

تحلیل تغییر شکل ترموالاستیک پلاستیک ورق در فرایند شکل دهی خمکاری شعله‌ای

سید جلال همتی*، محمد علی نیازی، مهدی معرفت و رضا نقدآبادی**

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۲/۹/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۹/۱۰)

چکیده - فرایند خمکاری شعله ای یکی از روشهای شکل دهی ورقهای فولادی است. در این فرایند با اعمال گرمای ناشی از شعله مشعل گازی و سپس خنک کاری کنترل شده در راستای مسیرهای معین روی ورق، به آن شکل می‌دهند. با توجه به ابزار ساده به کار رفته در فرایند، روش اقتصادی و جذابی است. در حال حاضر این فرایند به صورت دستی و براساس تجارب تکنسینهای ماهر انجام می‌شود. رویه تجربی و عدم اتوماسیون فرایند، بهره‌وری آن را پایین آورده است. در این مقاله روشی برای شبیه سازی تغییر شکل ماده در حین فرایند ارائه می‌شود. با توجه به ماهیت فیزیکی فرایند از تحلیل تغییر شکل بزرگ ترموالاستیک پلاستیک استفاده شده است. در این روش راه حل تحلیلی جدیدی برای تحلیل انتقال گرما در ورق اعمال شده است. حل تحلیلی انتقال گرما به همراه حل عددی اجزای محدود تغییر شکل ورق در محیط نرم افزار ANSYS، قادر به توضیح و تفسیر مشاهدات تجربی‌اند. در مقایسه با نتایج سایر محققان و اندازه‌گیریهای تجربی، شبیه سازیهای به عمل آمده نتایج معقولی نشان می‌دهند. از روش و نتایج این شبیه‌سازیها می‌توان برای مطالعات اتوماسیون فرایند استفاده کرد.

واژگان کلیدی: شکل دهی ورق، فرایند خمکاری شعله‌ای، تحلیل ترمو الاستیک پلاستیک

Thermo-Elastic-Plastic Analysis of Plate Forming Process by Flame Bending Method

Seyyed Jalal Hemmati, M.A. Niazi, M. Maarefat, and R. Naghdabadi
Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University
Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology

Abstract: Flame bending process is one of the forming processes of steel plates. During this process, plate is formed with heating by gas torch flame followed by controlled cooling along specified paths. Considering simple tools used in the process, it is a popular and economical forming method. At present, this process is manually done on the basis of skilled technician's

**-استادیار

*- دانشجوی دکترا

experience. Experimental and non-automated procedures decrease productivity of the process. In this paper, a method is proposed for simulation of material deformation. Regarding the physics of the process, large deformation thermoelastic-plastic analysis has been applied. In the simulations, a new analytical solution is used for thermal analysis of plate. The analytical solution along with finite element analysis of the deformation in ANSYS program is able to interpret experimental observations. The simulations show reasonable results, compared with the analytical results by other researchers and with experimental data. The method and simulation results can be used to study the process automation.

Keywords: Plate forming, Flame bending process, Thermo Elastic Plastic Analysis

۱- مقدمه

خمکاری شعله‌ای یکی از فرایندهای شکل دهی ورقهای فولادی است. در این فرایند با اعمال گرمایش و خنک کاری کنترل شده در امتداد مسیرهای معین روی ورق، آن را شکل می‌دهند. وقتی یک طرف ورق توسط مشعل گرم می‌شود در حالی که طرف دیگر آن خنک است گرادیانهای دما به خصوص در راستای ضخامت، باعث ایجاد انبساطهای گرمایی و در نتیجه ممان خمشی و نیروهای صفحه‌ای گرمایی می‌شود که بدین وسیله باعث تغییر شکل زاویه‌ای و انقباض صفحه‌ای ورق می‌شود. چون دما در منطقه زیرمنبع گرما بالا و برعکس تنش تسلیم در این منطقه پایین است تغییر شکل پلاستیک اتفاق می‌افتد. در هنگام خنک شدن ورق، سطح گرم شده منقبض شده و باعث خمش معکوس ورق می‌شود. شکل (۱) به طور شماتیک ورق تخت اولیه و ورق شکل داده شده و مسیرهای گرمایش روی ورق را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین نحوه تغییر شکل زاویه‌ای ورق پس از اعمال هر خط گرمایش نمایش داده شده است. شکل (۲) نمونه‌ای از ورقهای شکل داده شده به این روش را نشان می‌دهد.

تحلیلهای نظری و عددی مختلفی برای پیش بینی پاسخ ورق در این فرایند انجام شده‌اند. روشی برای حل مسئله دوبعدی توسط ایوامرا و ریپیکی [۱] ارائه شده است. آنها از مدل تیر دو بعدی عمود برخط گرمایش استفاده کرده‌اند که با استفاده از روش تفاضل محدود تحلیل می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که توزیع کرنش کل شامل کرنشهای الاستیک، پلاستیک و کرنش گرمایی، در جهت ضخامت ورق خطی است. با این فرض به همراه شرایط تعادل، پیوستگی و مرزی، سیستمی از

معادلات همزمان غیرخطی به دست می‌آید که به روش تکرار قابل حل است. خواص مواد تابع دما در نظر گرفته شده‌اند. مقایسه نتایج نظری به دست آمده با نتایج تجربی، توافق خوبی نشان داده‌اند. آزمونهای تجربی روی تیر انجام شده تا شبیه سازی خوبی از تحلیل نظری به دست آید.

موشایف و وروس [۲] براساس نظریه ورقهای نازک باخیز کم، معادله خمش ورق الاستیک را برای در برگرفتن مولفه‌های گرمایی و پلاستیکی تغییر شکل مورد فرمولبندی مجدد قرار داده‌اند. آنها نیز برای استخراج معادلات حاکم توزیع کرنش کل درامتداد ضخامت ورق را به صورت خطی فرض کرده‌اند. همچنین خواص مواد در راستای ضخامت ورق متغیر در نظر گرفته شده‌اند. برای حل معادلات از روش المان مرزی استفاده شده است. روش حل ارائه شده در این تحقیق به فهم مکانیزم تغییر شکل ورق کمک می‌کند ولی به کار بیشتری نیاز دارد.

موشایف و شین [۳ و ۴] نظریه باریکه اصلاح شده‌ای را مطرح کرده‌اند. آنها برای مدلسازی ورق گرم شده، باریکه‌ای عمود برخط گرمایش که توسط فنرهایی مهار می‌شود در نظر گرفته‌اند. نظریه باریکه اصلاح شده با موفقیت برای حالت الاستیک آزمایش شده ولی درحالت پلاستیک تعیین ثابت فنرها مشکل است.

جانگ و همکارانش [۵] منطقه گرم شده را به صورت دیسک دایروی متقارنی ساده سازی کردند که توسط فنرهایی مهار شده است. ثابت فنرها از نظریه ورق نامحدود دارای یک سوراخ دایروی تعیین می‌شود. این دیسک برای مدلسازی حرکت مشعل، درطول مسیرگرمایش متحرک در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- نمونه‌ای از ورقهای شکل داده شده به روش خمکاری شعله‌ای

می‌افتد و مابقی قسمتها فقط تحت تغییرشکلهای الاستیک قرار می‌گیرند. با حرکت مشعل به تدریج مواد بیشتری دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند و مواد پیرامون آنها در برابر این تغییر شکل مقاومت می‌کنند. ماده واقع در زیر شعله تحت تغییر شکل بزرگ و کرنش کوچک قرار دارد. علاوه بر حالت غیر خطی هندسی، بروز تغییر شکل ترمو پلاستیک و تابع دما بودن خواص مواد، باعث غیر خطی بودن مادی تحلیل می‌شود.

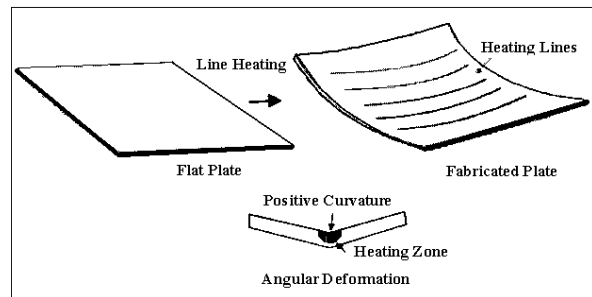
در شکل (۳) مراحل تحلیل ترموالاستیک پلاستیک تغییر شکل ماده در این تحقیق نشان داده شده است. مراحل مختلف تحلیل در برنامه تجاری ANSYS نسخه هفتم انجام می‌گیرند. مولفان برای تعیین پارامترهای شعله از روش ارائه شده در مقاله قبل خود [۱۱] استفاده کرده‌اند. شکل (۴) مدل توزیع گوسی به کار رفته برای شار گرمایی ورودی به همراه سیستمهای مختصات ساکن و متحرک مفروض را نشان می‌دهد. شار گرمایی ورودی در هر نقطه از فصل مشترک شعله با ورق به فاصله r از مرکز شعله از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$q(r) = q_{\max} \exp(-\gamma r^2) \quad (1)$$

شار ماکزیمم در مرکز شعله، q_{\max} ، از معادله

$$q_{\max} = \frac{q_{\text{eff}} \cdot \gamma}{\pi} \quad (2)$$

محاسبه می‌شود. متغیرهای q_{eff} و γ در معادلات بالا، به ترتیب توان موثر و ضریب تمرکز شعله بوده و به



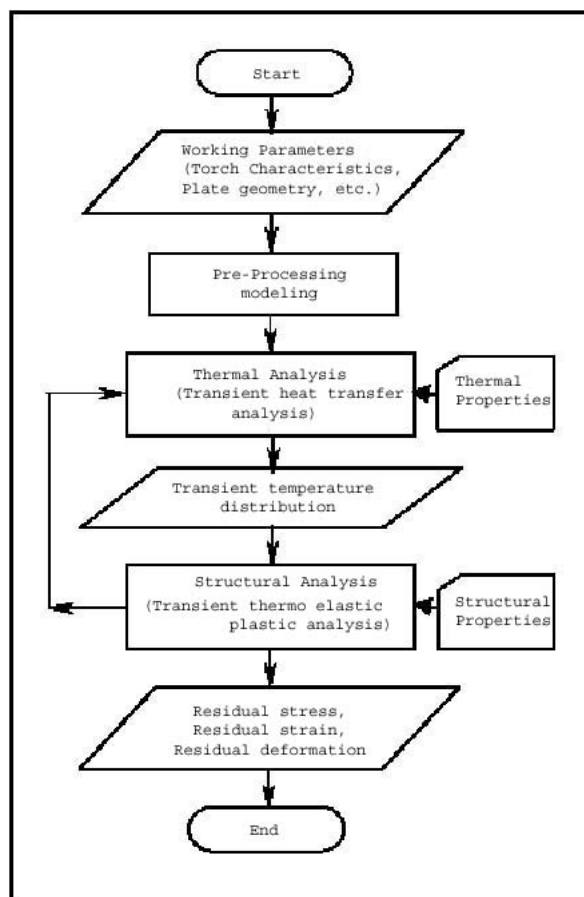
شکل ۱- ورق تخت اولیه و سطح نهایی پس از فرایند خمکاری شعله‌ای

تحلیل اجزای محدود فرایند با برنامه‌های تجاری مختلف توسط یو [۶]، لی [۷]، کلوسن [۸]، وایشی یا ما [۹] انجام گرفته است. ائدا و همکارانش [۱۰] برای شبیه سازی تغییر شکل ورق در فرایند گرمایش خطی، تحلیلگر گرمایی و تحلیلگر تغییر شکل مخصوصی تدوین کرده‌اند. در مطالعات انجام گرفته، تحلیل ترموالاستوپلاستیک تغییر شکل بزرگ ماده اعمال شده است. معمولاً میدانهای دما و تغییر شکل، کوپل نشده و خواص مواد تابع دما فرض می‌شوند. در هر گام زمانی از تحلیل تغییر شکل، دماهای گرهی محاسباتی از تحلیل گرمایی به صورت بارگذاری گرمایی در تحلیل الاستوپلاستیک اعمال می‌شوند.

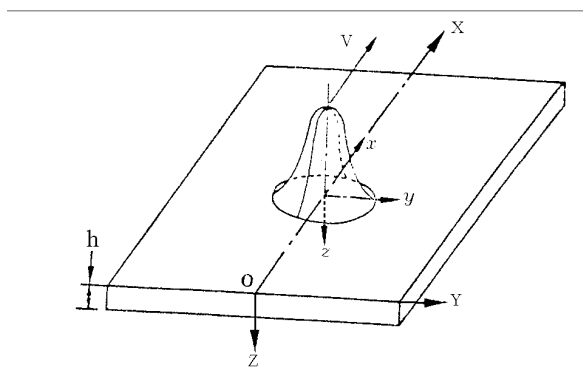
در این تحقیق با استفاده از یک راه حل تحلیلی جدید برای تحلیل انتقال گرما در ورق، شار گرمایی ورودی و میدان دما تعیین می‌شوند. مولفان در کار قبلی خود [۱۱]، صحت و اعتبار تحلیل گرمایی فرایند به روش فوق را نشان داده‌اند. در ادامه، با استفاده توأم از این راه حل تحلیلی برای میدان دما و تحلیل اجزای محدود تغییر شکل به کمک نرم افزار ANSYS، روشی برای شبیه سازی ترمومکانیکی فرایند ارائه می‌شود.

۲- روش تحلیل و فرضیات

در فرایند خمکاری شعله‌ای ماده تحت اثرات گرمایی و وزن خود، دچار تغییر شکل دائمی می‌شود. تقریباً تمام تغییر شکل پلاستیک ماده در فصل مشترک شعله با سطح ورق اتفاق



شکل ۳- رویه تحلیل ترمو الاستیک پلاستیک تغییر شکل ماده



شکل ۴- مدل توزیع گوسی شار گرمایی شعله و سیستمهای مختصات ساکن و متحرک در نظر گرفته شده

پارامترهای شعله معروف اند.

در این تحقیق پارامترهای ورودی برای تحلیل ترمو الاستیک پلاستیک عبارت اند از: سرعت حرکت مشعل (v)، توان موثر (q_{eff}) و ضریب تمرکز شعله (γ). ابعاد ورق در مرحله مدلسازی و مش بندی به عنوان پارامترهای ورودی

معرفی می شوند. با توجه به مشعل و غیرخطی بودن تغییر شکل ماده، تحلیل به صورت گام به گام انجام می گیرد. تحلیل گرمایی فرایند بر اساس الگوریتم توصیف شده در [۱۱] و با استفاده از امکانات برنامه نویسی کاربر در ANSYS ترتیب داده شده است. در مرجع فوق راه حل تحلیلی جدیدی [۱۲] برای

تحلیل گرمایی فرایند به کار رفته است. در تحلیل گرمایی از تبادل گرمایی ورق با هوای اطراف به صورت همرفت و تابش صرف نظر شده و بنا به فرض، خنک کار دیگری هم استفاده نمی شود. همچنین خواص مواد مستقل از دما و مکان در نظر گرفته می شوند. در هر گام با معلوم بودن مختصات نقاط گرهی، پس از محاسبه شار گرمایی ورودی و تحلیل گرمایی، دماهای گرهی تعیین می شوند. از میدان دمای گرهی محاسبه شده به عنوان بارگذاری گرمایی برای تحلیل ترمو الاستیک پلاستیک استفاده می شود. در این مطالعه اثر وزن ورق نیز در نظر گرفته می شود. در پایان هر گام مختصات به روز شده نقاط گرهی برای محاسبه میدان دمای گرهی گام بعدی مورد استفاده قرار می گیرند. سیکل اشاره شده تا اتمام زمان کل تحلیل ادامه می یابد.

۳- مدل اجزای محدود ورق

در فرایند خمکاری شعله ای در راستای محورهای مختلف به خصوص در راستای ضخامت ورق گرادانهای گرمایی زیادی به وجود می آیند. همچنین تحلیل تغییر شکل غیرخطی ورق به روش اجزای محدود مستلزم حل مکرر یک سیستم معادلات غیرخطی حجیم است. بنابراین انتخاب نوع و تعداد اجزا حائز اهمیت است. در شکل (۵) مدل مش بندی شده نصف ورق را نشان می دهد. در تحلیلهای ترمومکانیکی یک خط گرمایش در وسط ورق در نظر گرفته می شود. به دلیل تقارن بارگذاری و حل نسبت به صفحه xz ، تنها نصف ورق تحلیل می شود. با توجه به غیرخطی بودن تحلیل و تعداد زیاد اجزای مدل، از اجزای جامد هشت گرهی استفاده می شود. این مدل از سه ناحیه مش ریز، ناحیه گذر از مش ریز به درشت و ناحیه مش درشت تشکیل یافته است. تقریباً تمام تغییر شکل پلاستیک ماده در ناحیه زیر شعله (ناحیه مش ریز) متمرکز می شود. در این ناحیه چگالی شار ورودی گرما نیز بالاست. گرادیان دما در راستای ضخامت ایجاب می کند اندازه تقسیمات از وجه گرم شده به طرف پشت ورق

به طور تصاعدی افزایش یابد.

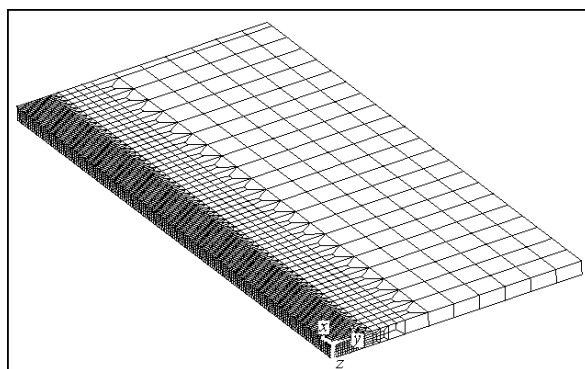
۴- خواص مواد

در شبیه سازیهای به عمل آمده در این تحقیق خواص گرمایی مواد ثابت و برابر خواص فولاد نرم در صفر درجه سانتیگراد در نظر گرفته می شود. شکلهای (۶) و (۷) خواص مواد مربوط به فولاد نرم را به صورت تابعی از دما نشان می دهند. ρ و k و c_p در شکل (۶) به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت گرمایی و چگالی ماده اند. در شکل (۷) نیز E ، σ_y و α به ترتیب تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، شیب خط منحنی تنش کرنش در ناحیه پلاستیک و ضریب انبساط طولی ماده اند. در شبیه سازیها خواص مکانیکی به صورت تابع دما و برابر مقادیر نظیر شکل (۷) در نظر گرفته شده اند. در این شبیه سازیها رفتار ماده به صورت الاستیک-پلاستیک با کار سختی ایزوتروپیک و منحنی تنش-کرنش دو خطی فرض شده است.

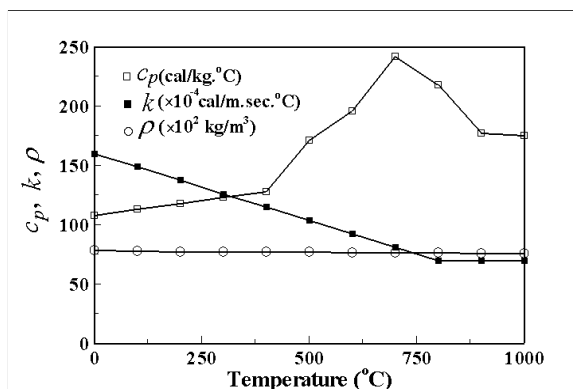
۵- نتایج تحلیلهای عددی

بر اساس رویه مشروح در بخشهای قبل دوازده تحلیل ترمو-الاستیک پلاستیک ترتیب داده شدند. شرایط گرمایش به کار رفته در این تحلیلهای جدول (۱) ذکر شده اند. q_{eff} ، v ، h و γ در این جدول به ترتیب نشان دهنده ضخامت ورق، سرعت مشعل، توان موثر و ضریب تمرکز شعله اند. برای انتخاب شرایط گرمایش، داده های تجربی اندازه گیری شده و نتایج ارائه شده توسط سایر محققان مد نظر بوده اند [۵، ۷ و ۱۰].

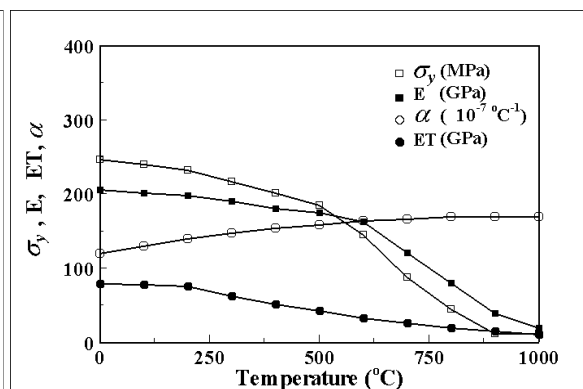
در تحلیل اول، ورق مربع شکلی به طول و عرض 300×300 mm در نظر گرفته شده است. منحنیهای دما - زمان محاسباتی به روش تحلیلی این مطالعه و به روش عددی [۱۰]، برای نقاط وسط ورق در وجوه گرم شده و پشت آن در شکل (۸) نشان داده شده اند. همان طوری که در این شکل ملاحظه می شود دمای نقطه مرکز ورق در وجه گرم شونده از لحظه ای که مرکز شعله به نزدیکی آن می رسد شروع به افزایش



شکل ۵- مدل مش بندی شده نصف ورق



شکل ۷. خواص مکانیکی مواد به صورت تابع دما [۷]



شکل ۶. خواص گرمایی مواد به صورت تابعی از دما [۷]

جدول ۱- شرایط گرمایش در نظر گرفته شده برای تحلیلهای عددی

No.	h (mm)	v (mm/s)	q_{eff} (cal/s)	γ (mm ⁻²)
۱	۸	۵۰	۲۴۷۵	۰/۰۰۴۶
۲	۱۸	۱/۲	۸۷۰	۰/۰۰۱۹
۳	۱۲	۳/۸	۱۳۰۰	۰/۰۰۳۱
۴-۵-۶	۱۶	۴-۵-۶	۱۳۰۰	۰/۰۰۳۱
۷-۸-۹	۱۸	۴-۵-۶	۱۳۰۰	۰/۰۰۳۱
۱۰-۱۱-۱۲	۲۰	۴-۵-۶	۱۳۰۰	۰/۰۰۳۱

مقایسه‌ای بین توزیع دمای محاسباتی در این تحقیق با نتایج [۱۰] انجام شده است. در این حالت به ازای توان موثر و خواص گرمایی یکسان مواد، ملاحظه می‌شود که در روش تحلیلی انتقال گرمای به کار رفته در این تحقیق، باید مقدار

می‌کند و کمی پس از عبور مرکز مشعل از این نقطه (تقریباً $t=3$ SEC) دما به حداکثر خود می‌رسد. از این لحظه به بعد دما شروع به کم شدن می‌کند. آهنگ کاهش دما ابتدا سریع و سپس آهنگ کندی پیدا می‌کند. همچنین در شکل (۸)

– معادله (۱) برای مدل‌سازی شار ورودی گرما اعمال شده است. توان موثر مشعل 2475 cal/sec ، ضریب تمرکز آن 0.031 mm^{-2} و سرعت مشعل 50 mm/sec در نظر گرفته شده‌اند.

– خواص گرمایی مواد ثابت و عبارت‌اند از:

$$c_p = 0.098 \text{ cal/gr.}^\circ\text{C}$$

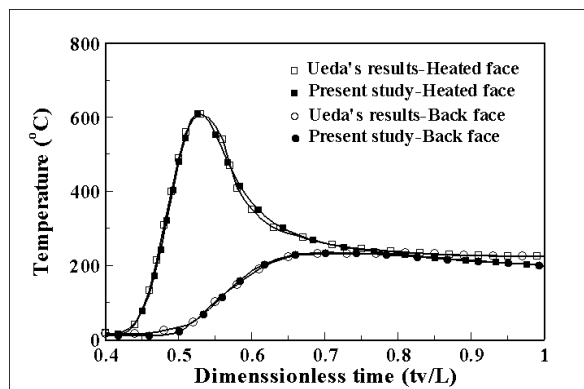
$$k = 0.016 \text{ cal/mm.sec.}^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\rho = 0.00782 \text{ gr/mm}^3$$

همچنین خواص مکانیکی مواد تابع دما فرض شده‌اند. در تحلیل عددی انجام شده در این مطالعه، شیب منحنی تنش کرنش در ناحیه پلاستیک کم فرض شده تا به حالت کاملاً پلاستیک نزدیک باشد.

در شکل (۹) تغییر شکل زاویه‌ای لبه شروع ورق به ازای زمان بی بعد τ نشان داده شده است. همان طوری که از این شکل ملاحظه می‌شود رفتار ماده در هر سه حالت یکسان است. در ابتدا ورق دچار خمش معکوس می‌شود ولی به تدریج با گرم شدن آن خمش و تغییر شکل زاویه‌ای ورق عکس شده و مقدار آن به سمت مقدار واحدی میل می‌کند. به طوری که تقریباً از $\tau = 0.8$ به بعد، تقریباً پاسخ هر دو روش یکسان و تقریباً برابر 0.02 rad است.

در شکل (۱۰) مقدار نرماله شده انقباض صفحه‌ای ورق به ازای مختصه نرماله شده مختصات نقاط در جهت عرضی رسم شده است. در این فرایند با تغییر شکل بزرگ ورق وجوه گرم شده و پشتی ورق کشیده خواهند شد. به عبارت بهتر صفحه میانی ورق نیز دارای جابه جایی خواهد بود. لذا منظور از عبارت انقباض مثبت، انبساط این صفحات است. در این شکل به ازای $\tau \geq 0.2$ نتیجه هر سه مطالعه یکسان است ولی برای زمانهای کمتر رفتار ورق متفاوت خواهد بود. در منحنی مربوط به نتایج ائدا [۱۰] مقدار انقباض نقاط در راستای y برای تمام نقاط مثبت است یعنی نقاط واقع در وجه گرم شده در این راستا منبسط می‌شوند. در صورتی که با رجوع به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود نقطه مرکز ورق در وجه گرم شده در این

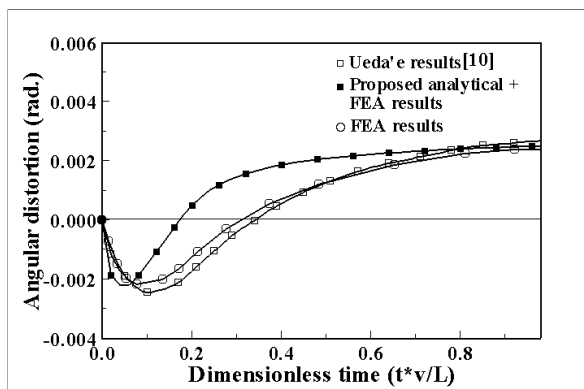


شکل ۸. سابقه زمانی توزیع دما در ورق محاسبه شده به روش این تحقیق و روش اجزای محدود در [۱۰]

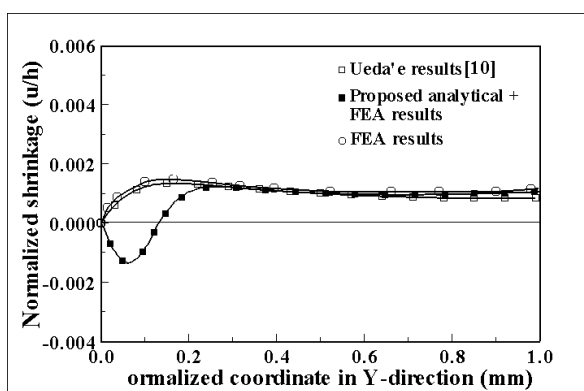
ضریب تمرکز شعله 0.046 mm^{-2} انتخاب شود تا انطباق بالا مشاهده شود. ضریب تمرکز شعله در مرجع [۱۰] 0.031 mm^{-2} تخمین زده شده است. بنابراین شعله در این حالت فشرده تر پیش بینی می‌شود.

نتایج تحلیل تغییر شکل ورق در این تحقیق را می‌توان با نتایج اعلام شده در مرجع [۱۰] مقایسه کرد. فرضیات و روش به کار رفته در مرجع فوق عبارت‌اند از:

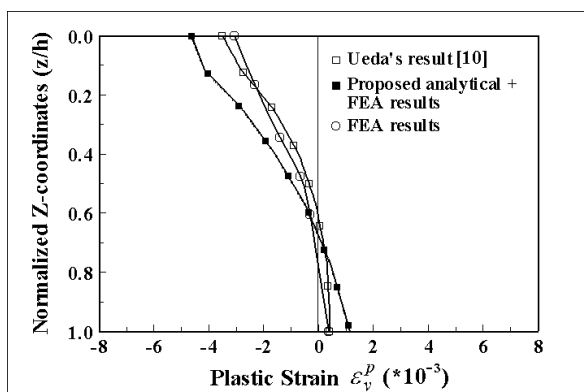
– از روش اجزای محدود با فرض رفتار ترموالاستیک- کاملاً پلاستیک و تغییر شکل بزرگ ماده استفاده شده است. برنامه تحلیلگر تغییر شکل را خود مولف تدوین کرده و برای جلوگیری از رخ دادن پدیده قفل شدن برشی محاسبات، روش «انتگرالگیری کاهیده انتخابی» را به کار برده است. مشخصات مش بندی مدل و جزییات روش اعمال شده برای انتگرالگیری ذکر نشده‌اند. لذا برای بررسی بیشتر نتایج به دست آمده از روش فعلی با نتایج مرجع [۱۰]، یک تحلیل کاملاً عددی ترموالاستیک پلاستیک نیز ترتیب داده شده است. در این تمرین به کمک برنامه ANSYS هر دوی تحلیل‌های گرمایی و تغییر شکل به روش اجزای محدود انجام شده‌اند. برای نزدیک بودن شرایط تحلیل عددی اینجا با تحلیل ائدا [۱۰]، از امکانات انتگرالگیری کاهیده در ANSYS استفاده شده است.



شکل ۹- مقایسه تغییر شکل زاویه‌ای لبه شروع ورق محاسبه شده در [۱۰] و این تحقیق



شکل ۱۰- مقایسه انقباض صفحه‌ای ورق محاسبه شده در [۱۰] و این تحقیق



شکل ۱۱- مقایسه کرنش پلاستیک در راستای ضخامت ورق

شکل (۱۰) معقول است. از طرف دیگر پدیده ای که غالباً در فرایند گرمایش خطی اتفاق می افتد این است که در راستای خط گرمایش نوعی انباشتگی ماده مانند خطوط بند انگشت به وجود می آید. شکل (۱۲) این پدیده فیزیکی را نشان می دهد. منحنی مربوط به تحقیق فعلی در شکل (۱۰) بروز این پدیده را

راستا دچار کرنش فشاری پلاستیک می شود. در شکل (۱۱) کرنش پلاستیک در راستای ضخامت ورق در نقطه مرکز ورق رسم شده است. با توجه به اینکه در مرکز وجه گرم شده بیشترین کرنش پلاستیک منفی گزارش شده است، به نظر می رسد نتایج تحقیق فعلی در مورد انقباض صفحه‌ای،

مدلسازی شار ورودی انتخاب کرده است. شرایط گرمایش در مثال لی عبارت‌اند از:

$$v = 1.2 \text{ [mm/sec]}$$

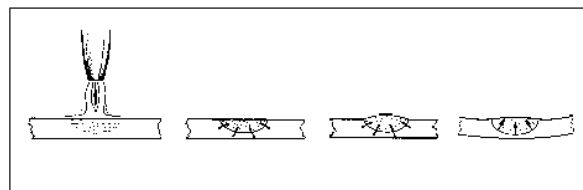
$$q_{\text{eff}} = 800 \text{ [cal/sec]}$$

$$\gamma = 0.164 \text{ [cm}^{-2}\text{]}$$

در شکل (۱۳) منحنیهای دما-زمان مربوط به هر دو تحقیق نشان داده شده‌اند. همان طوری که ملاحظه می‌شود منحنیها کاملا برهم منطبق‌اند. در شکل (۱۴) نیز نمودارهای خیز-زمان برای نقطه مرکز ورق در وجه گرم شده رسم شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که مقدار خیز پیش بینی شده در هر دو روش یکسان خواهد بود. از نتایج به دست آمده در لحظات ابتدایی ملاحظه می‌شود ورق دچار خمش معکوس اولیه خواهد شد. همچنین از جدول (۱)، مجددا ضریب تمرکز شعله در روش لی کمتر و لذا شعاع موثر شعله بیش از مقدار نظیر آن در روش فعلی در نظر گرفته می‌شود. همان طوری که انتظار می‌رود به ازای یک میدان دما یکسان، مقدار خیز پیش بینی شده نیز برابر است.

شکل (۱۵) مقدار مولفه کرنش پلاستیک عرضی ورق به ازای زمانهای مختلف را نشان می‌دهد. در این حالت نیز مقدار کرنش کمی بیش از مقدار پیش بینی شده در تحقیق لی است. علت این امر می‌تواند در موضعی بودن بیشتر تغییر شکل در روش تحقیق فعلی و در نتیجه میزان کرنش بیشتر ماده دانست. قابل ذکر است که تاکنون مقدار کرنش فوق‌الذکر به طور تجربی اندازه‌گیری نشده است.

جانگ [۵] برای تحلیل گرمایی فرایند از راه حل تحلیلی روزنتال استفاده کرده است. در این روش مشعل با منبع گرمایی نقطه‌ای مدلسازی می‌شود. بنابراین در این مثال باید ضریب تمرکز شعله را با کالیبراسیون عددی از توزیع تجربی دمای گزارش شده در [۵] تعیین کرد. بر این اساس در جدول (۱) پارامترهای شعله نظیر شرایط گرمایش جانگ در ردیف سوم آورده شده‌اند. طول و عرض ورق در این حالت به ترتیب ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر هستند.

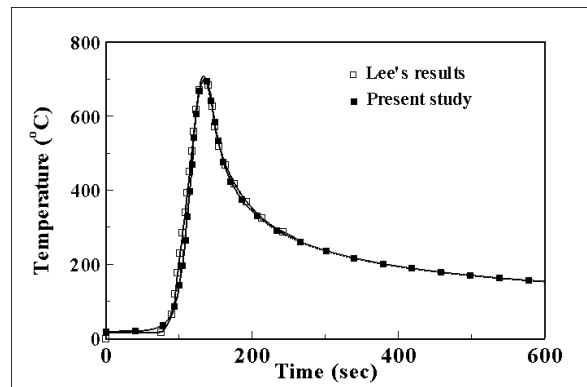
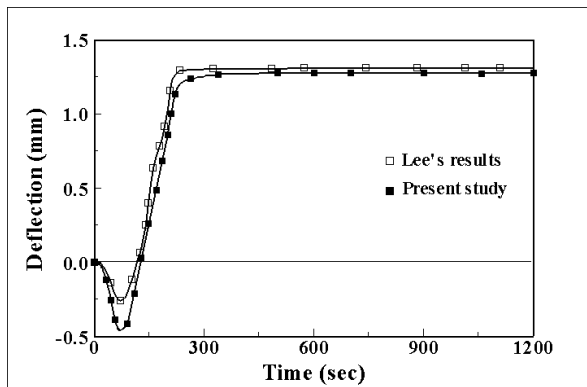


شکل ۱۲- پدیده انباشتگی موضعی ماده در اطراف خط گرمایش (از چپ به راست)

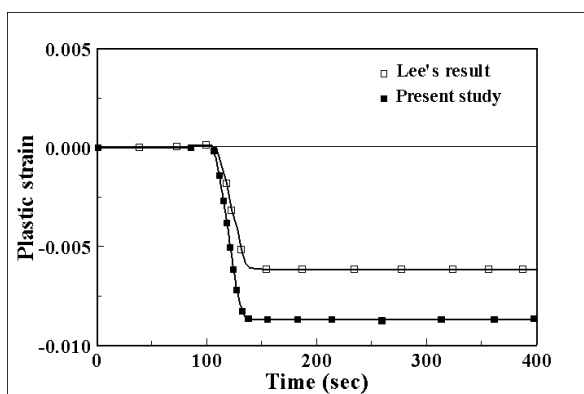
با پارامترهای گرمایش مربوطه پیش بینی می‌کند. در صورتی که با شرایط گرمایش مربوط به روش کاملا عددی اندا [۱۰]، این پدیده اتفاق نمی‌افتد.

در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود علی‌رغم هماهنگی کیفی در رفتار پیش بینی شده ورق، نتیجه روش فعلی برای کرنش پلاستیک کمی بیش از نتایج کاملا عددی و روش اندا محاسبه شده در [۱۰] و این رساله‌اند. در هر دو تحلیل انجام گرفته در این مطالعه (تحلیلهای کاملا عددی و تحلیلی- عددی) خواص مواد شبیه خواص در نظر گرفته شده در مطالعه اندا هستند بعضی خواص گرمایی ثابت و خواص مکانیکی به صورت تابع دما فرض شده‌اند. با این تفاوت که رفتار ماده ترمو الاستیک پلاستیک در نظر گرفته شده است. به نظر می‌رسد در این مطالعه کاهش شعاع موثر شعله قدری موضعی بودن و در نتیجه کمیت کرنش پلاستیک را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر انتظار می‌رود اعمال انتگرالگیری کاهیده در نتایج مطالعه اندا به طور قابل ملاحظه‌ای موثر باشد. نتایج تحلیل کاملا عددی انجام گرفته، نشان دهنده این امر هستند. این روش به رغم ذخیره زمان پردازش، تا حدی نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. البته با توجه به همخوانی خوب نتایج در دو مطالعه دقت محاسبات منطقی به نظر می‌رسد.

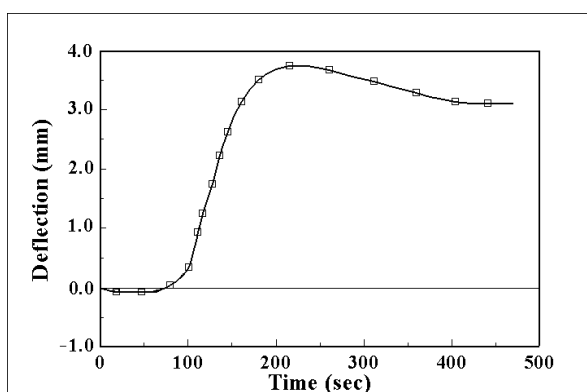
در دومین تحلیل، ورقی به ابعاد ۶۰۰×۲۰۰ mm در نظر گرفته شده است. شرایط گرمایش در این مطالعه طوری انتخاب شده‌اند که توزیع دمای محاسباتی بر توزیع دمای گزارش شده در تحقیق لی [۷] منطبق شود. لی [۷] برای شبیه‌سازی فرایند از نرم افزار ANSYS به عنوان برنامه تحلیلگر انتقال گرما و تغییر شکل استفاده کرده است. او نیز توزیع گوسی نرمال را برای



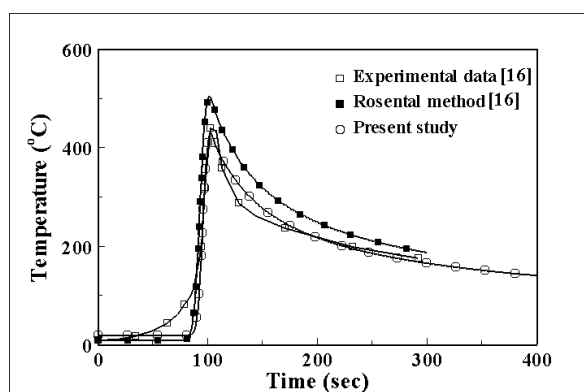
شکل ۱۳- منحنیهای دما-زمان تحقیق لی [۷] و تحقیق فعلی برای مرکز وجه گرم شده
 شکل ۱۴. منحنیهای خیز- زمان تحقیق لی [۷] و تحقیق فعلی برای مرکز وجه گرم شده



شکل ۱۵- منحنیهای کرنش پلاستیک-زمان تحقیق لی [۲۰] و تحقیق فعلی برای مرکز وجه گرم شده در راستای عرضی



شکل ۱۷- منحنی محاسباتی خیز- زمان در تحقیق فعلی



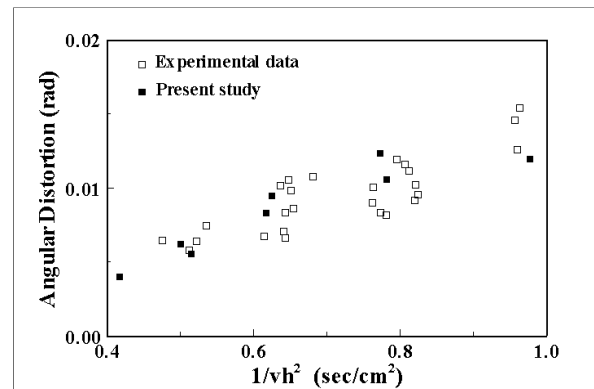
شکل ۱۶- منحنیهای دما-زمان تجربی و محاسباتی جانگ [۵] و محاسباتی در تحقیق فعلی در $y = 20$ mm از مرکز وجه گرم شده

شکل (۱۸) مقایسه‌ای بین نتایج محاسباتی در این تحقیق با داده‌های تجربی جانگ صورت گرفته است. همان طوری که در این شکل نیز مشاهده می‌شود نتایج شبیه سازیها انطباق خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای مطالعه مکانیزم تغییر شکل ورق در فرایند خمکاری شعله‌ای ارائه شد. در این روش از راه حل تحلیلی میدان دما همراه حل عددی جابه جایی گرهی استفاده می‌شود. در هر مرحله از تحلیل پس از اعمال شار گرمای ورودی با توزیع گوسی نرمال، میدان دما تعیین شده و به عنوان بارگذاری گرمایی در تحلیل ترمو الاستیک پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبیه سازیها تغییر شکل ماده، بزرگ و کرنش، کوچک فرض می‌شوند. خواص گرمایی ماده ثابت و برابر مقادیر مربوط به صفر درجه، شکل (۶) و خواص مکانیکی تابع دما، شکل (۷) در نظر گرفته می‌شوند. در این روش برای تعیین پارامترهای شعله از کالیبراسیون عددی استفاده می‌شود. برای این منظور به منحنی دما- زمان یا دما- مکان تجربی نیاز است.

نتایج شبیه سازیها به این روش همخوانی خوبی با نتایج سایر محققان و داده‌های تجربی موجود دارند. پدیده‌های خمش معکوس ورق، انباشتگی موضعی ماده و برگشت فنری را می‌توان با این تحلیل مشاهده کرد. از این روش می‌توان در مطالعات پارامتری فرایند استفاده کرد. در شبیه سازیهای انجام شده تغییر شکل ورق نسبت به گزارشهای موجود، موضعیت‌تر بوده و کرنش پلاستیک بیشتری در ناحیه زیر شعله پیش بینی می‌شود.



شکل ۱۸- مقایسه نتایج شبیه‌سازیهای انجام شده با داده‌های تجربی جانگ [۵]

شکل (۱۶) منحنی دما- زمان تجربی و محاسباتی جانگ را نشان می‌دهد. به ازای پارامترهای جدول (۱) و با استفاده از راه حل تحلیلی به کار رفته در تحقیق فعلی، منحنیهای دما- زمان در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند. در این شکل، میزان انطباق خوبی با داده‌های تجربی ملاحظه می‌شود. شار ماکزیمم تخمینی به روش جانگ برابر 1300 cal/sec گزارش شده که از جدول (۱) ملاحظه می‌شود با شار ماکزیمم برآورد شده در این تحقیق یکسان است. شکل (۱۷) نمودار خیز- زمان برای نقطه مرکز وجه گرم شده در این شبیه سازی را نشان می‌دهد. خیز اندازه‌گیری شده در نقطه مرکز ورق در [۵] برابر $\delta = 2/96 \text{ mm}$ است. مقدار خیز محاسباتی در اینجا تقریباً ۵٪ بیش از مقدار اندازه‌گیری شده است. بنابراین نتیجه شبیه‌سازی قابل قبول به نظر می‌رسد. در این شکل مجدداً پدیده عکس شدن خیز ورق در لحظات اولیه پیش بینی می‌شود. نکته دیگری که از این شکل مشاهده می‌شود اینکه ورق حالت برگشت فنری را تجربه می‌کند.

بر اساس پارامترهای گرمایش نظیر آزمایشهای جانگ (تحلیل سوم)، تحلیل‌های دیگری ترتیب داده شده‌اند. در

1. Iwamura, Y., and Rybicki, E.F., "A Transient Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis of Flame Forming," *Journal of Engineering for Industry*, pp.163-171, Feb.1973.
 2. Moshaiov, A. and Vorus, W., "The Mechanics of the Flame Bending Process: Theory and Applications," *Journal of Ship Research*, Vol.31, No.4, pp. 269-281, 1987.
 3. Shin, J.G., and Moshaiov, A., "Modified Strip Model for Analyzing the Line Heating Method-Part1: Elastic Plates," *Journal of Ship Research*, Vol.35, No.2, pp.172-182, 1991.
 4. Shin, J.G., and Moshaiov, A., "Modified Strip Model for Analyzing the Line Heating Method-Part2: Thermo-Elastic Plastic Plates," *Journal of Ship Research*, Vol.35, No.3, pp. 266-275, 1991.
 5. Jang, C.D., and D.E. Ko, "A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis," *Journal of Ship Production*, Vol.13, No.1, pp. 22-27, 1997.
 6. Yu, G., "Modeling of Shell Forming by Line Heating," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
 7. Lee, J. H., "Three-Dimensional Simulation of the Mechanics of Line Heating," M.S. Thesis Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 1995.
 8. Clausen, H.B., "Three Dimensional Numerical Simulation of Plate Forming by Line Heating," ICCAS', pp. 387-398, 1999.
 9. Ishiyama, M., Tango, Y., and Nakamura, Y., "Studies of Plate Bending for Practical Use by Computer Aided Line Heating System," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.183, pp.335-342, 1998.
 10. Ueda, Y., Murakawa, H., Rashwan, A.M., Okumoto, Y., and Kamichika, R., "Development of Computer-Aided Process Planning System for Plate Bending (Report 3)- Relation Between Heating Condition and Deformation," *Journal of Ship Production*, Vol.10, No.4, pp. 248-257, 1994.
۱۱. همتی، س. ج. نیازی، م. ع. معرفت م. و نقدآبادی، ر.، "تعیین تاثیر پارامترهای موثر در شکل دهی ورقهای بدنه کشتی به روش گرمایش خطی"، رساله دکتری، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس.
12. Manca, O., "Quasi-Steady-State Three-Dimensional Temperature Distribution Induced by a Moving Circular Gaussian Heat Source in a Finite Depth Solid," *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 1305-1315, 1995.