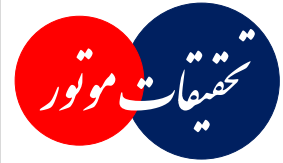




## فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



### بهینه‌سازی دما و زمان انحلال در ابرهمبسته پایه نیکل پرخوران موتور براساس سختی به روش طراحی آزمایش‌ها

محمد آزادی<sup>۱\*</sup>، مصطفی ایزی<sup>۲</sup>، آرمن مربوط<sup>۳</sup>، محبوبه آزادی<sup>۴</sup>، علیرضا حاجی علی محمدی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [m\\_azadi@semnan.ac.ir](mailto:m_azadi@semnan.ac.ir)

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [mostafaiziy\\_metal@yahoo.com](mailto:mostafaiziy_metal@yahoo.com)

<sup>۳</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [arminmarbout@yahoo.com](mailto:arminmarbout@yahoo.com)

<sup>۴</sup>دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [m.azadi@semnan.ac.ir](mailto:m.azadi@semnan.ac.ir)

<sup>۵</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، [ahajiali@semnan.ac.ir](mailto:ahajiali@semnan.ac.ir)

\* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۰۲۱۰۷۲۸۰

#### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵

کلیدواژه‌ها:

طراحی آزمایش

سختی سنجی

عملیات حرارتی

ابرهمبسته پایه نیکل

#### چکیده

امروزه یکی از قطعات مهم در برخی از موتورهای احتراقی، پرخوران است که می‌تواند در بهبود عملکرد، نقش ایفا کند. پره‌های گردای این قطعه، در دمای داغ کار می‌کنند. بر این اساس و با توجه به نیروی گریز از مرکز موجود در پره‌ها، یکی از متغیرهای طراحی، استحکام خزشی ماده است و لذا از ابرهمبسته‌های پایه نیکل، استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است که مقدار سختی ابرهمبسته پایه نیکل 713C (مورد استفاده در پره‌های گردای قطعه پرخوران موتور) با فرایند عملیات حرارتی، افزایش یابد. برای این منظور از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده شده و در مقادیر مختلف دما و زمان انحلال طی فرایند عملیات حرارتی، سختی سنجی در خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها در ریزساختار ماده، صورت پذیرفته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد؛ بطور کلی در دمای انحلال ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان انحلال ۶۰ دقیقه، مقادیر سختی، بیشینه می‌شوند. تحلیل حساسیت متغیرها نیز، نشان دهنده اثر مؤثر دمای انحلال نسبت به سایر متغیرها (زمان انحلال و اثر متقابل دما و زمان) است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

قطعهٔ پرخوران در موتورهای احتراقی به منظور بهبود عملکرد (افزایش توان و گشتاور)، مورد استفاده است. قطعات اصلی در پرخوران شامل تنجار، محور و گردا است. گردا توسط گازهای خروجی به چرخش درآمده و با توجه به اینکه گردا و تنجار روی یک محور واقع هستند، حرکت دوارنی به تنجار منتقل شده و هوای ورودی به موتور متراکم می‌شود. بدین وسیله، هوای بیشتری وارد موتور می‌گردد که باعث افزایش توان و گشتاور آن می‌شود. حال با توجه به اینکه کارکرد قطعه گردا و پره‌های آن، در دمای داغ (حدود ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در موتورهای احتراقی) است، لازم است که در اثر بارهای خزشی (ناشی از نیروی گریز از مرکز به دلیل حرکت دورانی پرها با سرعتی حدود ۲۰۰ هزار دور بر دقیقه)، ماده مورد استفاده، استحکام کافی را داشته باشد. برای این منظور، معمولاً از ابرهمبسته‌های پایه نیکل در ساخت پره‌های گردای قطعهٔ پرخوران استفاده می‌شود. لذا همواره، هدف افزایش عمر این قطعه مدنظر مهندسان قرار گرفته است. روش‌های متعددی برای افزایش عمر وجود دارد همچون تغییر روش ساخت و فرایند عملیات حرارتی که در این مقاله، به روش دوم پرداخته می‌شود.

در زمینه مطالعاتی بهبود عمر انواع ابرهمبسته‌ها با استفاده از عملیات حرارتی، تحقیقاتی انجام شده است که شرح برخی از آنها، در ادامه موجود است. کارون و همکاران<sup>۱</sup> [۱-۲]، با استفاده از عملیات حرارتی، استحکام خزشی ابرهمبسته پایه نیکل CMSX-2 در محدوده دمایی ۷۶۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد را بهبود دادند. آنها نشان دادند که عملیات حرارتی تأثیری بر ترکیب رسوبات و حالت گاما پرایم (۷) ندارد. راتو<sup>۲</sup> و همکاران [۳]، تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی ابرهمبسته پایه نیکل IN718 را بررسی کردند و نشان دادند که عملیات حرارتی مورد استفاده، شرایط بهینه‌ای ندارد و خواص مکانیکی (شامل تنش تسلیم و تنش نهایی)، طی آن، کاهش می‌یابد.

لی و واهی<sup>۳</sup> [۴]، اثر عملیات حرارتی و تغییر شکل خزش در ابرهمبسته پایه نیکل IN718LC را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که تغییر شکل خزشی باعث ایجاد یک عدم تطبیق قابل توجه بین رسوبات گاما (۷) و گاما پرایم (۷) شد. جکسون و رد<sup>۴</sup> [۵]، اثر عملیات حرارتی بر روی ریزساختار ابرهمبسته آهنگری شده UDIMET-720Li را بررسی کردند. آنها فرایند عملیات حرارتی را به صورت نگهداری نمونه طی ۲۴ ساعت در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد، پیشنهاد دادند. صفری و ناطق [۶]، ریزساختار ابرهمبسته

پایه نیکل Rene-80 را طی یک فرایند عملیات حرارتی چند مرحله ای (شامل یک مرحله انحلال<sup>۵</sup> و دو مرحله پیرسازی<sup>۶</sup>)، ارزیابی کردند. سجادی و همکاران [۷] نیز، ریزساختار ابرهمبسته پایه نیکل دیگری (GTD-111) را تحت متغیرهای مختلف فرایند عملیات حرارتی، مطالعه کردند. در تحقیق آنها، دمای بهینه برای انحلال را معادل با ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه شد. همچنین، نشان دادند که شکل و اندازه ریزساختار ماده وابسته به نرخ سرد کردن در فرایند عملیات حرارتی است.

براساس تاریخچه تحقیق، می‌توان ادعا نمود که فعالیت‌های علمی بسیار کمی در زمینه طراحی آزمایش‌ها (DOE)<sup>۷</sup> به منظور بهینه کردن فرایند عملیات حرارتی در ابرهمبسته‌ها صورت گرفته است. لذا در این مقاله، دو متغیر دما و مدت زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی، با تابع هدف افزایش سختی در ابرهمبسته پایه نیکل 713C، با کاربرد در پره‌های گردای قطعهٔ پرخوران موتور، بهینه شده است.

## ۲- مواد و آزمون‌ها

## ۲-۱- ابرهمبسته پایه نیکل

ماده مورد مطالعه در این مقاله، ماده بکار رفته در پره گردای قطعهٔ پرخوران در یک موتور احتراق داخلی بنزینی چهار استوانه است که با عنوان ابرهمبسته پایه نیکل 713C شناخته می‌شود. درصد عناصر همبسته این ماده در جدول (۱) نشان داده شده است.

در شکل (۱)، ریزساختار ماده اولیه از ابرهمبسته پایه نیکل 713C (بدون عملیات حرارتی) و ترکیبات موجود در ریزساختار آن نمایش داده شده است. ریزساختار نمونه اولیه حاوی کاربیدهای همبسته (مثل کاربید کروم)، زمینه گاما (۷) و رسوبات گاما پرایم (۷) است. انتظار می‌رود با افزایش دمای انحلال در فرایند عملیات حرارتی تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد (انحلال کامل)، کاربیدهای کروم نیز در درون حالت گاما (۷) حل شود [۸].

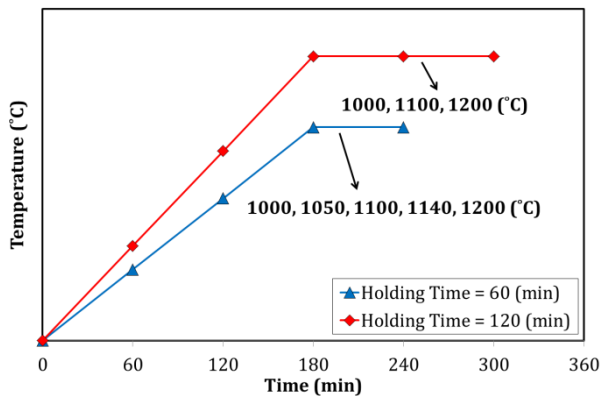
جدول ۱: درصد عناصر همبسته در ابرهمبسته پایه نیکل 713C

نام عنصر	درصد عنصر	نام عنصر	درصد عنصر
Ni	Bal.	C	۰,۱۲
Al	۵,۵	Fe	۰,۱۳
Ti	۰,۹۷	B	۰,۰۱
Ta+Nb	۱,۹۱	Zr	۰,۰۶
Mn	۰,۰۴	Si	۰,۰۴
Cr	۱۴	Cu	۰,۰۱
Mo	۴,۵	V	trace

<sup>۵</sup> Solution<sup>۶</sup> Ageing<sup>۷</sup> Design of Experiments<sup>۱</sup> Caron<sup>۲</sup> Rao<sup>۳</sup> Li and Wahi<sup>۴</sup> Jackson and Reed



شکل ۲: کوره حرارتی به منظور اجرای فرایند عملیات حرارتی



شکل ۳: تاریخچه تغییرات دما در فرایند عملیات حرارتی

### ۲-۳- آزمون سختی سنجی

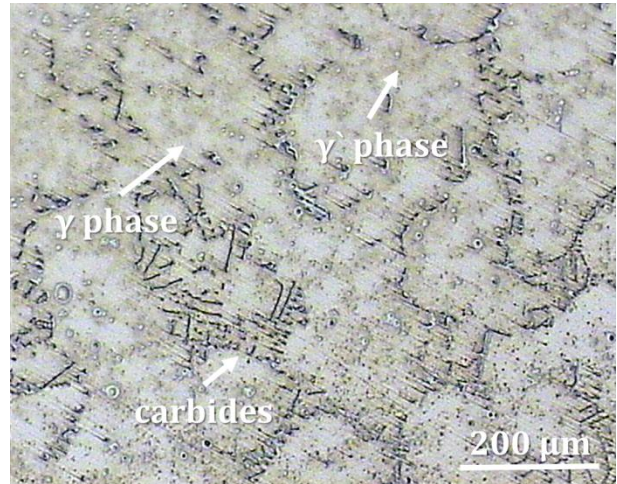
برای ابرهمیسته پایه نیکل مورد مطالعه، آزمون سختی سنجی براساس استاندارد ASTM-E18-11 [۱۱] انجام شده است. براساس این استاندارد، در آزمون راکولسی<sup>۲</sup>، برای سنجش مقدار سختی موادی مانند فولادهای سخت و همبسته‌های پایه تیتانیومی و نیکلی، از مخروط الماسی ۱۲۰ درجه ای، به عنوان فرو رونده (سنبه) استفاده می‌شود. بار اعمالی در این آزمون، ۱۵۰ کیلوگرم است. شکل تجهیزات شامل دستگاه سختی سنجی دیجیتالی ENSRT، در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از آماده سازی سطح نمونه، در دو جهت (شکل ۵)، برای بررسی تکرارپذیری<sup>۳</sup>، سه بار آزمون سختی تکرار شده است. براساس استاندارد ASTM-E18-11 [۱۱]، پس از اجرای آزمون‌ها، میانگین سختی ( $H_{avg}$ ) و انحراف استاندارد ( $H_{stdev}$ ) از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود.

$$H_{avg} = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{3} \quad (1)$$

$$H_{stdev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (H_i - H_{avg})^2}{2}} \quad (2)$$

<sup>2</sup> Rockwell\_C

<sup>3</sup> Repeatability



شکل ۱: ریزساختار ماده اولیه از ابرهمیسته پایه نیکل 713C بدون عملیات حرارتی

شایان ذکر است که حالت گاما (γ) شامل یک محلول جامد نیکل با عناصری مانند کروم یا مولیبدن است. ضمناً حالت گاما پرایم (γ') شامل یک حالت بین فلزی<sup>۱</sup>، بین عناصر نیکل و آلومینیوم است. نوع کاربید نیز در نمونه اولیه بدون عملیات حرارتی، حاوی عناصر کروم، تیتانیوم و نیوبیوم است که در دماهای گرم پایدارند [۹].

### ۲-۲- فرایند عملیات حرارتی

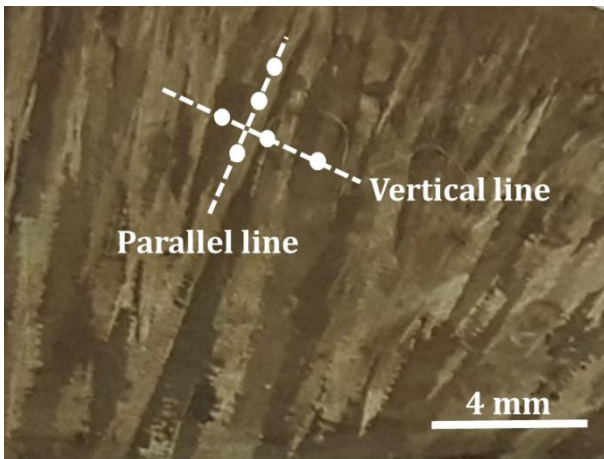
به منظور اجرای فرایند عملیات حرارتی، از کوره مقاومتی در فضای اتمسفر محیط، استفاده شده است (شکل ۲). محدوده دمای عملیات حرارتی بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انتخاب گردیده است. شایان ذکر است که دمای ذوب این ماده، در محدوده ۱۲۶۰ تا ۱۲۸۸ درجه سانتیگراد است [۱۰]. در فرایند عملیات حرارتی، بر روی نمونه‌های مختلف، دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۴۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و همچنین، مدت زمان‌های ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه مدنظر قرار گرفته است.

تعداد نمونه‌های عملیات حرارتی شده، هشت قطعه بوده که از این هشت نمونه، شش نمونه در مدت زمان ثابت ۶۰ دقیقه، در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰، ۱۱۴۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و سه نمونه دیگر در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان ثابت ۱۲۰ دقیقه، عملیات حرارتی شده اند. این دماهای انحلال، براساس مرجع [۹] انتخاب شده است. همچنین، نرخ افزایش دما برای رسیدن به دمای مدنظر، ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شده است (شکل ۳). این نرخ به گونه ای انتخاب شده است که کمترین تنش حرارتی به قطعه وارد شود. پس از فرایند گرم کردن، نمونه‌ها از کوره خارج شده و در محیط، به تدریج سرد می‌شوند. این سرد شدن تدریجی نمونه، در حدود ۱۵ دقیقه به طول می‌انجامد.

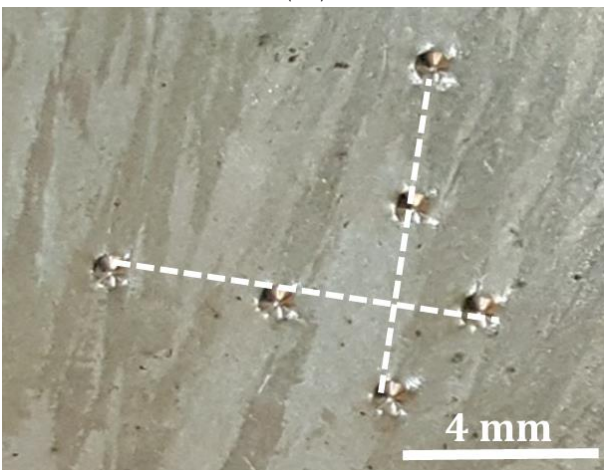
<sup>1</sup> Intermetallic phase



شکل ۴: دستگاه سختی سنجی دیجیتالی



(الف)



(ب)

شکل ۵: سطح ماکرو اچ شده نمونه آزمون: (الف) قبل و (ب) به هنگام آزمون سختی سنجی و (ب) بعد از آزمون سختی سنجی

آزمون سختی سنجی در هر قطعه، بر روی خطوط عمودی و موازی با راستای دانه بندی سطح نمونه، انجام شده است. هر قطعه در ابتدا، ماکرو اچ<sup>۱</sup> گردیده است (شکل ۵). قبل از اجرای آزمون سختی، سطح نمونه با سنباده‌های متفاوت از شماره ۲۵۰ تا ۱۲۰۰ صیقلی، صاف و با محلول مناسب اچ شده است. محلول اچان مورد استفاده شامل محلول ماربل (اسید هیدروکلریک ۳۷ درصد، ۵۰ میلی لیتر و سولفات مس، ۱۰ گرم و آب، ۱۰۰ میلی لیتر) و زمان اچ کردن نیز در حد بسیار اندک (۲ ثانیه) است [۱۲]. در بخش دوم شکل ۵، سطح نمونه بعد از انجام آزمون سختی سنجی (شامل اثر فرورفتگی‌های ناشی از اجرای آزمون)، نشان داده شده است. ضمناً در مرز دانه‌ها (شکل ۵)، به دلیل وجود کاربیدها، انتظار می‌رود که عدد سختی افزایش یابد. به عبارت دیگر، مقدار سختی‌های اندازه‌گیری شده در جهت خطوط عمود بر راستای دانه بندی، دارای محدوده تغییرات بیشتر و در نتیجه، انحراف معیار بیشتری نسبت به عدد سختی میانگین، داشته باشند.

## ۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

به منظور ایجاد یک درک صحیح از اثر متغیرهای مختلف بر یک رفتار و همچنین بهینه سازی متغیرهای مؤثر، می‌توان از طراحی آزمایش‌ها استفاده نمود که شامل چندین روش و چندین بخش است. یکی از این روش‌ها، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل‌های آماری است. بر این اساس، با محاسبه میانگین مربعات ( $MS$ ) اثر شامل متغیر مدنظر ( $MS_{treatment}$ ) و خطا ( $MS_{error}$ ) و همچنین، مقایسه آن با مقدار مرجع ( $F_{\alpha, a-1, N-a}$ )، حساسیت اثر بدست می‌آید [۱۳].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (3)$$

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (4)$$

که در آن،  $F_{\alpha, a-1, N-a}$  از جداول آماری استخراج می‌شود. مقدار سطح ریسک  $\alpha$ ، معمولاً برابر با ۰٫۰۵ بوده و ضریب اطمینان، ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. مقادیر  $a-1$  و  $N-a$  نیز، درجات آزادی اثر و خطا را نشان می‌دهد. روابط فوق برای یک اثر قابل اجراست و می‌توان برای چند اثر، آن را تعمیم داد. جزئیات بیشتر در این مورد، در مرجع [۱۳] آمده است. تحلیل‌های آماری در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار MINITAB انجام شده است. پس از تحلیل حساسیت، با استفاده از تحلیل رگرسیون<sup>۲</sup>، تابعی براساس متغیرهای مدنظر ( $P_1, P_2, \dots$ ) برای تخمین میزان سختی ( $H$ ) ارائه شده است.

$$H = C_0 + C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_1P_2 + \dots \quad (5)$$

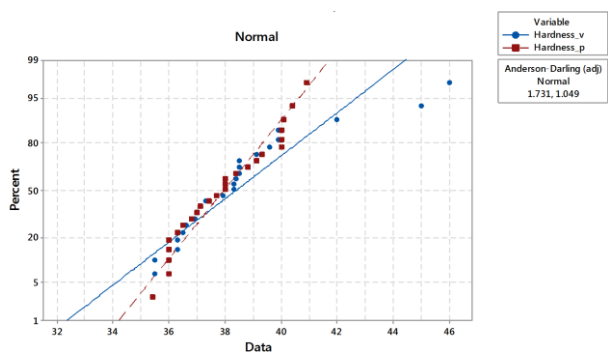
پس از تطبیق<sup>۳</sup> رابطه فوق با نتایج تجربی بدست آمده، ضرائب تابع فوق ( $C_0, C_1, \dots$ ) محاسبه می‌شوند [۱۳].

<sup>1</sup> Macro-etching

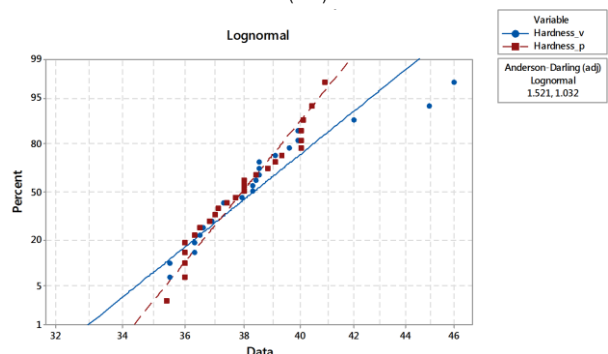
<sup>2</sup> Regression analysis

<sup>3</sup> Curve fitting

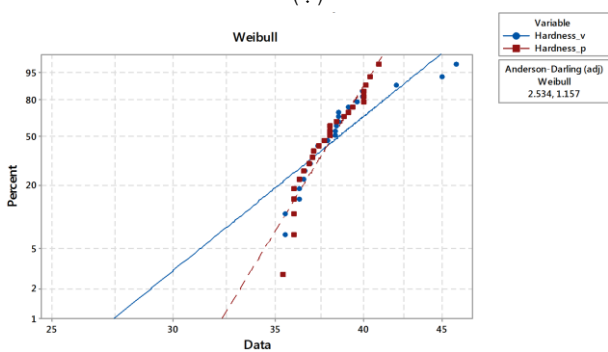
این رفتار در شکل ۸ نیز، برای مقدار انحراف از انواع توزیع (نرمال<sup>۱</sup>، نرمال لگاریتمی<sup>۲</sup> و ویبال<sup>۳</sup>) داده‌های سختی اندازه‌گیری شده، نشان داده است. توزیع نرمال لگاریتمی و نرمال، بهترین نوع برای نمایش داده‌های بدست آمده، است. بطور کلی می‌توان گفت که سختی پس از عملیات حرارتی (با هر شرایطی دمایی و زمانی)، نسبت به سختی نمونه اولیه ماده، افزایش یافته و یا تقریباً بدون تغییر (در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) است. به عبارت دیگر، کاهش محسوس سختی در اثر عملیات حرارتی‌های انجام شده، قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)



(ج)

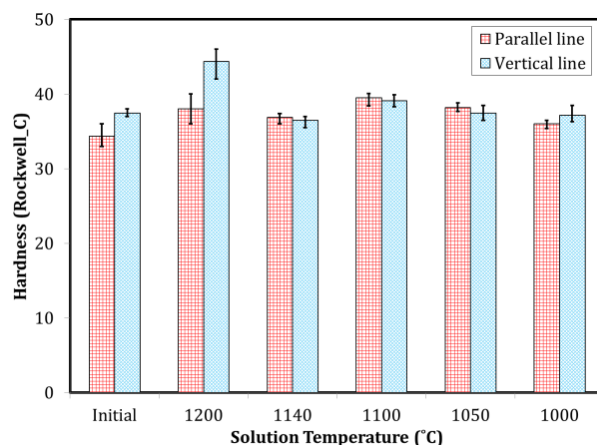
شکل ۸: انواع توزیع داده‌های اندازه‌گیری شده برای سختی شامل (الف) توزیع نرمال، (ب) توزیع لگاریتم نرمال و (ج) توزیع ویبال

در این مقاله، ضریب ثابت، توان اول و دوم متغیرها و اثر متقابل آنها (ضرب دو متغیر) در نظر گرفته شده است. البته با توجه به اینکه متغیر زمان، فقط در دو سطح تغییر کرده است، توان دوم متغیر زمان حذف می‌گردد.

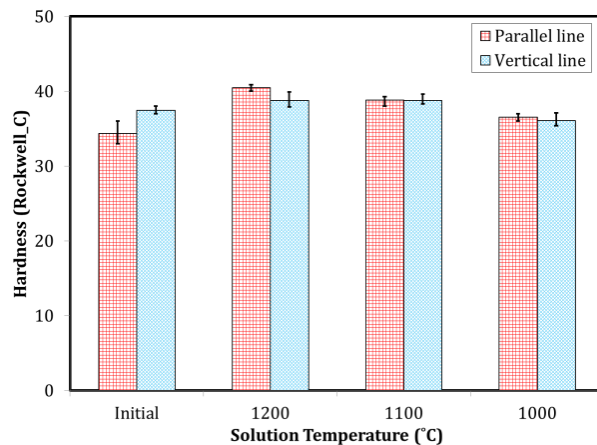
### ۳- نتایج و بحث بر روی نتایج

در اولین بخش از ارائه نتایج، مقادیر سختی میانگین و انحراف معیار در نمونه‌های مختلف برای خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها، در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب، برای فرایند عملیات حرارتی در مدت زمان ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه، آمده است.

به عنوان اولین نتیجه قابل ذکر، همان گونه که انتظار می‌رفت، بطور کلی انحراف معیار در نتایج سختی سنجی بر روی خطوط عمود بر راستای دانه‌ها، بیشتر از راستای موازی است. البته ممکن است در این مورد استثنایی وجود داشته باشد اما در مجموع، جمله صحیحی است. علت این امر نیز، احتمال اجرای آزمون سختی سنجی بر روی مرز دانه‌ها که دارای کاربیدها هستند، است.



شکل ۶: نتایج سختی میانگین و انحراف معیار برای فرایند عملیات حرارتی در مدت زمان ۶۰ دقیقه



شکل ۷: نتایج سختی میانگین و انحراف معیار برای فرایند عملیات حرارتی در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه

<sup>1</sup> Normal

<sup>2</sup> Log-Normal

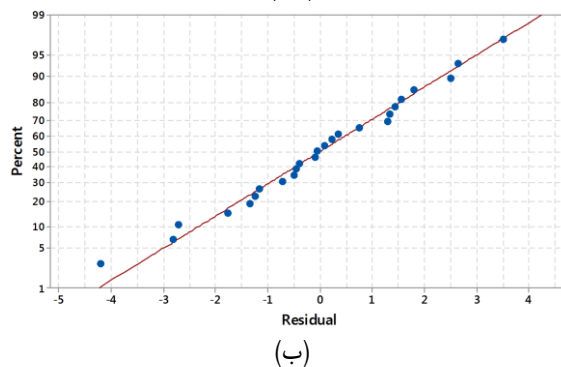
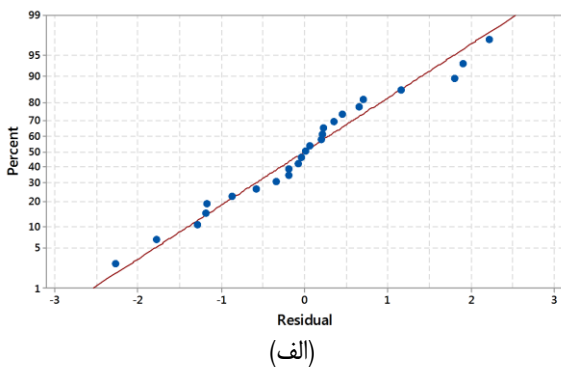
<sup>3</sup> Weibull

شایان ذکر است که مقدار ایده آل متغیرهای فوق، به ترتیب، مقادیر کمتر از ۰,۰۵ و مقادیر نزدیک به ۱ است. نحوه تغییرات سختی برحسب متغیرهای انحلال (دما و زمان) در فرایند عملیات حرارتی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش دمای انحلال، سختی افزایش یافته است. این افزایش سختی، برای نتایج هر دو خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها، قابل مشاهده است. همچنین، این نتایج برای هر دو زمان انحلال (۶۰ و ۱۲۰ ثانیه)، تکرار شده است با این تفاوت که برای سختی در خطوط موازی، مقدار افزایش سختی در مدت زمان انحلال ۱۲۰ دقیقه بیشتر از مقادیر مربوط به ۶۰ ثانیه است و برای سختی در خطوط عمود، کمتر است.

جدول ۲: دقت و حساسیت بخش‌های مختلف در تابع رگرسیون

Hardness_p		Hardness_v	
Parts	P-Value	Parts	P-Value
Constant	۰,۲۵۳	Constant	۰,۲۱۱
T	۰,۰۸۵	T	۰,۲۶۰
t	۰,۰۶۸	t	۰,۲۳۰
T <sup>2</sup>	۰,۰۷۵	T <sup>2</sup>	۰,۱۸۲
T × t	۰,۰۵۰	T × t	۰,۱۹۰
R <sup>2</sup>	%۵۶,۵۶	R <sup>2</sup>	%۵۳,۲



شکل ۱۰: احتمال توزیع نرمال مقادیر باقیمانده برای نتایج سختی خطوط (الف) موازی و (ب) عمود بر راستای دانه‌ها

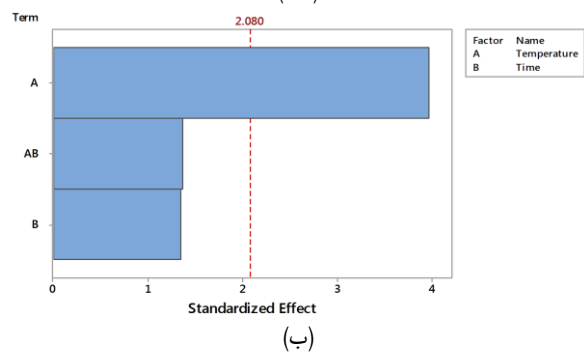
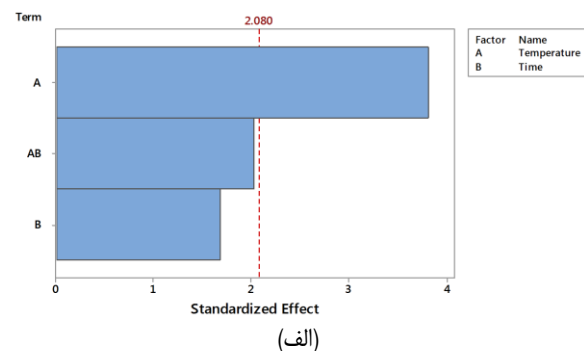
نتایج تحلیل حساسیت (شامل منحنی پرتو<sup>۱</sup>)، در شکل ۹، برای سختی اندازه‌گیری شده برای خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها، آمده است. بر این اساس، برای هر دو حالت، متغیر دمای انحلال در فرایند عملیات حرارتی، متغیر مؤثر شناخته شده و بقیه متغیرها (زمان و اثر متقابل دما و زمان)، حساس نیستند. اما اثر متقابل دو متغیر دما و زمان، حساسیت بیشتری نسبت به اثر متغیر زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی دارد.

نتایج مقادیر باقیمانده<sup>۲</sup> شامل احتمال نرمال مقادیر انحراف نتایج شبیه سازی براساس تابع رگرسیون انتخاب شده با نتایج تجربی، در شکل ۱۰ برای سختی بر روی خطوط موازی و عمود (H<sub>v</sub> و H<sub>p</sub>) بر راستای دانه‌ها، آمده است. این شکل، توزیع مناسب مقادیر باقیمانده را نشان می‌دهد. معادلات حاصل از تحلیل رگرسیون براساس متغیرهای دمای انحلال (T) و زمان انحلال (t) در فرایند عملیات حرارتی نیز، به شرح زیر هستند:

$$H_p = -78.3 + 0.217T - 0.225t - 0.000102T^2 + 0.000221Tt \quad (۶)$$

$$H_v = 143 - 0.232T + 0.241t + 0.000125T^2 - 0.00024Tt \quad (۷)$$

دقت و حساسیت هر متغیر در معادلات نشان داده شده (شامل مقادیر P-Value و R<sup>2</sup>)، در جدول ۲ آمده است.



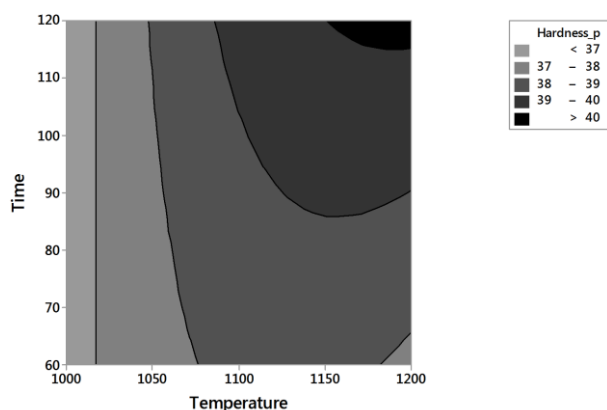
شکل ۹: نتایج تحلیل حساسیت برای سختی خطوط (الف) موازی و (ب) عمود بر راستای دانه‌ها

<sup>1</sup> Pareto Chart

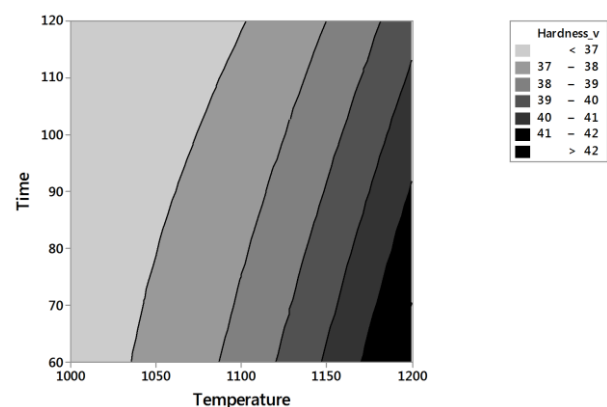
<sup>2</sup> Residual

بررسی‌های ریزساختاری ماده برای مدت زمان انحلال ۶۰ دقیقه، نشان می‌دهد که با افزایش دمای انحلال تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، برخی از کاربیدهای همبسته، تقریباً انحلال کامل پیدا می‌کنند و لذا از پیوستگی کاربیدها در مرز دانه‌ها، کاسته می‌شود. کاربیدهای موجود در نمونه آزمون، کاربید کروم بوده که با افزایش دما، کروم در زمینه حل می‌شود. وجود کروم در زمینه، با تشکیل اکسید کروم، مقاومت به اکسیداسیون را بالا می‌برد.

لازم به ذکر است که هرچه از مقدار پیوستگی کاربیدها در مرز کاسته شود و هرچه که دانه‌ها به صورت شاخه‌ای درآیند، به بهبود خواص خزشی با قفل کردن حرکت مرز دانه‌ها، کمک می‌کند. همچنین، با اجرای فرایند عملیات حرارتی، اگر حالت گاما پرایم (۳) از ۲۰ به ۶۰ درصد برسد، سختی و خزش را تغییر و بهبود می‌بخشد. افزایش حالت گاما پرایم (۳) در زمینه با افزایش دما تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش سختی می‌شود. همچنین عنصر نیویوم که از کاربید خارج شده، در حالت گاما زگوند (۳) شرکت می‌کند و لذا در استحکام بخشی نیز، تأثیرگذار است [۷-۹].



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: مقادیر تغییرات سختی خطوط (الف) موازی و (ب) عمود بر راستای دانه‌ها برحسب متغیرهای دما و زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی به صورت کانتور

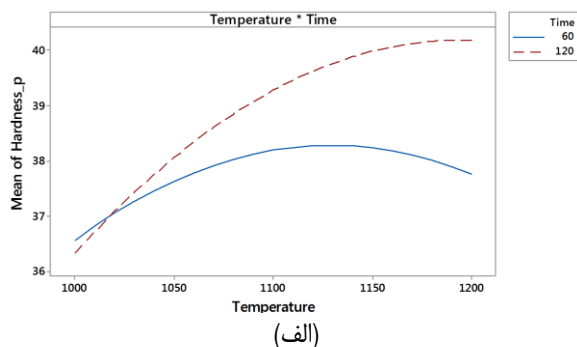
البته برای سختی در خطوط موازی با راستای دانه‌ها و مدت زمان انحلال ۶۰ دقیقه، در دمای انحلال ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، سختی کمی کاهش یافته است. چنین نتایجی، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب به صورت طیف و رویه پاسخ، برای درک بهتر نتایج، قابل مشاهده است.

براساس نتایج بدست آمده، می‌توان مقادیر بهینه برای دما و زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی را با تابع هدف افزایش سختی، محاسبه نمود. در صورتی که تابع هدف، فقط مقادیر سختی خطوط موازی با راستای دانه‌ها انتخاب شود، دمای انحلال بهینه برابر با ۱۱۹۴ درجه سانتیگراد و زمان انحلال بهینه برابر با ۱۲۰ دقیقه محاسبه می‌گردد.

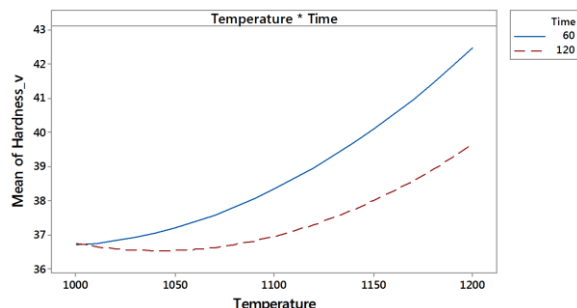
در صورتی که تابع هدف، فقط مقادیر سختی خطوط عمود بر راستای دانه‌ها انتخاب شود، دمای انحلال بهینه برابر با ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان انحلال بهینه برابر با ۶۰ دقیقه محاسبه می‌گردد.

در صورتی که تابع هدف، هر دو مقادیر سختی خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها انتخاب شود (با ضریب وزنی یکسان)، دمای انحلال بهینه برابر با ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان انحلال بهینه برابر با ۱۰۶ دقیقه محاسبه می‌گردد.

در گام بعدی، فرایند عملیات حرارتی بهینه شده، برای بررسی پدیده خزش، که یک حالت خرابی عمده در پره‌های گردا هاست، مدنظر قرار می‌گیرند که نتایج آن در مقالات بعدی، ارائه خواهد شد.



(الف)



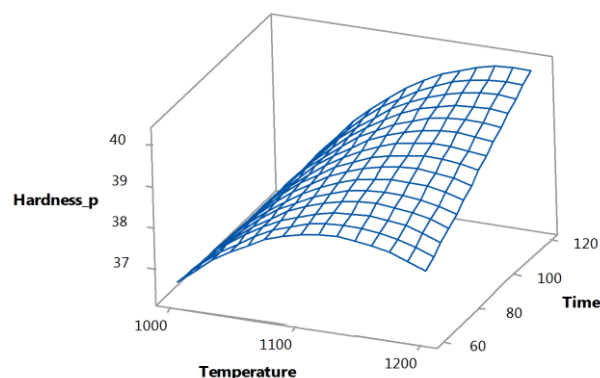
(ب)

شکل ۱۱: مقادیر تغییرات سختی خطوط (الف) موازی و (ب) عمود بر راستای دانه‌ها برحسب متغیرهای دما و زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی

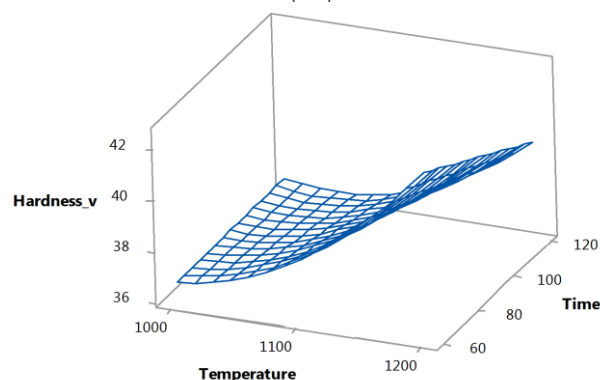
دانه‌ها، به عنوان تابع هدف، دمای انحلال بهینه برابر با ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان انحلال بهینه برابر با ۱۰۶ دقیقه محاسبه می‌گردد.

### مراجع و منابع

- [1] P. Caron, T. Khan, Improvement of creep strength in a nickel-base single-crystal super-alloy by heat treatment, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 61, No. 2, pp. 173-184, 1983
- [2] P. Caron, P.J. Henderson, T. Khan, M. McLean, On the effects of heat treatments on the creep behavior of a single crystal superalloy, *Scripta Metallurgica*, Vol. 20, No. 6, pp. 875-880, 1986
- [3] G.A. Rao, M. Kumar, M. Srinivas, D.S. Sarma, Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot iso-statically pressed super-alloy Inconel 718, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 355, No. 1-2, pp. 114-125, 2003
- [4] J. Li, R.P. Wahi, Investigation of Y/Y lattice mismatch in the poly-crystalline nickel-base super-alloy IN718LC: Influence of heat treatment and creep deformation, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 43, No. 2, pp. 507-517, 1995
- [5] M.P. Jackson, R.C. Reed, Heat treatment of UDIMET 720Li: The effect of microstructure on properties, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 259, No. 1, pp. 85-97, 1999
- [6] J. Safari, S. Nategh, On the heat treatment of Rene-80 nickel-base superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, No. 1-3, pp. 240-250, 2006
- [7] S.A. Sajadi, S.M. Zebarjad, R.I.L. Guthrie, M. Isac, Microstructure evolution of high-performance Ni-base super-alloy GTD-111 with heat treatment parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, No. 1-3, pp. 376-381, 2006
- [8] C.M. Kuo, H. Yang, Y. Bor, C.N. Wei, C.C. Tai, Ageing effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 super-alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 510-511, pp. 289-294, 2009
- [9] M.J. Donchie, S.J. Donchie, *Super-alloys: A Technical Guide*, ASM International, 2002
- [10] *Engineering properties of alloy 713C*, Nickel Institute
- [11] *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials*, ASTM-E8-11, ASTM International, 2012
- [12] F. Binczyk, J. Sleziona, Effect of modification on the mechanical properties of IN-713C alloy, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 195-198, 2010
- [13] M. Azadi, Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2008



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: مقادیر تغییرات سختی خطوط موازی و عمودی بر راستای دانه‌ها برحسب متغیرهای دما و زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی به صورت رویه پاسخ

بررسی‌های ریزساختاری ماده برای مدت زمان انحلال ۱۲۰ دقیقه نشان می‌دهد که افزایش دمای انحلال، تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. به عبارت دیگر، از یک مدت زمان انحلال معین به بعد، حل شدن کاربید در زمینه، تأثیری بر روی سختی ماده ندارد. اما پراکنده شدن بیشتر کاربیدها و شاخه‌ای شدنشان در ریزساختار ماده، روی رفتار خزش تأثیر دارد [۷-۹].

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر دو متغیر دما و زمان انحلال در فرایند عملیات حرارتی ابرهمبسته پایه نیکل 713C که در پره‌های گردای قطعه پرخوران موتور استفاده می‌شود، با تابع هدف افزایش سختی، بررسی شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که برای هر دو حالت سختی (خطوط موازی و عمود بر راستای دانه‌ها)، متغیر دمای انحلال در فرایند عملیات حرارتی، متغیر مؤثر شناخته شده و بقیه متغیرها (زمان و اثر متقابل دما و زمان)، حساس نیستند. نتایج بهینه‌سازی سختی برای ابرهمبسته پایه نیکل 713C نیز، نشان می‌دهد که با انتخاب هر دو مقدار سختی برای خطوط موازی و عمود بر راستای



## Optimization of solution temperature and time in nickel-based super-alloy of engine turbocharger based on hardness by design of experiments

M. Azadi<sup>1\*</sup>, M. Iziy<sup>2</sup>, A. Marbout<sup>3</sup>, M. Azadi<sup>4</sup>, A. Hajjali Mohammadi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [m\\_azadi@semnan.ac.ir](mailto:m_azadi@semnan.ac.ir)

<sup>2</sup> Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [mostafaiziy\\_metal@yahoo.com](mailto:mostafaiziy_metal@yahoo.com)

<sup>3</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [arminmarbout@yahoo.com](mailto:arminmarbout@yahoo.com)

<sup>4</sup> Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [m\\_azadi@semnan.ac.ir](mailto:m_azadi@semnan.ac.ir)

<sup>5</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, [ahajjali@semnan.ac.ir](mailto:ahajjali@semnan.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 29 February 2016

Accepted: 3 September 2016

#### Keywords:

Design of experiments

Hardness measurement

Heat treatment

Nickel-base super-alloy

### ABSTRACT

Nowadays, one of important parts in some combustion engines is the turbo-charger, which could improve the performance. Such blades of the turbine, is working at high temperatures. Based on this condition and according to centrifugal forces in blades, one of design parameters is the creep strength of the material. For such condition, nickel-base super-alloy has been utilized. In this article, the hardness of 713C nickel-base super-alloy (which has been used in turbine blades of engines) increased by a typical heat treatment. For this objective, the design of experiments was utilized and the hardness through parallel and vertical lines to the grains direction in the material micro-structure was measured at different values of the solution temperature and time in the heat treatment. Experimental results showed that optimum values for the solution temperature and time are generally 1200°C and 60 min, respectively, when the hardness increased. The sensitivity analysis indicated that effects of the solution temperature are more significant in comparison to other parameters.

