

تحلیل اجزای محدود فرآیند سخت گردانی استحاله ای سطحی با استفاده از منبع حرارتی متحرک به همراه اعمال استراتژی کنترل سرعت جهت کاهش مشکل عیوب در لبه ها

آرش خواجه^۱، سید احمد جنابعلی جهرمی^{۲*}، حبیب دانش منش^۳

۱- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

* Jahromiah@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۴)

چکیده

در این تحقیق، از استراتژی کنترل سرعت، در تحلیل اجزای محدود فرآیند سخت گردانی استحاله ای سطحی فولاد S355 استفاده گردیده است. استراتژی معرفی شده، که بر مبنای کنترل سرعت حرکت منبع حرارتی بر اساس میزان دمای بیشینه موجود در سطح بنا نهاده شده است، کنترل ریز ساختار حاصل از این فرآیند را، که نتیجه دستیابی به یک تاریخچه حرارتی یکنواخت در طول مسیر پروسه است، امکان پذیر می کند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استراتژی اتخاذ شده تاثیر بسزایی در دستیابی به هدف مورد نظر خواهد داشت. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی ها بدون استراتژی ذکر شده نشان می دهد که استفاده از ترکیبی همزمان از منبع حرارتی با ابعاد کوچکتر و توان بیشتر می تواند در غیاب این رویکرد به نتایج بهتری منجر گردد.

واژه های کلیدی:

تحلیل اجزای محدود، سخت گردانی سطحی، استحاله فازی.

۱- مقدمه

می بایستی دارای مقاومت به سایش بالایی نیز باشند بسیار مطلوب است [۱].

هر چند که تکنیک های زیادی وجود دارند که در آن ها مناطق موضعی ماده را تحت تاثیر قرار داده و سخت گردانی می کنند، روش هایی که در آن ها از یک پرتو پر انرژی (لیزر، پرتو الکترونی و ...) استفاده می گردد از مزایای ویژه ای برخوردارند. در این روش ها سطح بالایی از انرژی بصورت

فرآیند های سخت گردانی سطحی عموماً به عنوان ابزاری جهت بهبود مقاومت سایشی و خستگی فولاد ها، بدون تاثیر بر توده نرم و چقرمه ماده، مورد استفاده قرار می گیرند. این ترکیب به دست آمده از یک سطح سخت و عمق نرم تر مقاوم در برابر شکست در اثر ضربه، در بسیاری از کاربرد های مهندسی از جمله چرخ دنده ها و بادامک ها که در عین حال

یکنواخت که ناشی از یکنواختی در پیشینه حرارتی نقاط مختلف است می تواند تاثیر شایانی در بهبود خواص مکانیکی قطعات صنعتی از جمله مقاومت به سایش، خوردگی و حفره زایی ایفا کند. در این راستا نویسندگان این مقاله به تازگی پژوهشی را در جهت کنترل پیشینه حرارتی نقاط در سطح قطعه با استفاده از استراتژی کنترل توان منبع حرارتی انجام داده اند [۲۹].

هدف از تحقیق حاضر، بررسی مشکلات پیش رو در دستیابی به یک ریز ساختار یکنواخت بوسیله فرآیند سخت گردانی استحاله ای سطحی در حضور لبه ها، ناپیوستگی ها و پیچیدگی های قطعه و در نهایت ارائه راهکاری دیگر جهت برون رفت از این مشکلات می باشد. به این جهت تحلیل اجزای محدود این فرآیند به وسیله نرم افزار ABAQUS در شرایط حضور و عدم حضور استراتژی کنترل سرعت انجام پذیرفت. در نهایت به منظور تخمین پارامترهای بهینه، نتایج بدست آمده از دو گروه شبیه سازی سازی ذکر شده با یکدیگر مقایسه گردید.

۲- شبیه سازی اجزای محدود

۲-۱- هندسه و مش بندی مدل

تحلیل میدان دمایی ناشی از منبع حرارتی متحرک، بوسیله نرم افزار اجزای محدود ABAQUS انجام گرفت. به دلیل تقارن فرآیند در امتداد خط سیر منبع حرارتی تنها نیمی از قطعه بصورت سه بعدی مدل شد. شکل (۱) نمای شماتیک این فرآیند را برای یک مسیر از حرکت منبع به همراه ابعاد قطعه مدل شده نمایش می دهد.

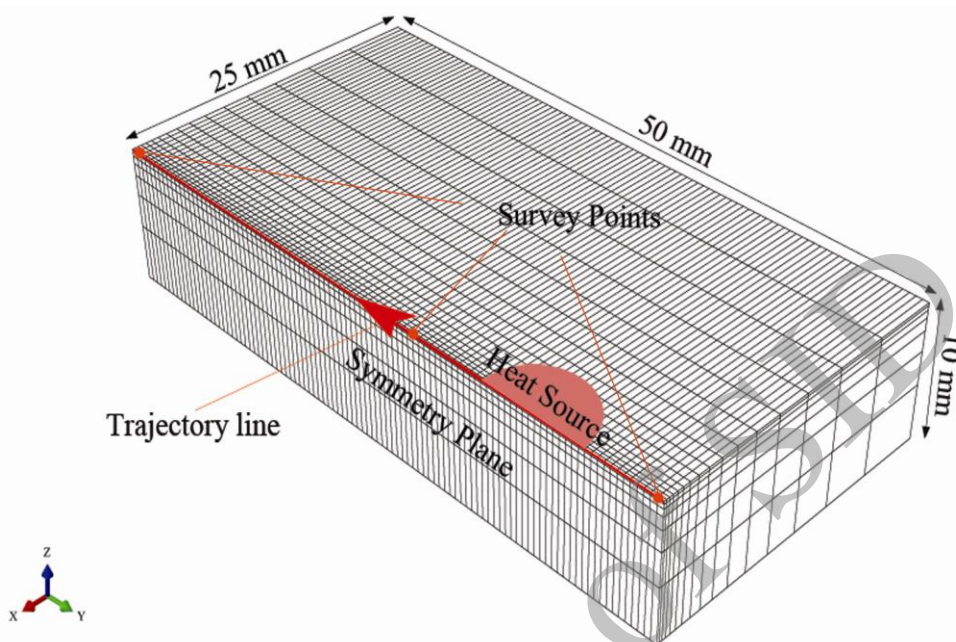
از آنجایی که انتخاب یک مش بندی مناسب در دقت و همچنین در مدت زمان تحلیل، بخصوص در تحلیل مسائل غیر خطی، بشدت اثر گذار است، در نقاط مرکزی که به میزان بیشتری تحت تاثیر منبع حرارتی قرار می گیرد از المان های با ابعاد کوچکتر و در نقاط دور تر از المان های با ابعاد بزرگتر استفاده گردید. در حقیقت نقاط نزدیکتر به سطح و در نزدیکی خط سیر منبع به دلیل آنکه گرادیان حرارتی بیشتری را تجربه

بسیار دقیق و بطور بسیار موضعی به سطحی کوچک از ماده منتقل می گردد [۲-۳]. به دلیل اینکه منطقه حرارت دیده به شدت موضعی و رسانایی حرارتی فلز بسیار بالا است، توده ماده بصورت یک چاه حرارتی^۱ بسیار قوی عمل کرده و حرارت اعمال شده با سرعت بالایی در داخل ماده توزیع می گردد. عبارت دیگر در این روش نیازی به سیال خنک کننده نمی باشد و این خنک شدن توسط پدیده خود سرمایشی^۲ انجام می پذیرد [۴]. در نتیجه در این روش نرخ سرمایش و گرمایش بسیار بالا و اعوجاج حرارتی بسیار پایینی در مقایسه با روش های مرسوم سخت گردانی سطحی همچون سخت گردانی توسط شعله و سخت گردانی القایی قابل دستیابی است [۵]. سخت گردانی استحاله ای سطحی با استفاده از پرتو پرتو پرتو، بوسیله پارامترهای پروسه از قبیل: توان پرتو، سرعت روبش سطح، ابعاد پرتو، توزیع توان پرتو و نحوه روبش سطح که می تواند به صورت پالسی و یا پیوسته باشد، توصیف می گردد. همه این پارامترها اثرات متقابلی بر هم و همچنین بر سختی نهایی ایجاد شده بر روی سطح ماده خواهند داشت [۶]. با این وجود به دلیل وجود نرخ گرمایش و سرمایش بسیار زیاد در این روش، دمای پیشینه ای که سطح ماده تجربه می کند مهمترین عامل تاثیر گذار در ایجاد ریز ساختار نهایی و در نتیجه سختی حاصل خواهد بود [۷-۸].

تا کنون تحقیقات بسیاری بوسیله روش های تحلیلی^۳ [۹-۱۹] و عددی^۴ [۲۰-۲۸] جهت پیش بینی میدان های حرارتی و ریز ساختاری حاصل از یک منبع حرارتی متحرک روی سطح انجام شده است. با این وجود غالب توجهات به مدل هایی ایده آل به همراه محدودیت هایی در شارش حرارت و ابعاد نمونه معطوف گردیده است. لذا این مدل ها قادر به ارزیابی صحیحی از اثر لبه های قطعه که تمایل به متمرکز نمودن حرارت دارند، نمی باشند. بعلاوه، اکثر مدل های ایجاد شده به تحلیل فرآیند در شرایط شبه پایا اختصاص یافته است، در حالیکه که بررسی حرارتی فرآیند تحت شرایط واقعی نیازمند ایجاد یک مدل کاملا وابسته به زمان می باشد. دستیابی به یک ریز ساختار

کامل از شرایط تقارن مساله باعث می گردد که تحلیل در مدت زمان کمتری پایان یابد و بازده محاسباتی را افزایش می دهد.

می کنند شرایط بحرانی تری جهت دستیابی به نتیجه دقیق دارند و لذا با المان های با ابعاد کوچکتر تخمین زده شده اند [۳۰]. از سوی دیگر استفاده از المان های با ابعاد بزرگتر به همراه استفاده



شکل (۱): نمای شماتیک فرآیند سخت گردانی استحالته ای بوسیله یک مسیر از حرکت منبع حرارتی متحرک

ترم در مقایسه با حرارتی که به علت رسانش، همرفت و تابش به سمت مرزها منتقل می شود از آن صرف نظر شده است. رابطه (۱) بوسیله شرط اولیه $T=T_0$ در $t=0$ و شرط مرزی های Dirichlet، Neumann و Newton که از دست رفتن حرارت از طریق همرفت و تابش را نیز لحاظ می کنند، بصورت زیر تکمیل می گردد [۳۱-۳۲]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q + \alpha(T|_{\Gamma} - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

در این رابطه α ضریب همرفت^۶ (برای هوا $\alpha = 50 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) فرض شده است [۳۳]، ε ضریب تابش^۷ (با فرض اکسید شدن سطح $\varepsilon = 0.8$ در نظر گرفته شده [۳۴]) و σ ثابت استفان-بولتزمن ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) است. همچنین در این رابطه ترم $q = q(x,y,0)$ نماینده شار حرارتی منبع حرارتی به

۲-۲- مدل تحلیل حرارتی

فرآیند سخت گردانی استحالته ای به وسیله تحلیل حرارتی گذرا^۵ و بصورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS بررسی گردید. معادله رسانش حرارتی گذرا در حضور منبع حرارتی متحرک را می توان به شکل کلی زیر توصیف کرد:

$$\rho(T)C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla(\lambda(T)\nabla T) + Q \quad (1)$$

در این رابطه $\rho(T)$ ، $C_p(T)$ و $\lambda(T)$ به ترتیب نماینده چگالی، گرمای ویژه و رسانایی حرارتی ماده مورد نظر است که همگی وابسته به دما می باشند. ترم Q در سمت راست معادله (۱) نماینده منبع حرارتی درونی است که می تواند ناشی از گرمای نهان تغییرات فازی باشد. در این تحقیق به علت میزان کم این

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد S355

عنصر	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	P	S
درصد	۰/۱۹	۱/۰۵	۰/۲	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۲۸	۰/۰۲

جدول (۲): خواص فیزیکی - حرارتی فولاد S355 مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود

دما T(°C)	رسانایی حرارتی λ (W/m °C)	چگالی ρ (kg/m ³)	گرمای ویژه C _p (J/kg °C)
۲۰	۵۲/۰	۷۸۰۰	۶۵۰
۲۰۰	۴۹/۰	۷۸۰۰	۶۵۰
۱۰۰۰	۲۶/۵	۷۸۰۰	۶۵۰
۱۴۷۷	۳۳/۵	۷۸۰۰	۶۵۰
۱۵۰۲	۳۴/۰	۷۳۰۰	۷۴۵
۱۵۲۷	۳۴/۰	۶۸۰۰	۸۴۰

۲-۵- استراتژی کنترل سرعت

به منظور کاهش مشکلات و عیوب در نزدیکی لبه های قطعه، علی الخصوص در ابتدا و انتهای مسیر حرکت منبع حرارتی، استراتژی اتخاذ سرعت حرکت منبع بر مبنای بیشینه دمای موجود بر روی سطح قطعه در نظر گرفته شد و به وسیله زیر روال USDFLD برای نرم افزار تعریف گردید. بعلاوه از این زیر روال بطور همزمان جهت دسترسی به بیشینه دمایی که هر نقطه گره ای تجربه می کند، استفاده شد. برای تعریف این برنامه از یک دمای ثابت $T_{constant}$ و یک ΔT که بازه مورد قبول برای دمای بیشینه در سطح را تعریف می کند، استفاده گردید. با این روش می توان دما هر نقطه گره ای روی سطح را فارغ از هندسه قطعه کار، خواص ماده مورد استفاده، شرایط مرزی و دیگر پارامترهای ثابت فرآیند کنترل کرد. در تحقیق حاضر $T_{constant}$ ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده که حد واسط دمای بحرانی بالای^{۱۱} و دمای ذوب ماده مورد نظر است. روندی که تا کنون شرح داده شد ضمن تضمین ایجاد یک منطقه کاملاً آستنیت در امتداد خط سیر منبع حرارتی از ایجاد ذوب سطحی و از دست رفتن دقت ابعادی جلوگیری

سطح بالایی قطعه ($z=0$) در منطقه فعالیت منبعی به شعاع r_0 و T_0 درجه حرارت محیط ($T=25^\circ\text{C}$) است.

۲-۳- مدل منبع حرارتی

در این تحقیق از یک زیر روال^۸ DFLUX که بوسیله کاربر برای نرم افزار تعریف شد، جهت مدل کردن منبع حرارتی پیوسته با توزیع گوسی^۹ استفاده گردید. معادله زیر نشان دهنده نحوه توزیع شار حرارتی در چنین منبعی را نشان می دهد:

$$q(r, t) = \frac{AP}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (۳)$$

که در آن r بصورت زیر در سیستم کارترین تعریف می گردد:

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0 + vt)^2} \quad 0 \leq r \leq r_0 \quad (۴)$$

در رابطه (۳) A: قابلیت جذب پرتو توسط سطح (بدون واحد)، P توان منبع حرارتی (W) و r_0 شعاع پرتو ناشی از منبع حرارتی (m) است. در رابطه (۴): v سرعت حرکت منبع بر روی سطح (m/s)، x_0 موقعیت اولیه مرکز منبع حرارتی در راستای محور x و y_0 موقعیت اولیه مرکز منبع حرارتی در راستای محور y می باشند. همچنین در رابطه (۳) مقادیر $q(x, y)$ از یک مقدار بیشینه در مرکز منبع ($q_{max} = AP / (r_0^2 \pi)$) تا مقدار کمینه آن ($q_{min} = q_{max} / e$) در $r = r_0$ تغییر میکند. به دلیل متغیر بودن میزان جذب بر اساس ماده مورد استفاده و نوع منبع مورد استفاده در این پژوهش دو فاکتور توان (P) و ضریب جذب (A) جمع شده و بصورت میزان انرژی جذب شده توسط سطح بررسی گردید.

۲-۴- خواص فیزیکی - حرارتی^{۱۰}

جهت مدل کردن رفتار قطعه کار در حضور منبع حرارتی از خواص فیزیکی - حرارتی فولاد S355 استفاده گردید. ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی حرارتی این فولاد به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) نمایش داده شده است [۳۲، ۳۵].

سری از شبیه سازی ها (در حضور استراتژی کنترل سرعت و در شرایط عدم استفاده از این استراتژی) مقایسه گردید.

۳- حل تحلیلی

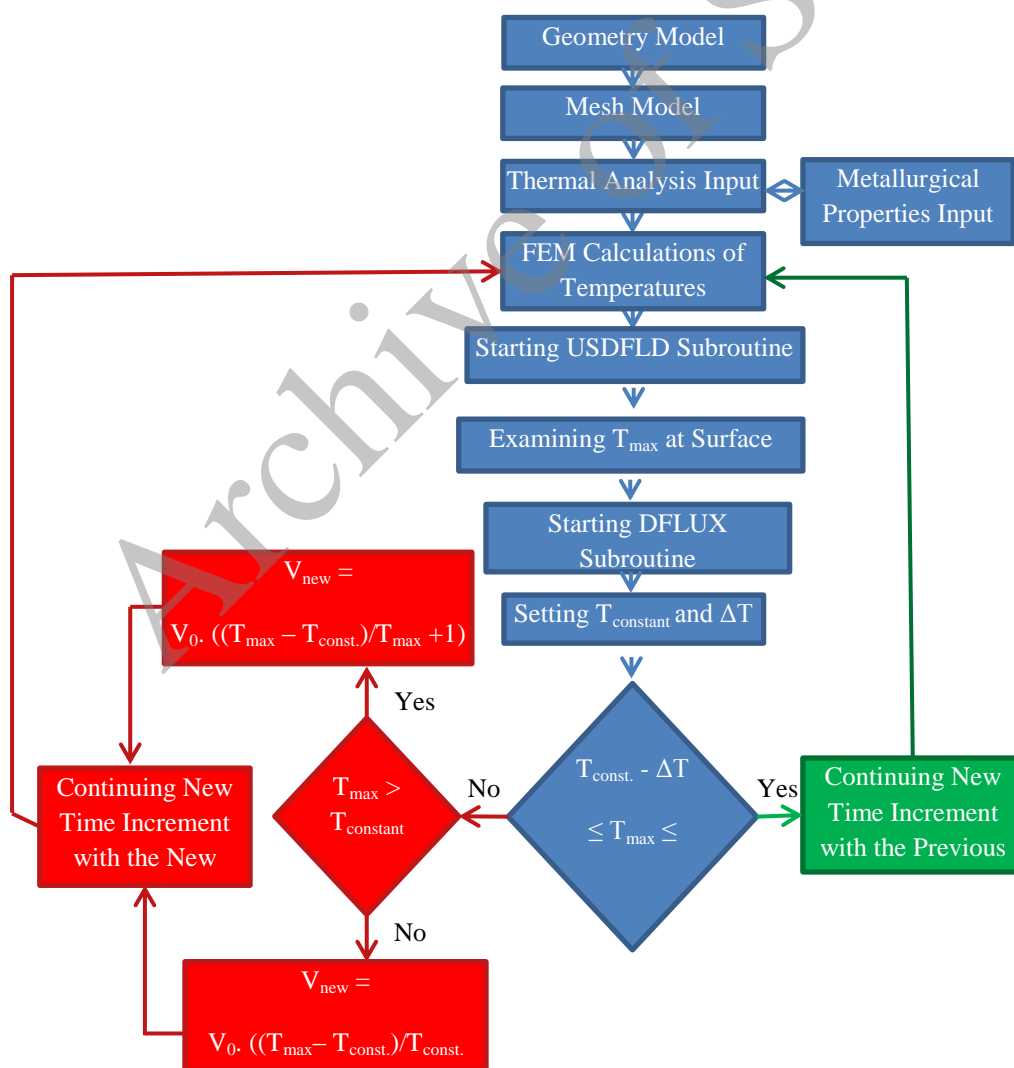
نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در شرایط شبه پایا (پیش از رسیدن منبع حرارتی به انتهای قطعه و افزایش سرعت نهایی) با رابطه تحلیلی زیر که توسط Ashby و Easterling [۱۲] پیشنهاد شده است، مقایسه گردید:

$$T_P = T_0 + \left(\frac{2}{e}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{(AP/v)}{\pi \cdot \rho \cdot C_p \cdot r_0 \cdot (z+z_0)} \quad (۵)$$

که در آن:

$$z_0^2 = \left(\frac{\pi}{2e}\right) \frac{\lambda \cdot r_0}{v \cdot \rho \cdot C_p} \quad (۶)$$

خواهد کرد. در شکل (۲) نمودار گردش اطلاعات در حین تحلیل اجزای محدود به همراه نحوه محاسبه سرعت حرکت منبع حرارتی در هر بازه زمانی نمایش داده شده است. به منظور بررسی اثر پارامترهای فرآیند، شبیه سازی ها برای سه مقدار متفاوت از توان متوسط (۱۰۰۰، ۹۰۰ و ۸۰۰ وات) و سه شعاع متفاوت از منبع حرارتی (۳، ۳/۲۵ و ۳/۵ میلیمتر) انجام شد. همچنین با هدف بررسی میزان تاثیر گذاری استراتژی اتخاذ شده، شبیه سازی ها با سرعت ثابت مورد نیاز برای رسیدن به دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و بدون استراتژی مورد نظر تکرار گردید. سپس میزان دماهای پیشینه حاصل شده از نتایج دو



شکل (۲): نمودار گردش اطلاعات تحلیل با استفاده از استراتژی کنترل سرعت حرکت منبع حرارتی

جایی که ماده ای برای رسانش حرارتی وجود ندارد، توجیه کرد. همانگونه که در شکل (۳) دیده می شود از یک سرعت اولیه ثابت در ابتدای فرآیند و پیش از ورود کامل منبع به درون قطعه استفاده شده است. این سرعت های اولیه بصورت تجربی و با سعی و خطا بدست آمده است. برای درک اهمیت اتخاذ یک سرعت اولیه مناسب، بایستی توجه شود که در صورتی که از یک سرعت اولیه کوچک برای منبع حرارتی استفاده گردد، دمای بیشینه ای در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد پیش از ورود کامل منبع به درون قطعه ایجاد می گردد. در نتیجه از آنجایی که بیشینه شار حرارتی در مرکز منبع حرارتی وجود دارد با حرکت بیشتر منبع به درون قطعه، این دمای بیشینه به مقادیری بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. همچنین در صورتی که از یک سرعت اولیه بزرگ برای منبع حرارتی استفاده گردد، دمای بیشینه ای در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد پس از ورود کامل منبع به درون قطعه حاصل می گردد. بنابر این به دلیل آنکه بیشینه شار حرارتی در مرکز منبع وجود دارد نقاط پیش از آن شانس رسیدن به این دما را از دست خواهند داد. با توجه به این توضیحات بهترین شرایط در حالتی روی می دهد که بیشینه دمایی در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد هنگامی که مرکز منبع روی لبه ابتدایی قطعه قرار می گیرد، حاصل شود. مقادیر سرعت حرکت منبع حرارتی در شرایط شبه پایا^{۱۳} که از تحلیل های اجزای محدود بدست آمده است، در شکل (۴) با نتایج تحلیلی مقایسه شده اند.

همانگونه که در این شکل مشاهده می گردد، با کاهش شعاع منبع حرارتی و افزایش توان جذب شده، سرعت مورد نیاز برای منبع در شرایط شبه پایا افزایش می یابد. با توجه به افزایش میزان شار حرارتی با افزایش توان و همچنین افزایش چگالی شار حرارتی^{۱۴} (متمركز شدن شار حرارتی در مساحت کوچکتر) با کاهش ابعاد منبع، این مطلب توجیه پذیر می باشد. بعلاوه با توجه به عدم لحاظ شدن از دست رفتن حرارت از طریق همرفت و تابش و همچنین وابستگی رسانایی حرارتی با دما در روش تحلیلی، همچنان تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج

در این رابطه T_p دمای بیشینه ناشی از حرکت یک منبع حرارتی با توزیع گوسی، شعاع r_0 و سرعت حرکت ثابت v در عمق Z از یک قطعه نیمه نامتناهی^{۱۲} است. به منظور بررسی دمای بیشینه در سطح قطعه با اعمال $z=0$ و سپس جایگزینی رابطه (۶) در رابطه (۵) نتیجه خواهد شد:

$$V_{\text{steady}} = \frac{(AP)^2}{\pi^3 \lambda \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_p - T_0)^2 \cdot r_0^3} \quad (7)$$

توجه شود که در این رابطه از دست رفتن حرارت به دلیل همرفت و تابش لحاظ نشده است. با این وجود به دلیل حرارت دهی بسیار موضعی در این روش و نقش پررنگ تر رسانش که ناشی از بالا بودن رسانایی حرارتی فلزات است، همچنان انتظار می رود تطابق مطلوبی بین نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و نتایج تحلیلی وجود داشته باشد.

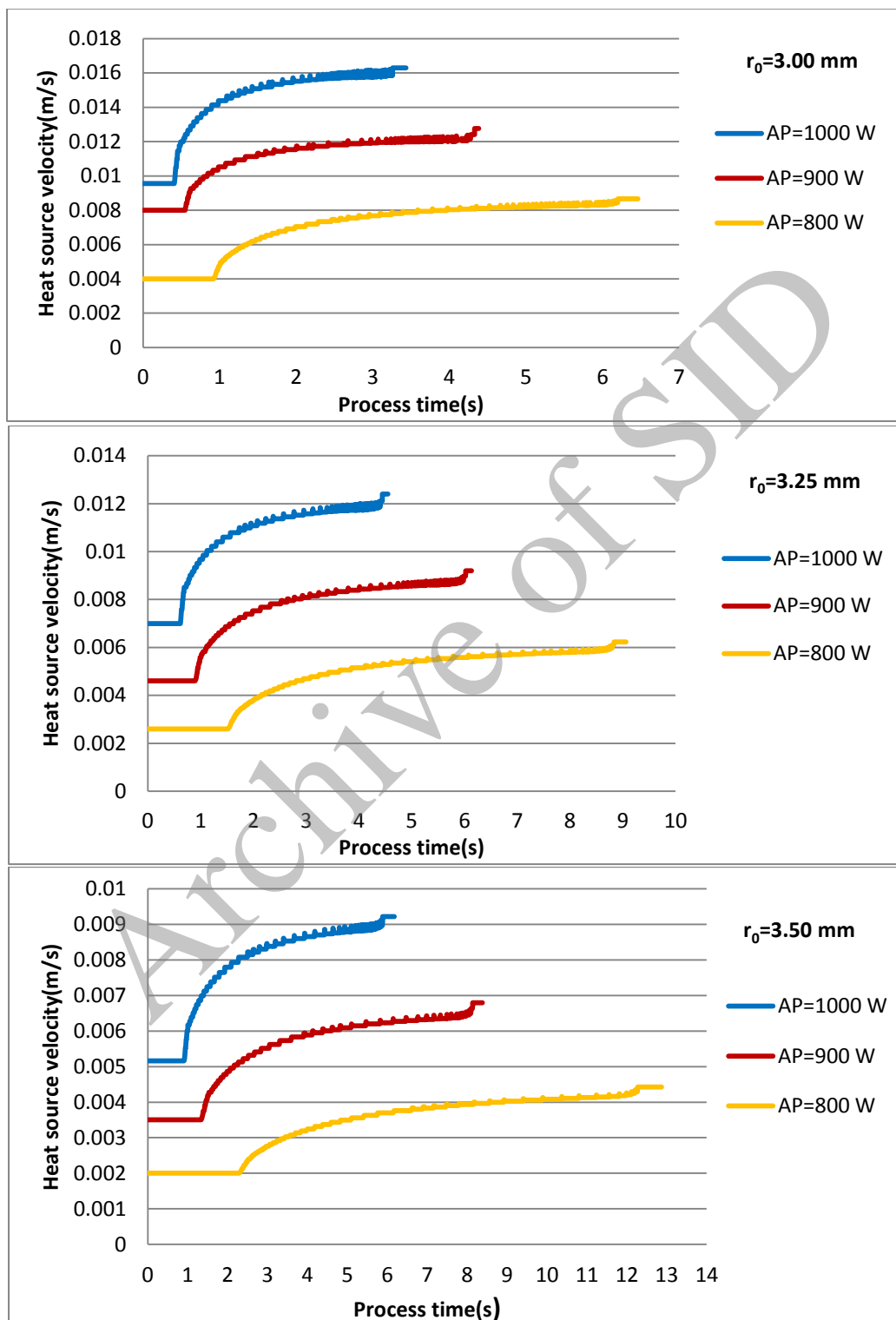
۴- نتایج و بحث

تحلیل فرآیند سخت گردانی استحاله ای سطحی با استفاده از یک پرتو پر انرژی با توزیع گوسی بر روی یک قطعه از جنس فولاد S355 و ابعاد $10 \times 50 \times 50$ میلیمتر انجام شد (شکل (۱)). به منظور اطمینان از ایجاد ناحیه کاملاً آستنیت در سطح بالایی قطعه در امتداد مسیر حرکت منبع، از دو زیر روال DFLUX و USDFLD جهت ثابت نگهداشتن دمای بیشینه در سطح در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد استفاده گردید.

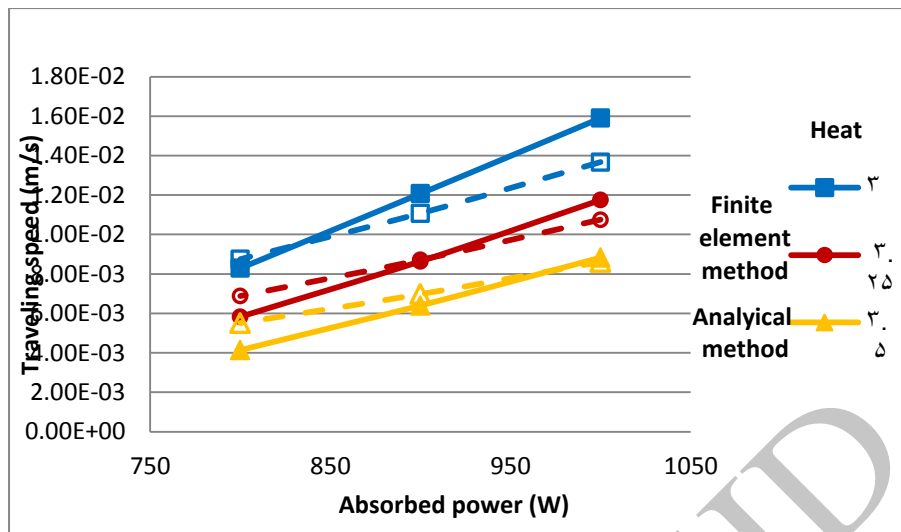
شکل (۳) که از نتایج تحلیل این فرآیند با استفاده از استراتژی کنترل سرعت به دست آمده است، نحوه تغییرات سرعت حرکت منبع را بر اساس زمان پیشرفت فرآیند نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می گردد، بطور کلی به منظور حفظ دمای بیشینه ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در طول فرآیند و در امتداد خط سیر منبع، به سرعت حرکت کمتری در ابتدای فرآیند و سرعت های بیشتری در انتهای فرآیند مورد نیاز است. این موضوع را می توان با کمتر بودن دمای اولیه در ابتدای شروع فرآیند و تجمع حرارت در انتهای مسیر حرکت منبع،

حاصل از شبیه سازی های اجزای محدود و نتایج روش تحلیلی

دیده می شود.



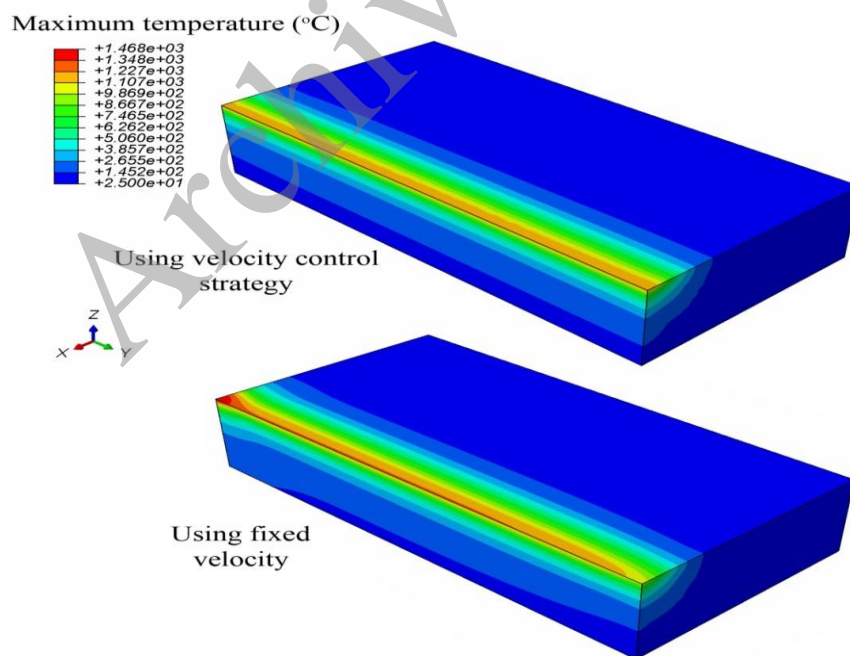
شکل (۳): پیش بینی تغییرات مورد نیاز در سرعت حرکت منبع حرارتی توسط تحلیل های اجزای محدود در حضور استراتژی کنترل سرعت برای شعاع های مختلف منبع حرارتی



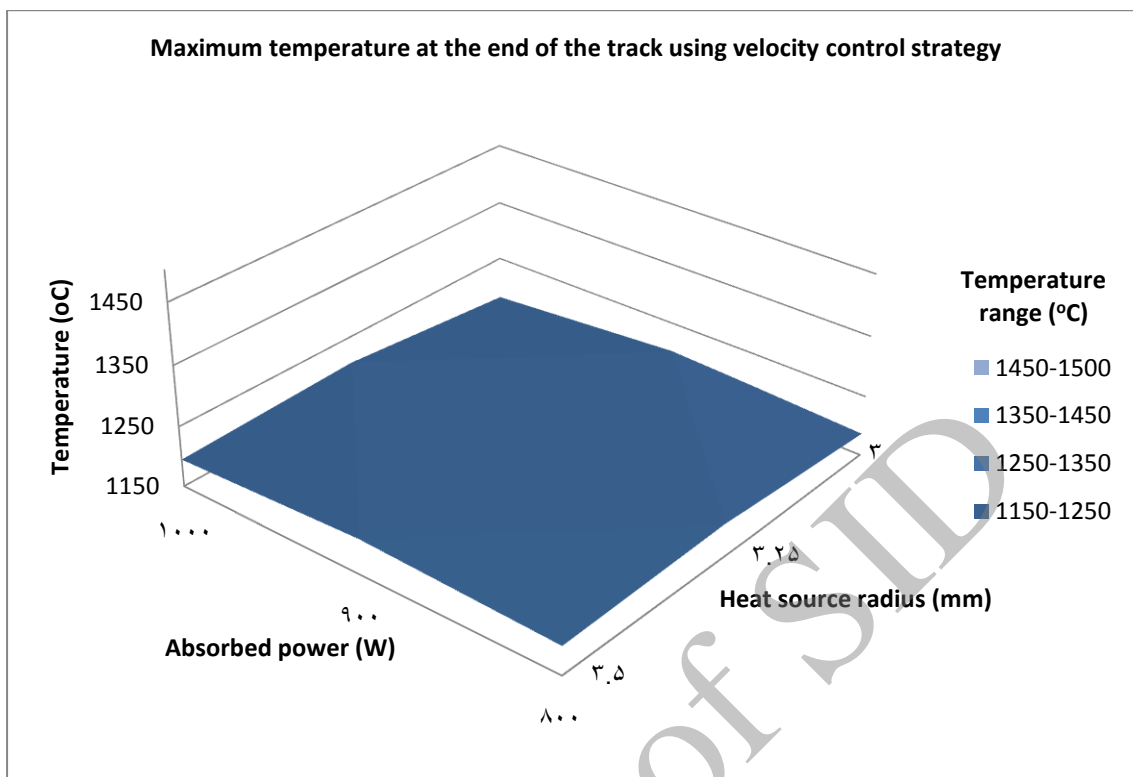
شکل (۴): مقایسه پیش بینی تحلیل اجزای محدود و روش تحلیلی از سرعت حرکت منبع حرارتی در حالت شبه پایا برای پارامترهای مختلف فرآیند

وجود در غیاب این استراتژی، شرایط گذرا منجر به ایجاد دمای بیشینه ای کمتر از حد مورد نیاز در ابتدای فرآیند و دمای بیشینه ای بسیار بیشتر از حد مطلوب (در حدود دمای ذوب) در انتهای مسیر حرکت منبع حرارتی می گردد.

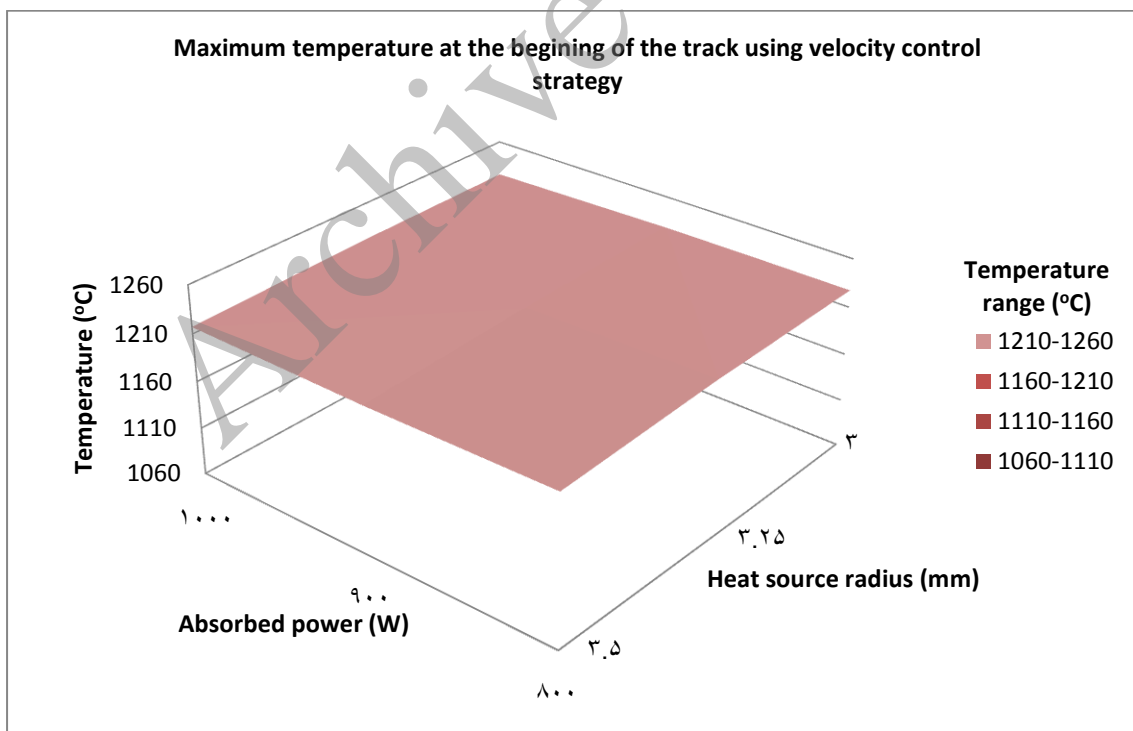
شکل (۵) بیشینه دمایی را که هر نقطه در طول فرآیند تجربه می کند، نمایش می دهد. همان گونه که مشاهده می گردد با استفاده از استراتژی کنترل سرعت، دمای آستانه تقریباً یکنواختی در امتداد مسیر حرکت منبع حرارتی قابل دستیابی می باشد. با این



شکل (۵): بیشینه دمای نقاط مختلف برای عبور منبع حرارتی با توان ۹۰۰ وات و شعاع پرتو ۳.۵ میلیمتر با استفاده از استراتژی کنترل سرعت (شکل بالا) و با استفاده از سرعت ثابت (شکل پایین)

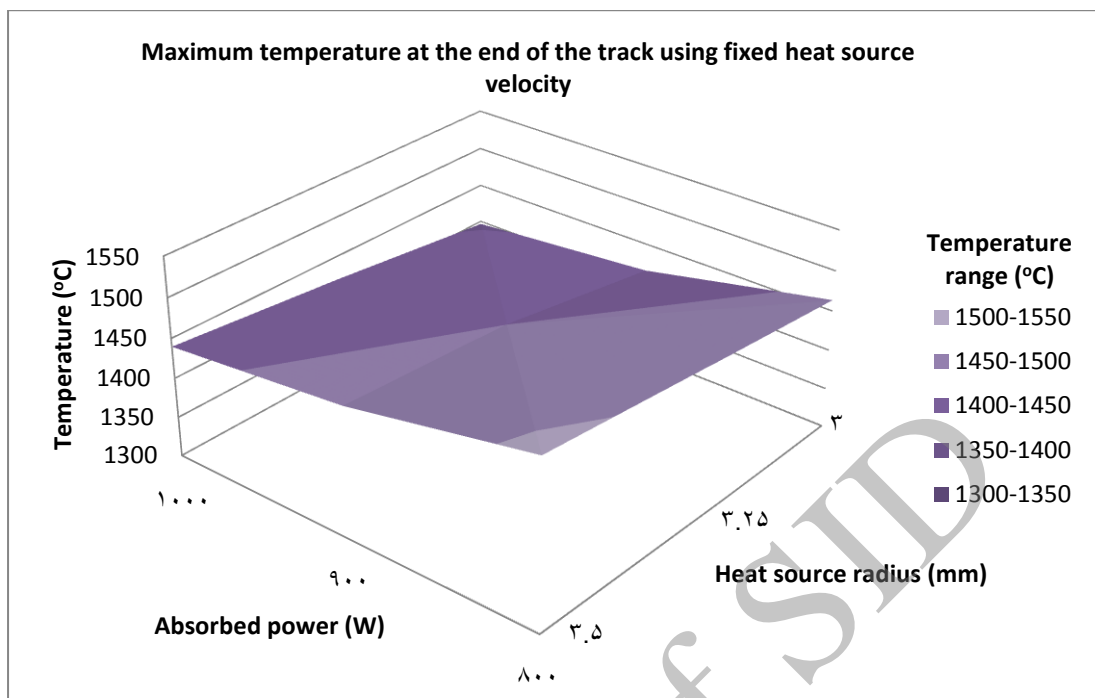


(الف)

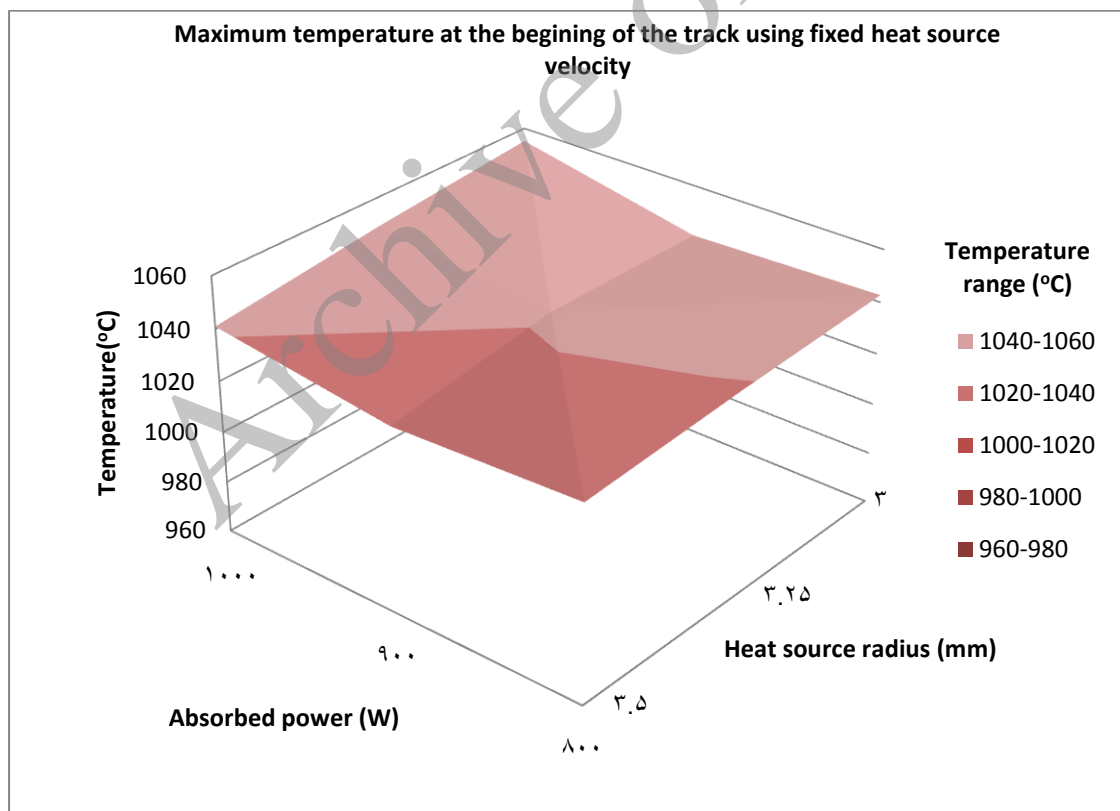


(ب)

شکل (۶): پیشینه دمای ایجاد شده در اثر حرکت منبع حرارتی متحرک با استفاده از استراتژی کنترل سرعت در ابتدای مسیر حرکت منبع: (الف) و در انتهای مسیر حرکت منبع: (ب)



(الف)



(ب)

شکل (۷): پیشینه دمای ایجاد شده در اثر حرکت منبع حرارتی متحرک با استفاده از سرعت ثابت در ابتدای مسیر حرکت منبع: (الف) و در انتهای مسیر حرکت منبع:

(ب)

حرکت منبع را به گونه ای فراهم می نماید که ضمن ایجاد یک منطقه کاملاً آستنیت، از ایجاد هر گونه ذوب سطحی و در نتیجه از دست رفتن دقت ابعاد جلوگیری می شود.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی ها در حضور استراتژی استفاده شده و شبیه سازی فرآیند با سرعت ثابت حرکت منبع حرارتی، نمایانگر قدرت استراتژی اتخاذ شده در کنترل دما در طول فرآیند است. نتایج همچنین نشان می دهند که در صورت عدم امکان استفاده از این روش، بکار بردن ترکیبی از منبع با توان بالا تر و ابعاد کوچکتر به نتایج مطلوب تری منجر می گردد.

۶- مراجع

- [1] ASM handbook, Heat Treating, ASM International, Vol. 4, p. 259, 1991.
- [2] N. B. Dahotre, "Surface Engineering Series", ASM International, Materials Park, Vol. 1, p. 265, 1998.
- [3] N. S. Bailey, W. Tan & Y. C. Shin, "Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode laser", Surface and Coatings Technology, Vol. 203, pp. 2003-2012, 2009.
- [4] G. Tani, L. Orazi & A. Fortunato, "Prediction of hypo eutectoid steel softening due to tempering phenomena in laser surface hardening", CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 209-212, 2008.
- [5] J. Grum, Modeling of Laser Surface Hardening, In: Cemil Hakan Gür, Jiansheng Pan, editors. Handbook of thermal process modeling of steels, New York: CRC Press, pp. 499-627, 2009.
- [6] B. Mahmoudi, M. J. Torkamany, A. R. Sabour Rouh Aghdam & J. Sabbaghzade, "Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser", Materials and Design, Vol. 31, pp. 2553-2560, 2010.
- [7] M. Kalyona & B. S. Yilbasa, "Laser pulse heating: a formulation of desired temperature at the surface", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 39, pp. 109-119, 2003.

دما های بیشینه در ابتدا و انتهای مسیر حرکت منبع حرارتی، جایی که بیشترین مشکل از نظر دستیابی به درجه حرارت مورد نظر انتظار می رود، در شکل (۶) و شکل (۷) برای توان های مختلف و شعاع های مختلف منبع حرارتی خلاصه شده اند. همانگونه که در این شکل ها مشاهده می گردد، دما های آستنیت یکنواخت تری با استفاده از استراتژی کنترل سرعت قابل دستیابی است. نتایج حاکی از قدرت استراتژی بکار رفته در کنترل بیشینه دمای سطح برای رسیدن به یک ریز ساختار یکنواخت تر، صرف نظر از پارامتر های دیگر از جمله توان و ابعاد منبع حرارتی است.

چنانکه در شکل (۷) دیده می شود، در غیاب استراتژی کنترل سرعت، بیشینه دما های ایجاد شده در ابتدای مسیر حرکت منبع حرارتی بطور کلی کمتر از میزان مورد نظر است. این امر می تواند به عدم آستنیت شدن، یا آستنیت شدن ناقص و در نتیجه عدم دستیابی به سختی مورد نظر در لبه ابتدایی قطعه منجر گردد.

همچنین در شکل (۷) دیده می شود که مقدار دمای بیشینه، با افزایش توان و کاهش شعاع منبع افزایش می یابد. بعلاوه در شکل (۷) - (ب) دیده می شود که دمای بیشینه ای که در انتهای مسیر حرکت منبعی با سرعت ثابت ایجاد می گردد در تمامی موارد بالا تر از حد مورد نظر است. این بیشینه دما با افزایش توان و کاهش ابعاد منبع کاهش می یابد. این نتایج بیان گر آن است که در صورت عدم امکان استفاده از استراتژی کنترل سرعت، استفاده از ترکیبی از توان های بالاتر و منبع حرارتی کوچکتر جهت رسیدن به تاریخچه حرارتی یکنواخت، مناسب تر است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک استراتژی جدید جهت دستیابی به تاریخچه حرارتی یکنواخت در نزدیکی لبه ها، در فرآیند سطح سختی استحاله ای با استفاده از منبع حرارتی متحرک (پرتو پُر انرژی) پیشنهاد گردید. این استراتژی که بر مبنای تنظیم سرعت حرکت منبع حرارتی بر اساس بیشینه دمای روی سطح بنیان گذاشته شده، امکان دستیابی به دمای آستنیت مناسب در ابتدا و انتهای مسیر

- [18] M. Van Elsen, M. Baelmans, P. Mercelis & J. P. Kruth, "Solutions for modeling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4872–4882, 2007.
- [19] L. Jiang & H. L. Tsai, "Modeling of ultrashort laser pulse-train processing of metal thin films", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3461–3470, 2007.
- [20] J. Goldak, A. Chakravarti & M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources", *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15, pp. 299–305, 1984.
- [21] R. I. Karlsson & B. L. Josefson, "Three dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in a single – pass butt-welded pipe", *Pressure Vessel Technology*, Vol. 112, pp. 76–84, 1990.
- [22] R. C. Reed, H. K. D. Bhadeshia, "A simple model for multipass steel welds", *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 42, pp. 3663–3678, 1994.
- [23] K. Mundra, & T. DebRoy, K. M. Kelkar, "Numerical prediction of fluid flow and heat transfer in welding with a moving heat source", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 29A, pp. 115–129, 1996.
- [24] R. Komanduri & Z. B. Hou, "Thermal analysis of the arc welding process: Part I. General solutions", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 3, pp. 1353–1370, 2000.
- [25] W. Jiang, K. Yahiaoui & F. R. Hall, "Finite element predictions of temperature distributions in a multipass welded piping branch junction", *Pressure Vessels Technology*, Vol. 127, pp. 7–12, 2005.
- [26] R. Patwa & Y. C. Shin, "Predictive modeling of laser hardening of AISI150H steels", *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 307–320, 2007.
- [27] F. Kong, S. Santhanakrishnan, D. Lin & R. Kovacevic, "Modeling of temperature field and grain growth of a dual phase steel DP980 in direct diode laser heat treatment", *Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5996–6003, 2009.
- [28] G. Fribourga, A. Deschamps. Y. Brecheta, G. Mylonasb, G. Labeasb, U. Heckenbergerc & M. S. A. Jenabali Jahromi, A. Khajeh & B. Mahmoudi, "Effect of different pre-heat treatment processes on the hardness of AISI 410 martensitic stainless steels surface-treated using pulsed neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser", *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 857–862, 2012.
- [9] D. Rosenthal, "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", *Welding Journal*, Vol. 5, pp. 220s–234s, 1941.
- [10] N. Rykalin, A. Uglov, A. Kokora & O. Glebov, *Laser Machining and Welding*, Mir Publishers, Moscow, 1978.
- [11] T. W. Eagar & N. S. Tsai, "Temperature fields produced by traveling distributed heat sources", *Welding Journal*, Vol. 62, pp. 346–355, 1983.
- [12] M. F. Ashby & K. E. Easterling, "Transformation hardening of steel surfaces by laser-beams.1. Hypo-eutectoid steels", *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 1935–1948, 1984.
- [13] K. S. Bo & H. S. Cho, "Transient temperature distribution in arc welding of finite thickness plates", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacturing*, Vol. 204, pp. 175–183, 1990.
- [14] S. M. Zubair & M. A. Chaudhry, "Heat conduction in a semi-infinite solid when subjected to spatially decaying instantaneous laser source", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 425–431, 1993.
- [15] M. K. Al-Adawi, M. A. Abdel-Naby & S. A. Shalaby, "Laser heating of a two-layer system with constant surface absorption: an exact solution", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 947–952, 1995.
- [16] J. C. Rozzi, F. E. Pfefferkorn, F. P. Incropera & Y. C. Shin, "Transient thermal response of a rotating cylindrical silicon nitride workpiece subjected to a translating laser heat source, Part I: comparison of surface temperature measurements with theoretical results", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 899–906, 1998.
- [17] N. T. Nguyen, A. Otha, K. Matsuoka, N. Suzuki & Y. Maeda, "Analytic solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources", *Welding Journal*, Vol. 78, pp. 265s–274s, 1999.

- [6] Convection coefficient
- [7] Radiation coefficient
- [8] Subroutine
- [9] Gaussian distribution
- [10] Thermo-physical properties
- [11] Ac3
- [12] Semi-infinite
- [13] Quasi steady state
- [14] Heat flux density

Perezd, "Microstructure modifications induced by a laser surface treatment in an AA7449 aluminium alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 2736–2747, 2011.

- A. Khajeh & S. A. Jenabali Jahromi, "The finite element analysis of the surface transformation hardening process using the power control strategy in order to reduce edge effect problems", *Computational Materials Science*, Vol. 88, pp. 151-155, 2014.
- B. Li, Y. Wang, Z. Zhang, B. Han & T. Han, "Influence of overlapping ratio on hardness and residual stress distributions in multi-track laser surface melting roller steel *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, pp. 1224–1230, 2010.
- [29] Chehrghania, M. J. Torkamany, M. J. Hamed & J. Sabbaghzadeh, "Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation", *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 2068-2076, 2012.
- [30] W. Piekarska, M. Kubiak & A. Bokota, "Numerical simulation of thermal phenomena and phase transformations in laser-arc hybrid welded joints", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 56, pp. 409-426, 2011.
- [31] W. Piekarska, M. Kubiak & Z. Saternus, "Application of Abaqus to analysis of the temperature field in elements heated by moving heat sources", *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 10, pp. 177-182, 2010.
- [32] J. Caron, C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, S. S. Babu & J. Lippold, "Effect of continuous cooling transformation variations on numerical calculation of welding-induced residual stresses" *Welding Research*, Vol. 89, pp. s151-s160, 2010.
- [33] W. Piekarska, M. Kubiak & Z. Saternus, "Numerical modeling of thermal and structural strain in laser welding process". *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 57, pp. 1219-1227, 2012.

۶- پی نوشت

- [1] Heat sink
- [2] Self quenching
- [3] Analytical method
- [4] Numerical method
- [5] Transient thermal analysis