

# جبران خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در فورج پره توربین گازی با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی

آرمان خاتونی (کارشناس ارشد)

کارن ابری‌نیا\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف  
دوره‌ی ۳-۱۴۹، شماره‌ی ۱، ص. ۵۳-۵۹

با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود می‌توان آنالیز جریان ماده در طول فرایند فورج، نیروی فورجینگ در هر زمان، توزیع فشار تماسی بین قالب و قطعه‌کار، و نیز خیز کشسان قالب‌های فورج را پیش‌بینی کرد. بنابراین برای جبران مقدار تغییر شکل کشسان قالب باید شکل قالب را با استفاده از تغییر اندازه‌های آن اصلاح کرد. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی، خیز کشسانی قالب در مقاطع مختلف پره به دست می‌آید و با اصلاح پروفیل‌های قالب بالایی و پایینی در این مقاطع و در جهت‌های مخالف آن، خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب جبران می‌شود. با استفاده از این اصلاحات، خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان به مقدار قابل ملاحظه‌ی کاهش خواهد یافت. برای جبران تغییر شکل کشسان قالب باید چندبار شبیه‌سازی انجام داد تا خطای ناشی از این تغییر شکل کمینه شود.

واژگان کلیدی: فورج پره توربین گازی، تغییر شکل کشسان قالب، شبیه‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی.

a.khatouni@ut.ac.ir  
cabrinia@ut.ac.ir

## ۱. مقدمه

دیگر، خواص مکانیکی ترکیبات فورج شده و محدودیت‌های موجود در فورج مقاطع آیرودینامیک بررسی شده است.<sup>[۷،۶]</sup>

با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود دوبعدی مقدار تغییر شکل کشسان قالب به دست آمد و با استفاده از تعریف ضریب وزنی جبران شد.<sup>[۸]</sup> تحقیقات گزارش شده شامل بررسی عواملی است که بر روی فورج دقیق مقاطع آیرودینامیکی تأثیر می‌گذارد و روش‌هایی برای تصحیح تغییر شکل کشسانی قالب با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS عنوان شده است.<sup>[۹]</sup>

بیشتر کارهای انجام شده در خصوص فرایند فورج پره به صورت شبیه‌سازی اجزاء محدود دوبعدی است و با این ساده‌سازی فرایند، خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب جبران شده است. اما با توجه به سه‌بعدی بودن ماهیت فرایند فورج پره، و نیز یکسان نبودن سطح مقطع‌های پره نمی‌توان فرایند را به صورت کرنش صفحه‌یی در نظر گرفت.

در این کار با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی که به وسیله‌ی نرم‌افزار DEFORM ۳D انجام شده، میزان تغییر شکل کشسان قالب در مرحله نهایی فورج و در مقطع‌های مختلف پره به دست آمده است؛ با توجه به این مقادیر، پروفیل‌های قالب بالایی و پایینی در این مقاطع و در راستای مخالف آن اصلاح شده و خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب جبران شده است. با استفاده از این اصلاحات، خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب کم‌تر از قالب‌های اولیه می‌شود. برای

دقت مقطع‌های آیرودینامیکی بستگی به عوامل متعدد -- مانند تغییر شکل کشسان قالب در فورج، تغییر شکل حرارتی و تغییر شکل قطعات به هنگام خنک‌کاری -- دارد. یکی از هدف‌ها برای تولید مقطع‌های آیرودینامیک به‌وسیله‌ی فورج دقیق، حذف ماشین‌کاری بعد از تولید قطعه است. با این حال تغییر شکل قالب در طول فرایند فورج یکی از عوامل اصلی اشکالات به وجود آمده در قطعات آیرودینامیک است. خطاهای به وجود آمده در شکل این مقطع‌ها نه فقط با سیستم CAD/CAM و اندازه‌های هندسی مقطع‌های آیرودینامیک و موقعیت قالب‌های فورج، بلکه به روش‌های طراحی پیش‌فرم مناسب، تعیین شیوه‌های عملیات حرارتی، و روغن‌کاری برای جبران تغییر فرم قطعه احتیاج دارد.

مدل‌های فیزیکی برای بررسی شکل فشار و جریان ماده در قالب برای مقاطع آیرودینامیک به صورت دوبعدی مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>[۱]</sup> تحقیق‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود می‌توان نیروهای تغییر شکل، تأثیر عامل اصطکاک و همچنین تأثیر تغییر شکل کشسان پرس بر دقت قطعات را به دست آورد.<sup>[۲-۴]</sup> تغییر شکل کشسان قالب و انقباض حرارتی مقاطع آیرودینامیک در دمای بیشتر از  $600^{\circ}\text{C}$  توسط محققین محاسبه شده است.<sup>[۵]</sup> در مطالعات

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۴/۶، اصلاحیه ۱۳۹۰/۴/۵، پذیرش ۱۳۹۰/۸/۲۹

جبران تغییر شکل کشسان قالب باید چندبار شبیه سازی را تکرار کرد تا خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب به کمترین مقدار برسد.

## ۲. جزئیات شبیه سازی

با استفاده از نرم افزار ۳D DFORM مراحل فرایند فورج پره شبیه سازی می شود. برای شبیه سازی تأثیرات ترمومکانیکی قطعه کار، یک فرمول بندی صلب-ویسکوپلاستیک با یک فرمول بندی انتقال حرارت جفت می شود. این فرمول بندی براساس اصل تغییر چنین بیان می شود: در میان سرعت های مجاز که شرایط سازگاری  $(\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{v_{ij} + v_{ji}}{2})$  و تراکم ناپذیری  $\dot{\epsilon}_{kk} = 0$  و نیز شرایط مرزی سرعت  $(\sigma_{ij} n_{ij} = \bar{F}_i \text{ on } S_F, v_i = \bar{v}_i \text{ on } S_V)$  را ارضا می کند، حل حقیقی منجر به تابعی می شود که یک مقدار ثابت دارد:

$$\pi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_F} F_i u_i dS \quad (1)$$

$E(\dot{\epsilon}_{ij})$  تابع کار است و برابر است با:

$$E(\dot{\epsilon}_{ij}) = \int_0^{\dot{\epsilon}_{ij}} \sigma'_{ij} d\dot{\epsilon}_{ij} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} \quad (2)$$

محدودیت تراکم ناپذیری بر سرعت های مجاز در معادله ۱ با معرفی ثابت جبران  $(\alpha)$  جایگزین می شود و تغییرات درجه اول تابع ۱ چنین می شود:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + \alpha \int_V \dot{\epsilon}_V \delta\dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS \quad (3)$$

که در آن،  $\bar{\sigma}$  تنش مؤثر؛  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش مؤثر؛  $\dot{\epsilon}_V$  نرخ کرنش حجمی؛  $F_i$  کشش سطحی؛  $\alpha$  ضریب جبران تغییرات حجمی؛  $V$  حجم ترکیب؛  $S_F$  سطح نیرو؛ و  $S_V$  سطح سرعت است.

معادله ۳ به یک معادله ریاضی غیرخطی با استفاده از روش جداسازی اجزاء محدود تبدیل، و سپس حل می شود. این ماده صلب-ویسکوپلاستیک با یک مدل انتقال حرارتی جفت می شود که به صورت یک معادله تعادل انرژی است:

$$(KT_{,i})_{,i} + \dot{r} - (\rho c_p \dot{T}) = 0 \quad (4)$$

در معادله ۴،  $K$  رسانش گرمایی،  $T$  دما؛  $\rho$  چگالی؛  $c_p$  گرمای ویژه؛  $(KT_{,i})_{,i}$  نرخ انتقال حرارت؛  $(\rho c_p \dot{T})$  نرخ انرژی داخلی، و  $\dot{r}$  نرخ تولید حرارت قطعه کار به علت تغییر شکل خمیری است که برابر است با:

$$\dot{r} = \alpha \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \quad (5)$$

$\alpha$  بخشی از انرژی مکانیکی است که به گرما تبدیل می شود.

توزیع دما در قطعه کار یا قالب به آسانی و با حل معادله تعادل انرژی اجرا می شود که با استفاده از روش باقی مانده وزنی به صورت معادله ۶ بیان می شود:

$$\int_V KT_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \alpha \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \delta T dV - \int_V \rho c_p \dot{T} \delta T dV = \int_S q_n \delta T dS \quad (6)$$

$q_n$  شار حرارتی عمود بر سطح مرزی.

معادله ۶ هم با استفاده از روش جداسازی اجزاء محدود به یک سری معادلات ریاضی تبدیل می شود که با روشی استاندارد حل می شود. در عمل برای حل مسائل

حرارتی و مکانیکی از یک روش تناوبی استفاده می شود. در شبیه سازی شکل دهی حجمی بیشتر از مدل اصطکاک برشی استفاده می شود که به صورت معادله ۷ تعریف می شود:

$$f_s = mk \quad (7)$$

که در آن،  $f_s$  تنش اصطکاک؛  $k$  تنش تسلیم برشی، و  $m$  ضریب اصطکاک است.

## ۳. مدل سازی فرایند

فورج پره های توربین گازی که جنس آن از سوپرآلیاژهاست احتیاج به فرم دادن چندمرحله ای -- شامل اکستروژن، کله زنی، پیش فرم فورج و مرحله های نهایی فورج -- دارد. با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود می توان آنالیزی از جزئیات عمل فورج را با پیش فرم ها و شرایط مختلف فورج نشان داد.

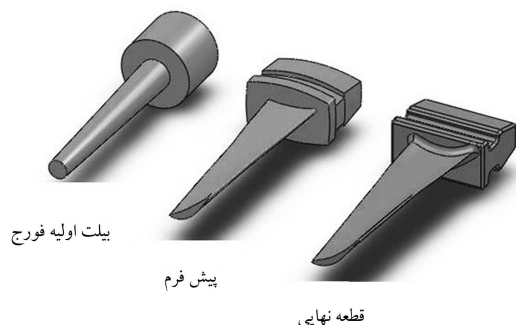
بره ای که در این تحقیق مورد تحلیل قرار گرفته است پره ردیف چهارم توربین گازی سولزر است که جنس آن از سوپرآلیاژ پایه نیکل Nimonic-۸۰ A (شکل ۱). همان طور که از شکل پره نمایان است قسمت ایرفویل پره دارای سطح مقطع های متفاوت است به گونه ای که هرچه از ریشه دورتر می شویم مساحت مقاطع ایرفویل کوچک تر می شود. به همین دلیل نمی توان فورج پره را به صورت مستله ای دوبعدی تحلیل کرد و لذا باید قسمت ایرفویل پره به پنج سطح مقطع تقسیم شود (شکل ۲) و خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در این سطح مقطع ها بررسی و جبران شود. همچنین اختلاف سطح مقطع ها در قسمت ایرفویل پره در شکل ۲ نمایان است.

## ۳.۱. معرفی مشخصات ماده

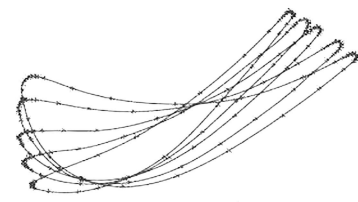
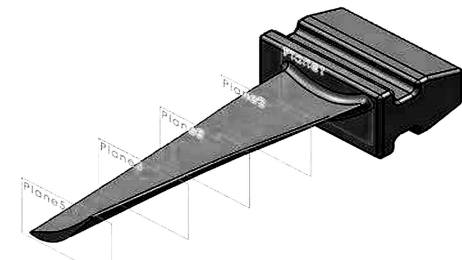
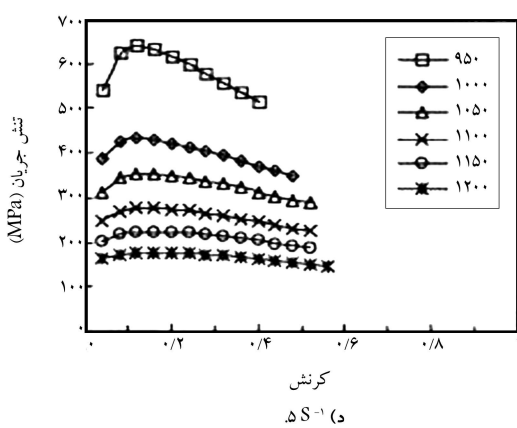
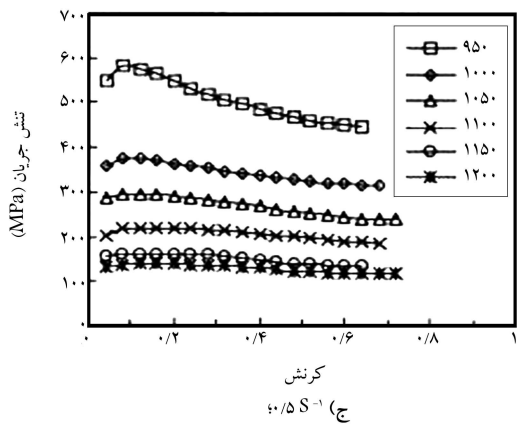
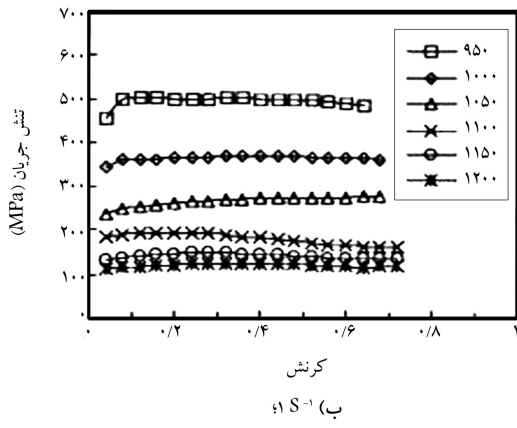
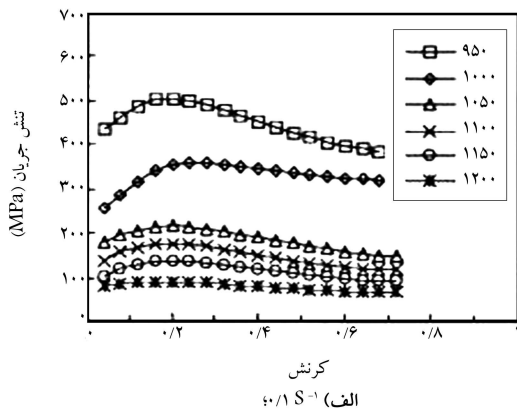
چنان که در قسمت قبل اشاره شد جنس پره از سوپرآلیاژ پایه نیکل Nimonic-۸۰ A است، که منحنی تنش-کرنش آن در دما و نرخ کرنش های مختلف در شکل ۳ نمایان است. جنس قالب نیز از فولاد گرمکار H۱۳ انتخاب شده که خواص مکانیکی آن در شکل ۴ آمده است.

## ۳.۲. شبیه سازی

با استفاده از نرم افزار ۳D DEFORM مرحله های نهایی فورج مورد بررسی قرار می گیرد. در شبیه سازی مرحله نهایی فورج، که شرایط آن در جدول ۱ آمده است، قطعه کار به صورت خمیری و قالب به صورت صلب در نظر گرفته می شود. پس از انجام شبیه سازی، نمودار نیروی لازم برای انجام عملیات در مقابل جابه جایی به دست



شکل ۱. بیلت اولیه ی فورج، پیش فرم و قطعه نهایی.



شکل ۲. تقسیم ایرفویل به قسمت‌های مساوی.  
جدول ۱. شرایط فرایند برای شبیه‌سازی اجزاء محدود.

مقدار	پارامتر
۱۲۰۰°C	دمای اولیه‌ی قطعه‌کار
۳۰۰°C	دمای قالب
۲۰°C	دمای محیط
۰٫۳	ضریب اصطکاک
۴(N/(s mm°C))	ضریب انتقال حرارت
۵ mm/s	سرعت پرس
۲۰۸۹۵۸	تعداد اجزاء

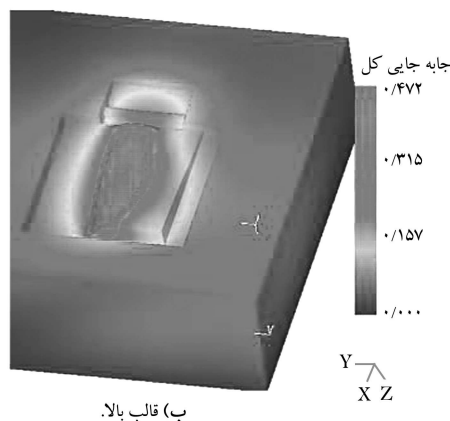
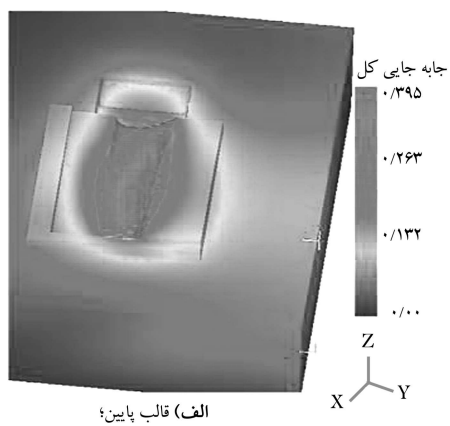
می‌آید که در شبیه‌سازی دیگری که در آن قالب‌ها به صورت کشسان در نظر گرفته می‌شود نیرو از قطعه کار بر روی قالب میان‌یابی می‌شود و این نیروی وارده بر روی قالب باعث به وجود آمدن تغییر شکل کشسانی در قالب‌های بالا و پایین می‌شود که این تغییر شکل در پنج مقطع مختلف پره مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ اجزاء بندی قالب‌های بالا و پایین نشان داده شده است (از اجزاء چهاروجهی استفاده شده است).

#### ۴. نتایج و بحث

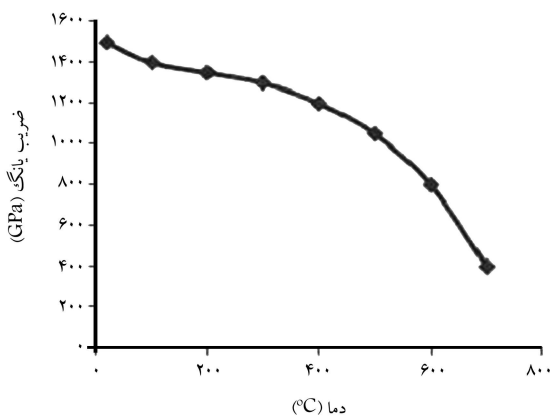
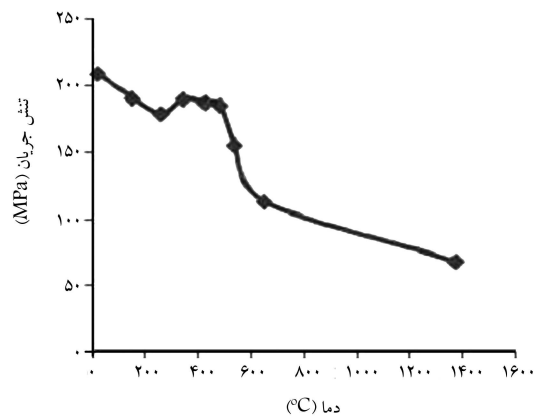
##### ۱.۴. تغییر شکل کشسان قالب

بعد از انجام شبیه‌سازی مقدار خیز قالب در قالب بالا و پایین قابل مشاهده است. مقدار خیز قالب در قسمت ایرفویل پره بیشترین مقدار است؛ چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، این مقدار به سمت مثبت محور  $y$  کشیده شده که به دلیل شکل پره است. در شکل ۷ مقدار خیز قالب در دو جهت عمودی ( $z$ ) و افقی ( $y$ ) در مقطعی از قالب نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود محدوده خیز قالب در جهت عمودی  $z$  (۰٫۳۳۷-۰٫۴۳۵) است که حاصل آن خطای شکل حدود ۰٫۸ میلی‌متر است و در جهت افقی  $y$  (۰٫۲۲۱-۰٫۲۴۰) است که نشان‌گر به وجود آمدن خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در حدود ۰٫۴۵ میلی‌متر در این راستاست. در شکل ۸ نیز مقدار تغییر شکل کشسان قالب در پنج مقطع از ایرفویل پره نشان داده شده است.

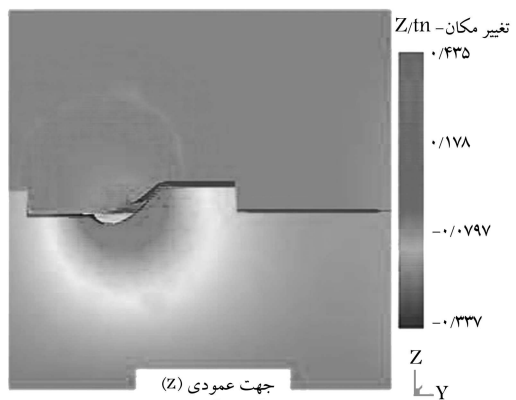
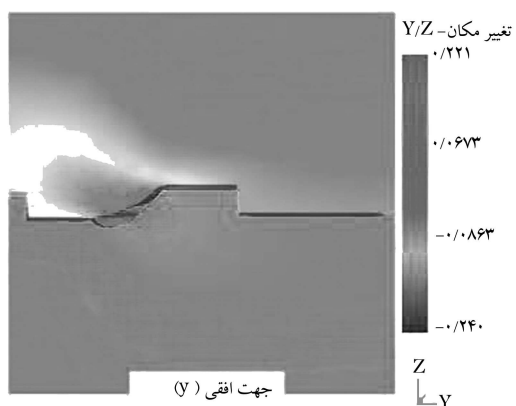
شکل ۳. مشخصات جریان ماده در دماهای بالا و نرخ کرنش‌های متفاوت. [۱۰]



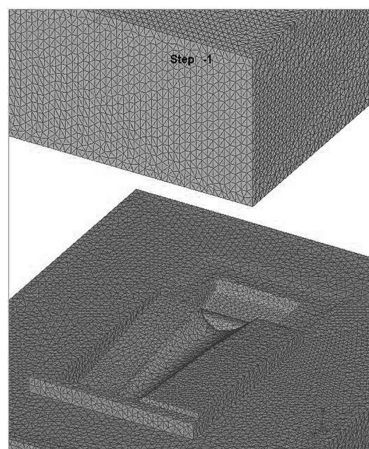
شکل ۶. خیز کلی قالب.



شکل ۴. خواص مکانیکی فولاد گرمکار H۱۳ [۱۱].



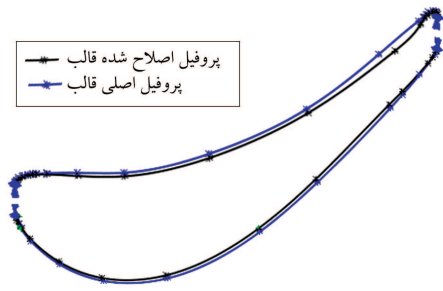
شکل ۷. خیز قالب در دو راستای عمودی (z) و افقی (y) در مقطعی از قالب.



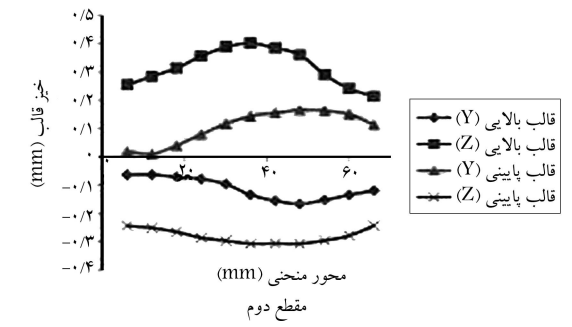
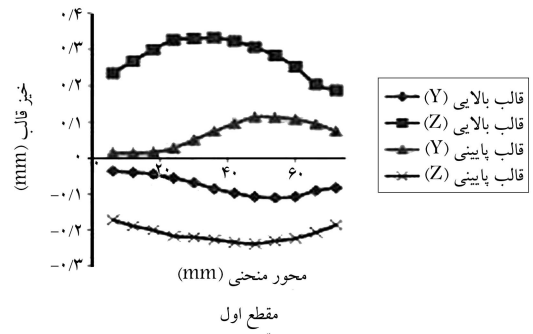
شکل ۵. قالب‌های فورج بالا و پایین اجزاء بندی شده.

#### ۲.۴. جبران خطای ناشی از تغییر شکل کشسانی قالب

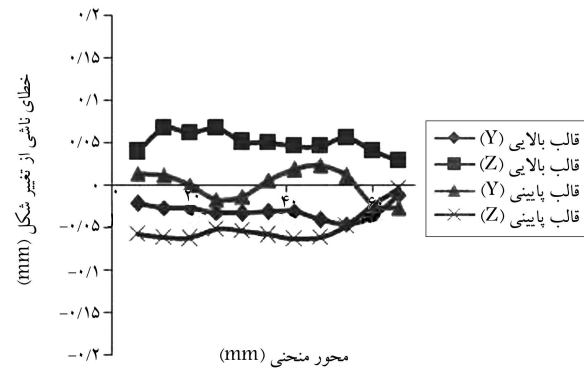
با توجه به نتایج به دست آمده از بخش قبلی و به دست آوردن خیز قالب در مقطع‌های پره، حالا نوبت جبران آن می‌رسد. چنان که در شکل ۸ نشان داده شده، خیز قالب در پنج مقطع از پره به دست آمده که نمایانگر اختلاف مقادیر تغییر شکل در مقطع‌های مختلف ایرفویل پره است. با اصلاح پروفیل قالب بالایی و پایینی در این مقاطع، این مقدار خیز در دو جهت افقی و عمودی، و نیز در خلاف جهت خیز به وجود آمده جبران می‌شود. در شکل ۹ نحوه‌ی این جبران در پروفیلی از قالب بالایی و پایینی قابل مشاهده است. چنان که مشاهده می‌شود پروفیل اصلاحی به نازک‌تر



شکل ۹. پروفیل اصلی و اصلاح شده قالب.



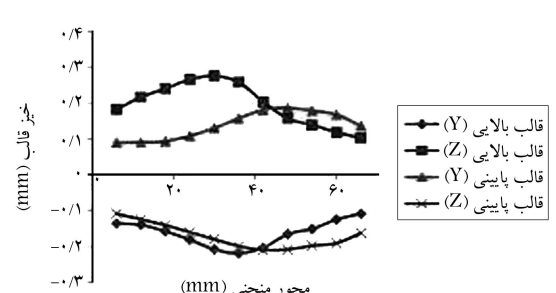
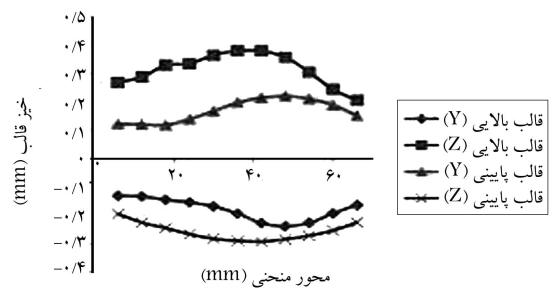
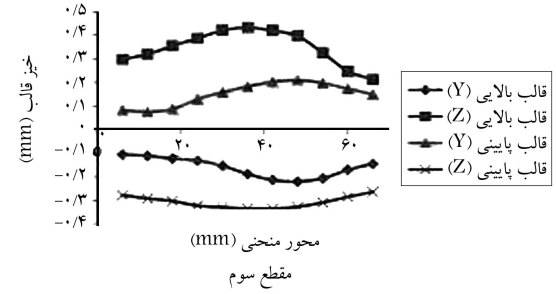
شکل ۱۰. خیز قالب در مقطع سوم ایرفویل پره، بعد از اصلاح اولیه پروفیل پره.



شکل ۱۱. خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در مقطع سوم پره بعد از اصلاح اولیه قالب.

شدن مقطع پره می‌انجامد. پس از اصلاح پروفیل قالب و جبران خطای ناشی از خیز قالب، شبیه‌سازی دیگری با استفاده از این قالب‌های اصلاح شده انجام می‌شود و مرحله نهایی فورج شبیه‌سازی می‌شود. سپس با تحلیل قالب‌ها مقدار تغییر شکل کشسان قالب به دست می‌آید، و مثل مراحل قبل می‌توان مقدار خیز قالب را در مقطع‌های پره به دست آورد.

در شکل ۱۰ خیز قالب بعد از جبران در مقطع سوم پره که بیشترین مقدار خیز در این مقطع اتفاق می‌افتد به‌طور مثال نشان داده شده است. از این شکل پیداست که خیز قالب‌های اصلاح شده بیشتر از حالت قبلی است و دلیل آن افزایش نیروی فورج در مقایسه با حالت قبلی است؛ چرا که با اصلاح قالب، مقطع پره نازک‌تر می‌شود و به‌همین دلیل نیروی عملیاتی افزایش می‌یابد. با توجه به داشتن خیز قالب قبل و بعد از اصلاح می‌توان خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب را به دست آورد (شکل ۱۱). چنان‌که در این شکل نمایان است مقدار خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب با انجام اصلاح اولیه در راستای عمودی از ۰/۸ به ۰/۱۵



شکل ۸. خیز قالب در پنج مقطع از ایرفویل پره، قبل از اصلاح پروفیل پره.

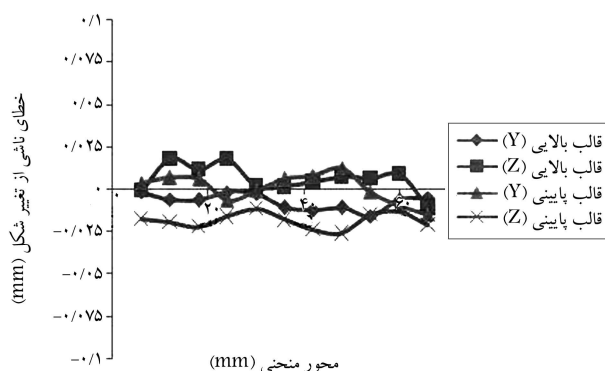
## ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی، خیز ناشی از تغییر شکل کشسان قالب -- که بر شکل پروفیل پره تأثیر می‌گذارد -- پیش‌بینی و سپس با انجام شبیه‌سازی‌های دیگر خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب کاهش داده شد. با تقسیم‌کردن ایرفویل پره -- که نسبت به قسمت ریشه پره بیشترین خیز را دارد -- به پنج مقطع و به دست آوردن خیز در هر مقطع، هندسه‌ی آن اصلاح شد. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان چنین برشمرد:

۱. در فرایندهای فرم‌دهی، به‌ویژه فرایند فورج پره خیز قالب با پروفیل قالب فرضی منجر به خطاهایی در قطعه کار می‌شود که مقدار آن در مقطع میانی بیشتر است. تغییر شکل عمودی قالب به میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی اشاره دارد، در حالی که خیز افقی قالب ناشی از نیروی افقی و نیز هندسه‌ی سطح است.
۲. خطاهای ناشی از خیز کشسان، با اصلاح موقعیت قالب براساس مقدار خیز آن قابل جبران است، که با طراحی نازک‌تر قطعه کار همراه است.
۳. با انجام دوبار اصلاح بر روی پروفیل قالب، خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در راستای عمودی و افقی بیشتر از ۹۰ درصد کاهش داده شد.

## تقدیر و تشکر

در پایان از حمایت مالی بازرگانی شرکت پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران کمال تشکر را دارد.



شکل ۱۲. خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در مقطع سوم پره بعد از اصلاح ثانویه قالب.

میلی‌متر و در راستای افقی از ۰/۴۵ به ۰/۰۸ میلی‌متر رسیده است، ولی از آنجا که با انجام اصلاح‌سازی دیگری می‌توان این مقدار را دوباره کاهش داد، اصلاح دیگری بر روی پروفیل قالب انجام می‌شود که بعد از این اصلاح ثانویه و به دست آوردن خیز قالب، مقدار خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در راستای عمودی از ۰/۱۵ به کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، و در راستای افقی از ۰/۰۸ به کم‌تر از ۰/۰۴ میلی‌متر رسیده است (شکل ۱۲). با توجه به نتایج ارائه‌شده، مقدار خطای ناشی از تغییر شکل کشسان قالب در راستای افقی ۹۲٪ و در راستای عمودی حدود ۹۵٪ کاهش یافته است که با نتایج به دست آمده از کار دویعدی محققین، که در آن خطای شکل در حدود ۹۳٪ کاهش یافته، مطابقت خوبی نشان می‌دهد.<sup>[۹]</sup>

## منابع (References)

1. Boer, C.R.; Rebelo, N.; Rydstad, H. and Schroder, G., *Process Modelling of Metal Forming and Thermomechanical Treatment*, Springer-Verlag, Berlin (1986).
2. Kang, B.S.; Kim, N. and Kobayashi, S. "Computer-aided preformdesign in forging of an airfoil section blade", *Int. Journal Mach. Tools Manuf.*, **30** pp. 43-52 (1990).
3. Soltani, B.; Mattiasson, K. and Samuelsson, A. "Implicit and dynamicexplicit solutions of blade forging using finite element method", *Journal Mat. Process Technol.*, **45**, pp. 69-74 (1994).
4. Balendra, R. and Ou, H. "Influence of forming press elasticity on the accuracy of formed components", *Advanced Technology of Plasticity, Proc. 5th Int. Conf. Technology of Plasticity*, Columbus, OH, **1**, pp. 291-294 (1996).
5. Lu, X. and Balendra, R. "Thermoplastic considerations for simulation of nett-forming of turbine aerofoils", *Proc. 11th Int. Conf. of Computer-Aided Production Engineering*, London, pp. 67-72 (1995).
6. Voigtlander, O. and Gunther, G. "Isothermal precision forging aero-engine compressor blades made in titanium alloys", *Metallurgia*, **50** pp. 322-326 (1983).
7. Puschnik, H.; Zeiler, G.; Fladischer, J.; Eber, W. and Keienburg, K.H. "Udimet 720 turbine blades-production and properties", *MetallItal*, **82**, pp. 473-476 (1990).
8. ABAQUS 5.5 User Manual, Hibbit, Karlsson and Sorensen (1995).
9. Ou, H. and Balendra, R. "Die-elasticity for precision

- forging of aerofoil sections using finite element simulation”, *Materials Processing Technology*, **76**, pp. 56-61 (1998).
10. Kim, D.K.; Kim, D.Y.; Ryu, S.H and Kim, D.J. “Application of nimonic 80A to the hot forging of an exhaust valve head”, *Materials Processing Technology*, **113**, pp. 148-152 (2001).
  11. Babu, S.; Ribeiro, D. and Shivpuri, R., *Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies*, The Ohio State University (1999).