

بررسی اثرات فشار جانبی در عمق زمین بر روی ضرایب شدت تنش مود ترکیبی اول و دوم

مجید رضا آیت الهی^{۱*}؛ محمد مهدی سید موسوی^۲

۱. استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک، ۱۶۸۴۶؛ m.ayat@iust.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران؛ m_mousavi@mecheng.iust.ac.ir

(دریافت ۱۸ اردیبهشت ۱۳۸۷، پذیرش ۱۲ مرداد ۱۳۸۷)

چکیده

بسیاری از توده‌های سنگی موجود در اعماق زمین، تحت تاثیر تنش‌های چند محوری قرار دارند و چون مبدا شروع شکست در آنها می‌تواند وجود ترک‌ها باشد، بنابراین تحلیل استحکام سازه‌های ترک‌دار تحت بارهای چند محوری بسیار با اهمیت است. با این حال بسیاری از تحقیقات گذشته، در شرایط محیطی و بدون توجه به اثرات فشار جانبی موجود در شرایط واقعی، صورت گرفته است. در این مقاله به کمک تعداد زیادی مدلسازی سه بعدی اجزای محدود و با هدف بررسی اثرات فشار جانبی بر روی ضرایب شدت تنش مود اول و دوم (K_I , K_{II}) دو نمونه آزمایشگاهی ترک‌دار شامل دیسک برزیلی (BD) و نیم دیسک (SCB)، که تحت اثر بار قطری (F) هستند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مدلسازی اثر فشار جانبی، یک بار گسترده یکنواخت (P_m) به تمام وجوه نمونه‌ها وارد شده است. با تحلیل مدل ساخته شده برای مقادیر مختلف طول ترک، زاویه ترک و همچنین فشارهای جانبی مختلف، اثر فشار جانبی بر روی ضرایب شدت تنش مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اعمال فشار جانبی اثر قابل توجهی بر ضریب شدت تنش مود اول دارد در حالی که بر روی ضریب شدت تنش مود دوم اثر قابل توجهی ندارد.

کلمات کلیدی

سنگ، فشار جانبی، بارگذاری مود ترکیبی، ضرایب شدت تنش، روش اجزای محدود

* عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

امروزه هرگاه به زمین و معادن گسترده آن اشاره می‌شود، به طور معمول ذهن تصویری از منابع طبیعی و کانی‌های فلزی و غیر فلزی نهفته در آن را تداعی می‌کند که برای استخراج آنها از میان سنگ و خاک، چاره‌ای جز حفاری در دل کوه یا اعماق زمین وجود ندارد. فلزات گرانبهایی چون طلا و نقره و سایر فلزات با اهمیت همچون آهن، مس و آلومینیوم، همچنین معادن وسیع نمک، آهک و سنگ‌های تزئینی نهفته در دل کوه‌ها و منابع گسترده نفت و گاز مدفون در اعماق زمین، همه و همه از جمله موادی هستند که جهت استخراج و بهره‌برداری از آنها، به حفاری‌های گسترده در دل کوه‌ها و اعماق زمین نیاز است. انجام این حفاری‌ها و استخراج این مواد مستلزم بررسی دقیق جغرافیا و خاک منطقه و تعیین مقاومت توده‌های سنگی اطراف محدوده حفاری است. در این میان تعیین مقاومت توده‌های سنگی در برابر شکست از دو جنبه بسیار مهم، یکی تعیین مقدار بار لازم برای شکست و دیگری تعیین حد مجاز بار اعمالی برای جلوگیری از شکست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اگر چه این حیطه وسیع و گسترده از کاربردهای حفاری، تا حد زیادی پیشرفت دانش و فن‌آوری در علم مکانیک سنگ را موجب شده است، ولی باید توجه داشت که اخیراً کاربردهایی فراتر از آنچه در گذشته به آن پرداخته می‌شد، اهمیت مطالعه رفتار مکانیکی سنگ‌ها از جنبه‌های مختلف را نمایان ساخته است. اگر در گذشته هدف از مطالعات زمین‌شناسی و تحقیق در مکانیک شکست سنگ، تنها حفر یک چاه و استخراج آب، نفت و یا گاز از آن بود، اما امروزه افزایش بهره‌وری و میزان استخراج با بهره‌گیری از شیوه نوینی چون شکست هیدرولیکی^۱ به جهت افزودن میزان نفوذپذیری سیال به داخل چاه نیز اهمیت پیدا کرده است. اگر در گذشته هدف از این مطالعات و حفاری‌ها دسترسی به یک ماده نهفته در اعماق زمین و استخراج آن بود اما امروزه دسترسی به انرژی نهفته در اعماق زمین و استخراج آن از داخل زمین توسط تکنولوژی زمین‌گرایی^۲ مورد توجه قرار گرفته است که همه اینها ارتباط تنگاتنگی با علم مکانیک شکست سنگ دارند. در نتیجه مطالعه رفتار شکست توده‌های سنگی در آنها ضروری می‌باشد. علاوه بر آنچه ذکر شد، تخمین استحکام و مقاومت در برابر شکست توده‌های سنگی در بسیاری از پروژه‌های معدنی و عمرانی دیگر نظیر ساخت تونل‌ها در عملیات راه‌سازی، دفن ایمن زباله‌های اتمی

در اعماق زمین، حفاری‌های باستان‌شناسی و ده‌ها کاربرد دیگر نیز بسیار حائز اهمیت است که در بعضی از آنها هدف افزایش بار اعمالی تا میزان بحرانی آن و در نهایت شکست توده سنگی است. در بعضی دیگر ممانعت از تجاوز بار اعمالی از میزان بحرانی آن و در نتیجه جلوگیری از شکست توده سنگی است. به عنوان مثال در پدیده شکست هیدرولیکی و تکنولوژی زمین‌گرایی به منظور افزایش نفوذ پذیری سیال در قطعات سنگی، با ایجاد ترک و شکاف در آنها هدف اول مورد توجه قرار دارد ولی هنگام حفر یک تونل و یا استخراج از یک معدن جهت افزایش ایمنی و جلوگیری از ریزش‌های احتمالی، لازم است که از گسترش ترک‌ها در دیواره‌های سنگی و اطراف محدوده حفاری جلوگیری کرد. در این تحقیق هدف دوم مورد نظر است.

برای نیل به این اهداف، در بررسی رفتار مکانیکی سنگ‌ها تعیین بار بحرانی و شکست در توده‌های سنگی بسیار با اهمیت است. از طرفی ناپیوستگی‌ها و ترک‌های موجود در سنگ‌ها، مهم‌ترین عامل در شکست آنها محسوب می‌شوند. لذا مساله تعیین بار بحرانی و شکست یک توده سنگی به مساله تعیین بار بحرانی برای رشد و گسترش ترک‌های موجود در آن تبدیل می‌شود.

در علم مکانیک شکست، شرایط بحرانی یک قطعه ترک‌دار با استفاده از شدت تنش موجود در نوک ترک تخمین زده می‌شود. بدین منظور ضرایبی تحت عنوان ضرایب شدت تنش^۳، در نوک ترک تعریف می‌شوند. ضرایب شدت تنش (K_I و K_{II})، پارامترهای اصلی شکست هستند که میزان مقاومت ماده را در مقابل رشد و گسترش ترک مشخص می‌سازند. برای آگاهی از وضعیت شروع و رشد ترک و در نهایت شکست قطعه، تعیین مقادیر K_I و K_{II} که از این پس در این مقاله پارامترهای اصلی شکست نامیده می‌شوند، کاملاً ضروری است. تاکنون مطالعات زیادی جهت تعیین عوامل موثر بر پارامترهای اصلی شکست در نوک ترک و در شرایط محیطی^۴ انجام گرفته است [۱ و ۲]. هر چند این مطالعات گستره وسیعی از کاربردهای مکانیک شکست در پیش‌بینی شکست قطعات و سازه‌های سنگی را پوشش می‌دهند ولی طیف وسیعی از کاربردها نیز هستند که تحت تاثیر شرایطی غیر از شرایط محیطی، یعنی فشارها و دماهای بالا، قرار دارند و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی در شرایط محیطی قابل توجیه و تفسیر نیستند. وجود این طیف وسیع از کاربردها در شرایطی غیر از شرایط محیطی، ضرورت بررسی رفتار شکست مواد را تحت آن

کاملاً لازم و ضروری است. باید توجه داشت که برای به دست آوردن این اطلاعات باید شرایط واقعی موجود در اعماق زمین را در نظر گرفت که فشار جانبی از جمله آنهاست. به منظور دستیابی به یک تصویر دقیق از مقاومت سنگ‌های محدوده حفاری و ضرایب شدت تنش آنها، برای استفاده در فرایند تولید ترک مصنوعی، باید اثر فشار ناشی از لایه‌های بالایی (فشار جانبی) را مد نظر قرار داد و ضرایب شدت تنش را تحت اثر این فشار جانبی محاسبه کرد.

از طرف دیگر در صنعت نفت نیز به منظور افزایش نفوذپذیری نفت به داخل چاه، تولید ترک مصنوعی با استفاده از تکنولوژی شکست هیدرولیکی بسیار مورد توجه قرار دارد. در این صنعت به منظور افزایش استحصال نفت از چاه‌هایی که یا به علت برداشت طولانی مدت بازدهی آنها کاهش یافته است و یا به علت جنس خاک و سنگ‌های اطراف چاه میزان نفوذپذیری کمی دارند، از شکست هیدرولیکی و یا همان پروسه ایجاد شکست در لایه‌هایی از پوسته زمین استفاده می‌شود [۳ و ۴]. استفاده از این تکنولوژی جهت افزایش استخراج نفت به ویژه در زمین‌های رسی، بسیار موثر است.

پیش‌بینی دقیق مسیر و میزان رشد ترک، تعیین مقدار دقیق فشار لازم برای به وجود آوردن ترک‌های مناسب و پیش رونده در دیواره چاه و همچنین سایر پارامترهای مهم و موثر در این پدیده، ضرورت تعیین ضرایب شدت تنش در سنگ‌های اطراف چاه را به خوبی مشخص می‌کند. در اینجا نیز باید توجه داشت که استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی تحت شرایط محیطی (بدون فشار جانبی) صحیح نمی‌باشد و باید اثر توده‌های مختلف سنگ و خاک و یا همان فشار جانبی در مقطع مورد نظر را نیز در نظر گرفت.

شکل ۱ نحوه اثر فشار جانبی را در دو عمق مختلف نشان می‌دهد. با افزایش عمق، میزان فشار جانبی به علت افزایش حجم توده‌های خاک و سنگ بالای آن، افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت موضوع و آنچه ذکر شد تغییرات پارامترهای اصلی شکست (K_I و K_{II}) تحت اثر فشار جانبی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

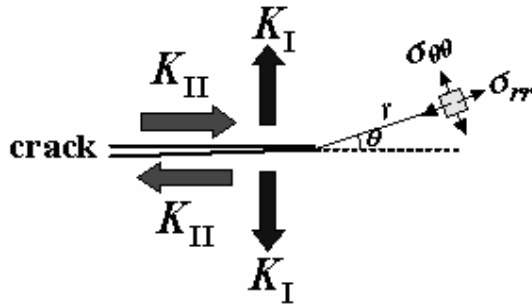
شرایط خاص به وضوح نمایان می‌سازد. فشار جانبی^۵ نمونه‌ای از این شرایط خاص است که در بسیاری از جنبه‌های عملی به طور مستقیم دخالت دارد و بی توجهی به اثر این فاکتور در تغییر پارامترهای اصلی شکست، باعث به وجود آمدن اختلاف میان پیش‌بینی و واقعیت خواهد شد.

۲- اهمیت محاسبه ضرایب شدت تنش تحت اثر فشار جانبی

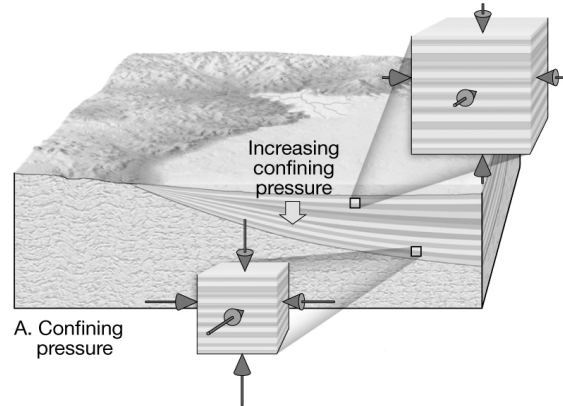
برای پی بردن به اهمیت تعیین ضرایب شدت تنش تحت اثر فشار جانبی، شناخت شیوه افزایش میزان جریان آب در توده‌های سنگی داغ در استخراج انرژی زمین گرمایی و همچنین روش افزایش نفوذپذیری نفت به داخل چاه در عملیات استخراج نفت، بسیار راه گشا خواهد بود. چرا که در هر دوی این پدیده‌ها همواره توده‌های سنگی موجود در اعماق زمین تحت تاثیر فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی قرار دارند. این فشار اعمالی از سوی لایه‌های بالایی همچون یک فشار هیدرواستاتیک بر توده‌های سنگی زیرین عمل می‌کند و بر پارامترهای اصلی شکست تاثیرگذار است.

تکنولوژی انرژی زمین گرمایی (HDRT)، روشی در تولید انرژی است که در آن از دمای بالای سنگ‌های موجود در اعماق ۳ تا ۷ کیلومتری سطح زمین برای تولید انرژی برق و یا گرم کردن آب مصرفی منازل و صنایع استفاده می‌شود. این کار به وسیله پمپ کردن آب پرفشار^۶ به داخل چاهی که تا اعماق زمین پیش رفته است، انجام می‌پذیرد. آب پس از گذشتن از درون شکاف‌ها و ترک‌های سنگ‌ها و دریافت حرارت از آنها توسط همان فشار بالا از طریق چاه دومی که در مجاورت چاه اول حفر شده است جمع‌آوری می‌شود. این آب دارای دمای بسیار بالایی تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است که معمولاً جهت تولید انرژی الکتریسیته در توربین‌های بخار و یا در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

HDRT نقطه پایانی تکنولوژی استخراج گرما از اعماق زمین است و در مناطقی که به طور طبیعی و به اندازه کافی شکاف و ترک در سنگ‌های اعماق زمین وجود دارد، به خوبی قابل اجراست. اما در مواردی که تعداد این ترک‌ها و شکاف‌های طبیعی کم بوده و در نتیجه توده‌های سنگی نفوذپذیری مناسبی برای جریان یافتن آب در بین آنها نداشته باشند، باید به طور مصنوعی و با بکارگیری روش‌های خاص، این ترک‌ها و شکاف‌ها را در سنگ‌های اعماق زمین ایجاد کرد تا دبی جریان آب به حد مطلوب برسد. برای نیل به این هدف دانستن مقاومت به شکست توده‌های سنگی اطراف محدوده حفاری



شکل ۳: تصویری از مود ترکیبی اول و دوم



شکل ۱: نحوه اثر فشار جانبی در دو عمق مختلف [۵]

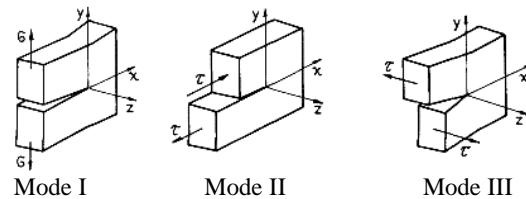
تاکنون نمونه‌های استاندارد گوناگونی برای تعیین پارامترهای اصلی شکست تعیین شده است. نمونه دیسک برزیلی با یک ترک مرکزی^۸ که به اختصار BD خوانده می‌شود و همچنین قطعه نیم دیسک ترک‌دار^۹ که به اختصار SCB خوانده می‌شود از بهترین نمونه‌ها برای آزمایش بر روی مواد سنگی می‌باشند [۸ و ۹]. در این نمونه‌ها به راحتی می‌توان با تغییر در زاویه راستای نیرو و ترک، مودهای مختلف بارگذاری را شبیه‌سازی کرد. در این تحقیق، این نمونه‌های متداول آزمایشگاهی با تغییر زاویه اعمال نیرو از ۰ تا ۸۰ درجه و همچنین تحت اثر فشارهای جانبی ۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۴ تصویری از دیسک برزیلی و نیم دیسک ترک‌دار را تحت فشار جانبی P_m و بار متمرکز F نشان می‌دهد.

هنگامی که نیروهای خارجی بر یک نمونه سنگی ترک‌دار وارد می‌شوند، تمرکز تنش در اطراف نوک ترک به وجود می‌آید و با افزایش ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} و رسیدن آنها به مقدار بحرانی، به دلیل رشد و گسترش ترک، شکست اتفاق می‌افتد. سه شیوه متداول برای تعیین ضرایب شدت تنش یک ماده وجود دارد: ۱- روش‌های تحلیلی ۲- روش‌های عددی ۳- روش‌های تجربی. در این تحقیق از روش عددی و از نرم افزار ABAQUS [۱۰] برای تعیین میزان ضرایب شدت تنش

استفاده شده است. این نرم افزار از روش انتگرال J برای محاسبه ضرایب شدت تنش استفاده می‌کند. در این روش تغییر مکانهای وجوه بالا و پایین ترک توسط نرم افزار و از طریق روش‌های اجزای محدود محاسبه شده و نسبت K_{II} به K_I که با R_K نمایش داده می‌شود با استفاده از این تغییر مکانها تعیین می‌گردد و سپس با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} محاسبه می‌شوند [۱۰].

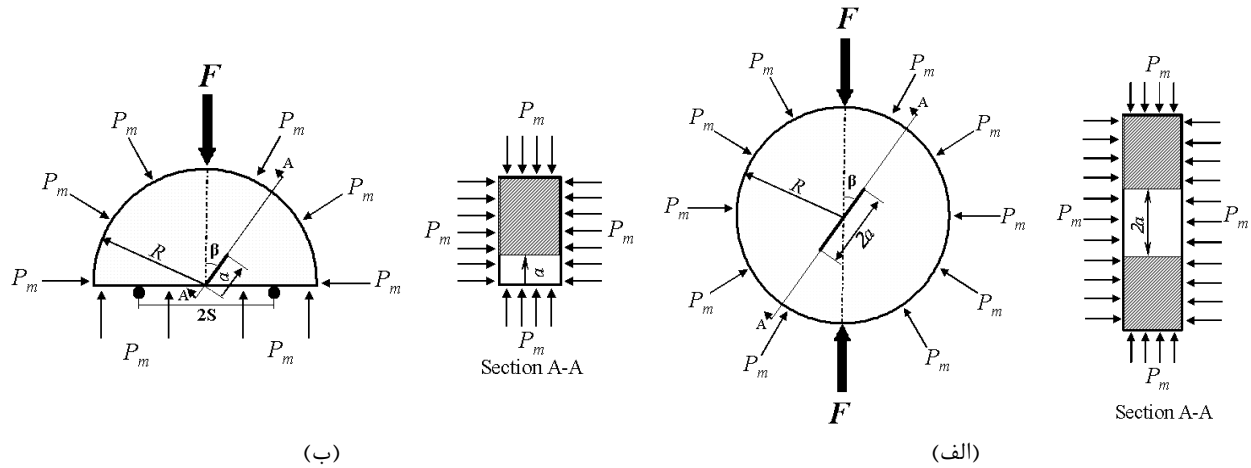
۳- اصول و تئوری موضوع

سه مود اصلی اعمال نیرو بر ترک وجود دارد. مود یک (کشیدگی و باز شدگی)، مود دو (برش و لغزش) و مود سه (لغزش و پاره شدگی). شکل ۲ تصویر شماتیکی از این مودها را نشان می‌دهد. هر ترکیبی از این سه مود اصلی تحت عنوان مود ترکیبی^۷ شناخته می‌شود.



شکل ۲: سه مود اصلی اعمال نیرو در قطعات ترک‌دار

در گذشته مطالعه تغییرات پارامترهای اصلی شکست تحت اثر فشار جانبی به ندرت مورد توجه بوده است و در موارد اندکی هم که این تحقیقات صورت گرفته است، عمدتاً نمونه‌ها تحت اثر مود اول بارگذاری بوده‌اند [۶ و ۷]. با توجه به جهت‌گیری‌های تصادفی ترک‌ها در سنگ‌ها و در شرایط اعماق زمین، نیروها اغلب به صورت ترکیبی از مودهای اصلی بارگذاری بر ترک اعمال می‌شوند. از طرفی در سنگ‌ها مود ترکیبی اول و دوم (Mixed-Mode I-II) بسیار متداول‌تر است. لذا در این تحقیق طیف وسیعی از تحلیل‌ها از مود اول تا مود دوم و ترکیب آنها انجام گرفته است. شکل ۳ تصویری از مود ترکیبی اول و دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تصویری از نمونه‌های ترکدار تحت فشار جانبی P_m و بار متمرکز F : (الف) نمونه BD (ب) نمونه SCB

تنش استفاده می‌شود. از طرفی نمونه‌های به کار برده شده در این تحلیل‌ها دارای قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر هستند و نسبت a (نصف طول ترک در قطعه BD یا طول ترک در قطعه SCB) به R (شعاع دیسک) در آنها برابر $0.1/2$ ، $0.1/4$ و $0.1/6$ می‌باشد. همچنین نیروی متمرکز اعمالی (F)، برابر ۱۰ کیلونیوتن و میزان فشار جانبی اعمالی (P_m)، برابر ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. زاویه راستای نیرو و ترک نیز بین ۰ و ۸۰ درجه و با افزایش‌های ۴ درجه‌ای انتخاب شده است. در نمونه نیم دیسک نیز نسبت S (نصف فاصله بین دو تکیه‌گاه) به R (شعاع نیم دیسک)، $0.1/5$ و $0.1/7$ در نظر گرفته شد.

مدلسازی در نرم‌افزار ABAQUS توسط المان‌های ۸ گرهی اکستروود شده که در نهایت یک المان سه بعدی ۲۰ گرهی را می‌سازند، انجام شده است. گره‌های میانی اولین المان‌های نوک ترک به یک چهارم طول اولین گره تا نوک ترک منتقل شده‌اند. این کار به جهت دقیق‌تر کردن نتایج، پیشنهاد شده است. در مجموع در حدود ۲۲۰۰۰ المان برای مدلسازی با مشخصات فوق به کار برده شد. شکل ۵ نمایی از نمونه‌های المان‌بندی شده را نشان می‌دهد. کانتورها جهت محاسبه انتگرال J به تعداد ۱۵ عدد تعیین شد و مقادیر K_I و K_{II} از محدوده‌ای که نتایج همگرا شدند، استخراج گردید. همچنین تحلیل برای سنگ گرانیته با مدول الاستیسیته (E) برابر ۵۳ گیگاپاسکال و نسبت پواسون (ν) برابر 0.23 انجام شد.

$$K_I = \sqrt{\frac{E'J}{1+R_K^2}} \quad (1)$$

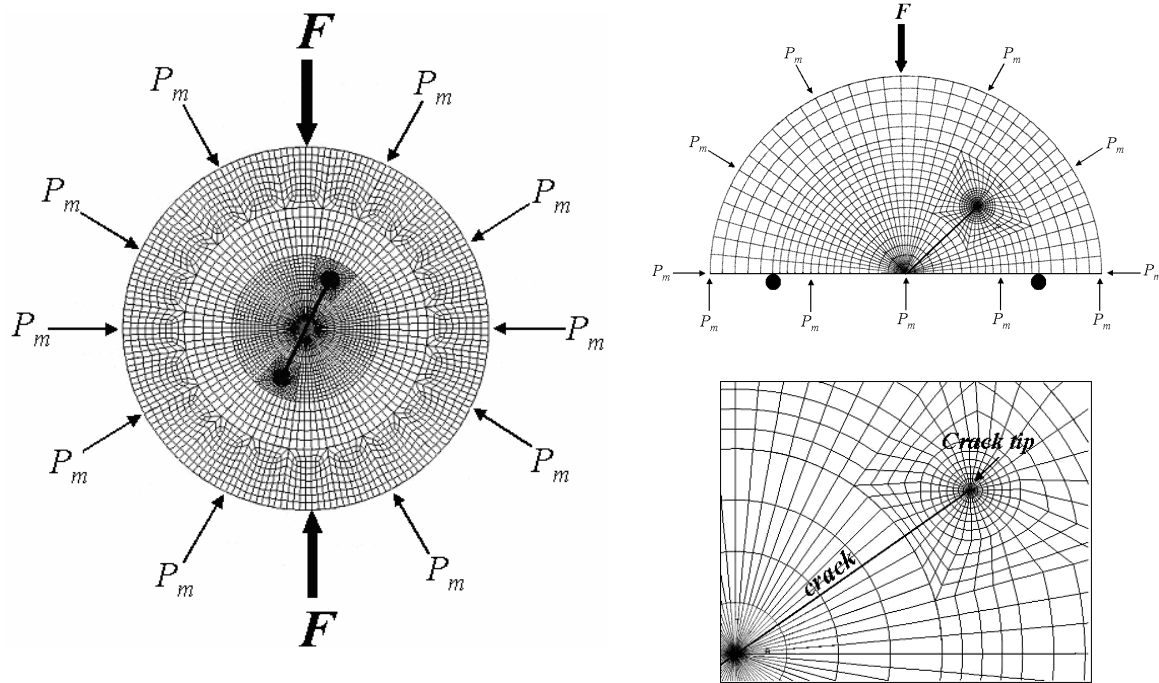
$$K_{II} = R_K K_I \quad (2)$$

$$E' = \begin{cases} E & \text{کرنش صفحه ای} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{تنش صفحه ای} \end{cases} \quad (3)$$

که در آنها E مدول یانگ (پاسکال)، ν نسبت پواسون (بی بعد) و J مقدار انتگرال J (پاسکال متر) و در نهایت K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش (پاسکال رادیکال متر) می‌باشند.

۴- روش کار و مدلسازی اجزای محدود

برای هندسه و بارگذاری‌های پیچیده تکنیک المان محدود، روش بسیار قابل اعتماد و مناسبی برای تعیین پارامترهای اصلی شکست می‌باشد. از میان چندین روش موجود در این تکنیک برای محاسبه ضرایب شدت تنش مود اول و دوم، روش انتگرال J شیوه مناسب و قابل اعتمادی است که دارای دقت بسیار مطلوبی نیز می‌باشد [۱۱]. نرم‌افزار ABAQUS از جمله نرم‌افزارهای تحلیلی در علم مکانیک است که از این روش برای محاسبه ضرایب شدت



شکل ۵: نمایشی از نمونه‌های BD و SCB المان بندی شده و المانهای نوک ترک

۵- نتایج

برای بررسی صحت مدلسازی اجزای محدود انجام شده در این تحقیق، ابتدا بدون اعمال فشار جانبی بر نمونه‌ها مقادیر K_I و K_{II} تعیین و نتایج بدست آمده با آنچه اتکینسون^{۱۱} [۱۲]، فت^{۱۱} [۱۳] و آیت الهی [۱۴] در حالت عدم وجود فشار جانبی بدست آورده بودند، مقایسه شد. به عنوان مثال در شکل ۶ نتایج مربوط به نمونه BD برای نسبت a/R برابر 0.2 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده توسط اتکینسون و فت مقادیر بی‌بعد شده ضرایب شدت تنش یعنی Y_I و Y_{II} می‌باشند، لذا از روابط زیر که توسط آنها نیز مورد استفاده قرار گرفته است، به منظور بی‌بعد کردن K_I و K_{II} استفاده شد تا امکان مقایسه نتایج فراهم آید.

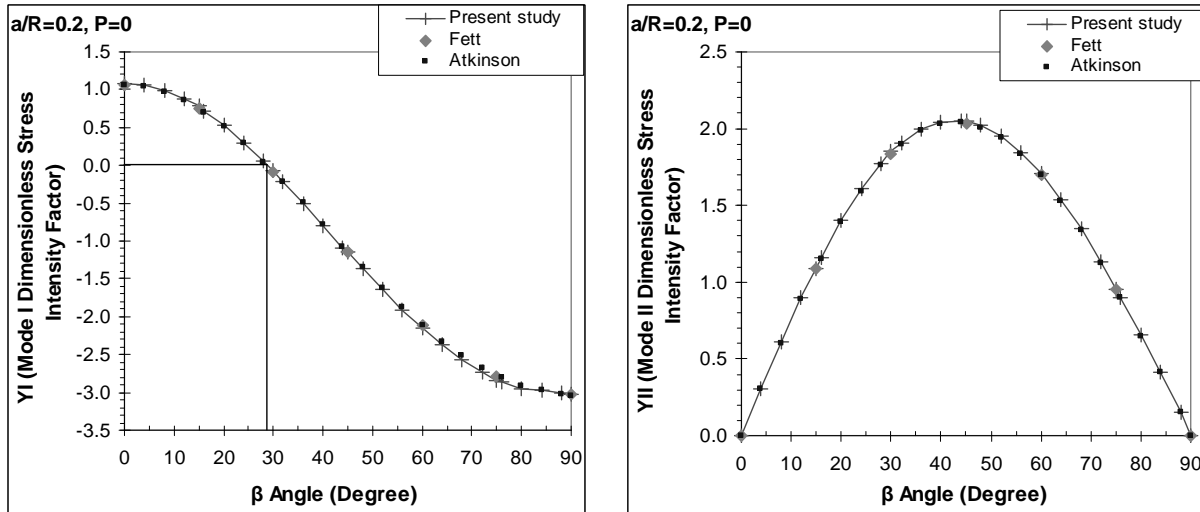
$$Y_I = \frac{Rt}{F} \sqrt{\frac{\pi}{a}} K_I \quad (4)$$

$$Y_{II} = \frac{Rt}{F} \sqrt{\frac{\pi}{a}} K_{II} \quad (5)$$

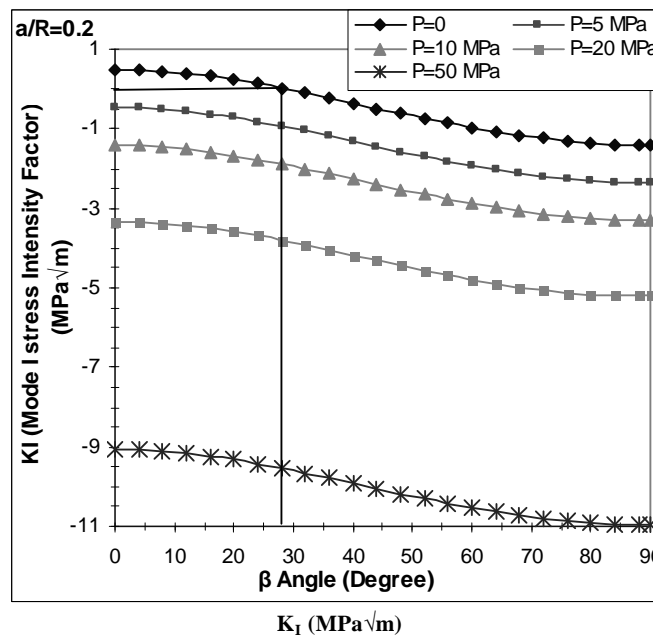
در روابط فوق K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش موده‌های اول و دوم، R شعاع دیسک برزیلی (متر)، t ضخامت دیسک (متر)، F بار متمرکز اعمالی بر نمونه (نیوتن)، a نصف طول ترک (متر) و Y_I و Y_{II} ضرایب بی‌بعدی هستند که به مشخصه‌های هندسی نمونه از جمله نسبت a/R و زاویه نیروی اعمالی (β) وابسته‌اند. اگر چه مقایسه نتایج در شکل ۶ برای حالت عدم وجود فشار جانبی صورت پذیرفته است ولی یکسان بودن نتایج در موارد مشابه، صحت مدلسازی اجزای محدود انجام شده را تایید و در نتیجه نتایج به دست آمده در حالت وجود فشار جانبی را نیز قابل اعتماد می‌سازد.

۵-۱- نمونه BD

شکل ۷ تغییرات K_I نسبت به زاویه را با تغییر میزان فشار جانبی برای نمونه BD نشان می‌دهد. با بررسی این نمودار مشخص می‌شود که با افزایش فشار جانبی مقدار K_I در دیسک برزیلی کاهش می‌یابد و با توجه به منفی بودن مقادیر K_I ، تمایل ترک به بسته شدن در حضور فشار جانبی افزایش می‌یابد. بعلاوه، روند کاهنده مقادیر K_I با افزایش زاویه



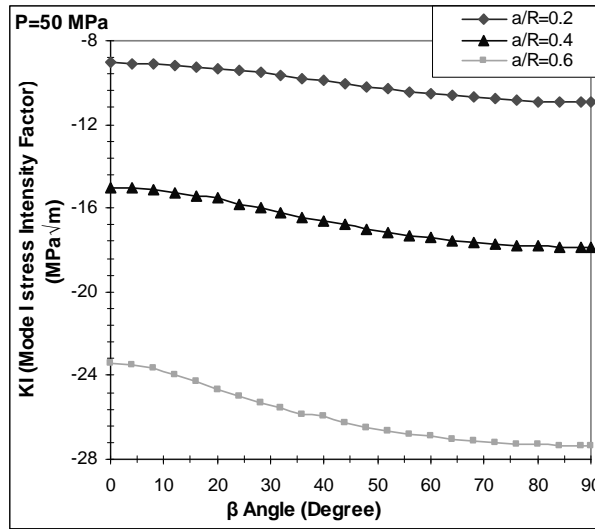
شکل ۶: مقایسه مقادیر بی بعد ضرایب شدت تنش (Y_{II} و Y_I) گزارش شده توسط اتکینسون و فت با نتایج به دست آمده در این تحقیق برای نمونه BD در حالت عدم وجود فشار جانبی



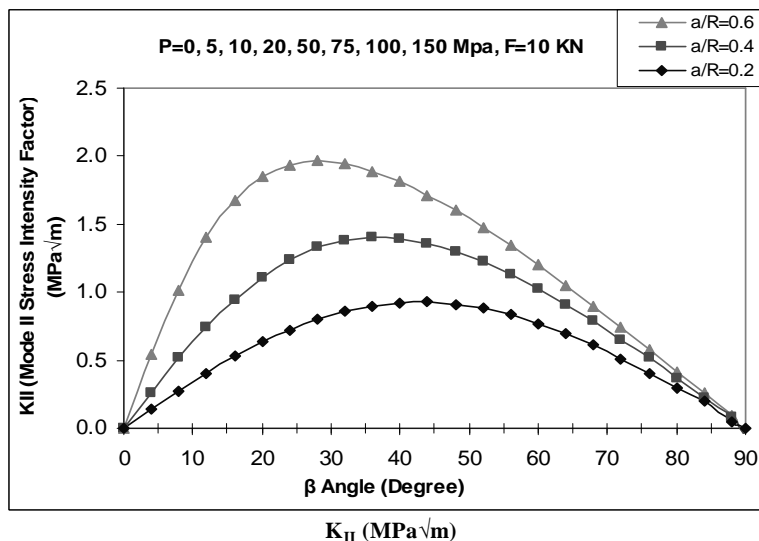
شکل ۷: تغییرات K_I نسبت به زاویه با تغییر میزان فشار جانبی برای نمونه BD

جانبی نیز این اثر وجود داشت که در اینجا جهت رعایت اختصار آورده نشده است. با این وجود نتایج اجزای محدود نشان دادند که اعمال فشار جانبی تاثیری بر مود دوم شکست ندارد (شکل ۹) و لذا مقدار K_{II} که بیانگر لغزش صفحه‌ای وجوه ترک مطابق شکل ۳ است، تاثیری از فشارهای جانبی ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال اعمالی در این تحقیق نمی‌پذیرد. این پدیده با تشبیه فشار جانبی اعمالی به یک فشار هیدرواستاتیک، به طوری که بر وجوه ترک اعمال نشود، قابل توجیه است. این فشار هیدرواستاتیکی به علت

راستای ترک نشان می‌دهد که ترک در زوایای کمتر تمایل بیشتری به بازشدگی و رشد و در نهایت شکست دارد و در این زوایا قطعه با نیروی کمتری دچار شکست می‌شود. از طرفی هر چه نسبت a/R افزایش می‌یابد، میزان تاثیر فشار جانبی بر K_I بیشتر شده، به طوری که مقاومت به شکست در اثر بازشدگی وجوه ترکی با نسبت a/R برابر $0/6$ از ترکی با نسبت $0/2$ یا $0/4$ به مراتب بیشتر است. این اثر در نمودار شکل ۸ که برای یک فشار جانبی نمونه (۵۰ مگاپاسکال) آورده شده است به راحتی قابل رویت است. لازم به ذکر است که در سایر فشارهای



شکل ۸: تغییرات K_I نسبت به زاویه با تغییر نسبت a/R برای فشار جانبی 50 مگاپاسکال برای نمونه BD



شکل ۹: تغییرات K_{II} نسبت به زاویه با تغییر نسبت a/R برای فشارهای جانبی مختلف برای نمونه BD

زوایای بزرگتر ترک بیشتر است تا جایی که در زاویه 70 درجه و در حضور فشارهای جانبی بزرگتر، ترک کاملاً تمایل به بسته شدن دارد. همچنین از نمودار شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که بر خلاف نمونه BD در قطعه SCB با اعمال و افزایش فشار جانبی مقادیر K_{II} تغییر کرده و کاهش می‌یابد. چرا که در این نمونه به علت عدم تقارن هندسی شکل، بارهای ناشی از اعمال فشار جانبی بر جسم اثر همدیگر را خنثی نمی‌کنند و در نتیجه اعمال فشار جانبی بر ضریب شدت تنش K_{II} نیز اثرگذار خواهد بود. از طرفی اثر فشار جانبی بر روی K_{II} در زوایای بزرگتر ترک بیشتر است به طوری که در زوایای بزرگتر، تمایل ترک به لغزش و برش کاملاً مشخص است. این در حالی است که

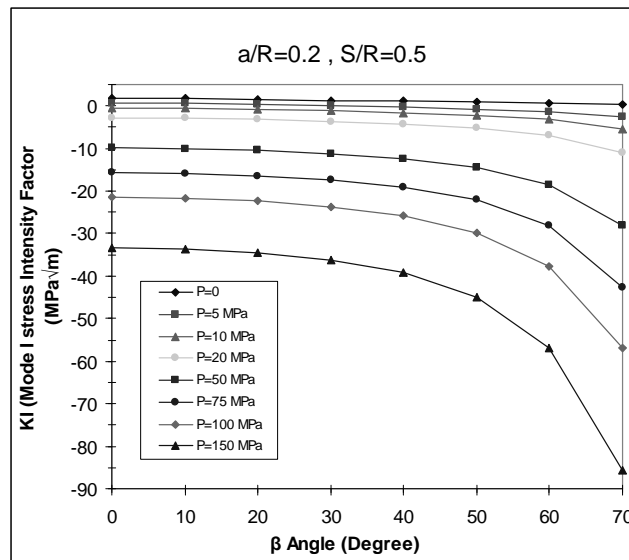
تقارن شکل، اثر خود را خنثی می‌کند و در نتیجه، تنها بر روی K_I اثرگذار خواهد بود و بر K_{II} تاثیری نخواهد داشت. همچنین از این نمودار پیداست که هر چه نسبت a/R بیشتر می‌شود، مقدار K_{II} افزایش می‌یابد.

۵-۲- نمونه SCB

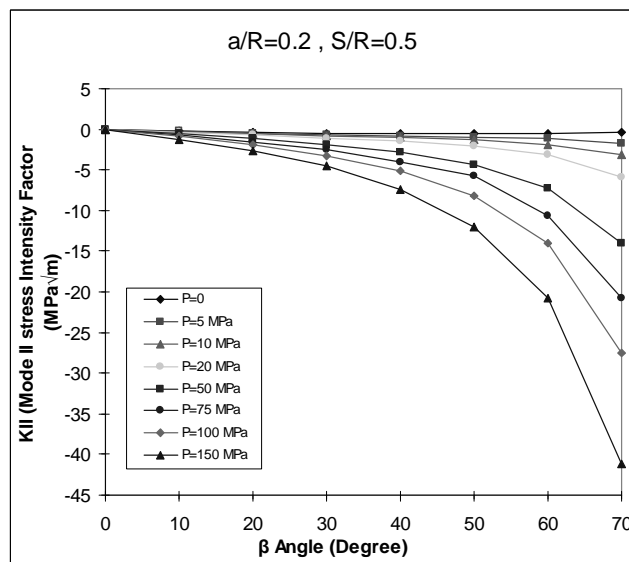
شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نتایج مربوط به ضرایب شدت تنش در قطعه SCB را نشان می‌دهند. به طور مشابه در مورد قطعه SCB مشاهده می‌شود که با افزایش فشار جانبی مقدار K_I کاهش یافته و تمایل ترک به بسته شدن در حضور فشار جانبی بیشتر خواهد بود. با توجه به این نمودار اثر فشار جانبی در

مگا پاسکال و برای نسبت a/R برابر 0.2 آورده شده است. به همین ترتیب از نمودار شکل ۱۳ نیز می‌توان پی برد که با افزایش نسبت a/R از 0.2 به 0.4 یا 0.6 اثر فشار جانبی بر ضریب شدت تنش K_I باعث کاهش بیشتر آن می‌شود. در حالی که در مورد ضریب شدت تنش K_{II} تا زاویه حدود 30 درجه، با افزایش نسبت a/R از 0.2 به 0.4 و 0.6 مقدار K_{II} کاهش یافته ولی پس از این زاویه این روند به صورت منظم ادامه ندارد.

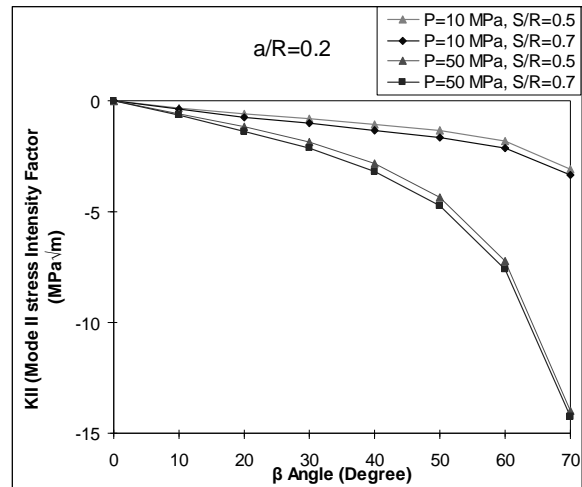
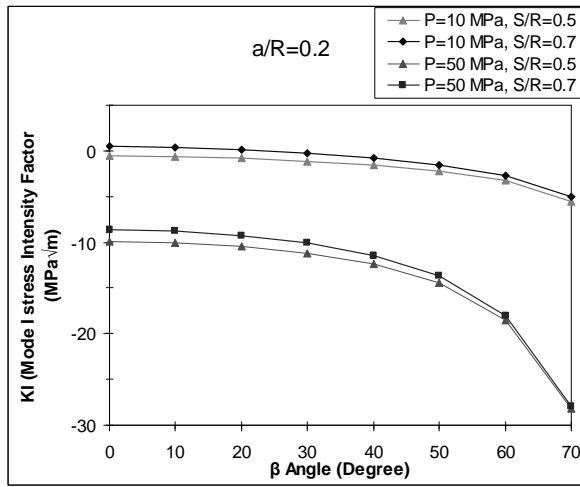
همانطور که انتظار می‌رود در زاویه صفر درجه به علت یکسان بودن سطح موثر اعمال فشار جانبی در وجوه بالا و پایین نیم دیسک هیچگونه نیروی برشی بر وجوه ترک وارد نشده و در نتیجه مقدار K_{II} به ازای همه مقادیر فشار جانبی صفر است. به همین ترتیب با افزایش نسبت S/R از 0.5 به 0.7 اثر کاهشی فشار جانبی بر ضرایب شدت تنش بیشتر خواهد شد. این موضوع در نمودار شکل ۱۲ برای فشارهای نمونه 10 و 50



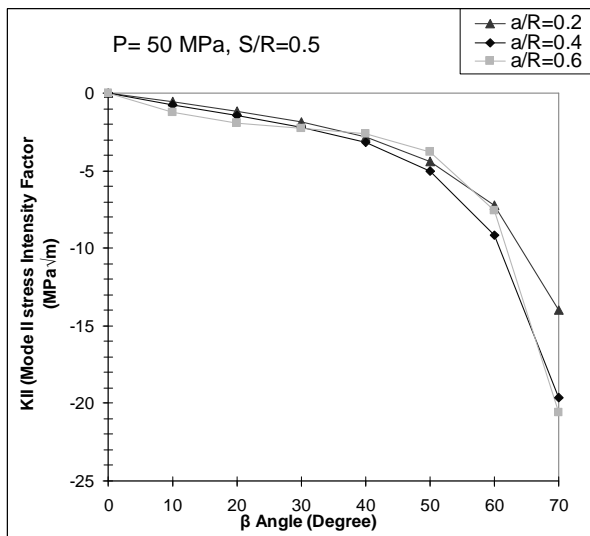
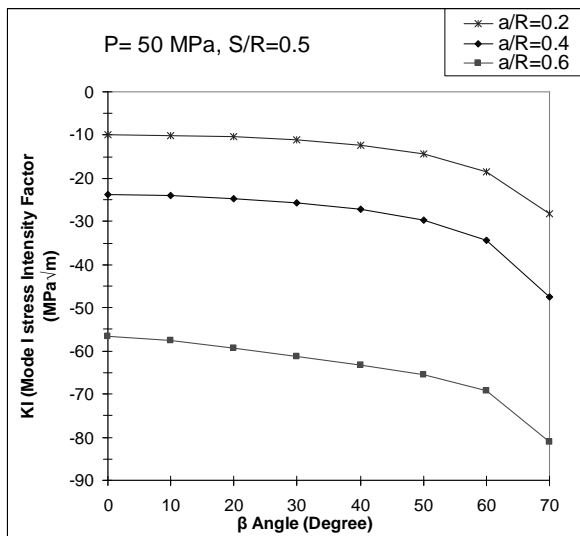
شکل ۱۰: تغییرات K_I نسبت به زاویه با تغییر میزان فشار جانبی برای نمونه SCB



شکل ۱۱: تغییرات K_{II} نسبت به زاویه با تغییر میزان فشار جانبی برای نمونه SCB



شکل ۱۲: تغییرات K_I و K_{II} نسبت به زاویه با تغییر نسبت S/R برای فشار جانبی های ۱۰ و ۵۰ مگاپاسکال برای نمونه SCB



شکل ۱۳: تغییرات K_I و K_{II} نسبت به زاویه با تغییر نسبت a/R برای فشار جانبی ۵۰ مگاپاسکال و نسبت S/R برابر ۰/۵ برای نمونه SCB

می‌دهد که فشار جانبی اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار شکست توده‌های سنگی ترک‌دار اعماق زمین دارد. این در حالی است که اکثر تحقیقات قبلی در شرایط محیطی معمولی (فشار جو) انجام پذیرفته است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شد، برای نمونه دیسک برزلی ضریب شدت تنش مود یک (K_I) برای همه زوایای ترک در حالت مود ترکیبی تا حد زیادی به اندازه فشار جانبی وابسته است. در تمام نتایج بدست آمده، یک کاهش قابل

۶- بحث و نتیجه گیری

در مطالعه سازه‌ها و توده‌های سنگی باید به این نکته توجه داشت که این سازه‌ها معمولاً در معرض تنش‌ها و بارهای چند جانبه قرار دارند. در شرایط واقعی اعماق زمین، توده‌های سنگی ترک‌دار فشار جانبی اعمالی از جهات مختلف را تحمل می‌کنند. بر این اساس باید اثر فشار جانبی بر روی چقرمگی شکست و رشد ترک در نظر گرفته شود. نتایج عددی بدست آمده در این تحقیق نشان

موضوع در مراحل بعدی تحقیق حاضر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

منابع

- [1] Lim IL; Johnston IW; Choi SK; (1994); *Assessment of mixed mode fracture toughness testing methods for rock*, International Journal of Rock Mechanics, 31, 265-272.
- [2] Krishnan GR; Zhao XL; Zaman M; Rogiers JC; (1998), *Fracture toughness of a soft sandstone*, International Journal of Rock Mechanics, 35, 195-218.
- [3] Abe H; Keer LM; Mura T; (1979); *Theoretical study of hydraulic fractured penny-shaped cracks in hot, dry rocks*, International Journal of Numerical Analy. Methods in Geomech, 79-96.
- [4] Cornell Fracture Group
<http://www.cfg.cornell.edu/projects/HydroFrac/HydroFracProj.html>
- [5] Fort Hays State University. Intro Geology Course (GSCI 100)
<http://hays.outcrop.org/GSCI100/lecture30.html>
- [6] Schmidt RA; Huddle CW; (1977); *Effect of confining pressure on fracture toughness of Indiana limestone*, International Journal of Rock Mech. Min Sci. Geomech. Abstr, 14, 289-293.
- [7] Funatsu T; Seto M; Shimada H; Matsui K; Kuruppu M; (2004); *Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness of clay bearing rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(6), 927-938.
- [8] Fowell RJ; Xu C; (1994); *The use of the cracked Brazilian disk geometry for rock fracture investigations*, International Journal of Rock Mechanics, 31, 571-579.
- [9] Whittaker BN; Singh RN; Sun G; (1992); *Rock fracture mechanics: principles, design and applications*, developments in geotechnical engineering, Netherlands, Elsevier Publishers.
- [10] ABAQUS Software, Version 6; (1997); *User's Manual*; Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc, Providence, Rhode Island.
- [11] Courtin S; Gardin C; Bezine G; Ben Hadj Hamouda H; (2005); *Advantages of the J-integral approach for calculating stress intensity factors when using the commercial finite element software ABAQUS*. Engineering Fracture Mechanics, 2174-2185.

توجه در مقدار K_I با افزایش فشار جانبی مشاهده می‌شود. این کاهش به این علت است که فشار جانبی اعمالی به نمونه موجب بسته شدن ترک و فشردن وجوه ترک به یکدیگر می‌شود. در نتیجه برای فشارهای جانبی زیاد، K_I کاهش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده این واقعیت است که برای ایجاد شکست در یک توده ترک‌دار محبوس در فشار جانبی، مقدار بار متمرکز (F) بیشتری مورد نیاز است. از طرف دیگر هر چه عمق منطقه حفاری بیشتر باشد، باید مقدار فشار بیشتری برای به وجود آوردن ترک و رشد آن به کار برده شود. همانطور که از شکل ۷ مشخص می‌شود با افزایش فشار جانبی ناشی از افزایش عمق حفاری مقدار K_I منفی‌تر می‌شود که به معنای بسته‌تر شدن ترک و نیاز به نیروی کششی بیشتر برای رشد و شکست است. در چنین شرایطی رشد ترک عمدتاً به واسطه نیروهای برشی و اثرات مود دوم خواهد بود. این موضوع در مورد قطعه نیم دیسک نیز صادق است زیرا در نتایج بدست آمده از مدلسازی این نمونه، کاهش در مقدار K_I با افزایش فشار جانبی مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

از طرف دیگر با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۱ می‌توان پی برد که در قطعه دیسک برزیلی به علت خنثی شدن اثر فشار جانبی بر وجوه مقابل هم، ضریب شدت تنش K_{II} متأثر از فشار جانبی نخواهد بود در حالی که در مورد قطعه نیم دیسک با توجه به عدم تقارن، اثر فشار جانبی خنثی نشده و در نتیجه آن، مقدار K_{II} کاهش می‌یابد.

اگرچه در این تحقیق، اثرات فشار جانبی بر ضرایب شدت تنش در حالت مود ترکیبی اول و دوم به این منظور مورد مطالعه قرار گرفته است تا شرایط واقعی موجود در اعماق زمین را شبیه‌سازی کرده و نتایج مدل سازی اجزای محدود انجام گرفته را در کاربردهای عملی، قابل اعتمادتر گرداند ولی باید به این نکته مهم توجه داشت که در شرایط واقعی موجود در اعماق زمین، دما نیز از عوامل مهم و تاثیرگذار بر پارامترهای اصلی شکست است و در نتیجه اثر دما بر این پارامترها را نیز باید مورد توجه قرار داد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که سایر علاقه‌مندان در آینده اثر این عامل مهم را نیز بر روی ضرایب شدت تنش با استفاده از مدلسازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار دهند. این

- [17] Al-Shayea NA; K Khan; Abduljawwad SN; (2000); *Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, 629-643.
- [18] Vasarhelyi B; (1997); Influence of pressure on the crack propagation under mode-I loading in anisotropic Gneiss. Rock, Mech Rock Eng, 30, 59-64.
- [19] Perkins TK; Krech WW; (1966); "Effect of cleavage rate and stress level on apparent surface energies of rocks", Society of Petroleum Engineers Journal, 6, 308-314.
- [20] Balme MR; Rocchi VC; Jones PR; Sammonds PG; Meredith SB; (2004); *Fracture toughness measurements on igneous rocks using a high-pressure, high-temperature rock fracture mechanics cell*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132, 159-172.
- [12] Atkinson C; Smelser RE; Sanchez J; (1982); *Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test*, International Journal of Fracture, 18, 279-291.
- [13] Fett T; (2001); *Stress intensity factors and T-stress for cracked circular disks*, Engineering Fracture Mechanics, 68, 119-1136.
- [14] Ayatollahi MR; Aliha MRM; (2007); *Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading*, Computational Materials Science, 38, 660-670.
- [15] Awaji H; Sato S; (1978); *Combined mode fracture toughness measurement by the disk test*, Journal of Engineering Material Technology, 100, 175-182.
- [16] Abou-Sayed AS; (1978); *An experimental technique for measuring the fracture toughness of rocks under downhole stress condition*, VDI-Berichte, 33, 819-824.

زیر نویس ها

-
- ¹ - Hydraulic Fracture Method
² - Hot Dry Rock Technology
³ - Stress Intensity Factors
⁴ - Ambient Condition
⁵ - Confining Pressure
⁶ - High Pressure Water
⁷ - Mixed-Mode
⁸ - Central Notched Brazilian Disc
⁹ - Notched Semi-circular Disc
¹⁰ - Atkinson
¹¹ - Fett