



## بررسی اثر خواص مواد بر زاویه خمکاری و توزیع حرارت در شکل‌دهی با اشعه لیزر

شمس تراب نیا<sup>۱</sup>، جلیل رضایی پزند<sup>۲</sup>

۱- گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

### چکیده

یکی از جدیدترین روش‌های شکل‌دهی مواد، فرم‌دهی به وسیله اشعه لیزر یا لیزر فرم (LaserForm) است. این شیوه، با حرارت دادن موضعی ماده و استفاده از تنش‌های حرارتی ایجاد شده در آن موجب تغییر شکل می‌شود. به علت وابستگی این فرآیند به خواص حرارتی و مکانیکی ماده و تغییرات این خواص در دماهای مختلف می‌توان با کمک آن فلزات سخت و همچنین قطعات ظریف را شکل‌دهی نمود. از این روش در تولید قطعات پیچیده هواپیما و پرتابه‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله به بررسی این روش شکل‌دهی با نرم افزارهای آلمان محدود و آرایه فرمولاسیون خمکاری به وسیله اشعه لیزر پرداخته می‌شود. در این تحقیق خواص ماده وابسته به دما بررسی شده است و در مراحل مختلف خواص مختلف ماده به صورت مستقل از دما و با مقادیر متفاوت بررسی می‌شود. نتیجه این تحقیق آرایه یک مدل برای پیش‌بینی زاویه خمش و همچنین توزیع حرارت روی سطح می‌باشد. در پایان همانطور که ذکر شد اثر خواص ماده بر زاویه خمش و تغییرات ناشی از آن بررسی شده است. این مدل برای پروسه‌های پیچیده‌تر قابل استفاده است حال آنکه پایداری به فراخور شرایط فرضیات را تغییر داد و بهینه سازی نمود. با وجود اینکه این روش دوران تحقیقات خود را می‌گذرانند، از هم‌اکنون به عنوان روشی اقتصادی و کارآمد برای تولید قطعات سازه هواپیما مطرح شده است و علاوه بر شرکت‌های آمریکایی، شرکت‌های ژاپنی، انگلیسی، استرالیایی و چینی هم بر روی صنعتی نمودن این فرآیند تحقیقات فراوانی انجام داده اند.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی با لیزر - تحلیل آلمان محدود - خواص مواد

### مقدمه

تولید نور لیزر به دهه ۶۰ میلادی بازمی‌گردد و تقریباً از همان ابتدا ایده استفاده از آن در ساخت و تولید قطعات خاص مطرح گردیده است، اما در اوایل دهه ۸۰ کاربرد جدیدی برای اشعه لیزر کشف شده و آن فرم دادن قطعات پیچیده فلزی به کمک اشعه لیزر است. طراحی این روش در سال ۱۹۸۰ در انستیتوی فناوری ماساچوست (MIT) در پاسخ به مساله طرح شده از سوی انجمن جوشکاری ژاپن آغاز شد. در این برنامه پرتو لیزر یا لایر در راستای یک خط بر سطح فولاد تابانده شد و تغییر شکل‌های ناشی از حرارت در ورق فولادی بررسی شد. پس از آن طی سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۷ برنامه ای برای تولید قطعات کشتی با روش شکل‌دهی با لیزر از ورق‌های فولادی اجراء شد [۱]. شکل دهی با لیزر آلایزهای تیتانیوم کلاس هوافضایی مانند Ti6Al4V توسط موسسه آرومت (AeroMet) انجام شده و پروسه خاصی تحت عنوان لسفرم (Lasform) تعریف شده است [۲].

آزمایش کشش نشان داده است قطعات شکل‌دهی شده به وسیله لیزر خواص مکانیکی بهتری از قطعات فرم‌دهی معمولی دارند [۳]. تاکنون، پیش‌نمونه سازه هواپیمای F/A ۱۸ در اندازه واقعی برای آزمایش قطعات و تایید صلاحیت برای تولید انبوه، با لیزر، فرم‌دهی شده است. در عین حال بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد این روش، نسبت به سایر روشهای تولید برتری های منحصر به فردی دارد، این فرآیند می‌تواند به راحتی به صورت خودکار انجام شود زیرا تمامی پارامترهای آن کاملاً کنترل پذیرند و بنابراین می‌توان به دقت بسیار بالایی در تولید دست یافت. از نظر دور ریز مواد خام در مقایسه با سایر روشها بهینه است. به دلیل کنترل پذیری دقیق محل اشعه لیزر می‌توان به وسیله آن شکلهای پیچیده و دقیق تولید نمود و به علاوه در این شیوه خرابی ایزار حداقل است زیرا اصولاً تماس بین ایزار و قطعه کار حذف شده است که خود یکی از مهمترین عوامل خرابی ایزار می باشد.

در اوایل دهه ۹۰ میلادی در دانشگاه ارلانگن در آلمان برای نخستین بار شبیه سازی یک بعدی رایانه‌ای شکل دهی به وسیله اشعه لیزر انجام گرفت، در این تحقیق اثراتی مانند انتقال حرارت و زاویه خمش بررسی شد. محققین از یک ابر رایانه به نام CRAY YMP-EL استفاده نمودند [۴]. در دانشگاه دترویت مرس می‌شیکان شبیه سازی آلمان محدود دوبعدی شکل دهی با لیزر انجام گرفت که بسیاری از جزئیات این شیوه را شبیه‌سازی می‌نمود [۵]. پس از آن شبیه سازی های زیادی بر روی دامنه دوبعدی و سه بعدی انجام گرفته است و سعی شده روی دقت شبیه سازی تحقیقاتی انجام پذیرد.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - گرایش ساخت و تولید . ۰۹۱۲۴۰۵۰۳۴۸ . Shams.Torabnia@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مکانیک

در تحقیق پیش رو یک تحلیل سه بعدی ترمو الاستوپلاستیک المان محدود شکل دهی با اشعه لیزر انجام گرفته است و نتایج آن با تئوری های موجود مقایسه شده است.

#### اصول شکل دهی به کمک اشعه لیزر و مدل سازی

در این روش (شکل ۱) ماده، به کمک پرتو لیزر در راستای مورد نظر حرارت داده می شود و سپس با توجه به اینکه لایه های فوقانی و زیرین در ورق به طور یکسان گرم نمی شوند، در لایه های بالایی انبساط بیشتر و در لایه های پایینی انبساط کمتری رخ می دهد. به همین علت گشتاور خمشی نسبتاً بزرگی ایجاد می شود که باعث تاب برداشتن فلز در راستای اعمال حرارت می شود. (شکل ۲) [۶].

پس از این مرحله فلز را سرد می نمایند، در نتیجه سطوح بالایی به اندازه خیلی خود منقبض می شوند. اما سطوح کشیده شده پایینی مانع این کار هستند. لذا گشتاور خمشی در جهت مخالف گرم کردن ایجاد می شود و این گشتاور خمشی موجب تاب برداشتن مجدد صفحه در راستای مخالف می گردد. اگر میزان تنش تولید شده در اثر این گشتاور خمشی بزرگتر از تنش تسلیم جسم باشد، فلز تحت فرآیند شکل دهی قرار می گیرد (شکل ۳).

در مرحله حرارت دهی به علت اثر ضریب انتقال حرارت، سطح گرم می شود که میزان گرم شدن سطح ارتباط مستقیم با قطر اشعه دارد. از پارامترهای دیگر این مرحله می توان به قدرت اشعه و ضخامت ورق اشاره نمود.

در مرحله سرد کردن، میزان انتقال حرارت در این حالت (با توجه به تغییرات ملکولی جسم جامد)، میزان انحنای ورق در اثر تغییر شکل، ضخامت آن و دمای محیط از پارامترهای موثر به شمار می آیند.

در زمینه زاویه خم کاری افرادی مانند گیگر و ولرستن [۷] و [۸] تحقیقاتی انجام داده اند و نتیجه آن روابط زیر است که در هر یک مشخصات فیزیکی اشعه لیزر و سطح قطعه کار دیده می شود.

$$\alpha = \frac{180\sqrt{2}}{5\pi\sqrt{\pi}} \frac{AP}{\sqrt{rv}} \frac{\alpha_h \sqrt{a}}{kz_0} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{3\alpha_h PA}{\rho c_p v z_0^2} \quad (2)$$

در روابط فوق  $\alpha$ : ضریب جذب،  $P$ : قدرت اشعه لیزر بر حسب وات،  $r$ : شعاع لیزر (متر)،  $\alpha_h$ : ضریب انبساط حرارتی،  $k$ : ضریب انتقال حرارت (وات بر متر کلوین)،  $c_p$ : گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)،  $\rho$ : چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $a$ : فاکتور هدایت،  $v$ : سرعت اسکن سطح (متر بر ثانیه) و  $z_0$ : ضخامت ورق (متر) است.

یان [۹] یک مدل تئوری دیگر پیشنهاد داده است که بر اساس این مدل زاویه خم از فرمول زیر حساب می شود.

$$\alpha = \frac{3\alpha_h PA}{\rho c_p v z_0^2} \frac{7}{2} - 36 \frac{r}{z_0} \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

رابطه "یان" از دو رابطه دیگر کامل تر و جامع تر است و عوامل بیشتری را مورد بررسی قرار داده است. در این رابطه  $E$  مدول یانگ و  $\sigma$  استحکام تسلیم (هر دو بر حسب پاسکال) هستند. با تغییر هر

کدام از پارامترها و ثابت نگه داشتن سایر عوامل می توان به معیاری مناسب برای مقایسه دست یافت.

با توجه به تحلیل های صورت گرفته مشخصات فیزیکی و حرارتی مواد (ضریب انبساط حرارتی، گرمای ویژه، انتقال حرارت، چگالی) و خواص مکانیکی ماده (مدول یانگ، استحکام تسلیم، ضریب سخت شدگی) هر دو در پروسه فرم دهی با لیزر موثرند، این پارامترها همگی وابسته به دما هستند و تغییرات آنها در دماهای مختلف بسیار وسیع است [۱۰]. به علاوه اثرات خواص مختلف مکانیکی بر شکل دهی با لیزر متفاوت است. با توجه به آنچه گفته شد یابستی رابطه بین خواص مواد و زاویه خمش درک شود تا بتوان به پارامترهای بهینه پروسه دست یافت. با کمک روش اجزای محدود می توان پروسه را شبیه سازی نمود. بدین واسطه می توان شکل دهی با لیزر را به راحتی و با گستره عمل کرد وسیع بررسی نمود. مقاله حاضر با تحلیل ترکیبی حرارت و جابه جایی (Thermo-Displacement) به شبیه المان محدود یک ورق فلزی با نرم افزار آباکوس (ABAQUS) و مقایسه نتایج با زاویه خمش محاسبه شده توسط روشهای تحلیلی، به بررسی این شبیه پرداخته است.

#### روش تحقیق

همان گونه که اشاره شد هدف به دست آوردن مدل بهینه برای شبیه سازی پروسه شکل دهی با لیزر و ارایه فرمولاسیون بهینه برای مدل ارایه شده می باشد. از شرایط حرارتی (هدایت حرارتی) در راستای طولی صرف نظر می شود و تغییر شکل کلی در نظر گرفته می شود. جوزفسون نشان داده این فرضیات در شرایطی که سرعت حرکت لیزر بسیار بالا و طول ورق به حد کافی طولانیست معتبر است [۱۱].

ورق در ابتدا بدون تنش است. ماده الاستیک کاملاً پلاستیک و هموزن و ایزوتروپیک است و از تئوری وان میسر پیروی می کند. تنش تسلیم در کشش و فشار برابر است (ماده در کشش و فشار رفتار مشابهی از خود نشان می دهد) تنشهای خزشی قابل صرف نظر است.

به منظور محاسبه شار حرارتی ناشی از تابش اشعه لیزر روی سطح ورق از رابطه زیر استفاده می شود.

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_s^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

این رابطه توزیع شار حرارتی بر ناحیه تابش را گوسی فرض می کند و در آن  $I_b$  متغیر شعاعی به مرکز اشعه لیزر است. مقدار شار متوسط با توجه به رابطه (۴) از روش زیر محاسبه می شود.

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r I(2\pi r_s) dr_s \quad (5)$$

$$= \frac{2\pi}{\pi r^2} \int_0^r \frac{2AP}{\pi r_s^2} \exp\left(-\frac{2r_s^2}{r^2}\right) (r_s) dr_s = \frac{0.865AP}{\pi r^2}$$

در تحلیل نرم افزاری انجام گرفته در محیط آباکوس، اشعه، مربعی فرض شده است. توضیح اینکه در تحلیل های مقدماتی انجام شده اثر اشعه دایره ای بررسی شد و نتیجه آن ایجاد تمرکز تنش ناخواسته و

همچنین ایجاد تغییر شکل‌های غیر واقعی بود که دلیل آن بهم-ریختگی مش‌ها در اثر شکل دایره‌ای محل اثر حرارت بود. همچنین از آلمان C2DAT برای مشخص‌سازی مجموعه استفاده شده‌است که یک آلمان ترکیبی اثر حرارت و جابه‌جایی می‌باشد. مشخص‌سازی مورد استفاده در این تحلیل در شکل ۴ آمده است.

در این شبیه‌سازی ابتدا یک حالت عمومی ماده با خواص فیزیکی - مکانیکی - حرارتی وابسته به دما مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل با تئوریهای ذکر شده مقایسه می‌شود، سپس هریک از مشخصات ماده مورد نظر به صورت مستقل از دما فرض می‌شود در شرایطی که سایر خواص وابسته به دما در نظر گرفته می‌شوند. ابعاد مدل و شرایط شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - شرایط شبیه‌سازی

ابعاد ورق (میلیمتر)	جنس ورق	مشخصات اشعه
۲۰×۲۰×۴۰	فولاد	لیزر ۱۰۰۰ وات با سرعت اسکن ۲۵ میلیمتر بر ثانیه

خواص فولاد معمولی وابسته به دما بر اساس مرجع [۱۲] و [۱۳] در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ - خواص فولاد معمولی [۱۲] و [۱۳]

T °C	$\nu$	E GPa	Ye MPa	k W/mK	Cp J/KgK	$\alpha \times 10^{-6}$	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>
۲۰	-۰.۳۰۰	۱۹۹.۶۷	۳۷۱.۹۶	۵۱.۹	۴۸۶	۱.۱۷	۷۸۶۰
۱۰۰	-۰.۳۰۹	۱۹۹.۶۰	۳۶۹.۱۹	۵۱.۱	۴۸۶	۱.۱۷	۷۸۳۷.۵
۲۰۰	-۰.۳۲۰	۱۹۹.۳۰	۳۶۲.۰۸	۴۸.۶	۴۹۸	۱.۲۲	۷۸۱۵
۳۰۰	-۰.۳۳۱	۱۹۸.۰۴	۳۴۷.۰۰	۴۴.۴	۵۱۵	۱.۲۸	۷۷۹۲.۵
۴۰۰	-۰.۳۴۲	۱۹۲.۹۴	۳۱۷.۵۱	۴۲.۷	۵۳۶	۱.۳۳	۷۷۷۰
۵۰۰	-۰.۳۵۳	۱۷۴.۳۱	۲۶۷.۹۹	۳۹.۴	۵۵۷	۱.۳۸	۷۷۴۷.۵
۶۰۰	-۰.۳۶۴	۱۲۵.۳۱	۲۰۲.۸۰	۳۵.۶	۵۸۶	۱.۴۴	۷۷۲۵
۷۰۰	-۰.۳۷۵	۶۱.۷۰	۱۳۹.۸۷	۳۱.۸	۶۱۹	۱.۴۸	۷۷۰۲.۵
۸۰۰	-۰.۳۸۶	۲۶.۲۹	۹۴.۹۰	۲۶	۶۹۱	۱.۴۸	۷۶۸۰
۹۰۰	-۰.۳۹۷	۱.۴۹۶	۶۹.۲۰	۲۶.۴	۶۹۵	۱.۴۸	۷۶۵۷.۵
۱۰۰۰	-۰.۴۰۸	۱۲.۰۳	۵۶.۳۵	۲۷.۲	۷۰۰	۱.۴۸	۷۶۳۵
۱۶۰۰	-۰.۵۰۰	۱۱.۱۰	۴۵.۵۰	۱۲۰	۷۰۰	۱.۴۸	۷۵۰۰

### اعتبار سنجی شبیه‌سازی

به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی انجام گرفته از مقایسه نتایج حالت عمومی با فرمولهای ارایه شده استفاده می‌شود. جدول ۳ نتایج مقایسه‌های صورت گرفته با نتایج تئوری را نشان می‌دهد که بر درستی نتایج دلالت دارد.

جدول ۳ - مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عمومی با

مدلهای تحلیلی	شبه‌سازی	گیگر [۷]	ولرستن [۸]	یان [۹]
۰.۴۷۶۹۵۱°	۰.۴۳۰۱۱۶°	۰.۴۸۵۶۳۱°	۰.۴۴۹۰۲۳°	

با نگاهی به روابط (۱) و (۲) و (۳) می‌توان علت اختلاف بین جواب‌های موجود را دریافت اما آنچه مهم است این نکته است که در این پروسه به دلیل ماهیت موضعی بار، گرادیان حرارت و همچنین وابستگی خواص موارد به حرارت نمی‌توان تنها با داشتن یک فرمول ساده به درستی جواب اعتنا نمود. فرمول‌های ارایه شده همانطور که ذکر شد تجربی هستند و در شرایط خاص دارای جواب قابل قبولند. بنا بر این تنها برای کنترل درستی جواب می‌توان از آنها بهره‌جست و در مورد دقت نمی‌توان نظری داد.

### نتایج و جمع‌بندی

نتایج به دست آمده از تحلیل در شکلهای ۵ تا ۱۱ ارایه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تحلیل‌های ارایه شده خواص مختلف ماده را مورد بررسی قرار داده‌اند و هر کدام نتایجی در خور توجه دارند.

شکل ۵ توزیع حرارت را در تحلیل عمومی روی سطح نشان می‌دهد. با توجه به موضعی بودن بار مشاهده می‌شود حرارت دارای نواحی همدمايي به مرکزیت محدوده اعمال اشعه می‌باشد. این محدوده‌ها باعث ایجاد خواص مختلف مواد و تنشهای متفاوت حرارتی می‌شوند که در شکل ۶ به خوبی نمایان است. از آنجایی که

بار حرارتی بر خلاف بار مکانیکی ناشی از سنبه خمش مایل به انتقال در کل حجم ورق است اثرات تنش ناشی از حرارت در بیشتر حجم ورق مشاهده می‌شود. شکل ۷ نتیجه نهایی تغییر شکل ناشی از حرارت دهی موضعی ورق با اشعه لیزر را نمایش می‌دهد. در اینجا می‌توان دید که خمش به خوبی و بدون ایجاد اثرات نامطلوب (تغییر شکلهای ناخواسته) روی ورق انجام گرفته است.

پس از بررسی مدل عمومی، همانگونه که پیشتر ذکر شد به شبیه‌سازی تغییرات برخی خواص مکانیکی و حرارتی و فیزیکی ماده به منظور دستیابی به یک جمع‌بندی کلی پرداخته شده است.

شکل ۸ تغییرات ضریب انتقال حرارت یا هدایت حرارتی روی حجم ورق را بررسی می‌کند. همانطور که از نمودار مشخص است هر چه هدایت حرارتی بالاتر برود زاویه خمش کمتر می‌شود، دلیل این پدیده انتقال سریع‌تر حرارت در محیط و بالارفتن "کمتر" دما در هر قسمت می‌باشد. برای توصیف بهتر می‌توان محیط را به یک مقاومت در یک مدار الکتریکی تشبیه کرد و جریان حرارت را مانند

جریان الکتریکی دید. هر چه مقاومت بالاتر باشد به فراخور جریان دمای بیشتری تولید می‌کند.

شکل ۹ اثر تغییرات انبساط حرارتی بر زاویه خمش را نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رود انبساط حرارتی بالاتر به معنی زاویه خمش بزرگتر است.

اثر تغییر گرمای ویژه بر زاویه خمش در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. هر چه مقدار گرمای ویژه یک ماده بیشتر باشد زاویه خمش کوچکتر است.

در شکل ۱۱ اثر افزایش مدول الاستیک بر زاویه خمش دیده می‌شود. از این نمودار می‌توان استنباط نمود افزایش مدول

سازد. بنا بر مباحث مطرح شده برخی خواص مواد تاثیر مثبتی بر فرآیند می گذارند و برخی تاثیر منفی، حال آنکه تعیین و تشخیص اینکه تغییر شکل نهایی یک ماده، یا توجه به آنچه ذکر شد، چگونه است، نیازمند شبیه سازی و آزمایش دقیق فرآیند شکل دهی یا لیزر می باشد. آنچه در این مقاله ذکر شده است بخشی از تحلیل های انجام شده در زمینه تحلیل فرآیندهای خم کاری روی ورق های فلزی به کمک اشعه لیزر است.

## مراجع

- Chen D.J., Wu S.C., Li M.Q., Studies on Laser Forming of Ti-6Al-4V Alloy Sheet. Journal of Materials Processing Technology, v. ۱۵۲, ۲۰۰۴, pp. ۶۲-۶۵.
- Arcella F.G., Abbott D.H., House M.A. Titanium Alloy Structures for Airframe Application, by the Laser Forming Process. AeroMet Co., AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, 41st, Atlanta, GA, Apr. ۳-۶, ۲۰۰۰.
- Thomson Gareth, Pridham Mark, Material Properties Change Associated With Laser Forming of Mild Steel Components. Journal of Materials Processing Technology, v. ۱۸۸, ۲۰۰۱, pp. ۴۰-۴۴
- Vollersten F., Holzer S., 2D-thermomechanical Simulation of Laser Forming, Simulation of Material Processing Conference, ۱۹۹۵.
- Odumodu K.U., Finite Element Simulation of Laser Shaping, PhD. Thesis, University of Detroit-Mercy, ۱۹۹۵.
- Shi Yongjun, Yao Zhenqiang, Shen Hong, Hu Jun, Research on The Mechanisms of Laser Forming for The Metal Plate, International Journal of Machine Tools & Manufacture v. ۳۶, ۲۰۰۶, pp. ۱۶۸۹-۱۶۹۷.
- Geiger M., Vollertsen F., The Mechanism of Laser Forming, CIRP Ann., v. ۴۲, n. ۱, ۱۹۹۳, pp. ۳۰۱-۳۰۴.
- F. Vollertsen, An analytical model for laser bending, Lasers Eng., v. ۲, ۱۹۹۴, pp. ۲۶۱-۲۷۶.
- Yan C.L., Chan K.C., Lee W.B., Laser Bending of Leadframe Materials. Journal of Materials Processing Technology, ۱۹۹۸, pp. ۱۱۷-۱۲۱.
- Yanjin Guan, Sheng Sun, Guoqun Zhao, Yiguo Luan, Influence of Material Properties on the Laser-Forming Process of Sheet Metals. Journal of Materials Processing Technology, v. ۱۶۷, ۲۰۰۵, pp. ۱۲۴-۱۳۱.
- Josefson B.L., Effects of Transformation Plasticity on Welding Residual-Stress Fields in Thin-Walled Pipes & Thin Plates. Material Science Technology, v. ۱, ۱۹۸۵, pp. ۹۰۴-۹۰۸.
- Zhang L., Reutzel E.W., Michaleris P., Finite element modeling discretization requirements for the laser forming process. International Journal of Mechanical Sciences, v. ۴۶, ۲۰۰۴, pp. ۶۲۳-۶۳۷.
- Kyrasani An.K., Kermanidis Th.B., Pantelakis Sp.G., An analytical model for the prediction of distortions caused by the

analytical model for the prediction of distortions caused by the laser forming process, Journal of Materials Processing Technology, v. ۱۰۴, ۲۰۰۰, pp. ۹۴-۱۰۲.

الاستیک به معنای بهتر شدن شکل پذیری در یک فرآیند شکل دهی حرارتی است.

شکل ۱۲ نمایانگر یک مساله بدیهی است، هر چه استحکام تسلیم بالاتر باشد ماده کمتر تغییر شکل می دهد که علت آن وجود باند الاستیک بزرگتر در محل خم است، قسمتی از این نمودار پایین محور است و به معنی زاویه منفی می باشد. دلیل این مساله نرسیدن ماده به نقطه تسلیم است. همانگونه که در تشریح فرآیند شکل دهی یا اشعه لیزر ذکر شده در فاز اول که همان گرم کردن ورق است ماده مقداری به سمت مخالف خم می شود که در صورت نرسیدن به نقطه تسلیم در سرد کردن این تغییر شکل باقی می ماند.

چگالی بالاتر به معنی شکل دهی سخت تر است. تایید این مساله در شکل ۱۳ دیده می شود.

حال یابستی دید تاثیرات فوق الذکر در مجموع چه تاثیری بر فرآیند می گذارند.

همانگونه که در ابتدا گفته شد شبیه سازی شکل دهی یا لیزر یابستی یا خواص وابسته به دمای مواد بررسی شوند. از طرفی خواص مختلف مواد در اثر افزایش دما سیر صعودی یا نزولی دارد بنابراین می توان از نتایج به دست آمده تخمینی از اثر این تغییرات بر فرآیند را یافت.

۱. ضریب هدایت حرارتی: همانگونه که ذکر شد افزایش این

ضریب موجب کاهش زاویه خمش است حال آنکه با افزایش دما این ضریب سیر نزولی دارد بنابراین حرارت یا این دیدگاه بر شکل پذیری تاثیر مثبت دارد.

۲. انبساط حرارتی: انبساط حرارتی بیشتر به معنی زاویه خمش بزرگتر است، با افزایش دما این ضریب افزایش می یابد و بنابراین به عنوان یک عامل مثبت عمل می کند.

۳. گرمای ویژه: در اثر افزایش حرارت گرمای ویژه زیاد می شود حال آنکه با توجه به مباحث صورت گرفته، این پدیده خود تاثیر منفی بر زاویه خمش دارد.

۴. مدول الاستیک: اثر مدول یانگ بر شکل پذیری یا اشعه لیزر منفی است دلیل این امر کاهش مدول یانگ با افزایش دماست.

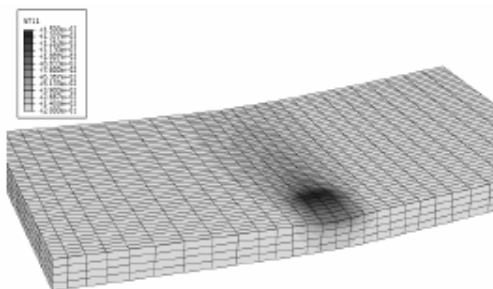
۵. استحکام تسلیم: با افزایش دما نقطه تسلیم هر ماده کاهش می یابد و با این کاهش ماده نرم تر شده و بهتر تغییر شکل می دهد.

۶. چگالی: چگالی مواد با افزایش دما کاهش می یابد و بنابراین تغییر شکل بهتر می شود.

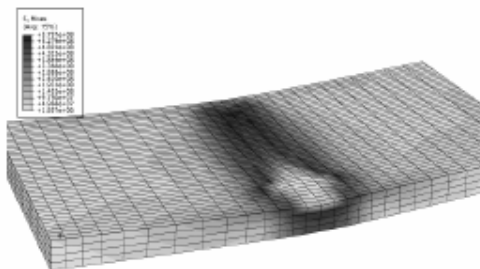
## نتیجه گیری

پروسه شکل دهی یا لیزر یک روش شکل دهی یا حساسیت بالا نسبت به خواص مکانیکی و فیزیکی مواد است. محاسبات و تحلیل های انجام شده نشان می دهند که این پروسه نسبت به تغییرات خواص مختلف مواد نتایج متفاوتی را ایجاد می کند که شبیه سازی دقیق این روش در محیط نرم افزارهای المان محدود را ضروری می

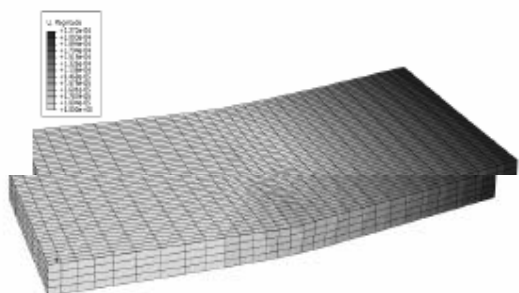
## شکل‌ها و نمودارها



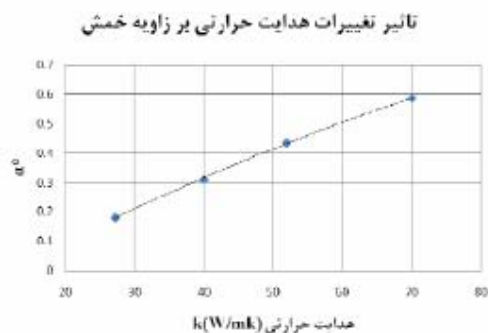
شکل ۵ - توزیع حرارت در شبکه سازی عمومی



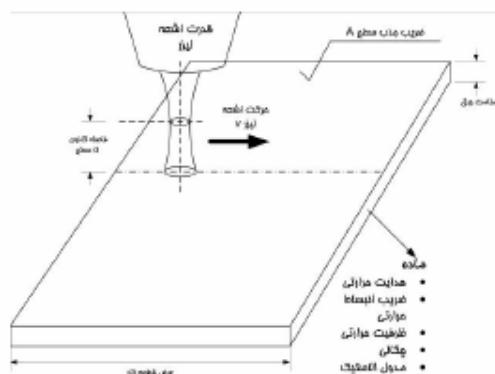
شکل ۶ - توزیع تنش در ورق در شبکه سازی عمومی



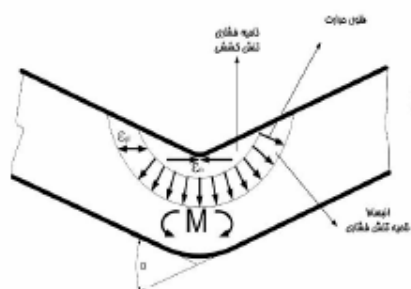
شکل ۷ - تغییر شکل ورق در شبکه سازی عمومی



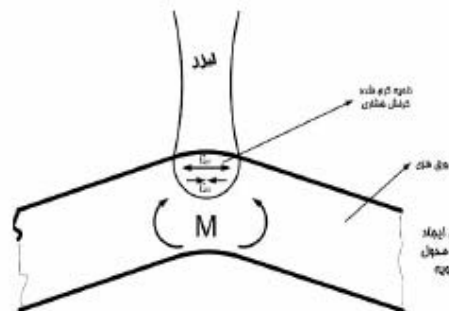
شکل ۸ - مقایسه تغییرات زاویه خمشی در اثر تغییر هدایت حرارتی



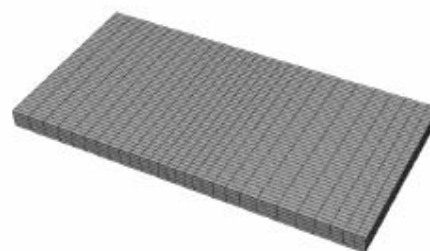
شکل ۱ - شماتیک پروسه لیزر فرم



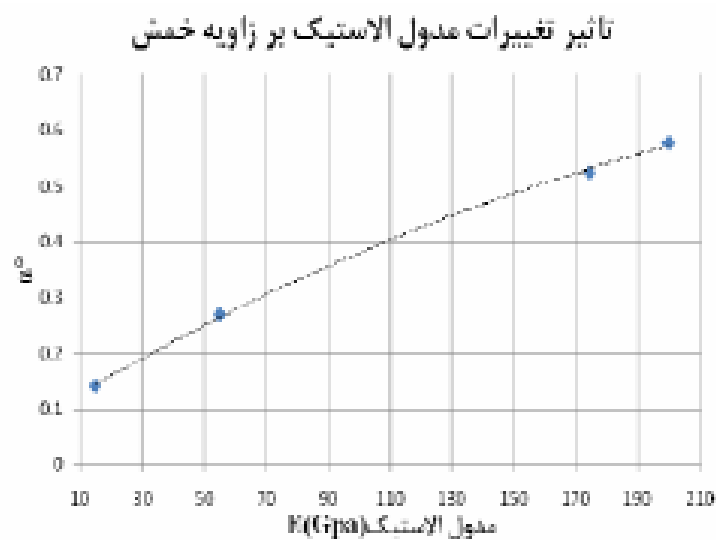
شکل ۲ - مراحل شکل دهی با لیزر، گرم کردن



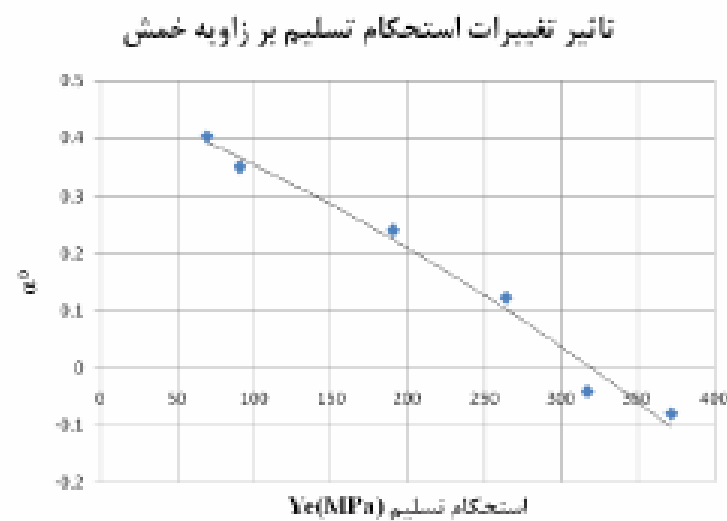
شکل ۳ - مراحل شکل دهی با لیزر، سرد کردن



شکل ۴ - قطعه مش بندی شده



شکل ۱۱ - مقایسه تغییرات زاویه خمش در اثر تغییر مدول الاستيک



شکل ۱۲ - مقایسه تغییرات زاویه خمش در اثر تغییر استحکام تسلیم