

## تحلیل تنش ناشی از FOD روی یک پره توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل

سید مسعود مرندي<sup>۱</sup>، مهدی تاجداری<sup>۲\*</sup> و خسرو رحمانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مرکز مکانیک و فناوری‌های ساخت

<sup>۳</sup> استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

(تاریخ دریافت ۸۸/۱/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۳، تاریخ تصویب ۸۸/۶/۱۵)

### چکیده

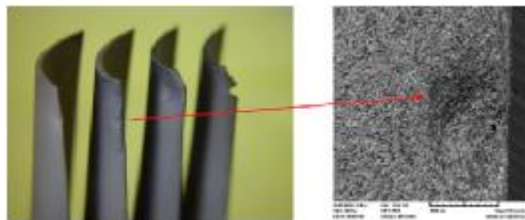
خسارت ناشی از برخورد جسم خارجی<sup>۱</sup> به پره‌ها به طور معمول در اثر ورود اجسام سخت از جمله شن، سنگ و یا قسمتی از اجزای جدا شده موتور به داخل توربین، ایجاد می‌شود. تحت بدترین شرایط، FOD می‌تواند منجر به خسارت‌های شدید ساختاری شود و باعث ایجاد فرورفتگی در لبه پره توربین گاز شود. در این مقاله برخورد روی لبه پره از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل René 80 به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این بررسی، تنش‌های پسماند در سه منطقه بحرانی (که تنش‌هایشان به طور معمول کششی است) از دو روش دینامیکی و شبه استاتیکی، مقایسه شده است. همچنین ضریب تمرکز تنش الاستیک از روش آنالیز تجربی تنش به دست آمده است که با مقادیر اجزای محدود، مطابقت دارد.

**واژه‌های کلیدی:** خسارت جسم خارجی، ضریب تمرکز تنش، تنش‌های پسماند، آنالیز تجربی تنش

### مقدمه

ولی تا کنون گزارش‌های علمی در این باره منتشر نشده است.

خسارت جسم خارجی، سالیانه بیش از ۴ میلیارد دلار برای صنایع هوایی آمریکا هزینه به همراه دارد [۲]. شکل (۱) تصویر خسارت دیده چند نمونه از پره توربین گاز موتور جت، در اثر FOD را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تصویر خسارت دیده چند نمونه از پره توربین گاز موتور جت در اثر FOD.

### تشریح مدل و خصوصیات ماده

برای مدل کردن خسارت جسم خارجی به پره توربین گاز، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱- قسمتی از اجزای توربین کنده شده و به لبه پره برخورد می‌کند. جنس این قطعه از سوپرآلیاژ پایه نیکل In617 و با دمای 300°C در نظر گرفته شده است.

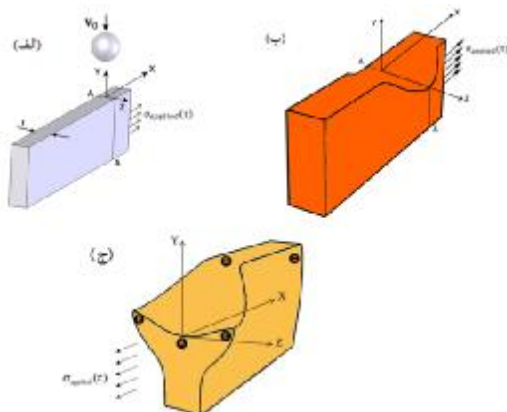
خسارت جسم خارجی، یک عامل اصلی واماندگی خستگی در موتورهای جت است. خسارت جسم خارجی زمانی رخ می‌دهد که اجسام سخت همچون سنگ، شن و یا حتی قسمتی از اجزای موتور هواپیما با سرعت‌هایی در محدوده ۳۵۰-۱۰۰ متر بر ثانیه به پره هواپیما برخورد می‌کند. جریان هوا با دبی زیاد که مورد نیاز برای عمل کردن چنین موتورهایی است، با یک مکش قوی، باعث ورود ذرات کوچک از هوای خارج هواپیما یا کنده شدن قسمتی از اجزای موتور می‌شود که به داخل توربین گاز وارد می‌شوند [۱]. این خسارت به لبه برخورد پره کمپرسور گزارش شده است. افرادی که در زمینه برخورد اجسام خارجی به پره کمپرسور تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند و حتی دست به آزمایش‌های گسترده زده‌اند پیترز و ریچی (۲۰۰۱)، چن، هاچینسون (۲۰۰۳)، چاپتی (۲۰۰۴) و دیگران هستند که زحمات زیادی در این زمینه کشیده‌اند. برخورد اجسام به پره توربین گاز نیز انجام شده است که نمونه‌هایی از آن در دست است که باعث خسارت به پوشش حرارتی پره<sup>۲</sup> شده است،

\* نویسنده مسئول: Email: tajdari@yahoo.com

تلفن / فاکس: ۲۲۵۶۴۱۴۸

در ابتدا صفحه مکعب مستطیل شکل بدون تنش بوده و وجه سمت چپ آن به طور کامل مقید شده است. با اندازه‌گیری‌هایی که از یک نمونه پره توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ René 80 انجام گرفت، مکعبی به ابعاد  $70 \times 20 \times 1.27 \text{ mm}^3$  در نظر گرفته شد. پس از برخورد، هندسه فرورفتگی با عمق فرورفتگی  $\delta$ ، قطر فرورفتگی  $w$  و قطر برآمدگی جانبی  $b$  مشخص شده است (شکل ۳).

شماتیک سه‌بعدی فرورفتگی در نمونه در شکل (۴-ب) و نمایی از مقطع A-A در شکل (۴-ج) آورده شده است. در شکل (۴-ج)، بستر حفره  $A$ ، برآمدگی جانبی  $E$ ، توده پلاستیک<sup>۵</sup> اطراف فرورفتگی  $B$  و منطقه زیر سطحی که به اندازه شعاع حفره از حفره فاصله دارد  $C$ ، نشان داده شده است. پس از برخورد، طول نمونه (در جهت  $x$ ) پس از برخورد و ایجاد حفره با تنش تناوبی متغیر با زمان  $\sigma_{\text{app}}(t)$  قرار گرفته است.



شکل ۴: (الف) شماتیک قبل از برخورد (ب) تغییر شکل پس از برخورد (ج) برش A-A از جسم تغییر شکل یافته که در آن، بستر حفره  $A$ ، برآمدگی جانبی  $E$ ، توده پلاستیک اطراف فرورفتگی  $B$  و منطقه‌ای زیر سطح که به اندازه شعاع حفره از حفره فاصله دارد  $C$ ، نشان داده شده است.

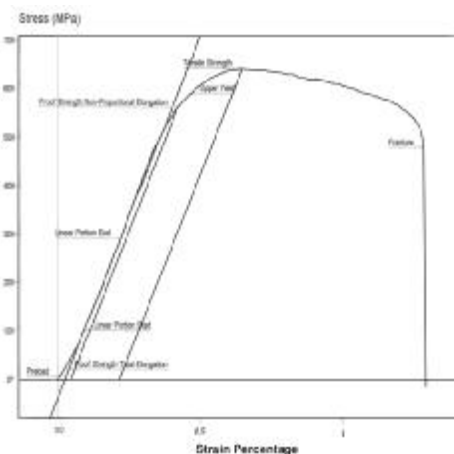
ارتفاع توده پلاستیک اطراف حفره (B) در شکل (۴-ج) بستگی به سرعت جسم برخوردکننده دارد و در حد صدم میلی‌متر است که در مقایسه با عمق و قطر فرورفتگی قابل چشم‌پوشی است. با صرف نظر کردن از ارتفاع توده پلاستیک (و با مراجعه به شکل ۵) رابطه‌ای ساده بین عمق فرورفتگی و قطر فرورفتگی به شکل فرمول (۱) به دست آمده است.

خواص مکانیکی سوپر آلیاژ In 617 در دمای  $300^\circ\text{C}$  از این قرار است: مدول الاستیسیته  $E=190\text{GPa}$ ، ضریب پواسون  $\nu=0.3$  و چگالی  $\rho = 8360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  [۴].

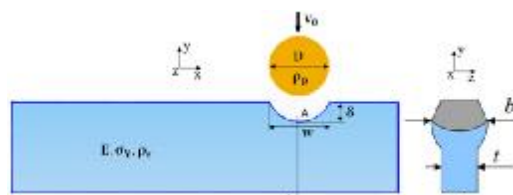
۲- یافتن خصوصیات مکانیکی سوپرآلیاژ René 80 در همه دماها غیرممکن به نظر می‌رسد. از این رو در این مدل‌سازی درجه حرارتی میانگین، متناسب با محل برخورد برای پره در نظر گرفته شده است که برابر با  $871^\circ\text{C}$  است. شکل (۲) نمودار تنش- کرنش سوپرآلیاژ René 80 در دمای  $871^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهد. چگالی سوپرآلیاژ  $\rho = 8160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  و ضریب پواسون آن  $\nu=0.3$  است [۵].

۳- جسم کروی برخوردکننده قطرهای مختلفی برابر با  $D_1=3.2\text{mm}$ ،  $D_2=2\text{mm}$  و  $D_3=1.27\text{mm}$  دارند و با سرعت‌های مختلف به نمونه برخورد کرده و فرورفتگی‌های متفاوتی را ایجاد می‌کند.

۴- برای ساده‌سازی مسئله، پره به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شده است که جسم کروی به  $\frac{1}{3}$  بالایی آن برخورد می‌کند. شکل (۳) شماتیک از برخورد جسم کروی به صفحه مستطیل شکل را نشان می‌دهد.

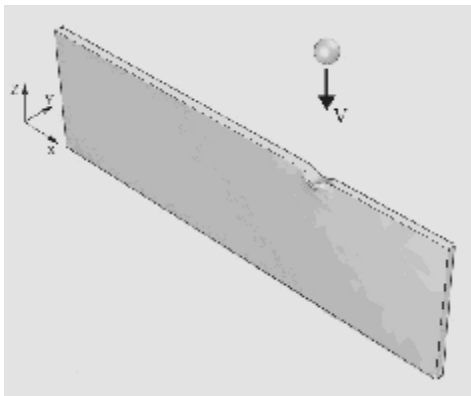


شکل ۲: نمودار تنش-کرنش سوپرآلیاژ René 80 در دمای  $871^\circ\text{C}$  [۵].



شکل ۳: شماتیک از برخورد جسم کروی به صفحه مستطیل شکل.

تحلیل آن به روش اجزای محدود، باید از نرم‌افزاری استفاده شود که بتواند برخورد را نزدیک به حالت واقعی آن شبیه‌سازی کند و همچنین از بقیه نرم‌افزارها در این زمینه نیز قوی‌تر عمل کند. آنالیز مسئله برخورد جسم خارجی با نرم‌افزار ABAQUS V6.5 و به صورت سه‌بعدی انجام شده است. با اندازه‌گیری‌هایی که از یک نمونه پره توربین انجام گرفت و با مراجعه به شکل (۳)، مکعب مستطیلی به ابعاد  $70 \times 20 \times 1.27 \text{ mm}^3$  در نظر گرفته شده است. مکعب مستطیل مذکور با ۲۰۰۰۰ المان هرمی ۴ گرهی المان‌بندی شده است. در شکل (۷)، برخورد جسم کروی به نمونه و تغییر شکل ایجاد شده در آن نشان داده شده است.



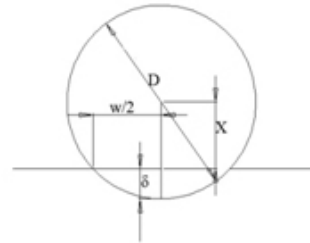
شکل ۷: برخورد جسم کروی به نمونه و تغییر شکل ایجاد شده در آن.

برای جسم کروی برخورد کننده، قطرهای مختلفی نظیر  $D_1 = 3.2 \text{ mm}$ ،  $D_2 = 2 \text{ mm}$  و  $D_3 = 1.27 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است که با سرعت‌های مختلف به نمونه برخورد کرده و فرورفتگی‌هایی با عمق متفاوت، ایجاد می‌کند. آنالیز اجزای محدود مسئله، شامل دو قسمت است:

- برخورد جسم به مکعب مستطیل که به شکل Dynamic Explicit انجام می‌شود.

- پس از برخورد، به مکعب مستطیل در جهت x (طول مکعب) تنش متغیر با زمان و به شکل استاتیکی اعمال می‌شود (شکل ۶).

در این تحلیل، ضریب اصطکاک کلمب ۰.۱ در نظر گرفته شد. همچنین نرخ کرنش برای سوپرآلیاژ René 80 مقدار ثابت  $\dot{\epsilon} = 1.167 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$  منظور شد.



شکل ۵: فرورفتگی ایجاد شده در نمونه که از توده پلاستیک صرف نظر شده است.

$$\delta = \frac{D}{2} - X, X = \frac{\sqrt{D^2 - w^2}}{2}$$

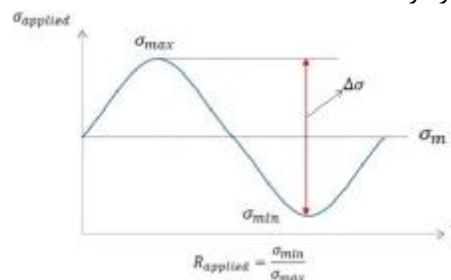
$$\delta = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - w^2})$$

$$w = 2\sqrt{\delta(D - \delta)} \quad (1)$$

انرژی جنبشی ذره  $KE = \frac{\pi}{12} D^3 \rho_p v_0^2$ ، دانسیته ذره و  $v_0$  سرعت برخورد است. انرژی جنبشی نرمال شده ذره به صورت فرمول (۲) بیان می‌شود.

$$\Omega = KE / (\sigma_Y D^3) = \frac{\pi}{12} \left( \frac{\rho_p}{\sigma_Y} \right) v_0^2 \quad (2)$$

شکل ۵- نمودار بار اعمالی به جسم مکعبی شکل را نشان می‌دهد.  $\sigma_{max} = 300 \text{ MPa}$  (در حدود نیمی از تنش تسلیم سوپرآلیاژ René 80) و  $\sigma_{min} = 30 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شد.



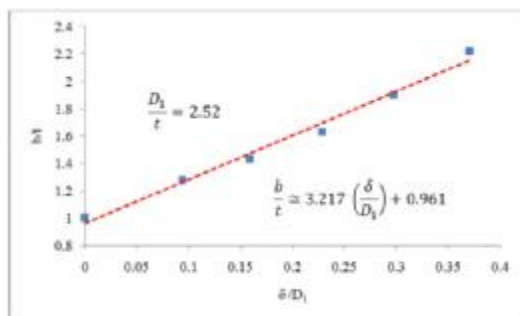
شکل ۶: نمودار بار اعمالی به جسم مکعبی شکل.

نمونه‌های تخریب شده که از موتورهای جت جنگنده به دست آمده، نشان داده است که شروع ترک‌های خستگی از سه ناحیه A، B، C و است. به همین منظور همه تحلیل تنش‌ها در این مقاله روی این سه ناحیه متمرکز شده است.

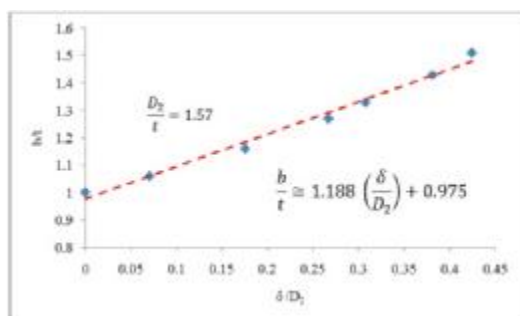
### روش اجزای محدود

مسئله برخورد، یک مسئله غیرخطی است و برای

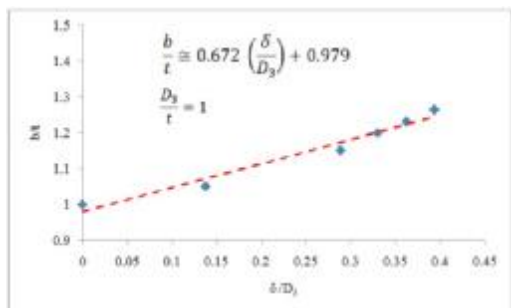
شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) رابطه خطی بین  $\delta/D$  و  $b/t$  را برای سه قطر مختلف ذره  $D_1$ ،  $D_2$  و  $D_3$  نشان می‌دهند.



شکل ۱۱: رابطه خطی بین  $\frac{b}{t}$  و  $\frac{\delta}{D_1}$



شکل ۱۲: رابطه خطی بین  $\frac{b}{t}$  و  $\frac{\delta}{D_2}$



شکل ۱۳: رابطه خطی بین  $\frac{b}{t}$  و  $\frac{\delta}{D_3}$

۲- ضریب تمرکز تنش الاستیک برای حفره  
ضریب تمرکز تنش الاستیک برای A و E (شکل ۴-ج) و به روش‌های مختلف اجزای محدود، تحلیلی و فتوالاستیک به دست آمده‌اند.

#### الف) روش تحلیلی پترسون

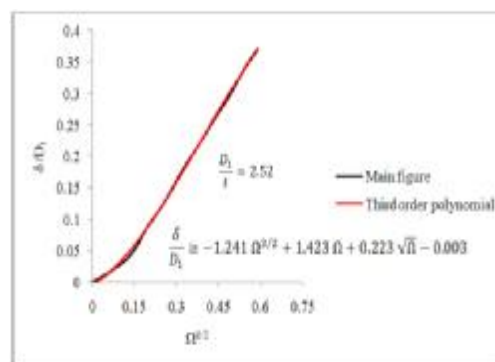
پترسون [۶] برای بستر حفره (A در شکل ۴-ج) ضریب تمرکز تنش به صورت فرمول (۳) ارائه کرده است:

$$k_T = 1 + 2 \sqrt{\frac{\delta}{t}} \quad (3)$$

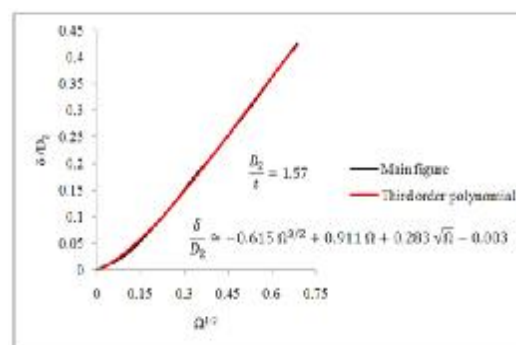
## نتایج عددی

### ۱- برآمدگی جانبی و فرورفتگی بر جای مانده از برخورد

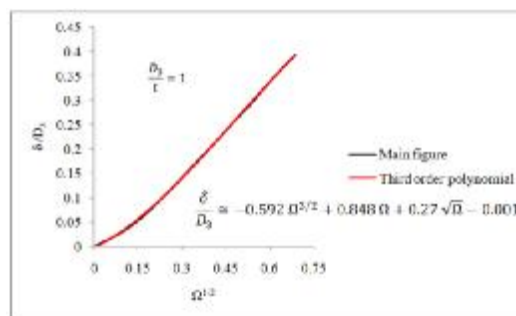
عمق فرورفتگی بی‌بعد شده به عنوان تابعی از انرژی بی‌بعد برای سه قطر مختلف ذره  $D_1$ ،  $D_2$  و  $D_3$  در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. اگر انرژی جنبشی بزرگ باشد، فرورفتگی ایجاد شده عمیق خواهد بود. همان‌طور که از شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، رابطه بین  $\delta/D$  و  $\Omega^{1/2}$  از مرتبه سوم است.



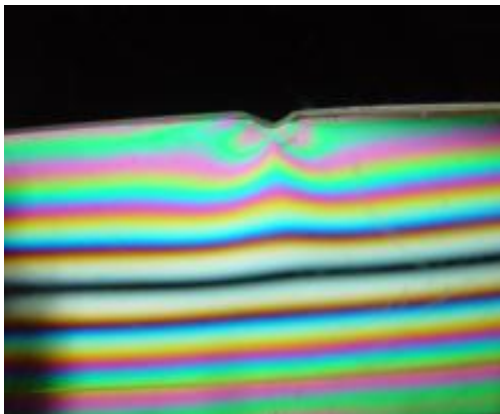
شکل ۸: رابطه بین  $\frac{\delta}{D_1}$  و  $\Omega^{1/2}$



شکل ۹: رابطه بین  $\frac{\delta}{D_2}$  و  $\Omega^{1/2}$



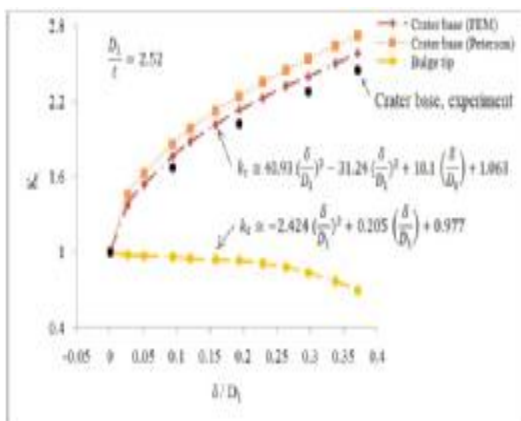
شکل ۱۰: رابطه بین  $\frac{\delta}{D_3}$  و  $\Omega^{1/2}$



شکل ۱۵: آنالیز تجربی تنش برای فرورفتگی با  $\frac{\delta}{D_1} = 0.09375$  و  $w = 1.86 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد که ضریب تمرکز تنش  $K_{tE} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  را برای بستر حفره به دست می‌دهد.

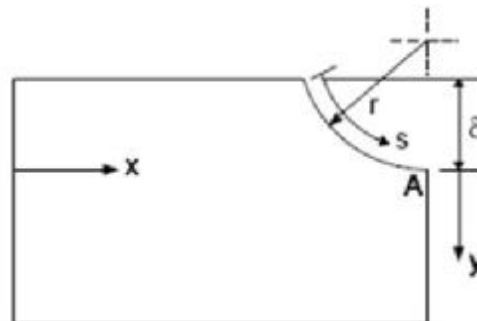


شکل ۱۶: دستگاه فتوالاستیک دستی.



شکل ۱۷: ضریب تمرکز تنش الاستیک برای بستر حفره و برآمدگی جانبی برحسب  $\frac{\delta}{D_1}$ .

در فرمول (۳)،  $\delta$  عمق فرورفتگی و  $r$  شعاع انحنای فرورفتگی است و از ارتفاع توده پلاستیک صرفنظر شده است. شکل (۱۴) هندسه نیمی از فرورفتگی را نشان می‌دهد که در آن  $\delta$  و  $r$  مشخص شده است.



شکل ۱۴: هندسه نیمی از فرورفتگی که در آن  $\delta$  و  $r$  مشخص شده است [۶].

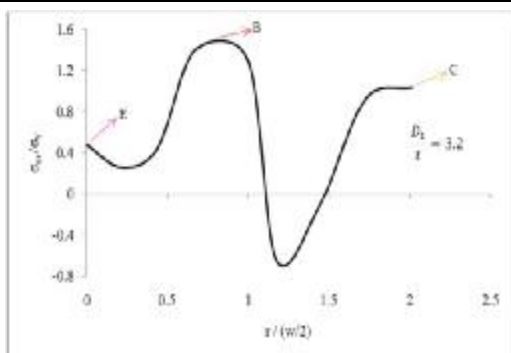
### ب) روش اجزای محدود

ضریب تمرکز تنش برای A و E (شکل ۴ - ج)) پس از برخورد محاسبه شده است. در این روش هندسه فرورفتگی (فرورفتگی از تنش‌های پسماند، آزاد سازی شده است) تحت بار استاتیکی قرار می‌گیرد و ضریب تمرکز تنش الاستیک  $K_{tE} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$  که تنش در دوردست فرورفتگی است (از آنالیز سه‌بعدی اجزای محدود به دست می‌آید).

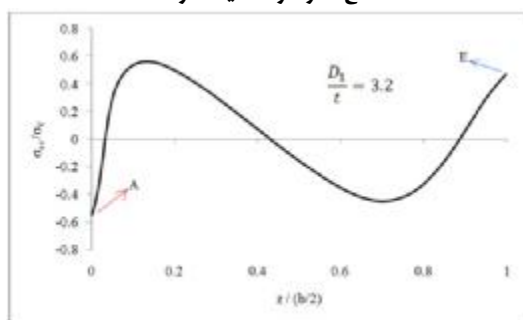
### ج) آنالیز تجربی تنش (فتوالاستیک)

برای این هدف، هندسه فرورفتگی توسط دستگاه لیزر ۱۰۰۰ وات روی قطعات از جنس پلی کربنات (مواد فتوالاستیک) ایجاد شدند، سپس توسط دستگاه فتوالاستیک دستی تحت بار کششی ساده قرار گرفتند و ضریب تمرکز تنش الاستیک برای A (شکل ۴ - ج)) محاسبه شد. شکل (۱۵) آنالیز تجربی تنش برای فرورفتگی با عمق  $\frac{\delta}{D_1} = 0.09375$  قطر  $\frac{w}{D_1} = 0.186$  میلی‌متر را نشان می‌دهد که ضریب تمرکز تنش  $K_{tE} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  را برای بستر حفره به دست می‌دهد. شکل (۱۶) دستگاه فتوالاستیک دستی را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) ضریب تمرکز تنش الاستیک برای بستر حفره و برآمدگی جانبی (به ترتیب A و E در شکل (۴ - ج)) را به ترتیب بر حسب  $\frac{\delta}{D_1}$  و  $\frac{\delta}{D_2}$  های مختلف نشان می‌دهد.



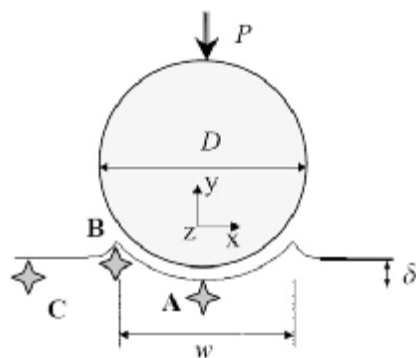
شکل ۲۰: تنش‌های پسماند کششی در برآمدگی جانبی E، توده پلاستیک اطراف حفره B و منطقه‌ای زیر سطح و به اندازه شعاع حفره از حاشیه حفره C.



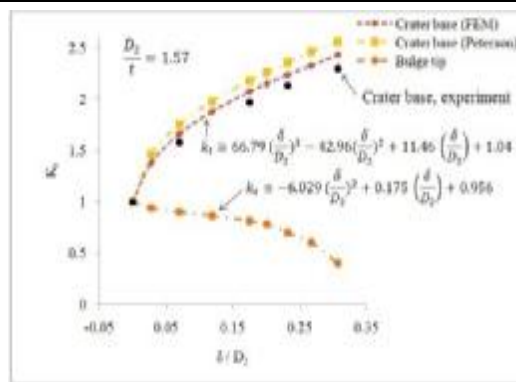
شکل ۲۱: تنش پسماند فشاری در بستر حفره A که تنش‌های پسماند کششی را تعدیل می‌کند.

### مقایسه بین تنش‌های پسماند از دو روش استاتیکی و دینامیکی در A، B و C

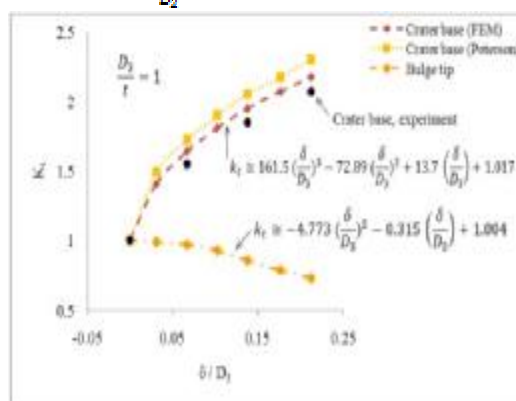
برای آنالیز شبه استاتیکی [۷]، اثرگذاری قائم یک جسم کروی سخت روی نمونه ضخیم و بدون تنش اولیه از جنس سوپرآلیاژ René 80 در نظر گرفته شد. این اثرگذاری قائم با فشار دادن جسم کروی با قطرهای مختلف  $D_1, D_2, D_3$  روی نمونه انجام گرفت. شکل (۲۲)، فشردن جسم کروی روی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۲۲: فشردن جسم کروی با نیروی P بر روی نمونه [۷].



شکل ۱۸: ضریب تمرکز تنش الاستیک برای بستر حفره و برآمدگی جانبی برحسب  $\frac{\delta}{D_3}$



شکل ۱۹: ضریب تمرکز تنش الاستیک برای بستر حفره و برآمدگی جانبی برحسب  $\frac{\delta}{D_3}$

### تنش‌های پسماند

برای یافتن میدان تنش‌های پسماند، فرض می‌شود که جسم به لبه پره با ضخامت  $t = 1 \text{ mm}$  برخورد می‌کند. در این شبیه‌سازی، قطر جسم کروی  $D = 3.2 \text{ mm}$  است که با سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه و به طور قائم به نمونه از جنس سوپرآلیاژ René 80 برخورد می‌کند.

نمودارهای تنش پسماند  $\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_y}$  در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل (۲۰) مشخص است، دو منطقه کششی وجود دارد: منطقه کششی در حاشیه حفره B در شکل (۴ - ج) و منطقه کششی زیر سطح که به میزان شعاع حفره از حاشیه حفره فاصله دارد (C در شکل (۴ - ج)). در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود که تنش پسماند فشاری در A (شکل (۴ - ج)) وجود دارد که باعث تعادل تنش‌های پسماند کششی می‌شود.



نمودارهای (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) نشان می‌دهند که در محدوده‌ای از فرورفتگی بدون بعد، نتایج برخورد دینامیکی و آنالیز استاتیکی به هم نزدیک هستند و می‌توان از آنالیز استاتیکی، به سبب تحلیل ساده‌تر با نرم‌افزار، برای محاسبه تنش‌های پسماند استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری

۱- ضریب تمرکز تنش الاستیک، توزیع تنش موضعی را تغییر می‌دهد. برای خسارت جسم خارجی روی لبه برخورد پره، این ضریب برای بستر حفره (A در شکل (۴ - ج)) و قطرهای مختلف جسم برخوردکننده، بیشترین مقدار را دارد. همچنین ضریب تمرکز تنش الاستیک برای نوک برآمدگی جانبی (E در شکل (۴ - ج)) و برای قطرهای مختلف جسم برخوردکننده، به دلیل تغییر مکان این ناحیه در راستاهای  $y$  و  $z$  همواره کمتر از ۱ است.

۲- با مراجعه به شکل‌های 23 و 24 و 25 مشاهده می‌شود که تنش‌های پسماند (استاتیکی و دینامیکی) نرمال شده برای بستر حفره (A در شکل (۴ - ج)) مستقل از قطر جسم برخوردکننده در  $\frac{\delta}{D_2} \cong 0.26$  فشاری می‌شود.

۳- با مراجعه به شکل (۲۵)، اختلافی به میزان ۲۶ درصد بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.33$  دیده می‌شود که در نهایت این اختلاف به ۳۶ درصد در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.39$  افزایش می‌یابد.

۴- با مراجعه به شکل (۲۴)، اختلافی به میزان ۲۷ درصد بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.3$  دیده می‌شود که در نهایت این اختلاف به ۴۰ درصد در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.424$  افزایش می‌یابد.

۵- با مراجعه به شکل (۲۳)، اختلافی به میزان ۳۰ درصد بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.26$  دیده می‌شود که در نهایت این اختلاف به ۵۰ درصد در  $\frac{\delta}{D_2} = 0.34$  افزایش می‌یابد.

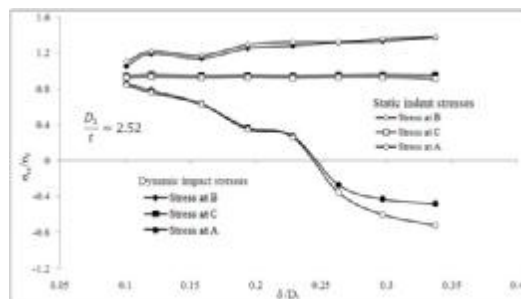
۶- با توجه به نتایج شماره ۳، ۴ و ۵، نتیجه‌گیری می‌شود که هر چه قطر جسم کروی بزرگ‌تر باشد، اختلاف بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی در  $\frac{\delta}{D_2}$  کمتر قابل مشاهده و مقدار این اختلاف بزرگ‌تر خواهد بود.

فرمول (۴) رابطه بین نیروی استاتیکی  $P$  و عمق فرورفتگی را بیان می‌کند:

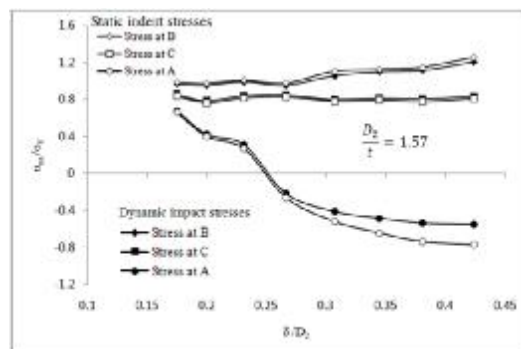
$$\frac{\sigma_u}{3.45} = \frac{P}{\pi D \delta} \quad (۴)$$

$\sigma_u$  برای سوپرآلیاژ René 80،  $650 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است.

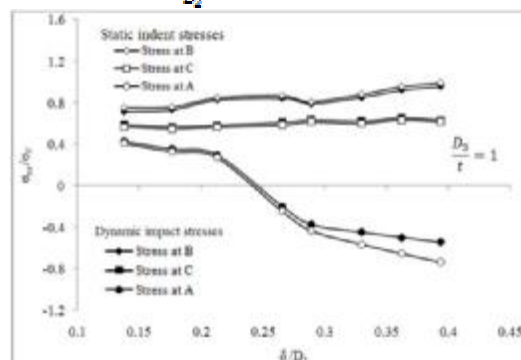
شکل‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) مقایسه بین تنش‌های حاصل از آنالیز شبه استاتیکی و دینامیکی را بر حسب (به ترتیب)  $\frac{\delta}{D_2}$ ،  $\frac{\delta}{D_2}$  و  $\frac{\delta}{D_2}$  نشان می‌دهد.



شکل ۲۳: مقایسه بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی بر حسب  $\frac{\delta}{D_2}$



شکل ۲۴: مقایسه بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی بر حسب  $\frac{\delta}{D_2}$



شکل ۲۵: مقایسه بین تنش‌های پسماند شبه استاتیکی و دینامیکی بر حسب  $\frac{\delta}{D_2}$

۸- ضریب تمرکز تنش الاستیک محاسبه شده در بستر حفره با استفاده از سه روش اجزای محدود، روش پترسون و روش آنالیز تجربی تنش، به یکدیگر نزدیک و اختلاف ۵ درصد بین روش اجزای محدود و روش پترسون و همچنین بین دو روش اجزای محدود و روش تجربی را نشان می دهد. به عبارت دیگر مقادیر به دست آمده از روش اجزای محدود میانگین عددی دو روش دیگر است.

۷- با توجه به اینکه احتمال ایجاد ترک خستگی در سه ناحیه A، B، C و در سرعت های زیاد جسم برخوردکننده بیشتر است و در این رنج سرعت تنش های پسماند ایجاد شده در بستر حفره A فشاری است (با مراجعه به شکل های ۲۳، ۲۴ و ۲۵) در نتیجه تنها عامل مؤثر در ایجاد ترک های خستگی در بستر حفره ضریب تمرکز تنش الاستیک در این ناحیه است.

### مراجع

- 1 - Nowell, D., Duo, P. and Stewar, I. F. (2003). "Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage." *Int J Fatigue*, Vol. 25, PP. 963-969.
- 2 - Chen, XI. (2005). *Foreign object damage on the leading edge of a thin blade. Mechanics of materials*, Vol. 37, PP. 447-457.
- 3 - Wikipedia the encyclopedia. *History of jet aircrafts*, <http://en.wikipedia.org/wiki/jet-engine> history.
- 4 - Donachie, M. J. and Donachie, S. D. (2002). "Superalloys" "A Technical guide." *ASM International, USA*, PP. 245-246.
- 5 - Rahmani, Kh. (2008). *Research on the effect of coating on fatigue properties of Ni-base superalloy René 80*, Ph.D. Thesis, Sharif University of Technology, Tehran.
- 6 - Nicholas, T., Thompson, S. R., Porter, W. J. and Buchanan, D. J. (2005). "Comparison of fatigue limit strength of Ti-6Al-4V in tension and torsion after real and simulated foreign object damage." *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, PP. 1637-1643.
- 7 - Chen, XI. Hutchinson, J. W. (2002). "Particle impact on metal substrates with application to foreign object damage to aircraft engines." *Int J Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, PP. 2669-2690.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Foreign Object Damage
- 2- Thermal Barrier Coating
- 3- Crater Base
- 4- Bulge Tip
- 5- Pile Up