



بررسی تنش پسماند میلگرد کوئنچ تمپر شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود و روش تجربی

سید احسان رضوی^۱، پژمان تقی پور بیرگانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

نویسنده مسئول: Pz.taghipour@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

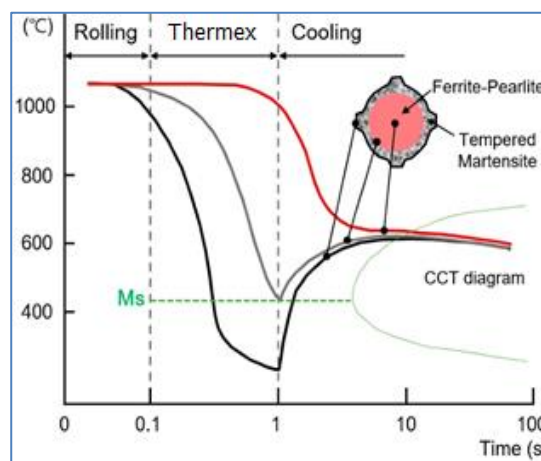
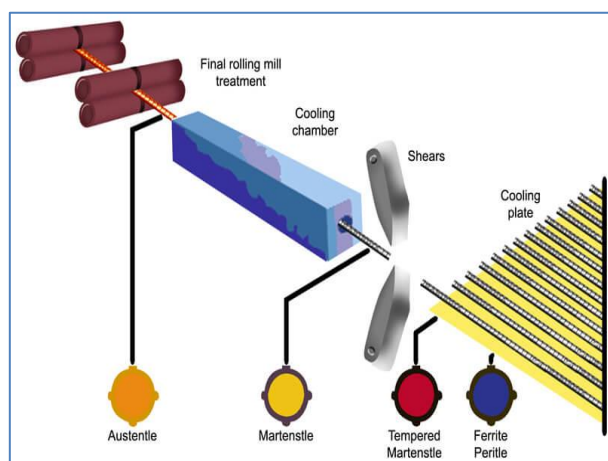
چکیده

یکی از روش‌های رایج در تولید محصول میلگرد فولادی با استحکام تسلیم حداقل ۵۰۰ مگاپاسکال، استفاده از عملیات کوئنچ تمپرینگ با نام تجاری ترمکس می‌باشد. کاهش هزینه خرید مواد اولیه و بهبود خواص مکانیکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از این عملیات در خطوط تولید می‌باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند ترمکس با هدف درک تأثیر عملیات کوئنچ و تمپرینگ روی تنش‌های پسماند میلگرد سائز ۲۵ میلی‌متر با استفاده از نرم افزار انسیس انجام شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمون تجربی کرنش سنجی سوراخ مقایسه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود نشان می‌دهد که تنش پسماند فون میسز به مقدار ۱۵۵/۶ مگاپاسکال در مرکز سطح مقطع میلگرد سائز ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین نتایج آزمون مشخص می‌نماید که تنش پسماند فشاری در مرکز سطح مقطع نمونه در عمق‌های مختلف بین ۲۵۶ تا ۲/۰۰۲ میلی‌متر دارای مقادیری بین ۸۵ تا ۱۹۴/۵ مگاپاسکال و در این آزمون تنش به عمق سوراخکاری وابسته می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: میلگرد فولادی، کوئنچ و تمپرینگ، اجزاء محدود، تنش پسماند، کرنش سنجی سوراخ

مقدمه

امروزه یکی از روش‌های تولید محصول میلگرد فولادی با استحکام تسلیم حداقل ۵۰۰ مگاپاسکال استفاده از عملیات کوئنچ تمپرینگ می‌باشد. مرحله اول عملیات کوئنچ تمپرینگ بدین صورت است که میلگرد خروجی از استند نهایی نورد گرم که دمایی در حدود ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد دارد وارد محفظه کوئنچ می‌گردد. در این شرایط به دلیل سرعت بالای خنک کاری، سطح میلگرد سخت و شکننده می‌شود ولی مرکز میلگرد همچنان نرم و منعطف باقی می‌ماند. محفظه کوئنچ شامل تعدادی کولر بوده که براساس اندازه محصول تولیدی و سرعت خطی میلگرد عبوری تعیین می‌گردد. در مرحله دوم پس از خروج میلگرد از محفظه کوئنچ، میلگرد روی بستر خنک کننده و در معرض خنک کاری طبیعی با هوا قرار می‌گیرد. در این شرایط به دلیل گرمی مرکز میلگرد و سرد شدن سطح آن، انتقال حرارت از مرکز به سطح انجام می‌شود و طی این فرآیند ساختار سطح میلگرد که در مرحله قبل سخت و شکننده شده بود تغییر می‌کند و شکنندگی جای خود را به چقرمگی بالا می‌دهد و محصول این فرآیند دارای سختی سطحی بالا و انعطاف پذیری در مرکز میلگرد می‌باشد. در شکل (۱) منحنی دما - زمان فرآیند و همچنین فازهای تشکیل شده به صورت شماتیک در سطح مقطع میلگرد و شکل (۲) موقعیت قرارگیری محفظه کوئنچ در فرآیند نورد میلگرد را نشان می‌دهند. هنگام انجام کوئنچینگ، به دلیل خنک شدن سریع تر سطح نسبت به هسته همواره مواد مختلف تحت تنش‌های انقباضی سطحی قرار می‌گیرند. به علاوه اگر تغییر فاز در حین کوئنچینگ ایجاد شود، تنش‌های تغییر فاز نیز به تنش‌های انقباضی فوق اضافه می‌گردد [۱]. حیدری قلعه و عزیزاده [۲] تأثیر نرخ خنک کاری بر روی ضخامت لایه مارتنزیت تشکیل شده روی سطح میلگرد را بررسی نمودند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که فشار سیستم خنک کاری، زمان خنک کاری و آنالیز شیمیایی تأثیر اصلی را بر ضخامت لایه مارتنزیت و استحکام کششی خواهند گذاشت. همچنین هوسنی و همکاران [۳] روشی برای پیش بینی ریزساختار داخلی و خواص مکانیکی کلیمیلگردهای کوئنچ شده براساس آنالیز شیمیایی، سائز میلگرد، پارامترهای فرآیند تولید و فرضیات شبیه‌سازی ارائه نمودند. سه مدل متوالی پیشنهاد شده عبارتند از: (۱) مدل سازی دمایی برای پیش بینی پروفیل دمایی میلگرد (۲) مدل متالورژیکی برای تخمین تغییرات ریزساختار داخلی میلگرد (۳) مدل رگرسیون براساس قانون اختلاط جهت پیش بینی خواص مکانیکی. در نهایت روش پیشنهادی یک راه حل آسان، سریع و اقتصادی برای دستیابی به خواص مکانیکی در فرآیند کوئنچ میلگرد تشخیص داده شد.



شکل ۲: موقعیت قرارگیری محفظه کوئنچ در فرآیند نورد میلگرد [۲]

شکل ۱: منحنی دما - زمان فرآیند ترمکس [۱]

روش تحقیق

در این مقاله، ابتدا روابط انتقال حرارت حاکم بر خنک‌کاری میلگرد و رابطه محاسبه ضریب انتقال حرارت در فرآیند کوئنچ براساس پارامترهای موثر بر آن برای میلگرد سایز ۲۵ میلی‌متر بدست آمد. سپس با استفاده از مقادیر تجربی پارامترهای بکار رفته در دستورالعمل‌ها و جداول شرکت دانیلی^۱ ایتالیا مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه و در شبیه‌سازی فرآیند کوئنچ - تمپرینگ با نرم افزار اجزا محدود انسیس مورد استفاده قرار گرفت.

روابط انتقال حرارت حاکم بر شبیه‌سازی اجزاء محدود

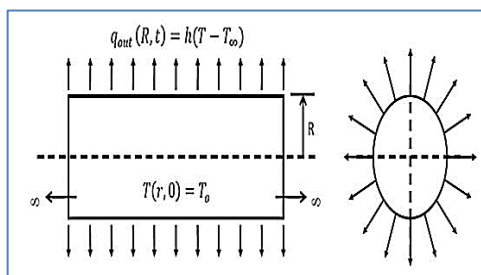
به دلیل اهمیت نرخ انتقال گرما و رفتار دمایی میلگرد کوئنچ شده و همرفت آن به سیال آب مجاور، معادلات مربوط به انتقال حرارت در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال گرما در میلگرد از نوع رسانشی خواهد بود. همچنین انتقال گرما در راستای محوری به دلیل اختلاف دمای جزیی در طول میلگرد در مقایسه با انتقال گرما در راستای شعاعی میلگرد قابل صرفنظر کردن می‌باشد. مدل حرارتی براساس حل عددی معادله انتقال حرارت رسانشی ناپایدار جهت تعیین توزیع دما بر حسب زمان در سطح مقطع میلگرد به صورت معادله زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱)$$

در این رابطه r شعاع میلگرد، t زمان خنک‌کاری، k ضریب هدایت حرارتی ماده، p چگالی، C_p گرمای ویژه، T دما می‌باشد.

شرایط مرزی مسئله

شکل (۳) شرایط مرزی مسئله را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳: شرایط مرزی مسئله [۴]

^۱ Danieli



در مرکز سطح مقطع میلگرد:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2)$$

در سطح بیرونی میلگرد:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h[T(r, t) - T_{\infty}] \quad (3)$$

در این معادله T_{∞} دمای سیال آب مجاور و h ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب و میلگرد می‌باشد. ضریب انتقال حرارت آب در طول مدت خنک کاری با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$h = \frac{\{(0.023)(Pr)^{0.3}(Re)^{0.8}\}}{Dh} \quad (4)$$

در این معادله Dh قطر هیدرولیکی می‌باشد که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$(Dh = \frac{4A}{p}) \quad (5)$$

$$(p = 2\pi \frac{(Rc+R)}{2}) \quad (6)$$

$$A = \text{Area} = A = \pi\{(Rc)^2 - (R)^2\} \quad (7)$$

در این روابط، Pr عدد پرانتل، Re عدد رینولدز، p محیط قسمت مرطوب، Rc شعاع لوله خنک کننده، R شعاع میلگرد کوئنچ شده می‌باشد.

$$Re = \frac{(V_{\text{relative}} \times \rho_{\text{water}} \times Dh)}{\nu} \quad (8)$$

$$V_{\text{water}}(\text{water velocity}) = \frac{Q_{\text{per nozzle}}}{A} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{Cp \times \nu}{k} \quad (10)$$

که ν ویسکوزیته دینامیکی، ρ_{water} چگالی سیال آب و V_{relative} سرعت نسبی بین سرعت سیال آب و میلگرد در حال عبور می‌باشد. نرخ جریان در نازل خنک کننده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_{\text{کولر}} = \frac{\text{نرخ جریان کلی در محفظه کوئنچ}}{\text{تعداد کولرهای فعال در محفظه}} \quad (11)$$

$$V_{\text{relative}} = |v_{\text{water}} - \bar{v}| \quad (12)$$

$\bar{v}$ سرعت خطی (متر بر ثانیه) میلگرد بوده که توسط دستگاه رابط اندازه‌گیری^۱ کنترل می‌گردد [۴-۶]. رابطه بین دبی و فشار سیال براساس شکل هندسی نازل پاشش آب در یک کولر محفظه کوئنچ به صورت رابطه (۱۳) می‌باشد [۷]:

$$Q = k\sqrt{p} \quad (13)$$

که در آن p فشار (بار) و Q نرخ جریان عبوری (متر مکعب بر ساعت) و k ضریب ثابت می‌باشد.

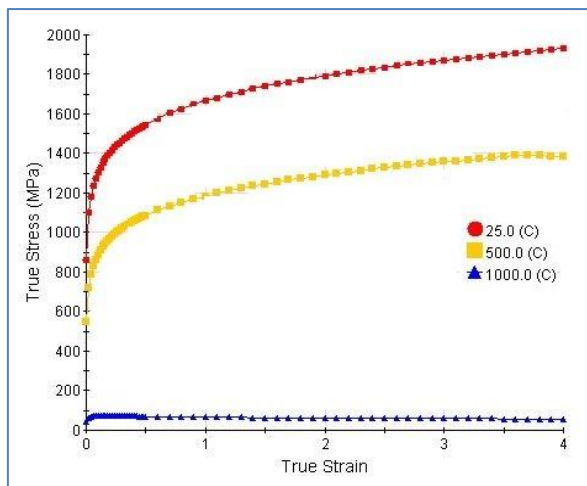
شبیه‌سازی اجزاء محدود

شبیه‌سازی اجزاء محدود به دو مرحله اصلی شبیه‌سازی حرارتی و شبیه‌سازی و تحلیل تنش پسماند ایجاد شده تقسیم می‌گردد. شبیه‌سازی حرارتی در دو مرحله کوئنچ توسط سیال آب و مرحله تمپرینگ در مجاورت هوای محیط انجام می‌شود. فرآیند شبیه‌سازی به این صورت می‌باشد، که ابتدا یک قطعه میلگرد سایز ۲۵ و طول ۱۰۰ میلی‌متر مطابق با ابعاد ذکر شده در استاندارد ۳۱۳۲ در نرم افزار سالیدورکز ۲۰۱۸ مدل سازی شده و به نرم افزار انسیس ۲۰۲۲ وارد می‌گردد. خواص مکانیکی فولاد 5SP مورد استفاده از جدول (۱) در میلگرد آجدار مطابق استاندارد GOST 5781 شامل نمودار تنش- کرنش، مدول

^۱ Human Machine Interface (HMI)



یانگ و ضریب انبساط حرارتی در دماهای مختلف با استفاده از نرم افزار جی مت پرو^۱ محاسبه شده و در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. شکل (۴) نتایج نمودار تنش و کرنش در دماهای مختلف و جدول (۲) مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش در دماهای مختلف

جدول ۱: ترکیب شیمیایی بیلت گرید 5SP بر حسب درصد وزنی مطابق با استاندارد GOST

Cu	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C
(حداکثر)	(حداکثر)	(حداکثر)	(حداکثر)	(حداکثر)			
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۵ - ۰/۸	۰/۱۵ - ۰/۳	۰/۲۸ - ۰/۳۷

جدول ۲: مقادیر مورد نیاز جهت شبیه‌سازی اجزا محدود

دمای میلگرد	مدت زمان کوئنچ	ضریب انتقال حرارت سیال با میلگرد	ضریب انتقال حرارت هوا	دمای آب	دمای هوا	ضریب تابش فولاد
۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد	۱/۴ ثانیه	۵۰ kw/m ² .c	۲۵ w/m ² .c	۳۵ درجه سانتی‌گراد	۴۰ درجه سانتی‌گراد	۰/۸۵

جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب و میلگرد عبوری از درون لوله‌های کولر موجود در محفظه کوئنچ از پارامترهای ذکر شده در دستورالعمل‌های شرکت دانیلی ایتالیا مطابق جدول (۳) استفاده گردید. مقدار این پارامترها به عواملی از قبیل: آنالیز شیمیایی شمش، قطر میلگرد و همچنین خواص مکانیکی مطلوب برای میلگرد تولید شده بستگی دارد.

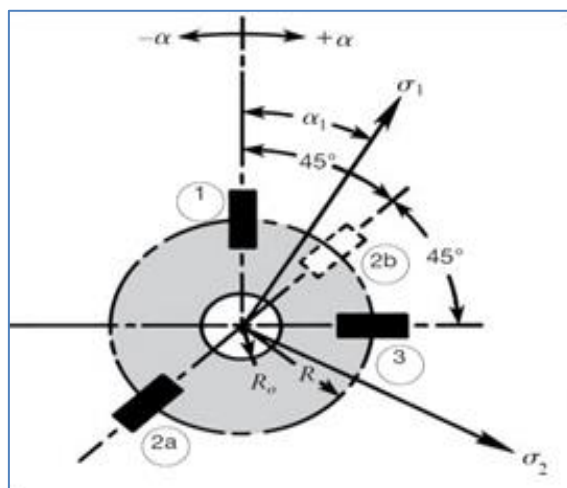
جدول ۳: پارامترهای تنظیم محفظه کوئنچ برای تولید محصول قطر ۲۵ میلی‌متر

سرعت خطی نورد متر بر ثانیه	قطر داخل لوله کولر میلی‌متر	فشار آب بار	دمای آب درجه سانتی‌گراد	ضریب k	دبی آب مترمکعب بر ساعت
۵	۴۰	۱۳	۳۵	۱۰-۱۶	۲۸۸

اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کرنش سنجی سوراخ

در این روش مطابق استاندارد ASTM E837 یک سوراخ کوچک در صفحه حاوی تنش ایجاد می‌شود. با ایجاد این سوراخ، تنش‌های باقیمانده در اطراف سوراخ آزاد می‌شود که می‌توان با قرار دادن کرنش سنج در اطراف سوراخ مقدار تنش آزاد شده را اندازه‌گیری نمود. شکل (۵) نحوه نصب کرنش‌سنج بر روی نمونه را نشان می‌دهد [۸].

^۱ JMatPro



شکل ۵: نحوه نصب کرنش سنج در روش سوراخ مرکزی [۸]

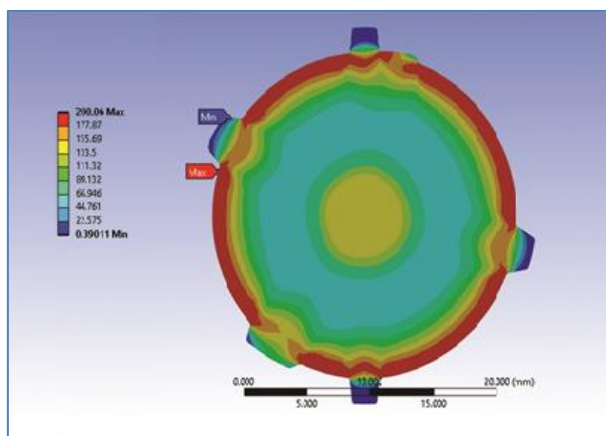
مطابق شکل ابتدا سه کرنش سنج با زاویه ۱۲۰ درجه روی صفحه قرار داده می‌شود و در مرکز محل بین سه کرنش سنج، سوراخی ایجاد می‌شود. با ایجاد سوراخ و آزاد شدن تنش، مقدار کرنش در محل تغییر می‌کند که این تغییر توسط کرنش سنج‌ها ثبت می‌شود. جهت آماده سازی نمونه مطابق شکل (۶) با استفاده از دستگاه وایرکات ابتدا یک قطعه از سطح مقطع میلگرد قطر ۲۵ میلی‌متر کوئنچ شده به ضخامت ۱۰ میلی‌متر برش داده شد.



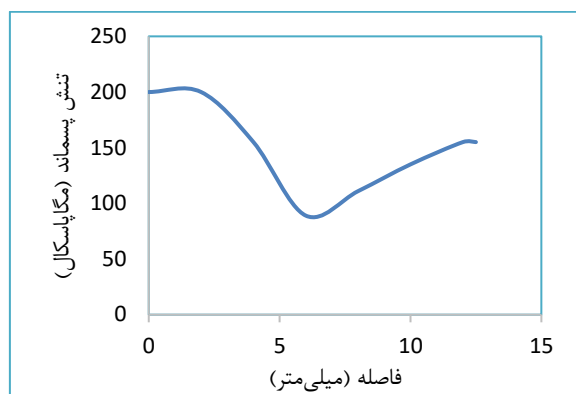
شکل ۶: تصویر نمونه قبل و بعد از آزمون کرنش سنجی سوراخ

نتایج و بحث

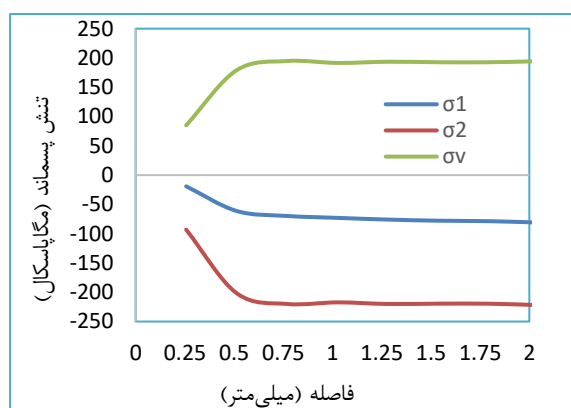
نتایج آنالیز اجزا محدود جهت اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح مقطع میلگرد در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه گردیده است. در این مرحله داده‌های مربوط به نتایج تست تنش پسماند استخراج شد. این نتایج به نرم افزار Excel انتقال داده شد و در این نرم افزار عمل تحلیل داده‌ها انجام و منحنی تنش پسماند مطابق شکل (۹) رسم گردید.



شکل ۷: تنش پسماند فون میسز موجود در سطح مقطع میلگرد قطر ۲۵ میلی‌متر



شکل ۸: منحنی تنش پسماند بر حسب فاصله از سطح بیرونی میلگرد قطر ۲۵ میلی‌متر



شکل ۹: نمودار مقادیر آزمون تنش پسماند مرکز سطح مقطع میلگرد بر حسب فاصله از سطح

آزمون کرنش سنجی سوراخ بر اساس ابعاد نمونه و مطابق با استاندارد ASTM E837 در ۸ مرحله روی مرکز سطح مقطع میلگرد و به فاصله عمق ۰/۲۵ میلی‌متر انجام و ثبت گردید و تا عمق ۲/۰۰۲ میلی‌متر ادامه پیدا کرد. طبق رابطه (۱۴) تنش‌های صفحه‌ای اصلی به تنش فون میسر تبدیل گردید که نتایج به صورت جدول (۴) می‌باشد:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (14)$$

که در آن σ_v تنش فون میسر، σ_1 و σ_2 به ترتیب تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه می‌باشند.

جدول ۴: نتایج آزمون تنش پسماند کرنش سنجی بر حسب فاصله از سطح

عمق میلی‌متر	تنش اصلی بیشینه σ_1 مگاپاسکال	تنش اصلی کمینه σ_2 مگاپاسکال	تنش فون میسر σ_v مگاپاسکال
۰/۲۵۶	-۱۹/۱۴۵	-۹۳/۰۵۹	۸۵/۱۱۷
۰/۵۱۳	-۶۱/۲۳۷	-۲۰۱/۶۲۷	۱۷۹/۰۴۲
۰/۷۶۹	-۶۹/۷۳۵	-۲۲۰/۰۲۴	۱۹۴/۷۵۶
۱/۰۲۶	-۷۳/۰۰۷	-۲۱۷/۲۴	۱۹۱/۴۷۶
۱/۲۸۲	-۷۵/۹۱۷	-۲۱۹/۹۶۶	۱۹۳/۵۱۸
۱/۵۳۹	-۷۷/۸۴۶	-۲۱۹/۴۴۲	۱۹۲/۶۹۷
۱/۷۹۵	-۷۸/۶۶۱	-۲۱۹/۵۵۱	۱۹۲/۶۶۵
۲/۰۰۲	-۸۱/۰۴۸	-۲۲۱/۹۵	۱۹۴/۵۳



نتیجه گیری

مطابق نتایج جداول و نمودارها مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تنش پسماند فون میسر در ناحیه زیر سطح بیرونی میلگرد به اندازه ۲۰۰ مگاپاسکال ایجاد شده است و در قسمت مرکز سطح مقطع مقدار تنش پسماند به اندازه ۱۵۵/۶ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج آزمون نشان می‌دهد که تنش پسماند فشاری در مرکز سطح مقطع نمونه در عمق‌های مختلف بین ۰/۲۵۶ تا ۲/۰۰۲ میلی‌متر دارای مقادیری بین ۸۵ تا ۱۹۴/۵ مگاپاسکال می‌باشد و در این آزمون تنش به عمق سوراخکاری وابسته می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که از آزمون برش^۱ برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح مقطع میلگرد استفاده گردد.

مراجع

- [1] Shahul Hameed, M. Z., Wölfle, C. H., Robl, T., Obermayer, T., Rappl, S., Osterminski, K., Krempaszy, C., Werner, E., (2021). Parameter Identification for Thermo-Mechanical Constitutive Modeling to Describe Process-Induced Residual Stresses and Phase Transformations in Low-Carbon Steels, Appl. Sci. <https://doi.org/10.3390/app11020550>.
- [2] Heidari Ghaleh, M., Alizadeh, K., (2011). Effect of cooling rate on quenched & tempered steel rebar properties, International Conference on Martensitic Transformations.
- [3] Hosny, S., Gepreel, M., Ibrahim, M., Bassuony, A., (2020). Simulation of Tempcore Process for 500 MPa Steel Bars, The Korean Institute of Metals and Materials. 27(9), pp 3359-3370.
- [4] Ahmed, E., Ibrahim, S., Galal, M., Elnekhaily, S., Allam, T., (2021). Microstructure and Mechanical Properties of V-Alloyed Rebars Subjected to Tempcore Process, Metals. <https://doi.org/10.3390/met11020246>.
- [5] Khalifa, H., Megahed, G., (2016). Experimental investigation and simulation of structure and tensile properties of Tempcore treated rebar, Journal of Materials Processing Technology, 230, pp 245-253.
- [6] Sankar, I., Rao, M., (2010). Prediction of heat transfer coefficient of steel bars subjected to Tempcore process using nonlinear modeling, Int J Adv Manuf Technol, pp 1159-1166.
- [7] Durisotti, M., (2014). Danieli Structure Control System for QTB Functional and Operative Manual.
- [8] Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method, ASTM Standard E – 837.

¹ Slitting Method