



## مدل سازی عددی شکل دهی ورق ها به روش حرارت دهی خطی

حمید رضائی<sup>۱</sup>، موعود نیکفرجام<sup>۲</sup>

گروه صنایع دریایی سازمان صنایع دفاع، مجتمع صنایع دریایی شهید جولایی

### چکیده

امروزه در صنایع کشتی سازی روش حرارت دهی خطی به عنوان یک روش متداول برای شکل دهی ورق های فلزی با انحنای دوگانه مطرح می باشد. ماهیت این روش یک فرآیند حرارتی گذراست که باعث ایجاد یک میدان تنش ترمو-الاستو-پلاستیک در ورق می گردد. هدف اصلی مقاله حاضر بررسی و آنالیز مکانیزم فرآیند شکل دهی ورق های فلزی به روش حرارت دهی خطی و ارائه ابزاری عددی برای محاسبه و تخمین رفتار فلز در این فرآیند است. برای این منظور یک مدل اجزای محدود تهیه و به کمک نرم افزار ANSYS تغییر شکل ورق و تنش های حرارتی حاصل از این روش را محاسبه می نمایم. در انتها به منظور معتبر سازی، نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی مقایسه می گردد که این مقایسه نشان دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج عددی و تجربی است.

### کلمات کلیدی

حرارت دهی خطی - تنش های حرارتی - شکل دهی ورق ها

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد معماری کشتی، هیدرودینامیک

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد معماری کشتی، سازه



## (۱) مقدمه

قسمت‌های عمده‌ای از بدنه کشتی‌ها از ورق‌هایی با خم‌های دوگانه تشکیل شده است. شکل‌دهی این ورق‌ها به وسیله پرس‌های هیدرولیک و یا حرارت‌دهی خطی توسط کارگران ماهر انجام می‌شود. با توجه به وابستگی کامل روش حرارت‌دهی خطی به کارگر و لزوم تجربه بالا برای این کار استفاده از یک روش اتوماتیک ضروری به نظر می‌رسد. روش مکانیکی اتوماتیک اولین بار در ژاپن در سال ۱۹۷۶ به وسیله پرس با پیستون‌هایی با محورهای چندگانه انجام شد که نتایج حاصل از آن چندان قابل قبول نبود. به منظور ایجاد امکان انجام اتوماتیک روش حرارت‌دهی خطی نیاز به ابزاری عددی برای تخمین تنش‌ها و فرم تغییر شکل یافته ورق لازم می‌باشد.

فرآیند حرارت‌دهی خطی به عنوان یک تکنیک قدیمی شکل‌دهی پوسته‌هایی با انحناهای دوگانه (شکل-۱) در صنایع کشتی‌سازی بسیار پیچیده است زیرا در این فرآیند فاکتورهای زیادی مانند انتخاب مسیر حرارت‌دهی، ترتیب و توالی این مسیرها، سرعت و ارتفاع مشعل، میزان حرارت ورودی، ابعاد ورق و خنک‌کاری آن، تغییر شکل نهایی ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهند. گسترش تکنیک حرارت‌دهی خطی مستلزم حل تحلیلی و یا عددی ترمو-الاستو-پلاستیک این مسأله می‌باشد. به واسطه پیچیدگی‌های ناشی از غیرخطی بودن و تغییر شکل‌های پلاستیک فلز در دماهای بالا که با زمان و مکان تغییر می‌کنند، حل تحلیلی جوابگوی کار نبوده و توانایی کافی برای حل دقیق مسأله را ندارد.

تکنیک حرارت‌دهی خطی شامل کاربرد سیکل‌های حرارتی کنترل شده می‌باشد. سیکل‌های حرارت‌دهی و خنک‌کاری باعث ایجاد کرنش‌های حرارتی می‌گردد و این کرنش‌ها باعث ایجاد شکل دلخواه در ورق می‌شوند (شکل-۱). Watanabe and Satoh به کمک حل تحلیلی حاصل از تئوری الاستیسیته سعی در پیش‌بینی تغییر شکل‌های حرارتی ناشی از جوشکاری و حرارت‌دهی خطی داشتند که به واسطه محدودیت‌های ناشی از این تئوری کاربرد این روش نیز محدود و ناکافی می‌باشد [۱].

با توجه به کاربرد وسیع فولاد در صنایع کشتی‌سازی، فولاد نرم<sup>۳</sup> به عنوان جنس ورق‌هایی که در این مقاله مورد آنالیز قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS و در دسترس

<sup>3</sup> Mild Steel



بودن این نرم افزار در کشورمان، در این مقاله از بین نرم افزارهای تجاری موجود این نرم افزار جهت حل مدل اجزای محدود انتخاب گردیده است.

## ۲) مدل سازی عددی مسأله

### ۱-۲) منبع حرارتی

شعله مشعل در حال حرکت را نمی توان دقیقاً با یک منبع حرارتی نقطه ای در حال حرکت مدل کرد ولی برای راحتی می توان به جای آن از یک توزیع شار حرارتی استفاده کرد. Rykalin مطالعات مختلفی در این زمینه انجام داد و یک رابطه ریاضی برای توزیع شار حرارتی مشعل ارائه داد [۲]. او فرض کرد که زاویه مشعل نسبت به ورق قائمه بوده و در شعاع  $r$  شار حرارتی  $Q''(r)$  به وسیله توزیع نرمال گوسی بیان می گردد که در شکل ۲- نشان داده شده است. معادله شار حرارتی را می توان به شکل زیر نوشت:

$$Q''(r) = Q_{\max} e^{-\gamma r^2} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Total}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} Q''(r) r dr d\theta = \frac{\pi Q''_{\max}}{\gamma} \quad (2)$$

که  $\gamma$  ضریب تمرکز با یکای  $1/m^2$  و  $Q_{\text{Total}}$  توان کل حاصل از شعله مشعل می باشد. به منظور انتخاب صحیح عرض مشعل و درک بهتر پارامتر  $\gamma$ ، شعاع مشعل،  $r_{\text{torch}}$ ، به گونه ای تعریف می گردد که  $Q''$  برابر با یک درصد مقدار  $Q_{\max}$  باشد، یعنی داریم:

$$Q''_{\max} e^{-\gamma r^2} = 0.01 \times Q''_{\max} \Rightarrow \gamma = \frac{\ln 100}{r_{\text{torch}}^2} \quad (3)$$

در محاسبات انجام شده در این مقاله  $r_{\text{torch}} = 4 \text{ cm}$  در نظر گرفته می شود و لذا  $\gamma = 2878 \text{ } 1/m^2$  می باشد.

### ۲-۲) انتقال حرارت به روش رسانایی، همرفت و تابش

معادله حاکم بر انتقال حرارت به روش رسانایی همان قانون اول ترمودینامیک است که بیانگر پایستگی انرژی می باشد. با صرف نظر کردن از انتقال جرم و تولید حرارت می توان در قالب حجم کنترل دیفرانسیلی این معادله را به فرم زیر نوشت:



$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} = 0 \quad (4)$$

که  $\rho$  نشان دهنده چگالی،  $c_p$  حرارت ویژه،  $T$  دما،  $t$  زمان،  $\nabla \cdot$  عملگر دیورژانس و  $\bar{q}$  بردار شار حرارتی می باشد. شار حرارتی و گرادیان دما به وسیله قانون فوریه به فرم زیر بیان می شوند:

$$\bar{q} = -D \nabla T \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}$$

که ماتریس رسانایی گرمایی است و در این ماتریس  $\lambda$  نشان دهنده ضریب رسانایی گرمایی و  $\nabla$  عملگر گرادیان است. با ترکیب دو معادله (4) و (5) می توان رابطه زیر را استخراج نمود:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

فرض اساسی که در نرم افزار ANSYS اعمال می شود آن است که حرارت همرفت شده از یک سطح،  $Q_C$ ، را می توان در حالت عمومی به وسیله رابطه Newton's postulate بیان کرد:

$$Q_C = \int_A h_f (T_S - T_B) dA \quad (7)$$

که  $h_f$  ضریب فیلم است که با دما تغییر می کند،  $T_S$  دمای سطح و  $T_B$  دمای هوای محیط است. تغییرات ضریب فیلم در دمای  $T_B = 20^\circ C$  در شکل ۳- نشان داده شده است. خواص همرفت مربوط به هوای محیط مطابق اطلاعات قید شده در (Incropera & Dewitt (1993) در نظر گرفته شده است [۳].

حرارت تابیده شده از سطح ورق را می توان به کمک قانون استفان-بولتزمان مدل کرد:

$$Q_R = \int_A \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_B^4) dA \quad (9)$$

که  $A$  نشان دهنده سطح و  $\varepsilon$  نشان دهنده Radiant Emissivity و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمان است. در این رابطه علاوه بر متغیر دما، ضریب Radiant Emissivity نیز متغیر است که می توان بر اساس پیشنهاد ارائه شده توسط Yagla et al ضریب Emissivity را برابر با ۰/۵ در نظر گرفت [۴].



### ۳) خواص مواد

دستیابی به خواص وابسته به دمای مواد معمولاً دشوار است. در اینجا از سه مرجع موجود برای این منظور استفاده می‌شود که عبارتند از: Patel (1985) و Richter (1973) و Birk-Sørensen (1999) [۵]، [۶] و [۷]. در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ مقایسه‌های خواص حرارتی و سازه‌ای مواد به صورت تابعی از دما،  $T$ ، نشان داده شده است. همان طور که در این اشکال دیده می‌شود بجز مدول مماسی بین داده‌های ارائه شده تطابق خوبی وجود دارد. با توجه به کامل بودن داده‌های Patel این منبع به عنوان مرجع مربوط به خواص مواد در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۴) مش‌بندی و شرایط مرزی

خط حرارت‌دهی مشعل به عنوان خط مرکزی ورق در نظر گرفته می‌شود و لذا با توجه به شرط مرزی تقارن آنالیز فقط برای نیمی از ورق انجام می‌شود. شکل شماتیک شبکه مانند شکل ۷ می‌باشد. به منظور مش‌بندی ورق از المان‌های سه‌بعدی 8-node solid استفاده شده است. در ضمن گوشه‌های ورق نیز با شرط مرزی تکیه‌گاه ساده (Simple Support) مهار می‌گردد.

### ۵) مطالعه موردی

به منظور مطالعه موردی و حل عددی مسأله، ورقی با ابعاد  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  و ضخامت  $20\text{ mm}$  در نظر گرفته می‌شود. حداکثر دما  $T_{\max} = 500^\circ\text{C}$  و سرعت مشعل  $15\text{ mm/s}$  در نظر گرفته می‌شود. همان طور که قبلاً اشاره شد شعاع مشعل را  $r_{\text{torch}} = 4\text{ cm}$  و خط مرکزی ورق را به عنوان خط حرارت‌دهی در نظر می‌گیریم. مدل تهیه شده شامل ۵۱۰۰ المان و ۶۴۰۰ گره می‌باشد. تعداد ۵۰۰ گام زمانی برای مدل‌سازی کل زمان حل مسأله در نظر گرفته می‌شود. نقطه شروع و پایان برای تأثیر مشعل (نقاط A و B در شکل ۷) به فاصله  $20\text{ cm}$  از هم واقع شده‌اند.

توزیع دما در ورق به صورت کانتورهای هم دما در شکل ۸ نشان داده شده است. حداکثر دما در این شکل  $500^\circ\text{C}$  و فاصله کانتورها  $50^\circ\text{C}$  می‌باشد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است انتشار حرارت در ورق با نفوذ بالایی صورت نمی‌گیرد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مؤلفه X و Y تنش کششی،



$\sigma_x$  و  $\sigma_y$  و در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مؤلفه X و Y کرنش پلاستیک،  $\varepsilon_x^P$  و  $\varepsilon_y^P$ ، در گام‌های زمانی وسط و آخر نشان داده شده است. در این اشکال موقعیت مشعل با یک مستطیل توپر و جهت حرکت مشعل از راست به چپ می‌باشد. همان‌طور که مشخص است  $\sigma_x$  در ناحیه وسیعی از موقعیت جلوتر از مشعل از نوع فشاری می‌باشد و به تدریج با افزایش فاصله از مشعل کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. در مورد  $\sigma_y$  نیز این مطلب صادق است ولی به واسطه تقارن در جهت Y قسمتی از ورق تحت تنش کششی می‌باشد.

## ۶) معتبرسازی نتایج

به منظور معتبرسازی نتایج عددی حاصل، از نتایج تجربی به دست آمده توسط Henrik Bisgaard Clausen (200) استفاده می‌گردد [۸]. این آزمایش‌ها در دانشگاه ملی سئول انجام شده‌اند. در این آزمایش از یک ورق به ابعاد  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$  استفاده شده است. خطوط حرارت‌دهی در موقعیت‌های  $\frac{1}{3}$  و  $\frac{2}{3}$  عرض ورق می‌باشند (شکل-۱۳). ضخامت ورق و سرعت مشعل مطابق جدول-۱ می‌باشد. در این آزمایش نیز فاصله مشعل از ورق  $r_{torch} = 4\text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. موقعیت نقاط اندازه‌گیری در شکل-۱۳ نشان داده شده است. در شکل-۱۴ مدل المان محدود مسأله نشان داده شده است. این مدل شامل ۲۸۷۴۰ المان و ۳۴۳۳۴ گره می‌باشد. ضخامت ورق و سرعت حرکت مشعل را مطابق حالت سوم از جدول-۱ در نظر می‌گیریم. حداکثر دما در این حالت  $635^\circ\text{C}$  می‌باشد.

جدول-۱: ضخامت ورق و سرعت مشعل در آزمایش‌های تجربی

Plat e	h [mm]	v $\left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$
1	12.5	3.0
2	12.5	3.0
3	9.7	3.0
4	13.0	4.0
5	12.8	5.0
6	13.0	4.0
7	13.0	4.0



تغییر شکل‌های حاصل از حل عددی در جدول-۲ نشان داده شده است. در آزمایش‌های انجام شده دما در قسمت تحتانی ورق اندازه‌گیری می‌شود. در شکل-۱۵ مقایسه دما در یک نقطه ثابت در قسمت تحتانی ورق به صورت تابعی از زمان نشان داده شده است. در این شکل پروفیل دما عمود بر مسیر حرارت‌دهی در قسمت تحتانی ورق اندازه‌گیری شده است.

جدول-۲: تغییر شکل‌های حاصل از حل عددی نمونه سوم از جدول-۱

Position	50	150	200	250	350	400	450	550
50	2.102	-0.112	-1.082	-1.144	-1.132	-1.007	-0.075	1.978
150	1.977	-0.224	-1.218	-1.082	-1.256	-1.094	0.099	1.779
250	1.816	-0.323	-1.356	-1.530	-1.343	-1.554	-0.448	1.542
350	1.455	-0.796	-1.915	-1.902	-2.188	-1.989	-1.020	0.883
450	0.721	-1.753	-2.673	-2.935	-2.897	-2.836	-2.127	0.062
550	0.112	-2.450	-3.744	-4.104	-4.253	-3.756	-3.519	-1.306

## ۷) بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه پروفیل دمای به دست آمده در محاسبات عددی و آزمایش‌های تجربی نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین این نتایج است. این تطابق نشان‌دهنده آن است که تفاوت در نرخ سرد شدن ورق نتایج حاصل را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. مقایسه تغییر شکل حاصل از نتایج عددی و تجربی در شکل-۱۶ نشان داده شده است. کانتورهای رسم شده در این شکل به فاصله  $0.75 \text{ mm}$  نسبت به هم می‌باشند. این شکل نیز نشان‌دهنده تطابق خوبی بین این نتایج است. بررسی تغییر شکل‌های محاسبه شده در آنالیز الاستو-پلاستیک بیانگر این مطلب است که در صورتی که تأثیر تنش‌های غشایی را بر تغییر شکل‌های خارج از صفحه لحاظ نکنیم، این تغییر شکل‌ها ناشی از خمش محض حول خطوط حرارت‌دهی می‌باشند. مقایسه کانتورهای تغییر شکل نشان می‌دهد که کانتورهای مربوط به آزمایش تجربی کوتاه‌تر از کانتورهای مربوط به نتایج عددی است، زیرا اندازه‌گیری تغییر شکل در لبه‌های ورق انجام نشده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در سمت چپ ورق کانتورهای عددی و تجربی تطابق خوبی دارند ولی در سمت راست کانتورها به علت پیچش ورق در آزمایش تجربی و خمش بیشتر در امتداد خط حرارت‌دهی، این تطابق کمتر می‌باشد.

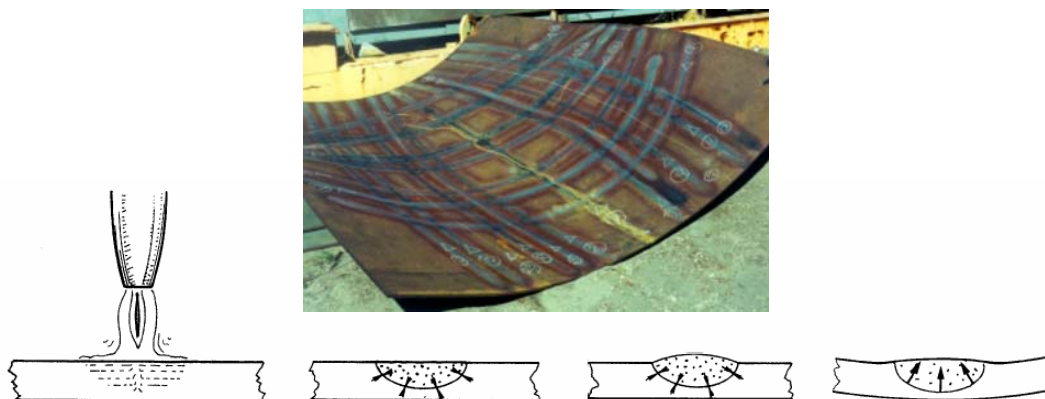


## ۸) مراجع

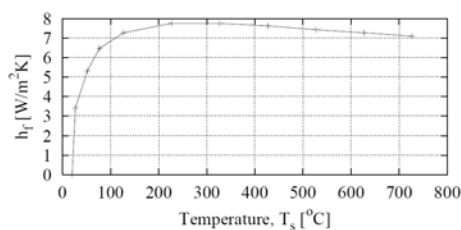
- [1] **Watanabe, M. and Satoh, K.**, "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures", *Welding journal*, Vol. 40, 1961.
- [2] **Rykalin, N. N.**, "Calculation of Heat Processes in Welding", *Mashinostroeniye*, Moscow, 1960.
- [3] **Incropera, F. P. & Dewitt, D. P.**, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> edition, 1993.
- [4] **Yagla, J. J., Haag, R. S. & Scott, M. E.**, "Laser Welding Analysis and Experiments", *Journal of Ship Production*, 11(2):102–110, 1995.
- [5] **Patel, B.**, "Thermo-Elasto-Plastic Finite Element Formulation for Deformation and Residual Stresses Due to Welds", Ph.D. thesis, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 1985.
- [6] **Richter, F.**, *Stahleisen-Sonderberichte, Heft 8. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen*, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1973, (in German).
- [7] **Birk-Sørensen, M.**, "Simulation of Welding Distorsions in Ship Sections", Ph.D. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 1999.
- [8] **Henrik Bisgaard Clausen**, "Plate Forming by Line Heating", Ph.D. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 2000.



اشکال (۹)

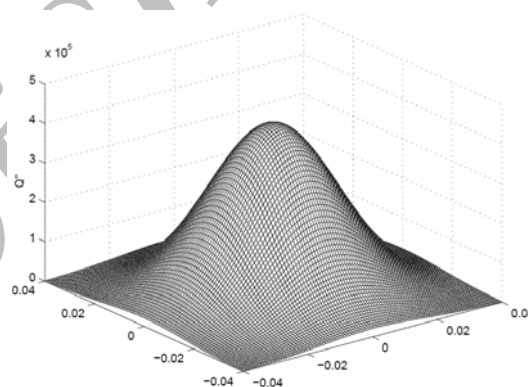


شکل-۱: نمونه‌ای از یک ورق شکل داده شده به وسیله روش حرارت‌دهی خطی و مکانیزم آن

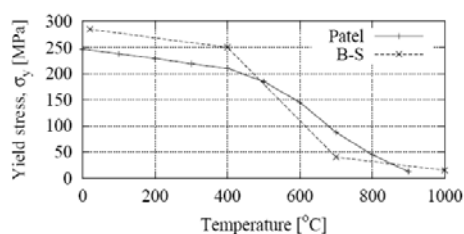
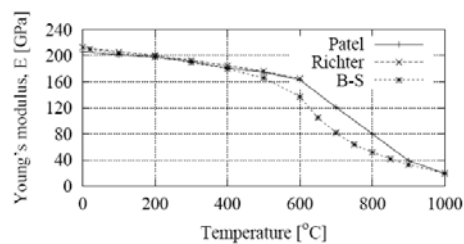
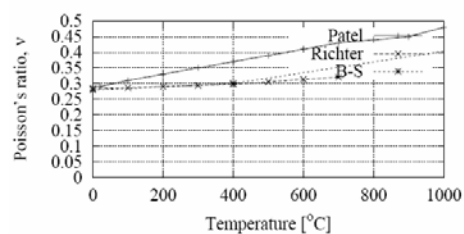
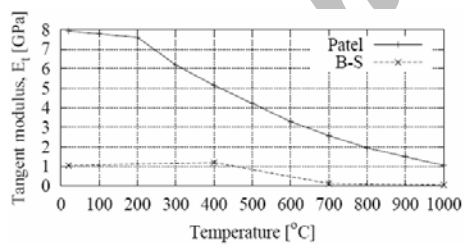


$$T_B = 20^\circ C$$

شکل-۳: تغییرات ضریب فیلم در

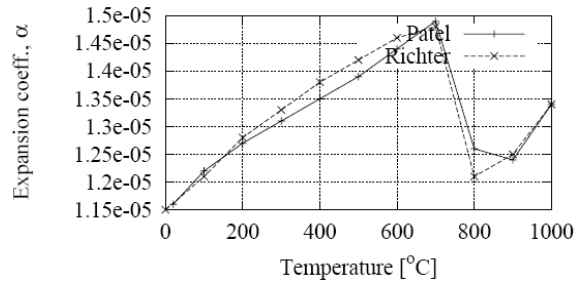
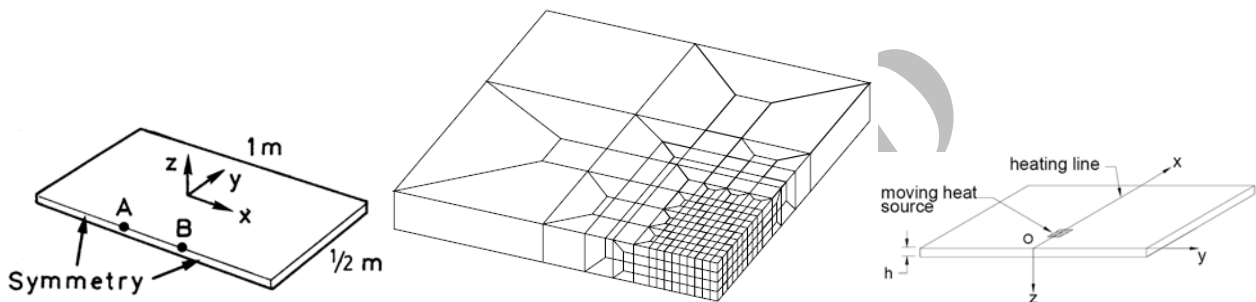


شکل-۴: توزیع نرمال گوسی برای منبع حرارتی

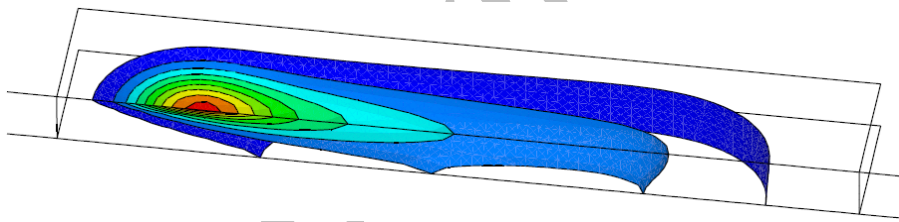
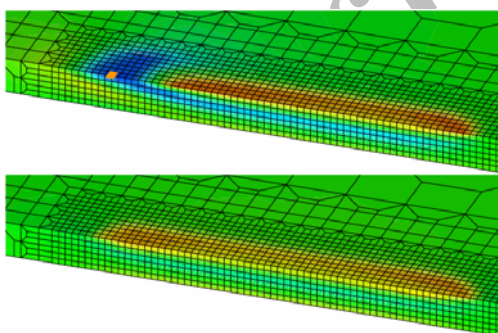
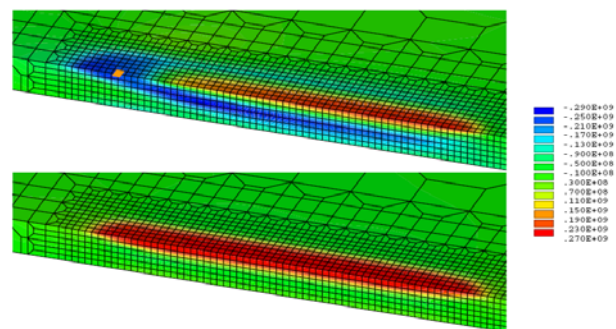


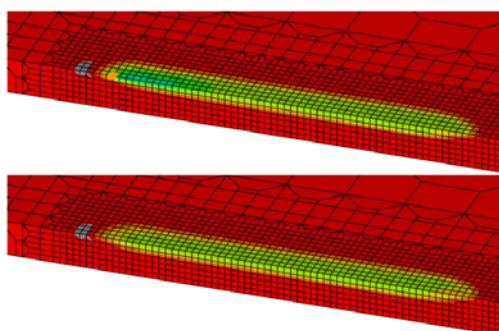
شکل-۵: مقایسه مدول مماسی،  $E_t$ ، و نسبت پواسون،  $\nu$ ، برای فولاد نرم

شکل-۴: مقایسه مدول یانگ،  $E$ ، و تنش تسلیم،  $\sigma_y$ ، برای فولاد نرم

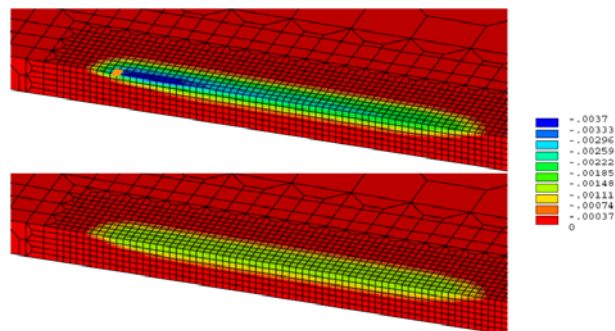
شکل-۶: مقایسه ضریب انبساط حرارتی،  $\alpha$ ، برای فولاد نرم

شکل-۷: محورهای مختصات و ابعاد نمونه مورد آنالیز و شکل شمایک مش بندی ورق

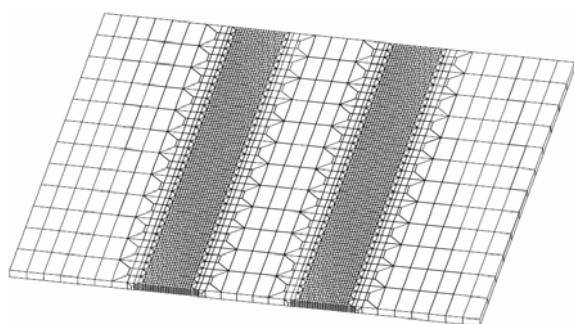
شکل-۸: کانتورهای دما برای نمونه مورد مطالعه با فاصله  $50^\circ\text{C}$  و حداکثر دمای  $500^\circ\text{C}$ شکل-۱۰: تنش کششی،  $\sigma_y$ ، برای گام زمانی وسط و آخرشکل-۹: تنش کششی،  $\sigma_x$ ، برای گام زمانی وسط و آخر



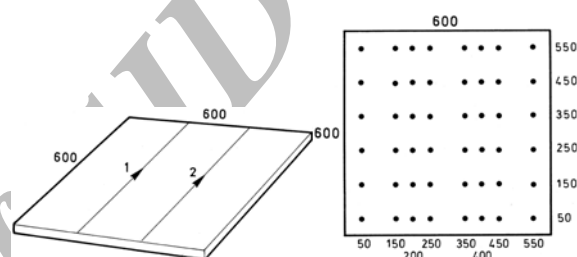
شکل-۱۲: کرنش پلاستیک،  $\epsilon_y^p$ ، در گام زمانی وسط و آخر



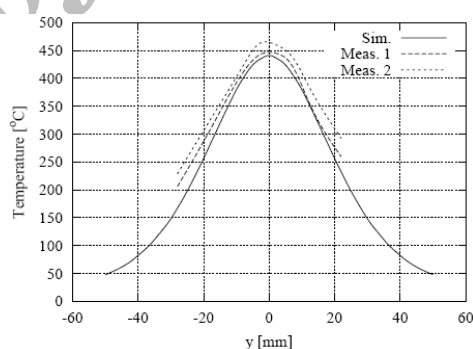
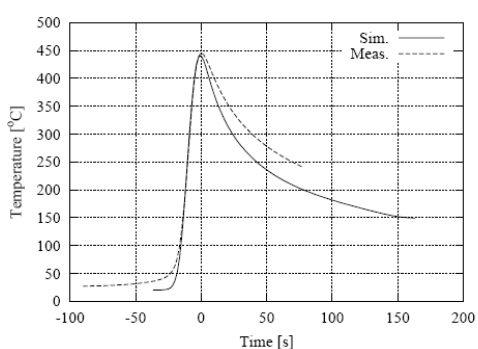
شکل-۱۱: کرنش پلاستیک،  $\epsilon_x^p$ ، در گام زمانی وسط و آخر



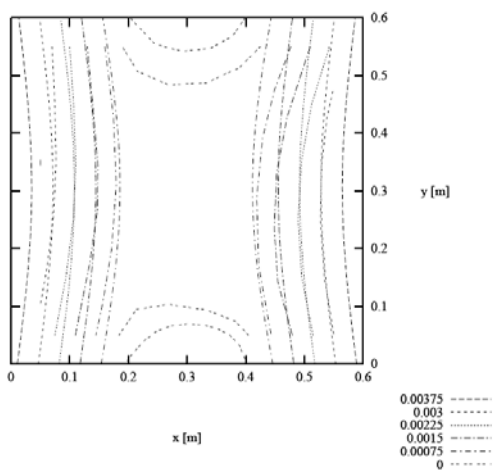
شکل-۱۴: مدل المان محدود از نمونه مورد مطالعه



شکل-۱۳: موقعیت نقاط اندازه‌گیری در آزمایش‌های تجربی



شکل-۱۵: مقایسه پروفیل دما بین نتایج عددی و تجربی



شکل-۱۶: مقایسه کانتورهای تغییر شکل برای نتایج عددی و تجربی