

شبیه‌سازی تنش‌های باقیمانده و اعوجاج استوانه‌های فولادی در عملیات حرارتی سخت کاری

محمد مهدی خرمی‌راد^۱، محمدرضا ابوطالبی^۲، محمد تقی صالحی^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

Mm2006kh@yahoo.com

چکیده

عملیات حرارتی یکی از فرآیندهای تمام کاری قطعات فولادی و چدنی است که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص نهایی محصول دارد. از مهمترین عیوب ناشی در عملیات حرارتی تنش‌های حرارتی ایجاد شده در حین فرآیند می‌باشد که تاثیر منفی بر تolerانس ابعادی داشته و در صورت عدم کنترل می‌تواند باعث ایجاد ترک و اعوجاج در نمونه گردد. شبیه‌سازی انتقال حرارت و آنالیز تنش‌های ایجاد شده در ضمن عملیات حرارتی، به عنوان یک ابزار توانمند می‌تواند در بهینه‌سازی شرایط عملیات حرارتی جهت کنترل عیوب مربوطه کمک نماید. لذا تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی انتقال حرارت و بررسی اعوجاج و تنش‌های ایجاد شده در نمونه‌های سیلندر فولادی انجام گردیده است. در این پژوهش ضمن توسعه یک مدل سه بعدی انتقال حرارت و آنالیز تنش برای استوانه فولادی کربنی ساده با ترکیب معین با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و مقایسه نتایج به دست آمده با مدل حاضر با نتایج موجود در منابع، تاثیر ابعاد نمونه بر عیوب ناشی از فرآیند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

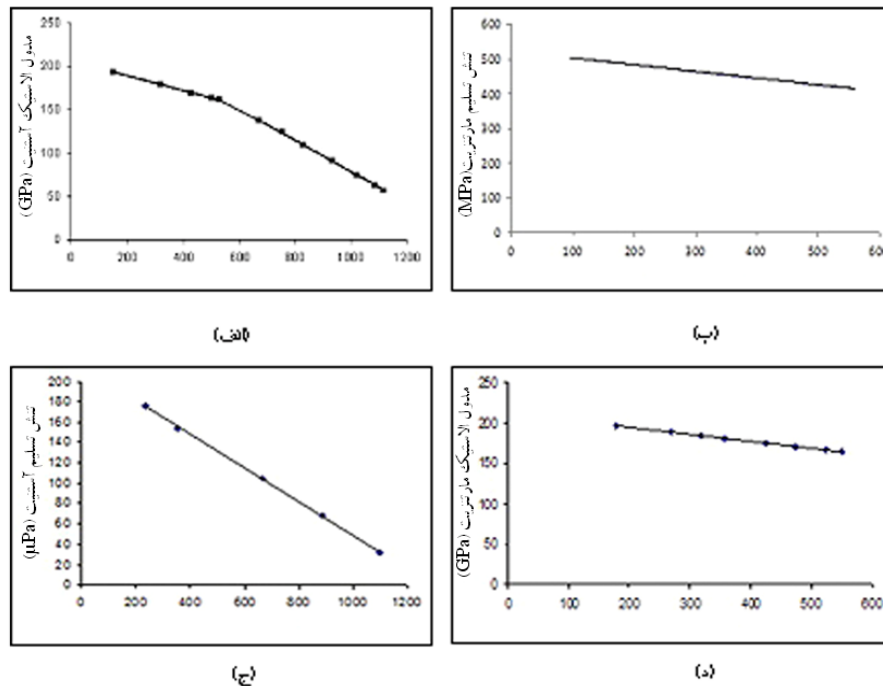
واژه‌های کلیدی:

عملیات حرارتی، شبیه‌سازی، اعوجاج.

۱- مقدمه

کاربرد عملیات حرارتی می‌شوند. کوئنچ کردن فرآیندی است که فولاد تا بالای دمای آستنیت گرم می‌شود و سپس تا دمای اتاق بوسیله اسپری کردن مایعات و یا غوطه‌وری در یک حمام مایع، سرد می‌شود. قطعات کوئنچ شده دارای خواص مطلوبی مانند: سختی زیاد، ریزساختار مناسب، مقاومت سایشی و خواص

عملیات حرارتی فلزات و آلیاژهای فلزی شامل فرایند گرم و سرد شدن یک فلز جامد و آلیاژ برای به دست آوردن ویژگی‌های خاص تعریف می‌شود. بسیاری از قطعات فلزی مورد استفاده در صنایع مختلف برای بهبود بخشیدن خواص مکانیکی، قبل از



شکل (۱): مدول پلاستیک، مدول الاستیک و تنش تسلیم در فازهای آستنیت و مارتنزیت در فولاد کربنی ۰.۲٪.

ترم منبع حرارتی درونی در معادله هدایت حرارتی فوریه را ارائه داد. دنیس و همکارانش، برهمکنش‌های استحاله فازی - تنش را مرور کرد و بعضی از اصول اساسی در محاسبه تنش‌های درونی را ارائه کرد.

لبلودن، کوپل مکانیکی - متالورژیکی را با بررسی پلاستیسیته استحاله و اثر تنش بر رفتار استحاله فازی را مطالعه کردند. آریموتو و اینویو، براساس تئوری متالوترمو مکانیکی فرآیند عملیات حرارتی را شبیه‌سازی کردند. گیور و تکایا، یک مدل المان محدود برای پیش‌بینی توزیع دمایی و تنش/ کرنش در حین کوئنچ اجزای فولادی مقارن توسعه داد. اثر هندسه نمونه بر توزیع تنش‌های باقیمانده و میکروساختار برای فولادهای کم آلیاژی و کربنی ساده تمپر شده و کوئنچ شده توسط، گیور و لتایا، به صورت تجربی انجام شد.

خستگی خوب می‌باشند که این تغییرات خواص از تغییرات فازی رخ داده در حین کوئنچ ناشی می‌شود. استحاله مارتنزیتی در حین کوئنچ ممکن است اعوجاج زیاد، تنش‌های باقی‌مانده و رشد ترک در بعضی از مناطق قطعه ایجاد کند. به همین دلیل پیش‌بینی و کنترل فرآیند کوئنچ از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. اغلب مهندسين برای کنترل فرآیند کوئنچ از سعی و خطا و آزمایشات استفاده می‌کنند که هر دو وقت‌گیر و هزینه‌بردار می‌باشد، بنابراین نیاز بحرانی برای یک مدل شبیه‌سازی کامپیوتری موثر و قابل اعتماد در این فرآیند وجود دارد.

یو و همکارانش، مطالعات گسترده‌ای بر تولید تنش حرارتی در حین کوئنچ استوانه‌های فولادی با قطرهای مختلف انجام داده‌اند. اریکسون و همکارانش، تنش‌های باقیمانده در اثر کوئنچ فولادهای کربوره شده را پیش‌بینی کردند و فرناندس به همراه همکارانش، یک مدل ریاضی برای حل مدل استحاله فازی توام با مدل انتقال حرارت در حین فرآیند کوئنچ با اضافه کردن یک

- اثر حالت تنش بر ساختار متالورژیکی صرف نظر می‌شود [۲].

۲-۱- آنالیز انتقال حرارت

برای بررسی و محاسبه دقیق تنش/ کرنش ایجاد شده در اثر عملیات حرارتی لازم است تا توزیع دما با گذشت زمان در قطعه معین باشد. انتقال حرارت ناپایدار در قطعه در حین عملیات کوئنچ به صورت ریاضی با معادله هدایت حرارت فوریه نشان داده می‌شود این معادله به فرم کلی به صورت زیر می‌باشد.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

در طی رخ دادن یک استحاله فازی، گرمای نهان آزاد می‌شود که نرخ تولید حرارت درونی در واحد حجم Q در اثر آزاد شدن این گرمای نهان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q = \sum \Delta H_i \frac{df_i(T)}{\Delta t} \quad (2)$$

ΔH_i ، گرمای نهان آزاد شده به دلیل تشکیل فاز i و $f_i(T)$ تغییر کسر حجمی فاز i در زمان Δt می‌باشد.

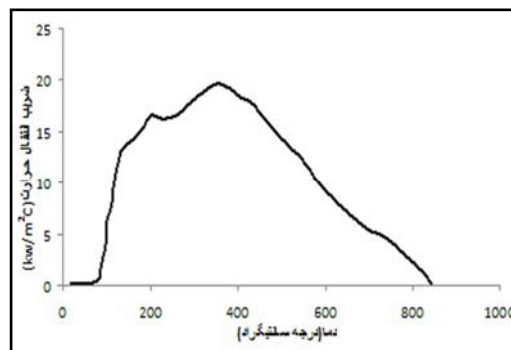
شرایط اولیه و مرزی برای حل معادله انتقال حرارت باید در نظر گرفته شود. در ابتدا دمای همه نقاط برابر دمای آستنیتیه فرض می‌شوند:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (3)$$

سطح قطعه که در تماس با محیط کوئنچ است، شرط مرزی جابجایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) + h(T_s - T_\infty) + q = 0 \quad (4)$$

K هدایت حرارتی فلز، ρ و C_p و q و h به ترتیب دانسیته، گرمای ویژه، فلاکس حرارت در سطح و ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط کوئنچ می‌باشد. دمای محیط کوئنچ تابعی از زمان است و در انتها برابر مقدار ثابت T_∞ می‌شود. این خواص مواد وابسته به دما و فازهای فولاد هستند. سطوح متقارن و سطوحی که در تماس با محیط کوئنچ نیستند، فرض می‌شوند فلاکس حرارتی در این سطوح صفر در نظر گرفته می‌شود [۱ و ۳].



شکل (۲): ضریب انتقال حرارت آب.

نهایتاً گیور و سیمسیر، اثر هندسه نمونه بر توزیع تنش باقیمانده و اعوجاج در حین کوئنچ استوانه‌های تراش کاری شده با شکل‌های غیر متقارن بدون استحاله فازی را بررسی کرد [۱].

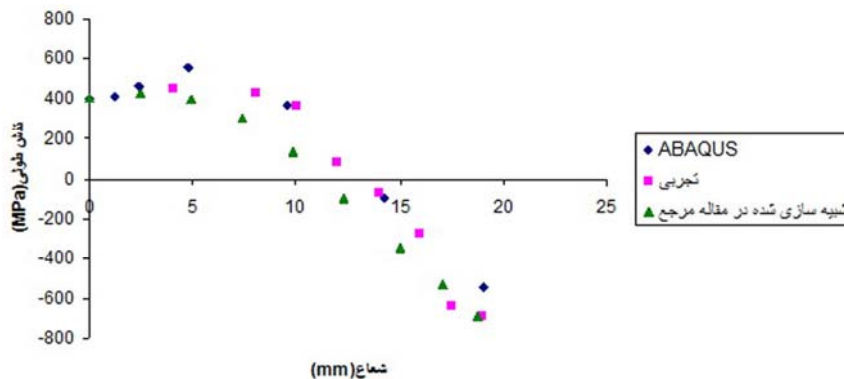
تعداد زیادی بسته‌های کامپیوتری براساس آنالیز المان محدود برای حل مسائل تنوع سازه‌ای و مکانیک جامدات توسعه یافته‌اند که می‌توان نرم‌افزارهای ABAQUS، ANSYS و NASTRAN را نام برد. طبیعت پیچیده‌ی عملیات حرارتی فولادها، نیاز به نرم‌افزار FEM برای مدل‌سازی برهمکنش استحاله فازی، دما و تنش را ضروری ساخته است.

در این تحقیق، از نرم افزار تجاری المان محدود ABAQUS برای شبیه‌سازی توزیع دما، تنش‌های باقی‌مانده و اعوجاج ناشی از آن در فرآیند سخت گردانی کوئنچ استفاده شد. در ابتدا شبیه‌سازی نمونه استوانه فولادی انجام شده و با نتایج موجود در منابع مقایسه شده و با اطمینان از صحت مدل‌سازی، شبیه‌سازی تنش‌های باقیمانده در سیلندرهای فولادی ۰/۲٪ کربن انجام شد.

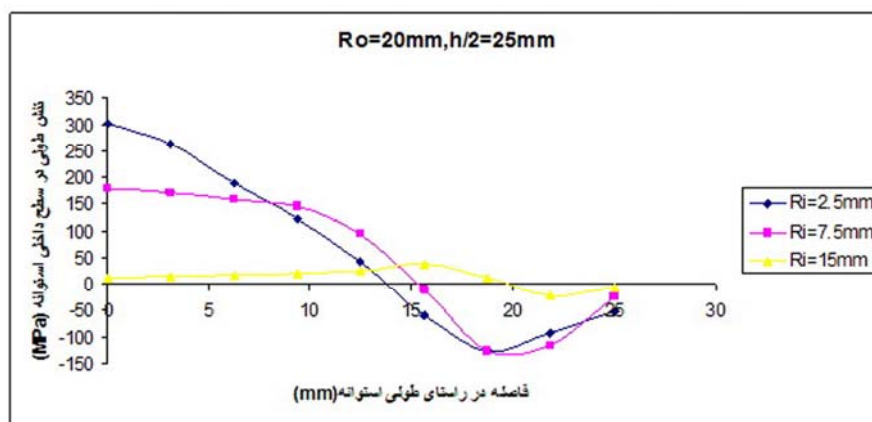
۲- روش تحقیق

یک مدل شبیه‌سازی فرآیند عملیات حرارتی خوب شامل سه بخش آنالیز استحاله فازی، آنالیز دما و آنالیز تنش می‌باشد. اما بدلیل پیچیدگی روابط و مشکل بودن شبیه‌سازی می‌توان از بعضی روابط غیرضروری صرف نظر کرد. بنابراین در اکثر موارد دو فرض زیر انجام می‌گیرد:

- از اثر میدان تنش - کرنش بر توزیع دما صرف نظر می‌شود.



شکل (۳): مقایسه نتایج شبیه‌سازی استوانه توپر با نتایج تجربی و شبیه‌سازی توسط کانگ و همکارانش.



شکل (۴): تنش طولی باقیمانده در راستای طولی استوانه.

۲-۲ - آنالیز تنش

نمو کرنش حرارتی در هر dt با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d\varepsilon_{ij}^{th} = \alpha dT \delta_{ij} \quad (6)$$

dT نمو دما، α ضریب انبساط حرارتی و δ_{ij} دلتا کرانکر می‌باشد.

کرنش فازی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d\varepsilon_{ij}^{ph} = \frac{\Delta V}{3V} df \delta_{ij} \quad (7)$$

$\frac{\Delta V}{V}$ تغییرات حجم فاز استحاله یافته و df نمو کسری فاز شکل گرفته در نمو زمانی dt می‌باشد.

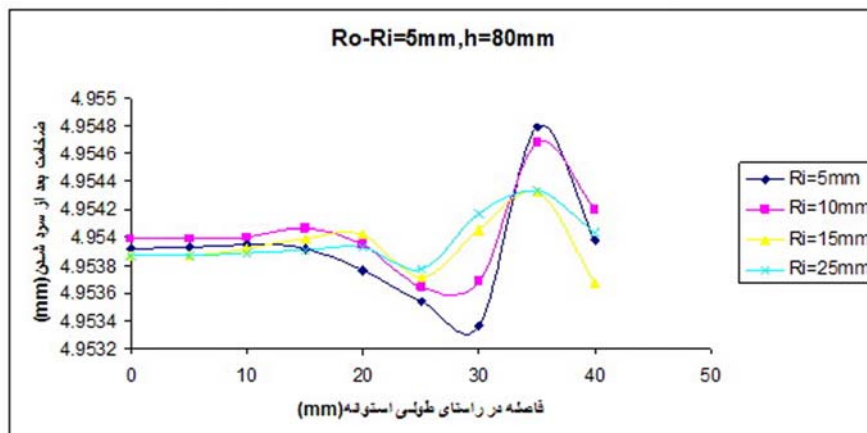
نمو کرنش پلاستیک استحاله برای کوئچ طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود که به صورت تجربی محاسبه شده است [۴].

$$d\varepsilon_{ij}^{tp} = 3K(1 - f_m) s_{ij} df_m \quad (8)$$

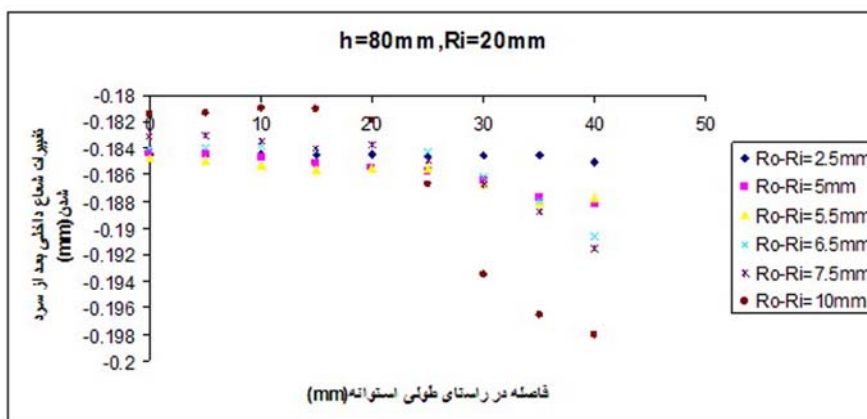
با عملیات حرارتی یک قطعه فولادی تنش‌های درونی توسط گرادیان‌های حرارتی زیاد، کرنش‌های فازی و تغییرات خواص مواد ایجاد می‌شود. با صرف نظر کردن از اثرات حالت تنش بر توزیع دما، آنالیز هدایت حرارتی را تماماً با آنالیز تنش حل کرده و این به این معنا می‌باشد که توزیع دما و فاز به دست آمده از آنالیز دما به عنوان ورودی برای آنالیز تنش می‌باشد. نمو کرنش کل که در حین فرآیند سرد شدن پیوسته تولید می‌شود، مجموع نمونه‌های کرنش‌های مستقل، طبق رابطه‌ی زیر می‌باشد:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^{th} + d\varepsilon_{ij}^{ph} + d\varepsilon_{ij}^{tp} \quad (5)$$

که در این رابطه $d\varepsilon_{ij}^e$ ، نمو کرنش الاستیک، $d\varepsilon_{ij}^p$ نمو کرنش پلاستیک، $d\varepsilon_{ij}^{th}$ نمو کرنش حرارتی، $d\varepsilon_{ij}^{ph}$ نمو کرنش فازی و $d\varepsilon_{ij}^{tp}$ نمو کرنش پلاستیسیته می‌باشد.



شکل (۵): تغییرات ضخامت در راستای طولی استوانه.



شکل (۶): تغییرات شعاع داخلی در راستای طولی استوانه.

$$(d\varepsilon^p) = d\lambda \frac{(\partial f)}{\partial(\sigma)} \quad (10)$$

$d\lambda$ یک ثابت تناسب غیر منفی است که ممکن است در طول تاریخچه بارگذاری تغییر کند. معادله بالا را قانون جریان همبسته می‌نامند، زیرا یکی از معیارهای تسلیم است که برای تعیین نمو کرنش پلاستیک به کار می‌رود [۵ و ۶].

۲-۳- استحاله فازی

در فرآیند کوئنچ، یک فولاد از دمای آستینیت سرد شده تا به دمای اتاق برسد. در طی سرد کردن، آستینیت با توجه به سرعت سرد کردن و عناصر آلیاژی موجود، به پرلیت، بینیت و مارتنزیت دگرگونی پیدا می‌کند [۷].

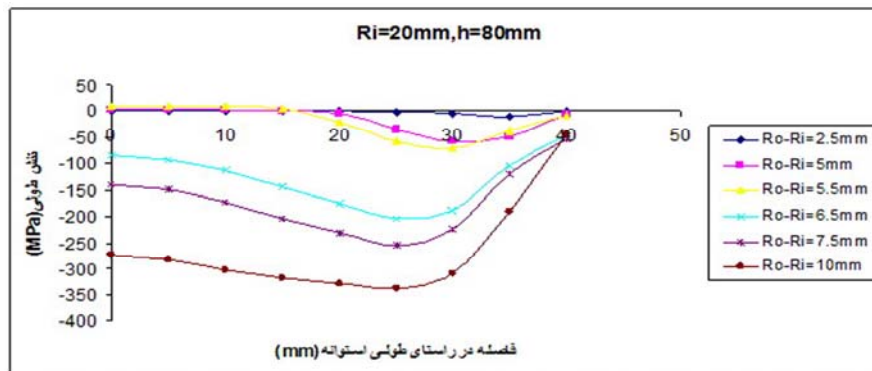
f_m کسر مارتنزیت، S_{ij} تانسور تنش انحرافی می باشد و K ثابتی است که به صورت تجربی محاسبه شده است.

نمو کرنش الاستیک و پلاستیک کلاسیک با رابطه سازگاری الاستیک-پلاستیک چند فازی محاسبه می‌شود. در محدوده‌ی الاستیک که تابع تسلیم فون میز بزرگتر از صفر است، فولاد به صورت ماده هموزن با خواص وابسته به دما عمل می‌کند.

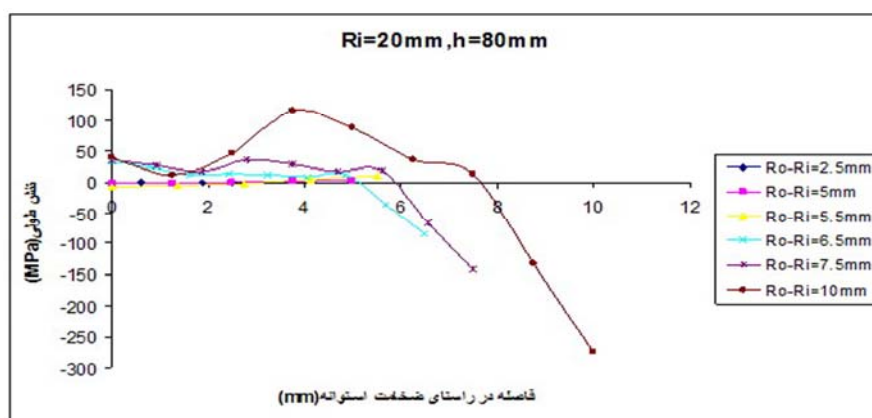
نمو کرنش الاستیک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d\varepsilon_{ij}^e = S_{ijkl} d\sigma_{kl} \quad (9)$$

S_{ijkl} تانسور ضعف الاستیک می‌باشد. نمو کرنش پلاستیک را می‌توان از معیار تسلیم (f) به صورت زیر به دست آورد:



شکل (۷): تنش طولی در راستای طولی استوانه با ضخامت‌های متفاوت



شکل (۸): تنش طولی در راستای ضخامت استوانه با ضخامت‌های متفاوت

که مواد هموژن باشند. خواص مواد مانند مدول یانگ، نسبت پواسون، تنش تسلیم اولیه و مدول پلاستیک به صورت ترکیب خطی از خواص هر فاز متناسب با کسر حجمی آنها می‌باشند.

$$p = \sum_i p_i f_i \quad (12)$$

P_i ویژگی ماده در فاز i و f_i کسر حجمی فاز i می‌باشند [۳].

۲-۴- شبیه‌سازی

روش المان محدود (FEM) به طور گسترده‌ای در روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری مسائل مهندسی استفاده شده است. هدف اصلی در روش اجزاء محدود، یافتن حل یک مسئله پیچیده از طریق جایگزینی آن با یک مدل ساده‌تر و سپس حل تقریبی آن می‌باشد.

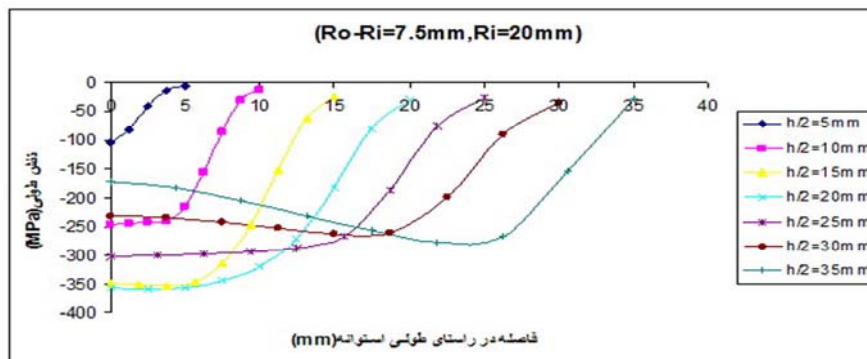
۲-۳- استحاله فازی

استحاله آستنیت به مارتنزیت، نفوذی نبوده و کسر حجمی مارتنزیت شکل گرفته شده توسط معادله Koistinen-Marburger [۸] تخمین زده می‌شود.

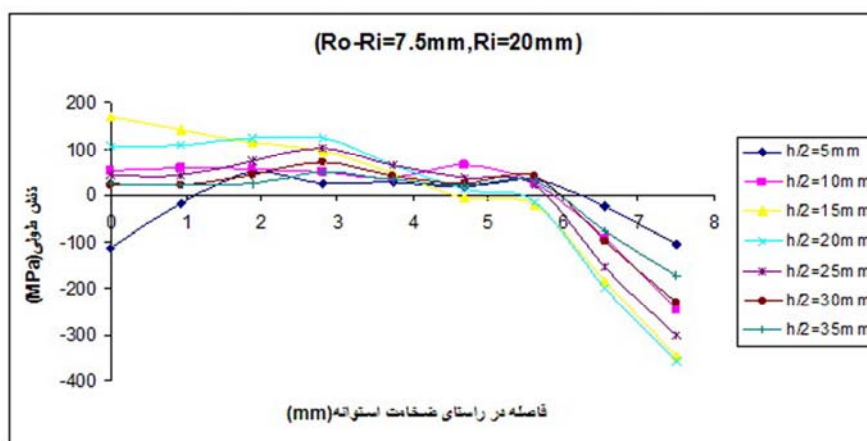
$$f_m = (1 - \sum_i f_i) [1 - e^{-\alpha(M_s - T)}] \quad (11)$$

f_m کسر حجمی مارتنزیت و M_s دمای شروع دگرگونی مارتنزیتی و M_f دمای پایانی دگرگونی مارتنزیتی و f_i کسر حجمی فاز غیر مارتنزیتی می‌باشند. در معادله بالا دیده می‌شود که در دمای اتاق هنوز ممکن است مقداری آستنیت باقی‌مانده وجود داشته باشد. Wang [۹]، نشان داد که این رویه یک تقریب خوب برای مدل کردن دگرگونی غیرایزوترمال می‌باشند.

در مدل خواص میانگین مواد (مدل ترکیبی)، با وجود چندین فاز به طور همزمان در فولاد در حین عملیات حرارتی فرض می‌شود



شکل (۹): تنش طولی در راستای طولی استوانه‌هایی با ارتفاع‌های متفاوت



شکل (۱۰): تنش طولی در راستای ضخامت استوانه‌هایی با ارتفاع‌های متفاوت

$[M]$ ، ماتریس جرم و $[K]$ ، ماتریس چقرمگی می‌باشد و $\{F\}$ ، $\{u\}$ ، $\{\ddot{u}\}$ ، به ترتیب بردار سرعت و بردار جابجایی گره و بردار بارگذاری مکانیکی می‌باشند [۱]. به دلیل رابطه‌ی غیر خطی میان تنش $\{\sigma\}$ و کرنش $\{\epsilon\}$ ، آنالیز الاستیک-پلاستیک معادله به دست آمده در معادله بالا یک معادله غیرخطی می‌باشد. برای حل این معادله غیرخطی روش‌های تکراری و آنالیز افزایشی معمولاً به کار برده می‌شود. در این تحقیق شبیه‌سازی توزیع دما، توزیع تنش و اعوجاج ناشی از آن در نمونه‌های استوانه‌ای جدار نازک فولاد کربنی ۰/۲٪ انجام شد. در ابتدا فرض شده که نمونه‌ها در دمای 850°C کاملاً آستنیت شده و سپس در محیط آب با دمای $22/5^{\circ}\text{C}$ کوئنچ شده‌اند.

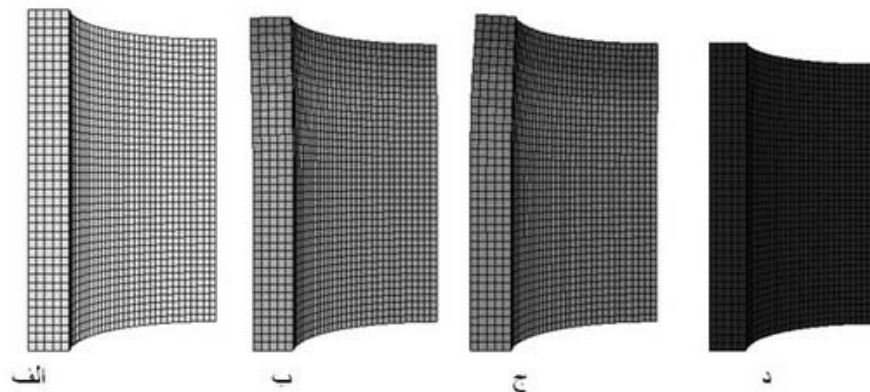
هنگام تحلیل یک مدل به روش المان محدود تعداد معادلات بسیار زیادی حاصل می‌شود که همزمان باید حل شود. حل این معادلات مستلزم زمان و محاسبات زیادی می‌باشد [۱۰].

معادله انتقال حرارت در بخش قبل معادله (۱) بیان شده است. این معادله به روش المان محدود به صورت زیر گسسته‌سازی می‌شود:

$$[H]\{T\} + [C]\{T\} = Q \quad (13)$$

$[H]$ و $[C]$ ماتریس گرمای ویژه و هدایت حرارتی می‌باشند و $\{T\}$ ، $\{\dot{T}\}$ بردارهای گرادیان دمایی و دمای گره می‌باشند. معادله کلی به دست آمده در آنالیز تنش به روش المان محدود به شکل زیر می‌باشد:

$$[M]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (14)$$



شکل (۱۱): تغییرات ابعادی در ۱/۸ استوانه، در زمان‌های الف) زمان اولیه ب) ۱.۵ ثانیه ج) ۲.۳ ثانیه د) ۱۰۰ ثانیه

تنش باقی‌مانده کششی و در سطح خارجی تنش باقی‌مانده فشاری داریم. این نوع توزیع تنش ناشی از استحاله مارتزیتی انقباض حرارتی می‌باشد. تنش فشاری در سطح در بهبود استحکام خستگی و مقاومت در برابر خوردگی تنشی و افزایش استحکام خمشی موثر می‌باشند ولی تنش کششی در سطح سبب کاهش عمر خستگی و استحکام اجزاء می‌شود که این حالت در استوانه‌های با قطر کوچک ایجاد خواهد شد.

با تأیید شدن مدل‌سازی فوق، تغییرات ارتفاع، شعاع داخلی و شعاع خارجی سیلندر فولادی در توزیع تنش‌های باقی‌مانده و اعوجاج در حین سرد شدن مورد بررسی قرار گرفت. در سه نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۵۰ و شعاع خارجی ۲۰ میلی‌متر تنش‌های باقی‌مانده در راستای طولی استوانه‌های مذکور پیش‌بینی شد شکل (۴). با افزایش شعاع داخلی و کاهش ضخامت استوانه، تنش باقی‌مانده کاهش یافته و به حالت الاستیک نزدیک می‌شود.

شکل (۵) نشان‌دهنده تغییرات ضخامت در طول استوانه‌هایی با ضخامت اولیه و ارتفاع یکسان و شعاع‌های داخلی متفاوت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی لبه استوانه که ماکزیمم تنش در آنجا وجود دارد، کاهش ضخامت بیشتری در مقایسه با سایر نقاط طول استوانه وجود دارد. هر چه شعاع داخلی استوانه کاهش می‌یابد میزان این کاهش ضخامت افزایش

به دلیل سرعت انتقال حرارت زیاد و ضخامت کم فرض شده است که آستنیت کاملاً به مارتزیت استحاله می‌یابد. در این شبیه‌سازی مدل پلاستیک، مدل الاستیک و تنش تسلیم فازهای آستنیت و مارتزیت مربوط به این فولاد طبق تحقیقات انجام شده توسط ناگاساکی و همکارانش [۶] و کانگ و همکارانش [۵] طبق شکل (۱) استفاده شد. تغییرات ضریب انتقال حرارت آب با دما نیز در شکل (۲) نشان داده شده است [۶].

شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار تجاری المان محدود ABAQUS 6.6 انجام شد. برای مش‌بندی دامنه حل از المان‌های هگزاهدرال (C3D8T) استفاده شد. به دلیل کاهش تعداد مش‌ها و زمان شبیه‌سازی، ۱/۸ نمونه شبیه‌سازی شد.

برای تأیید صحت مدل در ابتدا شبیه‌سازی برای یک نمونه استوانه‌ای توپر به ارتفاع ۷۶/۲ mm و شعاع ۱۹/۰۵ mm انجام شد. سپس در ادامه پژوهش شبیه‌سازی سیلندرهای فولادی با ابعاد هندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

تنش‌های باقی‌مانده طولی حاصل از شبیه‌سازی استوانه توپر در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نتایج حاصله تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی و تجربی انجام شده توسط کانگ و همکارانش [۵] برای نمونه مشابه دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مرکز

تغییرات تنش باقیمانده افزایش یافته است و همچنین در ضخامت‌های کم سطح داخلی استوانه در حالت الاستیک باقی‌مانده و تنش باقی‌مانده صفر می‌باشد در حالی که با افزایش کمی در ضخامت مشاهده می‌شود که تنش باقی‌مانده در سطح داخلی به صورت فشاری و در سطح خارجی به صورت کششی می‌باشد ولی با افزایش بیشتر ضخامت این پروفیل تنش به تنش فشاری در سطح خارجی و تنش کششی در سطح داخلی تغییر پیدا می‌کند. و با افزایش ضخامت مقدار تنش باقی‌مانده در سطح داخلی و خارجی افزایش پیدا می‌کند.

شکل (۹) تغییرات تنش طولی را در استوانه‌هایی با ارتفاع‌های مختلف و ضخامت و شعاع داخلی یکسان نشان می‌دهد. نتیجه آنکه در ضخامت ۷۵ میلی‌متر، تا ارتفاع ۳۵ میلی‌متر تنش باقی‌مانده فشاری در سطح خارجی افزایش یافته و سپس در ارتفاع‌های بیشتر، تنش باقی‌مانده فشاری کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد که تغییرات مقدار تنش در بین سطح داخلی و سطح خارجی استوانه‌ها به صورت قابل توجهی زیاد می‌باشد همچنین در نمونه‌های دارای ارتفاع کم در سطح خارجی و سطح داخلی تنش باقی‌مانده فشاری خواهیم داشت اما با افزایش ارتفاع در سطح داخلی تنش باقی‌مانده کششی و در سطح خارجی تنش باقی‌مانده فشاری خواهیم داشت. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات تنش باقی‌مانده بین سطح داخلی و خارجی تا ارتفاع ۳۵ میلی‌متر افزایش یافته و سپس کاهش یافته تا به یک پایداری نسبی برسد. با مشاهده شکل (۱۱) مشخص است که در طی عملیات کوئنچ ابعاد نمونه سیلندری به ارتفاع ۱۰۰، شعاع داخلی ۱۲ و شعاع خارجی ۱۵ میلی‌متر تغییر یافته است. در زمان اولیه شکل (۱۱-الف) فاز موجود در نمونه کاملاً آستنیت می‌باشد. با گذشت زمان و کاهش دما در نمونه انقباض حرارتی ایجاد شده شکل (۱۱-ب) و اعوجاج لبه‌های استوانه به سمت خارج رخ می‌دهد. در اثر کاهش دما انبساط در لبه‌ها ناشی از استحاله فاز آستنیت به فاز مارتزیت رخ می‌دهد شکل (۱۱-ج) که باعث اعوجاج لبه‌های استوانه به سمت داخل می‌گردد. نهایتاً با گذشت زمان و تشکیل فاز مارتزیت در تمام قطعه، در اثر

می‌یابد و این کاهش ضخامت به سمت لبه استوانه نزدیک‌تر می‌شود. با بررسی تغییرات شعاع داخلی بعد از سرد شدن در استوانه‌هایی با ارتفاع و ضخامت یکسان مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع داخلی استوانه، تغییرات شعاع داخلی افزایش یافته و افت و خیزهای مربوط به آن در نزدیکی لبه استوانه کاهش می‌یابد.

با مدل‌سازی سه نمونه سیلندری با ارتفاع و شعاع داخلی یکسان ($h/2=40\text{mm}$, $R_i=20\text{mm}$) و ضخامت‌های متفاوت مشاهده شد، با افزایش ضخامت به بیش از ۵/۵ میلی‌متر تنش باقی‌مانده طولی در سطح داخلی از حالت فشاری به کششی و در سطح خارجی از کششی به فشاری تغییر می‌یابد. همچنین در ضخامت‌های کمتر از ۵ میلی‌متر، در سیلندر فولادی تغییر فرم پلاستیکی رخ نداده است، زیرا در این حالت تنش‌ها در حد الاستیک می‌باشند.

شکل (۶) تغییرات شعاع داخلی استوانه را در استوانه‌هایی با ارتفاع و شعاع داخلی یکسان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه استوانه‌ها شعاع داخلی لبه نمونه‌ها نسبت به مرکز کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش ضخامت اولیه استوانه‌ها تغییرات شعاع داخلی در مرکز نمونه کمتر می‌شود اما در لبه‌ها شعاع داخلی بیشتر کاهش می‌یابد. که این نتیجه به دلیل شیب حرارتی بیشتر در لبه‌های استوانه می‌باشد.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت استوانه در حالتی که شعاع داخلی و ارتفاع استوانه در نمونه‌های مختلف یکسان می‌باشد، تنش طولی در راستای طول استوانه افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که ماکزیمم تنش فشاری در روی سطح با افزایش ضخامت به طرف مرکز ارتفاع جابجا می‌شود. مورد دیگری که در شکل قابل توجه می‌باشد این است که در ضخامت‌های کم، سطح داخلی و خارجی استوانه در حالت الاستیک باقی می‌ماند و تنش باقی‌مانده تقریباً صفر می‌باشد. شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت استوانه

۵- مراجع

- [1] Caner Simsir, C. Hakan Gur, 3D FEM simulation of steel quenching and investigation of the effect of asymmetric geometry on residual stress distribution, Department of Metallurgical and Materials Engineering, materials processing technology, December, 2007.
- [2] B. Fernandes, S. Denis, A. Simon. Mathematical model coupling phase transformation and temperature evolution during quenching of steels. materials science and technology, 1:838-844, October 1985.
- [3] Long Jin, simulation of quenching and tempering of steels, August 2001, Purdue University.
- [4] P.T. Rajeev, L. Jin, T.N. Farris and S. Chandrasekar. Simulation of the quenching of steels: Effects of different multiphase constitutive models. Proceeding of 19th ASM heat treating society conference, 1999.
- [5] Y.T. Im, S.H. Kang, Thermo-elasto-plastic finite element analysis of quenching process of carbon steel, materials processing technology, 381-390, 2007.
- [6] Seong-Hoon Kanga, Yong-Taek Imb, Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation, International Journal of mechanical Sciences, 423-439, 2007.
- [7] Albert G. Guy and John J. Herm. Element of physical Metallurgy. Addison Wesley, Reading, MA USA, third edition, 1994.
- [8] P. Koistinen and R.E. Maberger. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and carbon steels. Acta Metallurgica, 7:59, 1989.
- [9] K.F. Wang, S. Chandrasekar and H.T.Y. Yng. An efficient 2D finite element procedure for the quenching analysis with phase change. Journal of Engineering for industry, 115:124-138, 1993.

[۱۰] دکتر غلامحسین مجذوبی، مهندس فرزاد فریبا، روش

اجزاء محدود در مهندسی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا

۱۳۷۶.

شیب حرارتی منفی انقباض حرارتی به وجود می‌آید. و لذا ابعاد نهایی نمونه نسبت به زمانی که کاملاً آستنیته است شکل (۱۱-الف)، کوچکتر گشته و حالت بشکه‌ای ایجاد می‌شود.

۴- نتیجه گیری

- ۱- در فرآیند کوئنچ با کاهش ضخامت نمونه استوانه‌ای، تنش‌های باقیمانده کاهش یافته و تغییر فرم الاستیک رخ می‌دهد.
- ۲- در نمونه‌هایی با ارتفاع و شعاع داخلی یکسان، با افزایش ضخامت به بیش از مقدار معینی، تنش باقی‌مانده طولی در سطح داخلی از حالت فشاری به کششی و در سطح خارجی از کششی به فشاری تغییر می‌یابد.
- ۳- در لبه‌های استوانه، تغییرات شعاعی و اعوجاج در اثر فرآیند کوئنچ بیشتر از نقاط دیگر می‌باشد.
- ۴- در ضخامت‌های کم سطح داخلی استوانه در حالت الاستیک باقی‌مانده و تنش باقی‌مانده صفر می‌باشد و با افزایش کمی در ضخامت، تنش باقی‌مانده فشاری در سطح داخلی و تنش باقیمانده کششی در سطح خارجی می‌باشد با افزایش بیشتر ضخامت تنش فشاری در سطح خارجی و تنش کششی در سطح داخلی تغییر پیدا می‌کند.
- ۵- در نمونه‌های دارای ارتفاع کم در سطح خارجی و سطح داخلی، تنش باقی‌مانده فشاری خواهیم داشت اما با افزایش ارتفاع در سطح داخلی، تنش باقی‌مانده کششی و در سطح خارجی، تنش باقی‌مانده فشاری خواهیم داشت.
- ۶- در استحاله فازی آستنیته به مارتنزیت انبساط و انقباض حرارتی ناشی از شیب دمایی، سبب انقباض نمونه می‌شود. تغییر شکل پلاستیکی به دلیل انتقال حرارت زیاد و دگرگونی فازی بیشتر از مرکز می‌باشد.