بسم الله الرحمن الرحیم

مکانیک شکست کاربردی

تألیف و ترجمه:

دکتر موسی مظلوم

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

محمد کرملو

سر شناسنامه	:	**مظلوم، موسی، ۱۳۴۷–، گردآورنده، مترجم**
عنوان و نام پدید آور	:	**مکانیک شکست کاربردی/ تألیف و ترجمه موسی مظلوم، محمد کرملو**
مشخصات نشر	:	**تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۴.**
مشخصات ظاهری	:	**ح، ۳۷۰ص.: مصور، جدول.**
شابک	:	**۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۵۳-۸**
وضعیت فهرست نویسی	:	**فیپا**
یادداشت	:	**کتاب حاضر از منابع گردآوری و ترجمه شده است.**
یادداشت	:	**واژه‌نامه.**
یادداشت	:	**کتابنامه.**
یادداشت	:	**نمایه.**
موضوع	:	**مکانیک شکست اجسام**
شناسه افزوده	:	**کرملو، محمد، ۱۳۶۶–، گردآورنده، مترجم**
شناسه افزوده	:	**دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی**
رده بندی کنگره	:	**۱۳۹۴ ۷م۶۶م/ TA۴۰۹**
رده بندی دیویی	:	**۶۲۰/۱۱۲۶**
شماره کتابشناسی ملی	:	**۴۱۳۱۰۵۷**

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	مکانیک شکست کاربردی
تألیف ترجمه	:	دکتر موسی مظلوم عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، محمد کرملو
ویراستار ادبی	:	شهرام طهماسبی
چاپ اول	:	بهار ۱۳۹۵
چاپ دوم	:	بهار ۱۳۹۸
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	:	فرانقش
چاپ	:	فردوس
طراح جلد	:	مهندس هادی عارفی
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی نژاد
کارشناس چاپ و صفحه‌آرا	:	نیره فیروزی
کارشناسان	:	طاهره کیاء/ علی رضایی اهوانوئی
شمارگان	:	۵۰۰ جلد
قیمت	:	۵۰،۰۰۰ تومان
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۵۳-۸ ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹٤-۵۳-۸

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

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

پیشـــگفتـــار

شکست‌های ناگهانی همواره یکی از معضلات خطرآفرین در دوره‌ی بهره‌برداری بوده است. هر ماده با توجه به ساختار اتمی تشکیل‌دهنده الگوی شکست خود را دارا است. از طرف دیگر شرایط بهره‌برداری نیز می‌تواند بر این الگو تأثیرگذار باشد. مسئله‌ی دیگر مؤثر بر موضوع یادشده، فرایند ساخت قطعه است. قطعات ساخته‌شده در صنعت بدون نقص نیستند و این موضوع نیز می‌تواند الگوی شکست و خرابی سازه‌ها را تحت‌الشعاع قرار دهد. ازآنجایی‌که خرابی در سازه‌ها با توجه به نوع کاربری آن‌ها می‌تواند منجر به خسارت‌های مالی، جانی و زیست‌محیطی گردد، ایجاد یک ابزار مناسب برای حل معادله‌ی چند مجهولی حاکم بر الگوی شکست اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

در پنجاه سال گذشته، مکانیک شکست به یک زمینه‌ی علمی توسعه‌یافته تبدیل‌شده است که جایگاهی بین دانش‌های مکانیک مهندسی، علم مواد و فیزیک جامدات دارد. با استفاده از این ابزار و پارامترهای بارگذاری و معیارهای گسیختگی که در آن ارائه می‌گردد، رفتار بسیاری از مواد تا حد قابل قبولی پیش‌بینی می‌گردد.

در این نوشتار سعی بر آن بوده است تا با مبنا قرار دادن مراجع معتبری چون کتاب " Fracture Mechanics Fundamentals and Applications" نوشته‌ی Anderson و کتاب "Elementary Engineering Fracture Mechanics" نوشته‌ی Broek و "Fracture Mechanics- An Introduction" نوشته‌ی Gdoutos ضروریات علم مکانیک شکست ارائه گردد و در کنار آن با ارائه‌ی تمرین‌ها و مثال‌های پرتعداد گامی در جهت ارائه‌ی بهتر این علم به خوانندگان محترم برداشته شود. همچنین به جهت رعایت اختصار از ارائه‌ی مطالب پیچیده‌ی علمی نظیر روش‌های نوین مدل‌سازی پدیده‌ی خستگی، مباحث مرتبط با شاخه‌ی علم مواد و نظیر آن در این نوشتار پرهیز و به ارائه‌ی مباحث ضروری و کاربردی بسنده شده است.

نویسندگان بر این اعتقاد هستند که هیچ اثری خالی از عیب و نقص نیست، لذا تدوین مباحث این اثر عاری از ایراد و کمبود نمی‌تواند باشد. در این راستا از هرگونه انتقاد و پیشنهاد کلیه اساتید محققین و دانشجویان محترم استقبال می‌گردد.

موسی مظلوم
محمد کرملو
زمستان ۹۴

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول/ مقدمه‌ای بر مکانیک شکست	**۱**
۱-۱ مقدمه	۳
۱-۲ تاریخچه‌ی مکانیک شکست	۳
۱-۲-۱ مطالعات اولیه‌ی شکست	۴
۱-۲-۲ مطالعات مکانیک شکست پس از جنگ جهانی	۵
۱-۳ تاریخچه‌ی مکانیک شکست در بتن	۸
۱-۳-۱ مطالعات اولیه‌ی انجام‌شده روی بتن با استفاده از LEFM	۹
۱-۴ فتو الاستیسیته	۱۱
۱-۵ طراحی بر مبنای مکانیک شکست	۱۲
۱-۵-۱ معیار انرژی	۱۳
۱-۵-۲ روش ضریب شدت تنش	۱۳
منابع و مراجع	۱۵
فصل دوم/ مکانیک شکست الاستیک و خطی	**۱۹**
۲-۱ مقدمه	۲۱
۲-۲ شکست از دیدگاه میکروسکپی	۲۱
۲-۳ تمرکز تنش	۲۳
۲-۴ نظریه‌ی تعادل گریفیس	۲۶
۲-۴-۱ معیار گریفیس اصلاح‌شده	۲۹
۲-۵ نرخ آزادسازی انرژی	۳۲
۲-۶ ناپایداری و منحنی R	۳۶
۲-۶-۱ دلایل شکل منحنی مقاومت (R)	۳۸
۲-۶-۲ تغییر مکان- کنترل در مقابل نیرو- کنترل	۴۰
۲-۶-۳ سازه با نرمی محدود	۴۲
۲-۷ تحلیل تنش ترک‌ها	۴۳

۲-۷-۱ روش وسترگارد ۴۴
۲-۷-۲ حل مسائل ترک با استفاده از توابع وسترگارد ۴۷
۲-۷-۳ میدان‌های تنش و جابجایی تکین ۴۸
۲-۷-۴ ضریب شدت تنش و راه‌های محاسبه‌ی آن ۵۱
۲-۷-۵ رابطه‌ی بین K و رفتار کلی ۵۵
۲-۷-۶ اثر اندازه‌های محدود ۶۰
۲-۷-۷ اصل جمع آثار قوا ۶۵
۲-۸ رابطه‌ی بین K و G ۶۸
۲-۹ پلاستیسیته ی نوک ترک ۷۱
۲-۹-۱ روش ایروین ۷۲
۲-۹-۲ مدل نوار گسیختگی ۷۶
۲-۹-۳ مقایسه‌ی ضرایب اصلاحی ناحیه پلاستیک ۷۹
۲-۹-۴ شکل ناحیه‌ی پلاستیک ۸۰
۲-۱۰ شکل K کنترل ۸۵
۲-۱۰-۱ معیار گسیختگی ۸۸
۲-۱۰-۲ تغییرات چقرمگی شکست در اثر تغییر ضخامت نمونه ۸۸
۲-۱۰-۳ محاسبه آزمایشگاهی K_{IC} ۹۴
۲-۱۱-۱ مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های مربوط به تحلیل تنش در ترک‌ها ۱۰۰
۲-۱۱-۲ مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های مربوط به نرخ آزادسازی انرژی کرنشی ۱۳۲
۲-۱۱-۳ مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های مربوط به پلاستیسیته نوک ترک ۱۵۹
منابع و مراجع ۱۷۹

فصل سوم/ مکانیک شکست الاستوپلاستیک ۱۸۱
۳-۱ مقدمه ۱۸۳
۳-۲ تغییر مکان مربوط به بازشدگی نوک ترک ۱۸۳
۳-۳ انتگرال J ۱۹۰
۳-۳-۱ نرخ غیرخطی آزادسازی انرژی ۱۹۱
۳-۳-۲ J یک انتگرال مستقل از مسیر ۱۹۶
۳-۳-۳ J یک پارامتر شدت تنش ۱۹۷

۳-۴ روابط بین J و CTOD ۲۰۱
۳-۵ مقدمه‌ای بر محاسبات آزمایشگاهی J ۲۰۵
۳-۶ منحنی‌های مقاومت در برابر رشد ترک ۲۰۹
۳-۶-۱ رشد پایدار یا ناپایدار ترک ۲۱۰
۳-۷ شکست J-کنترل ۲۱۳
۳-۷-۱ ترک‌های ساکن ۲۱۴
۳-۷-۲ رشد J-کنترل ترک ۲۱۵
۳-۸ قید نوک ترک در جاری‌شدگی بزرگ‌مقیاس ۲۱۷
۳-۸-۱ تنش T الاستیک ۲۱۸
۳-۹ مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های مربوط به مکانیک شکست الاستوپلاستیک ۲۲۳
منابع و مراجع ۲۶۰

فصل چهارم/ رشد ترک در اثر بارهای ناشی از خستگی ۲۶۳
۴-۱ مقدمه ۲۶۵
۴-۲ سیکل‌های تنش ۲۶۵
۴-۳ خستگی با سیکل بالا ۲۶۹
۴-۴ پراکندگی داده‌ها ۲۷۶
۴-۵ خستگی با سیکل کم ۲۷۸
۴-۶ پیش‌بینی عمر خستگی ۲۸۱
۴-۷ رشد و تبلور ترک در اثر خستگی ۲۸۵
۴-۸ شروع ترک ۲۸۶
۴-۹ گسترش ترک در اثر خستگی ۲۸۸
۴-۱۰ بیچ مارک‌ها ۲۹۲
۴-۱۱ راچت مارک‌ها ۲۹۴
۴-۱۲ خطوط اثر ۲۹۵
۴-۱۳ شکست نهایی (مرحله سوم) ۲۹۷
۴-۱۴ راهکار مکانیک شکست برای گسترش ترک ناشی از خستگی ۳۰۰
۴-۱۵ بسته شدن ترک ۳۰۶
۴-۱۶ آستانه‌ی خستگی ۳۱۱

۴-۱۷ سطح تنش در نوک ترک ۳۱۱
۴-۱۷-۱ پلاستیک شدگی متناوب ۳۱۱
۴-۱۷-۲ تنش‌های پسماند ۳۱۴
۴-۱۸ بارگذاری با شدت متغیر ۳۱۴
۴-۱۹ مثال‌های حل‌شده و تمرین‌های مربوط به خستگی ۳۲۰
منابع و مراجع ۳۳۵

فصل پنجم/ کنترل شکست ۳۳۹
۵-۱ مقدمه ۳۴۱
۵-۲ انتخاب‌های موجود در کنترل شکست ۳۴۱
۵-۲-۱ بازرسی‌های دوره‌ای ۳۴۴
۵-۲-۲ ایمنی خرابی ۳۴۵
۵-۲-۳ دوام ۳۴۵
۵-۲-۴ آزمایش اثباتی ۳۴۶
۵-۳ اصول جلوگیری از توسعه‌ی ترک ۳۴۷
۵-۴ بازداشت ترک به‌صورت عملی ۳۵۳
منابع و مراجع ۳۵۶

فهرست راهنما ۳۵۷

واژه‌نامه ۳۶۳

فصل اول

مقدمه‌ای بر مکانیک شکست

۱–۱ مقدمه

از زمانی که سازه‌هایی به دست انسان ساخته شد و تحت بهره‌برداری قرار گرفت، جامعه‌ی بشری شاهد بروز حوادث گوناگونی در آن‌ها بوده است. شکست در این قبیل سازه‌ها ذهن بشر را درگیر مقوله‌ی جدیدی در زمان خود کرد که موضوع اصلی آن تحقیق در چگونگی خرابی و زوال بود. امروزه نیز باوجود رشد روزافزون فن‌آوری، همچنان ناشناخته‌های زیادی در این خصوص وجود داشته و موضوع مکانیک شکست موردتوجه محققین و دانشمندان بسیاری است.

۱–۲ تاریخچه‌ی مکانیک شکست

قبل از آنکه در خصوص تاریخچه‌ی توسعه‌ی علم مکانیک شکست بحثی مطرح شود بهتر است به این سؤال پاسخ داده شود که چرا سازه‌ها از بین می‌روند؟ دلیل خرابی سازه‌ها را می‌توان در دو دسته‌بندی ذیل مطرح نمود [۱]:

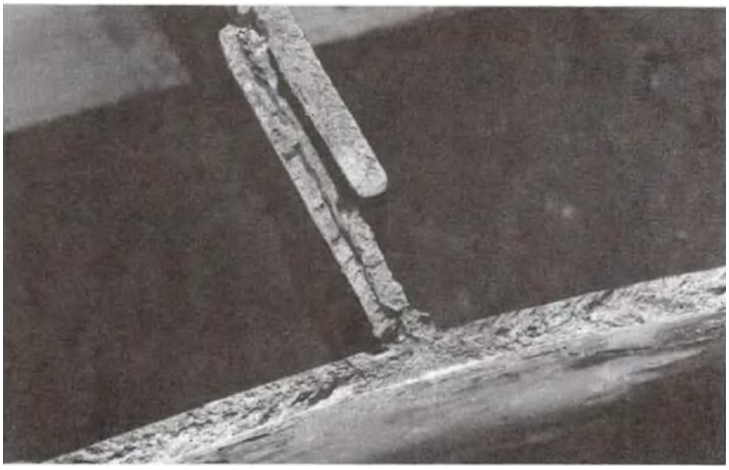
- سهل‌انگاری در طراحی، ساخت و یا بهره‌برداری.
- به کار بردن مواد و یا طراحی‌های نو که تولید نتایج پیش‌بینی‌نشده می‌کند.

در مورد موضوع اول، محدودسازی منابع خطا، بهبود طراحی با به‌کارگیری متخصصین ماهر و رعایت استانداردهای بهینه، از زوال و نابودی سازه جلوگیری خواهد نمود اما در خصوص موضوع دوم مسئله به این سادگی نخواهد بود. زمانی که یک ماده‌ی جدید یا یک‌روند جدید طراحی پیشنهاد می‌گردد، اگرچه می‌تواند محاسن بسیاری را به همراه داشته باشد اما اشکالات بالقوه‌ای نیز در آن محتمل خواهد بود؛ بنابراین قبل از آنکه چنین مطالعاتی به مرحله‌ی بهره‌برداری برسند آزمایش‌های گسترده‌ای بایستی بر روی آن‌ها انجام پذیرد. انجام این‌گونه آزمایش‌ها اگرچه تکرر خرابی‌ها را کاهش می‌دهد اما آن‌ها را متوقف نمی‌سازد چراکه در هر مطالعه‌ای ممکن است عامل‌های مهمی منظور نگردد.

یکی از معروف‌ترین خرابی‌های روی‌داده از انواع خرابی‌های نوع دوم، شکست ترد کشتی‌های لیبرتی[1] است. در طی جنگ جهانی دوم، به‌منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت ساخت، در اتصال قطعات بدنه‌ی کشتی‌های مذکور از جوش استفاده گردید، حال‌آنکه پیش از آن از پرچ به‌عنوان وسیله‌ی اتصال استفاده می‌شد. در هنگام بهره‌برداری، شکست‌های جدی در تعداد قابل‌توجهی از آن‌ها مشاهده گردید. در سال ۱۹۷۹ میلادی تانکر نفت کردستان[2]، زمانی که در

[1]. Liberty Ships
[2]. Kurdistan oil Tanker

اقیانوس اطلس شمالی شناور بود به دو قسمت مجزا تفکیک شد [۲]. ترکیب نفت گرم موجود در تانکر و آب‌های سرد در تماس با بدنه ایجاد تنش‌های جدی حرارتی کرده و شکست در قطعه‌ی تعادلی کشتی[1] که جوشکاری نامناسبی داشت شروع شد و علیرغم چقرمگی شکست بالای بدنه برای جلوگیری از شروع ترک، گسترش ترک متوقف نگردید. وقوع چنین حوادثی باعث انگیزش محققین در مطالعه‌ی علل حاکم گردید.



شکل ۱-۱ تصویر قسمتی از قطعه‌ی تعادلی تانکر کردستان که شکست از آن شروع شد [۱].

۱-۲-۱ مطالعات اولیه‌ی شکست

آزمایش‌های انجام‌گرفته توسط داوینچی قرن‌ها پیش، چراغی را در مسیر شناخت مکانیسم شکست روشن کرده بود. او مقاومت سیم‌های آهنی را اندازه‌گیری کرد و متوجه شد که مقاومت به‌دست‌آمده در تناسب معکوس با طول نمونه‌ی مورد آزمایش است. این نتیجه به‌صورت غیرمستقیم وجود نقایص بیشتر ذاتی را در نمونه‌ی بزرگ‌تر القا می‌نمود هرچند که این نتایج کیفی بود.

در سال ۱۹۲۰، گریفیس[2] رابطه‌ی کمی بین شکست و اندازه‌ی نقص ذاتی[3] را ارائه نمود [۳]. او تحلیل تنش سوراخ بیضوی را که هفت سال پیش از آن توسط اینگلیس[4] توسعه داده‌شده بود

1. Bilge Keel
2. Griffith
3. Flaw
4. Inglis