بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

عنوان

تحلیل خرابی در آزمایش برزیلی با استفاده از مدلهای مکانیک شکست و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

نگارش

مجتبی احمدیان

استاد راهنما

دکتر احمد فهیمی‌فر

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
آذر ۱۳۸۶

دانشکده مهندسي عمران و محيط زيست

چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان :

تحلیل خرابی در آزمایش برزیلی با استفاده از مدلهای مکانیک شکست و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

ارائه شده توسط مجتبی احمدیان یزدی **شماره دانشجویی** ۸۴۱۲۴۰۲۲ **گرایش** ژئوتکنیک

استاد راهنما : دکتر احمد فهیمی‌فر **تاریخ تحویل :** ۸۶/۹/۲۰

هدف از این پژوهش، ارزیابی آزمایش برزیلی و خرابی در آن از دیدگاه تئوری مکانیک شکست می‌باشد. در این رابطه و با توجه به اهمیت تعیین مقاومت کششی در مواد ترد و نیمه ترد مانند بتن و سنگ، در ابتدا برای تعیین مقاومت کششی واقعی سنگ مورد نظر، تعدادی آزمایش کشش مستقیم انجام شد و در ادامه تعدادی آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های سنگی صورت گرفت که تمامی این آزمایشها، توسط یک دستگاه بارگذاری خود کنترل (servo-control) انجام شد. در این آزمایشها سعی شد که با تغییر در دو پارامتر ضخامت نمونه‌ها و سرعت بارگذاری، نقش این دو پارامتر در نتایج حاصل از آزمایشها بررسی شود. برای این بررسی از دو معیار کمی و کیفی استفاده گردید. معیار کیفی شامل مشاهده مد شکست و ترک ایجاد شده بعد از انجام آزمایش بوده و در معیار کمی نیز از مقایسه عددی نتایج حاصل از آزمایش برزیلی با نتایج آزمایش کشش مستقیم استفاده شد. به این ترتیب پارامترهای برگزیده معرفی شده و نتایج آزمایشهای مربوط به این پارامترها برای مقایسه با نتایج تئوری بکار رفت. با توجه به انجام آزمایش برزیلی با سه سرعت بارگذاری مختلف، بهترین نتایج با سرعت بارگذاری ۰/۰۰۱ mm/s بدست آمد. از آنجا که در مواد ترد و نیمه ترد تعیین سرعت بارگذاری مناسب اهمیت زیادی دارد، شاید سرعت ۰/۰۰۱ mm/s را بتوان برای این نوع سنگ و آزمایش مناسب دانست.

هدف نهایی در قسمت تئوری، مدل‌سازی آزمایشهای برزیلی انجام شده، توسط دو مدل "ترک چسبنده" و "ترک نامعین چرخشی" می‌باشد. برای رسیدن به این مهم، علاوه بر مقاومت کششی سنگ مورد استفاده که از آزمایش کشش مستقیم تعیین گردید، به دو پارامتر دیگر بنام‌های مدول الاستیسیته و بازشدگی اولیه ترک، نیاز می‌باشد. بدین‌جهت، آزمایش برزیلی در برنامه OOFEM (Object Oriented Finite Element) که قابلیت تحلیل بر مبنای تئوری مکانیک شکست را دارد، مدل گردیده و در تحلیل آن، از مدل "ترک نامعین چرخشی" استفاده شد. پس از این مرحله و با انجام آنالیز برگشتی بر روی مدل ساخته شده، مقادیر مربوط به دو پارامتر مورد نیاز برای تحلیل مکانیک شکستی نیز تعیین گردیدند. در مرحله پایانی، از رابطه‌ای حاصل از یک تحلیل انجام شده روی آزمایش برزیلی و بر پایه مدل ترک چسبنده، استفاده شد و نتایج آن با نتایج حاصل از آزمایشهای برزیلی مقایسه گردید و در نهایت و با توجه به بررسی‌های انجام شده، کارایی و انطباق خوب تئوری مکانیک شکست در تحلیل خرابی در مواد نیمه ترد، نتیجه گرفته شد.

کلمات کلیدی : مکانیک شکست، آزمایش برزیلی، مدل ترک چسبنده، مدل ترک چرخشی، آزمایش کشش مستقیم، سرعت بارگذاری، آنالیز برگشتی

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- اهمیت تئوری مکانیک شکست	۱
۱-۲- اهدف این پژوهش	۲
۱-۳- گستره این پژوهش	۲
فصل دوم: مروری بر پیشینه مطالعات	۴
۲-۱- پیشینه آزمایش برزیلی	۵
۲-۲- پیشینه تئوری مکانیک شکست	۶
فصل سوم: مطالعه آزمایش برزیلی	۱۰
۳-۱- مقدمه	۱۱
۳-۲- میدان تنشها در آزمایش برزیلی	۱۲
۳-۳- اعتبار آزمایش برزیلی در تعیین مقاومت کششی	۱۵
۳-۴- شرایط انتهایی در آزمایش برزیلی	۱۸
فصل چهارم: مبانی تئوری مکانیک شکست و مدلهای آن	۲۱

۴-۱- مقدمه **۲۲**

۴-۲- لزوم استفاده از روش مکانیک شکست در تحلیل خرابی **۲۲**

۴-۲-۱- انرژی مورد نیاز برای تشکیل ترک **۲۳**

۴-۲-۲- عینیت داشتن آنالیز **۲۳**

۴-۲-۳- نبود سطح جاری شدن ثابت **۲۴**

۴-۲-۴- ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری **۲۵**

۴-۲-۵ - اثر اندازه **۲۵**

۴-۳- مدلهای تئوری مکانیک شکست **۲۶**

۴-۴- مفهوم مدل ترک چسبنده **۲۷**

۴-۴-۱- نگاه ترک چسبنده به آزمایش کشش مستقیم **۲۹**

۴-۴-۲- پارامترهای مدل ترک چسبنده **۳۲**

۴-۵- مفهوم مدل نوار ترک **۳۵**

۴-۶- گروه مدل‌های ترک ثابت **۳۶**

۴-۷- مدل‌های ترک چرخشی **۳۸**

فصل پنجم: انجام آزمونهای آزمایشگاهی و بررسی نتایج آنها **۴۱**

۵-۱- مقدمه **۴۲**

۵-۲- معرفی دستگاه آزمایش **۴۳**

۵-۳- انجام آزمایشهای برزیلی **۴۵**

۵-۳-۱- تهیه نمونه‌های آزمایش ۴۶

۵-۳-۲- ایجاد شرایط انتهایی مناسب ۴۷

۵-۴- انجام آزمایشهای کشش مستقیم ۴۹

۵-۴-۱- ایجاد تمهیدات مورد نیاز جهت انجام آزمایش کشش مستقیم ۵۰

۵-۵- نتایج آزمایشهای برزیلی ۵۲

۵-۵-۱- بررسی اثر دو پارامتر سرعت بارگذاری وضخامت ۵۴

۵-۵-۲- انتخاب بهترین نتایج جهت استفاده در مدل تئوری ۵۷

۵-۶- نتایج آزمایشهای کشش مستقیم ۶۰

فصل ششم: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری ۶۳

۶-۱- مقدمه ۶۴

۶-۲- برنامه کامپیوتری مورد استفاده و فرضیات مدل‌سازی ۶۵

۶-۲-۱- مدلهای رفتاری ۶۵

۶-۳- استفاده از مدل ترک چرخشی در تحلیل آزمایش برزیلی ۶۶

۶-۳-۱- آنالیز حساسیت ۶۶

۶-۳-۲- استفاده از آنالیز برگشتی در تعیین دو پارامتر ۷۰

۶-۳-۳- تایید نتایج آنالیز برگشتی و مدل ترک چرخشی ۷۲

۶-۴- استفاده از مدل ترک چسبنده در تحلیل آزمایش برزیلی ۷۳

۶-۴-۱- ارائه یک رابطه ریاضی برای نتایج ۷۶

۶-۴-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تحلیل تئوری ۷۷

فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۰

۷-۱- مقدمه ۸۱

۷-۲- نتایج حاصل از انجام آزمایشهای برزیلی و کشش مستقیم ۸۲

۷-۳- نتایج حاصل از تحلیل بر پایه مکانیک شکست ۸۳

۷-۴- پیشنهادها و چشم‌اندازهای تحقیقات آینده ۸۴

مراجع ۸۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- اهمیت تئوری مکانیک شکست

در حالیکه از مکانیک شکست سالهاست برای آنالیز سازه‌های فلزی بویژه در صنایع هوایی، زیر دریایی و سازه‌های هسته‌ای استفاده می‌گردد، ولی ظهور آن در سایر زمینه‌ها قدمت چندانی ندارد. با مطرح شدن تئوری مکانیک شکست برای مواد شبه ترد، فعالیت‌های زیادی در زمینه بتن صورت پذیرفت و اغلب پیشرفتهای حاصل شده در این شاخه نیز مربوط به بتن می‌باشد. با گذشت زمان، استفاده از مکانیک شکست برای سایر مواد شبه ترد مانند سنگ، یخ و بعضی پلیمرها آغاز شد. در این زمینه فعالیت‌های زیادی در جهت دقیق کردن مدلها، فراهم آوردن ابزارهای قوی تحلیلی و عددی و همچنین توسعه روشهای آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامترهای ورودی تئوریهای مختلف، در حال انجام می‌باشد.

با توجه به اهمیت و جایگاه خاص و مهم سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها، مغارها وفضاهای بزرگ زیرزمینی، سالانه هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در این بخش صورت می‌گیرد. این سازه‌ها بدلیل پیچیدگی‌های خاص خود، دارای روش مطالعه و طراحی متفاوت از سایر سازه‌های عمرانی می‌باشند. متاسفانه بدلیل عدم توسعه مدلهای دقیق در مکانیک سنگ، طراحی‌ها در این زمینه با تقریب بالا و با اعمال ضرایب اطمینان بزرگ صورت می‌گیرد. استفاده از تئوری مکانیک شکست در زمینه سازه‌های سنگی، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای رفع این مشکل باشد.

۱-۲- اهدف این پژوهش

در این پایان نامه، توانایی تئوری مکانیک شکست در پیش‌بینی خرابی در ماده سنگی تحت آزمایش برزیلی، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. جهت فراهم آوردن زمینه برای استفاده از تئوری مکانیک شکست در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی، نخست باید این روش از نظر مبانی مورد بررسی قرار گرفته و سپس ابزارهای تحلیلی مناسب برای استفاده از آن فراهم شود. در مرحله بعد باید به کمک روشهای آزمایشگاهی و آزمونهای ساده روی نمونه‌های کوچک، کارایی این تئوری را محک زده و در صورت نیاز به اصلاح آنها اقدام شود. این پایان نامه نیز در راستای مرحله نهایی، یعنی محک زدن تئوری مکانیک شکست بوسیله انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. از طرفی، آزمایش برزیلی بعنوان جایگزین آزمایش کشش مستقیم در تعیین مقاومت کششی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وجود میدان پیچیده تنشها و همچنین تاثیر گذاری عوامل مختلف در نتایج ، نیاز به مطالعه بیشتر بر روی این آزمایش را ایجاب می‌کند.

بدین ترتیب سعی گردید تا با انجام این پژوهش، از طرفی تئوری مکانیک شکست مورد ارزیابی قرار گیرد و از جهت دیگر به بررسی و مطالعه بیشتر آزمایش برزیلی پرداخته شود.

۱-۳- گستره این پژوهش

با توجه به اهداف مطرح شده، این پایان نامه را می‌توان به دو بخش تئوری و آزمایشگاهی تقسیم نمود. در قسمت آزمایشگاهی تعدادی آزمایش برزیلی وکشش‌مستقیم بر روی نمونه‌های سنگی انجام شد. از نتایج آزمایشهای برزیلی برای مقایسه با نتایج حاصل از بخش تئوری استفاده گردید و همچنین از نتایج آزمایشهای کشش مستقیم برای تعیین مقاومت کششی واقعی سنگ استفاده شد. در قسمت تئوری و از بین مدلهای گوناگون ارائه شده در تئوری مکانیک شکست، از دو مدل "ترک چسبنده" و "ترک نامعین چرخشی" برای ارزیابی و بررسی بیشتر و همچنین مدلسازی آزمایش برزیلی استفاده گردید. همچنین جهت تحلیل عددی در مدل ترک نامعین چرخشی، برنامه کامپیوتری ویژه‌ای بکار گرفته شد. در نهایت می‌توان مراحل این پژوهش را بصورت زیر خلاصه نمود:

۱) بررسی سوابق مطالعاتی در زمینه آزمایش برزیلی و تئوری مکانیک شکست

۲) بررسی مبانی تئوری آزمایش برزیلی

۳) بررسی مبانی تئوری مکانیک شکست

۴) بیان مفاهیم و مبانی تئوری "مدل ترک چسبنده" و "مدل ترک چرخشی"

۵) فراهم آوردن یک برنامه کامپیوتری با توانایی انجام تحلیلهای مکانیک شکستی

۶) پیشنهاد و طراحی آزمایشات لازم برای ارزیابی مدلهای تئوری مکانیک شکست

۷) فراهم آوردن نمونه‌های سنگی مورد نیاز و انجام آزمایشات لازم

۸) مدل سازی نمونه‌های تهیه شده در آزمایشگاه به کمک برنامه کامپیوتری

۹) ارائه راه‌حل برای بدست آوردن پارامترهای ورودی مدل با کمک آزمایشهای برزیلی و کشش مستقیم

۱۰) استفاده از نتایج چند آزمایش برای تعیین پارامترهای مکانیک شکستی سنگ مورد آزمایش

۱۱) استفاده از پارامترهای بدست آمده از مرحله قبلی، برای پیش‌بینی رفتار نمونه‌های دیگر تحت آزمایش برزیلی با انجام مدل سازی بوسیله برنامه کامپیوتری

۱۲) مقایسه پیش‌بینی فوق با نتایج ثبت شده در آزمایشگاه

۱۳) نتیجه‌گیری در مورد ارزیابی کارایی مدل با استفاده از مقایسه فوق

در این پایان‌نامه مراحل فوق در ۷ فصل و به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱) مقدمه: شامل اهداف تحقیق و روش مورد استفاده

۲) مروری بر پیشینه مطالعات: شامل بیان تاریخچه‌ای از آزمایش برزیلی و تئوری مکانیک شکست

۳) مطالعه آزمایش برزیلی: شامل مباحث تئوریک پیرامون این آزمایش

۴) مبانی تئوری مکانیک شکست و مدلهای آن: شامل مبانی این تئوری و بعضی مدلهای ارائه شده در آن بخصوص دو مدل ترک چرخشی و ترک چسبنده

۵) انجام آزمونهای آزمایشگاهی و بررسی نتایج آنها: شامل بررسی نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایشهای برزیلی و کشش مستقیم و همچنین تحلیل و توضیح بیشتر پیرامون نتایج حاصل از آزمایشها

۶) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری

۷) نتیجه‌گیری و پیشنهادها: مشتمل بر جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در مورد کارائی مدلهای تئوری ارائه شده و ارائه پیشنهادهایی برای پیگیری این تحقیق و چشم‌انداز کارهای آینده

فصل دوم

مروری بر پیشینه مطالعات

۲-۱- پیشینه آزمایش برزیلی

اولین قدم در راه شکل گرفتن ایده آزمایش برزیلی در سال ۱۸۸۳ توسط هرتز[1] برداشته شد. او راه حلی تئوری برای تعیین میدان تنشها در دیسک یا سیلندری که بصورت قطری تحت بار فشاری خطی قرار گرفته باشد (شرایط آزمایش برزیلی)، ارائه داد. سپس برای اولین بار در سال ۱۹۴۹، "آزمایش برزیلی" توسط کارنیرو و بارسلوس در برزیل ابداع گردید. آنها در حین انتقال بار سنگینی توسط غلتکهای چدنی، متوجه شدند که غلتکها در امتداد قطر عمودیشان ترک برمی‌دارند. پس از بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی، مشخص شد که اعمال بار قطری به نمونه‌های آزمایشگاهی، باعث ایجاد تنشهای داخلی کششی و فشاری در آن می‌گردد. از آنجایی که هیچ تنش مستقیمی به نمونه‌ها وارد نشده بود، این پدیده را کشش غیر مستقیم نامیدند و بر اساس آن آزمایش برزیلی را طراحی نمودند. هوندراس در سال ۱۹۵۹، تحلیلی مشابه با تحلیل هرتز و البته برای بار نواری انجام داد و در مقاله‌ای که در همان سال ارائه کرد به بررسی علمی آزمایش برزیلی و نحوه تعیین مقاومت کششی از این آزمایش پرداخت **[۱]**. در همین راستا فیرهاست در سال ۱۹۶۴ **[۲]** و کولباک در سال ۱۹۶۶ **[۳]**، این آزمایش را مورد بررسی بیشتر قرار دادند و بدین ترتیب نام آزمایش برزیلی (کشش غیرمستقیم) بشکل رسمی وارد ادبیات فنی گردید. در سالهای بعد، جنبه‌های مختلف آزمایش برزیلی مانند اثر اندازه و سرعت بارگذاری، توسط نیومن **[۴]** و ملور **[۵]** مورد مطالعه کامل‌تری قرار گرفت. ساندارام

[1] Hertz

[۶] و چن **[۷]** از جمله افرادی بودند که این آزمایش را از جهت متفاوت بودن رفتار سنگ در کشش و فشار مورد بررسی قرار دادند.

در سالهای اخیر، بررسی این آزمایش از دیدگاه تئوری مکانیک شکست نیز، مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است **[۱۰-۸]**.

۲-۲- پیشینه تئوری مکانیک شکست

مبحث مکانیک شکست با مقاله‌ای که در سال ۱۹۱۳ توسط انگلس ارائه گردید **[۱۱]**، آغاز شد. او راه‌حلی الاستیک برای بدست آوردن تنش‌های رأس یک حفره بیضی شکل در یک جامد نامحدود ارائه کرد و مشاهده نمود که اگر بیضی به یک خط، مانند ترک نزدیک شود (یعنی محور کوچک بیضی به صفر میل کند) ،تنش‌ها در رأس بیضی، تمایل به بی‌نهایت شدن دارند. با توجه به این واقعیت، گریفیث **[۱۲،۱۳]** نتیجه گرفت که در صورت وجود ترک، مقدار تنش نمی‌تواند بعنوان معیار خرابی مورد استفاده قرار بگیرد. این موضوع او را بسمت معیار انرژی برای خرابی هدایت کرد که منجر به پیدایش مکانیک شکست الاستیک خطی کلاسیک و بعدها به شکل کلی‌تر مکانیک شکست الاستیک شد. بر اساس این معیار، اصول تعادل انرژی این‌گونه مطرح می‌شود که اگر انرژی موجود برای توسعه ترک در واحد سطح ترک برابر با انرژی مورد نیاز برای ایجاد آن باشد آنگاه یک ترک می‌تواند توسعه پیدا کند. گریفیث این انرژی را برابر $2\gamma_s$ بدست آورد، که γ_s انرژی سطحی ویژه در یک جامد الاستیک بوده و بیانگر مقدار انرژی موردنیاز برای شکستن قیود ساختار میکروسکوپی مواد و درنتیجه تشکیل یک سطح جدید است.

بعد از آن مشخص شد که انرژی واقعی مورد نیاز برای توسعهٔ ترک از این مقدار بیشتر می‌باشد که این واقعیت بدین دلیل است که در اغلب مواد ترک‌ها نرم و مستقیم نیستند بلکه زبر و موج‌دار و همراه با تعداد زیادی ریزترک هستند، درضمن ناحیه قابل ملاحظه‌ای در اطراف رئوس ترک پلاستیک می‌شود. بدین دلائل مقاومت رشد ترک R جایگزین انرژی سطح مخصوص $2\gamma_s$ شد، که با یک تقریب ساده‌کننده مقدار R ثابت می‌باشد. تعیین مقدار R بصورت آزمایشگاهی یک مشکل اساسی در مکانیک شکست می‌باشد، همچنین تعیین انرژی موجود در یک سازه مشخص برای توسعهٔ ترک در واحد سطح بسیار مشکل است. امروزه این مقدار نرخ آزاد شدن انرژی نامیده می‌شود و معمولاً با ς نمایش داده می‌شود.

بزودی کار گریفیث مورد توجه مجامع آکادمیک قرار گرفت وتحقیقات در این زمینه با سرعت کم تا سال ۱۹۴۰ ادامه داشت. ولی در بین سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۷۰ بواسطهٔ پیشرفت‌های زیاد در شکست

فلزات، مکانیک‌شکست توسعهٔ زیادی یافت. در طول این دوره کارهای خوبی بصورت تئوری و عددی و تجربی انجام شد. اساس کارهای تئوری شامل تعمیم نظریه گریفیث به هر حالتی از شرایط بارگذاری و هندسی و ارتباط آن به نرخ آزاد شدن انرژی ς در میدان‌های تنش و کرنش الاستیک بود. اساس کارهای تجربی نیز شامل انجام آزمایشاتی برای بدست‌آوردن مقاومت رشد ترک R بود. از مهمترین کارهای صورت‌گرفته در این دوره، بدست‌آوردن انتگرال J بود که بوسیله رایس در سال ۱۹۶۸ ارائه شد **[۱۴]** که بر اساس آن یک رابطه بین نرخ آزاد شدن انرژی و میدان‌های تنش و کرنش نزدیک رأس ترک برای هر مادهٔ الاستیک خطی یا غیرخطی بدست می‌آمد.

دومین کار بزرگ در مبانی تئوریکی مکانیک شکست الاستیک خطی بوسیله ایروین **[۱۵]** انجام شد که مفهوم فاکتور شدت تنش را بعنوان پارامتری برای شدت تنش‌های نزدیک به رأس ترک و ارتباط آن را با نرخ آزاد شدن انرژی معرفی کرد. هر چند که مکانیک شکست الاستیک خطی یک ابزار اساسی برای آنالیز مسائل مربوط به رشد ترک می‌باشد و پیش‌بینی خوبی برای وقتیکه شکست خیلی ترد بوده و مواد تا قبل از رسیدن به شکست الاستیک می‌باشند، می‌دهد، اما این موضوع برای اغلب موارد عملی صادق نیست و ناحیه پلاستیک قابل توجهی در اطراف رأس ترک قبل از گسیختگی بوجود می‌آید. ایروین و دیگران **[۱۶]** در سال ۱۹۵۸ اندازهٔ ناحیهٔ پلاستیک اطراف رأس ترک را محاسبه کردند. بعد از آن تئوری‌های مکانیک شکست متنوعی که کمابیش بموازات هم بودند، توسعه پیدا کردند، که دو مدل ترک الاستیک معادل و مدل ترک چسبنده بیش ازهمه گسترش یافتند.

در مدل ترک معادل، ناحیهٔ غیرخطی بطور تقریبی بوسیلهٔ شرایطی مدل می‌شود که اثر آن کاهش سختی جسم می‌باشد، که این تقریباً مشابه است با افزایش طول ترک در حالیکه جسم همچنان الاستیک است. این ترک بلندتر، ترک معادل یا ترک مؤثر نامیده می‌شود. رفتار این مدل مشابه با مکانیک شکست الاستیک خطی می‌باشد فقط باید قوانینی برای نشان‌دادن چگونگی توسعهٔ ترک معادل تحت افزایش نیرو، به آن اضافه کرد. در این زمینه ایروین در سال ۱۹۵۸ در حالت کلی و کرافت و دیگران در سال ۱۹۶۱ با وضوح بیشتر مفهوم منحنی R (منحنی مقاومت) را پیشنهاد کردند که در آن مقاومت رشد ترک (R) ثابت نیست و با طول ترک تغییر می‌کند **[۱۷،۱۸]**.

مدل ترک معادل برای بتن بوسیله جنگ و شاه در سال ۱۹۸۵ پیشنهاد شد **[۱۹]** و سپس توسط بازانت و همکاران توسعه زیادی یافت که منجر به توصیه‌های آزمایشگاهی برای بدست‌آوردن ویژگی‌های شکست بتن شد. مفهوم منحنی R با موفقیت در بتن و سرامیک کاربرد پیدا کرد، هر چندکه بعدها مشخص شد منحنی R از ویژگی‌های ماده نبوده و وابسته به هندسه می‌باشد.

مدل ترک چسبنده نیز برای مدل‌کردن رفتار غیرخطی در ناحیهٔ نزدیک به رأس ترک توسعه پیدا کرد. در این مدل فرض می‌شود توسعه و بازشدگی ترک درحالی اتفاق می‌افتد که تنش از یک وجه

ترک به وجه دیگر آن منتقل می‌شود. اولین بار مدل ترک چسبنده بوسیله بارن‌بلات **[۲۰]** پیشنهاد شد که هدف آن مرتبط کردن مقاومت رشد ترک ماکروسکوپی به انرژی پیوندهای اتمی بود. بارن‌بلات نیروهای بین اتمی را با معرفی تنش‌های چسبنده روی سطوح ترک تشکیل یافتهٔ جدید مدل کرد که این به بازشدگی بین وجوه ترک بستگی داشت. توزیع این نیروهای اتمی چسبنده باید طوری مورد محاسبه قرار گیرند که تنش‌های غیر معمول حذف شوند و تنش‌ها به شکل محدود باقی بمانند. بارن-بلات فرض کرد که نیروهای چسبنده تنها روی ناحیهٔ کوچکی اطراف رأس ترک عمل می‌کنند و شکل پروفیل ترک‌ها در این ناحیه مستقل از شکل و اندازهٔ جسم است. با معادل قراردادن کار خارجی در ناحیه رأس ترک با کار نیروهای چسبنده، او توانست نتایج گریفیث را بدست آورد.

دوگدل **[۲۱]** در سال ۱۹۶۰ مدلی با یک ناحیه چسبنده و با تنش چسبنده ثابت فرمول‌بندی کرد. هر چند که این مدل از نظر ظاهری شبیه مدل بارن‌بلات بود، اما این مدل یک شرایط فیزیکی کاملاً متفاوت یعنی پلاستیک شدن ماکروسکوپی را بجای اندرکنش‌های اتمی میکروسکوپی ارائه کرد.

مدل‌های زیادی با استفاده از تئوری ترک چسبنده، توسط افراد مختلف ارائه‌گردید که از آن جمله مدل ترک موهومی بود که بوسیله هیلربرگ **[۲۲]** برای بتن ارائه شد که دارای مزایای ویژه‌ای بود. بطورکلی تمام تئوری‌های مکانیک شکست بیان شده تا این زمان برای آنالیز شکست سازه نیاز به ترک از پیش موجود داشتند، یعنی اگر ترکی از پیش وجود نداشته باشد از مدل‌های ترک معادل یا مدل‌های ترک چسبنده کلاسیک نمی‌توان استفاده کرد ولی از مدل ترک موهومی هیلربرگ می‌توان استفاده نمود، زیرا این مدل شامل قوانینی برای شروع ترک می‌باشد و در آن یک رابطه بین مقاومت کلاسیک سازه که مبنای آنالیز قرار می‌گیرد و مکانیک شکست کلاسیک با مبنای انرژی بیان می‌شود.

بعد از آن محققین مدل‌هایی را مورد بررسی قرار دادند که بوسیلهٔ آنها بتوانند تشکیل ترک و رشد آن را در یک سازه خالی از ترک و عیب اولیه با یک دیدگاه ماکروسکوپی توضیح دهند. نخستین روش اجزاء محدود در این راستا شامل کاهش سختی به مقدار صفر برای المان‌هایی بود که به مقاومت کششی خود رسیده‌اند، که توسط رشید **[۲۳]** در سال ۱۹۶۸ ارائه شد. در این روش، که روش ترک نامعین (smeared crack) نامیده می‌شود، تصور می‌شود تعداد نامتناهی ترک‌های موازی با فاصله خیلی کم بصورت پیوسته‌ای توزیع شده‌اند. بدین ترتیب می‌توان براحتی با کاهش سختی و مقاومت مواد در جهت عمود بر ترک‌ها وقتیکه آن مواد به مقاومت حداکثر خود رسیده‌اند، مدل‌سازی را انجام داد. انجام این تغییرات در ماتریس سختی بشکل نسبتاً راحتی در کدهای اجزا محدود قابل اجرا می‌باشد. بعدها مدل‌های کاملتری بر اساس خرابی تدریجی با توجه به نرم‌شوندگی، برای المان‌ها مورد استفاده قرارگرفتند که کاچانف در سال ۱۹۵۸ برای اولین‌بار مدلی با این دید ارائه‌کرد **[۲۴]**.

اگرچه نتایج خیلی امیدبخشی از این مدل‌ها بدست آمد، اما بعدها آشکار شد که نتایج تحلیل‌های عددی که از این مدل‌ها استفاده می‌کنند، شدیداً به اندازهٔ المان‌های مورد استفاده در مش اجزا محدود بستگی دارد. این حساسیت کاذب به مش‌بندی و همینطور ناپایداری‌های محلی بدلیل متمرکزشدن کرنش در ناحیه‌ای به حجم صفر، سال‌ها منجر به اختلاف‌نظر و جدل در زمینهٔ این تئوری شد. برای غلبه بر این مشکل بازانت مدل باند ترک (Crack Band Model) را ارائه داد که در آن ترک بوسیلهٔ یک باند شکست با ضخامت ثابت (که این ضخامت از ویژگی‌های ماده است) مدل می‌شود و کرنش در این باند بطور یکنواخت توزیع می‌گردد **[۲۷-۲۵]**.

مدل ترک چرخشی نیز در سال ۱۹۸۰ توسط کوپ **[۲۸]** پیشنهاد شد. گوپتا و دیگران **[۲۹]** در سال ۱۹۸۴ و همچنین کریسفیلد **[۳۰]** در سال ۱۹۸۷، فرمولاسیون این مدل را بازنویسی کردند.

در سال ۱۹۸۴ تلاش فراوانی بوسیله بازانت **[۳۱]** آغاز شد که اختصاص به توسعهٔ مدل‌های پیوسته نرم شونده داشت و می‌توانست توضیحاتی درباره زمان و چگونگی شروع و توسعهٔ فرآیند شکست بدون مفروضات ویژهٔ قابل توجهی ارائه دهد. با روش غیرمحلی‌سازی، پاسخ غیرخطی در یک نقطه نه تنها به کرنش در آن نقطه بلکه به کرنش در نقاط دیگر در همسایگی آن نقطه بستگی دارد. بعلت مشکلات عددی که در استفاده از مدل‌های پیوسته وجود دارد، استفاده عملی از این مدل‌ها تاکنون فقط برای گروه‌های تحقیقاتی امکان‌پذیر شده است. علاوه بر این کمبود آنالیزهای تئوریکی قدرتمند سبب شده است این مدل‌ها توسعه زیادی نیابند. با این همه قدرت تعمیم این مدل‌ها غیرقابل انکار است و آنها می‌توانند یک اساس محکم برای توسعهٔ مدل‌های قابل قبول‌تر فراهم کنند.

فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در زمینهٔ مکانیک شکست مواد شبه‌ترد شامل بتن، سنگ، سرامیک و بعضی پلی‌مرها از سال ۱۹۸۰ به بعد انجام شد. تلاش‌های تحقیقاتی زیادی هنوز هم برای دقیق‌تر کردن مدل‌های بیان شده، بهبود ابزارهای تحلیلی و عددی مورد نیاز برای کنترل مدل‌ها، توسعهٔ روش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامترهای ورودی در تئوری‌های مختلف و ارتباط دادن رفتار شکست ماکروسکوپیک به ویژگی‌های میکروسکوپی ساختار ماده، در حال انجام می‌باشد. این مطالعات تاجایی پیش‌رفته است که اکنون استفاده از مکانیک شکست در طراحی بتن امکان‌پذیر شده است و این می‌تواند منجر به طراحی‌های دقیق‌تر و ایمن‌تر با استفاده از هزینه‌های کمتر گردد. متأسفانه در زمینهٔ سنگ برخلاف بتن تاکنون فعالیت‌های زیادی صورت نگرفته، که همین امر سبب شده جای تحقیقات زیادی در ارتباط با ورود مبحث مکانیک شکست در مکانیک سنگ وجود داشته باشد.

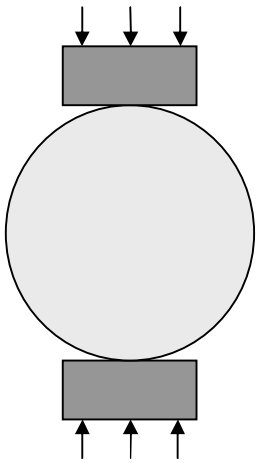
فصل سوم

مطالعه آزمایش برزیلی

۳-۱- مقدمه

در مواد نیمه ترد مانند سنگ و بتن، معمولا مقاومت کششی بسیار پایین‌تر از مقاومت فشاری می‌باشد. بهمین دلیل، گسیختگی در این مواد بیشتر بر اثر تنشهای کششی و پدیده ایجاد ترک روی می‌دهد. از این رو تعیین مقاومت کششی این مواد، از جمله مسائل مورد علاقه پژوهشگران بوده است. از نظر تئوری، آزمایش کشش خالص بهترین روش برای تعیین مقاومت کششی می‌باشد. چرا که بدلیل ایجاد میدان تک بعدی تنش کششی در این آزمایش، گسیختگی در تنشی برابر با مقاومت کششی ماده روی می‌دهد. اما آزمایش کشش مستقیم در عمل، آزمایشی پرهزینه، زمان‌بر و مشکل می‌باشد. ایجاد تنش کششی خالص در نمونه تحت آزمایش و همچنین نحوه اتصال نمونه به فکهای دستگاه، از جمله مشکلات این آزمایش می‌باشد. از این جهت معمولا مقاومت کششی از طریق روشهای غیرمستقیم تعیین می‌گردد. یکی از این روشها آزمایش برزیلی می‌باشد که بدلیل سادگی و سرعت بیشتر، بعنوان جایگزینی برای تعیین مقاومت کششی مواد نیمه ترد بروش غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی، وجود میدان دو بعدی تنش در لحظه گسیختگی، اثر شرایط انتهایی در نتایج و همچنین رفتار غیرخطی ماده سنگی، این آزمایش را از جهت تئوری با پیچیدگیهایی روبرو کرده است. از اینرو تحقیقات بسیاری برای آشکار کردن زوایای پنهان این آزمایش در حال انجام می-

باشد. در آزمایش برزیلی، نمونه دیسکی یا سیلندری شکل از دو طرف توسط صفحات موازی (فکهای دستگاه آزمایش) تحت فشار قرار می‌گیرد. این صفحات می‌توانند تخت یا منحنی شکل باشند. نقطه آغاز مطالعه آزمایش برزیلی، تحلیل تنشها در نمونه تحت آزمایش می‌باشد. کلیه این تحلیلها با فرض نمونه همگن، ایزوتروپ و دارای رفتار خطی انجام شده است. نحوه انجام این آزمایش در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ نحوه انجام آزمایش برزیلی

۳-۲- میدان تنشها در آزمایش برزیلی

اولین بار، حل تنشها برای دیسک یا سیلندری که از دو طرف بصورت قطری تحت بار خطی یکنواخت قرار گرفته باشد توسط Hertz در سال ۱۸۸۳ انجام گردید. بعد از آن معادلاتی توسط Frocht برای توزیع تنشهای اصلی با همان شکل بارگذاری ارائه شد **[۵]**. این روابط در دستگاه مختصات کارتزین و با تعیین مرکز دیسک بعنوان مبدا مختصات می‌باشد (در کلیه روابط تنش کششی مثبت در نظر گرفته شده است).

$$s_1 = \frac{P}{p\,Rt}\left(\frac{M.N - 2R^2.N}{M.N + 2R^2L}\right) \qquad (۳-۱)$$

$$s_3 = \frac{P}{p\,Rt}\left(\frac{M.N + 2R^2.N}{M.N + 2R^2L}\right) \qquad (۳-۲)$$

که در آن

$$M = x^2 + y^2 + R^2, \qquad N = x^2 + y^2 - R^2, \qquad L = x^2 - y^2 + R^2$$

و P, R و t نیز بترتیب نیروی وارده، شعاع و ضخامت دیسک می‌باشند.

با حل این روابط مشخص گردید که در قطر اصلی واصل بین دو نقطه بارگذاری (قطر قائم)، تنش

کششی یکنواختی بوجود می‌آید، همچنین وجود تنش فشاری نسبتا پایین و یکنواخت در منطقه مرکزی قطر اصلی و شروع ترک خوردگی در همان ناحیه، محققان را به ایده استفاده از تست برزیلی جهت تعیین مقاومت کششی نزدیک نمود. در روابط فوق، فرض وجود بار خطی باعث شده است که نتوان شرایط تنشها در زیر صفحات بارگذاری را تعیین کرد. از طرفی این فرض با واقعیت آزمایش برزیلی چندان تطابق ندارد. تیموشنکو نشان داد که با انجام بارگذاری روی محیط دایره‌ای یک دیسک توسط صفحات تخت (شرایط آزمایش برزیلی)، بتدریج محل تماس از شکل خطی به یک نوار با عرض محدود (سطح محدود) تبدیل می‌شود [۳۲].

پس از آن حل تنش کاملی برای شرایط بارگذاری مشابه آزمایش برزیلی و با فرض بار گسترده نواری توسط Hondros ارائه گردید **[۱]**. از آنجا که ترک اصلی در آزمایش برزیلی در راستای قطر قائم (قطر واصل بین دو صفحه بارگذاری) ایجاد می‌شود، توزیع تنش در طول این قطر مورد توجه قرار گرفت. با استفاده از تحلیل تنشها مشاهده شد که مولفه‌های تنش عمود بر قطر اصلی (s_{qd}) و در امتداد قطر اصلی (s_{rd})، تنشهای اصلی می‌باشند. جهت تنشهای اصلی و همچنین فرضیات مورد استفاده در روابط Hondros را می‌توان در شکل (۳-۲) مشاهده کرد. روابط وی بشرح زیر می‌باشند:

$$s_{qd} = +\frac{P}{pRta}\left\{\frac{\left[1-(\frac{r}{R})^2\right]\sin 2a}{1-2(\frac{r}{R})^2\cos 2a+(\frac{r}{R})^4}-\tan^{-1}\left[\frac{1+(\frac{r}{R})^2}{1-(\frac{r}{R})^2}\tan a\right]\right\} \qquad (۳-۳)$$

$$s_{rd} = -\frac{P}{pRta}\left\{\frac{\left[1-(\frac{r}{R})^2\right]\sin 2a}{1-2(\frac{r}{R})^2\cos 2a+(\frac{r}{R})^4}+\tan^{-1}\left[\frac{1+(\frac{r}{R})^2}{1-(\frac{r}{R})^2}\tan a\right]\right\} \qquad (۳-۴)$$

در این روابط:

s_{qd} و s_{rd} : بترتیب تنشهای اصلی مماسی و شعاعی بر روی قطر قائم

r: فاصله از مرکز دیسک

2α: زاویه روبرو به کمان بارگذاری

P, R و **t**: بترتیب نیروی وارده، شعاع و ضخامت دیسک

نتایج معادلات فوق برای $a = \tan^{-1}1/12 \approx 5^o$ در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بواسطه این نوع بارگذاری، تنش کششی یکنواخت در طول زیادی از قطر قائم بوجود می‌آید. همچنین تنش فشاری نیز در قسمت مرکزی از قطر اصلی، تقریبا یکنواخت است.