



## بررسی زاویه خمکاری و توزیع حرارت در شکل دهی با لیزر ورقهای چندلایه

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

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

Shams.Torabnia@gmail.com

### چکیده

یکی از جدیدترین روش‌های شکل‌دهی مواد، فرم‌دهی به وسیله اشعه لیزر می‌باشد. در این شیوه تنش‌های حرارتی ایجاد شده در اثر حرارت‌دهی موضعی ماده موجب تغییر شکل می‌شود. به علت وابستگی این شیوه به خواص حرارتی ماده می‌توان با کمک آن فلزات سخت و همچنین قطعات ظریف و پیچیده را شکل‌دهی نمود. در این مقاله به بررسی این شیوه با روشهای عددی و نرم‌افزارهای المان محدود و ارایه فرمولاسیون خمکاری پرداخته شده‌است. در پایان اثر چندلایه بودن خواص ورق بر زاویه خمش و تغییرات ناشی از آن بررسی شده‌است.

کلمات کلیدی: شکل دهی با لیزر، تحلیل المان محدود، ورق چندلایه

### ۱- مقدمه

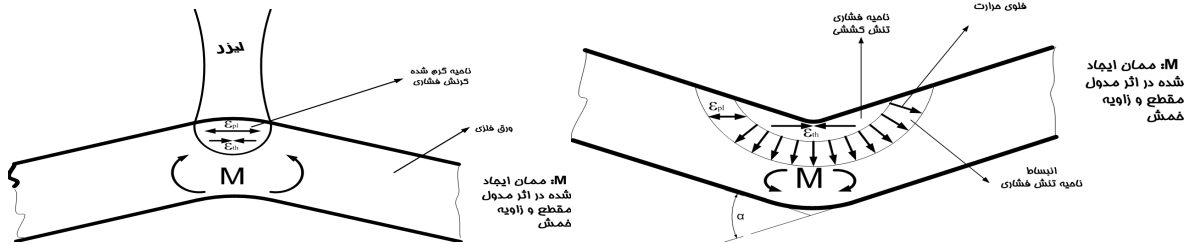
در اوایل دهه ۸۰ کاربرد جدیدی برای اشعه لیزر کشف شد و آن فرم دادن قطعات پیچیده به کمک اشعه لیزر است. این روش در سال ۱۹۸۰ در انستیتوی فناوری ماساچوست (MIT) در پاسخ به مساله طرح شده از سوی انجمن جوشکاری ژاپن طراحی شد. در این برنامه تغییر شکل‌های ناشی از حرارت که در اثر تابش پرتو لیزر با توان بالا در راستای یک خط بر سطح فولاد به وجود آمده بود در ورق فولادی بررسی شد. پس از آن طی سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۷ برنامه‌ای برای تولید قطعات کشتی با روش شکل‌دهی لیزری از ورق‌های فولادی اجرا گردید [۱]. شکل دهی با لیزر آلیاژهای تیتانیوم کلاس هوافضایی مانند Ti6Al4V توسط موسسه آرومت (Aero Met) انجام شده و پروسه خاصی تحت عنوان لسفرم (LASFORM) تعریف شده‌است [۲]. آزمایش کشش نشان داده‌است قطعات شکل‌دهی شده به وسیله لیزر خواص مکانیکی بهتری از قطعات فرم‌دهی معمولی دارند [۳]. در عین حال بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد این روش، نسبت به سایر روشهای تولید برتری‌های منحصر به فردی دارد، این شیوه می‌تواند به راحتی به صورت خودکار انجام گیرد زیرا تمامی پارامترهای آن کاملاً کنترل پذیرند. از نظر ضایعات مواد خام نیز 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 ابزار حداقل است زیرا اصولاً تماس بین ابزار و قطعه کار حذف شده است که خود یکی از مهمترین عوامل خرابی ابزار می‌باشد. 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 مرسی می‌شینگان شبیه سازی المان محدود دوبعدی شکل دهی با لیزر انجام گرفت که بسیاری از جزئیات این شیوه را شبیه سازی می‌نمود [۵].

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> دانشیار

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

در این روش ورق، به کمک پرتو لیزر در راستای مورد نظر حرارت داده می شود و سپس با توجه به تفاوت دما در لایه های فوقانی و زیرین ورق و به علت انقباض و انقباض ماده، نیروهایی در ساختار شبکه ماده ایجاد می شود. در اثر نیروهای بین شبکه گشتاورهای نسبتاً بزرگی ایجاد می شود که باعث تاب برداشتن ماده در راستای اعمال حرارت می شود. در این حالت سطوح بالایی کشیده می شوند و سطوح زیرین فشرده خواهند شد (شکل ۱-چپ) [۴]. پس از این مرحله ماده را سرد می نمایند که موجب انقباض سطوح بالایی به اندازه قبلی خود می شود. اما سطوح کشیده شده پایینی مانع این کار هستند. لذا گشتاوری در جهت مخالف گرم کردن ایجاد می شود و این ممان موجب تاب برداشتن مجدد صفحه در راستای مخالف می گردد (شکل ۱-راست).



شکل ۱ مراحل شکل دهی با لیزر - گرم کردن (چپ) و سرد کردن (راست)

## ۳- رفتار اشعه لیزر و توزیع حرارت

حرارت تولید شده توسط اشعه لیزر دارای توزیع گوسی است. چگالی شار حرارتی بر سطح از رابطه زیر محاسبه می شود [6].

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

بنابراین مقدار متوسط شار حرارتی در محدوده اشعه لیزر از انتگرال گیری تابع شار (معادله (۱)) در دامنه محاسبه می شود.

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r I(2\pi r_1) dr_1 = \frac{2\pi}{\pi r^2} \int_0^r \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) (r_1) dr_1 = \frac{0.865 AP}{\pi r^2} \quad (2)$$

که در آن  $A$  ضریب جذب سطح،  $P$  قدرت خروجی لیزر، شعاع اشعه لیزر و  $r_1$  فاصله بین نقطه مورد بررسی و مرکز لیزر است. برای بهبود میزان جذب اشعه لیزر توسط سطح، روی قطعه کار با لایه های اکسید و گرافیت پوشانده می شود که ضریب جذبی بین ۰.۵ تا ۰.۷ را ارائه می دهد. شدت جذب بر اساس آزمایشات انجام گرفته در این مقاله برابر ۰.۶ در نظر گرفته می شود [۶].

## ۴- روابط تئوری زاویه خمش

در زمینه زاویه خم کاری گیگر و ولرستن [۸] و [۹] 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.

$$\alpha = \frac{180 \sqrt{2}}{5\pi \sqrt{\pi}} \frac{AP}{\sqrt{rv}} \frac{\alpha_{th} \sqrt{a}}{ks_0} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{3\alpha_{th} PA}{\rho c_p v s_0^2} \quad (4)$$

یان [۱۰]، یک مدل تئوری دیگر پیشنهاد داده است که بر اساس این مدل زاویه خم از فرمول زیر حساب می شود.

$$\alpha = \frac{3\alpha_{th} PA}{\rho c_p v s_0^2} \frac{7}{2} - 36 \frac{r}{s_0} \frac{\sigma_s}{E} \quad (5)$$

از طرف دیگر شی [۱۱] فرمول زیر را برای محاسبه زاویه خم ناشی از حرارت دهی سطح به وسیله لیزر ارائه نموده است.

$$\alpha = \frac{6.92AP\alpha_{th}B}{L^2s_0} \times \sqrt{\frac{2r}{\pi^3\rho c_p kv}} \quad (6)$$

در روابط فوق A ضریب جذب، v سرعت حرکت اشعه لیزر، k ضریب انتقال حرارت،  $\alpha_{th}$  ضریب انبساط حرارتی،  $s_0$  ضخامت قطعه،  $\rho$  چگالی،  $c_p$  ظرفیت حرارتی ویژه،  $\sigma_s$  تنش تسلیم و E مدول یانگ است. در رابطه "شی" اثر ابعاد ورق (B و L) نیز به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار دیده شده است. این رابطه برای خمکاری ورق با ابعاد کوچک صادق است. با توجه به تحلیل های صورت گرفته مشخصات فیزیکی و حرارتی مواد (از قبیل ضریب انبساط حرارتی، گرمای ویژه، انتقال حرارت، چگالی) و خواص مکانیکی ماده (مانند مدول یانگ و استحکام تسلیم) هر دو در فرآیند فرم دهی با لیزر موثرند. این پارامترها همگی وابسته به دما هستند و تغییرات آنها در دماهای مختلف بسیار وسیع است [6]. به علاوه اثرات خواص مختلف مکانیکی بر شکل دهی لیزری متفاوت است.

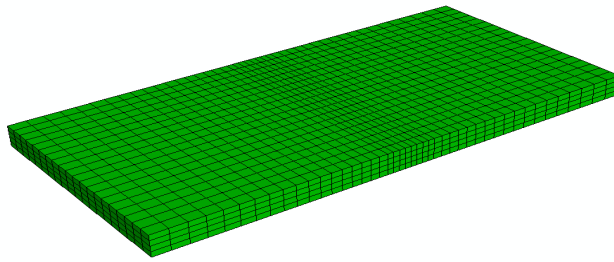
## ۵- شبیه سازی فرآیند

با کمک روش اجزای محدود می توان پروسه ها را شبیه سازی نمود. بدین واسطه می توان شکل دهی با لیزر را به راحتی و با گستره عملکرد وسیع بررسی نمود. مقاله حاضر به تحلیل ترکیبی حرارت و جابجایی (Thermo-Displacement) به شیوه المان محدود یک ورق چندلایه فلزی با نرم افزار آباکوس (ABAQUS) و مقایسه نتایج با زاویه خمش محاسبه شده توسط روش های تحلیلی، به بررسی این شیوه پرداخته است. برای شبیه سازی، از هدایت حرارتی در راستای طولی صرف نظر می شود و تغییر شکل کلی در نظر گرفته می شود. جوزفسون [۱۲] نشان داد این فرضیات در شرایطی که سرعت حرکت لیزر بسیار بالا و طول ورق به حد کافی طولانی است معتبر است. ورق در ابتدا بدون تنش است. ماده الاستیک کاملاً پلاستیک و در هر لایه همگن و همسانگرد است. تنش تسلیم در کشش و فشار در هر لایه برابر است. در تحلیل نرم افزاری انجام گرفته، اشعه، مربعی فرض شده است. توضیح اینکه در تحلیل های مقدماتی انجام شده اثر اشعه دایره ای بررسی شد و نتیجه آن ایجاد نقاط تمرکز تنش ناخواسته و همچنین ایجاد تغییر شکل های غیر واقعی بود که دلیل آن بهم ریختگی المان بندی در اثر شکل دایره ای محل اثر حرارت بود. از المان C3D8T برای مش بندی مجموعه استفاده شده است که یک المان ترکیبی اثر حرارت و جابه جایی می باشد. شبیه سازی و تحلیل نرم افزاری پروسه نشان داده است که چند لایگی، در صورت انتخاب مناسب جنس لایه ها و خواص مکانیکی مناسب، عملی بوده و حتی در برخی موارد نتایج بدست آمده، شکل پذیری مواد چندلایه بهتر از مواد تک لایه است. ابتدا تحلیل بر روی نمونه فولاد در دو حالت مختلف شکل دهی، انجام می شود سپس یک نمونه آلومینیومی بررسی می شود. زاویه خمش به دست آمده از شبیه سازی با فرمول های ارایه شده مقایسه می شوند و پس از اثبات صحت شبیه سازی به بررسی زاویه خمش حالت سه لایه فولاد-آلومینیوم-فولاد پرداخته می شود. شرایط شبیه سازی هر مدل مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱- شبیه سازی های صورت گرفته، قطر اشعه لیزر 4mm و دمای اولیه 20 درجه سلیسیوس.

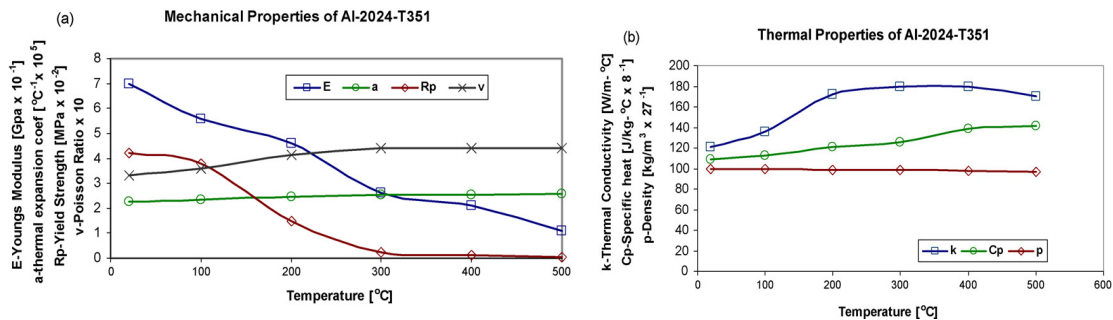
نمونه	جنس	ابعاد	شرایط شبیه سازی
۱	فولاد	۴۰×۲۰×۲mm	P=0.5kw, v=0.05m/s
۲	فولاد	۴۰×۶۰×۲mm	P=0.5kw, v=0.05m/s
۳	آلومینیوم	۴۰×۲۰×۲mm	P=0.5kw, v=0.05m/s
۴	فولاد(0.5mm)-آلومینیوم(1mm)-فولاد(0.5mm)	۴۰×۲۰×۲mm	P=1.5kw, v=0.025m/s
۵	فولاد(0.5mm)-آلومینیوم(1mm)-فولاد(0.5mm)	۴۰×۲۰×۲mm	P=0.5kw, v=0.05m/s
۶	فولاد(1mm)-آلومینیوم(0.5mm)-فولاد(1mm)	۴۰×۲۰×۲mm	P=1.5kw, v=0.025m/s

در شکل ۲ نمونه ای از المان بندی مورد استفاده نشان داده شده است. در این المان بندی، خط عبور اشعه لیزر دارای المانهای ریزتر از سایر قسمتها است و به مرور از فشردگی آن کم می شود.



شکل ۲ نمونه‌ای از مدل المان محدود مورد استفاده

خواص مکانیکی و حرارتی فولاد معمولی در مرجع [۱۴] و آلومینیوم ۲۰۲۴ در نمودارهای زیر آورده شده است.



شکل ۳ خواص حرارتی و مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۴]

## ۶- اعتبار سنجی شبیه سازی

از مقایسه شبیه سازی با فرمولهای (۳) - (۶) مشخص می شود شبیه سازی های انجام شده به فرمولاسیون بسیار نزدیک است.

جدول ۲ - مقایسه زاویه خمش ( $\alpha^\circ$ ) به دست آمده از شبیه سازی با فرمولاسیون گیگر، ولرستن، یاو، شی

مدل	حل حاضر	گیگر [۸]	ولرستن [۹]	یان [۱۱]	شی [۱۱]
۱	۰	۳,۴۶۴۰	۳,۹۷۹۲	۲,۵۱۶۲	۲,۵۷۸۵
۲	۷,۲۷۶۵	۸,۰۴۹۷	۷,۱۶۲۵	۷,۲۹۱۲	۷,۷۳۵۶
۳	۱,۳۳۴۶	۱,۲۳۹۱	۱,۶۷۱۹	۱,۲۹۹۱	۱,۸۸۷۷

مدل ۱ در تئوری و عمل دو نتیجه متفاوت را به دست می دهد. دلیل این امر این است که در مدل های تئوری ارایه شده فرض می شود قطعه تسلیم شده باشد.

## ۷- بررسی صحت مدل و روش حل

مدلهای ۴ و ۵ و ۶ شبیه سازی نمونه های چندلایه است. موارد ۴ و ۵ از نظر جنس قطعه کار مشابه می باشند و تنها توان لیزر و سرعت اسکن متفاوت است.

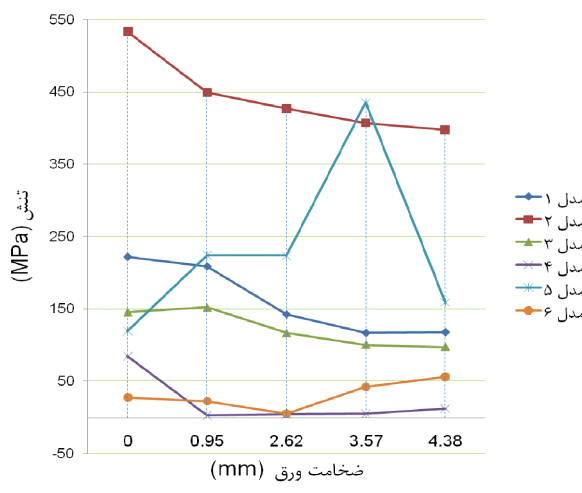
جدول ۳ - زاویه خمش به دست آمده از شبیه سازی ۴ و ۵ و ۶

مدل	زاویه خمش (درجه)
۴	۱۲,۷۶۴۲
۵	۴,۱۵۳۴
۶	۹,۱۲۱۲

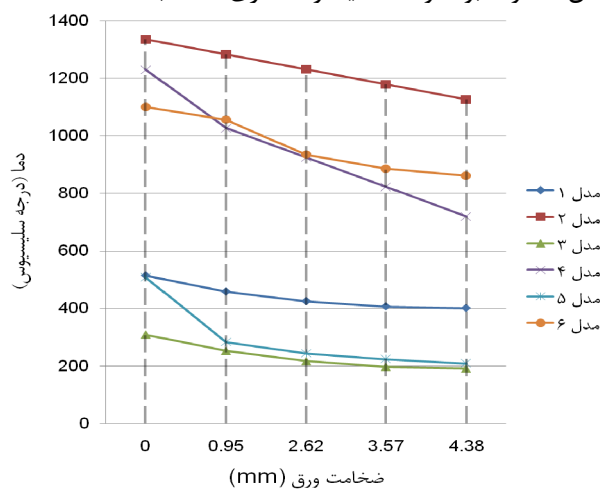
همانطور که پیشبینی می‌شود در شرایط یکسان مدل ۲ و ۵ و با تغییر مقطع ورق در مدل ۵، زاویه خمش بیشتر از مدل ۲ است که دلیل آن وجود آلومینیوم در مقطع ورق است. در مدل ۵ با افزایش سرعت اسکن و کاهش توان لیزر زاویه خمش به شکل قابل ملاحظه‌ای (در مقایسه با مدل ۴) کاهش می‌یابد ولی نسبت به مدل ۱ مقدار زاویه تغییر شکل بیشتر است. در مدل ۶ با توجه به افزایش مقطع فولادی مقدار زاویه کاهش می‌یابد.

## ۸- نتایج

حال با توجه به تحلیل‌های انجام‌گرفته به ازایه نمودارهای تغییرات تنش و دما در راستای ضخامت در مرکز تابش اشعه لیزر پرداخته می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود در تمامی نمودارها دما از سطح مورد تابش قرار گرفته به سمت سطح داخلی کاهش می‌یابد. (شکل ۴) این کاهش دما عامل اصلی تغییر شکل در ورق می‌باشد. از طرفی در مدل‌های ۱ و ۲ و ۳ که قطعه کار دارای مقطع یک‌لایه است تغییرات تنش به فراخور تغییرات دما سیر نزولی دارد. ولی در مدل‌های ۴ و ۵ و ۶ به دلیل تغییرات جنس قطعه در راستای ضخامت نمودار تنش دارای شکستگی‌هایی است (شکل ۴ شکل ۵). در مدل ۱ قطعه کار به تنش تسلیم خود نمی‌رسد. بنابراین در مرحله خنک‌کاری به حالت اولیه باز می‌گردد. در مدل ۴ تنش در نزدیکی نقطه تغییر جنس لایه دارای افزایش تنش نسبی است و پس از آن تنش به طور ناگهانی افت می‌کند. دلیل این افزایش نیروهای وارده بین لایه‌های مختلف است. ولی به علت تغییر جنس لایه و پایین بودن تنش تسلیم آلومینیوم، تنش به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. اما در نقطه گذر از لایه آلومینیوم به فولاد به دلیل بزرگتر بودن تغییر شکلها اختلاف تنش بزرگتر است. مدل ۵ شرایطی متفاوت دارد. همانند مدل ۱ که به دلیل افزایش سرعت اسکن و کاهش توان لیزر دارای تنشهای پایین‌تری بود، تنش در فولاد پایین است. اما نیروی ایجادشده به واسطه تنش بر روی لایه آلومینیومی باعث ایجاد تنش بزرگتری می‌شود و تغییر شکل آن را سبب می‌شود. مدل ۶ شرایطی مشابه مدل ۴ دارد تنها تفاوت در ضخامت لایه‌هاست این تفاوت موجب می‌شود نحوه توزیع تنش متفاوت بوده و حالت یکنواخت‌تری داشته باشد.



شکل ۵ مقایسه تنش برای مدل‌های مورد بررسی

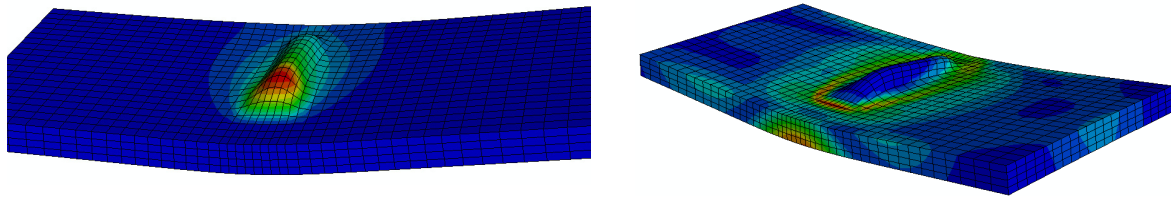


شکل ۴ مقایسه دما برای مدل‌های مورد بررسی

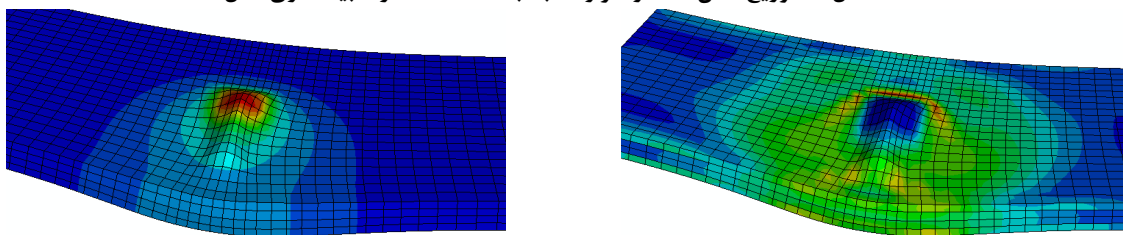
## ۹- نتیجه گیری

توزیع تنش در سطح ورق حالت موضعی دارد (شکل ۶-الف و شکل ۷-الف). مورد دیگر آنکه مناطق هم‌دما در توزیع حرارت به خوبی قابل تشخیص است (شکل ۶-ب و شکل ۷-ب) و این خود صحتی بر درستی فرضیات صورت گرفته می‌باشد (فرض مربعی بودن اشعه). محاسبات و تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهند که این فرآیند نسبت به تغییرات خواص مختلف مواد نتایج متفاوتی را ایجاد می‌کند. نتیجه تحلیل‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که می‌توان با تنظیم دقیق پارامترهای این پروسه، ورق-

های چندلایه را نیز شکل‌دهی نمود. نکته جالب دیگر اینکه نتایج تئوری به دلیل لحاظ نمودن پارهای از شرایط در برخی مواقع پاسخی متضاد با واقعیت می‌دهد. از طرف دیگر مدل‌های ۱ و ۴ نشان دادند که می‌توان با شرایط یکسان با وجود شباهت سطوح دو ماده به دلیل اختلاف جنس در مقاطع شکل‌پذیری بهتری به دست می‌آید.



الف  
ب  
شکل ۶ توزیع تنش (الف) و حرارت (ب) به دست آمده از شبیه سازی مدل ۲



الف  
ب  
شکل ۷ توزیع تنش (الف) و حرارت (ب) به دست آمده از شبیه سازی مدل ۴

## تشکر و قدردانی

جای دارد از راهنمایی‌های بی دریغ دوست، استاد و همکار عزیز و بزرگوارم مرحوم دکتر علیرضا صفی‌خانی که در خلال نوشتن مقاله حاضر دار فانی را وداع گفت کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. خدایش بیامرزد.

## مراجع

1. Chen D.J., Wu S.C., Li M.Q., "Studies on Laser Forming of Ti-6Al-4V Alloy Sheet.", "J. of Mat. Processing Tech.", Vol. 152, pp. 62-65, 2004.
2. Arcella F.G., Abbott D.H., House M.A., "Titanium Alloy Structures for Airframe Application, by the Laser Forming Process.", AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, 41st, Atlanta, GA, Apr. 3-6, 2000.
3. Thomson G., Pridham M., "Material Properties Change Associated With Laser Forming of Mild Steel Components.", "J. of Mat. Processing Tech.", Vol. 188, pp. 40-44, 2001.
4. F. Vollersten, S. Holzer, "3D-thermomechanical Simulation of Laser Forming", Simulation of Material Processing: Theory, Methods and Applications, Balkema, Rotterdam, pp.785, 1995.
5. K.U. Odumodu, "Finite Element Simulation of Laser Shaping.", PhD. Thesis, University of Detroit-Mercy, 1995.
6. Yanjin Guan, Sheng Sun, Guoqun Zhao, Yiguo Luan, "Influence of Material Properties on the Laser-Forming Process of Sheet Metals.", "J. of Mat. Processing Tech.", Vol. 167, pp. 124-131, 2005.
7. Shi Yongjun, Yao Zhenqiang, Shen Hong, Hu Jun, "Research on The Mechanisms of Laser Forming for The Metal Plate., International J. of Machine Tools & Manufacture" Vol. 46, pp. 1689-1697, 2006.
8. Geiger M., Vollertsen F., "The Mechanism of Laser Forming", "CIRP Ann.", Vol. 42, No.1, pp. 301-304, 1993.
9. F. Vollertsen, "An analytical model for laser bending", "J. of Lasers Eng.", Vol 2, pp. 261-276, 1994.
10. Yan C.L., Chan K.C., Lee W.B., "Laser Bending of Leadframe Materials.", "J. of Mat. Processing Tech.", Vol. 82, pp. 117-121, 1998.
11. Yongjun Shi, Hong Shen, Zhenqiang Yao, Jun Hu, "Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates.", "Optics & Laser Tech.", Vol. 39, pp. 858-863, 2007.
12. Josefson B.L., "Effects of Transformation Plasticity on Welding Residual-Stress Fields in Thin-Walled Pipes & Thin Plates.", "Mat. Science Tech.", Vol. 1, pp. 904-908, 1985.
13. Labeas G.N., "Development of a local three-dimensional numerical simulation model for the laser forming process of aluminum components.", "J. of Mat. Processing Tech.", Vol. 207, No. 1-3, pp. 248-257, 2008.
14. Zhanga L., Reutzelt E.W., Michaleris P., "Finite element modeling discretization requirements for the laser forming process.", "International J. of Mechanical Sciences", Vol. 46, pp. 623-637, 2004.