

## بررسی تنش پسماند ایجادشده در پروسه سخت کاری با اشعه لیزر

پروسه سخت کاری با اشعه لیزر با ایجاد یک لایه سطحی سخت شده بر روی قطعات باعث ایجاد تنش های پسماند، موجب کاهش سایش می گردد. در این مقاله با کدنویسی تحلیل کوپلینگ حرارتی- سازه ای به روش غیرمستقیم در نرم افزار ANSYS جهت بدست آوردن تنش های پسماند، مدل المان محدود ناشی از پروسه سخت کاری با اشعه لیزر ساخته شده و سیکل حرارتی این مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. پس از ارزیابی مدل به بررسی اثر پارامترهای موثر در پروسه پرداخته شده و همچنین میدان تنش های پسماند حاصل از سخت کاری بر روی سطح و عمق قطعه کار بررسی شده است.

سید هادی یوسفی<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

پریسا حسینی تهرانی<sup>۲</sup>

دانشیار

واژه های راهنما: سخت کاری با اشعه لیزر، کوپلینگ حرارتی- سازه ای، شدت توان اشعه لیزر، سرعت اشعه لیزر، تنش پسماند

### ۱- مقدمه

لیزر یکی از اختراعات بسیار مهم بشر در قرن بیستم است. توسعه آن در کلیه صنایع منجر به تغییراتی شگرف در حوزه های گوناگون گردیده است. یکی از کاربردهای ویژه آن در حوزه مهندسی مکانیک، سخت کاری بر روی فلزات است. امروزه لیزر به عنوان یکی از پرکاربردترین جنبه های مهندسی مخصوصاً در زمینه های مرتبط با فلزات برای برشکاری، جوشکاری، سخت کاری، آلیاژکاری، روکش کاری و ... مورد استفاده قرار می گیرد. تکنولوژی لیزر بدینصورت است که یک پرتو بوسیله یک میله سبک که وظیفه کنترل اشعه لیزر را به عهده دارد، با شدت توان بسیار بالا بر روی سطح موردنظر تابیده و بسته به نوع کاربرد آن، تغییراتی را در سطح موردنظر بوجود می آورد. ورودی انرژی لازم برای گرم کردن سطح قطعه کار با انتخاب سرعت حرکت پرتو، قدرت و دیگر پارامترهای آن تعیین می شود. مزیت هایی همچون صرف وقت و انرژی

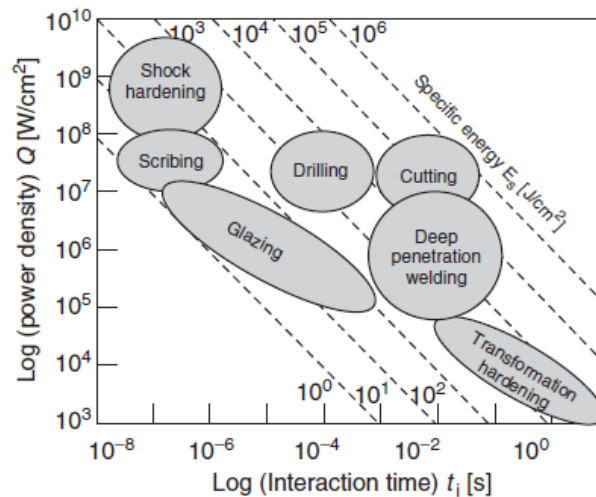
<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ماشین های ریلی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران [hadiusofi@rail.iust.ac.ir](mailto:hadiusofi@rail.iust.ac.ir)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، قطب علمی حمل و نقل ریلی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

[hosseini\\_t@iust.ac.ir](mailto:hosseini_t@iust.ac.ir)

کمتر، تمیزبودن، قابل انعطاف بودن، دقت، مناسب جهت اتوماسیون و ... از جمله ویژگیهای این پروسه به حساب می آید.

پروسه سخت کاری با اشعه لیزر<sup>۱</sup> فرآیندی با توان حرارتی بالاست که به سرعت به سطح یک قطعه کار تابیده، بطوریکه دمای سطح قطعه کار را در محل تابش اشعه به شدت افزایش می دهد. این افزایش تا آنجا ادامه می یابد که دمای سطح بیشتر از نقطه تبدیل فاز و کمتر از دمای ذوب گردد. پس از عبور اشعه، ناحیه متاثر از گرما با سرعت سرد شده و موجب سختی سطحی و بهبودبخشیدن کیفیت سطح می گردد. بدلیل اینکه ناحیه گرم شده بسیار کوچک است، اعوجاج گرمایی آن بسیار کم است. حسن دیگر این پروسه، کنترل دمای سطح و عمق سخت شده می باشد که از طریق تنظیم قدرت، سرعت و ابعاد اشعه لیزر انجام می گردد. شکل (۱) چگونگی رابطه انواع پروسه های مختلف با استفاده از لیزر را با شدت توان، انرژی و زمان فعل و انفعال نشان می دهد. مطابق این شکل محدوده پروسه سخت کاری با اشعه لیزر بین  $10^7$  تا  $10^9$  وات بر متر مربع و زمان تاثیر این پروسه بین  $0.1$  تا  $10$  ثانیه می باشد [۱].



شکل ۱- وابستگی انواع پروسه های لیزر با شدت توان، انرژی مخصوص و زمان فعل و انفعال آن [۱]

این پروسه از دیدگاه حرارتی و متالورژیکی بارها توسط دانشمندان مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. وانگ<sup>۲</sup> و همکارانش به توزیع میدان دما در سخت کاری با اشعه لیزر پرداخته و آن را با کارهای آزمایشگاهی مقایسه نموده اند [۲]. کوماندوری<sup>۳</sup> و هو<sup>۴</sup> به بررسی تحلیلی معادلات سخت کاری با اشعه لیزر پرداخته و اثر پارامترهایی همچون شدت توان و سرعت اشعه لیزر را بر میدان توزیع دما بررسی کرده اند [۳]. وو<sup>۵</sup> و همکارانش به تاثیر انواع شکل های مختلف پالس اشعه لیزر پرداخته و اثر آن را بر عمق سخت شده

<sup>1</sup> Laser Transformation Hardening (LTH)

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Komanduri

<sup>4</sup> Hou

<sup>5</sup> Wu

بررسی نموده‌اند [۴]. یائو<sup>۱</sup> و همکارانش اثر سخت‌کاری با اشعه لیزر را بر سایش پره‌های توربین مورد بررسی قرار داده‌اند [۵]. بر اساس تحقیقات انجام‌گرفته در این مقاله سایش پره توربین پس از اعمال سخت‌کاری با اشعه لیزر تقریباً کمتر از یک سوم سایش در مقایسه با پروسه‌های معمول سخت‌کاری است. تحقیقات مشابه دیگری نیز توسط محققین صورت پذیرفته است که به بحث عمق سخت‌شوندگی، توزیع دما و تاثیر پارامترهای مختلف بر توزیع میدان دما و عمق سخت‌شوندگی در فولادهای مختلف پرداخته است [۶-۷]. همانطور که مشاهده می‌گردد، تا کنون در مقالات ارائه‌شده به تحلیل میدان تنش‌های حرارتی ناشی از تابش اشعه لیزر و اثری که ممکن است این پروسه بر تنش‌های پسماند در قطعه داشته باشد، اشاره‌ای نشده است. لذا در این مقاله به تحلیل میدان تنش و مقدار تنش پسماند بوجودآمده در قطعه پس از انجام پروسه سخت‌کاری پرداخته می‌شود.

## ۲- معادلات حاکم بر پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر

### ۲-۱- معادلات حاکم بر تحلیل حرارتی

وقتی که یک فلاکس حرارتی به یک سطح جامد اعمال می‌شود، میدان دما از رابطه زیر بدست می‌آید [۸].

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K(T)\nabla T) \quad (1)$$

در این رابطه  $T$  دما و  $C_p(T)$ ،  $\rho(T)$  و  $K(T)$  به ترتیب ضریب گرمای ویژه، چگالی و ضریب هدایت حرارتی می‌باشند که خود وابسته به دما هستند. همچنین  $t$  زمان و علامت  $\nabla$  به صورت رابطه ذیل تعریف می‌شود [۸].

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k \quad (2)$$

با جایگزینی معادله ۲ در رابطه ۱ معادله هدایت حرارتی از رابطه ۳ حاصل می‌شود که در آن

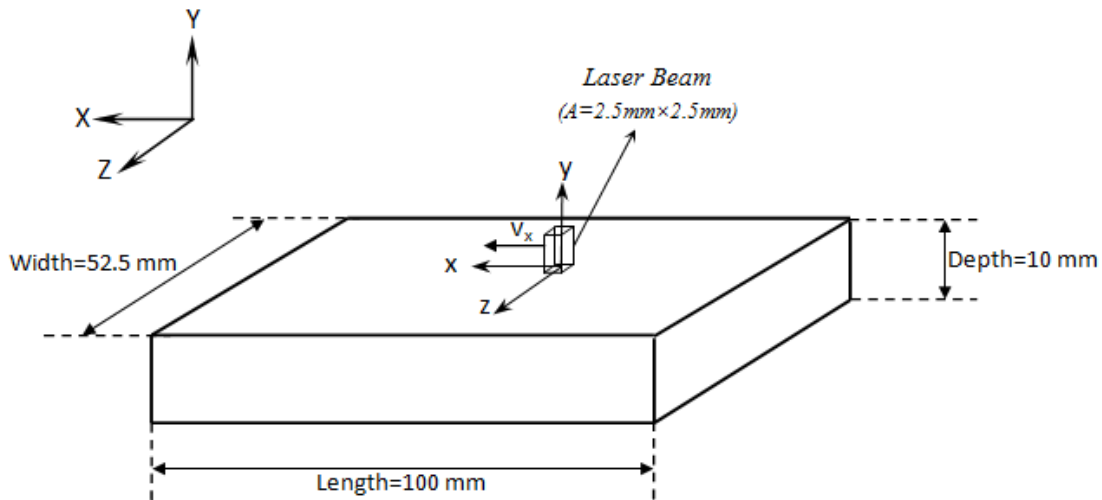
$$\varphi(T) = \frac{k(T)}{\rho(T)C_p(T)} \text{ تحت عنوان ضریب پخش ماده شناخته می‌شود. این ضریب نیز به دما وابسته است.}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \varphi\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)T \quad (3)$$

برای بدست آوردن توزیع دمای حاصل از حرکت یک فلاکس حرارتی لازم است که دو دستگاه مختصاتی ثابت و متحرک در نظر گرفته شود. دستگاه مختصات ثابت بر یک نقطه ثابت از قطعه منطبق شده و دستگاه مختصات متحرک با فلاکس حرارتی مطابق شکل (۲) در حال حرکت است. برای حل توزیع دما در چنین مسئله‌ای از تابع گرین استفاده می‌گردد. با انتگرال‌گیری از تابع گرین و توزیع گرما بر روی سطح موردنظر و

<sup>1</sup> Yao

سپس انتگرال‌گیری در حوزه زمان از مختصات متحرک می‌توان میدان توزیع دما را در چنین پروسه‌ای محاسبه نمود.



شکل ۲- نمایشی از محور مختصات ثابت و متحرک در قطعه‌کار

در طول پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر گرما در سطح بوسیله گازهای پوششی و تابش دفع می‌گردد. بنابراین می‌توان در صورت وجود جابجایی و تابش برای سطح زیرین قطعه‌کار، معادله ۴ را نوشت. همچنین در سطح فوقانی قطعه نیز رابطه ۵ برقرار است [۸].

$$k(T) \frac{\partial T}{\partial Y} + \zeta_b (T - T_0) = 0 \quad (4)$$

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial Y} - Q + \zeta_s (T - T_0) = 0 \quad (5)$$

لازم بذکر است که در این معادلات ضریبی تحت عنوان ضریب کلی انتقال حرارت ( $\zeta$ ) تعریف شده است که شامل جابجایی و تابش می‌باشد. روابط ۶ و ۷ به ترتیب مقدار انتقال حرارت از طریق جابجایی و تابش و معادله ۸ انتقال حرارت کلی قطعه را نشان می‌دهد. همچنین رابطه ۹ ضریب کلی انتقال حرارت که خود وابسته به دماست را نشان می‌دهد.

$$q_{Conv} = h(T - T_\infty) \quad (6)$$

$$q_{Rad} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

$$q_{Tot} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) + h(T - T_\infty) = [\varepsilon \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) + h](T - T_\infty) \quad (8)$$

$$\zeta(T) = \varepsilon \sigma (T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) + h \quad (9)$$

## ۲-۲- شرایط اولیه و مرزی تحلیل حرارتی

شرایط مرزی و اولیه به عنوان یکی از مراحل اصلی حل معادلات نقش غیرقابل انکاری را ایفا می‌نمایند. شرط مرزی اول اینکه در فواصل دور از تابش اشعه لیزر دمای سطح قطعه برابر دمای محیط است. زیرا ناحیه متاثر

از گرما در این پروسه بسیار کوچک است. این شرط مرزی در قالب معادله ۱۰ نوشته می‌شود که در آن مقدار  $T$  از رابطه ۱۱ حاصل می‌شود و به منزله فاصله نقطه موردنظر از محل تابش اشعه لیزر می‌باشد.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(X, Y, Z, t) = T_0 \quad (10)$$

$$r = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + Y^2} \quad (11)$$

همچنین دمای سطح قطعه کار در ابتدا برابر دمای محیط در نظر گرفته شده است.

$$T(X, Y, Z, t = 0) = T_0 \quad (12)$$

حال پس از بدست آوردن معادله توزیع دما، می‌توان میدان توزیع دما را بوسیله معادلات کوپلینگ حرارتی-سازه‌ای در بدست آوردن مقدار تنش و کرنش استفاده نمود.

پس از بدست آوردن میدان حرارتی در پروسه مذکور، این میدان موجب بوجود آمدن کرنشی می‌شود که در هر لحظه از رابطه ذیل حاصل می‌شود [۸]:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^E + \Delta \varepsilon_{ij}^P + \Delta \varepsilon_{ij}^T \quad (13)$$

که در حقیقت این کرنش شامل کرنش‌های الاستیک، پلاستیک و دمایی قطعه کار می‌گردد.

تنش‌های الاستیک و پلاستیک با توجه به تنش تسلیم در هر لحظه از معادلات ذیل حاصل می‌شوند [۸]:

$$\varepsilon_{ij}^E = \frac{1 + \nu_r}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu_r}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (14)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^P = G \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \sigma_{kl} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (15)$$

که در آن  $G$  از رابطه ذیل حاصل می‌شود [۸]:

$$\frac{1}{G} = - \left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{mn}^P} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \sigma_{mn} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \quad (16)$$

که در آن  $F$  تابع تنش فون-میزز وابسته به دما بوده و از رابطه ۱۷ حاصل می‌شود [۸]:

$$F = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} \sigma^2(\varepsilon, T) \quad (17)$$

که در آن  $\kappa$  پارامتر سخت‌کاری  $\kappa = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^P$  بوده و  $S$  تنش انحرافی می‌باشد.

همچنین کرنش ناشی از تغییرات دما از رابطه ذیل بدست می‌آید [۸]:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^T = \alpha(\Delta T) \delta_{ij} \quad (18)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی می‌باشد.

پس از بدست آوردن میدان کرنش، میدان تنش وارد بر قطعه در هر لحظه قابل دستیابی است و بنابراین می‌توان تنش وارد شده به هر نقطه در هر لحظه را محاسبه نمود.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

به منظور تحلیل میدان تنش در سخت‌کاری با اشعه لیزر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS از روش کوپلینگ پی‌درپی یا غیرمستقیم استفاده شده است. در این روش برای آنالیز تنش‌های حرارتی نخست به تحلیل توزیع میدان دمای ناشی از تابش اشعه لیزر پرداخته می‌شود و سپس نتایج حاصل از آنالیز حرارتی یعنی همان تاریخچه حرارتی گره‌ها بعنوان بارگذاری در آنالیز دوم که تحلیل سازه‌ای است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم بذکر است از آنجا که در شبیه‌سازی امکان تحلیل مسائل ترمو-الاستو پلاستیک به طور مستقیم وجود ندارد، ناگزیر از روش مذکور استفاده گردیده است.

#### ۳-۱- ضریب تبادل گرما در حین پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر

یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در حین پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر تبادل گرمای سطح با محیط اطراف است. به این منظور ضریبی تحت عنوان ضریب تبادل گرما یا انتقال حرارت تعریف می‌شود. این ضریب شامل جابجایی و تابش بین سطح و محیط اطراف می‌باشد. همانطور که در رابطه ۹ نشان داده شده است، این ضریب تابع دماست. طبق تحقیقات انجام‌شده ضریب تبادل حرارت کلی در پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر بین ۸۰ تا ۱۰۰ برابر شرایط پایدار می‌باشد که به دلیل سرد شدن سریع این پروسه است [۲]. از اینرو این ضریب که با نماد  $k$  در معادلات مشخص گردیده است، بر اساس جدول ۱ تعیین می‌گردد. در این مقاله از مقدار متوسط این ضریب برای تحلیل استفاده گردیده است. از آنجا که ضریب تبادل گرما باید در نرم‌افزار بصورت تابعی از دمای سطح تعریف گردد، لازم است که با تطبیق منحنی<sup>۱</sup> بر داده‌ها تابع ضریب تبادل گرمای سطح معرفی گردد. بر این اساس با تطبیق منحنی، سه رژیم مختلف بر اساس محدوده دمایی تعریف شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است. این ضریب بر اساس دمای سطح، خود را با توابع تعریف شده تطبیق می‌دهد.

جدول ۱- مقدار ضریب کلی و متوسط انتقال حرارت در پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر بر حسب دما [۲]

دما (کلوین)	ضریب کلی انتقال حرارت در شرایط پایدار ( $W/m^2K$ )	ضریب کلی انتقال حرارت در سخت‌کاری با اشعه لیزر ( $W/m^2K$ )
۲۹۳	۶	۴۸۰-۶۰۰
۵۷۳	۵۰	۴۰۰۰-۵۰۰۰
۸۷۳	۱۲۰	۹۶۰۰-۱۲۰۰۰
۱۰۲۳	۱۸۰	۱۴۴۰۰-۱۸۰۰۰
۱۱۷۳	۲۰۰	۱۶۰۰۰-۲۰۰۰۰
۱۴۷۳	۲۵۰	۲۰۰۰۰-۲۵۰۰۰
۱۷۷۳	۳۷۰	۳۰۲۴۰-۳۷۸۰۰

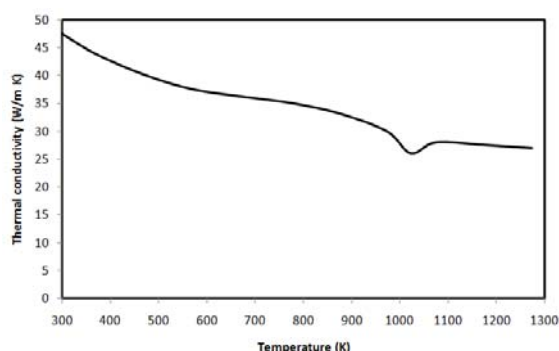
<sup>1</sup> Curve fitting

## جدول ۲- معادله ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب محدوده دمایی بر اساس تطبیق منحنی

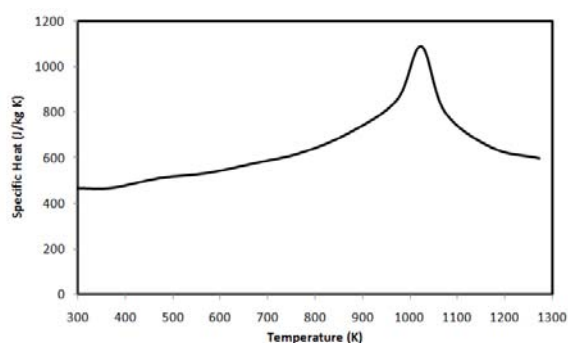
محدوده دمایی بر حسب کلونین	معادله مقدار متوسط ضریب انتقال حرارت کلی ( $W/m^2K$ )
$293 \leq T \leq 1023$	$\zeta = 3 \times 10^{-5} T^3 - 0.039 T^2 + 31.12 T - 5937$
$1023 < T < 1173$	$\zeta = 12 T + 3924$
$1173 \leq T \leq 1773$	$\zeta = 0.039 T^2 - 88.19 T + 67790$

## ۳-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام‌شده

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی انجام‌شده در این مقاله مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی برگرفته از مرجع [۲] و نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. کار آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی فولاد C45 با مشخصات حرارتی مطابق شکل (۳)، توان خروجی ۳۵۰ وات (شدت توان  $2/8 \times 10^7$  وات بر متر مربع) و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه بر روی قطعه‌کاری مشابه با شکل (۲) با ابعاد  $0/4 \times 0/4$  میلیمتر مربع انجام پذیرفته است. مرحله اول شبیه‌سازی به تحلیل حرارتی مربوط می‌شود که با ورودی‌های اشاره‌شده در فوق می‌توان تغییرات دما بر حسب زمان را بر روی یک نود روی سطح و دیگر نقاط قطعه بدست آورد.



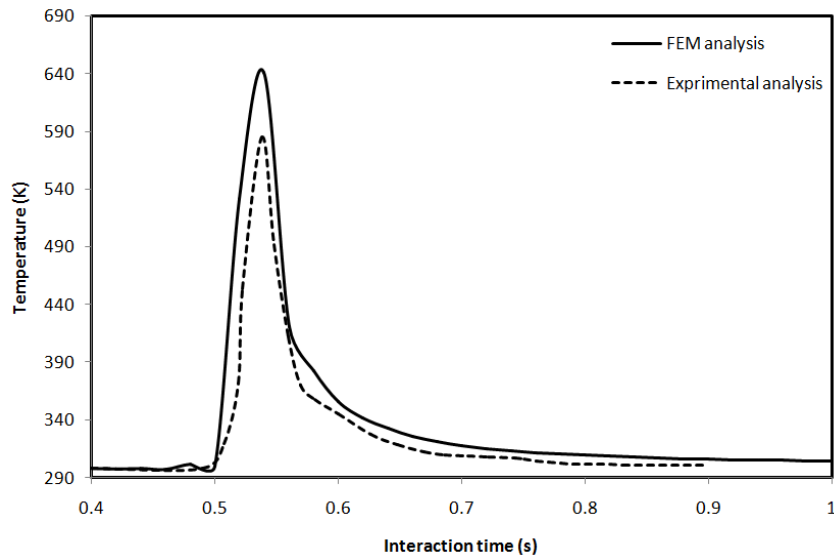
ب- نمودار ضریب هدایت گرمایی بر حسب دما



الف- نمودار ضریب گرمای ویژه بر حسب دما

## شکل ۳- تغییرات خواص حرارتی فولاد C45 با دما [۲]

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده در این پروسه تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. ماکزیمم خطای شبیه‌سازی در حدود ۸ درصد و در محل ماکزیمم دما رخ می‌دهد. دلیل اختلاف می‌تواند مربوط به دقت نبودن میزان  $h$  در نظر گرفته‌شده در شبیه‌سازی عددی باشد. از طرفی به دلیل اینکه در مرحله دوم شبیه‌سازی نیز از نتایج خروجی مرحله اول استفاده می‌شود، می‌توان گفت که شبیه‌سازی انجام‌شده از دقت بسیار خوبی برخوردار است. حال پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی صورت گرفته، می‌توان تحلیل‌های مد نظر را بر روی هر فولادی با خصوصیات متفاوت انجام داد. در این مقاله آنالیز انجام‌شده بر روی فولاد ۱۰۸۰ می‌باشد که در قسمت بعد به تفصیل بحث می‌شود.



شکل ۴- مقایسه بین نتایج المان محدود و نتایج آزمایشگاهی برگرفته از مرجع [۲]

### ۳-۳- خواص مکانیکی و حرارتی فولاد ۱۰۸۰

یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل‌های کوپلینگ حرارتی- مکانیکی تغییر خواص مکانیکی و حرارتی فلز موردنظر با افزایش دماست که در اکثر مقالات این خواص ثابت در نظر گرفته می‌شوند. اما در این تحلیل خواص مذکور برای فولادی با ۰/۶۷ تا ۰/۷۷ درصد کربن از مراجع مختلفی اقتباس گردیده است. فولادهایی همچون فولاد ریل و فولاد ۱۰۸۰ از جمله فولادهایی با درصد کربن ذکر شده می‌باشند [۱۰-۱۳]. در این راستا ضرایب بی‌بعدی تعریف شده و مقادیر مرجع آن در هر مورد ذکر گردیده است. جداول ۳ و ۴ به ترتیب ضرایب بی‌بعد و مقادیر آنها را در دمای مرجع نشان می‌دهد. در ادامه شکل‌های (۵) و (۶) تغییر ضرایب بی‌بعد حرارتی و مکانیکی معرفی شده در جدول ۳ را با دما نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۷) و (۸) هم به ترتیب نمایانگر تغییرات ضریب پواسون و نمودار تنش کرنش فولاد ۱۰۸۰ با دما می‌باشند. این تغییرات ناشی از تغییر خواص فولاد با تغییر فاز آن می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب حرارتی و مکانیکی و مقدار بی‌بعد شده آن

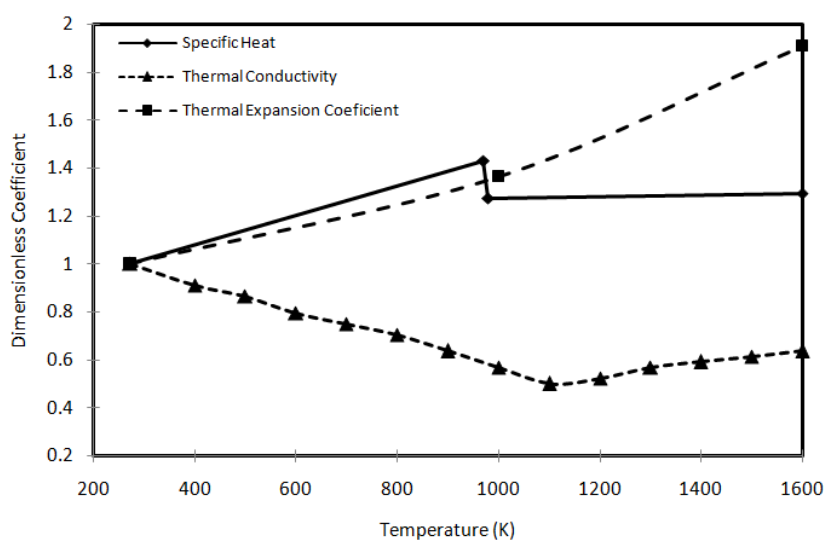
نام ضریب	نماد
ضریب بی‌بعد گرمای ویژه	$C_p^*(T) = \frac{C_p(T)}{C_p(T_{Ref})}$
ضریب بی‌بعد هدایت حرارتی	$K^*(T) = \frac{K(T)}{K(T_{Ref})}$
ضریب بی‌بعد انبساط حرارتی	$\alpha^*(T) = \frac{\alpha(T)}{\alpha(T_{Ref})}$
ضریب بی‌بعد تنش تسلیم	$S_y^*(T) = \frac{S_y(T)}{S_y(T_{Ref})}$



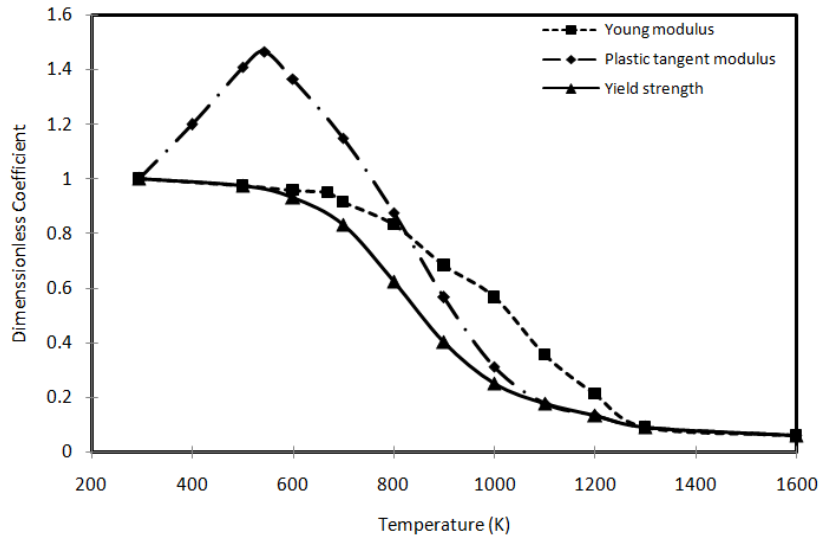
$E^*(T) = \frac{E(T)}{E(T_{Ref})}$	ضریب بی‌بعد مدول یانگ
$E_p^*(T) = \frac{E_p(T)}{E_p(T_{Ref})}$	ضریب بی‌بعد سخت‌شوندگی

جدول ۴- مقدار ضرایب حرارتی و مکانیکی فولاد ۱۰۸۰ در دمای مرجع [۱۰-۱۳]

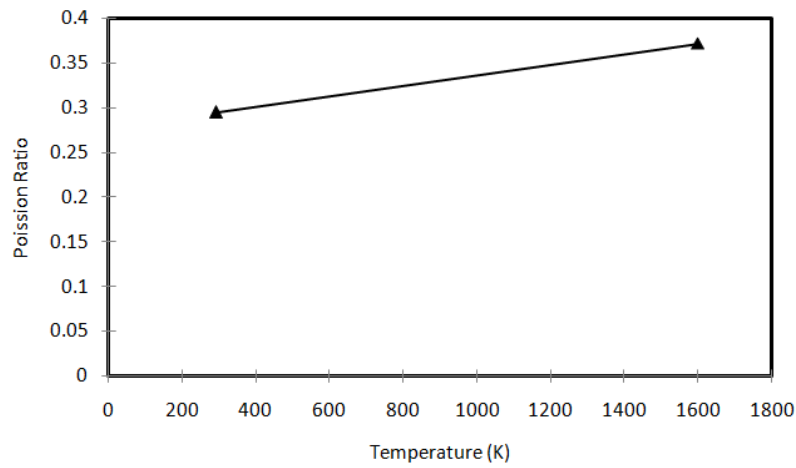
خواص	ضریب هدایت حرارتی	ضریب گرمای ویژه	ضریب انبساط گرمایی	مدول یانگ	مدول سخت‌شوندگی	تنش تسلیم	ضریب پواسون
نماد	$K$	$C_p$	$\alpha$	$E$	$E_k$	$S_y$	$\nu$
واحد	$W(mK)^{-1}$	$J(kg K)^{-1}$	$(K)^{-1}$	$GPa$	$GPa$	$MPa$	-
دمای مرجع	۲۷۳	۲۷۳	۲۹۳	۲۹۳	۲۹۳	۲۹۳	۲۹۳
مقدار	۵۱/۵	۵۰۸/۹۴	$9/7 \times 10^{-6}$	۲۰۲	۴/۸۰	۶۲۰	۰/۲۹۵



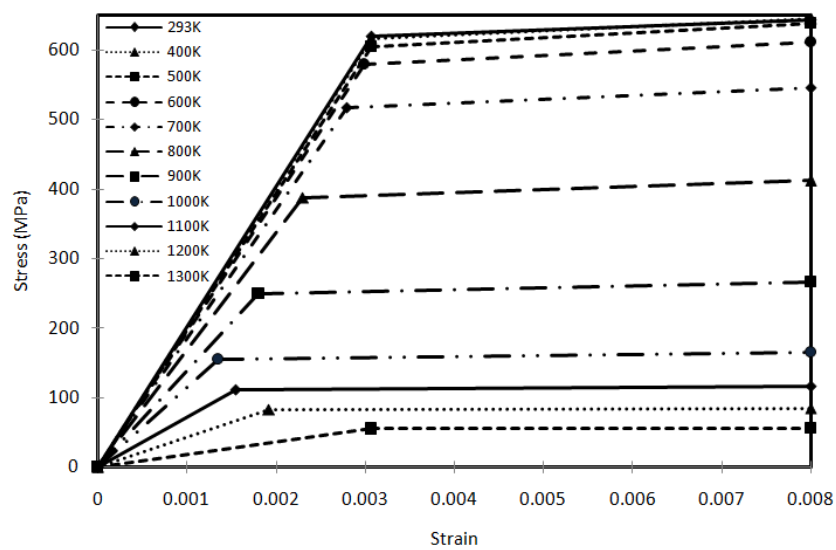
شکل ۵- تغییر خواص حرارتی بی‌بعد فولاد ۱۰۸۰ بر حسب دما [۱۰-۱۳]



شکل ۶- تغییر خواص مکانیکی فولاد ۱۰۸۰ بر حسب دما [۱۰-۱۳]



شکل ۷- تغییرات ضریب پواسون فولاد ۱۰۸۰ بر حسب دما [۱۰-۱۳]

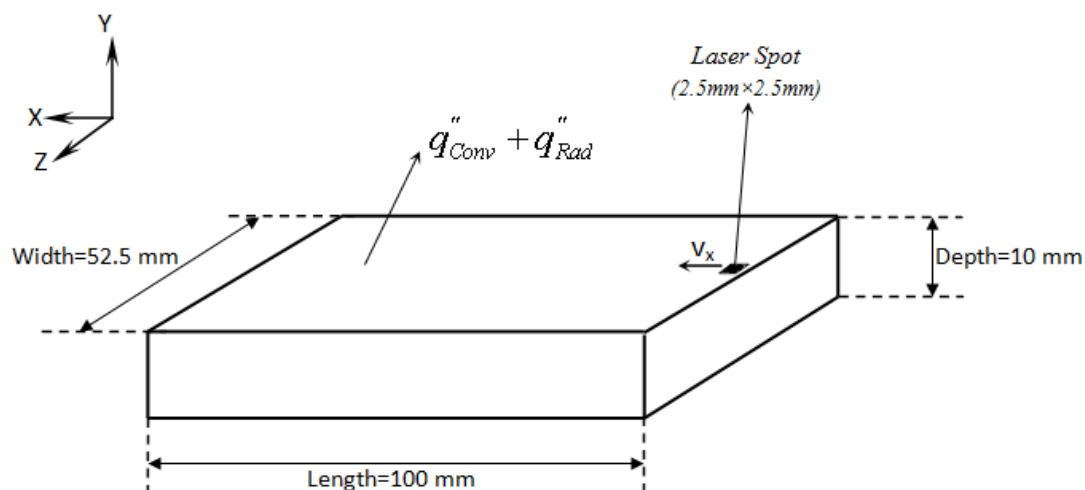


شکل ۸- نمودار تغییرات تنش- کرنش فولاد ۱۰۸۰ با دما بر حسب کلومین [۱۰-۱۳]

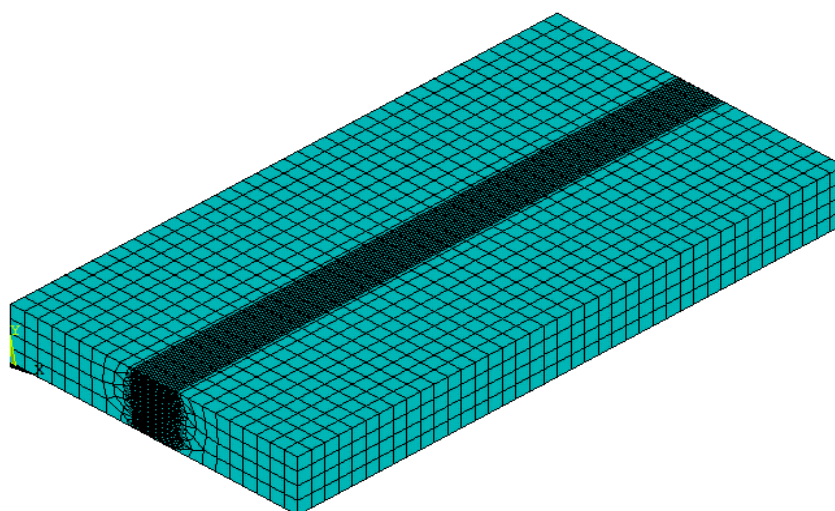
همچنین مطابق مراجع [۱۰-۱۳] دمای ذوب این فولاد برابر ۱۷۴۳ درجه کلوین و دمای آستنیت آن ۱۰۰۴ درجه کلوین در نظر گرفته شده است [۱۰-۱۳].

### ۳-۴- مشخصات هندسی قطعه کار

قطعه انتخاب شده برای تحلیل، قطعه‌ای به ابعاد  $10 \times 52.5 \times 10$  میلیمتر می‌باشد که اشعه لیزر با مقطع مربع به ابعاد  $2.5 \times 2.5$  میلیمتر مربع به آن اعمال می‌شود. شکل (۹) چگونگی حرکت اشعه لیزر بر روی قطعه کار را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی برای تحلیل حرارتی از المان مکعبی Solid70 با ۸ نود و برای تحلیل سازه‌ای از المان Solid45 با ۸ نود استفاده شده است. کل شکل از ۱۳۹۴۰۰ المان و ۱۴۲۵۹۸ نود تشکیل شده است. شکل (۱۰) کیفیت المان‌بندی قطعه کار را نشان می‌دهد. در نقاط اطراف تابش اشعه لیزر که دمای تک‌تک نقاط از اهمیت بالایی برخوردار است، المان‌بندی ریزتر و در نقاط دور از ناحیه تاثیرپذیر از گرما، المان‌ها درشت‌تر انتخاب شده است. اندازه المان‌های ریز  $0.625 \text{ mm} \times 0.625 \text{ mm}$  و اندازه المان‌های درشت‌تر  $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$  می‌باشد.



شکل ۹- نمایی شماتیک از چگونگی تابش اشعه لیزر بر روی قطعه کار



شکل ۱۰- نمایی از المان‌بندی قطعه کار

### ۳-۵- شرایط مرزی

با توجه به معلوم بودن سرعت و توان اشعه لیزر، بازه‌های زمانی از تقسیم طول المان‌های تحت تابش اشعه لیزر بر سرعت حاصل می‌شود.

$$t_r = \frac{\Delta x}{V} \quad (19)$$

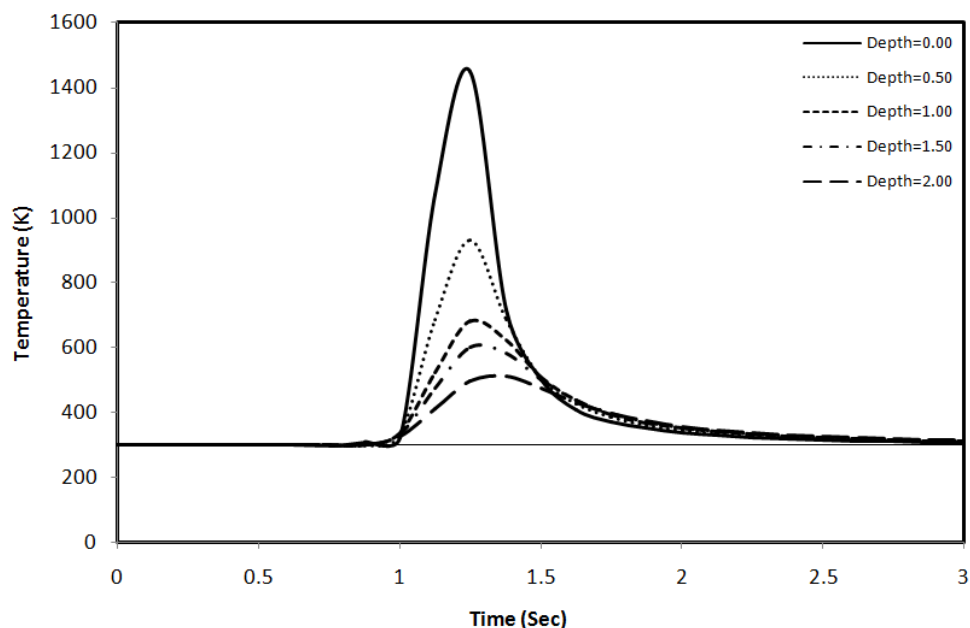
علاوه بر توان حرارتی اعمال شده بر روی سطح قطعه کار، انتقال حرارت نیز بوسیله جابجایی و تابش صورت می‌گیرد. در کنار شرط مرزی حرارتی، در مرحله تحلیل تنش نیاز به یک شرط مرزی مکانیکی است. در این شرط مرزی فرض شده است که قطعه کار مورد نظر بر روی یک میز کار قرار گرفته است. بنابراین در شرایط تکیه‌گاهی تنها سطح زیرین قطعه کار در جهت  $y$  ثابت شده است و برای بقیه سطوح هیچ قیدی اعمال نگردیده است.

### ۴- نتایج شبیه‌سازی و جمع‌بندی

پس از تحلیل کوپلینگ حرارتی-سازه‌ای به روش غیر مستقیم و آنالیز مراحل به طور جداگانه، می‌توان تحلیل‌ها را به دو دسته مجزا تقسیم‌بندی کرد:

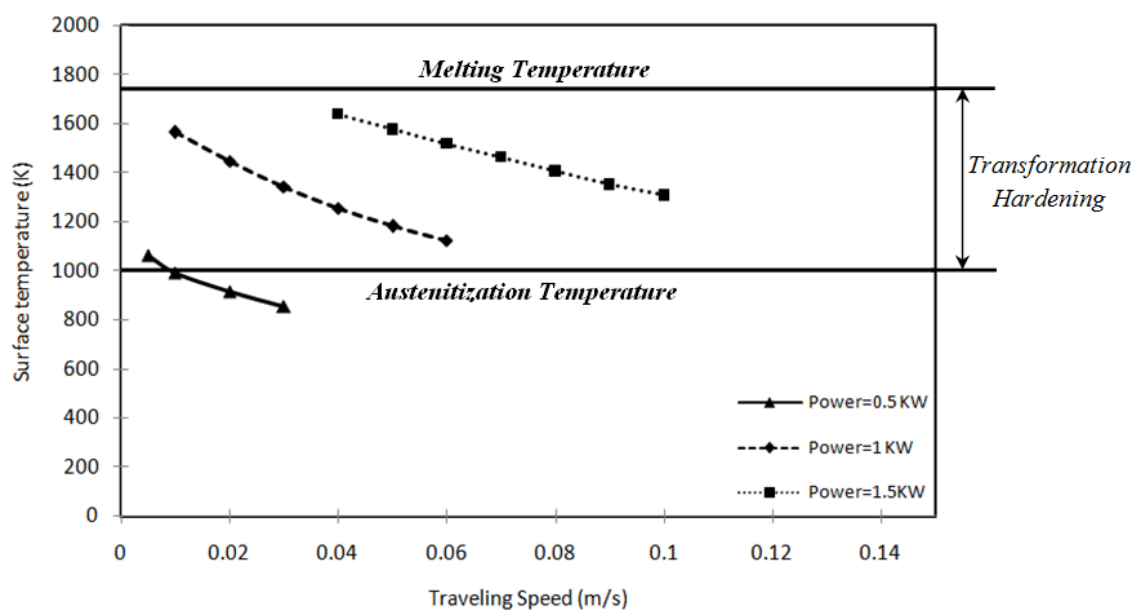
#### ۴-۱- تحلیل حرارتی

در تحلیل حرارتی که مرحله اول شبیه‌سازی را تشکیل می‌دهد، المانی با خواص حرارتی و فولاد ۱۰۸۰ بر اساس خواص متغیر با دما تعریف می‌گردد. پس از آن اشعه لیزر با سرعتی معلوم و با توانی مشخص در محدوده مجاز مطابق شکل (۱) بر روی سطح قطعه کار حرکت می‌کند. آنچه که در خروجی تک‌تک نودهای قطعه کار اهمیت دارد، دمای نودهای مختلف می‌باشد. همانطور که معلوم است، مقدار سرعت و توان اشعه لیزر می‌تواند دمای تک‌تک نودهای قطعه مورد نظر را تحت تاثیر قرار دهد. پس از صحت‌سنجی شبیه‌سازی در مرحله قبل این بار تحلیل حرارتی برای فولاد ۱۰۸۰ با خواص اشاره شده در توان ۱ کیلووات، سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و ابعاد اشعه لیزر ۲/۵×۲/۵ میلیمتر مربع انجام گرفته است. شکل (۱۱) تغییرات دما با زمان را برای چند نود خاص که دارای مختصات  $X$  و  $Z$  یکسان و عمق‌های متفاوت می‌باشند را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین تغییرات دما در سطح قطعه و با دور شدن از آن میزان تغییرات کمتر و به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. از طرفی بیشترین نرخ سرد شدن نیز در سطح قطعه اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۱- نمودار دما بر حسب زمان در پروسه سخت کاری با اشعه لیزر با توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه برای عمق‌های معینی از سطح قطعه کار

شکل (۱۲) تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای سطح قطعه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در یک شدت توان معلوم، با افزایش سرعت دمای سطح کاهش می‌یابد. بالطبع با افزایش سرعت، میزان جذب اشعه بر روی سطح کمتر شده و دمای سطح کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت توان اشعه لیزر میزان دمای سطح افزایش می‌یابد. نکته مهمی که باید ذکر گردد این است که از دیدگاه متالورژیکی بهترین حالت برای سخت کاری موقعی اتفاق می‌افتد که دمای قطعه بین دمای آستنیت و نقطه ذوب باشد [۸]. به همین منظور در شکل (۱۲) این دو مقدار با خطوط مشخصی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲- نتایج شبیه‌سازی تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای سطح قطعه کار در پروسه سخت کاری با اشعه لیزر

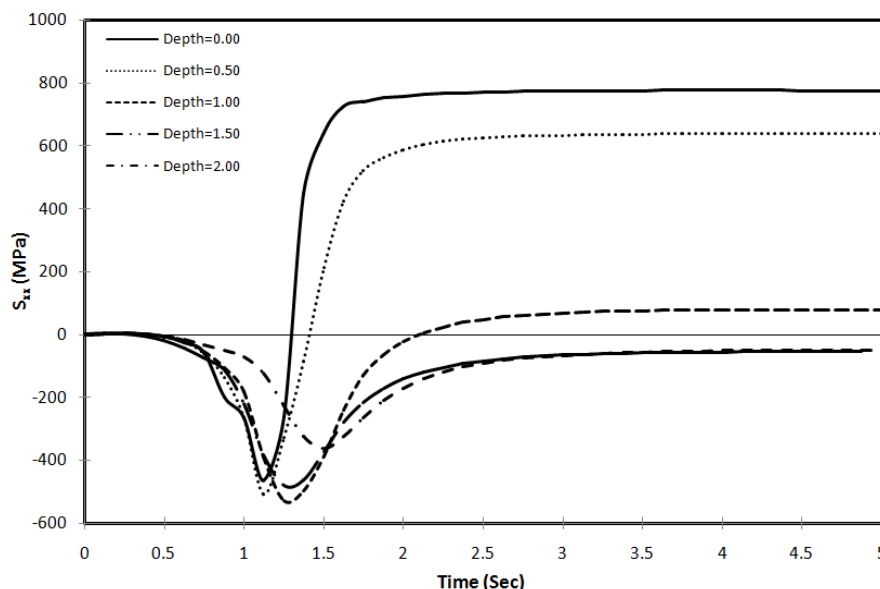
#### ۴-۲- تحلیل مکانیکی

پس از اعمال تاریخچه دمای نودهای مختلف قطعه کار در تحلیل حرارتی به تحلیل سازه‌ای و اعمال شرایط مرزی، آنالیز سازه‌ای صورت می‌گیرد. با تحلیل ذکرشده می‌توان انواع تنش‌ها و کرنش‌های اعمال‌شده به نودهای مختلف قطعه کار را بدست آورد. بنابراین پس از پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر می‌توان میدان تنش بوجودآمده را در قالب‌های زیر دسته‌بندی نمود:

#### ۴-۲-۱- تنش در راستای طولی ( $S_{xx}$ )

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد، پس از اعمال اشعه لیزر با سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه و توان ۱ کیلووات بر روی یک نقطه خاص، در مرحله گرم‌شدن تنش فشاری در راستای طولی در جسم ایجاد می‌گردد. اما با توجه به سردکاری سریعی که در حین این پروسه اتفاق می‌افتد، تنش کششی در مرحله سردشدن به جسم القا می‌گردد که بسته به سرعت و شدت توان اشعه لیزر می‌تواند مقادیر متفاوتی بخود بگیرد. با توجه به اینکه پس از مرحله سردشدن، تنش با زمان تغییر نکرده و روندی ثابت را طی می‌کند، لذا این تنش به عنوان تنش پسماند در جسم باقی می‌ماند.

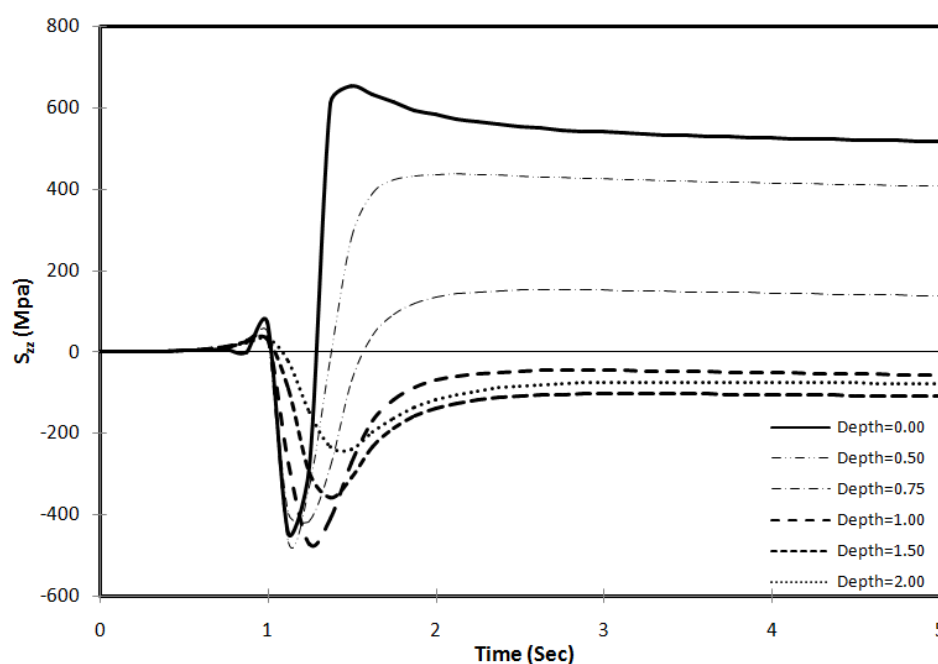
نکته دیگری که باید راجع به این پروسه بیان شود این است که به دلیل کاهش تنش تسلیم با افزایش دما ممکن است بعضاً نقاطی وارد ناحیه پلاستیک شده و از قوانین الیستیک پیروی نکند. لذا مطابق شکل (۱۳) تا عمق ۱ میلیمتری قطعه تنش پسماند کششی بخود می‌گیرند و پس از آن در عمق‌های بیشتر از ۱ میلیمتر تنش‌های پسماند فشاری است. مسلماً با افزایش دما در نزدیکی سطح، تنش اعمال‌شده به سطح بیشتر است، بطوریکه بیشترین تنش اعمالی در سطح قطعه و با دورشدن از سطح این تنش کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- تغییرات تنش در راستای طولی در سخت‌کاری با اشعه لیزر در توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه تا عمق ۲ میلیمتر

#### ۴-۲-۲- تنش در راستای عرضی ( $S_{zz}$ )

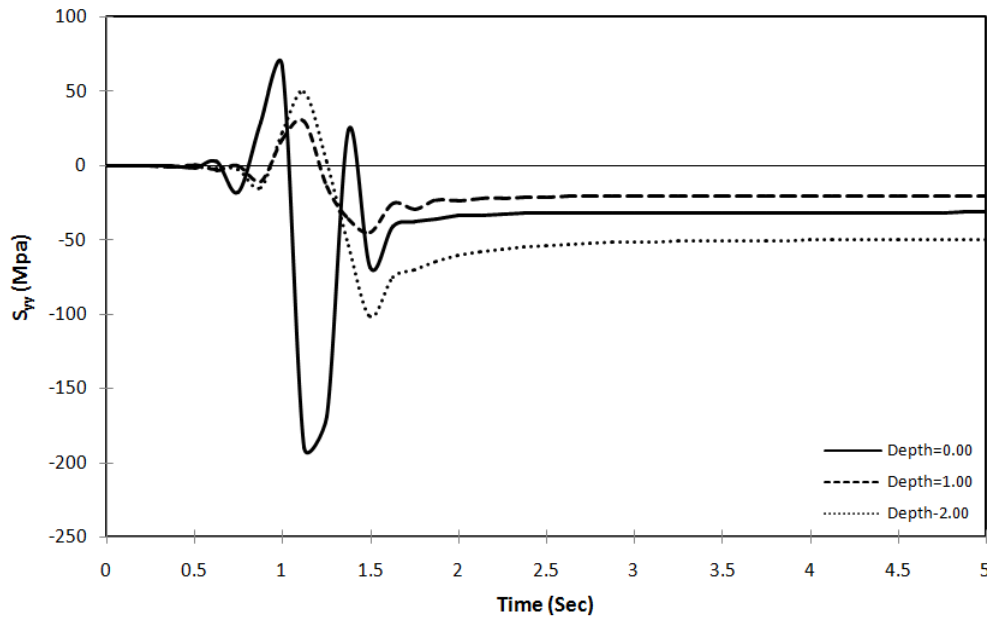
همانند تنش در راستای طولی، تنش در راستای عرضی هم روندی مشابه با تنش در راستای طولی دارد. شکل (۱۴) کاملاً این روند را نشان می‌دهند. آنچه از اهمیت بسزائی برخوردار است، این است که در حین اعمال اشعه به ناحیه موردنظر تنشی منفی به سطح و نقاط زیر آن القا می‌گردد. اما با سرد شدن ناگهانی در این پروسه تنش روندی معکوس را طی نموده و نهایتاً مقداری کششی بخود می‌گیرد.



شکل ۱۴- تغییرات تنش در راستای عرضی بر حسب زمان در سخت‌کاری با اشعه لیزر در توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه از سطح قطعه‌کار تا عمق ۱ میلی‌متر

#### ۴-۲-۳- تنش در راستای عمودی ( $S_{yy}$ )

با توجه به اینکه جهت عمودی در راستای تابش اشعه به سطح می‌باشد، تنش در این راستا منفی است. طبق شکل (۱۵) تنش پسماند ایجادشده در راستای عمودی فشاری است. این مقدار منفی در عمق خاصی به ماکزیمم مقدار خود رسیده و بعد از آن روندی ثابت بخود می‌گیرد. نکته مهمی که باید راجع به تنش در این راستا ذکر گردد، این است که مقدار تنش ایجادشده در این راستا در مقایسه با مقدار تنش‌های بوجودآمده در راستای طولی و عرضی بسیار کمتر است.

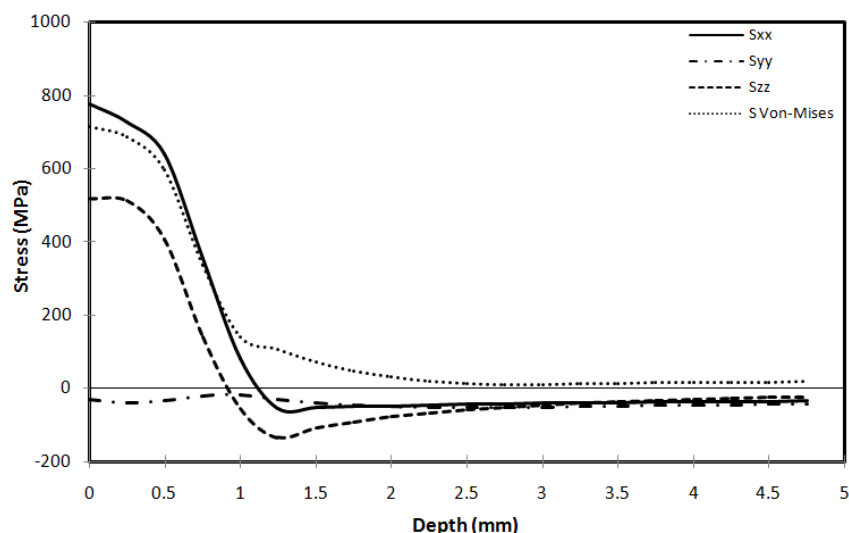


**شکل ۱۵-** تغییرات تنش در راستای عمودی بر حسب زمان در سخت کاری با اشعه لیزر در توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه از سطح قطعه کار تا عمق ۰/۷۵ میلیمتر

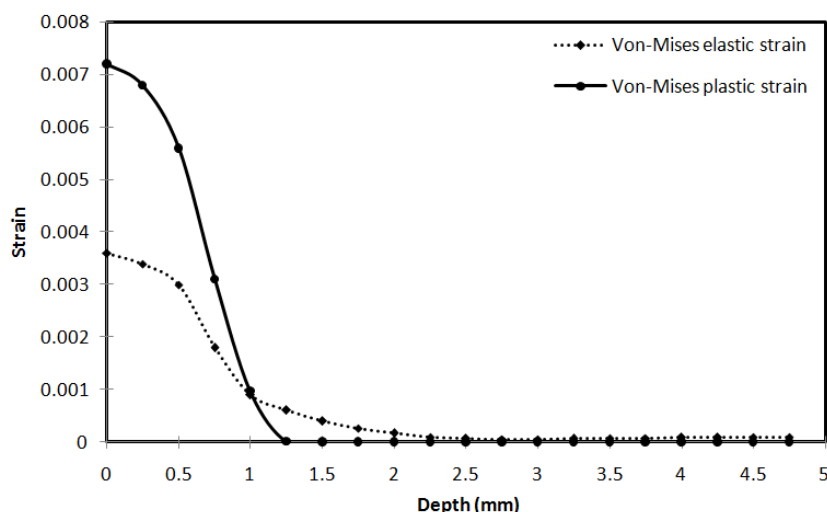
#### ۴-۲-۴- تنش پسماند ایجاد شده بر حسب عمق

شکل (۱۶) مقدار تنش پسماند بوجود آمده در جهات مختلف را بر حسب عمق قطعه کار نشان می دهد. طبق این شکل و با توجه به توضیحات قسمت قبل، تنش در سطح و نقاط نزدیک به آن در راستاهای طولی و عرضی کششی و از عمق ۱/۱ میلیمتر به بعد فشاری است. همچنین تنش پسماند در راستای عمودی در سطح و کلیه نقاط زیر آن منفی است. اما اندازه آن در مقایسه با تنشها در دیگر راستاها بسیار کمتر است. تقریباً از عمق ۲/۵ میلیمتر به بعد تنش پسماند در کلیه راستاها با یکدیگر برابر می شود. همچنین شکل (۱۷) مقدار کرنش الاستیک و پلاستیک فون-میزز بر حسب عمق قطعه کار را نشان می دهد. مطابق این شکل سطح قطعه تا عمق ۱/۲۵ میلیمتر کاملاً وارد ناحیه پلاستیک شده و از عمق ۱/۲۵ میلیمتر به بعد ماده کاملاً رفتاری الاستیک دارد. همانطور که بیان شد، این پدیده به دلیل کاهش تنش تسلیم ماده با افزایش دماست. لازم بذکر است که دلیل بوجود آمدن تنش کششی در سطح تا عمق ۱/۲۵ میلیمتر رفتار پلاستیک ماده است.





شکل ۱۶- تغییرات تنش پسماند ایجادشده در پروسه سخت کاری با اشعه لیزر بر حسب عمق قطعه کار در توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه



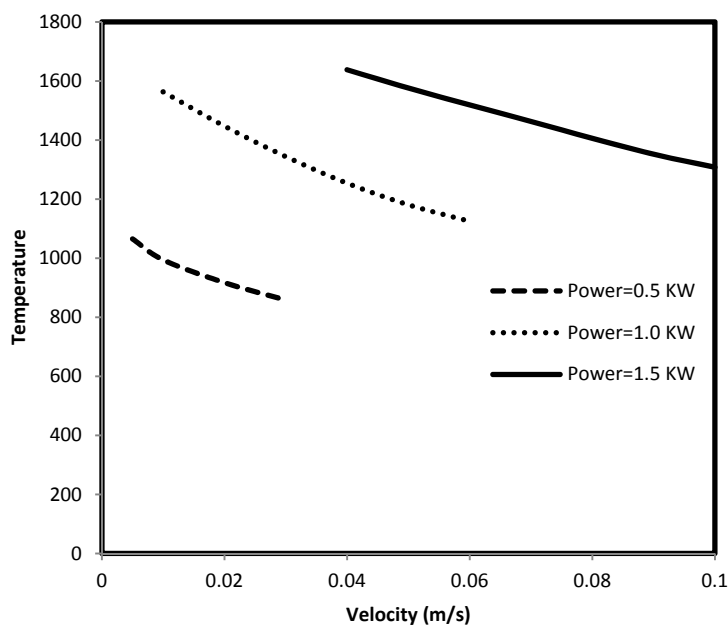
شکل ۱۷- تغییرات کرنش فون- میزز الاستیک و پلاستیک بر حسب عمق در پروسه سخت کاری با اشعه لیزر برای توان ۱ کیلووات و سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه

## ۵- تاثیر توان و سرعت بر تنش پسماند

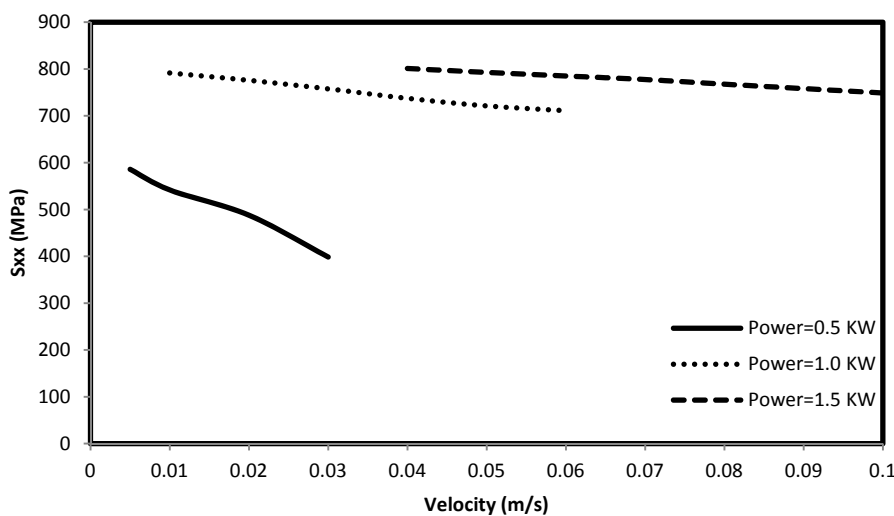
شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) تاثیر توان و سرعت اشعه لیزر بر تنش پسماند ایجادشده در راستاهای مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول که ابعاد اشعه لیزر  $2/5\text{mm} \times 2/5\text{mm}$  است، با افزایش سرعت، از تنش در راستای طولی کاسته می‌شود. اما نکته مهمی که در این قسمت وجود دارد این است که میزان افزایش یا کاهش تنش پسماند ارتباط تنگاتنگی با محدوده دمایی سطح قطعه مورد نظر دارد. بطوریکه اگر محدوده دمایی فولاد مورد نظر بین ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ کلوین باشد، میزان تغییرات تنش بسیار ناچیز است. زیرا مطابق شکل (۶) در این محدوده، تغییرات سه پارامتر اصلی تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و مدول سخت‌شوندگی با دما بسیار ناچیز می‌باشد. اعداد استخراج شده در توان ۱/۵ کیلووات صحت گفته‌های فوق را تایید می‌کند. اما در محدوده دمایی کمتر از ۱۳۰۰ کلوین بدلیل اینکه میزان تغییرات این سه پارامتر با دما قابل ملاحظه

است، لذا تغییرات تنش پسماند نیز در این محدوده زیاد می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۸) ملاحظه می‌گردد، در توان ۰/۵ کیلووات و در سرعت‌های مختلف، محدوده دمایی سطح بین ۸۵۰ تا ۱۰۶۵ کلوین است و در این محدوده میزان تغییرات تنش پسماند قابل ملاحظه است.

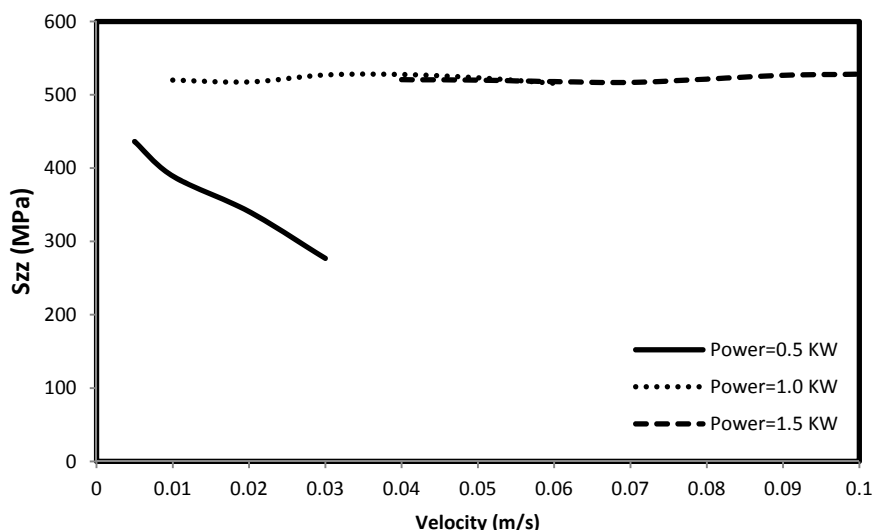
بطور کلی با افزایش توان در یک سرعت ثابت، بر تنش موثر ایجادشده روی سطح افزوده می‌شود. در حالیکه با افزایش سرعت در یک توان ثابت از مقدار این تنش کاسته می‌شود. همچنین مطابق شکل‌های ترسیم‌شده میزان تاثیرگذاری توان اشعه لیزر بر تنش به مراتب بیشتر از اثر سرعت حرکت اشعه لیزر می‌باشد. لازم بذکر است به دلیل کوچک‌بودن مقادیر تنش در راستای عمودی در مقایسه با راستاهای طولی و عرضی، از آوردن شکل مربوط به این تنش صرف‌نظر گردیده است. اما تنش رفتار تنش معادل در شکل (۲۱) آورده شده است.



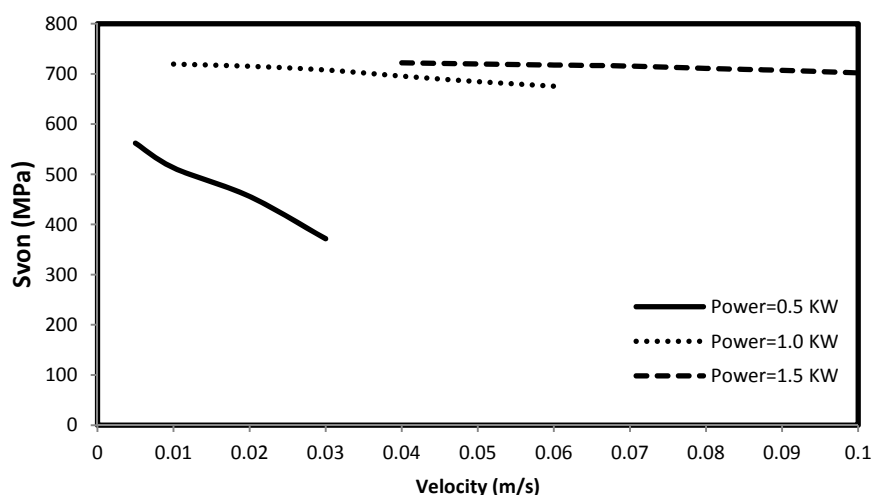
شکل ۱۸- تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای سطح قطعه‌کار



شکل ۱۹- تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای تنش در راستای طولی در سطح قطعه‌کار



شکل ۲۰- تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای تنش در راستای عرضی در سطح قطعه کار



شکل ۲۱- تاثیر سرعت و توان اشعه لیزر بر دمای تنش در راستای عرضی در سطح قطعه کار

## ۶- نتیجه گیری

پروسه سخت کاری با اشعه لیزر که به منظور کاهش سایش قطعات مورد استفاده قرار می گیرد تا به حال از دیدگاه های متالورژیکی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهایی نظیر عمق سخت شده و رفتار سیکل دمایی در حین این پروسه از جمله مواردی است که به آن پرداخته شده است. اما یکی از نکات اساسی در رابطه با این پروسه اطلاع از چگونگی میدان تنش بوجود آمده در حین این پروسه و نهایتاً اثر این پروسه بر تنش پسماند ایجاد شده بر روی سطح قطعه کار است. لذا با توجه به موارد اشاره شده در مقاله مذکور می توان نتایج زیر را برشمرد:

۱. تطابق کیفی نتایج شبیه سازی حرارتی سیکل دمایی پروسه سخت کاری با اشعه لیزر در این مقاله با نتایج آزمایشگاهی قابل قبول است. زمان فعل و انفعال سیکل مذکور باید در محدوده اشاره شده در شکل (۱) قرار گیرد.

۲. طبق شکل (۱۱) نرخ سردشدن در سطح قطعه کار بیش از سایر نقاط است. با دورشدن از سطح در جهت عمق قطعه، این نرخ حالت نزولی بخود می‌گیرد.
۳. بهترین محدوده مجاز برای سخت‌کاری، دمایی بین دمای آستنیت و نقطه ذوب است. در سخت‌کاری با اشعه لیزر حتماً باید پارامترهای موردنظر طوری انتخاب گردد که دمای ماکزیمم سطح در حین این پروسه به این محدوده خاص برسد.
۴. با افزایش دو تا شش برابری سرعت در یک شدت توان ثابت، دمای سطح قطعه کار به ترتیب از ۷ تا ۲۶ درصد کاهش می‌یابد. زیرا افزایش سرعت موجب جذب کمتر اشعه لیزر شده و به تبع آن موجب کاهش دما می‌گردد. همچنین افزایش دو برابری توان لیزر در پروسه سخت‌کاری با اشعه لیزر موجب افزایش ۳۶ درصدی دمای سطح می‌گردد.
۵. تنش پسماند ایجاد شده در یک قطعه کار بر روی سطح در جهات طولی و عرضی کششی بوده و در جهت اعمال اشعه لیزر فشاری است. اما مقدار تنش پسماند در راستای اعمال اشعه نسبت به دو راستای دیگر بسیار کمتر است.
۶. بیشترین تنش بوجودآمده در راستاهای طولی و عرضی در سطح قطعه کار بوده و با دورشدن از سطح قطعه مقدار این تنش کاهش می‌یابد.
۷. یکی از فاکتورهای تاثیرگذار بر تنش پسماند ایجادشده در قطعه کار نرخ سردشدن ناحیه تاثیرپذیر از گرما با زمان است. هر چه که این نرخ زیادتر باشد، تنش پسماند کششی بوجود آمده بیشتر خواهد بود. زیرا با تطبیق سیکل حرارتی نقاط مختلف با تنش پسماند ایجادشده در آن می‌توان گفت که افزایش عمق قطعه که دارای نرخ سردشدن کمتری است، موجب کاهش تنش پسماند کششی می‌شود.
۸. با دورشدن از سطح قطعه کار در جهت عمق از تنش پسماند کششی کاسته می‌شود. از عمق معینی به بعد تنش‌های پسماند در تمام راستاها فشاری است که این می‌تواند مفید باشد.
۹. با تحلیل‌های انجام‌شده واضح است که میزان تاثیرگذاری توان اشعه لیزر بر تنش به مراتب بیشتر از اثر سرعت حرکت اشعه لیزر می‌باشد.

## مراجع

- [1] Totten, G.E., and Fasm, P. D., "Steel Heat Treatment Handbook-equipment and Process Design", 2<sup>nd</sup> Edition, Taylor and Francis, New York, (2007).
- [2] Wang, X. F., Lu, X. D., Chen, G. N., Hu, Sh. G., and Su, Y. P., "Research on the Temperature Field in Laser Hardening", Journal of Optics and Laser Technology, Vol. 38, pp. 8-13, (2006).
- [3] Komanduri, R., and Hou, Z. B., "Thermal Analysis of the Laser Transformation Hardening Process", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 2845-2862, (2001).

- [4] Wu, W., Liang, N. G., Gan, C. H., and Yu, G., "Numerical Investigation on Laser Transformation Hardening with Different Temporal Pulse Shapes", *Journal of Surface Coating and Technology*, Vol. 200, pp. 2686-2694, (2006).
- [5] Yao, J., Zhang, Q., Kong, F., and Ding, Q., "Laser Hardening Technique on Steam Turbine Blade and Application", *Journal of Physics and Procedia*, Vol. 5, pp. 399-406, (2010).
- [6] Miokovic, T., Schulze, V., Vohringer, O., and Lohe, D., "Influence of Cyclic Temperature Changes on the Microstructure of AISI 4140 after Laser Surface Hardening", *Journal of Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 589-599, (2007).
- [7] Patwa, R., and Shin, Y. C., "Predictive Modeling of Laser Hardening of AISI 5150H Steels", *International Journal of Machine and Manufacture*, Vol. 47, pp. 307-320, (2007).
- [8] Woo, H. G., and Cho, H. S., "Three-dimensional Temperature and Stress Distribution in Laser Surface Hardening Process", *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 213, pp. 695-712, (1999).
- [9] Hosseini Tehrani, P., and Hosseini Godarzi, A. R., "Dynamic Crack Analysis under Thermal Shock Considering Lord-Shulman Theory", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 43, pp. 1003-1010, (2004).
- [10] Anon, E., "*Metals Handbook*", American Society of Metals, 9<sup>th</sup> Edition, Ohio, USA, (1978).
- [11] Kuhlman, C., Sehitoglu, H., and Gallagher, M., "The Significance of Material Properties on Stresses Developed during Quenching of Railroad Wheels", *Proc. ASME/IEEE Railroad Conference*, pp. 55-63, Tokyo, Japan, (1988).
- [12] Marceline, J. L., Abouaf, M., and Chenot, J. L., "Analysis of Residual Stresses in Hot Rolled Complex Beams", *Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 56, pp. 1-16, (1986).
- [13] Leighton, A. K., and Perlman, A. B., "Residual Stresses in Quenched Solid and Hollow Cylinders with Application to Railroad Axles", *ASME Transportation Systems*, DSC-54/DE-76, (1994).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$C_p$ : ضریب گرمای ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم کلوین

$C_p^*$ : ضریب گرمای ویژه بی بعد

$C_n$ : ثابت دلخواه

$d$ : ارتفاع قطعه کار بر حسب متر

$E$ : مدول یانگ بر حسب گیگاپاسکال

$E^*$ : مدول یانگ بی بعد

- $E_p$ : مدول سخت‌شوندگی بر حسب گیگاپاسکال
- $E_p^*$ : مدول سخت‌شوندگی بی‌بعد
- $h$ : ضریب جابجایی بر حسب وات بر متر مربع کلوین
- $K$ : ضریب هدایت گرمایی بر حسب وات بر متر کلوین
- $K^*$ : ضریب هدایت گرمایی بی‌بعد
- $Q$ : شدت توان اشعه لیزر بر حسب وات بر متر مربع
- $r$ : فاصله یک نقطه دلخواه از مرکز هندسی مقطع تابش اشعه لیزر بر حسب متر
- $S_y$ : تنش تسلیم بر حسب مگاپاسکال
- $S_y^*$ : تنش تسلیم بی‌بعد
- $S$ : اپراتور تبدیل لاپلاس
- $t$ : زمان بر حسب ثانیه
- $T$ : دما بر حسب کلوین
- $T^*$ : دمای بی‌بعد
- $T_0$ : دمای محیط بر حسب کلوین
- $v$ : سرعت حرکت اشعه لیزر بر حسب متر بر ثانیه
- $X$ : مولفه طولی دستگاه مختصات ثابت بر حسب متر
- $x$ : مولفه طولی دستگاه مختصات متحرک بر حسب متر
- $Y$ : مولفه عمودی دستگاه مختصات ثابت بر حسب متر
- $y$ : مولفه عمودی دستگاه مختصات متحرک بر حسب متر
- $Z$ : مولفه عرضی دستگاه مختصات ثابت بر حسب متر
- $z$ : مولفه عرضی دستگاه مختصات متحرک بر حسب متر
- $\alpha$ : ضریب انبساط حرارتی ماده بر حسب یک بر کلوین
- $\alpha^*$ : ضریب انبساط حرارتی بی‌بعد
- $\beta_1$ : نسبت ضریب تبادل گرما به ضریب هدایت حرارتی در سطح تحتانی قطعه‌کار بر حسب یک بر متر
- $\beta_2$ : نسبت ضریب تبادل گرما به ضریب هدایت حرارتی در سطح فوقانی قطعه‌کار بر حسب یک بر متر
- $\varepsilon$ : ضریب صدور بدون بعد
- $\xi$ : ضریب تبادل گرما بر حسب وات بر متر مربع کلوین
- $\nu$ : ضریب پواسون
- $\rho$ : چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب
- $\sigma$ : ثابت بولتزمن بر حسب وات بر متر مربع کلوین به توان چهار
- $\sigma_{ii}$ : تانسور تنش بر حسب مگاپاسکال
- $\phi$ : ضریب پخش ماده بر حسب وات متر مربع بر ژول
- $\omega$ : ثابت دلخواه

**Abstract**

Because of residual stress induction, Laser transformation hardening (LTH) process decrease corrosion by creating a surface hardened layer. In this paper with coding of indirect method of thermal-structural coupling in ANSYS software for obtaining of residual stress, the FEM model of LTH process has been simulated and its thermal cycle has been compared with experimental results. Checking the simulation outputs show that the obtained results in this study are in good agreement with experimental data. After validating of this model, the effect of laser parameters such as power and travelling speed has been investigated and the residual stress field on surface and below it has been studied. Results show that stress creating by LTH on the surface of workpiece is tensile and in specified depth is compressive.