

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در شرایط
کشش و برش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

صمد منصوری

اساتید راهنما:

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

دکتر محمود شریعتی

مشاور:

مهندس نادر زیاری

شهریور ۱۳۹۲

ب

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است:

به استوارترین تکیه‌گاهم، **دستان پر مهر پدرم**

به سبزترین نگاه زندگیم، **چشمان سبز مادرم**

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگوختم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیان را پاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ به‌شتم رضای شما

را آوردی کران سنگ ترا از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار حسگیتان

را بزوداید .

بوسه بر دستان پر مهرتان

لازم می‌دانم از اساتید گرانقدر خود جناب آقایان دکتر حسین میرزائی نصیرآباد و دکتر محمود شریعتی، به خاطر راهنمایی‌های ارزنده ایشان و زحماتی که از ابتدا تا انتهای پایان نامه کشیده‌اند، تشکر و قدردانی کنم.

تشکر و سپاس خود را نثار برادران ارجمندم جناب آقایان مهندس نادر زیاری به عنوان مشاور این پایان‌نامه و مهندس کمال کلاسنگانی می‌کنم که در کلیه مراحل ساخت، آماده‌سازی و بارگذاری نمونه‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ و آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی شاهرود یار و یاور بنده بودند. همچنین از جناب آقایان مهندس حسین احسان‌پور کارشناس کارگاه ابزار برش و جناب آقای مهندس مصطفی نادری کارشناس آزمایشگاه کانه‌آرایی که کمال مساعدت را با بنده داشتند، تقدیر و تشکر می‌کنم.

از جناب آقایان مهندس شریف براتی، مهندس سیامک آذرگشسب، مهندس مجید دژم خوی و مهندس مسلم امیدباد که هر یک به نوعی در پیشبرد پایان‌نامه یاری‌ام نموده‌اند نیز سپاسگزارم.

صمد منصوری

چکیده

اندازه‌گیری دقیق چقرمگی شکست سنگ‌ها بعنوان پارامتر کلیدی در تحقیقات مکانیک شکست سنگ، در حالت کشش و برش از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تعیین این پارامتر روش‌های آزمایشگاهی مختلفی ارائه شده است که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

این پایان‌نامه تلاشی برای ارائه مقایسه‌ای جامع بین شش روش تعیین چقرمگی مود کششی و سه روش تعیین چقرمگی شکست مود برشی سنگ‌ها براساس میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه‌ها و تغییر طول ترک در نمونه‌هاست. به منظور نیل به این هدف و با توجه به ماهیت مقایسه‌ای این پژوهش، ابتدا ۳۱۶ نمونه‌ی ترک‌دار لازم بطور مصنوعی با مصالح گچی ساخته شدند تا نمونه‌ها حتی‌الامکان همگن و همسانگرد بوده و رفتار الاستیک خطی داشته باشند. سپس نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه و طول ترک مشخص شده است. در گام آخر نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، نحوه‌ی توزیع تنش و جابجایی‌ها در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار و نیم‌دیسکی ترک‌دار بررسی شده و رفتار شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که نتایج مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

با در نظر گرفتن عوامل مختلف نظیر سادگی هندسه نمونه، سادگی بارگذاری، دقت نتایج و تجهیزات بارگذاری لازم، می‌توان عنوان کرد که براساس نتایج این پژوهش روش نمونه‌های دیسک برزلی با ترک مرکزی شورن (CCNBD) که یکی از روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ می‌باشد، هم در حالت کشش و هم در حالت برش مناسب‌ترین روش بوده است.

کلید واژه‌ها: چقرمگی شکست سنگ - مود کششی (I) - مود برشی (II) - مطالعات آزمایشگاهی - نمونه‌شبه سنگی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ج	چکیده
و	فهرست مطالب
ک	فهرست شکل ها
س	فهرست جدول ها
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- کلیات
۳	۲-۱- ضرورت انجام تحقیق
۴	۳-۱- اهداف تحقیق
۵	۴-۱- ساختار پایان نامه
۶	فصل دوم: مبانی مکانیک شکست و مکانیک شکست سنگ
۷	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- حالات مختلف رشد ترک
۹	۳-۲- مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)
۱۰	۴-۲- میدان تنش و تغییر مکان در نوک ترک
۱۳	۵-۲- ضریب تمرکز تنش
۱۴	۶-۲- چقرمگی شکست
۱۵	۱-۶-۲- چقرمگی شکست مود کششی
۱۶	۲-۶-۲- چقرمگی شکست مود برشی
۱۶	۳-۶-۲- عوامل موثر بر چقرمگی شکست
۱۶	۱-۳-۶-۲- اثر مقیاس
۱۷	۲-۳-۶-۲- ناحیه‌ی فرآیند شکست (FPZ)
۱۹	۳-۳-۶-۲- اندازه نمونه
۲۰	۴-۳-۶-۲- فشار محصورکننده

۲۱	..... ۲-۶-۳-۵-۵
۲۲	..... ۲-۷- معیارهای رشد ترک
۲۲	..... ۲-۷-۱- معیار حداکثر تنش مماسی
۲۴	..... ۲-۷-۲- معیار حداکثر نرخ رهايش انرژی کرنشی
۲۵	..... ۲-۷-۳- معیار حداقل دانسیته انرژی کرنشی
۲۶	..... ۲-۸- مکانیک شکست سنگ
۲۸	..... ۲-۹- جمع‌بندی
۲۹	..... فصل سوم: روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی
۳۰	..... ۳-۱- مقدمه
۳۰	..... ۳-۲- نمونه‌های استوانه‌ای با شکاف شورن تحت کشش مستقیم (SR)
۳۱	..... ۳-۲-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش
۳۳	..... ۳-۲-۲- تعیین چقرمگی شکست
۳۴	..... ۳-۳- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه‌نقطه‌ای (CB)
۳۴	..... ۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش
۳۵	..... ۳-۳-۲- انتخاب اندازه‌ی نمونه
۳۶	..... ۳-۳-۳- تعیین چقرمگی شکست
۳۷	..... ۳-۴- نمونه‌ی استوانه‌ای با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه‌نقطه‌ای (SECRBB)
۳۸	..... ۳-۵- نمونه‌ی دیسکی با ترک مرکزی مستقیم (CSTBD)
۳۹	..... ۳-۵-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش
۴۰	..... ۳-۵-۲- تعیین چقرمگی شکست
۴۴	..... ۳-۶- نمونه‌ی نمونه‌ی دیسکی با ترک مرکزی شورن (CCNBD)
۴۶	..... ۳-۶-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی
۴۷	..... ۳-۶-۲- انتخاب اندازه نمونه
۴۸	..... ۳-۶-۳- تعیین چقرمگی شکست
۵۱	..... ۳-۷- نمونه‌ی دیسک برزلی بدون ترک (BDT)
۵۲	..... ۳-۸- نمونه‌ی دیسکی با دو انتهای مسطح شده (FBD)
۵۴	..... ۳-۹- نمونه‌ی نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه‌نقطه‌ای (SNSCB)
۵۴	..... ۳-۹-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی
۵۵	..... ۳-۹-۲- تعیین چقرمگی شکست
۵۸	..... ۳-۱۰- نمونه‌ی نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه‌نقطه‌ای (CNSCB)

- ۱۱-۳- نمونه‌ی دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (SNDB) ۶۰
- ۱-۱۱-۳- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی ۶۰
- ۲-۱۱-۳- تعیین چقرمگی شکست ۶۱
- ۱۲-۳- روش PTS ۶۲
- ۱-۱۲-۳- آماده‌سازی نمونه ۶۳
- ۲-۱۲-۳- تعیین چقرمگی شکست ۶۳
- ۱۳-۳- جمع‌بندی ۶۵

فصل چهارم: ارزیابی نتایج روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست مود کششی و برشی مصالح سنگی با استفاده از نمونه‌های

شبه‌سنگی مصنوعی ۶۷

- ۱-۴- مقدمه ۶۸
- ۲-۴- نمونه‌های آزمایشگاهی و خواص مکانیکی آن‌ها ۶۹
- ۳-۴- بارگذاری نمونه‌ها ۷۰
- ۴-۴- نتایج مطالعات آزمایشگاهی مود کششی ۷۱
- ۱-۴-۴- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه نقطه‌ای (CB) ۷۱
- ۱-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۷۱
- ۲-۴-۴- نتایج ۷۴
- ۲-۴-۴- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (SECRBB) ۷۷
- ۱-۲-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۷۷
- ۲-۲-۴-۴- نتایج ۷۹
- ۳-۴-۴- نمونه‌های دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (SNDB) ۸۱
- ۱-۳-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۸۱
- ۲-۳-۴-۴- نتایج ۸۴
- ۴-۴-۴- نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (SNSCB) ۸۷
- ۱-۴-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۸۷
- ۲-۴-۴-۴- نتایج ۹۰
- ۵-۴-۴- نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (CSTBD) ۹۴
- ۱-۵-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۹۴
- ۲-۵-۴-۴- نتایج ۹۴
- ۶-۴-۴- نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (CCNBD) ۱۰۰
- ۱-۶-۴-۴- نحوه ساخت نمونه‌ها ۱۰۰

۱۰۳	نتایج ۲-۶-۴-۴
۱۰۸	نتایج مطالعات آزمایشگاهی مود برشی ۵-۴
۱۰۸	نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (SNSCB) ۱-۵-۴
۱۰۸	نحوه ساخت نمونه‌ها ۱-۱-۵-۴
۱۰۹	نتایج ۲-۱-۵-۴
۱۱۲	نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم (CSTBD) ۲-۵-۴
۱۱۲	نحوه ساخت نمونه‌ها ۱-۲-۵-۴
۱۱۴	نتایج ۲-۲-۵-۴
۱۱۶	نمونه‌های دیسکی با ترک شورن (CCNBD) ۳-۵-۴
۱۱۶	نحوه ساخت نمونه‌ها ۱-۳-۵-۴
۱۱۷	نتایج ۲-۳-۵-۴
۱۲۰	ارزیابی نتایج ۶-۴
۱۲۰	مود کششی ۱-۶-۴
۱۲۳	مود برشی ۲-۶-۴
۱۲۵	جمع بندی ۷-۴
۱۲۷	فصل پنجم: تحلیل عددی نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی ترک‌دار برای تفسیر نتایج آزمایشگاهی
۱۲۸	مقدمه ۱-۵
۱۲۸	نرم‌افزار ABAQUS ۲-۵
۱۲۹	مدول‌های ABAQUS ۱-۲-۵
۱۳۱	مکانیک شکست در ABAQUS ۲-۲-۵
۱۳۲	هندسه، شرایط مرزی و مدلسازی نمونه‌ها ۳-۵
۱۳۲	شرایط مرزی مدل نمونه‌ی دیسکی ترک‌دار ۱-۳-۵
۱۳۳	شرایط مرزی نمونه‌ی نیم‌دیسکی ترک‌دار ۲-۳-۵
۱۳۳	میدان تنش و جابجایی در نمونه‌ها ۴-۵
۱۳۳	میدان تنش و جابجایی در نمونه‌های دیسکی ۱-۴-۵
۱۴۰	میدان تنش و جابجایی در نمونه‌های نیم‌دیسکی ۲-۴-۵
۱۴۵	رفتار شکست نمونه‌ها ۵-۵
۱۴۶	رفتار شکست نمونه‌های دیسکی ۱-۵-۵
۱۵۰	رفتار شکست نمونه‌های نیم‌دیسکی ترک‌دار ۲-۵-۵
۱۵۲	جمع بندی ۶-۵

۱۵۴	..... فصل ششم: نتایج پایان نامه و پیشنهادات
۱۵۵	..... ۱-۶- نتایج
۱۵۷	..... ۲-۶- پیشنهادات
۱۵۸	..... منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

۸	شکل ۲-۱- سه مود اصلی انتشار ترک
۹	شکل ۲-۲- شرایط تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای در صفحات تحت بارگذاری کششی دو محوری
۱۱	شکل ۲-۳- ترک در یک صفحه به ابعاد بینهایت تحت بار کششی دو محوری یکنواخت
۱۲	شکل ۲-۴- تنش ارتجاعی σ_y در نوک ترک
۱۵	شکل ۲-۵- مود کششی خالص
۱۶	شکل ۲-۶- مود برشی خالص
۱۷	شکل ۲-۷- زون ناحیه شکست
۱۸	شکل ۲-۸- زون ناحیه شکست در سنگ
۲۴	شکل ۲-۹- رشد بینهایت کوچک با زاویه θ نسبت به ترک اصلی
۳۱	شکل ۳-۱- سطح بارگذاری و هندسه‌ی نمونه‌ی SR
۳۲	شکل ۳-۲- تصویر شماتیک و مشخصات نمونه‌ی SR
۳۲	شکل ۳-۳- هندسه، مشخصات و تنظیمات بارگذاری نمونه‌ی SR
۳۴	شکل ۳-۴- مشخصات مربوط به تعیین ضریب تصحیح بر اساس منحنی بار-جابجایی باز شدگی دهانه‌ی ترک
۳۵	شکل ۳-۵- هندسه، مشخصات و تنظیمات نمونه‌ی CB
۳۸	شکل ۳-۶- هندسه، مشخصات و تنظیمات نمونه‌ی SECRBB
۳۹	شکل ۳-۷- نمای شماتیک از هندسه و تنظیمات روش CTSBD
۳۹	شکل ۳-۸- نمونه‌های SNBD
۴۰	شکل ۳-۹- بارگذاری در نمونه‌ی دیسک برزلی ترک‌دار
۴۳	شکل ۳-۱۰- ضرایب بدون بعد شدت تنش مود I برای نمونه‌ی CSTBD
۴۵	شکل ۳-۱۱- هندسه، مشخصات و تنظیمات روش CCNBD
۴۶	شکل ۳-۱۲- (a) نمای شماتیک از دیسک برزلی ترک‌دار تحت بارگذاری فشاری، (b) مقطع عرضی از نمونه‌ی CSTBD و (c) مقطع عرضی نمونه‌ی CCNBD
۴۷	شکل ۳-۱۳- مراحل ایجاد شکاف شورن در نمونه‌ی CCNBD
۴۸	شکل ۳-۱۴- محدوده‌ی مجاز هندسه نمونه در روش CCNBD
۵۲	شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از منحنی شکست در روش BDT
۵۳	شکل ۳-۱۶- (a) نمونه‌ی FBD، هندسه، تنظیمات و مشخصات نمونه (b) مقادیر SIF (c) منالی از منحنی بار-جابجایی در این روش
۵۴	شکل ۳-۱۷- هندسه و تنظیمات روش SNSCB
۵۵	شکل ۳-۱۸- آماده سازی نمونه‌ی SNSCB
۵۵	شکل ۳-۱۹- تنظیمات بارگذاری نمونه‌ی SNSCB
۵۷	شکل ۳-۲۰- ضرایب بدون بعد شدت تنش متناظر با حالت مود I و مود II خالص برای نسبت‌های مختلف a/R و S/R
۵۸	شکل ۳-۲۱- زاویه قرارگیری ترک متناظر با حالت مود II خالص برای نسبت‌های مختلف a/R و S/R

- شکل ۳-۲۲- نمونه‌ی نیم دیسکی با ترک شورن ۵۹
- شکل ۳-۲۳- نحوه‌ی تعیین حداقل ضریب شدت تنش نرمالایز شده‌ی مود I در نمونه‌ی CNSCB ۶۰
- شکل ۳-۲۴- هندسه‌ی پیشنهادی نمونه SNDB و نحوه‌ی تنظیمات بارگذاری ۶۱
- شکل ۳-۲۵- مقادیر مختلف ضریب شدت تنش بدون بعد نمونه‌ی SNDB به ازای نسبت‌های مختلف (a/t) و (S/R) ۶۲
- شکل ۳-۲۶- هندسه نمونه و نحوه بارگذاری برای PTS-test (W ارتفاع نمونه، D قطر نمونه، ID قطر استوانه داخلی، a عمق ترک بالایی، b عمق ترک پایینی IP طول بخش بگر سنگ، t عرض ترک و p فشار جانبی) ۶۴
- شکل ۳-۲۷- نمای شماتیک از نوک ترک قبل و بعد از تغییر شکل در PTS-test ۶۵
- شکل ۴-۱- خلاصه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش ۶۸
- شکل ۴-۲- تصویر یکی از دستگاه‌های اون استفاده شده برای خشک کردن نمونه‌ها ۶۹
- شکل ۴-۳- دستگاه بارگذاری مورد استفاده از نوع INSTRON 8802 ۷۰
- شکل ۴-۴- قالب‌های فلزی استفاده برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۷۱
- شکل ۴-۵- تیغه‌های فلزی آماده شده برای ایجاد ترک شورن در نمونه‌های روش CB ۷۲
- شکل ۴-۶- نمای از بالا از نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در قالب‌های فلزی برای ایجاد ترک شورن در نمونه‌های روش CB ۷۳
- شکل ۴-۷- تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای روش CB ۷۳
- شکل ۴-۸- تعدادی از نمونه‌های روش CB پس از بارگذاری ۷۴
- شکل ۴-۹- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۷۶
- شکل ۴-۱۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۷۶
- شکل ۴-۱۱- نمای جانبی و نما از بالای نحوه‌ی قرارگیری تیغه در قالب فلزی برای ایجاد شکاف مستقیم ۷۷
- شکل ۴-۱۲- تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای روش SECRBB ۷۸
- شکل ۴-۱۳- تعدادی از نمونه‌های روش SECRBB پس از بارگذاری ۷۸
- شکل ۴-۱۴- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SECRBB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۸۰
- شکل ۴-۱۵- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SECRBB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۸۱
- شکل ۴-۱۶- یکی از قالب‌های فلزی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های دیسکی سالم ۸۱
- شکل ۴-۱۷- تعدادی از نمونه‌های ترک‌دار شده در روش SNDB ۸۳
- شکل ۴-۱۸- نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های روش SNDB ۸۴
- شکل ۴-۱۹- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNDB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۸۶
- شکل ۴-۲۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNDB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۸۷
- شکل ۴-۲۱- قالب‌های فلزی و تیغه‌های تقسیم‌کننده‌ی آن‌ها برای ساخت نمونه‌های نیم‌دیسکی سالم ۸۸
- شکل ۴-۲۲- تعدادی از نمونه‌های نیم‌دیسکی الف (نمونه‌های سالم ب) نمونه‌ها پس از ترک‌دار شدن ۸۹
- شکل ۴-۲۳- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۹۱
- شکل ۴-۲۴- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A) ۹۲
- شکل ۴-۲۵- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B) ۹۳
- شکل ۴-۲۶- ساخت نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم الف) قالب‌های فلزی مورد استفاده و نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در داخل قالب ب) نمای قالب و تیغه‌فلزی پس از ریختن ترکیب ج) نمونه‌های آماده شده ۹۵
- شکل ۴-۲۷- الف) بارگذاری نمونه‌های دیسکی در شرایط مود کششی ب) نمونه‌ها پس از بارگذاری ۹۶
- شکل ۴-۲۸- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها ۹۷
- شکل ۴-۲۹- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A) ۹۸
- شکل ۴-۳۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B) ۱۰۰

- شکل ۴-۳۱- ساخت نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی الف) تیغه‌های دو تکه ب) نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در داخل قالب ج و د) نمایی از ترک‌های شورن ایجاد شده در نمونه‌ها..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۲- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۳- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A)..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۴- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B)..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۵- الگوهای نیم دایره‌ای تهیه شده با مقیاس واقعی با نرم‌افزار اتوکد..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۶- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۷- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۸- الگوهای دایره‌ای تهیه شده با مقیاس واقعی با نرم‌افزار اتوکد..... ۱۱۳
- شکل ۴-۳۹- نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های روش CSTBD در حالت مود برشی خالص..... ۱۱۳
- شکل ۴-۴۰- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۱- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۲- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II..... ۱۱۹
- شکل ۴-۴۳- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها..... ۱۲۰
- شکل ۴-۴۴- مقایسه نتایج چقرمگی شکست مود I روش‌های مختلف..... ۱۲۰
- شکل ۴-۴۵- مقایسه نتایج چقرمگی شکست مود II روش‌های مختلف..... ۱۲۴
- شکل ۵-۱- مدل ساخته شده و شرایط مرزی برای نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری فشاری تک محوری..... ۱۳۲
- شکل ۵-۲- مدل ساخته شده و شرایط مرزی برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/2$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۳۴
- شکل ۵-۴- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/4$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۳۵
- شکل ۵-۵- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۳۵
- شکل ۵-۶- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/8$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۳۶
- شکل ۵-۷- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/2$ در حالت برش خالص ($\beta=28.72$)..... ۱۳۷
- شکل ۵-۸- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/4$ در حالت برش خالص ($\beta=25.27$)..... ۱۳۸
- شکل ۵-۹- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ در حالت برش خالص ($\beta=20.18$)..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۰- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/8$ در حالت برش خالص ($\beta=13.07$)..... ۱۴۰
- شکل ۵-۱۱- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/3$ و $(S/D=0/4)$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۴۲
- شکل ۵-۱۲- شکل ۵-۱۱- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/4$ و $(S/D=0/4)$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)..... ۱۴۲

فهرست جدول‌ها

عنوان

صفحه

جدول ۳-۱- ابعاد نمونه‌ی SR	۳۲
جدول ۳-۲- ابعاد نمونه‌ی استاندارد برای تست CB	۳۵
جدول ۳-۳- پنج مقدار اولیه‌ی ثوابت عددی T_i, S_i	۴۲
جدول ۳-۴- پنج مقدار اولیه‌ی ثوابت زاویه‌ای $A_i(\beta), B_i(\beta)$	۴۲
جدول ۳-۵- مقادیر زاویه‌ای راستای قرارگیری ترک نسبت به محور بارگذاری در شرایط مود II خالص	۴۴
جدول ۳-۶- ابعاد هندسی استاندارد نمونه‌ی CCNBD	۴۵
جدول ۳-۷- مقادیر ν و u برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD	۴۹
جدول ۳-۸- مقادیر u برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD	۴۹
جدول ۳-۹- مقادیر ν برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD	۵۰
جدول ۳-۱۰- پارامترهای هندسی پیشنهادی نمونه‌ی SNDB	۶۱
جدول ۴-۱- خواص مکانیکی مصالح گچی استفاده شده در ساخت نمونه‌ها	۷۰
جدول ۴-۲- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های استوانه‌ای با ترک شورن	۷۵
جدول ۴-۳- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های استوانه‌ای با ترک مستقیم	۷۹
جدول ۴-۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم	۸۵
جدول ۴-۵- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم (حالت A)	۹۱
جدول ۴-۶- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم (حالت B)	۹۲
جدول ۴-۷- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (حالت A)	۹۷
جدول ۴-۸- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (حالت B)	۹۹
جدول ۴-۹- پارامترهای هندسی نمونه‌های ساخته شده‌ی روش دیسکی با ترک شورن مرکزی	۱۰۲
جدول ۴-۱۰- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (حالت A)	۱۰۴
جدول ۴-۱۱- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (حالت B)	۱۰۶
جدول ۴-۱۲- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش SNSCB	۱۰۸
جدول ۴-۱۳- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم	۱۱۰
جدول ۴-۱۴- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش CSTBD	۱۱۲
جدول ۴-۱۵- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی	۱۱۵
جدول ۴-۱۶- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش CCNBD	۱۱۷
جدول ۴-۱۷- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی	۱۱۸
جدول ۴-۱۸- مقایسه نتایج در روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود I	۱۲۱
جدول ۴-۱۹- مقایسه نتایج در روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود II	۱۲۴

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- کلیات

مکانیک شکست سنگ^۱ علمی است که به تشریح چگونگی آغاز و رشد ترک در اثر بارهای اعمال شده در مواد سنگی و شبه‌سنگی می‌پردازد. موادی مانند سنگ، سرامیک، شیشه و حتی بتن رفتاری شکننده دارند. آغاز و گسترش ترک در اینگونه مواد شکننده، بوسیله‌ی میدان تنش در اطراف نوک ترک و با استفاده از فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی تعیین می‌شود. این فرضیات تا زمانیکه تغییر شکل‌های پلاستیک در اطراف نوک ترک قابل چشم‌پوشی باشند، معتبر هستند.

مهمترین و اساسی‌ترین مشخصه‌ی مواد در مکانیک شکست، چقرمگی شکست^۲ است که بصورت مقاومت ماده در مقابل آغاز و رشد ترک تعریف می‌شود و با استفاده از آن می‌توان زمان، مکان و چرایی وقوع گسیختگی را تشریح کرد. چقرمگی شکست ارتباط مستقیمی با ضریب شدت تنش (K) دارد. ضریب شدت تنش نیز میدان تنش در نزدیکی نوک ترک جسم بر اثر بارهای اعمال شده‌ی دوردست را توصیف می‌کند. همچنین ضریب شدت تنش را می‌توان با مقدار انرژی لازم برای ایجاد یک سطح جدید در ماده ترک‌دار که تحت میدان تنش خارجی قرار گرفته است، مرتبط دانست.

¹ Rock fracture mechanics

² Fracture toughness

بسته به درجه تیزی نوک ترک و طول آن، مقدار تنش متمرکز شده در نوک ترک بسیار بیشتر از تنش اعمال شده است. زمانی که این مقدار تنش در اطراف نوک ترک باعث شود که ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی خود که ضریب شدت تنش بحرانی یا چقرمگی شکست نامیده می‌شود برسد، فرض می‌شود که رشد ترک و شکست آغاز می‌شود. تا زمانی که مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک از مقدار بحرانی آن بیشتر باشد، رشد ترک تداوم می‌یابد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها از ویژگی‌های متداول توده‌های سنگی می‌باشند و سنگ یکی از موادی است که سازه‌های زیادی درون آن مثل تونل‌ها و یا بر روی آن مثل سدها و ساختمان‌ها ساخته می‌شود. پس تنش‌های زیادی بر سنگ‌ها وارد می‌شود که می‌تواند باعث شکست سنگ شود. بسته به نوع بارگذاری و هندسه شکستگی‌های سنگ، یک شکستگی به صورت یکی از سه مود اصلی و یا ترکیبی از آنها گسترش می‌یابد. مود اول، مود بازشدگی یا کششی است که سطوح ترک یا شکستگی در راستای عمود بر صفحه ترک جدا می‌شوند. مود دوم، مود لغزشی یا برشی است که سطوح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می‌لغزند. مود سوم، مود پارگی است که سطوح ترک در جهتی به موازات خط پروفیل ترک می‌لغزند. با توسعه سریع فعالیت‌های مهندسی سنگ نظیر حفاری و ایجاد فضاهای زیرزمینی، انفجار و برش سنگ و... اهمیت استفاده از اصول، روش‌ها و تکنیک‌های مکانیک شکست سنگ بیشتر شده است. در این میان چقرمگی شکست سنگ پارامتر کلیدی مکانیک شکست سنگ برای پیش‌بینی شروع و گسترش ترک‌ها در سنگ است که نقش مهمی را در طراحی ابزار برش سنگ، انفجار سنگ، تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، طراحی شکافت هیدرولیکی مخازن هیدروکربوری، تحلیل پایداری چاه‌های نفت و گاز و بسیاری دیگر از کاربردهای مهندسی سنگ ایفا می‌کند.

در مکانیک شکست سنگ برای مطالعه‌ی رشد یا عدم رشد ترک، نوع مود انتشار ترک و جهت انتشار ترک از معیارهای مختلفی نظیر معیارهای مبتنی بر ضرایب تمرکز تنش استفاده می‌شود. در این معیارها در صورتیکه ضریب تمرکز تنش در یک مود خاص از ضریب تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست مود

موردنظر تجاوز کند، شکستگی در آن مود گسترش می‌یابد. بنابراین برای استفاده از معیارهای مذکور و تعیین شرایط رشد ترک (رشد یا عدم رشد، مود انتشار و جهت انتشار) اطلاع از میزان چقرمگی شکست مودهای مختلف محیط ضروری می‌باشد.

آزمایش‌های اندازه‌گیری چقرمگی سنگ با سایر آزمایش‌های موجود در مکانیک سنگ تفاوت عمده‌ای دارد چرا که نمونه‌های آزمایش باید حاوی ترکی با مشخصات هندسی مشخص باشند تا بتوان اثرات ترک را تحت بارگذاری‌های مختلف بررسی نمود. اما در انتخاب روش خاصی برای تعیین چقرمگی شکست سنگ، عوامل زیادی نظیر مقاومت سنگ مورد آزمایش، تجهیزات آزمایشگاهی در دسترس، سادگی یا پیچیدگی آماده سازی نمونه و... تاثیرگذارند.

بنابراین برای اینکه نتایج مطالعات مکانیک شکست سنگ از دقت کافی برخوردار باشد لازم است دقت روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست سنگ را با حذف تاثیر پارامترهای محیط سنگی (ریز ترک‌ها و دانه‌بندی) مورد مطالعه قرار گیرد.

۱-۳- اهداف تحقیق

بدلیل محدودیت در تهیه نمونه‌های سنگی با شکل هندسی دلخواه، روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین چقرمگی شکست مود کششی و مود برشی سنگ با استفاده از نمونه‌های دیسکی، نیم‌دیسکی و استوانه‌ای ارائه شده است. در این پژوهش میزان تاثیر دو پارامتر مهم هندسه نمونه‌ها یعنی قطر نمونه و طول ترک آن بر روی نتایج روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین چقرمگی مود کششی و مود برشی سنگ با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. بدین منظور برای اجتناب از اثرات منفی و خطاهای ناشی از ریزترک‌های سنگ و دانه‌بندی آن، نمونه‌هایی شبه‌سنگی از جنس گچ که حتی‌الامکان همگن و ایزوتروپ بوده و رفتار الاستیک خطی داشته باشند با اشکال هندسی مختلف تهیه شده و چقرمگی شکست آن‌ها با روش‌های مختلف ارائه شده تعیین می‌شود. همچنین برای ارزیابی توزیع تنش و جابجایی‌ها در نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی ترک‌دار با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌های عددی از نمونه‌ها ساخته شده و نتایج تحلیل خواهند شد.

سوال های اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. از بین روش های مختلف ارائه شده، کدامیک از دقت بیشتری برای تعیین چقرمگی شکست مود کششی برخوردار است؟
۲. از بین روش های مختلف ارائه شده، کدامیک از دقت بیشتری برای تعیین چقرمگی شکست مود برشی برخوردار است؟
۳. اثر مقیاس (نسبت نصف طول ترک به شعاع دیسک) چه تاثیری بر نتایج دارد؟
۴. اثر مقیاس بر کدامیک از روش ها کمترین تاثیر را دارد؟

۱-۴- ساختار پایان نامه

این پژوهش در شش فصل تدوین شده است که با معرفی مختصری از مکانیک شکست سنگ، بیان مسئله و ضرورت انجام این تحقیق و همچنین اهداف آن آغاز می شود. در فصل دوم مبانی، اصول و مفاهیم مکانیک شکست و نیز ویژگی های خاص مکانیک شکست سنگ و فرضیات آن ارائه شده است. پیشینه، نحوه آماده سازی و روابط ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست در متداول ترین روش های اندازه گیری چقرمگی شکست سنگ ها در حالت کششی و برشی و از جمله روش های پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ، در فصل سوم بطور کامل مورد بحث قرار گرفته اند. فصل چهارم نیز با ارائه نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق شامل نحوه ساخت، آماده سازی، بارگذاری و نتایج آزمایش نمونه ها در شش روش مختلف اندازه گیری چقرمگی شکست مود کششی و سه روش مختلف اندازه گیری چقرمگی شکست مود برشی آغاز شده و در ادامه تحلیل نتایج و میزان تاثیر پارامترهایی مانند طول ترک و قطر نمونه بر روی نتایج هر روش ارائه شده است. در فصل پنجم نیز ضمن معرفی مختصر نرم افزار ABAQUS، نحوه مدلسازی، توزیع تنش و مکانیزم شکست نمونه های دیسکی و نیم دیسکی در این نرم افزار تحلیل و ارزیابی شده است. در نهایت در فصل ششم نتایج بدست آمده در این پژوهش مورد بحث قرار گرفته و پیشنهاداتی نیز برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم:

مبانی مکانیک شکت و مکانیک شکت سکت

۲-۱- مقدمه

در زمان‌های دور طراحی‌های مهندسی تنها بر اساس تئوری الاستیسیته و مفهوم مقاومت مواد انجام می‌شد و لذا وجود نقایص ساختاری و ریزترک‌ها و امکان رشد یک ترک منفرد را در محاسبات خود وارد نمی‌کردند. اما پس از بروز حوادثی مانند نصف شدن یک تانکر نفتکش و جدایی بخشی از سقف یک هواپیما، صحت و اطمینان این طراحی‌ها با تردید مواجه شد. لذا در دهه دوم قرن بیستم علم جدیدی بنام مکانیک شکست پایه‌گذاری شد که تجزیه و تحلیل سازه‌ها را بر مبنای وجود ترک در آن‌ها بررسی می‌کند (فرهی، ۱۳۸۷).

در مقاومت مصالح پارامتر تنش معرف پایداری و تحمل یک عضو در مقابل بارهای وارده می‌باشد. در این علم معیارهای طراحی بر اساس استحکام کششی، استحکام تسلیم و تنش کمانش استوار است. در حال حاضر این معیارها برای بسیاری از سازه‌ها مناسب می‌باشند. اما اگر ترک‌هایی در سازه وجود داشته باشد این معیارها کافی نیستند. از آنجا که در مکانیک شکست همواره فرض بر این است که هر قطعه‌ای دارای یکسری عیوب و ترک‌های کوچک می‌باشد، پارامتر تنش به تنهایی برای بیان تحمل یک عضو کافی نیست. زیرا چنانچه دو عضو هم جنس و با ابعاد کاملاً مساوی و تحت بارهای خارجی مساوی در نظر بگیریم بطوریکه یکی دارای ترک کوچکتر و دیگری حاوی ترک بزرگتری باشد، بدیهی است که عضو دوم خیلی زودتر از عضو اول می‌شکند. پس باید پارامتر دیگری را در نظر گرفت که معرف طول ترک هم باشد. این پارامتر ضریب تمرکز تنش نام دارد.

مکانیک شکست^۱ به بررسی رشد ترک و مکانیزم شکست می‌پردازد. در واقع مکانیک شکست شرحی کمی بر فرایند شکست ماده توسط رشد ترک می‌باشد. حوزه مکانیک شکست دربرگیرنده‌ی روابط میان ماکزیمم تنش مجاز، اندازه و محل ترک، سرعت رشد ترک ناشی از اثرات محیطی، امکان جلوگیری از حرکت ترک‌ها و ... می‌باشد.

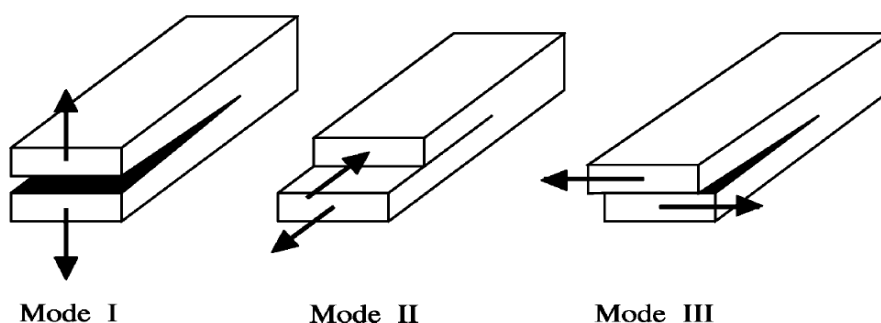
حوزه مکانیک شکست را می‌توان به دو بخش زیر تقسیم کرد:

علم مواد : روند شکست را در مقیاس اتم‌ها و نابعائی‌ها بررسی می‌کند.

مکانیک کاربردی : میدان تنش در نوک ترک، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در مجاورت نوک ترک را بررسی می‌کند (جاویدراد، ۱۳۸۳).

۲-۲- حالات مختلف رشد ترک

همانطور که در شکل (۱-۲) مشهود است یک ترک می‌تواند به سه طریق تحت تنش واقع شده و گسترش یابد؛ مود I یا مود بازشدگی متداول‌ترین فرم گسیختگی در اثر رشد ترک است. در این مود سطوح ترک نسبت به صفحات بطور عمود برهم در جهت مخالف یکدیگر تغییر مکان می‌دهند. مود II یا مود برشی که دو سطح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می‌لغزند و مود III یا مود پارگی که لغزش دو صفحه ترک در جهتی به موازات خط پروفیل ترک اتفاق می‌افتد.

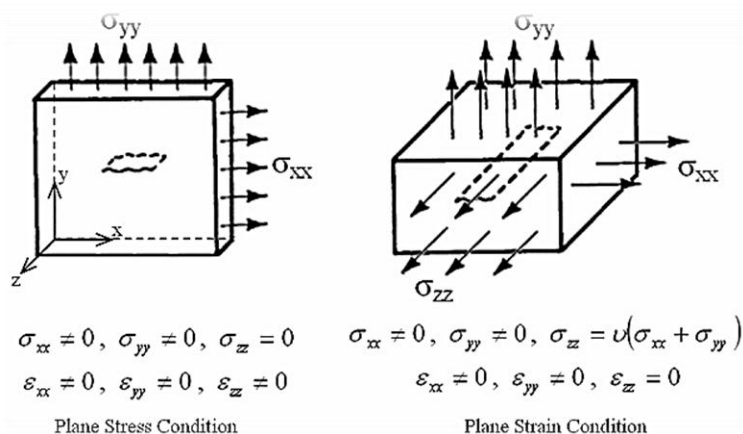


شکل ۱-۲- سه مود اصلی انتشار ترک

¹ fracture mechanics

در مکانیک شکست الاستیک خطی، اغلب روابط با در نظر گرفتن این مودها و تحت شرایط تنش صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای (شکل ۲-۲) استنتاج می‌شوند (فرهی، ۱۳۸۷).

- شرایط تنش صفحه‌ای: در یک صفحه‌ی نازک، تنش در جهت ضخامت (σ_{zz}) بدلیل نازک بودن ضخامت نمی‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر کند و برابر صفر است ($\sigma_{zz}=0$) این حالت را شرایط تنش صفحه‌ای می‌نامند.
- شرایط کرنش صفحه‌ای: در یک جسم ضخیم، ماده در جهت ضخامت محبوس بوده و کرنش در آن جهت برابر صفر است ($\epsilon_{zz}=0$). این حالت را نیز شرایط کرنش صفحه‌ای می‌نامند.



شکل ۲-۲- شرایط تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای در صفحات تحت بارگذاری کششی دو محوری (Alkilicgil, 2006)

۲-۳- مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ (LEFM)

مسائل رشد ترک در سنگ‌ها با استفاده از تئوری مکانیک شکست و بویژه مکانیک شکست الاستیک خطی بررسی می‌شود. مکانیک شکست الاستیک خطی اساساً به تعیین میزان تنش تکین در نوک ترک و در یک جسم الاستیک مربوط می‌شود. این مقدار ضریب شدت تنش نامیده می‌شود و معمولاً با K نشان داده می‌شود. فرضیات لازم برای بکارگیری LEFM عبارتند از:

- ماده الاستیک خطی باشد.

^۱ Linear Elastic Fracture Mechanics

- ماده همگن و همسانگرد باشد.
- کرنش‌های کوچک اتفاق بیفتند.

همسانگردی و الاستیک خطی بدین معناست که خصوصیات مواد مستقل از مسیر بوده و این مواد تنها دو ثابت الاستیک مستقل دارند که عبارتند از: مدول یانگ E و نسبت پواسون ν .

مکانیک شکست الاستیک خطی تنها تا وقتی تغییر شکل پلاستیک کوچکتر از اندازه ترک باشد، معتبر است. اگر قبل از رشد ترک، نواحی بزرگ تغییر شکل پلاستیک گسترش یابند، بایستی بجای آن از مکانیک شکست الاستو پلاستیک استفاده کرد.

با توجه به تئوری الاستیسیته خطی، مطابق با رابطه‌ی (۱-۲) میدان تنش در نزدیکی نوک ترک به موقعیت، شرایط بارگذاری و هندسه نمونه بستگی دارد:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{crack\ tip} &\equiv \sigma_{ij}^{crack\ tip}(Location, Loading, Geometry) \\ &\equiv \sigma_{ij}^{crack\ tip}(r, \theta, K) \end{aligned} \quad (1-2)$$

که در آن:

Location: مختصات قطبی (r, θ) و

Loading & Geometry: فاکتور شدت تنش K می‌باشند (Alkilicgil, 2006).

۲-۴- میدان تنش و تغییر مکان در نوک ترک

اولین گام در بررسی یک ترک، تحلیل تنش قطعه ترک‌دار است که توسط آن بررسی رشد ترک و در نتیجه حساسیت قطعه به ترک امکان‌پذیر می‌شود. برای حل مسائل ترک و تعیین میدان تنش و تغییر مکان در مجاورت نوک ترک، دو راه‌حل تحلیلی کلاسیک توسط وسترگارد^۱ (۱۹۳۹) و ویلیامز^۲ (۱۹۵۲) ارائه شده است. راه‌حل وسترگارد آسان بوده و عموماً این راه‌حل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Saouma, 2000). اگر مطابق شکل (۲-۳) یک ترک نوع اول به طول $2a$ در یک صفحه با ابعاد بی‌نهایت در حالت تنش مسطح در

1 - Westergaard

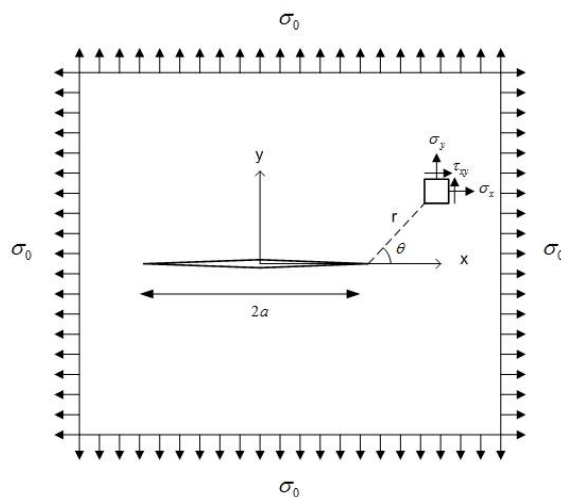
2 - Williams

نظر گرفته شود و همچنین ماده تشکیل دهنده این جسم نیز همگن و همسانگرد فرض گردد، میدان تنش ارتجاعی در نوک ترک بر مبنای راه حل وسترگارد بصورت بسط تیلور زیر خواهد بود (قاجار، ۱۳۸۱):

$$\sigma_{ij} = c_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{-1/2} f_{1ij}(\theta) + c_2 \left(\frac{r}{a}\right)^0 f_{2ij}(\theta) + c_3 \left(\frac{r}{a}\right)^{1/2} f_{3ij}(\theta) + \dots \quad (2-2)$$

یا:

$$\sigma_{ij} = \frac{c_1}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n r^{(n-1)/2} f_{nij}(\theta) \quad (3-2)$$



شکل ۲-۳- ترک در یک صفحه به ابعاد بینهایت تحت بار کششی دو محوری یکنواخت (قاجار، ۱۳۸۱)

در مجاورت نوک ترک ($r \ll a$) می توان از جملات مرتبه بالا صرف نظر کرد و معادلات را بصورت زیر نوشت:

$$\sigma_{ij} = \frac{c_1}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \quad (4-2)$$

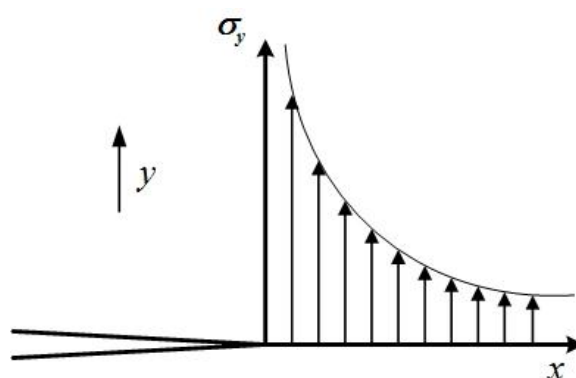
که در آن (r, θ) مختصات قطبی المان بوده و c_1 بصورت زیر تعریف می شود:

$$c_1 = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2}} \quad (5-2)$$

بنابراین معادلات تنش و جابجایی برای ترک نوع اول بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (۶-۲)$$

همانطور که انتظار می‌رود در حالت ارتجاعی، تنش‌ها متناسب با تنش خارجی σ_0 بوده و با ریشه دوم اندازه ترک و با عکس ریشه دوم r تغییر می‌کنند. وقتی که r به سمت صفر میل می‌کند مقادیر تنش از فرمول‌های فوق بسمت بی‌نهایت میل می‌کنند. به عبارت دیگر در نوک ترک تابع تنش تکین می‌باشد که باید به طریقی رفع شود. توزیع تنش σ_y بر حسب r برای $\theta = 0$ در شکل (۴-۲) رسم شده است. برای مقادیر زیاد r تنش σ_y بسمت صفر میل می‌کند در صورتیکه باید بسمت σ میل کند. علت این است که این معادلات فقط برای یک ناحیه مشخص اطراف نوک ترک معتبر هستند. هر یک از معادلات (۶-۲) جمله اول یک سری می‌باشند. در مجاورت نوک ترک جمله اول سری توزیع تنش را با تقریب خوبی نشان می‌دهد. زیرا جملات بعدی (جمله دوم به بعد) در مقایسه با جمله اول کوچک می‌باشند. بنابراین با افزایش r مقدار جمله اول سری کوچک شده و نمی‌توان از جملات بعدی صرف‌نظر کرد. با در نظر گرفتن جملات بعدی مقدار σ_y صفر نشده بلکه برابر σ خواهد شد.



شکل ۴-۲- تنش ارتجاعی σ_y در نوک ترک (فاجار، ۱۳۸۱)

۲-۵- ضریب تمرکز تنش

مفهوم ضریب تمرکز تنش را اروین^۱ (۱۹۵۷) معرفی کرد. با استفاده از این کمیت توزیع تنش در نوک ترک قابل بیان است. ضریب تمرکز تنش به دو عامل تنش وارد بر جسم و طول ترک بستگی دارد. این ضریب برای ترک نوع اول با K_I نشان داده می‌شود. بنابراین معادلات (۲-۶) بر حسب این کمیت به صورت زیر خواهند بود (جاویدراد، ۱۳۸۳):

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (7-2)$$

که در آن $K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a}$ است. میدان تغییر مکان نیز برای ترک مود I با معادلات زیر بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned}u &= \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ v &= \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)\end{aligned}\quad (8-2)$$

با این توصیف روابط تنش و تغییر مکان در ترک‌های مود II نیز به صورت زیر خواهد بود:

مود II :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \\ u &= \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ v &= \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)\end{aligned}\quad (9-2)$$

¹ Irwin

با استفاده از روابط تبدیل، معادلات تنش برای مدهای I و II در مختصات قطبی به صورت زیر خواهند بود (جاویدراد، ۱۳۸۳):

مود I :

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2}\end{aligned}\quad (10-2)$$

مود II :

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\frac{5}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\frac{3}{4} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right)\end{aligned}\quad (11-2)$$

در مکانیک شکست الاستیک خطی، وقتی بارگذاری اعمال شده ترکیبی از مودها را تولید نماید، با ترکیب خطی مودها می‌توان میدان تنش و تغییر مکان را برای آن مود ترکیبی محاسبه نمود (جاویدراد، ۱۳۸۳).

۲-۶- چقرمگی شکست

چقرمگی شکست یا استحکام ماده در مقابل شکست به میزان توانایی ماده جهت تحمل بارهای وارده در حضور یک ترک اطلاق می‌گردد. برای موادی که رفتار ارتجاعی خطی دارند، این خاصیت معمولاً بر حسب کمیتی بنام مقدار بحرانی ضریب تمرکز تنش بیان می‌شود که در یک درجه حرارت معین تابعی از ضخامت قطعه ترک‌دار است (جاویدراد، ۱۳۸۳).

چقرمگی شکست بعنوان یک ویژگی ذاتی ماده، نقش اصلی و بحرانی را در آنالیز شکست مواد ایفا می‌کند و از نقطه نظر شکست، مبنای ارزیابی مقاومت مواد را فراهم می‌کند. این پارامتر با علامت K_{Ic} نشان داده می‌شود و بعد آن نیز:

$$Dim[K_c] = \frac{F}{L^2} \sqrt{L} = FL^{-\frac{3}{2}} = stress \cdot \sqrt{Length} = Pa \cdot \sqrt{m} \quad (12-2)$$

می‌باشد (Alkilicgil, 2010).

۲-۶-۱- چقرمگی شکست مود کششی (مود I)

مطابق شکل (۲-۵) برای یک صفحه به ضخامت واحد با یک ترک مرکزی بطول $2a$ که تحت بار کششی

یکنواخت قرار گرفته است، مقدار ضریب تمرکز تنش از رابطه $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ قابل محاسبه می‌باشد.

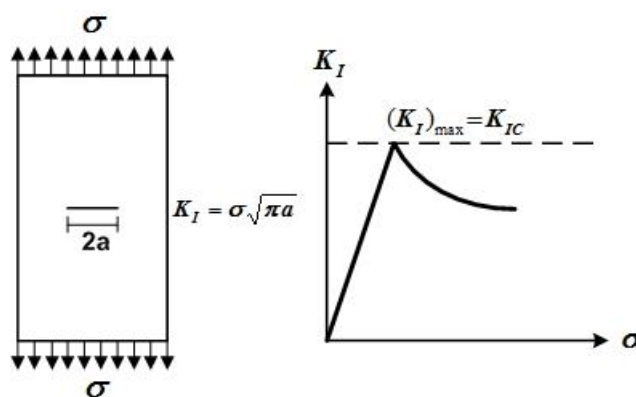
با افزایش تنش اعمالی، مقدار ضریب تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد. ولی از آنجایی که هر ماده دارای

تحمل محدودی است (همانند تنش تسلیم (σ_{ys})) که در واقع حد تحمل قطعه نرم در مقابل تنش وارده و یا

تنش گسیختگی که حد نهائی تحمل ماده ترد است)، منطقی است که حد تحملی برای ضریب تمرکز تنش

موجود باشد که بتوان آنرا از مشخصات ماده دانست. در حالت مود کششی مقدار حداکثر ضریب تمرکز تنش

(ضریب تمرکز تنش بحرانی) را چقرمگی شکست مود I نامیده و با نماد K_{IC} نشان می‌دهند.



شکل ۲-۵- مود کششی خالص (جاویدراد، ۱۳۸۳)

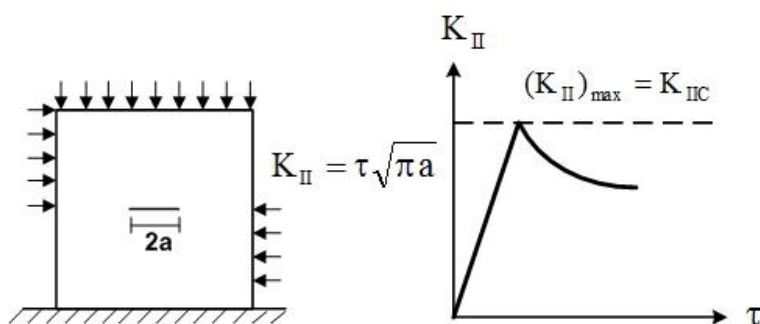
به همین ترتیب فاکتور تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست در مود II را با K_{IIC} نشان می‌دهند.

فاکتور تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست مواد مختلف با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری

می‌شود (جاویدراد، ۱۳۸۳).

۲-۶-۲- چقرمگی شکست مود برشی (مود II)

چنانچه مطابق شکل (۲-۶) ترک در یک جسم در حالت مود برشی خالص قرار بگیرد، ضریب تمرکز تنش از رابطه $K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$ قابل محاسبه است. با افزایش تنش برشی اعمالی بر جسم، ضریب تمرکز تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. حداکثر ضریب تمرکز تنش برشی که منجر به رشد ترک می‌شود، جز خواص مواد بوده و ضریب تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست مود برشی نامیده می‌شود (جاویدراد، ۱۳۸۳).



شکل ۲-۶- مود برشی خالص (جاویدراد، ۱۳۸۳)

۲-۶-۳- عوامل موثر بر چقرمگی شکست

چقرمگی شکست یکی از ویژگی‌های مکانیکی ماده است که ممکن است با تغییر در شرایط محیط و بارگذاری، تغییر کند. فاکتورهای زیادی همانند اندازه نمونه، همسانگردی، روش آزمایش، نرخ کرنش، ابعاد دانه‌ها، اندازه یا طول ترک و... بر مقدار چقرمگی شکست تاثیرگذارند. همچنین بطور جالب توجهی، چقرمگی شکست می‌تواند با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگ نظیر مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره، سایز دانه‌ها، طول تماس دانه‌ها و چگالی مرتبط شود (Whittaker et al., 1992). برخی از فاکتورهای مهم موثر بر چقرمگی شکست در زیر بحث می‌شوند.

۲-۶-۳-۱- اثر مقیاس

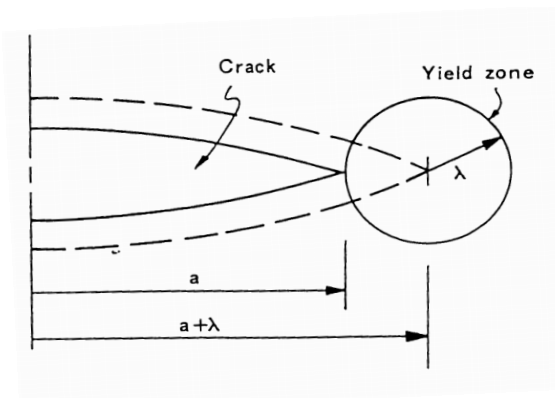
نمونه‌های سنگی که در آزمایشگاه بررسی می‌شوند عموماً همگن و بدون نقص هستند، در حالی‌که ناهمگنی‌های هندسی (یعنی درزه‌ها، گسل‌ها و...) و ساختاری از ویژگی‌های خاص سنگ‌ها در طبیعت هستند. لذا به نظر می‌رسد نتایج بدست آمده از نمونه‌های بدون نقص در آزمایشگاه نمی‌تواند معرف

توده‌سنگ‌های بزرگ باشد. برای مثال در سنگ‌های درزه‌دار، ممکن است رفتار شکست بیشتر توسط مشخصات درزه‌ها کنترل شود تا توده سنگ بین آن‌ها. در واقع، تجربیات ثابت کرده‌اند که با افزایش مقیاس نمونه‌های آزمایش، مقاومت اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد (Khan, 1998).

بنابراین به نظر می‌رسد چقرمگی شکست پوسته‌ی شکننده زمین کمتر از مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه است.

۲-۶-۳-۲- ناحیه‌ی فرآیند شکست (FPZ)

در آزمایشگاه، چقرمگی شکست سنگ‌هایی که بطور مصنوعی ترک‌دار شده‌اند و تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، اندازه‌گیری می‌شود. بارگذاری روی نمونه‌ها موجب تمرکز یافتن تنش در اطراف نوک ترک می‌شود. بر اثر تمرکز تنش زیاد ریزترک‌ها توسعه یافته و مواد سنگی در جلوی نوک ترک بطور موضعی تسلیم می‌شوند و منجر به شکل‌گیری ناحیه‌ای از ترک‌های ریز موسوم به زون فرآیند شکست می‌شوند. شکل این ناحیه تسلیم هنوز ناشناخته است و بصورت ساده شده دایره‌ای با شعاع λ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-۷). از آنجاییکه روابط موجود برای تعیین چقرمگی شکست سنگ با استفاده از فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی استنتاج شده‌اند، لذا برای بکارگیری آن‌ها و بررسی معتبری از چقرمگی شکست، در نظر گرفتن این ناحیه اهمیت می‌یابد.



شکل ۲-۷- زون ناحیه شکست (FPZ) (Khan, 1998)

¹ Fracture process zone

اشمیت^۱ در سال ۱۹۸۰ معیار حداکثر تنش نرمال را برای توصیف FPZ در سنگ پیشنهاد کرد (Khan, 1998). این معیار فرض می‌کند که FPZ زمانی تشکیل می‌شود که تنش اصلی حداکثر در اطراف نوک ترک به مقاومت کششی نهایی سنگ برسد. در شکل (۸-۲) FPZ سنگ نشان داده شده است. روابط حاکم برای این شکل نیز بصورت زیر است:

$$r(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_t} \right)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + \left| \sin \frac{\theta}{2} \right| \right)^2 \quad (13-2)$$

از رابطه (۱۴-۲) نیز می‌توان حداکثر گسترش FPZ (یعنی r_{mc}) را محاسبه کرد که در زاویه $\theta=60$ درجه رخ می‌دهد. در این حالت:

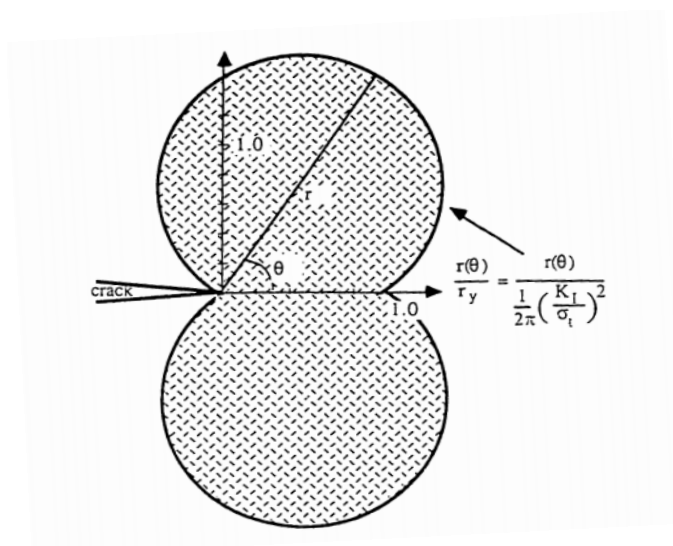
$$r_{mc} = \frac{27}{32\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (14-2)$$

که در آن:

r_{mc} : حداکثر اندازه‌ی FPZ (فاصله‌ی شعاعی از نوک ترک)،

K_{Ic} : ضریب شدت تنش بحرانی مود کششی خالص و

σ_t : مقاومت کششی سنگ می‌باشند.



شکل ۸-۲- زون ناحیه شکست در سنگ (Wittaker et al., 1992)

¹ Schmith

در آزمایش‌های مود کششی به‌ویژه در روش‌های مبتنی بر بارگذاری کششی مستقیم، نمونه‌ها حساسیت بیشتری به اندازه‌ی FPZ دارند. در آزمایش‌های مود ترکیبی I-II در اطراف نوک ترک نمونه، ترکیبی از تنش‌های نرمال و برشی ایجاد می‌شوند. برای نمونه‌های ترک‌دار دیسک برزلی با افزایش زاویه‌ی بین ترک و راستای بارگذاری، تنش‌های نرمال در محدوده‌ای از تنش‌های کششی تا فشاری تغییر می‌کنند و بدلیل همین ماهیت فشاری تنش‌ها، نوک ترک تمایل به بسته شدن دارد. در نتیجه تشکیل ریزترک‌ها و بدنبال آن FPZ احتمالاً گسترش محدودی دارند. در آزمایش‌های همراه با اعمال فشار محصور کننده نیز حالت مشابهی بوجود می‌آید. زیرا فشار محصور کننده در نوک ترک تنش‌های فشاری القا می‌کند و لذا سعی در جلوگیری از توسعه‌ی ریز ترک‌ها در ناحیه‌ی اطراف ترک دارد (Khan, 1998).

۲-۶-۳-۳-اندازه نمونه

اندازه نمونه مورد نیاز برای اطمینان از اعتبار و صحت مقادیر چقرمگی شکست مواد یکی از موضوعات مورد مناقشه در میان محققین بوده است. مبنای معیار اندازه لازم برای مواد سنگی، معیار ارائه شده توسط اشمیت (۱۹۷۹) است که برای آزمایش فلزات می‌باشد. این معیار به شکل زیر می‌باشد:

$$\left. \begin{array}{l} a \\ D - 2a \end{array} \right\} \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2$$

And (۱۵-۲)

$$B \geq r_{mc} = 0.269 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2$$

که در آن:

a : طول ترک (برای دیسک برزلی 2a)،

D : قطر نمونه،

B : ضخامت نمونه،

r_{mc} : FPZ بحرانی (فاصله‌ی شعاعی از نوک ترک) و

K_{Ic} : ضریب شدت تنش بحرانی مود کششی خالص می‌باشند.

تحقیقات نشان می‌دهند که معیار فوق از موردی به مورد دیگر متفاوت بوده و بطور مطلق برای همه‌ی سنگ‌ها و همه‌ی آزمایش‌ها معتبر نیست (Lim et al., 1994-c).

برخی از محققین ثابت کرده‌اند که ضریب $2/5$ در معادله‌ی فوق قدری محافظه‌کارانه بوده و برای اغلب سنگ‌ها مقدار کمتر از $2/5$ گزارش کرده‌اند. برای مثال ویتاکر^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۲ پس از مطالعات تعیین حداقل طول ترک، پیشنهاد کردند که فاکتور ضریب معادله فوق می‌تواند بین $1/2$ تا 2 باشد. همچنین لیم^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۴ تحقیقات جدیدی بر روی حداقل طول ترک لازم برای معتبر بودن نتایج آزمایشگاهی چقرمگی شکست انجام دادند که با دقت در نتایج آن مشخص می‌شود که حداقل طول ترک بسیار متغیر بوده و به نوع مواد و همچنین روش آزمایش بستگی دارد (Lim et al., 1994-b). برخلاف اثر طول ترک، به نظر میرسد ضخامت نمونه حساسیت کمتری دارد (Wittaker et al., 1992).

در عمل برای تعیین حداقل اندازه مورد نیاز (طول ترک یا ضخامت) برای آزمایش چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه‌ای، می‌توان با ثابت نگه‌داشتن سایر ابعاد و تغییر طول یا ضخامت چقرمگی شکست ظاهری را اندازه‌گیری کرد سپس نمودار مقادیر چقرمگی شکست را در مقابل مقادیر متغیر طول ترک یا ضخامت ترسیم کرد. در این حالت محدوده‌ای که مقادیر چقرمگی شکست مستقل از مقادیر متغیر است، نشان‌دهنده‌ی حداقل اندازه بعد مورد نظر می‌باشد (Wittaker et al., 1992).

۲-۶-۳-۴- فشار محصورکننده

مطالعه رفتار چقرمگی سنگ سازندهای سنگی در اعماق زیاد، مستلزم انجام مطالعات آزمایشگاهی در شرایط شبیه‌سازی شده‌ی برجا مانند فشار محصورکننده است. تحقیقات متعدد انجام شده نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه چقرمگی شکست مود کششی با افزایش فشار محصورکننده است. هرچند نتایج آزمایش‌ها پراکندگی زیادی دارند اما وینترال^۳ در سال ۱۹۸۳ با مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی نوعی

¹ Wittaker

² Lim

³ Winteral

ماسه‌سنگ نشان داد که چقرمگی شکست مود کششی با افزایش فشار محصور کننده تا ۱۰۰ MPa، بطور خطی تا ۵ برابر زیاد می‌شود (Khan, 1998). همچنین تالوک^۱ و همکارانش نیز در سال ۱۹۹۳ پس از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی این افزایش خطی را تایید کردند (Al-Shayea et al., 2000). پس از آن‌ها الشایا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ فشار محصور کننده تا ۲۸ MPa را برای نمونه‌های ترک‌دار دیسک برزیلی بکار بردند که براساس نتایج بدست آمده، مقدار K_{Ic} برای ماسه‌سنگ ۲۷۴٪ افزایش یافت درحالی‌که K_{IIc} تنها ۱۳۷٪ رشد را نشان داد (Al-Shayea et al., 2000).

۲-۶-۳-۵-دما

از نقطه نظر کاربردهای عملی، بررسی تاثیر دما بر روی چقرمگی شکست سنگ بسیار ارزشمند است. زیرا سازندهای سنگی در اعماق زیاد مسلماً دماهای بسیار بالاتری را نسبت به شرایط آزمایشگاهی تجربه می‌کنند. در کاربردهای عملی مانند عملیات شکافت هیدرولیکی که به منظور ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز انجام می‌شود و همچنین دفن زباله‌های اتمی در مغارهای زیرزمینی بررسی رفتار چقرمگی شکست در دماهای بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

دویدی^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که با کاهش دما از ۳۰ تا ۵۰- درجه سانتی‌گراد در نمونه‌های دیسک برزیلی با شکاف شورن، K_{Ic} افزایش می‌یابد که آن‌ها این تاثیر را به باقیمانده رطوبت در نمونه‌ها مرتبط ساختند. بدین ترتیب که در دماهای پایین آب منجمد شده و چقرمگی شکست یخ نیز به مقدار چقرمگی شکست سنگ افزوده می‌شود (Dwivedi et al., 2000).

همچنین تغییر میزان رطوبت در نمونه‌ها باعث کاهش نوسانات K_{Ic} با تغییر دما می‌شود. با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، K_{Ic} اندکی افزایش می‌یابد و سپس شروع به افت می‌کند. همچنین تغییرات مقدار K_{IIc} حداقل تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بسیار اندک است (Al-Shayea et al., 2000).

¹ Thallok

² Al-Shayea

³ Dwivedi

نتایج کار میر^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ در بررسی تاثیر دمای بین ۲۵ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بر روی مقدار K_{Ic} نوعی سنگ گرانیت با استفاده از روش PTS-test، نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت است ولی با افزایش آن تا حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار چقرمگی شکست به آرامی حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد (Meier et al., 2009).

۲-۷- معیارهای رشد ترک

در کاربردهای عملی برای مطالعه رشد ترک و تعیین جهت رشد آن عموماً از سه تئوری پایه استفاده می‌شود. این تئوری‌ها عبارتند از: تئوری حداکثر تنش مماسی، تئوری حداکثر نرخ رهايش انرژی کرنشی و تئوری حداقل دانسیته انرژی کرنشی. در این قسمت فرمول‌بندی این سه معیار توضیح داده می‌شود (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۸۸). لازم به ذکر است مطالب ارائه شده در این بخش برگرفته از همین منبع می‌باشند.

۲-۷-۱- معیار حداکثر تنش مماسی

تئوری حداکثر تنش مماسی بعنوان اولین معیار شکست در حالت مود ترکیبی توسط اردوغان و سی^۲ در سال ۱۹۶۳ ارائه شد. این معیار بر پایه آگاهی از وضعیت تنش در حوالی نوک ترک در مختصات قطبی استوار است. بر مبنای این معیار زمانی که حداکثر تنش مماسی ($\sigma_{\theta_{max}}$) به مقدار بحرانی ثابت مواد برسد، ترک از نوک آن و در یک راستای شعاعی در صفحه‌ای عمود بر راستای بزرگترین کشش ($\sigma_{\theta_{max}}$) منتشر می‌شود. راستای انتشار با زاویه θ_0 مشخص می‌شود. به راحتی می‌توان نشان داد که σ_{θ} وقتی به حداکثر مقدار خود می‌رسد که $\tau_{r\theta} = 0$ باشد. در حالت مود ترکیبی $\tau_{r\theta}$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (۲-۱۶)$$

پس خواهیم داشت:

^۱ Meier

^۲ Erdogan and Sih

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos^2 \frac{\theta_0}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{4} \cos \frac{\theta_0}{2} + \frac{3}{4} \cos \frac{3\theta_0}{2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1)] = 0 \quad (17-2)$$

این معادله دو جواب دارد:

$$\theta_0 = \pm \pi \quad \text{غیر قابل قبول} \quad (18-2)$$

$$[K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1)] = 0 \quad (19-2)$$

با حل معادله دوم، راستای انتشار ترک، θ_0 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\tan \frac{\theta_0}{2} = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8}$$

$$\Rightarrow \theta_0 = 2 \arctan \left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \quad (20-2)$$

همانطور که اشاره شد ترک زمانی رشد می‌کند که حداکثر تنش مماسی به مقدار بحرانی برسد:

$$\sigma_{\theta_{\max}} \sqrt{2\pi r} = K_{IC} \quad (21-2)$$

از طرفی در حالت مود ترکیبی داریم:

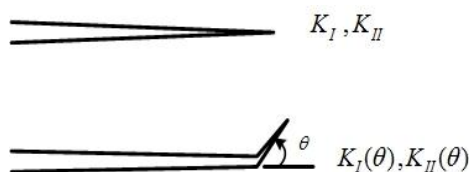
$$\sigma_{\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\frac{3}{4} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (22-2)$$

پس معیار شکست بصورت زیر در می‌آید:

$$\cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] = K_{IC} \quad (23-2)$$

۲-۷-۲- معیار حداکثر نرخ رهايش انرژی کرنشی

این مدل اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط اردوغان و سی ارائه شد ولی با مشکلات ریاضی غیر قابل حل مواجه شد. هوسین^۱ و همکارانش در سال ۱۹۷۴ این مساله را حل کردند. آنها یک رشد بی نهایت کوچک را با زاویه θ نسبت به ترک اصلی در نظر گرفتند (شکل ۱-۱۵) و ضرایب تمرکز تنش این وضعیت را بر حسب ضرایب تمرکز تنش ترک اصلی بدست آوردند (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۹- رشد بی نهایت کوچک با زاویه θ نسبت به ترک اصلی (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۸۸)

$$\begin{Bmatrix} K_I(\theta) \\ K_{II}(\theta) \end{Bmatrix} = \left(\frac{4}{3 + \cos^2 \theta} \right) \begin{pmatrix} 1 - \frac{\theta}{\pi} \\ \frac{\theta}{\pi} \\ 1 + \frac{\theta}{\pi} \end{pmatrix}^{2\pi} \begin{Bmatrix} K_I \cos \theta + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \\ K_{II} \cos \theta - \frac{1}{2} K_I \sin \theta \end{Bmatrix} \quad (24-2)$$

$$G(\theta) = \frac{1}{E'} (K_I^2(\theta) + K_{II}^2(\theta)) \quad (25-2)$$

$$G(\theta) = \frac{4}{E'} \left(\frac{1}{3 + \cos^2 \theta} \right)^2 \begin{pmatrix} 1 - \frac{\theta}{\pi} \\ \frac{\theta}{\pi} \\ 1 + \frac{\theta}{\pi} \end{pmatrix}^{2\pi} \left[(1 + 3 \cos^2 \theta) K_I^2 + 8 \sin \theta \cos \theta K_I K_{II} + (9 - 5 \cos^2 \theta) K_{II}^2 \right] \quad (26-2)$$

بر مبنای این معیار ترک در راستایی (θ_0) گسترش می یابد که مقدار G حداکثر باشد و ترک زمانی شروع به رشد می کند که G_{\max} یا $G(\theta_0)$ به مقدار بحرانی G_C برسد:

$$G(\theta) = G_C \quad (27-2)$$

که در آن:

$$G_c = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (28-2)$$

در رابطه بالا K_{IC} چقرمگی شکست مود I سنگ و E ضریب ارتجاعی می باشد.

۲-۷-۳- معیار حداقل دانسیته انرژی کرنشی

این معیار توسط سی در سال ۱۹۷۴ ارائه شده و بیانگر این است که ترک از نوک آن و در راستایی

(θ_0) منتشر می شود که دانسیته انرژی کرنشی در یک فاصله بحرانی حداقل مقدار است و زمانی رشد ترک

شروع می شود که این حداقل مقدار به مقدار بحرانی برسد. دانسیته انرژی کرنشی dW در واحد حجم dV

عبارت است از:

$$\frac{dW}{dV} = \frac{1}{2E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + \frac{1}{2\mu}(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (29-2)$$

که در آن μ ضریب ارتجاعی برشی می باشد. در حالت دو بعدی این معادله بصورت زیر در می آید.

$$\frac{dW}{dV} = \frac{1}{4\mu} \left[\frac{\kappa+1}{4}(\sigma_x + \sigma_y)^2 - 2(\sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2) \right] \quad (30-2)$$

که در حالت کرنش مسطح $\kappa = 4 - 3\nu$ و در حالت تنش مسطح $\kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}$ می باشد.

با استفاده از راه حل وسترگاد برای صفحه ترک دار با ابعاد بی نهایت و جایگزینی تنش ها در معادله بالا،

خواهیم داشت:

$$\frac{\partial W}{\partial V} = \frac{1}{r_0\pi} (a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2) = \frac{S(\theta)}{r_0} \quad (31-2)$$

که:

$$a_{11} = \frac{1}{16\mu} [(1 - \cos \theta)(\kappa - \cos \theta)]$$

$$a_{12} = \frac{\sin \theta}{16\mu} [2 \cos \theta - (\kappa - 1)] \quad (32-2)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\mu} [(\kappa + 1)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta)(3 \cos \theta - 1)]$$

این مدل بر مبنای فرضیات زیر است:

- راستای رشد ترک به سمت نقطه‌ای است که فاکتور دانسیته انرژی کرنشی در مقایسه با سایر نقاط اطراف، حداقل باشد.

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad (33-2)$$

- فرض بر این است ترک زمانی رشد می‌کند که $S_{\theta_{\min}}$ به مقدار بحرانی S_C برسد. S_{Cr} از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$S_C = \frac{2(\kappa - 1)K_{IC}^2}{16\mu\pi} \quad (34-2)$$

۲-۸- مکانیک شکست سنگ

کلید حل مسائل مهندسی سنگ، مکانیک سنگ است. برخلاف مکانیک سایر مواد، مکانیک سنگ با محیطی ناپیوسته، ناهمگن و ناهمسانگرد مواجه است. ناپیوستگی‌ها در سنگ هم در مقیاس میکروسکوپی و هم ماکروسکوپی مشاهده می‌شوند. وجود این ناپیوستگی‌های (درزه‌ها، ترک‌ها، صفحات لایه‌بندی، فضاهای خالی بصورت سوراخ‌های منفذی یا غارها و هر نوع نقص مکانیکی) در محیط سنگی باعث تغییر نحوه توزیع تنش در شرایط بارگذاری سنگ می‌شوند. چراکه ثابت شده است این ناپیوستگی‌ها در انفعالات مکانیکی بعنوان نقاط برجسته‌ی متمرکز کننده تنش عمل می‌کنند. بنابراین در مورد محیط سنگی تئوری مکانیک پیوسته اغلب کارائی نداشته و به همین دلیل سنگ به عنوان نوعی محیط ناپیوسته مورد بحث قرار می‌گیرد.

در نتیجه مکانیک سنگ ناپیوسته و از جمله مکانیک شکست سنگ که اولین تحقیقات مهم آن در اواسط دهه‌ی ۱۹۶۰ انجام شد، پیشرفت زیادی داشته و رواج یافته‌اند.

با استفاده از علم مکانیک شکست فلزات و ترکیب آن با ویژگی‌های خاص محیط سنگی، علم نوپای مکانیک شکست سنگ توسعه یافته است. اما نکته‌ی مهم، برخی ویژگی‌های خاص و اساسی محیط سنگی نسبت به فلزات و سایر مواد ساخت بشر هستند که باید همواره در نظر گرفته شوند. برخی از این تفاوت‌های اساسی عبارتند از:

۱. سنگ ذاتاً ناپیوسته، ناهمگن و ناهمسانگرد است. یعنی توزیع تنش محلی و رفتار گسترشی ترک تحت تاثیر این ویژگی‌هاست. بنابراین رشد ترک در مواد سنگی معمولاً پیچیده بوده و خصوصیات نظیر تصادفی بودن، بی‌نظمی و تمایل به انحراف در مرزهای دانه‌ها و ناپیوستگی‌ها (صفحات ضعیف) دارد.

۲. در کاربردهای مهندسی سنگ، مسائل شکست برای اغلب مواد سنگی، ترد و شبه ترد هستند. شکست پلاستیک سنگ نادر بوده و تنها در موارد خاصی از شرایط محیطی مانند دماهای بسیار بالا رخ می‌دهد. لذا برای توصیف وضعیت شکست در نوک ترک مواد سنگی، باید مفهوم زون فرآیند شکست ریز ترک خوردگی جایگزین مفهوم زون فرآیند شکست پلاستیک در مواد فلزی شود.

۳. در مقیاس بزرگ، توده سنگ ممکن است رفتار مکانیکی کاملاً متفاوتی نسبت به رفتار مکانیکی نمونه‌های کوچک مقیاس که در آزمایشگاه تعیین می‌شوند، داشته باشد. بنابراین برای بکارگیری نتایج مطالعات آزمایشگاهی در کاربردهای عملی مهندسی سنگ باید عامل بحرانی مقیاس را برای رفتار مکانیکی در نظر داشت.

۴. در کاربردهای عملی، نمونه‌های آزمایشگاهی که در دسترس هستند اغلب بصورت مغزه بوده و در نتیجه روش‌های آزمایشی که بر اساس مغزه هستند، ارجحیت دارند.

جدا از خصوصیات سنگ که در بالا اشاره شد، در مهندسی سنگ برای دو هدف متضاد از مکانیک شکست سنگ بهره گرفته می‌شود. اول برای جلوگیری از گسیختگی یعنی رشد ترک یا جابجایی در امتداد

ترک‌های قبلی موجود در سازه سنگی حفر شده، مانند شیب‌های سنگی و بازشدگی‌های زیرزمینی که پایداری آن‌ها بایستی تضمین شده باشد. هدف دیگر برای آغاز شکست است یعنی ایجاد و گسترش ترک‌های جدید در سنگ بوسیله‌ی برش، حفاری و انفجار که در این موارد از مکانیک شکست سنگ جهت بهینه‌سازی فرآیند خردایش سنگ استفاده می‌شود (Xu, 1993).

۲-۹- جمع‌بندی

در مکانیک شکست سنگ برای مطالعه‌ی رشد یا عدم رشد ترک، نوع مود انتشار ترک و جهت انتشار ترک از معیارهای مختلفی نظیر معیارهای مبتنی بر ضرایب تمرکز تنش استفاده می‌شود. در این معیارها در صورتیکه ضریب تمرکز تنش در یک مود خاص از ضریب تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست مود موردنظر تجاوز کند، شکستگی در آن مود گسترش می‌یابد. بنابراین برای استفاده از معیارهای مذکور و تعیین شرایط رشد ترک (رشد یا عدم رشد، مود انتشار و جهت انتشار) اطلاع از میزان چقرمگی شکست مودهای مختلف محیط ضروری می‌باشد. این امر چقرمگی شکست را در یک موقعیت مهم در تحقیقات شکست سنگ قرار داده است.

فصل سوم:

روش های مختلف تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی

۳-۱- مقدمه

در کاربردهای مختلف مهندسی سنگ، محیط‌های سنگی تحت انواع بارگذاری‌ها به‌ویژه بارگذاری فشاری قرار می‌گیرند. تحت این شرایط و در محیط‌های سنگی ترک‌دار، انتشار ترک عموماً در مود کششی (مود I)، مود برشی (مود II) و یا مود ترکیبی I-II اتفاق می‌افتد. روش‌های متنوع و با نمونه‌های گوناگون برای تعیین چقرمگی شکست سنگ در شرایط بارگذاری کشش و برش ارائه شده‌اند. در این فصل پیش زمینه، نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها، مشخصات نمونه‌ها و روابط ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست در روش‌های استاندارد پیشنهادی توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و همچنین سایر روش‌های متداولی که برای تعیین چقرمگی شکست سنگ‌های مختلف از مقبولیت خاصی بین محققین برخوردارند، بطور مفصل مورد بحث قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که عمده‌ترین وجه مشترک این روش‌ها، مطابقت هندسه‌ی نمونه‌ی آن‌ها براساس مغزه‌های سنگ می‌باشد.

۳-۲- نمونه‌های استوانه‌ای با شکاف شورن تحت کشش مستقیم (SR¹)

نمونه‌های SR توسط بارکر^۲ در سال ۱۹۷۷ توسعه یافتند (Alkilicgil, 2006). این روش در سال ۱۹۸۸ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ بعنوان یکی از روش‌های استاندارد پیشنهادی این انجمن برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود کششی معرفی شد (Ouchterlony, 1988). در این روش یک شکاف

^۱ Short Rod specimens

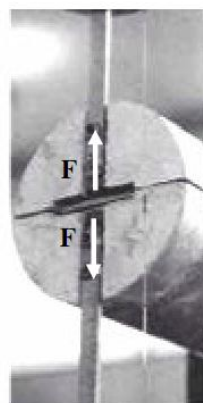
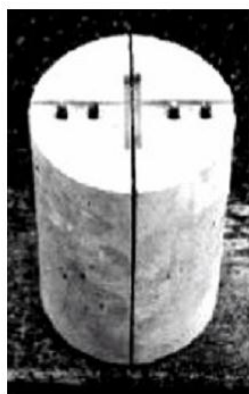
^۲ Barker

شورن (۷ شکل) در نمونه‌ی استوانه‌ای ایجاد شده و محاسبه‌ی چقرمگی شکست با روشی تحلیلی که توسط ISRM در سال ۱۹۸۸ ارائه شده است، انجام می‌شود. همچنین یک ضریب تصحیح برای رفتار غیرخطی مواد که با معادله‌ی دیگری که وابسته به منحنی بار-جابجایی بازشدگی دهانه‌ی ترک^۱ در آزمایش است، در نظر گرفته می‌شود (Alkilicgil,2006).

از این روش تنها برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده می‌شود.

۳-۲-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش

ابتدا مغزه‌ها را از بلوک‌های سنگی تهیه و سپس نمونه‌های استوانه‌ای را از این بلوک‌ها جدا می‌کنند. به منظور فراهم کردن سطح لازم برای بارگذاری، در یکی از دو انتهای نمونه یک شیار مستطیل شکل برش داده می‌شود (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- سطح بارگذاری و هندسه‌ی نمونه‌ی SR (Alkilicgil,2006)

پس از ایجاد این شیار، دو شکاف در زوایای مخالف در نمونه برش داده می‌شود که باید در نهایت یک رباط مثلثی^۲ که شورن^۳ نامیده می‌شود را در نمونه شکل دهند (شکل ۳-۲). ابعاد پیشنهادی ISRM برای این نمونه در جدول (۳-۱) نشان داده شده است.

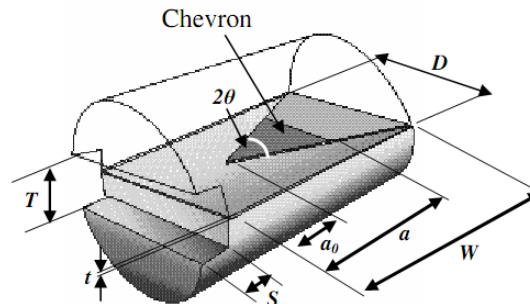
^۱ Load- Crack mouth opening displacement

^۲ triangular ligament

^۳ chevron

مطابق شکل (۳-۳) برای انجام این آزمایش از دستگاه بارگذاری کششی و سیستم اندازه‌گیری

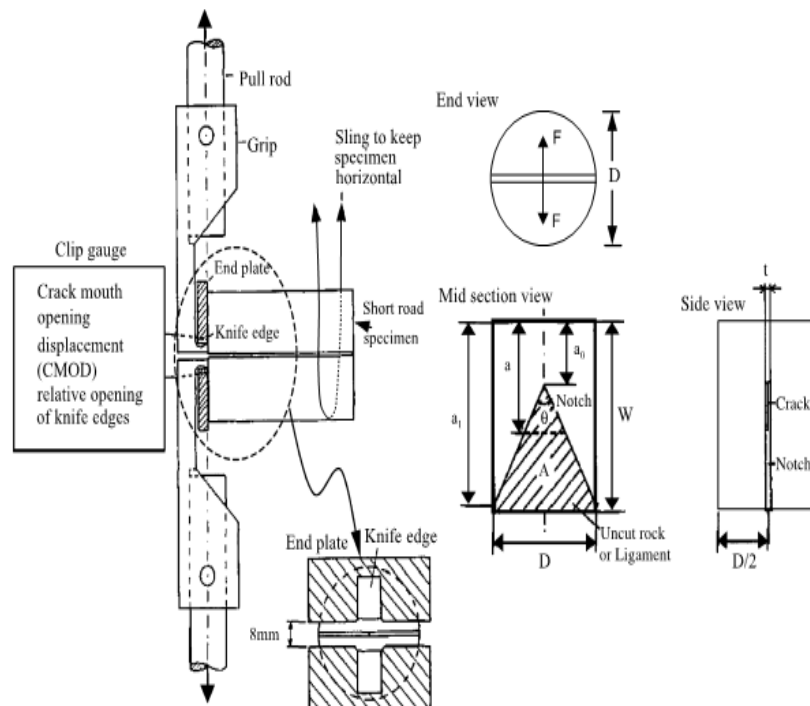
جابجایی استفاده می‌شود.



شکل ۳-۲- تصویر شماتیک و مشخصات نمونه‌ی SR (Ouchterlony, 1988)

جدول ۳-۱- ابعاد نمونه‌ی SR (Ouchterlony, 1988)

پارامتر هندسی	مقدار	میزان خطای مجاز
قطر نمونه (D)	۳۵ تا ۵۰ میلی‌متر	بزرگتر از ۱۰ برابر اندازه دانه
طول نمونه (W)	$1/45 D$	$\pm 0/02$
فاصله تا نوک شکاف شورن (a_0)	$0/48 D$	$\pm 0/02 D$
زاویه شکاف شورن (θ)	۵۴/۶ درجه	± 1 درجه
طول شکاف شورن ($W-a_0$)	$0/15 D$	$\pm 0/1 D$
ضخامت ترک (t)	$0/30 D \geq$ یا ۱ میلی‌متر	هرکدام بزرگتر باشد



شکل ۳-۳- هندسه، مشخصات و تنظیمات بارگذاری نمونه‌ی SR (Alkilicgil, 2006)

۳-۲-۲- تعیین چقرمگی شکست

برای نمونه‌های با رفتار خطی، چقرمگی شکست نمونه‌ی SR را با توجه به رابطه‌ی پیشنهادی ISRM در سال ۱۹۸۸ بصورت زیر محاسبه می‌کنند (Ouchterlony, 1988):

$$K_{SR} = C_K 24.0 \frac{F_{max}}{D^{1.5}} \quad (1-3)$$

که در آن:

F_{max} : بار در لحظه‌ی شکست،

D: قطر نمونه و

C_K : ضریب تصحیح برای اعمال تغییرات در سایز نمونه می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_K = \left(1 - \frac{0.6\Delta W}{D} + \frac{1.4\Delta a_0}{D} - 0.01\Delta\theta\right) \quad (2-3)$$

و در آن:

ΔW : اختلاف در ارتفاع نمونه نسبت به ابعاد پیشنهادی،

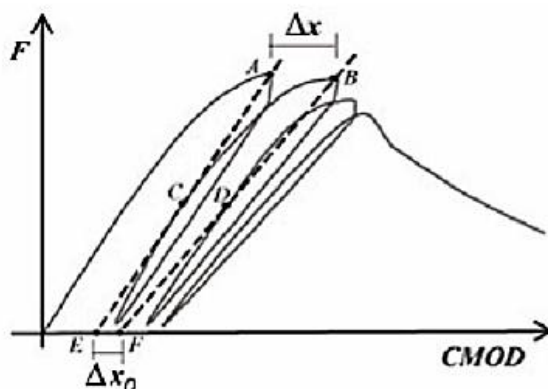
Δa_0 : اختلاف در موقعیت اولیه راس شکاف شورن نسبت به ابعاد پیشنهادی و

$\Delta\theta$: تفاضل زاویه شکاف شورن نسبت به ابعاد پیشنهادی می‌باشند.

اما در نمونه‌های با رفتار غیرخطی، برای لحاظ کردن رفتار غیرخطی در محاسبات، ابتدا تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ی SR را با رابطه (۱-۳) شروع می‌کنند و سپس مقدار ضریب تصحیح رفتار غیرخطی محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار چقرمگی شکست اصلاح شده‌ی نمونه‌ی SR با استفاده از منحنی بار-جابجایی بازشدگی دهانه‌ی ترک (شکل ۳-۴) و رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$K_{SR}^C = \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} K_{SR} \quad (3-3)$$

که در آن $P = \Delta x_0 / \Delta x$ می‌باشد و از روی شکل (۳-۴) تعیین می‌شود.



شکل ۳-۴- مشخصات مربوط به تعیین ضریب تصحیح بر اساس منحنی بار-جابجایی بازشدگی دهانه‌ی ترک (Alkilicgil,2006)

۳-۳- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه‌نقطه‌ای (CB^۱)

این روش نیز یکی دیگر از روش‌های استاندارد پیشنهادی توسط ISRM است که بوسیله‌ی اوچرلونی^۲ در سال ۱۹۸۸ ارائه شد (Ouchterlony, 1988). در این روش نمونه‌های استوانه‌ای که یک شکاف شورن در مرکز و عمود بر محور آن بوسیله‌ی اره ایجاد می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای قرار می‌گیرند.

در این روش نیز مشابه با روش SR دو سطح آزمایش وجود دارد. در سطح اول که در سنگ‌های شکننده کافی است، تنها به حداکثر بار ثبت شده نیاز است اما در سطح دوم و در مواد با رفتار غیرخطی باید مقادیر بار-جابجایی بطور مداوم اندازه‌گیری شوند.

از روش CB نیز تنها برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده می‌شود.

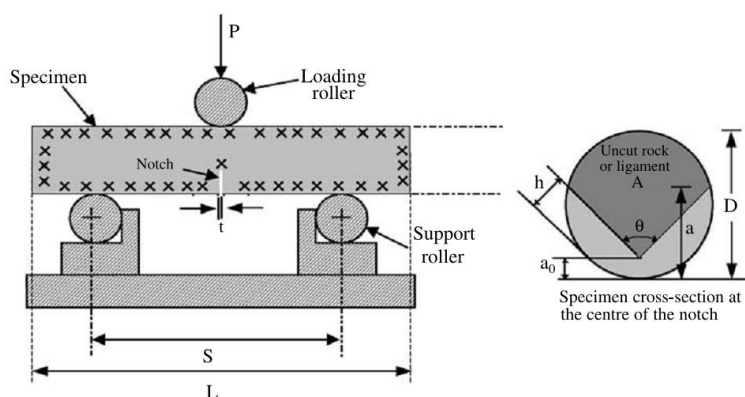
۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش

پس از تهیه‌ی نمونه‌های استوانه‌ای از بلوک‌های سنگ، مغزه‌ها را در طول‌های مورد نیاز برش داده و سپس با استفاده از یک اره چرخشی، دو شکاف با زوایای مخالف بطوریکه یک رباط ν شکل (شورن) در وسط مغزه و عمود بر محور آن تشکیل دهند، ایجاد می‌شود. پس از این مراحل آماده‌سازی مطابق با

^۱ Chevron Bend

^۲ Ouchterlony

راهنمای ISRM، نمونه‌ها را با استفاده از یک دستگاه خودکنترل^۱ و یک گیج گیره‌ای^۲ (مانند نمونه‌ی SR شکل ۳-۳) که باز شدگی شکاف شورن را اندازه‌گیری می‌کند، تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌دهند. در شکل (۳-۵) هندسه، مشخصات و تنظیمات نمونه‌ی CB و در جدول (۳-۲) نیز ابعاد پیشنهاد شده و استاندارد برای نمونه‌ی CB ارائه شده است.



شکل ۳-۵- هندسه، مشخصات و تنظیمات نمونه‌ی CB (Iqbal, 2004)

جدول ۳-۲- ابعاد نمونه‌ی استاندارد برای روش CB (Iqbal, 2004)

پارامتر هندسی	مقدار	میزان خطای مجاز
قطر نمونه (D)	۳۵ تا ۵۰ میلی‌متر	بزرگتر از ۱۰ برابر اندازه دانه
طول نمونه (L)	۴ D	بزرگتر از ۳/۵ D
فاصله نقاط تکیه‌گاهی (S)	۲/۳۳ D	$\pm 0.2 D$
زاویه شکاف شورن (θ)	۹۰	± 1 درجه
طول ترک (a_0)	۰/۱۵ D	$\pm 0.1 D$
ضخامت ترک (t)	$\geq 0.30 D$ یا ۱ میلی‌متر	هرکدام بزرگتر باشد

۳-۳-۲- انتخاب اندازه‌ی نمونه

برای اطمینان از معتبر بودن ابعاد نمونه CB در تعیین مقادیر چقرمگی شکست مود I، روابط تجربی توسط ماتسوکوی^۳ و همکارانش و نیز اوچرلونی و همکارانش در سال ۱۹۹۱ پیشنهاد شدند (Iqbal, 2004). این روابط که در واقع پیشنهادی برای بهبود اندازه‌ی نمونه‌ی مورد نیاز در روش CB بودند، به صورت زیر می‌باشند:

^۱ Servo-control

^۲ Clip gauge

^۳ Matsuki

$$D_{min} = 1.6 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad \text{or} \quad D_{min} = 1.6 \left(\frac{1.2K_{Ic}^e}{\sigma_t} \right)^2 \quad (4-3)$$

$$K_{Ic}^e (MPa\sqrt{m}) = 0.23(E(GPa))^{0.65} \quad (5-3)$$

که در آن‌ها:

D_{min} : کمترین قطر موردنیاز نمونه‌ی CB،

K_{Ic} : چقرمگی شکست مود I،

E : مدول یانگ سنگ،

σ_t : مقاومت کششی تک‌محوره‌ی سنگ و

K_{Ic}^e : چقرمگی شکست تخمینی مود I می‌باشند.

محققین با بکارگیری این دو معادله دریافتند که برای تمام انواع سنگ، حداقل قطر مغزه‌ی مورد نیاز برای روش CB بین ۲۰۰-۳۰۰ mm می‌باشند. اما این مقادیر برای نمونه‌های سنگی عملاً غیرممکن بودند چراکه در این صورت طول نمونه‌ها برای آزمایش بسیار زیاد می‌شد. بنابراین در کارهای آزمایشگاهی معمولاً قطر نمونه را ده برابر اندازه‌ی بزرگترین دانه در نظر می‌گیرند (Iqbal, 2004).

۳-۳-۳- تعیین چقرمگی شکست

در روش CB چقرمگی شکست با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی ISRM که در سال ۱۹۸۸ ارائه شد و بصورت زیر می‌باشد، محاسبه می‌شود (Iqbal et al, 2007):

$$K_{CB} = A_{min} \frac{F_{max}}{D^{1.5}} \quad (6-3)$$

که در آن:

K_{CB} : چقرمگی شکست نمونه‌ی روش CB است که برای مواد شکننده $K_{CB}=K_{Ic}$

F_{max} : بار در لحظه‌ی شکست،

D : قطر نمونه و A_{min} نیز بشکل زیر تعریف می‌شود:

$$A_{min} = \left[1.835 + 7.15 \left(\frac{a_0}{D} \right) + 9.85 \left(\frac{a_0}{D} \right)^2 \right] \left(\frac{S}{D} \right) \quad (7-3)$$

که در آن:

S: فاصله‌ی بین نقاط تکیه‌گاهی، که معمولاً $\frac{3}{33}$ برابر قطر نمونه است (شکل ۳-۵ را ببینید) و

a_0 : فاصله‌ی نوک شکاف شورن از سطح نمونه (شکل ۳-۵ را ببینید) می‌باشند.

۳-۴- نمونه‌ی استوانه‌ای با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه‌نقطه‌ای (SECRBB)^۱

این روش برای اولین بار توسط اوچرلونی در سال ۱۹۸۱ مورد استفاده قرار گرفت و توسعه یافت (Khan and Al-Shayea, 2000). در این روش از نمونه‌های استوانه‌ای که مشخصات، هندسه، نحوه‌ی آماده‌سازی و بارگذاری آن‌ها دقیقاً مشابه با روش CB است استفاده می‌شود، تنها با این تفاوت که در این روش بجای شکاف شورن در نمونه‌ی CB، یک شکاف مستقیم در وسط نمونه و عمود بر محور آن برش داده می‌شود. اوچرلونی در سال ۱۹۸۱ برای تعیین چقرمگی شکست مود I در روش SECRBB روابط زیر را پیشنهاد کرد (Khan and Al-Shayea, 2000):

$$K_I = 0.25 \left(\frac{S}{D} \right) \left(\frac{P}{D^{1.5}} \right) Y_I' \quad (۸-۳)$$

$$Y_I' = \frac{2 \left(\frac{D}{S} \right) \left[450.8531 \rho^2 \left(\frac{a}{D} \right)^{1.5} \right]^{0.5}}{\left[\left(\frac{a}{D} \right) - \left(\frac{a}{D} \right)^2 \right]^{0.25}} \quad (۹-۳)$$

که در آن‌ها:

D: قطر نمونه،

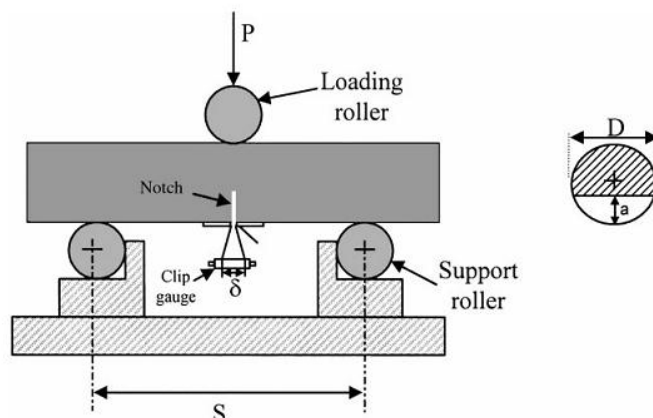
S: فاصله‌ی بین نقاط تکیه‌گاهی،

a: طول ترک،

P: بار در لحظه‌ی شکست و

$\rho = S/3.33D$ می‌باشند (شکل ۳-۶).

^۱ Single Edge Cracked Round Bar Bend



شکل ۳-۶- هندسه، مشخصات و تنظیمات نمونه‌ی SECRBB (Khan & Al-Shayea, 2000)

لازم به ذکر است که این روش نیز تنها قادر به تعیین چقرمگی شکست مود I می‌باشد.

۳-۵- نمونه‌ی دیسکی با ترک مرکزی مستقیم (CSTBD)^۱

این روش بطور مستقل توسط آواجی و ساتو^۲ در سال ۱۹۷۸ و سانچز^۳ در سال ۱۹۷۹ و البته بر اساس کارهای قبلی یاریمان و کریستین^۴ که در سال ۱۹۶۶ انجام شده بود، پیشنهاد شد (Al-Shayea, 2002). در این تکنیک از هندسه‌ی دیسک دایره‌ای با یک ترک مرکزی مستقیم استفاده می‌شود که تحت بارگذاری فشاری قطری و در راستای خط گذرنده از مرکز دیسک قرار می‌گیرد (شکل ۳-۷). این روش قابلیت بکارگیری برای تعیین چقرمگی شکست در شرایط مود I، مود II و مود ترکیبی II-III را داراست. در این روش با تراز کردن راستای ترک در زوایای مختلف نسبت به صفحه‌ی بارگذاری (β)، مطالعه‌ی الگوهای مختلف مود ترکیبی I-II امکان‌پذیر است (شکل ۳-۸). بطور مثال برای $\beta=0$ جهت ترک با راستای بارگذاری موازی می‌شود و لذا میدان تنش مود I خالص ایجاد می‌شود.

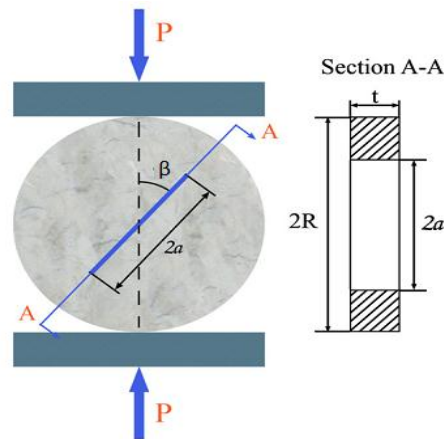
یکی از مزایای استفاده از دیسک‌های برزیلی ترک‌دار نسبت به سایر روش‌های بحث شده اینست که تنها از یک هندسه نمونه برای ایجاد طیف وسیعی از مکانیزم‌های شکست مود ترکیبی I-II استفاده می‌شود.

^۱ Cracked Straight Trough Brazilian Disk

^۲ Awaji & Sato

^۳ Sanchez

^۴ Yareman & Krestin

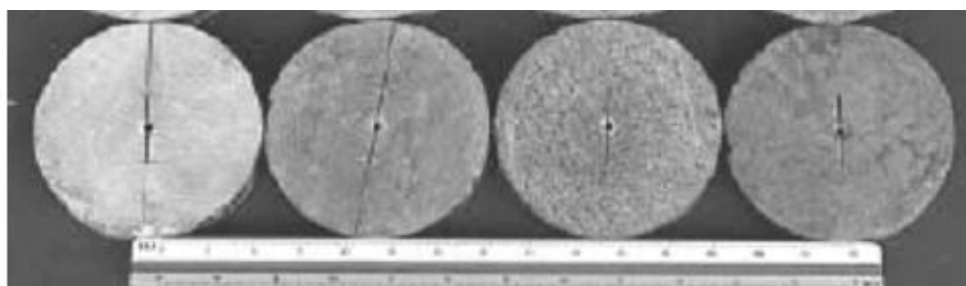


شکل ۳-۷- نمای شماتیکی از هندسه و تنظیمات روش CTSBD (Ayatollahy et al., 2011)

۳-۵-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایش

روش CTSBD برای تعیین چقرمگی سنگ در سال ۱۹۸۴ توسط چانگ و کروپو^۱ بکار گرفته شد و توسعه یافت. آن‌ها قطعه‌ی پیشنهادی خود را SNBD^۲ نامیدند که در آن ترک وسط نمونه دیسکی با استفاده از یک سرمته و اره سیمی ایجاد می‌شود (Chong & kuruppu, 1984).

پس از گرفتن مغزه‌ها از بلوک‌های سنگی، با استفاده از اره‌ی چرخشی الماسی و با سرعت بالا، دیسک‌های دایره‌ای با ضخامت یکسان برش داده می‌شوند. سپس با استفاده از یک سرمته سوراخی در مرکز دیسک‌ها ایجاد می‌شود. این مته باید طوری تنظیم شود که تا نصف ضخامت دیسک نفوذ کند و سپس دیسک برگردانده شده و سوراخ آن تکمیل می‌شود. پس از تکمیل سوراخ مرکزی دیسک، اره سیمی از میان آن عبور داده می‌شود و ترکی در دیسک تراشیده می‌شود (شکل ۳-۸). عمق برش ترک نیز باید با ابزار مخصوصی بطور دقیق کنترل شود.

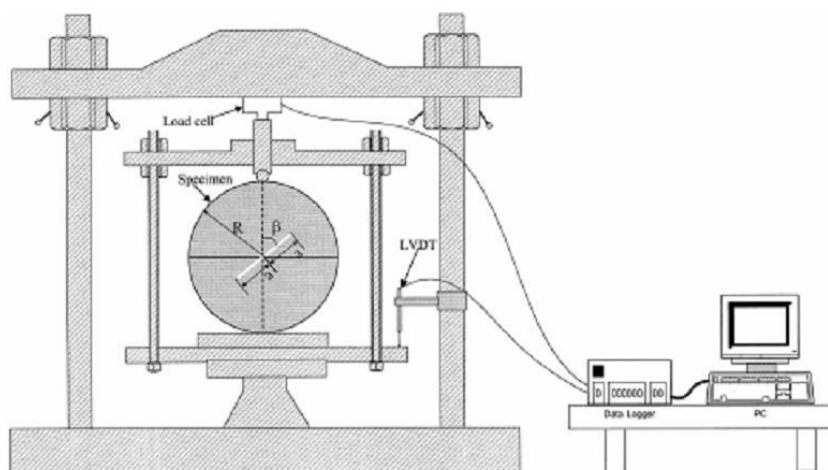


شکل ۳-۸- نمونه‌های SNBD (Al-Shayea, 2002)

^۱ Chong & kuruppu

^۲ Straight Notched Brazilian Disk

برای بارگذاری نمونه نیز مطابق شکل از دستگاه‌های بارگذاری فشاری تک‌محوری با قابلیت کنترل بار و یا جابجایی استفاده می‌شود. بار اعمال شده و جابجایی نیز با استفاده از یک دیتا لاگر کامپیوتری^۱ بدست می‌آید (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۹- بارگذاری در نمونه‌ی دیسک برزلی ترک‌دار (Khan and Al-Shayea, 2000)

۳-۵-۲- تعیین چقرمگی شکست

همانطور که ذکر شد، در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار می‌توان با ترکیب خاصی از نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه (a/R) و زاویه قرارگیری ترک نسبت به صفحه‌ی بارگذاری (β)، شرایط مود I، مود II و مود ترکیبی I-II را ایجاد کرد. با این حال مثلاً در ایجاد شرایط مود II، اندکی انحراف از طول ترک یا جهت مشخص شده ممکن است باعث تغییر میدان تنش شده و در نتیجه منجر به ایجاد مولفه‌های مود I شود. این تغییرات ضریب شدت تنش توسط آواجی و ساتو در سال ۱۹۷۸ بصورت عددی تعیین شدند و سپس اتکینسون^۲ و همکارانش در سال ۱۹۸۲ رابطه‌ای را برای تعیین ضریب شدت تنش در این نمونه‌ها پیشنهاد کردند (Atkinson et al., 1982):

$$K_I = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_I \quad (10-3)$$

^۱ computerized data logger

^۲ Atkinson

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_{II} \quad (11-3)$$

که در آن:

R : شعاع دیسک برزیلی،

B : ضخامت دیسک،

P : بار فشاری در لحظه‌ی شکست،

a : نصف طول ترک و

N_{II} و N_I : ضرایب بدون بعد شدت تنش که وابسته به a/R و β می‌باشند.

اتکینسون برای تعیین مقادیر N_{II} و N_I روابط زیر را با تقریب پنج جمله‌ای و به ازای $0.1 < a/R < 0.6$

پیشنهاد کرد (Atkinson et al., 1982):

$$N_I = \sum_{i=1}^N T_i \left(\frac{a}{R}\right)^{2i-2} A_i(\beta) \quad (12-3)$$

$$N_{II} = 2 \sin 2\beta \sum_{i=1}^N S_i \left(\frac{a}{R}\right)^{2i-2} B_i(\beta) \quad (13-3)$$

که در آن‌ها :

T_i, S_i : ثوابت عددی و

$A_i(\beta), B_i(\beta)$: ثوابت زاویه‌ای هستند.

پنج مقدار اولیه‌ی T_i و S_i در جدول (۳-۳) دیده می‌شوند. در این جدول نسبت a/R با α که طول

ترک بدون بعد نامیده می‌شود، نشان داده شده است. مقادیر متناظر $A_i(\beta)$ و $B_i(\beta)$ نیز در جدول (۴-۳)

دیده می‌شوند که در این جدول بجای β از θ استفاده شده است. برای بدست آوردن ثوابت فوق به ازای

مقادیری از α که در جدول (۳-۳) نیستند، از درون‌یابی و برون‌یابی استفاده می‌شود (Chang et al., 2002).

جدول ۳-۳- پنج مقدار اولیه‌ی ثوابت عددی S_i و T_i (Atkinson et al., 1982)

α	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
0.1	1.014998	0.503597	0.376991	0.376991	0.314159
	1.009987	0.502341	0.376363	0.376363	0.314159
0.2	1.060049	0.514907	0.382430	0.383392	0.318086
	1.039864	0.509959	0.379956	0.380584	0.316245
0.3	1.135551	0.533477	0.391640	0.393835	0.325033
	1.089702	0.522272	0.386086	0.387518	0.320834
0.4	1.243134	0.559734	0.404603	0.408597	0.334831
	1.160796	0.539824	0.394822	0.397403	0.327411
0.5	1.387239	0.594892	0.421949	0.428353	0.347941
	1.257488	0.563966	0.406869	0.410966	0.336447
0.6	1.578258	0.642124	0.445387	0.454861	0.365559
	1.390654	0.597985	0.424037	0.430072	0.349219

جدول ۳-۴- پنج مقدار اولیه‌ی ثوابت زاویه‌ای $A_i(\beta)$ و $B_i(\beta)$ (Atkinson et al., 1982)

A_1	$1 - 4\sin^2\theta$
A_2	$8\sin^2\theta(1 - 4\cos^2\theta)$
A_3	$-4\sin^2\theta(3 - 36\cos^2\theta + 48\cos^4\theta)$
A_4	$-16\sin^2\theta(-1 + 24\cos^2\theta - 80\cos^4\theta + 64\cos^6\theta)$
A_5	$-20\sin^2\theta(1 - 40\cos^2\theta + 240\cos^4\theta - 448\cos^6\theta + 256\cos^8\theta)$
B_1	1
B_2	$-5 + 8\cos^2\theta$
B_3	$-3 + 8(1 - 2\cos^2\theta)(2 - 3\cos^2\theta)$
B_4	$3 + 16(1 - 2\cos^2\theta) - 12(1 - 2\cos^2\theta)^2 - 32(1 - 2\cos^2\theta)^3$
B_5	$5 - 16(1 - 2\cos^2\theta) - 60(1 - 2\cos^2\theta)^2 + 32(1 - 2\cos^2\theta)^3 + 80(1 - 2\cos^2\theta)^4$

همانطور که قبلاً نیز بحث شد، برای کاربرد اصول مکانیک شکست الاستیک خطی در مطالعات چقرمگی شکست باید زون ناحیه‌ی شکست (FPZ) حتی‌الامکان کوچک باشد. بخشی از این امر با استفاده از نمونه‌های با ابعاد بزرگ و بخشی نیز با محدود کردن اندازه‌ی ترک تا یک مقدار ویژه‌ی مینیمم محقق می‌شود. با این هدف اتکینسون برای تعیین N_I و N_{II} همچنین تقریب ترک کوچک^۱ را به ازای $a/R \leq 0.3$ بصورت زیر ارائه کرد (Atkinson et al., 1982):

$$N_I = 1 - a\sin^2\beta + \sin^2\beta(1 - 4\cos^2\beta) \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (14-3)$$

$$N_{II} = \left[2 + (8\cos^2\beta - 5) \left(\frac{a}{R}\right)\right] \sin 2\beta \quad (15-3)$$

^۱ small crack approximation

پس از آن شتی^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۷، با استفاده از برازش منحنی بر روی نتایج عددی بدست آمده توسط اتکینسون، با خطای کمتر از ۰/۱٪ چند جمله‌ای درجه سوم زیر را برای N_I و به ازای $0.6 > a/R$ بدست آوردند (Shetty et al., 1987):

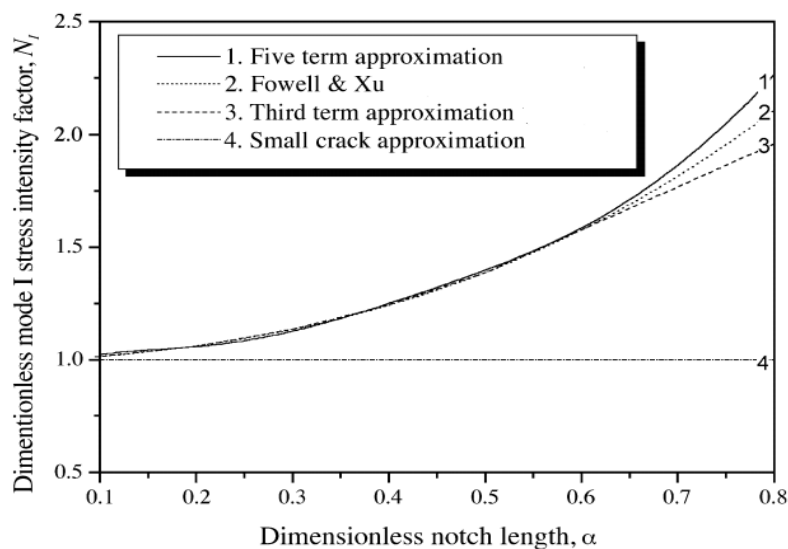
$$N_I = 0.99 + 0.141 \left(\frac{a}{R}\right) + 0.863 \left(\frac{a}{R}\right)^2 + 0.886 \left(\frac{a}{R}\right)^3 \quad (16-3)$$

فوول و ژو^۲ نیز در سال ۱۹۹۴ چند جمله‌ای زیر را به ازای $0.05 < a/R < 0.95$ برای تعیین N_I پیشنهاد کردند (Fowell and Xu, 1994):

$$N_I = \sqrt{\frac{\pi R}{a}} \left(0.354 + 2.394 \left(\frac{a}{R}\right) - 7.035 \left(\frac{a}{R}\right)^2 + 12.1854 \left(\frac{a}{R}\right)^3 + 8.4111 \left(\frac{a}{R}\right)^4 - 30.741 \left(\frac{a}{R}\right)^5 - 29.4959 \left(\frac{a}{R}\right)^6 + 62.973 \left(\frac{a}{R}\right)^7 + 66.5439 \left(\frac{a}{R}\right)^8 - 82.1339 \left(\frac{a}{R}\right)^9 - 73.6742 \left(\frac{a}{R}\right)^{10} + 73.8466 \left(\frac{a}{R}\right)^{11} \right) \quad (17-3)$$

در شکل (۱۰-۳) ضرایب بدون بعد شدت تنش مود I ($\beta=0$) با استفاده از تقریب‌های ارائه شده‌ی فوق

مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۰-۳- ضرایب بدون بعد شدت تنش مود I برای نمونه‌ی CSTBD (Chang et al., 2002)

^۱ Shetty

^۲ Fowell & Xu

همانگونه که بحث شد در نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم به‌ازای هر نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه (a/R) با قرارگیری راستای ترک در زاویه‌ی خاصی با محور بارگذاری (زاویه β) شرایط مود II خالص ایجاد می‌شود. فوول و ژو با بررسی تحلیلی مسئله، روابطی برای تعیین دقیق این زاویه و همچنین مقدار ضریب شدت تنش متناظر با آن (N_{II}) بر اساس پارامتر بدون بعد α (a/R) بصورت زیر ارائه کردند (Fowell and Xu, 1994):

$$\begin{aligned} \beta = & 30.4406 - 4.6734(\alpha) - 17.6741(\alpha)^2 - 9.8566(\alpha)^3 + 3.9819(\alpha)^4 \\ & + 12.9163(\alpha)^5 - 13.2222(\alpha)^6 + 12.8001(\alpha)^7 \\ & - 13.1239(\alpha)^8 \end{aligned} \quad (18-3)$$

$$\begin{aligned} N_{II} = & 0.06462 + 2.8956(\alpha) - 6.8663(\alpha)^2 + 9.8566(\alpha)^3 - 0.4455(\alpha)^4 \\ & - 1.0494(\alpha)^5 - 13.2492(\alpha)^6 + 9.0783(\alpha)^7 - 10.7354(\alpha)^8 \\ & + 28.4775(\alpha)^9 - 6.3197(\alpha)^{10} + 10.6626(\alpha)^{11} \\ & - 10.0268(\alpha)^{12} - 34.2997(\alpha)^{13} + 1.7292(\alpha)^{14} \\ & + 25.2216(\alpha)^{15} \end{aligned} \quad (19-3)$$

مقادیر زاویه β متناظر با حالت مود II برای نسبت‌های مختلف a/R با استفاده از رابطه فوق در جدول (۵-۳) نشان داده شده است.

جدول ۵-۳- مقادیر زاویه‌ای راستای قرارگیری ترک نسبت به محور بارگذاری در شرایط مود II خالص

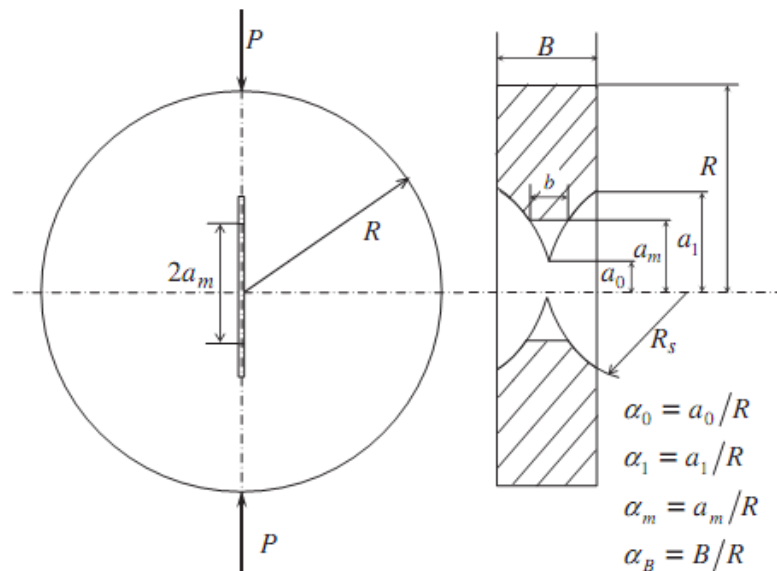
a/R	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
β (degree)									
Pure mode II	۲۹/۶۷	۲۸/۷۲	۲۷/۲۳	۲۵/۲۷	۲۲/۹۳	۲۰/۱۱۸	۱۶/۹۶	۱۳/۰۷	۸/۱۷

۳-۶- نمونه‌ی دیسکی با ترک مرکزی شورن (CCNBD)^۱

این نمونه اولین بار توسط شتی و همکارانش در سال ۱۹۸۵ برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست سرامیک‌ها مورد استفاده قرار گرفت (Chang et al., 2002). نمونه‌ی CCNBD در واقع برگرفته از نمونه‌ی CSTBD می‌باشد و توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در سال ۱۹۹۵ بعنوان یکی از روش‌های

¹ Cracked Chevron-Notch Brazilian Disc

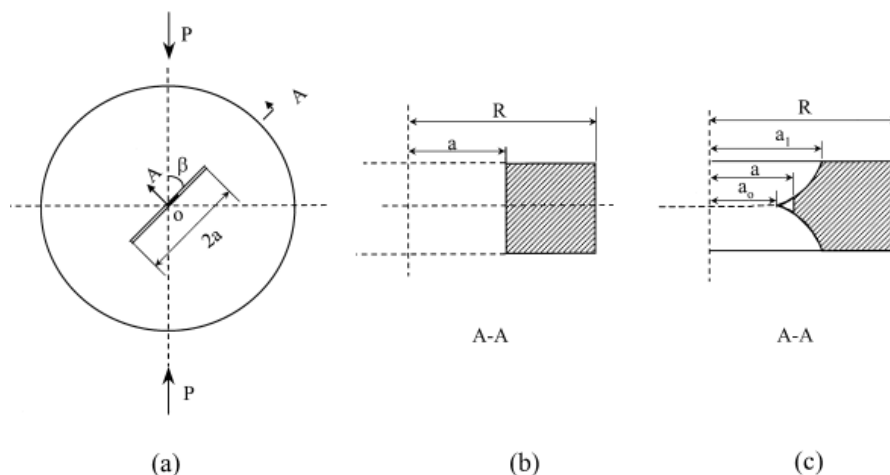
پیشنهادی برای تعیین چقرمگی شکست مود I معرفی شد (Fowell, 1995). در این روش نیز همانند روش CSTBD از هندسه‌ی دیسک برزیلی استفاده می‌شود. با این تفاوت که بجای شکاف مستقیم یک شکاف شورن در مرکز دیسک ایجاد می‌شود (شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲). در جدول (۳-۶) ابعاد هندسی استاندارد نمونه‌ی CCNBD که توسط ISRM در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱ - هندسه، مشخصات و تنظیمات روش CCNBD (Wang et al., 2004)

جدول ۳-۶ - ابعاد هندسی استاندارد نمونه‌ی CCNBD (Fowell, 1995)

پارامتر هندسی	مقدار (میلی‌متر)	پارامتر بدون بعد متناظر
قطر (D)	۷۵	-
ضخامت (B)	۳۰	$\alpha_B = B/R = 0.8$
طول قسمت نوک ترک شورن (a_0)	۹/۸۹	$\alpha_0 = a_0/R = 0.2637$
طول قسمت انتهایی ترک شورن (a_1)	۲۴/۳۷	$\alpha_1 = a_1/R = 0.65$
قطر اره (D_s)	۵۲	$\alpha_s = D_s/R = 0.6933$
عمق برش (h_c)	۱۶/۹۵	-
پارامتر بدون بعد شدت تنش (Y_{min}^*)	۰/۸۴	-
طول بحرانی ترک (a_m)	۱۹/۳۱	$\alpha_m = a_m/R = 0.5149$



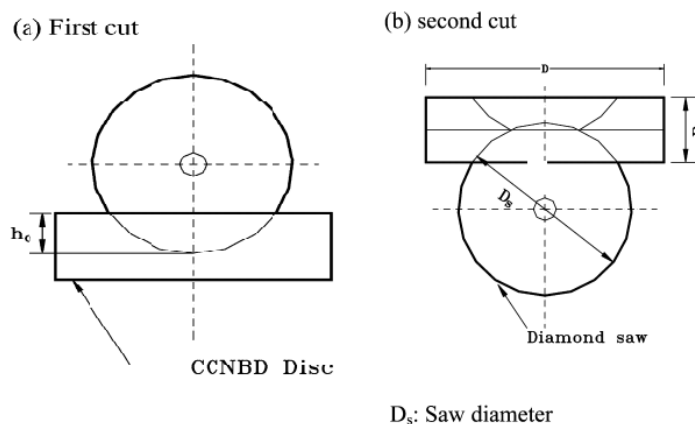
شکل ۳-۱۲- (a) نمای شماتیک از دیسک برزیلی ترک‌دار تحت بارگذاری فشاری، (b) مقطع عرضی از نمونه‌ی CSTBD و (c) مقطع عرضی نمونه‌ی CCBND (Khan and Al-Shayea., 2000)

اگرچه این روش تنها برای تعیین چقرمگی شکست مود I توسط ISRM پیشنهاد شده است، اما قابلیت بکارگیری برای تعیین چقرمگی شکست در شرایط مود II و مود ترکیبی I-II را نیز داراست.

۳-۶-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی

پس از گرفتن مغزه‌ها از بلوک‌های سنگی، با استفاده از اره‌ی چرخشی الماسی و با سرعت بالا، دیسک‌های دایره‌ای با ضخامت یکسان برش داده می‌شوند. برای ایجاد ترک شورن ابتدا هر دو طرف دیسک در امتداد قطر علامت‌گذاری می‌شود تا نقاط کرانی را که اره می‌تواند برش دهد، مشخص شوند. پس از آن دیسک برزیلی علامت‌گذاری شده به اره دایره‌ای در حال چرخش با سرعت پایین فشار داده می‌شود تا اره به دو نقطه‌ی کرانی برسد، سپس دیسک را از اره جدا کرده و بر می‌گردانند و روی دیگر آن را به اره نزدیک کرده و برش می‌دهند (شکل ۳-۱۳). با کامل شدن این مرحله یک ترک شورن در مرکز دیسک ایجاد می‌شود.

برای ایجاد ترک شورن در دیسک همانطور که اشاره شد، نمونه باید با دست در مقابل اره نگه داشته شود که این امر موجب دشوار شدن برش دقیق شکاف می‌شود.



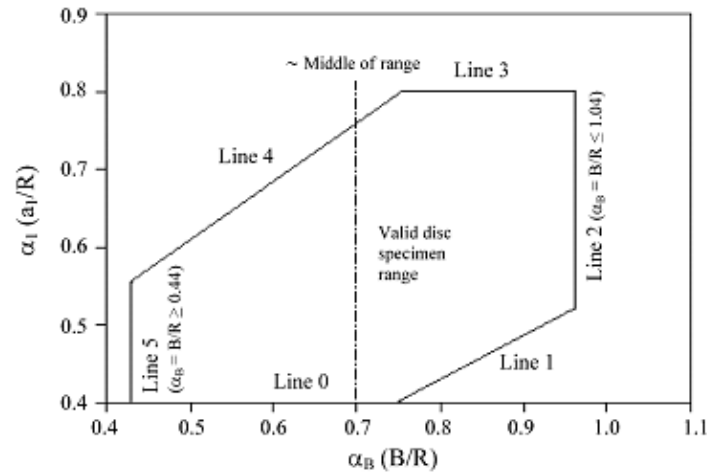
شکل ۳-۱۳- مراحل ایجاد ترک شورن در نمونه‌ی CCNBD (Chang et al., 2002)

برای بارگذاری نمونه‌ی CCNBD همانند نمونه‌ی CSTBD، از یک قاب بارگذاری با قابلیت کنترل جابجایی استفاده می‌شود. بار اعمال شده و جابجایی نیز با استفاده از یک دیتا لاگر کامپیوتری بدست می‌آید.

۳-۶-۲- انتخاب اندازه نمونه

بدلیل محدودیت‌های کرنش صفحه‌ای، تمام هندسه‌های نمونه‌ی CCNBD برای تعیین چقرمگی شکست معتبر نیستند. بررسی‌های فوول و ژو در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ نشان داد که برای معتبر شناخته شدن نتایج چقرمگی شکست، هندسه‌های این روش باید در محدوده‌ی مشخص شده در شکل (۳-۱۴) قرار گیرند (Fowell and Xu, 1994). در واقع این محدوده با حالت بحرانی نمونه یعنی وقتی جبهه‌ی ترک در فاصله‌ی بین طول اولیه و طول نهایی ترک (a_0 و a_1 در شکل ۳-۱۲-۱) قرار می‌گیرد، مرتبط است. در این محدوده مقادیر طول ترک بحرانی و ضریب شدت تنش بدون بعد، تنها به هندسه‌ی نمونه وابسته هستند. این محدوده را همچنین می‌توان بصورت زیر بیان کرد (Fowell et al., 2006):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha_1 \geq 0.4, & \text{Line0} \\ \alpha_1 \geq \frac{\alpha_B}{2} & \text{Line1} \\ \alpha_B \leq 1.04 & \text{Line2} \\ \alpha_B \leq 0.8 & \text{Line3} \\ \alpha_B \geq 1.1729(\alpha_1)^{\frac{5}{3}} & \text{Line4} \\ \alpha_B \geq 0.44 & \text{Line5} \end{array} \right.$$



شکل ۳-۱۴- محدوده‌ی مجاز هندسه نمونه در روش CCNBD (Fowell et al., 2006)

۳-۶-۳- تعیین چقرمگی شکست

بررسی نوشتجات و گزارش‌های منتشر شده نشان‌دهنده‌ی اختلاف در میان محققین در نحوه‌ی محاسبه‌ی K_{IC} در روش CCNBD می‌باشد (Iqbal et al., 2007). انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای محاسبه‌ی چقرمگی شکست مود I روش CCNBD بعنوان یکی از روش‌های پیشنهادی این انجمن، رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کرد (Fowell, 1995):

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (20-3)$$

که در آن:

D: قطر دیسک برزیلی،

B: ضخامت نمونه،

P_{max} : بار فشاری در لحظه شکست و

Y_{min}^* : ضریب شدت تنش بحرانی بدون بعد می‌باشند.

ISRM همچنین برای محاسبه‌ی ضریب بدون بعد شدت تنش بحرانی در نمونه‌ی CCNBD با

هندسه‌ی مجاز (شکل ۳-۱۴) رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کرد (Fowell, 1995):

$$Y_{min}^* = u e^{v\alpha_1} \quad (21-3)$$

که u و v ثوابتی هستند که با $(\alpha_0 = a_0/R)$ و $(\alpha_B = B/R)$ محاسبه شده‌اند (جدول ۳-۷).

جدول ۳-۷- مقادیر u و v برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD (Fowell, 1995)

α_0	0.200	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	
u									
α_B	0.680	0.2667	0.2704	0.2718	0.2744	0.2774	0.2807	0.2848	0.2888
	0.720	0.2650	0.2683	0.2705	0.2727	0.2763	0.2794	0.2831	0.2871
	0.760	0.2637	0.2668	0.2693	0.2719	0.2744	0.2781	0.2819	0.2860
	0.800	0.2625	0.2657	0.2680	0.2706	0.2736	0.2772	0.2811	0.2845
	0.840	0.2612	0.2649	0.2672	0.2699	0.2727	0.2763	0.2801	0.2831
	0.880	0.2602	0.2642	0.2668	0.2691	0.2723	0.2754	0.2793	0.2816
	0.920	0.2598	0.2634	0.2658	0.2684	0.2716	0.2747	0.2782	0.2811
	0.960	0.2593	0.2633	0.2655	0.2685	0.2710	0.2746	0.2767	0.2799
	1.000	0.2591	0.2630	0.2653	0.2679	0.2709	0.2738	0.2768	0.2786
v									
	0.680	1.7676	1.7711	1.7757	1.7759	1.7754	1.7741	1.7700	1.7666
	0.720	1.7647	1.7698	1.7708	1.7722	1.7693	1.7683	1.7652	1.7617
	0.760	1.7600	1.7656	1.7649	1.7652	1.7662	1.7624	1.7593	1.7554
	0.800	1.7557	1.7611	1.7613	1.7603	1.7596	1.7561	1.7525	1.7512
	0.840	1.7522	1.7547	1.7551	1.7548	1.7535	1.7499	1.7469	1.7473
	0.880	1.7487	1.7492	1.7478	1.7487	1.7463	1.7452	1.7403	1.7434
	0.920	1.7423	1.7446	1.7443	1.7432	1.7411	1.7389	1.7360	1.7363
	0.960	1.7370	1.7373	1.7372	1.7346	1.7344	1.7309	1.7343	1.7331
	1.000	1.7308	1.7307	1.7306	1.7297	1.7273	1.7270	1.7258	1.7302

همچنین وانگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ بر اساس آنالیزهای عددی، مقادیر تجدیدنظر شده‌ای را برای u و v پیشنهاد کردند که در جداول (۳-۸) و (۳-۹) ارائه شده‌اند. برای محاسبه‌ی u و v در تنظیمات دیگری که در جداول ارائه شده پیش‌بینی نشده‌اند، می‌توان از درونیایی خطی استفاده کرد (Wang et al., 2004).

جدول ۳-۸- مقادیر u برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD (Wang et al., 2004)

α_0	0.100	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
α_B	0.440	0.2723	0.2765	0.2788	0.2814	0.2843	0.2873	0.2906	0.2941	0.2977	0.3016	0.3055	0.3095	0.3136
	0.480	0.2754	0.2798	0.2823	0.2850	0.2879	0.2911	0.2944	0.2980	0.3017	0.3056	0.3095	0.3136	0.3176
	0.520	0.2787	0.2832	0.2858	0.2886	0.2916	0.2948	0.2983	0.3019	0.3056	0.3095	0.3135	0.3175	0.3215
	0.560	0.2821	0.2868	0.2894	0.2923	0.2954	0.2986	0.3021	0.3058	0.3095	0.3134	0.3174	0.3213	0.3252
	0.600	0.2857	0.2904	0.2931	0.2960	0.2991	0.3025	0.3060	0.3096	0.3134	0.3173	0.3212	0.3250	0.3289
	0.640	0.2894	0.2941	0.2969	0.2998	0.3029	0.3063	0.3098	0.3134	0.3172	0.3210	0.3248	0.3286	0.3323
	0.680	0.2931	0.2979	0.3006	0.3036	0.3067	0.3100	0.3135	0.3171	0.3208	0.3246	0.3284	0.3321	0.3357
	0.720	0.2969	0.3017	0.3044	0.3073	0.3104	0.3137	0.3172	0.3208	0.3244	0.3281	0.3318	0.3354	0.3389
	0.760	0.3008	0.3055	0.3082	0.3111	0.3141	0.3174	0.3208	0.3243	0.3279	0.3315	0.3351	0.3386	0.3420
	0.800	0.3047	0.3093	0.3119	0.3148	0.3178	0.3210	0.3244	0.3278	0.3313	0.3349	0.3384	0.3418	0.3450
	0.840	0.3086	0.3130	0.3156	0.3184	0.3214	0.3246	0.3278	0.3312	0.3347	0.3381	0.3415	0.3448	0.3480
	0.880	0.3125	0.3168	0.3193	0.3220	0.3250	0.3280	0.3313	0.3346	0.3380	0.3413	0.3446	0.3479	0.3509
	0.920	0.3164	0.3205	0.3230	0.3256	0.3285	0.3315	0.3347	0.3379	0.3412	0.3445	0.3477	0.3509	0.3538
	0.960	0.3203	0.3242	0.3266	0.3292	0.3320	0.3349	0.3380	0.3412	0.3445	0.3477	0.3509	0.3539	0.3568
	1.000	0.3241	0.3279	0.3302	0.3328	0.3355	0.3384	0.3414	0.3445	0.3477	0.3509	0.3540	0.3570	0.3598
	1.040	0.3281	0.3317	0.3339	0.3363	0.3390	0.3418	0.3448	0.3479	0.3511	0.3542	0.3573	0.3603	0.3631

^۱ Wang

جدول ۳-۹- مقادیر ν برای هندسه‌های متداول نمونه‌ی CCNBD (Wang et al., 2004)

α_a	0.100	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
α_b														
0.440	1.8688	1.8747	1.8752	1.8743	1.8720	1.8684	1.8638	1.8582	1.8518	1.8446	1.8369	1.8286	1.8199	1.8111
0.480	1.8341	1.8406	1.8416	1.8411	1.8395	1.8367	1.8329	1.8281	1.8227	1.8165	1.8099	1.8028	1.7955	1.7880
0.520	1.8017	1.8088	1.8102	1.8103	1.8092	1.8071	1.8040	1.8002	1.7956	1.7905	1.7850	1.7791	1.7730	1.7668
0.560	1.7717	1.7793	1.7811	1.7816	1.7811	1.7796	1.7773	1.7742	1.7706	1.7664	1.7619	1.7572	1.7523	1.7475
0.600	1.7438	1.7519	1.7540	1.7550	1.7550	1.7541	1.7525	1.7502	1.7474	1.7442	1.7407	1.7370	1.7334	1.7298
0.640	1.7180	1.7265	1.7289	1.7303	1.7308	1.7305	1.7295	1.7279	1.7259	1.7236	1.7211	1.7185	1.7160	1.7136
0.680	1.6942	1.7030	1.7057	1.7074	1.7084	1.7086	1.7082	1.7073	1.7061	1.7046	1.7030	1.7015	1.7001	1.6989
0.720	1.6723	1.6812	1.6842	1.6863	1.6876	1.6883	1.6884	1.6882	1.6877	1.6871	1.6864	1.6859	1.6855	1.6855
0.760	1.6520	1.6611	1.6643	1.6666	1.6683	1.6694	1.6702	1.6706	1.6708	1.6709	1.6711	1.6715	1.6722	1.6733
0.800	1.6334	1.6426	1.6459	1.6485	1.6505	1.6520	1.6532	1.6542	1.6551	1.6560	1.6570	1.6583	1.6600	1.6622
0.840	1.6162	1.6254	1.6288	1.6316	1.6339	1.6359	1.6375	1.6391	1.6406	1.6422	1.6440	1.6462	1.6488	1.6521
0.880	1.6004	1.6096	1.6131	1.6160	1.6186	1.6209	1.6229	1.6250	1.6271	1.6293	1.6319	1.6350	1.6385	1.6428
0.920	1.5859	1.5949	1.5984	1.6015	1.6043	1.6069	1.6093	1.6118	1.6145	1.6174	1.6207	1.6245	1.6290	1.6342
0.960	1.5725	1.5812	1.5848	1.5880	1.5910	1.5938	1.5966	1.5995	1.6027	1.6062	1.6102	1.6148	1.6201	1.6263
1.000	1.5601	1.5686	1.5721	1.5754	1.5785	1.5815	1.5846	1.5879	1.5916	1.5957	1.6003	1.6056	1.6117	1.6188
1.040	1.5486	1.5567	1.5602	1.5635	1.5667	1.5699	1.5733	1.5770	1.5810	1.5856	1.5909	1.5969	1.6038	1.6117

ایقبال^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ پس از بررسی‌های آزمایشگاهی خود دریافتند که در رابطه‌ی پیشنهادی ISRM برای محاسبه‌ی K_{IC} خطا وجود دارد و لذا پیشنهاد کردند که از رابطه‌ی پیشنهادی فوول و ژو که در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است و بصورت زیر می‌باشد، استفاده شود (Iqbal et al., 2007):

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{R}} Y_{min}^* \quad (22-3)$$

که در آن R شعاع نمونه‌ی دیسکی است.

با اینکه روش CCNBD تنها برای تعیین چقرمگی شکست مود I توسط ISRM پیشنهاد شده است، اما در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار می‌توان با ترکیب خاصی از نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه (a/R) و زاویه قرارگیری ترک نسبت به صفحه‌ی بارگذاری (β)، شرایط مود I، مود II و مود ترکیبی I-II را ایجاد کرد. برای تعیین ضرایب شدت تنش (K_I و K_{II}) نمونه‌ی CCNBD در شرایط بارگذاری مود ترکیبی I-II، محققین راه‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند. شتی و همکارانش در سال ۱۹۸۵ فرمول‌های پیشنهادی اتکینسون برای نمونه‌ی CSTBD (روابط ۳-۱۲ و ۳-۱۳) را در روش CCNBD نیز معتبر دانستند اما

^۱ Iqbal

توصیه کردند که قبل از آزمایش تحت شرایط مود ترکیبی I-II، نمونه در شرایط مود I پیش ترک‌دار^۱ شود تا ترک نوک تیز ایجاد شود (Khan, 1998).

اما ایجاد پیش ترک کاری دشوار بوده و نیاز به وسایل پیچیده برای پایش دقیق گسترش ترک دارد. گسترش ترک نباید تا پشت a_1 در شکل (۳-۱۲-c) ادامه یابد چراکه در این صورت رشد ناپایدار ترک اتفاق می‌افتد و نمونه غیرقابل استفاده می‌شود (Wittaker et al., 1992). بنابراین با توجه به این پیچیدگی‌ها و همچنین در نظر گرفتن این واقعیت که هدف از ایجاد پیش ترک در نمونه تنها برای دستیابی به نوک تیز در ترک است، برخی از محققین بدون ایجاد پیش ترک از روابط ذکر شده برای نمونه‌ی CCNBD استفاده کردند. آن‌ها معتقد بودند که این کار تاثیر قابل توجهی روی نتایج نخواهد داشت (Khan and Al-Shayea, 2000).

۳-۷- نمونه‌ی دیسک برزیلی بدون ترک (BDT^2)

نمونه‌های BDT هندسه‌ای مشابه با دیسک‌های برزیلی متداول و بدون ترک دارند. این روش توسط جو^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۲ برای تعیین چقرمگی شکست مود I معرفی شد (Guo et al., 1992). نحوه‌ی محاسبه‌ی چقرمگی شکست در این روش مشابه با نمونه‌های دیسک برزیلی بدون ترک با دو انتهای مسطح شده (FBD^4) است که در بخش بعدی تشریح می‌شود. عدم نیاز به شکاف یا ترک مزیت این روش است و یکی از ویژگی‌های این روش اینست که بجای حداکثر بار فشاری در نقطه شکست نمونه، از بار موضعی حداقل^۵ بعنوان بار بحرانی برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده می‌شود. بار موضعی حداقل (P_{min}) در شکل (۳-۱۵) تعریف شده است. در این شکل نقطه‌ی شروع ناحیه bc که رشد ناپایدار ترک

^۱ precracking

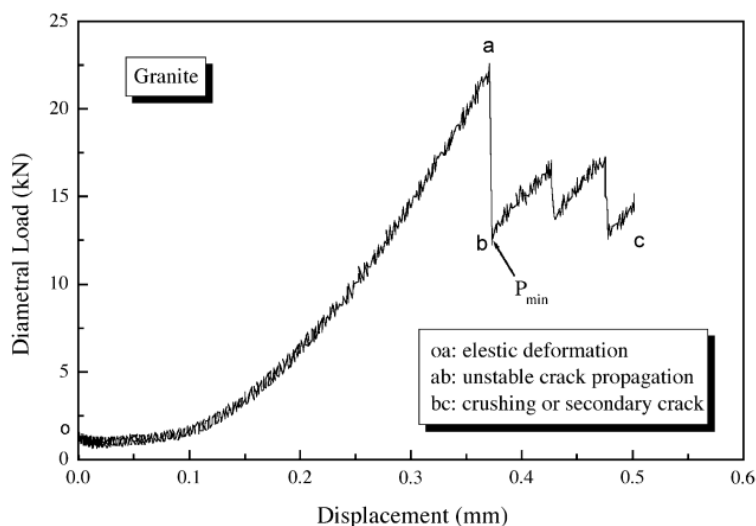
^۲ Uncracked Brazilian Disk Test

^۳ Guo

^۴ Flattened Brazilian Disc

^۵ Local minimum load

متوقف می‌شود و خردشدگی یا ترک‌های ثانویه^۱ توسعه می‌یابند بعنوان بار موضعی حداقل تعریف می‌شود. در اغلب آزمایش‌ها با متوقف کردن بارگذاری در شروع مرحله‌ی bc و سپس استفاده از گراف‌های ثبت شده می‌توان P_{min} را به سادگی تشخیص داد (Chang et al., 2002).



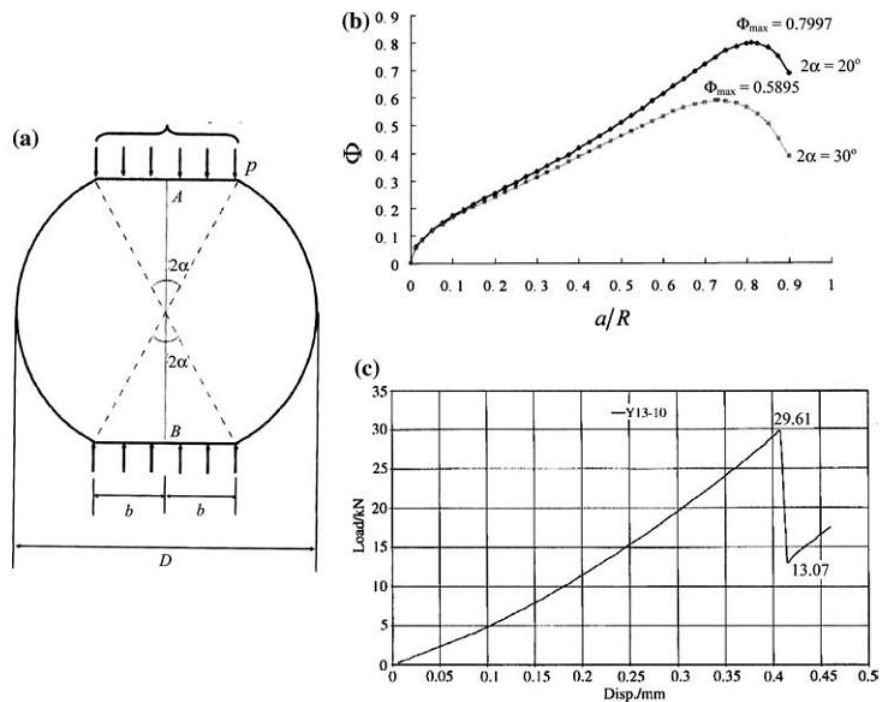
شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از منحنی شکست در روش BDT (Chang et al., 2002)

۳-۸- نمونه‌ی دیسکی با دو انتهای مسطح شده (FBD^۲)

این روش برگرفته از روش BDT است و توسط وانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ معرفی شد (Wang et al., 2004). در شکل (۳-۱۶) هندسه، تنظیمات و مقادیر ضریب شدت تنش بدون بعد در مراحل مختلف رشد ترک را که توسط وانگ و همکارانش با آنالیز المان محدود بدست آمده نشان داده شده است. انجام آزمایش‌های این روش به دلیل نیاز به منحنی دقیق بار-جابجایی برای محاسبات چقرمگی شکست، تنها با استفاده از دستگاه‌های بارگذاری با قابلیت کنترل جابجایی امکان‌پذیر است.

^۱ Crashing or secondary crack

^۲ Flattened Brazilian Disc



شکل ۳-۱۶- نمونه‌ی FBD (a) هندسه، تنظیمات و مشخصات نمونه (b) مقادیر SIF (c) مثالی از منحنی بار-جابجایی در این روش (Wang et al., 2004)

چقرمگی شکست مود I در این روش بصورت زیر محاسبه می‌شود (Wang et al., 2004):

$$K_{IC} = \frac{P_{min}}{\sqrt{R} \cdot t} \varphi_{max}^* \quad (3-23)$$

که در آن:

P_{max} : بار محلی حداقل (شکل ۳-۱۶ را ببینید)،

φ_{max}^* : حداکثر مقدار ضریب شدت تنش بدون بعد که این پارامتر با فرضیات خاصی با استفاده از

روش‌های عددی محاسبه می‌شود (شکل ۳-۱۷ را ببینید)،

R : شعاع دیسک و

t : ضخامت دیسک می‌باشند.

از مزایای این روش می‌توان به آماده‌سازی راحت نمونه اشاره کرد. با این حال نیاز به تجهیزات

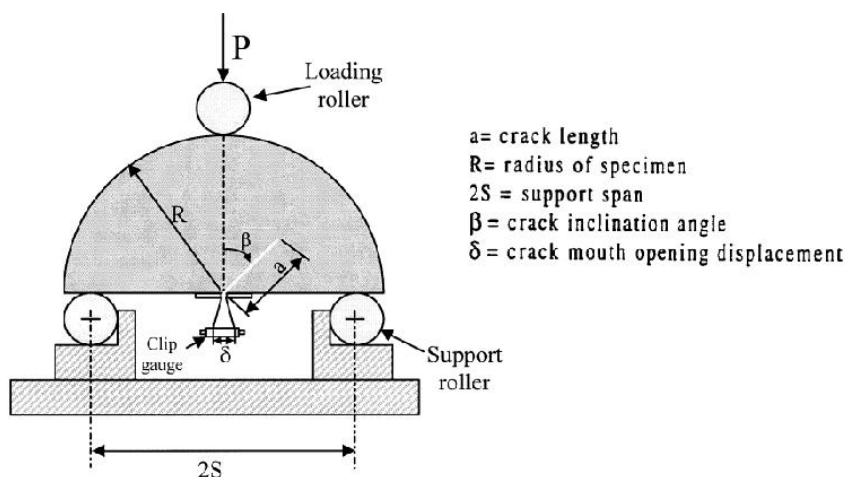
بارگذاری با حساسیت بالا و همچنین نرخ اندک موفقیت آزمایش‌ها در این روش از معایب قابل توجه آن

بشمار می‌روند (Fowell et al., 2006).

۳-۹- نمونه‌ی نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه‌نقطه‌ای (SNSCB)^۱

این روش توسط لیم و همکارانش در سال ۱۹۹۴ معرفی شد (Lim et al., 1994-a). در این تکنیک از یک نیم‌دیسک برزیلی استفاده می‌شود که شکاف مستقیمی در لبه‌ی آن ایجاد شده است و تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار می‌گیرد (شکل ۳-۱۸).

همانند روش‌های دیسک برزیلی ترک‌دار (CSTBD و CCNBD) این روش نیز قابلیت بکارگیری برای تعیین چقرمگی شکست در شرایط مود I، مود II و مود ترکیبی I-II را داراست. در این روش با تراز کردن راستای ترک در زوایای مختلف نسبت به صفحه‌ی بارگذاری (β)، مطالعه‌ی الگوهای مختلف مود ترکیبی I-II امکان‌پذیر است (شکل ۳-۱۷). مثلاً برای $\beta=0$ جهت ترک با راستای بارگذاری موازی می‌شود و لذا میدان تنش مود I خالص ایجاد می‌شود.



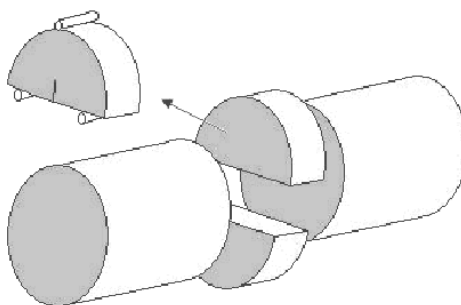
شکل ۳-۱۷- هندسه و تنظیمات روش SNSCB (Lim et al., 1994-a)

۳-۹-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی

پس از تهیه‌ی دیسک‌ها از مغزه‌های سنگ (مانند آماده‌سازی نمونه‌های روش CCNBD)، برای اطمینان از یکسان بودن ضخامت آن‌ها از پولیش استفاده می‌کنند. سپس دیسک‌ها را در امتداد قطر به دو

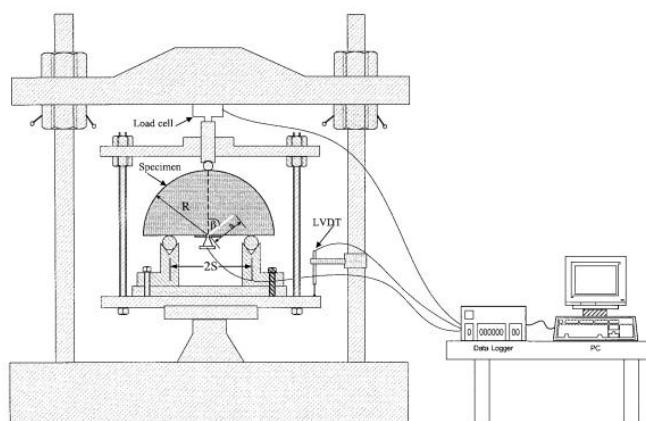
^۱Straight-Notched Semi-Circular specimen under three-point Bend

قسمت مساوی تقسیم می‌کنند و با استفاده از یک اهر سیمی شکافی با راستا و طول مورد نیاز برش داده می‌شود (شکل ۳-۱۸).



شکل ۳-۱۸- آماده سازی نمونه‌ی SNSCB (Khan and Al-Shayea, 2000)

برای بارگذاری نمونه نیز مطابق شکل (۳-۱۹) از ماشین بارگذاری با قابلیت کنترل جابجایی استفاده می‌شود و بار اعمالی و جابجایی‌های متناظر و همچنین در صورت نیاز بازشدگی ترک را با استفاده از یک دیتالاگر کامپیوتری بدست می‌آورند.



شکل ۳-۱۹- تنظیمات بارگذاری در تست نمونه‌ی SNSCB (Khan and Al-Shayea, 2000)

۳-۹-۲- تعیین چقرمگی شکست

در این روش با ترکیب طول ترک (a)، زاویه‌ی قرارگیری ترک نسبت به مسیر بارگذاری (β) و همچنین فاصله‌ی بین نقاط تکیه‌گاهی (2S) می‌توان شرایط مختلف مود ترکیبی I-II را ایجاد کرد (شکل ۳-۱۷).

چونگ^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۷ معادله‌ای را برای تعیین K_I در نمونه‌ی SNSCB توسعه دادند (Khan, 1998):

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2RB} Y_K \quad (24-3)$$

که در آن:

Y_K : ضریب شدت تنش بدون بعد است که تابعی از طول ترک بدون بعد ($\alpha=a/D$) است،

D : قطر نمونه،

P : بار فشاری،

R : شعاع نمونه و

B : ضخامت نمونه می باشند.

شرایط بارگذاری مود I را نیز می‌توان با مقادیر Y_I متناظر با $\beta=0$ ایجاد کرد. با این حال گزارشات نشان می‌دهند که مقادیر Y_I و Y_{II} در مقادیر بزرگ a/R حساس‌تر شده و لذا باید کوچکترین نسبت a/R ممکن را برای نمونه‌ها مورد استفاده قرار داد (Lim et al., 1994).

ضریب شدت تنش بدون بعد به ازای $0.25 \leq a/D \leq 0.35$ و $S/D=0.4$ می‌تواند با یک چند جمله‌ای درجه سوم بصورت زیر تقریب زده شود (Khan, 1998):

$$Y_K = 4.47 + 7.40 \frac{a}{D} - 106.0 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 433.3 \left(\frac{a}{D}\right)^3 \quad (25-3)$$

پس از آن لیم و همکارانش در سال ۱۹۹۳ با انجام مطالعات آزمایشگاهی، روابط زیر را برای تعیین ضرایب شدت تنش در نمونه‌ی SNSCB پیشنهاد کردند:

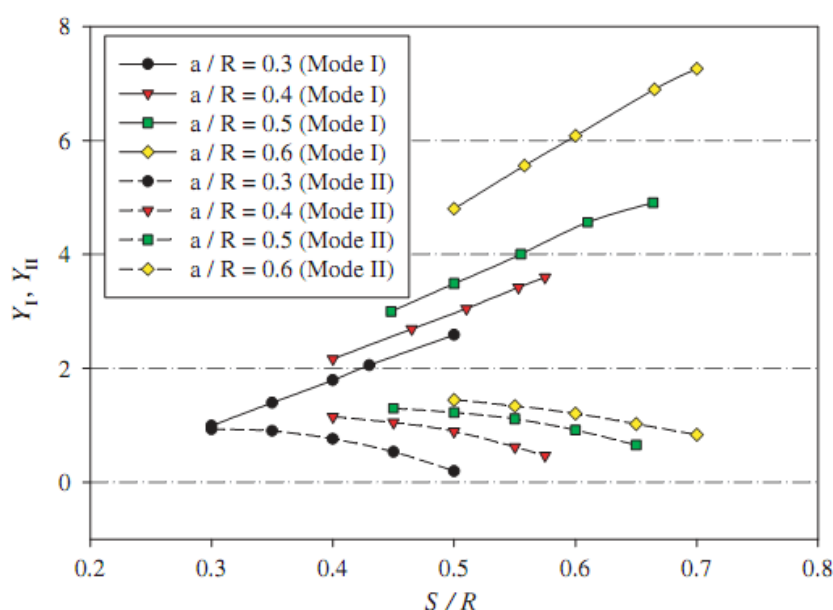
$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{DB} Y_I \left(\beta, \frac{a}{R}, \frac{S}{R}\right) \quad \text{for } \beta \geq 0 \quad (26-3)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{DB} Y_{II} \left(\beta, \frac{a}{R}, \frac{S}{R}\right) \quad \text{for } \beta > 0 \quad (27-3)$$

^۱ Chong

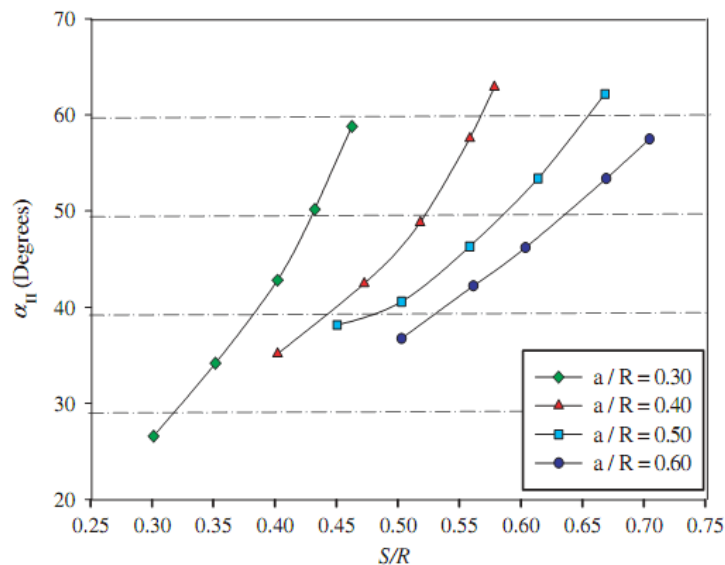
که Y_I و Y_{II} ضرایب بدون بعد شدت تنش هستند و با روش‌های عددی با توجه به مقادیر a/D و β و S محاسبه می‌شوند (Lim et al., 1993).

آیت‌اللهی و علیها در سال ۲۰۰۶ با تحلیل عددی المان محدود این نمونه، مقادیر مختلف ضرایب شدت تنش Y_I و Y_{II} را به‌ازای پارامترهای هندسی مختلف (نسبت‌های مختلف a/R و S/R) در هر دو حالت مود کششی و برشی خالص بدست آوردند که نتایج آن در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است (Ayatollahy and Aliha, 2006).



شکل ۳-۲۰- ضرایب بدون بعد شدت تنش متناظر با حالت مود I و مود II خالص برای نسبت‌های مختلف a/R و S/R (Ayatollahy and Aliha, 2006)

آن‌ها همچنین به‌ازای پارامترهای هندسی مختلف این نمونه (نسبت‌های مختلف a/R و S/R)، مقادیر زاویه‌ای متناظر با شرایط مود II خالص را نیز با تحلیل‌های عددی خود مشخص کردند که نتایج آن در شکل (۳-۲۱) ارائه شده است (Ayatollahy and Aliha, 2006).



شکل ۳-۲۱- زاویه قرارگیری ترک متناظر با حالت مود II خالص برای نسبت‌های مختلف a/R و S/R (Ayatollahy and Aliha, 2006)

الکیللیسگیل^۱ نیز در سال ۲۰۰۶ با تحلیل عددی المان محدود این نمونه، رابطه‌ی زیر را برای تعیین ضرایب شدت تنش Y_I به‌ازای پارامترهای هندسی مختلف (نسبت‌های مختلف a/R و S/R) ارائه کرد (Tutluoglu et al., 2011):

$$Y_I = \frac{0.615 - 9.676 \left(\frac{a}{R}\right) + 18.904 \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 9.987 \left(\frac{a}{R}\right)^3 + 5.235 \left(\frac{S}{R}\right)}{1 - 1.136 \left(\frac{a}{R}\right) + 0.876 \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 0.866 \left(\frac{a}{R}\right)^3 - 0.019 \left(\frac{S}{R}\right)} \quad (۳-۲۸)$$

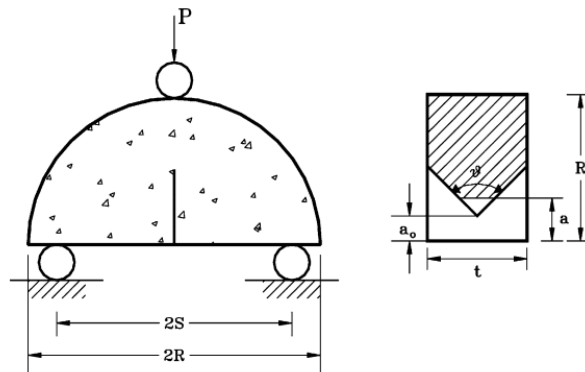
۳-۱۰- نمونه‌ی نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه‌نقطه‌ای (CNSCB^۲)

از دیگر نمونه‌های نیم‌دیسکی، نمونه‌ی CNSCB است که هندسه‌ای مشابه با نمونه‌ی SNSCB دارد. با این تفاوت که در این روش بجای شکاف مستقیم از یک شکاف شورن استفاده می‌شود (شکل ۳-۲۲). کروپو در سال ۱۹۹۷ آنالیز عددی سه‌بعدی را برای تعیین ضریب شدت تنش در نوک ترک این نمونه انجام داد. نمونه‌ی تحلیل شده توسط او دارای طول ترک اولیه (a_0) ۶ میلی‌متر و ضخامت (t) ۲۵ میلی‌متر بود

^۱ Alkilicgil

^۲ Chevron Notched Semi-Circular Bending

(Chang et al., 2002). همچنین نمونه‌ها دارای نسبت نصف دهانه به شعاع (S/R) برابر ۰/۸ و زاویه‌ی شکاف شورن ۹۰ درجه بودند.



شکل ۳-۲۲- نمونه‌ی نیم دیسکی با شکاف شورن (Chang et al., 2002)

کروپو مقدار میانگین ضریب شدت تنش نرمالایز شده در جلوی نوک ترک را بصورت زیر تعیین کرد:

$$K_{nd} = \frac{K_I}{P} t \sqrt{R} \quad (3-29)$$

که در آن:

P: بار اعمالی،

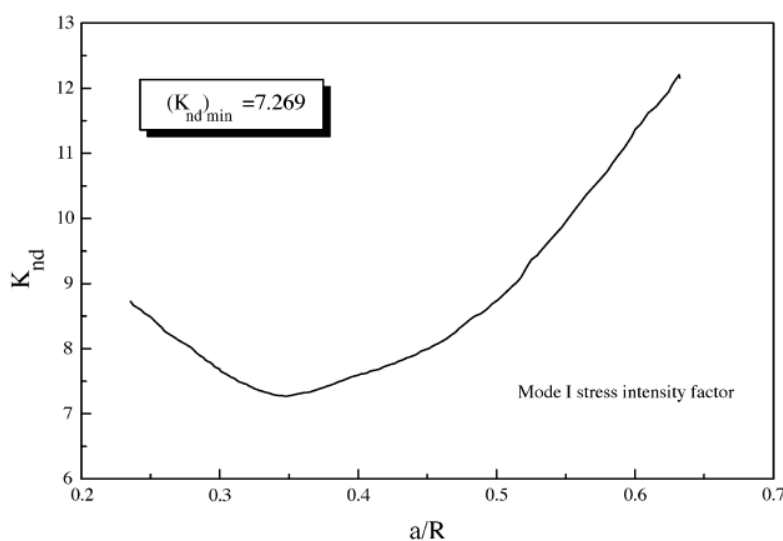
t: ضخامت نمونه و

R: شعاع نمونه می‌باشند.

در شکل (۳-۲۴) نمودار ضریب شدت تنش نرمالایز شده در مقابل طول ترک نرمالایز شده نشان داده شده است.

در این نمونه‌ها در طی افزایش بار رشد پایدار ترک آغاز می‌شود و بلافاصله پس از رسیدن به حداکثر مقاومت، گسیخته می‌شوند. بنابراین بار حداکثر به‌عنوان بار شکست بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این بار حداکثر همراه با مقدار حداقل ضریب شدت تنش نرمالایز شده چقرمگی شکست مود I را محاسبه می‌کنند (Chang et al., 2002):

$$K_{IC} = \frac{P}{t \sqrt{R}} (K_{nd})_{min} \quad (3-30)$$



شکل ۳-۲۳- نحوه‌ی تعیین حداقل ضریب شدت تنش نرمالایز شده‌ی مود I در نمونه‌ی CNSCB (Chang et al., 2002)

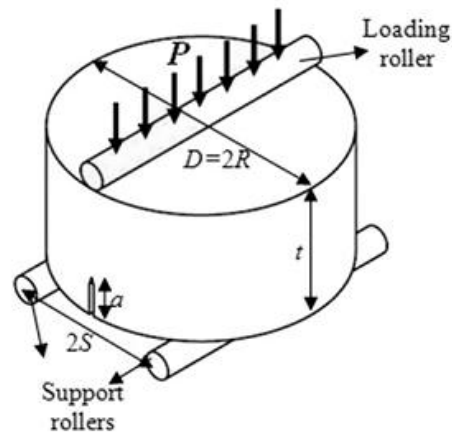
۳-۱۱- نمونه‌ی دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (SNDB)^۱

این روش توسط الکیلیسگیل در سال ۲۰۰۶ معرفی شد (Tutluoglu et al., 2011). در این روش از نمونه‌های دیسکی حاوی ترک تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای برای تعیین چقرمگی شکست مود I استفاده می‌شود.

۳-۱۱-۱- آماده‌سازی نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی

هندسه‌ی پیشنهادی نمونه SNDB و نحوه‌ی تنظیمات بارگذاری آن در شکل (۳-۲۴) نشان داده شده است. در این روش نمونه‌ی دیسکی با استفاده از غلتکی که بر روی سطح بالایی نمونه و موازی با شکاف ایجاد شده در زیر نمونه قرار داده می‌شود و دو غلتکی که در دو سمت شکاف با فواصل برابر قرار می‌گیرند، تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد. در این روش شکاف را با استفاده از اهر برش می‌دهند. توتلوگلو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی ابعاد هندسی مختلف این روش را بررسی کردند و در نهایت ابعاد هندسی پیشنهادی برای بدست آوردن نتایج معتبر چقرمگی شکست را بصورت جدول (۳-۱۰) ارائه کردند (Tutluoglu et al., 2011).

^۱ Straight Notched Disk Bending



شکل ۳-۲۴- هندسه‌ی پیشنهادی نمونه SNDB و نحوه‌ی تنظیمات بارگذاری (Tutluoglu et al., 2011)

جدول ۳-۱۰- پارامترهای هندسی پیشنهادی نمونه‌ی SNDB (Tutluoglu et al., 2011)

مقدار	پارامتر هندسی
۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳	نسبت ضخامت به شعاع نمونه (t/R)
۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸	نسبت نصف فاصله نقاط تکیه‌گاهی به شعاع نمونه (S/R)
۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹	نسبت طول ترک به ضخامت نمونه (a/t)

۳-۱۱-۲- تعیین چقرمگی شکست

چقرمگی شکست مود I در روش SNDB را می‌توان بصورت زیر محاسبه کرد (Tutluoglu et

al., 2011):

$$K_{IC} = \frac{P_{cr} \sqrt{\pi a}}{2Dt} Y_{I(CNDB)} \quad (3-31)$$

که در آن:

P_{cr} : بار در لحظه‌ی شکست،

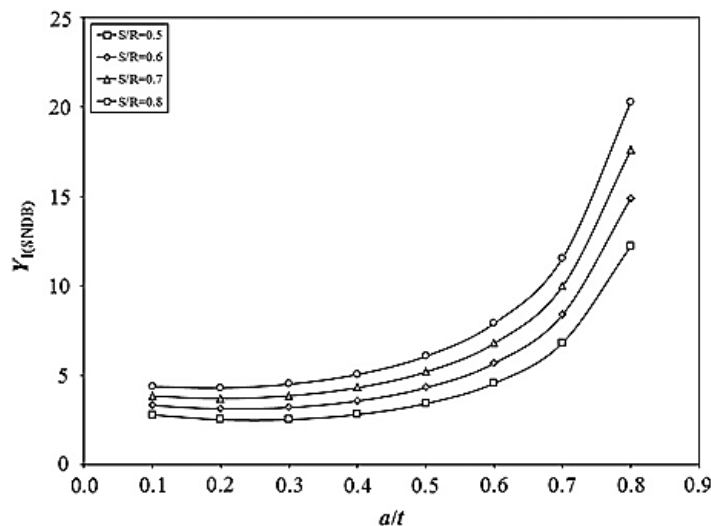
a: طول شکاف اولیه،

D: قطر دیسک،

t: ضخامت دیسک و

$Y_{I(SNDB)}$: ضریب شدت تنش بدون بعد می‌باشند.

توتلوگلو و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با استفاده از مدلسازی عددی سه‌بعدی هندسه‌های مختلف نمونه‌ی SNDB در این روش، مقادیر مختلف $Y_{I(SNDB)}$ را محاسبه کردند که در شکل (۳-۲۵) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۲۵- مقادیر مختلف ضریب شدت تنش بدون بعد نمونه‌ی SNDB به ازای نسبت‌های مختلف (a/t) و (S/R) (Tutluoglu et al., 2011)

۳-۱۲- روش PTS^۱

این روش توسط بکرز^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ برای تعیین چقرمگی شکست مود II پیشنهاد شد (Backers et al., 2002). در این روش نمونه‌های استوانه‌ای شکل که در دو سطح انتهایی آن‌ها شکاف‌های دایروی ایجاد شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. هندسه نمونه‌ی پیشنهادی این روش برای شکست برشی با استفاده از مدلسازی کامپیوتری المان محدود و انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های با هندسه مختلف (مثلاً عمق و قطر مختلف ترک) تعیین شده است. یکی از مزیت‌های این روش امکان تهیه نمونه‌ی آن از قطعات باقیمانده نمونه‌ی آزمایش شده‌ی CB است و بدین طریق می‌توان با نمونه‌ای یکسان چقرمگی شکست مود I (CB) و مود II (PTS-test) را بدست آورد. به‌همین دلیل قطر نمونه پیشنهادی در این روش را مانند روش CB، ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته‌اند. این روش در سال ۲۰۱۲

^۱ Punch Through Shear method

^۲ Backers

بعنوان روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای تعیین چقرمگی شکست مود II معرفی شد (Backers & Stephansson, 2012).

۳-۱۲-۱- آماده سازی نمونه

برای آماده‌سازی نمونه‌ها در این روش ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای شکل با طول‌های مساوی و با قطر ۵۰ میلی‌متر برش داده می‌شوند و سپس با استفاده از مته شکاف‌های دایروی را در دو انتهای نمونه ایجاد می‌کنند. آماده‌سازی نمونه‌ها در این روش باید بسیار دقیق و با دقت انجام شود تا قبل از انجام آزمایش به نمونه و شکاف‌ها آسیبی وارد نشود. پس از آماده‌سازی نمونه، آن را همراه با منگنه بار و راهنماها^۱ و صفحه‌ی کف با یک روکش پلاستیکی می‌پوشانند و سپس آن‌ها را در داخل یک ظرف فشار قرار می‌دهند تا محیط با فشار محصورکننده شبیه‌سازی شود. فشار محصورکننده P عمود بر صفحه‌ی شکاف عمل می‌کند و در این حالت قسمت داخلی نمونه با نرخ جابجایی ثابتی (مثلاً ۲ mm/min) به سمت پایین منگنه^۲ می‌شود. تنش محوری اعمال شده (σ) تنش برشی زیادی را در ناحیه‌ی بکر بین شکاف‌های نمونه ایجاد، و منجر به رشد ترک می‌شود. در این روش تجهیزات آزمایشگاهی سروو کنترل و ثبت کننده منحنی بار-جابجایی مورد نیاز است. در شکل (۳-۲۶) هندسه‌ی نمونه، نحوه‌ی بارگذاری و ابعاد نمونه‌ی پیشنهادی نشان داده شده است (Backers et al., 2002).

۳-۱۲-۲- تعیین چقرمگی شکست

در روش PTS-test چقرمگی شکست مود سنگ را بصورت زیر محاسبه می‌کنند (Backers et al., 2002):

$$K_{IC} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dy} + \frac{du}{dx} \right) \frac{E}{2(1+\nu)} \sqrt{\pi c} \quad (3-32)$$

که در آن:

^۱ load stamp with guidance

^۲ punch

E: مدول یانگ نمونه،

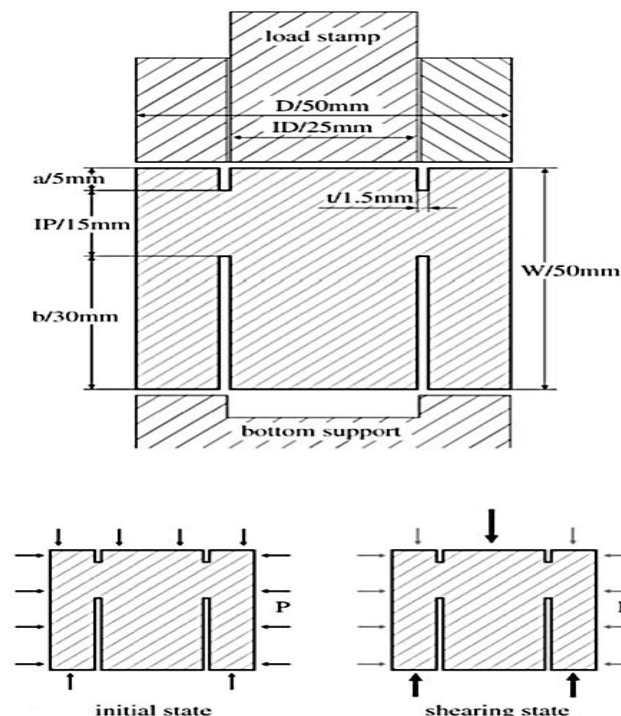
v: نسبت پواسون،

c: طول ترک اولیه که برابر با عرض شکاف (t) فرض می‌شود و

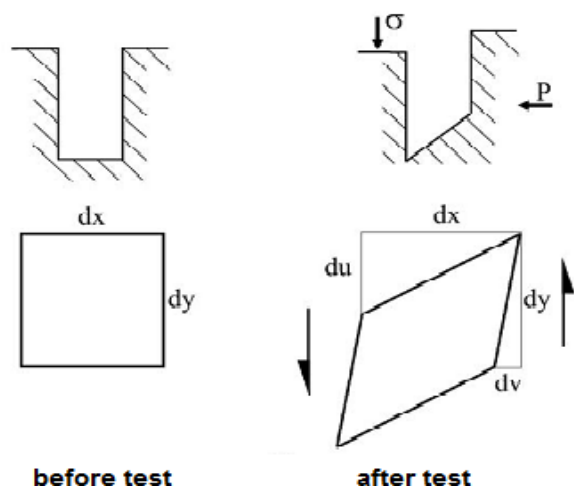
و du/dx و dv/dy : گرادیان‌های جابجایی u و v در راستای x.y هستند که در شکل (۳-۲۷) نشان

داده شده است.

اما در عمل اندازه‌گیری گرادیان‌های جابجایی در نوک ترک در طول آزمایش غیرممکن است و بنابراین بکرز و همکارانش با استفاده از روش المان محدود، آنالیز برگشتی را بر روی تنش‌های اعمالی بر نمونه انجام دادند و با بکارگیری فرضیات خاصی پیشنهاد کردند که میزان جابجایی محوری نمونه در لحظه‌ی شکست بعنوان بیشترین گرادیان جابجایی در محاسبات چقرمگی شکست در نظر گرفته شود. این میزان جابجایی نمونه در لحظه‌ی شکست را از منحنی بار-جابجایی که توسط دستگاه در حین آزمایش ثبت شده است، بدست می‌آورند (Backers et al., 2002).



شکل ۳-۲۶- هندسه نمونه و نحوه بارگذاری برای PTS-test (W ارتفاع نمونه، D قطر نمونه، ID قطر استوانه داخلی، a عمق ترک بالایی، b عمق ترک پایینی IP طول بخش بکر سنگ و عرض ترک و p فشار جانبی) (Backers et al., 2002)



شکل ۳-۲۷- نمای شماتیک از نوک ترک قبل و بعد از تغییر شکل در PTS-test (Backers et al., 2002)

۳-۱۳- جمع‌بندی

برای تعیین چقرمگی شکست موده‌های مختلف در سنگ‌ها، روش‌های گوناگونی با استفاده از نمونه‌هایی با هندسه دیسکی، نیم‌دیسکی و استوانه‌ای معرفی شده‌اند. برخی از این روش‌ها مانند نمونه‌های استوانه‌ای شکل تنها قابلیت تعیین چقرمگی شکست مود I را دارند، درحالی‌که در نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی با تنظیم راستای ترک در امتداد زاویه‌ی معینی با محور بارگذاری، می‌توان علاوه بر آن شرایط مود II و مود ترکیبی I-II را ایجاد کرد. علت استفاده از این هندسه‌های معدود برای سنگ‌ها این است که در آزمایش‌های مربوط به سنگ، باید نمونه‌های لازم را از مغزه‌های سنگی که سطح مقطع دایره‌ای دارند، جدا کرد. بنابراین با توجه به نحوه‌ی آماده‌سازی و پیچیدگی‌های مربوط به آن، استفاده از این هندسه‌ها در آزمایش‌های سنگ ارجحیت دارند. هرکدام از این روش‌ها دارای معایب و مزایای خاص مربوط به خود می‌باشند که در شرایط خاص می‌توانند نسبت به سایر روش‌ها از اولویت بیشتری برخوردار شوند. از میان تمام روش‌های ارائه شده، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای تعیین چقرمگی شکست مود I در سنگ‌ها سه روش SR، CB و CCNBD را به‌عنوان روش‌های استاندارد پیشنهادی در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۵ معرفی کرده است. این انجمن همچنین در سال ۲۰۱۲ روش PTS-test را بعنوان روش استاندارد پیشنهادی برای تعیین چقرمگی شکست مود II سنگ‌ها معرفی کرد.

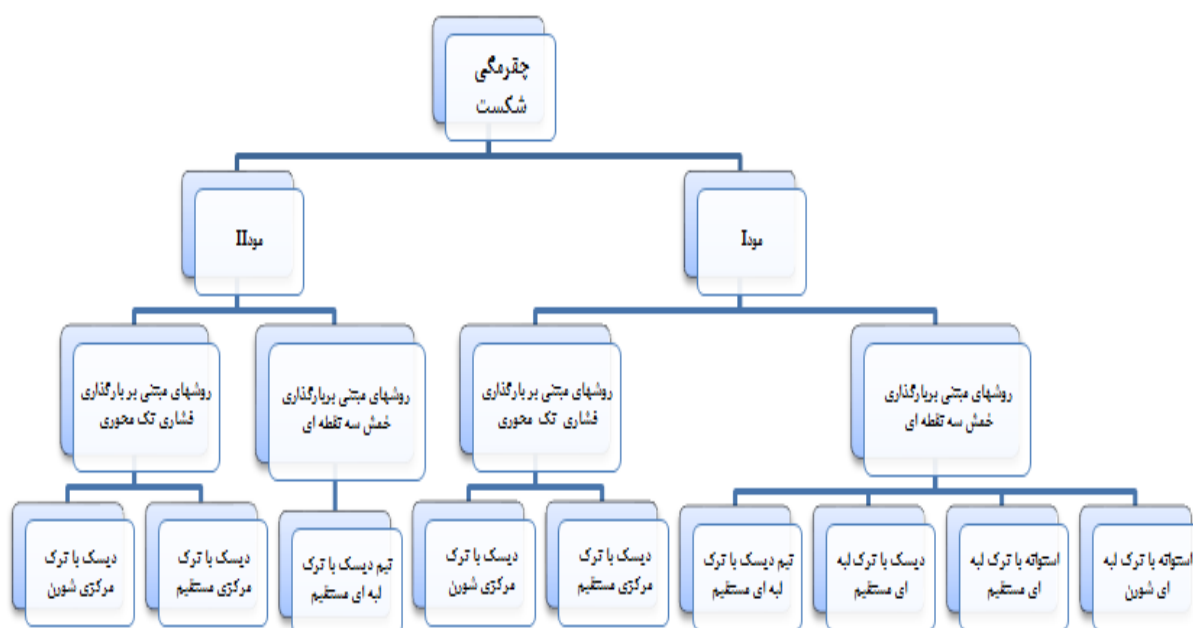
با این حال در انتخاب روشی خاص برای تعیین چقرمگی شکست سنگ، عوامل زیادی نظیر مقاومت سنگ مورد آزمایش، تجهیزات آزمایشگاهی در دسترس، سادگی یا پیچیدگی آماده سازی نمونه و... تاثیرگذارند.

فصل چهارم:

ارزیابی نتایج روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست مواد
کششی و برشی مصالح سنگی با استفاده از نمونه‌های شبه سنگی مصنوعی

۴-۱- مقدمه

در فصل سوم روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست سنگ بطور کامل تشریح شد. با توجه به امکانات و تجهیزات در دسترس و امکان ساخت نمونه‌های مصنوعی در نهایت شش روش مختلف برای تعیین چقرمگی شکست مود I و سه روش نیز برای تعیین چقرمگی شکست مود II انتخاب شدند (شکل ۴-۱). در این فصل جزئیات نحوه و روند آماده سازی نمونه‌ها، بارگذاری آن‌ها و نتایج بدست آمده از روش‌های استفاده شده در این پژوهش، مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱- خلاصه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش

۲-۴- نمونه‌های آزمایشگاهی و خواص مکانیکی آن‌ها

یکی از مهمترین چالش‌های روش‌های آزمایشگاهی مواد سنگی، تهیه نمونه‌های یکسان و با خواص مشابه برای قابل مقایسه بودن و در نتیجه اعتباربخشی به نتایج است (Ghazvinian et al., 2012) و (Nasari & Mohanty, 2008). در نمونه‌های سنگ طبیعی اغلب بدلیل وجود انواع ناپیوستگی‌ها امکان تهیه نمونه‌های همگن، ایزوتروپ، با دانه‌بندی یکنواخت و با مقاومت یکسان وجود ندارد. با توجه به ماهیت مقایسه‌ای این پژوهش و اهمیت یکسان بودن تمام شرایط نمونه‌ها، در این تحقیق از نمونه‌های شبه‌سنگی مصنوعی استفاده شده است. برای این منظور از ترکیب مناسب گچ و آب با نسبت ۳ به ۲ استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌ها (روند ساخت نمونه‌های هر روش در ادامه توضیح داده می‌شود) تمامی آن‌ها به مدت چهار شبانه‌روز در دستگاه‌های اون با دمای ثابت ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند تا آب خود را پس داده و کاملاً خشک و ترد شوند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴- تصویر یکی از دستگاه‌های اون استفاده شده برای خشک کردن نمونه‌ها

بدلیل یکسان بودن نوع گچ (گچ سپیدار دو سرنده درجه ۱ سمنان) و نسبت ترکیب گچ و آب استفاده شده (۳ به ۲) در این پژوهش، با کار دکتر میرزائی در سال ۱۳۸۸ (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۸۸) و در نتیجه یکسان بودن خواص مکانیکی این ترکیب، از تکرار آزمایش‌های مربوطه تعیین این خواص صرف‌نظر شده است. خواص مکانیکی این ترکیب در جدول (۴-۱) درج شده است.

جدول ۴-۱- خواص مکانیکی مصالح گچی استفاده شده در ساخت نمونه‌ها (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۸۸)

مقاومت فشاری تک محوری (σ_c)	مقاومت کششی (σ_t)	مدول یانگ (E)	ضریب پواسون (ν)	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	چسبندگی (C)
۱۵/۷ MPa	۳/۱۷ MPa	۳/۳۳ GPa	۰/۱۹	۱۰ درجه	۵/۳۲ MPa

۴-۳- بارگذاری نمونه‌ها

تمامی آزمایش‌ها با یک دستگاه بارگذاری سروو کنترل هیدرولیک از نوع INSTRON 8802 با قابلیت کنترل بار و جابجایی، در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. بدلیل مقاومت نسبتاً کم نمونه‌های ترک‌دار و نیاز به دقت زیاد در اندازه‌گیری میزان بار منجر به شکست هر نمونه، یک سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن در دستگاه مورد استفاده قرار گرفت که با دقت ± 1 نیوتن بار وارده را ثبت می‌کند. بارگذاری نمونه‌ها با مکانیسم کنترل جابجایی و با نرخ $0/01$ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت. برای ایجاد شرایط خمش سه نقطه‌ای در دستگاه نیز از یک فیکسچر استفاده شده است. در شکل (۴-۳) این دستگاه بارگذاری دیده می‌شود.



شکل ۴-۳- دستگاه بارگذاری مورد استفاده از نوع INSTRON 8802

پس از بارگذاری و گسیختگی نمونه‌ها و با استفاده از داده‌های نرم افزار دستگاه، منحنی بار-جابجایی رسم شده است. و از روی نمودارها با توجه به اینکه در لحظه شکست نمونه‌ها، افت قابل توجهی در نمودار

ایجاد می‌شود، بارگسیختگی برای هر آزمایش ثبت گردیده است. سپس با استفاده از این میزان بار شکست حداکثر و روابط ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها در هر روش، مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده‌اند.

۴-۴- نتایج مطالعات آزمایشگاهی مود کششی

۴-۴-۱- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای شورن تحت خمش سه نقطه‌ای (CB)

۴-۴-۱-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

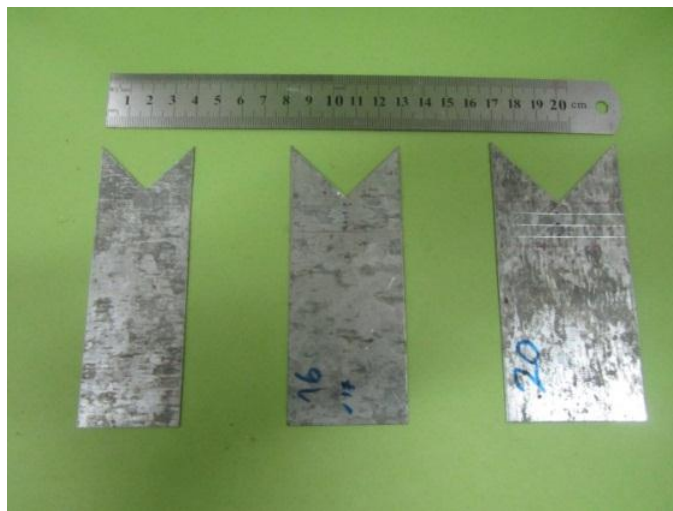
برای ساخت این نمونه‌ها از سه قالب فلزی با قطرهای ۳۵، ۴۲ و ۵۰ میلی‌متر و برای ایجاد ترک مصنوعی مورد نیاز نیز از تیغه‌ها فلزی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴- قالب‌های فلزی استفاده شده برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای

همانطور که در بخش (۳-۳) بحث شد در این روش از یک ترک لبه‌ای ۷ شکل (شورن) در مرکز نمونه استفاده می‌شود. برای این منظور یک تیغه فلزی به ازای هر قالب در نظر گرفته شد و یک برش دقیق

۷ شکل در یک سر آن ایجاد شد و سپس برای طول ترک‌های مورد نظر اندازه‌ها بطور دقیق بر روی این تیغه‌ها علامت‌گذاری شد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- تیغه‌های فلزی آماده شده برای ایجاد ترک شورن در نمونه‌های روش CB

قبل از ریختن ترکیب گچ و آب، قسمت داخلی قالب و تیغه بخوبی روغن مالیده شد تا پس از گیرش اولیه ترکیب و باز کردن پیچ‌های روی قالب و پایه‌ی آن، نمونه براحتی از قالب جدا شود. پس از گیرش اولیه ترکیب در داخل قالب که حدود ۷ تا ۱۰ دقیقه طول کشید تیغه از شکاف قالب بیرون کشیده شده و در نهایت پس از حدود ۲۰ دقیقه نیز نمونه بطور کامل از قالب جدا گردید (این روند در تمامی روش‌های بعدی نیز تکرار شد). با قرارگیری این تیغه‌ها به اندازه‌ی علامت‌گذاری شده در شکاف وسط قالب‌ها، نمونه‌ها با قطر و طول ترک‌های مختلف تهیه شدند (شکل ۴-۶). در شکل (۴-۷) تعدادی از نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- نمای از بالا از نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در قالب‌های فلزی برای ایجاد ترک شوره در نمونه‌های روش CB



شکل ۴-۷- تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای روش CB

به منظور بررسی تاثیر طول ترک بر روی نتایج این روش، چهار نسبت طول ترک به قطر نمونه (a_0/D) برابر با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۴ برای هر قطر در نظر گرفته شد. برای هر حالت نیز سه نمونه و در

مجموع ۳۶ نمونه ساخته شد که تحت بارگذاری قرار گرفتند. در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد. در شکل (۴-۸) نمونه‌ها پس از بارگذاری مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۸- تعدادی از نمونه‌های روش CB پس از بارگذاری

۴-۴-۱-۲- نتایج

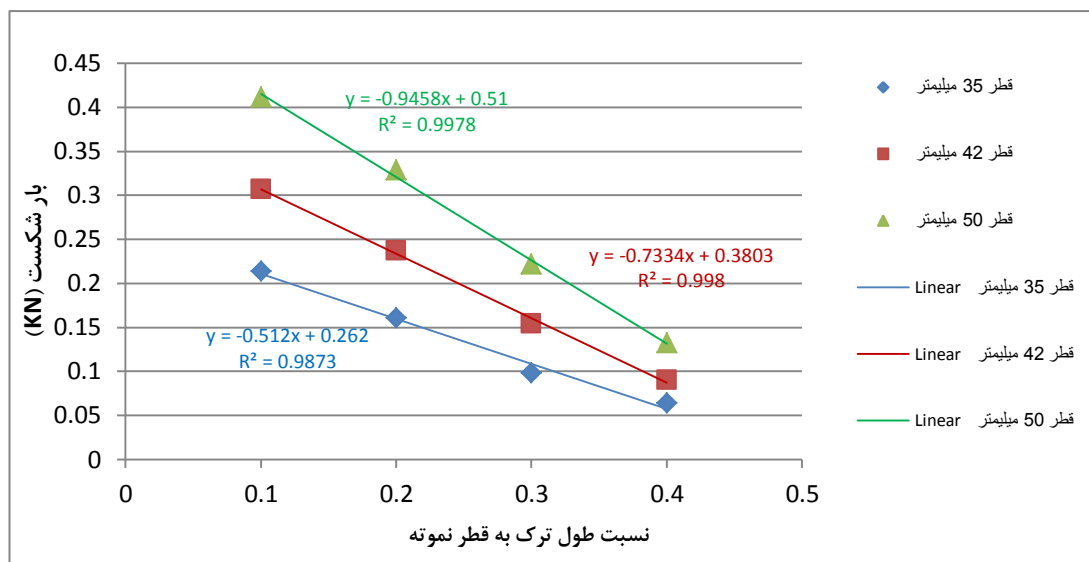
خلاصه‌ی نتایج آزمایش نمونه‌های این روش در جدول (۴-۲) ارائه شده است. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر مختلف نمونه نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. در این جدول مقادیر پارامتر بدون بعد (A_{min}) و چقرمگی شکست با استفاده از روابط (۳-۶) و (۳-۷) محاسبه شده‌اند. همچنین این نتایج به صورت نموداری در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

جدول ۴-۲- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های استوانه‌ای با ترک شورن

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa√m)	چقرمگی شکست مود I (MPa√m)	بار شکست میانگین نمونه (F_{max}) _{ave} (KN)	A_{min}	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه S/D	نسبت طول ترک به قطر نمونه a_0/D	قطر نمونه D (میلی‌متر)
۰/۲۵۸±۰/۰۳۸	۰/۲۸۸	۰/۲۱۴	۸/۸۲	۳/۳۳	۰/۱	۳۵
	۰/۲۹۸	۰/۱۶۱	۱۲/۱۸۵		۰/۲	
	۰/۲۴۲	۰/۰۹۸	۱۶/۲۰۵		۰/۳	
	۰/۲۰۴	۰/۰۶۴	۲۰/۸۸۲		۰/۴	
۰/۲۸۹±۰/۰۴۴	۰/۳۱۴	۰/۳۰۷	۸/۸۲	۳/۳۳	۰/۱	۴۲
	۰/۳۳۵	۰/۲۳۷	۱۲/۱۸۵		۰/۲	
	۰/۲۹۱	۰/۱۵۴	۱۶/۲۰۵		۰/۳	
	۰/۲۱۸	۰/۰۸۹	۲۰/۸۸۲		۰/۴	
۰/۳۱۳±۰/۰۴	۰/۳۲۵	۰/۴۱۲	۸/۸۲	۳/۳۳	۰/۱	۵۰
	۰/۳۵۸	۰/۳۲۹	۱۲/۱۸۵		۰/۲	
	۰/۳۲۱	۰/۲۲۱	۱۶/۲۰۵		۰/۳	
	۰/۲۴۷	۰/۱۳۲	۲۰/۸۸۲		۰/۴	
۰/۲۸۷±۰/۰۴۷		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

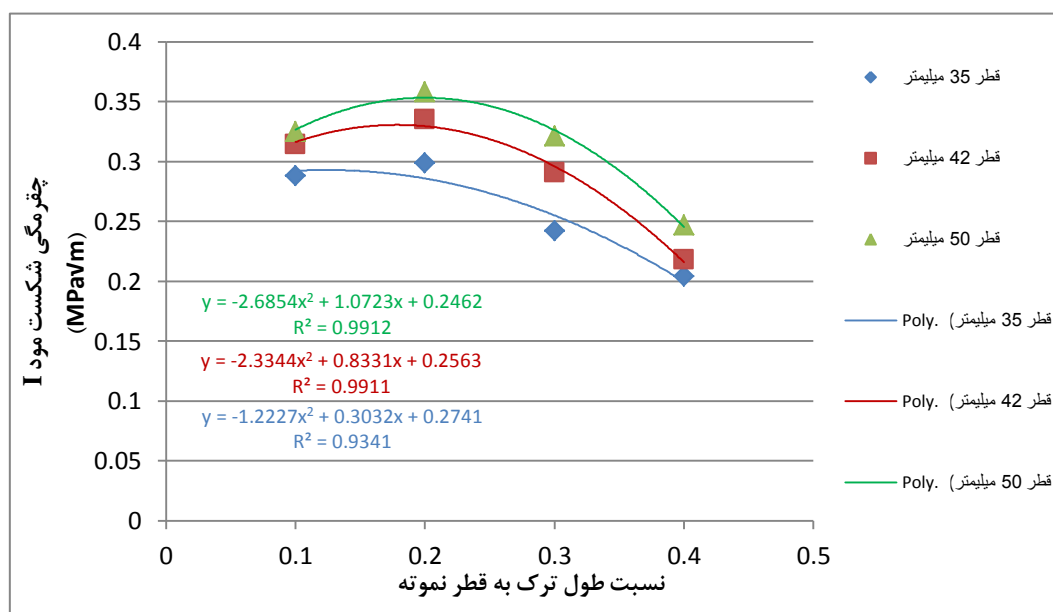
همانطور که از نتایج جدول فوق مشخص است، بیشترین مقدار بار شکست در نمونه‌های این روش ۰/۴۱۲ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۰/۰۶۴ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست برای نمونه‌های با قطر ۳۵ میلی‌متر $0.258 \pm 0.038 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۴۲ میلی‌متر $0.289 \pm 0.044 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر $0.313 \pm 0.04 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها در این روش با افزایش ۲۰ درصدی در اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۳۵ تا ۴۲ میلی‌متر) مقدار ۱۲ درصد و با افزایش ۱۹ درصدی (از قطر ۴۲ تا ۵۰ میلی‌متر) ۸ درصد افزایش یافته است.

در شکل (۴-۹) همانگونه که انتظار می‌رود، به‌ازای تمامی قطرها، کاهش مقدار بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک در آن‌ها کاملاً مشخص است. همچنین با افزایش قطر نمونه‌ها میزان بار شکست در آن‌ها نیز افزایش یافته است.



شکل ۴-۹- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

نمودارهای شکل (۴-۱۰) نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش اولیه مقادیر چقرمگی شکست در تمامی قطرها با افزایش طول ترک تا نسبت طول ترک به قطر برابر با ۰/۲ و سپس کاهش آن می‌باشد. بطوریکه در تمامی قطرها، بیشترین مقادیر چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر برابر با ۰/۲ و کمترین مقدار نیز مربوط به نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر برابر با ۰/۴ بوده است. همچنین نتایج چقرمگی شکست به‌ازای نسبت‌های طول ترک به قطر برابر با ۰/۱ و ۰/۴ کمترین پراکندگی را نشان داده‌اند.



شکل ۴-۱۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۴-۲- نمونه‌های استوانه‌ای با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (SECRBB)

۴-۴-۲-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

همانطور که در بخش (۳-۴) بیان شد و از نام آن نیز پیداست، این روش کاملاً مشابه نمونه‌های CB است، با این تفاوت که در اینجا بجای ترک شورن از ترک مستقیم استفاده می‌شود. بنابراین مراحل ساخت، قالب‌های مورد استفاده و سایر پارامترهای این نمونه‌ها با روش قبلی کاملاً یکسان است و همانطور که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است، تفاوت تنها در نحوه قرارگیری تیغه‌های فلزی در قالب است که در این روش یک ترک مستقیم در نمونه‌ها ایجاد شده است.

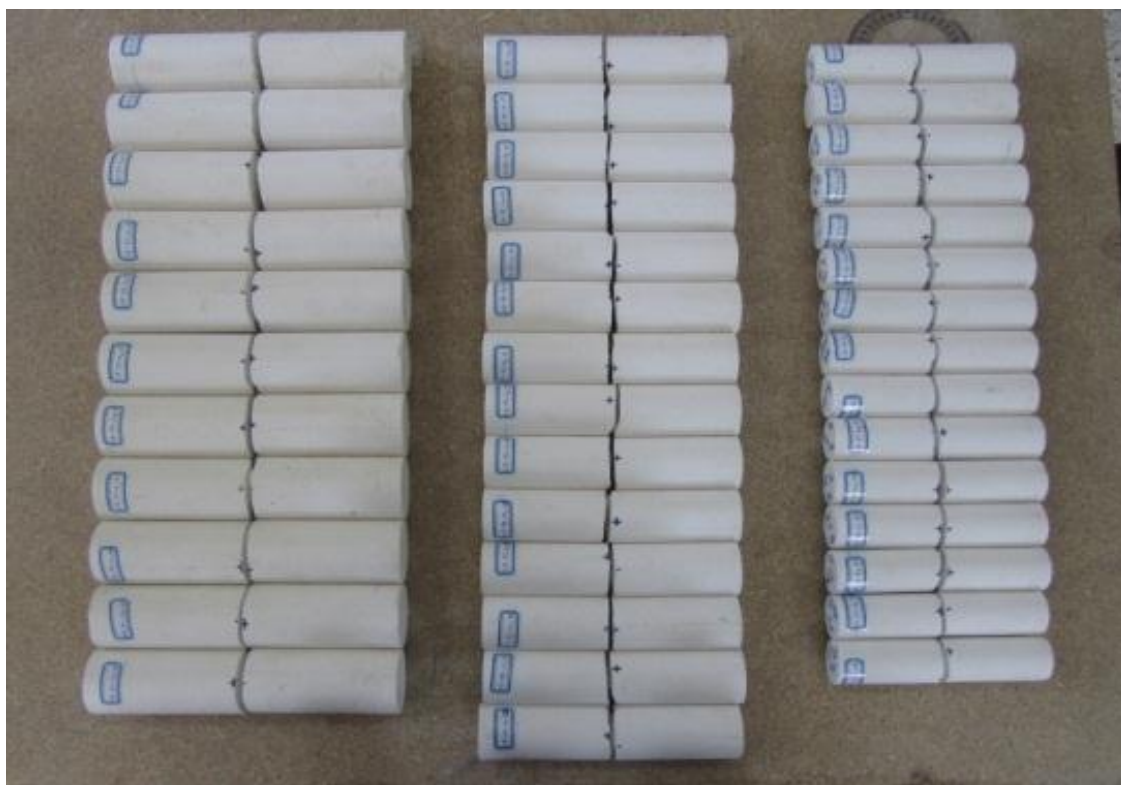


شکل ۴-۱۱- نمای جانبی و نما از بالای نحوه‌ی قرارگیری تیغه در قالب فلزی برای ایجاد شکاف مستقیم

به منظور بررسی تاثیر طول ترک بر روی نتایج این روش نیز مشابه روش قبلی، چهار نسبت طول ترک به قطر نمونه (a/D) برابر با $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ و $0/4$ برای هر قطر در نظر گرفته شد. برای هر حالت نیز سه نمونه و در مجموع ۳۶ نمونه ساخته شد که تحت بارگذاری قرار گرفتند. در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد. در شکل (۴-۱۲) نمونه‌های ساخته شده قبل از بارگذاری و در شکل (۴-۱۳) این نمونه‌ها پس از بارگذاری مشاهده می‌شوند.



شکل ۴-۱۲- تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای روش SECRRBB



شکل ۴-۱۳- تعدادی از نمونه‌های روش SECRRBB پس از بارگذاری

۴-۲-۲-۴-۴- نتایج

در جدول (۳-۴) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها در این روش آمده است. در این جدول مقادیر پارامتر بدون بعد (Y_I') و چقرمگی شکست با استفاده از روابط (۳-۸) و (۳-۹) محاسبه شده‌اند. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به صورت نموداری در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

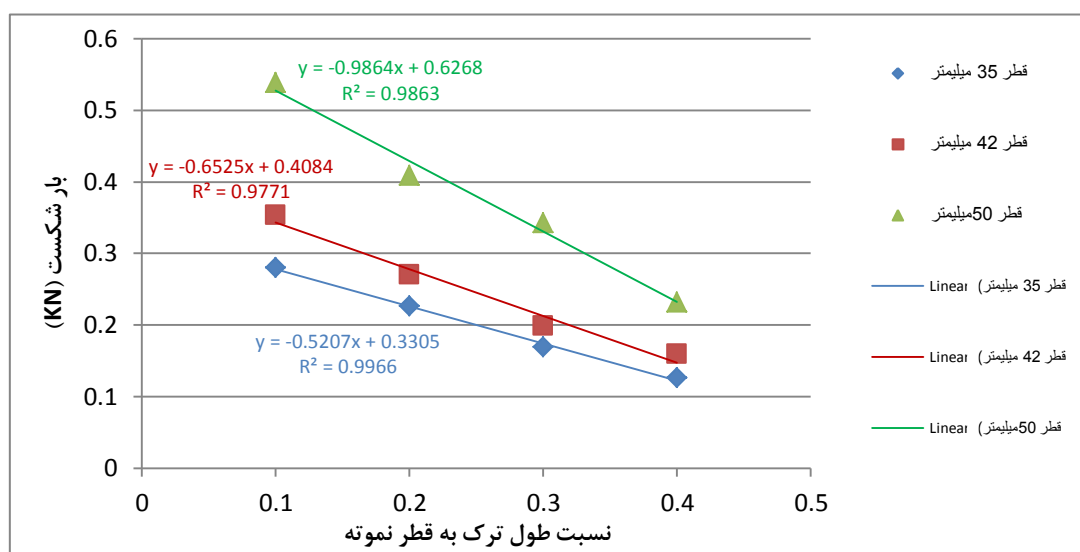
جدول ۳-۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های استوانه‌ای با ترک مستقیم

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m})	بار شکست میانگین نمونه‌ها (KN)	Y_I'	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۱۵۸ \pm ۰/۰۱۱	۰/۱۴۸	۰/۲۸۱	۴/۱۴	۳/۳۳	۰/۱	۳۵
	۰/۱۷۳	۰/۲۲۶	۶/۰۳		۰/۲	
	۰/۱۶۴	۰/۱۶۸	۷/۶۳۶		۰/۳	
	۰/۱۴۷	۰/۱۲۶	۹/۱۶۴		۰/۴	
۰/۱۴۷ \pm ۰/۰۰۶	۰/۱۴۱	۰/۳۵۳	۴/۱۴	۳/۳۳	۰/۱	۴۲
	۰/۱۵۷	۰/۲۷۰	۶/۰۳		۰/۲	
	۰/۱۴۶	۰/۱۹۹	۷/۶۳۶		۰/۳	
	۰/۱۴۱	۰/۱۶۰	۹/۱۶۴		۰/۴	
۰/۱۷۵ \pm ۰/۰۱۴	۰/۱۶۵	۰/۵۳۸	۴/۱۴	۳/۳۳	۰/۱	۵۰
	۰/۱۸۴	۰/۴۰۹	۶/۰۳		۰/۲	
	۰/۱۹۵	۰/۳۴۲	۷/۶۳۶		۰/۳	
	۰/۱۵۸	۰/۲۳۲	۹/۱۶۴		۰/۴	
۰/۱۶۰ \pm ۰/۰۱۵		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

نتایج ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش ۰/۵۳۸ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۰/۱۲۶ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست برای نمونه‌های با قطر ۳۵ میلی‌متر $0.158 \pm 0.011 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۴۲

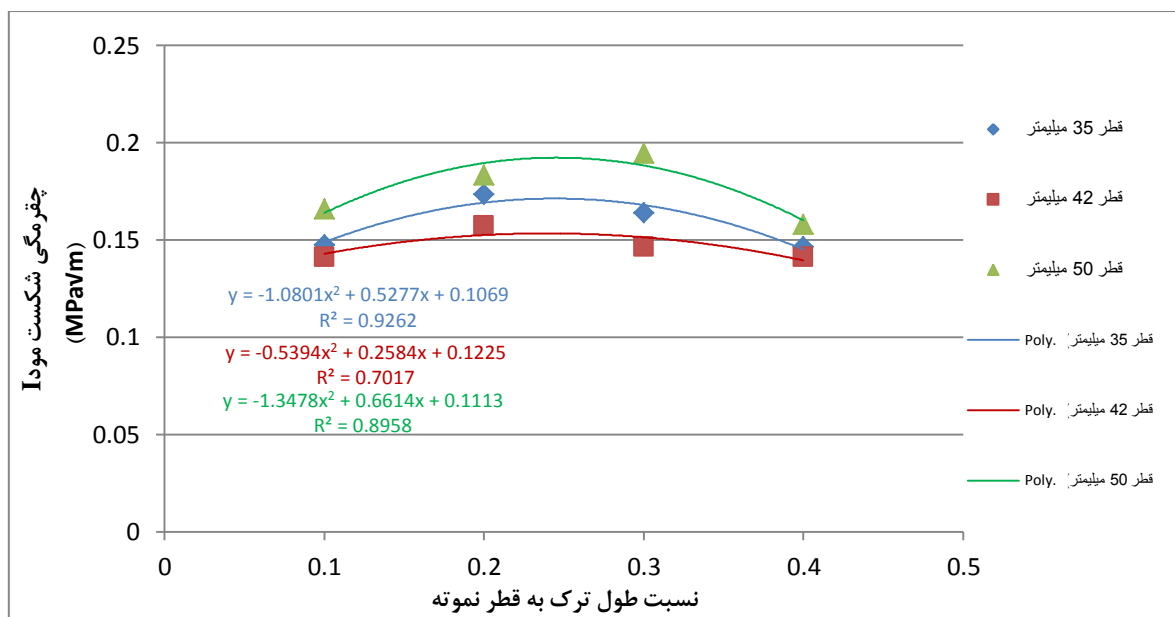
میلی‌متر $0.147 \pm 0.006 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر $0.175 \pm 0.014 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد.

در شکل (۴-۱۴) همانگونه که انتظار می‌رود، به‌ازای تمامی قطرها، کاهش مقدار بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک در آن‌ها کاملاً مشخص است. همچنین با افزایش قطر نمونه‌ها میزان بار شکست در آن‌ها نیز افزایش یافته است که این افزایش در نمونه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر قابل ملاحظه بوده است.



شکل ۴-۱۴- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SECRRBB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

هرچند روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با بزرگتر شدن اندازه‌ی نمونه در این روش مطابق شکل (۴-۱۵) منظم نیست اما نکته قابل توجه در این نتایج پیوستگی قابل توجه مقادیر در تمام قطرها به ویژه قطر ۴۲ میلی‌متر می‌باشد که انحراف معیار استاندارد مقادیر آن تنها 0.006 بوده است.



شکل ۴-۱۵- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SECRBB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۴-۳- نمونه‌های دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (SNDB)

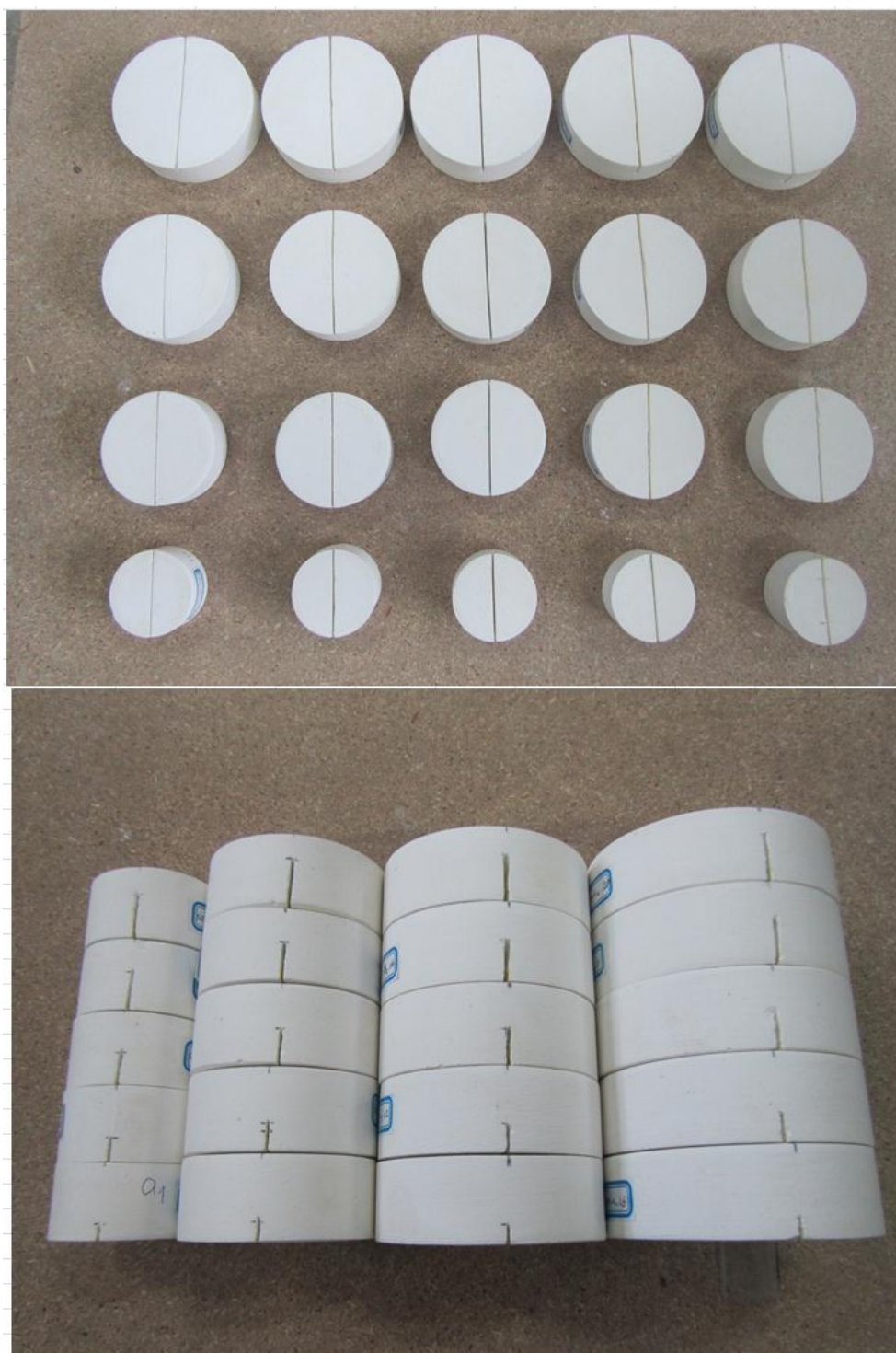
۴-۴-۳-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های این روش با استفاده از چهار عدد قالب فلزی با قطرهای ۵۴، ۷۵، ۸۷ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. در شکل (۴-۱۶) یکی از قالب‌ها نشان داده شده است. قبل از ریختن ترکیب در قالب ابتدا قسمت داخلی قالب کاملاً با روغن چرب شده تا پس از گیرش ترکیب در داخل آن، با بازکردن پیچ‌های پایه‌ی قالب و پیچ روی آن، نمونه‌ها با راحتی از قالب جدا شوند.



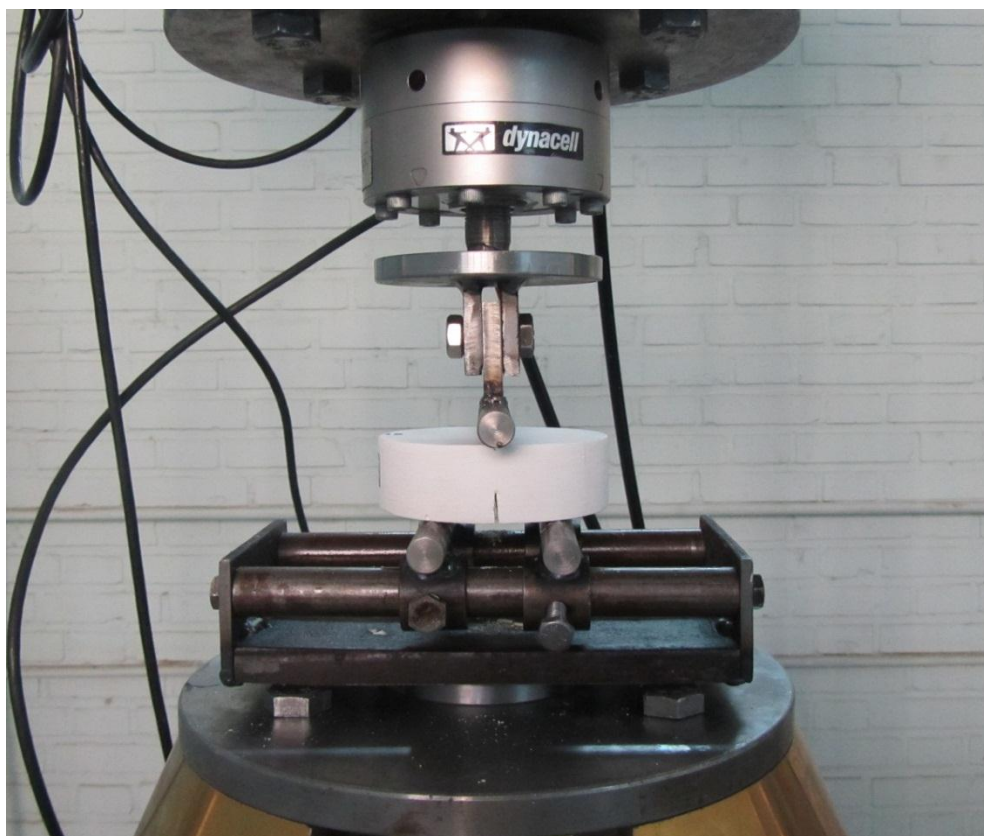
شکل ۴-۱۶- یکی از قالب‌های فلزی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های دیسکی سالم

با این کار نمونه‌های دیسکی سالم و بدون ترک با ضخامت ثابت ۳۰ میلی‌متر ساخته شدند. سپس برای ترک‌دار کردن آن‌ها، پس از علامت‌گذاری دقیق روی نمونه‌ها، با استفاده از یک تیغه کمان‌اره دستی با ضخامت حدود ۰/۴ میلی‌متر، ترک‌های مورد نظر بر روی نمونه‌ها بطور دقیق ایجاد شدند. به منظور بررسی تاثیر طول ترک بر نتایج این روش نیز به‌ازای هر قطر پنج طول ترک مختلف بصورت نسبت طول ترک به ضخامت دیسک (a/t) برابر با ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شد و بر روی نمونه‌ها ایجاد شد. برای هر حالت نیز دو نمونه و در مجموع ۴۰ نمونه ساخته شد. در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر دو نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد. در شکل (۴-۱۷) یک‌سری از نمونه‌های آماده شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷- تعدادی از نمونه‌های ترک‌دار شده در روش SNDB

برای ایجاد شرایط بارگذاری خمش سه نقطه‌ای در این روش از همان فیکسچر روش‌های قبلی استفاده شد (شکل ۴-۱۸). همچنین نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه ($2S/D$) در تمام آزمایش‌های این روش ثابت و برابر با $0/5$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱۸- نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های روش SNDB

۴-۳-۲- نتایج

در جدول (۴-۴) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها در این روش آمده است. در این جدول مقادیر پارامتر بدون بعد (Y_I) با استفاده از نمودارهای شکل (۳-۲۵) و مقادیر چقرمگی شکست نیز با استفاده از رابطه‌ی (۳-۳۱) محاسبه شده‌اند. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به صورت نموداری در شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

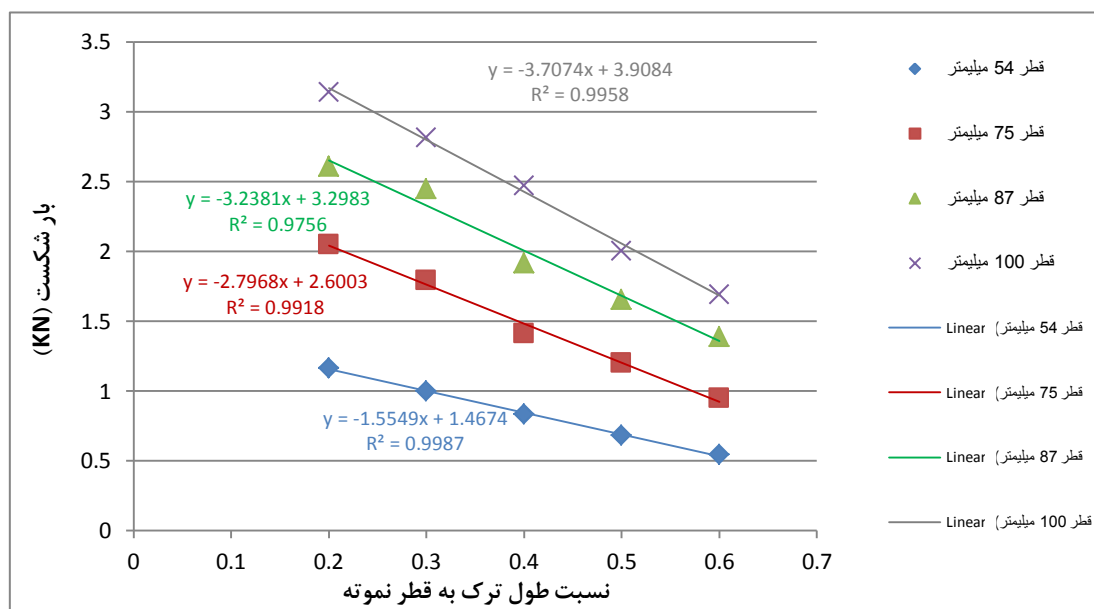
نتایج ارائه شده در جدول زیر نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش $3/609$ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز $0/544$ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست برای نمونه‌های با قطر 54 میلی‌متر $0/146 \pm 0/022 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر 75 میلی‌متر $0/184 \pm 0/027 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر 87 میلی‌متر $0/218 \pm 0/041 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در

نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $MPa \cdot m^{1/2}$ 0.231 ± 0.045 می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۳۹ درصدی در اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۵۴ تا ۷۵ میلی‌متر) مقدار ۲۶ درصد، با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۹ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۶ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴-۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم

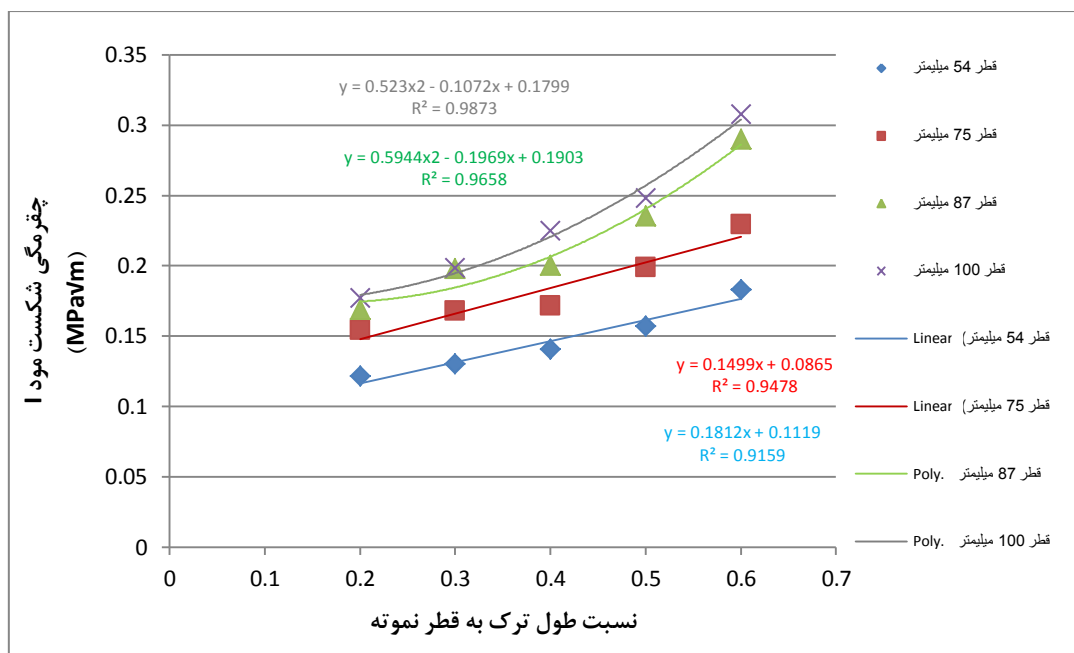
چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد ($MPa \cdot m$)	چقرمگی شکست مود I ($MPa \cdot m$)	بار شکست میانگین نمونه (KN)	Y_1	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	نسبت طول ترک به ضخامت نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
0.146 ± 0.022	0.122	1.1652	2.461	0.5	0.2	54
	0.13	0.9981	2.51		0.3	
	0.141	0.8345	2.81		0.4	
	0.157	0.6854	3.42		0.5	
	0.183	0.5441	4.58		0.6	
0.184 ± 0.027	0.154	2.0519	2.461	0.5	0.2	75
	0.168	1.7919	2.51		0.3	
	0.171	1.4128	2.81		0.4	
	0.199	1.2037	3.42		0.5	
	0.229	0.9476	4.58		0.6	
0.218 ± 0.041	0.169	2.6089	2.461	0.5	0.2	87
	0.198	2.4495	2.51		0.3	
	0.2	1.9153	2.81		0.4	
	0.235	1.6538	3.42		0.5	
	0.289	1.3877	4.58		0.6	
0.231 ± 0.045	0.177	3.1416	2.461	0.5	0.2	100
	0.198	2.8116	2.51		0.3	
	0.225	2.4719	2.81		0.4	
	0.248	2.004	3.42		0.5	
	0.308	1.6939	4.58		0.6	
0.195 ± 0.048		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

روند تغییرات بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک و افزایش اندازه نمونه‌ها در شکل (۴-۱۹) مشخص شده است. در تمامی قطرها با افزایش طول ترک مقاومت نمونه‌ها نیز کمتر شده است. همچنین افزایش قطر نیز موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است.



شکل ۴-۱۹- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNDB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

با توجه به نمودارهای شکل (۴-۲۰) ملاحظه می‌شود که در تمامی قطرها با افزایش طول ترک در نمونه‌ها مقدار چقرمگی شکست نیز افزایش یافته است و روند تغییرات تقریباً مشابه می‌باشد. با این حال بیشترین میزان جهش در مقادیر چقرمگی شکست در نمونه‌های با نسبت طول ترک به ضخامت نمونه‌ی برابر با ۰/۶ دیده می‌شود. این میزان افزایش در مقادیر چقرمگی شکست با افزایش در اندازه‌ی نمونه‌ها نیز کاملاً مشخص است.



شکل ۴-۲۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNDB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۴-۴- نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه‌نقطه‌ای (SNSCB)

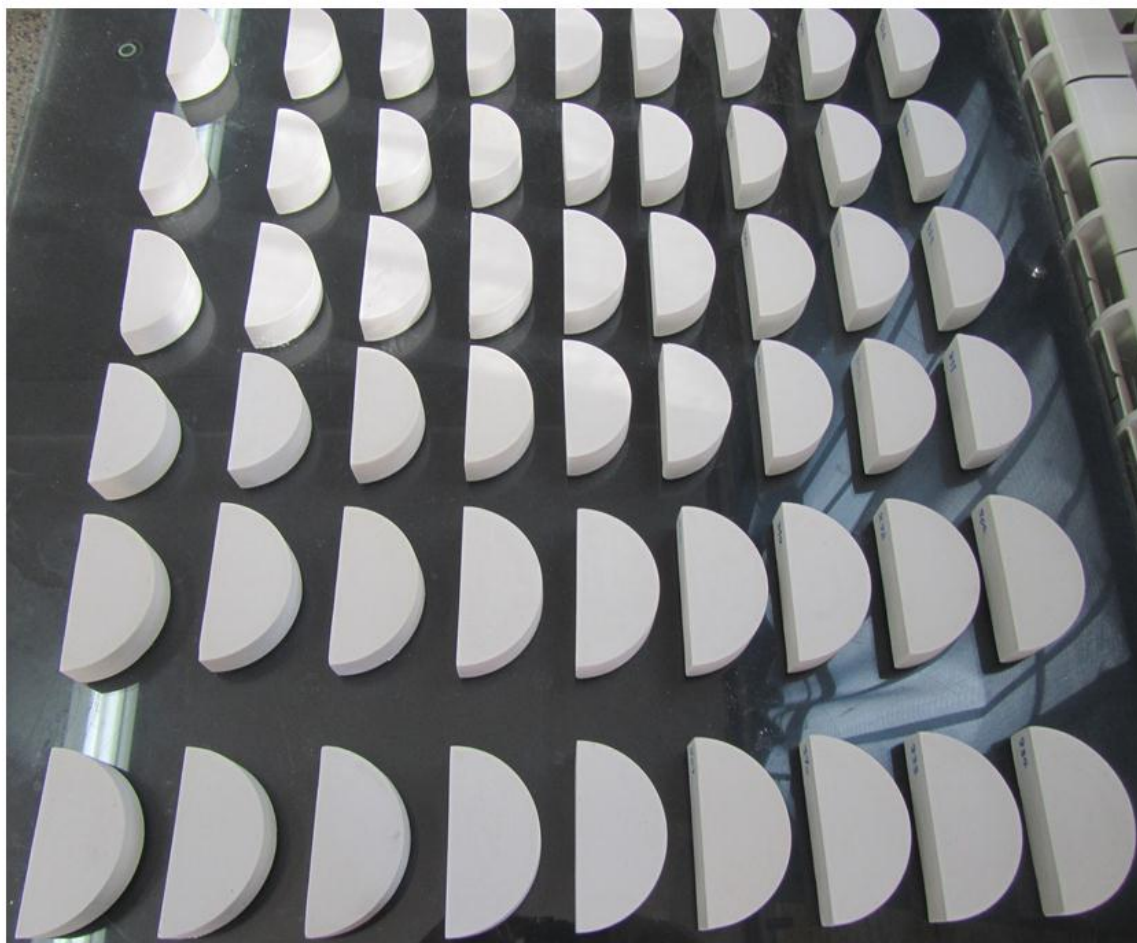
۴-۴-۴-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها در این روش از سه قالب فلزی با قطرهای ۸۷، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. مطابق شکل (۴-۲۱) با توجه به شکاف تعبیه شده در کف قالب‌ها و استفاده از تیغه‌های فلزی که با قرار گرفتن در وسط قالب آن‌را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کنند، برای هر قالب در هر بار دو نمونه‌ی نیم‌دیسکی کاملاً یکسان و بدون ترک ساخته شد.



شکل ۴-۲۱- قالب‌های فلزی و تیغه‌های تقسیم‌کننده‌ی آن‌ها برای ساخت نمونه‌های نیم‌دیسکی سالم

پس از جداسازی نمونه‌ها از قالب و خشک شدن آن‌ها، هر دو طرف نمونه‌ها بطور دقیق و مطابق با طول ترک‌های مورد نظر خط‌کشی شده و سپس با استفاده از کمان اره دستی با ضخامت $0/4$ میلی‌متر، نمونه‌ها بطور دقیق ترک‌دار شدند. در شکل (۴-۲۲) تعدادی از نمونه‌ها پیش و پس از ترک‌دار شدن نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۴-۲۲- تعدادی از نمونه‌های نیم‌دیسکی (الف) نمونه‌های سالم (ب) نمونه‌ها پس از ترک‌دار شدن

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر در دستگاه بارگذاری شرایط بارگذاری خمش سه نقطه‌ای ایجاد شده و نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی بارگذاری شدند. به منظور بررسی طول ترک بر نتایج این روش، برای هر قطر سه نسبت طول ترک به شعاع نمونه (a/R) برابر با $0/3$ ، $0/4$ و $0/6$ در نظر گرفته شد. همچنین نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه‌ها ($2S/D$) برای نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر $0/3$ و $0/4$ ، برابر با $0/4$ و برای نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر $0/6$ برابر با $0/5$ و ثابت در نظر گرفته شد. در این روش برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۲۷ نمونه ساخته شد. در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد.

۴-۴-۲- نتایج

در جدول (۴-۵) و جدول (۴-۶) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها در این روش آمده است. در این جداول برای محاسبه مقادیر پارامتر بدون بعد (Y_1) دو حالت در نظر گرفته شده است.

A. در حالت اول این مقادیر با استفاده از نمودارهای شکل (۳-۲۰) و

B. در حالت دوم با استفاده از رابطه‌ی (۳-۲۸) محاسبه شده‌اند.

همچنین مقادیر چقرمگی شکست نیز با استفاده از رابطه‌ی (۳-۲۶) محاسبه شده‌اند. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به صورت نموداری برای حالت اول (A) در شکل (۴-۲۴) و برای حالت دوم (B) در شکل (۴-۲۵) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برآزش ممکن نیز رسم شده است.

نتایج ارائه شده در جدول (۴-۵) نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش $3/201$ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز $1/146$ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست (با استفاده از حالت A) برای نمونه‌های با قطر 75 میلی‌متر $MPa.m^{1/2}$ $0/937 \pm 0/245$ ، نمونه‌های با قطر 87 میلی‌متر $MPa.m^{1/2}$ $1/011 \pm 0/346$ و در نمونه‌های با قطر 100 میلی‌متر $MPa.m^{1/2}$ $1/205 \pm 0/365$ بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی

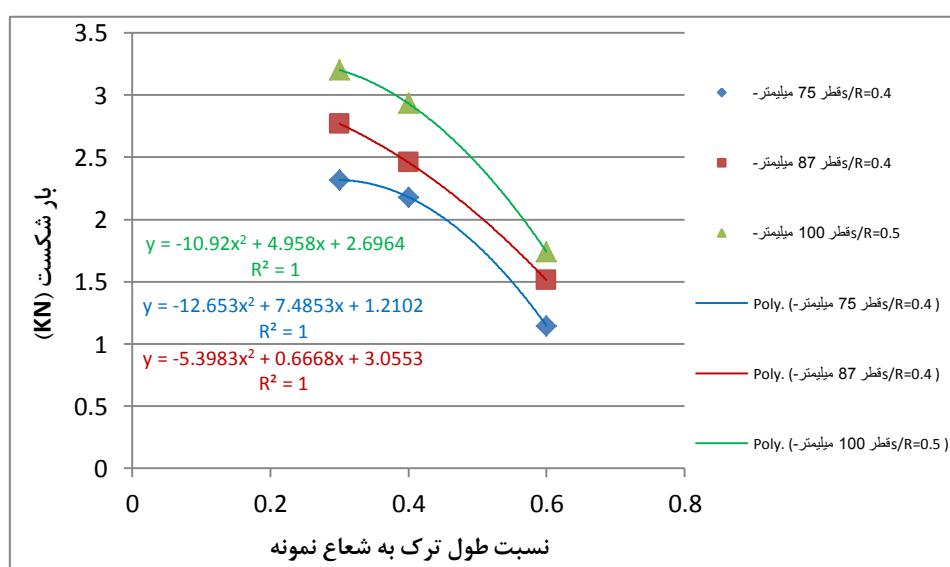
شکست نمونه‌ها با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۴ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۸/۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴-۵- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم (حالت A)

قطر نمونه (میلی‌متر)	نسبت طول ترک به شعاع نمونه	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	Y_1 (روش A)	بار شکست میانگین (KN)	چقرمگی شکست مود I (MPa√m)	چقرمگی شکست میانگین ± انحراف معیار استاندارد (MPa√m)
۷۵	۰/۳	۰/۴	۱/۸۲	۲/۳۱۷	۰/۷۰۵	۰/۹۷۳±۰/۲۴۵
	۰/۴	۰/۴	۲/۱۸	۲/۱۷۹	۰/۹۱۷	
	۰/۶	۰/۵	۴/۷۹	۱/۱۴۶	۱/۲۹۷	
۸۷	۰/۳	۰/۴	۱/۸۲	۲/۷۶۹	۰/۷۸۲	۱/۱۱±۰/۳۴۶
	۰/۴	۰/۴	۲/۱۸	۲/۴۵۸	۰/۹۵۹	
	۰/۶	۰/۵	۴/۷۹	۱/۵۱۲	۱/۵۸۸	
۱۰۰	۰/۳	۰/۴	۱/۸۲	۳/۲۰۱	۰/۸۴۳	۱/۲۰۵±۰/۳۶۵
	۰/۴	۰/۴	۲/۱۸	۲/۹۳۲	۱/۰۶۸	
	۰/۶	۰/۵	۴/۷۹	۱/۷۴	۱/۷۰۵	
مقدار میانگین چقرمگی شکست ± انحراف معیار استاندارد					۱/۰۹۶±۰/۳۳۷	

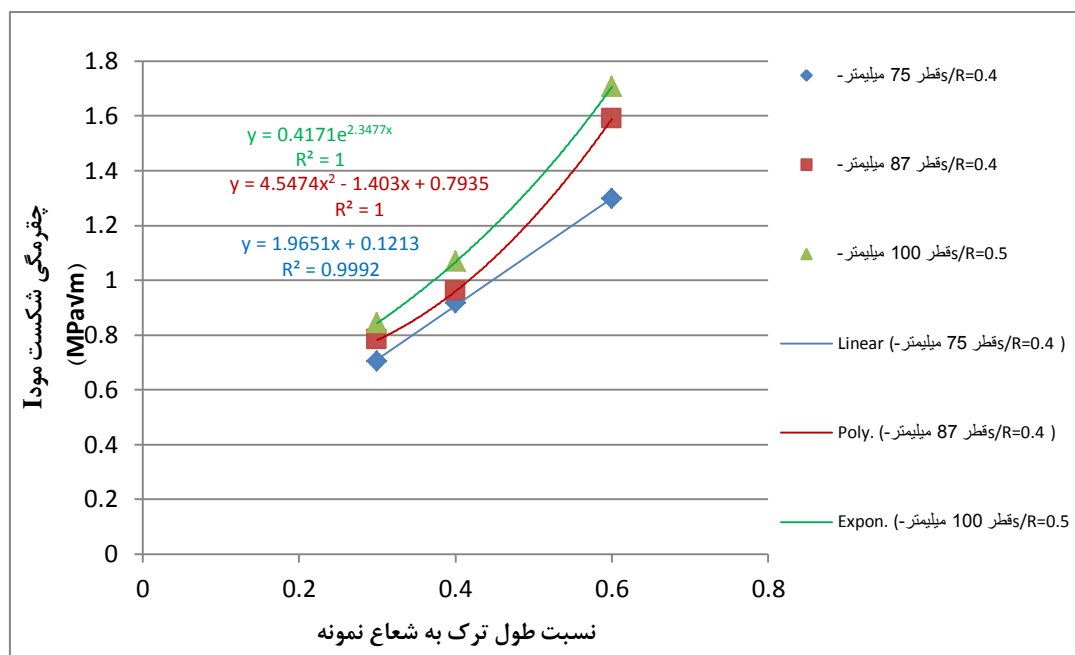
مطابق با شکل (۴-۲۳) بار شکست نمونه‌ها در این روش نیز مطابق انتظار بوده و با افزایش طول ترک

در نمونه‌ها کاهش یافته و با بیشتر شدن اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافته است.



شکل ۴-۲۳- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

دقت در نتایج جدول فوق و همچنین نمودارهای شکل (۴-۲۴) نشان می‌دهد نتایج چقرمگی شکست در حالت A به تغییر طول ترک بسیار حساس بوده و با تغییرات آن نسبت مستقیم دارند. همچنین به نظر می‌رسد مقدار نوسانات این مقادیر هم با افزایش طول ترک و هم با افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها بیشتر شده است.

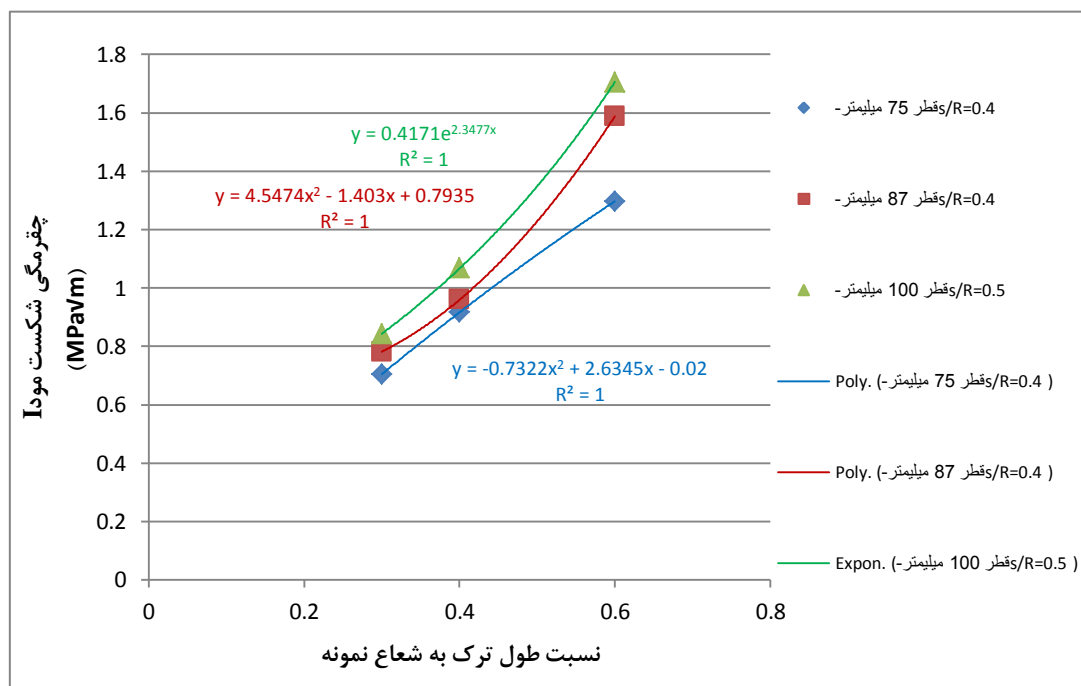


شکل ۴-۲۴- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A)

جدول ۴-۶- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم (حالت B)

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa√m)	چقرمگی شکست مود I (MPa√m)	بار شکست میانگین (KN)	Y_1 (روش B)	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	نسبت طول ترک به شعاع نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۹۳±۰/۲۵۸	۰/۶۷۸	۲/۳۱۷	۱/۷۵۱	۰/۴	۰/۳	۷۵
	۰/۸۲۷	۲/۱۷۹	۱/۹۶۶	۰/۴	۰/۴	
	۱/۲۸۵	۱/۱۴۶	۴/۷۴۶	۰/۵	۰/۶	
۱/۰۶۴±۰/۳۶۴	۰/۷۵۲	۲/۷۶۹	۱/۷۵۱	۰/۴	۰/۳	۸۷
	۰/۸۶۵	۲/۴۵۸	۱/۹۶۶	۰/۴	۰/۴	
	۱/۵۷۴	۱/۵۱۲	۴/۷۴۶	۰/۵	۰/۶	
۱/۱۵۵±۰/۳۸۳	۰/۸۱۱	۳/۲۰۱	۱/۷۵۱	۰/۴	۰/۳	۱۰۰
	۰/۹۶۳	۲/۹۳۲	۱/۹۶۶	۰/۴	۰/۴	
	۱/۶۸۹	۱/۷۴	۴/۷۴۶	۰/۵	۰/۶	
۱/۰۴۹±۰/۳۵۲		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

نتایج جدول (۴-۶) نشان می‌دهند، مقدار میانگین چقرمگی شکست (در حالت B) برای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.93 \pm 0.258 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $1.064 \pm 0.364 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $1.155 \pm 0.383 \text{ MPa.m}^{1/2}$ بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با استفاده از حالت B، با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۴ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۸/۵ درصد افزایش یافته است. بنابراین میزان تغییرات مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش اندازه در چقرمگی شکست با استفاده از حالت B تقریباً ۷ درصد کمتر از نتایج متناظر محاسبه شده با حالت A می‌باشد. روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با تغییر طول ترک در حالت B (شکل ۴-۲۵) نیز مشابه با نتایج متناظر با حالت A می‌باشد.



شکل ۴-۲۵- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B)

۴-۴-۵- نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (CSTBD)

۴-۴-۵-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های این روش با استفاده از چهار قالب فلزی دیسکی شکل به قطرهای ۵۴، ۷۵، ۸۷ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. مطابق شکل (۴-۲۶) با جاسازی تیغه‌های فلزی به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر در داخل قالب‌ها ترک‌های مورد نظر در نمونه‌ها ایجاد شدند.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و خط‌کشی دقیق روی آن‌ها، خط ترک نمونه‌ها به‌دقت در راستای محور بارگذاری قرار داده شده و بدین ترتیب شرایط مود کشش خالص ایجاد شد (شکل ۴-۲۷). در این روش برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۴۸ نمونه ساخته شد که در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد.

۴-۴-۵-۲- نتایج

در جدول (۴-۷) و جدول (۴-۸) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها و محاسبات انجام شده در این روش آمده است. برای محاسبه مقادیر پارامتر بدون بعد (N_I) دو حالت استفاده شده است.

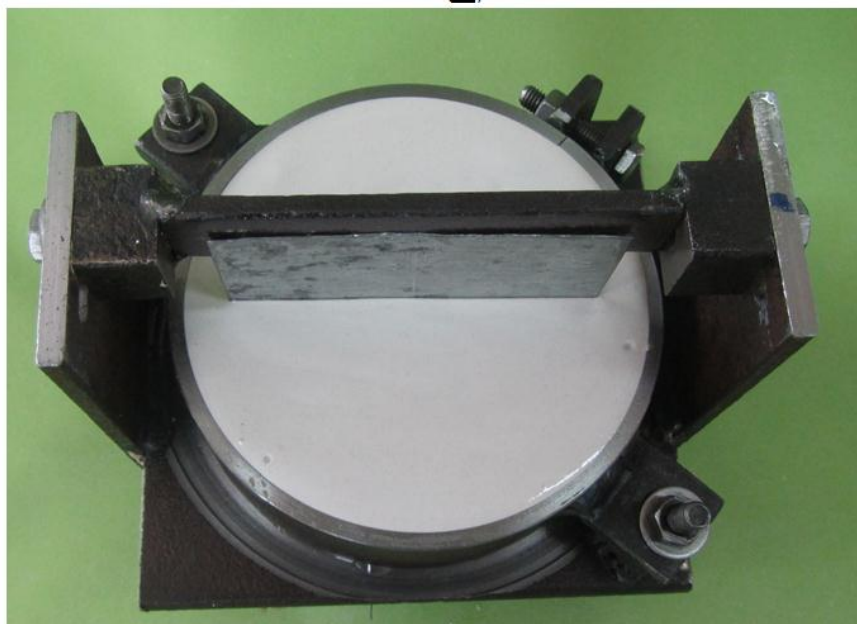
A. در حالت اول این مقادیر با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۲) و

B. در حالت دوم با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۷) محاسبه شده‌اند.

همچنین مقادیر چقرمگی شکست نیز با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۰) محاسبه شده‌اند. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به‌صورت نموداری برای حالت اول (A) در شکل (۴-۲۹) و برای حالت دوم (B) در شکل (۴-۳۰) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.



الف



ب

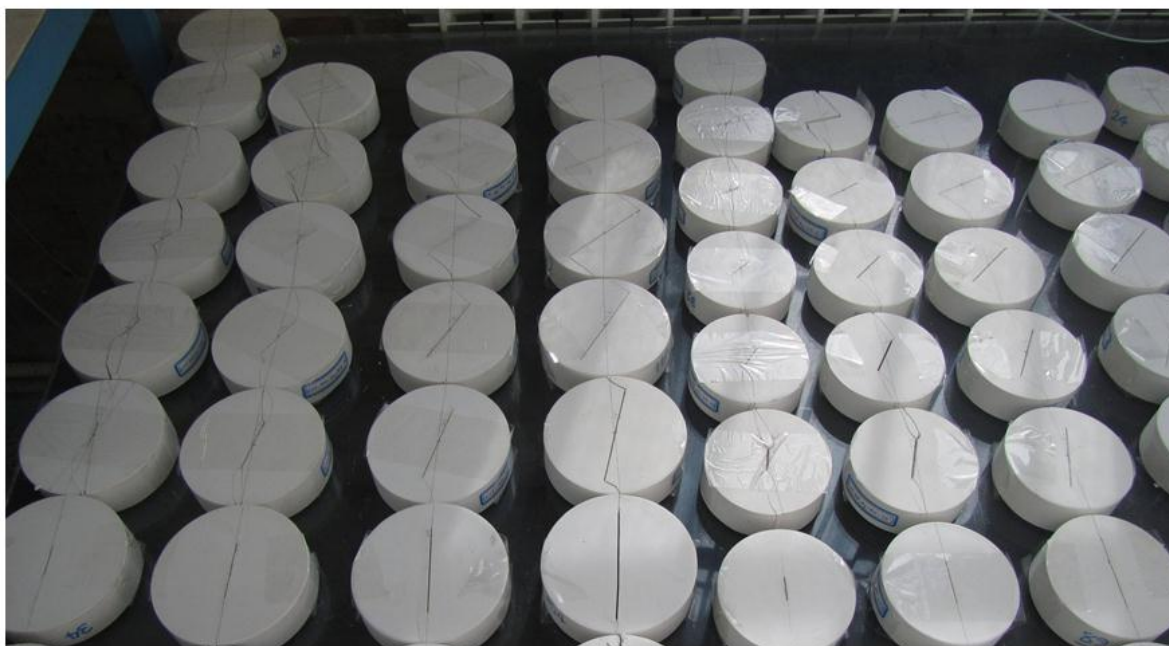


ج

شکل ۴-۲۶- ساخت نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم (الف) قالب‌های فلزی مورد استفاده و نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در داخل قالب (ب) نمای قالب و تیغه فلزی پس از ریختن ترکیب (ج) نمونه‌های آماده شده



الف



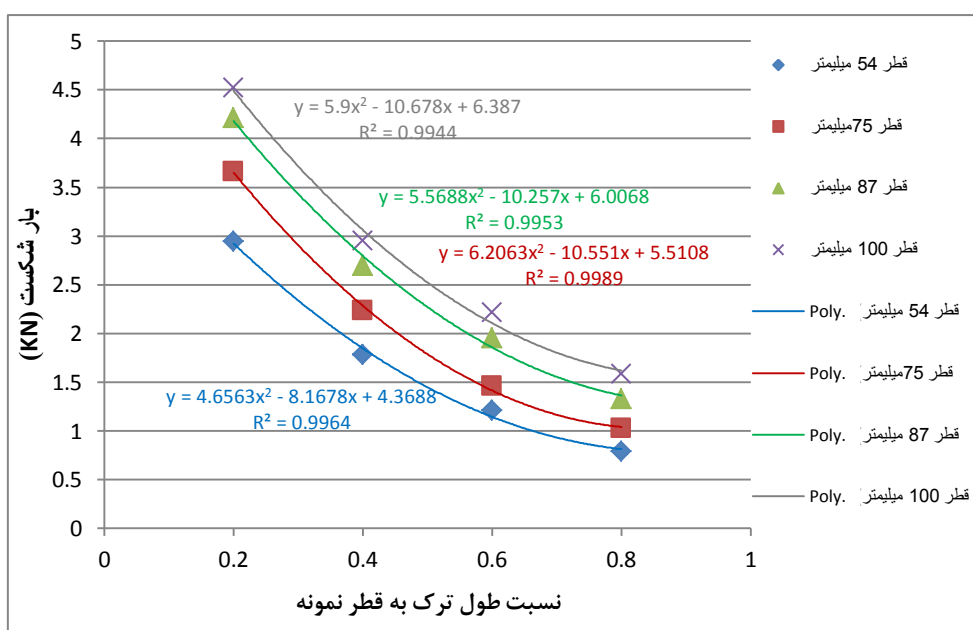
ب

شکل ۴-۲۷- الف) بارگذاری نمونه‌های دیسکی در شرایط مود کششی ب) نمونه‌ها پس از بارگذاری

روند تغییرات بار شکست نمونه‌ها با تغییر طول ترک در شکل (۴-۲۸) نشان می‌دهد که با افزایش طول ترک در نمونه‌ها در تمامی طول قطرها مقدار بار شکست کاهش یافته است.

جدول ۴-۷- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (حالت A)

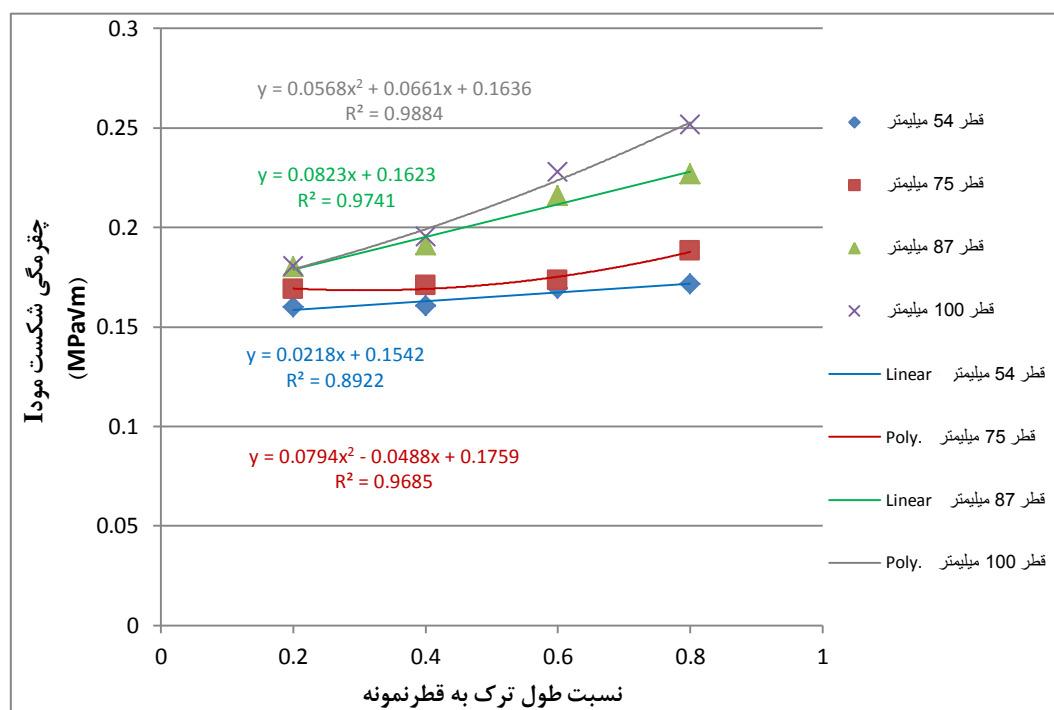
چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m})	بار شکست میانگین (KN)	N_I	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۱۶۵ \pm ۰/۰۰۵	۰/۱۵۹	۲/۹۴۳	۱/۰۶	۰/۲	۵۴
	۰/۱۶۰	۱/۷۸۲	۱/۲۴۳	۰/۴	
	۰/۱۶۹	۱/۲۰۹	۱/۵۷۸	۰/۶	
	۰/۱۷۱	۰/۷۹۳	۲/۱۱۰	۰/۸	
۰/۱۷۵ \pm ۰/۰۰۸	۰/۱۶۹	۳/۶۶۴	۱/۰۶	۰/۲	۷۵
	۰/۱۷۱	۲/۲۳۸	۱/۲۴۳	۰/۴	
	۰/۱۷۳	۱/۴۴۶	۱/۵۷۸	۰/۶	
	۰/۱۸۸	۱/۰۲۷	۲/۱۱۰	۰/۸	
۰/۲۰۳ \pm ۰/۰۱۹	۰/۱۸۰	۴/۲۱۱	۱/۰۶	۰/۲	۸۷
	۰/۱۹۱	۲/۶۹۶	۱/۲۴۳	۰/۴	
	۰/۲۱۶	۱/۹۵۶	۱/۵۷۸	۰/۶	
	۰/۲۲۷	۱/۳۳۲	۲/۱۱۰	۰/۸	
۰/۲۱۴ \pm ۰/۰۲۸	۰/۱۸۰	۴/۵۲۴	۱/۰۶	۰/۲	۱۰۰
	۰/۱۹۵	۲/۹۵	۱/۲۴۳	۰/۴	
	۰/۲۲۸	۲/۲۱۴	۱/۵۷۸	۰/۶	
	۰/۲۵۱	۱/۵۸۴	۲/۱۱۰	۰/۸	
۰/۱۸۹ \pm ۰/۰۲۶	مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				



شکل ۴-۲۸- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

نتایج ارائه شده در جدول (۴-۷) نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش ۴/۵۲۴ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۰/۷۹۳ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست در حالت A برای نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر $0.165 \pm 0.005 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.175 \pm 0.008 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0.214 \pm 0.028 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $0.203 \pm 0.019 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۳۹ درصدی در اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۵۴ تا ۷۵ میلی‌متر) مقدار ۶ درصد، با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۴ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۵ درصد افزایش یافته است.

روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با طول ترک در حالت A در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است. نمودارهای این شکل بیانگر همگرایی قابل قبول نتایج به ازای نسبت نصف طول ترک به قطر نمونه برابر با ۰/۲ است و همچنین افزایش پراکندگی مقادیر با افزایش طول ترک در نمونه‌هاست.



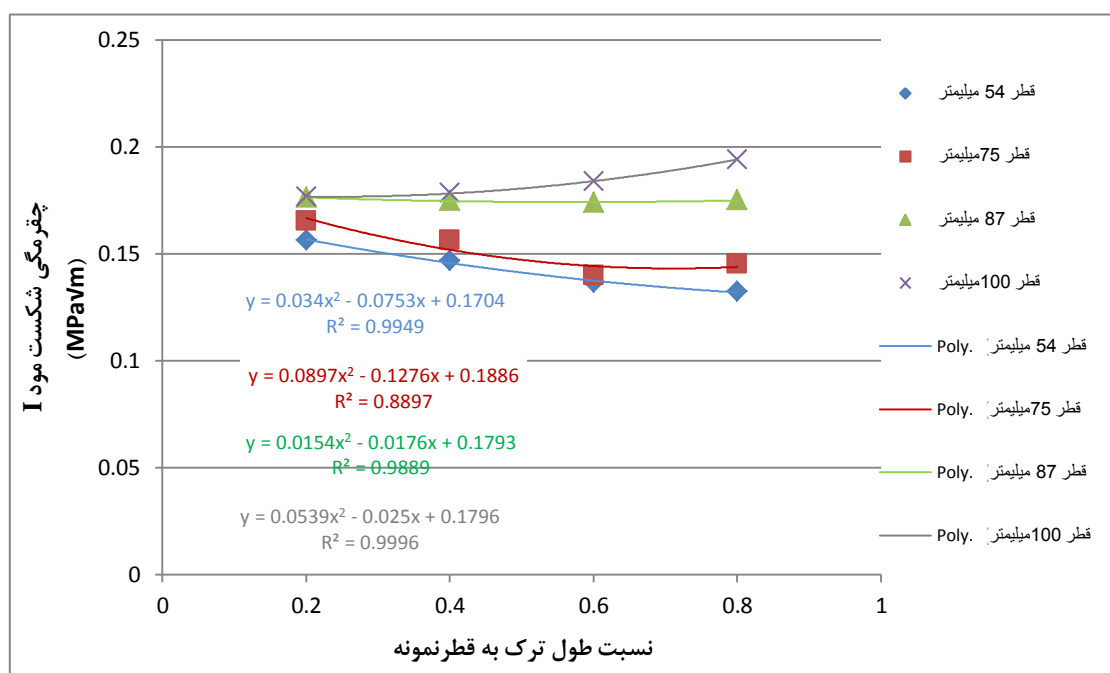
شکل ۴-۲۹- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A)

مطابق جدول (۴-۸) مقدار میانگین چقرمگی شکست در حالت B برای نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر $0.143 \pm 0.009 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.151 \pm 0.009 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0.175 \pm 0.008 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $0.183 \pm 0.007 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که در حالت B مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۳۹ درصدی در اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۵۴ تا ۷۵ میلی‌متر) مقدار ۶ درصد، با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۶ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴-۸- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی (حالت B)

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	چقرمگی شکست مود I ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	بار شکست میانگین (KN)	N_I	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
0.143 ± 0.009	0.156	2.943	1.038	0.2	54
	0.147	1.782	1.137	0.4	
	0.137	1.209	1.274	0.6	
	0.132	0.793	0.629	0.8	
0.151 ± 0.009	0.165	3.664	1.038	0.2	75
	0.156	2.238	1.137	0.4	
	0.140	1.466	1.274	0.6	
	0.145	1.027	0.629	0.8	
0.175 ± 0.008	0.176	4.211	1.038	0.2	87
	0.175	2.696	1.137	0.4	
	0.174	1.956	1.274	0.6	
	0.175	1.332	0.629	0.8	
0.183 ± 0.007	0.177	4.524	1.038	0.2	100
	0.178	2.95	1.137	0.4	
	0.183	2.214	1.274	0.6	
	0.194	1.584	0.629	0.8	
0.163 ± 0.018	مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با طول ترک در حالت B در شکل (۴-۳۰) نشان داده شده است. نمودارهای این شکل بیانگر همگرایی قابل توجه در مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر نمونه برابر با ۰/۲ است و میزان همگرایی نتایج با افزایش طول ترک در نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین نکته قابل توجه دیگر در نمودارهای این شکل عدم حساسیت مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر به تغییر طول ترک نمونه‌ها در این پژوهش است.



شکل ۴-۳۰- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B)

۴-۴-۶- نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (CCNBD)

۴-۴-۶-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

همانطور که در بخش (۳-۶-۲) تشریح شد، بدلیل محدودیت‌های کرنش صفحه‌ای، تمام هندسه‌های نمونه‌ی CCNBD برای آزمایش شکست معتبر نیستند. بررسی‌های فوول و ژو در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ نشان داد که برای معتبر شناخته شدن نتایج چقرمگی شکست، هندسه‌های این روش باید در محدوده‌ی مشخص شده در شکل (۳-۱۴) قرار گیرند (Fowell & Xu, 2006). لذا با توجه به ثابت بودن ضخامت ۳۰ میلی‌متری قالب‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های این روش، به منظور قرارگیری ابعاد هندسی

نمونه‌ها در محدوده معتبر مورد نظر، برای هر قطر طول ترک‌های مختلفی در نظر گرفته شد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد برای آماده سازی نمونه‌های سنگی در این روش هر دو طرف نمونه‌ها با اره برش داده می‌شود و ترک ایجاد می‌شود. اما مصنوعی بودن نمونه‌ها در این پژوهش و نیاز به دقت زیاد در ساخت نمونه‌ها باعث شد تا از ابتکار ویژه‌ای برای ایجاد ترک‌های شورن مورد نظر در نمونه‌های این روش استفاده شود. بدین صورت که با تعبیه کردن شکاف در کف قالب‌ها و استفاده از تیغه‌های دو تیکه با ضخامت $0/4$ میلی‌متر که از بالا و پایین در داخل قالب جاسازی شدند، ترک‌های مورد نظر ایجاد شدند. حدود ۸ دقیقه پس از ریختن ترکیب در قالب و گیرش اولیه نمونه، تیغه‌ی بالایی از قسمت بالا و تیغه‌ی پایینی از قسمت زیر قالب با دقت و به آرامی بیرون کشیده شدند و بدین ترتیب نمونه‌هایی با دقت حداکثر ساخته شدند. در شکل (۴-۳۱) تعدادی از تیغه‌های مورد استفاده، نحوه قرارگیری تیغه‌ها در قالب و همچنین ترک شورن ایجاد شده نشان داده شده است.

برای ساخت نمونه‌های این روش از سه قالب فلزی با قطرهای ۷۵، ۸۷ و ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. پارامترهای هندسی نمونه‌های ساخته شده با توجه به شکل (۳-۱۲) در جدول (۴-۹) آمده است. برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۲۷ نمونه برای این روش ساخته شد.



شکل ۴-۳۱- ساخت نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (الف) تیغه‌های دو تکه ب) نحوه‌ی قرارگیری تیغه‌ها در داخل قالب ج و د) نمایی از ترک‌های شورن ایجاد شده در نمونه‌ها

جدول ۴-۹- پارامترهای هندسی نمونه‌های ساخته شده‌ی روش دیسکی با ترک شورن مرکزی

پارامتر هندسی							B (mm)	قطر نمونه (میلی‌متر)
a/R	α_B	α_1	α_0	2a (mm)	2a ₁ (mm)	2a ₀ (mm)		
۰/۴	۰/۸	۰/۵	۰/۳	۳۰	۳۷/۵	۲۲/۵	۳۰	۷۵
۰/۵۵	۰/۸	۰/۶۵	۰/۴۵	۴۱	۴۹	۳۳		
۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۶۶	۵۵	۶۰	۵۰		
۰/۳	۰/۷	۰/۴	۰/۱۵	۲۴/۲۵	۳۵	۱۳/۵	۳۰	۸۷
۰/۴	۰/۷	۰/۵۵	۰/۳۶	۳۹/۵	۴۸	۳۱		
۰/۶۵	۰/۷	۰/۷	۰/۵۹	۵۶	۶۱	۵۱		
۰/۳	۰/۶	۰/۴	۰/۲۲۵	۳۱/۲۵	۴۰	۲۲/۵	۳۰	۱۰۰
۰/۴۵	۰/۶	۰/۵	۰/۴۱	۴۵/۵	۵۰	۴۱		
۰/۵۵	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۵۵	۶۰	۵۰		

۴-۶-۲-نتایج

در جدول (۴-۱۰) و جدول (۴-۱۱) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها و محاسبات انجام شده در این روش ارائه شده است. در این روش نیز مشابه با روش CSTBD، برای محاسبه مقادیر پارامتر بدون بعد (Y_{min}^*) از دو حالت استفاده شده است.

A. در حالت اول این مقادیر u و v با استفاده از جدول (۳-۷) و

B. در حالت دوم مقادیر u و v با استفاده از جداول (۳-۸) و (۳-۹) محاسبه شده‌اند.

همچنین مقادیر چقرمگی شکست هر دو حالت نیز با استفاده از دو رابطه یعنی روابط (۳-۲۱) و (۳-۲۲) محاسبه شده‌اند. برای هر کدام از حالات فوق مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به صورت نموداری برای حالت اول (A) در شکل (۴-۳۳) و برای حالت دوم (B) در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه پارامترهای روابط مورد استفاده برای تعیین چقرمگی شکست در این روش مشابه بوده و تنها بجای مجذور پارامتر قطر در رابطه‌ی ISRM، مجذور پارامتر شعاع در رابطه‌ی تصحیح شده جایگزین شده است، بنابراین در هر دو جدول مقادیر چقرمگی شکست حاصل شده با رابطه‌ی ISRM دقیقاً ۰/۷۰۷ برابر مقادیر متناظر با رابطه‌ی تصحیح شده هستند. با توجه به این مطلب، در این بخش تنها بر روی نتایج رابطه‌ی تصحیح شده بحث می‌شود.

روند تغییرات بار شکست نمونه‌ها با تغییر طول ترک در نمونه‌های این روش در شکل (۴-۳۲) نشان

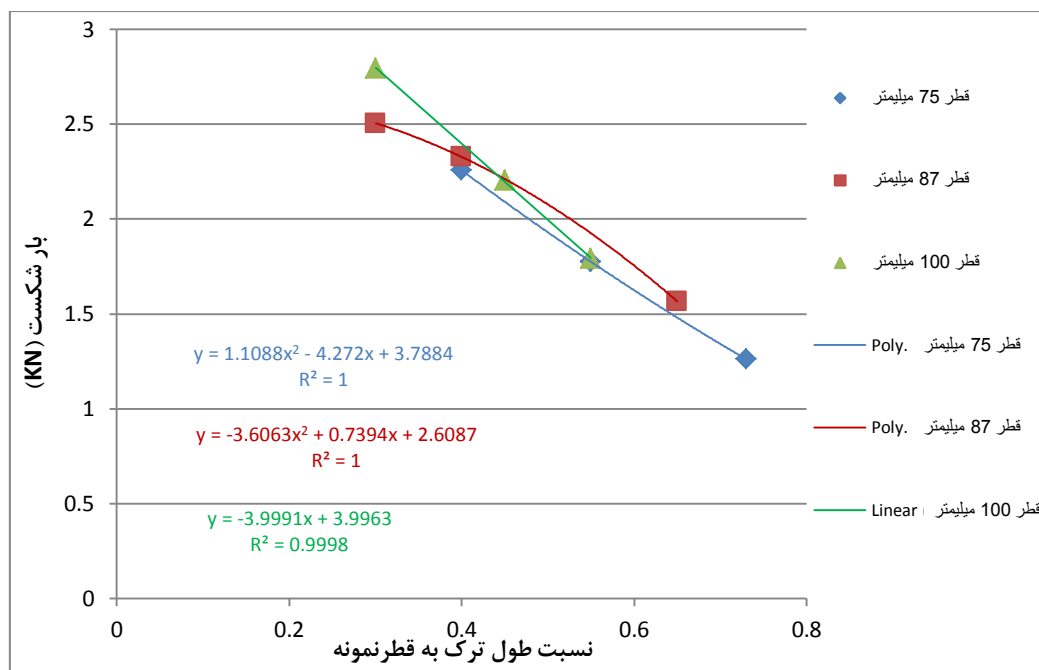
می‌دهد که با افزایش طول ترک در نمونه‌ها در تمامی قطرها، مقدار بار شکست کاهش یافته است.

جدول ۴-۱۰- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (حالت A)

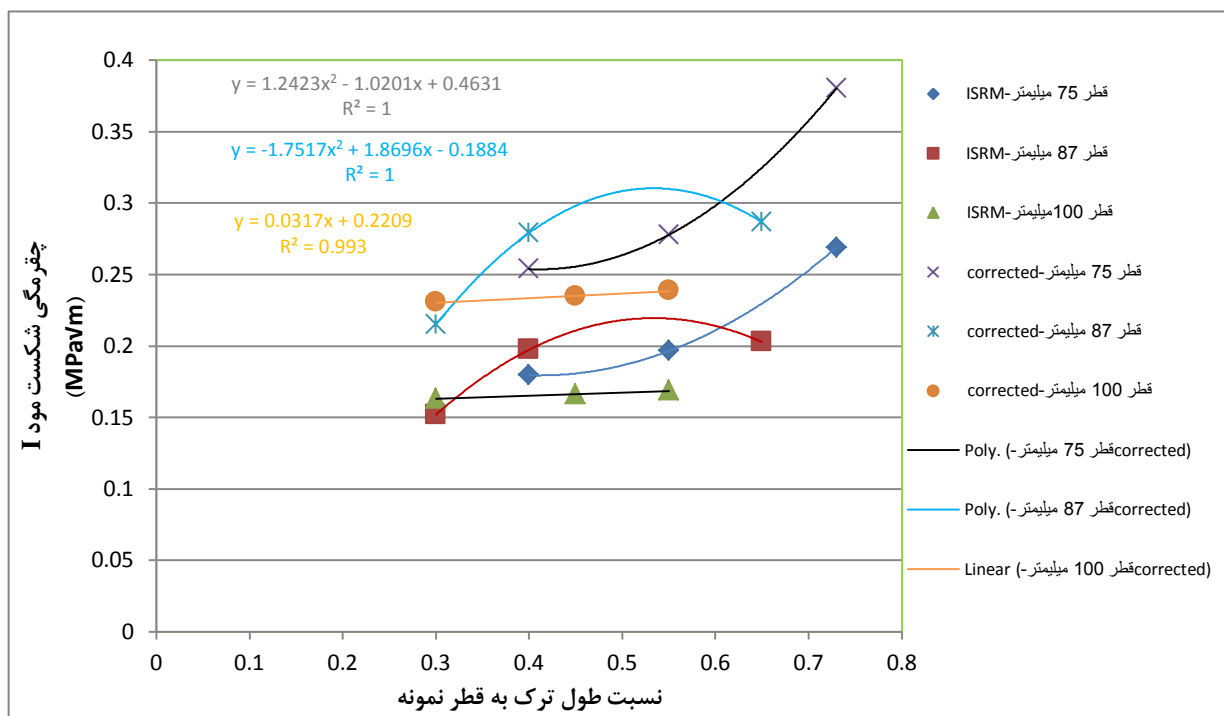
چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m}) تصحیح شده	چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m}) ISRM	بار شکست میانگین (KN)	Y_{min} ISRM	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۳۰۴ \pm ۰/۰۵۵	۰/۲۵۴	۰/۲۱۵ \pm ۰/۰۳۹	۰/۱۷۹	۲/۲۵۷	۰/۶۵۳	۰/۴	۷۵
	۰/۲۷۸		۰/۱۹۶	۱/۷۷۴	۰/۹۱۰	۰/۵۵	
	۰/۳۸۰		۰/۲۶۹	۱/۲۶۱	۱/۷۵۳	۰/۷	
۰/۲۶۰ \pm ۰/۰۳۲	۰/۲۱۵	۰/۱۸۴ \pm ۰/۰۲۳	۰/۱۵۲	۲/۵۰۶	۰/۵۳۶	۰/۳	۸۷
	۰/۲۷۹		۰/۱۹۷	۲/۳۲۸	۰/۷۵۰	۰/۴	
	۰/۲۸۷		۰/۲۰۳	۱/۵۶۶	۱/۱۴۶	۰/۶۵	
۰/۲۳۵ \pm ۰/۰۰۳	۰/۲۳۱	۰/۱۶۶ \pm ۰/۰۰۲	۰/۱۶۳	۲/۷۹۴	۰/۵۵۴	۰/۳	۱۰۰
	۰/۲۳۵		۰/۱۶۶	۲/۲۰۴	۰/۷۱۴	۰/۴۵	
	۰/۲۳۹		۰/۱۶۹	۱/۷۹۲	۰/۸۹۳	۰/۵۵	
۰/۲۶۶ \pm ۰/۰۴۷		۰/۱۸۸ \pm ۰/۰۳۳		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد			

نتایج ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش ۲/۷۹۴ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۱/۲۶۱ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست در حالت A برای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.304 \pm 0.055 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0.260 \pm 0.032 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $0.235 \pm 0.003 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۱۴ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۱۰ درصد کاهش یافته است.

روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با طول ترک در حالت A در شکل (۴-۳۳) نشان داده شده است. نمودارهای این شکل بیانگر کاهش قابل توجه پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست با افزایش قطر نمونه‌هاست. نکته جالب توجه عدم حساسیت چقرمگی شکست نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به تغییر طول ترک می‌باشد.



شکل ۴-۳۲- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها



شکل ۴-۳۳- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت A)

جدول ۴-۱۱- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی (حالت B)

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m}) تصحیح شده	چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود I (MPa \sqrt{m}) ISRМ	بار شکست میانگین (KN)	Y_{min} Wang	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۴۰۵ \pm ۰/۰۹	۰/۳۱۱	۰/۲۸۶ \pm ۰/۰۶۳	۰/۲۲۰	۲/۲۵۷	۰/۸۰۰	۰/۴	۷۵
	۰/۳۷۷		۰/۲۶۷	۱/۷۷۴	۱/۲۳۴	۰/۵۵	
	۰/۵۲۷		۰/۳۷۲	۱/۲۶۱	۲/۴۲۷	۰/۷	
۰/۲۸۰ \pm ۰/۰۳۹	۰/۲۳۷	۰/۱۹۸ \pm ۰/۰۲۲	۰/۱۶۸	۲/۵۰۶	۰/۵۹۱	۰/۳	۸۷
	۰/۳۱۰		۰/۲۱۹	۲/۳۲۸	۰/۸۳۲	۰/۴	
	۰/۲۹۳		۰/۲۰۷	۱/۵۶۶	۱/۱۷۱	۰/۶۵	
۰/۲۵۴ \pm ۰/۰۰۱	۰/۲۵۱	۰/۱۷۹ \pm ۰/۰۰۱	۰/۱۷۸	۲/۷۹۴	۰/۶۰۳	۰/۳	۱۰۰
	۰/۲۵۵		۰/۱۸۰	۲/۲۰۴	۰/۷۷۷	۰/۴۵	
	۰/۲۵۵		۰/۱۸۰	۱/۷۹۲	۰/۹۵۳	۰/۵۵	
۰/۳۱۳ \pm ۰/۰۸۶		۰/۲۲۱ \pm ۰/۰۶		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد			

مطابق جدول فوق مقدار میانگین چقرمگی شکست در حالت B برای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر

$0/405 \pm 0/09 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0/280 \pm 0/039 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر

۱۰۰ میلی‌متر $0/254 \pm 0/001 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که در حالت B مقدار میانگین

چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۳۱ درصد و با

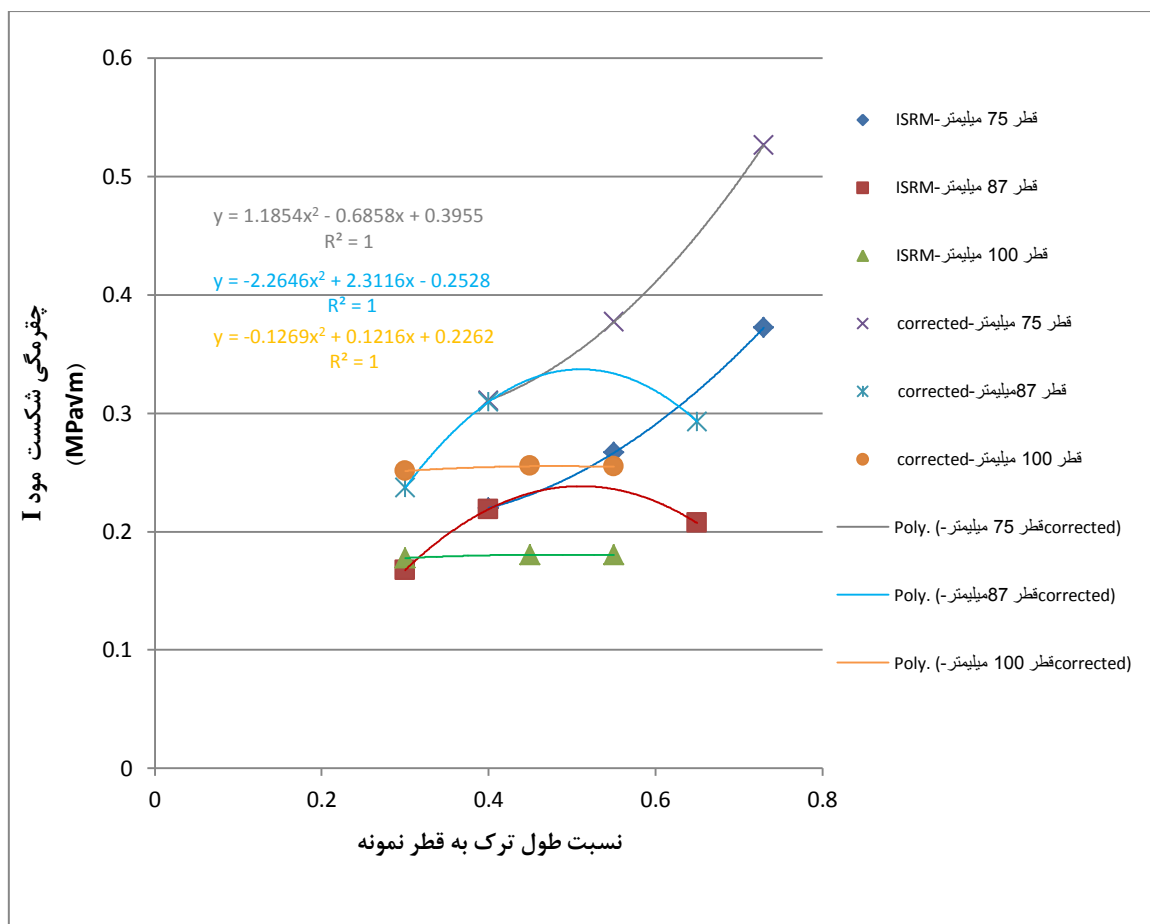
افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۹ درصد کاهش یافته است.

روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست با طول ترک در حالت B در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده

است. نمودارهای این شکل با نمودارهای متناظر مربوط به حالت A کاملاً مشابه بوده و در اینجا نیز کاهش

قابل توجه پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست با افزایش قطر نمونه‌ها و عدم حساسیت چقرمگی شکست

نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر با تغییر طول ترک مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۳۴- روند تغییرات چقرمگی شکست مود I نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها (حالت B)

با توجه به نتایج بدست آمده در دو حالت A و B مشاهده می‌شود که استفاده از مقادیر u و v ارائه شده توسط وانگ (حالت B) برای محاسبه‌ی چقرمگی شکست نمونه‌ها، باعث افزایش قابل توجه در مقادیر آن می‌شود. بطوریکه به ازای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر ۳۳ درصد و برای نمونه‌های با قطر ۸۷ و ۱۰۰ میلی‌متر ۸ درصد مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها را نسبت به مقادیر متناظر حالت A افزایش داده است.

۴-۵- نتایج مطالعات آزمایشگاهی مود برشی

۴-۵-۱- نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (SNSCB)

۴-۵-۱-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

همانطور که در بخش (۳-۹) تشریح شد، نمونه‌های نیم‌دیسکی تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای یکی از روش‌هایی است که علاوه بر مود کشش خالص قابلیت ایجاد مود ترکیبی کشش-برش و نیز مود برش خالص را داراست. نحوه‌ی ساخت، آماده‌سازی، بارگذاری و مشخصات هندسی این نمونه‌ها کاملاً مشابه با نمونه‌های بخش (۴-۴-۴) می‌باشد. در این روش با تراز کردن راستای ترک در زوایای مختلف نسبت به صفحه‌ی بارگذاری (β)، مطالعه‌ی الگوهای مختلف مود ترکیبی I-II و تحت زاویه خاصی در مود برش خالص امکان‌پذیر است. زاویه متناسب با حالت برش خالص در این روش با استفاده از نتایج تحلیل عددی ایت‌اللهی و همکارانش (بخش ۳-۹-۲) مشخص شده است که مقادیر متناظر با نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش در جدول (۴-۱۲) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۲- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش

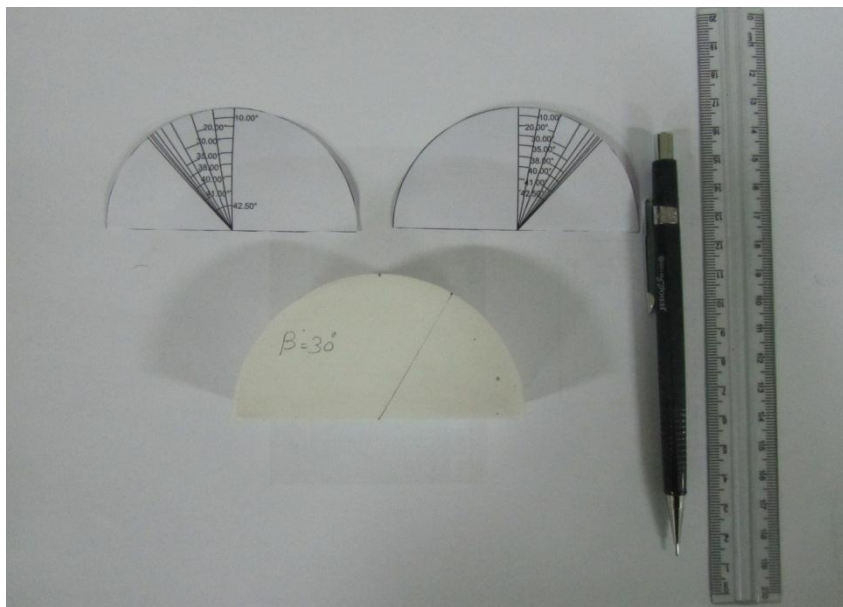
SNSCB

نسبت طول ترک به قطر نمونه	نسبت فاصله بین نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود برشی خالص (درجه)
۰/۳	۰/۴	۴۲/۵
۰/۴	۰/۴	۳۵
۰/۶	۰/۵	۳۸

با توجه به اینکه اندکی انحراف از این مقادیر زاویه‌ای منجر به ایجاد مود ترکیبی می‌شود، تعیین دقیق این زوایا بر روی نمونه‌ها و سپس ترک‌دار کردن نمونه‌ها در جهت آن، بسیار حائز اهمیت بود. به همین منظور مطابق شکل (۴-۳۵) الگوهای نیم دایره‌ای با مقیاس واقعی و با تعیین زوایا روی آن‌ها، با استفاده از نرم افزار اتوکد^۱ تهیه شد و سپس با قرار دادن این الگوها بر روی نمونه‌ها زوایای مورد نظر بطور دقیق بر

^۱ Autocad

روی نمونه‌ها علامت‌گذاری شده و ترک‌دار شدند. در شکل (۴-۲۲-ب) تعدادی از این نمونه‌های آماده شده، دیده می‌شوند.



شکل ۴-۳۵-الگوهای نیم دایره‌ای تهیه شده با مقیاس واقعی با نرم‌افزار اتوکد

به منظور بررسی تاثیر طول ترک بر نتایج این روش، برای هر قطر سه نسبت طول ترک به شعاع نمونه (a/R) برابر با $0/3$ ، $0/4$ و $0/6$ در نظر گرفته شد. همچنین نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه‌ها ($2S/D$) برای نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر $0/3$ و $0/4$ ، برابر با $0/4$ و برای نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر $0/6$ برابر با $0/5$ و ثابت در نظر گرفته شد. در این روش برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۲۷ نمونه ساخته شد و در نهایت مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد.

۴-۱-۵-۲-نتایج

در جدول (۴-۱۳) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود II در این روش نشان داده شده است. در این جدول مقادیر پارامتر بدون بعد (Y_{II}) و چقرمگی شکست از نتایج و نمودارهای ارائه شده توسط آیت‌الهی و همکارانش (بخش ۳-۹-۲) محاسبه شده‌اند. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و

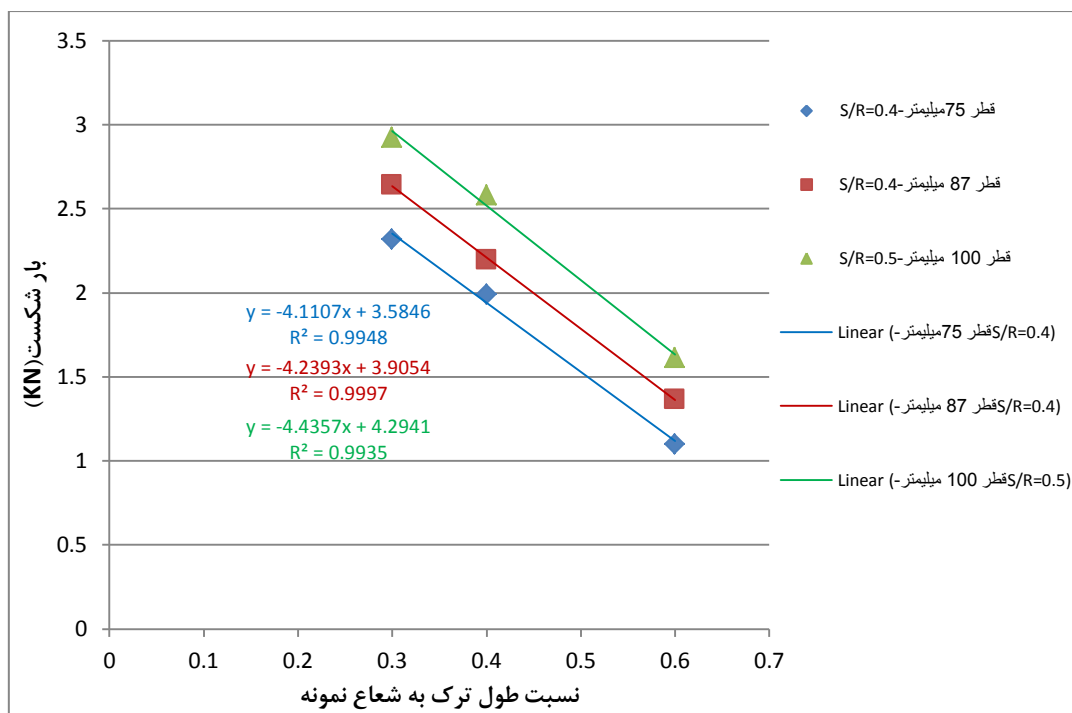
انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. همچنین این نتایج به صورت نموداری در شکل (۴-۳۷) نشان داده شده‌اند. در این شکل برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

جدول ۴-۱۳- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم

قطر نمونه (میلی‌متر)	نسبت طول ترک به شعاع نمونه	نسبت فاصله نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه	β (درجه)	Y_{II}	بار شکست میانگین (KN)	چقرمگی شکست مود II (MPa√m)	چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa√m)
۷۵	۰/۳	۰/۴	۴۲/۵	۰/۷۶	۲/۳۱۷	۰/۲۹۴	۰/۳۷۶ \pm ۰/۰۶۶
	۰/۴	۰/۴	۳۵	۱/۱۹	۱/۹۹۲	۰/۴۵۷	
	۰/۶	۰/۵	۳۸	۱/۴۵	۱/۱۰۱	۰/۳۷۷	
۸۷	۰/۳	۰/۴	۴۲/۵	۰/۷۶	۲/۶۴۲	۰/۳۱۲	۰/۴۰۵ \pm ۰/۰۶۷
	۰/۴	۰/۴	۳۵	۱/۱۹	۲/۱۹۷	۰/۴۶۸	
	۰/۶	۰/۵	۳۸	۱/۴۵	۱/۳۶۶	۰/۴۳۵	
۱۰۰	۰/۳	۰/۴	۴۲/۵	۰/۷۶	۲/۹۲۲	۰/۳۲۱	۰/۴۳۸ \pm ۰/۰۸۴
	۰/۴	۰/۴	۳۵	۱/۱۹	۲/۵۸۲	۰/۵۱۳	
	۰/۶	۰/۵	۳۸	۱/۴۵	۱/۶۱۲	۰/۴۷۸	
مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد					۰/۴۰۶ \pm ۰/۰۷۷		

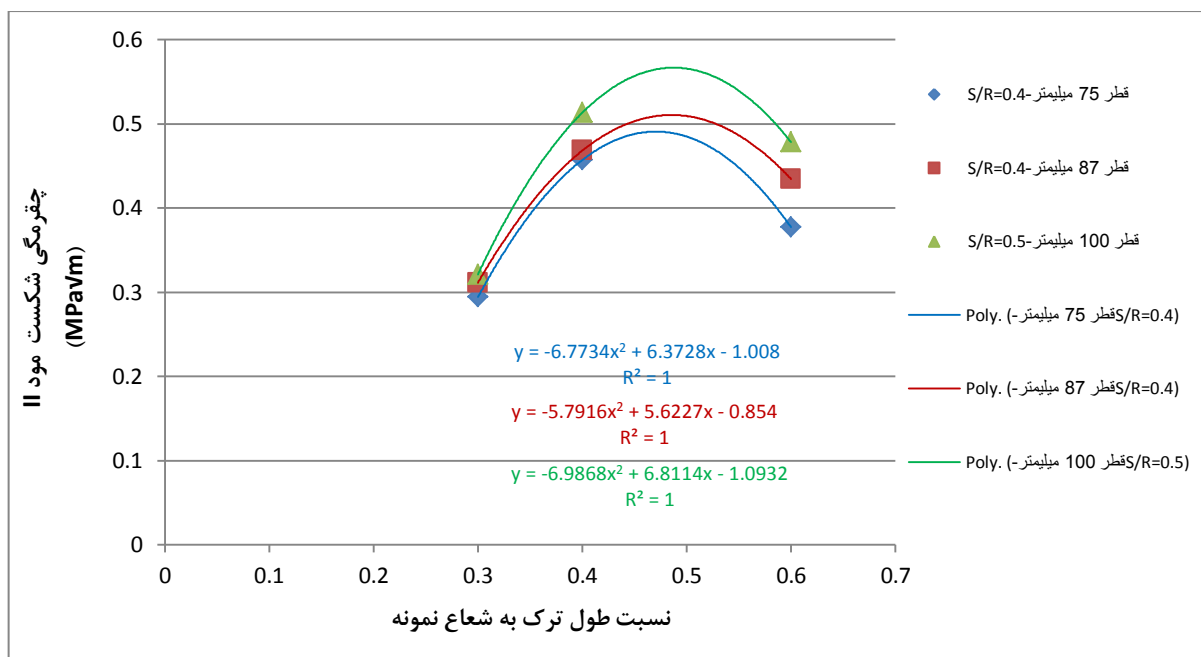
نتایج ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش در حالت مود II، ۲/۹۲۲ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۱/۱۰۱ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II برای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.376 \pm 0.066 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0.405 \pm 0.067 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $0.438 \pm 0.084 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۷ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۸ درصد افزایش یافته است.

در شکل (۴-۳۶) به‌ازای تمامی قطر‌ها، کاهش مقدار بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک در آن‌ها کاملاً مشخص است. همچنین با افزایش قطر نمونه‌ها میزان بار شکست در آن‌ها نیز افزایش یافته است که این افزایش در تمامی قطر‌ها تقریباً یکنواخت بوده است..



شکل ۴-۳۶- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II

نمودارهای شکل (۴-۳۷) نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش اولیه مقادیر چقرمگی شکست در تمامی قطرها با افزایش طول ترک تا نسبت طول ترک به شعاع برابر با ۰/۴ و سپس کاهش آن می‌باشد. بطوریکه در تمامی قطرها، بیشترین مقادیر چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های با نسبت طول ترک به شعاع برابر با ۰/۴ و کمترین مقدار نیز مربوط به نمونه‌های با نسبت طول ترک به شعاع برابر با ۰/۳ بوده است. همچنین نتایج چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های با نسبت طول ترک به شعاع برابر با ۰/۳ کمترین پراکندگی را نشان می‌دهند. بطور کلی با افزایش طول ترک در نمونه‌های این روش میزان پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست نیز بیشتر شده است.



شکل ۴-۳۷- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش SNSCB نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۵-۲- نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم (CSTBD)

۴-۵-۲-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

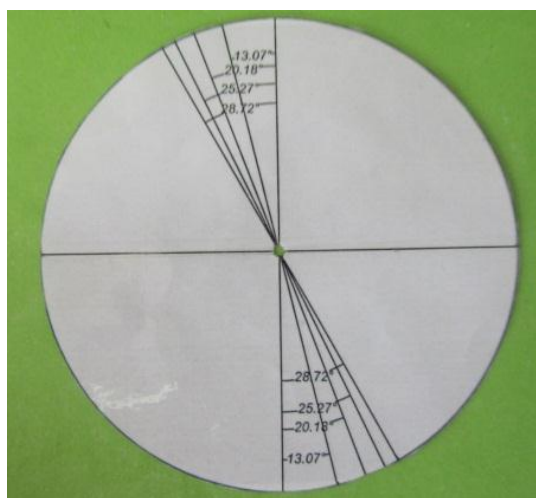
نحوه ساخت، آماده‌سازی و بارگذاری نمونه‌ها در این روش مشابه بخش (۴-۴-۵) است. این روش نیز یکی از روش‌هایی است که علاوه بر مود کشش خالص، قابلیت ایجاد مود ترکیبی کشش-برش و مود برش خالص را با تراز کردن راستای ترک در زوایای مختلف نسبت به محور بارگذاری (β) دارد. همانطور که در بخش (۳-۵-۲) ذکر شد، فوول و ژو رابطه‌ی (۳-۱۸) را برای تعیین زوایای متناظر با حالت مود برش خالص با توجه به نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه، در این روش ارائه کردند. مقادیر زوایای محاسبه شده با استفاده از این رابطه برای نمونه‌های استفاده شده این روش در جدول (۴-۱۴) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش

CSTBD

نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸
زاویه متناظر با مود برش خالص (درجه)	۲۸/۷۲	۲۵/۲۷	۲۰/۱۸	۱۳/۰۷

برای تعیین دقیق این زوایا بر روی نمونه‌ها از روشی مشابه با نمونه‌های نیم‌دیسکی استفاده شد. الگوهای دایره‌ای شکل با مقیاس واقعی در نرم‌افزار اتوکد تهیه شد که در شکل (۴-۳۸) نشان داده شده است. با استفاده از این الگوها زوایای متناظر برای هر نمونه بطور دقیق علامت‌گذاری شده و نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری تک محوری قرار گرفتند (شکل ۴-۳۹). برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۴۸ نمونه آماده شد و در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۳۸- الگوهای دایره‌ای تهیه شده با مقیاس واقعی با نرم‌افزار اتوکد



شکل ۴-۳۹- نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های روش CSTBD در حالت مود برشی خالص

۴-۵-۲-۲-نتایج

در جدول (۴-۱۵) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها برای تعیین چقرمگی شکست مود II در این روش ارائه شده است. برای محاسبه مقادیر پارامتر بدون بعد (N_{II}) در این جدول از رابطه‌ی (۳-۱۹) استفاده شده است. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. روند تغییرات نتایج این روش به صورت نموداری در شکل (۴-۴۱) نشان داده شده‌اند. در این شکل برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

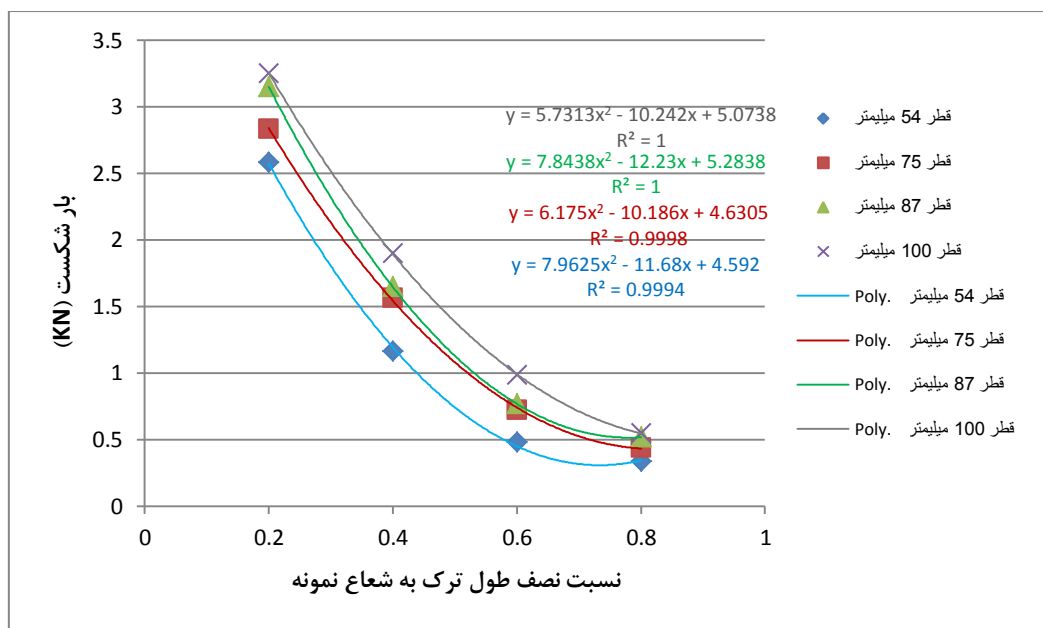
نتایج ارائه شده در جدول (۴-۱۵) نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش ۳/۲۵۳ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۰/۳۳۵ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II برای نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر $0.54 \pm 0.054 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر $0.166 \pm 0.04 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر $0.169 \pm 0.04 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر $0.177 \pm 0.033 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌ها با افزایش ۳۹ درصدی در اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۵۴ تا ۷۵ میلی‌متر) مقدار ۲۲ درصد، با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۲ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴-۱۵- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های دیسکی با ترک مستقیم مرکزی

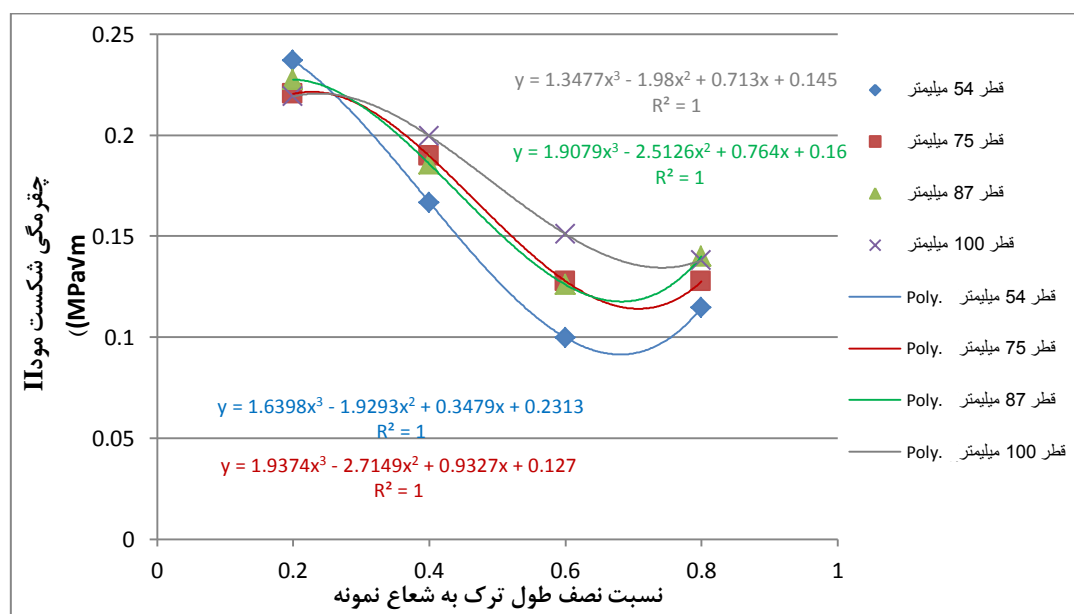
چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود II (MPa \sqrt{m})	بار شکست میانگین (KN)	N_{II}	β (درجه)	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۱۵۴ \pm ۰/۰۵۴	۰/۲۳۷	۲/۵۸۴	۱/۷۹۱	۲۸/۷۲	۰/۲	۵۴
	۰/۱۶۷	۱/۱۶۶	۱/۹۷۶	۲۵/۲۷	۰/۴	
	۰/۰۹۹	۰/۴۷۹	۲/۳۴۹	۲۰/۱۸	۰/۶	
	۰/۱۱۵	۰/۳۳۵	۳/۳۳۹	۱۳/۰۷	۰/۸	
۰/۱۶۶ \pm ۰/۰۴	۰/۲۲۰	۲/۸۳۴	۱/۷۹۱	۲۸/۷۲	۰/۲	۷۵
	۰/۱۹۰	۱/۵۶۳	۱/۹۷۶	۲۵/۲۷	۰/۴	
	۰/۱۲۸	۰/۷۲۳	۲/۳۴۹	۲۰/۱۸	۰/۶	
	۰/۱۲۸	۰/۴۴	۳/۳۳۹	۱۳/۰۷	۰/۸	
۰/۱۶۹ \pm ۰/۰۴	۰/۲۲۸	۳/۱۵۱	۱/۷۹۱	۲۸/۷۲	۰/۲	۸۷
	۰/۱۸۶	۱/۶۴۸	۱/۹۷۶	۲۵/۲۷	۰/۴	
	۰/۱۲۶	۰/۷۶۸	۲/۳۴۹	۲۰/۱۸	۰/۶	
	۰/۱۴۰	۰/۵۲	۳/۳۳۹	۱۳/۰۷	۰/۸	
۰/۱۷۷ \pm ۰/۰۳۳	۰/۲۱۹	۳/۲۵۳	۱/۷۹۱	۲۸/۷۲	۰/۲	۱۰۰
	۰/۱۹۹	۱/۸۹۹	۱/۹۷۶	۲۵/۲۷	۰/۴	
	۰/۱۵۱	۰/۹۸۷	۲/۳۴۹	۲۰/۱۸	۰/۶	
	۰/۱۳۸	۰/۵۵	۳/۳۳۹	۱۳/۰۷	۰/۸	
۰/۱۶۷ \pm ۰/۰۴۳	مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد					

روند تغییرات بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک و افزایش اندازه نمونه‌ها در شکل (۴-۴۰) مشخص شده است. در تمامی قطرها با افزایش طول ترک مقاومت نمونه‌ها نیز کمتر شده است. همچنین افزایش قطر نیز موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. نکته قابل توجه در این نمودارها نزدیکی مقادیر بار شکست مربوط به نمونه‌های با نسبت نصف طول ترک به شعاع برابر با ۰/۸ است.

روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست مود II با تغییر طول ترک نیز در شکل (۴-۴۱) نشان داده شده است. نمودارهای این شکل بیانگر حساسیت زیاد مقادیر چقرمگی شکست به تغییر طول ترک در نمونه‌هاست. همانطور که در شکل دیده می‌شود در نمونه‌های با نسبت نصف طول ترک به شعاع برابر با ۰/۲ همگرایی بیشتری بین مقادیر وجود داد.



شکل ۴-۴- روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II



شکل ۴-۴-۱- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش CSTBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۵-۳- نمونه‌های دیسکی با ترک شورن (CCNBD)

۴-۵-۳-۱- نحوه ساخت نمونه‌ها

نحوه ساخت، آماده‌سازی و بارگذاری نمونه‌ها در این روش مشابه بخش (۴-۴-۶) است. این روش نیز

همانند دو روش قبلی از جمله روش‌هایی است که علاوه بر مود کشش خالص، قابلیت ایجاد مود ترکیبی

کشش-برش و مود برش خالص را با تراز کردن راستای ترک در زوایای مختلف نسبت به محور بارگذاری (β) دارد.

برای تعیین دقیق این زوایا بر روی نمونه‌ها از روشی مشابه با نمونه‌های دو روش قبلی استفاده شد. الگوهای دایره‌ای مشابه با شکل (۴-۴۸) با مقیاس واقعی در نرم‌افزار اتوکد تهیه شد. با استفاده از این الگوها زوایای متناظر برای هر نمونه بطور دقیق علامت‌گذاری شده و نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری قرار گرفتند. در این روش نیز برای هر حالت سه نمونه و در مجموع ۲۷ نمونه آماده شد و در محاسبات نیز مقدار میانگین بار شکست هر سه نمونه برای هر حالت در نظر گرفته شد.

برای بررسی مود ترکیبی و مود II خالص با این روش تاکنون روابط خاصی ارائه نشده است. همانگونه که در بخش (۳-۶-۳) ذکر شد در گزارشات مختلف ارائه شده در نوشتجات، برای تعیین چقرمگی شکست مود II با استفاده از نمونه‌های CCNBD از همان روابط مربوط به نمونه‌های CSTBD استفاده شده است. در این پژوهش نیز برای تعیین زوایای متناظر با حالت مود برش خالص با توجه به نسبت طول ترک به شعاع نمونه، از رابطه‌ی (۳-۱۸) استفاده شده است. مقادیر زوایای محاسبه شده با استفاده از این رابطه برای نمونه‌های استفاده شده این روش در جدول (۴-۱۶) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۶- زاویه بین راستای ترک و صفحه بارگذاری متناظر با مود II خالص در نمونه‌های استفاده شده برای روش CCNBD

۰/۷	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۴	۰/۳	نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه
۱۵/۹۹	۱۸/۶۹	۲۱/۶۴	۲۴/۱۹	۲۵/۳۲	۲۷/۲۴	زاویه متناظر با مود برش خالص (درجه)

۴-۵-۳-۲- نتایج

در جدول (۴-۱۷) خلاصه‌ی نتیجه آزمایش نمونه‌ها برای تعیین چقرمگی شکست مود II در این روش ارائه شده است. برای محاسبه مقادیر پارامتر بدون بعد (N_{II}) در این جدول از رابطه‌ی (۳-۱۹) استفاده شده است. برای هر حالت مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده است و برای هر سه قطر نمونه مختلف نیز مقدار میانگین چقرمگی شکست و انحراف معیار استاندارد مقادیر درج شده است. روند تغییرات نتایج به

صورت نموداری در شکل (۴-۴۳) نشان داده شده‌اند. در این شکل برای هر دسته از نتایج بهترین برازش ممکن نیز رسم شده است.

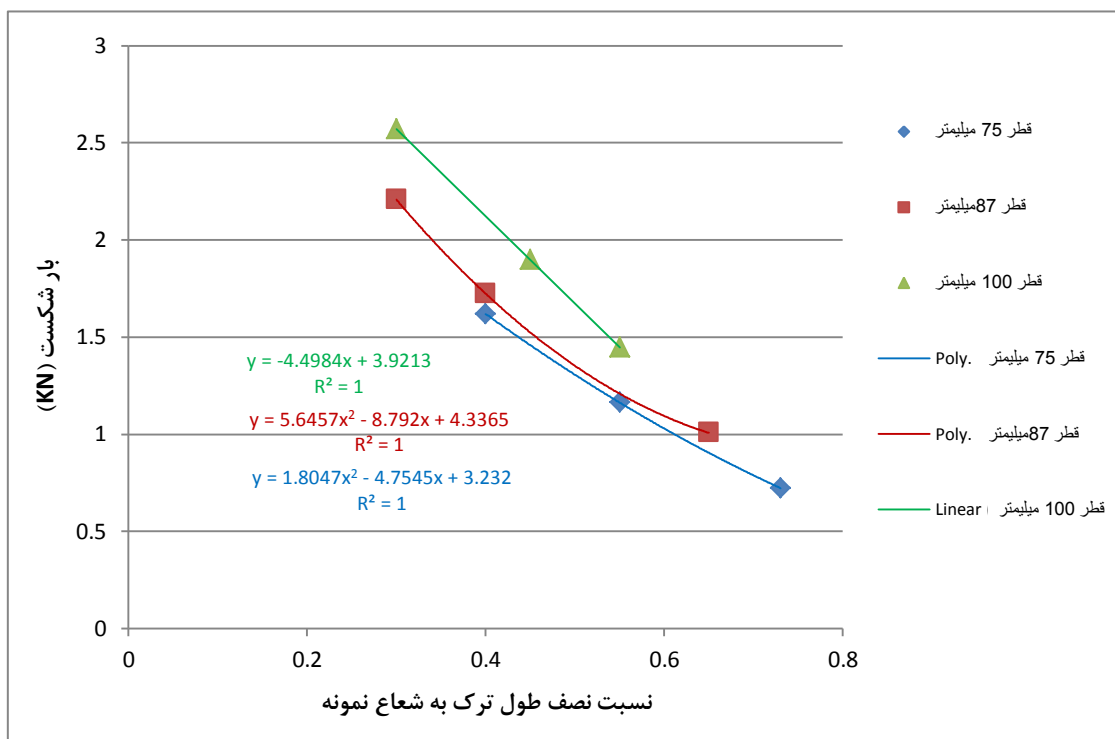
جدول ۴-۱۷- خلاصه نتایج آزمایش‌های چقرمگی شکست مود II نمونه‌های دیسکی با ترک شورن مرکزی

چقرمگی شکست میانگین \pm انحراف معیار استاندارد (MPa \sqrt{m})	چقرمگی شکست مود II (MPa \sqrt{m})	بار شکست میانگین (KN)	N_{II}	β (درجه)	نسبت طول ترک به قطر نمونه	قطر نمونه (میلی‌متر)
۰/۱۸۵ \pm ۰/۰۱	۰/۱۹۷	۱/۶۱۹	۱/۹۷۶	۲۵/۳۲	۰/۴	۷۵
	۰/۱۸۶	۱/۱۶۳	۲/۲۳۰	۲۱/۶۴	۰/۵۵	
	۰/۱۷۱	۰/۷۲۳	۲/۸۴۸	۱۵/۹۹	۰/۷	
۰/۱۹۵ \pm ۰/۰۱	۰/۱۹۶	۲/۲۰۷	۱/۸۶۶	۲۷/۲۴	۰/۳	۸۷
	۰/۲۰۷	۱/۷۲۳	۱/۹۷۶	۲۵/۳۲	۰/۴	
	۰/۱۸۲	۱/۰۰۷	۲/۴۹۸	۱۸/۶۹	۰/۶۵	
۰/۲۱۶ \pm ۰/۰۱	۰/۲۲۵	۲/۵۷۱	۱/۸۶۶	۲۷/۲۴	۰/۳	۱۰۰
	۰/۲۲۱	۱/۸۸۹	۲/۰۴۸	۲۴/۱۹	۰/۴۵	
	۰/۲۰۱	۱/۴۴۶	۲/۲۳۱	۲۱/۶۴	۰/۵۵	
۰/۱۹۸ \pm ۰/۰۱۶		مقدار میانگین چقرمگی شکست \pm انحراف معیار استاندارد				

نتایج جدول فوق نشان می‌دهند، بیشترین مقدار بار شکست نمونه‌های آزمایش شده در این روش ۲/۵۷۱ کیلونیوتن و کمترین مقدار آن نیز ۰/۷۲۳ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II برای نمونه‌های با قطر ۷۵ میلی‌متر ۰/۱۸۵ \pm ۰/۰۱، نمونه‌های با قطر ۸۷ میلی‌متر 0.195 ± 0.01 MPa.m^{1/2} و در نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر 0.216 ± 0.01 MPa.m^{1/2} می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II نمونه‌ها با افزایش ۱۶ درصدی اندازه‌ی نمونه‌ها (از قطر ۷۵ تا ۸۷ میلی‌متر) ۵ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی آن‌ها (از قطر ۸۷ تا ۱۰۰ میلی‌متر) ۱۱ درصد افزایش یافته است.

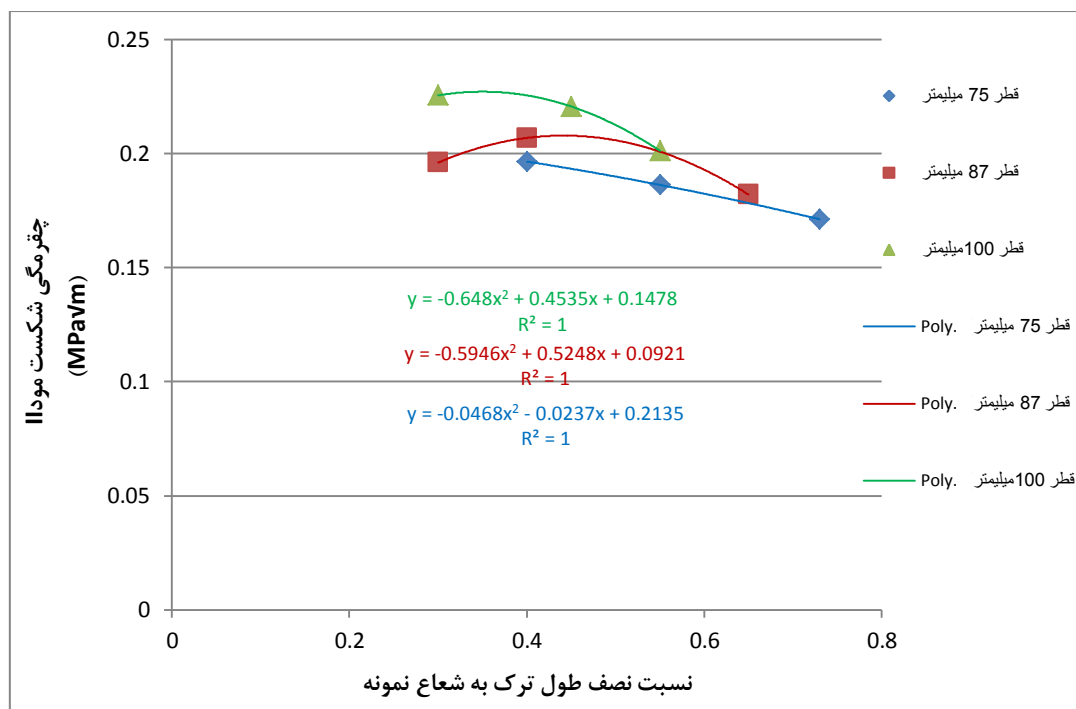
روند تغییرات بار شکست نمونه‌ها با افزایش طول ترک و افزایش اندازه نمونه‌ها در شکل (۴-۴۲) مشخص شده است. در تمامی قطرها با افزایش طول ترک مقاومت نمونه‌ها نیز کمتر شده است. همچنین

افزایش قطر نیز موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. نکته قابل توجه در این نمودارها مقادیر نسبتاً بالای بار شکست مربوط به نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر است.



شکل ۴-۴۲ - روند تغییرات بار شکست نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها در شرایط مود II

همانطور که در شکل (۴-۴۳) نشان داده شده است، مقادیر چقرمگی شکست مود II با تغییر طول ترک روند مشخصی را دنبال نمی‌کنند اما بطور کلی میزان پراکندگی مقادیر نسبت به دو روش قبلی کمتر است.



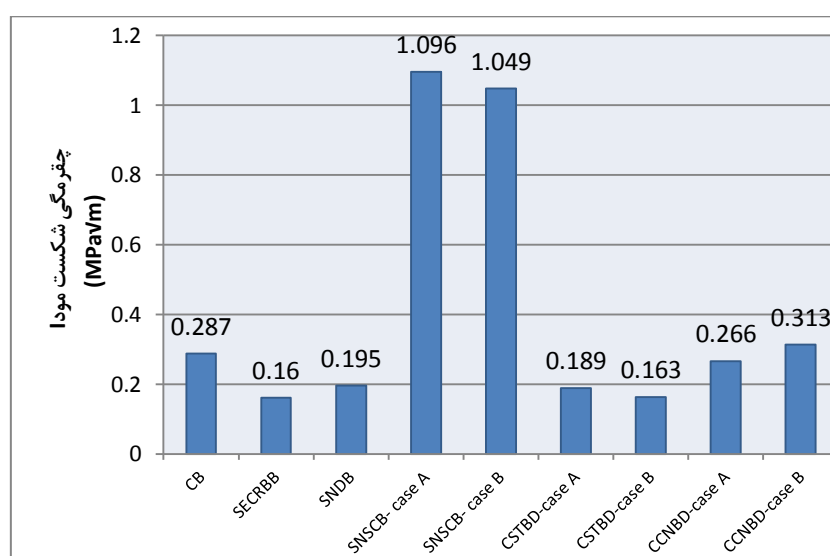
شکل ۴-۴۳- روند تغییرات چقرمگی شکست مود II نمونه‌های روش CCNBD نسبت به تغییر طول ترک در نمونه‌ها

۴-۶-۴- ارزیابی نتایج

۴-۶-۴-۱- مود کششی

مقدار میانگین چقرمگی شکست مود I بدست آمده از روش‌های استفاده شده در شکل (۴-۴۴) نشان

داده شده است.



شکل ۴-۴۴- مقایسه نتایج چقرمگی شکست مود I روش‌های مختلف

همانگونه که دیده می‌شود نتایج روش SNSCB در هر دو حالت A و B تفاوت زیادی با نتایج سایر روش‌ها دارند. همچنین در دو روش مبتنی بر روش‌های استوانه‌ای (CB و SECRBB) که تنها تفاوت آن‌ها در نوع ترک ایجاد شده، بوده است، نتایج روش CB حدود ۷۹ درصد بیشتر هستند در حالیکه میانگین مقادیر بار شکست این نمونه‌ها ۷۳ درصد مقادیر متناظر بار شکست نمونه‌های SECRBB بوده است. همچنین با دقت در نتایج این شکل مشخص می‌شود نتایج دو روش استاندارد پیشنهادی ISRM یعنی روش‌های CB و CCNBD-case A در این پژوهش بسیار به هم نزدیک هستند. در جدول (۴-۱۸) نیز نتایج بدست آمده از شش روش مختلف استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود کششی، از جهات مختلف باهم مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۱۸ - مقایسه نتایج در روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود I

CCNBD	CSTBD	SNSCB	SNDB	SECRBB	CB	روش نتایج
۲/۲۹۴	۴/۵۲۴	۲/۲۰۱	۲/۶۰۹	۰/۵۳۸	۰/۴۱۲	بیشترین مقدار بار شکست (KN)
۱/۲۶۱	۰/۷۹۳	۱/۱۴۶	۰/۵۴۴	۰/۱۲۶	۰/۰۶۴	کمترین مقدار بار شکست (KN)
caseA=۰/۳۸ caseB=۰/۵۲۷	caseA=۰/۲۵۱ caseB=۰/۱۹۴	caseA=۱/۷۰۵ caseB=۱/۶۸۹	۰/۳۰۸	۰/۱۹۵	۰/۳۵۸	بیشترین مقدار چقرمگی شکست (MPa√m)
caseA=۰/۲۱۵ caseB=۰/۲۳۷	caseA=۰/۱۵۹ caseB=۰/۱۳۲	caseA=۰/۷۰۵ caseB=۰/۶۷۸	۰/۱۲۲	۰/۱۴۱	۰/۲۰۴	کمترین مقدار چقرمگی شکست (MPa√m)
caseA=۷۷ caseB=۱۲۲	caseA=۵۸ caseB=۴۷	caseA=۱۴۱ caseB=۱۴۹	۱۵۲	۳۸	۷۵	اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار چقرمگی شکست (درصد)
caseA=۰/۲۶۶ caseB=۰/۳۱۳	caseA=۰/۱۸۹ caseB=۰/۱۶۳	caseA=۱/۰۹۶ caseB=۱/۰۴۹	۰/۱۹۵	۰/۱۶	۰/۲۸۷	مقدار میانگین چقرمگی شکست (MPa√m)
caseA=۰/۰۴۷ caseB=۰/۰۸۶	caseA=۰/۰۲۶ caseB=۰/۰۱۸	caseA=۰/۳۳۷ caseB=۰/۳۵۲	۰/۰۴۸	۰/۰۱۵	۰/۰۴۷	میزان انحراف معیار استاندارد
caseA=۰/۳ caseB=۰/۳	caseA=۰/۲ caseB=۰/۲	caseA=۰/۳ caseB=۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱	مناسب‌ترین نسبت مقدار طول ترک به قطر نمونه
caseA=۱۰۰ caseB=۱۰۰	caseA=۵۴ caseB=۸۷	caseA=۷۵ caseB=۷۵	۵۴	۴۲	۳۵	مناسب‌ترین قطر نمونه (mm)

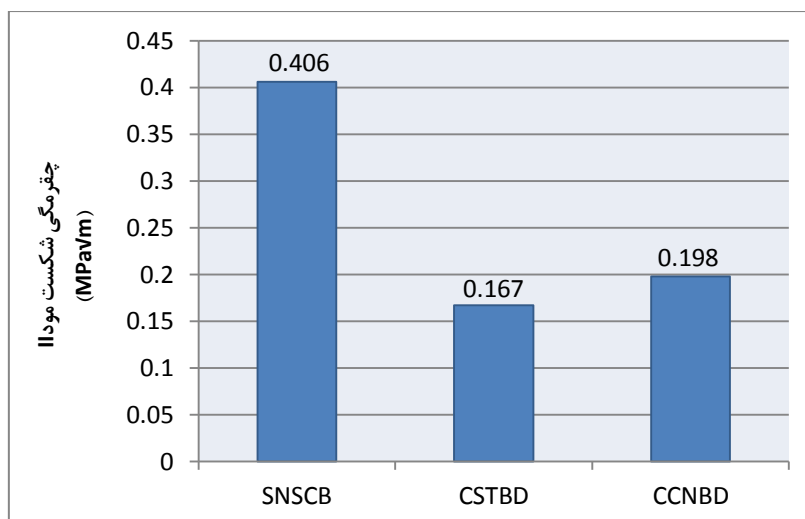
ارزیابی نتایج چقرمگی شکست مود I بدست آمده از روش‌های استفاده شده در این پژوهش بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- در روش CB به ازای نمونه‌های با نسبت طول ترک به قطر برابر با $0/1$ و $0/2$ مقادیر چقرمگی شکست از پراکندگی کمتری برخوردار هستند. همچنین میزان همگرایی بین نتایج این روش در نمونه‌های با قطر 42 و 50 میلی‌متر بیشتر بوده است. مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های این روش حدود $1/08$ برابر نمونه‌های CCNBD در حالت A و حدود $0/92$ نمونه‌های CCNBD در حالت B بوده است.
- همانطور که ذکر شد میزان بار شکست نمونه‌های روش SECRBB نسبت به نمونه‌های با هندسه‌ی مشابه روش CB، بطور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر بوده است درحالی‌که مقادیر چقرمگی شکست محاسبه شده در این روش کمترند. همچنین مقایسه‌ی نتایج این دو روش نشان می‌دهد حساسیت نتایج روش SECRBB نسبت به تغییر اندازه‌ی نمونه و تغییر طول ترک بسیار کمتر از روش CB بوده است و در این روش نتایج به‌ازای هر چهار طول ترک مورد استفاده و هر سه قطر نمونه همبستگی قابل قبولی را نشان می‌دهند.
- نتایج روش SNDB به ازای طول ترک‌های کوچک بسیار به هم نزدیک بوده و با افزایش طول ترک در نمونه‌ها میزان پراکندگی نتایج نیز بیشتر شده است. این افزایش پراکندگی در نتایج با افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها نیز دیده می‌شود. در مقایسه با نتایج روش CB بعنوان یکی از روش‌های پیشنهادی ISRM، مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های این روش حدود $0/68$ روش CB بوده است.
- بطور کلی نتایج روش SNSCB در هر دو حالت A و B با نتایج سایر روش‌ها بسیار متفاوت بوده است. بطور مثال در مقایسه با مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های روش CB، نتایج این روش در حالت A حدود $3/82$ برابر و در حالت B نیز $3/66$ برابر بیشتر بوده است. علاوه بر این میزان حساسیت نتایج این روش به تغییر اندازه‌ی نمونه و تغییر طول ترک بسیار زیاد بوده است و با افزایش این پارامترها، مقادیر چقرمگی شکست مود I بطور چشمگیری افزایش یافته‌اند.

- نتایج بدست آمده از نمونه‌های روش CSTBD در حالت A به ازای نمونه‌های با نسبت نصف طول ترک به شعاع برابر با $0/2$ از همگرایی قابل توجهی برخوردار بوده‌اند و میزان پراکندگی نتایج با افزایش طول ترک در نمونه‌ها و نیز افزایش اندازه‌ی آن‌ها، بیشتر شده است. نزدیکترین مقادیر در این حالت مربوط به نمونه‌های با قطر 54 و 75 میلی‌متر و با نسبت نصف طول ترک به قطر $0/2$ و $0/4$ بوده است. مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های این روش در حالت A حدود $0/66$ برابر روش CB، حدود $0/71$ برابر روش CCBND در حالت A و حدود $0/6$ برابر روش CCBND در حالت B بوده است. همچنین روند تغییرات نتایج این روش در حالت B نیز همانند حالت A است با این تفاوت که در اینجا میزان پیوستگی نتایج مربوط به نمونه‌های با قطر 87 میلی‌متر و عدم حساسیت آن‌ها به تغییر طول ترک قابل توجه بوده است. مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های این روش در حالت B حدود $0/86$ برابر حالت A می‌باشد.
- در روش CCBND برخلاف سایر روش‌های استفاده شده در این پژوهش، با افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها مقدار چقرمگی شکست میانگین نمونه‌ها کاهش یافته است. نتایج بدست آمده از این روش به‌ازای تمامی طول ترک‌ها بویژه در نسبت‌های نصف طول ترک به شعاع کمتر از $0/6$ همگرایی خوبی را نشان می‌دهند. همچنین عدم حساسیت نمونه‌های با قطر 100 میلی‌متر به تغییر طول ترک در نتایج این روش قابل توجه است. مقدار میانگین چقرمگی شکست نمونه‌های این روش در حالت B حدود $1/18$ برابر حالت A بوده است.

۴-۶-۲- مود برشی

مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II بدست آمده از روش‌های استفاده شده در شکل (۴-۴۵) نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود در اینجا نیز نتایج روش SNSCB نسبت به دو روش دیگر بسیار متفاوت و بیشتر است و همچنین نتایج روش CCBND نیز بیشتر از نتایج روش CSTBD بوده‌اند.



شکل ۴-۴۵- مقایسه نتایج چقرمگی شکست مود II روش‌های مختلف

در جدول (۴-۱۹) نیز نتایج بدست آمده از سه روش مختلف استفاده شده برای تعیین چقرمگی

شکست مود برشی، از جهات مختلف باهم مقایسه شده‌اند.

جدول ۴-۱۹- مقایسه نتایج در روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود II

CCNBD	CSTBD	SNSCB	روش / نتایج
۲/۵۷۱	۳/۲۵۳	۲/۹۲۲	بیشترین مقدار بار شکست (KN)
۰/۷۲۳	۰/۳۳۵	۱/۱۰۱	کمترین مقدار بار شکست (KN)
۰/۲۲۵	۰/۲۳۷	۰/۵۱۳	بیشترین مقدار چقرمگی شکست (MPa·m)
۰/۱۷۱	۰/۰۹۹	۰/۳۱۲	کمترین مقدار چقرمگی شکست (MPa·m)
۳۲	۱۳۹	۶۴	اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار چقرمگی شکست
۰/۱۹۸	۰/۱۶۷	۰/۴۰۶	مقدار میانگین چقرمگی شکست (MPa·m)
۰/۰۱۶	۰/۰۴۳	۰/۰۷۷	میزان انحراف معیار استاندارد
۰/۴	۰/۲	۰/۳	مناسب‌ترین نسبت طول ترک به قطر نمونه
۱۰۰ و ۸۷ و ۷۵	۱۰۰	۸۷ و ۷۵	مناسب‌ترین قطر نمونه (mm)

ارزیابی نتایج چقرمگی شکست مود II بدست آمده از روش‌های استفاده شده در این پژوهش بصورت

زیر خلاصه می‌شود:

- نتایج بدست آمده از روش SCNBD در اینجا نیز به تغییر اندازه‌ی نمونه و تغییر طول ترک حساس بوده‌اند اما پیوستگی نتایج برای نمونه‌های با نسبت طول ترک به شعاع برابر با $0/3$ قابل ملاحظه است. نسبت به حالت مود کشش در اینجا حساسیت مقادیر به تغییر اندازه و طول ترک نمونه‌ها کمتر شده است. مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II نمونه‌های این روش حدود $2/43$ برابر روش CSTBD و حدود $2/05$ برابر روش CCNBD بوده است.
- روند تغییرات نتایج روش CSTBD با تغییر طول ترک و اندازه‌ی نمونه‌ها مشخص نبوده و تنها نکته قابل توجه پیوستگی نتایج در نمونه‌های با نسبت نصف طول ترک به شعاع $0/2$ است. مقدار میانگین چقرمگی شکست مود II نمونه‌های این روش حدود $0/84$ برابر روش CCNBD بوده است.
- نتایج چقرمگی شکست مود II روش CCNBD در حالت مود II نیز مانند حالت مود I با افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها بیشتر شده‌اند. اما در این حالت با افزایش طول ترک در قطره‌های متفاوت، نتایج روند متفاوتی را دنبال می‌کنند.

۴-۷- جمع‌بندی

به منظور مقایسه بین روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست سنگ در حالت کشش و برش بر اساس امکانات در دسترس شش روش مختلف برای تعیین چقرمگی شکست مود کششی و سه روش مختلف نیز برای تعیین چقرمگی شکست مود برشی انتخاب شده و نمونه‌های لازم برای هر روش بطور مصنوعی و با مصالح گچی ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. در مجموع ۳۱۶ آزمایش انجام شد و ابتدا نتایج بدست آمده در هر روش بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه و تغییر طول ترک مطالعه گردید. سپس نتایج بدست آمده برای هر دو حالت کشش و

برش ارزیابی شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. تحلیل نتایج چقرمگی شکست در حالت کشش در این پژوهش نشان می‌دهد میزان حساسیت نتایج روش SNSCB به تغییر طول ترک و اندازه نمونه در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار بیشتر بوده و مقدار چقرمگی شکست بسیار بیشتری نشان می‌دهد. از طرف دیگر میزان حساسیت نتایج روش SECRBB به تغییر طول ترک و اندازه نمونه در مقایسه با سایر روش‌ها کمتر بوده و نتایج آن همگرایی خوبی را نشان می‌دهند. همچنین تحلیل نتایج چقرمگی شکست در حالت برش در این پژوهش نشان می‌دهد که حساسیت به تغییر طول ترک و اندازه نمونه در روش CCNBD نسبت به دو روش دیگر کمتر است و همگرایی نتایج قابل توجه بوده است.

فصل پنجم:

تحلیل عددی نمونه‌های دیسکی و نیم دیسکی ترک دار برای تفسیر

نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

همانطور که قبلاً بحث شد، اساس این پژوهش بر مطالعات آزمایشگاهی است که جزئیات آن در فصل چهارم ارائه شده است. در این فصل مدلسازی رفتار نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی ترک‌دار با استفاده از نرم‌افزار المان محدود^۱ ABAQUS (نسخه‌ی 6.10) بصورت دو بعدی انجام می‌شود. خواص مواد و شرایط مرزی مشابه با شرایط آزمایشگاهی بر روی مدل‌ها اعمال شده و سپس نحوه توزیع تنش در این نمونه‌ها تحلیل می‌شود. در پایان نیز رفتار شکست این نمونه‌ها با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته^۲ در نرم‌افزار بررسی شده و نتایج آن با مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در فصل چهارم، مقایسه می‌شوند.

۵-۲- نرم‌افزار ABAQUS

ABAQUS نرم‌افزاری قدرتمند بر اساس روش المان محدود است که قابلیت مدلسازی و تحلیل انواع مختلفی از مسائل مهندسی از تحلیل‌های ساده خطی تا شبیه‌سازی‌های پیچیده غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار شامل طیف وسیعی از المان‌ها است که امکان مدلسازی مجازی هر نوع هندسه‌ای را ممکن می‌سازد. همچنین این نرم‌افزار تحلیل بسیاری از مصالح مهندسی نظیر فلزات، لاستیک، سیالات، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح و مواد ژئوتکنیکی یعنی سنگ و خاک را تحت پوشش قرار می‌دهد. یکی از

^۱Finite Element Method

^۲ Extended Finite Element Method

کاربردهای این نرم افزار در مسائل مکانیک شکست است که در این پژوهش از این ویژگی آن استفاده می‌شود.

۵-۲-۱- مدول‌های ABAQUS

ABAQUS نرم‌افزاری گرافیکی با محیطی بسیار کاربرپسند است که به بخش‌های اصلی به نام مدول^۱ تقسیم شده است. هریک از این مدول‌ها حاوی ابزار مربوط به خودش می‌باشد و به عنوان مثال مدول Part تنها شامل ابزارهایی برای ایجاد مدل است درحالیکه مدول Mesh تنها ابزارهای مربوط به مش‌بندی مدل را شامل می‌شود.

نحوه‌ی چینش این مدول‌ها در نرم‌افزار بصورت مراحل منطقی است که دنبال کردن آن‌ها برای ایجاد و تحلیل مدل لازم است. قبل از ثبت مدل برای آغاز تحلیل در نرم‌افزار، بایستی هندسه و سایر خصوصیات فیزیکی آن مرحله به مرحله و به ترتیبی که در ذیل بحث می‌شود، تعریف شوند (ABAQUS user manual, 2010).

۱. مدول Part

از این مدول برای ایجاد و ویرایش قطعات بطور جداگانه و با رسم مستقیم هندسه آن‌ها در نرم‌افزار استفاده می‌شود. با استفاده از این مدول می‌توان مدل‌های پیچیده را به قطعات ساده‌تر جداگانه تقسیم کرد و سپس با ترکیب کردن این قطعات در مدول Assembly مدل نهایی را ایجاد کرد. از طرف دیگر می‌توان قطعات طراحی شده در سایر نرم‌افزارها را در این قسمت وارد کرد و بعنوان هندسه ورودی مدل در نظر گرفت.

۲. مدول Property

در این مدول مواد و خصوصیات آن تعریف می‌شوند و به هر بخش موردنظر از قطعات ایجاد شده اختصاص می‌یابند.

¹ module

۳. مدول Assembly

همانگونه که بحث شد، با استفاده از این مدول می‌توان قطعات جداگانه ایجاد شده در مدول Part را وارد صفحه کرد و با اعمال قیدهای مناسب آن‌ها را در موقعیت مناسب قرار داده و هندسه نهایی مدل را ایجاد کرد.

۴. مدول Step

در این بخش با توجه به نوع مسئله، مراحل لازم برای تحلیل آن تعریف می‌شود. علاوه بر آن می‌توان نوع و چگونگی نتایج خروجی حاصل از تحلیل را تعیین کرد. در کاربردهای مکانیک شکست، درخواست برای محاسبه‌ی پارامترهای مختلف از جمله ضرایب شدت تنش یک ترک در این مرحله صورت می‌گیرد.

۵. مدول Interaction

در این بخش رفتارهای تماسی مکانیکی (مانند اصطکاک) و حرارتی (مانند انتقال حرارت) بین قطعات تعریف و اعمال می‌شوند. همچنین قیود و اتصالات مدل نیز در این مرحله تعریف و اعمال می‌شوند، تعریف ترک و معرفی آن به مدل ساخته شده نیز در این مدول انجام می‌گیرد.

۶. مدول Load

از این مدول برای تعیین بارها و شرایط مرزی مدل استفاده می‌شود.

۷. مدول Mesh

ایجاد مش‌بندی المان محدود، دانه بندی مش، کنترل مش‌بندی و تعریف نوع المان‌ها در این مرحله انجام می‌شود.

۸. مدول Job

فاز بعدی پس از تعیین و تعریف تمام مراحل فوق، نهایی کردن تحلیل با استفاده از این مدول است. در این مرحله مدل تحلیل می‌شود و می‌توان مراحل حل و نحوه‌ی اجرای آن را مشاهده کرد.

۹. مدول Visualization

از این مدول برای نمایش گرافیکی مدل‌های المان محدود و نتایج استفاده می‌شود. تغییر شکل‌ها، کانتورها، گراف‌ها و انیمیشن‌های تحلیل و بطور کلی نتایج خروجی تعیین شده در مدول Step را می‌توان در این مرحله مشاهده کرد.

۵-۲-۲- مکانیک شکست در ABAQUS

مدلسازی مکانیک شکست در نرم‌افزار ABAQUS/CAE را می‌توان با روش‌های زیر انجام داد (ABAQUS user manual, 2010):

۱. ایجاد یک ترک درزی^۱ که بصورت یک لبه یا وجه و بوسیله‌ی همپوشانی گره‌ها و امکان جداشدن در حین تحلیل، تعریف می‌شود.
۲. استفاده از تخمین‌های انتگرال کانتوری^۲ برای بررسی آغاز ترک‌خوردگی در مسائل شبه‌استاتیکی. با این حال امکان پیش‌بینی چگونگی رشد ترک با این روش امکان‌پذیر نیست. با استفاده از این روش می‌توان پارامترهای مکانیک شکست نظیر ضرایب شدت تنش، انتگرال J ، انتگرال C_I و تنش T را محاسبه کرد.
۳. استفاده از روش المان محدود توسعه یافته (XFEM^۳) برای مطالعه‌ی آغاز و گسترش ترک در امتداد یک مسیر مشخص یا مسیری وابسته به حل مسئله. مهمترین ویژگی این روش عدم نیاز به مش‌بندی مکرر مدل در هر گام از تحلیل است.

¹ Seam crack

² Contour integral

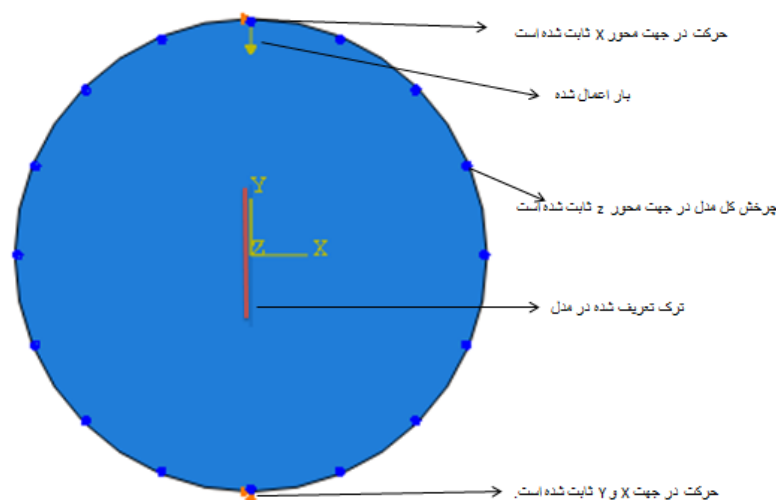
³ Extended finite element method

۵-۳- هندسه، شرایط مرزی و مدلسازی نمونه‌ها

به منظور مدلسازی و تحلیل نمونه‌ها، تمام مدل‌ها بصورت دو بعدی ساخته شده و شرایط تنش صفحه‌ای برای مسئله در نظر گرفته شده است. به منظور مدلسازی نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری و نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای، قطر نمونه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها ۱ میلی‌متر (شرایط تنش صفحه‌ای دو بعدی) در نظر گرفته شده است. همچنین مطابق جدول (۴-۱) مدول یانگ نمونه‌ها ۳/۱۳ گیگا پاسکال و ضریب پواسون آن‌ها نیز ۰/۱۹ بعنوان پارامترهای الاستیک مواد در نرم‌افزار وارد شد. لازم به ذکر است که در این نرم‌افزار تنش‌های کششی با علامت مثبت و تنش‌های فشاری با علامت منفی مشخص می‌شوند (برخلاف عرف قراردادی علامت‌گذاری در علم مکانیک سنگ).

۵-۳-۱- شرایط مرزی مدل نمونه‌ی دیسکی ترک‌دار

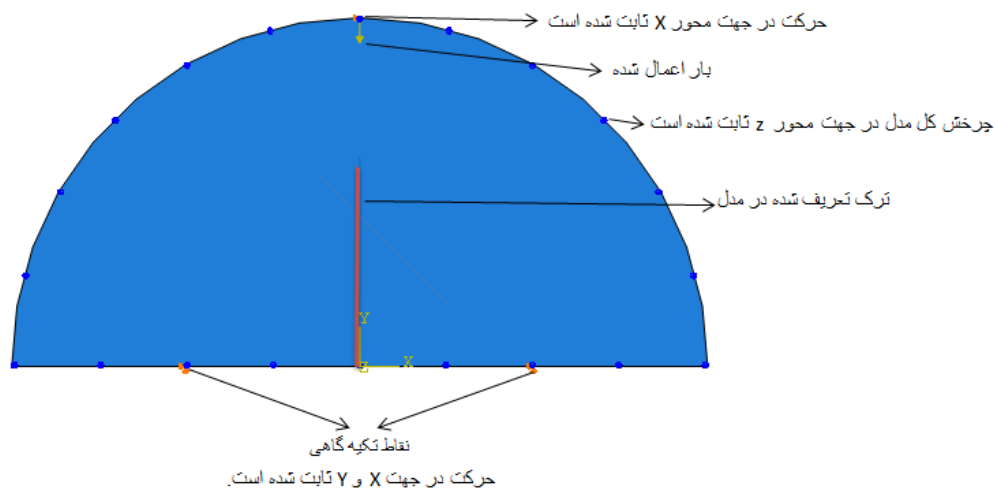
در شکل (۵-۱) هندسه مدل ساخته شده، شرایط مرزی اعمال شده بر روی آن در نرم‌افزار و همچنین ترک تعریف شده برای نمونه‌های دیسکی نشان داده شده است. قسمت بالای مدل در جهت محور x و قسمت انتهایی آن نیز در هر دو جهت اصلی ثابت شده‌اند. همچنین چرخش کل مدل در راستای محور z نیز ثابت شده است تا شرایط مرزی کاملاً مشابه با شرایط آزمایشگاهی برای مدل لحاظ شده باشد.



شکل ۵-۱- مدل ساخته شده و شرایط مرزی برای نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری فشاری تک محوری

۵-۳-۲- شرایط مرزی نمونه‌ی نیم‌دیسکی ترک‌دار

مدل ساخته شده، شرایط مرزی اعمال شده بر روی آن در نرم‌افزار و ترک تعریف شده برای نمونه‌های نیم‌دیسکی در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نیز مشخص شده است، قسمت بالایی مدل در جهت محور X و هر دو تکیه‌گاه انتهایی آن نیز در جهت هر دو محور اصلی ثابت شده‌اند. مانند مدل نمونه‌ی دیسکی در اینجا نیز امکان چرخش کل مدل در جهت محور Z سلب شده است.



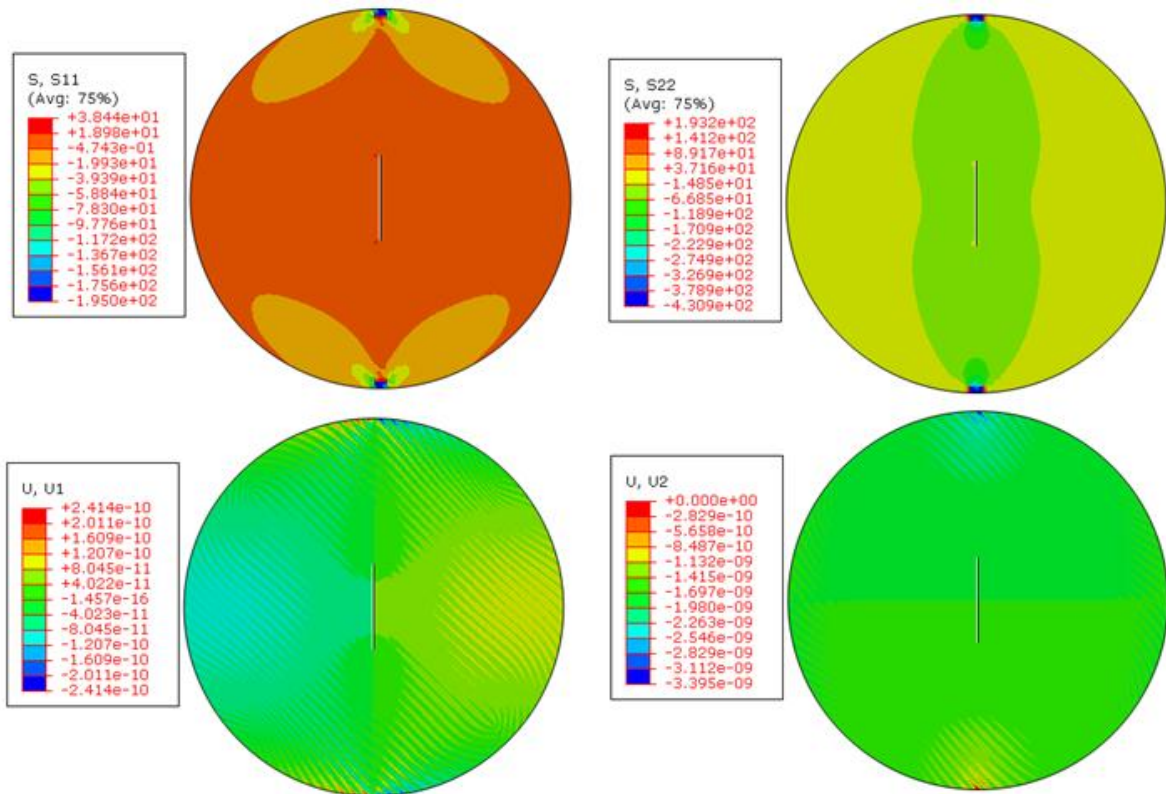
شکل ۵-۲- مدل ساخته شده و شرایط مرزی برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای

۵-۴- میدان تنش و جابجایی در نمونه‌ها

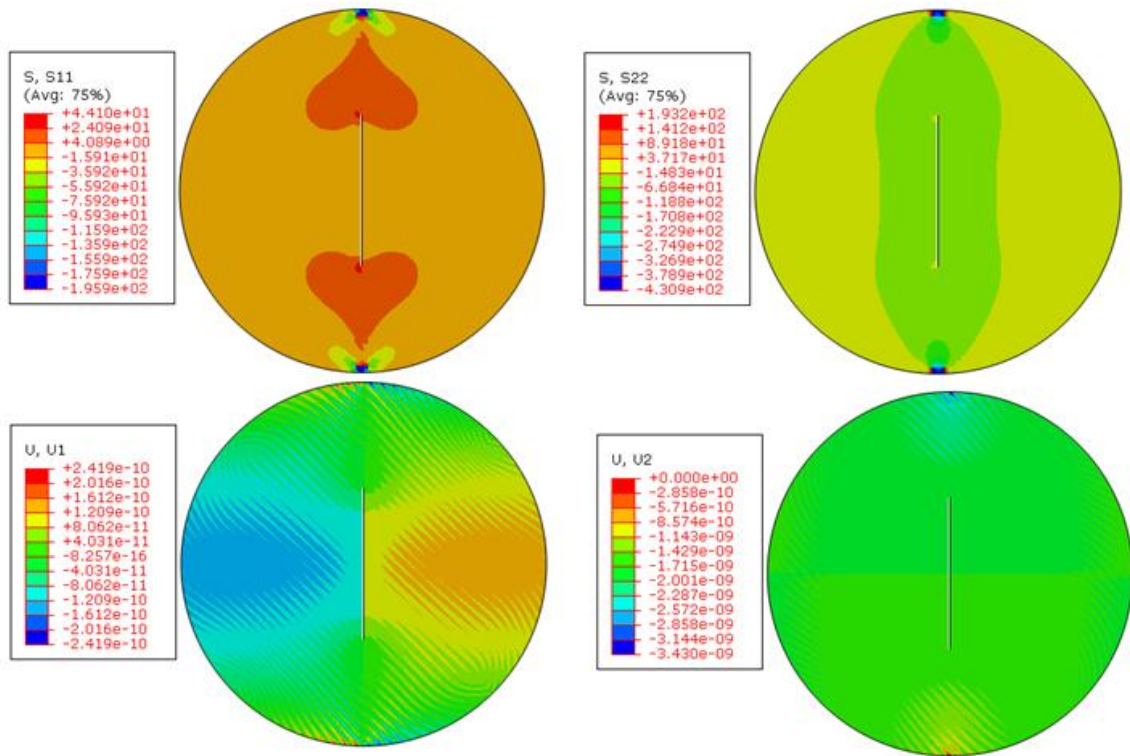
۵-۴-۱- میدان تنش و جابجایی در نمونه‌های دیسکی

تحلیل میدان تنش و جابجایی‌ها در نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم، در مدل‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به‌ازای چهار نسبت نصف طول ترک به شعاع (a/R) برابر با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ انجام شده است. این تحلیل‌ها برای حالات کشش و برش خالص در این نمونه‌ها انجام شده است. شرایط مرزی مطابق شکل (۵-۱) اعمال شده است. به منظور ایجاد امکان مقایسه و بررسی تاثیر طول ترک بر روی نحوه توزیع تنش در نمونه‌ها، برای تمامی حالت‌ها بار فشاری معادل ۱ نیوتن ($F_Y = -1N$) بر روی قسمت بالایی مدل‌ها (شکل ۵-۱) اعمال شده است.

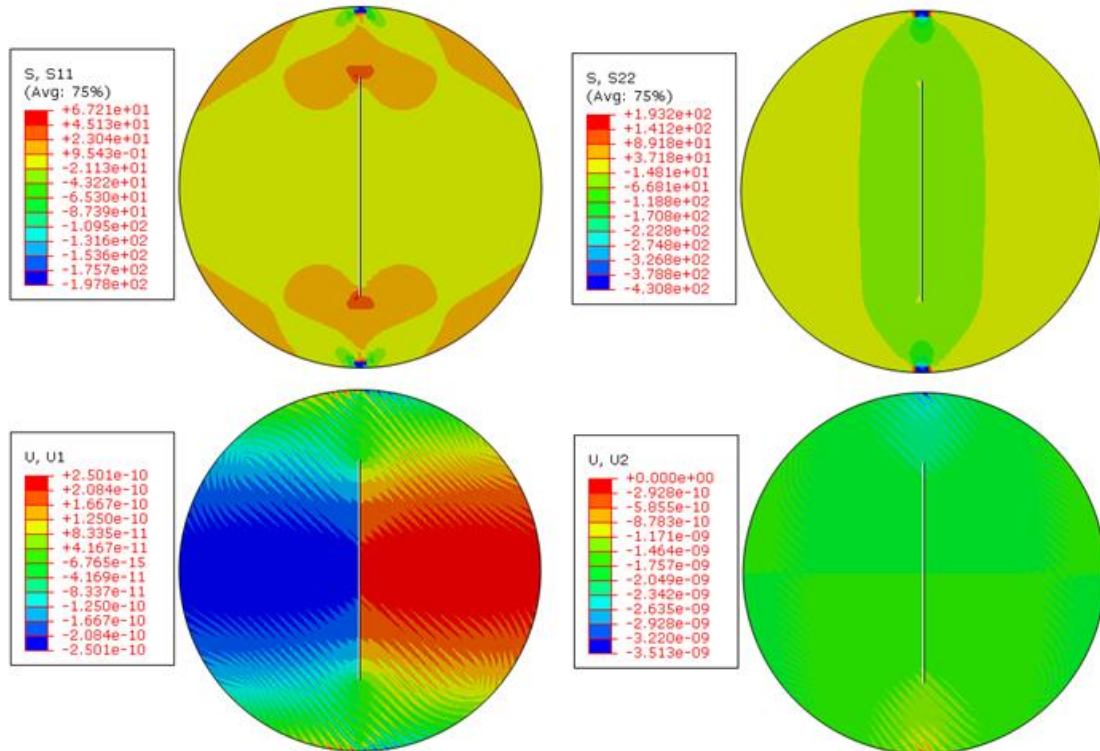
در شکل‌های (۳-۵) تا (۶-۵) نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای هر چهار طول ترک ذکر شده در حالت کشش خالص نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بیشترین میزان تنش کششی در حالت افقی (تصاویر بالا سمت چپ) در تمامی حالات در دو نوک ترک ایجاد شده است. همچنین با افزایش طول ترک میزان تمرکز تنش نیز بیشتر شده است. این میزان تمرکز تنش برای نسبت‌های نصف طول ترک به شعاع $0/2$ ، $0/4$ ، $0/6$ و $0/8$ به ترتیب تقریباً 38 ، 44 ، 67 و 107 پاسکال می‌باشد. کانتورهای جابجایی افقی نیز تقارن کامل در هر دو سمت ترک تعریف شده در مدل‌ها را نشان می‌دهند. بطوریکه جابجایی افقی مدل‌ها در سمت راست ترک مثبت و در سمت چپ آن منفی است. بدلیل ثابت نگه داشتن قسمت انتهایی مدل‌ها در راستای عمودی، میزان جابجایی عمودی در این نقاط در تمام شکل‌های متناظر صفر است.



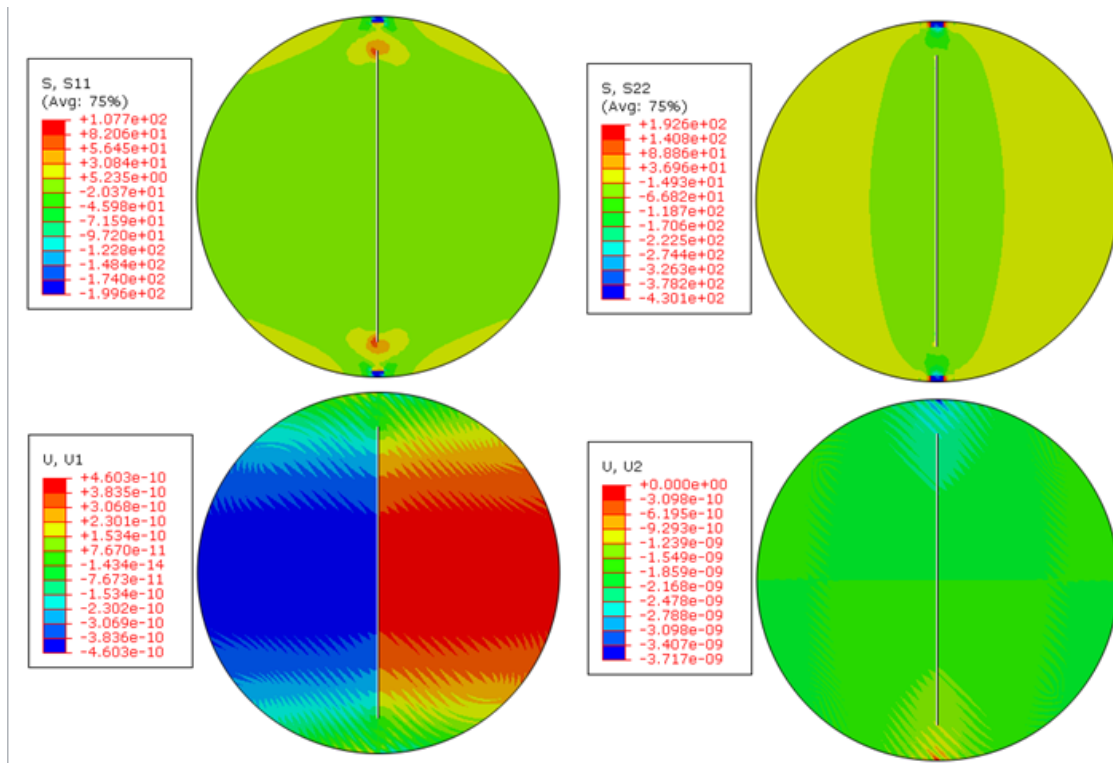
شکل ۳-۵- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/2$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



شکل ۴-۵- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه ۰/۴ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)

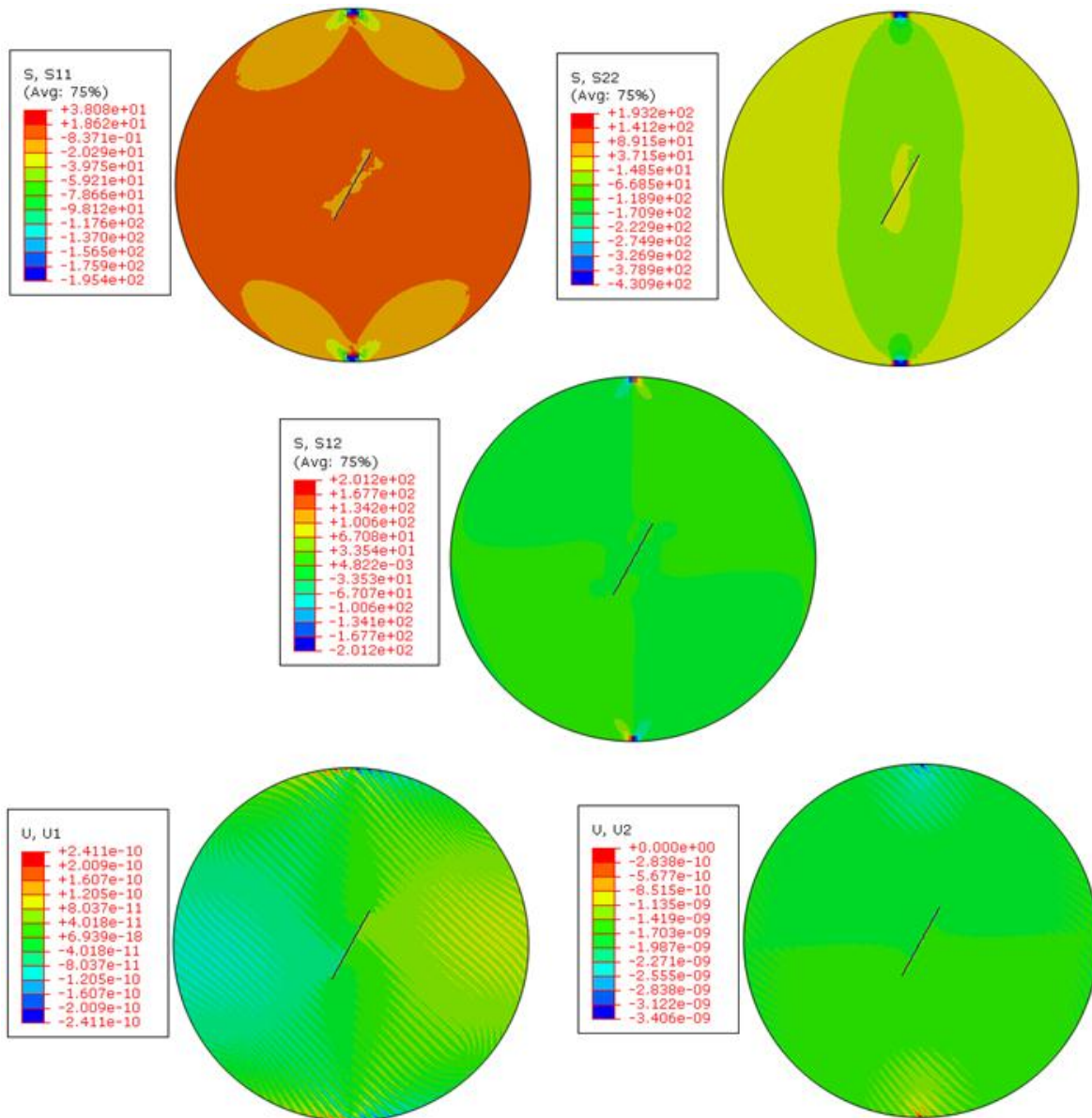


شکل ۵-۵- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه ۰/۶ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)

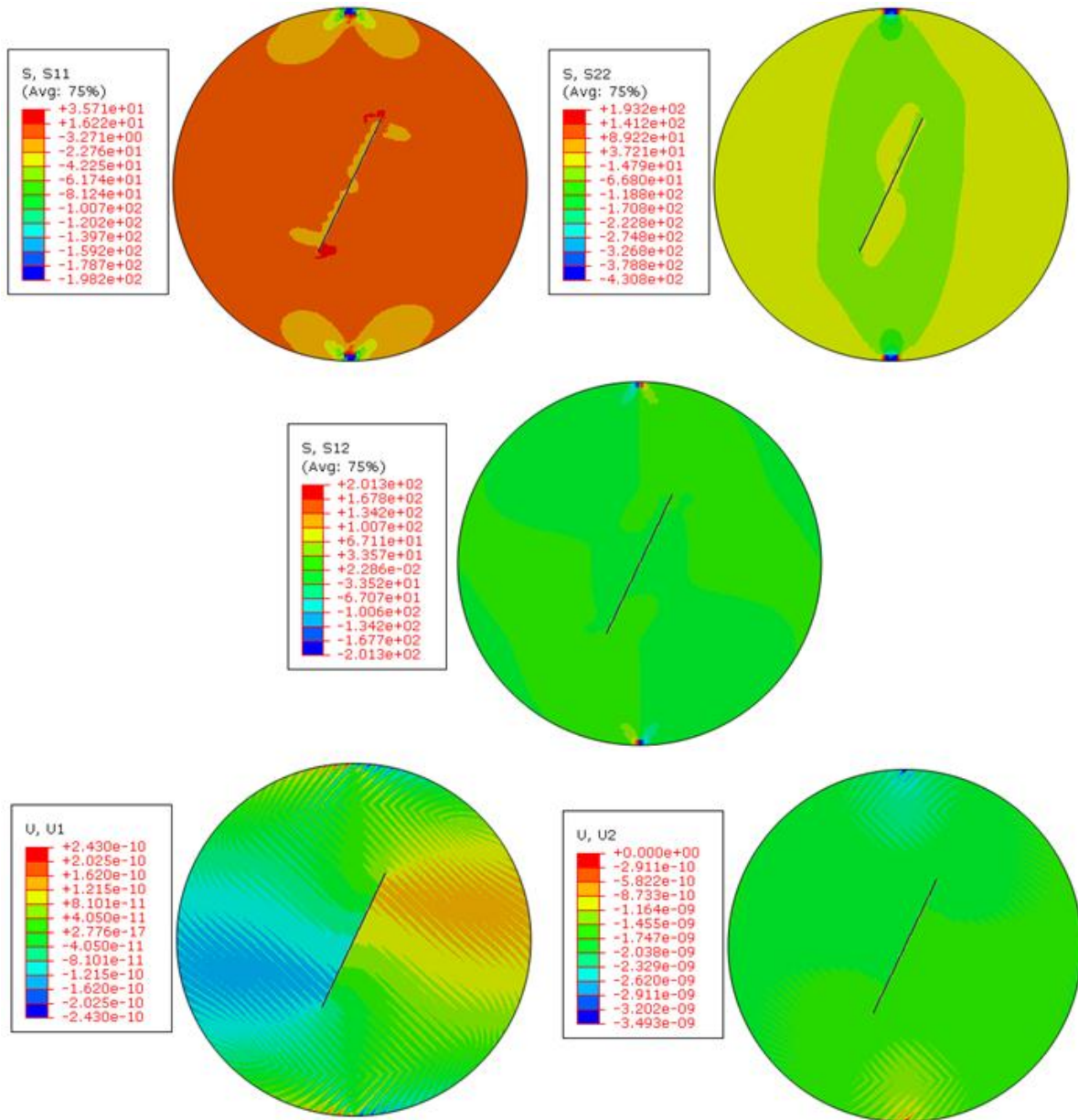


شکل ۵-۶- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه ۰/۸ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)

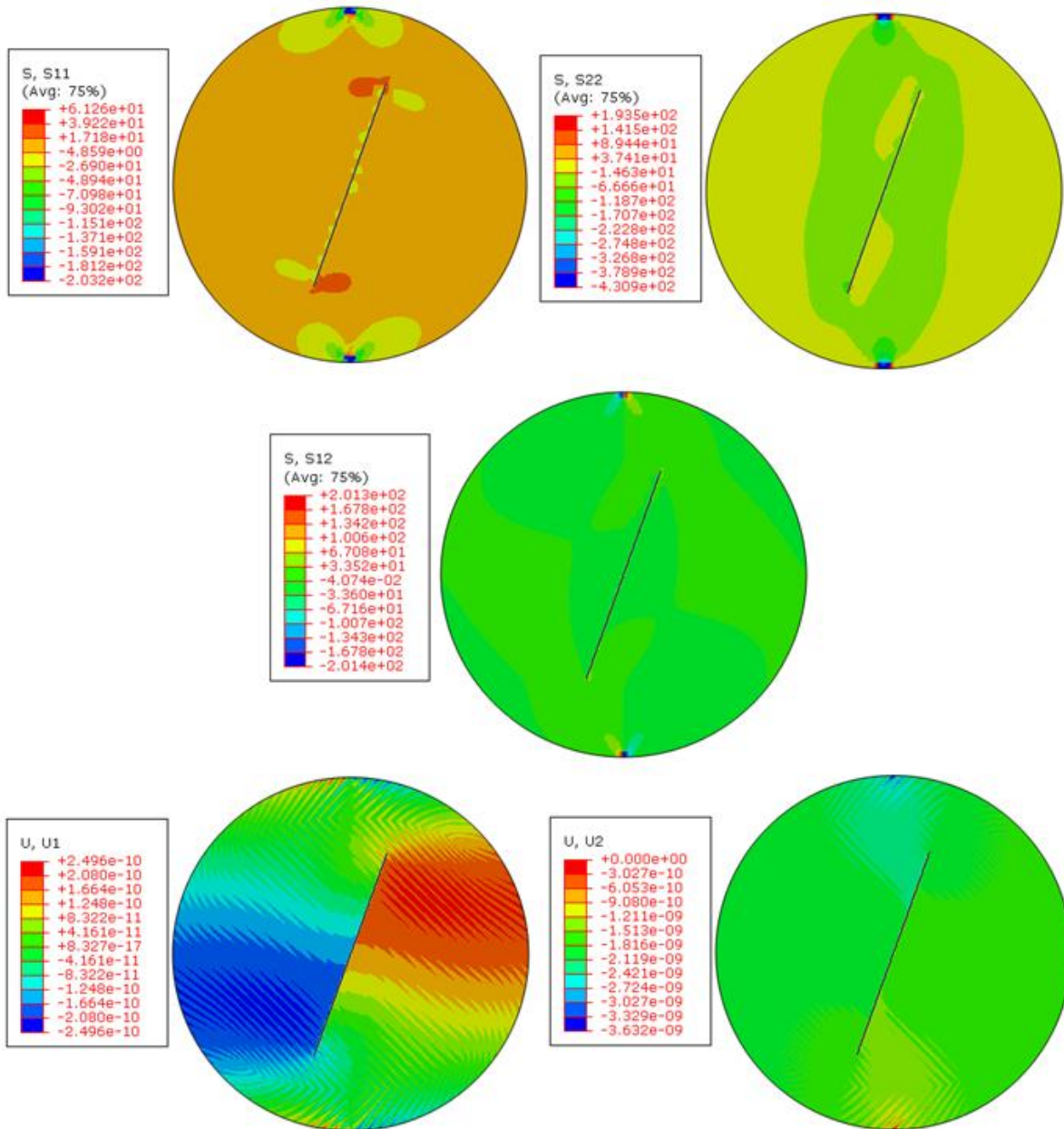
در شکل‌های (۵-۷) تا (۵-۱۰) نیز نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و همچنین نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای هر چهار طول ترک ذکر شده در حالت برش خالص نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود نحوه قرارگیری ترک در مدل و طول آن، در مقایسه با حالت کشش خالص تاثیر چشم‌گیری بر روی نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها دارد.



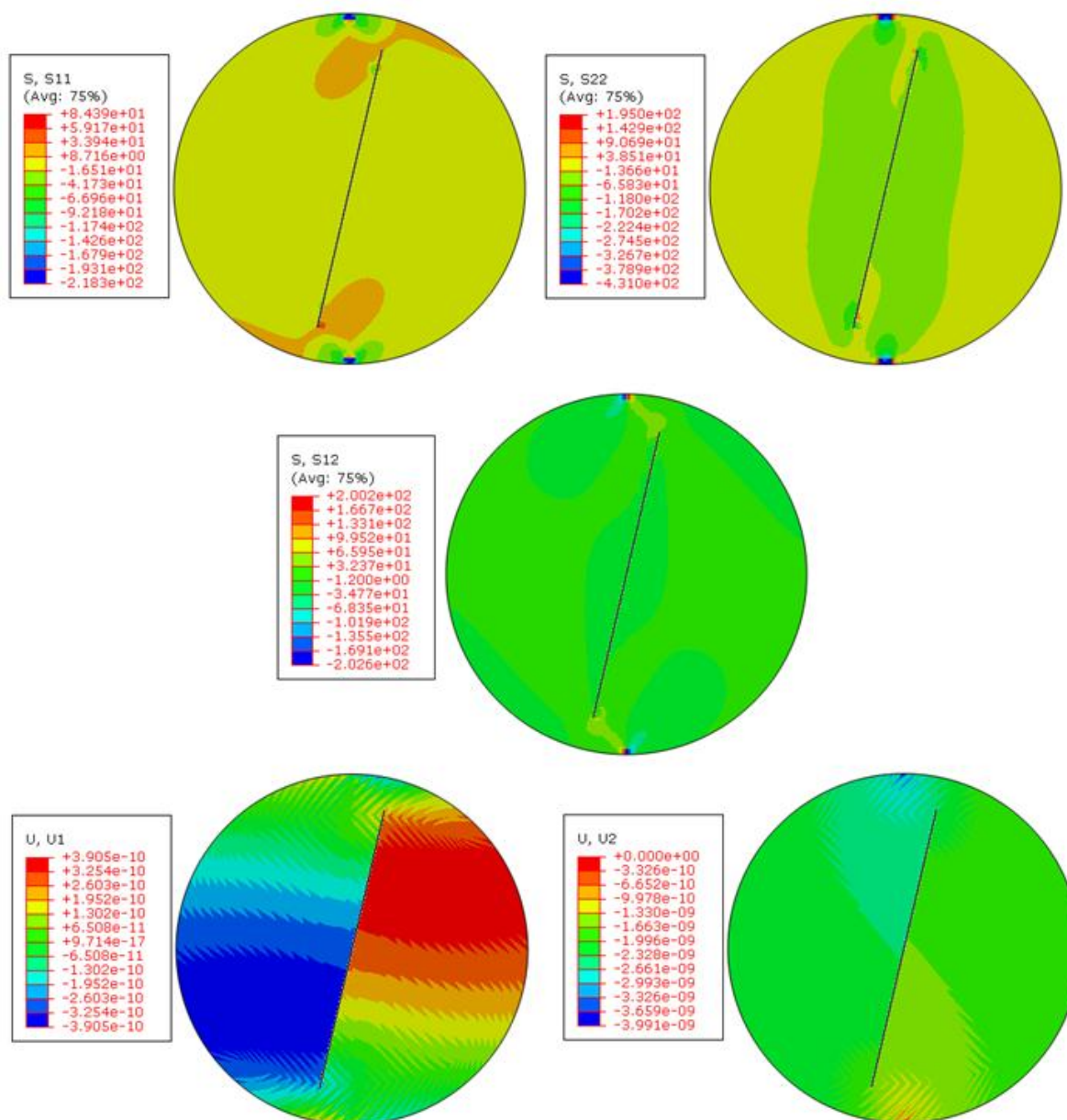
شکل ۵-۷- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه 0.2 در حالت برش خالص ($\beta=28.72$)



شکل ۵-۸- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه 0.4 در حالت برش خالص ($\beta=25.27$)



شکل ۵-۹- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ در حالت برش خالص ($\beta=20.18$)



شکل ۵-۱۰- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه ۰/۸ در حالت برش خالص ($\beta=13.07$)

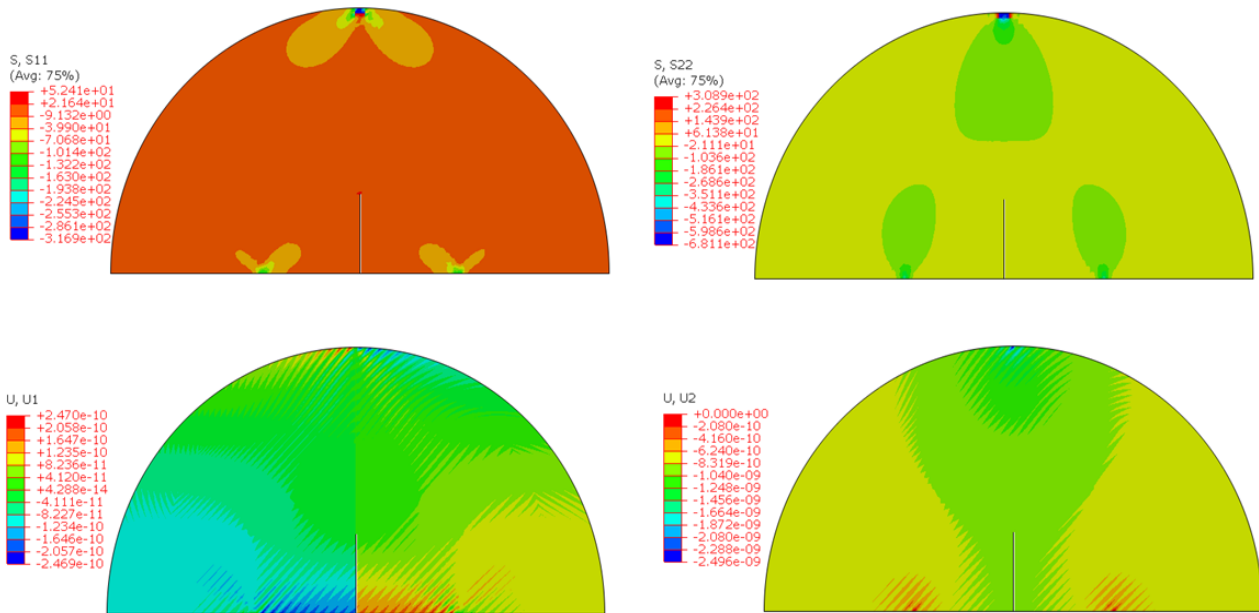
۵-۴-۲- میدان تنش و جابجایی در نمونه‌های نیم‌دیسکی

تحلیل میدان تنش و جابجایی‌ها در نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم و تحت شرایط بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای، در مدل‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به‌ازای سه نسبت طول ترک به شعاع (a/R) برابر با ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۶ انجام شده است. در مدلسازی دو طول ترک اول نسبت فاصله‌ی نقاط تکیه‌گاهی به قطر نمونه (S/D) برابر با ۰/۴ و برای نسبت طول ترک به شعاع ۰/۶ این نسبت برابر با ۰/۵ در

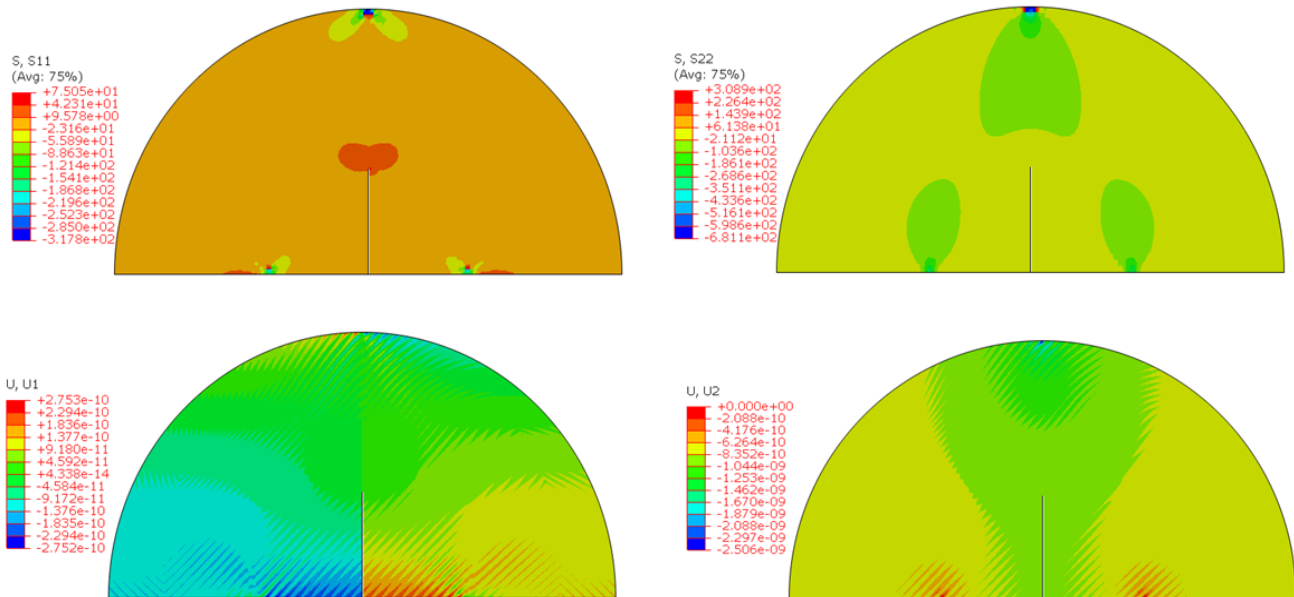
نظر گرفته شده است. این تحلیل‌ها برای حالات کشش و برش خالص در این نمونه‌ها انجام شده است. شرایط مرزی مطابق شکل (۵-۲) اعمال شده است. به منظور ایجاد امکان مقایسه و بررسی تاثیر طول ترک بر روی نحوه توزیع تنش در نمونه‌ها، برای تمامی حالت‌ها بار فشاری معادل ۱ نیوتن ($F_Y = -1N$) بر روی قسمت بالایی مدل‌ها (شکل ۵-۲) اعمال شده است.

نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای هر سه طول ترک ذکر شده در حالت کشش خالص در شکل‌های (۵-۱۱) تا (۵-۱۳) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود بیشترین میزان تنش کششی در حالت افقی (تصاویر بالایی سمت چپ) در تمامی حالات در نوک ترک ایجاد شده است. همچنین در دو حالت اول که شرایط مشابهی دارند (شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲) با افزایش طول ترک میزان تمرکز تنش نیز بیشتر شده است. این میزان تمرکز تنش برای نسبت‌های نصف طول ترک به شعاع $0/3$ و $0/4$ به ترتیب تقریباً ۵۲ و ۷۵ پاسکال می‌باشد. در حالت سوم (شکل ۵-۱۳) نیز این میزان تنش کششی متمرکز شده در نوک ترک تقریباً ۹۳ پاسکال است که هرچند طول ترک در این حالت از طول ترک در دو حالت قبلی بیشتر است اما بدلیل نسبت (S/D) بیشتر، میزان افزایش تنش کششی در نوک ترک به نسبت کمتر است. کانتورهای جابجایی افقی نیز تقارن کامل در هر دو سمت ترک تعریف شده در مدل‌ها را نشان می‌دهند. بطوریکه جابجایی افقی مدل‌ها در سمت راست ترک مثبت و در سمت چپ آن منفی است.

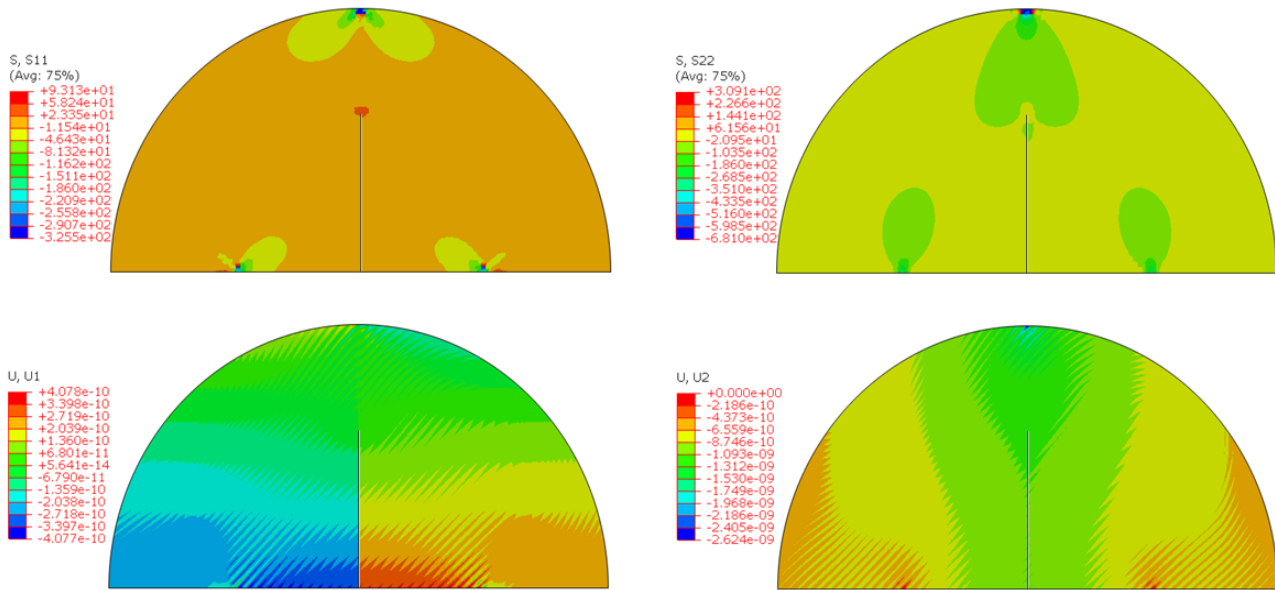
بدلیل ثابت نگه داشتن نقاط تکیه‌گاهی مدل‌ها در راستاهای افقی و عمودی، میزان جابجایی افقی عمودی در این نقاط در تمام شکل‌های متناظر صفر است.



شکل ۵-۱۱- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/3$ و در حالت کشش خالص ($\beta=0$) در $(S/D=0/4)$

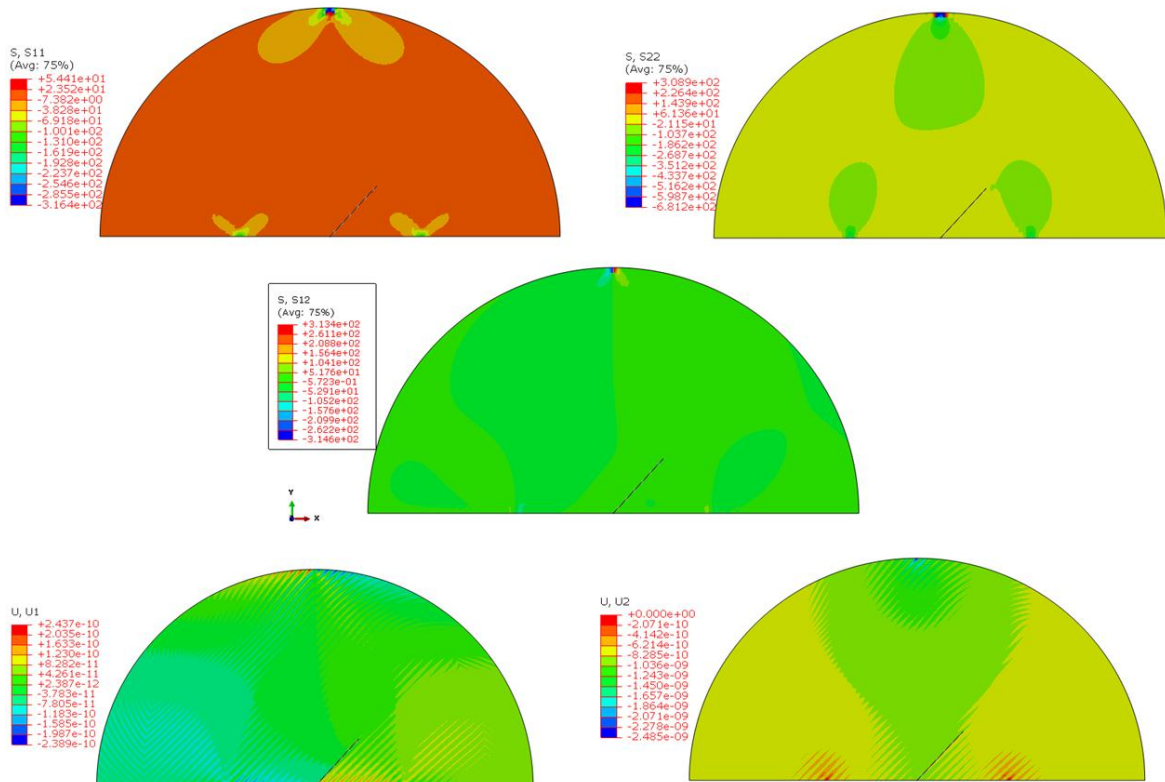


شکل ۵-۱۲- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/4$ و در حالت کشش خالص ($\beta=0$) در $(S/D=0/4)$

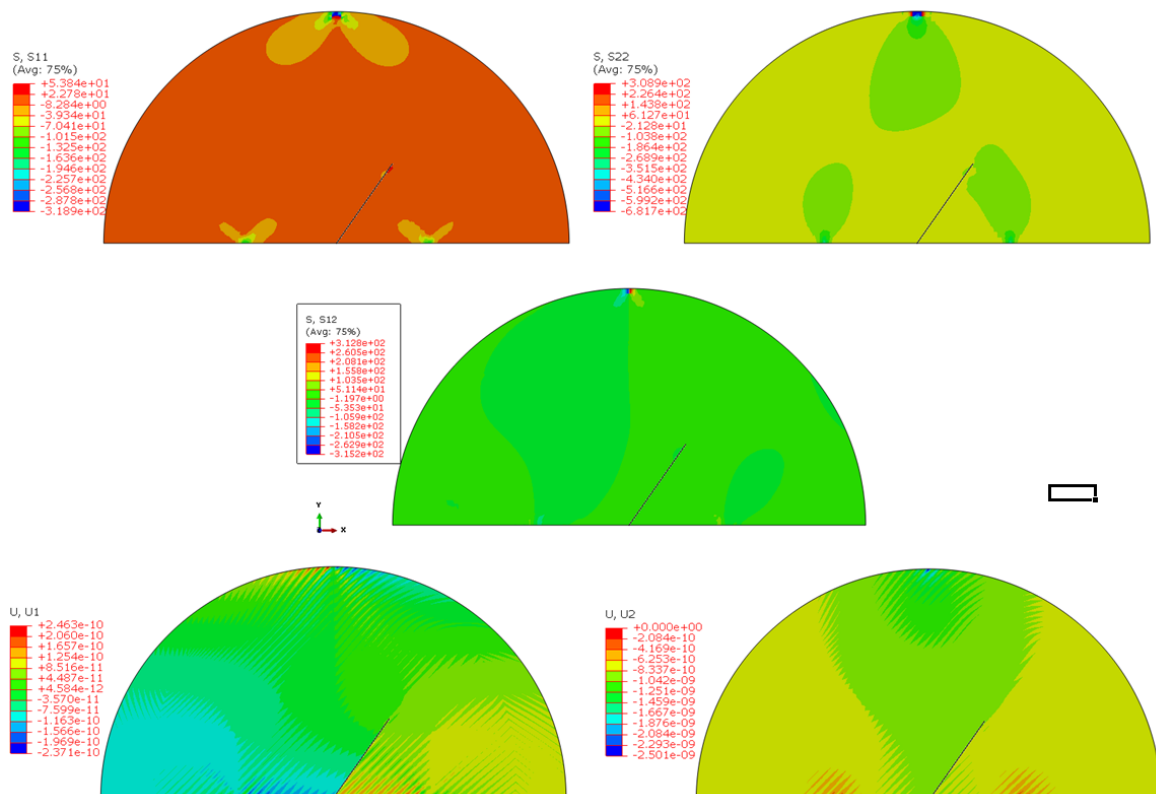


شکل ۵-۱۳- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ و $(S/D=0/5)$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)

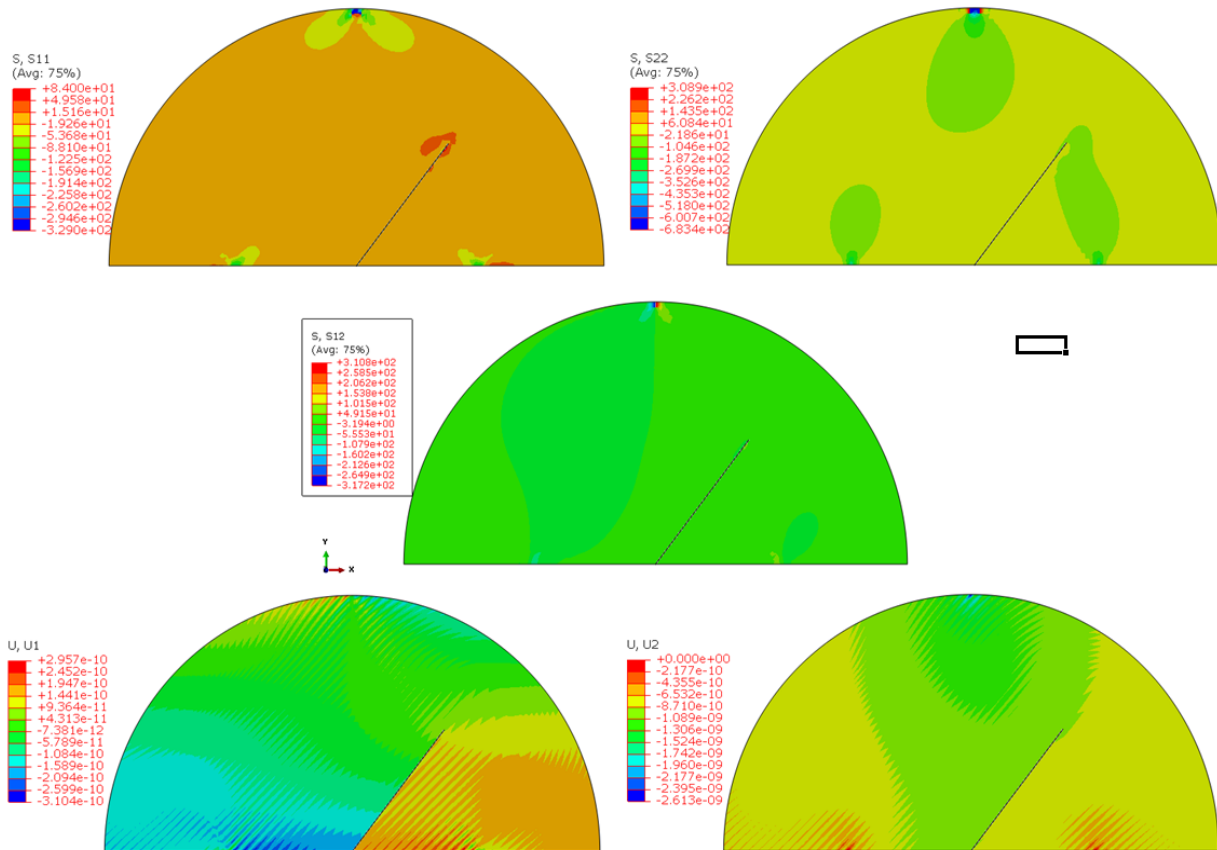
در شکل‌های (۵-۱۴) تا (۵-۱۶) نیز نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و همچنین نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای هر سه طول ترک ذکر شده در حالت برش خالص نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در اینجا نیز نحوه‌ی قرارگیری ترک در مدل و طول آن، در مقایسه با حالت کشش خالص تاثیر چشم‌گیری بر روی نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها دارد.



شکل ۵-۱۴- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $\beta=0.3$ و $(S/D=0/4)$ در حالت برش خالص ($\beta=42.5$)



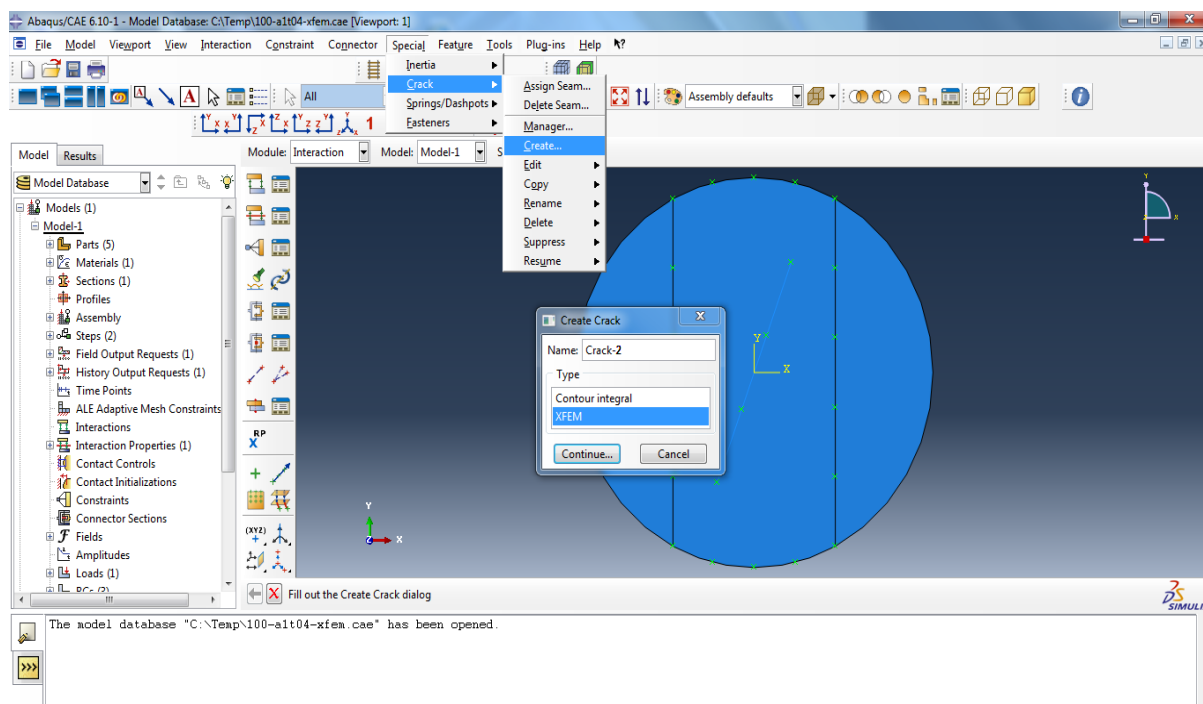
شکل ۵-۱۵- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $\beta=0.4$ و $(S/D=0/4)$ در حالت برش خالص ($\beta=35$)



شکل ۵-۱۶- نحوه توزیع تنش و جابجایی‌ها در راستاهای افقی (11) و عمودی (22) و نحوه توزیع تنش‌های برشی (12) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ و $(S/D=0/5)$ در حالت برش خالص ($\beta=38$)

۵-۵- رفتار شکست نمونه‌ها

از نسخه‌ی ۶.۹.۱ به بعد در نرم‌افزار ABAQUS روش المان محدود توسعه یافته برای آنالیز آغاز و رشد ترک بدون نیاز با مش‌بندی مکرر در هر گام حل مسئله، ارائه شده است. تعریف ترک از نوع XFEM در مدول Interaction انجام می‌گیرد (شکل ۵-۱۷).



شکل ۵-۱۷- نحوه‌ی تعریف ترک از نوع XFEM به مدل در نرم‌افزار ABAQUS

یکی از معیارهایی که در این نرم‌افزار برای آغاز ترک‌خوردگی وجود دارد و در این تحقیق استفاده شده است، معیار حداکثر تنش اصلی^۱ است. این معیار فرض می‌کند که فرآیند ترک‌خوردگی زمانی شروع می‌شود که مقدار حداکثر تنش اصلی به مقدار تعیین شده توسط کاربر (مقاومت ترک‌خوردگی)^۲ برسد. مقاومت ترک‌خوردگی برای مواد شکننده نظیر سنگ و بتن معادل مقاومت کششی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (Tanfener, 2012). این پارامتر در مدول Property بعنوان یکی از پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود.

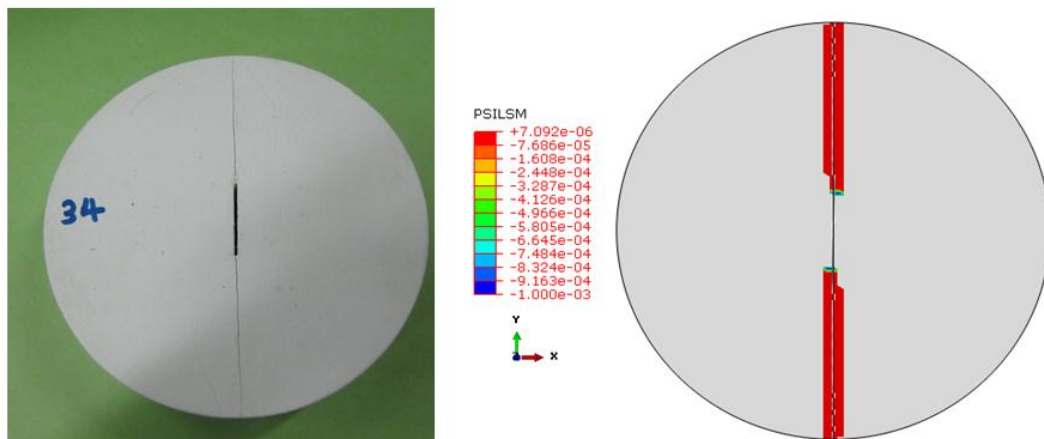
۵-۵-۱- رفتار شکست نمونه‌های دیسکی

برای بررسی رفتار شکست و مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام شده در نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری، نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه (a/R) ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ در نظر گرفته شدند. برای

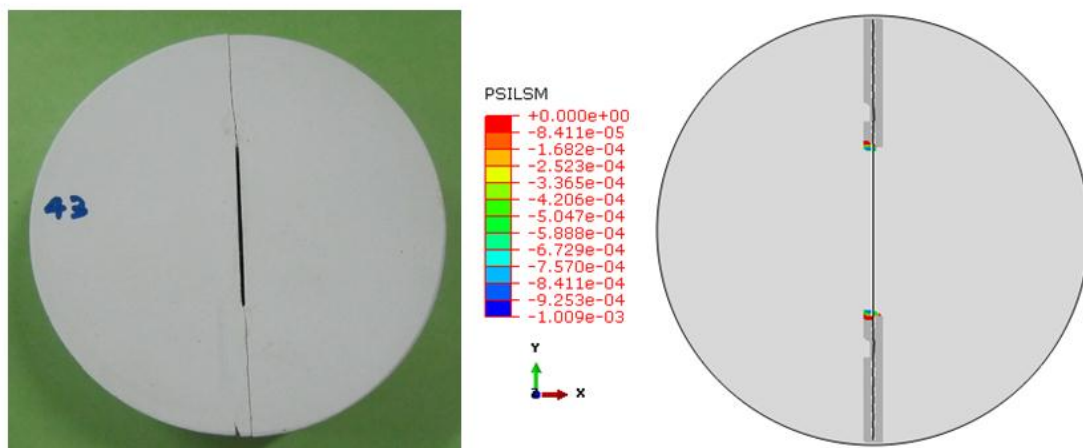
^۱ Maximum principale stress criterion

^۲ Cracking strength

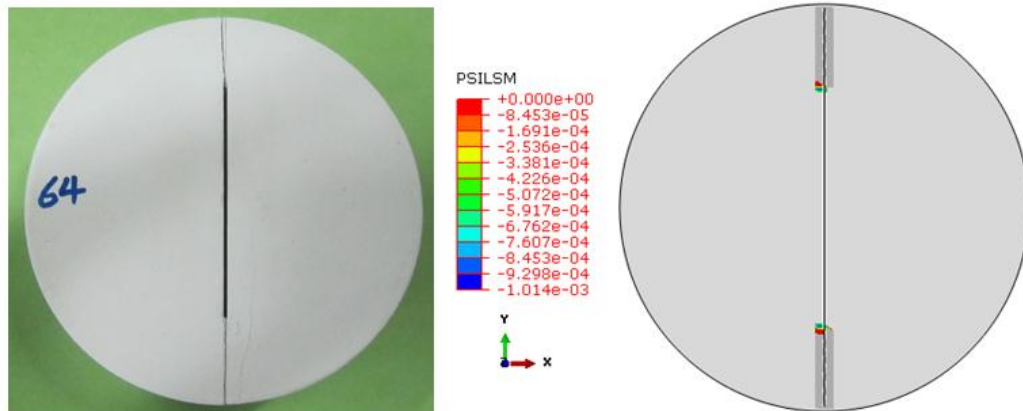
تمامی طول ترک‌های ذکر شده حالت‌های کشش خالص (شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۱) و حالت‌های برش خالص (شکل‌های ۵-۲۲ تا ۵-۲۵) بررسی شده‌اند. در تمام شکل‌ها تصویر سمت چپ نتیجه مطالعات آزمایشگاهی و تصویر سمت راست نتیجه حاصل از مدلسازی عددی است. در تصاویر مربوط به نتایج عددی با انتخاب خروجی PSILSM که قسمت رشد یافته‌ی ترک را مشخص می‌کند، طول اولیه‌ی ترک و نحوه‌ی رشد آن بطور واضح نشان داده شده‌اند. همانگونه که دیده می‌شود در تمامی حالات کشش و برش خالص نتایج مطابقت بسیار خوبی را با هم نشان می‌دهند و پیش‌بینی رفتار شکست نمونه‌ها با استفاده از این نرم‌افزار، از دقت بسیار بالایی در این پژوهش برخوردار بوده است.



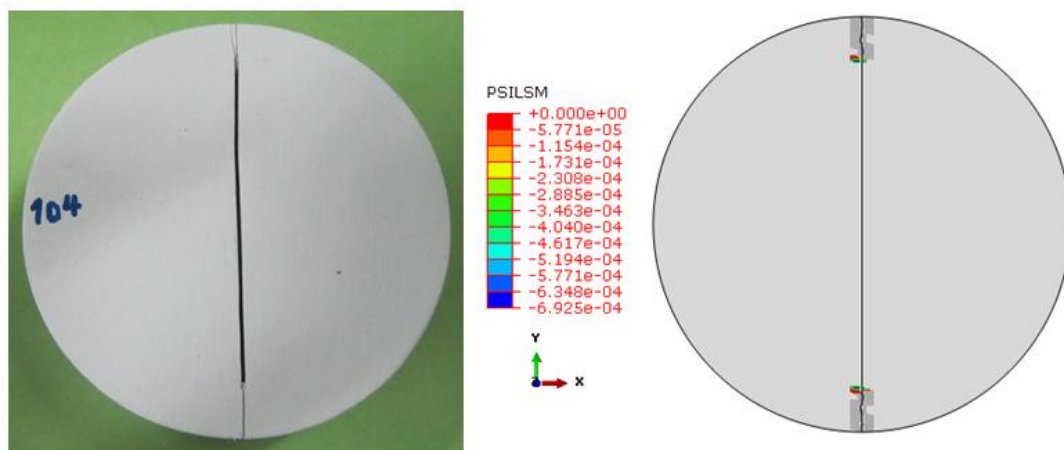
شکل ۵-۱۸- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه 0.2 در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



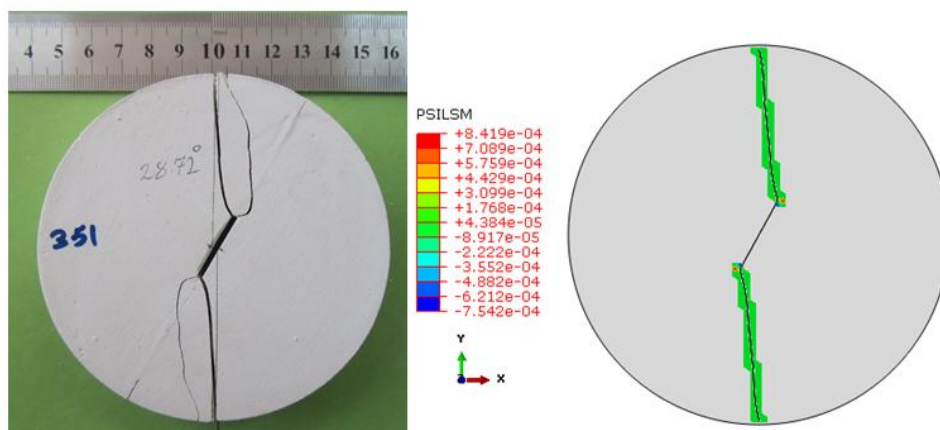
شکل ۵-۱۹- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه 0.4 در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



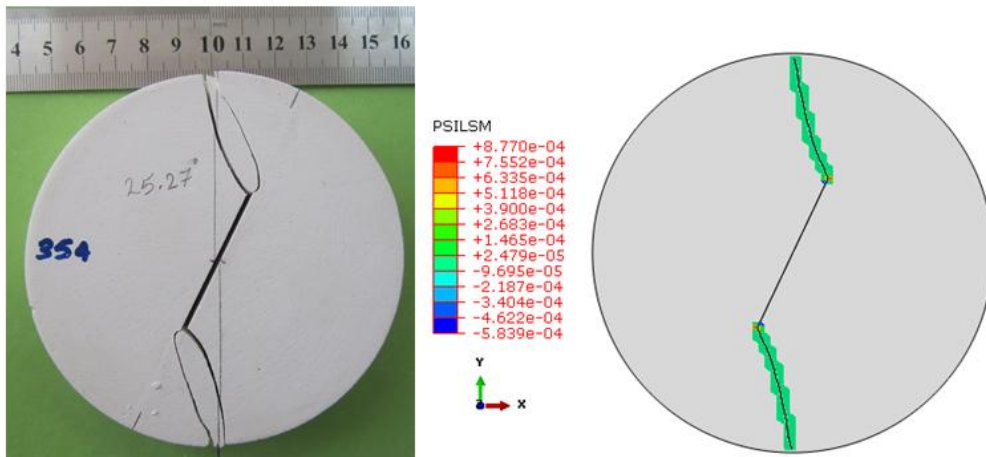
شکل ۵-۲۰- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



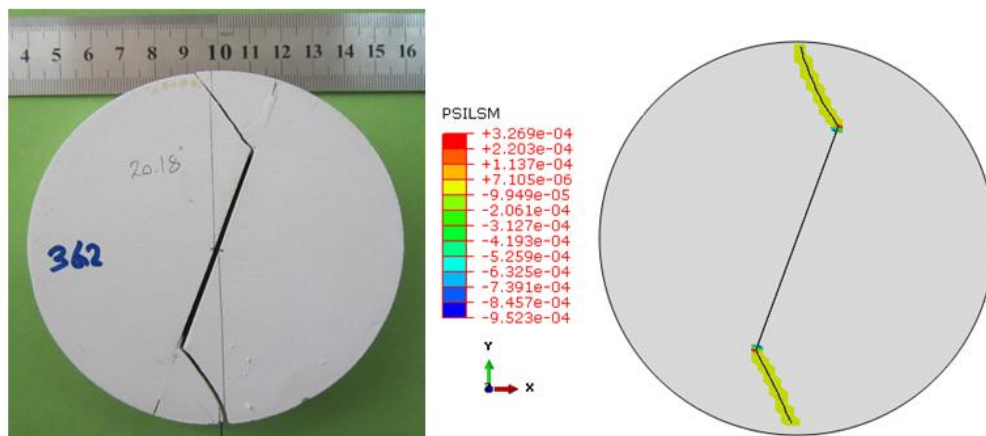
شکل ۵-۲۱- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/2$ در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



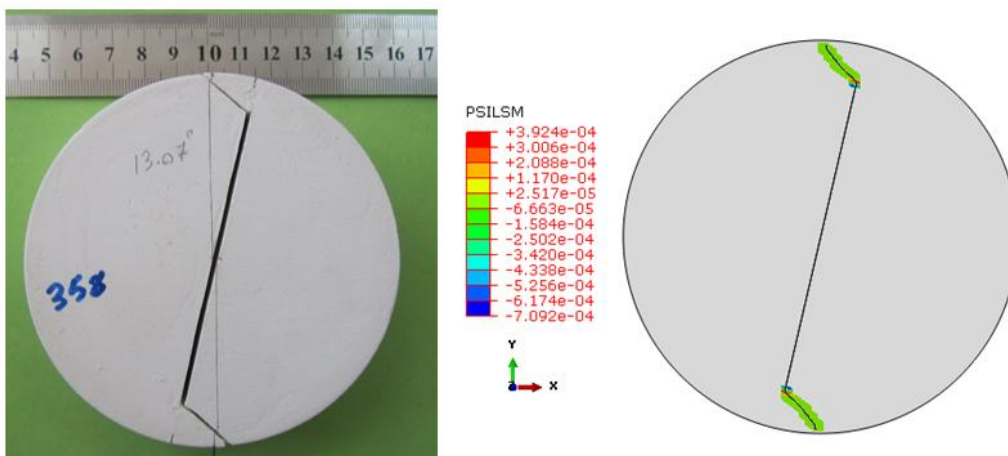
شکل ۵-۲۲- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/2$ در حالت برش خالص ($\beta=28.72$)



شکل ۵-۲۳- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/4$ در حالت برش خالص ($\beta=25.27$)



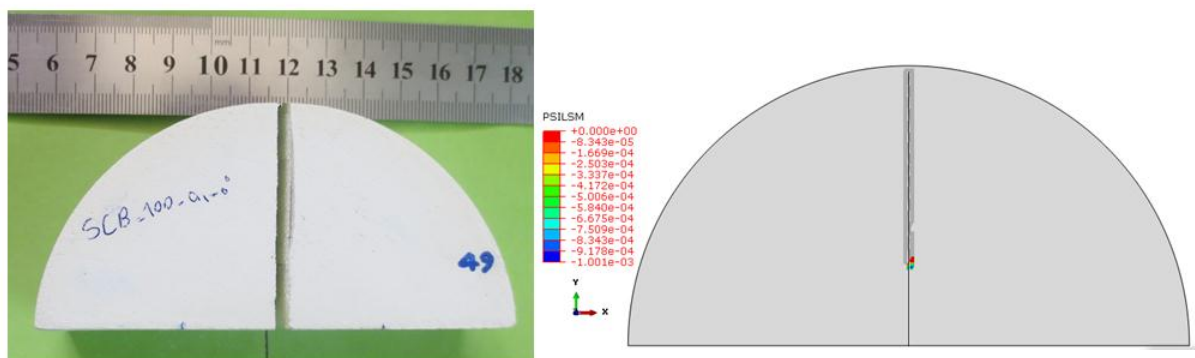
شکل ۵-۲۴- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/6$ در حالت برش خالص ($\beta=20.18$)



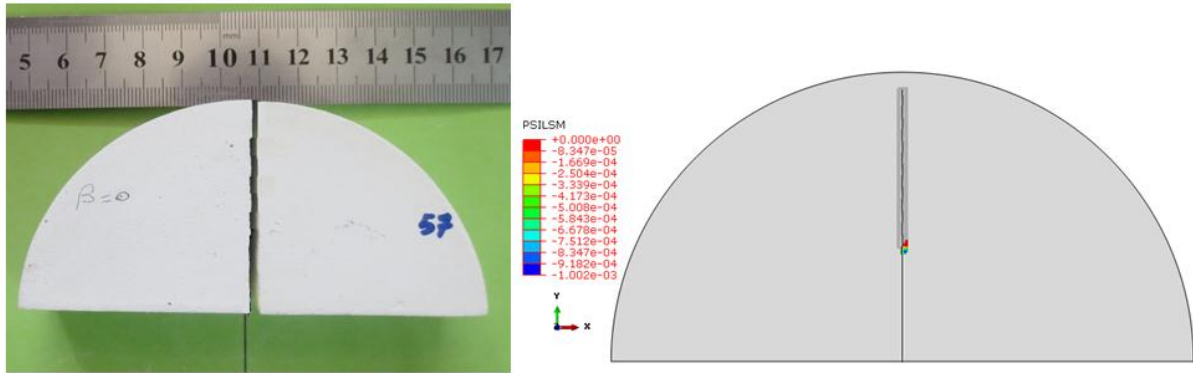
شکل ۵-۲۵- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های دیسکی با نسبت نصف طول ترک به شعاع نمونه $0/8$ در حالت برش خالص ($\beta=13.07$)

۵-۵-۲- رفتار شکست نمونه‌های نیم‌دیسکی ترک‌دار

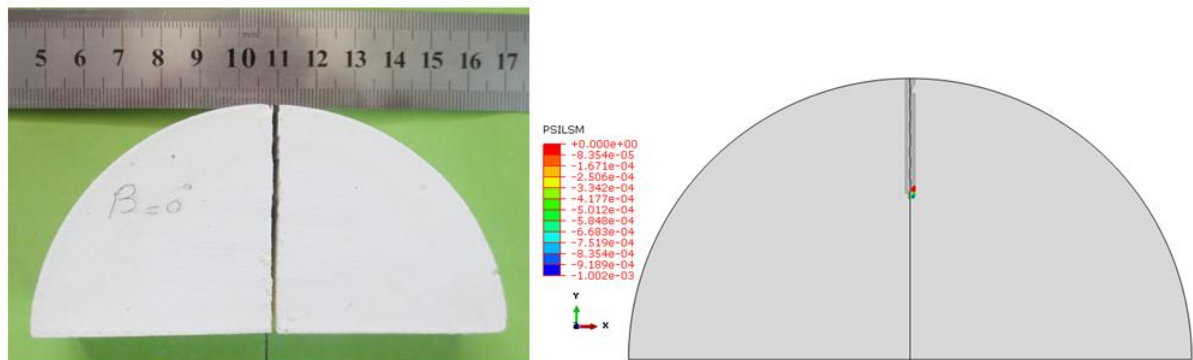
برای بررسی رفتار شکست و مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام شده در نمونه‌های نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای، نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شدند. نسبت طول ترک به شعاع نمونه (a/R) برابر با $0/3$ و $0/4$ برای نسبت فاصله‌ی نقاط تکیه‌گاهی به شعاع نمونه (S/D) برابر با $0/4$ و نسبت طول ترک به شعاع نمونه (a/R) برابر با $0/6$ برای (S/D) برابر با $0/5$ در نظر گرفته شدند. برای تمامی طول ترک‌های ذکر شده حالت‌های کشش خالص (شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۱) و حالت‌های برش خالص (شکل‌های ۵-۲۲ تا ۵-۲۵) بررسی شده‌اند. در تمام شکل‌ها تصویر سمت چپ نتیجه مطالعات آزمایشگاهی و تصویر سمت راست نتیجه حاصل از مدل‌سازی عددی است. در تصاویر نتایج عددی با انتخاب خروجی PSILSM که قسمت رشد یافته‌ی ترک در مدل را برجسته می‌کند، طول اولیه‌ی ترک و نحوه‌ی رشد آن بطور واضح نشان داده شده‌اند. همانگونه که دیده می‌شود در این نمونه‌ها نیز نتایج تمامی حالات کشش و برش خالص مطابقت بسیار خوبی را با هم نشان می‌دهند و پیش‌بینی رفتار شکست نمونه‌ها در این نرم‌افزار در شرایط بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای نیز از دقت بسیار بالایی در این پژوهش برخوردار بوده است.



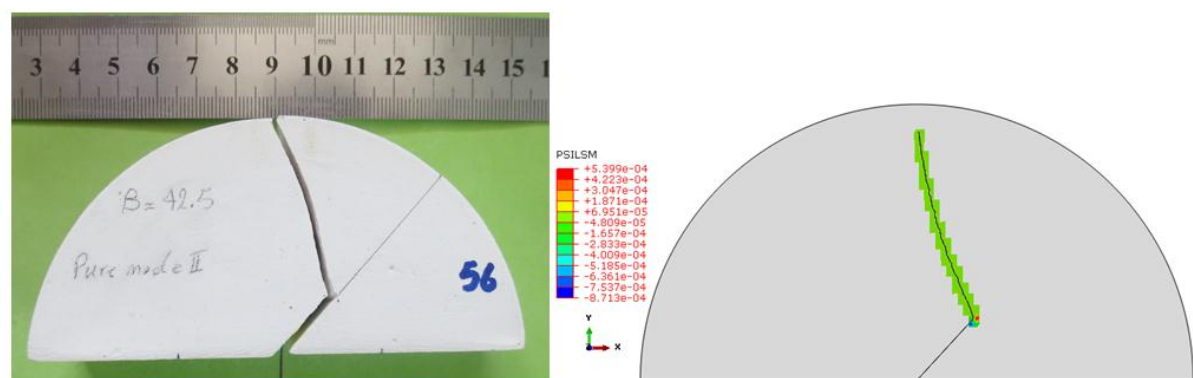
شکل ۵-۲۶- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدل‌سازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه $0/3$ و ($S/D=0.4$) در حالت کشش خالص ($\beta=0$)



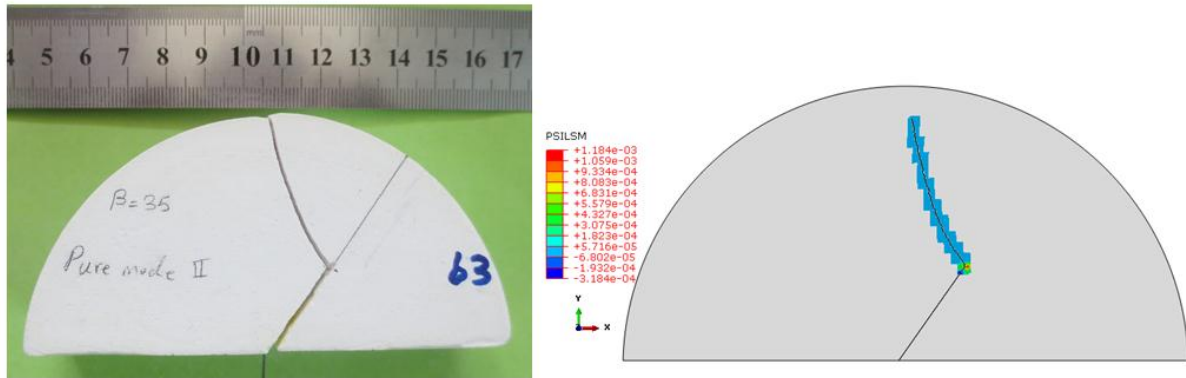
شکل ۵-۲۷- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه 0.4 و $(\beta=0)$ در حالت کشش خالص



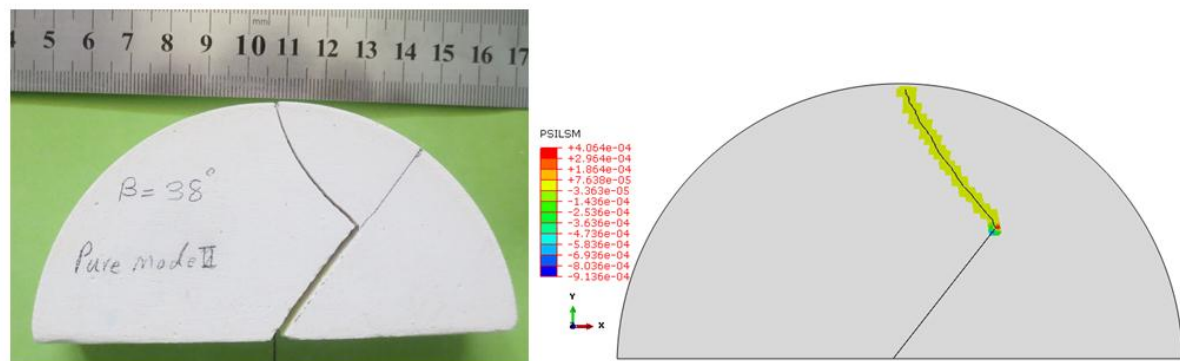
شکل ۵-۲۸- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه 0.6 و $(\beta=0)$ در حالت کشش خالص



شکل ۵-۲۹- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه 0.3 و $(\beta=42.5)$ در حالت برش خالص



شکل ۵-۳۰- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه 0.4 و 35° در حالت برش خالص ($\beta=35$)



شکل ۵-۳۱- مقایسه نتایج رفتار شکست حاصل از مطالعات آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدلسازی عددی (سمت راست) برای نمونه‌های نیم‌دیسکی با نسبت طول ترک به شعاع نمونه 0.5 و 38° در حالت برش خالص ($\beta=38$)

۵-۶- جمع‌بندی

در این فصل با انتخاب یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای مدلسازی عددی و تحلیل مکانیکی مسائل مهندسی یعنی نرم‌افزار ABAQUS که بر پایه‌ی روش المان محدود می‌باشد، نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی مستقیم و نیم‌دیسکی با ترک لبه‌ای مستقیم مدلسازی شدند. با اعمال شرایط مرزی و خصوصیات مواد کاملاً مشابه با شرایط مطالعات آزمایشگاهی نحوه‌ی توزیع تنش و جابجایی‌ها در آنها هم در شرایط مود I خالص و هم در شرایط مود II خالص تحلیل شده و مورد بررسی قرار گرفتند. نکته مهم در این تحلیل‌ها تاثیر چشم‌گیر حضور ترک در نمونه بر روی نحوه‌ی توزیع تنش و جابجایی‌ها است که با افزایش طول ترک در نمونه‌ها، این تاثیر بیشتر شده و تمرکز تنش در نوک ترک افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از تحلیل رفتار شکست در نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی در شرایط بارگذاری مود I خالص و مود II خالص نیز نشان می‌دهد که نرم‌افزار ABAQUS با بکارگیری روش المان محدود توسعه یافته، قابلیت تحلیل درست و پیش‌بینی مناسب رفتار شکست در نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش را دارد.

فصل ششم:

نتیجہ پیمانہ نامہ و پیشہدات

۶-۱-نتایج

در این پژوهش به منظور ارزیابی نتایج و تعیین میزان حساسیت روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین چقرمگی شکست مصالح سنگی به اندازه‌ی نمونه و طول ترک، با توجه به امکانات و تجهیزات در دسترس و امکان ساخت نمونه‌های مصنوعی در نهایت شش روش مختلف برای تعیین چقرمگی شکست مود I و سه روش نیز برای تعیین چقرمگی شکست مود II انتخاب شدند و نمونه‌های لازم برای هر روش بطور مصنوعی و با مصالح گچی ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. در مجموع ۳۱۶ آزمایش انجام شد و ابتدا نتایج بدست آمده در هر روش بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه و تغییر طول ترک مطالعه گردید. خلاصه‌ی مهمترین نتایج کلی این پژوهش بصورت زیر ارائه می‌شود:

- میزان بار شکست نمونه‌های دو روش SECRBB و CB در مقایسه با سایر روش‌ها ناچیز است و یکی از نقاط ضعف اصلی این روش‌ها محسوب می‌شود.
- با توجه به هندسه نمونه و نحوه‌ی آماده‌سازی و بارگذاری آن‌ها در روش SNDB، می‌توان این روش را بعنوان یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های تعیین چقرمگی شکست مود کششی سنگ‌ها معرفی کرد که هم مزایای نمونه‌های دیسک برزلی را دارد و هم از مزایای بارگذاری خمشی بهره می‌گیرد.
- از میان روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود I در این پژوهش، نمونه‌های SECRBB و CCNBD کمترین میزان پراکندگی در نتایج را نشان دادند و نسبت به سایر روش‌ها، تاثیر تغییر طول ترک و اندازه نمونه بر روی نتایج آن‌ها ناچیز بوده است. همچنین نمونه‌های SNSCB نیز بیشترین میزان پراکندگی در نتایج و بیشترین حساسیت به تغییر طول ترک و اندازه نمونه را نشان دادند.
- در تمامی روش‌های مورد استفاده در این پژوهش برای تعیین چقرمگی شکست مود I و II، کوچکترین نسبت طول ترک به قطر نمونه همگراترین نتایج را ارائه کرده است و همچنین به

ازای نسبت‌های طول ترک به قطر نمونه بزرگتر از ۰/۵ پراکندگی نتایج بسیار بیشتر شده است.

- از میان روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود II در این پژوهش نیز نتایج روش CCNBD بیشترین میزان همگرایی در نتایج و کمترین میزان حساسیت به تغییر اندازه نمونه و تغییر طول ترک را نشان دادند.
- نتایج چقرمگی شکست مود I حاصل از دو روش استاندارد پیشنهادی ISRM یعنی روش‌های CCNBD و CB نزدیکی خوبی را با هم نشان دادند (به ویژه در حالت A نمونه‌های CCNBD).
- بطور کلی بر اساس پارامترهایی نظیر سادگی آماده‌سازی نمونه، سادگی بارگذاری، انعطاف‌پذیری، دقت و عدم پراکندگی نتایج و... روش CCNBD بسیار مناسب‌تر بوده و نسبت به سایر روش‌ها از ارجحیت بیشتری برخوردار است.
- با توجه به نحوه‌ی ایجاد حالت برش در روش‌های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست مود II در این پژوهش و حساسیت بسیار زیاد نتایج به دقت در تنظیم زاویه‌ی قرارگیری ترک نسبت به محور بارگذاری، به نظر می‌رسد که برای تعیین چقرمگی شکست مود برشی خالص سنگ‌ها بایستی از روش‌های که حالت برش خالص را بطور مسقیم در نمونه ایجاد می‌کنند استفاده شود مانند روش PTS-test.
- روش XFEM در نرم‌افزار ABAQUS رفتار شکست نمونه‌های دیسکی و نیم‌دیسکی مورد استفاده در این پژوهش را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کرد و نتایج حاصل از مدلسازی عددی با استفاده از این روش و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده مطابقت بسیار خوبی را نشان دادند.

۶-۲- پیشنهادات

- با توجه به اینکه این پژوهش بر اساس ارزیابی دقت روش‌های مختلف تعیین چقرمگی شکست مود I و II مصالح سنگی در حالت بارگذاری استاتیکی بوده است و نظر به اهمیت بحث دینامیک در سنگ و تحلیل رفتار مکانیک شکست سازه‌های سنگی در شرایط بارگذاری دینامیکی مانند زلزله، پیشنهاد می‌شود حداقل برای روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ این مقایسه در حالت بارگذاری دینامیکی انجام شود.
- با استفاده از ترکیب مورد استفاده در این پژوهش نمونه‌های روش PTS-test ساخته شده و نتایج این روش نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- با استفاده از مصالح دیگری با خصوصیات مکانیکی متفاوت، این مطالعه آزمایشگاهی تکرار شده و نتایج با هم مقایسه شوند.
- با توجه به ویژگی‌ها و مزایای خاص دو روش CCNBD و SNDB برای تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها، مطالعه‌ی مقایسه‌ای جامع‌تر و با جزئیات بیشتری بین نتایج این دو روش انجام گیرد.

منابع:

- جاویدراد، ف.، "مکانیک شکست و کاربرد آن در مهندسی"، چاپ اول، ۴۴۸ص، انتشارات صنایع هوا فضا، تهران، ۱۳۸۳.
- فرهی، غ.، "مکانیک شکست"، چاپ دوم، ۳۷۰ص، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۸۷.
- قاجار، ر. "مقدمه‌ای بر مکانیک شکست"، جلد اول، ۲۵۴ص، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۱.
- میرزائی نصیرآباد، حسین، ۱۳۸۸. "مدلسازی نحوه‌ی رشد و اتصال ترک‌ها در محیط سنگی با روش عددی بدون مش گالرکین و اعتبارسنجی آن با مطالعات آزمایشگاهی"، رساله‌ی دکتری. دانشگاه صنعتی شاهرود. دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.
- ABAQUS 6.10, (2010) "ABAQUS analysis user's manual".
- Alkilicil, C. (2006). "DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR MODE I FRACTURE TOUGHNESS TEST ON DISC TYPE ROCK SPECIMENS", MSc thesis. Department of Mining Engineering. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. Turkey.
- Alkilicil, C. (2010). "DEVELOPMENT OF SPECIMEN GEOMETRIES FOR MODE I FRACTURE TOUGHNESS TESTING WITH DISC TYPE ROCK SPECIMENS", PhD thesis. Department of Mining Engineering. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. Turkey.
- Al-Shayea, N.A. (2002), "Comparing reservoir and outcrop specimens for mixed mode I-II fracture toughness of a limestone rock formation at various conditions". International journal of Rock Mech & Min. Sciences.
- Atkinson, C., Smelser, R.E., Sanchez, J. (1982), "Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk". Int J Fracture. 18:279-291.
- Ayatollahi, M.R., Sistaninia, M., (2011) "Mode II fracture study of rocks using Brazilian disk specimens". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 75:4631-4641.
- Ayatollahi, M.R., Aliha, M.R.M., (2006) "On determination of mode II fracture toughness using semi-circular bend specimen". International Journal of Solids and Structures 5217-5227.
- Backers, T., Stephansson, O. and Rybacki, E., (2002). "Rock fracture toughness testing in Mode II-punch-through", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
- Backers, T. and Stephansson, O., (2012) "ISRM Suggested Method for the Determination of Mode II Fracture Toughness". Rock Mech Rock Eng (2012) 45:1011-1022.
- Chang, S.H., Lee, C.I and Jeon. S., (2002). "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens", Engineering Geology.

Chong, K.P., Kuruppu, M.D., (1984)'' **New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials**'' . Int. J.Fract. 26, R59–R62.

Dwivedi, R.D., Soni, A.K., Goel, R.K., Dube, A.K.(2000)'' **Fracture toughness of rock under sub-zero temperature conditions**'' . Int J Rock Mech Min Sci.

Fowell, R.J., Xu, C.(1994),'' **The use of the cracked Brazilian disc geometry for rock fracture investigations**'' . Int J Rock Mech. & Min. Science

Fowell R, J., Xu, C. and Dowd, P. A. (2006).'' **An Update on the Fracture Toughness Testing Methods Related to the Cracked Chevron-notched Brazilian Disk (CCNBD) Specimen**'' , Pure appl. Geophys.

Ghazvinian,A. , Najafi,H., Sarfarazi,V., Hadei,R.,(2012)'' **Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials**'' . Arab J Geosci DOI 10.1007/s12517-012-0681-8.

GUO, H., AZIZ, N.I., and SCHMIDT, L.C. (1993)'' **Rock fracture toughness determination by Brazilian test**'' .Engin. Geology 33, 177–188.

Iqbal,M.J.(2004),''**COMPARISON OF FRACTURE TOUGHNESS MEASUREMENT TECHNIQUE IN BRITTLE ROCKS**'' .MSc thesis.Department of Civil Engineering.University of Toronto.Canada.

Iqbal,M. J. and Mohanty ,B. (2007),'' **Experimental Calibration of ISRM Suggested Fracture Toughness Measurement Techniques in Selected Brittle Rocks**'' , Rock Mech. Rock Eng.

ISRM Testing Commission- Fowell,R.J. (1995)'' **Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked Chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens**'' . Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 32:57–64.

Khan,Kh.(1998).''**FRACTURE TOUGHNESS INVESTIGATION OF AN INDIGENOUS LIMESTONE ROCK FORMATION**'' .MSc thesis.King Fahd university of Petroleum and Mineral.Saudi Arabia.

Khan, K., Al-Shayea, N. A. (2000)'' **Effect of specimen geometry and testing method on mixed I–II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia**'' , Rock Mechanics and Rock Engineering .

Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K. (1993)'' **Stress intensity factor for semi-circular specimens under three point bending**'' . Eng Fract. Mech. 44 (3), 363–382.

LIM, I.L., JOHNSTON, I.W., CHOI, S.K. and BOLAND, J.N., (1994a),” **Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending**”, part 1–mode I, Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci.

LIM, I.L., JOHNSTON, I.W., and CHOI, S.K. (1994c), “**Assessment of mixed-mode fracture toughness testing methods for rock**”, Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci.

LIM, I.L., JOHNSTON, I.W., CHOI, S.K., and BOLAND, J.N. (1994b), “**Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending**” part 2–mixed modes, Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci.

Meier, T., Backers, T., Stephansson, O. (2009) ”**The influence of temperature on mode I fracture toughness using The Punch Through Shear with confining pressure experiment**”. 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto.

Nasseri, M.H.B., Mohanty, B., (2008) “**Fracture toughness anisotropy in granitic rocks**”. Int J Rock Mech Min Sci 45:167–193.

Ouchterlony, F. (1988) “**Suggested methods for determining the fracture toughness of rock**”. Int J Rock Mech Min Sci 25(2):71–96.

Saouma, V.T. (2000),”**Lecture Notes in: FRACTURE MECHANICS**”, Department of Civil and Architectural Engineering University of Colorado.

Shetty, D.K., Rosenfield, A.R., Duckworth, W.H., (1987),” **Mixed-mode fracture in biaxial stress state: application of the diametral-compression (Brazilian disk) test**” Eng Fract Mech ;26(6):825–40.

Tanfener, T., (2009).”**Finite element analysis of differential shrinkage-induced cracking in centerfugally cast concrete poles**”, MSc thesis. Department of Civil Engineering. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. Turkey.

Tutluoglu, L. and Keles, C., (2011),” **Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method**”. International journal of Rock Mech & Min. Sciences.

Wang, Q.Z., Jia, X.M., Wu, L.Z. (2004) ” **Wide-range stress intensity factor for the ISRM suggested method using CCNBD specimens for rock fracture toughness tests**”. Int J Rock Mech Min Sci 41:709–716.

Wang, Q.Z., Jia, X.M., Kou, S.Q., Zhang, Z.X., and Lindqvist, P. A. (2004) ” **The flattened Brazilian disc specimen used for elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results**”. Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci. 41, 245–253.

Whittaker, B.N., Singh, R.N., Sun, G. (1992)” **Rock Fracture Mechanics-Principles, Design and Applications**”. Elsevier, Amsterdam.

Xu,C.(1993).”**Fracture Mechanics and its application in rock excavation engineering**” Ph.D thesis,Department of Mining and mineral Engineering.leeds university.England.

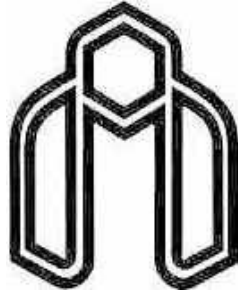
Abstract

Precise measuring the fracture toughness of rocks in tensile and shear modes is important as a key parameter in the investigation of rock fracture mechanics. Many different methods have been proposed to determine these parameters. Each method has its own advantages and disadvantages. This thesis attempts to provide a comprehensive comparison between commonly used methods for determining fracture toughness of rock. They include six methods for determining tensile mode and three ones for determining shear mode. The comparisons are based on the sensitivity of results to changes in specimens size and the length of crack in specimens. For this aim and due to the comparative nature of this study, like-rock specimens are used. The specimens are perfectly homogeneous and isotropic and they show linear elastic behavior characteristics. At first, 316 specimens are artificially made of plaster materials and after the preparation, all of them are loaded until the moment of failure. Then the results are obtained from different methods are separately analyzed. Finally the sensitivity of results to changes in specimen size and the length of crack in specimens are specified.

In the last step by using the finite element software ABAQUS, the distribution of stress and displacements in cracked circular disk and in semi-circular disk specimens are investigated. Also, failure behavior of laboratory specimens are compared with the results of numerical method. The experimental results verify the numerical results and show high performance of the applied method.

Regarding to various factors such as the geometry of specimen, easy loading, precision of results and equipments that are required, it can be concluded the Cracked Chevron-Notch Brazilian Disc method (CCNBD) is the most appropriate method for both modes (tensile and shear). This method is one of the ISRM suggested methods to determine tensile mode of rock fracture toughness.

Keywords: Rock fracture toughness- Tensile mode- Shear mode- Experimental study- Rock-like specimens



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics engineering

Precision assessment of different measurement methods of rock fracture toughness under tension and shear loading condition by using the experimental studies and numerical modeling

Samad Mansouri

Supervisors:

Hossein Mirzaei Nasir Abad

Mahmod Shariati

Advisor:

Nader Ziari

September 2013