

# خستگی فلزات در مهندسی

دکتر سید ابراهیم موسوی ترشیزی

پژوهشگاه نیرو

عنوان و نام پدید آورنده: خستگی فلزات در مهندسی / رالف ایوان استیونز... [و دیگران] ; مترجم: ابراهیم موسوی ترشیزی

مشخصات نشر: تهران: پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۹

مشخصات ظاهری: ۶۶۳ ص.: مصور، جدول، نمودار

شابک: ۹۵۰۰۰ ریال: 9-5304-04-964-978

وضعیت فهرست نویسی: فیا

یادداشت: عنوان اصلی: Metal fatigue in engineering, 2<sup>nd</sup> ed, c2001

در منابع کتابشناختی خارجی نام نویسندگان رالف ایوان استیونز، علی فاطمی، رابرت [آر استیونز، هنری اوتن فوکس ذکر شده است.

در ویراست قبلی هنری اوتن فوکس سرشناسه بوده است.

ویراست قبلی اثر اصلی تحت عنوان "خستگی فلز در مهندسی" با ترجمه اکبر خداپرست حقی، وحید متقی طلب توسط انتشارات

دانشگاه گیلان در سال ۱۳۷۸ منتشر شده است.

یادداشت: کتابنامه، نمایه

عنوان دیگر: خستگی فلز در مهندسی

موضوع: فلزها—خستگی

شناسه افزوده: استیونز، رالف ایوان

شناسه افزوده: Stephens, Ralph Ivan

شناسه افزوده: موسوی ترشیزی، ابراهیم، مترجم

شناسه افزوده: پژوهشگاه نیرو

رده بندی کنگره: ۶۲۰/۱۶۶ TA۴۶۰

رده بندی دیویی: ۶۲۰/۱۶۶

شماره کتابشناسی ملی: ۲۰۰۷۵۴۰



انتشارات پژوهشگاه نیرو

نام کتاب:

خستگی فلزات در مهندسی

مؤلف:

دکتر سید ابراهیم موسوی ترشیزی

ناشر:

پژوهشگاه نیرو

چاپخانه:

چاپ پردیس

شمارگان:

۱۰۰۰ جلد

نوبت چاپ:

اول / بهار ۱۳۸۹

قیمت:

۹۵۰۰۰ ریال

شابک:

۹۷۸-۹۶۴-۰۴-۵۳۰۴-۹

خواهشمند است جهت کسب اطلاعات بیشتر از مکان های توزیع کتاب با شماره تلفن ۸۸۰۴۳۸۱ دفتر روابط عمومی پژوهشگاه نیرو تماس حاصل فرمایید.

# فهرست

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| مقدمه مترجم .....                                 | ۱         |
| پیشگفتار مؤلفین .....                             | ۵         |
| <b>فصل اول : مقدمه و مرور تاریخی .....</b>        | <b>۱۱</b> |
| ۱-۱ انواع واماندگی مکانیکی .....                  | ۱۱        |
| ۲-۱ اهمیت در نظر گرفتن خستگی در طراحی .....       | ۱۵        |
| ۳-۱ نگاهی به تاریخچه خستگی .....                  | ۱۷        |
| ۴-۱ خلاصه .....                                   | ۲۵        |
| ۵-۱ باید ها و نبایدها در طراحی .....              | ۲۵        |
| مراجع .....                                       | ۲۶        |
| مسائل .....                                       | ۲۸        |
| <b>فصل دوم : روش های طراحی خستگی .....</b>        | <b>۳۱</b> |
| ۱-۲ شیوه های طراحی خستگی .....                    | ۳۱        |
| ۱-۱-۲ ابزار داخلی .....                           | ۳۵        |
| ۲-۱-۲ مدل جدید .....                              | ۳۵        |
| ۳-۱-۲ محصول جدید .....                            | ۳۶        |
| ۴-۱-۲ طراحی طبق کد .....                          | ۳۶        |
| ۲-۲ معیارهای طراحی خستگی .....                    | ۳۷        |
| ۱-۲-۲ طراحی بر اساس عمر نامحدود .....             | ۳۷        |
| ۲-۲-۲ طراحی برای یک عمر مطمئن .....               | ۳۷        |
| ۳-۲-۲ طراحی برای واماندگی ایمن .....              | ۳۹        |
| ۴-۲-۲ طراحی تحمل آسیب .....                       | ۳۹        |
| ۳-۲ تحلیل و تست .....                             | ۴۱        |
| ۴-۲ طراحی و قابلیت اطمینان احتمالاتی .....        | ۴۵        |
| ۵-۲ CAE و مدلسازی دیجیتال .....                   | ۴۵        |
| ۶-۲ بازرسی حین کار و جمع آوری تجربیات مرتبط ..... | ۴۶        |
| ۷-۲ خلاصه .....                                   | ۴۷        |
| ۸-۲ باید ها و نبایدها در طراحی .....              | ۴۸        |

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| ۴۹.....  | مراجع                                                    |
| ۴۹.....  | مسائل                                                    |
| ۵۳.....  | فصل سوم: جنبه های ریزساختاری و ظاهری در خستگی            |
| ۵۴.....  | ۱-۳ سطوح شکست خستگی و مشخصه های ماکروسکوپی آن            |
| ۶۶.....  | ۲-۳ مکانیزم خستگی و جنبه های میکروسکوپی                  |
| ۸۳.....  | ۳-۳ خلاصه                                                |
| ۸۴.....  | ۴-۳ بایدها و نبایدها در طراحی                            |
| ۸۵.....  | مراجع                                                    |
| ۸۶.....  | مسائل                                                    |
| ۸۹.....  | فصل چهارم: آزمایش های خستگی و دیدگاه تنش-عمر ( $S - N$ ) |
| ۸۹.....  | ۱-۴ بارگذاری خستگی، دستگاه های آزمایش و نمونه ها         |
| ۸۹.....  | ۱-۱-۴ بارگذاری خستگی                                     |
| ۹۳.....  | ۲-۱-۴ دستگاه های تست خستگی                               |
| ۹۷.....  | ۳-۱-۴ نمونه های آزمون خستگی                              |
| ۱۰۰..... | ۲-۴ منحنی های تنش - عمر ( $S - N$ )                      |
| ۱۰۰..... | ۱-۲-۴ رفتار عمومی $S - N$                                |
| ۱۰۳..... | ۲-۲-۴ حد خستگی تحت تنش تک محوری کاملاً معکوس             |
| ۱۰۸..... | ۳-۴ اثرات تنش متوسط بر رفتار $S - N$                     |
| ۱۱۳..... | ۴-۴ عوامل مؤثر در رفتار $S - N$                          |
| ۱۱۴..... | ۱-۴-۴ ریز ساختارها                                       |
| ۱۱۶..... | ۲-۴-۴ اثرات اندازه                                       |
| ۱۱۷..... | ۳-۴-۴ پرداخت سطح                                         |
| ۱۱۸..... | ۴-۴-۴ فرکانس                                             |
| ۱۲۰..... | ۵-۴ معرفی منحنی $S - N$ و تقریبات آن                     |
| ۱۲۵..... | ۶-۴ مثالی از تخمین عمر با استفاده از دیدگاه $S - N$      |
| ۱۲۷..... | ۷-۴ خلاصه                                                |
| ۱۲۹..... | ۸-۴ بایدها و نبایدها در طراحی                            |
| ۱۳۰..... | مراجع                                                    |
| ۱۳۱..... | مسائل                                                    |
| ۱۳۵..... | فصل پنجم: تغییر شکل چرخه ای و دیدگاه کرنش-عمر            |

|       |                                                        |     |
|-------|--------------------------------------------------------|-----|
| ۱-۵   | تست کشش یکنواخت و رفتار تنش-کرنش                       | ۱۳۵ |
| ۲-۵   | روش های تست با کرنش کنترل شده                          | ۱۴۲ |
| ۳-۵   | تغییر شکل چرخه ای مواد و رفتار تنش-کرنش چرخه ای        | ۱۴۴ |
| ۴-۵   | تخمین عمر با روش مبتنی بر کرنش $(\epsilon - N)$        | ۱۵۳ |
| ۵-۵   | تعیین خصوصیات خستگی کرنش-عمر                           | ۱۶۱ |
| ۶-۵   | اثرات تنش متوسط                                        | ۱۶۴ |
| ۷-۵   | پرداخت سطح و دیگر پارامترهای مؤثر بر رفتار کرنش-عمر    | ۱۶۷ |
| ۸-۵   | خلاصه                                                  | ۱۶۹ |
| ۹-۵   | بایدها و نبایدها در طراحی                              | ۱۷۰ |
|       | مراجع                                                  | ۱۷۱ |
|       | مسائل                                                  | ۱۷۳ |
| ۱۷۷   | فصل ششم: مبانی LEFM و کاربردهای آن در رشد ترک خستگی    |     |
| ۱-۶   | مفاهیم LEFM                                            | ۱۷۹ |
| ۱-۱-۶ | مودهای بارگذاری                                        | ۱۷۹ |
| ۲-۱-۶ | ضریب شدت تنش، $K$                                      | ۱۸۱ |
| ۳-۱-۶ | روابط مختلف $K$ برای عضوهای ترک دار رایج               | ۱۸۳ |
| ۴-۱-۶ | برهم نهی برای بارگذاری ترکیبی مودا                     | ۱۹۱ |
| ۲-۶   | ناحیه پلاستیک نوک ترک                                  | ۱۹۱ |
| ۳-۶   | چقرمگی شکست، $K_{IC}$ و $K_{IC}$                       | ۱۹۶ |
| ۴-۶   | رشد ترک خستگی، $da/dN - \Delta K$                      | ۲۰۵ |
| ۱-۴-۶ | منحنی $S$ شکل $da/dN - \Delta K$                       | ۲۰۷ |
| ۲-۴-۶ | روش های تست رشد ترک خستگی در بارگذاری با دامنه ثابت    | ۲۱۰ |
| ۳-۴-۶ | $da/dN - \Delta K$ برای $R = 0$                        | ۲۱۲ |
| ۴-۴-۶ | مثالی از انتگرال گیری عمر رشد ترک بدون اثرات تنش متوسط | ۲۱۹ |
| ۵-۶   | اثرات تنش متوسط                                        | ۲۲۴ |
| ۶-۶   | اندازه ناحیه پلاستیک تناوبی                            | ۲۳۱ |
| ۷-۶   | بسته شدن ترک                                           | ۲۳۴ |
| ۸-۶   | ترک های کوچک خستگی و محدودیت های LEFM                  | ۲۳۹ |
| ۹-۶   | گسترش پلاستیسه LEFM و مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک      | ۲۴۷ |
| ۱۰-۶  | خلاصه                                                  | ۲۵۳ |

|       |                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----|
| ۶-۱۱  | بایدها و نبایدها در طراحی                                   | ۲۵۵ |
|       | مراجع                                                       | ۲۵۶ |
|       | مسائل                                                       | ۲۶۱ |
|       | <b>فصل هفتم: شیارها و اثرات آن‌ها</b>                       | ۲۶۹ |
| ۷-۱   | تمرکز و گرا دیان تنش و کرنش                                 | ۲۷۰ |
| ۷-۲   | دیدگاه $S - N$ برای قطعات شیاردار                           | ۲۸۱ |
| ۷-۲-۱ | حسابت شیار و ضریب شیار خستگی، $K_f$                         | ۲۸۱ |
| ۷-۲-۲ | اثرات میزان تنش بر ضریب شیار                                | ۲۸۵ |
| ۷-۲-۳ | اثرات تنش متوسط و دیاگرام Haigh                             | ۲۸۸ |
| ۷-۲-۴ | نمونه‌ای از تخمین عمر با استفاده از دیدگاه $S - N$          | ۲۹۵ |
| ۷-۳   | تحلیل کرنش در شیار و دیدگاه کرنش-عمر                        | ۳۰۱ |
| ۷-۳-۱ | تنش‌ها و کرنش‌های شیار                                      | ۳۰۱ |
| ۷-۳-۲ | رابطه نویر                                                  | ۳۰۵ |
| ۷-۳-۳ | چگالی انرژی کرنشی یا رابطه گلینکا                           | ۳۰۸ |
| ۷-۳-۴ | تنش صفحه‌ای در مقابل کرنش صفحه‌ای                           | ۳۱۰ |
| ۷-۳-۵ | مثالی از تخمین عمر با استفاده از دیدگاه کرنش-عمر            | ۳۱۲ |
| ۷-۴   | کاربرد دیدگاه مکانیزم شکست بر رشد ترک در شیارها             | ۳۲۲ |
| ۷-۵   | دیدگاه دو مرحله‌ای در برآورد عمر خستگی                      | ۳۲۹ |
| ۷-۶   | خلاصه                                                       | ۳۳۴ |
| ۷-۷   | بایدها و نبایدها در طراحی                                   | ۳۳۷ |
|       | مراجع                                                       | ۳۳۸ |
|       | مسائل                                                       | ۳۴۰ |
|       | <b>فصل هشتم: تنش‌های پسماند و اثرات آن بر استحکام خستگی</b> | ۳۴۷ |
| ۸-۱   | مثال‌ها                                                     | ۳۴۷ |
| ۸-۲   | تولید تنش‌های پسماند و استحکام خستگی                        | ۳۵۰ |
| ۸-۲-۱ | روش‌های مکانیکی                                             | ۳۵۰ |
| ۸-۲-۲ | روش‌های حرارتی                                              | ۳۶۰ |
| ۸-۲-۳ | روش‌های کاری                                                | ۳۶۳ |
| ۸-۲-۴ | ماشین‌کاری                                                  | ۳۶۶ |
| ۸-۳   | آزادسازی تنش‌های پسماند                                     | ۳۶۸ |

|       |                                                                  |     |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----|
| ۴-۸   | اندازه‌گیری تنش‌های پسماند                                       | ۳۷۱ |
| ۵-۸   | ضرایب شدت تنش برای تنش‌های پسماند                                | ۳۷۳ |
| ۶-۸   | خلاصه                                                            | ۳۷۸ |
| ۷-۸   | بایدها و نبایدها در طراحی                                        | ۳۸۰ |
|       | مراجع                                                            | ۳۸۱ |
|       | مسائل                                                            | ۳۸۲ |
| ۳۸۷   | <b>فصل نهم: خستگی بر اثر بارگذاری با دامنه متغیر</b>             | ۳۸۷ |
| ۱-۹   | بارهای طیفی و آسیب انباشته                                       | ۳۸۷ |
| ۲-۹   | تعیین کمی آسیب و مفاهیم کسر آسیب و آسیب انباشته                  | ۳۹۲ |
| ۳-۹   | تنوری‌های آسیب انباشته                                           | ۳۹۳ |
| ۱-۳-۹ | قانون آسیب خطی پالمگرن-مایر                                      | ۳۹۳ |
| ۲-۳-۹ | تنوری‌های آسیب غیر خطی                                           | ۳۹۵ |
| ۴-۹   | اندرکنش بار و اثرات توالی                                        | ۳۹۷ |
| ۵-۹   | روش‌های شمارش چرخه                                               | ۴۰۲ |
| ۱-۵-۹ | روش جریان باران                                                  | ۴۰۴ |
| ۲-۵-۹ | روش‌های دیگر شمارش چرخه‌ها                                       | ۴۱۰ |
| ۶-۹   | تخمین عمر به کمک دیدگاه تنش-عمر                                  | ۴۱۷ |
| ۷-۹   | تخمین عمر از دیدگاه کرنش-عمر                                     | ۴۲۳ |
| ۸-۹   | رشد ترک و مدل‌های تخمین عمر                                      | ۴۲۹ |
| ۹-۹   | شبیه‌سازی تاریخچه‌های کاری در آزمایشگاه و نمونه‌سازی دیجیتال     | ۴۴۲ |
| ۱-۹-۹ | روش‌های تست آزمایشگاهی                                           | ۴۴۲ |
| ۲-۹-۹ | نمونه‌سازی دیجیتال                                               | ۴۴۵ |
|       | خلاصه                                                            | ۴۴۷ |
|       | بایدها و نبایدها در طراحی                                        | ۴۴۹ |
|       | مراجع                                                            | ۴۵۰ |
|       | مسائل                                                            | ۴۵۲ |
| ۴۵۷   | <b>فصل دهم: تنش‌های چند محوری</b>                                | ۴۵۷ |
| ۱-۱۰  | حالت‌های تنش و کرنش و بارگذاری متناسب در مقابل بارگذاری نامتناسب | ۴۵۸ |
| ۲-۱۰  | تسلیم و پلاستیسیته در خستگی چند محوری                            | ۴۶۲ |
| ۳-۱۰  | معیارهای براساس تنش                                              | ۴۶۴ |

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۴۶۴ | ۱۰-۳-۱ روش‌های تنش معادل                                   |
| ۴۶۸ | ۱۰-۳-۲ روش ساینز                                           |
| ۴۶۹ | ۱۰-۳-۳ مثال‌های کاربرد روش عمر - تنش                       |
| ۴۷۲ | ۱۰-۴-۱ روش‌های مبتنی بر کرنش، مبتنی بر انرژی و صفحه بحرانی |
| ۴۷۲ | ۱۰-۴-۱ روش‌های مبتنی بر کرنش و مبتنی بر انرژی              |
| ۴۷۴ | ۱۰-۴-۲ روش‌های صفحه بحرانی و مدل فاطمی - سوسی              |
| ۴۷۹ | ۱۰-۴-۳ نمونه‌ای از بارگذاری نامتناسب                       |
| ۴۸۵ | ۱۰-۵ مدل‌های مکانیک شکست برای رشد ترک خستگی                |
| ۴۸۷ | ۱۰-۶ اثرات شیار و بارگذاری با دامنه متغیر                  |
| ۴۸۹ | ۱۰-۷ خلاصه                                                 |
| ۴۹۱ | ۱۰-۸ باید‌ها و نباید‌ها در طراحی                           |
| ۴۹۲ | مراجع                                                      |
| ۴۹۳ | مسائل                                                      |
| ۴۹۷ | <b>فصل یازدهم: اثرات محیط</b>                              |
| ۴۹۸ | ۱۱-۱ خستگی خوردگی                                          |
| ۴۹۹ | ۱۱-۱-۱ ترک در اثر خوردگی / اثر عوامل محیطی                 |
| ۵۰۱ | ۱۱-۱-۲ رفتار تنش - عمر $(S - N)$                           |
| ۵۰۶ | ۱۱-۱-۳ رفتار کرنش - عمر $(\epsilon - N)$                   |
| ۵۰۹ | ۱۱-۱-۴ رفتار رشد ترک خستگی $da/dN - \Delta K$              |
| ۵۱۱ | ۱۱-۱-۵ محافظت در برابر خستگی خوردگی                        |
| ۵۱۴ | ۱۱-۱-۶ تخمین عمر خستگی خوردگی                              |
| ۵۱۵ | ۱۱-۱-۷ خلاصه                                               |
| ۵۱۶ | ۱۱-۱-۸ باید‌ها و نباید‌ها در طراحی                         |
| ۵۱۶ | ۱۱-۲ خستگی سایشی                                           |
| ۵۱۹ | ۱۱-۲-۱ مکانیزم‌های خستگی سایشی                             |
| ۵۲۴ | ۱۱-۲-۲ اثر متغیرها                                         |
| ۵۲۶ | ۱۱-۲-۳ خلاصه                                               |
| ۵۲۷ | ۱۱-۲-۴ باید‌ها و نباید‌ها در طراحی                         |
| ۵۲۷ | ۱۱-۳ خستگی دما پایین                                       |
| ۵۲۸ | ۱۱-۳-۱ رفتار یکنواخت در دماهای پایین                       |

- ۵۲۹ ..... ۱۱-۳-۲ رفتار تنش - عمر ( $S - N$ )
- ۵۳۱ ..... ۱۱-۳-۳ رفتار کرنش - عمر ( $\epsilon - N$ )
- ۵۳۴ ..... ۱۱-۳-۴ رفتار رشد ترک خستگی ( $da/dN - \Delta K$ )
- ۵۳۸ ..... ۱۱-۳-۵ رفتار دامنه متغیر و تخمین عمر خستگی
- ۵۴۰ ..... ۱۱-۳-۶ خلاصه
- ۵۴۱ ..... ۱۱-۳-۷ باید ها و نبایدها در طراحی
- ۵۴۱ ..... ۱۱-۴-۴ خستگی دما- بالا
- ۵۴۳ ..... ۱۱-۴-۱ تغییر شکل خزشی
- ۵۴۵ ..... ۱۱-۴-۲ رفتار تنش-کرنش تحت بارگذاری چرخه‌ای و زمان‌های توقف
- ۵۴۶ ..... ۱۱-۴-۳ رفتار تنش-عمر ( $S - N$ )/خزش
- ۵۵۱ ..... ۱۱-۴-۴ رفتار کرنش-عمر ( $\epsilon - N$ )
- ۵۵۹ ..... ۱۱-۴-۵ رفتار رشد ترک خستگی ( $da/dN - \Delta K$ )
- ۵۶۶ ..... ۱۱-۴-۶ خلاصه
- ۵۶۷ ..... ۱۱-۴-۷ باید ها و نبایدها در طراحی
- ۵۶۷ ..... ۱۱-۵ تابش نوترونی
- ۵۷۱ ..... مراجع
- ۵۷۶ ..... مسائل
- ۵۷۹ ..... فصل دوازدهم: خستگی قطعات جوش خورده
- ۵۸۰ ..... ۱۲-۱ نامگذاری قطعات جوش خورده و ناپیوستگی‌ها
- ۵۸۶ ..... ۱۲-۲ رفتار خستگی قطعات جوش خورده با دامنه ثابت
- ۵۸۶ ..... ۱۲-۲-۱ رفتار تنش - عمر ( $S - N$ )
- ۵۸۹ ..... ۱۲-۲-۲ رفتار کرنش - عمر ( $\epsilon - N$ )
- ۵۹۳ ..... ۱۲-۲-۳ رفتار رشد ترک ( $da/dN - \Delta K$ )
- ۵۹۳ ..... ۱۲-۲-۴ خال جوش‌ها
- ۵۹۴ ..... ۱۲-۳ افزایش مقاومت خستگی قطعه جوش خورده
- ۵۹۷ ..... ۱۲-۴ تخمین عمر خستگی قطعه جوش خورده
- ۵۹۷ ..... ۱۲-۴-۱ مدل‌های کلی عمر خستگی قطعه جوش خورده
- ۶۰۰ ..... ۱۲-۴-۲ کدها و استانداردهای طراحی خستگی قطعه جوش خورده
- ۶۱۰ ..... ۱۲-۵ خلاصه
- ۶۱۲ ..... ۱۲-۶ باید ها و نبایدها در طراحی

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۶۱۲ | ..... مراجع                                      |
| ۶۱۴ | ..... مسائل                                      |
| ۶۱۷ | ..... فصل سیزدهم: جنبه های آماری خستگی           |
| ۶۱۸ | ..... ۱-۱۳ تعاریف و تعیین پراکندگی داده ها       |
| ۶۱۹ | ..... ۲-۱۳ توزیع های احتمال                      |
| ۶۲۰ | ..... ۱-۲-۱۳ توزیع های نرمال و نرمال لگاریتمی    |
| ۶۲۴ | ..... ۲-۲-۱۳ توزیع های ویبول                     |
| ۶۲۶ | ..... ۳-۲-۱۳ تخمین احتمالات پایین و اماندگی      |
| ۶۲۹ | ..... ۳-۱۳ حدود تفرانس                           |
| ۶۳۲ | ..... ۴-۱۳ تحلیل برگشت داده های خستگی            |
| ۶۳۳ | ..... ۵-۱۳ تحلیل قابلیت اطمینان                  |
| ۶۳۴ | ..... ۶-۱۳ مسأله نمونه با استفاده از توزیع ویبول |
| ۶۳۷ | ..... ۷-۱۳ خلاصه                                 |
| ۶۳۷ | ..... ۸-۱۳ باید ها و نباید ها در طراحی           |
| ۶۳۸ | ..... مراجع                                      |
| ۶۳۹ | ..... مسائل                                      |
| ۶۴۳ | ..... پیوست                                      |
| ۶۵۳ | ..... واژه نامه                                  |
| ۶۶۱ | ..... اعلام                                      |

## مقدمه مترجم:

سالیان درازی است که به دلایل مختلف با بحث خستگی فلزات آشنا و درگیر شده‌ام، و گرچه سابقه آن به دوران تحصیل در مقاطع مختلف برمی‌گردد ولی اهمیت آن و خسارت‌های ناشی از توجه نکردن به آن را در صنعت و تحلیل خرابی قطعات مختلف صنعتی با تمام وجودم احساس کردم. علاوه بر آن موضوع خستگی فلزات را در دوره‌های کارشناسی (به صورت فشرده)، کارشناسی ارشد (به صورت کامل‌تر و بنیادی‌تر) و در دوره‌های تخصصی کوتاه مدت کارشناسان صنعت برق کشور با دیدگاهی کاربردی بیش از ده سال و مکرراً با استفاده از منابع مختلف آموزشی ارائه نموده‌ام. ولی چهار سال است که کتاب حاضر را به عنوان متن اصلی انتخاب و به دانشجویان توصیه می‌کنم. زیرا این کتاب را به دلیل ویژگی‌های زیر کامل‌تر و جامع‌تر دیده‌ام و شاید به دلیل همین ویژگی‌هاست که در دوره‌ی کارشناسی ارشد مکانیک چند دانشگاه دیگر نیز تدریس می‌شود:

۱- کتاب به صورت متن آموزشی تهیه شده است و مطالب با ترتیب منطقی و با رعایت اصل پیش‌نیازی، ارائه شده‌اند. وجود مسائل در انتهای هر فصل از ویژگی‌های کتاب حاضر است زیرا در کتاب‌های تخصصی در این سطح به ندرت مسائل مرتبط با هر فصل طراحی و ارائه می‌شود.

۲- کتاب جامع است و از تعاریف اولیه، مبانی تئوری، کاربردها و عوامل مکانیکی و محیطی مؤثر بر خستگی را به نحو بسیار مطلوبی در بر گرفته است.

۳- علاوه بر ارائه کلیه مبانی تئوری و علمی، مؤلفین از جنبه‌های کاربردی غفلت نکرده‌اند و از این رو برای مهندسان طراح به سهولت قابل استفاده است.

۴- بیان کتاب نسبتاً ساده و روان است و علیرغم پیچیدگی نسبی موضوع و وجود مبانی ریاضی و تئوریک، مؤلفین محترم بر سادگی بیان اهتمام ورزیده‌اند.

۵- گرچه مطالب کتاب و ترتیب فصول آن دارای پیوستگی منطقی است ولی این نکته در آن با ظرافت رعایت شده است که هر فصل را بر حسب نیاز به طور مستقل می‌توان مطالعه کرده و از آن بهره برد.

ویرایش و چاپ اول این کتاب در سال ۱۹۸۰ توسط مؤلفین ارائه شده است و به دلیل جامع بودن مطالب آن به مدت بیست سال به عنوان مرجع درسی در دنیا به فروش رسیده است و در

ایران نیز توسط آقایان دکتر اکبر خداپرست حقی و مهندس وحید متقی طلب با دقت و صداقت ترجمه شده و انتشارات دانشگاه گیلان آن را در سال ۱۳۷۸ منتشر نموده است. کتابی که پیش رو دارید ترجمه ویرایش دوم کتاب است که در سال ۲۰۰۱ عرضه شده و علاوه بر تغییرات اساسی در فصول، به مطالب کتاب نیز بیش از ۵۰٪ اضافه شده است که مؤلفین در پیشگفتار به خوبی به آن‌ها اشاره کرده‌اند که از آن جمله به وجود خلاصه، بایدها و نبایدهای طراحی و تمرین های مهندسی در انتهای هر فصل می‌توان اشاره کرد. از این رو خوانندگان محترم را به مطالعه پیشگفتار مؤلفین که در ادامه آمده است توصیه می‌نمایم.

سعی شده است در ترجمه کتاب، صداقت در ترجمه به جد رعایت شود. از این رو کلماتی که در فارسی معادلی نداشت و یا معادل واحدی نداشت و هنگام استفاده خواننده را با ابهام رو به رو می‌کرد، اصل لاتین آن در زیرنویس اضافه شده است.

دوستان بزرگواری بر من منت نهاده و هر کدام بخشی از کتاب و یا همه آن را ویرایش نموده و با اصل آن مطابقت داده‌اند تا از صحت ترجمه اطمینان حاصل شود و از این رو بر خود فرض می‌دانم که از همکاری همه آن‌ها صمیمانه سپاسگزاری نمایم در این میان دوستان و دانشجویان زیر نقش چشم گیرتری داشته‌اند:

۱- آقای مهندس بهمن قشمی

۲- آقای مهندس عزیز محمد قرنچیک

۳- آقای مهندس مجتبی احمدی

که در صورت نبود همکاری و دقت نظر این عزیزان، شاید هیچ‌گاه قادر به ارائه این کتاب نمی‌شدم. و در نهایت خانم سمیرا محمدعلی، با حوصله و دقت تمام زحمت ویراستاری ادبی کتاب را بر عهده داشته‌اند که دقت نظر ایشان شایان تقدیر است.

با توجه به اینکه به دلیل مشغله فراوان کاری، عملاً تمام کار این کتاب در منزل و روزهای تعطیل انجام شده است. جا دارد از صبر و حوصله افراد خانواده و به ویژه همسر که در انجام این کار مدداری نموده‌اند و هم چنین از فرزندم سید ابوالفضل موسوی ترشیزی که یک دور ویرایش فنی کتاب و مقابله کامل ترجمه و اصل را با دقت و حوصله انجام داده است، سپاسگزاری می‌نمایم.

این کار مدارا نموده‌اند و هم چنین از فرزندم سید ابوالفضل موسوی ترشیزی که یک دور ویرایش فنی کتاب و مقابله کامل ترجمه و اصل را با دقت و حوصله انجام داده است، سپاسگزاری می‌نمایم.

علیرغم چند بار بازخوانی ترجمه و مطابقت آن با اصل کتاب توسط اینجانب و همکاران و دوستان، باز هم وجود خطا در آن محتمل است، از این رو از تمامی اساتید محترم دانشگاه، دانشجویان گرامی و خوانندگان عزیز مجدانه تقاضا می‌شود ما را از نظرات اصلاحی خود محروم نفرمایند تا در صورت تجدید چاپ، مورد استفاده قرار گیرد.

**سید ابراهیم موسوی ترشیزی**

**خرداد ماه ۱۳۸۹**

## پیشگفتار مؤلفین

ویرایش دوم «خستگی فلزات در مهندسی»، مشابه ویرایش اول برای مهندسین طراح و دانشجویان مهندسی در گرایش های طراحی، توسعه، و تحلیل واماندگی قطعات، سازه ها، تجهیزات در معرض بارهای تکراری، و هم چنین برای افرادی که در مورد پایداری/عمر خستگی تحقیق و بررسی می کنند، نوشته شده است. این کتاب به عنوان یک کتاب درسی برای یک نیمسال دوره کارشناسی ارشد یا دوره کارشناسی در مکانیک، ساختمان، کشاورزی، هوافضا، مهندسی مکانیک، یا مهندسی مواد و برای دوره های کوتاه مدت در این موضوع قابل استفاده است. این کتاب هم چنین برای مهندسین شاغل نیز قابل استفاده می باشد. موضوعات مطرح شده، برای محدوده وسیعی از سازه ها و ماشین هایی از قبیل اتومبیل ها، وسیله های فضایی، پل ها، تراکتورها، بیوایمپلانت ها<sup>۱</sup> و مخازن تحت فشار هسته ای بکار می روند. پیش نیاز اصلی برای استفاده مؤثر از این کتاب، داشتن آگاهی از مکانیک مواد و علم مواد می باشد. تمرکز ویرایش دوم، مانند ویرایش اول، در طراحی مهندسی به منظور دستیابی به ایمنی، قابلیت اعتماد، و تولیدات اقتصادی می باشد. اطلاعات مورد نیاز روش های مختلف طراحی خستگی به منظور توانایی خوانندگان در بررسی مدل ها و فرآیندهای پیشنهادی ارایه شده است. عمدتاً موضوعات جالب برای محققان، که تاکنون کاربردی در طراحی خستگی واقعی پیدا نکرده اند، حذف شده اند. روش های ارایه شده، به طور موفقیت آمیزی در طراحی خستگی و تخمین/پیش بینی عمر مورد استفاده قرار می گیرند.

از زمان چاپ ویرایش اول بیست سال گذشته است. که این به علت فوت ناگهانی پروفیسور فوجس<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۹ می باشد، که مصادف با زمانی بود که، تلاش برای نوشتن ویرایش دوم شروع شده بود. در بهار سال ۱۹۹۸، ما دوباره تصمیم به شروع ویرایش دوم این کتاب با دو مؤلف جدید گرفتیم. وایلی ایترساینس<sup>۳</sup> با این تصمیم کاملاً موافق بود، چون چاپ اول کتاب خیلی موفق بود و تقریباً پس از گذشت ۲۰ سال از چاپ آن، هنوز هم به فروش

---

1- Bioimplants

2- Professor Fuchs

3- Wiley Interscience

می رفت. ویرایش اول به زبان چینی نیز ترجمه شده بود. ویرایش دوم به علت مطالب اضافی بیشتر و متن به روز شده، شکل ها، مسائل نمونه حل شده و حل نشده، خلاصه های فصل، بایدها و نبایدها در طراحی و مراجع، نسبت به ویرایش اول ۵۰ درصد بیشتر است. حل المسائل ویرایش دوم، برای اساتید دانشگاهی که از این کتاب استفاده می کنند، هم چنین قابل دسترس می باشد.

موضوعات جدیدی در مورد خستگی در ویرایش دوم اضافه شده اند که عبارتند از: طراحی مهندسی به کمک کامپیوتر و مدل سازی دیجیتال، بحث های بیشتر در مورد مکانیزم های ریز/ درشت و عوامل تأثیرگذار در رفتار خستگی، رشد ترک کوچک، مکانیزم های الاستیک- پلاستیک شکست، مدل بهبود یافته بسته شدگی ترک، ارایه بیشتر در مورد تحلیل کرنش شیار، که شامل چگالی انرژی کرنشی یا قانون گلینکا<sup>۱</sup>، ترک های ناشی از شیارها، تولید و اندازه گیری تنش های پسماند، ضرایب شدت تنش پسماند، معرفی روش های مختلف شمارش سیکل و جوانه زنی ترک و مدل های رشد و پیش بینی عمر ناشی از بارگذاری با دامنه متغیر، بارگذاری چندمحوری غیرهم فاز، روش صفحه های بحرانی و رشد ترک خستگی با مود ترکیبی برای خستگی چندمحوری، توضیح مفصل از اثرات محیطی، کد طراحی خستگی BS 7608 برای قطعات جوش خورده، و یک فصل جدید در مورد جنبه های آماری خستگی، به همراه جداول خواص مواد در ضمیمه می باشد.

چهار روش تحلیلی برای طراحی خستگی و تخمین یا پیش بینی عمر خستگی فلزات ارایه شده است: تنش اسمی  $(S - N)$ ، کرنش موضعی  $(\epsilon - N)$ ، رشد ترک خستگی  $(da/dN - \Delta K)$ ، و یک روش دو مرحله ای که شامل  $\epsilon - N$  برای جوانه زنی ترک های کوچک و  $da/dN - \Delta K$  برای رشد مداوم ترک تا زمان شکست می باشد. این چهار روش در اکثر برنامه های تجاری، دولتی و در کامپیوترهای خانگی در نظر گرفته شده اند و در اکثر موقعیت های طراحی خستگی پیچیده، بطور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ها می توانند شامل شیارها، تنش های پسماند، ترک های کوچک و طولانی، بارگذاری با دامنه متغیر، حالت های تنش چندمحوری، و شرایط محیطی باشند. این چهار روش تحلیلی برای

تأیید آزمایش در شرایط شبیه سازی شده و عمر واقعی لازم می باشند، و اساس نمونه سازی دیجیتال و طراحی مهندسی به کمک کامپیوتر برای ایجاد قابلیت دوام را تشکیل می دهند.

فصل ۱ مودهای مختلف واماندگی مکانیکی را توضیح می دهد و شامل یک مرور تاریخچه خستگی می باشد. فصل ۲، بینش های کلی طراحی خستگی و روش هایی مانند عمر-ایمن، واماندگی-ایمن، و طراحی مقاوم در برابر آسیب، تجزیه، تحلیل، آزمایش، نمونه سازی دیجیتال، و بازرسی رامعرفی می کند. فصل ۳ جنبه های ریز ساختاری و ظاهری رفتار خستگی را شرح می دهد و مکانیزم های مرتبط با جوانه زنی و رشد ترک خستگی را توضیح می دهد. به توصیه اخیر ASTM و جهت سازگاری با آن، از اصطلاح «شروع ترک»<sup>۱</sup> استفاده نمی شود. فصل ۴ شامل آزمایش خستگی، استانداردهای آزمایش خستگی ASTM و ISO برای فلزات، و رفتار عمر-تنش اسمی ( $S - N$ ) برای بارگذاری با دامنه ثابت برای قطعات بدون شیار می باشد. فصل ۵ رفتار تغییر شکل تنش- کرنش تناوبی و یکنواخت و رفتار خستگی کرنش-عمر ( $E - N$ ) و خواص بارگذاری با دامنه ثابت برای قطعات بدون شیار را توضیح می دهد. فصل ۶ مفاهیم LEFM و کاربرد آن ها را برای رشد ترک خستگی ( $da/dN - \Delta K$ ) تحت بارگذاری با دامنه ثابت را بیان می کند. این فصل شامل بسته شدگی ترک، ترک های کوچک و بزرگتر، و ملاحظات پلاستیسته نوک ترک می باشد. فصل ۷، در مورد اهمیت تمرکز تنش ها بحث می کند، و اثرات آن ها را در طراحی خستگی با استفاده از چهار روش طراحی خستگی در نظر می گیرد. فصل ۸ تنش های پسماند را به همراه نحوه ایجاد آن ها، آزادسازی، اندازه گیری، اثرات مفید و مخرب و ضرایب شدت تنش اعمالی و پسماند را برای استفاده در رشد ترک خستگی در نظر می گیرد. فصل ۹، انباشتگی آسیب و شمارش سیکل را مورد بحث قرار می دهد و چهار روش طراحی خستگی ارائه شده در فصل های ۴ تا ۷ را برای بارگذاری با دامنه متغیر تعمیم می دهد. خستگی چند محوری شامل بارگذاری هم فاز و غیر هم فاز، تنش ها و کرنش های معادل، روش های صفحه بحرانی می باشد و رشد ترک با مود ترکیبی در فصل ۱۰ ارائه شده است. اثرات محیطی از قبیل خوردگی، سایش، دماهای بالا و پایین، و تابش نوترونی در فصل ۱۱ بررسی شده اند. در فصل ۱۲ چهار روش طراحی خستگی بکار رفته برای

خستگی قطعات جوش خورده ارائه شده است، که شامل کاربرد استاندارد بریتانیایی BS 7608 می باشد. فصل ۱۳ پراکندگی داده های خستگی و جنبه های احتمالی طراحی خستگی را در نظر می گیرد.

در ضمیمه، پنج جدول در مورد خواص چقرمگی شکست و خستگی برای مواد مهندسی انتخابی به روز شده است. این جداول در متن و مسائل مورد استفاده قرار می گیرد. مسائل نمونه برای بهتر نشان دادن کاربرد مفاهیم در طراحی مهندسی در متن کتاب حل و ارائه شده اند. در انتهای هر فصل، مسائل حل نشده در نظر گرفته شده است و در برخی موارد، بیشتر از یک جواب دارند، یا دارای محدوده ای از جواب ها هستند، که به خاطر روش های مدل-سازی مختلف، روش های حل، خواص انتخابی مواد، و ماهیت تجربی و غیرواقعی خستگی و طراحی خستگی منطقی می باشد. ۱۶۶ مسأله پرکاربرد که اغلب مورد نیاز خوانندگان می باشد و مشتمل بر مفاهیم کاربردی و توضیح فرضیات اصلی است، حل و ارائه شده اند. هر فصل دارای مراجع مهم (۴۲۴ مرجع در این ویرایش با افزایشی در حدود ۴۰ درصد) و شکل ها (۱۸۳ عدد)، یک بخش خلاصه، و یک بخش «بایدها و نبایدها در طراحی» می باشد. واحدهای SI با واحدهای آمریکایی در موارد متعددی همزمان، استفاده شده است. اکثر شکل ها و جداول دارای دو واحد می باشند.

ما تشکر خود را از تمام کسانی که در زمینه خستگی کار کرده اند و ما به نتایج کار آن ها به عنوان مرجع اشاره کرده ایم و یا کسانی که در این زمینه فعالیت کرده اند و نام آن ها قید نشده است، اعلام می کنیم. بحث ها، مناظره ها، تفسیرها، و توسعه استانداردها توسط همکاران، به خصوص توسط کمیته های شکست و خستگی ASTM و SAE که در تصحیح درک ما از این موضوع پیچیده کمک کرده اند. از دکتر هارولد ریم اشنايدر از فولاد بسل هم<sup>۱</sup>، پروفیسور درو نلسون از دانشگاه استنفورد<sup>۲</sup>، پروفیسور دارل سوسی از دانشگاه ایلینویز در اوربانا-چامپین<sup>۳</sup>، دکتر گری هالفورد از گلن ناسا<sup>۴</sup> و از لی جیمز به خاطر مشاوره برای توضیحات

1- Dr. Harlod Reemsnyder of Bethlehem Steel

2- Professor Drew Nelson of Stanford University

3- Professor Darrel Socie of the University of Illinois at Urbana-Champaign

4- Dr. Gary Halford of NASA Glen

ساختاری در طول نوشتن ویرایش دوم، کمال تشکر را داریم. همچنین از همکاران مان برای ایجاد اطلاعات و یا پیشنهادات منبع: پروفیسور گری گورلی گلینکا از دانشگاه واترلو<sup>۱</sup>، پروفیسور دیوید هوپنر از دانشگاه اوتا<sup>۲</sup>، دکتر جیمز نیومن از لانگلی ناسا<sup>۳</sup>، پروفیسور حسین شهیدآوغلو دانشگاه ایلینویز در اوربانا-چامپین<sup>۴</sup>، کیث اسمیت از اتحادیه راه آهن های آمریکا<sup>۵</sup>، پروفیسور استیو تیپون از دانشگاه تولسا<sup>۶</sup>، و پروفیسور تیم تاپر از دانشگاه واترلو<sup>۷</sup>، قدردانی می کنیم. ما همچنین بسیار مدیون همسران و فرزندانمان هستیم، که در زمان نوشتن ویرایش دوم این کتاب حوصله به خرج داده و تحمل کردند.

---

1- Professor Gregory Glinka of the University of Waterloo

2- Professor David Hoepfner of the University of Utah

3- James Newman of NASA Langley

4- Professor Huseyin Sehitoğlu of the University of Illinois at Urbana-Champaign

5- Keith Smith of the Association of American Railroads

6- Professor Steve Tipton of the University of Tulsa

7- Professor Tim Topper of the University of Waterloo