مطالعهی تأثیر پارامترهای ورودی بر مشخصه های خروجی سطح نشیمنگاه میل لنگ های میکروآلیاژی 38MnVS5 در فرآیند سختکاری القایی مهدی ثقفیان'، محمدرضا شبگرد\*'، هادی عیوضی باقری <sup>۲</sup> و بابک سعدی زاده<sup>†</sup>

چکیدہ

در این پژوهش تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند سختکاری القایی( توان، فاصله کویل تا میل لنگ و زمان القای جریان ) بر پارامترهای خروجی (سختی سطح و تغییرات عمق ناحیهٔ سختکاری شده)، در عملیات سختکاری میل لنگ های میکروآلیاژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان میدهند که با افزایش توان و زمان القای جریان، مقدار سختی سطح بیشتر شده و عمق منطقهی سختکاری شده افزایش می یابد. همچنین، با افزایش فاصلهی بین کویل و میل لنگ، مقدار سختی بدست آمده کاهش می یابد. براساس نتایج بدست آمده مشخص شد که در تمامی میل لنگ های مورد آزمایش، سختی سطح پینها (نشیمنگاهها) در بخش بالایی آنها، بیش از بخش پایینی آنهاست. به گونهای که این عامل می تواند موجب سایش زودرس میل لنگ ها شده و عمر آنها را کاهش دهد.

**واژههای کلیدی**: توان، زمان القای جریان، سختی سطح، عمق سختی

<sup>1-</sup> كارشناس ارشد مهندسي مكانيك، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقيقات تهران.

<sup>2-</sup> دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

<sup>3-</sup> كارشناس ارشد مهندسي مكانيك، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد واحد تبريز.

<sup>4-</sup> كارشناس ارشد مهندسي مكانيك، شركت موتورسازان تراكتورسازي تبريز.

<sup>\*-</sup> نویسندهی مسئول مقاله:mrshabgard@tabrizu.ac.ir:

پيشگفتار

در فرآیند حرارت دهی القایی قطعه کاری که می بایستی روی بخشی از آن عملیات سختکاری القایی انجام شود، در داخل یک سیم پیچ (القاگر) قرار می گیرد. در این فرآیند، با عبور جریان متناوب با فرکانس زیاد (در محدودهی 2 تا 55 کیلو هرتز) از القاگر، میدان مغناطیسی پیرامون آن ایجاد شده و باعث ایجاد جریانهای فوکو در قطعهی یاد شده می گردد. این جریان که در سطح قطعه متمرکز میشود، به دلیل وجود مقاومت الکتریکی ماده باعث ایجاد حرارت در آن ناحیه می شود. به گونهای که هر چه فرکانس جریان بیشتر باشد، عمق نفوذ جریان و ضخامت فرکانس عمر خسته کمتر خواهد شد[1]. از مزایای روش سختکاری القایی سرعت زیاد فرایند، تکرار پذیری بالا، افزایش عمر خستگی قطعات و همچنین، قابلیت خودکار شدن آن می باشد.

یکی از پیشرفتهای مهم صنعت فولاد در نیم قرن اخیر ،تولید فولادهای میکروآلیاژی با استحکام بالا میباشد. فولاد میکرو آلیاژی، فولادی است که ترکیب شیمیایی پایه آن شبیه ترکیب شیمیایی یک فولاد ساختمانی معمولی است که مقادیر جزئی از عناصر میکرو آلیاژی (مانند وانادیوم و تیتانیم) به آن افزوده شده است. در این فولادها معمولا مقدار کل عناصر میکرو آلیاژ افزوده شده در حدود چند دهم درصد و یا کمتر است[2].

در سالهای اخیر، پژوهشهای متعددی در ارتباط با مطالعه عوامل موثر در مورد عملیات حرارتی القایی قطعات فولادی انجام گرفته است. کرام و همکاران [3]، کیفیت سطح و لایههای زیر سطحی میل لنگهای تحت عملیات سخت کاری القایی را مورد مطالعه قرار داده اند، آنها در بررسیهای خود به این نتیجه رسیدند که الگوی دقیق تنشهای پسماند بوجود آمده در سطح، بستگی به دماهای مورد استفاده، عمق سختکاری و نوع عملیات کوئنچ دارد. کوهلی و همکاران [4]، در پژوهش خود شرایط بهینهی عملیات سختکاری القایی فولاد شرایط بهینهی عملیات سختکاری القایی فولاد قطعه کار و القاگر و زمان حرارت دهی را موثرترین پارامترهای ورودی بر عمق سختکاری معرفی کرده اند.

همچنین، بر اساس بررسیهای متالوگرافی مشخص شد که با افزایش دمای آستینیتی کردن میل لنگ، ساختار مارتنزیت متراکمتری بدست آمده و سختی سطحی مناطق سختکاری شده افزایش مییابد. احمد و همکاران [5]، ویژگیهای سطح در عملیات سختکاری القایی فولاد (AISI 1045) را مورد مطالعه قرار داده اند. بر اساس گزارش آنها، عمق ناحیهی سختکاری شدهی سطح نمونهها مابین 0.۸ تا 2.5 میلیمتر متغیر بوده و سختی سطح به مقدار قابل توجهی از سختی لایه های پایین تر بیشتر است. کاشفی و همکاران [6]، تأثیر پارامترهای ورودی توان، زمان القای جریان و تأثیر ساختار اولیه را بر عمق ناحیهی سختکاری شدهی پلوس خودرو از جنس فولاد (AISI 1045) مورد بررسی قرار دادهاند. در پژوهش آنها، ارتباط بین عمق سخت شدهی کل و عمق سخت شدهی موثر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که عمق سخت شدهی موثر 85٪ عمق سخت شدهی کل می باشد. همچنین، بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که با ساختار اولیهی ظریف تر، میتوان عمق ناحیهی سختکاری شده را افزایش داد. کریستوفرسون و همکاران [7]، ريز ساختار سطح دو نوع ريزساختار اوليهي (كوئنچ و تمپر شده و نرمالیزه شده) سختکاری شده به روش القایی را مورد بررسی قرار دادهاند. در بررسی آنها مشخص شد که پس از انجام فرآیند سختکاری القایی، یک تنش پسماند دو محوره روی سطح نمونه ایجاد میشود. این بررسی نشان میدهد که به ازای عمق یکسان پوسته، پارامترهای فرآیند سختکاری به روش القایی، وضعیت تنش پسماند قطعات سختکاری شده را به دلیل توزیعهای متفاوت دما در نمونهها در طول گرمایش، به مقدار زیادی تحت تأثير قرار می دهد.

با توجه به کاربرد گستردهی میللنگ در صنایع خودروسازی و نقش خیلی مهم آن در تعیین قیمت و عمر مفید مجموعهی موتور و با ملاحظهی این که سختی و مقاومت به سایش تکیه گاه یاتاقانها در روی میل لنگ بیش ترین تأثیر را در روی عمر میل لنگ دارد، بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند سختکاری القایی بر سختی سطح میل لنگهای میکروآلیاژی که در شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز تولید می شوند، به عنوان

یک پروژهٔ مهم پژوهشی در دستور کار این واحد صنعتی قرار گرفت. لذا، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مهمترین پارامترهای ورودی فرآیند سختکاری القایی (توان، فاصله کویل تا میل لنگ و زمان القای جریان) بر سختی سطح و عمق سختکاری شده در ناحیهی سختکاری شده (نشیمنگاه محل یاتاقانها در روی میل لنگ) می باشد. همچنین، انجام تستها در شرایط واقعی بر روی میل لنگهای مورد استفاده در موتور (به جای نمونه های آزمایشگاهی) از مزایای دیگر این پژوهش می اشد.

مواد و روش انجام آزمایش ها

میل لنگهای مورد آزمایش در این پژوهش از نوع میل لنگ های چهار نشیمنگاهی میکروآلیاژی (38MnVS5) می باشند که در موتورهای دیزلی بکار می روند. جدول 1 آنالیز کوانتومتری از میل لنگ های مورد استفاده را نشان می دهد.

در این آزمایشها زمان القای جریان، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ به عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند، به گونهای که زمان القای جریان در چهار سطح، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ<sup>۱</sup> هر کدام در سه سطح انتخاب شده اند. بدین ترتیب، با استفاده از روش طراحی آزمایشهای کامل<sup>۲</sup>، 36 عدد قطعه کار نمونه آماده گردید و برای این منظور 9 عدد میل لنگ که هر کدام دارای چهار نشیمنگاه یاتاقان خارج از مرکز میباشند، بکار گرفته شد. جدول 2 پارامترهای ورودی جهت انجام آزمایشها را نشان میدهد. همچنین، شکل شماتیک میللنگ همراه با پینها (نشیمنگاهها) مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است.

ابتدا تمامی میل لنگها به وسیلهی ماشین مخصوص سختکاری القایی (-Alfing -Type: PU90-43-130) موجود در خط میل لنگ شرکت موتور سازان مورد عملیات سختکاری قرار گرفتند. به دلیل انحنا دار بودن سطح پینها، جهت اندازه گیری سختی سطح پین ها از دستگاه سختی سنج پرتابل ( Equo Tip)

613.0097 استفاده شد. در مرحلهی بعد برای اندازه گیری سختی سطح مقطع نواحی سختکاری شدهی میل لنگها، تمامی پینهای سختکاری شده، به وسیلهی دستگاه وایرکات (CNC-DK77 - 40A) از نصف قطرشان به صورت افقی برش داده شدند تا نیمرخ نواحی سختکاری شده ظاهر گردد، سپس عملیات سختی سنجی سختکاری شده ظاهر گردد، سپس عملیات سختی سنجی دستگاه سختی سنج (Vechers Briviskop 250M) انجام گردید و اندازهی عمق و پروفیل ناحیهی سختکاری شده مشخص شد. شکل 2 سطح مقطع برش خوردهی میل لنگ از ناحیهی یکی از پین ها را همراه با نیمرخ ناحیهی سختکاری شده نمایش می دهد.

بمنظور بررسی متالورژیکی سطح مقطع قطعه کارهای سختکاری شده، نمونه ها پس از مانت گیری، سمباده زنی شده و پولیش زده شدند. جهت مشاهده سطح مقطع قطعات به وسیلهی دستگاه میکروسکوپ نوری Cam یه وسیلهی دستگاه میکروسکوپ زر Cam (Scan mv2300)و میکروسکوپ الکترونی ( Scan سر2300)، نمونههای پولیش شده با محلول الکل و اسید نیتریک اچ شده و بلافاصله شسته شده و به وسیلهی جریان هوای گرم، خشک گردیدند.

بحث و نتايج

شكل هاى  $\mathbf{S}$  و  $\mathbf{4}$  تأثير مقدار توان مصرفى و زمان القاى جريان<sup>7</sup> (I.H.T) بر سختى سطح قطعات سختكارى شده را نشان مىدهند. همان گونه كه ملاحظه مى شود، مقدار سختى سطح پينهاى سختكارى شده (نشيمنگاهها) با افزايش توان افزايش مىيابد. دليل اين مسئله را اين گونه مىتوان بيان كرد كه با افزايش مقدار توان ورودى، جريانهاى گردابى شديدترى در سطح قطعه ايجاد مىشود به گونه اى كه با افزايش شدت اين جريان ها، بر جريانهاى گردابى شديدترى در سطح معله ايجاد اساس رابطهى (1) حرارت بيشترى در سطح ميللنگ القا مى شود. (1) كه در آن t مدت زمان عبور جريان، I شدت جريان عبورى، R مقاومت الكتريكى و  $\mathbf{Q}$  گرماى توليد شده

است. با توجه به این که در سرعتهای بالای گرمایش نظیر

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Gap

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> - full factorial

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> - Induction heating Time

گرم کردن القایی، مکانیسم تشکیل آستنیت شبیه مکانیزم استحالهی ماتنزیتی میباشد. لذا، در حالت گرمایش با سرعت زیاد، در ساختار بدست آمده، دانسیتهی بالایی از معایب کریستالی نظیر نابجاییها و جاهای خالی ایجاد میشود که در هنگام عملیات کوئنچ به عنوان محلهای جوانه زنی مارتنزیت عمل میکنند. لذا، با افزایش توان ورودی و در نتیجه، افزایش سرعت گرمایش، در هنگام کوئنچ در سطح قطعهکار فاز مارتنزیت با ساختار ظریفتری بوجود میآید که باعث افزایش سختی آن میشود [8] و در نتیجه همزمان با افزایش توان ورودی، مقدار سختی سطح بیشتر می شود.

بر اساس شکلهای 3 و 4 همزمان با افزایش زمان القای جریان مقدار سختی سطح افزایش مییابد. دلیل این امر را این گونه میتوان توضیح داد که با افزایش زمان القای جریان تا یک حد مناسب، سطح قطعه کار مدت زمان بیشتری در معرض جریانهای گردابی قرار گرفته، دمای سطح قطعه افزایش یافته و سطح میل لنگ مدت زمان کافی برای رسیدن به دمای آستینیتی در اختیار خواهد داشت، در حالی که در زمانهای پایین تر، دمای فاز آستنیت تشکیل شده پایین تر است. این امر سبب میشود که پس از عملیات کوئنچ، مقدار سختی در این نمونهها در مقایسه با نمونههایی که مدت زمان کافی در معرض مقایسه با نمونههایی که مدت زمان کافی در معرض

# تأثیر فاصلهی کویل تا میل لنگ بر مقدار سختی سطح مقطع قطعات سختکاری شده

شکلهای 5 و 6 تأثیر فاصله یبین کویل تا پین را بر سختی سطح پینها نشان می دهند. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش فاصله بین کویل تا پینها، مقدار سختی سطح کاهش مییابد. علت این مسئله را بدین صورت می توان توضیح داد که افزایش فاصله یبین کویل و میللنگ، باعث پراکندگی میدان مغناطیسی و کاهش شدت جریان های گردابی القای در سطح قطعه کار می گردد که این مسئله باعث کاهش گرمای تولید شده و در نتیجه، کاهش دمای سطح می شود [9]، لذا در عملیات کوئنچ، مقدار سختی در سطح کاهش می یابد.

تأثیر مقدار توان ورودی بر مقدار سختی سطح و عمق ناحیهی سختکاری شده

شکلهای 7 و 8 تأثیر مقدار توان مصرفی بر سختی سطح مقطع قطعات سختكارى شده را نشان مىدهند. همان گونه که ملاحظه می شود، مقدار سختی سطح مقطع میللنگ های سختکاری شده در جهت شعاع پینها روندی نزولی دارد. دلیل این مسئله را بدین صورت می توان بیان کرد که به دلیل استفاده از جریان متناوب برای انجام عملیات سختکاری القایی، همواره اثر پوستهای در نتیجهی تجمع جریانهای گردابی در لایهی سطحي قطعه كار واقع در درون كويل بوجود مي آيد كه به موجب اثر پوستهای تقریبا 86٪ توان اعمالی در لایهی سطحی قطعه کار متمرکز می شود [10]، این امر به دلیل ایجاد گرمای بیشتر در سطح میل لنگ و لبه های نزدیک به سطح سبب تغییر ساختار نهایی به ساختار مارتنزیتی مي شود، ولي با افزايش فاصله از سطح قطعه كار، از مقدار فاز مارتنزیت بوجود آمده کاسته می شود و در نتیجه، مقدار سختی کاهش می یابد. همچنین، با توجه به اینکه سرعت گرمایش در لبهی قطعه کار بیشتر از بخشهای داخلی است، لذا با افزایش فاصله از سطح، امکان افزایش اندازهی دانه های آستنیت وجود دارد، این مسئله باعث می شود که فاز ماتنزیت از آستنیت اولیه با دانههای درشتری بوجود آید و نسبت به مازتنزیتی که در لبهی قطعه کار از دانههای ریزتر آستنیت تشکیل میشود، سختی کمتری داشته باشد. شکلهای 9 و 11 (تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نوری) ساختار مارتنزیتی بدست آمده در سطح نمونه و کاهش فاز مارتنزیتی با افزایش فاصله از لبهی سختکاری شده را نشان می دهد.

همچنین، شکلهای 7 و 8 تأثیر مقدار توان ورودی بر عمق ناحیهی سختکاری شده را مختلف نشان می دهند. همان گونه که ملاحظه میشود، با افزایش توان عمق ناحیهی سختکاری شده افزایش می یابد. علت این امر را این گونه می توان توضیح داد که با توجه به قانون انتقال این گونه می توان توضیح داد که با توجه به قانون انتقال این گونه می توان توضیح داد که با توجه به داخل قطعه افزایش توان بیشتر شود، مقدار گرمایی که به داخل قطعه نفوذ می کند، بیشتر می شود [9]. (2)

که در رابطهی (2)، (q) مقدار گرمای منتقل شده و (T) دمای سطح قطعه می باشد. به بیان دیگر، هر چه توان بالاتری بکار برده شود، گرمای تولید شده عمق بیشتری را تحت تأثیر قرار خواهد داد که این امر باعث افزایش عمق ناحیهی سختکاری خواهد شد.

## تأثیر زمان القای جریان بر عمق ناحیهی سختکاری شده

شكل 11 تأثير زمان القای جریان (I.H.T) بر عمق ناحیهی سختكاری شده را نشان می دهد. همان گونه كه ملاحظه می شود، با افزایش زمان القای جریان، عمق ناحیهی سختكاری شده افزایش می یابد. دلیل این مسئله را بدین صورت می توان توضیح داد كه با افزایش زمان القای جریان تا یک حد مناسب، فرصت بیش تری جهت القای جریان تا یک حد مناسب، فرصت بیش تری جهت آمده و لایههای پایین تر نیز تحت تأثیر حرارت ایجاد شده قرار می گیرند. با افزایش دما در لایهی پایین تر و رسیدن مدای این مناطق به دمای استحالهی آستنیتی، پس از عملیات كوئنچ افزون بر لبهی قطعه كار، لایه های نزدیک به سطح نیز دچار تغییر فاز شده و به دلیل ایجاد فاز مارتنزیت در این لایه ها، مقدار عمق سختی افزایش می ابد. شكلهای 11 و 12 ساختار متالورژیكی سطح نمونه ها را پیش و پس از سختكاری نشان می دهد.

## تأثیر فاصلهی کویل تا میللنگ بر عمق ناحیهی سختکاری شده

مقایسه یشکلهای 13 و 14 نشان می دهد که با افزایش فاصله ی بین کویل و میل لنگ، عمق ناحیه ی سختکاری شده کاهش می یابد. علت این امر را این گونه می توان توضیح داد که افزایش فاصله ی بین کویل و میل لنگ، به دلیل پراکندگی جریانهایی گردابی ایجاد شده و اتلاف گرمای بوجود آمده، گرمای تولید شده در سطح کاهش می یابد و در نتیجه ی منجر به کاهش عمق نفوذ گرما با استفاده از مکانیزم رسانش به لایه های پایین تر قطعه کار می شود. این مسئله باعث کاهش عمق لایه ی متأثر از حرارت فرآیند سختکاری القایی در سطح قطعات می شود. گفتنی است جهت بالا بردن عمق لایه ی

سختکاری شده، فاصلهی بین کویل و میللنگ را نمی توان خیلی کم در نظر گرفت، زیرا در حین دوران میللنگ احتمال برخورد میللنگ با کویل وجود دارد که باعث ایجاد اتصال کوتاه شده و منجر به آسیب دیدن القاگر و در نتیجه باعث ایجاد وقفه در عملیات تولید می شود.

شکلهای 15 و 16 مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پینها (نشیمنگاهها) را نشان میدهند. همان گونه که ملاحظه می شود، مقدار سختی سطح در قسمت بالای پین، بیشتر از قسمت پایین است، دلیل اختلاف سختی در این دو ناحیه در تفاوت سرعت کوئنچ این دو منطقه می باشد. با توجه به اینکه میللنگ در حال دوران وارد مايع كوئنچ مي شود، اين امر سبب مي شود که سرعت حرکت خطی قسمت بالای نشیمنگاه در داخل مايع كوئنچ بيش از قسمت پاييني آن باشد و در نتيجه عملیات کوئنچ در بخش بیرونی پین سریعتر رخ داده و باعث افزایش سختی در این سطح نسبت به سطح قسمت داخلی نشیمنگاه می شود. عامل دیگر موثر در پایین تر بودن مقدار سختی در سمت داخلی پین ها، وجود وب ها در دو سمت این ناحیه است. هنگامی که میللنگ در حالت دورانی وارد مایع کوئنچ می شود، وجود وب ها در سمت پایین پین ها، نوعی مانع در مقابل جریان مایع کوئنچ در اطراف پین ها ایجاد می کند، به گونه ای که مایع کوئنچ نمی تواند به صورت مناسب در اطراف این نقاط جریان یابد و در نتیجه، شدت عملیات کوئنچ در این ناحیه کاهش یافته و منجر به کم شدن سختی در این منطقه می شود.

#### نتيجه گيرى

در این پژوهش تأثیر پارامترهای توان، فاصلهی کویل تا میل لنگ و زمان القای جریان بر سختی سطح و تغییرات عمق ناحیهی سختکاری شده در عملیات سختکاری میل لنگهای میکروآلیاژی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مهم زیر بدست آمد:

۱- در تمامی نمونه ها با افزایش توان تنظیمی، سختی
 سطح و عمق لایهی سخت کاری شده افزایش می یابد.

۲- در سطح ثابتی از توان، با افزایش زمان القای جریان، سختی سطح و عمق لایهی سختکاری شده افزایش مییابد.
۳- با افزایش فاصلهی بین کویل و میللنگ، عمق لایه سختکاری شده کاهش می یابد.
۴- فاز مارتنزیت تشکیل شده متأثر از مقدار پارامترهای ورودی بوده و با افزایش فاصله از سطح، از مقدار فاز مارتنزیت کاسته شده و بر مقدار فریت و پرلیت افزوده میشود.

Institute of Chemical Engineers, Vol. XXXVII, 2009.

6- م. کاشفی، م. ر. ثانی، ک. زرگریان، "عوامل مؤثر بر عمق سخت شده در سخت کاری القایی پلوس خودرو"، دهمین گنکره انجمن مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، .1385

7- H. Kristoffersen and P. Vomacka, "Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses", Materials and Design, 22, pp. 637-644, 2001.

8- ع. هرندی، ح. رضوی و م. عباسی، "بررسی پارامترهای فرآیند سختکاری القایی بر عمر خستگی توشن بار"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی ایران و جامعهٔ ریخته گران ایران .1387.

9- V. Rudnev, "coil copper electromagnetic edge effect", Heat treating process, Professor Induction Series, Inductoheat Group, 2007.
10- M. Melander, "Theoretical and experimental study of stationary and progressive induction hardening". Journal of Heat Treating, Vol. 4(2), pp.145–166, 1985.

۵- در تمامی نمونهها، مقدار سختی سطح در سمت
 خارجی پین ها بیشتر از سمت داخلی پین هاست.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند که از مدیریت و پرسنل محترم بخش فنی و مهندسی شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز جهت همکاری صمیمانه در انجام این پژوهش تقدیر و تشکر نمایند.

#### منابع

 1- م. ع. گلعذار، عملیات حرارتی و مهندسی سطح، انتشارات ارکان، اصفهان، .1382
 2- ا. باباخانی، "بررسی تأثیر دمای پیشگرم، میزان کرنش و نرخ سرد شدن بر اندازه 30MSV6 دانه ی فولاد میکروآلیاژی وانادیوم دار"، دومین همایش مشترک انجمن ریخته گران ایران و انجمن مهندسان متالورژی ایران، 1387

3- J. Grum, "Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction

surface hardening and fnish grinding", Faculty of Mechanical Engineering Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 217, Part D, 2002.

4- A. Kohli and H. Singh, "Optimizing mean effective case depth of induction hardened parts (rolled condition) using response surface methodology", International Journal on Emerging Technologies, Vol. 1(1), pp. 87-91, 2010.

5- T. Ahmad, O. Yousaf, A. Salam and J.Ahmad, "Relationthip Between Case Depth and Hardness in an Induction Hardened Medium Carbon Steel" Journal of Pakistan

پيوستھا

جدول 1- آنالیز شیمیایی از نمونه های مورد آزمایش														
	عنصر	С	Si	Р	Mo	Ni	Al	Cu	V	Cr	Mn	Fe	S	Ti
0 درصد	,365	0,562	0/007	0/008	0,096	0/019	0,112	2 0,1	0,148	8	1,392	97 <sub>/</sub> 23	0,054	0/002
														وزنى

جدول 2- پارامتر های ورودی جهت انجام آزمایش ها.								
متغيير	توان (kW)	زمان القای جریان	فاصله بين كويل و	فرکانس (KHz)	دمای مایع کوینچ			
		(S)	میل لنگ (mm)		(°C)			
سطوح آزمایش ها	105.95.85	13.11.9.7	5,5,5,7.1	7,8	27			
	ی یمن	رورنال		رب				



سمت پايين <u>پين</u>

شکل 2- پروفیل لایهی سختکاری شده.



شکل 3- تأثیر توان و زمان القای جریان بر روی سختی سطح.(فاصلهی کویل تا میل لنگ=0٫5 میلیمتر)



شکل 4- تأثیر توان و زمان القای جریان بر روی سختی سطح.(فاصلهی کویل تا میل لنگ=0٫7 میلیمتر)



شکل 5- تأثیر فاصلهی بین کویل و میل لنگ بر روی سختی سطح (توان ورودی=105 کیلو وات)



شکل 6- تأثیر فاصلهی بین کویل و میل لنگ بر روی سختی سطح (توان ورودی=85 کیلو وات)



شکل 2– توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونههای سختکاری شده در توان های ورودی متفاوت (فاصلهی کویل تا میل لنگ=0/7 میلیمتر، زمان القای جریان=9 ثانیه)



شکل **3-** توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونههای سختکاری شده در توان های ورودی متفاوت (فاصلهی کویل تا میل لنگ=5/0 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه)



شکل4- تصویر میکروسکوپ الکترونی(SEM) با بزرگنمایی 0444X از نمونه آزمایشی الف) لبهی سختکاری شده (مارتنزیتی) ب) پایین تر از لبهٔ سختکاری شده (فاصلهٔ کویل تا میل لنگ=0/5 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=105 کیلو وات)



شکل044- تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 044X از نمونه آزمایشی الف) لبهٔ سختکاری شده (مارتنزیتی) ب) ساختار نمونه ها قبل از عملیات سختکاری القایی (ساختار فریتی- پرلیتی) (فاصلهٔ کویل تا میل لنگ=0/5 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=105 کیلو وات)



شکل 00– توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونههای سختکاری شده در زمانهای القای جریان تفاوت (فاصلهی کویل تا میل لنگ=0٫5 میلیمتر، توان ورودی=85 کیلو وات)



(ساختار فریتی- پرلیتی) ب) پس از عملیات سختکاری القایی(ساختار مارتنزیتی) (فاصلهی کویل تا میل لنگ=1 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=85 کیلو وات)



شکل00– توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونههای سختکاری شده (فاصلهی کویل تا میل لنگ=0/7 میلیمتر، توان ورودی=95 کیلو وات)



شکل00-مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پین ها (فاصلهی کویل تا میل لنگ=0٫5 میلیمتر، زمان القای جریان=7 ثانیه)



شکل01– مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پین ها (فاصلهی کویل تا میل لنگ=0/5 میلیمتر، زمان القای جریان=11 ثانیه)