بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

مکانیک شکست بتن کاربردی

به همراه مثال‌های عددی متعدد

تألیف:

دکتر موسی مظلوم

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجائی

مهندس سید حسن احمدی

دانش‌آموخته دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجائی

سرشناسه	:	مظلوم، موسی، ۱۳۴۷-
عنوان و نام پدیدآور	:	مکانیک شکست بتن کاربردی به همراه مثال‌های عددی متعدد/ تالیف موسی مظلوم، سیدحسن احمدی.
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری	:	۲۹۳ ص.: مصور(رنگی)، نمودار(رنگی).
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۵۸-۱
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	کتابنامه.
یادداشت	:	نمایه.
موضوع	:	بتن -- شکستگی Concrete -- Fracture
شناسه افزوده	:	احمدی، سیدحسن، ۱۳۶۵-
شناسه افزوده	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
شناسه افزوده	:	Shahid Rajaee Teacher Training University
رده بندی کنگره	:	TA۴۴۰
رده بندی دیویی	:	۶۲۰/۱۳۶۶
شماره کتابشناسی ملی	:	۹۴۱۲۵۸۲
اطلاعات رکورد کتابشناسی	:	فیپا

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	مکانیک شکست بتن کاربردی به همراه مثال‌های عددی متعدد
تألیف	:	دکتر موسی مظلوم، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی/ مهندس سید حسین احمدی، دانش‌آموخته دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
ویراستار علمی	:	دکتر امیر طریقت
ویراستار ادبی	:	عاطفه نجیبی
نوبت چاپ	:	اول- زمستان ۱۴۰۲
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی، چاپ	:	شریف
طراح جلد	:	عباس مرادی
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی‌نژاد
کارشناس صفحه‌آرا	:	نیره فیروزی
کارشناس انتشارات	:	طاهره کیاء
شمارگان	:	۲۵ جلد
قیمت	:	۲۴۰.۰۰۰ تومان
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۵۸-۱ ISBN: 978-622-6589-58-1

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفان و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان، کد پستی ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱، صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ ، تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰، تلفکس: ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: publish@sru.ac.ir، وب سایت: http://publish.sru.ac.ir

پیش‌گفتار

شکر و سپاس پروردگار عالمیان را که توان اندیشه داد تا تألیف کتاب «نگاهی ویژه به مکانیک شکست بتن» پس از سال‌ها محقق گردد. این کتاب حاصل چند سال تحقیق و حدود سه سال نگارشی است که با تمام ناهمواری‌ها اکنون برخود جامه عمل پوشیده، خالق فکر و اندیشه را سپاس می‌گوئیم که شکیبایی و استقامت عطا فرمود تا موانع و مشکلات را در این راه پر فراز و نشیب پشت سر گزاریم.

هدف از تألیف این کتاب، در واقع وجود بحث‌های گسترده درباره‌ی مکانیک شکست و پیچیدگی مباحث بیان شده در زمینه مکانیک شکست بتن می‌باشد که ایجاد نوعی سردرگمی برای خوانندگان کرده است. از آنجا که در کتابخانه‌های مختلف و کتاب فروشی‌ها نیز کتاب کامل و جامعی در این زمینه پیدا نشد، در طی یک دهه کتاب‌های مختلفی درباره مکانیک شکست و مکانیک شکست بتن مورد مطالعه قرار گرفت، و حاصل آن کتاب حاضر می‌باشد که در آن سعی شده به طوری جامع و کاربردی و به بهترین شکل در اختیار دوستداران این موضوع قرار گیرد.

کتاب حاضر شامل ۵ فصل می‌باشد و در هر فصل مثال‌های متعددی برای تبیین موضوعات بیان شده است. در انتهای هر فصل تمرین‌های متعدد و کاربردی آمده است که پاسخ به آن‌ها در یادگیری مباحث عنوان شده در کتاب بسیار مؤثر می‌باشد. ضمن اینکه از همان ابتدا به مؤثر بودن و نیز مختصر و مفید بودن کتاب توجه خاصی اعمال شده تا از تکرارهای بی‌مورد و غیر لازم که عموماً موجب اتلاف وقت و سر درگمی می‌گردد، جلوگیری شود. در بخش مراجع نیز می‌توان با نوشتارهایی شامل «کتاب، آیین‌نامه‌ها و مقالات» آشنا شد.

امید است مجموعه حاضر مورد توجه استادان ارجمند، دانشجویان گرامی و مهندسان این رشته واقع گردد. در پایان از همه صاحبنظران و همکاران محترم خواهشمندیم که با دیدگاه‌ها و نظرات کارشناسانه ما را در بهبود بخشیدن چاپ‌های بعدی یاری فرمایند.

موسی مظلوم- سید حسن احمدی

بهار ۱۴۰۲

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه‌ای بر مکانیک شکست	**۱**
۱-۱ مقدمه	**۱**
۱-۲ نظریه خطی در مکانیک شکست	۳
۱-۳ تمرکز تنش	۵
۱-۴ مودهای شکست	۶
۱-۵ ضریب شدت تنش	۷
۱-۶ نرخ آزادسازی انرژی	۹
۱-۷ میدان‌های تنش در همسایگی نوک ترک	۹
۱-۸ شکست در مواد مختلف	۱۱
۱-۹ نظریه‌های غیرخطی در مکانیک شکست	۱۲
۱-۱۰ مکانیک شکست الاستوپلاستیک	۱۳
۱-۱۰-۱ معیار بازشدگی نوک ترک (*CTOD*)	۱۳
۱-۱۱ مقدمه‌ای بر مکانیک شکست بتن	۱۸
۱-۱۲ رفتار شکست در بتن و فولاد	۱۹
۱-۱۳ توزیع تنش در نمونه بتنی شیاردار خمشی	۲۱
۱-۱۴ تخمین انرژی شکست کلی	۲۴
۱-۱۵ تابع‌های نرم‌شوندگی بتن	۲۵
۱-۱۵-۱ تابع نرم‌شوندگی یک خطی	۲۶

۱-۱۵-۲ تابع نرم‌شوندگی دو خطی به روش *CEB- FIP* ۳۲
۱-۱۵-۳ تابع نرم‌شوندگی دو خطی به روش *Xu* و *Zhang* ۳۴
۱-۱۶ منابع و مآخذ ۴۵
فصل دوم: اثر اندازه ۴۹
۲-۱ مقدمه ۴۹
۲-۲ مفهوم اثر اندازه ۵۰
۲-۳ انرژی کرنشی ۵۱
۲-۴ چگالی انرژی کرنشی ۵۴
۲-۵ قانون اثر اندازه بازانت ۵۵
۲-۵-۱ قانون اثر اندازه بازانت برای نمونه‌ی دارای محدوده‌ی آسیب دیده‌ی در نوک ترک ۵۵
۲-۵-۲ قانون اثر اندازه بازانت برای نمونه‌ی دارای ناحیه‌ی آسیب دیده‌ی نوک تیز ۵۸
۲-۵-۳ قانون جامع اثر اندازه بازانت ۶۱
۲-۵-۴ تعیین انرژی شکست نمونه‌های بتنی شیاردار تحت خمش سه نقطه‌ای در آزمایشگاه بوسیله‌ی روش اثر اندازه ۶۳
۲-۶ منابع و مآخذ ۸۰
فصل سوم: روش‌های مختلف به دست آوردن انرژی شکست بتن (G) ۸۳
۳-۱ مقدمه ۸۳
۳-۲ مفهوم‌های انرژی شکست کل (G_F) ۸۴
۳-۲-۱ تعیین انرژی شکست به روش اول کارشکست ۸۵
۳-۲-۲ تعیین انرژی شکست به روش دوم کار شکست ۹۳
۳-۳ مفهوم‌های انرژی شکست اولیه (G_f) ۱۰۳
۳-۳-۱ روش دو پارامتری ۱۰۴
۳-۳-۲ مدل شکست بتن به روش ضریب شدت تنش دو تایی ۱۱۳
۳-۳-۳ مدل شکست بتن به روش نرخ آزاد سازی انرژی دو تایی ۱۲۷

۳-۴ محاسبه‌ی انرژی شکست چسبنده بحرانی (G^c_{Ic}) با استفاده از روابط محاسباتی ۱۴۱
۳-۵ منابع و مآخذ ۱۵۸
فصل چهارم: شکست خمشی تیرهای بتن مسلح ۱۶۱
۴-۱ مقدمه ۱۶۱
۴-۲ به‌دست آوردن لنگر خمشی تیر تحت خمش سه نقطه‌ای با استفاده از روش آیین‌نامه ACI ۱۶۲
۴-۳ روش کارپنتری ۱۶۷
۴-۴ روش بوسکو و کارپنتری ۱۷۸
۴-۵ منابع و مآخذ ۱۹۱
فصل پنجم: تحلیل تیر بتن مسلح و غیرمسلح به روش اجزاء محدود ۱۹۳
۵-۱ مقدمه ۱۹۳
۵-۲ مدل‌سازی ۱۹۴
۵-۲-۱ ساخت هندسه مدل ۱۹۶
۵-۲-۲ تعریف مشخصات مصالح و سطح مقطع ۲۱۶
۵-۲-۳ سرهم کردن یا مونتاژ مدل ۲۳۴
۵-۲-۴ تعریف مراحل تحلیل ۲۵۲
۵-۲-۵ تعریف بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی ۲۵۵
۵-۲-۶ مش‌بندی ۲۶۲
۵-۲-۷ پردازش مدل ۲۶۸
۵-۲-۸ نتایج تحلیل ۲۷۰
۵-۳ تحلیل تیربتنی غیرمسلح ۲۸۰
واژه‌نامه ۲۸۵
نمایه ۲۹۱

فصل اول

مقدمه‌ای بر مکانیک شکست

۱–۱ مقدمه

شکست، موضوعی است که از ابتدا در طبیعت وجود داشته است. ساخت سازه‌های دست‌ساز توسط انسان‌ها آن را آشکارتر می‌کند. خرابی‌های ایجاد شده در سازه‌ها به‌دلیل شکست، خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به اقتصاد وارد می‌کند. اکنون درک ما از چگونگی خرابی‌ها و توانایی ما برای جلوگیری از آن به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. درواقع موضوع شکست یکی از مسائلی است که بشر از ابتدای ساخت سازه با آن مواجه بوده است.

امروزه پیشرفت‌های زیادی در زمینه طراحی سازه‌های صنعتی صورت گرفته است. از این‌رو جلوگیری از بروز شکست ناگهانی اعضای این سازه‌ها که در بعضی از موارد به فروپاشی کلی سازه می‌انجامد، به یک نیاز اساسی تبدیل شده است. مطالعه علت‌های شکست و فروپاشی انواع سازه‌های صنعتی نشان می‌دهد که نیاز به یک علم تخصصی است که به بررسی پدیده شکست در سازه‌های ترک‌دار بپردازد. چراکه مفاهیم کلاسیک مکانیک جامدات، تنها در حالت‌های ساده و زمانی که ماده فاقد ترک و سایر عیب‌ها است، پاسخگوی ضرورت‌های طراحی است. وجود ترک و هرگونه عیبی در عضو، تمامی رابطه‌های مقاومت مصالح را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. از این‌رو ضرورت مطالعه مکانیک شکست با هدف بررسی عمیق و تخصصی سازه‌های دارای عیب و ترک، بیش از پیش آشکار می‌گردد. همچنین توجه به علم مکانیک شکست می‌تواند تا حد زیادی از خسارت‌های اقتصادی وارد شده جلوگیری کند.

در تعریف مکانیک شکست می‌توان گفت که مکانیک شکست شاخه‌ای از مکانیک جامدات است که در آن رشد ترک و اثر آن بر مقاومت سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این علم دو دیدگاه کلی وجود دارد. دیدگاه اول به ایروین نسبت داده شده و بر پایه‌ی بررسی میدان‌های تنش پیرامون نوک ترک استوار است. ایروین در پژوهش‌های خود دریافت که در سازه‌هایی با شرایط گوناگون، میدان‌های تنش پیرامون نوک ترک از شکل و ساختار واحدی تبعیت می‌کنند. بر این اساس او با معرفی مفهوم ضریب شدت تنش به بررسی شکست سازه‌ها پرداخت. همچنین ایروین رسیدن مقدار ضریب شدت تنش در ماده به مقدار بحرانی آن را آغازی برای گسترش ترک معرفی نمود. این رویکرد مزیت‌های فراوانی داشت اما از آنجائی که مستقیماً به میدان‌های تنش می‌پرداخت توانایی چندانی در بیان مسائل جدید در علم مکانیک شکست را نداشت. دیدگاه دوم توسط گریفیس مطرح شد که از مفهوم انرژی استفاده می‌کرد. براساس این رویکرد، انرژی وارد شده بر ترک توسط آن جذب شده و یا صرف غلبه بر سازوکارهای مقاوم در برابر گسترش ترک می‌گردد. ایروین ضریب شدت تنش و گریفیس انرژی شکست را ثابت‌هایی می‌دانستند که تنها به خصوصیت‌های مصالح بستگی داشتند. پژوهش‌های بعدی نشان داد که این مقادیر علاوه بر جنس مصالح، به ابعاد، شکل، هندسه سازه و طول ترک اولیه وابسته هستند. بعدها مطالعه‌های فراوانی برای یافتن دلیل این وابستگی‌ها صورت گرفت. لازم به ذکر است که اگر نظریه‌ی گریفیس بر پایه‌ی انرژی مطرح نشده بود، هیچ‌گونه پیشرفتی در علم مکانیک شکست رخ نمی‌داد.

همچنین در علم مکانیک شکست، به مطالعه رفتار و شرایط مواد در مجاورت نوک ترک پرداخته می‌شود. با پیشرفت این علم در قرن گذشته مشخص شد که استفاده از ایده‌های مکانیک شکست لازمه‌ی تحلیل صحیح بسیاری از سازه‌ها مخصوصاً سازه‌های بتنی است. لزوم استفاده از مکانیک شکست از آنجا ناشی می‌شود که تکنیک‌های مقاومت مصالح کلاسیک توانمندی کافی برای تحلیل بسیاری از سازه‌هایی که دارای ناپیوستگی شدید مانند ترک هستند را ندارند. به‌عنوان نمونه در یک میدان کششی با فرض الاستیک بودن رفتار مصالح، تنش در نوک ترک به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. از آنجائی‌که هیچ ماده‌ای نمی‌تواند مقدار تنش بی‌نهایت را تحمل کند بنابراین ناحیه‌ای با رفتار غیر الاستیک در نوک ترک وجود دارد که برای لحاظ نمودن آن در محاسبه‌ها، قطعاً نیاز به استفاده از علم مکانیک شکست است. به این ترتیب تکنیک‌های کلاسیک مقاومت مصالح نمی‌توانند چنین پدیده پیچیده‌ای را تعریف کنند و در نتیجه علم مکانیک شکست برای پیش‌بینی رفتار انتشار ترک توسعه‌یافته است.