

تحلیل حرارتی ورق در فرآیند خمکاری شعله‌ای به روش اجزاء محدود

محمد علی نیازی
استادیار

سید جلال همتی
استادیار

رضا نقد آبادی
استادیار

مهدی معرفت
استادیار

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

شکل دهی قطعات فولادی به روش خمکاری شعله‌ای، نمونه‌ای از کاربرد منبع حرارت متحرک گسترده است. برای شبیه‌سازی فرآیند تعیین توزیع درجه حرارت در قطعه کار بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور باید معادله انتقال حرارت سه بعدی گذرا را حل کرد. در این مطالعه با در نظر گرفتن شار حرارت شعله بصورت توزیع گوسی نرمال و همچنین شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش، مدلی برای انتقال حرارت در فرآیند خمکاری شعله‌ای ورق ارائه می‌گردد. براساس این مدل و با استفاده از روش اجزاء محدود یک برنامه کامپیوتری تدوین شده است. برای تحقیق اعتبار مدل و برنامه تدوین شده، چند مثال نمونه تحلیل شده و نتایج آنها با نتایج سایر محققان در حالت‌های خاص مقایسه شده اند. نتایج حاصل از این مقایسه صحت و اعتبار روش را نشان می‌دهند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که سرعت مشعل، توان موثر و ضریب تمرکز شعله، ضخامت ورق و شرایط مرزی از جمله پارامترهای موثر در توزیع درجه حرارت هستند.

کلمات کلیدی

تحلیل حرارتی ورق - روش اجزاء محدود - منبع حرارت متحرک گسترده - فرآیند خمکاری شعله‌ای

Thermal Analysis of Plate in Flame Bending Process with Finite Element Method

S. J. Hemmati
Assistant Professor

M. A. Niazi
Assistant Professor

M. Maerefat
Assistant Professor

R. Naghdabadi
Assistant Professor

Mechanical Engineering Department,
Tarbiat Modarres University

Abstract

One of the applications of distributed moving heat source is forming steel components by flame bending process. In the process simulation, determination of temperature distribution in work pieces is very important. For this purpose, the 3D transient heat transfer equation must be solved. In present study, Considering input heat flux as Gaussian distribution with free convection and radiation boundary conditions, a model is given to analyze heat transfer during flame bending

process of steel plates. For this model, a computer program has been developed by using finite element method. To verify the model and program, some examples are analyzed and their results are compared with those of the other researchers in given cases. From obtained results, it has been shown that the process is under influence of torch speed, effective power and concentration coefficient of flame, plate thickness and boundary conditions including of free convection and radiation.

Keywords

Thermal analysis of plate- Finite element method- Distributed moving heat source- Flame bending process

مقدمه

از منبع حرارت متحرک در صنعت به منظورهای مختلفی استفاده می‌شود. در جوشکاری و یا در عملیات حرارتی بعضی از قطعات و نیز در شکل‌دهی تیرها و ورقهای فولادی، کاربرد منبع حرارت متحرک رواج دارد. در اینگونه موارد مقدار حرارت لازم و نحوه اعمال آن در انتخاب نوع منبع تعیین کننده است. در جوشکاری با قوس الکتریکی، منبع حرارت قوس الکتریکی ایجاد شده بین قطعه کار و الکترود است و بصورت نقطه‌ای عمل می‌کند. در فرآیند شکل‌دهی قطعات فولادی به روش خمکاری شعله‌ای، شعله احتراقی روی سطح کار پخش می‌شود و بصورت غیرنقطه‌ای آن را گرم می‌کند. در این فرآیند با گرم کردن ورق در راستای مسیرهای معین روی قطعه کار به آن شکل می‌دهند. شکل (۱) نمونه‌ای از ورقهای شکل داده شده به این روش را نشان می‌دهد. تعیین پارامترهای شعله برای شبیه‌سازی فرآیند بسیار حائز اهمیت است. همچنین در شبیه‌سازیهای ترموالاستو پلاستیک، برای تعیین میزان بارگذاری حرارتی باید درجه حرارت‌های گرهی را محاسبه نمود. برای این منظور، تحلیل حرارتی فرآیند پیش نیاز تحلیل الاستو پلاستیک می‌باشد.

در تحلیل جوشکاری با قوس الکتریکی معمولاً راه حل تحلیلی منبع حرارت نقطه‌ای متحرک به کار می‌رود [۱ و ۲]. برای مواردیکه از منبع حرارت متحرک گسترده استفاده می‌شود مدل‌سازی فرآیند با فرض نقطه‌ای بودن منبع، خطاهایی را ایجاد می‌کند. علت این امر ماهیت پخش شده حرارت ورودی روی سطح است که بخاطر حرکت منبع غیرمتقارن نیز هست. تومیتا [۳] و او [۴] شعله را بصورت جت برخورد کننده به سطح ورق مدل کرده‌اند. آنها با حل عددی جریان متلاطم سیال داغ و مقایسه نتایج تحلیل با اندازه‌گیریهای تجربی اعتبار این مدل را نشان داده‌اند. در این روش می‌توان نقش پارامترهای مهمی مانند فاصله مشعل تا سطح ورق و قطر نازل را مورد بررسی قرار داد ولی تحلیل جریان متلاطم پیچیده و وابسته به اندازه‌گیریهای تجربی می‌باشد. سادگی و کارآمدی مدل توزیع گوسی شار حرارت شعله باعث محبوبیت آن شده است. موشایف و لاتور [۲] مساله انتقال حرارت در فرآیند شکل‌دهی ورق با استفاده از مشعل اکسی استیلن را به کمک نرم افزار ADINAT مورد مطالعه قرار داده‌اند. در تحقیق آنها فقط به مساله هدایت حرارت در داخل ورق پرداخته شده و نتایج حاصل با داده‌های تجربی ایواساکی [۵] مقایسه شده‌اند.

شین و همکارانش [۶] نیز با استفاده از نرم افزار ANSYS مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند. این محققان در مدل‌سازی مساله علاوه بر هدایت حرارت داخل ورق، شرط مرزی همرفت واداشته با ضریب همرفت و توزیع شار تجربی را در نظر گرفته‌اند. در مطالعات انجام شده اثر همرفت آزاد و تابش لحاظ نشده و خواص حرارتی ماده ثابت گرفته شده‌اند. در این مقاله اثر همرفت آزاد، تابش و تغییر خواص مواد نسبت به درجه حرارت بر فرآیند انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شوند. بعلاوه، با انتخاب مشعل اکسی استیلن بعنوان منبع حرارت، نقش سرعت مشعل، ضخامت ورق، توان موثر و ضریب تمرکز شعله بر توزیع درجه حرارت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای این منظور با استفاده از روش اجزاء محدود یک برنامه کامپیوتری تدوین شده که با آن می‌توان انتقال حرارت سه بعدی گذرای مذکور را تحلیل کرد. نتایج این مطالعه با نتایج مراجع [۲ و ۶] و داده‌های تجربی ایواساکی [۵] مقایسه شده‌اند.

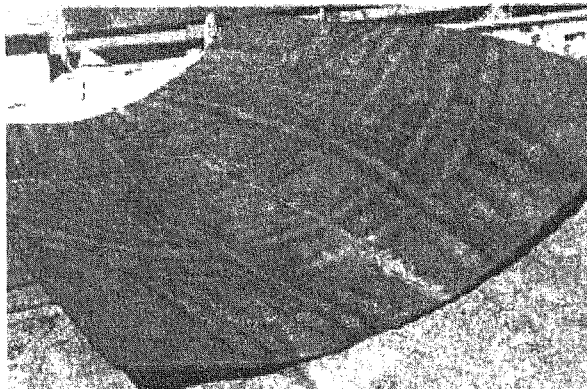
معادلات حاکم

برای تعیین توزیع سه بعدی گذرای درجه حرارت در ورق باید معادله دیفرانسیل انتقال حرارت زیر را حل کرد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c_p}{k} \dot{T} \quad (1)$$

که T درجه حرارت نقطه‌ای، ρ چگالی، c_p ظرفیت ویژه گرمایی و k ضریب هدایت حرارتی ماده هستند. شرایط مرزی مساله بصورت شار حرارت ورودی شعله و شار خروجی ناشی از همرفت آزاد با هوا و تابش نواحی گرم شده به محیط می‌باشند. در مدل توزیع گوسی نرمال، شار حرارت مشعل در فاصله شعاعی r از مرکز شعله، $q(r)$ عبارت است از:

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



شکل (۱) نمونه‌ای از ورقهای شکل داده شده به روش خمکاری شعله‌ای.

که q_{\max} شار ماکزیمم در مرکز شعله و γ ضریب تمرکز آن است. در این حالت فرض می‌شود مشعل بطور عمود و تحت فاصله معین از سطح قطعه کار قرار دارد. توان موثر شعله (q_{eff}) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{\text{eff}} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} q(r) r d\theta dr \quad (3)$$

از روابط (۲) و (۳) نتیجه می‌شود:

$$q_{\max} = \frac{q_{\text{eff}} \cdot \gamma}{\pi} \quad (4)$$

مقادیر q_{eff} و γ (پارامترهای شعله) برای تعدادی از مشعلهای استاندارد با سر مشعلهای مختلف و بازا مصرف استیلین معین در مرجع [۲] ذکر شده‌اند. با معلوم بودن این مقادیر می‌توان q_{\max} را از رابطه (۴) محاسبه نمود.

برای اعمال شرط همرفت آزاد با هوا باید ضریب همرفت (h) را تعیین کرد. طبق تعریف ضریب همرفت عبارت است از:

$$h = \frac{k Nu}{L} \quad (5)$$

که در آن k ضریب هدایت هوا، Nu عدد نوسلت و L طول مشخصه سطح همرفت می‌باشند [۸ و ۹]. برای تعیین عدد نوسلت در این حالت، روابط تجربی زیر ارائه شده‌اند:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.54 (Gr.Pr)^{0.25} && \text{سطح گرم رو به بالا} \\ Nu &= 0.27 (Gr.Pr)^{0.25} && \text{سطح گرم رو به پائین} \\ Nu &= 0.14 (Gr.Pr)^{0.33} && \text{سطح گرم عمودی} \end{aligned} \quad (6)$$

روابط (۶) با صرفنظر از اغتشاش اطراف شعله، برای جریان آرام هوا روی سطح گرم شده استفاده می‌شوند. طول مشخصه سطح همرفت (L)، بنا به تعریف حاصل تقسیم مساحت موثر در همرفت بر محیط پیرامون آن می‌باشد. براساس نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی و این تحقیق ملاحظه می‌شود که محدوده گرم شده عمود بر مسیر حرکت مشعل تقریباً ثابت است و با حرکت مشعل، طول مساحت موثر زیاد می‌شود. لذا ضریب همرفت متغیر خواهد بود. تغییرات ضریب همرفت به پهنای ناحیه گرم شده و موقعیت طولی مشعل بستگی دارد. در روابط (۶)، عدد گراشف و Pr عدد پراتل هستند. با محاسبه حاصلضرب عدد گراشف در عدد پراتل برای این حالت ملاحظه می‌شود که جریان هوا روی سطح ورق آرام خواهد بود. این فرآیند معمولاً در محدوده ۴۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود [۲، ۵، ۶]. هرگاه خط گرمایشی بطول یک متر و به پهنای ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود ماکزیمم طول مشخصه تقریباً $m = 0.45$ (۱/۲) / (۱×۱۰) خواهد بود. هرگاه هوای اطراف ورق ساکن به دمای $300 K$ در نظر گرفته شود عدد گراشف عبارت خواهد بود از:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu^2} = \frac{9.8 \times (1.5 \times 10^{-3}) \times (723.0) \times 0.045^3}{(20.75 \times 10^{-6})^2} = 2.25 \times 10^6 \quad (7)$$

در رابطه (۷) اختلاف دمای مطلق هوا با سطح ورق، g شتاب ثقل، β ضریب انبساط گرمایی هوا و ν ویسکوزیته سینماتیکی هوا هستند. در رابطه (۷) بازاء درجه حرارت سطح $750^\circ C$ عدد گراشف تعیین شده است. عدد پراتل در این حالت از جداول مراجع [۹ و ۸] حدوداً ۰/۷۱ تخمین زده می‌شود. بنابراین حاصلضرب

$$Gr.Pr = 1.6 \times 10^6 \quad (8)$$

خواهد شد. هرگاه مرز بین جریان آرام و متلاطم در حالات سه گانه (۶) بصورت

$$\begin{aligned} 10^5 < Gr.Pr < 2 \times 10^7 & \quad \text{سطح گرم رو به بالا} \\ 3 \times 10^5 < Gr.Pr < 3 \times 10^{10} & \quad \text{سطح گرم رو به پایین} \\ 10^4 < Gr.Pr < 10^9 & \quad \text{سطح گرم عمودی} \end{aligned} \quad (9)$$

فرض شوند [۸] از حاصلضرب (۸) ملاحظه می‌شود فرض جریان آرام برای تحلیل فرآیند منطقی است. شار حرارت ناشی از تابش بصورت زیر بیان می‌شود:

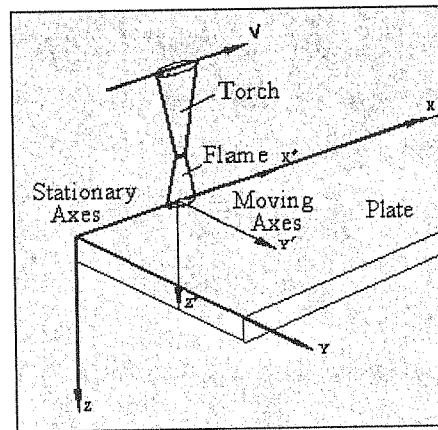
$$q_r = \sigma\epsilon(T_r^4 - T_s^4) \quad (10)$$

که در آن T_r و T_s به ترتیب درجه حرارت منبع تابش خارجی و درجه حرارت سطح، σ ثابت استفان-بولتزمن و ϵ ضریب صدور هستند. ضریب صدور بر حسب شرایط سطح ورق و درجه حرارت آن تغییر می‌کند. معمولاً در روش خمکاری شعله‌ای ورق‌های رول شده شکل داده می‌شوند. همچنین همانطوریکه قبلاً اشاره شد ماکزیمم درجه حرارت سطح ورق (T_{max}) بین ۴۵۰ تا $750^\circ C$ می‌باشد. در بعضی از تحلیلها مانند تحلیل حرارتی ورق در فرآیند جوشکاری ضریب صدور بصورت تابع درجه حرارت در نظر گرفته شده است [۱۱]. ولی در فرآیند خمکاری شعله‌ای که حالت خاصی از فرآیند جوشکاری با محدوده حرارتی پائینتری است فرض می‌شود ضریب صدور ثابت و برابر مقدار متوسطی می‌باشد. برای این منظور با توجه به کیفیت رول شده سطح و درجه حرارت متوسط $600^\circ C$ می‌توان مقدار ضریب صدور را از جداول موجود در مراجع [۹، ۸ و ۱۱] برابر ۰/۵ انتخاب کرد. مطالعات پارامتری (شکل ۱۲) نشان می‌دهند که مقدار این کمیت چندان تأثیری در میزان تبادل حرارتی ورق با محیط نخواهد گذارد. از رابطه (۱۰) ملاحظه می‌شود که شار حرارت ناشی از تابش تابع غیر خطی از درجه حرارت هاست و در نظر گرفتن آن باعث غیر خطی شدن معادله تعادل خواهد شد.

روش حل عددی

برای حل معادله (۱) می‌توان از روش اجزاء محدود استفاده کرد. برای این منظور الگوریتمهای مختلفی وجود دارند. در این

تحقیق از فرمولبندی و الگوریتم ارائه شده توسط بت [۱۰] استفاده می‌شود. در فرمولبندی مذکور معادله تعادل بصورت نمو (Incremental) بیان می‌شود. این نوع بیان معادلات، بخصوص در بارگذاریهای متغیر با زمان و یا تحلیلهای غیرخطی کاربرد دارد. در این روش فرض می‌شود درجه حرارت گرهها در لحظه t معلومند و باید آنها را برای لحظه $t + \Delta t$ (نمو زمان) محاسبه نمود. معادله تعادل اجزاء محدود حاکم در زمان $t + \Delta t$ بصورت ماتریسی عبارت است از:



شکل (۲) سیستمهای مختصات ثابت و متحرک روی ورق.

$$\left({}^t K^k + {}^t K^c + {}^t K^r + \frac{{}^t C}{\Delta t} \right) \Delta T^{(i)} = {}^{t+\Delta t} Q_s + {}^{t+\Delta t} Q^{c(i-1)} + {}^{t+\Delta t} Q^{r(i-1)} - {}^{t+\Delta t} Q^{k(i-1)} - {}^{t+\Delta t} C^{(i-1)} \left(\frac{{}^{t+\Delta t} T^{(i-1)} - {}^t T}{\Delta t} \right) \quad (11)$$

که در آن بالانویسههای t, r, c, k و به ترتیب نشان دهنده زمان، هدایت، همرفت، تابش و تکرار هستند. تعریف متغیرهای معادله (۱۱) در ضمیمه (الف) آورده شده‌اند. با حل سیستم معادلات غیرخطی (۱۱) بردار نمو درجه حرارت‌های گرهی (ΔT) بدست می‌آید. برای حل سیستم فوق روش تکرار نیوتن-رافسون اصلاح شده بکار رفته است. به این ترتیب تنها در ابتدای هر نمو، ماتریس سفتی سمت چپ سیستم معادلات (۱۱) به روز می‌شود. در هر نمو و تکرار، درجه حرارت‌های گرهی از رابطه زیر اصلاح می‌شوند:

$${}^{t+\Delta t} T^{(i)} = {}^{t+\Delta t} T^{(i-1)} + \Delta T^{(i)} \quad (12)$$

در این حالت فرض اولیه عبارت است از:

$${}^{t+\Delta t} T^{(0)} = {}^t T \quad (13)$$

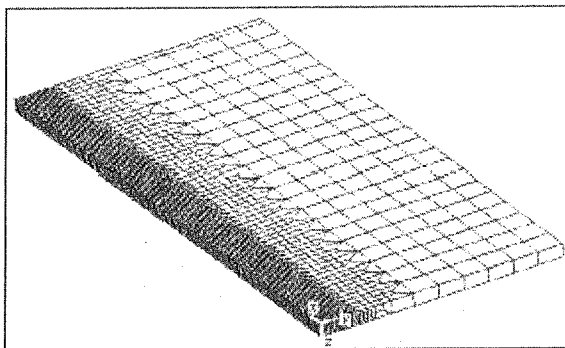
همچنین برای محاسبه مشتق \dot{T} از انتگرالگیری زمانی زیر استفاده می‌شود:

$${}^{t+\Delta t} \dot{T}^{(i)} = \frac{{}^{t+\Delta t} T^{(i-1)} + \Delta T^{(i)} - {}^t T}{\Delta t} \quad (14)$$

برای در نظر گرفتن سرعت مشعل، روابط مربوطه باید شامل متغیر زمان و مکان باشند. برای این منظور شعله مشعل بصورت یک دایره متحرک مدل می‌شود [۶ و ۲]. با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات متحرک $x'y'z'$ در مرکز شعله (شکل ۲)، مختصات گره‌های مختلف با تبدیل زیر به سیستم مختصات ثابت xyz مربوط می‌شوند:

$$\begin{aligned} x' &= x - v.t \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \quad (15)$$

که v سرعت مشعل و t زمان هستند. بردار شار حرارت شعله با انتگرالگیری عددی از رابطه Q_s در جدول (الف-۱) روی سطح اجزا واقع در محدوده دایره شعله محاسبه می‌شود. شار q در هر نقطه از سطح به مختصات (x', y') و شعاع



شکل (۳) مدل مش بندی شده نصف ورق.

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (۱۶)$$

از رابطه (۲) تعیین می‌گردد. در لحظه شروع حرکت مرکز مشعل قبل از لبه ورق قرار دارد. رابطه (۱۱) برای تحلیلهای پایدار و ناپایدار خطی و غیر خطی صادق است. در این رابطه می‌توان تغییر خواص مواد نسبت به درجه حرارت را در نظر گرفت. با استفاده از روابط بالا برنامه‌ای بنام HTLP برای تحلیل حرارتی فرآیند تدوین گردید. منوی اصلی این برنامه در ضمیمه (ب) نشان داده شده است. برای مدلسازی حجمی ورق و مش بندی آن از نرم افزار ANSYS بعنوان پیش پردازشگر استفاده می‌شود. ابعاد و جنس ورق، پارامترهای شعله و فرآیند، شرایط مرزی مورد نظر و نام فایل حاوی اطلاعات مش بندی و فایل خروجی بعنوان اطلاعات اولیه وارد می‌شوند. سپس برنامه به آزاء زمان کل مورد نظر درجه حرارتهای گرهی هر نمو را محاسبه و در فایل خروجی چاپ می‌کند. با توجه به دقت جوابها و زمان پردازش لازم، در تحلیلهای انجام شده گام زمانی، $\Delta t = 0.15 \text{ sec}$ در نظر گرفته شده است.

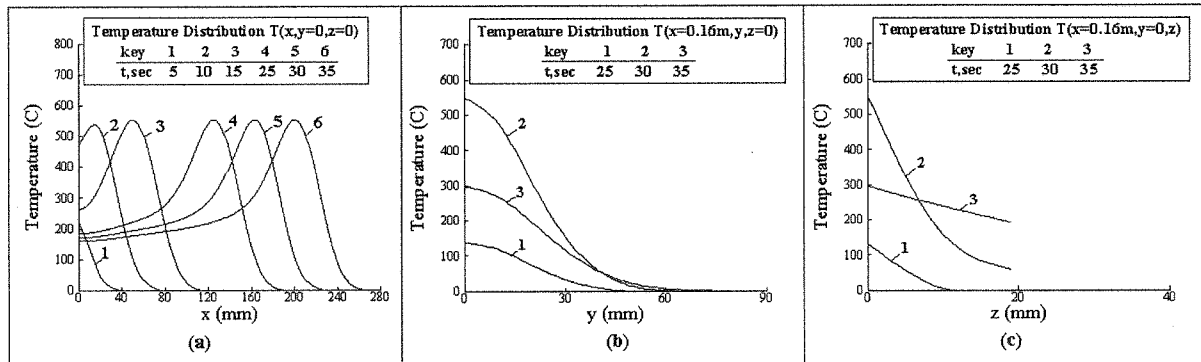
مدل اجزاء محدود

وقتی که ورق با مشعل گرم می‌شود تنها محدوده معینی اطراف شعله از شار ورودی متاثر می‌شود. لذا برای به حداقل رساندن زمان پردازش باید از مش بندی مناسب استفاده شود. تراکم شار ورودی و گرادیان درجه حرارت در نزدیکی مرکز شعله ایجاب می‌کند که در این ناحیه درجهت شعاعی و در راستای ضخامت ورق مش بندی ریزتر و مش سایر مناطق درشت تر انتخاب شوند. شکل (۳) مدل مش بندی شده نصف ورق را نشان می‌دهد. این مدل از سه ناحیه مش ریز، ناحیه گذر از مش ریز به درشت و ناحیه مش درشت تشکیل شده است. همچنین در راستای ضخامت سائز تقسیمات بطور تصاعدی افزایش می‌یابد. برای ورقههای دارای ضخامت زیر ۳۰ میلی‌متر شش جز در راستای ضخامت کفایت می‌کند. عرض ناحیه مش ریز در مدل برابر شعاع موثر شعله است. این شعاع به فاصله‌ای از مرکز دایره شعله گفته می‌شود که در آن شار ورودی حرارت حدوداً یک درصد شار ماکزیمم می‌باشد. در این تحلیل بدلیل تقارن بارگذاری و حل، تنها نصف ورق تحلیل می‌شود. همچنین مش بندی در حین پردازش ثابت در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه با توجه به ابعاد ورقتها و ملاحظات بالا از اجزاء جامد هشت گرهی استفاده می‌شود. ورقهایی به طول و عرض $۳۲۰ \times ۲۰۰ \text{ mm}$ و $۵۰۰ \times ۲۰۰ \text{ mm}$ و ضخامتهای ۱۰، ۱۵، ۱۹، ۲۰ و ۲۵ mm مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شرایط گرم کردن ورق در مواردیکه ذکر نشده برابر:

$$v = 7.5 \text{ (mm/sec)}, q_{eff} = 8036 \text{ (w)}, \gamma = 0.164 \text{ (cm}^{-2}\text{)}, T_0 = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

می‌باشند. خط مرکز ورق در امتداد طولی و محور x بعنوان مسیر حرکت مشعل انتخاب گردیده است. سیستم مختصات طبق شکل (۲) طوری انتخاب شده که ورق دروجه $z=0$ گرم شود. شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش در وجوه رویی و زیری ورق و همچنین لبه های شروع و انتهای آن در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۴) توزیع درجه حرارت در راستای (a) محور x ، (b) محور y و (c) محور z برای ورقی به ابعاد $100 \times 50 \times 19$ mm

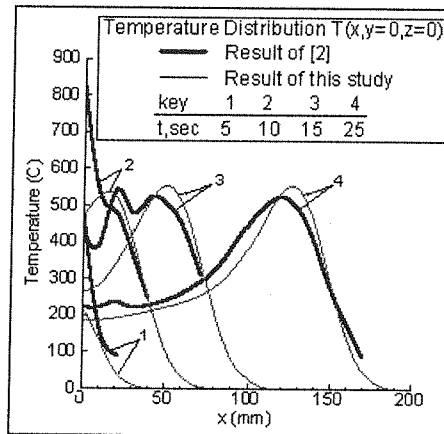
توزیع درجه حرارت

شکل (۴) توزیع درجه حرارت در ورق در راستای محورهای مختصات و بازاء زمانهای مختلف را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۵) و (۶) نیز مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق به ترتیب با نتایج مرجع [۲] و داده‌های تجربی ایواساکی [۵] صورت گرفته است. خواص مواد ثابت و برابر مقادیر مربوط به فولاد نرم در 200°C ($\rho = 7.18 \text{ g/cm}^3$, $k = 0.14 \text{ cal/mm.s.C}$, $c = 0.125 \text{ cal/g.C}$) فرض شده‌اند. در این حالت شعاع موثر دایره شعله تقریباً 50 mm است.

در شکل (۴a) مشاهده می‌شود که منحنی توزیع درجه حرارت در زمانهای متفاوت دارای مقدار ماکزیمم (T_{max}) و پهنای تقریباً یکسانی است و در فواصل کمی دورتر از لبه‌های ورق حالت شبه پایداری برقرار می‌باشد. از توزیع درجه حرارت در راستای محورهای x و y ملاحظه می‌شود که وسعت ناحیه متأثر از حرارت در مقایسه با ابعاد ورق محدود می‌باشد. در موقع عبور مشعل درجه حرارت نقاط زیر آن نسبتاً سریع بالا می‌رود ولی بدلیل حرکت شعله مدتی طول می‌کشد که دمای نقاط به T_{max} برسد بطوریکه در یک لحظه مرکز شعله بر نقطه T_{max} منطبق نیست. نکته دیگری که از این منحنیها ملاحظه می‌شود این است که شیب حرارتی در حد فاصل مرکز دایره شعله تا لبه جلویی آن خیلی بیشتر از لبه عقبی است و پس از مدت نسبتاً کوتاهی سرعت خنک شدن ماده کند می‌شود. در شکل‌های (۴b) و (۴c) نقطه $x = 160 \text{ mm}$ طوری انتخاب شده که در زمانهای ۳۰، ۲۵، ۳۵ ثانیه مرکز شعله به ترتیب قبل، کمی بعد و دورتر از این نقطه قرار بگیرد.

از مقایسه دو دسته منحنی شکل (۵) بازاء $t \geq 25 \text{ sec}$ یک همخوانی کیفی ملاحظه می‌شود. در این شکل برای سادگی منحنیهای مربوط به زمانهای بیشتر رسم نشده‌اند. همانطوریکه در این شکل ملاحظه می‌شود منحنیهای ۱ و ۲ و ۳ مربوط به [۲] دارای شکل منظمی نیستند درحالیکه این امر در منحنیهای مربوط به این تحقیق مشاهده نمی‌شود. موشایف ولاتور [۲] عامل این بی نظمی را تأثیرات لبه‌ای در توزیع درجه حرارت در نزدیکی لبه‌های ورق معرفی کرده‌اند. به نظر می‌رسد با توجه به طبیعت فرآیند انتقال حرارت، تغییرات درجه حرارت در منحنیهای مربوط به [۲] شدیدتر از حالت طبیعی هستند. همچنین در مطالعات انجام شده مشاهده می‌شود بدلیل ضخامت کم ورق و پهنای کم محدوده گرم شده، تأثیرات لبه‌ای خیلی کم خواهند بود بطوریکه در مجاورت لبه‌های شروع و انتها T_{max} کمی کمتر از نقاط دیگر است. لذا علت بی نظمی منحنیهای فوق احتمالاً ناشی از اشکال حل عددی به کار رفته است. این امر در مطالعات [۶] نیز تأیید شده است. در منحنیهای مربوط به [۶] نیز تغییرات شدید درجه حرارت در لبه‌های ورق گزارش نشده است بلکه نتایجی شبیه نتایج این تحقیق ارائه کرده‌اند. در شکل (۵) T_{max} منحنی (۴) مربوط به مطالعه فعلی تقریباً ده درصد بالاتر از T_{max} منحنی نظیر آن از [۲] بوده و نقطه مربوطه روی محور x کمی جلوتر می‌باشد. در محاسبات [۲] درجه حرارت اولیه $T_0 = 0^\circ\text{C}$ و خواص مواد در 200°C ثابت فرض شده‌اند و از اثرات همرفت آزاد و تابش صرفنظر شده است. بنابراین با در نظر گرفتن $T_0 = 25^\circ\text{C}$ منحنی بطور یکنواخت در راستای محور درجه حرارتها صعود می‌کند. در صورتیکه با این مقدار افزایش منحنی مربوط به [۲] هنوز پائین‌تر از منحنی

تجربی قرار می‌گیرد که با طبیعت مساله کمی متفاوت است زیرا برغم صرفنظر از اثر کاهش دما توسط همرفت و تابش و صرفنظر از تغییر خواص مواد با دمای ورق، باز هم منحنی محاسباتی [۲] پائینتر از منحنی تجربی قرار می‌گیرد. همچنین پهنای منحنی توزیع درجه حرارت در نتایج [۲] بیش از حالت طبیعی است. به نظر می‌رسد تقریب خطی شار ورودی گوسی در تحقیق فوق بر توزیع درجه حرارت تاثیر می‌گذارد. در این تحقیق با انتگرالگیری عددی شار روی سطح دایره‌ای برای تعیین شار ورودی، پهنای منحنی کمتر شده است. این امر توافق بهتری با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد از خود نشان می‌دهد. زیرا همانطوریکه در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، سطح همپوشانی منحنی تجربی ایواساکی با منحنی محاسباتی این تحقیق بیشتر است.



شکل (۵) مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مرجع [۲].

نقش خواص مواد

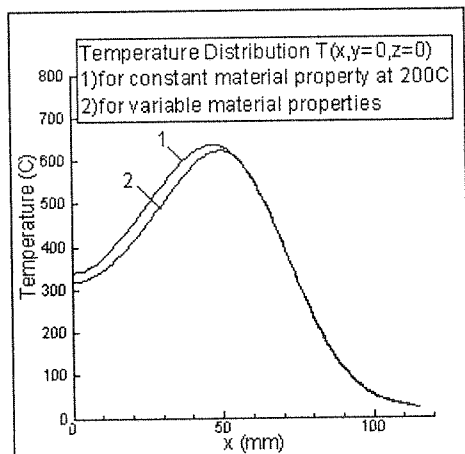
در این تحلیل از خواص فولاد نرم مرجع [۱۱] استفاده شده است. در شکل (۷) منحنی (۱) مربوط به حالت در نظر گرفتن تغییر خواص مواد نسبت به درجه حرارت است. منحنی (۲) با استفاده از خواص مواد در دمای 200°C رسم شده است. همانطوریکه ملاحظه می‌شود درجه حرارت نقاط سمت چپ T_{max} در منحنی (۲) با در نظر گرفتن تغییر خواص مواد در منحنی (۱) بین ۷ تا ۱۲ درصد افزایش یافته است. همچنین نقطه T_{max} منحنی (۲) کمی به سمت چپ منتقل شده است. این تغییرات قابل انتظارند. زیرا با در نظر گرفتن خواص مواد در 200°C ، ضریب هدایت حرارت، بیشتر و گرمای ویژه کمتر از حالت طبیعی فرض شده‌اند و لذا بطور محاسباتی ماده بیشتر از حالت طبیعی خنک می‌شود. تاثیر دیگر اعمال تغییر خواص مواد، پهن تر شدن منحنی توزیع درجه حرارت است که باعث انتقال نقطه T_{max} به سمت چپ آن نیز می‌شود. تاثیر در نظر گرفتن خواص مواد بصورت تابع درجه حرارت بر گرم شدن ورق ناچیز است ولی باعث بالا رفتن T_{max} و کندتر خنک شدن ورق می‌شود.

تاثیر سرعت مشعل بر توزیع درجه حرارت

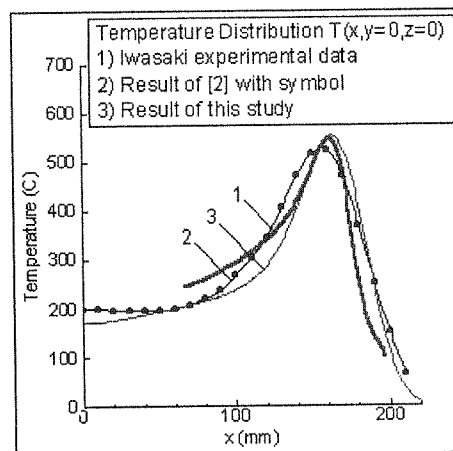
شکل (۸) منحنیهای توزیع درجه حرارت را در سرعتهای مختلف نشان می‌دهد. برای اینکه مسافت طی شده توسط مشعل یکسان باشد زمانها، مختلف در نظر گرفته شده‌اند. همانطوریکه از این نمودار ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت، T_{max} کم می‌شود. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین درصد تغییر سرعت با درصد تغییر T_{max} انجام شده است.

تاثیر ضخامت ورق (a) بر توزیع درجه حرارت

در شکل (۹) منحنیهای توزیع درجه حرارت با زاویه ضخامتها و سرعتهای مختلف رسم شده‌اند. در شکل (۹a) $v = 5 \text{ mm/sec}$ و در شکل (۹b) $v = 7/5 \text{ mm/sec}$ فرض شده است. برای مقایسه حالات مختلف درصد تغییر درجه حرارت ماکزیمم بعنوان معیار انتخاب شده و در جدول (۲) با درصد تغییر ضخامت مقایسه می‌شود. همانطوریکه از شکل‌های (۹a) و (۹b) و جدول (۲) ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت، درجه حرارت ماکزیمم تا حدی کم می‌شود و کاهش T_{max} بطرف یک حد معین پیش می‌رود.



شکل (۷) تاثیر تغییر خواص مواد با درجه حرارت.



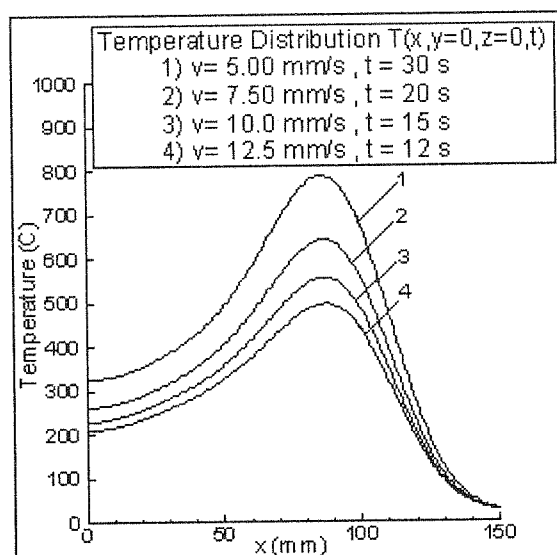
شکل (۶) مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مرجع [۲] و ایواساکی [۵].

تاثیر توان موثر و ضریب تمرکز شعله

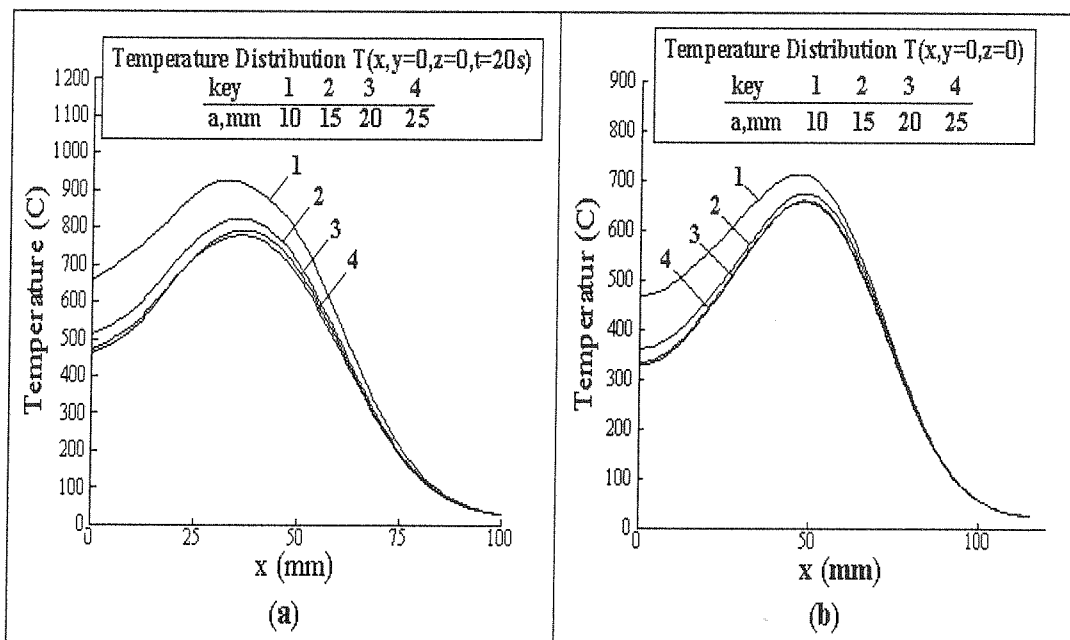
برای بررسی نقش توان موثر (q_{eff}) و ضریب تمرکز شعله (γ)، چند حالت مختلف تحلیل شدند. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتایج محاسبات را برای مقادیر مختلف q_{eff} و γ نشان می‌دهند. بر اساس فیزیک فرآیند بایستی با افزایش q_{eff} و γ ، T_{max} در ورق افزایش یابد. این امر از شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تأیید می‌شود. با افزایش γ شعاع دایره مدل شعله کمتر و در نتیجه تراکم شار ورودی بیشتر می‌شود.

جدول (۱) مقایسه درصد تغییر T_{max} با تغییر سرعت مشعل.

سرعت T_{max}	درصد تغییر سرعت	T_{max} (°C)	درصد تغییر (mm/s)
۵	میان	۷۹۰	میان
۷/۵	۵۰	۶۴۴	-۱۷۵
۱۰	۱۰۰	۵۵۸	-۲۹۴
۱۲/۵	۱۵۰	۴۹۸	-۳۶۶



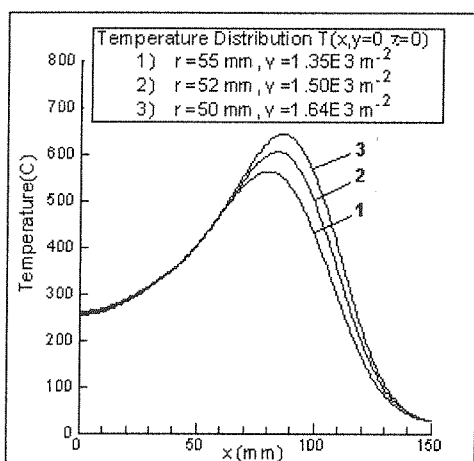
شکل (۸) تاثیر سرعت مشعل در توزیع درجه حرارت.



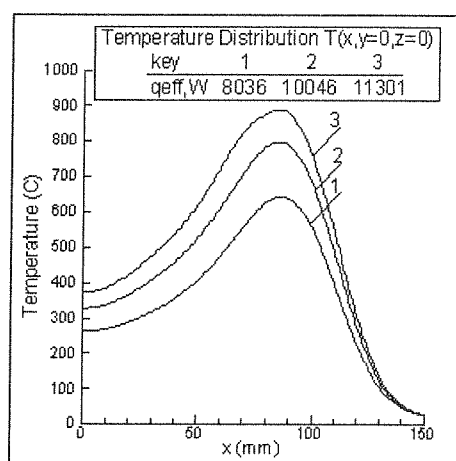
شکل (۹) تاثیر ضخامت ورق بر توزیع درجه حرارت بازاء سرعتهای مشعل $v=7/5 mm/sec$ (b) $v=5 mm/sec$ (a)

جدول (۲) مقایسه درصد تغییر T_{max} با تغییر ضخامت ورق.

سرعت mm/s	ضخامت mm	درصد تغییر ضخامت	T_{max} (°C)	درصد تغییر T_{max}
۵	۱۰	بنا	۹۳۷	بنا
	۱۵	۵۰	۸۲۴	-۱۱/۴
	۲۰	۱۰۰	۷۹۳	-۱۴/۴
	۲۵	۱۵۰	۷۸۰	-۱۵/۸
۷/۵	۱۰	بنا	۷۱۵	بنا
	۱۵	۵۰	۶۷۵	-۵/۸
	۲۰	۱۰۰	۶۶۰	-۷/۷
	۲۵	۱۵۰	۶۵۷/۵	-۸



شکل (۱۱) تاثیر ضریب تمرکز شعله بر توزیع درجه حرارت.



شکل (۱۰) تاثیر q_{eff} بر توزیع درجه حرارت.

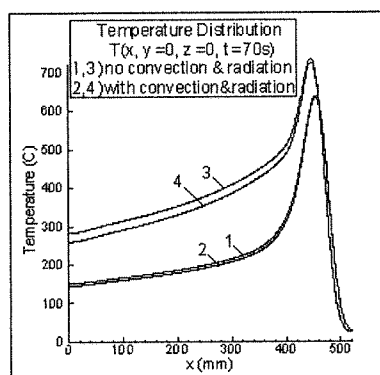
تأثیر شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش

برای تعیین تاثیر شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش در توزیع درجه حرارت دو حالت مختلف در نظر گرفته می‌شوند. در حالت اول فرض می‌شود غیر از سطح زیر شعله، بقیه سطوح ورق عایق شده‌اند و هیچگونه تبادل حرارتی با محیط انجام نمی‌دهند. در حالت دوم تبادل حرارت سطوح گرم شده اطراف شعله با محیط از طریق همرفت و تابش در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۶) منحنیهای توزیع درجه حرارت در راستای x را برای $a = 10 \text{ mm}$ (منحنیهای ۳ و ۴) و $a = 19 \text{ mm}$ (منحنیهای ۱ و ۲) نشان می‌دهد. در این شکل منحنیهای شماره (۱ و ۳) برای حالت بدون همرفت و تابش، و منحنی های شماره (۲ و ۴) با در نظر گرفتن همرفت و تابش رسم شده‌اند. همانطوریکه از این دو شکل ملاحظه می‌شود با کاهش ضخامت و ثابت ماندن سایر پارامترها، نقش تبادل حرارتی ورق با محیط از طریق همرفت و تابش بیشتر می‌شود. این امر از طبیعت فرآیند نیز قابل پیش‌بینی است زیرا با کاهش ضخامت از یک طرف سطح تبادل حرارت زیادتر می‌شود و از طرف دیگر همانطوریکه قبلا ملاحظه شد با افزایش ضخامت، درجه حرارت سطح نیز افت می‌کند. این موضوع را می‌توان برای سرعتهای مختلف مشعل نیز تعمیم داد. به این صورت که با کاهش سرعت و ثابت ماندن سایر پارامترها، نقش تبادل حرارت با محیط بیشتر می‌شود.

جمع بندی

در این مقاله برای تعیین توزیع درجه حرارت در ورق با منبع حرارت گسترده متحرک روشی ارائه شد. در این روش شار حرارت ورودی بصورت توزیع گوسی نرمال و سطح تبادل حرارت شعله با ورق به شکل دایره فرض شدند. با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات متحرک و تبدیل مختصات بین سیستمهای ساکن و متحرک، حرکت مشعل مدل شد. با استفاده از الگوریتم بت برای حل معادله انرژی، مساله هدایت حرارت در داخل ورق با لحاظ شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش بر روش اجزاء محدود حل شد. بر اساس این روش یک برنامه کامپیوتری تدوین گردید. با استفاده از این برنامه حالت‌های مختلف مربوط به پارامترهای موثر بر توزیع درجه حرارت مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای اطمینان از اعتبار محاسبات و صحت برنامه در حالت‌های خاص، نتایج محاسبات با نتایج محاسباتی [۲] و [۶] مقایسه شدند. نتایج حاصل از این مطالعه همخوانی خوبی با داده‌های تجربی ایواساکی [۵] نشان می‌دهند. به این ترتیب نتایج زیر به دست می‌آیند:

- از روش بکار رفته در این مقاله می‌توان برای تخمین پارامترهای شعله (q_{eff}, γ) استفاده کرد. تعیین پارامترهای مذکور برای شبیه‌سازی ترمومکانیکی فرآیند و تعیین میزان تغییر شکل پسماند ورق ضروری است.
- سرعت مشعل، توان موثر و ضریب تمرکز شعله، ضخامت ورق، خواص مواد متغیر با درجه حرارت و همرفت آزاد و تابش را می‌توان از جمله پارامترهای موثر بر فرآیند انتقال حرارت در این حالت دانست.
- با افزایش سرعت و یا ضخامت، و همچنین کاهش توان موثر و یا ضریب تمرکز شعله، T_{max} کم می‌شود.
- گرچه در نظر نگرفتن تغییر خواص مواد با درجه حرارت باعث ایجاد حد اکثر ۱۲٪ خطا در نتایج می‌گردد، می‌تواند بصورت خطاهای جمع شونده، از دقت محاسبات بکاهد.
- تاثیر شرایط مرزی همرفت آزاد و تابش، به مقدار هر یک از پارامترهای موثر بستگی دارد. همانطوریکه در مثالهای تحلیل شده نشان داده شد در ضخامتها و یا سرعت‌های کمتر، نقش تبادل حرارت با محیط از طریق همرفت آزاد و تابش بیشتر می‌شود.
- اثرهای لبه‌ای بدلیل کمی ضخامت ورق و غالب بودن مکانیزم هدایت حرارت بر همرفت آزاد و تابش، ناچیزند.



شکل (۱۲) تاثیر اعمال همرفت آزاد و تابش.

جدول (الف-۱) تعریف متغیرهای معادله تعادل (۱۱) در فرمولبندی اجزاء محدود.

تعریف	کمیت
ماتریس هدایت گرمایی (k ضریب هدایت حرارت)	${}^t K^k = \sum_m \int_{V(m)} B^{(m)T} {}^t k^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)}$
ماتریس همرفت (h ضریب همرفت)	${}^t K^c = \sum_m \int_{S_e(m)} {}^t h^{(m)} H^{s(m)T} H^{s(m)} dS^{(m)}$
ماتریس تابش $\kappa = \sigma \varepsilon (T_r^2 + T_s^2)(T_r + T_s)$	${}^t K^r = \sum_m \int_{S_r(m)} {}^t \kappa^{(m)} H^{s(m)T} H^{s(m)} dS^{(m)}$
ماتریس ظرفیت گرمایی (c ظرفیت گرمایی)	${}^{t+\Delta t} C^{(i)} = \sum_m \int_{V(m)} H^{(m)T} {}^{t+\Delta t} c^{(i)} H^{(m)} dV^{(m)}$
بردار شار ناشی از شعله (q شار حرارت شعله با توزیع (۲))	${}^{t+\Delta t} Q_S = \sum_m \int_{S_2(m)} H^{s(m)T} {}^{t+\Delta t} q^{(m)} dS^{(m)}$
بردار شار همرفت	${}^{t+\Delta t} Q^c = \sum_m \int_{S_c(m)} {}^{t+\Delta t} h^{(m)} H^{s(m)T} [H^{s(m)} ({}^{t+\Delta t} T_e - {}^{t+\Delta t} T_s)] dS^{(m)}$
بردار شار تابش	${}^{t+\Delta t} Q^r = \sum_m \int_{S_r(m)} {}^{t+\Delta t} \kappa^{(m)} H^{s(m)T} [H^{s(m)} ({}^{t+\Delta t} T_r - {}^{t+\Delta t} T_s)] dS^{(m)}$
بردار شار هدایت	${}^{t+\Delta t} Q^k = \sum_m \int_{V(m)} B^{(m)T} ({}^{t+\Delta t} k^{(m)} B^{(m)} {}^{t+\Delta t} T_s) dV^{(m)}$
توابع شکل حجمی و سطحی	$H_i^{(m)}$ $H_i^{s(m)}, i=1, \dots, N$
شماره المان	m
تعداد گره‌های هر المان	N
ماتریس $B(m) = Jac^{(m)-1} D_L$	$B(m) = \begin{pmatrix} H_{1,1} & \dots & H_{N,1} \\ H_{1,2} & \dots & H_{N,2} \\ H_{1,3} & \dots & H_{N,3} \end{pmatrix}$
ماتریس ژاکوبی	$Jac^{(m)} = D_L C_N^{(m)}$
ماتریس ضرائب	$D_L = \begin{pmatrix} H_{1,r} & \dots & H_{N,r} \\ H_{1,s} & \dots & H_{N,s} \\ H_{1,t} & \dots & H_{N,t} \end{pmatrix}$
ماتریس مختصات گره‌ها	$C_N^{(m)} = \begin{pmatrix} x_1^{(m)} & y_1^{(m)} & z_1^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^{(m)} & y_N^{(m)} & z_N^{(m)} \end{pmatrix}$

HTLP Program	
Plate Geometry (mm):	Torch Parameters:
Length: 320	Power(cal/s): 1920
Width: 100	Radius(mm): 50
Thickness: 19	Concentration(mm ²): 0.164
Process Parameters:	
Speed(mm/s): 7.5	
Total Time (s): 35	
Initial Temperature(C): 25	
Cooling Conditions:	
<input checked="" type="checkbox"/> Free Convection	
<input type="checkbox"/> Forced Convection	
<input checked="" type="checkbox"/> Radiation	
Material:	
Mild Steel: Brown&Song	
Dependency: Temperature_Dependent	
File Name:	
File Name: Study_1	
Output File Name: Study_1.out	
OK	Cancel

شکل (ب-۱) منوی اصلی برنامه تحلیلگر حرارتی HTLP.

مراجع

- [1] D. Rosental, "Theory of Moving Source of Heat and Its Application to Metal Treatment", Trans. ASME, 1946, pp. 849-866.
- [2] A. Moshiov and R. Lattore, "Temperature Distribution During Plate Bending by Torch Flame Heating", Journal of Ship Research, Vol.29, No.1, 1985, pp.1-11.
- [3] Y. Tomita, "Study on Approximate Method to Analyze Thermo-flow Field during Line Heating Process", Processing of the 9th International Offshore and Engineering Conference, 1999.
- [4] J.H. Woo, "Analysis of Heat Transfer between the Torch and the Plate for the Application of the Line Heating", M.S. thesis, Department of Naval and Ocean Engineering, Seoul National university Seoul, Korea, 2000.
- [5] Y. Iwasaki, "Study on the forming of hull plate by Line Heating Method", Mitsubishi Juko Giho, Vol. 19, No. 3, 1975, pp. 51-59.
- [6] J. Shin and J. Lee and S. Park, "A Numerical Thermo-plastic Analysis of Line Heating Processes for Saddle-type Shells with the Application of an Artificial Neural Network", Daewoo Heavy Ind. Ltd., Koje, Korea, 1997.
- [7] N.N. Rykalin, "Calculation of Heat Process in Welding", Mashinostroenije Moscow, 1960.
- [8] M. Ozishik, "Heat Convection", McGraw Hill, 1985.
- [9] W.H. McAdams, "Heat Transmission", McGraw-Hill, 1958.
- [10] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures for Engineering Analysis", Prentice-Hall Inc. , 1996.
- [11] S. Brown and H. Sony, "Finite Element Simulation of Welding of Large Structures", Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, 1992, pp. 441-451.