

## ارزیابی توزیع دما در فرایند شکل دهی حرارتی ورق فولادی به روش گرمایش خطی با منبع اکسی گازی

سیدرحمان حسینی\*، مهدی براتی و اسماعیل مقصودی  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵)

**چکیده** - هدف از این تحقیق، محاسبه و تعیین توزیع دما در فرایند گرمایش خطی با منبع اکسی گازی جهت کاربرد در ورق های فولادی است. برای محاسبه توزیع دما، از روش تحلیلی به وسیله حل معادلات ریاضی استفاده شد. توزیع دما در روش عددی به کمک نرم افزار «متلب» مدل سازی شد. جهت انجام فرایندها از دستگاه گرمایش خطی CNC و برای اندازه گیری دما از دوربین گرمانگار ITI استفاده شد. اثر فاصله مشعل، دبی گاز و سرعت مشعل بر توزیع دما در سطح بالایی و زیرین ورق بررسی شد. تغییرات توزیع دما در سرعت های حرکت مشعل ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه، دبی های ۹، ۱۰ و ۸ لیتر بر دقیقه و در فاصله های مشعل ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی متر به دست آمد. در سرعت های مشعل ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه؛ دمای بیشینه محاسبه شده به ترتیب ۹۰۰، ۸۱۰ و ۷۲۰ کلوین و دمای بیشینه اندازه گیری شده ۸۸۵، ۷۸۵ و ۶۹۰ کلوین به دست آمد. دمای بیشینه محاسبه شده در دبی های ۹، ۱۰ و ۸ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۹۰۰، ۸۱۰ و ۷۵۰ کلوین و دمای اندازه گیری شده ۸۸۵، ۷۹۵ و ۷۴۰ کلوین حاصل شد. در فاصله های مشعل ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی متری؛ بیشینه دمای محاسبه شده به ترتیب ۹۰۰، ۸۸۰ و ۸۱۰ کلوین و دمای اندازه گیری شده ۸۸۵، ۸۴۰ و ۷۹۰ کلوین به دست آمد.

واژگان کلیدی: گرمایش خطی، مدل سازی عددی، توزیع دما، شکل دهی حرارتی

## Evaluation of Temperature Distribution in Thermal Forming Process of Steel Plate by Oxy-gas Source Line Heating

S. R. Hosseini\*, M. Barati and E. Maghsoudi

Department of Materials Engineering, Maleke-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

**Abstract:** The aim of the present research is calculation and determination of the temperature distribution in the oxy-gas source line heating process for application in the steel plates. Analytical method was used to calculate the temperature distribution by solving mathematical equations. The temperature distribution was determined with numerical method using

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: hosseinisr@mut-es.ac.ir

*MATLAB software. A computerized numerical control line heating apparatus was used for carrying out the processes. ITI thermograph camera was used to measure the temperature. The effect of torch distance, gas flow and torch speed on the temperature distribution at the upper and lower surfaces of plate were evaluated. The changes of temperature distribution were achieved at torch speeds of 120, 200 and 300 mm/min, gas flow of 10, 9 and 8 lit/min and torch distances of 30, 40 and 50 mm. Calculated and measured maximum temperatures reached to 900, 810 and 720 K, and 885, 785, 690 K, at torch speeds of 120, 200, 300 mm/min, respectively. The calculated and measured maximum temperatures at gas flow of 10, 9, 8 lit/min are attained to be 900, 810 and 750 K, and 885, 795 and 740 K, respectively. Maximum calculated and measured temperatures at torch distance of 30, 40 and 50 mm are accomplished to be 900, 880 and 810 K and 885, 840 and 790 K, respectively.*

**Keywords:** Line heating, Numerical modeling, Temperature distribution, Thermal forming

## فهرست علائم

$r_0$ شعاع منطقه شار گرما (mm)	$C_p$ ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)
$T$ دمای لحظه‌ای قطعه برحسب کلونین (K)	$C_g = \tan(\alpha) / (h_u + h_l) k C_p / (h_u h_l - k^2 C_p^2)$ (بدون بعد)
$T_0$ دمای اولیه قبل از حرارت‌دهی خطی برحسب کلونین (K)	$C_n = n\pi/g$ (m)
$T_s$ دمای سطح قطعه برحسب کلونین (K)	$g$ ضخامت ورق (mm)
$t$ عامل زمان (s)	$H$ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m <sup>2</sup> .K)
$V$ سرعت منبع حرارت در حال حرکت (mm/min)	$h$ فاصله نازل از سطح ورق (mm)
$X, Y, Z$ محورهای مختصات سه‌بعدی (m)	$h_u$ ضریب انتقال حرارت برای سطح بالایی (W/m <sup>2</sup> .K)
$\alpha = 1/\lambda$ (m <sup>2</sup> /s) ضریب نفوذ حرارتی	$h_l$ ضریب انتقال حرارت برای سطح پایینی (W/m <sup>2</sup> .K)
$\sigma$ ثابت استفان-بولتزمن (W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )	$k$ ضریب هدایت گرمایی (W/m.K)
$\varepsilon$ ضریب تابش سطح $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (بدون بعد)	$K_0$ تابع بسل اصلاح شده از نوع دوم و مرتبه صفر (بدون بعد)
$\rho$ چگالی ماده (kg/m <sup>3</sup> )	$q'(z)$ شار حرارتی در محور Z (ضخامت) (W/m <sup>2</sup> )
$\rho(T)$ چگالی ماده در دمای مورد نظر (kg/m <sup>3</sup> )	$q'(0)$ شار حرارتی در سطح (W/m <sup>2</sup> )
$\lambda$ ضریب نفوذ حرارتی ماده $(\lambda = \rho C_p / 2k)$ (m <sup>2</sup> /s)	$q$ گرمای ورودی در واحد زمان $q = 1/2 q' \varepsilon$ (W)
	$q_{max}$ شار بیشینه مشعل (W/m <sup>2</sup> )

جذاب مطرح است.

قسمت‌های عمده بدنه کشتی‌ها از ورق‌هایی با انحنای دوگانه تشکیل شده است. سال‌هاست که در کارخانه‌های کشتی‌سازی از روش‌های مکانیکی برای شکل‌دهی ورق‌ها استفاده می‌شود. براساس برخی گزارشات، روش مکانیکی خودکار (اتوماتیک) اولین بار در ژاپن در سال ۱۹۷۶ میلادی به‌وسیله پرس با پیستون‌هایی با محورهای چندگانه انجام شد [۲]. با توجه به انرژی و هزینه بالای تولید، نتایج حاصل از

## ۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی حرارتی، یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فولادی جهت کاربردهای مختلف به‌ویژه در صنایع دریایی است. در فرایند شکل‌دهی حرارتی با اعمال گرمای ناشی از منبع حرارت و سپس خنک‌کاری کنترل شده، در راستای مسیرهای معین به ورق شکل داده می‌شود [۱]. در فرایند شکل‌دهی حرارتی با منبع اکسی‌گازی، به‌علت سادگی تجهیزات و ابزار، این روش به‌عنوان یک روش اقتصادی و

روش مکانیکی خودکار قابل قبول نبود. بنابراین از روش‌های دیگر به خصوص شکل‌دهی حرارتی که جایگزین روش مکانیکی است برای شکل‌دهی (خم‌کاری) این ورق‌ها استفاده شد.

مهم‌ترین کاربرد فرایند شکل‌دهی حرارتی در صنایع کشتی‌سازی کشور، ساخت شناورهای سطحی و زیرسطحی است. با توجه به تحریم‌های کشورهای استعمارگر علیه صنایع کشتی‌سازی کشور و همچنین نیاز روزافزون صنایع کشتی‌سازی و دفاعی، اهمیت دستیابی به روش شکل‌دهی حرارتی بیش از پیش نمایان می‌شود.

با توجه به اینکه روش‌های شکل‌دهی حرارتی از لحاظ اقتصادی نسبت به روش‌های مکانیکی، کم‌هزینه‌تر هستند و همچنین شکل‌دهی مکانیکی ورق‌های دریایی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، روش‌های شکل‌دهی حرارتی بیشتر مورد توجه دانشمندان و محققان بوده است. در حال حاضر این فرایند به صورت دستی و براساس تجربه متخصص‌های ماهر انجام می‌شود؛ این عدم خودکار بودن فرایند، بهره‌وری آن را پایین آورده است [۳]. در فرایند شکل‌دهی حرارتی، توزیع غیریکنواخت دما از یک طرف و افت شدید خواص مکانیکی ماده از طرف دیگر، سازوکار پیچیده تغییر شکل دائمی ورق‌ها را فراهم کرده است. لذا با بررسی نحوه توزیع دما در ورق فولادی و میزان تغییر شکل ایجاد شده ناشی از توزیع دما و همچنین با بررسی عوامل مؤثر بر توزیع دما، می‌توان به خودکار نمودن فرایند شکل‌دهی حرارتی و افزایش بهره‌وری این روش کمک کرد.

امروزه در جهان از روش‌های مختلفی برای شکل‌دهی حرارتی ورق‌های فولادی استفاده می‌شود. از عمده‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های شکل‌دهی حرارتی با منبع اکسی‌گازی، شکل‌دهی حرارتی با منبع لیزر، شکل‌دهی حرارتی با منبع پلاسما و شکل‌دهی حرارتی با منبع القایی اشاره کرد. منبع حرارت در فرایند شکل‌دهی حرارتی به انرژی بالایی نیاز دارد تا بتواند دمای ورق را افزایش دهد.

مشعل‌های گازی، سیم‌پیچ‌های القایی فرکانس بالا، پرتوهای الکترونی دارای انرژی زیاد و پرتوی لیزر از جمله منابع حرارت مناسب برای این کار هستند [۵ و ۴]. با توجه به سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بالای نگهداری و تعمیر در روش‌های مذکور، از گذشته گرمایش با مشعل‌های گازی (نسبت به سایر منابع حرارت) مورد توجه بیشتری بوده است. در روش شکل‌دهی حرارتی با منبع اکسی‌گازی، منبع گرمایش اغلب گاز استیلن و یا اتان است که از حرارت ایجاد شده توسط آنها به منظور ایجاد تغییر شکل در حد مطلوب استفاده شده است [۶].

در بسیاری از کاربردهای صنعتی به منظور دستیابی به نرخ انتقال حرارت بالاتر، از تماس شعله استفاده می‌شود [۷]. انتقال حرارت از شعله به ورق به عوامل متعددی بستگی دارد. نوع گازهای سوختنی، نسبت حجمی و فشار آنها، مشخصات هندسی سر مشعل، فاصله مشعل نسبت به ورق و همچنین سرعت مشعل از جمله مشخصه‌های مؤثر بر این پدیده هستند [۸]. در روش شکل‌دهی حرارتی با منبع اکسی‌گازی، فرایند خم‌کاری از طریق حرکت مشعل روی سطح ورق انجام می‌گیرد. به دلیل اینکه قسمت‌های مختلف ورق، نیازمند مقدار معینی خمش است، باید میزان شار حرارتی مشعل در قسمت‌های مختلف ورق به نحوی تنظیم شود که میزان خمش مورد نیاز حاصل شود. در صورت استفاده از حرارت بسیار زیاد، در ورق‌ها اعوجاج ایجاد می‌شود. این اعوجاج در مراحل بعدی ساخت باعث عدم دقت در سرهم‌بندی (مونتاژ) قطعات و همچنین باعث صرف زمان و افزایش هزینه خواهد شد. به منظور بررسی فرایند شکل‌دهی حرارتی، انگوین و همکاران [۹]، تغییر شکل ورق فولادی و راه‌حل تحلیلی برای حرارت گذرا در یک جسم نیمه‌بی نهایت را بررسی کردند. چنگ و همکاران [۱۰] یک روش تحلیلی برای میدان دمایی ورق‌های فلزی در فرایند شکل‌دهی با لیزر ارائه کردند. در تحقیق آنها میدان دمایی ایجاد شده و اثر آن بر خم‌کاری مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین میزان تغییر شکل و تنش باقی مانده روی ورق‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد بررسی عمیق توزیع دما در ورق فولادی و همچنین اثر عوامل مختلف بر توزیع دما در تحقیقات گذشته مشاهده نشده است که در این تحقیق به بررسی این موضوع پرداخته شده است. بنابر این هدف از انجام این پژوهش، محاسبه و تعیین توزیع دما در ورق فولادی و اثر عوامل مختلف بر فرایند شکل‌دهی حرارتی به‌روش اکسی‌گازی به‌منظور خودکارکردن فرایند گرمایش خطی برای دستیابی به میزان خم مورد نیاز است. برای این منظور از روش‌های محاسباتی برای مدل‌سازی فرایند استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج محاسباتی، پس از تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز برای انجام فرایند، آزمون‌های تجربی در شرایط متفاوت انجام گرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- روش محاسباتی

برای محاسبه توزیع دما از رابطه عمومی انتقال حرارت به‌صورت زیر استفاده شد [۱۶]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

در این رابطه  $k$  ضریب هدایت حرارتی ورق،  $\rho$  چگالی ورق و  $c$  ظرفیت گرمای ویژه است. این مقادیر همراه با سایر ضرایب و ثابت‌ها در جدول ۱ آورده شده است. از طرفی، توزیع دما در فرایند حرارت‌دهی ورق فولادی (با استفاده از منبع جوشکاری) به‌صورت رابطه زیر است [۱۰]:

$$T - T_0 = \frac{\sqrt{3}Q}{\rho c \pi \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{(\gamma a(t-t') + a_{hf}^2)(\gamma a(t-t') + b_{hf}^2)}} \left( \frac{A'}{\sqrt{\gamma a(t-t') + c_{hf}^2}} + \frac{B'}{\sqrt{\gamma a(t-t') + c_{hb}^2}} \right) \quad (2)$$

انگوبین و همکاران در ادامه کار قبلی، یک راه حل تقریب تحلیلی برای منبع حرارتی در ورق ضخیم را بررسی کردند [۱۱]. آنها در بررسی خود به توصیف جزئیات استخراج شده از راه‌حل تحلیلی برای یک منبع حرارتی با مشعل دویضوی در یک ورق ضخیم در سطح محدود پرداختند. آنها نشان دادند که راه‌حل منبع حرارت توانسته به‌صورت کارآمد برای پیش‌بینی سابقه حرارتی ورق جوش داده شده ضخیم به‌کار برده شود. کیم و همکارش [۱۲] در سال ۲۰۰۵ میلادی شکل‌دهی با لیزر را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک طرح کنترل پیشنهادی برای هر زاویه خم‌کاری تک‌ی، در زمینه شکل‌دهی با لیزر بدون انحنای دوبعدی ارائه کردند. آنها در این مطالعه از ترکیب یک روش آماری و اثر خطاهای به‌جا مانده، استفاده کردند. گرین و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۷ میلادی روش‌های مناسب برای تعیین انتقال حرارت گذرا در یک صفحه تخت را بررسی کردند. آنها روش‌های جدیدی را برای شناسایی انتقال حرارت همرفتی در یک ورق فولادی مسطح ارائه کردند و به روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی نمودند. بیسواس و همکاران [۱۴] روی موضوع حرارت‌دهی خطی متمرکز شدند. آنها با تحلیل شعله اکسی‌استیلن به‌کمک دو نوبت حرارت‌دهی خطی، تحلیل عددی و ابعادی برای پیش‌بینی تغییر شکل باقی مانده ناشی از حرارت‌دهی خطی ارائه کردند. چن و همکاران [۴] به پیش‌بینی گرمای ناشی از میدان‌های دمایی و اعوجاج در ورق‌های فولادی پرداختند. آنها در پژوهش خود روش‌ها و ترفندهایی را برای پیش‌بینی توزیع حرارت و اعوجاج ایجاد شده در ورق‌های فولادی، به‌وسیله حرارت‌دهی خطی در فرایندهای جوشکاری به‌خوبی توسعه دادند. جنگ و همکاران [۱۵] به فراگیری اطلاعات حرارت‌دهی خطی با هدف شکل‌دهی خودکار ورق‌ها در ساخت کشتی پرداختند. در تحقیقات آنها، مسیرهای حرارت‌دهی به‌وسیله تجزیه و تحلیل هندسی سطح نهایی مورد نظر و سطح اولیه ارزیابی شدند. در تحقیقات گذشته نوع منبع حرارت مورد استفاده و

جدول ۱- برخی از مقادیر ثابت جایگذاری شده در معادلات

عنوان	نماد	واحد	مقدار
ضریب هدایت حرارتی ورق فولادی	k	W/m.K	۴۲ / ۷
چگالی ورق فولادی	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	۸۰۰
ظرفیت گرمای ویژه (فشار ثابت)	C <sub>p</sub>	J/kg.K	۵۰۰
دمای اتاق	T <sub>0</sub>	K	۲۹۸
دبی گاز	Q	lit/min	۸ و ۹، ۱۰
فاصله مشعل از سطح ورق	h	mm	۵۰ و ۴۰، ۳۰
سرعت حرکت مشعل	V	mm/min	۳۰۰ و ۲۰۰، ۱۲۰
شار حرارتی در سطح ورق	q' (0)	W/m <sup>2</sup>	۲۲۰۰

اندرسون با فرض دوبعدی بودن میدان دمایی به صورت روابط زیر در نظر گرفته شد [۱۷]:

$$T - T_0 = e^{-\lambda u \xi} \phi(\xi, y, z), \quad (5)$$

$$\phi = Z(z)R(r). \quad (6)$$

$$Z_n(z) = A'_n \left[ \cos(c_n z) + \frac{h}{c_n k} \sin(c_n z) \right], \quad (7)$$

$$R_n(r) = K_n [\omega_n r], \quad \omega_n = \sqrt{(\lambda u)^2 + c_n^2}, \quad (8)$$

در معادلات فوق  $\phi$  به عنوان یک تابع از عمق  $Z$ ،  $R$  فاصله شعاعی از منبع در محورهای  $X$ - $Y$  دوبعدی،  $T_0$  دمای اولیه صفحه قبل از گرمایش،  $\lambda$  ضریب نفوذ حرارتی فلز،  $v$  سرعت حرکت مشعل،  $\xi = x - vt$  برای نقطه واقع در فاصله  $x$  از مبدأ مختصات،  $t$  زمان،  $r$  فاصله شعاعی از منبع (که به صورت  $r = (\xi^2 + y^2)^{1/2}$  محاسبه می شود)،  $K_0$  تابع بسط اصلاح شده از نوع دوم و مرتبه صفر،  $k$  ضریب هدایت حرارتی ورق و  $h$  ضریب انتقال گرمای سطح بالایی ورق فولادی هستند. با جای گذاری روابط (۷) و (۸) در معادله (۶):

$$A'_n \left[ \cos(c_n z) + \frac{h}{c_n k} \sin(c_n z) \right] K_n [\omega_n r] \phi_n \quad (9)$$

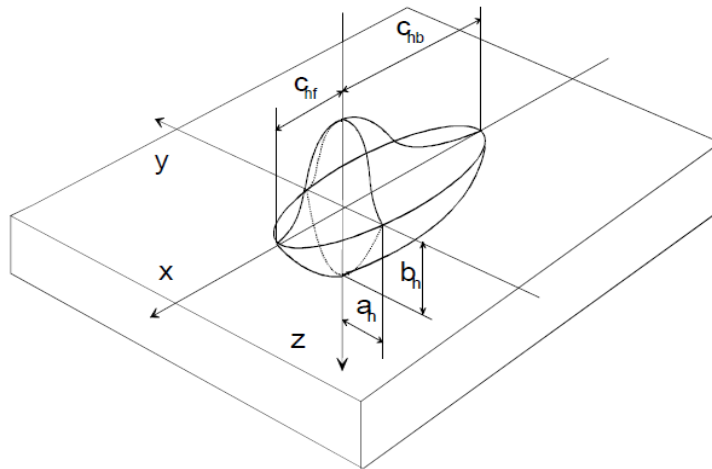
برای محاسبه توزیع دما در یک نقطه،  $\phi_n$  در معادله (۵)

در معادله فوق  $a$  ضریب نفوذ گرمایی و  $a_{hf}$ ،  $b_{hf}$ ،  $c_{hf}$ ،  $a_{hb}$ ،  $b_{hb}$ ،  $c_{hb}$  عوامل منبع حرارت هستند که شکل و ابعاد بیضی ها و در نتیجه، چگونگی توزیع منبع حرارت را تعیین می نمایند. همچنین در معادله فوق،  $A'$  و  $B'$  عبارتند از:

$$A' = \exp \left( - \frac{r(x-vt')^2}{\sqrt{2a(t-t')} + c_{hf}^2} - \frac{ry^2}{\sqrt{2a(t-t')} + a_{hf}^2} - \frac{rz^2}{\sqrt{2a(t-t')} + b_{hf}^2} \right) \quad (3)$$

$$B' = \exp \left( - \frac{r(x-vt')^2}{\sqrt{2a(t-t')} + c_{hb}^2} - \frac{ry^2}{\sqrt{2a(t-t')} + a_{hb}^2} - \frac{rz^2}{\sqrt{2a(t-t')} + b_{hb}^2} \right) \quad (4)$$

برخی دیگر از عوامل و متغیرهای معادلات فوق در شکل ۱ در قالب تصویر نمادینی از یک منبع حرارت معروف به گلدک نشان داده شده است [۱۶]. در فرایند جوشکاری به دلیل استفاده از حرارت بسیار زیاد و به دلیل ایجاد ذوب در محل اتصال از مدل گلدک استفاده می شود. با توجه به اینکه در فرایند گرمایش خطی<sup>۱</sup>، سطح ورق فولادی ذوب نمی شود، از مدل گلدک به طور مستقیم برای بررسی توزیع دما استفاده نمی شود. بنابراین، برای تعیین توزیع دما در روش محاسباتی (حل تحلیلی) توزیع دما، برطبق معادلات



شکل ۱- طرح نمادین از مدل منبع حرارتی گلدک [۱۶].

«متلب»<sup>۲</sup> انجام شد. برنامه‌های نوشته شده در نرم‌افزار متلب را می‌توان به چهار بخش عمده تقسیم نمود. بخش اول ورودی‌های برنامه شامل دمای اولیه قطعه، سرعت حرکت مشعل، دبی گازها، شار بیشینه مشعل و خواص حرارتی فیزیکی آلیاژ (از جمله ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب جذب) هستند. بخش دوم شامل کدهای مربوط به انجام محاسبات ثوابت و تغییر متغیرهای مورد نیاز است. به این ترتیب که به‌ازای هر بار اعمال ورودی جدید به برنامه، دمای سطحی قطعه به‌کمک روابط تحلیلی موجود محاسبه شده، سپس برابر با رابطه اصلی در سطح قطعه قرار داده شده و معادله حاصل حل شده است. بخش سوم شامل بدنه اصلی کدهای برنامه تدوین شده بوده و محاسبات اصلی تعیین تاریخچه دما برحسب زمان در متن آن انجام شده است. به جهت وجود حلقه‌های محاسباتی تودرتو، این بخش بیشترین زمان و حجم محاسبات برنامه را به‌خود اختصاص داده است. بخش چهارم برنامه دربرگیرنده کدهای سازنده واسطه ترسیمی کاربر است.

## ۲-۲- آزمون‌های تجربی

برای انجام فرایند گرمایش خطی، از ورق فولادی St52، تولید شرکت فولاد بارت ایرلند با ابعادی به‌طول ۲۰۰۰ میلی‌متر،

جایگزین و به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$T - T_0 = e^{-\lambda v \xi} \sum_{n=0}^N A'_n [\cos(c_n z) + \frac{h}{c_n k} \sin(c_n z)] K_0[\omega_n r]. \quad (10)$$

$$A'_n = \frac{q'(\circ)}{2\pi k} A_n. \quad (11)$$

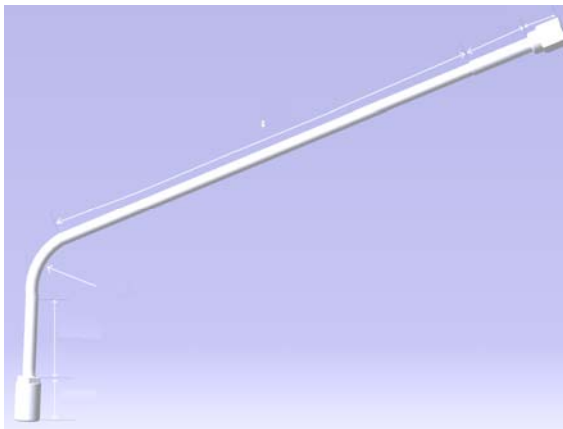
برای بیان افزایش دما در یک نقطه، با در نظر گرفتن ضریب  $A_n$  برای توزیع شار حرارتی، رابطه (۱۱) در معادله (۱۰) جایگزین می‌شود. راه‌حل برای تغییر دما، در یک نقطه در یک صفحه گرم با یک منبع قدرت متغیر با مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت همرفتی سطح، برای هر سطح ورق (بالایی و یا پایینی) به‌صورت زیر است:

$$T - T_0 = \frac{q'(\circ)}{2\pi k} e^{-\lambda v \xi} \sum_{n=0}^N A_n [\cos(c_n z) + \frac{h}{c_n k} \sin(c_n z)] K_0[\omega_n r] \quad (12)$$

مدل‌سازی عددی فرایند، با استفاده از روابط حاکم بر حل تحلیلی این فرایند (رابطه ۱۲) یا به‌طور کلی، فرایندهای مشتمل بر حرکت منبع گرمایش متمرکز و خطی انجام شد. در این بخش بر مبنای مدل‌های تحلیلی ارائه شده، برنامه‌نویسی‌های لازم جهت مدل‌سازی فرایند در نرم‌افزار

جدول ۲- ترکیب شیمیایی ورق فولادی St52 استفاده شده در مقایسه با استاندارد (ارقام برحسب درصد وزنی)

Fe	Al	S	P	Si	Mn	C	
باقی مانده	≤۰/۰۲	≤۰/۰۴	≤۰/۰۴	≤۰/۵۵	≤۱/۶۰	≤۰/۲۰	ASTM A572
باقی مانده	۰/۰۰۶	۰/۰۲۲	۰/۰۲۳	۰/۳۹	۱/۴۰	۰/۱۹	طیف سنج جرقه‌ای



شکل ۲- شکل هندسی و ابعاد مشعل گرمایش مورد استفاده در این تحقیق

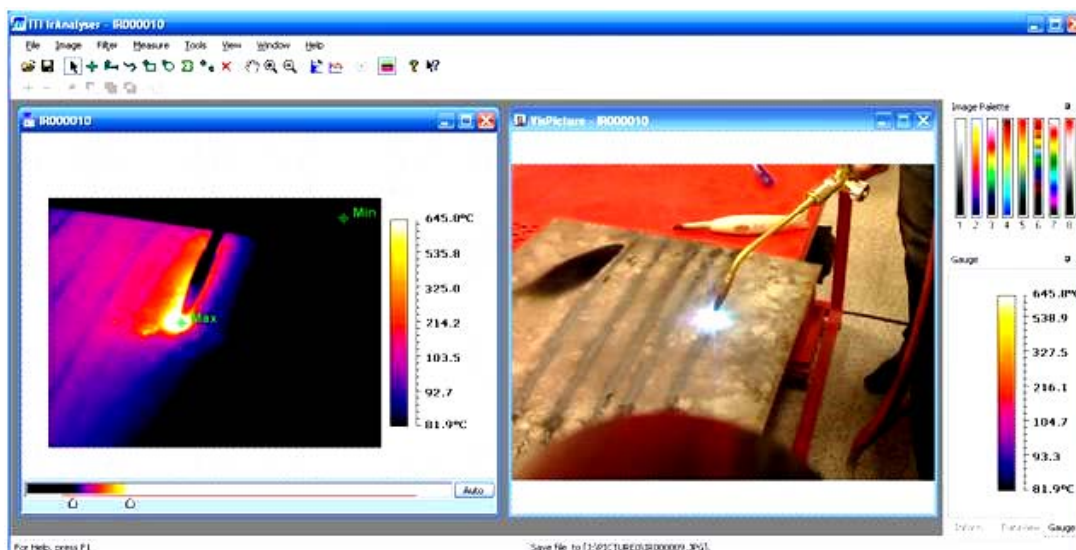
برای انجام فرایند در شکل ۴ آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- توزیع دما در سطح بالایی و زیرین

نتایج حاصل از حل تحلیلی (محاسبه) و یافته‌های تجربی (اندازه‌گیری) در فرایند گرمایش خطی به صورت نمودار توزیع دما در سطح بالایی ورق فولادی، در شرایط آزمایش شماره ۱ (جدول ۳) در شکل ۵- الف آورده شده است. مقایسه دو منحنی محاسباتی و تجربی نشان می‌دهد که روند عمومی دو منحنی یکسان است و اختلاف زیادی بین نتایج تجربی و داده‌های محاسباتی وجود ندارد. شکل ۵- ب نتایج حاصل از محاسبه تاریخچه دمایی در نقطه‌ای واقع در مبدأ مختصات در سطح بالایی و زیرین ورق را به صورت نمودار دما برحسب زمان نشان می‌دهد. دمای اولیه نقطه واقع در مبدأ مختصات ورق، در سطح زیرین و سطح فوقانی یکسان و برابر با

عرض ۱۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی ورق اولیه مورد استفاده در این پژوهش در مقایسه با محدوده ترکیب شیمیایی مجاز طبق استاندارد ASTM A572 در جدول ۲ آورده شده است [۱۸]. ترکیب شیمیایی ورق به روش طیف‌سنجی نوری به وسیله دستگاه طیف‌سنج جرقه‌ای مدل IERC ساخت شرکت اسپکتروماکس آلمان، اندازه‌گیری شد. مشعل گرمایش استفاده شده ساخت شرکت «ویکتور ابزار» آمریکا با قطر دهانه از ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بود که تصویر مشعل با قطر دهانه ۱۰ میلی‌متر در شکل ۲ آورده شده است. برای خودکار کردن فرایند، از دستگاه خودکار گرمایش خطی CNC<sup>۳</sup> استفاده شد. برای دماسنجی نمونه‌ها از دوربین گرمانگار<sup>۴</sup> فروسرخ مدل P400 ساخت شرکت ITI کشور سوئد استفاده شد. در شکل ۳ تصویر به دست آمده از دوربین گرمانگار در حین انجام فرایند گرمایش خطی آورده شده است. سایر تجهیزات مورد استفاده برای اجرای فرایند عبارتند از: فلومترهای تنظیم کننده دبی، رگلاتورهای گاز، شیلنگ‌های اتصال، اتصالات شیلنگ‌ها، سوپاپ‌های اطمینان، سرمشعل‌ها، سامانه خنک‌کاری و میزی که ورق‌ها روی آن قرار می‌گرفت. با انجام فرایندهای مختلف حرارت‌دهی؛ اثر تغییر دبی، فاصله نازل و سرعت حرکت مشعل بر توزیع دما مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ شرایط آزمایش‌های تجربی طراحی شده را نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها ابعاد ورق یکسان، یک لبه ورق گیردار و در حین انجام فرایند تغییرات دما در سطح ورق با استفاده از دوربین گرمانگار اندازه‌گیری شد. سپس داده‌های به دست آمده ثبت و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تصویر نمادین از دستگاه خودکار گرمایش خطی به همراه طرحواره‌ای از چیدمان نمونه



شکل ۳- نمونه‌ای از تصویر حاصل از دوربین گرمانگار در حین انجام فرایند گرمایش خطی

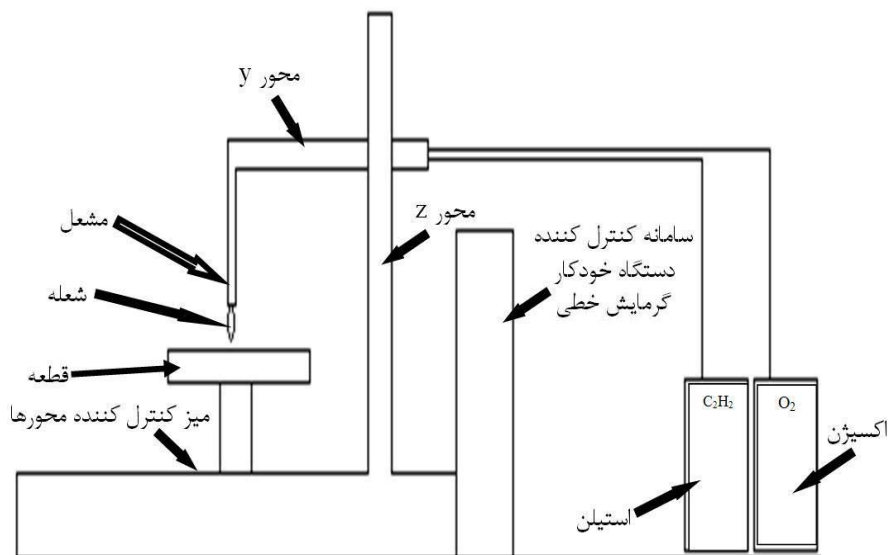
جدول ۳- شرایط و عوامل مورد بررسی در طراحی آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	سرعت حرکت مشعل (میلی‌متر در دقیقه)	فاصله مشعل تا سطح ورق (میلی‌متر)	دبی گاز (لیتر در دقیقه)
۱	۱۲۰	۳۰	۱۰
۲	۱۲۰	۴۰	۱۰
۳	۱۲۰	۵۰	۱۰
۴	۱۲۰	۳۰	۹
۵	۱۲۰	۳۰	۸
۶	۱۲۰	۳۰	۷
۷	۱۰۰	۳۰	۱۰
۸	۲۰۰	۳۰	۱۰
۹	۳۰۰	۳۰	۱۰

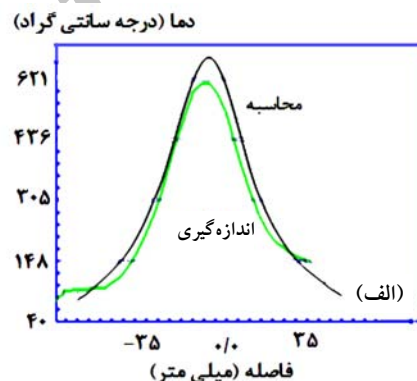
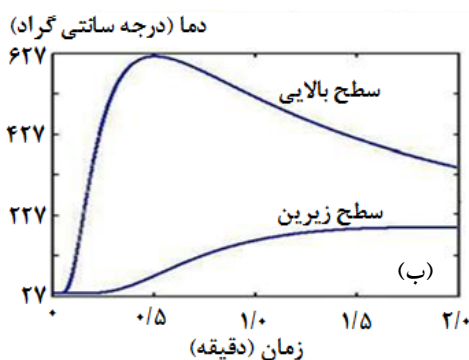
لحظه‌ای که مشعل در سطح بالایی به نزدیکی مبدأ مختصات ورق رسیده، دمای سطح زیرین، با یک آهنگ ثابت شروع به افزایش کرده است. دمای سطح زیرین ورق پس از ۳۰ ثانیه (۵/۵ دقیقه) به حدود ۳۵۰ کلوین (۷۷ درجه سانتی‌گراد) افزایش یافته است. با توجه به اختلاف ۵۵۰ درجه‌ای دما بین سطح بالایی و زیرین، یک میدان دمایی درون ورق به وجود

۳۰۰ کلوین (۲۷ درجه سانتی‌گراد) است. با گذشت زمان ضمن انجام فرایند گرمایش خطی، دما شروع به افزایش کرده است. پس از گذشت حدود ۳۰ ثانیه (۵/۵ دقیقه) دما به ۹۰۰ کلوین (۶۲۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده و پس از آن کاهش پیدا کرده است. آهنگ کاهش دما برحسب زمان در ابتدا نسبتاً سریع است ولی با گذشت زمان کند شده است. در





شکل ۴- تصویر نمادین از فرایند گرمایش خطی همراه با طرحواره‌ای از چیدمان تجهیزات و قطعه



شکل ۵- الف) نمودار دما-فاصله از محور طولی برای نقطه مرکزی ورق در سطح بالایی و ب) مقایسه دما-زمان در سطح فوقانی و سطح زیرین برای نقطه مرکز ورق (دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی‌متر)

همزمان با شروع گرمایش سطح بالایی، دمای سطح زیرین ورق حدود ۳۰۰ کلوین (۲۷ درجه سانتی‌گراد) است و در ادامه با یک آهنگ ثابت شروع به افزایش می‌کند. لحظه‌ای که دمای سطح بالایی ورق ۸۸۵ کلوین (۶۱۲ درجه سانتی‌گراد) است، دمای سطح زیرین به ۳۸۵ کلوین (۱۱۲ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. اختلاف دمای سطح بالایی و زیرین ورق (توزیع غیریکنواخت دما) از اهمیت زیادی برخوردار

آمده که از آن برای ایجاد تغییر شکل استفاده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری دما (شکل ۵- الف)، نقطه واقع در مبدأ مختصات در سطح بالایی نشان‌دهنده دمای بیشینه ۸۸۰ کلوین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) است. سطح زیرین ورق فولادی به صورت مستقیم با شعله در تماس نیست و تنها بر اثر نفوذ حرارت (با توجه به نحوه و میزان توزیع شار در مقطع) دمای آن افزایش پیدا می‌کند.

است و باعث ایجاد میدان دمایی درون ورق شده است (شکل ۵-ب). از این اختلاف دما برای ایجاد خم در ورق فولادی استفاده می‌شود [۱۹]. در شکل دهی حرارتی ورق‌های فولادی، با توجه به کاهش تنش تسلیم و مدول کشسان با افزایش دما، با سرمایش سریع به‌وسیله سیال آب به ورق فولادی شکل داده می‌شود [۱۵]. افزایش میزان اختلاف دمای سطح بالایی و سطح زیرین ورق منجر به افزایش میزان خم می‌شود [۲۰].

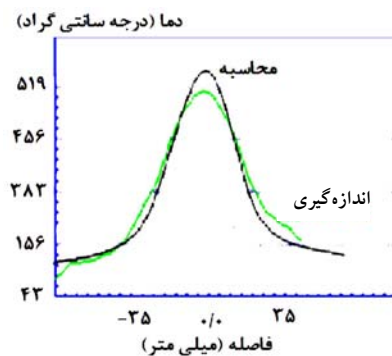
نوک مخروط درونی می‌شود. با افزایش فاصله ورق از مخروط درونی شعله، میزان انتقال حرارت از شعله به سطح ورق کاهش یافته و این امر باعث کاهش حرارت ورودی به قطعه و همچنین کاهش دمای بیشینه سطح شده است. بنابراین در مقایسه، بهترین شرایط مربوط به حالتی است که فاصله مشعل از سطح ورق کمترین مقدار (۳۰ میلی‌متر) است.

### ۳-۲- اثر فاصله مشعل

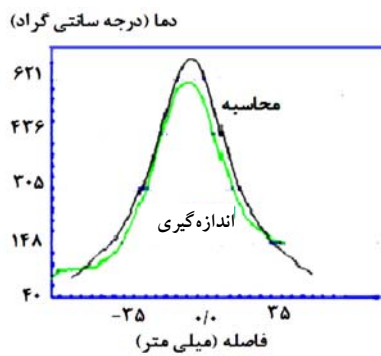
اثر فاصله مشعل (نازل) از سطح ورق بر توزیع دما با توجه به آزمایش‌های ۱، ۲ و ۳ در جدول ۳ (در شرایطی که سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و دبی گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه بوده است) بررسی و در شکل ۶ آورده شده است. دمای بیشینه محاسباتی سطح در شرایطی که فاصله مشعل ۳۰ میلی‌متری بوده، ۹۰۰ کلوین (۶۲۷ درجه سانتی‌گراد) به‌دست آمده است (منحنی بالایی در شکل ۶-الف و ۶-د). با افزایش فاصله مشعل به ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر، دمای بیشینه محاسباتی به ترتیب به ۸۸۰ و ۸۱۰ کلوین (۶۰۷ و ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است (منحنی‌های بالایی در شکل‌های ۶-ب و ۶-ج و دو منحنی پایین‌تر در شکل ۶-د). دمای بیشینه تجربی (در شرایطی که مشعل در فاصله ۳۰ میلی‌متری از سطح ورق بوده)، ۸۸۵ کلوین (۶۱۲ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده است (منحنی پایینی در شکل ۶-الف). با افزایش فاصله مشعل به ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر، دمای بیشینه تجربی به ترتیب به ۸۴۰ و ۷۹۰ کلوین (۵۶۷ و ۵۱۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است (منحنی‌های پایینی در شکل‌های ۶-ب و ۶-ج). شعله اکسی‌استیلن از دو قسمت تشکیل شده است، مخروط درونی و هاله خارجی یا دم اسبی [۲۱]. با توجه به اینکه بیشترین دمای شعله در قسمت نوک مخروط درونی است، افزایش فاصله مشعل از سطح قطعه موجب افزایش فاصله بین سطح ورق فولادی و

### ۳-۳- اثر دبی

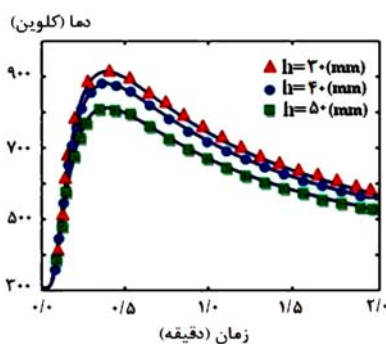
اثر تغییر دبی بر توزیع دما در شرایط آزمایش‌های ۱، ۴، ۵ و ۶ مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). منحنی‌های دما-فاصله محاسباتی و تجربی برای نقطه‌ای در کانون اثر مشعل در وسط ورق برای دبی‌های ۱۰، ۹ و ۸ لیتر بر دقیقه در شکل ۷ (الف، ب و ج) نشان داده شده است. نتایج محاسبات حاصل از اثر دبی بر توزیع دما نشان می‌دهد که دمای بیشینه حاصل از انجام فرایند گرمایش خطی در دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه ۹۰۰ کلوین (۶۲۷ درجه سانتی‌گراد) بوده است (شکل ۷-د). با کاهش دبی به ۹، ۸ و ۷ لیتر بر دقیقه دمای بیشینه به ترتیب به ۸۱۰، ۷۵۰ و ۶۹۰ کلوین (۵۳۷، ۴۴۷ و ۴۱۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است. یافته‌های تجربی حاصل از اندازه‌گیری اثر تغییرات دبی نشان داد که دمای بیشینه اندازه‌گیری شده در دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، ۸۸۰ کلوین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) است (شکل ۷-الف). با کاهش دبی به ۹ و ۸ لیتر بر دقیقه، دمای بیشینه تجربی به ترتیب به ۷۹۵ و ۷۴۰ کلوین (۵۲۲ و ۴۶۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است (شکل‌های ۷-ب و ۷-ج). نتایج فوق نشان می‌دهد با کاهش دبی، دمای بیشینه سطح کاهش یافته است. کاهش دبی گازها باعث کاهش فرایند سوختن و کاهش سرعت شعله برخورد کننده به سطح ورق می‌شود که این امر منجر به کاهش دمای بیشینه سطح ( $T_{max}$ ) شده است [۲۲]. با کاهش دبی گازها، اختلاف دمای سطح بالایی و زیرین ورق فولادی کاهش می‌یابد که می‌تواند باعث کاهش میزان خم در مرحله شکل‌دهی ورق شود.



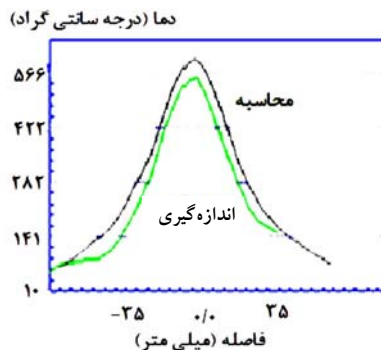
(ج)



(الف)



(د)



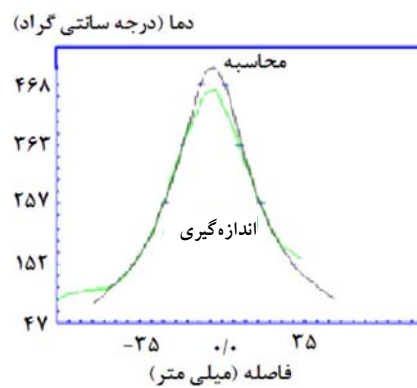
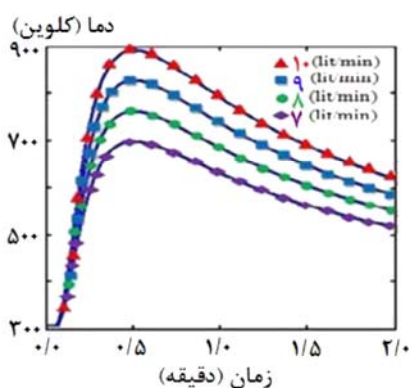
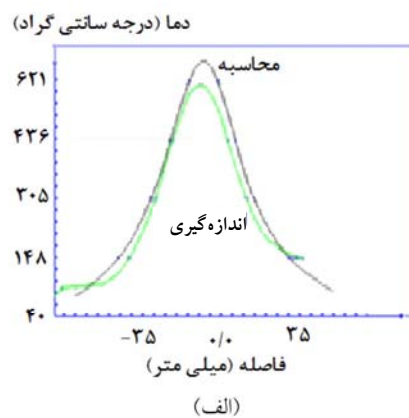
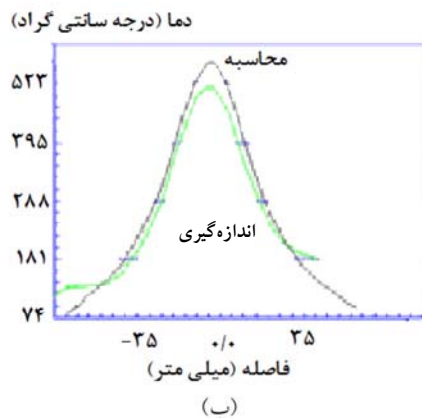
(ب)

شکل ۶- مقایسه نمودارهای توزیع دمای محاسباتی و تجربی با تغییر فاصله مشعل از سطح ورق: الف) فاصله ۳۰ میلی‌متر، ب) فاصله ۴۰ میلی‌متر، ج) فاصله ۵۰ میلی‌متر و د) تغییرات دمای محاسباتی بر حسب زمان فرایند با تغییر فاصله مشعل از سطح ورق (دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه)

#### ۴-۳- اثر سرعت مشعل

۵۳۷ و ۴۴۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری اثر سرعت مشعل بر توزیع دما نشان داد که دمای بیشینه اندازه‌گیری شده در سرعت ۱۰۰ لیتر بر دقیقه ۱۰۷۸ کلوین (۸۰۵ درجه سانتی‌گراد) است (شکل ۸-د). با افزایش سرعت حرکت مشعل به ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، دمای بیشینه محاسباتی به ترتیب به ۹۰۰، ۸۱۰ و ۷۲۰ کلوین (۶۲۷، ۵۳۷ و ۴۴۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا کرده است. از طرفی، در سرعت‌های حرکت مشعل ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، دمای بیشینه تجربی به ترتیب به ۸۸۰، ۷۸۵ و ۶۹۰ کلوین (۶۰۷، ۵۱۲ و ۴۱۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است (منحنی‌های پایین‌تر در شکل‌های ۸-الف، ۸-ب و ۸-ج). سرعت مشعل نقش مهمی بر توزیع دما دارد. به‌طور

اثر سرعت مشعل بر توزیع دما در شرایط آزمایش‌های شماره ۱، ۷، ۸ و ۹ بررسی شد (جدول ۳). منحنی‌های دما-فاصله محاسباتی و تجربی جهت بررسی توزیع دما با تغییر سرعت حرکت مشعل در مبدأ مختصات ورق برای سرعت‌های ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۸ (الف، ب و ج) نشان داده شده است. همچنین، منحنی‌های دما-زمان محاسباتی در مبدأ مختصات ورق برای سرعت‌های حرکت مشعل ۱۰۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۸-د آورده شده است. نتایج محاسبات حاصل از اثر سرعت مشعل بر توزیع دما نشان می‌دهد که با کاهش سرعت از ۱۲۰ به ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه دمای بیشینه به ترتیب از ۹۰۰ به ۸۱۰ و ۷۲۰ کلوین (۶۲۷،



شکل ۷- مقایسه نمودارهای توزیع دمای محاسباتی و تجربی با تغییر دبی، الف) دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، ب) دبی ۹ لیتر بر دقیقه، ج) دبی ۸ لیتر بر دقیقه و د) تغییرات دمای محاسباتی بر حسب زمان با تغییر دبی گاز (سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه و فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی متر)

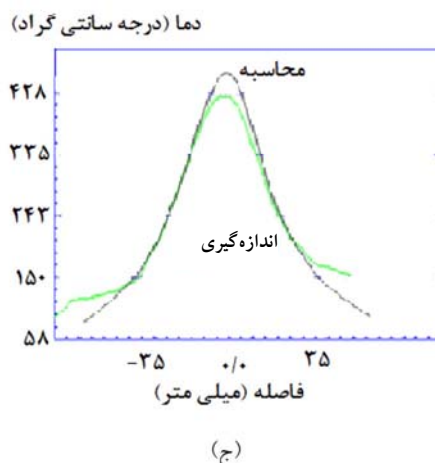
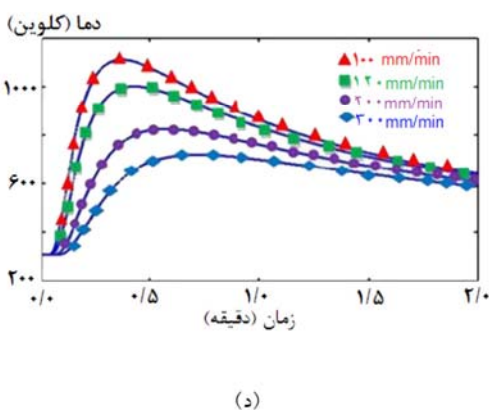
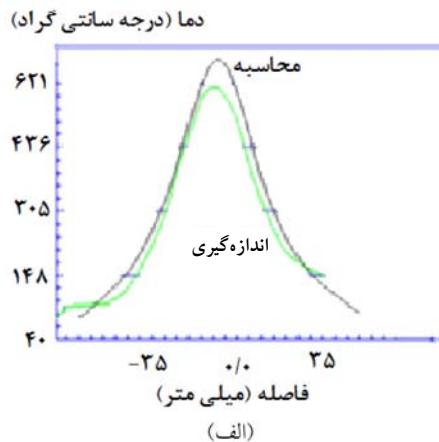
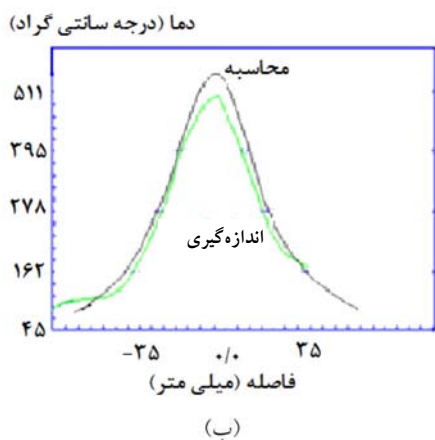
فولادی شود.

#### ۴- مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی

##### ۴-۱- توزیع دما در سطح بالایی و زیرین

نتایج تجربی حاصل از توزیع دما در سطح بالایی و سطح زیرین ورق فولادی (در شرایطی است که سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه، دبی گازهای خروجی ۱۰ لیتر بر دقیقه و مشعل در فاصله ۳۰ میلی متری از سطح ورق قرار داده شده است) در شکل ۹ نشان داده شده است. ابتدای فرایند، دمای سطح بالایی و زیرین ورق با هم برابر بوده و در دمای ۳۰۰

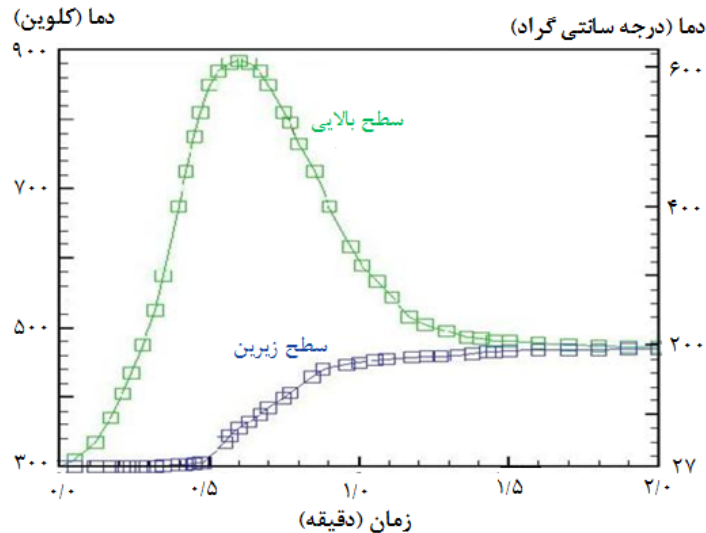
کلی، با افزایش سرعت حرکت مشعل، دمای بیشینه سطح در شرایط محاسباتی و تجربی کاهش پیدا کرده است. نشان داده شده که با افزایش سرعت مشعل، میزان انتقال حرارت از شعله به ورق کاهش پیدا می کند [۱۶]. دلیل این موضوع آن است که با افزایش سرعت حرکت مشعل، مدت تماس هر نقطه از ورق با شعله کاهش می یابد. از نظر فیزیکی انتظار می رود با افزایش سرعت حرکت مشعل، عمق نفوذ حرارت کمتر و دمای بیشینه کاهش پیدا کند. بنابراین، با افزایش سرعت حرکت مشعل، اختلاف دمای سطح بالایی و زیرین ورق کاهش پیدا می نماید که می تواند باعث کاهش میزان خم در مرحله شکل دهی ورق



شکل ۸- مقایسه نمودارهای توزیع دمای محاسباتی و تجربی با تغییر سرعت حرکت مشعل: الف) ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه، ب) ۲۰۰ میلی متر بر دقیقه، ج) ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه و د) تغییرات دمای محاسباتی بر حسب زمان با تغییر سرعت حرکت مشعل (دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی متر)

سطح بالایی می‌رسد، در ابتدا در دمای ۳۱۰ کلوین (۳۷) درجه سانتی‌گراد قرار دارد (شکل ۵- ب). سپس با یک آهنگ ثابت شروع به افزایش می‌کند. زمانی که شعله به نقطه مرکز ورق در وجه گرم شونده می‌رسد، دمای سطح بالایی به دمای بیشینه ۹۰۰ کلوین (۶۲۷) درجه سانتی‌گراد رسیده است. زمانی که سطح بالایی ورق در دمای بیشینه ۹۰۰ کلوین (۶۲۷) درجه سانتی‌گراد قرار دارد، سطح زیرین ورق دارای دمای ۴۰۰ کلوین (۱۲۷) درجه سانتی‌گراد است. مقایسه نتایج تجربی به دست آمده با نتایج حاصل از حل

کلوین (۲۷) درجه سانتی‌گراد قرار دارد. سپس با یک آهنگ ثابت شروع به افزایش کرده و در مبدأ مختصات ورق دمای بیشینه به ۸۸۰ کلوین (۶۰۷) درجه سانتی‌گراد رسیده است. در زمانی که سطح بالایی ورق به دمای بیشینه ۸۹۰ کلوین (۶۱۷) درجه سانتی‌گراد رسیده است، سطح زیرین ورق در دمای ۳۸۵ کلوین (۶۱۲) درجه سانتی‌گراد قرار دارد. نتایج محاسبه و مدل‌سازی حاصل از توزیع دما در سطح بالایی و سطح زیرین ورق فولادی در شرایط فوق حاکی از آن است که دمای سطح زیرین ورق در لحظه‌ای که مرکز شعله به نزدیکی آن در

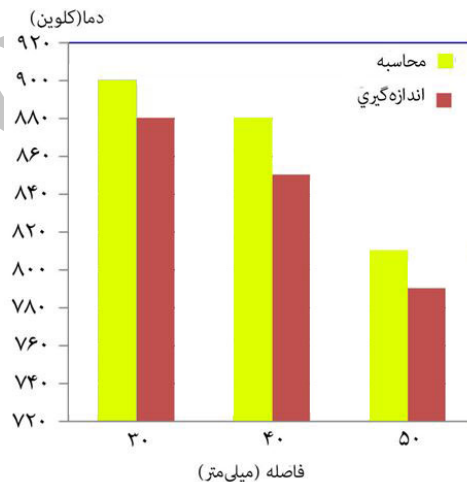


شکل ۹- نمودار تجربی توزیع دما در سطح فوقانی و سطح زیرین به صورت دما- زمان برای نقطه مرکز ورق (دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه و فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی متر)

حرارتی مهم ترین عاملی است که بر توزیع دما اثرگذار است، لذا می توان بخش قابل توجهی از اختلاف موجود را به این مسأله مربوط دانست.

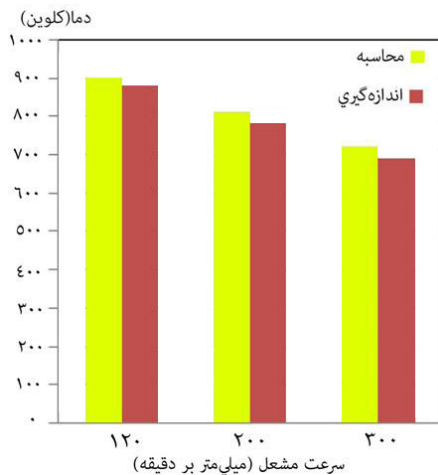
#### ۴-۲- اثر فاصله مشعل

در شکل ۱۰ اثرات تغییر فاصله مشعل (نازل) بر دمای بیشینه حاصل از مدل سازی (محاسبه) با نتایج تجربی مقایسه شده است. قبلاً اثر فاصله مشعل از سطح ورق بر توزیع دما (در سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه و دبی گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه) در حالت مدل سازی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶- ب). نتایج به دست آمده بیانگر کاهش دمای بیشینه سطح ورق در اثر افزایش فاصله نازل از سطح بود که موجب کاهش عمق نفوذ حرارت شده است. دمای بیشینه نقطه مرکز ورق در وجه گرم شونده در حالتی که سر مشعل در فاصله ۳۰ میلی متری از سطح ورق در نظر گرفته شد، حدود ۹۲۰ کلوین (۶۴۷ درجه سانتی گراد) بود که در این حالت دمای بیشینه سطح ورق بیشترین مقدار را (نسبت به فاصله های مشعل ۴۰ و ۵۰ میلی متری) دارد. در شرایطی مشابه در نقطه مرکز ورق در سطح

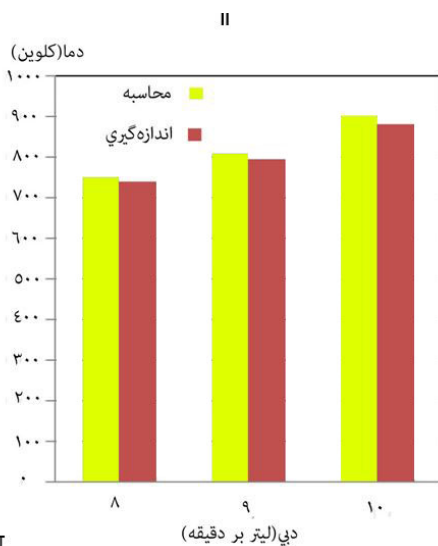


شکل ۱۰- مقایسه اثر تغییر فاصله مشعل از سطح ورق بر دمای بیشینه حاصل از نتایج مدل سازی و یافته های تجربی (دبی گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه و سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی متر بر دقیقه)

تحلیلی توزیع دما در سطح بالایی و زیرین ورق نشان دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج تجربی و مدل سازی است (شکل های ۵ و ۹). عدم تطابق کمی که مشاهده می شود، علاوه بر خطاهای تجربی، می تواند به ضریب هدایت حرارتی مربوط باشد [۲۳]. از آنجا که ضریب هدایت



شکل ۱۱- مقایسه اثر تغییر سرعت مشعل بر دمای بیشینه حاصل از نتایج مدل‌سازی و یافته‌های تجربی (دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی‌متر)



شکل ۱۲- مقایسه اثر تغییر دبی بر دمای بیشینه حاصل از نتایج مدل‌سازی و یافته‌های تجربی (فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی‌متر و سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه)

سرعت حرکت مشعل از ۱۰۰ به ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه دمای بیشینه سطح به دمای ۹۰۰ کلونین (۶۲۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. در صورتی که سرعت حرکت مشعل به ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه افزایش یافته، دمای بیشینه محاسباتی

گرم شوند با افزایش فاصله مشعل به ۴۰ میلی‌متر، نتایج بیانگر کاهش دمای بیشینه سطح است به نحوی که در این فاصله دمای بیشینه سطح، ۸۸۰ کلونین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) است و با تغییر فاصله مشعل به ۵۰ میلی‌متر، دمای بیشینه سطح به دمای ۸۱۰ کلونین (۵۳۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش یافته است.

نتایج تجربی توزیع دما در سطح بالایی (سطح گرم شونده) در شرایط فوق نیز بیانگر کاهش دمای بیشینه سطح با افزایش فاصله نازل از سطح ورق است (منحنی‌های پایین‌تر در شکل‌های ۶- الف، ۶- ب و ۶- ج). در مبدأ مختصات ورق در حالتی که مشعل در فاصله ۳۰ میلی‌متری از سطح ورق است، دمای ۸۸۰ کلونین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) است که در این حالت دمای بیشینه سطح ورق بیشترین مقدار را دارد. در شرایطی مشابه و در مبدأ مختصات ورق، با افزایش فاصله مشعل به ۴۰ میلی‌متر، نتایج تجربی بیانگر کاهش دمای بیشینه سطح است به نحوی که در این فاصله دمای بیشینه سطح به حدود ۸۵۰ کلونین (۵۷۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. با افزایش فاصله مشعل به ۵۰ میلی‌متر، دمای بیشینه سطح کاهش یافته و به ۷۹۰ کلونین (۵۱۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. کاهش دمای بیشینه سطح موجب کاهش عمق نفوذ حرارت می‌شود و در مرحله شکل‌دهی موجب کاهش زاویه خم خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، ضمن تغییر فاصله مشعل از سطح ورق، دمای بیشینه حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی اختلاف نسبتاً کمی دارد که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج آزمایشگاهی با داده‌های محاسباتی است.

#### ۳-۴- اثر سرعت حرکت مشعل

اثر تغییر سرعت حرکت مشعل بر توزیع دمای محاسباتی و تجربی در سرعت‌های ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (در شرایطی که سایر عوامل اصلی فرایند ثابت در نظر گرفته شدند)، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج محاسبات نشان داد با افزایش سرعت حرکت مشعل، دمای بیشینه سطح کاهش یافته و همچنین عمق نفوذ دما نیز کم شده است؛ به نحوی که با کاهش

کاهش پیدا کرده و به ترتیب به ۸۱۰ و ۷۲۰ کلوین (۵۳۷ و ۴۴۷ درجه سانتی‌گراد) کاهش پیدا نموده است.

در شرایط فوق نتایج تجربی نشان داد در زمانی که سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه بوده است، دمای بیشینه سطح به دمای ۸۸۰ کلوین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. هنگامی که سرعت حرکت مشعل به ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه افزایش یافته، دمای بیشینه تجربی کاهش پیدا کرده و به ۷۸۵ و ۶۹۰ کلوین (۵۱۲ و ۴۱۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، مقایسه دمای بیشینه حاصل از مدل‌سازی با یافته‌های تجربی (در اثر تغییر سرعت حرکت مشعل) نشان‌دهنده اختلاف ناچیز و تطابق قابل قبول بین نتایج است.

#### ۴-۴- اثر دبی گازها

در شکل ۱۲ اثر تغییر دبی بر دمای بیشینه حاصل از نتایج مدل‌سازی و یافته‌های تجربی (در شرایطی که فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰ میلی‌متر و سرعت حرکت مشعل ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه بوده) مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده از هر دو روش محاسباتی و تجربی در بررسی تأثیر تغییر دبی بر توزیع دما (در شرایطی که سایر عوامل اصلی مؤثر بر فرایند ثابت در نظر گرفته شدند)، بیانگر کاهش دمای بیشینه سطح با کاهش دبی است. در شرایطی که دبی گازها ۸ لیتر بر دقیقه، دمای بیشینه محاسباتی به ۷۵۰ کلوین (۴۷۷ درجه سانتی‌گراد) رسیده است. در همین شرایط (دبی ۸ لیتر بر دقیقه)، دمای بیشینه تجربی ۷۴۰ کلوین (۴۶۷ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده که فقط ۱۰ درجه سانتی‌گراد با دمای محاسباتی تفاوت دارد. با افزایش دبی گاز به ۹ لیتر بر دقیقه، دمای سطح شروع به افزایش کرده به‌گونه‌ای که بیشینه دمای محاسباتی به حدود ۸۱۰ کلوین (۵۳۷ درجه سانتی‌گراد) و بیشینه دمای تجربی به حدود ۷۹۵ کلوین (۵۲۲ درجه سانتی‌گراد) رسیده است (۱۵ درجه سانتی‌گراد اختلاف بین دمای تجربی و محاسباتی). با افزایش بیشتر دبی گاز به ۱۰ لیتر بر دقیقه، دمای سطح افزایش بیشتری

یافته به‌گونه‌ای که بیشینه دمای محاسباتی به حدود ۹۰۰ کلوین (۶۲۷ درجه سانتی‌گراد) و بیشینه دمای اندازه‌گیری شده به حدود ۸۸۰ کلوین (۶۰۷ درجه سانتی‌گراد) افزایش پیدا کرده است (۲۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف بین تجربی و محاسباتی). همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، مقایسه نتایج دمای بیشینه حاصل از مدل‌سازی با یافته‌های تجربی در اثر تغییر دبی گازها نشان‌دهنده اختلاف ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد (حدود ۲ تا ۳ درصد) است. بنابراین، تطابق بسیار قابل قبولی بین نتایج تجربی (آزمایشگاهی) با داده‌های محاسباتی (مدل‌سازی) وجود دارد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

ضخامت ورق، ظرفیت گرمای ویژه، ضریب هدایت گرمایی، فاصله مشعل از ورق، نوع گاز مصرفی، دبی گاز و سرعت حرکت مشعل عواملی هستند که بر توزیع دما در فرایند حرارت‌دهی خطی ورق‌های فولادی با منبع اکسی‌گازی مؤثرند. اثر فاصله مشعل از ورق، دبی گاز و سرعت حرکت مشعل به‌عنوان متغیرهای اصلی فرایند به‌روش مدل‌سازی (محاسباتی) و تجربی (آزمایشگاهی) مورد بررسی قرار گرفت.

با کاهش سرعت حرکت مشعل، دمای بیشینه ( $T_{max}$ )، عمق نفوذ حرارت و اختلاف دمای سطح بالایی و زیرین ورق افزایش یافت. دمای بیشینه اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در سرعت‌های ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌ترتیب برابر با ۸۸۰، ۷۸۵ و ۶۹۰ کلوین و ۹۰۰، ۸۱۰ و ۷۲۰ کلوین به‌دست آمد.

با توجه به اینکه شرایط بهینه برای انجام فرایند در حالتی است که بیشترین میزان خم و کمترین میزان اعوجاج در قطعه ایجاد شود، بهترین محدوده نسبی سرعت مشعل، ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شد.

در اثر افزایش دبی گاز، دمای بیشینه ( $T_{max}$ ) و عمق نفوذ حرارت افزایش پیدا کرد. دمای بیشینه اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در دبی‌های ۱۰، ۹ و ۸ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب برابر ۸۸۰



صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی توزیع دما با یافته‌های آزمایشگاهی، نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین محاسبات انجام شده با آزمون‌های تجربی است. ورودی‌های مدل تدوین شده شامل دمای اولیه و محیط، سرعت حرکت مشعل، ضریب انتقال حرارت جابجایی، دبی گاز و فاصله مشعل از ورق است که علاوه بر فولاد بررسی شده، قابلیت پیش‌بینی توزیع دما در سایر مواد فلزی و فرایندهای مشابه اکسی‌گازی را دارد.

۷۹۵ و ۷۴۰ کلوین و ۹۰۰، ۸۱۰ و ۷۵۰ کلوین به دست آمد. دمای بیشینه اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در شرایطی که فاصله مشعل از سطح ورق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر باشد، به ترتیب برابر ۸۸۰، ۸۴۰ و ۷۹۰ کلوین و ۹۰۰، ۸۸۰ و ۸۱۰ کلوین به دست آمد. با توجه به هندسه شعله و اینکه بیشترین دمای شعله در قسمت نوک مخروط درونی است، مناسب‌ترین فاصله نسبی مشعل از سطح ورق، ۳۰ میلی‌متر به دست آمد.

## واژه‌نامه

1. line heating
2. MATLAB

3. Computerized numerical control (CNC)
4. IR Thermo-Camera

## مراجع

1. Glaussen, H. B., "Plate Forming by Line Heating", Ph.D. Thesis, Denmark University of Technology, Denmark, 2000.
2. Battig, A., and Deluccioni, M. A. V., "Heat Flux Equation Applied to Thermal Conduction Problem", *Revista Brasileira de Fisica*, Vol. 14, pp. 27-36, 1984.
3. محمودی، ا. و مهین روستا، ک.، "آنالیز و روش‌های تولید فولاد دریایی"، مجموعه مقالات ششمین همایش ملی صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ص. ۱۵-۱۷، بهمن ماه ۱۳۸۶.
4. Chen, B. Q., "Prediction of Heating Induced Temperature Fields and Distortions in Steel Plates", MSc Dissertation in Naval Architecture and Marine Engineering, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisbon, 2011.
5. سیف، م. و سیف، م. د.، *اصول طراحی کشتی*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (واحد تفرش)، قم، ۱۳۷۳.
6. ایرامنش، م. و ادبی فیروزجائی، د.، "بررسی تغییر شکل دائمی صفحات در خلال خمش سرد در ساخت بدنه کشتی"، مجموعه مقالات پنجمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، انجمن مهندسی دریایی ایران، جزیره کیش، ص. ۱۰-۱۱، آذرماه ۱۳۸۲.
7. خلیلی، خ. و رادفر، ا.، "تنظیم شعله اکسی‌استیلن توسط ماشین بینایی و منطق فازی"، مجموعه مقاله‌های یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تبریز، ص. ۲۷-۲۹، مهر ماه ۱۳۸۹.
8. صفائی، پ.، قاسمی، ب. و خرم مبارکه، ا.، "انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در یک محفظه مورب مانع‌دار با گرمایش موضعی"، *مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مجلسی*، ص. ۳۷-۴۷، ۱۳۸۸.
9. Nguyen, N. T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y., "Analytical Solution of Double-Ellipsoidal Moving Heat Source and its Use for Evaluation of Residual Stresses in Bead-on-Plate", *International Workshop on Fracture Mechanics & Advanced Materials*, Sydney University, Dec. 8-10, 1999.
10. Cheng, P. J., and Lin, S. C., "An Analytical Model for the Temperature Field in the Laser Forming of Sheet Metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 260-267, 2000.
11. Nguyen, N. T., Mai, Y. W., Simpson, S., and Ohta, A., "Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate", *Welding Journal*, Vol. 89, pp. 82-93, 2004.
12. Kim, J., and Na, S. J., "Feedback Control for 2D Free Curve Laser Forming", *Optics and Laser Technology*, Vol. 37, pp. 139-146, 2005.

13. Grin, A., Saur, D., Desmans, J. Y., and Harman, S., "Identification Models for Transient Heat Transfer on a Flat Plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 701-710, 2007.
14. Biswas, P., Mandal, N. R., and Sha, O. P., "Numerical and Dimensional Analysis for Prediction of Line Heating Residual Deformations", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 9, pp. 14-21, 2010.
15. Jang, C. D., Moon, S. C., and Ko, D. E., "Acquisition of Line Heating Information for Automatic Plate Forming", *Proceeding of Symposium on Ship Structures Committee*, Seoul National University, Korea, 2000.
16. Shin, J. G., Kim, W. D., and Lee, J. H., "Numerical Modeling for Systematization of Line Heating Process", *Journal of Hydrospace Technology*, pp. 41-54, 1996.
17. Yu, G., Anderson, R. J., Maekawa, T., and Patrikalak N. M., "Efficient Simulation of Shell Forming by Line Heating", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 4, pp. 2349-2370, 2001.
18. *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*, Designation A572/A572M-04, The Annual Book of ASTM Standards, Section 01, Vol. 01.04, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2005.
19. Negi, V., and Chattopadhyaya, S., "Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 94-103, 2013.
۲۰. حبیبی، ن.، فرهی، غ.، مجذوبی، غ. و دقیق، م.، "تعیین تجربی خواص مکانیکی فولاد St52 تحت دمای بالا"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس شکل دهی فلزات و مواد ایران، دانشگاه صنعتی شریف تهران، ص. ۱-۶، مهر ماه ۱۳۹۰.
۲۱. بخشی، م. و حجتی، م. ح.، اصول فرایندهای تولید محصولات فلزی، انتشارات دانشگاه مازندران، مازندران، ۱۳۸۰.
22. Kou. S., *Welding Metallurgy*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2002.
۲۳. رضایی، ح. و نیکفرجام، م.، "مدل سازی عددی شکل دهی ورق ها به روش حرارت دهی خطی"، مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی صنایع دریایی، انجمن مهندسی دریایی ایران، ص. ۹-۱۱، بوشهر، آبان ماه ۱۳۸۵.