه‌ای مش بندی می‌شود. شکل (۲) نمونه مورد نظر را تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمونه مکعب مستطیلی تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای

به عنوان نتیجه تحلیل، تمرکز بر روی منحنی نیرو-تغییر مکان قرار داده می‌شود که منظور از تغییر مکان، جابجایی مرکز و بالای نمونه تحت بار نقطه‌ای است. تحلیل با برنامه OOFEM و در حالت تنش صفحه‌ای انجام می‌شود. پس از تحلیل به تفکیک برای هر یک از پارامترهای فوق، نتایج ذیل حاصل شد:

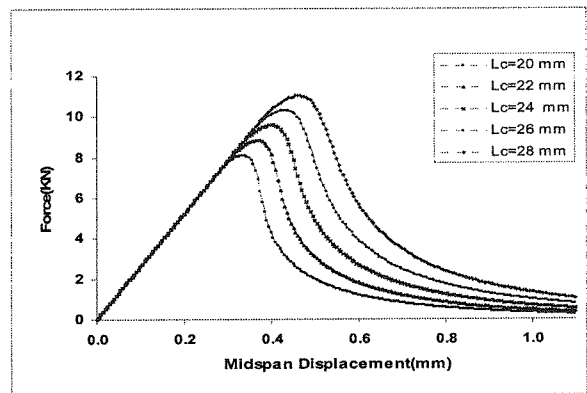
۱- با تغییرات E شیب نمودار نیرو-تغییر مکان برای قسمت قبل از بار نهایی تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش E شیب نمودار زیاد می‌شود (شکل (۳)).



شکل (۳): منحنی نیرو-تغییر مکان برای مقادیر مختلف مدول الاستیک

۲- تغییرات ضریب پواسون تأثیر چندانی روی رفتار نمونه تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای ندارد (شکل (۴)).

۵- با افزایش L_c بارنهایی تحمل شده به وسیله نمونه افزایش می‌یابد و شکل منحنی نیرو- تغییرمکان بعد از بار نهایی دچار تغییر می‌گردد (شکل (۷)).



شکل (۷): منحنی نیرو-تغییرمکان برای مقادیر مختلف طول مشخصه

۲-۷- ارایه راه حل به دست آوردن هر یک از پارامترها

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، ملاحظه شد که تنها پارامتر تأثیرگذار در رفتار قبل از بار نهایی نمونه تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای مدول الاستیک است؛ بنابراین می‌توان با کمک نتایج حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای و انجام سعی و خطا به محاسبه این پارامتر پرداخت.

برای پارامتر ضریب پواسون با توجه به تأثیر ناچیز این پارامتر و از طرفی بازه محدود تغییرات آن برای سنگ‌های مختلف از محاسبه آن به وسیله آزمون‌های آزمایشگاهی خودداری و با توجه به جنس سنگ مورد آزمایش ضریب پواسون انتخاب می‌شود.

روش غالب در استانداردهای جهانی برای تعیین مقاومت کششی، آزمایش برزیلی است. مطالعات عمیقی که اخیراً روی آزمایش برزیلی انجام شده، نشان داده است می‌توان با تمهیداتی جواب‌های خیلی نزدیک به مقاومت کششی واقعی به دست آورد. تحقیقات رکو [۷] نشان داد در صورتی که قطر نمونه استوانه‌ای بزرگ‌تر از $0/3$ طول مشخصه (عرض باند) و همچنین عرض نوار بارگذاری کمتر از $0/8$ قطر نمونه باشد اختلاف مقاومت کششی به دست آمده از آزمایش برزیلی و مقاومت کششی واقعی کمتر از ۴ درصد مقاومت واقعی خواهد بود.

برای تعیین انرژی شکست، ساده‌ترین روش، استفاده از روش کار شکست است که به وسیله هیلبرگ [۸] و کمیته ۵۰ RILEM [۹] در سال ۱۹۸۵ برای بتن پیشنهاد شد. براساس مفاهیم مکانیک شکست، انرژی شکست، انرژی موردنیاز برای به وجود آوردن مساحت واحد ترک است. در نتیجه، اگر ما یک

نمونه را به صورت استاتیکی بشکنیم و سپس کار W_F فراهم شده برای شکست را اندازه‌گیری کنیم، می‌توان انرژی شکست را از رابطه (۶) محاسبه کرد:

$$G_F = \frac{W_F}{t(h-h')} \quad (6)$$

در این رابطه t ضخامت نمونه و h و h' به ترتیب ارتفاع نمونه و ارتفاع شکاف هستند. برای اندازه‌گیری کار فراهم شده برای شکست نمونه به یک آزمایش؛ که در آن تعادل استاتیکی در تمام لحظات حفظ می‌شود، نیاز است که لازمه آن داشتن یک دستگاه بارگذاری خودکنترل است. با فراهم بودن چنین دستگاهی و در نظر گرفتن آزمایش خمش سه نقطه‌ای، منحنی تغییرات نیرو به تغییرمکان وسط دهانه قابل رسم است که در این صورت سطح زیر منحنی بیانگر کار شکست (W_F) است.

با توجه به تحلیل حساسیت می‌دانیم که سه پارامتر مقاومت کششی، انرژی شکست و عرض باند ترک در مقدار بار نهایی و شکل منحنی بعد از بار نهایی تأثیرگذار هستند. نحوه به دست آوردن پارامترهای مقاومت کششی و انرژی شکست توضیح داده شد؛ بنابراین تنها پارامتر تأثیرگذار باقی‌مانده طول مشخصه است؛ پس می‌توان با تحلیل معکوس و به دست آوردن بهترین تطابق بین منحنی‌های حاصل شده از تحلیل و منحنی حاصل از آزمایش، با قراردادن مقادیر مختلف نسبت به تعیین طول مشخصه اقدام کرد.

۳-۷- محاسبه پارامترهای مکانیک شکست براساس

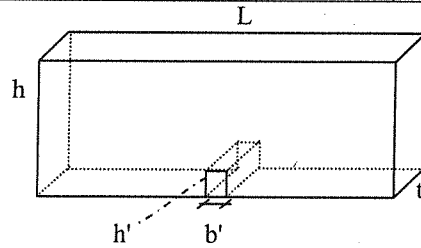
نتایج آزمایش‌ها

از دو آزمایش خمش سه نقطه‌ای و برزیلی برای به دست آوردن پارامترها استفاده می‌شود. بدین منظور چهار نمونه با ابعاد متفاوت برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای انتخاب می‌شود که در جدول (۱) مشخصات هندسی و نرخ بارگذاری بر اساس کنترل تغییرمکان آورده شده است. در شکل (۸) نتایج حاصل از آزمایش برای چهار نمونه ذکر شده بر اساس نمودار نیرو- تغییرمکان وسط دهانه آورده شده است.

برای آزمایش برزیلی نیز سه نمونه با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) انتخاب گردید؛ که نتایج حاصل از آزمایش به همراه محاسبه مقاومت کششی در جدول (۳) آورده شده است. مقدار پارامتر ضریب پواسون، با توجه به سنگ مورد استفاده؛ برابر با $0/28$ انتخاب گردید. برای محاسبه پارامتر انرژی شکست نیز لازم است سطح زیر منحنی نیرو- تغییرمکان محاسبه شود که در جدول (۴) برای هر چهار نمونه، نتایج محاسبه نشان داده شده است. با داشتن انرژی شکست تنها دو

جدول (۱): مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای

شماره نمونه	L(mm)	h(mm)	t(mm)	b'(mm)	h'(mm)	نرخ بارگذاری (mm/sec)
۱	۳۴۴	۱۵۹	۴۱	۶	۲۵	۰/۰۰۱
۲	۳۳۶	۱۷۸	۳۰	۶	۲۵	۰/۰۰۱
۳	۳۰۰	۱۸۰	۴۰	۷	۲۵	۰/۰۰۱
۴	۳۶۰	۱۵۲	۳۰	۶	۲۵	۰/۰۰۱

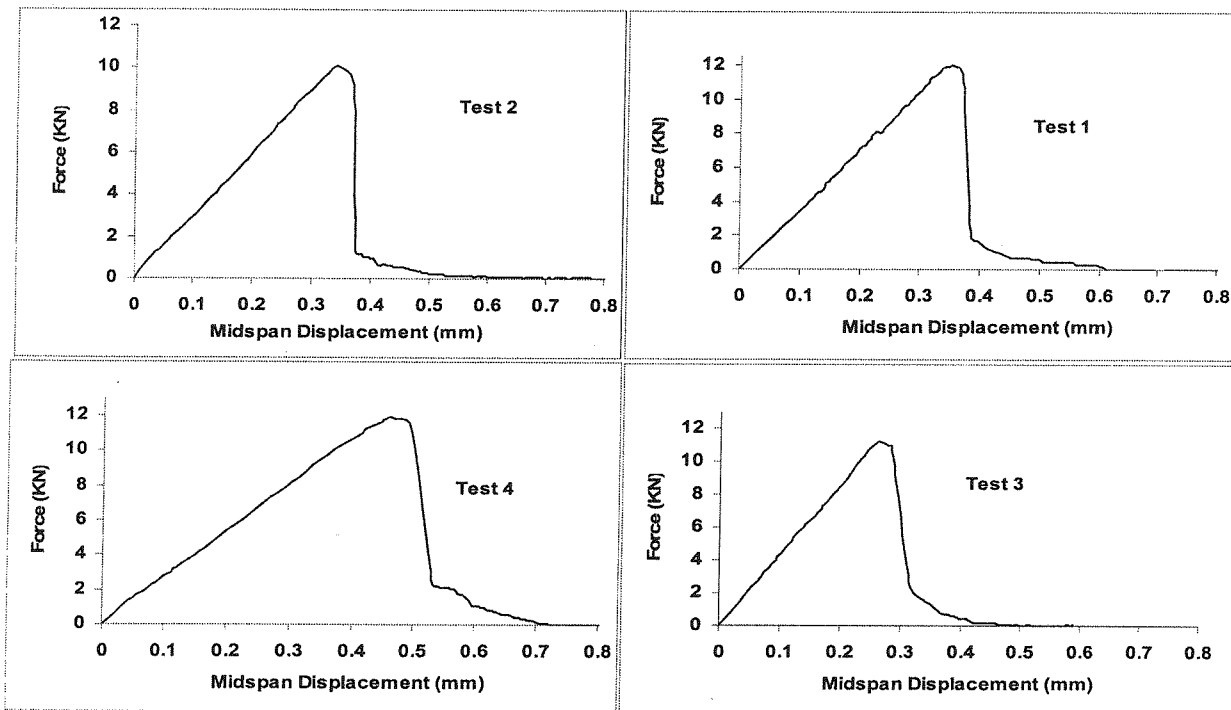


جدول (۲): مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش برزلی

شماره نمونه	D(mm)	h(mm)	نرخ بارگذاری (KN/sec)
۵	۵۴	۲۵	۰/۰۵
۶	۵۴	۲۵	۰/۰۲
۷	۵۴	۲۵	۰/۰۱

جدول (۳): نتایج حاصل شده از آزمایش برزلی

شماره نمونه	بار نهایی (KN)	مقاومت کششی (MPa)	مقدار متوسط (MPa)
۵	۱۰/۳۱	۳/۴۶۹	۳/۵۱۳
۶	۱۰/۴۸	۳/۵۲۷	
۷	۱۰/۵۳	۳/۵۴۳	



شکل (۸): نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های ۱ الی ۴

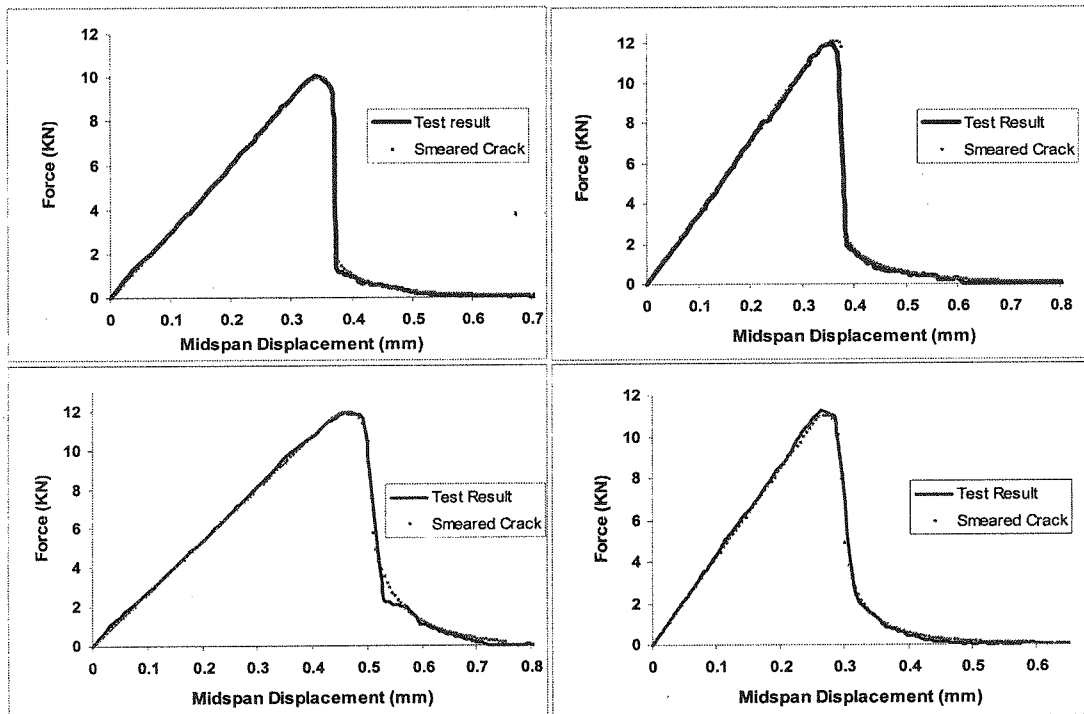
پارامتر مجهول دیگر باقی می‌ماند که یکی بر رفتار قبل از بار نهایی و دیگری بر رفتار بعد از بار نهایی نمونه اثر می‌گذارد. با توجه به تفکیک حوزه تأثیرگذاری این دو پارامتر می‌توان با انجام تحلیل معکوس به محاسبه آنها پرداخت. تحلیل با برنامه OOFEM و در حالت تنش صفحه‌ای صورت گرفته، با طی کردن روند سعی و خطا، نتایج مطابق با جدول (۵) حاصل شد، که این مقادیر همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تطابق کاملی را با نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد.

جدول (۴): محاسبه انرژی شکست

شماره نمونه	کار شکست (W_f) KN.mm	انرژی شکست (G_f) N/mm	انرژی شکست متوسط N/mm
۱	۲/۷۱۲۸	۰/۴۹۴	۰/۴۱۸
۲	۱/۸۱۶۶	۰/۳۹۶	
۳	۱/۹۳۲۶	۰/۳۳۳	
۴	۱/۷۰۴۴	۰/۴۴۷	

جدول (۵): نتایج تحلیل برای محاسبه مدول الاستیک و طول مشخصه

شماره نمونه	مدول الاستیک (GPa)	مدول الاستیک متوسط (GPa)	طول مشخصه l_c (mm)	طول مشخصه متوسط (mm)
۱	۵/۹	۶/۰۷۵	۳۰	۳۱/۵
۲	۶/۰۵		۳۳	
۳	۶/۲		۳۱	
۴	۶/۱۵		۳۲	



شکل (۹): انطباق نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای با نتایج مدل‌سازی برای نمونه‌های ۱ الی ۴

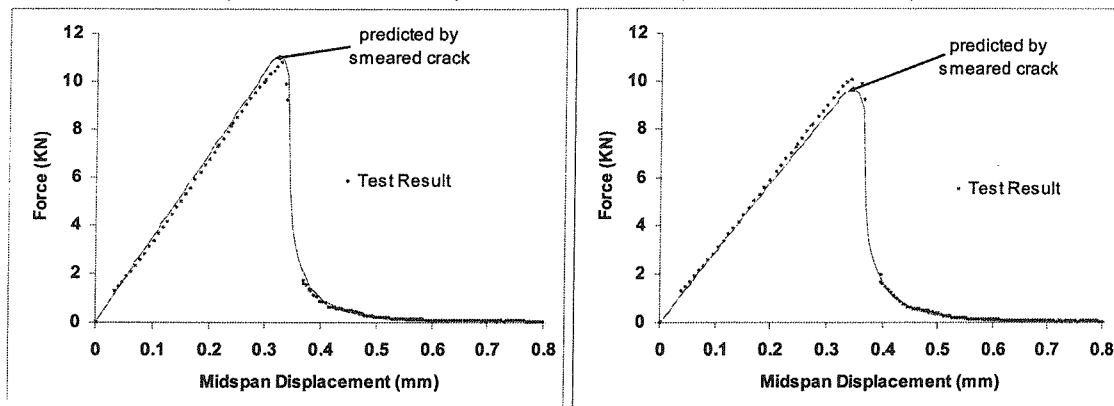
بررسی صحت و سقم محاسبات انجام شده، قابلیت این نظریه برای کاربرد در سنگ‌ها، بررسی می‌شود. پارامترهای حاکم بر سنگ نیز با توجه به بخش ۷-۳ انتخاب می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل و مدل‌سازی این دو نمونه به همراه نتایج ثبت شده در آزمایشگاه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود همخوانی و انطباق خوبی بین پیش‌بینی با مدل ترک نامعین و نتایج آزمایش بویژه در قسمت بعد از بار نهایی وجود دارد که این امر، ضمن تأیید صحت و درستی مراحل و روند طی شده، بیانگر کارایی مدل ترک نامعین در مدل‌سازی واقعیت‌های رفتاری سنگ است.

۸- استفاده از روش ترک نامعین برای پیش‌بینی رفتار نمونه‌های سنگی تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای

اکنون با توجه به پارامترهای به دست آمده از بخش قبلی، رفتار دو نمونه دیگر تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای پیش‌بینی می‌شود. در این زمینه، دو نمونه با مشخصات جدول (۶) در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش، مقایسه‌ای بین رفتار پیش‌بینی شده به وسیله تحلیل با مدل ترک نامعین و رفتار ثبت شده در آزمایشگاه انجام می‌شود و با این کار ضمن

جدول (۶): مشخصات نمونه‌های شماره ۸ و ۹

شماره نمونه	طول نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	ضخامت نمونه (mm)	نرخ بارگذاری (mm/sec)
۸	۳۳۴	۱۶۱	۳۰	۰/۰۰۱
۹	۳۷۰	۱۹۰	۳۵	۰/۰۰۱



شکل (۱۰): مقایسه نتایج پیش‌بینی به وسیله مدل ترک نامعین با نتایج آزمایش برای نمونه‌های ۸ و ۹

۹- خلاصه و نتیجه‌گیری

۱- مراجع

- Bazant, Z. P. and Jaime Planas (1998) "FRACTURE and SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle quasibrittle materials" CRC Press LLC, USA.
- Bazant, Z. P. (1976) "Instability, ductility and size effect in strain-softening concrete." J.Eng. Mech. Div.- ASCE, 102,331-334. (Discussion 103, 357-358,775-777 and 103, 501-502.)
- Bazant, Z. P. and Belystschko, T.B. (1985) "Wave propagation in strain-softening bar: Exact solution." J.Eng.Mech.-ASCE, 111,381-389.
- Rashid, Y. R. (1968) "Analysis of prestressed concrete pressure vessels." Nucl. Eng. Des., 7(4), 334-355.
- ASTM (2000) "Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading)." In annual Book of ASTM standards, Vol. 02 ASTM, Philadelphia (Standard C293-94)
- ASTM (2000) "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical rock specimens." In annual Book of ASTM standards, Vol. 03, ASTM, Philadelphia. (Standard D3967)
- Rocco, C.G (1996) influencia del tamaño y mecanismos de Rotura del Ensayo de compresion Diametral. Doctoral thesis. Dep. Ciencia de Materiales, Universidad politecnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain. ('Size-Dependence and Fracture Mechanisms in the Diagonal Compression Splitting Test', in Spanish.)
- Hillerborg, A. (1985) "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete." Mater. Struct., 18,291-296
- RILEM (1985) "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams." Mater. Struct., 18, 285-290. (RILEM Draft Recommendation, TC 50-FMC Fracture Mechanics of Concrete.)

- [۱] از نظریه‌های مکانیک شکست سال‌هاست در تحلیل سازه‌های فلزی استفاده می‌شود. با مطرح شدن مکانیک شکست مواد شبه‌ترد، فعالیت‌های زیادی در زمینه شکست بتن در شاخه‌های نظری و آزمایشگاهی صورت پذیرفت؛ ولی در شاخه مکانیک سنگ که جزء مجموعه مواد شبه‌ترد محسوب می‌شود (خصوصاً سنگ‌های سخت) به دلیل عدم انجام مطالعات کافی، توسعه زیادی حاصل نشد. عمده‌ترین هدف این تحقیق بررسی کارایی یکی از قوی‌ترین نظریه‌های مکانیک شکست مواد شبه‌ترد؛ یعنی، نظریه ترک نامعین در پیش‌بینی واقعیت‌های رفتاری سنگ در هنگام خرابی و شکست بود. بدین‌منظور، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای؛ که یک آزمایش ساده و قابل انجام با توجه به امکانات موجود بود، برای تحقیق استفاده شد. از طرف دیگر، برای انجام تحلیل با کمک نظریه ترک نامعین به فراهم‌آوردن نرم‌افزاری تحلیلی نیاز بود که بدین‌منظور از برنامه OOFEM با قابلیت تحلیل مکانیک شکست استفاده شد. بدین‌ترتیب، با داشتن اطلاعات ثبت‌شده آزمایشگاهی در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و از طرفی مدل‌سازی نمونه‌های تحت آزمایش قرارگرفته با کمک برنامه OOFEM امکان لازم برای بررسی فراهم شد، که بین نتایج آزمایش و تحلیل تطابق مناسبی وجود داشت و به این ترتیب می‌توان از توانایی این مدل در پیش‌بینی شکست سنگ اطراف سازه‌های زیرزمینی متناسب با شرایط سنگ استفاده کرد.