

تعیین شرایط گرمایش در فرایند شکل‌دهی ورق به‌روش

خمکاری شعله‌یی

سید جلال همتی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی - بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان

محمدعلی نیازی (استادیار)

مهدی معرفت (استادیار)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تربیت مدرس

رضا نقدآبادی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

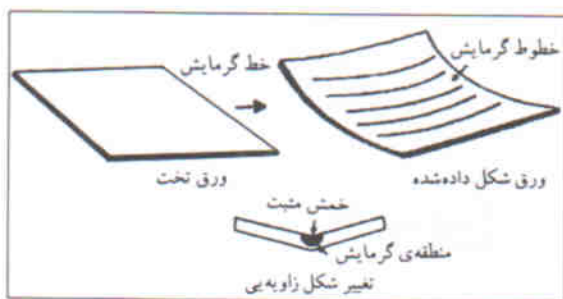
در صنعت از فرایند خمکاری شعله‌یی برای شکل‌دهی قطعه کارهای فولادی استفاده می‌شود. شکل‌دهی ورق‌های بزرگ و تیرها در سازه‌های فولادی از جمله موارد کاربرد این فرایند هستند. در اکثر موارد فرایند به‌صورت دستی انجام می‌گیرد. در این نوشتار با انجام مطالعات پارامتری، پارامترهای مؤثر بر فرایند خمکاری شعله‌یی ورق‌های فولادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی از تحلیل‌های کشسانی -خمیری گرمایی فرایند استفاده می‌شود. با انجام شبیه‌سازی‌های عددی و به‌کمک تحلیل ابعادی، پس از تعیین متغیرهای ورودی و با استفاده از تحلیل رگرسیون چندتایی متغیرهای مؤثر شناسایی شده، بین پارامترهای گرمایش و انحناء پسماند ورق یک رابطه ارائه می‌شود. از رابطه‌ی به دست آمده می‌توان برای پیش‌بینی میزان تغییر شکل ورق و خودکاری فرایند استفاده کرد.

مقدمه

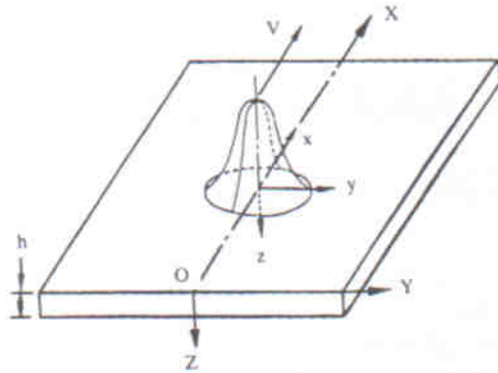
نیز برای انتقال این تجارب انجام گرفته است، ولی تجارب آنها قابل فرمول‌بندی نیستند. به همین دلیل معمولاً از شبیه‌سازی‌های میدانی یا نظری استفاده می‌شود. بعضی از محققان شبیه‌سازی‌هایی میدانی انجام داده‌اند^[۱]، ولی به دلیل بالا بودن هزینه‌های آزمایش‌های تجربی و نیز پیشرفت‌های رایانه‌یی، معمولاً از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده می‌شود. با انجام شبیه‌سازی‌های ترمومکانیکی، می‌توان مجموعه‌یی از داده‌ها برای استخراج روابط نظری یا برای استفاده از الگوریتم شبکه عصبی^[۲] تشکیل داد. برای این منظور، معمولاً ورق‌یی با یک خط گرمایش مرکزی، یا با خطوط گرمایش در موقعیت‌های

در فرایند خمکاری شعله‌یی، با اعمال حرارت ناشی از شعله‌ی یک مشعل گازی، به قطعه کار شکل می‌دهند. کاربرد این روش در صنعت سابقه‌یی طولانی دارد. کاربرد این روش، به‌خصوص برای ورق‌های فولادی بزرگ و با انحناء مرکب (انحناء گوسی غیر صفر) که شکل‌دهی آنها به روش‌های دیگر سخت و پرهزینه است، اقتصادی و مفید است. به دلیل ساده بودن ابزار مورد نیاز و هزینه‌های پائین، این روش از محبوبیت بالایی برخوردار است. مسیر حرکت مشعل روی ورق به‌صورت خطوط منحنی است. هرگاه در شکل‌دهی ورق از بالای وجه گرم شده به آن نگاه شود در راستای خط گرمایش، ورق یک انحنای پسماند مثبت خواهد داشت. شکل ۱ شماتیک ورق تخت اولیه و ورق شکل داده شده با اعمال چند خط گرمایش را نشان می‌دهد. پس از اتمام عملیات گرمایش، ورق در راستای خط گرمایش و عمود بر آن دچار تغییر شکل زاویه‌یی و انقباض صفحه‌یی دائمی خواهد شد.

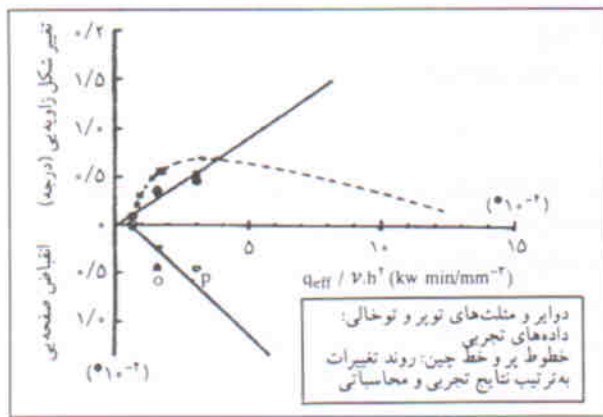
برای تعیین شرایط گرمایش باید روابط بین پارامترهای فرایند و میزان تغییر شکل ورق را شناسایی کرد. تکنسین‌های ماهر براساس پیش‌تجربی خود به‌طور کیفی به این روابط دست یافته‌اند. مطالعاتی



شکل ۱. ورق تخت اولیه و سطح نهایی پس از فرایند خمکاری شعله‌یی.



شکل ۳. مدل توزیع گوسی نرمال شار حرارت شعله.



شکل ۴. نتایج مطالعه‌ی تجربی نوموتو. [۲]

مؤثر شعله، سرعت مشعل و ضخامت ورق — به صورت تجربی بررسی کرد. [۲] در شکل ۴ نتایج مطالعات وی نشان داده شده است. در این شکل تغییر شکل زاویه‌ی و انقباض صفحه‌ی در راستای عمود بر خط گرمایش و برحسب مقادیر مختلف متغیر $q_{eff}/\nu h^2$ رسم شده است. براساس این نتایج، رابطه‌ی متغیر $q_{eff}/\nu h^2$ با تغییر شکل زاویه‌ی ورق، غیرخطی است و رابطه‌ی آن با انقباض صفحه‌ی به صورت خطی معکوس پیش‌بینی می‌شود. اندا و همکارانش نیز شاخص‌های نوموتو را برای تغییر شکل ورق انتخاب کرده‌اند. [۵] آنها برای مطالعات پارامتری خود از دو متغیر بی بعد β و γ استفاده کرده‌اند. در شکل‌های ۵ و ۶ به‌آزاد مقادیر مختلف β و γ تغییر شکل زاویه‌ی و انقباض صفحه‌ی نرمال ورق ترسیم شده‌اند.

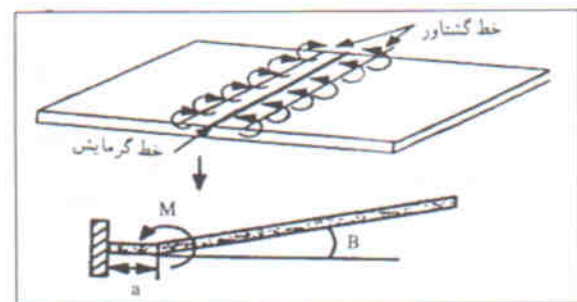
لی تغییر شکل زاویه‌ی و انقباض صفحه‌ی در راستای خط گرمایش و عمود بر آن را مورد مطالعه قرار داده است. [۶] او با انتخاب ضخامت ورق، سرعت مشعل و توان مؤثر شعله به‌عنوان پارامترهای گرمایش، رابطه‌ی آنها را با تغییر شکل‌های فوق مورد بررسی قرار داد.

مختلف را در نظر می‌گیرند و با تغییر پارامترهای گرمایش، مقدار تغییر شکل ورق اندازه‌گیری و در انباره داده‌ها ذخیره می‌شود. از نتایج این شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های آماری می‌توان به روابط کمی موجود بین پارامترهای گرمایش و میزان تغییر شکل پی برد.

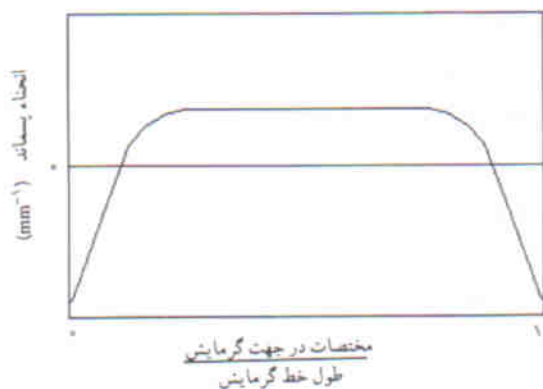
هرگاه موقعیت خط گرمایش معلوم باشد، از میزان تغییر شکل زاویه‌ی یا صفحه‌ی در راستای خط گرمایش یا عمود بر آن می‌توان شرایط گرمایش را تخمین زد. به‌طور کلی منظور از شرایط گرمایش، شرایط خاص تنظیم پارامترهای مشعل نسبت به مشخصات ورق و میزان تغییر شکل آن است. معمولاً مشعل با سرعت ثابت و تحت فاصله‌ی یکسان از سطح در راستای خط گرمایش حرکت می‌کند. بسته به نوع مدل‌سازی شعله‌ی مشعل و فرضیات به‌کار رفته در روش‌های محاسباتی، پارامترهای گرمایش متفاوت‌اند.

محققان رابطه‌ی بین شرایط گرمایش با گشتاور خمشی حرارتی ایجاد شده در ورق را بررسی کرده‌اند. [۲] به این ترتیب با انجام شبیه‌سازی‌هایی از فرایند، در گام اول رابطه‌ی بین گشتاور خمشی (M) با درجه حرارت (T) و سرعت مشعل (ν) و همچنین ضخامت ورق (h) در نظر گرفته شده است. در گام بعد با ساده‌سازی خمشی ورق با خمش تیر یکسر گیردار رابطه‌ی بین تغییر شکل زاویه‌ی ورق ($\hat{\theta}$) با M به دست آمده است (شکل ۲). به این ترتیب، با معلوم بودن مقادیر تجربی $\hat{\theta}$ ، M از رابطه دوم، و پارامترهای گرمایش از رابطه اول قابل محاسبه خواهند بود.

بعضی از محققان از جمله نوموتو، اندا و لی شار حرارت شعله را با توزیع گوسی نرمال مدل کرده‌اند. [۵، ۶] شکل ۳ توزیع شار ورودی و سیستم‌های مختصات ساکن و متحرک را نشان می‌دهد. شکل منحنی توزیع گوسی با دو پارامتر توان مؤثر شعله (q_{eff}) و ضریب تمرکز آن (γ) مشخص می‌شود. نوموتو با انتخاب تغییر شکل زاویه‌ی و انقباض صفحه‌ی عمود بر راستای گرمایش به‌عنوان شاخص‌های تغییر شکل ورق، رابطه‌ی آنها را با پارامترهای گرمایش — یعنی توان



شکل ۲. مدل‌سازی خمشی ورق با خمش تیر یکسر گیردار. [۲]



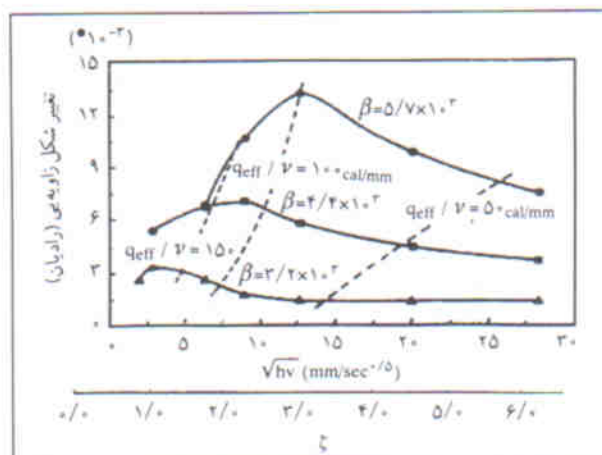
شکل ۷. انحنای ورق در راستای خط گرمایش واقع در وسط ورق.

طی یکسری مطالعات پارامتری، رابطه‌ی انحنای پسماند ورق با پارامترهای گرمایش به صورت آماری مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا متغیرهای مؤثر شناسایی و سپس رابطه‌ی آنها با انحنای پسماند بررسی می‌شود.

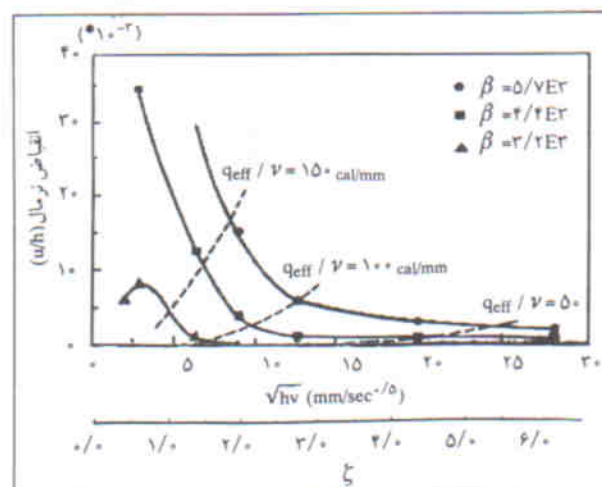
برای تعیین متغیرهای مؤثر از تحلیل ابعادی، و برای استخراج رابطه‌ی بین این متغیرها با انحنای پسماند ورق از تحلیل رگرسیون چندمتغیره استفاده می‌شود. در این تحقیق از شبیه‌سازی‌های رایانه‌یی فرایند به‌عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های به‌کار رفته در مقایسه با نتایج مشابه سایر محققان و داده‌های تجربی گزارش شده، مطابقت خوبی نشان می‌دهند.

مطالعه‌ی میدان درجه حرارت

برای تحلیل حرارتی فرایند شار حرارت شعله به صورت توزیع گوسی نرمال مدل می‌شود. به‌طور کلی هرچه توان مؤثر و ضریب تمرکز شعله بیشتر باشد درجه حرارت نقاط واقع در زیر شعله بالاتر و پهنای ناحیه گرم شده کم‌تر خواهد بود. فصل مشترک شعله با ورق به شکل دایره فرض می‌شود. شعاع این دایره که شعاع مؤثر نامیده می‌شود، به فاصله‌ی از مرکز دایره شعله اطلاق می‌شود که در آن شار حرارت ورودی درصد معینی از شار بیشینه در مرکز است.^[۱۷] در شرایط عملی برای تعیین پارامترهای شعله از نتایج اندازه‌گیری تجربی استفاده می‌شود. به این ترتیب به‌ازاء هر تنظیم خاص از مشعل (فاصله سرمشعل تا ورق، ابعاد سرمشعل و نسبت و فشار گازهای سوختی)، از طریق مقایسه‌ی نتایج محاسباتی با توزیع درجه حرارت اندازه‌گیری شده در یک قطعه کار استاندارد پارامترهای شعله را تخمین می‌زنند. از مطالعات به‌عمل آمده ملاحظه می‌شود که به‌ازاء هر تنظیم خاص از مشعل، مقادیر منحصر به‌فردی برای پارامترهای شعله

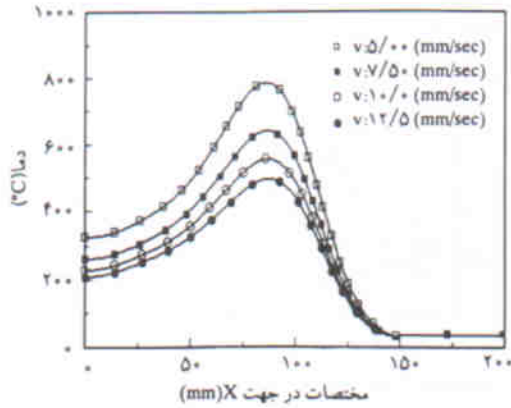


شکل ۵. نتایج اندا برای تغییر شکل زاویه‌یی ورق برحسب [۱۵]

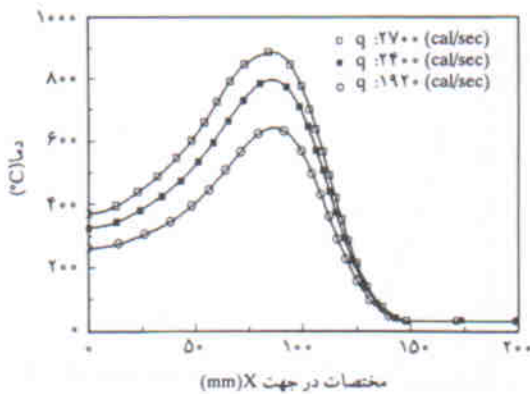


شکل ۶. نتایج اندا برای انقباض صفحه‌یی ورق برحسب [۱۵]

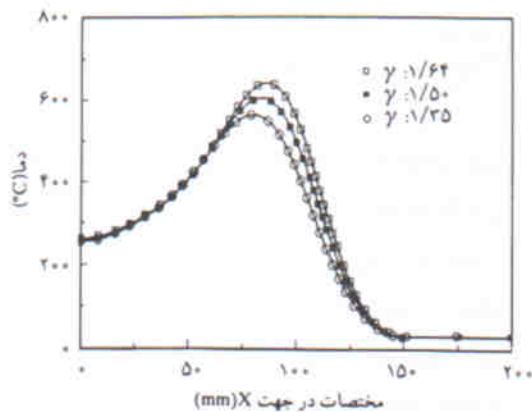
در مطالعات قبلی تغییر شکل زاویه‌یی و یا انقباض صفحه‌یی به‌عنوان شاخص‌های تغییر شکل ورق در نظر گرفته شده‌اند و براساس این شاخص‌ها شرایط گرمایش پیش‌بینی می‌شوند. در این مطالعه شاخص جدیدی برای تعیین شرایط گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۷ وضعیت انحنای پسماند ورق در راستای خط گرمایش را نشان می‌دهد. هرگاه حرکت مشعل از بیرون ورق شروع و به بیرون آن ختم شود (شکل ۷) در فواصل دور از لبه‌های ورق، انحنای ایجاد شده در راستای خط گرمایش ثابت می‌ماند. در این شکل، در قسمت‌های نزدیک لبه‌ها، ورق دارای انحنای متغیر منفی است و در فواصل دورتر انحنای تقریباً ثابت و مثبت دارد. انتظار می‌رود تغییرات انحنای پسماند ورق در نزدیکی لبه‌ها ناشی از اثرات لبه‌یی باشند. ایجاد انحنای ثابت در راستای خط گرمایش می‌تواند شاخصی از تغییر شکل ورق برای تعیین شرایط گرمایش باشد. در این نوشتار



شکل ۹. تأثیر سرعت مشعل بر توزیع درجه حرارت.



شکل ۱۰. تأثیر توان مؤثر مشعل بر توزیع درجه حرارت.



شکل ۱۱. تأثیر ضریب تمرکز شعله بر توزیع درجه حرارت.

درجه حرارت در راستای خط گرمایش به‌ازاء مقادیر مختلف q_{eff} و γ هستند.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده به‌روش اجزاء محدود، نقش خواص مواد مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱۲).

در تحلیل‌های مربوط به این شکل خواص مواد یکبار در 200

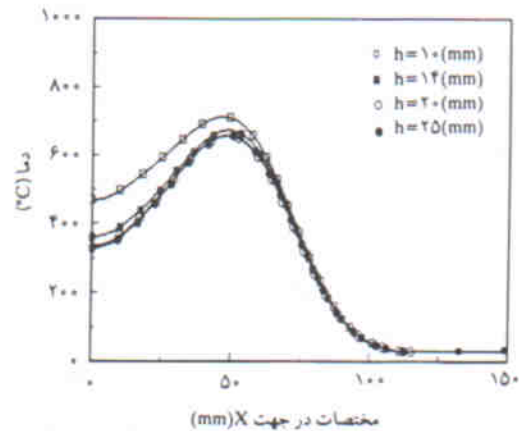
وجود دارند که مشخصات میدان درجه حرارت، از جمله بیشینه درجه حرارت (T_{max}) سطح را برآورده می‌کنند. بنابراین برای قطعه کار استاندارد به ابعاد معین، و مشعل با سرعت و پارامترهای معلوم، مقدار معینی از T_{max} حاصل خواهد شد. مؤلفان در مقالات قبلی به بررسی روش حل عددی و تحلیلی میدان درجه حرارت در این فرایند پرداخته‌اند. [۹، ۸]

تغییر شکل ورق در فرایند گرمایش خطی تحت تأثیر متغیرهای متعددی است. ابعاد ورق، خواص مواد، سرعت مشعل و مشخصات شعله از مهم‌ترین متغیرها هستند. از عوامل مؤثر دیگر می‌توان به اثرات لبه‌یی و ناهمگنی ناشی از کار سرد اولیه و خطوط گرمایش قبلی اشاره کرد. در این تحقیق، برای بررسی نقش پارامترهای مؤثر یک‌سری تحلیل‌های حرارتی به‌روش عددی و تحلیلی انجام شده‌اند. نتایج این تحلیل‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۵ آورده شده‌اند.

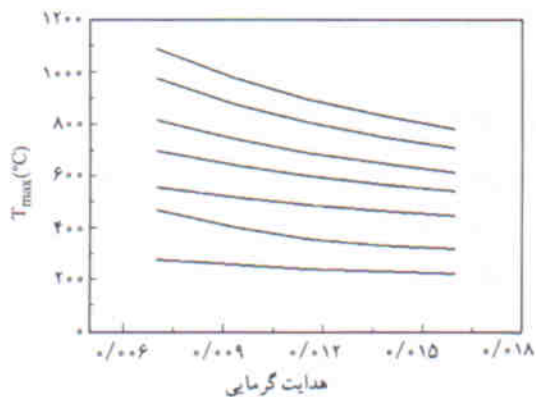
شکل ۸ نشان‌گر توزیع درجه حرارت در راستای خط گرمایش و به‌ازای ضخامت‌های مختلف است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت تا حدی از درجه حرارت بیشینه سطح (T_{max}) در وجه گرم شده کاسته شده و سرعت خنک شدن افزایش می‌یابد.

سرعت مشعل و پارامترهای شعله (γ و q_{eff}) نقش مهمی بر توزیع درجه حرارت دارند. از نظر فیزیکی انتظار می‌رود با افزایش سرعت مشعل عمق نفوذ حرارت کم‌تر و گرادیان درجه حرارت بیشتر شود. شکل ۹ مویذ این واقعیت است. در این شکل توزیع درجه حرارت به‌ازاء سرعت‌های مختلف مشعل در مکان در راستای خط گرمایش نشان داده شده است.

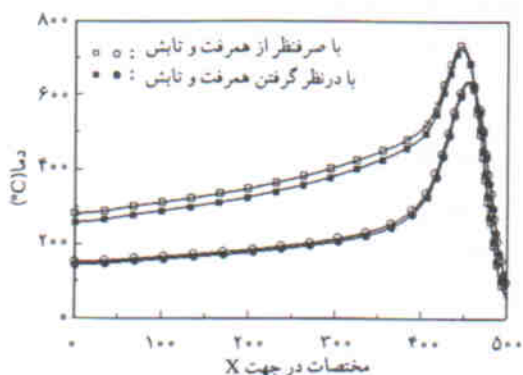
به همین ترتیب هر چه q_{eff} و γ بیشتر باشند درجه حرارت بیشینه بالاتر خواهد رفت زیرا شار حرارت بیشتری با تمرکز بیشتر به ورق اعمال خواهد شد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نشان‌گر توزیع



شکل ۸. تأثیر ضخامت ورق بر توزیع درجه حرارت.



شکل ۱۴. تأثیر ضریب هدایت گرمایی بر T_{max} .



شکل ۱۵. تأثیر تبادل حرارتی ورق با هوای اطراف برای ضخامت‌های مختلف.

از جمله ضخامت‌های مختلف میزان تبادل حرارت متفاوت است، کلاً تأثیر قابل توجهی بر توزیع درجه حرارت ندارد.

تحلیل ابعادی میدان درجه حرارت

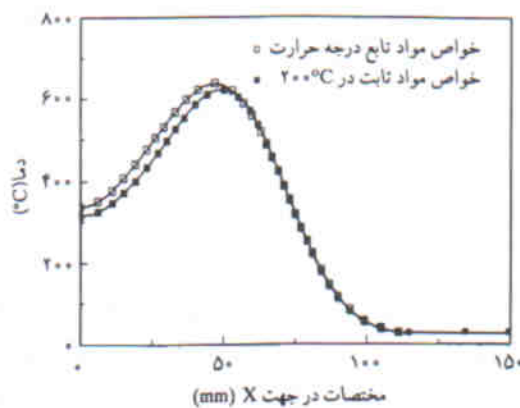
بر اساس توضیحات بخش قبل ضخامت ورق، سرعت مشعل، توان مؤثر و ضریب تمرکز شعله، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت گرمایی از جمله عوامل مؤثر بر میدان درجه حرارت، و نتیجتاً بر تغییر شکل ورق هستند. به جای ضریب تمرکز شعله می‌توان از شعاع مؤثر آن نیز استفاده کرد. همان طوری که قبلاً اشاره شد شعاع مؤثر شعله به فاصله‌ی از مرکز شعله گفته می‌شود که در آن شار ورودی حرارت درصد معینی از شار بیشینه باشد. به طور کلی می‌توان درجه حرارت در هر نقطه را چنین تعریف کرد:

$$T = f(h, \nu, q_{eff}, r, c, k) \quad (1)$$

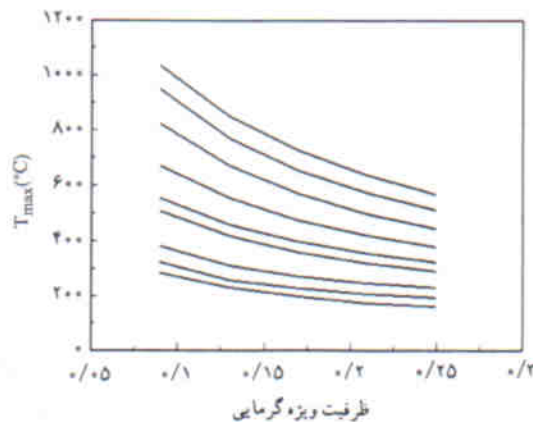
هرگاه T_{max} را به عنوان شاخص میدان درجه حرارت فرض کنیم. از مطالعات بالا نتیجه می‌شود که T_{max} دارای رابطه مستقیم با q_{eff} و رابطه عکس با h, ν, c و k است.

درجه سانتی‌گراد، و بار دیگر به صورت تابع درجه حرارت فرض شده‌اند. منحنی مربوط به خواص مواد تابع درجه حرارت دارای T_{max} بالاتر و پهنای بیشتری است. به عبارت دیگر، ثابت فرض کردن خواص مواد در مرحله‌ی گرم شدن ماده تأثیر قابل ملاحظه‌ی نداشته و فقط بر مقدار T_{max} و سرعت سرد شدن ماده مؤثر خواهد بود. این تأثیر برای خواص مواد در صفر درجه بیشتر است. در میان خواص مواد، تغییر چگالی نسبت به درجه حرارت قابل اغماض است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ شماتیکی تأثیر ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت گرمایی بر مقدار T_{max} نشان داده شده است. همان طوری که انتظار می‌رود با افزایش c_p و k مقدار T_{max} کاهش می‌یابد.

برای بررسی میزان تبادل حرارتی ورق با محیط از طریق همرفت آزاد و تابش، مطالعه‌ی صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۱۵ آمده است. در این شکل منحنی‌های توزیع درجه حرارت برای دو ضخامت مختلف $h = 10, 19 \text{ mm}$ از ورق با و بدون در نظر گرفتن تبادل حرارت با محیط رسم شده‌اند. گرچه به‌ازاء پارامترهای مختلف



شکل ۱۶. توزیع درجه حرارت برای خواص مواد (M.P.) ثابت و تابع دما.



شکل ۱۷. تأثیر ظرفیت ویژه گرمایی بر T_{max} .

در بین روابط ۷، رابطه‌ی سوم امکان کم‌تری دارد زیرا در آن تأثیر k در نظر گرفته نشده است. براساس این روابط، می‌توان متغیرهای زیر را به‌عنوان متغیرهای پیشنهادی برای برآزش یک رابطه‌ی نظری پیش‌بینی کرد:

$$\frac{q_{eff}}{r\sqrt{ckvh}}, \frac{q_{eff}}{h\sqrt{ckvr}}, \frac{q_{eff}}{\sqrt{ckvh^3}}, \frac{q_{eff}}{\sqrt{ckvr^3}}, \frac{q_{eff}}{cvrh}, \frac{q_{eff}}{cvr^2}, \frac{q_{eff}}{cvh^2} \quad (8)$$

این متغیرها از نظر ابعادی با T_{max} هم‌بعدند و در آنها نوع روابط خطی یا غیرخطی مستقیم و یا معکوس لحاظ شده است.

در مطالعات حرارتی بخش قبل اشاره شد که برای تعیین میدان درجه حرارت با راه حل تحلیلی، خواص مواد ثابت در نظر گرفته می‌شوند و لذا می‌توان در متغیرهای بالا k و c را به‌عنوان ثوابت خارج کرد. با مطالعه‌ی میدان درجه حرارت ملاحظه می‌شود که به‌ازاء سرعت‌ها و ضخامت‌های ثابت، برای هر مقدار q_{eff} فقط یک مقدار معین r وجود دارد که مشخصات میدان درجه حرارت را برآورده می‌کند، و معمولاً به‌ازاء هر تنظیم خاص از مشعل زوج معینی از q_{eff} و r به دست می‌آیند. همچنین هرگاه h, v و q_{eff} در بازه‌ی محدودی تغییر کنند تغییرات r نظیر آن کم است و از نظر عملی می‌توان آن را تقریباً ثابت فرض کرد. به این ترتیب می‌توان شعاع مؤثر شعله رانیز ثابت در نظر گرفت. لذا متغیرهای پیشنهادی ۸ را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

$$\frac{q_{eff}}{\sqrt{vh}}, \frac{q_{eff}}{\sqrt{vh^2}}, \frac{q_{eff}}{\sqrt{vh^3}}, \frac{q_{eff}}{\sqrt{v}}, \frac{q_{eff}}{vh}, \frac{q_{eff}}{v}, \frac{q_{eff}}{vh^2} \quad (9)$$

مطالعه‌ی پارامتری تغییر شکل ورق

برای مطالعه‌ی پارامتری تغییر شکل ورق در فرایند خمکاری شعله‌یی از روش شبیه‌سازی به‌کار رفته توسط همتی و همکاران استفاده شده است.^[۱۰] در این روش از راه حل تحلیلی انتقال حرارت برای تعیین توزیع درجه حرارت‌های گره‌ی و بارگذاری حرارتی در تحلیل‌های کشسانی - خمیری گرمایی استفاده می‌شود. تحلیل تغییر شکل بزرگ کشسانی - خمیری گرمایی ماده با استفاده از برنامه‌ی تجاری ANSYS انجام می‌گیرند. در تحلیل‌های انجام شده خواص حرارتی مواد ثابت و برابر با:

$$\begin{aligned} c_p &= 0.98 \text{ [cal/gr. } ^\circ\text{C]} \\ k &= 0.16 \text{ [cal/sec. } ^\circ\text{C]} \\ \rho &= 7.82 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \end{aligned} \quad (10)$$

و خواص مکانیکی به‌صورت تابع درجه حرارت و برابر خواص فولاد نرم در شکل ۱۶ در نظر گرفته شده‌اند.

در این شکل σ_y , E و ET به ترتیب عبارت‌اند از: تنش تسلیم،

براساس تحلیل ابعادی می‌توان رابطه‌ی زیر را برای T_{max} در نظر گرفت:

$$T_{max} = T(h^{\alpha_1}, v^{\alpha_2}, q_{eff}^{\alpha_3}, r^{\alpha_4}, c^{\alpha_5}, k^{\alpha_6}) \quad (2)$$

برای تعیین نماها و متغیرهای مربوطه در رابطه‌ی ۲، از تحلیل ابعادی استفاده می‌شود. ابعاد هر یک از پارامترهای بالا عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} T_{max} &= [\theta] & , & \quad q_{eff} = [FLT^{-1}] \\ h, r &= [L] & , & \quad c = [FL^{-2}\theta^{-1}] \\ v &= [LT^{-1}] & , & \quad k = [FT^{-1}\theta^{-1}] \end{aligned} \quad (3)$$

برای همگن بودن طرفین رابطه‌ی ۲ از نظر ابعادی می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} [\theta] &= [(L)^{\alpha_1} (LT^{-1})^{\alpha_2} (FLT^{-1})^{\alpha_3} (L)^{\alpha_4} (FL^{-2}\theta^{-1})^{\alpha_5} \\ & \quad (FT^{-1}\theta^{-1})^{\alpha_6}] \end{aligned} \quad (4)$$

و لذا نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 - 2\alpha_5 &= 0 \\ -\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_6 &= 0 \\ \alpha_3 + \alpha_5 + \alpha_6 &= 0 \\ -\alpha_5 - \alpha_6 &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

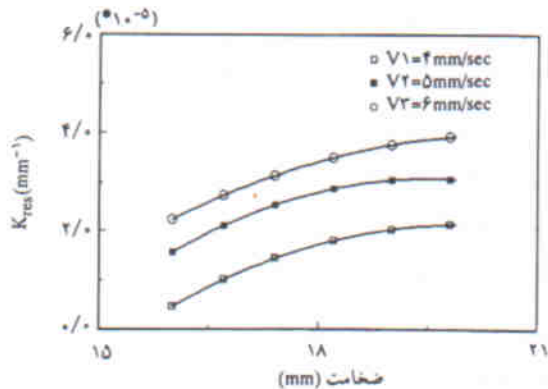
از حل معادلات فوق برحسب α_6 می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 &= -2 - \alpha_6 \\ \alpha_2 &= -(1 + \alpha_6) \\ \alpha_3 &= 1 \\ \alpha_5 &= -(1 + \alpha_6) \end{aligned} \quad (6)$$

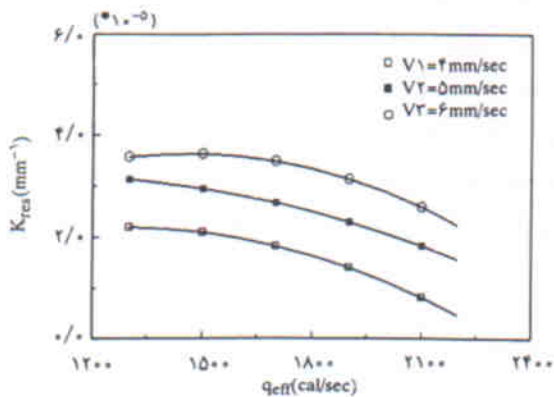
چون در سیستم معادلات فوق $\alpha_2 = 1$ است باید سیستمی مرکب از سه معادله و پنج مجهول را حل کرد. برای حل این سیستم نامعین می‌توان براساس ملاحظات تجربی به دست آمده، مقادیر آزمایشی مناسبی برای دو مجهول انتخاب کرده و معادلات را حل کنیم. چون در معادلات $\alpha_2 = \alpha_5$ است با توجه به رابطه‌ی معکوس T_{max} با v و c می‌توان برای α_2 و α_5 مقادیر آزمایشی منفی انتخاب کرد. اگر رابطه‌ی عکس T_{max} با v و c را از نوع خطی یا توان دوم و یا ریشه‌ی دوم فرض کنیم، با جایگذاری و حل سیستم معادلات ۶ به‌ازاء $-1, -2, \alpha_2 = \alpha_5 = \frac{-1}{2}$ سه حالت زیر محتمل خواهند بود:

$$\begin{aligned} T_{max} &= T\left(\frac{1}{h}, \frac{1}{\sqrt{v}}, q_{eff}, \frac{1}{r}, \frac{1}{\sqrt{c}}, \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \\ T_{max} &= T\left(\frac{1}{h}, \frac{1}{\sqrt{v}}, q_{eff}, \frac{1}{\sqrt{r}}, \frac{1}{\sqrt{c}}, \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \\ T_{max} &= T\left(\frac{1}{h}, \frac{1}{v}, q_{eff}, \frac{1}{r}, \frac{1}{c}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

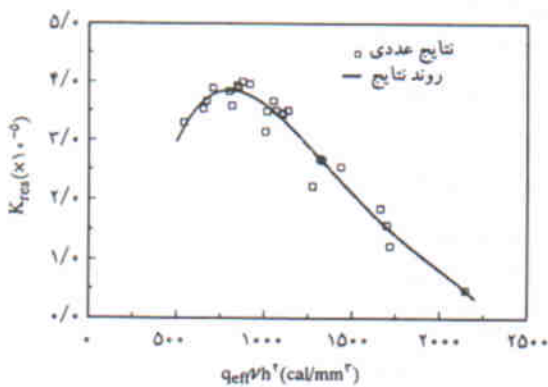
است. در این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت و سرعت‌ها انحناء زیاد و یا شعاع انحناء کم می‌شود. برعکس، در شکل ۱۸ با افزایش q_{eff} انحناء پسماند ورق کم می‌شود که از فیزیک فرایند قابل پیش‌بینی است. در شکل ۱۹ نیز روند تغییرات غیرخطی انحناء پسماند به‌ازاء متغیر q_{eff}/v^2 ملاحظه می‌شود. در این شکل پیش‌بینی می‌شود که به‌ازاء یک مقدار معین از متغیر بالا انحناء ایجاد شده بیشینه خواهد بود.



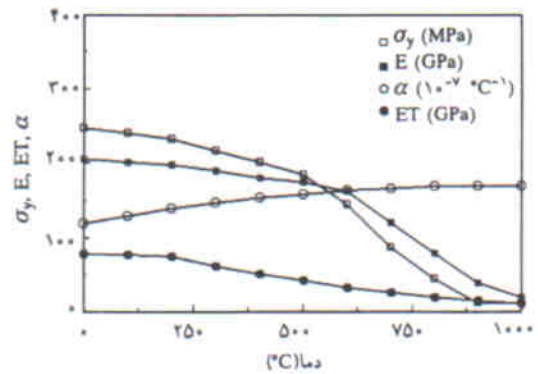
شکل ۱۷. انحناء پسماند ورق به‌ازاء h در سرعت‌های مختلف مشعل.



شکل ۱۸. انحناء پسماند ورق به‌ازاء q_{eff} در سرعت‌های مختلف مشعل.



شکل ۱۹. روند تغییرات انحناء پسماند ورق به‌ازاء q_{eff}/v^2



شکل ۱۶. خواص مکانیکی مواد به‌صورت تابع درجه حرارت. [۶]

جدول ۱. پارامترهای گرمایش و سطوح تغییرات نمونه آنها.

سطح سوم	سطح دوم	سطح اول	
۲۰	۱۸	۱۶	h (mm)
۶	۵	۴	v (mm/sec)
۲۲۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	q_{eff} (cal/sec)

مدول کشسانی، شیب خط منحنی تنش کرنش در ناحیه‌ی خمیری و ضریب انبساط طولی ماده. چنان‌که در «مقدمه» اشاره شد در این تحقیق از انحناء پسماند ورق به‌عنوان شاخص تغییر شکل استفاده می‌شود. از مطالعات بخش قبل چنین نتیجه می‌شود که می‌توان سه پارامتر h ، v و q_{eff} را به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل فرض کرد. برای بررسی نقش پارامترهای فوق بر میزان انحناء پسماند ورق می‌توان شبیه‌سازی‌هایی براساس مقادیر مختلف این پارامترها ترتیب داد. برای این منظور می‌توان از روش 3^k استفاده کرد که $k=3$ تعداد پارامترهای مؤثر است. در این روش با در نظر گرفتن $3^3=27$ ترکیب مختلف از مقادیر h ، v و q_{eff} و تعیین انحناء پسماند، می‌توان نحوه‌ی تأثیر متغیرهای شماره ۹ و درجه اهمیت آنها را تعیین کرد. در این مطالعه با علم به مؤثر بودن سه پارامتر بالا، میزان اهمیت و ارتباط بین متغیرهای مؤثر شماره ۹ با انحناء پسماند بررسی می‌شوند.

با این فرایند ورق‌هایی به‌ضخامت ۸ الی ۶ mm شکل داده می‌شوند. همچنین از سرعت‌های ۱/۲ الی ۵۰ mm/sec استفاده شده است. در اینجا رایج‌ترین مقادیر پارامترها طبق جدول ۱ انتخاب می‌شوند. در این تحلیل‌ها طول و عرض ورق به ترتیب ۲۰۰ و ۶۰۰ mm در نظر گرفته شده و تغییر شکل آن برای یک خط گرمایش واقع در وسط ورق مطالعه می‌شود.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تغییر انحناء پسماند ورق در راستای خط گرمایش، به‌ازاء مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر را نشان می‌دهند. در شکل ۱۷ به‌ازاء q_{eff} ثابت، تغییرات انحناء پسماند با تغییر ضخامت ورق به‌ازاء سرعت‌های مشعل ثابت متفاوت نشان داده شده

تحلیل رگرسیون چندتایی

در این تحقیق در ادامه‌ی مطالعات پارامتری تغییر شکل ورق، از متغیرهای بی‌بعد شده‌ی زیر به‌عنوان متغیرهای ورودی پیشنهادی استفاده می‌شود:

متغیرهای ورودی = $\{x_i\} (i=1, \dots, 7)$

$$= \left\{ \frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h}}, \frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h^2}}, \frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h^3}}, \frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v}}, \frac{q_{eff}}{T_{max} v h}, \frac{q_{eff}}{T_{max} v}, \frac{q_{eff}}{T_{max} v h^2} \right\} \quad (11)$$

با ضریب «انحنا پسماند» در طول «خط گرمایش»، متغیرهای ورودی بی‌بعد شده و با نماد k'_{res} نشان داده می‌شود. در اینجا برای تعیین پارامترهای گرمایش به رابطه‌ی نیاز است که انحنا پسماند را به‌صورت تابعی از متغیرهای ورودی بیان کند. این تابع را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$k'_{res} = f(x_i) \quad (12)$$

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های کشسانی - خمیری گرمایی، در جدول ۲ ضریب همبستگی متغیرهای ورودی نسبت به انحنا پسماند ورق نوشته شده‌اند. همان طوری که در این جدول ملاحظه می‌شود، متغیر هفتم و پنجم بالاترین ضریب همبستگی و در نتیجه بیشترین نقش را در تغییر انحنا دارند. برای یافتن $f(x_i)$ روش رگرسیون چندتایی به کار می‌رود. در این روش می‌توان انحنا پسماند را به‌صورت ترکیبی خطی از متغیرهای ورودی در نظر گرفت. به طوری که:

$$k'_{res} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_i \quad (13)$$

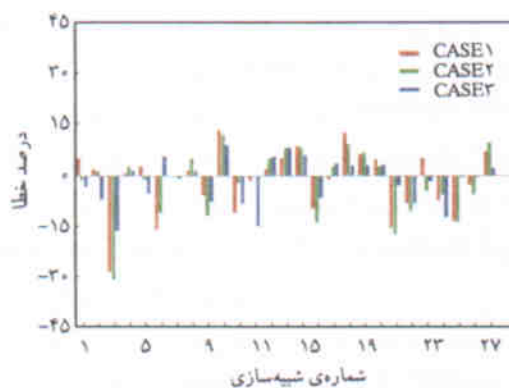
برای در نظر گرفتن تعامل بین متغیرها می‌توان حاصل ضرب دو یا چند متغیر را به‌عنوان یک متغیر مستقل در نظر گرفت. برای تعیین رابطه (۱۳) باید ضرایب $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ را تعیین کرد. در اینجا از بین حالت‌های ممکن، سه حالت محتمل‌تر با عناوین حالت ۱، حالت ۲ و حالت ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در حالت ۱ نقش هر ۷ متغیر شماره ۱۱ ارزیابی می‌شود. در حالت ۲ با توجه به ضریب همبستگی کم‌تر متغیرهای اول، چهارم و ششم، آنها را نادیده گرفته و مجدداً رابطه‌ی خطی بین سایر متغیرها و انحنا پسماند بررسی می‌شود. در حالت ۳ متغیرهای حالت ۲ همراه با دوم آنها در نظر گرفته می‌شوند. در جدول ۳ ضرایب رگرسیون مربوط به حالت‌های سه‌گانه فوق ارائه شده‌اند. ضرایب صفر نشان‌دهنده‌ی عدم حضور متغیر نظیر آنها در رابطه‌ی رگرسیون است. در شکل ۲۰، با در نظر گرفتن نتایج

جدول ۲. ضریب همبستگی متغیرهای نامزد نسبت به انحنا پسماند ورق.

شماره متغیر	متغیر	ضریب همبستگی
۱	$\frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h}}$	-۰/۵۸۸
۲	$\frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h^2}}$	-۰/۶۷۹
۳	$\frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v h^3}}$	-۰/۷۲۸
۴	$\frac{q_{eff}}{T_{max} \sqrt{v}}$	-۰/۴۵۸
۵	$\frac{q_{eff}}{T_{max} v h}$	-۰/۸۵۱
۶	$\frac{q_{eff}}{T_{max} v}$	-۰/۶۴۸
۷	$\frac{q_{eff}}{T_{max} v h^2}$	-۰/۹۰
۸	-	-

جدول ۳. ضرایب متغیرهای ورودی در روابط سه‌گانه رگرسیون.

شماره	ضرایب	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
۱	ثابت	۱/۱۰e-۲	۱/۱۱e-۲	۳/۵۹e-۳
۲	X_1	-۵/۴e+۱	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰
۳	X_2	۲/۲۳e+۲	-۵/۹۷e-۱	-۵/۲۰e+۰
۴	X_3	-۳/۰۶e+۲	۳/۰۱e+۰	۲/۲۹e+۱
۵	X_4	۴/۳۴e+۰	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰
۶	X_5	۶/۲۰e+۰	۵/۹۰e-۱	۵/۹۸e+۰
۷	X_6	-۱/۶۲e-۱	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰
۸	X_7	-۶/۸۰e+۱	-۱/۸۳e+۱	-۱/۰۸e+۲
۹	$X_2 X_3$	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰	۱/۸۷e+۱
۱۰	$X_3 X_4$	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰	-۳/۴۴e+۲
۱۱	$X_5 X_6$	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰	-۵/۱۱e+۱
۱۲	$X_7 X_8$	-۰/۰۰e+۰	-۰/۰۰e+۰	۱/۴۰۹e+۴



شکل ۲۰. درصد خطای نتایج محاسباتی از روابط رگرسیون نسبت به نتایج شبیه‌سازی‌های عددی.

نتیجه گیری

در این نوشتار به مطالعه‌ی پارامتری فرایند خمکاری شعله‌یی پرداخته شد و از معیار جدیدی برای سنجش میزان تغییر شکل ورق استفاده شد. برای این منظور با انتخاب انحناء پسماند ورق در راستای خط گرمایش به‌عنوان شاخص تغییر شکل ورق، ابتدا پارامترها و متغیرهای مؤثر بر آن تعیین شدند. سپس با انجام شبیه‌سازی‌های کشسانی - خمیری گرمایی حالت‌های مختلف از مقادیر پارامترهای مؤثر مورد بررسی قرار گرفتند. از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته و با استفاده از تحلیل رگرسیون چندتایی، رابطه‌ی بین پارامترهای مؤثر بر فرایند وانحناء پسماند ورق استخراج شد. از نتایج به دست آمده پیداست که رابطه‌ی استخراج شده با درصد اطمینان خوبی قابل کاربرد برای تعیین شرایط گرمایش در این فرایند است.

در این تحقیق، داده‌های لازم برای تحلیل آماری از نتایج شبیه‌سازی‌های کشسانی - خمیری گرمایی تأمین شده‌اند که اعتبار و صحت این شبیه‌سازی‌ها قبلاً با مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و تجربی تأیید شده‌اند.^[۱۰] تحلیل‌های آماری نیز حاکی از دقت قابل قبول رابطه‌ی به دست آمده‌اند. به هر حال در ادامه‌ی این تحقیق می‌توان به آزمون‌های تجربی بیشتری پرداخت.

براین اساس معیار انحناء نرمال ورق در راستای خط گرمایش را می‌توان برای تعیین مسیرهای گرمایش نیز استفاده کرد. به این ترتیب مکان هندسی تقاطع دارای انحناء نرمال یکسان قابلیت تعیین موقعیت خطوط گرمایش را دارد.

جدول ۴. درصد میانگین خطاها. محاسبه شده برپایه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده.

شماره	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
درصد میانگین خطاها	-۱/۵	-۱/۷	۰/۶
انحراف معیار خطاها	۹/۶	۱۰/۲	۶/۸
ضریب تعیین	۹۲/۹	۹۱/۷	۹۶/۵

شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان مینا، درصد خطاهای ناشی از برآزش مدل رگرسیون برای هر حالت رسم شده‌اند. در جدول ۴ میانگین خطاها، انحراف معیار و ضریب تعیین آنها نوشته شده‌اند. از نتایج ارائه شده در این جدول پیداست که به‌طور کلی میانگین خطاها و توزیع آنها در وضعیت قابل قبولی است. از مقادیر ضریب تعیین هر حالت نتیجه می‌شود که با روابط سه‌گانه‌ی فوق می‌توان بیش از ۹۱ درصد از تغییرات انحنای پسماند را ناشی از تغییرات متغیرهای ورودی لحاظ شده دانست و کمتر از ۹ درصد تغییرات ناشی از عوامل تصادفی و ناشناخته‌اند. همچنین از نتایج جداول آنالیز واریانس مربوطه ملاحظه می‌شود که نسبت F مربوط به هر حالت بیش از مقدار بحرانی آن است، و این امر حاکی از مهم بودن روابط رگرسیون استخراج شده است. در حالت ۲ با حذف سه متغیر، نتایج در حد قابل قبولی باقی می‌مانند و این امر نشان می‌دهد که می‌توان از نقش متغیرهای فوق صرف‌نظر کرد. همچنین ملاحظه می‌شود که در نتایج مربوط به حالت ۳ مقدار ضریب تعیین نیز افزوده می‌شود؛ به‌طوری‌که رابطه‌ی استخراج شده در حالت ۳ را می‌توان به‌عنوان رابطه‌ی نظری بین پارامترهای گرمایش و انحنای پسماند در نظر گرفت.

منابع

- Suhara, T., "Study of thermo plastic working: bending of beam of rectangular cross section", *Journal of Zosen Kyokai*, **103**, pp 233-243 (1958).
- Nomoto, T. and Ohmori, T., "Development of simulator for plate bending by line-heating", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **168**, pp 527-535 (1990).
- Shin, J.G., Lee, J.H. and Park, S.K., "A numerical thermoplastic analysis of heating processes for saddle type shells with the application of an artificial neural network", *Journal of Ship Production*, **12** (1), pp 10-20 (Feb 1999).
- Lee, J.S., "Development of automatic marking generation system for plate forming by line heating", pp 247-253 (1995).
- 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*, **10** (4), pp 248-257 (1994).
- 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).
- Clausen, H.B., "Three dimensional numerical simulation of plate forming by line heating", ICCAS, pp 387-398 (1999).
- همتی، سیدجلال، نیازی، محمدعلی، معرفت، مهدی، و نقدآبادی، رضا، «تحلیل حرارتی فرایند خمکاری شعله‌یی به‌روش اجزاء محدود»، نشریه علمی و مهندسی امیرکبیر (در دست چاپ).
- همتی، سیدجلال، نیازی، محمدعلی، معرفت، مهدی، و نقدآبادی، رضا، «کاربرد حل تحلیلی انتقال حرارت در شکل دهی ورق به‌روش خمکاری شعله‌یی»، نشریه علمی و پژوهشی فردوسی (در دست بررسی).
- همتی، سیدجلال، نیازی، محمدعلی، معرفت، مهدی، و نقدآبادی، رضا، «تحلیل تغییر شکل ترموآلاستیک-پلاستیک ورق در فرایند شکل دهی خمکاری شعله‌یی»، نشریه علمی و پژوهشی استقلال (در دست چاپ).