

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد
مهندسی معدن - گرایش مکانیک سنگ

بررسی آزمایشگاهی تغییرات دانه بندی محیط‌های ناهمگن بر گسترش

ترک

نگارنده:

منصور صبری

استاد راهنما:

دکتر عبدالهادی قزوینیان

آذر ۱۳۹۲

بسمه تعالی



تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای منصور صبری پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی آزمایشگاهی تغییرات دانه بندی محیط های ناهمگن برگسترش ترك در تاریخ ۱۳۹۲/۹/۴ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن - مکانیک سنگ پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مرتضی احمدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کامران گشتاسی گوهرریزی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مرتضی قارونی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر کامران گشتاسی گوهرریزی	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

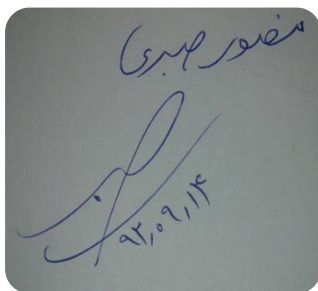
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مکانیک سنگ است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب منصور صبری دانشجوی رشته مکانیک سنگ مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.



منصور صبری

۹۳/۰۹/۱۴

نام و نام خانوادگی

تاریخ و امضا:

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

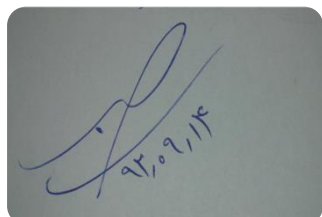
تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب منصور صبری دانشجوی رشته مکانیک سنگ ورودی سال تحصیلی ۱۳۹۰ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»



امضا:

تاریخ:

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست

به امید آنکه توفیق یابم جز خدمت به خلق او نکوشم

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس بی‌پایان خداوند بلند مرتبه، که توفیق تحصیل و کسب علم را به من عنایت فرمودند، اینک که به مدد لطف بی‌کران الهی مقطعی از دوران تحصیلم را به پایان می‌رسانم بر خود لازم می‌دانم که از تمامی کسانی که مرا در این امر یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

در ابتدا بر خود وظیفه می‌دانم تا از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر قزوینیان که با تجربه کارآمد و دانش عمیق خود، من را در طول این تحقیق راهنمایی نمودند، تشکر و قدردانی نمایم و برای ایشان آرزوی توفیق در مراحل مختلف زندگی جهت خدمت بیشتر در عرصه‌های مختلف علمی کشور را دارم.

در ادامه از زحمات اساتید گروه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس، دکتر گشتاسبی و دکتر احمدی نهایت تشکر را دارم. مهندس نجاتی، دوست خوب و راهنمایی بی‌منت که مرا در طول انجام پایان‌نامه یاری کردند.

مهندس شیخانی و مهندس کارگر، که همواره جهت انجام آزمایش‌ها به ایشان زحمت می‌دادیم و در پایان همه دوستان و همکلاسی‌های عزیزم که این مقطع از زندگی با ایشان سپری شد.

چکیده

در سال‌های اخیر، تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی و بتنی بر مبنای معیارهای معمول تنش و مقاومت، سبب بروز حوادث بسیاری شده است. این حوادث به دلیل عدم در نظر گرفتن تاثیر ساختارهای ضعف به ویژه میکروتُرک‌ها در نحوه توزیع تنش و شکست نمونه‌ها می‌باشد. لذا امروزه سعی می‌شود تا طراحی‌هایی با مبنای مکانیک شکست برای سازه‌ها انجام شود. به همین علت در این مطالعه اثر دانه‌بندی (اندازه دانه‌ها)، به عنوان یکی از عوامل مهم در چقرمگی نمونه‌ها و تاثیر گذار در مسیر گسترش ترک بررسی شده است. در بررسی‌های صورت گرفته قبلی در این زمینه به صورت صریح، تاثیر این پارامتر مشخص نشده است. لذا در این تحقیق سعی شده است تا اثر تغییرات دانه‌بندی بر روی چقرمگی شکست، مسیر رشد ترک و همچنین تغییراتی که در مکانیزم داخلی در حین شکست نمونه‌ها ایجاد می‌کند، بررسی شود. برای انجام این کار در مجموع ۷۲ عدد نمونه با ترک مرکزی (CSCBD) با شش دانه‌بندی متفاوت اما ترکیب یکسان ساخته شده و تحت آزمایش تعیین چقرمگی قرار گرفته است. نتایج بیانگر رابطه میان چقرمگی مد I (کشش) و مد II (برش) با اندازه دانه‌ها به صورت غیر خطی بوده به گونه‌ای که بیشترین چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌هایی با اندازه دانه‌های متوسط (۲_۲/۳۸) میلی‌متر می‌باشد و با افزایش و یا کاهش اندازه دانه‌ها از این مقدار، چقرمگی شکست نمونه‌ها در هر دو حالت برش و کشش کاهش می‌یابد. همچنین با مطالعه مسیر رشد ترک برای نمونه‌های مختلف با دانه‌بندی‌های متفاوت مشاهده می‌شود که مسیر رشد ترک در نمونه‌هایی با دانه‌بندی ریزتر، منظم‌تر بوده و از نوک ترک اولیه شروع شده و در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر گسترش می‌یابد. ولی در نمونه‌هایی با دانه بندی درشت‌تر، ترک از مرز دانه‌ها شروع شده و در یک مسیر نامنظم‌تر رشد کرده و ختم ترک در نقاطی با مقاومت کم در محیط نمونه می‌باشد. با بررسی برخی پارامترهای انتشار آوایی (AE) نمونه‌ها همچون تعداد کانت، انرژی، فرکانس متوسط و پارامتر RA نیز مشاهده شد که با تغییرات چقرمگی برای دانه بندی های مختلف، این پارامترها نیز تغییر می‌کنند. تعداد کانت‌های ثبت شده در بازه زمانی انتهای ناحیه الاستیک تا نقطه شروع بهم پیوستن میکروتُرک‌ها به عنوان زون شکست در نوک ترک، برای شش نمونه بدست آورده شده که رابطه مستقیم با نمودار تغییرات چقرمگی نمونه‌ها در هر دو حالت مد شکست کشش خالص و برش خالص دارد. همچنین RA متوسط نیز برای نمونه‌های که چقرمگی بیشتری دارند بیشتر از سایر نمونه‌ها است که حکایت از ارتباط مستقیم این پارامتر با چقرمگی شکست دارد. در ادامه آزمایش‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ (Rock failure process analysis) مدلسازی شده و نتایج با بررسی‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است که هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در پایان نیز، آزمایش تعیین چقرمگی بر روی نمونه‌های سنگ گابرو مربوط به یک منطقه خاص با مینرالوژی یکسان و ترکیب دانه‌بندی متفاوت انجام گرفت که مقادیر حاصل، روندی مشابه با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد.

کلید واژه: چقرمگی شکست، اثر دانه‌بندی، مکانیک شکست، زون شکست، نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ، انتشار آوایی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل ۱- مقدمه
۱.....	۱-۱- پیشگفتار
۳.....	فصل ۲- مروری بر مطالعات گذشته
۳.....	۱-۲- مقدمه
۳.....	۲-۲- تئوری مکانیک شکست
۴.....	۱-۲-۲- روش تعادل انرژی
۹.....	۲-۲-۲- روش شدت تنش
۱۲.....	۳-۲- چقرمگی شکست سنگ
۱۲.....	۱-۳-۲- روش تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های شبه سنگی
۱۴.....	۲-۳-۲- روش تعیین چقرمگی شکست مد کشش نمونه‌های سنگ گابرو
۱۵.....	۴-۲- شکل شکست نمونه‌های آزمایشگاهی
۱۵.....	۱-۴-۲- مقدمه
۱۶.....	۲-۴-۲- انواع ترک‌ها
۱۹.....	۳-۴-۲- منطقه صدمه دیده (FPZ)
۲۴.....	۵-۲- مطالعه مکانیک شکست مواد با سیستم انتشار صوت (AE)
۲۷.....	۶-۲- نرمافزار مکانیک شکست سنگ (RFPA)
۳۰.....	۷-۲- عوامل موثر بر چقرمگی سنگ‌ها
۳۰.....	۱-۷-۲- تاثیر دما و فشار محصور کننده بر رشد ترک در مد شکست ترکیبی (I - II)
۳۲.....	۲-۷-۲- تاثیر مشخصات میکروتُرک‌ها
۳۳.....	۳-۷-۲- تاثیر دماهای زیر صفر بر روی چقرمگی مد I
۳۴.....	۴-۷-۲- تاثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها
۳۶.....	۵-۷-۲- اندازه دانه‌ها
۴۰.....	۸-۲- جمع بندی
۴۲.....	فصل ۳- روش تحقیق آزمایشگاهی
۴۲.....	۱-۳- مقدمه
۴۲.....	۲-۳- ساخت نمونه‌ها
۴۴.....	۳-۳- ماشین بارگذاری
۴۵.....	۴-۳- دستگاه ثبت امواج صوتی
۴۷.....	۵-۳- تهیه نمونه‌های ترک‌دار سنگ گابرو
۵۱.....	۶-۳- مدلسازی با نرم افزار مکانیک شکست سنگ (RFPA)

فصل ۴ - بررسی و تحلیل نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی.....	۵۵
۱-۴ - مقدمه	۵۵
۲-۴ - چقرمگی حاصل از آزمایش نمونه‌های CSCBD.....	۵۵
۳-۴ - شکل شکست	۵۹
۴-۴ - نتایج بررسی‌های آکوستیک	۶۱
۱-۴-۴ - تعداد و انرژی کانت‌ها.....	۶۱
۲-۴-۴ - تغییرات اندازه ناحیه صدمه دیده نوک ترک.....	۶۴
۳-۴-۴ - تغییرات فرکانس متوسط و RA.....	۶۷
۵-۴ - نتایج حاصل از مدلسازی با نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ	۷۳
۶-۴ - نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های سنگ گابرو	۸۲
۱-۶-۴ - تغییرات پارامترهای مقاومتی نمونه‌های سنگ گابرو.....	۸۲
۲-۶-۴ - چقرمگی شکست مد A.....	۸۴
۳-۶-۴ - بررسی تغییرات پارامترهای انتشار آوایی نمونه‌های سنگ گابرو.....	۸۶
۱-۳-۶-۴ - تعداد و انرژی کانت	۸۶
۲-۳-۶-۴ - تغییرات فرکانس متوسط و RA.....	۸۷
فصل ۵ - نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۹۲
۱-۵ - مقدمه	۹۲
۲-۵ - نتایج	۹۲
۳-۵ - پیشنهادات.....	۹۴
فصل ۶ - منابع	۹۵

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲	فاکتورهای شدت تنش برای چندین هندسه معمول	۱۰
جدول ۲-۲	میانگین مقادیر آستانه برای سه نوع نمونه	۳۶
جدول ۳-۱	شماره سرندهای مورد استفاده جهت دانه بندی نمونه‌ها	۴۳
جدول ۳-۲	مشخصات دستگاه بارگذاری	۴۵
جدول ۴-۱	مقادیر حاصل از آزمایش برای شش دانه بندی مختلف	۵۵
جدول ۴-۲	مقادیر چقرمگی حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار RFPA برای هر دو حالت بارگذاری کششی و برشی	۷۴
جدول ۴-۳	مقادیر مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و شکنندگی حاصل بر روی سه نوع سنگ گابرو	۸۳
جدول ۴-۴	بار شکست و چقرمگی شکست معادل برای هر سه تیپ نمونه سنگ گابرو	۸۴

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۲-۱ نیروی مورد نیاز جهت شکست پیوندهای اتمی سنگ در امتداد صفحه شکست
۴	شکل ۲-۲ ترک به صورت بیضی توسط اینگلیس
۵	شکل ۲-۳ وضعیت توزیع تنش در اطراف ترک بیضی شکل در محیط ایزوتوپ شکننده
۶	شکل ۲-۴ مدل ارائه شده توسط گریفیث
۷	شکل ۲-۵ ناحیه با زدایی شده در اطراف ترکی به طول a
۷	شکل ۲-۶ تعادل انرژی شکست
۹	شکل ۲-۷ مودهای شکست (کشش، برش و پارگی)
۱۳	شکل ۲-۸ تصویری شماتیک از نمونه دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD)
۱۴	شکل ۲-۹ تغییرات NI و NIH با زاویه β و aR
۱۵	شکل ۲-۱۰ شکل نمونه و نحوه اعمال بار در روش بارگذاری فشاری قطری
۱۶	شکل ۲-۱۱ انواع ترک‌های تولیدی در نمونه‌های سنگی ترک‌دار تحت بارگذاری فشاری
۱۷	شکل ۲-۱۲ الگوی شکست مشاهده شده در نمونه‌های حاوی ترک مصنوعی باز
۱۸	شکل ۲-۱۳ الگوی ترک مشاهده شده در نمونه‌های ترک‌دار تحت بارگذاری تک محوری
۱۹	شکل ۲-۱۴ شکل توزیع تنش در نوک ترک و زون شکست
۲۰	شکل ۲-۱۵ منحنی تنش کششی- طولی شدگی برای (a) مواد ترد با رفتار الاستیک خطی (b) مواد شبه ترد (بتن و سنگ)
۲۰	شکل ۲-۱۶ مکانیزم‌های مقاوم در بتن
۲۱	شکل ۲-۱۷ مسیر گسترش ترک در بتن
۲۲	شکل ۲-۱۸ تصویری شماتیک از رقابت دوجانبه میان مکانیزم ذاتی پیشروی آسیب/ترک و مکانیزم غیرذاتی سپری در نوک ترک، درگیر در فرایند رشد ترک
۲۳	شکل ۲-۱۹ تصویری شماتیک از مکانیزم‌های مقاوم غیر ذاتی شامل، انحراف ترک، سپر نوک ترک تولید شده به واسطه زون غیرالاستیک و تماس بین سطوح ترک
۲۴	شکل ۲-۲۰ قسمتهای مختلف دستگاه انتشار صوتی
۲۵	شکل ۲-۲۱ پارامترهای AE در یک رویداد
۲۶	شکل ۲-۲۲ منابع AE به همراه شکل موج معادل (برشی و کششی)
۲۷	شکل ۲-۲۳ طبقه بندی مراحل مختلف شکست بر اساس مشخصات AE
۲۹	شکل ۲-۲۴ توزیع مقاومت نمونه‌ها با سه شاخص همگنی متفاوت
۲۹	شکل ۲-۲۵ نمودار مقاومت المان‌ها در نمونه‌های عددی با شاخص‌های همگنی متفاوت (پارامتر ویبال برابر ۱۰۰ میباشد)
۳۰	شکل ۲-۲۶ نمونه‌ای از مکان امواج صوتی مدلسازی شده با نرم افزار مکانیک شکست سنگ

- شکل ۲- ۲۷ منحنی‌های بار-جابجایی تحت شرایط بار گذاری مد I و تغییرات چقرمگی برحسب فشار محصور کننده ۳۱
- شکل ۲- ۲۸ تاثیر دماهای بالا روی چقرمگی شکست مد I ۳۱
- شکل ۲- ۲۹ رابطه معکوس مابین میانگین طول و چگالی میکروترک‌ها با میزان چقرمگی شکست سنگ‌ها ۳۲
- شکل ۲- ۳۰ مقادیر چقرمگی مد I سه نوع سنگ مختلف (آذرین_دگرگونی_رسوبی) در شرایط دماهای زیر صفر ۳۳
- شکل ۲- ۳۱ تاثیر هم زمان محتویات آب و کاهش دما بر میزان چقرمگی نمونه‌ها ۳۴
- شکل ۲- ۳۲ روابط بین چقرمگی و خواص فیزومکانیکی سنگ ۳۵
- شکل ۲- ۳۳ رابطه بین خواص فیزیکی با چقرمگی مد ۳۶
- شکل ۲- ۳۴ برخی جزئیات از نمونه‌های S، M، L، تولیدی ۳۷
- شکل ۲- ۳۵ مقایسه نتایج حاصل مقادیر بدست آمده برای چقرمگی شکست مد I از دو روش SENB و روش فراکتوگرافیک بر مبنای تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی ۳۸
- شکل ۲- ۳۶ روش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای ۳۹
- شکل ۲- ۳۷ فاکتور شدت تنش بحرانی مد I و II برای نمونه‌های آسفالت ۳۹
- شکل ۳- ۱ قالبهای PVC جهت تهیه نمونه‌های CSCBD و نمونه‌های تک محوری ۴۲
- شکل ۳- ۲ شش نمونه از ماسه سیلیسی دانه بندی شده با سرنده ۴۳
- شکل ۳- ۳ بخشی از نمونه‌های ترک‌دار و تک محوری ساخته شده با شش دانه بندی مختلف ۴۴
- شکل ۳- ۴ آزمایش تک محوری با سیستم AE توسط ماشین بارگذاری INSTRON ۴۵
- شکل ۳- ۵ اجزاء سخت افزاری دستگاه AE ۴۶
- شکل ۳- ۶ سه نمونه سنگ گابرو با مینرالوژی یکسان اما دانه بندی متفاوت (به ترتیب از بالا به پایین، دانه درشت، دانه متوسط و دانه ریز) ۴۷
- شکل ۳- ۷ مقاطع نازک تهیه شده از هر سه نوع نمونه (S: ریزدانه M: دانه متوسط L: درشت‌دانه) ۴۸
- شکل ۳- ۸ تصویر میکروسکوپی از نمونه ریز بلور S (سنگ متاگابرو) ۴۹
- شکل ۳- ۹ تصویر میکروسکوپی از نمونه M با اندازه بلور متوسط (سنگ مونزو دیوریت) ۴۹
- شکل ۳- ۱۰ تصویر میکروسکوپی از نمونه درشت بلور L (سنگ مونزو دیوریت) ۵۰
- شکل ۳- ۱۱ ایجاد ترک سراسری بر روی نمونه‌های سنگ گابرو توسط ابزار برش دیسکی ۵۰
- شکل ۳- ۱۲ سه نمونه از سنگهای گابرو برش داده شده به ترتیب دانه بندی آنها ۵۱
- شکل ۳- ۱۳ پارامترهای مورد نیاز نرم افزار جهت مدلسازی مخلوط سیمان نمونه‌ها ۵۲
- شکل ۳- ۱۴ مراحل تولید نمونه برزیلی ترک‌دار (CSCBD) با نرم افزار RFPA ۵۳
- شکل ۳- ۱۵ تولیدات AE و نمودار تجمعی انرژی معادل ۵۴
- شکل ۴- ۱ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری برای دانه بندی های مختلف ۵۶

شکل ۴-۲ تغییرات چقرمگی شکست مد کشش خالص و برش خالص برای دانه بندی های مختلف.....۵۶

شکل ۴-۳ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با عکس شکنندگی و چقرمگی مد کشش خالص و برش خالص.....۵۸

شکل ۴-۴ نسبت چقرمگی شکست مد برش با مد کشش.....۵۹

شکل ۴-۵ (الف) نمونه تحت بارگذاری مد برش خالص. (ب) نمونه تحت بارگذاری مد کشش خالص.....۶۰

شکل ۴-۶ نحوه شکست برای هر شش دانه بندی در هر دو مد شکست.....۶۱

شکل ۴-۷ تولیدات انتشار آوایی برای نمونه های شماره ۱ (۱-۵۹۵/۰ میلیمتر)، شماره ۴ (۲-۲/۳۸ میلیمتر) و شماره ۶ (۶/۷۳-۴/۷۵) میلیمتر.....۶۲

شکل ۴-۸ نمودار تجمعی انرژی کانت‌های تولیدی برای نمونه‌های شماره ۱، ۴ و ۶.....۶۳

شکل ۴-۹ انرژی آزاد شده توسط کانت‌های تولیدی در لحظه شکست برای شش دانه بندی.....۶۴

شکل ۴-۱۰ تغییرات تعداد کانت تولیدی برای زون شکست با چقرمگی شکست مد کشش و برش برای دانه بندی شش گانه.....۶۵

شکل ۴-۱۱ تغییرات چقرمگی مد کشش و برش با درصد انرژی آزاد شده توسط کانت‌های تولیدی در بازه ۴۰ درصد تا ۸۰ درصد بار نهایی.....۶۶

شکل ۴-۱۲ تولیدات فرکانس و RA برای نمونه شماره ۱ تحت بارگذاری برشی.....۶۷

شکل ۴-۱۳ نمودار تجمعی فرکانس و RA برای نمونه شماره ۶ در حالت بارگذاری برشی.....۶۸

شکل ۴-۱۴ (الف) تولیدات RA برای هر شش دانه‌بندی در طول آزمایش برای مد بارگذاری برشی. (ب) تغییرات مقدار RA متوسط برای هر شش دانه بندی در طول آزمایش برای هر دو مد بارگذاری برشی و کششی.....۶۹

شکل ۴-۱۵ مقایسه نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA برای شش دانه‌بندی مختلف در مد بارگذاری برشی.....۷۱

شکل ۴-۱۶ نسبت فرکانس متوسط به RA تولیدی برای ۱۲ عدد نمونه در دو حالت بارگذاری کششی و برشی.....۷۲

شکل ۴-۱۷ (الف) تغییرات RA متوسط برای شش دانه بندی در دو مد بارگذاری کشش و برش (ب) رابطه خطی میان RA متوسط دو مد شکست برش و کشش.....۷۲

شکل ۴-۱۸ تغییرت مدول یانگ و تولیدات صوتی معادل در چهار مرحله مختلف بارگذاری برای اندازه دانه ۲_۲/۳۸ میلیمتر.....۷۳

شکل ۴-۱۹ مقایسه چقرمگی حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی برای هر شش دانه بندی.....۷۵

شکل ۴-۲۰ لحظه شکست سه نوع نمونه با اندازه دانه‌ی: (الف) ۴/۷۵-۶/۷۳ میلیمتر (ب) ۲/۳۸-۴/۷۵ میلیمتر (پ) ۲-۲/۳۸ میلیمتر به همراه تولیدات انتشار آوایی معادل در هر دو حالت مد بارگذاری کششی و برشی.....۷۶

شکل ۴-۲۱ (الف) تعداد تجمعی کانت‌ها و انرژی معادل برای مد بارگذاری کششی (ب) تعداد تجمعی کانت‌ها و انرژی معادل برای مد بارگذاری برشی.....۷۷

- شکل ۴-۲۲ نمونه مکعبی با ترک مرکزی، مدلسازی شده با نرم افزار مکانیک شکست سنگ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۳ مراحل مختلف شروع و رشد ترک برای یک نمونه دانه درشت (۶/۷۳-۴/۷۵ میلیمتر)..... ۷۹
- شکل ۴-۲۴ توزیع تنش برشی برای سه مرحله مختلف رشد ترک در نمونه با اندازه دانه ۱-۱/۴۱ میلیمتر..... ۸۰
- شکل ۴-۲۵ توزیع تنش برشی برای سه مرحله مختلف رشد ترک در نمونه فاقد ماسه سیلیسی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۶ شکل نهایی شکست برای هر شش دانه بندی (بهترتیب از ردیف بالا سمت چپ نمونه شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱)..... ۸۱
- شکل ۴-۲۷ تغییرات بار شکست برای نمونه‌های مکعبی شکل با ترک مرکزی، مدلسازی شده با نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۸ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری و شکل پذیری برای سه نوع سنگ گابرو..... ۸۳
- شکل ۴-۲۹ تغییرات چقرمگی شکست مد کشش برای سه تیپ نمونه سنگ گابرو..... ۸۵
- شکل ۴-۳۰ تغییرات تعداد کانت تولیدی و انرژی معادل آن برای هر سه نمونه سنگ گابرو در بازه ۴۰ تا ۸۰ درصد بار نهایی شکست..... ۸۶
- شکل ۴-۳۱ تغییرات فرکانس متوسط و RA برای نمونه سنگ گابرو **L1**..... ۸۷
- شکل ۴-۳۲ نمودار تجمعی فرکانس متوسط و RA برای نمونه **L1**..... ۸۸
- شکل ۴-۳۳ تغییرات معکوس فرکانس متوسط و پارامتر RA برای سه نوع سنگ گابرو..... ۸۸
- شکل ۴-۳۴ مقایسه نسبت فرکانس متوسط به RA تولید شده برای هر سه سنگ گابرو..... ۸۹
- شکل ۴-۳۵ نسبت فرکانس متوسط به پارامتر RA برای شش نمونه سنگ گابرو به تفکیک مرحله شکست..... ۹۰
- شکل ۴-۳۶ رابطه میان پارامتر RA با چقرمگی شکست مد کشش شش نمونه سنگ گابرو..... ۹۱

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

متلاشی شدن بسیاری از سازه‌های مهندسی بر اثر رشد و گسترش ترک با وجود پایین بودن نرخ بارگذاری بر روی آنها در مقایسه با مقاومت تئوریک سازه‌ها، لزوم درک دقیق مکانیزم و عوامل موثر بر گسترش ترک را آشکار می‌سازد. استفاده از روش‌های متداول تحلیل و طراحی سازه‌های فولادی و بتنی و سنگی بر مبنای معیارهای تنش و مقاومت، تا کنون مشکلات زیادی را برای سازه‌ها بوجود آورده است [۱].

زمانی که سنگ‌ها تحت بارگذاری خاصی قرار می‌گیرند در آنها شکست حادث می‌شود. پیش‌بینی این شکست به طور مسلم برای مهندسیین مهم می‌باشد چراکه آنها باید از پایداری و عدم شکست سازه‌های طراحی شده و فوندانسیون آنها اطمینان حاصل کنند. اما مهندسیین مکانیک سنگ معترفند که تنش شکست سنگ‌ها غیر قابل پیش‌بینی و اعتماد است. به عبارت بهتر، اگر چند نمونه سنگ یکسان مورد بارگذاری جهت شکست قرار گیرد، مقادیر تنش شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها متفاوت خواهد بود. لذا نیاز به تحقیق و بررسی در زمینه مکانیک شکست در سنگ‌ها بسیار مشهود می‌باشد [۲]. تقابل میان چقرمگی^۱ سنگ و میزان تمرکز تنش^۲ در نوک ترک، جدال بر سر گسترش یا عدم گسترش ترک می‌باشد. فرایند شکست سنگ که وابسته به چقرمگی شکست است با جوانه زنی ترک شروع می‌شود. بنابر این دقت در هرگونه مدل سازی و نتایج حاصل به مقدار چقرمگی شکست سنگ بستگی دارد. از این رو در این مطالعه به بررسی ناهمگنی ناشی از تغییرات دانه بندی به عنوان یکی از عوامل مهم در رفتار شکست نمونه‌های سنگی و شبه سنگی پرداخته شده است.

در ادامه به اختصار عنوان و مطالب دربرگیرنده هر فصل ارائه شده است:

فصل دوم (مروری بر مطالعات گذشته): در این فصل ابتدا یک نگاه میکروسکوپی به پدیده شکست داشته و به تشریح دو نظریه مهم در زمینه مکانیک شکست^۳ پرداخته شده است. در ادامه فصل دوم، با توجه به اهمیت چقرمگی در مکانیزم شکست سنگ‌ها، به مطالعات صورت گرفته قبلی توسط سایر محققین اشاره شده و تاثیر پارامترهای مختلفی چون اندازه دانه‌های تشکیل دهنده، دما و فشار محصور کننده، دماهای زیر صفر، چگالی و طول میکروترک‌ها، رطوبت، چگالی و تخلخل نمونه‌ها را بر روی چقرمگی شکست نمونه‌های سنگی و شبه سنگی، البته با تاکید بیشتر بر روی اثر دانه بندی بررسی شده است. جهت تعیین چقرمگی نمونه‌های ساخته شده، از روش دیسک برزیلی با ترک مستقیم

^۱Toughness

^۲Stress concentration

^۳Fracture Mechanics

مرکزی^۱ (CSCBD) استفاده شده است. از این رو در بخش دیگری از فصل دوم تئوری حاکم بر این روش ارائه شده است. روش محاسبه چقرمگی نمونه‌های سنگ گابرو و همچنین معرفی دستگاه ثبت انتشار صوتی^۲ و پارامترهای استفاده شده‌ی آن در همین بخش توضیح داده شده است. جهت مدل‌سازی عددی نمونه‌های آزمایش شده، از نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ^۳ بر مبنای توزیع ویبال^۴ استفاده شده که در بخش پایانی این فصل، شرح جامعی بر این نرم‌افزار ارائه شده است.

فصل سوم (روش تحقیق): در این فصل گزارشی از نحوه تهیه قالب برای ساخت نمونه‌های ترک-دار و نمونه‌های NX، تهیه ماسه سیلیسی با شش نوع دانه بندی و در نهایت طرز تهیه ملات مورد نظر و ساخت نمونه‌های ترک‌دار و نمونه‌های NX جهت اندازه‌گیری چقرمگی و سایر پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها همچون مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و مقاومت کششی غیر مستقیم ارائه شده است. نحوه تعیین نوع کانی‌ها، اندازه میانگین و همچنین ایجاد ترک در نمونه‌های سنگ گابرو و انجام آزمایش تعیین چقرمگی شکست نیز در این بخش شرح داده شده است. در پایان نیز ماشین‌های آزمایش استفاده شده، سیستم AE و نیز نحوه مدل‌سازی نمونه‌ها با نرم افزار RFPA تا حدودی شرح داده شده است.

فصل چهارم (تحلیل و بررسی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی): در این فصل نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ترک‌دار و نمونه‌های NX شامل چقرمگی، مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی به صورت نمودار ارائه شده است. در ادامه تغییرات برخی پارامترهای AE همچون تعداد کانت، فرکانس متوسط و RA برای دانه بندی‌های مختلف ارائه شده است. نتایج تولیدی توسط نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ (RFPA) نیز در ادامه این فصل آورده شده است. در پایان نیز، نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ گابرو ارائه شده است.

فصل پنجم (نتیجه‌گیری و پیشنهاد): در این فصل نتایج گرفته شده در این تحقیق همچون رابطه غیر خطی چقرمگی شکست با اندازه دانه‌های نمونه‌ها، رابطه مستقیم پارامتر RA با چقرمگی شکست و تشخیص نوع میکروتُرک‌های تولید شده در داخل نمونه (کششی و برشی) بصورت منظم و منسجم ارائه شده است. در پایان نیز برخی پیشنهادها جهت بهبود و ادامه کار ارائه شده است.

¹ Central Straight Through Crack Brazilian disk (CSCBD)

² Acoustic Emission

³ Rock Failure Process analysis

⁴Weibull distribution

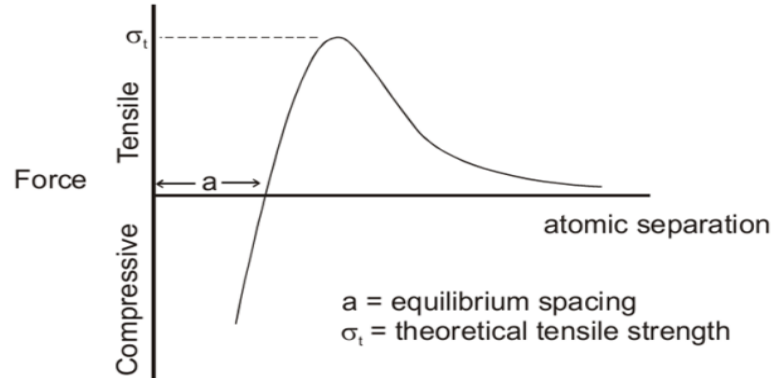
فصل ۲- مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به تشریح دو نظریه بنیادین در زمینه مکانیک شکست پرداخته خواهد شد تا در ادامه امکان شناسایی عوامل موثر بر این پدیده بوجود آید. در بخش دیگری نیز تئوری حاکم بر روش CSCBD شرح داده خواهد شد. بررسی های صورت گرفته بر روی نمونه های شبه سنگی^۱ جهت شناسایی انواع ترک ها و ناحیه صدمه دیده نوک ترک^۲، موضوع مهم دیگری است که در بخش دیگری از این فصل به آن پرداخته می شود. در ادامه اشاره مختصری به دستگاه ثبت انتشار صوتی^۳ و پارامترهای استفاده شده ی آن در این تحقیق خواهد شد. در بخش پایانی این فصل نیز بصورت مختصر به معرفی نرم افزار مدل سازی شکست سنگ پرداخته شده است.

۲-۲- تئوری مکانیک شکست

شکست در سنگ عبارت است از ایجاد جدایش موضعی و تشکیل صفحات جدایش در آن. انرژی لازم جهت شکستن پیوندهای بین ذرات و تشکیل این صفحات جدایش، معرف مقاومت سنگ می باشد لذا مقاومت تئوریک سنگ می تواند به صورت شکل ۲-۱ نشان داده شود [۲].



شکل ۲-۱ نیروی مورد نیاز جهت شکست پیوندهای اتمی سنگ در امتداد صفحه شکست [۲].

با توجه به شکل ۲-۱ با اعمال تنش بر نمونه سنگی، فاصله تعادلی مابین اتم های سنگ افزایش می یابد تا اینکه مقدار تنش برابر با مقدار تنش بحرانی شود. در این حالت فاصله بین اتمی بدون افزایش در مقدار تنش، افزایش می یابد. این نقطه معرف نقطه شکست و مقدار تنش بحرانی معرف مقاومت

¹ Rock like materials

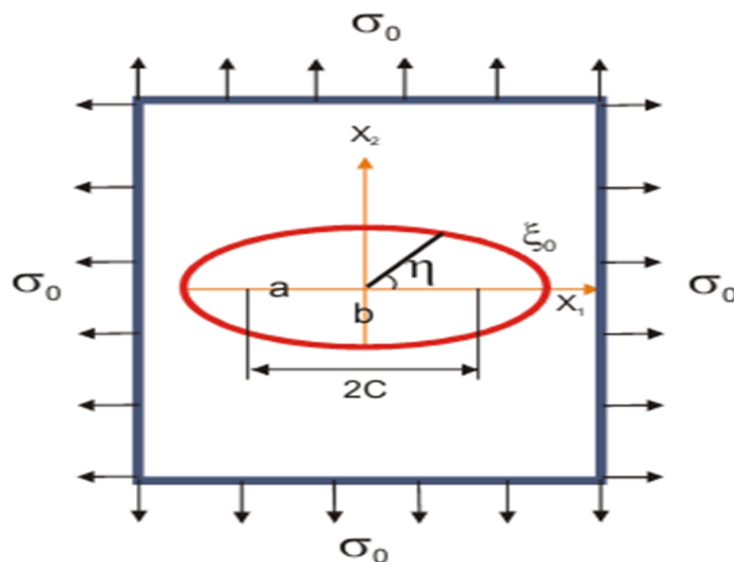
² Fracture process zone

³ Acoustic Emission

تئوریکی (σ_t) سنگ می‌باشد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت که این مقاومت ذاتی تابعی از مدول یانگ ماده (E) مطابق رابطه $\sigma_t \cong \frac{E}{2\pi}$ می‌باشد. در اینجا نیز مقادیر محاسبه شده برای مقاومت ذاتی سنگ با نتایج حاصل از آزمایش‌ها دارای اختلاف قابل تاملی می‌باشد که اهمیت تشریح مکانیزم شکست در سنگ‌ها و بررسی علل این اختلافات را که به نوعی با وجود میکرو ترک‌ها و گسترش آنها در سنگ در ارتباط می‌باشد را روشن می‌نماید [۲]. در ادامه به دو دیدگاه مطرح شده در زمینه توجیه مکانیزم شکست در مواد پرداخته شده است. روش تعادل انرژی مطرح شده توسط گریفیث و روش شدت تنش که به شرح زیر می‌باشند:

۲-۲-۱- روش تعادل انرژی

بررسی‌های اولیه‌ای کمی بر تاثیر ترک‌ها در روند تسریع ناپایداری و شکست مواد دارای نواقص که همان اختلاف بین استحکام شکست کریستال‌ها و استحکام پیوستگی می‌باشد توسط اینگلیس^۱ در سال ۱۹۱۳ صورت گرفت. اینگلیس مطابق شکل ۲-۲ ترک بسته در داخل جسم را به صورت یک بیضی با قطرهای b, a فرض کرد که تحت تاثیر تنش کششی هیدرو استاتیک σ_0 قرار دارد [۳].



شکل ۲-۲ ترک به صورت بیضی توسط اینگلیس [۳].

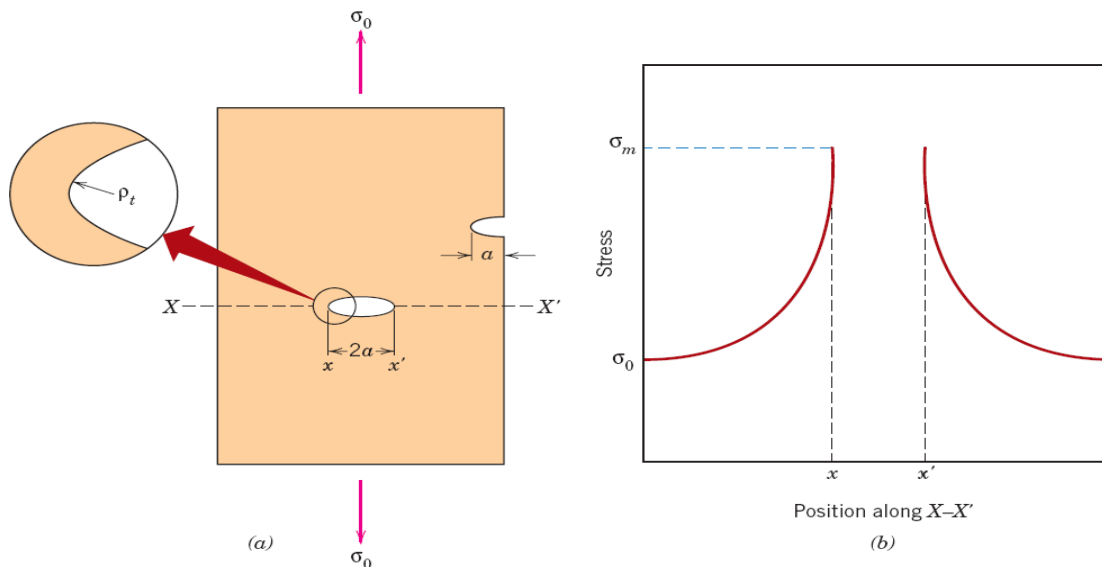
بر اساس تئوری الاستیسیته توزیع تنش در اطراف ترک مطابق رابطه ۲-۱ و رابطه ۲-۲ برابر است با:

$$(\sigma_\eta)_{\eta=0,\pi}^{max} = 2\sigma_0 \frac{a}{b} \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

$$(\sigma_\eta)_{\eta=\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2}}^{min} = 2\sigma_0 \frac{b}{a} \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

^۱ Englis

با میل دادن مقدار b به سمت صفر بیضی مورد نظر رفتاری مشابه ترک از خود نشان داده و در نتیجه مقادیر تنش در نوک ترک به سمت بینهایت میل می‌کند در صورتی که تنش در قسمت فوقانی حذف می‌شود. اما از لحاظ فیزیکی بی‌نهایت شدن تنش در نوک ترک اتفاق نمی‌افتد. زیرا وقتی تنش به حد معینی رسید تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در نوک ترک، تنش را در طول ترک ثابت نگه می‌دارد. در شکل ۲-۳ وضعیت توزیع تنش در اطراف ترک بر مبنای روش پیشنهادی اینگیس نشان داده شده است:



شکل ۲-۳ وضعیت توزیع تنش در اطراف ترک بیضی شکل در محیط شکننده [۲].

وجود این نقاط تکین^۱ در ادامه باعث شد تا محققان دیگری همچون گریفیث^۲ اقدام به ارائه نظریه شکست خود نمایند. گریفیث بر مبنای تئوری تعادل انرژی در سال ۱۹۲۰ بیان کرد که ماده ترد شامل تعداد زیادی میکروترک می‌باشد که می‌تواند باعث شکست ماده در یک تنش اسمی به مراتب کمتری نسبت به استحکام پیوستگی تئوریک شود [۲].

وقتی یک ترک شروع به رشد می‌نماید، یک افزایشی در سطوح اطراف ترک به وجود می‌آید. این افزایش سطح برای فائق آمدن بر نیروی پیوستگی ذرات به انرژی نیاز دارد یا به عبارتی دیگر یک افزایش در انرژی سطحی نیاز است. منبع تامین کننده این انرژی سطحی، انرژی کرنشی الاستیکی است که با پیشرفت ترک آزاد می‌شود [۴]. گریفیث معیار زیر را برای گسترش یک ترک عنوان کرد: "ترک وقتی شروع به رشد می‌کند که کاهش یا آزاد شدن انرژی کرنش الاستیک ماده حداقل برابر با جذب انرژی لازم برای ایجاد سطح ترک جدید باشد" [۴].

^۱Singular

^۲Griffith