

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## پایگاه علوم و مهندسی محاسباتی

# یک سابروتین برای برآورد خسارت‌های خزش – خستگی بر اساس روش‌های زمان – ترک خوردگی و انرژی هیستریزیس

۱/۰

	محمد رضا هرمزی: مهندسی مکانیک، دکتری	
	نام و نام خانوادگی: تحصیلات، رتبه علمی	توسعه دهنده (گان):
	نام و نام خانوادگی: تحصیلات، رتبه علمی	
	سید امیر صاحب الزمانی	مترجم:
	روز / ماه / سال	تاریخ تنظیم سند:



## فهرست مطالب

---

۶	چکیده
۷	فصل ۱: راهنمای کاربر
۷	۱-۱. تعریف پارامترهای اولیه
۹	۲-۱. معرفی ورودی‌ها و خروجی‌ها
۹	۱-۲-۱. ورودی‌ها
۱۱	۲-۲-۱. خروجی‌ها
۱۲	۳-۱. الزامات اجرای برنامه
۱۳	فصل ۲: مستندات علمی
۱۳	۱-۲. اندرکنش خزش - خستگی
۱۴	۱-۱-۲. مکانیزم خرابی تحت اندرکنش‌های خزش - خستگی
۱۷	۲-۱-۲. اثرات زمان وقفه
۲۰	۲-۲. مدل‌های خرابی خزش - خستگی
۲۱	۳-۲. تقسیم بندی حلقه‌های هیستریزیس
۲۴	فصل ۳: اعتبارسنجی برنامه
۲۴	۱-۳. مقدمه
۲۴	۲-۳. تست‌های LCF با زمان وقفه (خزش)
۲۶	۳-۳. مدلسازی با FE
۲۷	۴-۳. پارامترهای مورد نیاز برای مدلسازی با FE
۲۷	۱-۴-۳. گسیختن ناشی از خزش - استهلاک تنش
۲۸	۲-۴-۳. مدل خرابی عمر - ترک خوردگی
۳۰	۵-۳. مقایسه‌ی FE و نتایج تجربی
۳۳	نتیجه‌گیری
۳۴	مراجع

## فهرست اشکال

شکل (۱)	نمای مکانیزم شکست خزش - خستگی: (a) خستگی غالب باشد، (b) خزش غالب باشد، (c) اندرکنش خزش - خستگی	۱۴
شکل (۲)	انحراف مکانیزم شکست از اصل شکست خطی در اثر سه مکانیزم اندرکنش خزش - خستگی	۱۵
شکل (۳)	آغاز ترک یا (b) پخش ترک تحت شکست ناشی از غلبه‌ی خستگی که توسط خسارت کاویتاسیون شتاب یافته باشد.	۱۶
شکل (۴)	نرخ تجمیع خسارت افزایش یافته در خرابی با غلبه‌ی کاویتاسیون تحت بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده که در آن مساحت تنش - زمان برای بارگذاری چرخه‌ای کوچکتر است (b)، در قیاس با مساحت بارگذاری یکنواخت (a).	۱۶
شکل (۵)	موجشکل نمودار تنش بارگذاری چرخه‌ای - زمان با زمان های وقفه‌ی مختلف	۱۸
شکل (۶)	تقسیم بندی معمول یک حلقه‌ی هیستریزس چرخه‌ای با دوره‌ی وقفه‌ی کششی که در آن: $\Delta \varepsilon_{pp} =$ محدوده‌ی کرنش غیرالاستیک خستگی خالص، $\Delta \varepsilon_p =$ جزء کرنش پلاستیک در نیمه عمر، $\Delta \varepsilon_c =$ جزء کرنش خزشی واقعی در نیمه عمر و $\varepsilon_{mw} =$ نرخ کرنش انتقالی	۱۹
شکل (۷)	تقسیم بندی انرژی در حلقه‌های هیستریزس با زمان سکون	۲۲
شکل (۸)	حلقه‌های هیستریزس غیرالاستیک پایدار شده در $\Delta \varepsilon = \pm 0.8\%$	۲۳
شکل (۹)	هندسه‌ی نمونه‌ی تک محوری بکار رفته برای تست‌های LCF	۲۵
شکل (۱۰)	موجشکل بارگذاری برای تست سکون (تست‌های با زمان وقفه) در محدوده کرنش $\Delta \varepsilon = \pm 0.8\%$ در حرارت ۶۵۰ درجه‌ی سانتیگراد	۲۵
شکل (۱۱)	هندسه‌ی مدل LCF/TMF متقارن بکار رفته در مدلسازی FE	۲۶
شکل (۱۲)	مشخصات شکست خزش 316FRS7640 در دمای ۶۵۰ درجه‌ی سانتیگراد	۲۸
شکل (۱۳)	پارامترهای تغییر خرابی خستگی تقسیم‌بندی شده برای تست‌های LCF	۳۰
شکل (۱۴)	نتایج FE و تجربی خرابی‌های خزش - خستگی برای تست‌های LCF در حرارت ۶۵۰ درجه با $F = 0.001\text{Hz}$ و $\Delta \varepsilon = \pm 0.1\%$	۳۱
شکل (۱۵)	نتایج FE و تجربی خسارت‌های خزش - خستگی برای تست‌های LCF در حرارت ۶۵۰ درجه با $F = 0.001\text{Hz}$ و $\Delta \varepsilon = \pm 0.1\%$	۳۲

## فهرست جداول

---

- جدول (۱) تعریف پارامترهای داخل برنامه ..... ۷
- جدول (۲) تقسیم بندی  $\Delta w_{sta}$  برای تست‌های LCF در  $F = 0.001H_Z$  ..... ۲۳
- جدول (۳) استهلاک تنش و زمان لازم برای شکست در هر دو تست LCF ..... ۲۸
- جدول (۴) تقسیم‌بندی خرابی به ازای رابطه تجمیع خرابی برای تست‌های LCF ..... ۲۹
- جدول (۵) فاکتور نرمال سازی خرابی،  $\lambda$ ، برای هر دو تست LCF/TMF ..... ۲۹

---

## چکیده

یک سابروتین تعریف شده توسط کاربر برای پیش‌بینی سخت‌شدگی چرخه‌ای، استهلاک تنش در طول زمان وقفه و نهایتاً برای نشان دادن سیر تغییر خرابی هنگامی که خرابی آغاز می‌گردد، در نرم افزار اجزای محدود Abaqus توسعه یافته و پیاده‌سازی شده است. مرحله ی نهایی رفتار ماده (یعنی شکست) بصورت عددی برای تستهای خستگی چرخه‌ی کم (LCF) مدل‌سازی شده است که در آن یک زمان وقفه برای نشان دادن اثر خزش به همراه خستگی اعمال شده است. برای تست‌های با بارگذاری چرخه‌ای پیوسته (بدون زمان وقفه) یک مدل پدیده شناسی هیستریزیس براساس انرژی در یک سابروتین USDFLD پیاده سازی شد. سپس، این مدل به همراه مدل خرابی خزش براساس رابطه زمان- ترک خوردگی بصورت همزمان بکار رفتند تا نتایج تجربی که در آن‌ها زمان وقفه اعمال شده بود، بازسازی شوند. در پایان، نتایج FE با نتایج تجربی مقایسه شدند و همخوانی مناسب بین آن‌ها دیده شد.

**کلمات کلیدی:** خزش، خستگی، تنش - کرنش، مدل‌های خرابی، انرژی هیستریزیس، تحلیل اجزای محدود Abaqus

# فصل ۱: راهنمای کاربر

در این قسمت، تعریف پارامترهای داخل برنامه و ورودی‌ها- خروجی‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۱-۱. تعریف پارامترهای اولیه

پارامترهای داخل برنامه تعاریف زیر را دارند:

جدول (۱) تعریف پارامترهای داخل برنامه

STATEV(1)	مقدار پله‌ی خزش قبلی را ذخیره می‌کند.
STATEV(2)	مقدار کل خرابی خزش براساس مدل Cocks and Ashby را ذخیره می‌کند.
STATEV(3)	مقدار کل خرابی خزش براساس مدل Rice and Tracey را ذخیره می‌کند.
STATEV(4)	مقدار تنش را ذخیره می‌کند.
STATEV(5)	مقدار کرنش پلاستیک را ذخیره می‌کند.
STATEV(6)	مقدار مجموع انرژی را ذخیره می‌کند.
STATEV(7)	مقدار تنش به هنگام شده را ذخیره می‌کند.

STATEV(8)	مقدار کرنش پلاستیک به هنگام شده را ذخیره می کند.
STATEV(9)	مقدار پلهی زمان را ذخیره می کند.
STATEV(10)	مقدار مجموع انرژی به هنگام شده را ذخیره می کند.
STATEV(11)	مقدار انرژی هیستریزیس چرخه‌ای را ذخیره می کند.
STATEV(12)	مقدار پله‌ای خرابی در چرخه را ذخیره می کند.
STATEV(13)	مقدار کل خرابی خستگی را ذخیره می کند.
DTIME	پلهی زمان
TIME(1)	زمان پله
TIME(2)	کل زمان
STARTTIME	زمان شروع خرابی
EPSF	کرنش شکست تک محوری خزش
HYDRO	مؤلفه‌ی تنش (میانگین) هیدرواستاتیک
VMISES	تنش معادل فون میسز
DEP	پلهی کرنش خزش اولیه
DEC	پلهی کرنش خزش ثانویه
DAMAGE	مقدار خرابی تجمیعی در ابتدای پلهی فعلی
DMAX	حداکثر خرابی

## ۲-۱. معرفی ورودی‌ها و خروجی‌ها

ورودی‌ها و خروجی‌های برنامه پیشنهادی به شرح زیرند:

### ۱-۲-۱. ورودی‌ها

به منظور اجرای سابروتین خزش-خستگی، تعدادی ورودی اولیه مربوط به ویژگی‌های ماده‌ی مورد بررسی و شرایط آزمایش مانند دمای که آزمایش تحت آن انجام می‌شود، مورد نیاز است.

#### ۱-۱-۲-۱. داده‌ی ورودی خزش

داده‌ی ورودی در قسمت DATA COEF/ وارد می‌شود و به شرح زیر است:

- دمای آزمایش

در اولین خط DATA COEF/ وارد می‌شود. اگرچه در خزش، دما ثابت فرض شده و مشخصات ماده مربوط به همان دمای خاص است، در برنامه‌ی پیشنهادی امکان فراهم کردن داده‌ی ورودی برای دماهای مختلف وجود دارد و برنامه خود مشخصات مواد را با توجه به دمای مورد نظر در تحلیل FE، درون یابی می‌کند.

- مشخصات خزش اولیه

مشخصات خزش اولیه یعنی C1، C2 و N1 در خط دوم، سوم و چهارم وارد می‌شوند.

- مشخصات خزش ثانویه

مشخصات خزش ثانویه یعنی C و N در خطوط پنجم و ششم وارد می‌شوند.

به منظور نشان دادن واضح‌تر پارامترهای بالا، لیست مشخصات بکار رفته در سابروتین خزش پیشنهادی به شرح زیر آورده شده است، که در آن، مشخصات مربوط به فولاد ضد زنگ نوع ۳۱۶ می‌باشد.

DATA COEF/

+ 550, 600, 650, 700,

+ -12.548,-12.548,-12.548,-12.548,

+ 0.55,0.55,0.55,0.55,

+ 4.4,4.4,4.4,4.4,

+ -26.3,-26.3,-26.3,-26.3,

+ 10.6,10.6,10.6,10.6 /

مقادیر مربوط به پارامترهای a, b, c, d و e که طول بارچرخه‌ای همراه با در نظر گرفتن زمان وقفه را نشان می‌دهند، وارد شده‌اند. برای مثال، چرخه‌ای که در مجموع ۱۰۰۰ ثانیه است و ۴۵۰ ثانیه زمان وقفه هم در کشش و هم در فشار به همراه زمان تغییر ۲۵ ثانیه هم در کشش و هم در فشار دارد، پارامترهایی به شرح زیر دارد:

$$a = 1000$$

$$b = 25$$

$$c = 475$$

$$d = 525$$

$$e = 975$$

خط بعد از تعریف پارامترها بیان می‌کند که برنامه تنها برای آن قسمت چرخه که در آن زمان وقفه (خزش) وجود دارد، مشخصات خرابی خزش را اعمال می‌کند که به شکل زیر نشان داده شده است:

```
IF ((MOD(TIME(2),a).GE. b .AND. MOD(TIME(2),a).LE.c)
+ .OR.((MOD(TIME(2),a).GE.d .AND. MOD(TIME(2),a).LE.e)))
+ THEN
```

در پایان، مقادیر پارامترهای CF (ضریب اصلاح) و tr (زمان تا شکست) باید وارد شوند تا امکان محاسبه‌ی خرابی خزش مربوطه براساس رابطه زمان- ترک خوردگی فراهم شود. این موضوع در پایین نشان داده شده و در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

$$CF=0.117347754$$

$$tr=277$$

$$Dt=DTIME/3600$$

$$DDEC=CF*Dt/tr$$

بنابراین، به منظور اجرای برنامه‌ی خزش، لیست مشخصات بالا مورد نیاز است که بعد از وارد کردن آن‌ها به برنامه، خروجی‌ها می‌توانند به دست بیایند.

### ۱-۲-۱-۲. داده‌ی ورودی خستگی

به منظور اجرای سابروتین خستگی، تعدادی ورودی اولیه مورد نیازند که براساس آن‌ها، تعریف یک چرخه‌ی خستگی به همراه سیر تغییر خرابی به دست می‌آیند. این ورودی‌ها به شرح زیرند:

- تعریف چرخه

اولین خط برنامه‌ی اصلی می‌باشد که در آن طول چرخه به همراه پله‌های آن تعریف می‌شوند. لازم است که طول موجشکل چرخه‌ای و پله‌هایی که با آن چرخه کامل می‌شود، تعریف شوند. این امر امکان تعریف چرخه‌ای که در آن خرابی شروع می‌شود، را فراهم می‌آورد. در بخش بعدی جزئیات کامل موجشکل