

مدوری پدر  
پاییده خستگ  
در مصالح و سازدهما

جلد اول

ترجمه و تالیف:

احد باقر زاده خلخالی

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

بهرام خیری انباردان

کارشناس ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک

آرمان دادوند

کارشناس ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک

## پیش گفتار

خستگی مصالح و سازه‌ها دامنه وسیعی از موضوعات مختلف را در بر می‌گیرد. هدف کتاب حاضر توضیح این مباحث، بیان کردن نحوه‌ی تحلیل آن‌ها و چگونگی کمک به طراحی سازه‌های مقاوم در برابر خستگی و جلوگیری از مشکلات خستگی سازه‌ای می‌باشد.

فصل اول، یک بررسی کلی از موضوع را با نظرات مختصر در مورد اهمیت جوانب موجود ارائه می‌دهد و به عنوان دستور کاری برای فصل‌های بعدی می‌باشد. مباحث اصلی در این کتاب بر مبنای پیش‌بینی خواص خستگی و طراحی در برابر خستگی است. این اهداف بدون درک فیزیکی و مکانیکی از همه شرایط مربوطه قابل تحقق نیست. فصل دوم این کتاب با مفاهیم اساسی در رابطه با آنچه در مصالح یک سازه تحت بارهای چرخشی اتفاق می‌افتد؛ آغاز می‌شود. همچنین تعداد زیادی از متغیرها را نشان می‌دهد که می‌توانند خصوصیات خستگی را تحت تأثیر قرار دهند و دانش اساسی برای فصل‌های بعدی را فراهم می‌کند.

در هر فصل یک مبحث در مورد یک موضوع خاص ارائه شده است. دیدگاه‌های اصلی در آخرین بخش از هر فصل خلاصه می‌شود. این بخش الزاماً نه به عنوان یک خلاصه، بلکه تنها به عنوان بخشی از مهمترین نکاتی که باید به خاطر سپرد، ارائه شده است. علی‌رغم درک کیفی خوب از پدیده خستگی در عناصر ساختاری، دقت کمی پیش‌بینی خواص خستگی را همچنان می‌توان محدود دانست. در نتیجه، مهم است که همه مسائل مربوط به خستگی به خوبی شناخته شده و درک شوند که این مهم یکی از اصلی‌ترین دلایل نوشتن کتاب فعلی بوده است. آگاهی از مکانیزم خستگی در مصالح و چگونگی تأثیر آن بر طیف گسترده‌ای از شرایط عملی از اهمیت بالایی برخوردار است، طراح یک سازه تحت بارگذاری دینامیکی باید "در مقابل خستگی" طراحی کند. این رویکرد نه تنها شامل مفهوم کلی سازه با جوانب ایمنی و اقتصادی مرتبط است، بلکه سوالات مربوط به طراحی

جزئیات، کیفیت سطح مواد و اتصالات را نیز شامل می شود. در عین حال، طراح باید سعی کند عملکرد خستگی یک سازه، محدودیت های خستگی، عمر خستگی تا زمان شروع ترک و عمر باقیمانده تحت شرایط رشد ترک تا شکست نهایی را پیش بینی کند. این رویکرد به دلیل محدودیت ها و کاستی های پیش بینی خواص خستگی نیاز به دانش عمیق از عوامل مختلف تأثیرگذار را دارد.

احد باقر زاده خلخالی

بهرام خیری انباردان

آرمان دادوند

اسفند ۱۳۹۹

فهرست

۸.....	فصل اول مقدمه‌ای بر خستگی مصالح و سازه‌ها.....	
۱۷.....	منابع.....	
۱۸.....	بخش اول خستگی تحت بارگذاری دامنه-ثابت .....	
۱۹.....	فصل دوم خستگی به عنوان پدیده‌ای در مصالح.....	
۲۰.....	۲.۱ مقدمه .....	
۲۱.....	۲.۲ دوره‌های گوناگون عمر خستگی .....	
۲۲.....	۲.۳ پیدایش ترک .....	
۲۶.....	۲.۴ رشد و گسترش ترک .....	
	۲.۵ جزئیات بیشتر در مورد مکانیزم خستگی	
۲۹.....	۲.۶ .....	
۳۱.....	۲.۵.۱ خصلت بلوری مصالح .....	
۳۴.....	۲.۵.۲ پیدایش ترک در نقاط ضعف.....	
	۲.۵.۳ ترک های کوچک، موانع در برابر گسترش ترک، آستانه ترک ها	
۳۹.....	.....	
۴۳.....	۲.۵.۴ تعداد هسته‌ی ترک .....	
۴۸.....	۲.۵.۵ اثرات سطح .....	
۵۲.....	۲.۵.۶ رشد ترک های ماکروسکوپی و شیارها .....	
۵۷.....	۲.۵.۷ اثرات محیطی .....	
۶۱.....	۲.۵.۸ تنش و پیچش دوره ای .....	
۶۴.....	۲.۷ ویژگی‌های شکست‌های خستگی .....	
۶۶.....	۲.۶.۱ شاخص‌های میکروسکوپی .....	
۶۷.....	۲.۶.۲ شاخص‌های ماکروسکوپی .....	

۷۳.....	مباحث اصلی فصل.....	۲.۸
۷۴.....	مراجع.....	
۷۸.....	<b>فصل سوم تمرکز تنش در شکافها</b> .....	
۷۹.....	۳.۱ مقدمه.....	
۸۰.....	۳.۲ تعریف $K_t$ .....	
۸۳.....	۳.۳ محاسبات تحلیلی تمرکز تنش.....	
۹۰.....	۳.۴ تاثیر هندسه ی شیارها بر $K_t$ .....	
۱۰۲.....	۳.۵ برخی از جنبه های دیگر تمرکز تنش.....	
۱۰۶.....	۳.۶ سوپر پوزیشن (تجمع) در روزنه ها.....	
۱۰۹.....	۳.۷ روش های تعیین تمرکز تنش.....	
۱۱۵.....	۳.۸ مباحث اصلی فصل.....	
۱۱۶.....	مراجع.....	
۱۱۸.....	<b>فصل چهارم تنش پسماند</b> .....	
۱۱۸.....	۴.۱ مقدمه.....	
۱۲۱.....	۴.۲ منابع گوناگون سیستم های تنش پسماند.....	
۱۲۹.....	۴.۳ اندازه گیری ها یا محاسبات تنش پسماند.....	
۱۳۱.....	۴.۴ تخمین تنش پسماند در یک روزنه پس از اعمال بار بزرگ.....	
۱۳۳.....	۴.۵ چگونگی حذف تنش پسماند.....	
۱۳۵.....	۴.۶ مباحث اصلی فصل.....	
۱۳۶.....	مراجع.....	
۱۳۸.....	<b>نمادها، کلمات اختصاری و واحدها</b> .....	



## فصل اول

### معرفی خستگی مصالح و سازه ها

شکست ناشی از خستگی از مشکلات نام آشنا در سازه های فلزی می باشد. با رجوع به اسناد گذشته مشاهده شد که اولین شکست های قابل توجه ناشی از خستگی در قرن ۱۹ میلادی ثبت گردید و به سرآغازی بر بررسی های آزمایشگاهی این پدیده مبدل شد. آگوست وولر<sup>۱</sup> تحقیقات ارزشمندی بر روی موضوع خستگی انجام داد. وی در این تحقیق دریافت که یک بارگزاری واحد با مقداری کمتر از ظرفیت باربری استاتیکی سازه هیچ آسیبی به آن وارد نمی کند. درحالی که اگر همان بار چندین بار تکرار شود می تواند باعث ایجاد شکست و گسیختگی کامل در سازه شود. در آن زمان خستگی پدیده ای ناشناخته و مبهم بود چراکه آثار آسیب های آن بر مصالح قابل مشاهده نبود و گسیختگی بدون هیچگونه هشدار و نشانه ای به وقوع می پیوست. اما در قرن بیستم ما به این موضوع پی بردیم که بارگزاری پی در پی باعث ایجاد یک مکانیزم خستگی در مصالح شده که ظهور ترک و گسترش آن و در نهایت گسیختگی را به همراه دارد. از گذشته تا کنون مهندسی سازه تحت تاثیر خرابی ماشین آلات، وسایل نقلیه، اتصالات جوشکاری، وسایل نقلیه هوایی و غیره در اثر گسیختگی های ناشی از خستگی قرار گرفته است و در طول تاریخ چنین گسیختگی ها و خرابی هایی باعث وقوع وقایع فاجعه آمیز همچون انفجار مخازن تحت فشار، تخریب در پل ها، یا گسیختگی کامل سازه های عظیم شده اند. تعداد وقایع ناشی از خستگی بسیار زیادند به طوری که تمامی آنها گاه به دلیل ابعاد نه چندان عظیم به شکل ویژه ای مورد توجه قرار نمی گیرند اما با وجود ابعاد کوچک زیان اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارند. تاریخ خستگی در یک مقاله ی جامع و گسترده

<sup>۱</sup> august wohler

که سال های ۱۸۳۷ تا ۱۹۹۴ میلادی را پوشش می داد توسط والتر شوتز<sup>۲</sup> گردآوری شد. مقالات مهمی توسط هانوینکل<sup>۳</sup> و زئر<sup>۴</sup> و سانفور<sup>۵</sup> جمع آوری شدند. جان من<sup>۶</sup> ۲۱۰۷۵ یادداشت کتبی را که موضوع خستگی را بررسی می کردند در قالب ۴ جلد کتاب جمع آوری و تدوین نمود. از آن زمان شمار انتشارات در زمینه ی موضوع خستگی به طور چشمگیری افزایش یافته به طوریکه پیشبینی می شود تعداد این انتشارات تا سال ۲۰۰۰ به ۱۰۰۰۰۰ عدد در سال برسد. در نتیجه ی تحقیقات گسترده و تجربیات عملی اطلاعات زیادی در خصوص خستگی سازه ها و مصالح جمع آوری گردید. همان طور که گفته شد از نظر کیفی دانش ما در مورد پدیده ی خستگی به شکل مطلوب در قرن بیستم شکل گرفت. بخش عمده ای از این دانش از طریق تحقیقات آزمایشگاهی بدست آمد، اگرچه از نقش بررسی های میدانی و تحقیق بر روی وقایع ناشی از خستگی نباید چشم پوشی نمود. گسیختگی ناشی از خستگی در حین بهره برداری بیشترین اطلاعات را در اختیار ما قرار می دهد. اغلب تحلیل گسیختگی و خرابی ها به ما نشان می دهند که نقاط ضعف مختلف باعث کاهش مقاومت در برابر پدیده ی خستگی می گردند.

به عنوان مثال با توجه به تصویر ۱-۱ می بینیم که چرخ جلوی یک موتور سیکلت سنگین درهم شکسته و ۱۰ عدد از پره های آن به کلی شکسته و جدا شده اند. حال این سوال پیش می آید که چرا عمر مفید این چرخ در مقابل پدیده ی خستگی کافی نبود؟ اولین سوالی که باید در مورد تحلیل یک گسیختگی مطرح شود آن است که این گسیختگی ناشی از ضعف در مواد سازنده است یا بصورت تصادفی رخ داده؟

اگر گسیختگی ناشی از ضعف ساختاری چرخ باشد می توان نتیجه گرفت تمام موتور سیکلت هایی که از این نوع چرخ استفاده می کنند در معرض خطر خواهند بود و باید

---

<sup>۲</sup> Walter schütz

<sup>۳</sup> Hanewhinkel

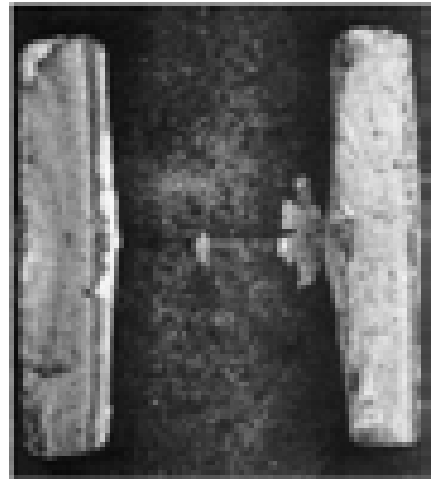
<sup>۴</sup> Zenner

<sup>۵</sup> sanfor

<sup>۶</sup> John mann



فورا در خصوص پیشگیری از تکرار چنین حادثه ای اقدام نمود، از سوی دیگر اگر فرض بر آن باشد که این رویداد امری تصادفی بوده و فقط برای یک موتور سیکلت خاص رخ داده باشد دلیل آن می تواند به عنوان مثال آسیب غیر عادی و گسترده در سطح خارجی مواد سازنده ی پره ها باشد. اما در خصوص این مورد خاص گسیختگی های مشابهی در چرخ ها در سراسر جهان و به ویژه در موتور سیکلت های مورد استفاده ی پلیس در هنگام استفاده ی ناگهانی از ترمز گزارش شده است.



تصویر a) شکستگی ناشی از خستگی (تصویر b) چرخ جلو پره های شکسته. جدایی محور.

تصویر ۱-۱) شکست چرخ جلوی یک موتور سیکلت در اثر پدیده ی خستگی

دو سوال رایج در خصوص گسیختگی ناشی از خستگی عبارتست از:

۱- آیا مقاومت مصالح در برابر خستگی بسیار پایین بوده است؟

۲- آیا مقدار تنش در محدوده ی گسیختگی بسیار بالا بوده است؟

البته سوالات فراوانی در این خصوص مطرح می شود، به عنوان مثال در مورد مثال موتور سیکلت این سوال وجود دارد که چه شرایط خاصی در طیف بارگذاری چرخ ها وجود دارد و اینکه آیا آیا دامنه ی بارگذاری خستگی چرخ توسط سازندگان مورد توجه قرار گرفته یا خیر، مواد تشکیل دهنده ی سطحی که ترک های ناشی از خستگی در آن ها پدیدار شد از چه کیفیتی برخوردار بودند.

پاسخ به هریک از سوالات فوق سرنخ‌ها و ایده‌هایی جدید جهت بهبود کیفیت و رفع نواقص در اختیار ما قرار می‌دهد.

سوال مهم دیگری که می‌توان مطرح نمود آن است که آیا قبل از آغاز تولید انبوه آیا آزمایشاتی در جهت ارزیابی عکس‌العمل چرخ در مقابل پدیده ی خستگی انجام شده است یا خیر؟ در جواب باید گفت خیر این آزمایشات بعد از گزارش خرابی‌ها و بروز مشکل انجام پذیرفت و البته گسیختگی و خرابی ناشی از پدیده ی خستگی در این آزمایشات مشهود بود.

یک سازه باید طوری طراحی و ساخته شود که خرابی ناشی از خستگی در مدت زمان طول عمر طراحی سازه به وقوع نپیوندد. بنابراین واضح است که ما با چالشی بنام "طراحی در برابر خستگی" رو به رو خواهیم بود. در بخش‌های بعدی در مورد انتخاب‌های گوناگونی که در اختیار طراح قرار می‌گیرد تا پاسخگوی نیازهای طرح در برابر چالش‌هایی نظیر عمر مفید کافی، ایمنی و صرفه‌ی اقتصادی طرح باشد صحبت خواهد شد. این انتخاب‌ها به فاکتورهای مختلفی اعم از طراحی محتاطانه‌تر و دقیق‌تر جزئیات، استفاده‌ی کمتر از مصالح حساس در برابر خستگی، افزایش کیفیت بهسازی سطحی مصالح، وجود گزینه‌های مختلف جهت استفاده در طراحی اتصالات و کاهش مقدار تنش طراحی بستگی دارند. همچنین فاکتورهایی نظیر طراحی در برابر آسیب‌ها، پیشبینی آسیب‌ها، تقلیل بارهای دینامیکی در حین بهره‌برداری نیز باید مورد توجه قرار گیرند. دامنه‌ی احتمالات به دلیل گستردگی عوامل موثر بر رفتار سازه تحت اثر خستگی بسیار وسیع است. از طرفی نحوه‌ی طراحی در برابر خستگی از نقطه نظر تعداد دفعات طراحی تا رسیدن به طرح مفید و موثر نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

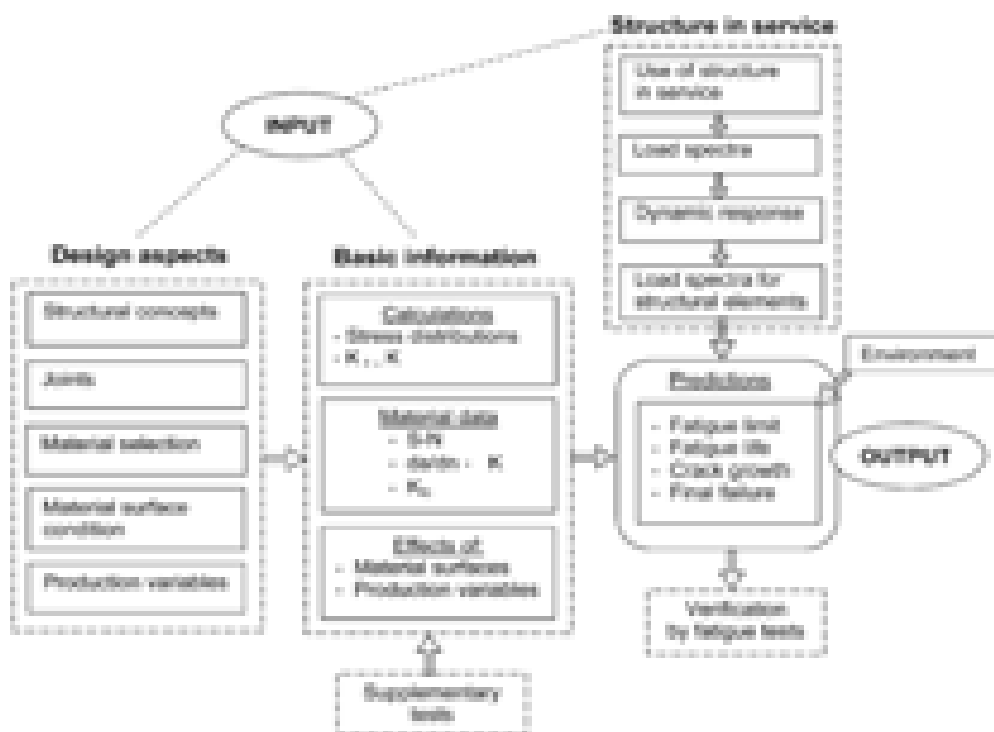
به‌طور معمول افراد شاغل در دفاتر طراحی صنایع مختلف برای پیشبینی مقاومت در برابر خستگی، طول عمر خستگی، رشد و گسترش ترک‌ها و قدرت مقابله با پدیده‌ی خستگی فرایندهای محاسباتی استاندارد را مورد استفاده قرار می‌دهند. این فرآیندها

قابل استفاده و مفید هستند اما باید در نظر داشت که این فرآیند ها با توجه به شرایط طراحی می توانند بیش از حد محتاطانه یا برعکس غیر محتاطانه باشند. این فرآیند ها تحت شرایط عمومی و معمول آغاز می شوند و به درک، تجربه و قضاوت مهندسی نیاز دارند تا دقت و اهمیت نتایج محاسبات قابل ارزیابی و ارزشگذاری بشوند. پیشبینی ها از نظر دقت و صحت دارای محدودیت هستند. در نتیجه برای رفع ابهامات در زمینه ی پیشبینی ها بهتر است آزمایشات مربوط به پدیده ی خستگی نیز در طی این فرآیند ها انجام پذیر هستند. برخی براین باور هستند که آزمایشات بر محاسبات نظری ارجحیت دارند. اما باید در نظر داشت که نتایج آزمایشات، به شرایط انجام آزمایش وابسته اند. اما باید به این موضوع توجه کرد که شرایط این آزمایشات تا چه حد به شرایط زمان بهره برداری شبیه اند و برای پاسخ به این سوال بار دیگر به درک، تجربه و قضاوت مهندسی نیاز خواهیم داشت. به عبارت دیگر طراحی در برابر خستگی چه با استفاده از تحلیل، چه با محاسبات و چه با آزمایشات صورت گرفته باشد در نهایت نیازمند تسلط کامل و دانش جامعی در زمینه ی پدیده ی خستگی و شرایط گوناگویی که بر این پدیده تاثیر گذارند دارد. و در نهایت هدف اصلی این کتاب ارائه ی دانش ابتدایی و در عین حال جامع در باره ی این پدیده است.

خلاصه ای از جنبه های مختلف فرآیند طراحی برای خستگی را در تصویر ۱-۲ می توان دید. ستون اول موضوعات اصلی در کار طراحی را شامل می شود. در ستون دوم دسته های گوناگونی از اطلاعات ابتدایی به چشم می خورد. این اطلاعات در جهت انتخاب مصالح، رسیدگی های مورد نیاز سطوح مصالح و همچنین برای جزئیات طراحی و اتصالات قابل استفاده اند. برای اینکه بتوان در مورد کیفیت یک سازه از نقطه نظر مقاومت در برابر خستگی قضاوت نمود پیشبینی هایی باید انجام داد و آن نیازمند اطلاعات مرتبط با بار های خستگی است. برای انجام تمام این امور باید گام هایی را پیمود که این گام ها را می توان در ستون سوم تصویر ۱-۲ مشاهده نمود. این ستون با

اطلاعاتی در مورد چگونگی استفاده از سازه در حین بهره برداری آغاز می شود. به این ترتیب می توان به طیف بار و در نتیجه به طیف تنش نقاط بحرانی از لحاظ خستگی در سازه دست یافت. همچنین در تصویر مشاهده می شود که گاه برای پوشش دادن نقاط ضعف پیشبینی ها به انجام آزمایشات مکمل بر روی یک موضوع خاص یا آزمایشات تایید کننده نیاز است.

یکی از موضوعات مهم در این زمینه پیشبینی تاثیرات زیست محیطی است. داده های آزمایشگاهی مورد استفاده در محاسبات و پیشبینی ها عموماً تحت تاثیر شرایط آزمایشگاهی هستند. اگر چه در عمل شرایط اتلاف نیرو ها در شرایط غیر آزمایشگاهی وجود دارد و تناوب نیرو ها بالطبع کمتر خواهد بود. به عنوان مثال، یک سازه ی جوشکاری شده برای حفاری در دریا را در نظر بگیرید. محیط حاوی آب شور بوده و تناوب بار های ناشی از امواج پایین است.



تصویر ۱-۲) جنبه های گوناگون فرایند طراحی برای مقابله با پدیده ی خستگی

## درباره ی محتوای این کتاب

موضوعات مورد بحث در تصویر ۱-۲ در بخش های گوناگون مورد بحث قرار گرفته اند، اما باید توجه داشت برخی سوالات که ممکن است از قلم افتاده باشند ، مانند: تاثیر شکاف یا بریدگی، تاثیر ابعاد، تنش پسماند، مقادیر خستگی، که در ادامه بررسی خواهند شد. این کتاب با بخشی که به مسائل ابتدایی و پایه می پردازد آغاز می گردد.

- خستگی از نقطه نظر پدیده ای واقع در مصالح (بخش ۲). دانش ابتدایی و شناخت کلی از مکانیسم خستگی برای شناخت فاکتورهای گوناگون تحت تاثیر این پدیده ضروری است.
- تمرکز تنش در سازه ها از دیدگاه خستگی از مهمترین مسائل در طراحی سازه ها است، توزیع تنش اطراف شکاف ها و فاکتور های تمرکز تنش ( $K_t$ ) در بخش سوم مورد بحث قرار می گیرد.
- تنش پسماند بر روی پدیده ی خستگی تاثیر به سزایی می گذارد. بخش خاصی برای بحث در مورد این تنش ها در نظر گرفته شده (بخش ۴).
- زمانی که ترک های خستگی تشکیل شوند، فاکتور شدت تنش ( $K$ ) پارامتر کنترل کننده ی شدت تنش توزیع شده در گوشه ی ترک و گسترش ترک خواهد بود. مفهوم شدت تنش در بخش پنجم مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.
- جزئیات و اطلاعات خستگی، شامل حدود خستگی، منحنی های  $S-N$ ، منحنی خستگی و همچنین گسترش ترک ها در بخش های شش تا هشت مورد بحث قرار خواهند گرفت. همچنین برخی مسائل مربوط به پیشبینی ها نیز بررسی می شوند.

در بخش های دو تا هشت جنبه های پایه و ابتدایی خستگی در مصالح مورد بررسی قرار می گیرد و فصل دوم به موضوع طیف بارگذاری و تغییرات مقادیر بارگذاری می پردازد. طیف بارهای خستگی در بخش نهم مورد بحث قرار می گیرد. این بخش با انواع بارهای موثر و تحلیل استاتیکی تاریخچه ی بارها و روش های آن آغاز می گردد. پیشبینی در مورد پدیده ی خستگی بدون در اختیار داشتن طیف بارگذاری امکان پذیر نیست. اگر طیف بارگذاری شامل بارهای با مقادیر مختلف باشد حل مسائل مربوط به پیشبینی نیاز به مدلسازی تجمع آسیب های ناشی از خستگی خواهیم داشت که این موضوع در بخش دهم بررسی خواهد شد و بخش یازدهم به رشد و گسترش ترک های ناشی از خستگی اختصاص می یابد.

فصل سوم به آزمایش خستگی و پراکندگی اطلاعات مربوط به این پدیده می پردازد. از نظر ابهامات مربوط به پیشبینی ها بررسی و تایید نتایج از طریق آزمون و آزمایش مطلوب تر است. آزمایشات خستگی برای جمع آوری اطلاعات در مورد مصالح و تحقیق در مورد موارد مختلف موثر بر روی خواص مواد مورد نیاز هستند. جنبه های گوناگون آزمون های خستگی در بخش سیزدهم بررسی شده اند. متأسفانه خواص و جزییات مربوط به پدیده ی خستگی پراکندگی زیادی دارند. اما باید توجه داشت که پراکندگی در رفتار خستگی در حین بهره برداری در سازه ها معمولاً به دلیل تفاوت شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی بوجود می آیند. مشکلات ناشی از این مسائل نیز در بخش دوازدهم بررسی می شوند.

شرایط گوناگونی که برای مسئله ی خستگی از اهمیت برخوردار هستند در فصل چهارم مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بهسازی های سطحی تاثیر بسزایی در ویژگی های مربوط به خستگی دارند و در مورد این موضوع در بخش چهاردهم صحبت خواهد شد. خوردگی سایشی از عواملی است که نقش کاهنده را در عمر مفید ایفا می کنند. این بحث، موضوع اصلی بخش پانزدهم است. اثرات محیطی از جمله اثر خوردگی بر عملکرد

خستگی در بخش شانزدهم بررسی شده است. در بخش هفدهم به طور خلاصه به اثر دمای بالا یا پایین اشاره شده است. البته لازم بذکر است که خستگی در دمای بالا از چهارچوب این کتاب خارج است چراکه این موضوع در حیطه ی چگونگی انتخاب مصالح و تولید و عمل آوری آنها قرار می گیرد و در بحث طراحی در برابر خستگی آنچنان جایگاهی ندارد.

موضوع خستگی در اتصالات و سازه ها در فصل پنجم قرار گرفته است. معمولا اتصالات و مفاصل سازه ها بحرانی ترین قسمت های سازه هستند. علاوه بر این اتصالات از انواع فراوانی برخوردار هستند. بخش هجدهم اتصالات گوناگون به استثنا اتصالات جوشی که در بخش نوزدهم بررسی می شوند را پوشش می دهد. در بخش بیستم در مورد مقابله با خستگی در سازه ها و چگونگی برخورد با این پدیده به عنوان یک مشکل در طراحی، همچنین از دیدگاه ابهامات، ایمنی و مباحث اقتصادی بحث و بررسی صورت گرفته است. نکات اصلی هر بخش به غیر از بخش اول در پایان آن به صورت نتیجه گیری قرار گرفته و این نتایج برای مرور کلی هر بخش مفیدند. همچنین منابعی که در هر بخش به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته در پایان هر بخش ضمیمه شده است. برخی از این منابع برای مطالعات بعدی در مورد موضوع هر بخش درج شده اند. این منابع به این منظور درج شده اند که نویسندگان برای انتشار کتاب از آنها کمک گرفته اما این مسئله به معنای درج تمامی منابع مرتبط نیست. به هر حال سالانه تعداد فراوانی از تالیفات منتشر می شوند و برای تحقیقات گسترده تر و عمیق تر باید به اطلاعات بیشتری دست یافت.

## مراجع

- ۱- Schijve, J., *Fatigue of Structures and Materials.*, Vol. ۶۲۶, Springer (۲۰۰۹).
- ۲- Schijve, J., *Fatigue of structure and materials in the ۲۰th century and the state of the art.*, Elsevier, vol. ۲۵, ۲۰۰۳, pp. ۶۷۹-۷۰۲.
- ۱- Schütz, W., *A history of fatigue. Engrg. Fracture Mech.*, Vol. ۵۴ (۱۹۹۶), pp. ۲۶۳-۳۰۰.
- ۲- Hanewinkel, D. and Zenner, H., *Fatigue strength. A facsimile collection of historical papers until ۱۹۵۰.* Technical University of Clausthal (۱۹۸۹) [historical papers in English and German].
- ۳- Sanford, R.J. (Ed.), *Selected Papers on Foundations of Linear Elastic Fracture Mechanics. SEM Classic papers, Vol. CP۱, SPIEMilestone Series, Vol. MS ۱۳۷* (۱۹۹۷).
- ۴- Mann, J.Y., *Bibliography on the Fatigue of Materials, Components and Structures, Vols. ۱ to ۴.* Pergamon Press, Oxford (۱۹۷۰, ۱۹۷۸, ۱۹۸۳ and ۱۹۹۰).
- ۵- Schijve, J., *Fatigue of structures and materials in the ۲۰th century and the state of the art.* *Int. J. Fatigue*, Vol. ۲۵, No. ۸ (۲۰۰۳), pp. ۶۷۹-۷۰۲.
- ۶- Heywood, R.B., *Designing against Fatigue.* Chapman and Hall, London (۱۹۶۲).
- ۷- Schijve, J., *Predictions on fatigue life and crack growth as an engineering problem. A state of the art survey.* *Fatigue ۹۶, Proc. ۶th International Fatigue Congress, Berlin, Vol. II*, G. Lütjering and H. Nowack (Eds.). Pergamon (۱۹۹۶), pp. ۱۱۴۹-۱۱۶۴.