

## مدل کردن آزمایش برش مستقیم برای مطالعه رفتار درزهای اطراف تونل

احمد فهیمی فر، استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

امیررضا امین جواهری\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: amirrezaaj@gmail.com

دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۵/۰۵

### چکیده

امروزه با گسترش صنعت حمل و نقل، نیاز به احداث تونل، امری اجتناب ناپذیر است و به تبع آن بررسی پایداری آن در کنار عوامل ساختاری مانند ناپیوستگی‌ها، در طراحی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آزمایش برش مستقیم یکی از پرکاربردترین آزمایش‌های ژئوتکنیکی در مطالعه رفتار عارضه‌های زمین مانند درزها می‌باشد. به وسیله این آزمایش می‌توان رفتار برشی و اتساع دو سطح لغزنده بر یکدیگر را بررسی کرد. در این مقاله، یک المان درز کرنش ثابت ارایه شده که در آن با ترکیبی از لغزنده و فنر، برخلاف مدل‌های پیشین رفتار برشی درز در قسمت پلاستیک هم، مدل شده است، در نهایت، یک آزمایش برش مستقیم با سختی برشی و عمودی ثابت بر اساس روش المان‌های محدود، برنامه‌نویسی شده و رفتار درز تحت تنش‌های عمودی فزاینده با سختی‌های برشی و زبری‌های مختلف، بررسی شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش سختی برشی درز، تغییر مکان‌های برشی، کاهش می‌یابد و به تبع آن اتساع کم می‌شود و با افزایش سطح تنش عمودی، با وجود اینکه درز، اتساع بیشتری را تجربه می‌کند، اما نرخ افزایش اتساع کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش زبری، تنش برشی نهایی افزایش می‌یابد ولی تأثیر تنش عمودی در افزایش مقاومت برشی بیشتر از زبری می‌باشد و به علاوه افزایش زبری اثر مستقیم در افزایش اتساع دارد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش برش مستقیم، المان درز، اتساع، المان محدود

### ۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی مانند تونل نقش مهمی در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کنند و بر همین اساس پایداری این سازه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا در اکثر موارد خسارت‌های ناشی از ناپایداری تونل‌ها بسیار سنگین و غیرقابل جبران می‌باشد. یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری سازه‌های زیرزمینی، ناپیوستگی‌ها مانند ترک، درز و گسل می‌باشد. بنابراین بررسی و درک صحیح رفتار یک ناپیوستگی و اثر آن بر رفتار توده سنگ و سازه زیرزمینی اهمیت زیادی دارد.

سازه‌های زیرزمینی مانند تونل نقش مهمی در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کنند و بر همین اساس پایداری این سازه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا در اکثر موارد خسارت‌های ناشی از ناپایداری تونل‌ها بسیار سنگین و غیرقابل جبران می‌باشد. یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری سازه‌های زیرزمینی، ناپیوستگی‌ها مانند ترک، درز و گسل می‌باشد. بنابراین بررسی و درک صحیح رفتار یک ناپیوستگی و اثر آن بر رفتار توده سنگ و سازه زیرزمینی اهمیت زیادی دارد.

سازه‌های زیرزمینی مانند تونل نقش مهمی در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کنند و بر همین اساس پایداری این سازه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا در اکثر موارد خسارت‌های ناشی از ناپایداری تونل‌ها بسیار سنگین و غیرقابل جبران می‌باشد. یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری سازه‌های زیرزمینی، ناپیوستگی‌ها مانند ترک، درز و گسل می‌باشد. بنابراین بررسی و درک صحیح رفتار یک ناپیوستگی و اثر آن بر رفتار توده سنگ و سازه زیرزمینی اهمیت زیادی دارد.

همچنین، قابل توجه است که زینکویچ و همکارانش یک المان ۶ گره‌ای ارایه داده‌اند که می‌تواند شکل منحنی هم به خود بگیرد و ضخامت آن هم در طول المان متغیر باشد که البته در عمل به ندرت به چنین حالتی نیاز پیدا می‌شود. همچنین خصوصیات مصالح در این مدل، می‌تواند هم به صورت ارتوتروپیک (Orthotropic) و هم ایزوتروپیک تعریف شود (Zienkiewicz (et al.), 1970). در سال ۱۹۷۳، قابوسی و همکارانش یک المان برای ناپیوستگی‌های سنگی و ایتتریس‌ها بر مبنای نظریه پلاستیسیته معرفی کردند. این المان که دو محیط پیوسته را به هم متصل می‌کند، دارای یک ضخامت محدود بوده و از تغییر مکان نسبی بین دو المان پیوسته به عنوان یک درجه آزادی مستقل استفاده می‌کند (Ghaboussi, Wildon and Isenberg, 1973).

در این تحقیق، سعی بر آن بوده است که با ارایه یک المان درز و مدل‌سازی عددی آزمایش برش مستقیم در سختی برشی و عمودی ثابت، رفتار درزها مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور، یک المان درز کرنش ثابت که از دو المان خطی دو‌گره‌ای تشکیل شده، ارایه شده است که در آن برای مدل کردن رفتار عمودی درز، یک فنر عمودی با سختی  $K_n$  به‌کار رفته است. برای مدل کردن رفتار برشی درز از ترکیب دو فنر برشی و یک لغزنده استفاده شده است که فنر اول دارای سختی قسمت الاستیک رفتار برشی درز می‌باشد و برای مدل کردن رفتار پلاستیک درز، از ترکیب فنر دیگری به‌صورت موازی با یک لغزنده پلاستیک کامل مورد استفاده قرار گرفته است که در نهایت این ترکیب به همراه فنر اول، سختی برشی برابر قسمت پلاستیک منحنی رفتار برشی درز را نتیجه می‌دهد. در نهایت اثر اتساع به‌صورت تئوریک در مدل عددی اعمال شده است.

## ۲- آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم برای مطالعه رفتار برشی درزها تحت تنش عمودی بسیار مناسب است و به راحتی می‌توان رفتار برشی و حتی اتساعی درز را به وسیله این آزمایش بررسی کرد. همان‌گونه که از شکل ۱ مشخص است، در یک آزمایش برش مستقیم، دو بلوک روی یکدیگر قرار می‌گیرند که در حین بارگذاری، بلوک بالایی روی بلوک پایینی می‌لغزد که به نوعی می‌توان گفت بین این دو بلوک، یک درز واقع شده است. هنگامی که چنین درزی

محدودیت‌های این المان می‌باشد. به‌طور کلی در یک ناپیوستگی باید رفتار عمودی، برشی و اتساعی مورد بررسی قرار گیرد که البته اتساع وابسته به رفتار برشی می‌باشد.

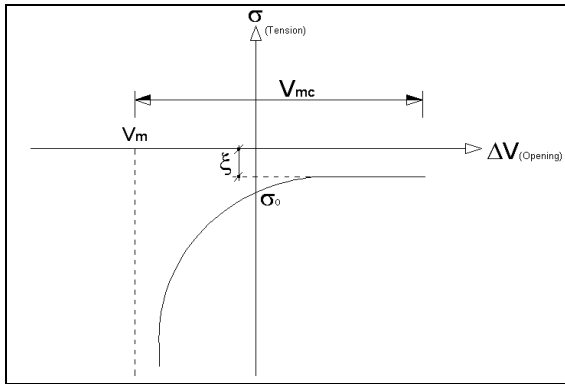
همان‌گونه که گفته شد، یکی از اولین مدل‌های ارایه شده در این زمینه المان درز (Joint Element) بوده که رفتار عمودی و برشی یک ناپیوستگی را توسط سختی عمودی و برشی بر مبنای روش المان محدود مدل کرده و از طریق یک سری روابط، روند واقعی رفتار را کنترل کرده و در نهایت اتساع را در مدل وارد می‌کند و اثرات آن را در نظر می‌گیرد. یکی از محدودیت‌های این مدل در نظر گرفتن ضخامت صفر برای المان درز می‌باشد (Goodman, Taylor and Brekke, 1968). همچنین، در سال ۱۹۸۲ مدلی ارایه شد که بر مبنای المان درز پیشین، رفتار یک ناپیوستگی را براساس همان روش المان‌های محدود، مدل کرده با این تفاوت که در مدل جدید اثر ضخامت در نظر گرفته شده است و در نهایت هم اتساع را توسط روابط ارایه شده به‌طور دقیق‌تر در نظر می‌گیرد (Huze and Barbure, 1982).

در سال ۲۰۰۹ یک مدل‌سازی عددی درزهای سنگی صورت گرفت که در نهایت یک سری آزمایش‌های برش مستقیم روی آن انجام شد و در آن، درز به‌صورت سطح چسبنده مدل شده است و اثر خصوصیات هندسی و خصوصیات ساختاری درز بر رفتار برشی آن مورد بررسی قرار گرفته است. بر همین اساس مشاهده شده که ضریب اصطکاک، مؤثرترین پارامتر در مقاومت برشی و اتساع است، به‌علاوه تغییرات زبری سطوح، بیشتر بر چسبندگی و زاویه اصطکاک نهایی تأثیرگذار می‌باشد؛ قابل توجه است که یک روش جدید برای نشان دادن اثرات ضریب زبری (JRC) Joint Roughness Coefficient) و مقاومت فشاری جداره درز (JCS Joint Compressive Strength) در این تحقیق پیشنهاد شده است (Park and Song, 2009).

در تحقیق دیگری، رفتار برشی نمونه‌های سنگی درزدار با خصوصیات ژئوتکنیکی مختلف توسط مدل عددی آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است و پوش گسیختگی آن با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شده که تطابق خوبی بین آنها برقرار بوده است. براساس این تحقیق، می‌توان گفت که پوش گسیختگی، بسیار به پارامترهای هندسی درزها وابسته بوده و در عین حال رفتار برشی بسیار تحت تأثیر الگوی پوش گسیختگی می‌باشد (Zhang (et al.), 2006).

موجود در درز و  $V_{mc}$  حداکثر بسته شدگی نهایی درز می باشد (Goodman, 1976).

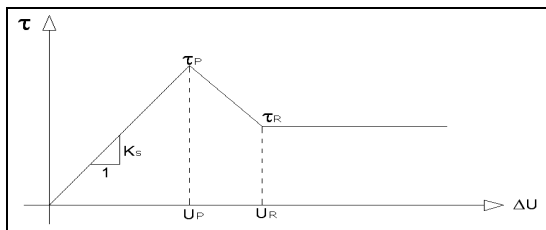
$$\sigma_n = \left( \frac{\Delta V}{V_m - \Delta V} - 1 \right) \xi \quad (1)$$



شکل ۲. مدل رفتاری تغییر مکان عمودی درز (Goodman, 1976)

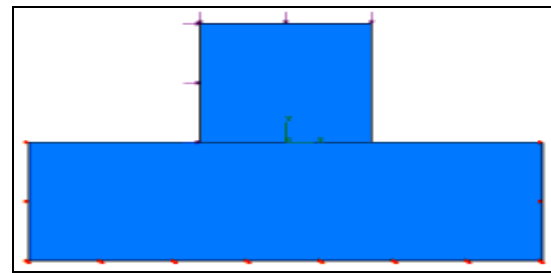
### ۲-۱-۲- رفتار برشی

در درزهای تمیز و عاری از مواد پرکننده، تنش برشی با افزایش تغییر شکل برشی با یک شیب تقریباً ثابت افزایش می یابد تا به نقطه اوج خود برسد، بعد از آن در صورت ادامه تغییر مکان برشی، یک افت ناگهانی در تنش مشاهده می شود و این افت تا رسیدن به تنش ماندگار (Residual) ادامه می یابد. از این پس با افزایش تغییر مکان برشی، تغییرات چندانی در میزان تنش ماندگار صورت نمی گیرد. مدل ایده آل شده این رفتار برشی به صورت شکل ۳ نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود مدل دارای یک قسمت خطی با شیب  $K_s$  می باشد که نشانگر رفتار الاستیک درز بوده و  $K_s$  سختی برشی درز نامیده می شود که در این ناحیه با افزایش تغییر مکان برشی، تنش برشی هم به صورت خطی افزایش می یابد. در پایان ناحیه الاستیک با افزایش تغییر مکان برشی، تنش برشی به حداکثر مقدار خود یعنی  $\tau_p$  می رسد که در این قسمت دندانهای سطح درز خرد می شوند و در نتیجه زبری سطح آن کم می شود و تنش برشی هم کاهش می یابد که در قسمت بعد تنش برشی به  $\tau_R$  که تنش برشی ماندگار نامیده می شود، می رسد.



شکل ۳. مدل رفتاری برشی درز (Goodman, 1976)

تحت بارگذاری قرار گیرد، پارامترهای مختلفی مانند تنش برشی، تغییر مکان برشی، اتساع و ... قابل بررسی می باشد، بر همین اساس برای مدل کردن آزمایش برش مستقیم، باید ابتدا رفتار یک درز بررسی و مدل شود تا در نهایت بتوان اثر آن را به کل آزمایش برش مستقیم تعمیم داد. در مطالعه حاضر، برای حل مدل عددی آزمایش برش مستقیم، از روش المان های محدود استفاده شده است. در این تحلیل، ارتفاع هر دو بلوک ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است که طول بلوک بالایی ۲۰ سانتی متر و طول بلوک پایینی برابر ۶۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. همان گونه که مشخص است، بلوک پایینی در جهت افقی و عمودی، مقید شده است.



شکل ۴. نمایش شماتیک آزمایش برش مستقیم

### ۲-۱-۱- رفتار درز

به طور کلی یک ناپیوستگی یا درز، معمولاً تحت تنش های عمودی و برشی قرار دارد و تحت چنین بارگذاری، رفتار آن به چند دسته تقسیم بندی می شود که شامل رفتار عمودی، شامل بازشدگی و بسته شدگی، رفتار برشی، رفتار پیچشی (دورانی) و رفتار اتساعی که وابسته به تغییر مکان برشی است، می باشد.

### ۲-۱-۱-۲- رفتار عمودی

هنگامی که یک نمونه درز شامل دو بلوک سنگی، تحت تنش عمودی قرار می گیرد، تغییر شکل های ایجاد شده در آن شامل دو دسته هستند؛ یک دسته شامل تغییر شکل خود سنگ می باشد که تقریباً بعد از باربرداری برگشت پذیر بوده و دیگری تغییر شکل مربوط به بسته شدن درز می باشد که به طور عمده بعد از باربرداری غیر قابل برگشت می باشد. در شکل ۲ نمودار رفتاری درز تحت تنش های عمودی ارائه شده است و رابطه ۱ هم برای محاسبه میزان تغییر شکل های عمودی ارائه شده است که در آن:  $\sigma_n$  تنش عمودی،  $\xi$  تنش آستانه بسته شدگی،  $\Delta V$  تغییر مکان عمودی درز و  $V_m$  حداکثر بسته شدگی درز از تنش اولیه می باشد. لازم به ذکر است که در شکل ۲،  $\sigma_0$  تنش عمودی اولیه

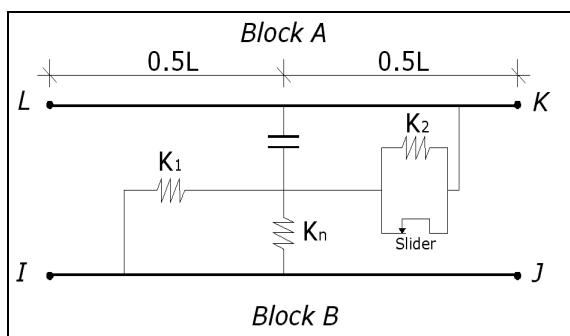
۲-۱-۳- رفتار پیچشی و اتساعی

در اکثر مدل‌های ارایه شده، رفتار پیچشی برحسب رفتار عمودی در نظر گرفته شده است که وابسته به تغییر مکان عمودی قسمت‌های مختلف المان درز می‌شود، به این صورت که با فرض دوران یک طرف المان درز، نیروی ایجاد شده برحسب سختی عمودی به دست آمده و سپس با محاسبه ممان ایجاد شده ناشی از آن نیرو در المان، سختی پیچشی تعریف می‌شود (Goodman, 1976).

نکته قابل توجه دیگر، پدیده اتساع می‌باشد که هنگام تغییر شکل برشی درز، بر اثر زبری و حرکت دندان‌ها روی هم به وجود می‌آید و باعث می‌شود که در اثر تغییر مکان برشی، در درز تغییر مکان عمودی به وجود آید. میزان اتساع به تغییر مکان برشی، زاویه زبری و تنش عمودی بستگی دارد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اتساع با تغییر مکان برشی افزایش می‌یابد تا به تغییر مکان متناظر با تنش برشی ماندگار برسد؛ پس از آن، با وجود افزایش تغییر مکان برشی، ثابت می‌ماند. این امر ناشی از آن است که بعد از رسیدن به تنش ماندگار تمام دندان‌ها خرد شده‌اند (Goodman, 1976).

شده است. این مدل شامل دو المان خطی دو گره‌ای است که یک المان درز با کرنش ثابت را تشکیل می‌دهد. شکل شماتیک این مدل برای درک بهتر، به صورت مجموعه‌ای از فنرها و المان‌های سازه‌ای نمایش داده شده است.

لازم به ذکر است که در این مدل، از یک فنر برشی برای مدل کردن رفتار برشی الاستیک درزه به همراه ترکیبی از یک لغزنده و فنر برشی برای مدل کردن رفتار برشی درزه در قسمت پلاستیک استفاده شده است که به خاطر غیرخطی بودن رفتار برشی درزه در قسمت پلاستیک، باید از طریق روش تکرار نیوتن-رافسون برای رسیدن به جواب‌های واقعی استفاده کرد؛ در حالی که در مدل درز گودمن تنها از یک فنر برشی برای مدل کردن رفتار برشی الاستیک درزه استفاده شده است.

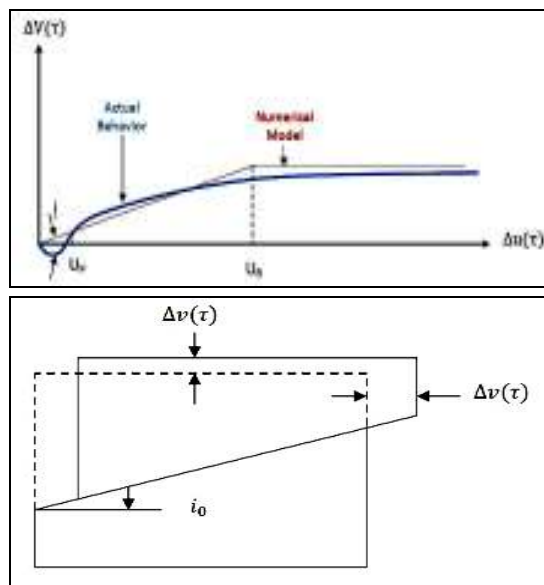


شکل ۵. شکل شماتیک المان درز ارایه شده

۳-۱- مدل رفتار عمودی

قابل توجه است که در مدل مذکور، با در نظر گرفتن یک فنر با سختی عمودی  $K_n$ ، به گونه‌ای که متصل به یک المان ستونی با مقاومت کششی صفر است، نشان داده شده است که درز مورد بحث، تحت بارهای عمودی فشاری، دارای سختی  $K_n$  می‌باشد و از طرفی دیگر، در برابر تنش‌های کششی هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. سختی عمودی براساس رابطه ۲ به دست می‌آید و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سختی عمودی وابسته به تنش عمودی اولیه است و با هم رابطه مستقیم دارند؛ در این رابطه  $\sigma_0$  تنش عمودی اولیه،  $\xi$  تنش آستانه بسته شدگی و  $V_{mc}$  حداکثر بسته شدگی می‌باشد (Goodman, 1976).

$$K_n = \frac{-\sigma_0^2}{\xi \times V_{mc}} \quad (2)$$



شکل ۴. پدیده اتساع و مدل رفتاری اتساع درز (Goodman, 1976)

۳-۲ مدل درز

مدل ارایه شده در این تحقیق به نوعی رفتار عمودی، برشی، دورانی و اتساعی درز را بیان می‌کند که در شکل ۵ نشان داده

۳-۲- مدل رفتار برشی

برای در نظر گرفتن رفتار برشی ناپیوستگی، از ترکیب از دو فنر و یک لغزنده (اسلایدر) پلاستیک کامل (Perfect Plastic) استفاده شده است که آستانه لغزنده، تنش برشی نهایی درز،  $\tau_p$  تعریف شده است. لازم به ذکر است که فنر شماره یک دارای سختی  $K_s$  که همان سختی قسمت الاستیک است، می‌باشد و سختی فنر شماره ۲ از رابطه ۳ به دست می‌آید که در آن  $K_s$  شیب قسمت الاستیک و  $K_{P-R}$  شیب قسمت انتقالی از تنش برشی نهایی به تنش برشی ماندگار است که از رابطه ۴ به دست می‌آید. این ترکیب این‌گونه عمل می‌کند که تا قبل از رسیدن به تنش برشی نهایی لغزنده به صورت صلب بوده و فنر شماره ۲ عمل نکرده و تنها فنر شماره ۱ با سختی قسمت الاستیک فعال است؛ ولی با رسیدن به تنش برشی نهایی و عبور از آن، اسلایدر پلاستیک شده و فنر شماره ۲ هم با ترکیب با فنر اول باید سختی برابر  $K_{P-R}$  را به سیستم اعمال کند که سختی فنر شماره ۲ بر همین اساس و با موازی شدن با فنر شماره ۱ به دست آمده است.

$$K_{P-R} = \frac{\tau_p - \tau_R}{U_R - U_p} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{K_s \times K_{P-R}}{K_s - K_{P-R}} \quad (4)$$

بر این اساس، می‌توان تنش برشی متناظر با تغییر مکان برشی ایجاد شده در مدل را به دست آورد. به این صورت که بعد از تشکیل ماتریس سختی برای کل مدل و حل معادله نیرو-تغییر مکان آن (معادله ۱۶)، تغییر مکان برشی  $\Delta U$  ایجاد شده در المان درز به دست آمده و سپس با توجه به مقدار تغییر مکان برشی و جهت آن، می‌توان تنش برشی متناظر با آن را محاسبه کرد. با توجه به تغییر مکان برشی، نمودار رفتار برشی یک درز به ۵ ناحیه مجزا تقسیم‌بندی شده که در شکل ۶ نشان داده شده است که بر اساس این ناحیه‌بندی، می‌توان تنش برشی را به وسیله معادله ۵ به دست آورد (Goodman, 1976).

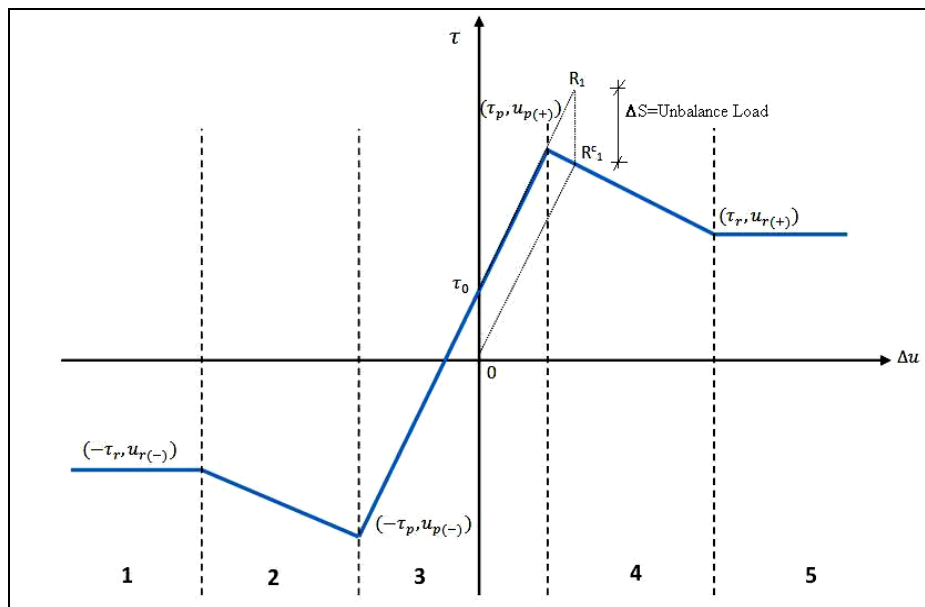
$$1 \rightarrow \tau = -\tau_R \text{ if } (\Delta u \leq u_{R(-)})$$

$$2 \rightarrow \tau = -\tau_p + K_{P-R} \times (\Delta u - u_{P(-)}) \text{ if } (u_{R(-)} \leq \Delta u \leq u_{P(-)})$$

$$3 \rightarrow \tau = K_s \cdot \Delta u + \tau_0 \text{ if } (u_{P(-)} \leq \Delta u \leq u_{P(+)}) \quad (5)$$

$$4 \rightarrow \tau = -\tau_p + K_{P-R} \times (\Delta u - u_{P(+)}) \text{ if } (u_{P(+)} \leq \Delta u \leq u_{R(+)})$$

$$5 \rightarrow \tau = \tau_R \text{ if } (\Delta u \geq u_{R(+)})$$



شکل ۶. ناحیه‌بندی منحنی رفتار برشی برای محاسبه تنش برشی المان (Goodman, 1976)

### ۳-۴- مدل اتساع

نکته قابل توجه دیگر این است که رفتار اتساعی درز در حالت عددی باید به صورت یک سختی  $K_{sn}$  تعریف شود که بیانگر رابطه بین تنش‌های عمودی با تغییر مکان برشی و یا تنش‌های برشی با تغییر مکان عمودی باشد ولی در عمل، محاسبه این پارامتر چندان ممکن نیست و اعمال آن به صورت عددی در محاسبات، محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. بنابراین رفتار اتساعی درز به وسیله روابط ۱۰ و ۱۱ در محاسبات به طور مستقل وارد می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، رابطه زیر براساس رفتار نشان داده شده در شکل ۴، برای تعیین اتساع ارایه شده است که  $\sigma_n$  تنش عمودی،  $q_u$  مقاومت فشاری غیر محصور،  $i$  زاویه اتساع،  $\Delta u$  تغییر مکان برشی،  $u_R$  تغییر مکان متناظر با تنش ماندگار،  $\tau$  تنش برشی و  $K_s$  سختی برشی می‌باشد (Goodman, 1976).

$$\Delta V_i = \left( \frac{\sigma_n}{q_u} - 1 \right)^4 \times \tan i \times (|\Delta u| + \left| \frac{\tau}{K_s} \right|) \text{for } (u_{R(-)} \leq \Delta u \leq u_{R(+)} \quad (10)$$

$$\left| \frac{\tau}{K_s} \right| \text{for } (u_{R(-)} \leq \Delta u \leq u_{R(+)} \quad (10)$$

$$\Delta V_i = \left( \frac{\sigma_n}{q_u} - 1 \right)^4 \times \tan i \times (u_{R(+)} + \left| \frac{\tau}{K_s} \right|) \text{for } (u_{R(-)} \geq \Delta u) \text{ and } (\Delta u \geq u_{R(+)} \quad (11)$$

$$\left| \frac{\tau}{K_s} \right| \text{for } (u_{R(-)} \geq \Delta u) \text{ and } (\Delta u \geq u_{R(+)} \quad (11)$$

### ۳-۵- معیار گسیختگی

نکته دیگر قابل ذکر این است که برای معیار گسیختگی در مدل درز ارایه شده و تعریف تنش برشی نهایی که نقش مهمی در رفتار برشی ناپیوستگی مورد بحث ایفا می‌کند، از معیار غیرخطی Barton - Bandis استفاده شده است که به وسیله رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan(JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi) \quad (12)$$

در رابطه بالا  $\sigma_n$  تنش عمودی، JRC ضریب زبری، JCS مقاومت فشاری جداره و  $\varphi$  زاویه اصطکاک باقیمانده می‌باشد (Goodman, 1976).

### ۳-۶- ماتریس‌های سختی المان‌ها

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، برای مدل کردن یک ناپیوستگی مانند درز، از المان درز ارایه شده، استفاده شده است که براساس

لازم به ذکر است که تنش برشی نهایی  $\tau_p$  و تنش برشی ماندگار  $\tau_R$  به ترتیب براساس روابط ۱۲، ۶ به دست می‌آیند.  $U_p$  تغییر مکان متناظر با تنش برشی نهایی و  $u_R$  هم پیش‌تر تعریف شده است و مقدار آن از رابطه ۷ تعریف می‌شود.  $B_0$  نسبت تنش برشی نهایی به ماندگار در تنش عمودی کم و  $M$  نسبت تغییر مکان‌های متناظر با تنش نهایی به تغییر مکان‌های متناظر با تنش برشی ماندگار و  $q_0$  مقاومت فشاری تک محوری درز می‌باشد (Goodman, 1976).

$$\tau_R = \tau_p \left( B_0 + \frac{1 - B_0}{q_0} \sigma \right) \quad (6)$$

$u_R = M \times u_p$  (۷) توجه است که مقدار  $B_0$  و  $M$  به پیشنهاد گودمن به ترتیب برابر ۰/۶ و ۴ است اما مقدار  $M$  با مقایسه نمودارهای ارایه شده توسط Haque و Indraratna به صورت واقع‌بینانه‌تری برابر ۱/۵ انتخاب شد (Goodman, 1976 and Indraratna and Haque, 2000). در نهایت به خاطر رفتار غیرخطی درز، تنش برشی ایجاد شده در المان، از طریق روابط المان محدود (معادله ۱۶) با تنش برشی واقعی به دست آمده از رابطه ۵ متفاوت است، که تفاوت این دو نیرو، نیروی Unbalance ( $\Delta S$ ) نامیده می‌شود که باید از طریق روش تکرار نیوتن-رافسون، این نیروی Unbalance را تا دقت قابل قبولی کاهش داد.

### ۳-۳- مدل رفتار پیچشی

برای مدل کردن رفتار پیچشی المان درز، فنر تأمین کننده سختی عمودی در مرکز المان قرار داده شده است. در این حالت با فرض دوران یک طرف المان به اندازه  $\theta$ ، تنش متناظر با تغییر مکان عمودی ناشی از دوران المان درز که توسط المان ستونی در مرکز المان درز وارد می‌شود از رابطه ۸ به دست می‌آید که در نهایت کوپل به وجود آمده در مرکز المان، ناشی از تنش اعمالی در گوشه المان (با فرض اینکه در مقادیر کم  $\theta$ ،  $\tan \theta = \theta$ ) برابر رابطه ۹ خواهد بود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سختی پیچشی  $K_n = 0.25(L^3)K_n$  به سیستم اعمال خواهد شد (Goodman, 1976).

$$\Delta \sigma = K_n \cdot 0.5L \cdot \tan \theta \approx 0.5L \cdot K_n \cdot \theta \quad (8)$$

$$M = 0.5 \times \frac{L^2}{2} K_n \cdot \theta \approx 0.25L^3 \times K_n \cdot \theta \quad (9)$$

#### ۴- به کارگیری مدل ارایه شده

همانگونه که شرح داده شد، بررسی رفتار ناپیوستگی‌های موجود در سنگ بسیار حائز اهمیت می‌باشد ولی این امر در شرایطی که هندسه مسئله پیچیده است تا حدی مشکل و نیازمند یک برنامه با قابلیت بالا می‌باشد. از آنجایی که برنامه‌های تجاری موجود، قابلیت بررسی رفتار درز را به‌طور کامل به‌گونه‌ای که خروجی‌های کاملی مربوط به آن ارایه کنند، ندارند، مدل عددی ارایه شده در بالا، در برنامه‌ای تحت عنوان (Finite Element Analysis of Fault Behaviour) در محیط برنامه MATLAB برنامه‌نویسی شده است.

در این برنامه که بر مبنای روش المان‌های محدود برنامه‌نویسی شده است، ابتدا باید هندسه مدل، شامل تعداد و شماره المان‌ها، گره‌ها، نوع آنها و تنش‌های آنها را که از برنامه ABAQUS گرفته شده است، وارد کرده، سپس رفتار آن تحلیل شود.

#### ۴-۱- نحوه بارگذاری و انجام آزمایش

ناپیوستگی مورد نظر در آزمایش برش مستقیم، بر اساس پارامترهای ارایه شده در جداول ۱ و ۲ مورد بارگذاری قرار گرفته است. بارگذاری انجام شده به این صورت بوده است که درز مذکور در چهار سختی برشی و چهار ضریب زبری مختلف، تحت تنش عمودی از ۱ مگا پاسکال تا ۱۰ مگاپاسکال قرار گرفته که به نوعی می‌توان گفت که رفتار آن از عمق تقریبی ۳۰ متر تا ۳۸۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است. متناسب با تنش عمودی، تنش برشی به نمونه اعمال شد تا درز، بعد از رسیدن به تنش برشی نهایی، شرایط تنش ماندگار را هم تجربه کند و بر همین اساس نمودارهای رفتار برشی و اتساعی آن، به‌دست آمده است.

#### ۴-۲- مشخصات مصالح

مشخصات سنگ به‌کار رفته بر اساس جدول شماره ۱ است و مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای ناپیوستگی مورد بررسی مطابق با جدول ۲ می‌باشد. لازم به ذکر است که از آنجا که در این تحقیق رفتار سنگ مد نظر نیست، توده سنگ به‌صورت الاستیک و ایزوتروپ فرض شده است.

ماتریس رفتاری  $C_j$  مطابق با رابطه ۱۳، ماتریس سختی آن طبق رابطه ۱۴ به‌دست آمده است (Goodman, 1976).

$$C_j = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_w \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K_j = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n \\ k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

همچنین برای بلوک سنگی از المان‌های مثلثی با کرنش ثابت (CST) (Constant Strain Triangle) با رفتار ایزوتروپ استفاده شده است. ماتریس رفتاری المان مثلثی هم به‌صورت ارایه شده در رابطه ۱۵ می‌باشد که در آن  $E$  مدول الاستیسیته سنگ و  $\nu$  ضریب پواسون می‌باشد و بر اساس این ماتریس رفتاری، ماتریس سختی المان مثلثی محاسبه شده است (Debasisi, 2006).

$$C = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

به این ترتیب با تشکیل ماتریس سختی المان‌های CST و المان‌های درز و ترکیب آنها، ماتریس سختی نهایی برای کل سیستم المان‌ها تشکیل می‌شود. سپس با تشکیل ماتریس نیروها، تغییر مکان‌های ایجاد شده در کل سیستم، به‌دست آمده و با حل معادله نیرو-تغییر مکان برای کل مدل (معادله ۱۶)، تنش‌ها و تغییر مکان‌ها برای هر المان به‌دست می‌آید که البته در این مقاله تمرکز بر المان درز می‌باشد. لازم به ذکر است که به خاطر رفتار غیرخطی عمودی و برشی درز از روش نیوتن-رافسون استفاده شده است تا جواب‌هایی واقعی و دقیق به‌دست آید.

$$[K] \cdot [\varphi] = [F] \quad (16)$$

در این معادله  $[K]$  ماتریس سختی برای کل سیستم،  $[F]$  ماتریس نیرو برای کل سیستم و  $[\varphi]$  تغییر مکان‌های گره‌ها (مجهولات) در کل سیستم در مقیاس کلی (Global) می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی سنگ بکر دربرگیرنده تونل

چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول حجمی، E (GPa)	ضریب پواسون، ν	مقاومت کششی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی، φ (درجه)	چسبندگی، C (MPa)
۲۶۰۰	۲۰	۰/۲۵	۳	۴۵	۸

جدول ۲. مشخصات مربوط به ناپیوستگی

JCS (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	سختی برشی (GPa) ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵	JRC ۰، ۵، ۱۵، ۲۰	زاویه اصطکاک پایه، φ (درجه)	چسبندگی، C (MPa)	V <sub>mc</sub> (m)	ξ (MPa)
۹۰	۰			۳۵	۰	۰/۰۱	۰/۰۵

برحسب سختی های برشی ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ گیگاپاسکال ارایه شده است. همانطور که از نمودارها برداشت می شود، با افزایش سختی برشی، تغییر مکان برشی درز کاهش یافته و با تجربه تغییر مکان برشی کمتری به تنش برشی نهایی می رسد. از طرف دیگر، همانگونه که انتظار می رفت، تنش برشی نهایی در یک سطح تنش عمودی، مستقل از سختی برشی است.

### ۵-۳- بررسی اثر زبری بر رفتار برشی درز

در شکل ۹ رفتار برشی ناپیوستگی مد نظر بر حسب ضرایب زبری ۵، ۱۵ و ۲۰ در سختی برشی ۱ گیگاپاسکال نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، این نمودارها در دو سطح تنش عمودی ۱ و ۱۰ مگاپاسکال ارایه شده است. براساس این نمودارها، با افزایش زبری، درز تنش های برشی بیشتری را تحمل کرده است و به نوعی می توان گفت که با افزایش زبری سطح، مقاومت برشی هم افزایش یافته است. نکته قابل توجه دیگر این است که آهنگ افزایش سطح تنش برشی نهایی، با افزایش تنش عمودی تا حدی کاهش یافته است و همچنین اختلاف بین تنش برشی نهایی در ضریب زبری صفر و ۲۰ با افزایش سطح تنش عمودی، افزایش یافته است. برای مثال در تنش عمودی ۱ مگاپاسکال اختلاف بین تنش برشی نهایی بین ضریب زبری صفر و ۲۰ برابر ۲/۵ مگاپاسکال است، در حالی که همین عدد برای تنش عمودی ۱۰ مگاپاسکال برابر ۶ مگاپاسکال است. بنابراین می توان گفت به نوعی تأثیر تنش عمودی در افزایش مقاومت برشی بیشتر از ضریب زبری می باشد که البته این امر براساس رابطه ۱۲ قابل انتظار می باشد. همچنین مشخص است که در سطح تنش عمودی ۱ مگاپاسکال، تغییر مکان برشی و تنش برشی مشاهده شده در زبری ۲۰، بسیار

### ۵- آنالیز مدل و بررسی رابطه متغیرها

براساس آنالیزهای انجام شده در سطح تنش های عمودی و سختی های برشی مختلف، نمودارهای رفتار برشی و اتساع درز در آزمایش برش مستقیم، به دست آمده است. برای مقایسه بهتر متغیرها، این نمودارها براساس تنش های عمودی و سختی برشی مرتب شده اند.

### ۵-۱- بررسی اثر تنش عمودی بر رفتار برشی درز

در شکل ۷ نمودار رفتار برشی درز بر حسب تنش عمودی برای سختی های برشی ۰/۲ و ۱ گیگاپاسکال در ضریب زبری JRC=۵ ارایه شده است. براساس نمودارهای حاصله، تنش های برشی ابتدا با یک شیب الاستیک برابر سختی برشی با تغییر مکان برشی افزایش می یابد و بعد از رسیدن به یک تنش برشی نهایی، تنش برشی آن کاهش یافته تا بعد از رسیدن به تنش برشی ماندگار با وجود افزایش تغییر شکل های برشی، تنش آن ثابت می ماند. لازم به ذکر است که دندانهای موجود در سطح ناپیوستگی با رسیدن به تنش برشی نهایی شروع به خرد شدن کرده و با رسیدن به سطح تنش ماندگار، همه دندانها به طور کامل خرد شده اند. همانگونه که از شکل مشخص است در یک سختی ثابت، با افزایش سطح تنش عمودی وارده، درز، تنش برشی بیشتری را تجربه کرده است، زیرا تنش برشی نهایی آن افزایش یافته است و به تبع آن با تحمل تغییر مکان برشی بیشتر به شرایط تنش برشی ماندگار می رسد.

### ۵-۲- بررسی اثر سختی برشی بر رفتار برشی درز

در شکل ۸ رفتار برشی ناپیوستگی مورد بررسی در آزمایش برش مستقیم مدل شده، در دو تنش عمودی ۱ و ۱۰ مگاپاسکال



که با افزایش تنش عمودی، اتساع کاهش می‌یابد ولی در اینجا ناپیوستگی به‌طور آزادانه تغییر مکان افقی داشته و مقادیر اتساع در تغییر مکان برشی ثابت بررسی نشده است.

#### ۵-۵-۵- بررسی اثر سختی برشی بر اتساع درز

در شکل ۱۲، اتساع به‌دست آمده از آزمایش برش مستقیم در درز برحسب سختی‌های برشی ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ گیگاپاسکال در تنش عمودی ۱ و ۱۰ مگاپاسکال برای زبری ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اتساع ابتدا با یک شیب ثابت افزایش یافته و با رسیدن به تغییر مکان متناظر با تنش نهایی، شیب آن کاهش یافته و بعد از رسیدن به تغییر مکان برشی متناظر با تنش ماندگار با وجود افزایش تغییر مکان افقی، دیگر افزایش نیافته و ثابت می‌ماند. به‌علاوه، مشخص است که با کاهش سختی برشی، ناپیوستگی مذکور تغییر شکل‌های برشی بیشتری را تجربه کرده است و به همین خاطر میزان اتساع هم با کاهش سختی افزایش داشته است ولی نرخ افزایش اتساع مستقل از سختی برشی می‌باشد.

#### ۵-۶- بررسی اثر زبری بر اتساع درز

در شکل ۱۳ اتساع به‌دست آمده از آزمایش برش مستقیم در درز بر حسب زبری‌های ۵، ۱۵ و ۲۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش زبری، اتساع در یک تنش عمودی ثابت، افزایش یافته است و میزان افزایش اتساع با افزایش تنش عمودی، در تنش‌های کم، بسیار قابل ملاحظه است، ولی در تنش‌های بالا برای زبری‌های کم، میزان افزایش اتساع کاهش یافته است.

#### ۵-۷- حداکثر اتساع درز

در شکل ۱۴، مقادیر حداکثر اتساع برحسب تنش‌های عمودی در سختی‌های برشی مختلف برای زبری ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش سختی برشی، حداکثر اتساع به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و همچنین با افزایش تنش عمودی حداکثر اتساع افزایش یافته است ولی بعد از تنش عمودی ۷ مگاپاسکال، شیب افزایش آن کاهش پیدا کرده است. البته این کاهش در اتساع ماکزیمم، در سختی‌های بالا، چندان قابل ملاحظه نیست. به‌علاوه، می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش سختی برشی،

بیشتر از مقادیر به‌دست آمده در زبری صفر است، زیرا با افزایش زبری، مقاومت برشی ناپیوستگی مدل شده افزایش پیدا کرده است و در نتیجه تغییر مکان‌های برشی بیشتری را تجربه خواهد کرد. همچنین با افزایش تنش عمودی به مقدار ۱۰ مگاپاسکال، مشاهده می‌شود که دامنه تغییر مکان‌ها نسبت به تنش عمودی ۱ مگاپاسکال، افزایش کمتری دارد، زیرا در شرایطی که تنش عمودی ۱ مگاپاسکال است تغییر مکان برشی در زبری صفر از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۴ در زبری ۲۰ رسیده است، یعنی تا ۴ برابر افزایش یافته است در حالی که در تنش عمودی ۱۰ مگاپاسکال تغییر مکان‌ها تقریباً تا ۳ برابر افزایش یافته‌اند که به میزان کمتری افزایش یافته است؛ در نتیجه حاکی از کاهش اثر تنش عمودی در افزایش مقاومت برشی و تغییر مکان‌های برشی در تنش‌های بالاتر می‌باشد.

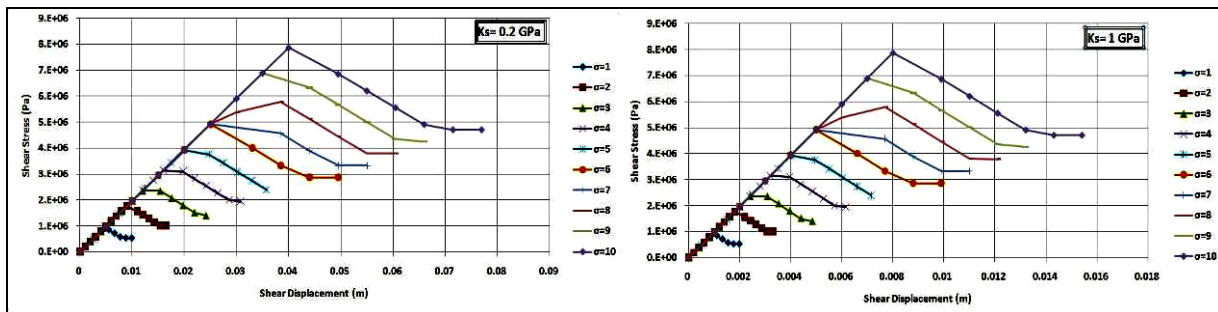
#### ۵-۴- بررسی اثر تنش عمودی بر اتساع درز

بر اساس نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰ که در آن اتساع بر حسب تغییر مکان افقی در سطح تنش‌های عمودی ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال در سختی‌های ۰/۲ و ۱ گیگاپاسکال ترسیم شده است، استنباط می‌شود که با افزایش تنش عمودی، اتساع نهایی ناپیوستگی افزایش پیدا کرده است. این امر ناشی از این است که در سطوح تنش بالا، با افزایش تنش برشی نهایی، درز، تغییر مکان‌های برشی بیشتری را تحمل می‌کند و به تبع آن اتساع هم افزایش خواهد یافت. همچنین، هنگامی که تنش برش درز از تنش برشی نهایی فراتر رود و وارد مرحله پلاستیک شود، تغییر رفتار برشی در درز به‌وجود می‌آید که باعث می‌شود در این مرحله اتساع نهایی با وجود تنش عمودی بالاتر، افزایش یابد، اما اساساً در ناحیه الاستیک و در یک تغییر مکان برشی ثابت، با افزایش تنش عمودی، اتساع کاهش می‌یابد که این مطلب در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد.

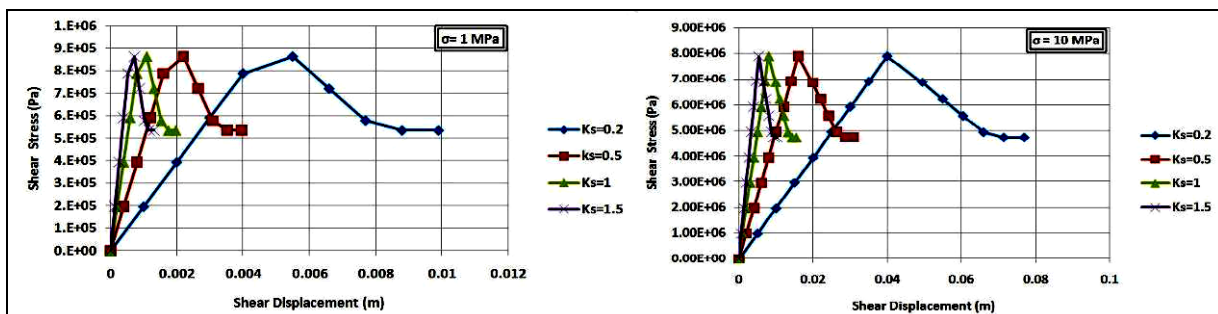
نکته قابل توجه دیگر این است که با وجود داشتن اتساع بیشتر در سطح تنش‌های بالا، نرخ افزایش اتساع با افزایش تنش عمودی کاهش یافته است و شیب کمتری پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در یک تغییر مکان برشی یکسان، در تنش‌های عمودی بالاتر، اتساع کمتری به‌دست خواهد آمد. این نکته قابل ذکر است که اگر در یک تغییر مکان برشی ثابت و در تنش‌های عمودی مختلف، اتساع بررسی شود، مشاهده می‌شود

در این نمودار هم می توان مشاهده کرد که با افزایش زبری اتساع حداکثر هم افزایش یافته است. نکته قابل توجه در اینجا این است که اثر زبری در افزایش حداکثر اتساع به گونه ای ثابت است و با افزایش زبری، مقدار افزایش حداکثر اتساع افزایش می یابد.

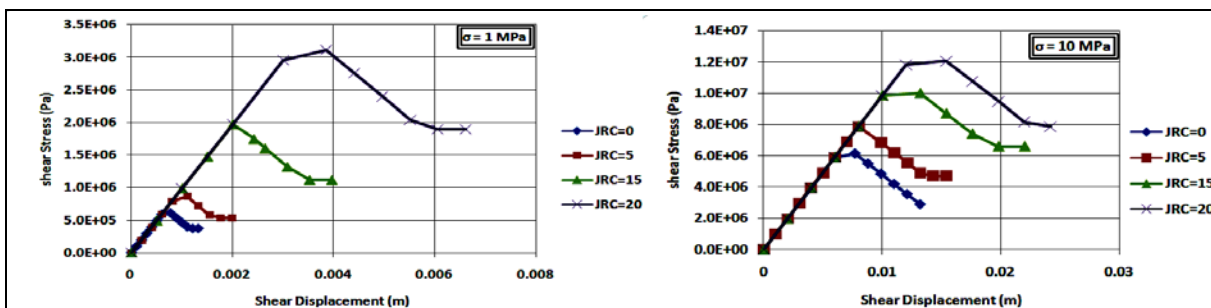
حداکثر اتساع به وجود آمده به هم نزدیک شده و تفاوت چندانی در سطوح تنش مختلف نمی کند. در نمودار شکل ۱۵ مقادیر اتساع حداکثر بر حسب تنش های عمودی در سختی برشی ۰/۲ گیگاپاسکال ارایه شده است.



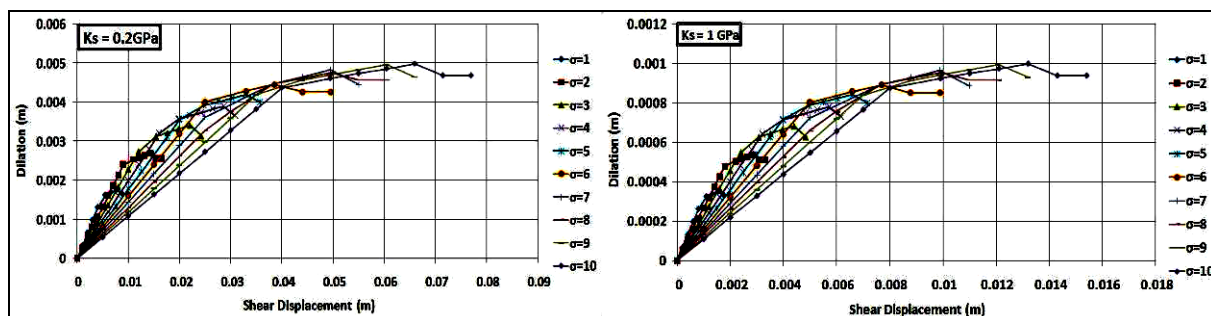
شکل ۷. رفتار برشی درز در سطح تنش های عمودی فزاینده در سختی های برشی ۰/۲ و ۱ گیگاپاسکال در JRC=۵



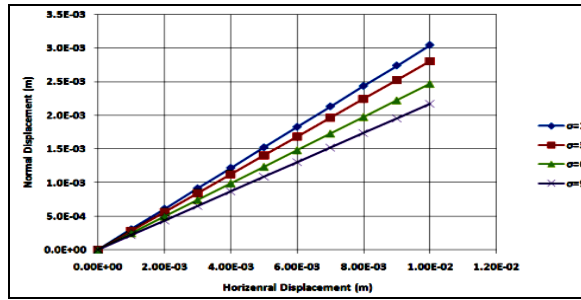
شکل ۸. رفتار برشی درز بر حسب سختی برشی در تنش های عمودی ۱ و ۱۰ مگاپاسکال در JRC=۵



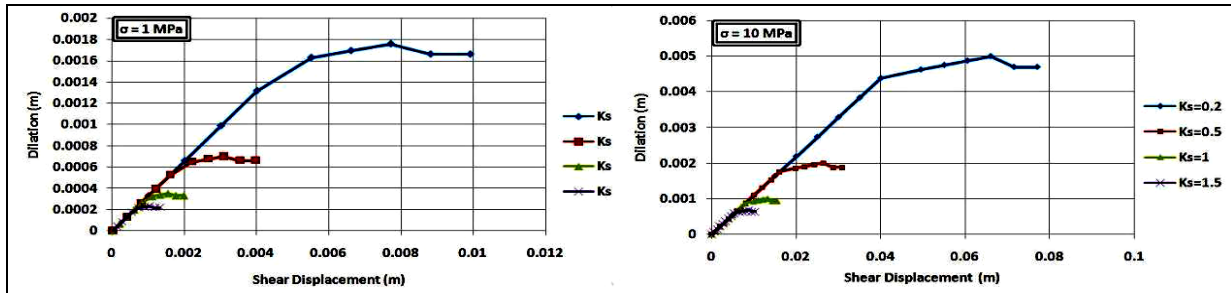
شکل ۹. نمودار رفتار برشی درز بر حسب ضریب زبری در تنش های عمودی مختلف و سختی برشی ۱ گیگاپاسکال



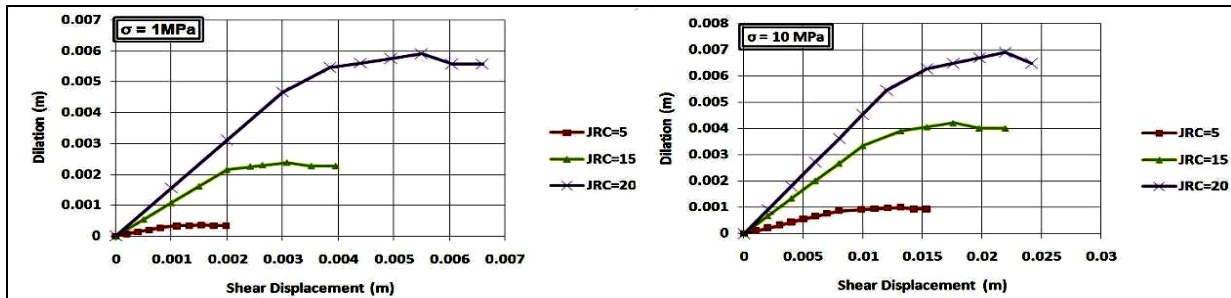
شکل ۱۰. اتساع درز در تنش های عمودی فزاینده در سختی های برشی مختلف برای JRC=۵



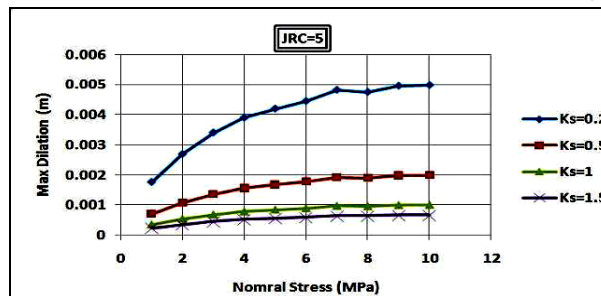
شکل ۱۱. اتساع درز در ناحیه الاستیک رفتار برشی در تنش‌های عمودی مختلف



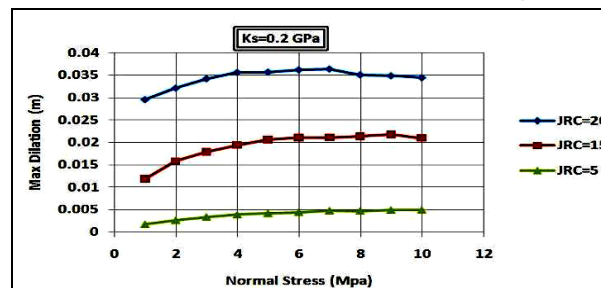
شکل ۱۲. اتساع درز بر حسب سختی برشی در تنش‌های عمودی مختلف در JRC=5



شکل ۱۳. اتساع درز بر حسب زبری در تنش‌های عمودی مختلف در سختی برشی ۱ گیگاپاسکال



شکل ۱۴. حداکثر اتساع درز بر حسب تنش عمودی برای سختی‌های برشی مختلف در JRC=5



شکل ۱۵. اتساع درز بر حسب تنش عمودی برای زبری‌های مختلف در سختی برشی ۰/۲ گیگاپاسکال

## ۷- نتیجه گیری

عمودی مختلف، تقریباً به یک اندازه می‌باشند ولی در سختی‌های برشی پایین میزان این مقادیر اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. مقادیر حداکثر اتساع هم با افزایش زبری افزایش یافته است و با افزایش زبری مقدار این افزایش هم بیشتر می‌شود.

## ۸- مراجع

– امین جواهری، امیررضا (۱۳۸۹) "تحلیل رفتار گسل‌ها در اطراف تونل‌ها به روش تحلیلی و عددی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.

- Debasis, D., (2006) "Finite element Method-concepts and applications in geomechanics"; India: Prentice Hall.
- Ghaboussi, J., Wildon, E. L., and Isenberg, J., "Finite elements for rock joints and interfaces, (1973) " JI. Soil Mech. Dn. A.S.C.E..
- Goodman, R. E., (1976) "Methods of geological engineering in discontinuous rocks"; USA: West Publishing Company.
- Goodman, R. E., Taylor, R., and Brekke, T. L., (1968) "A model for the mechanics of jointed rock, " J. Soil Mech. and Found. Eng. Div. ASCE, SM3, 94, 637-659.
- Heuze, F. E., and Barbour, T. G., (1982) "New models for rock joints and interfaces", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. GT5, pp. 757-775.
- Indraratna, B., Haque, A., (2000) "Shear behavior of rock joints"; Netherlands: A.A. Balkema, Rotterdam.
- Pande, G. N., and Beer, G. and Williams, J. R., (1990) "Numerical methods in rock mechanics"; England: John Wiley & Sons Ltd.
- Park, j. w., and song, j. j., (2009) "Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model, " Int. J. Rock Mech. Mining Sci., V.46, Issues 8, pp. 1315-1328.
- Zhang, H. Q., Zhao Z. Y., Tang, C. A., and Song, L., (2006) "Numerical study of shear behavior of Intermittent Rock Joints with different deometrical parameters," Int. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol. 43, Issues 5, pp. 802-816.
- Zienkiewicz, O. C., Best, B., Dullage, C. and Stagg, K. G., (1970) "Analysis of non-linear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems," Proc. 2<sup>nd</sup> intl. Congress on Rock Mechanics, Belgrade.

در مقاله حاضر سعی بر آن بود که با ارایه یک مدل عددی برای المان درز، رفتار ناپیوستگی بررسی و مدل شود. برای این منظور یک المان درز کرنش ثابت از ترکیب مجموعه‌ای از فنرها و یک اسلایدر و... ارایه شد تا نشان‌دهنده رفتار عمودی، برشی، پیچشی و اتساعی درز باشد. در این مدل رفتار عمودی توسط یک فنر با سختی عمودی  $K_{\parallel}$  برای فشار، مدل شده است که در عین حال به یک المان بدون مقاومت کششی متصل شده است، همچنین در این مدل، رفتار برشی الاستیک درز توسط یک فنر برشی با سختی برابر شیب قسمت الاستیک منحنی برش، مدل شده است و قسمت پلاستیک منحنی برش بر خلاف مدل‌های پیشین، توسط ترکیبی از یک اسلایدر و فنر برشی که با هم موازی بوده و با فنر اول به صورت سری می‌باشد، نشان داده شده است که در نهایت این ترکیب سختی قسمت پلاستیک منحنی برش درز را نتیجه می‌دهد. در نهایت اثر اتساع درز بر اساس روابط تئوریک موجود، محاسبه و اثر آن در محاسبات عددی وارد شده است. برای کنترل این مدل عددی برنامه‌ای بر مبنای روش المان محدود نوشته شد. توسط این برنامه یک آزمایش برش مستقیم به صورت عددی مدل شده تا رفتار برشی و اتساعی ناپیوستگی بررسی شود. در نهایت درز مذکور در آزمایش برش مستقیم در تنش‌های عمودی فزاینده و سختی‌های برشی و زبری‌های مختلف تحلیل شد. نتایج این تحقیق نشان داد که درز در تنش‌های عمودی فزاینده، تنش برشی، تغییر مکان برشی و اتساع نهایی بیشتری را تحمل کرده که این افزایش در مقدار نهایی اتساع، در شرایطی مشاهده شده است که درز، وارد منطقه پلاستیک رفتار برشی خود شده است، اما اساساً درز در ناحیه الاستیک رفتار برشی، با افزایش تنش عمودی، کاهش اتساع دارد. همچنین مشاهده شد که نرخ افزایش اتساع با افزایش تنش عمودی، کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سختی برشی درز، تغییر مکان‌های برشی کمتری به دست آمده و به دنبال آن، اتساع کمتری نیز حاصل شد، اما میزان افزایش اتساع به سختی برشی وابسته نبود. همچنین، مشاهده شد که با افزایش زبری، تنش برشی نهایی هم افزایش پیدا کرده ولی میزان این افزایش در تنش‌های بالا کمتر است و از طرفی این گونه برداشت شد که تأثیر زبری در افزایش مقاومت برشی کمتر از تنش عمودی است. به علاوه، با افزایش سختی هم، حداکثر اتساع ایجاد شده در سیستم، کاهش چشمگیری پیدا کرده است و میزان کاهش اتساع هم کمتر شده است. قابل ذکر است که در سختی‌های برشی بالا، مقادیر حداکثر اتساع درز در تنش‌های

## **Direct Shear Test Modelling to Analyse the Behaviour of Joints in Adjacency of a Tunnel**

*A. Fahimifar, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*A. R. Aminjavaheri, M.Sc. Grad., Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: amirrezaaj@gmail.com*

### **ABSTRACT**

In modern times, the necessity of tunnel construction is inevitable with regards, to the development of the transportation industry, and as a result it is very important to analyse its stability while it is adjacent to some geologic features, such as discontinuities. The direct shear test is one of the most applicable geotechnical tests to investigate geological features such as joints and discontinuities. The dilation and shear behaviour of two sliding surface can be analysed with this test, and in this paper, a constant strain joint element has been presented and a combination of a slider and a shear spring have been applied to this joint element to model the plastic shear behaviour of the joint in contrast to previous joint models. Then, the direct shear test has been programmed based on the finite element method in MATLAB. Subsequently, the joint behaviour has been analysed with an increasing normal stress with various shear stiffness values and JRC (Joint Roughness Coefficient). The results of this numerical study demonstrate that the shear displacements reduce with an increase in shear stiffness, and consequently the dilation decreases as well. Meanwhile, by increasing the normal stress, the joint experiences more dilation in spite of a reduction in the rate of increasing the dilation. Moreover, the peak shear stress and shear strength of the joint have been increased as the JRC increases, but the effect of the normal stress on the shear strength increases with greater significance than with the JRC. Also, the increase in JRC has a direct relationship with dilation increase in the joint.

**Keywords:** Direct Shear Test, Joint Element, Dilation, Finite Element