

# بررسی کاهش سختی سطحی موضعی و آزادسازی تنش داخلی فولاد روتور

رضا جاهدی (مربی)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

غلامحسین فرهی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

اسماعیل پورسعیدی (استادیار)

بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان

آزادسازی تنش فولاد روتور که به صورت موضعی دچار افزایش سختی شده، با تعیین پارامترهای عملیات حرارتی همچون دما و زمان مورد توجه قرار گرفته است. پس از تعیین ارتباط بین سختی اندازه گیری شده و تنش پسماند داخلی ماده، با حل یک تحلیل المان محدود حرارتی - سازه‌یی و جفت کردن آن با پدیده خزش، مشخصات و روش اجرای عملیات حرارتی به منظور حذف تنش‌های داخلی مشخص شد. در روش دوم کاهش مستقیم سختی موضعی با توجه به تغییرات سختی با دما و زمان مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج با روش المان محدود و اجرای عملیات حرارتی مقایسه شد. هر سه روش با دقت بالایی آزادسازی تنش و کاهش سختی را در محدوده دمایی حدود ۶۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۵ تا ۶ ساعت تعیین کردند. نتایج به دست آمده برای اجرای عملیات حرارتی در بخش تعمیرات صنعت مربوطه مورد استفاده قرار گرفت و نشان داد که روش ارائه شده در تعیین شرایط دقیق عملیات حرارتی مورد نیاز و کاهش قابل توجه زمان بسیار مفید است.

re.jahedi@gmail.com  
farrahi@sharif.edu  
epsaeidi@mail.znu.ac.ir

واژگان کلیدی: آزادسازی تنش، سختی، عملیات حرارتی، المان محدود، خزش.

## ۱. مقدمه

توزیع دمایی و نرخ حرارتی بر سختی و تنش داخلی ماده‌اند. [۵،۴] با افزایش نرخ حرارت‌دهی، میزان افزایش سختی اولیه و تنش داخلی بیشتر خواهد شد؛ این افزایش تنش در حین تنش‌زدایی عملیات حرارتی قابل جبران است. با توجه به هدف تنش‌زدایی از اجرای عملیات حرارتی، اثر افزایش تنش نیز در حین حرارت‌دهی قابل جبران است. با توجه به ارتباط بین سختی و خواص مکانیکی فولاد و تغییر این معادلات بر اثر تغییر دما، [۶،۷] رابطه‌ی کیفی سختی با تنش پسماند به کمک آزمایشات انجام شده مورد تأیید قرار گرفته است. [۸-۱۰] نتایج حاصله حاکی از آن است که سطحی که دارای تنش پسماند فشاری بیشتری است سختی بیشتری دارد، و سطحی که تنش پسماند کششی بیشتری دارد سختی‌اش کم‌تر است. با مدل‌سازی المان محدود با دیدگاه میزان عمق فرورفته برای دو سطح با/بدون تنش داخلی در آزمون سختی‌سنجی، به تعیین تغییرات سختی و تنش با عوامل موثر پرداخته شده است. [۱۱-۱۵]

راندمان بالا و کارکرد مناسب هر قطعه و سیستمی مرهون فناوری و سلامت تجهیزات آن است. ایجاد تنش پسماند در ماده غالباً با تغییر خواص مکانیکی، منجر به کاهش عمر و واماندگی قطعه می‌شود. وجود تنش‌های داخلی تأثیر به‌سزایی در تغییر استحکام تسلیم، ازدیاد طول، ضربه‌پذیری، چقرمگی و کیفیت سطح فولاد دارد. این تنش‌ها بر اثر تغییرات ناگهانی و غیریکدواخت دما و کارسختی ایجاد می‌شوند. ایجاد نواقص و ناهنجاری‌ها در ریزساختار و سردشدن ناگهانی، عامل افزایش سختی و تردشدگی هستند.

با افت فشار روغن در بخش باتاقان روتور یکی از نیروگاه‌های کشور، به علت برخورد شفت با باتاقان و اصطکاک بالا، سختی سطحی شفت افزایش می‌یابد و ضمن بروز تغییرات متالورژیکی، تنش پسماند داخلی نیز ایجاد می‌شود. لذا سختی سطحی، باید به همراه حذف تنش پسماند، تا حد استاندارد فولاد روتور (HV ۳۰۰) کاهش یابد.

تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر نرخ حرارت‌دهی به منظور کاهش سختی، [۱-۳] نشان‌گر آن است که با نرخ سردکردن کنترل شده، تنش پسماند نهایی ایجاد نشده و سختی افزایش نخواهد یافت. مدل‌های المان محدود تحلیل شده حاکی از تأثیر

آزادسازی تنش مرحله‌ی حساسی از تولید در برخی از قطعات صنعتی است. از میان پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به تحلیل آزادسازی تنش حرارتی به کمک یک مدل المان محدود [۱۶] و نیز حذف تنش داخلی با اعمال یک بار متناوب [۱۷] اشاره کرد. خزش به عنوان یک پدیده‌ی عامل آزادسازی تنش، در دمای ۵۷۵ °C در فرآیند دندان‌سازی [۱۸] و در دمای ۵۵۰-۶۰۰ °C برای فولاد

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۸۹/۹/۲۷، پذیرش ۱۳۸۹/۱۲/۱۵.

روتور CrMoV ۱ استفاده شده است. نشان داده شد که تغییرات دمای عملیات به زمان بسیار حساس و عکس یکدیگرند.<sup>[۱۹]</sup>

در پژوهش حاضر، با دو روش مدل‌سازی المان محدود و تعیین ارتباط بین روابط تغییرات سختی، پارامترهای اساسی عملیات حرارتی برگشت<sup>۱</sup> به‌دقت برای مدل شفت محاسبه شده و نتایج دو روش المان محدود و کاهش مستقیم سختی با اجرای عملیات حرارتی مقایسه و تأیید شده‌اند. مزیت روش ارائه شده، تحلیل تغییرات تنش پسماند به‌کمک آزمون سختی‌سنجی است که نسبت به آزمون‌های مخرب اندازه‌گیری تنش، آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر است. با به‌کار بردن این دو روش در تحلیل مدل قطعه‌ی صنعتی، نتایج آن‌ها در مراکز تعمیراتی مربوطه مورد توجه قرار گرفته و با نتایج تجربی محک زده شده است.

## ۲. مدل‌سازی و آزادسازی تنش

### ۱.۲. معادل‌سازی تنش پسماند فشاری

تخمین تنش پسماند در بسیاری از زمینه‌های مهندسی، به‌عنوان یک موضوع کاربردی مورد توجه است. در این‌جا نیز با توجه به داده‌های حاصل از آزمون سختی‌سنجی، تنش‌های پسماند ماده تعیین شده‌اند. برای این منظور، با مقایسه عمق و سطح فرورفتگی با بار یکسان در آزمون سختی‌سنجی مقایسه، و رابطه‌ی کمی بین سختی و تنش کششی یا فشاری ماده ارائه شده است.<sup>[۲۰]</sup> (رابطه‌ی ۱) که صحت آن در پژوهشی دیگر و با انجام آزمون اندازه‌گیری تنش تأیید شد.<sup>[۲۱]</sup>

$$\frac{A}{A_o} = \left\{ 1 - \frac{\sigma_r}{P_{avg}} \right\}^{-1} \quad \text{تنش داخلی کششی}$$

$$\frac{A}{A_o} = \left\{ 1 + \frac{\sigma_r}{P_{avg}} \right\}^{-1} \quad \text{تنش داخلی فشاری} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $A$  سطح فرورفته‌ی دارای تنش پسماند،  $A_o$  سطح فرورفته‌ی فاقد تنش پسماند،  $f$  ثابتی برابر با زاویه‌ی مخروط آزمون (برای آزمون ویکرز مساوی ۰٫۳۷۵) و  $P_{avg}$  فشار تماسی میانگین است. این روابط با فرضیات تنش یکنواخت در عمق و یکسان در جهات اصلی، تنش صفحه‌یی روی سطح، فرورونده، کشسان و بدون اصطکاک بیان شده‌اند که با توجه به شرایط اجرایی آزمون و ابعاد قطعه، و نیز صرف‌نظر از اصطکاک، قابل تعمیم‌اند. داده‌های اولیه‌ی این روش، سختی اندازه‌گیری شده در ۵۴ موقعیت در سه زاویه‌ی ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه روی سطح شفت و با فاصله‌های یکسان در طول است (شکل ۱).

برای فولاد روتور CrMoV ۱، در دمای محیط استحکام تسلیم برابر با ۵۴۰ MPa، استحکام نهایی ۸۰۰-۶۵۰ MPa<sup>[۲۲]</sup> و سختی استاندارد HV ۳۰۰-۲۵۰ تعریف می‌شود. با حذف موقعیت‌هایی که سختی آن‌ها در محدوده‌ی استاندارد است،

جدول ۱. معادل‌سازی تنش پسماند فشاری با سختی سطحی.

سختی (HV) و تنش پسماند فشاری (MPa)							
زاویه	سختی	۴۵۰	۴۹۹	۳۴۰	۲۴۰	۲۲۱	۲۴۴
۰	تنش	۱۵۳٫۰۲	۲۱۷٫۴	۴۵٫۵۲	۰	۰	۰
زاویه	سختی	۳۳۱	۲۵۱	۴۳۰	۴۵۰	۴۱۸	۳۵۲
۹۰	تنش	۳۵٫۶	۰	۱۲۹٫۴	۱۵۳٫۱	۱۱۶	۵۲٫۲
زاویه	سختی	۳۳۲	۵۱۴	۴۳۶	۵۷۹	۳۷۶	۳۱۶
۱۸۰	تنش	۳۶٫۳	۲۳۹٫۱	۱۳۶٫۳	۳۴۲٫۸	۷۳٫۵	۲۴٫۷

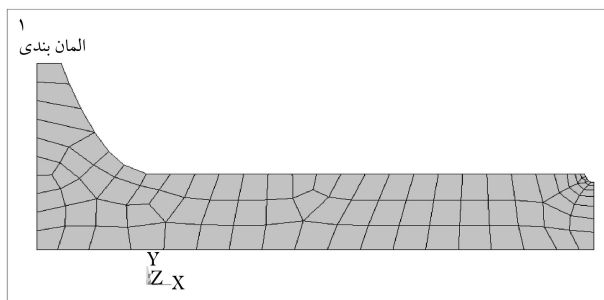
سختی ۱۸ موقعیت بحرانی به‌همراه تنش فشاری معادل به‌کمک رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود (جدول ۱). ضمن تعیین تنش فشاری معادل با سختی کم‌تر از HV ۳۰۰ برابر با صفر، دیده می‌شود بیشینه سختی HV ۵۷۹ و تنش مربوطه ۳۴۲٫۸ MPa است.

### ۲.۲. مدل‌سازی المان محدود

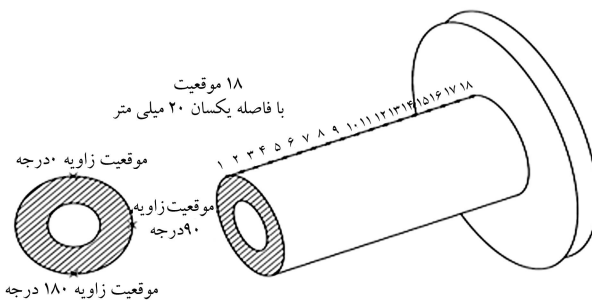
روش المان محدود معمولاً به‌عنوان روشی کم‌هزینه و دقیق برای تحلیل بیشتر فرایندها و پیش‌بینی نتایج، پذیرفته شده است. حل المان محدود بخش سرمحور شفت مستلزم تهیه‌ی مدل سه‌بعدی از قطعه است. اگرچه حرارت فقط در بخش سرمحور اعمال می‌شود، برای تعیین توزیع دما، محدوده‌ی جانبی سرمحور از دو سمت شامل شیار و دیسک اول نیز به مدل اضافه شده‌اند. شبکه‌بندی دوبعدی و چرخش ۳۶۰ درجه‌ی مدل، به یک المان‌بندی دقیق با نسبت منظر مناسب منجر می‌شود (شکل ۲).

با تعیین میزان حرارت و توان لازم برای افزایش دمای مدل در بخش آسیب‌دیده تا حدود ۶۹۰ درجه سانتی‌گراد، بار حرارتی<sup>۲</sup> به‌صورت سطحی اعمال می‌شود و با ممانعت از انتقال حرارت بین سطح و محیط، به‌عنوان شرایط مرزی، تحلیل حرارتی به‌صورت زمان‌مند از دمای محیط ۲۷ درجه سانتی‌گراد انجام، و توزیع دمایی قطعه طبق شکل ۳ محاسبه می‌شود. بیشینه دما ۶۹۳ درجه سانتی‌گراد و در محدوده‌ی نقاطی است که سختی بحرانی دارند. حل معادلات این مرحله به‌روش صریح<sup>۳</sup> انجام می‌شود که علت آن غیرخطی بودن در شرایط مرزی دمایی - سازه‌یی است. المان‌های به‌کار رفته قابلیت تقارن محوری و یک درجه آزادی دما روی هر گره را دارند.

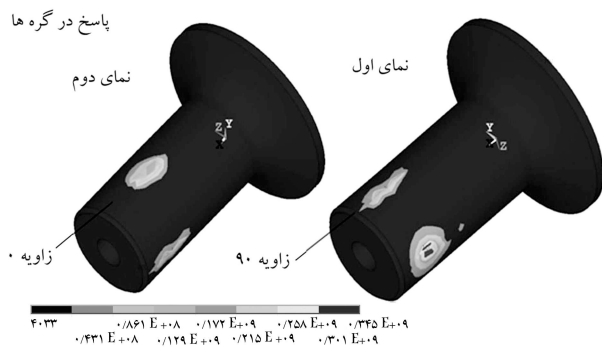
با اعمال تنش‌های معادل‌سازی شده در جدول ۱ به‌عنوان تنش اولیه (موقعیت A در شکل ۴)، به‌همراه توزیع دمایی به‌دست آمده از تحلیل حرارتی، تحلیل سازه‌یی انجام پذیرفته است. بنابراین المان‌ها به نوع سازه‌یی با سه درجه آزادی حرکت



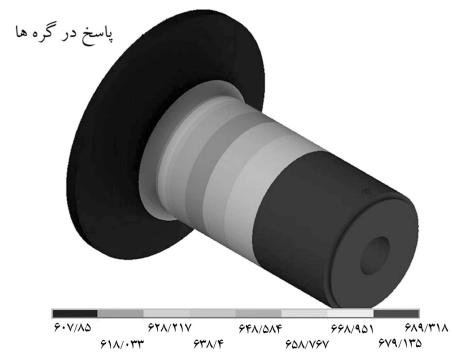
شکل ۲. المان بندی مدل ۲ بعدی با المان ۴ گره‌یی حرارتی.



شکل ۱. نمایش موقعیت ۵۴ نقطه از سطح روتور برای تعیین سختی.



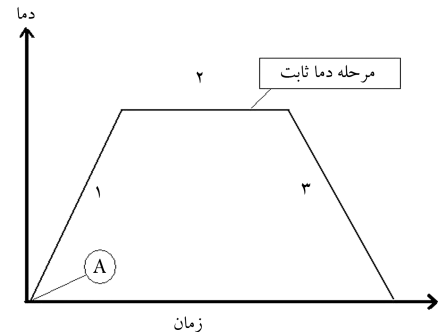
شکل ۵. تنش‌های پسماند اولیه پیش از اعمال حرارت (MPa) در سه زاویه ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه.



شکل ۳. توزیع دمایی محاسبه شده از تحلیل حرارتی.



شکل ۶. توزیع تنش فشاری (MPa) از حل تحلیل سازه‌ی با نرخ حرارتی ۶۷ °C/hr.



شکل ۴. منحنی عملیات حرارتی بازگشت برای کاهش سختی فولاد.

### ۳.۲. دما و زمان آزادسازی تنش

مرحله‌ی اصلی در آزادسازی تنش، مرحله‌ی دما ثابت است (شکل ۴). در این بخش از عملیات حرارتی، در دمای ثابت با گذر زمان سختی کاهش می‌یابد و پدیده‌ی خزش نیز بر اثر تنش داخلی حذف می‌شود. تغییرات این دو پارامتر عکس یکدیگرند و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد. خزش با توجه به دو سازوکار خزش ناشی از ناهنجاری و خزش نفوذی، منجر به آزادسازی تنش داخلی مواد می‌شود.

با فرض دمای ۶۹۰ °C در محدوده‌ی دمایی آزادسازی تنش در فولاد روتور (۷۰۰ - ۶۷۰ °C)، زمان مورد نیاز به کمک پدیده‌ی خزش با کرنش ثابت محاسبه می‌شود. در این روش فرض بر این است که با حذف بیشینه تنش داخلی (۳۸۴ MPa)، تنش‌های کم‌تر نیز آزاد خواهند شد. با در نظر گرفتن  $\epsilon_p$  و  $\epsilon_e$  به عنوان کرنش کشسان و خمیری می‌توان نوشت:

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = B\sigma^n \quad (3)$$

$$\epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon \quad (4)$$

نرخ تغییرات کرنش کل صفر و با جایگذاری شرایط اولیه، رابطه‌ی آزادسازی تنش برابر است با:

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} = \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} + BE(n-1)t \quad (5)$$

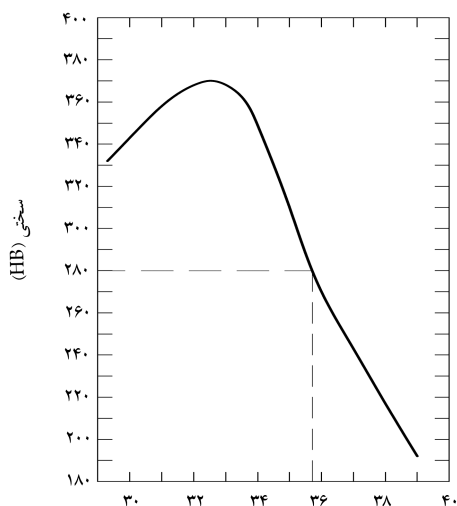
دما در رابطه‌ی ۵ در ثابت‌ها تأثیرگذار است. با معادل‌سازی سختی استاندارد ۳۰۰ HV با تنش ۱۴ MPa، بیشینه تنش باید تا این حد کاهش یابد. با تعیین  $B$  و

در سه جهت و قابلیت شکل‌منشوری در لبه‌ها تغییر می‌یابد. خواص غیرخطی و سینماتیک/ایزوتروپیک مکانیکی و حرارتی فولاد روتور همچون مدل کشسانی، رسانایی حرارتی، ضریب پواسون و حرارت مخصوص به صورت متغیر با دما و پیوسته در مدل‌سازی اعمال شده است. [۲۳،۲۲] با افزایش تعداد المان‌ها در چند مرحله، ۶۲۴۰ المان و ۲۰۰۶۶ گره نتایج پایداری را ارائه می‌کنند، و با عدم تغییر نتایج بر اثر افزایش المان، المان‌بندی دقیق و مناسب ارزیابی می‌شود. اندازه‌ی شبکه‌ی بهینه و نهایی در روی سطح به‌طور متوسط ۹/۲۹ میلی‌متر در طول است. این تحلیل به صورت یک حل ضمنی و زمان‌مند و غیرخطی صورت پذیرفته است. علت این نوع حل، غیرخطی بودن رفتار ماده به علت تغییر دما و نرخ کرنش، غیرخطی بودن هندسه‌ی جسم، و شرایط مرزی غیرخطی و مقید در جهات خاص است. به علت آویزان بودن روتور و حضور حجم ماده<sup>۴</sup> در انتهای آن، مدل به صورت تیر یک‌سر درگیر که وزن آن در راستای محور اثر می‌کند و از شرایط هندسه‌ی متقارن حول محور برخوردار است، تعریف می‌شود.

با فرض دمای ۶۹۰ °C برای آزادسازی تنش و دو نرخ حرارتی ۵۰ و ۶۸ درجه سانتی‌گراد بر ساعت، میزان انرژی لازم برای افزایش دما محاسبه شد، و اثر نرخ حرارتی بر تغییرات تنش مورد نظر قرار گرفت. تنش‌ها طبق شکل ۵ در مدل سازه‌ی در المان‌ها در سه زاویه ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه اعمال شده و به صورت یک‌نواخت در گره‌های جانبی کاهش یافته است.

با حل این مدل، بیشینه تنش اولیه ۳۴۲ MPa با ۱۳٪ افزایش طی مرحله‌ی حرارت‌دهی با نرخ ۶۸ °C/hr به ۳۸۴ MPa می‌رسد (شکل ۶). بیشینه تنش نهایی در محل بیشترین تنش اولیه‌ی اندازه‌گیری شده است.

تنش در دیگر المان‌ها به علت نمایش دقیق موقعیت‌های بحرانی حذف شده است. در صورت حرارت‌دهی با نرخ ۵۰ °C/hr، این افزایش تنش به حد ۱۱/۵٪ می‌رسد که حاکی از تأثیر افزایش نرخ حرارت‌دهی بر افزایش تنش داخلی است.



پارامتر عملیات برگشت  $T(C + \log t) \times 0.001 =$

شکل ۷. منحنی ارتباط پارامتر لارسون - میلر با سختی در دماهای مختلف. [۲۵]



شکل ۸. آویزان کردن روتور از سقف.

عملیات حرارتی در اختیار است، مقایسه و تحلیل شده است. هدف از اجرای این عملیات -- علاوه بر کاهش سختی موضعی -- ایجاد تعادل دینامیکی، افزایش ضربه‌پذیری و چقرمگی است. در این عملیات حرارتی باید توجه داشت که ضمن کاهش سختی و حذف تنش پسماند از نواحی تردشده، مناطق سالم از شفت آسیبی ندیده و دچار تغییر سختی نشوند. برای این منظور می‌توان طبق تحلیل المان محدود، المنت‌های حرارتی را تنها در محدوده‌ی موقعیت‌های بحرانی قرار داد.

انجام آزمون‌های کنترل کیفیت سطح (نظیر رپلیکا و کوانتومتری قبل و بعد از عملیات)، کمک زیادی به بررسی فرایند عملی کار می‌کنند. اولین مرحله‌ی آماده‌سازی برای اجرای عملیات، آویزان کردن روتور از سقف (شکل ۸) به منظور جلوگیری از اعوجاج حین حرارت‌دهی است.

با توجه به نرخ بالای اکسیداسیون در دمای بالای  $550^{\circ}\text{C}$  برای فولاد، آهک‌پاشی روی سطح سرمحور (شکل ۹) برای جلوگیری از این امر صورت می‌پذیرد. در شکل ۱۰

$n$  متناسب با دما  $[24]$  در رابطه‌ی ۵، مرحله‌ی دما ثابت با  $19167$  ثانیه یا ۵ ساعت و ۱۹ دقیقه در دمای  $690^{\circ}\text{C}$ ، سختی را به حد مطلوب رسیده و تنش داخلی حذف می‌شود. ثابت  $B$  در دمای  $T$  (از رابطه‌ی ۶) و نیز ثابت‌های  $c$  و  $\alpha$  [۲۴] را می‌توان چنین محاسبه کرد:

$$B = ce^{-\alpha/T} \quad (6)$$

تغییرات این دما و زمان با یکدیگر در بخش تحلیل نتایج مورد توجه قرار خواهد گرفت.

### ۳. روش کاهش مستقیم سختی

به‌منظور تأیید نتایج روش المان محدود، روش دیگری که مستقیماً تغییرات سختی با عملیات حرارتی را بدون ارجاع به تغییرات تنش مد نظر قرار می‌دهد، ارائه می‌شود. با داشتن سختی اولیه و سختی مطلوب پس از عملیات حرارتی، و با به‌کارگیری روابط و پارامتر لارسون - میلر [۲۵] می‌توان دما و زمان این عملیات را تعیین کرد. این روش نیز مبتنی بر خزش میکروسکوپی است. رابطه‌ی ۷ دمای عملیات بازگشت را با سختی افزایش یافته  $(H_h)$  و سختی استاندارد  $(H_t)$  نشان می‌دهد.

$$T = 917 \left( \frac{\ln [H_h - \lambda / H_t - \lambda]}{s} \right)^{\frac{1}{n}} - 273^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$T = 684^{\circ}\text{C}$$

رابطه‌ی ۸ به‌عنوان حلقه‌ی بازگشتی به سختی اولیه مطابق با استاندارد، با در نظر گرفتن دمای  $684^{\circ}\text{C}$ ، بین سختی افزایش یافته و حد مطلوب ارتباط میانگینی فراهم می‌کند. سختی اولیه برابر با HRC ۵۴ و سختی بعد از عملیات HRC ۲۵ است.

$$H_h = \left( \frac{T_t}{167} - 1.2 \right) H_t - 17 \quad (8)$$

بنابراین در این روش، بدون رجوع به خواص مکانیکی دیگر ماده -- نظیر تنش و استحکام تسلیم -- زمان و دمای عملیات به دست آمده است. زمان مرحله‌ی نگهداری در دمای ثابت طبق رابطه‌ی ۹، به‌کمک پارامتر لارسون - میلر و شکل ۷ خواهد بود:

$$Larson - Miller P_s = T(C + \log t) \times 10^{-2} \quad (9)$$

ثابت  $C$  متناسب با میزان کرنش فولاد، و در اینجا برابر با  $1978$  است.  $t$  زمان (ساعت) و  $T$  دما (رانکین) است. در این روش، سختی نهایی معادل میانگین حد ایده‌آل سختی (HB ۲۸۰) در نظر گرفته شده و پارامتر لارسون - میلر  $357$  است. طبق رابطه‌ی ۹ زمان مرحله‌ی دما ثابت ۵ ساعت و ۴۰ دقیقه به دست می‌آید که با توجه به دمای  $684^{\circ}\text{C}$ ، به نتایج روش المان محدود نزدیک است. مقایسه‌ی این نتایج با نتایج المان محدود، ضمن تأیید ارتباط روابط ۷، ۸ و ۹، مؤید دقت روش المان محدود نیز هست.

### ۴. نتایج تجربی

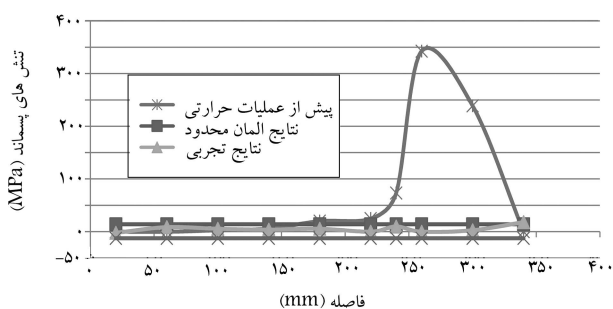
بهترین و دقیق‌ترین راه برای تأیید صحت نتایج و روش تحلیل‌های عددی و المان محدود، محک زدن آن‌ها با نتایج تجربی است. در اینجا نیز نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود و خزش و روش کاهش مستقیم سختی، با نتایجی که از اجرای

## ۵. بحث و تحلیل نتایج

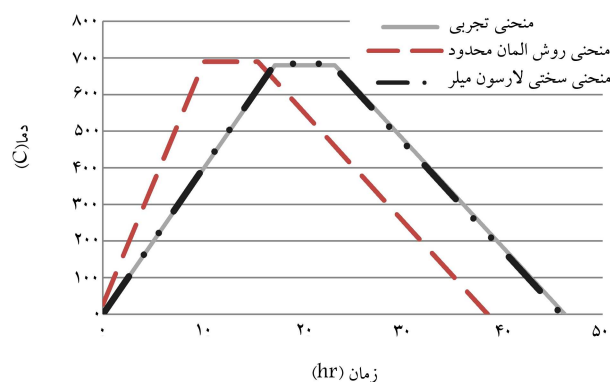
زمان و دمای محاسبه شده به منظور کاهش سختی از هر سه روش در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به تفاوت دما در سه روش، زمان‌های محاسبه شده با اختلاف قابل قبولی با یکدیگر مطابقت دارند. خطای کم این تحلیل را می‌توان ناشی از وجود نواقص در ماده، عدم عایق بندی کامل در اجرا، و تفاوت هرچند ناچیز در نسبت عناصر فولاد دانست.

در شکل ۱۲ میزان تنش قبل از اجرای عملیات، با نتایج آزادسازی تنش در روش المان محدود و تجربی برحسب طول شفت نمایش داده شده است. مقایسه منحنی این مقادیر با میزان تنش مرجع نشان‌گر کاهش کل تنش‌ها تا حد مطلوب است. برای تعیین کمینه زمان لازم به منظور آزادسازی تنش در تحلیل المان محدود، سختی  $300 \text{ HV}$  و تنش  $14 \text{ MPa}$  به عنوان معیار پایان عملیات مطرح شدند. با کاهش بیشینه تنش فشاری ( $384 \text{ MPa}$ ) تا حد  $14 \text{ MPa}$ ، تنش در دیگر موقعیت‌ها قطعاً کم‌تر خواهد بود. در شکل ۱۳ مقایسه منحنی عملیات حرارتی برگشت در هر سه روش امکان‌پذیر است. منحنی روش تجربی که مطابق با منحنی واقعی فولاد روتور اجرا شده است، می‌تواند به عنوان معیار بررسی قرارگیرد. مرحله ۲ جدول ۲. نتایج به دست آمده از سه روش برای تعیین دما و زمان عملیات حرارتی.

زمان مرحله‌ی دمای ثابت (دقیقه:ساعت)	دمای ثابت عملیات ( $^{\circ}\text{C}$ )	روش تحلیل
۵ : ۱۹	۶۹۰	المان محدود و آزادسازی تنش
۵ : ۴۰	۶۸۴	کاهش مستقیم سختی
۶ : ۰۰	۶۸۰	نتایج تجربی



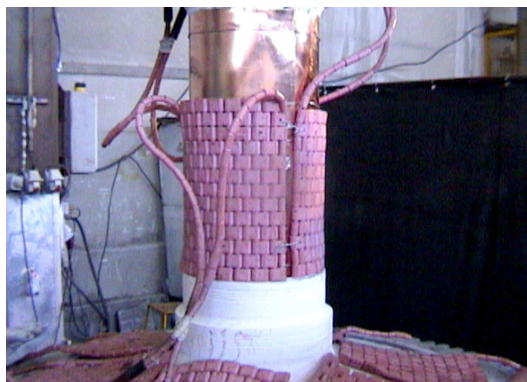
شکل ۱۲. مقایسه‌ی تنش داخلی برحسب طول شفت برای روش المان محدود و تجربی با مقادیر اولیه و مرجع.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی منحنی عملیات حرارتی بازگشت.



شکل ۹. پوشش‌دهی سطح شفت با آهک.



شکل ۱۰. قرار دادن ورقه‌های مسی و نصب المنت‌های حرارتی.



شکل ۱۱. پوشش‌دهی سطح حرارت‌دهی با عایق نسوز.

قراردادن ورقه‌های مسی به منظور توزیع یک‌نواخت حرارت و نصب المنت‌های حرارتی که روی سطح سرمحور را کاملاً پوشش داده‌اند، نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری از هرگونه انتقال حرارت بین سطح سرمحور و محیط اطراف، کل سطح توسط عایق نسوز پوشانیده می‌شود که نتیجه‌ی آن زمان و حرارت کم‌تر برای افزایش دما تا  $680^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۱).

با کنترل نرخ کاهش دما، سختی حین سردکردن افزایش نمی‌یابد و تنشی نیز ایجاد نمی‌شود. نتایج این روش حاکی از ۶ ساعت زمان لازم در دمای  $680^{\circ}\text{C}$  برای کاهش سختی است. نرخ گرم‌کردن قطعه، مشابه حل المان محدود بوده تا نتایج در بخش تحلیل قابل مقایسه باشند.

اجرای عملیات حرارتی به‌طور کامل ۴۸ ساعت زمان برده که بیش از ۲۵ ساعت آن صرف سردکردن با نرخ  $30-20^{\circ}\text{C/hr}$  می‌شود.

می‌شوند. منحنی نشان داده شده در شکل ۱۵ تغییرات دما و زمان عملیات را در روش المان محدود مورد بررسی قرار می‌دهد. مشاهده می‌شود که زمان در دمای کم‌تر از  $675^{\circ}\text{C}$  با نرخ بالایی تغییر می‌کند. شدت تغییرات زمان با دما برای کاهش سختی توسط عملیات بازگشت با  $55^{\circ}\text{C}$  در ۸ دقیقه یا  $49^{\circ}\text{C}$  در ۶ ساعت بیان شده است. [۲۶]

## ۶. نتیجه‌گیری

با مدل‌سازی المان محدود بخش سرم‌محور در شفت روتور، پارامترهای عملیات حرارتی لازم به‌منظور کاهش سختی موضعی و حذف تنش‌های داخلی محاسبه شدند. به‌کمک روش دیگری که مستقیماً تغییرات سختی را مورد توجه قرار می‌دهد دما و زمان محاسبه، و نتایج دو تحلیل با نتایج تجربی مقایسه شده است.

هر سه روش حاکی از آزادسازی تنش و کاهش سختی تا حد مطلوب در دمای  $680-690^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد با مدت زمان ۵ تا ۶ ساعت در مرحله‌ی دما ثابت هستند. بنابراین از روش المان محدود ارائه شده، می‌توان برای تعیین روش اجرایی عملیات حرارتی در کلیه‌ی قطعاتی که دچار افزایش سختی شده‌اند، با دقت بالایی بهره برد.

## فهرست علائم

$A$ : سطح فرو رفته دارای تنش پسماند

$A_0$ : سطح فرو رفته بدون تنش پسماند

$\sigma_r$ : تنش پسماند

$P_{avg}$ : فشار میانگین تماس

$B$ : ثابت خزش وابسته به دما

$n$ : ثابت خزش وابسته به دما

$t$ : زمان

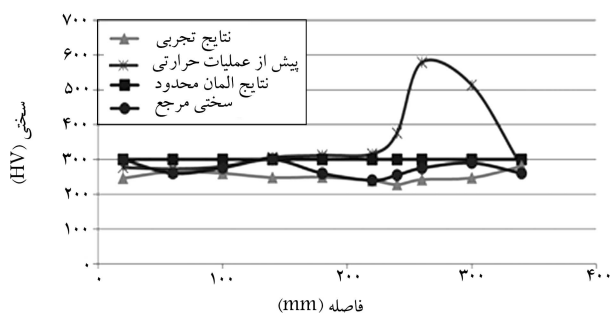
$E$ : مدول کشسانی

$H_h$ : سختی افزایش یافته

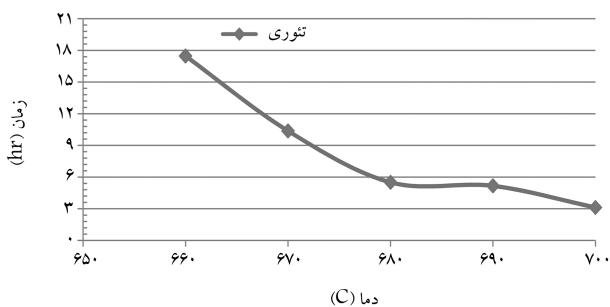
$H_t$ : سختی استاندارد مطلوب

$T$ : دما

$S$ : ثابت سختی‌سازی



شکل ۱۴. مقایسه‌ی سختی سطحی برحسب طول شفت برای روش المان محدود و تجربی با مقادیر اولیه و مرجع.



شکل ۱۵. تغییرات زمان مرحله‌ی دمای ثابت عملیات حرارتی با دما.

دمای ثابت که مورد بررسی آزادسازی تنش است، در جدول ۲ به دقت نشان داده شده و اختلاف زمان کل در شکل ۱۳ ناشی از تفاوت در نرخ حرارت‌دهی است که روش المان محدود، ضمن کاهش زمان کل اجرای عملیات، نتایج مطلوبی دارد.

در شکل ۱۴ تغییرات سختی در روش المان محدود و تجربی در مقایسه با سختی اولیه و مرجع نهایی نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، کاهش بیشینه سختی از  $579\text{ HV}$  به کم‌تر از  $30^{\circ}\text{HV}$ ، مؤید صحت عملکرد این تحلیل است. مدت زمان محاسبه شده، کمینه زمان لازم به‌منظور کاهش سختی تا حد مطلوب است و بنابراین با افزایش زمان نگاه‌داری در دمای ثابت، می‌توان سختی را در محدوده‌ی استاندارد به حد کم‌تری رساند.

تغییرات زمان و دمای آزادسازی تنش در مرحله‌ی دما ثابت عکس یکدیگرند، لذا با افزایش دمای حرارت‌دهی به زمان کم‌تری نیاز است. این دما در محدوده‌ی خاصی ( $700-670^{\circ}\text{C}$  برای آزادسازی تنش) قابل تغییر است. در دمای بالاتر به دلیل ایجاد تغییر فاز در نمودار آهن - کربن، خواص مکانیکی و متالورژیکی دچار تغییرات

## پانویس

1. tempering
2. heat flux
3. explicit
4. bulk material

## منابع

1. Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J. "Effects of the stress-relief conditions on a martensite stainless-steel welded component", *Journal of Materials Processing Technology*, **77**, pp. 216-225 (1998).



2. Sebaie, O.E. and Samuel, A.M. "The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys", *Materials Science and Engineering*, **54**, pp.1-41 (2007).
3. Gayda, J. "The effect of heat treatment on residual stress and machining distortions in advanced Nickel base disk alloys", *NASA/TMD2001-210717*, **14**, pp. 120-127 (2001).
4. Ferguson, B.L.; Freborg, Z. and Li, A.M. "Modeling heat treatment of steel parts", *Computational Materials Science*, **30**, pp. 274-281 (2005).
5. Zeren, A. and Zeren M. "Stress relaxation properties of prestressed steel wires", *Journal of Materials Processing Technology*, **141**, pp. 86-92 (2003).
6. Toparli, M. and Koksall, N.S. "Hardness and yield strength of dentin from simulated nano-indentation tests", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **77**, pp. 253-257 (2003).
7. Wang, Q. and Ozaki, K. "Surface stress evaluation from indentation load-depth curves", *Key Engineering Materials*, **324-325**, pp.89-92 (2006).
8. Chen, X. and Yan, J. "On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation", *Materials Science and Engineering*, **416**, pp. 139-149 (2006).
9. Xu, B.X. and Zhao, B. "Investigation of residual stress by the indentation method with the flat cylindrical indenter", *ASM International*, **15**, pp. 299-305 (2005).
10. Gibmeier, J. and Scholtes, B. "About the effect of residual stresses on micro hardness readings", *Material Science Forum*, **404**, pp. 349-354 (2002).
11. Toparli, M.; Sahin, S.; Ozkaya, E. and Sasaki, S. "Residual thermal stress analysis in cylindrical steel bars using finite element method and artificial neural networks", *Computers and Structures*, **80**, pp. 1763-1770 (2002).
12. Lee, J.I.; Choi, Y.; Boo, K.S. and Park, J.H. "A study on relationship between hardness and hydrostatic stress", *Key Engineering Materials*, **306-308**, pp. 619-624 (2006).
13. He, M.Y.; Odette, G.R.; Yamamoto, T. and Klingensmith, D. "A universal relationship between indentation hardness and flow stress", *Journal of Nuclear Materials*, **367-370**, pp. 556-560 (2007).
14. Warren, A.W.; Guo, Y.B. and Weaver, M.L. "The influence of machining induced residual stress and phase transformation on the measurement of subsurface mechanical behavior using nanoindentation", *Surface & Coatings Technology*, **200**, pp. 3459-3467 (2006).
15. Carlsson, S. and Larsson, P.L. "On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation", *Acta Mater*, **49**, pp. 2179-2191 (2001).
16. Liu, C.C.; Xu, X.J. and Liu, Z. "A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering", *Finite Elements in Analysis and Design*, **39**, pp. 1053-1070 (2002).
17. Smith, D.J.; Farrahi, G.H.; Zhu, W.X. and McMahon, C.A. "Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stresses and mechanical loading", *International Journal of Fatigue*, **23**, pp. 293-302 (2001).
18. DeHoff, P.H. and Anusavice, K.J. "Shear stress relaxation of dental ceramics determined from creep behavior", *Dental Materials*, **20**, pp. 717-725 (2004).
19. Bose, S.C.; Singh, K. and Jayaraman, G. "Application of stress relaxation test methodology for predicting creep life of a large steam turbine rotor steel (1 Cr-MoV)", *Journal of Testing and Evaluation*, **31**, pp. 155-164 (2003).
20. Suresh, S. and Giannakopoulos, A.E. "A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation", *Acta Mater*, **46**, pp. 5755-5767 (1998).
21. Atar, E.; Sarioglu, C.; Demirler, U.; Sabri Kayali, E. and Cimenoglu, H. "Residual stress estimation of ceramic thin films by x-ray diffraction and indentation techniques", *Scripta Materialia*, **48**, pp. 1331-1336 (2003).
22. Luise, W., *Saarstahl Steel Key*, Ed. 2004 part 1.
23. Shackelford, J., *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, CRC Press, Ed. 3 (2000).
24. Fracture Mechanics "ASTM", *Astm International*, **17**, (2003).
25. Tholten, G.E. and Howes, *Steel Heat Treatment Handbook*, USA International pub (1997).
26. Wan, N.; Xiong, W. and Suo J. "Mathematical model for tempering time effect on quenched steel based on hollomon parameter", *J. Mater. Sci. Technol.*, **21**, pp. 803-806 (2005).

