

تحلیل عددی تغییر شکل تیرهای نورد شده در معرض صاف کاری حرارتی

بهنام شهبابی^۱، سید جلال همتی^{۲*}

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲-استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

ترمیم سازه‌های فولادی به روش صاف کاری حرارتی قدمت طولانی دارد اما مطالعاتی در این زمینه در داخل کشور گزارش نشده است. ماهیت فیزیکی این فرآیند، حرارتی- مکانیکی است و اکثر مطالعات صورت گرفته نیز شامل بررسی تجربی اعوجاج‌ها و تغییر شکل‌های مکانیکی سازه‌ها و ترمیم به کمک ابزارهای تسریع کننده مانند جک‌های هیدرولیک بوده است. در این تحقیق، به تحلیل حرارتی و سازه‌ای این فرآیند روی یک تیر فولادی با مقطع I- شکل بدون اعمال بار خارجی پرداخته شد. مشعل اکسی استیلن به عنوان منبع حرارت، مد نظر بوده و از مدل شار حرارت نرمال گوسی برای مدل سازی شار حرارت ورودی از شعله به تیر استفاده شد. تحلیل انتقال حرارت گذرای سه بعدی و تغییر شکل‌های سازه‌ای به روش المان محدود در نرم افزار ANSYS، انجام گرفت و نتایج حاصل از تغییر شکل‌های حرارتی بر اساس میزان دوران پلاستیک در تیر بررسی شدند. همچنین نقش متغیرهای موثری مانند شرایط تکیه گاهی، سرعت مشعل در نواحی مختلف گرمایش، ابعاد منطقه گرم کاری و مسیر حرکت مشعل روی بال فوقانی تیر مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج شبیه سازی‌های عددی انجام گرفته در مقایسه با داده‌های تجربی موجود، همخوانی کیفی معقولی داشتند و به واسطه عدم اعمال نیروی خارجی، سهم حرارت در میزان تغییر شکل نهایی تیر تبیین گردید.

کلمات کلیدی: صاف کاری حرارتی تیر، تحلیل حرارتی - سازه‌ای، دوران پلاستیک، گرمایش مثلثی و نواری، گرمایش شعله‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.108868.1411	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.108868.1411	۱۳۹۸/۱۰/۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۰۲/۲۷	۱۳۹۶/۰۱/۲۶	۱۳۹۶/۱۰/۰۷
سید جلال همتی			*نویسنده مسئول:		
hemmati@hormozgan.ac.ir			پست الکترونیکی:		

Numerical Analysis of Rolled Beam Deformations Subjected to Heat Straightening

Behnam Shahrabi¹, Seyed Jalal Hemmati^{2*}

1- MSc student, dept. of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Assistant professor, dept. of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ABSTRACT

Restoration of the steel structures by heat straightening process has a long history, but national studies in this field have not been reported yet. The physical nature of this process is thermo mechanical, and the most of conducted studies have included the empirical investigation of angular distortions and mechanical deformations of structures and the restoration with the help of accelerators such as hydraulic jacks. In the present study, the numerical heat transfer and structural analysis of the process were carried out on an I-shaped cross section steel beam without application of external load. Oxy acetylene torch was considered as the heat source, and the Gaussian normal distribution model was used to model the input heat flux from flame to the beam surface. Three dimensional transient heat transfer and thermo elastic plastic deformations were analysed by finite element method in ANSYS software, and the results of thermo elastic plastic deformations were evaluated based on the amount of plastic rotation in the beam. Also role of the effective parameters such as supporting conditions, torch speed in different heating zones, heating dimensions and the path of torch movement on upper wing of the beam were studied. The results of numerical simulations carried out were in reasonable agreement with existing empirical data and showed the contribution of thermal deformation in the final deformations of the beam due to the non-application of external force.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 December 2017

Revise Date: 15 April 2018

Accept Date: 17 May 2018

Keywords:

Heat straightening process,
Thermal-structural analysis,
Plastic rotation,
Vee and strip heating,
Flame heating

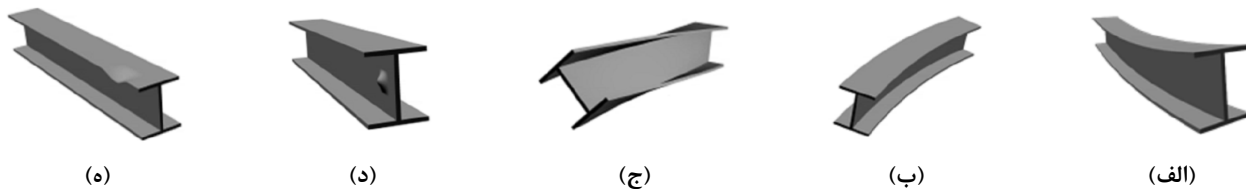
All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.108868.1411

*Corresponding author: Seyed Jalal Hemmati
Email address: hemmati@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

اعضای سازه‌های فولادی به دلایل مختلفی دچار آسیب می‌شوند. اضافه بار، ضربه اشیاء، اعوجاج‌های کنترل نشده در حین ساخت، جا به جایی وسایل نقلیه، زلزله و حرارت، از جمله عوامل ایجاد انواع آسیب‌ها می‌باشند. در شکل ۱ چهار الگوی معمول این آسیب‌ها معرفی شده‌اند [۱].

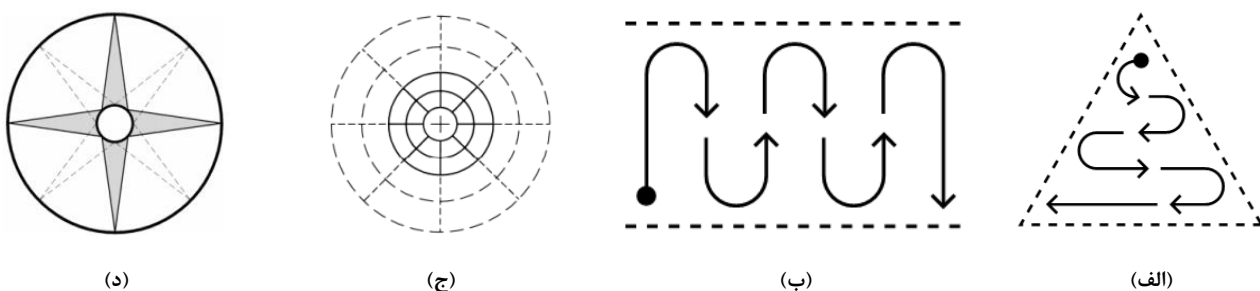


شکل ۱: انواع متداول الگوهای آسیب تیرها [۱]. (الف) الگوی قوی (S)، (ب) الگوی ضعیف (W)، (ج) الگوی پیچشی (T)، (د) آسیب L جان، (ه) آسیب L بال.

آسیب سازه‌های فولادی با صاف‌کاری مکانیکی قابل ترمیم است. در روش مکانیکی سرد، از نیروهای خارجی در دمای محیط برای صاف‌کاری استفاده می‌شود در حالی که در صاف‌کاری مکانیکی گرم، فولاد تا درجه حرارت بالایی (اغلب بیش از 927°C) گرم شده و سپس به وسیله نیروهای خارجی صاف می‌گردد. هر دوی این روش‌ها در برگزیده کرنش سختی‌ای می‌باشند که منجر به کاهش شکل‌پذیری و افزایش تردی خواهد شد. صاف‌کاری حرارتی^۱، یک فرآیند حرارتی-مکانیکی است که در آن حرارت کنترل شده‌ای را در الگوهای خاص در نواحی‌ای که سازه دچار تغییر شکل پلاستیک شده است متناوباً بکار برده و چرخه‌های گرمایش و خنک‌کاری را کنترل می‌کنند [۲]. چند الگوی گرمایش رایج در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. بیشینه دمای گرمایش به 650°C و تنش‌های بالابرنده^۲ به 50% تنش تسلیم در دمای اتاق محدود می‌شوند [۳]. این روش، نزدیک به نیم قرن است که به دلیل پتانسیل بالای آن در رفع خمش و تغییر شکل سازه‌های فولادی خصوصاً اعوجاج‌های ناخواسته در صنایعی از جمله راه‌سازی، پل‌سازی، کشتی‌سازی و غیره، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آونت و همکاران [۳] آسیب‌ها را به دو گروه کلی و موضعی تقسیم کردند: آسیب کلی، تغییر شکل‌های خمشی و پیچشی مقطع و آسیب موضعی، کرنش پلاستیک متمرکز در نواحی‌ای هم چون نقاط ضربه. این محققان روشی برای ترمیم آسیب‌های موضعی ارائه دادند. برای ارزیابی روش‌های صاف‌کاری، طبق شکل ۳ برآمدگی‌هایی را در جان تیر فولادی ایجاد کرده و با استفاده از الگوهای حلقوی، شعاعی و مثلثی^۳ ستاره‌ای ترمیم کردند.

آونت و موکابی [۴] به طبقه‌بندی آسیب‌ها و الگوهای گرمایش، بحث کنترل درجه حرارت و نیز نیروهای بازدارنده پرداختند. به اعتقاد ایشان، ترمیم عضوهای آسیب دیده فولادی نیازمند ترکیبی از الگوهای گرمایشی مثلثی، نواری، خطی یا نقطه‌ای است.

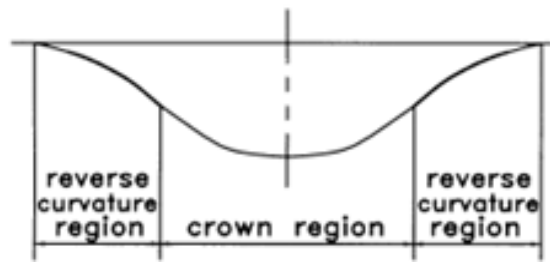


شکل ۲: الگوهای گرمایشی، (الف) مثلثی، (ب) نواری، (ج) حلقوی خطی و (د) مثلثی ستاره‌ای [۳].

¹ Heat Straightening

² Jacking Stresses

³ Vee Heating

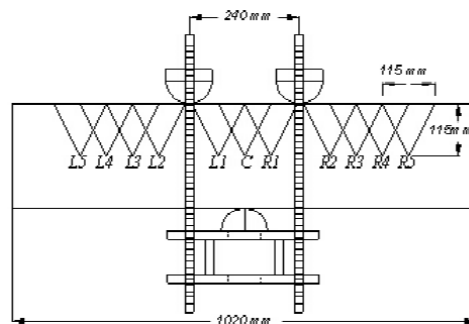


شکل ۳: نواحی خمیدگی معکوس برآمدگی [۲].

آونت و همکاران [۵] خواص مکانیکی تیرهای بال پهن صاف کاری شده را مطالعه کردند. افزایش قابل توجهی در تنش تسلیم و استحکام کششی در نزدیکی رأس مثلث ملاحظه شد. تنش تسلیم در سایر نقاط حداکثر تا ۲۱٪ افزایش داشت. لذا، رأس مثلث حساس ترین منطقه است. مدول الاستیسیته برای عضوهای تحت یک یا دو چرخه آسیب/ترمیم به طور میانگین ۸ الی ۲۳٪ کمتر می‌شد. آسیب با ماکزیمم کرنش‌هایی تا ۱۰۰ برابر کرنش تسلیم، ترمیم شد و خواص مواد در این حالت با خواص عضوهای آسیب دیده با کرنش‌های بسیار کوچک‌تر مقایسه گردید. نتایج نشان داد مقدار آسیب، اثر ناچیزی روی خواص فولاد ترمیم یافته داشته و با افزایش تعداد چرخه‌های آسیب/ترمیم تغییر خواص مشهودتر خواهد بود.

شارما [۶] به بررسی عددی و تجربی آسیب موضعی یک تیر بال پهن با سطح مقطع I-شکل پرداخت. برای تحلیل تجربی آسیب موضعی بال، با یک بار نقطه‌ای، نزدیک لبه آزاد آسیمی ایجاد شد. نتایج نشان داد: (۱) جا به جایی با نسبت بالابرنده، رابطه‌ی مستقیم و با نسبت کرنش، رابطه‌ی معکوس دارد؛ (۲) ترمیم ماده با مقدار آسیب زیاد، با خواص مواد ارتباط داشته و ممکن است منجر به خطای شکست شود؛ (۳) سطح نیروی بالابرنده به طور نسبی اثر ناچیزی بر روی خواص مواد دارد.

کوالکوسکی و وارما [۷] اثرات چرخه‌های متعدد آسیب/ترمیم را بر خواص مواد و چقرمگی شکست به طور تجربی مطالعه کردند. محل‌های گرمایش مثلثی در طول تیر مطابق شکل ۴ تعیین گردید. رفتار نیرو-جا به جایی غیرالاستیک تیر با استفاده از مدل‌های ساده بررسی شد. نتایج ارزیابی‌های تجربی و تست مواد نشان داد: (۱) چرخه‌های متعدد آسیب/ترمیم (سه چرخه) تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیک، تنش نهایی و سختی سطح ندارد و (۲) افزایش تنش تسلیم در نمونه‌های تحت کرنش‌های کوچک‌تر آسیب، بزرگ‌تر است.



شکل ۴: محل‌های گرمایش مثلثی [۷].

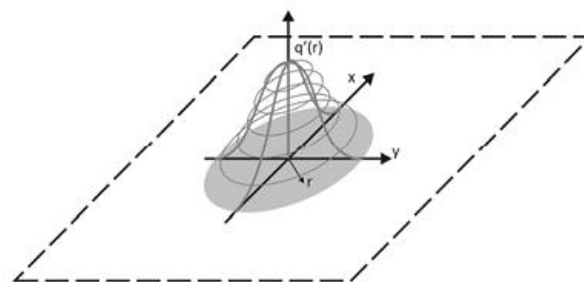
فونگ و همکاران [۸] به طور عددی و بر اساس تنش پسماند، کرنش پلاستیک و جا به جایی، مقایسه‌ای بین نتایج تحلیل‌های شبه استاتیکی و دینامیکی برای اعضای تغییر شکل یافته‌ی مشابه، انجام دادند. تحلیل، محدود به ضربه‌هایی بود که جا به جایی جان بزرگ‌تر از ۸ میلی‌متر بود.

آونت و همکاران [۹] به مطالعه تنش‌های پسماند در اعضای فولادی ترمیم شده پرداختند. این محققان، به دلایل نادیده گرفته شدن تنش‌های پسماند در طراحی اشاره کردند. نتایج ایشان نشان داد که اکثر متغیرهای گرمایش مثلثی تأثیر کمی روی تنش‌های پسماند دارند.

بر اساسی مطالعات پیشین، در صاف کاری حرارتی، کنترل دما و اعمال قیود و بارها اهمیت زیادی دارند. از آنجائی که دمای بیش از حد ممکن است باعث آسیب دیدگی سطح و یا افزایش شکنندگی شود توجه به عوامل مؤثر بر میدان درجه حرارت مانند نوع مشعل و اندازه روزنه های آن، شدت شعله، سرعت حرکت مشعل، شکل و ابعاد تیر ضروری می باشد. در پیشینه پژوهشی، کمتر گزارشی در این زمینه یافت می شود. همچنین در حین گرمایش، قیدگذاری روی تیر و اعمال و یا عدم اعمال بار خارجی و مقدار آنها تصریح نشده اند. از این رو، در این تحقیق سرعت و مسیر حرکت مشعل، ابعاد منطقه گرمایش و چگونگی اعمال قیود تکیه گاهی به عنوان متغیرهای مؤثر بر صاف کاری فرض شدند و در مورد یک تیر فولادی تحت آسیب الگوی S مورد بررسی قرار گرفتند. در این روش مطابق شکل ۲(الف)، ابتدا رأس مثلث حرارت داده می شود. همانطور که مشعل به صورت رفت و برگشت حرکت داده می شود طول پهنه جاروب افزایش یافته و یک ناحیه ی حرارت دیده ی مثلثی ایجاد می شود. الگوی گرمایش نواری طبق شکل ۲(ب)، شامل مسیرهای متوالی مشعل است که به صورت رفت و برگشت روی یک سطح مستطیلی حرکت مارپیچی دارد.

۲- مدل سازی و حل عددی

در این تحقیق از روش شبیه سازی المان محدود برای تحلیل انتقال حرارت و تغییر شکل سازه های در فرآیند صاف کاری حرارتی استفاده می شود. حداکثر درجه حرارت توصیه شده توسط محققان برای اکثر فولادها به جز فولاد با استحکام بالا و سخت کاری شده، 650°C است [۲ و ۳]. در این تحقیق، مشعل از نوع تک شعله ای اکسی استیلنی که عمومی ترین منبع حرارت دهی در این فرآیند است انتخاب گردید. در این حالت می توان برای مدل سازی شار حرارت ورودی از توزیع گوسی نرمال مطابق شکل ۵ استفاده نمود. چگالی جریان حرارت، حداکثر مقدار خود (q_{max}) را در محور شعله داشته و همراه با افزایش فاصله از محور کاهش می یابد. می توان فرض کرد شار حرارت ورودی در هر نقطه از فصل مشترک شعله با سطح قطعه کار به فاصله r از مرکز شعله به صورت زیر توصیف می شود [۱۰]:



شکل ۵: توزیع چگالی جریان حرارت ورودی به سطح قطعه کار [۱۰].

$$\dot{q}(r) = q_{max} \times e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (1)$$

ارتباط بین حداکثر شار در مرکز شعله با متغیرهای شعله، یعنی توان مؤثر $(q_{eff})^4$ و ضریب تمرکز شعله (γ) عبارت است از:

$$q_{max} = q_{eff} \times \gamma / \pi \quad (2)$$

ضریب تمرکز، مستقیماً به شعاع منبع حرارت^۵ (مثلاً $r_{s,0}$) به وسیله رابطه زیر مرتبط می شود:

$$r_{s,0} = \sqrt{\gamma / \gamma} \Leftrightarrow \gamma = \gamma / r_{s,0}^2 \quad (3)$$

شعاع منبع حرارت، محدوده ای را نشان می دهد که در آن ۹۰٪ جریان حرارت گسترده شده است.

⁴ Effective Heat Input

⁵ Radius of heat source

شرایط مرزی حرارتی از نوع همرفت آزاد با ضریبی برابر با $10 W/m^2 \cdot K$ [۱۱] و دمای هوا برابر با $25^\circ C$ فرض شدند. همچنین، ضریب تابش برای تیر فولادی برابر با 0.7 و ثابت بولتزمن برابر با $5/67 \times 10^{-16} W/m^2 \cdot K^4$ در نظر گرفته شد [۱۲]. برای تعیین بهترین شرایط گرمایش، لحاظ 60% از حداکثر چگالی جریان حرارتی، انتخاب مناسبی برای دستیابی به محدوده حرارت دهی $650^\circ C$ بود [۱۰]. در این حالت با در نظر گرفتن شعاع شعله برابر با $32/4$ میلی‌متر، ضریب تمرکز آن برابر خواهد بود با:

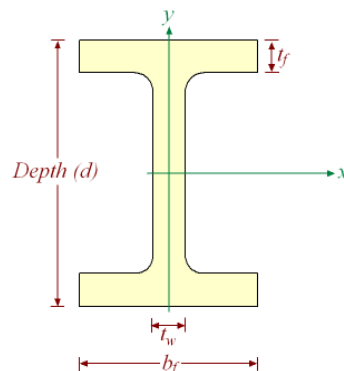
$$q_{max} = 0.6 \times 3.18 = 1.91 J/mm^2 \cdot s$$

$$\gamma = r^2/r^2 = 0.003 mm^{-2}$$

با توجه به مقدار حداکثر شار در مرکز شعله می‌توان مقدار مؤثر شعله را نیز به دست آورد:

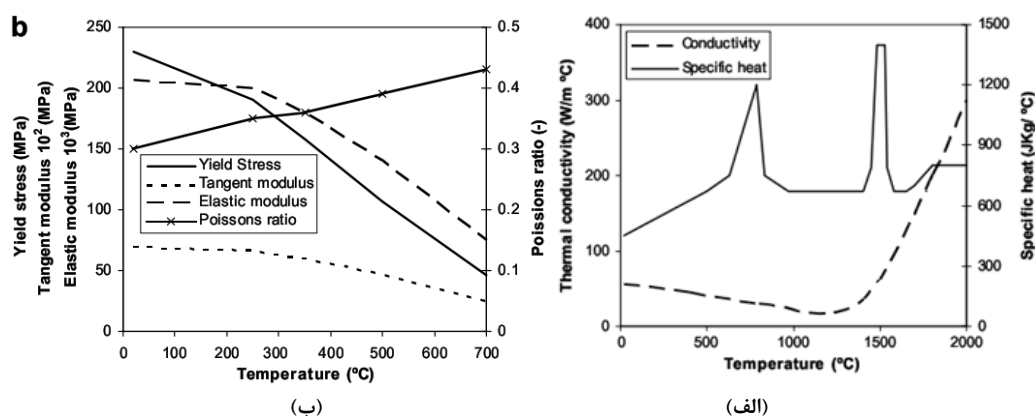
$$q_{eff} = q_{max} \times \pi \times r^2/3 = 2.964 J/s \quad (4)$$

برای شبیه‌سازی، بر حسب پیشنهاد کارفرما یک تیر فولادی با مقطع I- شکل از جنس St37-2 مطابق استاندارد DIN 17100 انتخاب گردید (شکل ۶).



شکل ۶: نمونه‌ای از شکل و مشخصات سطح مقطع تیر I- شکل مورد مطالعه [۱۳].

خواص حرارتی و مکانیکی فولاد مورد مطالعه شامل هدایت ویژه حرارتی، حرارت مخصوص، تنش تسلیم، مدول ماسی، مدول الاستیک و نسبت پواسون طبق شکل ۷، به صورت تابع درجه حرارت در نظر گرفته شد.



شکل ۷: خواص (الف) حرارتی و (ب) مکانیکی فولاد St37-2 [۱۴].

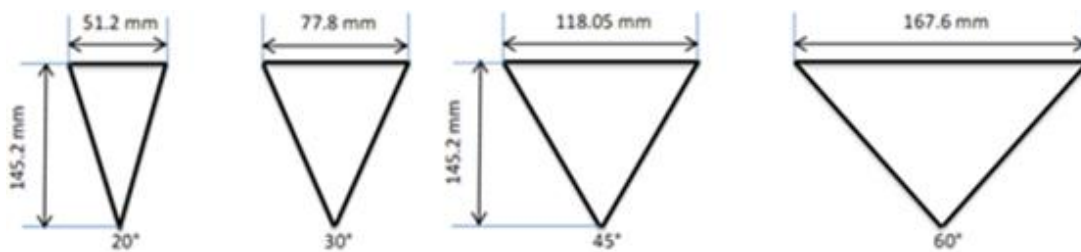
برای ساده‌سازی تحلیل، ابعاد تیر با حذف گوشه‌های گرد^۶ مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. همچنین، برای کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها تیری به طول $0.5m$ مدل‌سازی و تحلیل شد. بنا به فرض توزیع درجه حرارت و تغییر شکل روی نمونه کوچک را می‌توان به

^۶ Fillets

نمونه‌های اصلی تعمیر داد. از آنجایی که ابعاد منطقه گرمایش مثلثی تابعی از زاویه مثلث است بخشی از تیر، تحت این نوع گرمایش با زوایای ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و با عمق کامل^۷ روی جان و به دنبال آن گرمایش نواری روی بال فوقانی مورد تحلیل عددی قرار گرفت. هدف اصلی از این تحلیل‌ها، مطالعه تأثیر زاویه گرمایش مثلثی بر میزان دوران پلاستیک^۸ تیر است. ابعاد مثلث‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

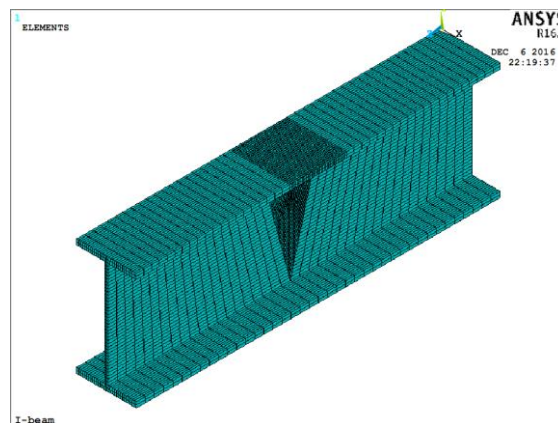
جدول ۱: ابعاد مقطع تیر انتخاب شده [۱۵].

IPE 160	Beam	Web	Flange	
	Depth (d)	Thickness / t_w	Width / b_f	Thickness / t_f
mm	۱۶۰	۵	۸۲	۷/۴



شکل ۸: ابعاد سطوح گرمایش مثلثی.

در شبیه‌سازی‌هایی که در محیط نرم افزار ANSYS انجام گرفت از المان‌های SOLID226 و SURF152 استفاده شد. المان SOLID226، یک المان سه بعدی بیست گرهی با حداکثر پنج درجه آزادی در هر گره می‌باشد. المان SURF152 نیز یک المان سه بعدی با اثر سطحی حرارتی است. المان فوق توسط چهار الی ده گره تعریف می‌گردد. مدل المان محدود، طبق شکل ۹، از ۱۲۲۸۶ المان و ۶۸۸۳۴ گره تشکیل شده است. چون گرادیان شار حرارت ورودی و درجه حرارت در مواضع گرم کاری زیاد است شبکه‌بندی این نواحی ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته شد. پس از اتمام گرمایش سطح مثلثی، نوار بال فوقانی که عرض آن برابر قاعده مثلث است در راستای عرضی بال حرارت‌دهی شد. از این ترکیب حرارت‌دهی به منظور ترمیم آسیب محور قوی (S) استفاده می‌شود.



شکل ۹: مدل شبکه بندی تیر.

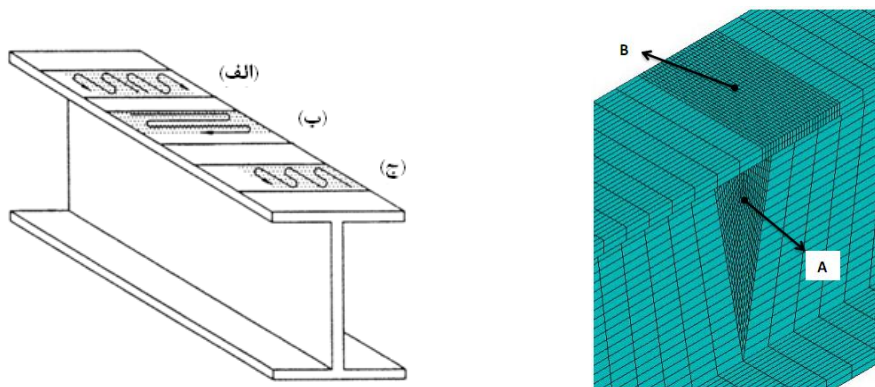
⁷ Full Depth

⁸ Plastic Rotation

در این مطالعه، بنا به فرض هیچ نیرو یا ممان خارجی به تیر وارد نمی‌شود. به این ترتیب شرایط مرزی مکانیکی، شرایط تکیه‌گاهی است که حرکت تیر فولادی تحت آن، مهار می‌شود. چون منبع حرارت متحرک است در نتیجه بارگذاری با زمان متغیر بوده و به دلیل عدم تقارن بارگذاری، نمی‌توان از نصف یا ربع تیر برای شبیه‌سازی استفاده کرد.

۳- نتایج و بحث

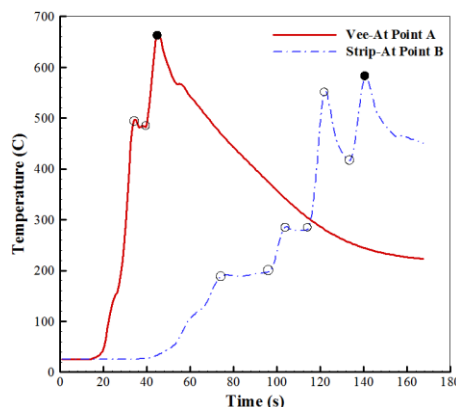
برای مطالعه نقش سرعت مشعل در توزیع درجه حرارت و نیز پیدا کردن سرعت بهینه، طبق شکل ۱۰ دو گره مرکزی به نام‌های A و B به ترتیب در وجوه گرمایش مثلثی روی جان و گرمایش نواری روی بال انتخاب شدند تا تغییرات درجه حرارت و نیز سایر سنجش‌ها در آنها انجام شود. در اولین شبیه‌سازی برای گرم‌کاری نواری روی بال فوقانی تیر، از الگوی شکل ۱۱ (ج) استفاده شد.



شکل ۱۱: نمایی از الگوهای گرمایش نواری روی بال تیر ۱۱.

شکل ۱۰: نقاط منتخب A و B روی جان و بال تیر.

شکل ۱۲، توزیع درجه حرارت در نقاط A و B در لحظات مختلف گرم‌کاری تیر را نشان می‌دهد. در این شکل منحنی رسم شده با خط‌نقطه نشان می‌دهد تا لحظه $t = 29/76$ sec، پس از شروع گرمایش نواری در بال فوقانی، درجه حرارت نقطه B، همچنان در حد دمای اتاق است ولی بعد از آن، شروع به افزایش خواهد کرد. حداکثر دمای 596°C در این نقطه در لحظه $t = 156$ sec، از شروع گرمایش به دست آمد. پس از عبور شعله از نقطه B درجه حرارت این نقطه روند کاهشی دارد.



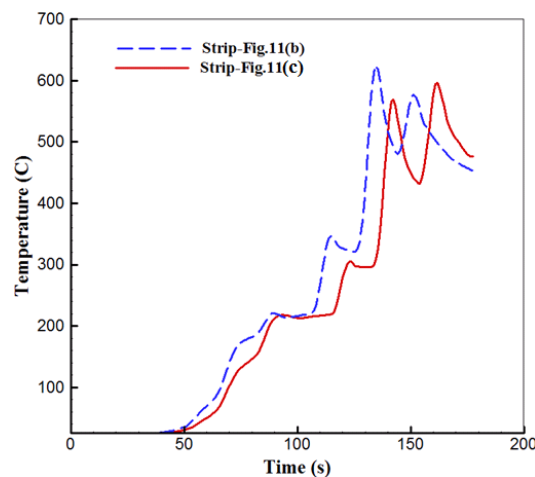
شکل ۱۲: منحنی دما- زمان در نقاط A و B به ازای سرعت 5mm/s و حرکت طولی مشعل طبق شکل ۱۱ در گرمایش نواری.

در تحلیل دوم، تاثیر گرمایش نواری با الگوی حرکتی شکل ۱۱ (ب) نیز مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول ۲ درجه حرارت‌های بیشینه‌ی نقطه B به ازای سرعت‌های مختلف مشعل ذکر شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت گرم‌کاری نواری در این حالت، مقادیر متفاوتی برای درجه حرارت در نقطه B ارائه داد که با توجه به درجه حرارت بیشینه توصیه شده، سرعت 5mm/sec سرعت مناسبی می‌باشد.

جدول ۲: درجه حرارت بیشینه در سطح بالایی تیر با مسیر حرکت تحت الگوی شکل ۱۱(ب).

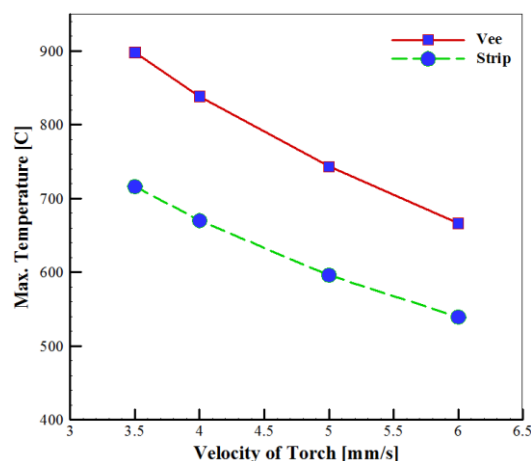
سرعت، mm/s	۳/۵	۴	۵	۶
دما، °C	۷۶۵/۷۳۲	۷۱۲/۸	۶۲۵/۲۸۵	۵۶۱/۶۹۵

در شکل ۱۳ اختلاف بازه دمایی ناشی از یک چرخه حرارت‌دهی بال تیر، با الگوهای گرمایش نواری طولی و عرضی تحت سرعت‌های یکسان نشان داده شده است. در هر دو حالت تقریباً ۵۰ sec پس از شروع گرمایش نواری، افزایش درجه حرارت تقریباً ناچیز بوده ولی پس از آن، شروع به افزایش کرده است. در منحنی‌های این شکل ملاحظه می‌شود علی‌رغم وجود اختلاف زمانی و تا حدودی اختلاف درجه حرارت بیشینه به دلیل اختلاف طول مسیر طی شده تا رسیدن شعله به نقطه B، این تفاوت‌ها چندان چشمگیر نخواهد بود.



شکل ۱۳: اختلاف در درجه حرارت‌های بیشینه در نقطه B، از لحظه شروع گرمایش تا خاتمه آن برای مسیرهای مختلف مشعل با سرعت ۵mm/s.

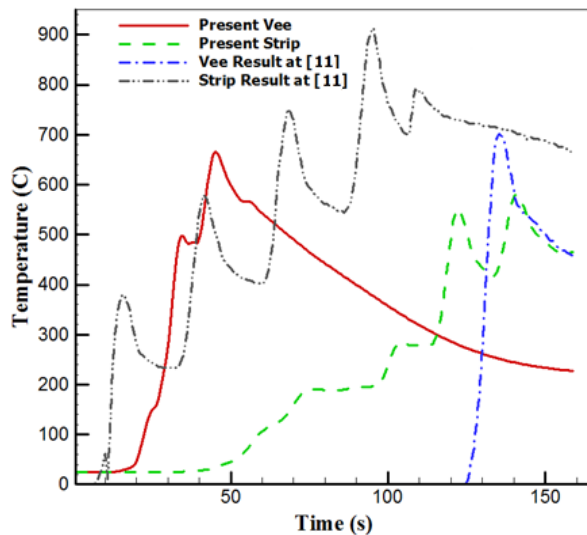
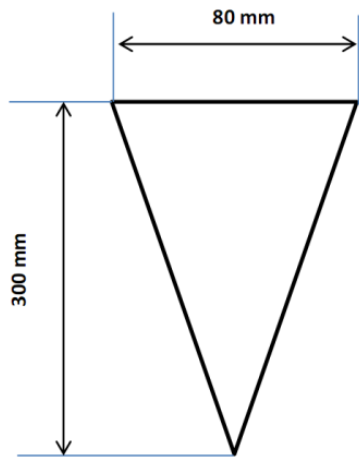
تغییرات درجه حرارت بیشینه به ازای سرعت‌های مختلف مشعل در شکل ۱۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت و در نتیجه کاهش حرارت ورودی، از دمای بیشینه، کاسته می‌شود. با توجه به این که مناسب‌ترین محدوده‌ی درجه حرارت در صاف‌کاری حرارتی فولادها برابر با ۶۵۰°C توصیه شده است از این شکل‌ها نتیجه شد که سرعت ۶ mm/sec برای گرمایش مثلثی (S_v) و سرعت ۵ mm/sec برای گرمایش نواری (S_w) مناسب هستند.



شکل ۱۴: نمودارهای تغییر بیشینه درجه حرارت مرکز سطح مثلثی و بال فوقانی به ازای سرعت‌های مختلف حرکت مشعل.

برای بررسی اعتبار تحلیل انتقال حرارت عددی در این مطالعه، نتایج به دست آمده با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۱] که در شکل ۱۵ آمده است مقایسه شدند. در مرجع مذکور از تیر IPE450 با گرید S235 و استحکام تسلیم ۳۳۸ MPa، به طول ۶ m با گرمایش

مثلثی و نواری در دو ناحیه مختلف از تیر استفاده شده است. این محققان اشاره صریحی به سرعت‌های گرمایش و علت در نظر گرفتن حداکثر درجه حرارت برابر 890°C نکرده‌اند ولی، سرعت مشعل با لحاظ ابعاد تیر و زمان گرمایش برابر $4/6\text{ mm/s}$ تخمین زده شد. گرمایش مثلثی در این گزارش به صورت عمق کامل نبوده است بلکه تقریباً 70% از پهنای جان، گرم کاری شده است که ابعاد آن در شکل ۱۶ آمده است. تیر IPE450 از نظر شکل مشابه شکل ۶ است و ابعاد آن طبق ابعاد مندرج در جدول ۳ می‌باشد.



شکل ۱۶: سطح گرمایش مثلثی در مرجع [۱۱].

شکل ۱۵: منحنی‌های گرمایش مثلثی و نواری در شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق و مطالعات در مرجع [۱۱].

جدول ۳: ابعاد مقطع تیر IPE450 [۱۱].

IPE 450	Beam	Web	Flange	
	Depth (d)	Thickness / t_w	Width / b_f	Thickness / t_f
mm	۴۵۰	۹/۴	۱۷۰	۱۴/۶

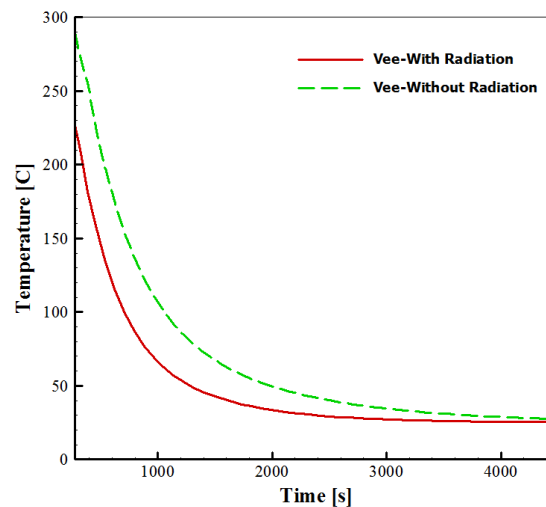
در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود رفتار منحنی‌های گرمایش مثلثی (منحنی خط پیوسته و منحنی خط نقطه) با یک اختلاف زمانی، تقریباً مشابهند. از طرفی، نوسانات موجود در منحنی‌های دما- زمان روی بال (منحنی خط چین و منحنی خط دو نقطه) می‌تواند متأثر از اختلاف در مواردی از جمله ابعاد تیر به ویژه بال، شرایط شعله، سرعت و زمان حرارت‌دهی، و نحوه حرکت شعله در این مطالعه و گزارش [۱۱] باشد. لازم به ذکر است در مرجع [۱۱] بر عکس این مطالعه ابتدا بال و سپس جان تیر گرم کاری شده است.

برای بررسی تأثیر بزرگی زاویه گرمایش مثلثی، مدلی با زاویه 45° درجه تهیه و یک مرحله شبیه‌سازی با سرعت‌های ترکیبی $S_v = 6$ و $S_w = 5$ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی با زاویه 45° درجه در جدول ۴ با نتایج مدل مثلث 30° درجه مقایسه شده‌اند. به دلیل افزایش طول مسیر حرکت شعله در الگوی 45° درجه، کل زمان گرمایش نیز به مقدار $67/326\text{ sec}$ افزایش یافت و به $234/612\text{ sec}$ رسید. بر اساس نتایج این شبیه‌سازی، 4500 ثانیه طول می‌کشد تا دمای جسم به دمای محیط (25°C) برسد.

جدول ۴: درجه حرارت در نقاط منتخب در دو الگوی گرمایش مثلثی با زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه.

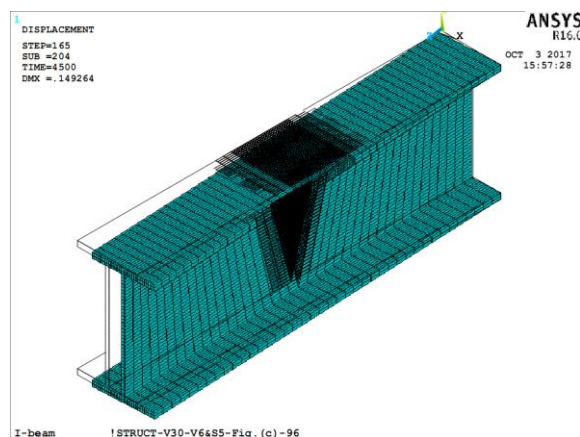
زاویه رأس مثلث	دمای نقطه A	دمای نقطه B
۳۰ درجه	۶۶۶/۵۴۳	۵۸۱/۰۳۹
۴۵ درجه	۷۷۹/۹۷۷	۵۸۲/۷۹۴

برای بررسی تأثیر لحاظ کردن تبادل حرارت تیر با محیط از طریق تابش، در تحلیل حرارتی، نمونه‌ای بدون در نظر گرفتن تابش برای مدل با زاویه مثلث برابر با ۴۵ درجه اجرا شد. نتیجه شبیه‌سازی، حدود ۷٪ افزایش درجه حرارت در نقاط منتخب A و B است. منحنی خط چین در شکل ۱۷ معرف فاز خنک‌کاری بدون لحاظ کردن تابش می‌باشد.



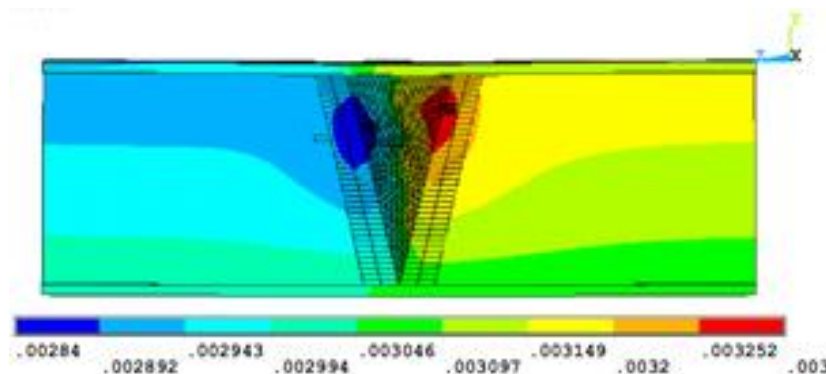
شکل ۱۷: اختلاف نمودار دما- زمان در الگوی گرمایش مثلثی ۴۵ درجه روی جان تیر ناشی از حذف تابش در شبیه‌سازی.

برای مطالعه تأثیر شرایط تکیه‌گاهی، ابتدا، فرآیند بر اساس تکیه‌گاه مفصلی در یک سمت و تکیه‌گاه غلتکی در سر دیگر تیر تحت بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۱۸ به دلیل جا به جایی عرضی تیر روی محور Xها در قسمت تکیه‌گاه غلتکی و نهایتاً گردش تیر حول محور Yها نسبت به خطوط اولیه، امکان دستیابی به تغییر شکل مورد نظر و اخذ دوران پلاستیک میسر نشد.



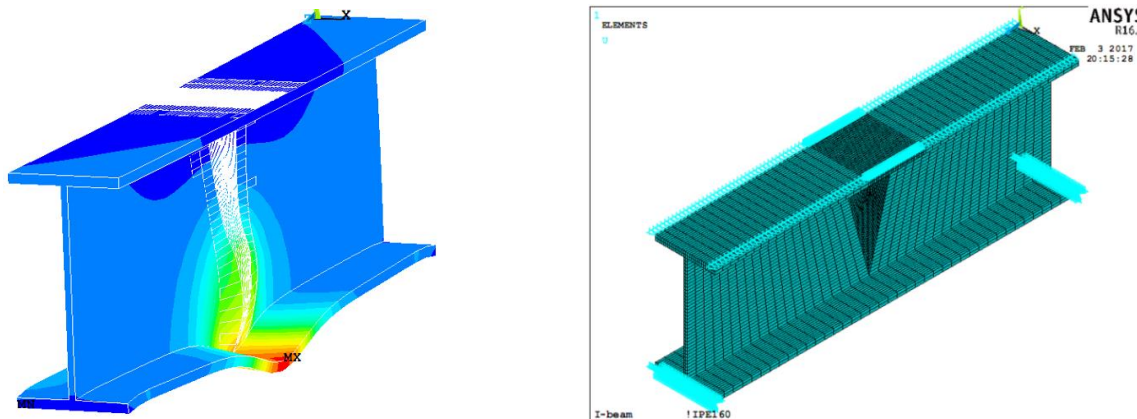
شکل ۱۸: پایان فاز خنک‌کاری و تغییر شکل نهایی تیر حول محوری غیر از محور دلخواه.

به دلیل تغییر شکل‌های ناخواسته زیاد، تکیه‌گاه‌های دو سر، یکسان و به نوع مفصلی تغییر داده شد. در این آزمون نیز تیر بر روی محور Zها جا به جا شد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹: تغییر شکل نهایی ناشی از تکیه‌گاه‌های مفصلی در هر دو سر تیر.

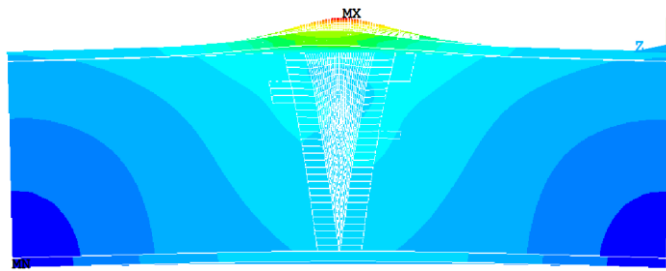
مجدداً با توجه به بررسی تغییر شکل‌ها و نتایج به دست آمده، تکیه‌گاه‌ها در دو سر پائینی تیر از نوع ثابت^۹ انتخاب شد و برای پیش‌گیری از کمانش‌های عرضی، لبه‌های بالایی بال فوقانی در تمام گره‌های مربوطه در راستاهای جانبی مقید شدند (شکل ۲۰). با توجه به موقعیت نوک مثلث در ناحیه جان، با شروع حرارت‌دهی رأس مثلث، طبق شکل ۲۱، به دلیل انبساط در این قسمت، کمی برآمدگی و جا به جایی به سمت پائین اتفاق افتاد. در ادامه، برآمدگی و انحراف بیشتری به وجود آمد و نواحی سرد مجاور حوزه گرمایش، مانع انبساط طولی شده و به خاطر همین مقاومت، ماده تمایل به افزایش برآمدگی و نهایتاً جریان پلاستیک دارد. ترکیب اثر بازدارنده‌های داخلی (نواحی سرد) و خارجی (تکیه‌گاه‌ها) مانع انبساط طولی و مسبب ضخیم شدن سطح مثلث بوده‌اند.



شکل ۲۰: اعمال تکیه‌گاه ثابت در لبه پایینی مدل به همراه بازدارنده‌های کنترل‌کننده بال فوقانی. شکل ۲۱: برآمدگی بزرگ‌تر در جان و جا به جایی‌ها در بال تحتانی.

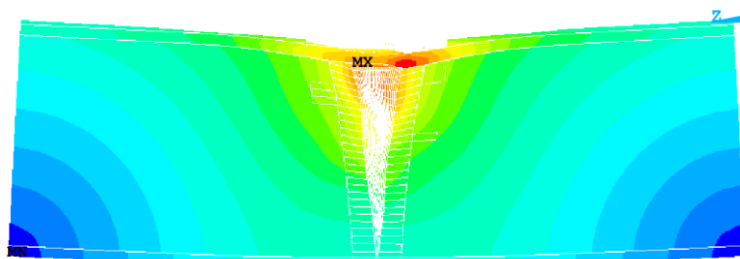
همچنان که مشعل به سمت دهانه باز مثلث پیش می‌رود انحراف ناشی از انبساط به سمت بالا گرایش می‌یابد. این حالت تا زمانی که گرم‌کاری جان خاتمه یابد ادامه دارد تا به بیشترین حد خود برسد. پس از پایان گرمایش مثلثی، گرمایش نواری آغاز شده و تا خاتمه آن، تیر به بیشترین حد خود به سمت بالا منحرف می‌شود (شکل ۲۲). علت استفاده از چنین الگویی به خاطر آن است که در حین فرآیند صاف‌کاری حرارتی دهانه مثلث جمع شده و تمایل به کاهش انحنای آسیب دارد.

^۹ Fixed support



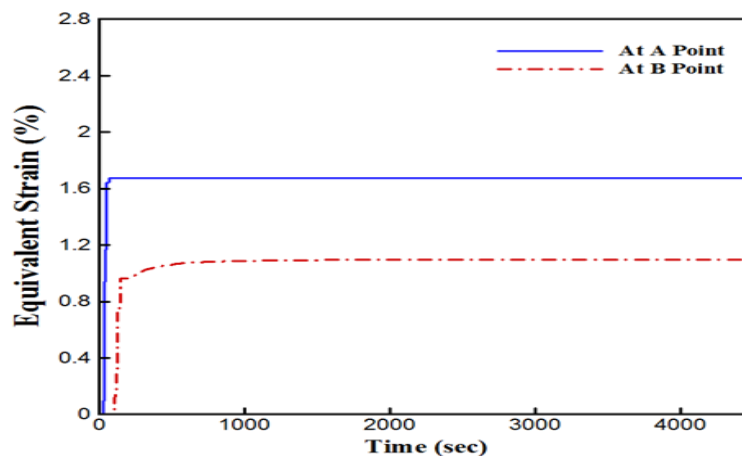
شکل ۲۲: پایان حرارت دهی بخش نواری در بال فوقانی و خاتمه جا به جایی به سمت بالا در تیر.

با قطع گرمایش و تبادل حرارتی با محیط، انقباض در موضع گرم کاری شکل می‌گیرد که البته مقدار آن نسبت به حالت حرارت دهی کمی بیشتر خواهد بود و سازه به سمت پائین منحرف می‌شود (شکل ۲۳).



شکل ۲۳: تغییر شکل نهایی در یک نمونه از مدل شبیه سازی شده.

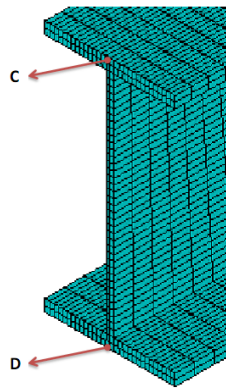
حداکثر کرنش پلاستیک به وجود آمده در گرمایش مثلی در نقطه منتخب A، ۱٪/۱۶۷ است که پس از ۶۶ ثانیه از شروع گرمایش ایجاد می‌شود. کرنش پلاستیک معادل در نقطه B از منطقه گرمایش نواری، پس از ۱۴۳ ثانیه در فاز گرمایش، ۰٪/۱۹۶۶ و پس از مدت ۱۶۲۰ ثانیه از شروع فاز خنک کاری ۱٪/۱ می‌باشد (شکل ۲۴). ملاحظه می‌شود که کرنش‌ها را می‌توان در محدوده کوچک فرض کرد.



شکل ۲۴: منحنی کرنش پلاستیک معادل - زمان.

با توجه به کوچک بودن سطح گرمایش مثلی در زاویه ۲۰ درجه و پایان حرارت دهی در مدت زمان کوتاه‌تر، سرعت ۵mm/s برای گرمایش مثلی (S_v) و سرعت ۴mm/s برای گرمایش نواری (S_w) در نظر گرفته شدند. حداکثر درجه حرارت به دست آمده در گره منتخب A، ۵۵۱°C و در نقطه B، ۶۰۲°C بود. در این مدل زمان لازم برای رسیدن به دمای اتاق در فاز خنک کاری ۴۵۰۰ ثانیه برآورد شد. برای محاسبه دوران پلاستیک تیر در این جا، طبق شکل ۲۵، دو گره در بالاترین و پائین ترین نقاط مقطع به نام‌های C و D انتخاب شد و سپس از رابطه مثلثاتی (۵)، زاویه‌ی دوران پلاستیک محاسبه گردید:

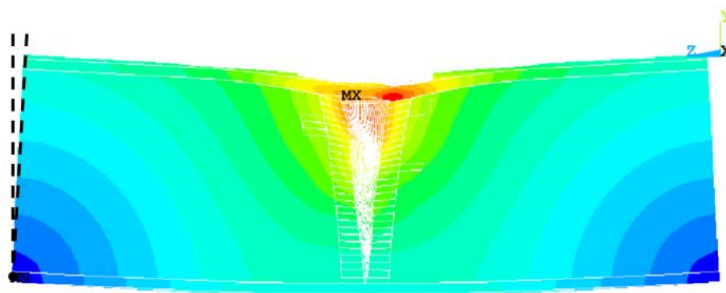
¹⁰ Cooling Phase



شکل ۲۵: نقاط منتخب C و D جهت بررسی دوران پلاستیک.

$$\varphi_p = \operatorname{tg}^{-1} \frac{U_Z}{U_Y} \text{ rad} \quad (5)$$

که در آن U_Y و U_Z جا به جایی گره C نسبت به گره ثابت D در راستاهای به ترتیب Y و Z هستند. این حالت، زاویه دوران پلاستیک برای شبیه‌سازی انجام شده، $0/9318$ میلی‌راد بیان محاسبه گردید (شکل ۲۶).



شکل ۲۶: خطوط خط‌چین نشان دهنده امتداد زاویه دوران پلاستیک هستند.

برای بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی سازه‌ای، می‌توان به نتایج مطالعات آونت و همکاران [۱] اشاره نمود. در این مرجع برای محاسبه زاویه دوران پلاستیک، رابطه (۶) به شرح زیر، پیشنهاد شده است:

$$\varphi_p = F_l \times F_s \times F_a \times \varphi_b \quad (6)$$

که در آن φ_b متغیر دوران پلاستیک پایه^{۱۱}، F_l ضریب نیروی بالابرنده^{۱۲}، F_s ضریب شکل^{۱۳} و F_a ضریب تنش^{۱۴} هستند. آونت و همکاران در مرجع دیگری [۱۶] متغیر دوران پلاستیک پایه و ضریب نیروی بالابرنده را برای یک ورق مستطیلی به شرح زیر استخراج کردند:

$$\varphi_b = 0.0147 \sin\theta / 3 \quad (7)$$

$$F_l = 0.60 + 2 M_j / M_p \quad (8)$$

که در آن θ ، زاویه رأس مثلث، M_j ممان در مثلث ناشی از نیروهای بالابرنده که تمایل به بستن مثلث دارد و M_p ظرفیت ممان پلاستیک مقطع هستند. با توجه به این که در این مطالعه از هیچ نیروی بالابرنده‌ای در فرآیند استفاده نشده است لذا، نسبت بار بالابرنده برابر با صفر منظور گردید. یعنی: $M_j / M_p = 0$.

¹¹ Basic Plastic Rotation Factor

¹² Jacking Load Factor

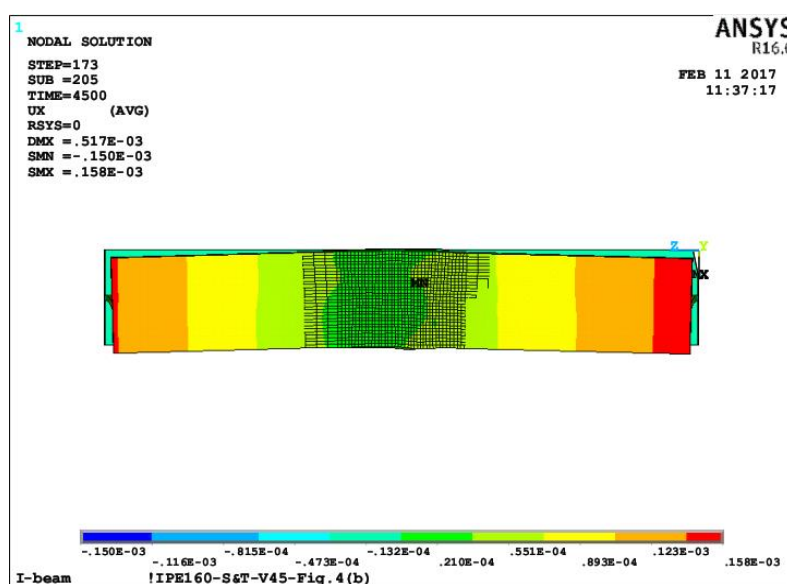
¹³ Form Factor

¹⁴ Stress Factor

بر اساس رابطه (۶)، در حالت گرمایش مثلثی با زاویه ۲۰ درجه، دوران پلاستیک پایه و ضریب شکل به ترتیب برابر با ۱/۷۰۶ میلی‌رادیان و ۱/۲۸۲ برآورد شدند. ضرایب نیروی بالابرنده و تنش، از مرجع فوق‌الذکر در صورت عدم اعمال نیروی بالابرنده و گشتاور خارجی به ترتیب برابر ۰/۶ و ۱ به دست آمدند. به این ترتیب با جایگذاری مقادیر بالا در رابطه (۶)، مقدار زاویه دوران پلاستیک برابر ۱/۳۱۲ میلی‌رادیان تخمین زده شد. این مقدار دوران در مقایسه با مقدار محاسباتی در این مطالعه (۰/۹۳۱۸ mrad) حدوداً ۲۸٪ خطا دارد. علاوه بر شبیه‌سازی گرمایش مثلثی با زاویه ۲۰ درجه، شبیه‌سازی‌های دیگری تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نیز انجام گرفتند. در این شبیه‌سازی‌ها، سرعت‌های S_w و S_v یکسان و یا متفاوت، یک بار با اعمال قید بازدارنده و بار دیگر بدون آن در نظر گرفته شد. همچنین، از دو مسیر حرکت مختلف برای مشعل روی بال تیر شامل مسیر طولی (شکل ۱ج) و مسیر عرضی (شکل ۱ب) استفاده گردید. زوایای دوران پلاستیک محاسباتی در این تحقیق و مقدار به دست آمده از رابطه (۶) در جدول ۵ گزارش شده‌اند. از مقادیر مربوط به زوایای دوران محاسباتی ملاحظه می‌شود بدون اعمال قید بازدارنده در لبه بالایی تیر، به دلیل آزادی تغییر شکل عرضی تیر (حرکت در راستای محور ضعیف) دوران کم شده و تغییر شکل ناخواسته ایجاد گردیده است که موجب عدم توفیق فرآیند در صاف‌کاری تیر در راستای محور قوی خواهد شد. از طرف دیگر، میزان اختلاف درصد خطا نیز به شدت افزایش خواهد یافت. در شکل ۲۷، به صورت گرافیکی این تغییر شکل جانبی نشان داده شده است.

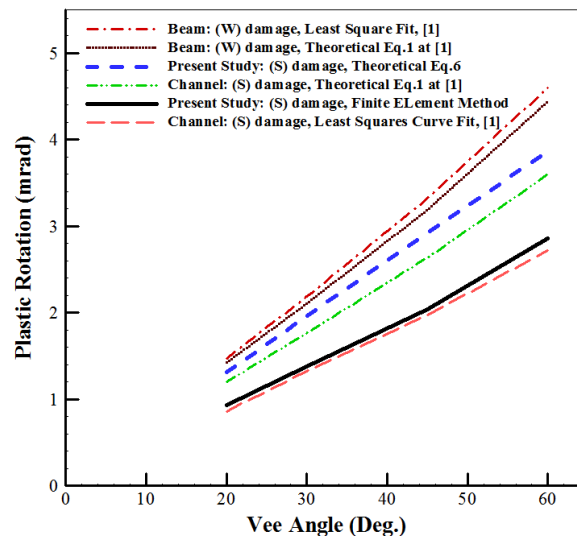
جدول ۵: نتایج کلی بدون اعمال بار خمشی به تیر.

زاویه رأس مثلث	$S_w - S_v$	مسیر حرکت مشعل در بال	اعمال بازدارنده بال فوقانی	دمای نقطه A (°C)	دمای نقطه B (°C)	دوران پلاستیک تحلیلی (mrad)	دوران پلاستیک تجربی [۱] (mrad)	خطا %
۲۰	۴-۵	طولی	بله	۵۵۱/۲	۶۰۲/۳	۰/۹۳۱۸	۱/۳۱۲	۲۸/۹۷
۳۰	۵-۶	"	بله	۶۷۹/۷	۵۹۲/۱	۱/۵۸۳	۱/۹۶۳	۱۹/۳۵
۳۰	۵-۶	عرضی	"	۶۹۳/۵	۶۱۳/۶	۱/۳۷۸	"	۲۹/۸
۴۵	۶-۶	"	خیر	۷۸۲/۵	۵۱۹/۵	۰/۸۷۷	۲/۹۲۶	۷۰
۴۵	۵-۶	"	بله	۸۵۶/۸	۵۹۶/۳	۲/۰۴۳	"	۳۰/۱۷
۶۰	۶-۶	"	خیر	۵۵۸/۵	۵۰۰/۷	۱/۲۰۲	۳/۸۶۷	۱۴۶/۴۹
۶۰	۵-۶	"	بله	۷۴۶/۳	۶۵۶/۲	۲/۸۶۲	"	۲۵/۹۸



شکل ۲۷: وضعیت جا به جایی‌ها در راستای محور Xها (محور ضعیف) در صورت عدم اعمال قیود بازدارنده در لبه بالایی تیر.

با رسم منحنی دوران پلاستیک به ازای زاویه گرمایش مثلثی، نمودار شکل ۲۸ بدست آمد. در این نمودار که نتایج شبیه سازی و تئوری این تحقیق با نتایج تجربی و تئوری [۱] برای دمای گرم کاری 650°C و با فرض نیروی خارجی صفر است روند مشابهی در منحنی های مربوط به مقاطع مختلف ملاحظه می شود و اعتبار کیفی روش به کار رفته در این تحقیق را نشان می دهد. مطابق شکل ۲۸، منحنی رسم شده با خط پیوسته پهن، حاصل شبیه سازی های انجام شده در این تحقیق است. همان طور که قبلاً اشاره شد این منحنی برای یک تیر I- شکل برای خمش حول محور قوی آن به دست آمده است. از جایگذاری متغیرهای بکار رفته در این شبیه سازی ها در رابطه تجربی (۶) از مرجع [۱]، منحنی خط چین نتیجه می شود که زاویه دوران بیشتری نسبت به نتایج روش عددی پیش بینی می کند لیکن گرایش هر دو منحنی یکسان است.



شکل ۲۸: زاویه دوران پلاستیک به ازای زاویه گرمایش مثلثی.

منحنی خط نقطه نتایج تجربی برای آسیب ضعیف یک تیر و منحنی خط دو نقطه نتایج تجربی برای یک ناودانی با آسیب قوی را نشان می دهند. بدیهی است زاویه دوران حول محور ضعیف بیش از مقدار مشابه برای محور قوی است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

مؤلفان در این مقاله ضمن معرفی فرآیند صاف کاری حرارتی، به مطالعه عددی تغییر شکل های ترمو الاستیک پلاستیک یک نمونه از تیرهای ساختمانی پرداخته اند. فرض بر این بوده است که میزان خمش این نمونه مستقیم از تیر در مقیاس کوچک تر، قابل تعمیم و برهم نهی در حالت صاف کاری تیرهای بزرگ تر و گرمایش چند نقطه ای خواهد بود. برای این منظور از روش المان محدود و نرم افزار ANSYS نسخه ۲۰۱۶ استفاده شده و خم کاری تیر حول محور قوی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. فرض شده است برای تسریع عملیات و یا تقویت بارگذاری لازم از نیرو و یا گشتاور خارجی استفاده نمی شود که به این ترتیب سهم تغییر شکل خالص حرارتی قابل ارزیابی است. برای خم کاری در این حالت، یک مرحله گرمایش مثلثی شکل روی جان تیر به همراه گرمایش نواری ثابته روی بال فوقانی آن اعمال گردیده است. گرمایش مثلثی در جان اصطلاحاً به عمق کامل در نظر گرفته شده که شامل ارتفاع کامل جان تیر می شود. منبع حرارت، از نوع مشعل اکسی استیلن فرض شده است که شار حرارت شعله تولیدی آن قابل مدل سازی با توزیع نرمال گوسی می باشد. شاخص های شعله بر اساس مطالعات قبلی مؤلفان [۱۰] تعیین گردیده اند. برای تعیین سرعت حرکت مشعل، از معیار بیشینه دمای تجربی توصیه شده از طرف سایر محققان استفاده شده است. نظر به این که ضخامت تیر در بال و ابعاد ناحیه گرمایش مثلثی بیشتر است تحلیل های حرارتی نشان داد سرعت مشعل در ناحیه مثلثی شکل باید بیشتر از ناحیه گرمایش نواری باشد.

از تحلیل های سازه ای معلوم شد گرچه اعمال نیروهای بالابرنده بر میزان ترمیم مؤثرند سهم تغییر شکل حرارتی خالص نیز مقدار قابل ملاحظه ای است. همچنین اعمال قید بازدارندگی در لبه های طولی بال فوقانی و تکیه گاه های ثابت در لبه های پائینی ضروری است تا

صاف کاری حول محور قوی بدون تغییر شکل های ناخواسته جانبی انجام بگیرد. اعمال قید بازدارندگی در لبه های طولی بال فوقانی خطای کمتری را ایجاد خواهد کرد. در شرایط در نظر گرفته شده کرنش معادل پلاستیک در محدوده کرنش های کوچک بودند. همچنین اکثر کرنش های پلاستیک در ناحیه مثلثی رخ دادند. همان طور که انتظار می رفت با افزایش زاویه مثلث و در نتیجه ابعاد منطقه گرم کاری، میزان دوران پلاستیک تیر هم افزایش یافت.

از آنجائی که به کلیه متغیرها و شرایط فرآیند در گزارش های تجربی قبلی دسترسی نبود ضمن انتخاب نمونه کاربردی کارفرما در این تحقیق، مقایسه های انجام گرفته مؤید همخوانی نتایج محاسباتی با تجربی بودند. از روش به کار رفته در این تحقیق می توان در تعیین متغیرهای شعله و سرعت مشعل در نواحی مختلف گرمایش استفاده کرد.

مراجع

- [1] Avent, R. R., Mukai, D. J. and Robinson, P. F. (2000). Heat straightening rolled shapes. *Journal of Structural Engineering*, 126 (7), 755-763.
- [2] Avent, R. R. and Mukai, D. J. (2001). What you should know about heat straightening repair of damaged steel. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction INC*, 38 (1), 27-49.
- [3] Avent, R. R., Mukai, D. J. and Heymsfield, E. (2001). Repair of localized damage in steel by heat straightening. *Journal of Structural Engineering*, 127 (10), 1121-1128.
- [4] Avent, R. and Mukai, D. (1999). *Fundamental concepts of heat-straightening repair for damaged steel bridges*. Transportation Research Record, No. 1680, Transportation Research Board, Washington, DC, 47-54.
- [5] Avent, R. R., Mukai, D. J. and Robinson, P. F. (2000). Effect of heat straightening on material properties of steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (3), 188-195.
- [6] Sharma, M. (2005). *Behavior of heat straightened plates bent along the minor axis*. Master degree of Civil Engineering. Louisiana State University.
- [7] Kowalkowski, K. and Varma, A. (2007). Effects of Multiple Damage-Heat Straightening Repairs on Steel Beams. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Issue 2028, 67-77.
- [8] Fong, N., Gracie, R. and Walbridge, S. (2014). *Finite Element Analysis of Structural Steel Impact Damage and Heat Straightening*. Available at: <http://conf.tac-atc.ca/>.
- [9] Avent, R. R., Mukai, D. J. and Robinson, P. F. (2001). Residual stresses in heat-straightened steel members. *Journal of materials in civil engineering*, 13 (1), 18-25.
- [10] Hemmati, S. J. and Shin, J. G. (2007). Estimation of flame parameters for flame bending process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (5), 799-804.
- [11] Schäfer, D., Rinaldi, V., Beg, D., Može, P., Lacalle, R., Portilla, J., Ferreño, D., Álvarez, J.A., Willms, R. and Schütz, J. (2012). *Optimisation and Improvement of the Flame straightening Process (Optistraight)*. Bruxelles: Euopean Commission. Available at: <http://ec.europa.eu/research/rtdinfo.html>.
- [12] Iordachescu, M., Ruiz Hervías, J., Iordachescu, D., Valiente Cancho, A. and Caballero, L. (2010). Thermal Influence of Welding Process on Strength Overmatching of Thin Dissimilar Sheets Joints. In: *Proceeding of CIFIE 2010, Iberian conference on Fracture and Structural integrity*, Available at: <http://oa.upm.es/9195>.
- [13] eFunda, (2017). *Steel Wide Flange I-Beams*. Available at: <https://www.efunda.com/math/areas/RolledSteelBeamsW.cfm>.
- [14] Fadaei, A. and Mokhtari, H. (2015). Finite Element Modeling and Experimental Study of Residual Stresses in Repair Butt Weld of ST-37 Plates. *Iranian Journal of Science and Technology*. Transactions of Mechanical Engineering, 39 (M2), 291-307.
- [15] Staticstools, (2017). *Section properties - Section ipe160*. Available at: <https://www.staticstools.eu/en/profile-ipe/ipe160>.
- [16] Avent, R. R., Mukai, D. J., Robinson, P. F. and Boudreaux, R. J. (2000). Heat Straightening Damaged Steel plate Elements. *Journal of Structural Engineering*, 126 (7), 747-754.