



## شناسایی غیرمخرب تغییرات ریزساختاری ناشی از سوختگی سنگ‌زنی با بهره‌گیری از کاوشگرهای الکترومغناطیسی

حسین نوروزی<sup>1</sup>، کیان کریمی نژاد<sup>1\*</sup>، سعید کهربائی<sup>2\*</sup>، مهرداد کاشفی<sup>3</sup>، ایمان احدی اخلاقی<sup>4</sup>، احسان احدی اخلاقی<sup>5</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

3- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

4- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

5- استادیار، فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

\* مشهد، صندوق پستی 9188148848، kahrobae@sadjad.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از مهمترین مشکلات فرایند سنگ‌زنی در شرایط عدم کنترل صحیح پارامترهای آن، وقوع سوختگی سنگ‌زنی می‌باشد که منجر به افت خواص مکانیکی و کارایی قطعه می‌شود. پژوهش حاضر با هدف شناسایی غیرمخرب پدیده سوختگی سنگ‌زنی در قطعات فولادی انجام شده است. برای این منظور، با تغییر پارامترهای سنگ‌زنی، میزان متفاوتی از سوختگی در سطح قطعات فولاد ساده کربنی ایجاد شده است. نتایج حاصل از مشاهدات میکروسکوپی و آزمون ریزسختی‌سنجی، وقوع دو نوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی (بازپخت سطحی) و سخت‌شدگی مجدد (تشکیل لایه سفید سخت در سطح) را نشان می‌دهد. در بیشترین شدت میزان سوختگی، سختی در سطح از 600 ویکرز به بیش از 900 ویکرز افزایش و در لایه‌های زیرین نیز در اثر وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی تا حدود 450 ویکرز کاهش یافته است. در این پژوهش، به بررسی قابلیت دو نوع کاوشگر اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی و نشت شار مغناطیسی در تشخیص سوختگی سنگ‌زنی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که خروجی‌های هر دو کاوشگر متأثر از تغییرات ریزساختاری ناشی از سنگ‌زنی می‌باشند. در اثر وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی، افزایش در نفوذپذیری و کاهش در میزان شار نشتی متناسب با ضخامت لایه نرم‌شده رخ می‌دهد. همچنین، برای نمونه‌های دارای سوختگی سخت‌شدگی مجدد، اثرات غیرهمسوی ناشی از سخت شدن در سطح و نرم شدن در لایه‌های زیرین، بر هر دو پارامتر مغناطیسی مشاهده و تحلیل شده است. این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از کاوشگرهای غیرمخرب طراحی شده امکان شناسایی سوختگی ناشی از سنگ‌زنی، به ویژه تشخیص نرم‌شدگی حرارتی که در صنعت بیشتر رخ می‌دهد، فراهم می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 25 اسفند 1399  
داوری اولیه: 15 فروردین 1400  
پذیرش: 4 اردیبهشت 1400

### کلیدواژگان:

سوختگی سنگ‌زنی  
آزمون غیرمخرب  
روش نشت شار مغناطیسی  
نفوذپذیری مغناطیسی

## Nondestructive detection of Microstructural Changes due to the Grinding Burn Using Electromagnetic Probes

Hossein Norouzi Sahraei<sup>1</sup>, Kian Karami Nezhad<sup>1</sup>, Saeed Kahrobaee<sup>2\*</sup>, Mehrdad Kashefi<sup>3</sup>, Iman Ahadi Akhlaghi<sup>4</sup>, Ehsan Ahadi Akhlaghi<sup>5</sup>

1- Center of Nondestructive Evaluation, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical and Materials Engineering, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran

3- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Department of Electrical and Bioelectric Engineering, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran

5- Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

\* P.O.B. 9188148848 Mashhad, Iran, kahrobae@sadjad.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 16 March 2021  
First Decision: 4 April 2021  
Accepted: 24 April 2021

### Keywords:

Grinding burn  
Non-destructive test  
Magnetic flux leakage method  
Magnetic permeability

### Abstract

Grinding burn is one of the most significant problems in grinding process with uncontrolled conditions and degrades the mechanical properties and performance of the part. The aim of the present study is to non-destructively evaluate the grinding burn phenomenon in steel parts. The parameters of the grinding process were changed to produce microstructural changes with different burn grades on the surface of steel parts. The results obtained from microscopic observations and micro-hardness tests revealed the occurrence of two types of burns including thermal softening (surface tempering) and re-hardening (formation of a hard white layer on the surface) burns. In the maximum burn grade, hardness of the surface increased from 600 HV to more than 900 HV, while hardness of 450 HV was obtained in the deeper layers due to thermal softening burn. In this study, the capability of two types of electromagnetic probes, measuring magnetic permeability and magnetic flux leakage, has been studied for detecting the grinding burn. The results show that the outputs of both probes were affected by the microstructural changes. Increase in tempered layer (due to thermal softening burn) enhances the magnetic permeability and reduces the flux leakage sensed by the probes. For the samples with re-hardening burn, effects of two opposing mechanisms (the surface hardening and softening) on the magnetic parameters have been assessed in the deeper layers. The present study indicates that utilizing the designed non-destructive probes, it is possible to detect the grinding burn, especially the thermal softening one, which happens more.

### Please cite this article using:

H. Norouzi Sahraei, K. Karami Nezhad, S. Kahrobaee, M. Kashefi, I. Ahadi Akhlaghi, E. Ahadi Akhlaghi, Nondestructive detection of Microstructural Changes due to the Grinding Burn Using Electromagnetic Probes, Vol. 8, No. 3, pp. 9- 19, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

سنگزنی یکی از فرایندهای ماشین‌کاری مهم و پرکاربرد است. این فرایند که یکی از مراحل پایانی تولید است در نهایت منجر به تولید قطعاتی با کیفیت سطح و دقت ابعادی مطلوب خواهد شد [1]. در سنگزنی نسبت به سایر روش‌های ماشین‌کاری، با توجه به برداشت ماده توسط تقابل ذرات ساینده و قطعه‌کار، انرژی زیادی صرف می‌شود. بخش زیادی از این انرژی در سطح قطعه‌کار به گرما تبدیل شده و دمای آن را افزایش می‌دهد. در صورتی که دمای قطعه از یک مقدار بحرانی بیشتر شود، آسیب‌های حرارتی یا همان سوختگی سنگزنی رخ خواهد داد. در سنگزنی قطعات فولادی پس از سخت‌کاری، افزایش دما در حین سنگزنی تا بالاتر از دمای بازپخت منجر به تغییر در ریزساختار، بازپخت آن و وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی می‌شود. اگر افزایش دما سطح قطعه تا بالاتر از دمای آستنیت‌ه آن ادامه یابد، سوختگی سخت‌شدگی مجدد رخ خواهد داد. در این حالت، در سطح قطعه یک لایه ساختار مارتنزیت بازپخت نشده، سخت و ترد تشکیل خواهد شد که در زیر آن یک لایه نرم‌شده وجود دارد. این تغییرات ریزساختاری ناشی از سوختگی سنگزنی به همراه تنش‌های پسماند کششی ایجاد شده ناشی از انبساط و انقباض حرارتی و وقوع استحاله‌های فازی به شدت بر خواص قطعه و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد. بنابراین، تشخیص نوع و میزان سوختگی سنگزنی در خطوط تولید انبوه قطعات صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲،۱].

یکی از روش‌های صنعتی و متداول برای تشخیص تغییرات ریزساختاری ناشی از سوختگی سنگزنی، حکاکی با محلول نایتال می‌باشد. بدین ترتیب که ریزساختار ناشی از سوختگی در سطح قطعه پاسخی متفاوت در مجاورت محلول نایتال خواهد داشت [۴،۳]. مطالعات متالوگرافی/مشاهدات میکروسکوپی و همچنین اندازه‌گیری تغییرات سختی در مقطع عرضی قطعات از دیگر روش‌های تشخیص سوختگی هستند [5-7]. این روش‌ها به طور عمده مخرب بوده و انجام آنها مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. همچنین، بازرسی 100% قطعات پس از سنگزنی به منظور تشخیص سوختگی با این روش‌ها ممکن نیست. بنابراین، بهره‌گیری از روش‌هایی غیرمخرب، دقیق، سریع و کم‌هزینه برای تشخیص سوختگی سنگزنی، گامی ارزنده در فرایندهای بازرسی و کنترل کیفیت محسوب می‌شود.

در بین انواع روش‌های غیرمخرب متداول مورد استفاده در صنعت، آزمون‌های پایه الکترومغناطیسی کاربرد گسترده‌ای در زمینه مشخصه‌یابی تغییرات ریزساختار در سطح قطعات فولادی

دارند. تعیین عمق لایه سخت شده در سطح قطعات سخت‌کاری القایی شده [8]، اندازه‌گیری ضخامت لایه کربن‌زدایی [9] و تعیین ضخامت لایه نیترووره شده [10]، به ترتیب، مثال‌هایی از کاربرد روش‌های جریان گردابی، حلقه هیستریز مغناطیسی و سیگنال‌های بارک‌هاوزن<sup>1</sup> در این حوزه هستند. علاوه بر روش‌های مذکور، آزمون نشت شار مغناطیسی (MFL<sup>2</sup>) نیز یک روش غیرمخرب رایج برای تشخیص خوردگی و ترک‌یابی در لوله‌های فولادی و چدنی انتقال نفت و گاز است. مکانیزم عملکردی این آزمون به این صورت است که با قرارگیری قطعه از جنس فرومغناطیس تحت یک میدان مغناطیسی خارجی، شار مغناطیسی در اثر ناپیوستگی‌هایی نزدیک سطح قطعه، نشت یافته و توسط حسگرهای مغناطیسی شناسایی می‌شود. به طور معمول این حسگرها از نوع سنسورهای اثر هال بوده و هرگونه تغییر در میدان مغناطیسی مجاورشان را حس کرده و ولتاژی متناسب با میزان شار مغناطیسی را گزارش می‌کنند [11،12].

یوزارک و وارنک<sup>3</sup> [13] با بهره‌گیری از تکنولوژی MFL به تعیین شکل، ابعاد و عمق حفرات خوردگی در لوله‌های گاز پرداخته‌اند. گائو<sup>4</sup> [14] و همکارانش نشان دادند که با استفاده از روش MFL نه تنها امکان تعیین کمی ابعاد، جهت و عمق ترک‌ها وجود دارد، بلکه می‌توان نمایشی سه بعدی از وضعیت قرارگیری آن‌ها در نزدیکی سطح را نیز ارائه داد. لی<sup>5</sup> [15] و همکارانش با بهره‌گیری از یک پل میکرومغناطیسی در آزمون MFL، امکان شناسایی میکروناپیوستگی‌ها را فراهم نموده‌اند. کیم و پارک [16] با استفاده از روش MFL به روبش مفتول‌های فولادی و شناسایی عیوب آن پرداخته‌اند. یکی دیگر از حوزه‌های مهم کاربرد روش MFL، که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، صنایع ریلی می‌باشد. در این حوزه، پژوهشگران زیادی از این روش برای شناسایی ترک‌های ناشی از خستگی تماسی غلته‌ای که بر سطح خطوط ریلی تشکیل می‌شود، استفاده کرده‌اند [17-19]. نتایج حاصل از بررسی این پژوهشگران نشان می‌دهد با استفاده از روش غیرمخرب آزمون نشت شار مغناطیسی می‌توان عمق ترک‌های خستگی تماسی غلته‌ای را قبل از رسیدن به مقادیر بحرانی و شاخه‌ای شدن آن‌ها تشخیص داده و به موقع عملیات سنگزنی پیشگیرانه را جهت جلوگیری از وقوع اتفاقات ناگواری همچون کنده شدن و شکست

<sup>1</sup> Barkhausen<sup>2</sup> Magnetic Flux Leakage: MFL<sup>3</sup> Usarek and Warnke<sup>4</sup> Gao<sup>5</sup> Li

بخشی از ریل، انجام داد.

خنک‌کننده تحت سنگ‌زنی قرار گرفته و بقیه نمونه‌ها به صورت خشک (بدون استفاده از سیال خنک‌کننده) سنگ‌زنی شدند. پس از سنگ‌زنی هر نمونه برای یکسان بودن شرایط چرخ‌سنگ، عملیات تیز کردن چرخ‌سنگ توسط الماس مصنوعی با سرعت و عمق بار یکسان انجام شد. در ادامه پژوهش به منظور انجام آزمون‌های غیرمخرب، ضخامت تمامی نمونه‌های سنگ‌خورده یکسان شدند.

**جدول 1** ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (بر حسب درصد وزنی)

**Table 1** Chemical composition of steel used in this work (in weight percent)

Fe	P	S	Cr	Mn	Si	C
باقیمانده	0/008	0/010	0/150	0/512	0/200	0/449

**جدول 2** شرایط سنگ‌زنی نمونه‌های آزمایش

**Table 2** Grinding conditions of test samples

نمونه	جریان سیال	عمق برش در هر پاس (mm)	تعداد رفت و برگشت (پاس)
1	دارد	0/01	10
2	ندارد	0/01	10
3	ندارد	0/01	20
4	ندارد	0/1	10
5	ندارد	0/1	20
6	ندارد	0/1	30

منظور انجام عملیات متالوگرافی نمونه‌ها پس از سنگ‌زنی، مقطع عرضی آنها به ترتیب توسط سمباده‌های 120، 400، 600 و 1200 تحت عملیات سمباده‌زنی قرار گرفت و پس از پولیش سطح با خمیر الماسه، توسط محلول ناپتال 2% حکاکی شد. سپس جهت مشاهده ریزساختار، از میکروسکوپ‌های نوری (مدل BX51-P Olympus) و الکترونی روبشی (مدل LEO 1450)، استفاده شد. ریزسختی‌سنجی نمونه‌ها با هدف تشخیص وقوع سوختگی سنگ‌زنی و عمق متأثر از حرارت در مقطع عرضی تحت بار 25 گرم به روش ویکرز با استفاده از دستگاه 385050 Buehler انجام و پروفیل سختی برای نمونه‌های مختلف رسم شد. همچنین، عمق سوختگی شامل محاسبه ضخامت لایه دچار سوختگی نرم‌شدگی حرارتی، سخت‌شدگی مجدد و لایه متأثر از حرارت با توجه به تغییرات سختی از مقایسه پروفیل سختی نمونه شاهد با نمونه‌های دچار سوختگی اندازه‌گیری شده است.

مشخصه‌یابی غیرمخرب به روش آزمون نشت شار مغناطیسی و اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی توسط کاوشگرهای طراحی

همان‌طور که عنوان شد، پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه بر بررسی و بهبود قابلیت آزمون MFL در عیب‌یابی و به ویژه ترکیب‌یابی تمرکز دارند. اما با توجه به این که خروجی این روش تحت تأثیر تغییرات شار مغناطیسی در نزدیکی سطح تغییر می‌کند، می‌توان از آن در شناسایی تغییرات ریزساختاری در مواد فرومغناطیس نیز بهره برد. لذا، در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت تشخیص غیرمخرب سوختگی سنگ‌زنی، به بررسی قابلیت دو کاوشگر اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی و نشت شار مغناطیسی در شناسایی نوع سوختگی سنگ‌زنی (نرم‌شدگی حرارتی و سخت‌شدگی مجدد) و همچنین تخمین شدت سوختگی در هر نوع پرداخته شده است. روش غیرمخرب پیشنهادی برای اولین بار جهت شناسایی تغییرات ریزساختاری حاصل از وقوع سوختگی سنگ‌زنی استفاده شده است. در حالی که پژوهش‌های غیرمخرب سایر محققان در این زمینه بر ارزیابی وضعیت تنش‌های باقیمانده روی سطح متمرکز بوده است [21,20,6].

## 2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، فرایند سنگ‌زنی بر روی قطعات فولاد ساده کربنی AISI 1045، که کاربرد فراوانی در صنعت دارند، با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول 1 (که با استفاده از آنالیز کوانتومتری تعیین شده است) و ابعاد  $100\text{mm} \times 15\text{mm} \times 10\text{mm}$  (که توسط دستگاه وایرکات آماده‌سازی شد) انجام شد. قبل از سنگ‌زنی، عملیات حرارتی با هدف ایجاد ریزساختار مارتنزیتی، با آستنیته کردن در دمای  $950^\circ\text{C}$  به مدت 30 دقیقه و سپس کوئنچ در آب (در دمای محیط) بر روی تمام قطعات انجام شده است. علت ایجاد ریزساختار اولیه مارتنزیتی تسهیل در ایجاد شرایط شدیدتری از سوختگی در سطح نمونه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است، از هفت نمونه عملیات حرارتی شده، یک نمونه به عنوان شاهد تحت فرایند سنگ‌زنی قرار داده نشد.

در ادامه فرایند سنگ‌زنی توسط دستگاه BPH 320 A تحت شرایط مختلف، مطابق با مندرجات جدول 2، بر روی شش نمونه انجام شد. در این دستگاه، سرعت میز کار (سرعت نمونه) و عمق برش (میزان باردهی در هر پاس)، قابل تنظیم و سرعت چرخ‌سنگ ثابت می‌باشد. چرخ‌سنگ از جنس آلومینا است و با سرعت ثابت 2000 دور در دقیقه دوران می‌کند. سیال مورد استفاده در این دستگاه آب و صابون با جریان ثابت است. نمونه شماره 1 با هدف سنگ‌زنی در شرایط معمول در حضور سیال

بسته به میزان شار تولیدی در بخش‌های مختلف نمونه، در سیم‌پیچ‌های حسگر (هر کدام با تعداد 1000 دور سیم مسی با قطر 0/1 میلی‌متر) که بر روی پایه‌های یوک قرار دارند، القاء صورت می‌پذیرد. ولتاژ القایی به کارت آنالوگ به دیجیتال PCI-1720U-AE 1714UL-BE وارد شده و سپس در رایانه مورد پردازش قرار می‌گیرد. پردازش روی خروجی‌های کارت با استفاده از نرم افزار متلب انجام شد. به این ترتیب که از ولتاژهای القایی که به صورت تابعی از زمان ثبت شدند، انتگرال گرفته شده و در نهایت به چگالی شار مغناطیسی تبدیل می‌شوند. با داشتن چگالی شار مغناطیسی به صورت تابعی از زمان  $B(t)$  و تبدیل جریان به شدت میدان اعمالی  $H(t)$ ، حلقه  $B-H$  رسم شده و منحنی نفوذپذیری تفاضلی  $(\mu_{Diff}^1)$  با رسم مشتق لحظه‌ای  $B$  نسبت به  $H$  (dB/dH)، تقسیم بر نفوذ پذیری خلاء، بر حسب میدان اعمالی حاصل می‌شود و از بیشینه آن به عنوان خروجی این آزمون در مشخصه‌یابی استفاده می‌شود. اجزاء تشکیل دهنده آزمون MFL به طور شماتیک در شکل 1-ب نشان داده شده است.

در این سیستم نیز، بخش تولید میدان مغناطیسی از طریق یوک همانند سیستم اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی است. در اثر عبور جریان از سیم‌پیچ تحریک، شار مغناطیسی تولید و در یوک مغناطیسی و قطعه مورد آزمایش جاری می‌شود. سپس، متناسب با رفتار مغناطیسی نمونه، بخشی از آن از سطح قطعه نشت یافته و توسط سنسور اثر هال (آنالوگ و خطی با محدوده اندازه‌گیری 900 تا -900 G) که بر روی سطح نمونه قرار گرفته است، شناسایی می‌شود. در این پژوهش، تغییرات ولتاژ القایی در سنسور اثر هال بر حسب زمان مورد بررسی قرار گرفته و از مقادیر بیشینه ولتاژ القایی به عنوان خروجی حاصل از روش MFL در مشخصه‌یابی استفاده شده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی تغییرات ریزساختاری

شکل 2، ریزساختار سطح نمونه‌هایی را که تحت شرایط متفاوت فرایند سنگ‌زنی قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. در ریزساختار سطح نمونه شماره 1 که تحت سنگ‌زنی در شرایط کنترل شده قرار گرفته (شکل 2-الف)، اثری از وقوع سوختگی سنگ‌زنی مشاهده نمی‌شود و ساختار آن مارتنزیتی است. دلیل این امر آن است که سنگ‌زنی تحت جریان سیال خنک‌کننده و با عمق باردهی کم، از افزایش دمای سطح نمونه و سوختگی سطح

شده در مرکز بررسی‌های غیرمخرب دانشگاه صنعتی سجاد انجام شد. شکل 1 طرح شماتیک این دو سیستم اندازه‌گیری و اجزای کاوشگرها را نشان می‌دهد. در سیستم اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی (شکل 1-الف)، ابتدا سیگنال مثلثی شکل با فرکانس 0/1 هرتز توسط کارت دیجیتال به آنالوگ PCI-1720U-AE تولید شده و دامنه آن پس از تقویت به ولتاژ 10V/-10V+ و جریان یک آمپر رسیده و به دو سر سیم‌پیچ‌های تحریک (هر کدام با تعداد 1500 دور سیم مسی با قطر 0/45 میلی‌متر) اعمال می‌شود. یوک مغناطیسی از کنار هم قرار دادن تعدادی ورق آهن ترانس به ضخامت 0/3 تا 0/5 میلی‌متر (جهت کم نمودن تلفات مغناطیسی) ساخته می‌شود. علت انتخاب سیگنال مثلثی شکل و اعمال فرکانس پایین در این سیستم اندازه‌گیری، به ترتیب اعمال نرخ ثابتی از میدان مغناطیسی و کاهش اثرات ناشی از تشکیل جریان‌های گردابی است. در اثر عبور جریان از سیم پیچ تحریک، شار مغناطیسی تولید و در یوک مغناطیسی و قطعه مورد آزمایش جریان می‌یابد.

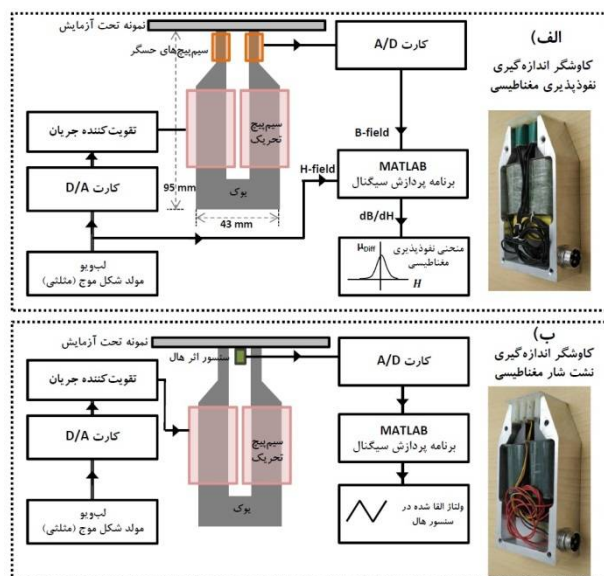


Fig. 1 Schematic images for measuring systems of a) magnetic permeability and b) magnetic flux leakage test output, as well as c) position of the probe on the sample.

شکل 1 تصاویر شماتیک سیستم‌های طراحی شده جهت اندازه‌گیری (الف) نفوذپذیری مغناطیسی و (ب) خروجی آزمون نشت شار مغناطیسی و همچنین (ج) موقعیت قرارگیری کاوشگر بر روی نمونه

<sup>1</sup> Differential permeability

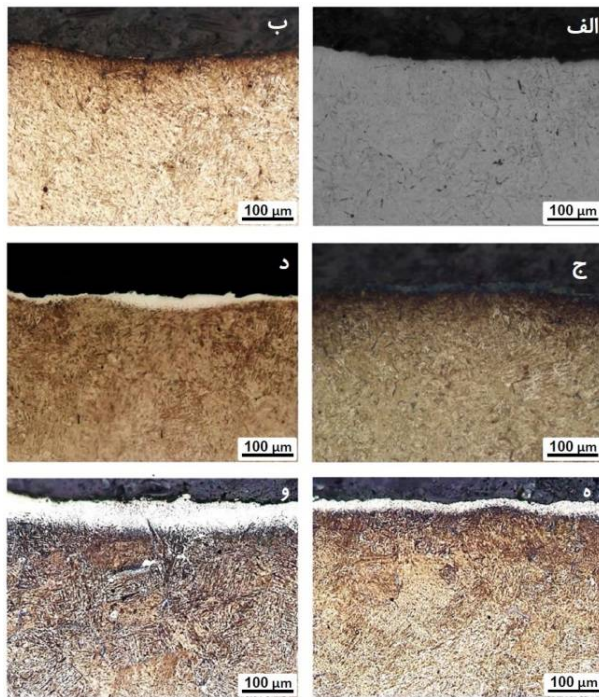


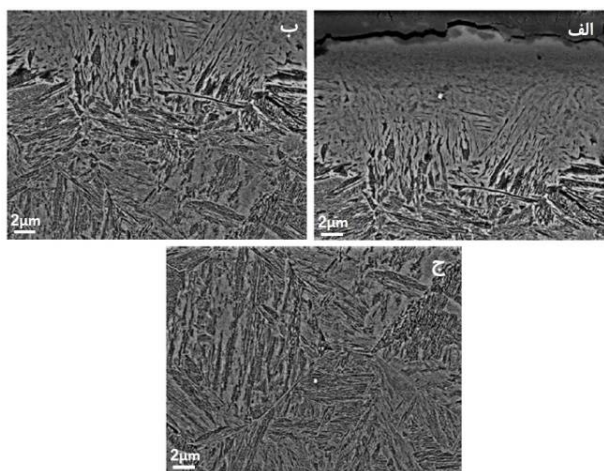
Fig. 2 Optical microscopic images of surface microstructures belonging to the samples with the number of a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5 and f) 6.

شکل 2 تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار سطح نمونه‌های شماره الف) 6، ب) 2، ج) 3، د) 4، ه) 5 و و) 6.

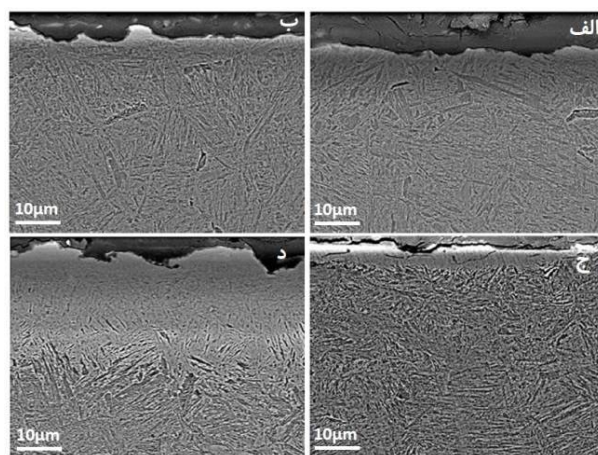
به منظور مطالعه دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌ها پس از سنگ‌زنی با هدف مشاهده لایه سفید در سطح، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل 3 ریزساختار مقطع عرضی از سطح نمونه‌های شماره 1، 3، 4 و 6 را پس از سنگ‌زنی نشان می‌دهد. در نمونه شماره 1 (شکل 3- الف)، که پس از سنگ‌زنی با حضور سیال دچار سوختگی نشده است، ریزساختار مارتنزیتی تا سطح نمونه قابل مشاهده است. در نمونه شماره 3 اثری از تشکیل لایه سفید در سطح دیده نمی‌شود (شکل 3- ب). در شکل 3- ج مربوط به ریزساختار نمونه 4، لایه‌ای که ریزساختار آن به طور واضح مشخص نیست، در سطح نمونه با ضخامت اندک قابل مشاهده است. این لایه، همان مارتنزیت بازپخت نشده است که در تصاویر میکروسکوپ نوری به شکل لایه سفید رنگ مشاهده می‌شود.

نایکنواختی ضخامت این لایه ناشی از تشکیل ناپیوسته آن می‌باشد. اما در سطح نمونه 6، همان طور که در شکل 3- د مشهود است، این لایه به طور پیوسته با ضخامت قابل توجهی تشکیل شده است. نکته قابل توجه در این تصویر، مرز لایه سخت‌شده با ساختار مارتنزیت بازپخت شده ناشی از سوختگی نرم‌شدگی زیرین آن می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که مرز میان این لایه‌ها به شکل یک ناحیه انتقالی است.

جلوگیری کرده است. شکل‌های 2- ب تا 2- و نشان می‌دهند با قطع جریان سیال در حین فرایند سنگ‌زنی، به دلیل افزایش دمای سطح، سوختگی رخ می‌دهد. در اثر افزایش دما و وقوع سوختگی در نمونه شماره 2، (شکل 2- ب) یک لایه تیره در اثر حکاکی با محلول نایتال در سطح ایجاد شده است که حاکی از وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی به وسیله بازپخت ساختار مارتنزیتی در سطح نمونه در اثر افزایش دما در حین فرایند است [22,5]. با افزایش تعداد پاس سنگ‌زنی در نمونه شماره 3 نسبت به نمونه شماره 2، حرارت تولیدی حین سنگ‌زنی زمان بیشتری برای نفوذ به عمق قطعه داشته و لذا سوختگی نرم‌شدگی (لایه تیره در سطح) تا عمق بیشتری ایجاد شده است (شکل 2- ج). شکل 2- د نشان می‌دهد که در سطح نمونه شماره 4، لایه سفیدی با ضخامت اندک تشکیل شده است. در اثر افزایش عمق برش یا میزان باردهی در هر پاس از 0/01 mm به 0/1 mm، میزان حرارت تولیدی (با توجه به این که از سیال خنک‌کننده نیز در فرایند استفاده نمی‌شود) به مراتب افزایش خواهد یافت. با گرم شدن سریع و افزایش دمای سطح، در زمان کوتاهی بخش‌هایی از نمونه مجدد آستنیت‌ه خواهد شد. در اثر سرد شدن سریع در حین فرایند، استحاله آستنیت به مارتنزیت اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب، عیب سوختگی سخت‌شدگی مجدد ناشی از تشکیل این ساختار مارتنزیتی رخ می‌دهد [24,23]. ساختار این مارتنزیت بازپخت نشده در اثر حکاکی با محلول نایتال نسبت به مارتنزیت بازپخت شده و فاز زمینه فولاد کمتر دچار خوردگی می‌شود و لذا در تصاویر میکروسکوپی به شکل لایه روشن و سفید بر روی سطح دیده می‌شود و جزئیات ساختار آن به خوبی قابل مشاهده نیست [7]. همچنین، شکل 2- د نشان می‌دهد که در عمق‌های بیشتر که تحت تاثیر حرارت کمتری بوده‌اند، یک لایه تیره نسبت به ساختار زمینه ایجاد شده است. افزایش دما به بالاتر از دمای بازپخت فولاد، در عمق‌های بیشتر منجر به بازپخت ساختار مارتنزیتی نمونه و وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی شده است. نمونه‌های 5 و 6 با عمق باردهی یکسان با نمونه 4 (0/1 mm) به میزان 20 و 30 پاس تحت سنگ‌زنی قرار گرفته‌اند. افزایش در تعداد پاس منجر به افزایش زمان فرایند و نفوذ حرارت ایجاد شده تا عمق‌های بیشتر خواهد شد. لذا همان طور که در تصویر 2- ه تا 2- و قابل مشاهده است، ضخامت لایه سفید یا همان ساختار مارتنزیت بازپخت نشده افزایش یافته است. به عبارت دیگر در نمونه‌های شماره 4 تا 6 عمق عیب سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح و سوختگی نرم‌شدگی حرارتی در لایه‌های زیرین افزایش یافته است.



**Fig. 4** Scanning electron microscopic micrographs belonging to the sample with the number of 6: a) re-hardened layer, b) transition zone between re-hardened and softened layers, and c) thermally softened layer. **شکل 4** تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه شماره 6، الف) لایه دچار سوختگی سخت‌شدگی مجدد، ب) ناحیه انتقالی میان لایه دچار سوختگی سخت‌شدگی مجدد و لایه دچار نرم‌شدگی حرارتی و ج) لایه دچار نرم‌شدگی حرارتی.



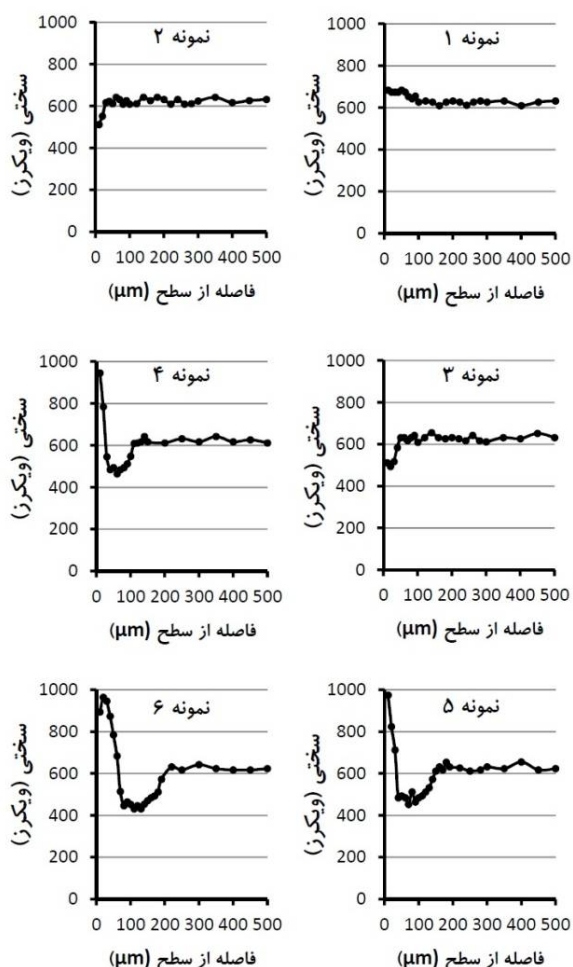
**Fig. 3** Scanning electron microscopic micrographs belonging to the surface of the samples with the number of a) 1, b) 3, c) 4, and d) 6. **شکل 3** تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های شماره الف) 1، ب) 3، ج) 4 و د) 6.

به منظور مشاهده دقیق‌تر ساختار لایه‌های سخت شده و نرم شده و مرز میان آن‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی بالاتر (شکل 4) استفاده شده است.

شکل 4، ریزساختار نمونه شماره 6 را در مناطق دچار سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح (4-الف)، ناحیه انتقالی میان لایه دچار سوختگی سخت‌شدگی مجدد و لایه دچار نرم‌شدگی حرارتی (4-ب) و لایه دچار نرم‌شدگی حرارتی (4-ج) نشان می‌دهد. همان‌طور که توضیح داده شد و در شکل 4-الف مشاهده می‌شود، جزئیات ریزساختار لایه سخت‌شده موسوم به لایه سفید در سطح در واکنش با محلول نایتال به خوبی قابل مشاهده نیست. شکل 4-ب نشان می‌دهد که مرز میان لایه سخت‌شدگی مجدد (مارتنزیت بازپخت نشده) و لایه نرم‌شدگی حرارتی (مارتنزیت بازپخت شده) محدوده‌ای را شامل می‌شود که ترکیبی از ساختار لایه سخت‌شده و تیغچه‌های مارتنزیتی بازپخت شده می‌باشد. این ناحیه انتقالی در بزرگ‌نمایی‌های کمتر و تصاویر میکروسکوپ نوری قابل مشاهده نیست. شکل 4-ج از منطقه دچار سوختگی نرم‌شدگی حرارتی تهیه شده است و در آن رسوب کاربیدهای انتقالی از درون تیغچه‌های مارتنزیتی مشهود است.

### 3-2- نتایج حاصل از آزمون ریزسختی‌سنجی

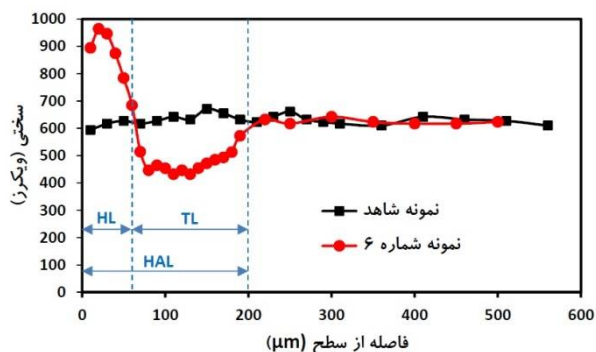
نتایج حاصل از آزمون ریزسختی‌سنجی از مقطع عرضی نمونه‌های مورد آزمایش در شکل 5 نشان داده شده‌اند. پروفیل سختی نمونه شماره 1 نشان می‌دهد که افزایش سختی در سطح این نمونه اتفاق افتاده است. این افزایش سختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک رخ داده در سطح حین سنگ‌زنی می‌باشد [25].



**Fig. 5** Hardness profiles of the samples subjected to the various conditions of grinding processes (according to the data presented in Table 2)

**شکل 5** پروفیل سختی نمونه‌هایی که تحت شرایط متفاوت سنگ‌زنی (مطابق با مندرجات جدول 2) قرار گرفته‌اند.

25 میکرومتر تشکیل شده است و ضخامت لایه بازیخت و متأثر از حرارت افزایش یافته است. در نمونه‌های 5 و 6 نیز با افزایش تعداد پاس‌های سنگ‌زنی، ضخامت لایه سخت شده، نرم شده و متأثر از حرارت افزایش یافته است.



**Fig. 6** Comparison of hardness profiles of reference sample and sample No. 6, with the aim of measuring thickness of tempered, hardened and heat affected layers (TL, HL, and HAL).

شکل 6 مقایسه منحنی تغییرات سختی نمونه شاهد با نمونه شماره 6، با هدف اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های بازیخت شده، سخت شده و متأثر از حرارت.

جدول 3 نتایج اندازه‌گیری ضخامت لایه سخت شده، بازیخت شده و متأثر از حرارت

**Table 3** Results of measuring thickness of hardened, tempered and heat affected layers

نمونه	ضخامت لایه بازیخت شده (μm)	ضخامت لایه سخت شده (سفید) (μm)	ضخامت لایه متأثر از حرارت (μm)
1		عدم سوختگی	
2	20	عدم تشکیل	20
3	40	عدم تشکیل	40
4	85	25	110
5	110	30	140
6	140	60	200

### 3-3- نتایج حاصل از آزمون‌های غیرمخرب

شکل 7- الف منحنی‌های نفوذپذیری تفاضلی بر حسب میدان مغناطیسی را برای 6 نمونه سنگ‌زنی شده و نمونه شاهد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل نمودارهای نفوذپذیری برای نمونه‌ها پس از سنگ‌زنی و با وقوع سوختگی تغییر کرده است. بیشینه نفوذپذیری تفاضلی از این نمودارها استخراج شده و روند تغییرات آن برای نمونه‌های مختلف در شکل 7- ب نشان داده شده است. افزایش سختی در نمونه شماره 1 (نسبت به نمونه شاهد) که ناشی از تغییر شکل پلاستیک حین سنگ‌زنی می‌باشد، روند مغناطیسی شدن نمونه را تحت تأثیر داده است. حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی،

در پروفیل سختی نمونه شماره 2، افت سختی در سطح ناشی از بازیخت ساختار مارتنزیتی تا حدود 500 ویکرز مشاهده می‌شود. میزان کاهش سختی و همچنین ضخامت لایه نرم شده در اثر سوختگی ناشی از سنگ‌زنی در نمونه شماره 3 نسبت به نمونه شماره 2 بیشتر است. تعداد پاس سنگ‌زنی بیشتر (یا به عبارت دیگر، زمان سنگ‌زنی بیشتر) در نمونه شماره 3، منجر به نفوذ حرارت ایجاد شده به عمق‌های بیشتر شده است. پروفیل سختی نمونه 4، افزایش سختی در سطح نمونه را تا حد بالاتر از 900 ویکرز نشان می‌دهد. این میزان سختی همان‌طور که در ریزساختار این نمونه مشاهده شد، ناشی از وقوع سوختگی سخت‌شدگی مجدد یا تشکیل لایه سفید است. لایه سفید دارای ساختار مارتنزیت بازیخت نشده بوده و به دلیل آستنیت‌شدن در زمان کوتاه و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در حین فرایند سنگ‌زنی، ریزدانه و دارای چگالی بالایی از نایجایی‌ها می‌باشد [24,23]. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری، در [27,26] و سختی آن در سطح فولاد CK45 سخت شده، حدود 900 ویکرز گزارش شده است [28]. همچنین، در پروفیل سختی نمونه 4، در فواصل بیشتر از سطح، کاهش سختی مشاهده شده است که ناشی از بروز سوختگی نرم‌شدگی حرارتی در عمق‌های بیشتر است که تحت تأثیر دمای کمتری بوده است. برای نمونه‌های 5 و 6 که عمق باردهی یکسان و مشابه نمونه 4 است، افزایش در تعداد پاس سنگ‌زنی منجر به افزایش زمان فرایند و نفوذ حرارت تا عمق بیشتر در نمونه شده است. بدین ترتیب ضخامت لایه سخت شده و ضخامت لایه نرم شده از نمونه 4 تا 6 افزایش یافته است.

به منظور اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های سخت شده (HL<sup>1</sup>)، بازیخت شده (TL<sup>2</sup>) و متأثر از حرارت (HAL<sup>3</sup>)، همان‌طور که در شکل 6 برای نمونه شماره 6 نمایش داده شده است) از مقایسه پروفیل سختی هر نمونه با نمونه شاهد استفاده شده و نتایج در جدول 3 گزارش شده است. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌های 2 و 3 که تنها سوختگی ناشی از بازیخت ساختار رخ داده، ضخامت لایه نرم شده با افزایش تعداد پاس سنگ‌زنی افزایش یافته است. با افزایش عمق باردهی در هر پاس (از 0/01 به 0/1 میلیمتر) در نمونه 4، در اثر افزایش حرارت حین فرایند، لایه دچار سخت‌شدگی مجدد به ضخامت

<sup>1</sup> Hardened Layer

<sup>2</sup> Tempered Layer

<sup>3</sup> Heat Affected Layer

با وقوع سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح نمونه 4 به دلیل تشکیل مارتنزیت بازپخت نشده، سخت و ریزدانه (لایه سفید)، روند مغناطیسی شدن نمونه تحت تأثیر قرار گرفته است. چگالی بالای مرزهای دانه و نابجایی‌ها در ساختار لایه سفید، موانع فرایند مغناطیسی شدن نمونه را افزایش می‌دهد و نفوذپذیری مغناطیسی و بیشینه آن با افت مواجه می‌شود [31]. نتایج مشابهی در مورد افت نفوذپذیری ناشی از تشکیل لایه مارتنزیت چگال ناشی از عملیات سختکاری القایی بر روی سطح قطعات فولادی توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [32، 33]. در نمونه 5 با وجود افزایش ضخامت لایه سفید نسبت به نمونه 4، بیشینه نفوذپذیری تفاضلی افزایش یافته است. این امر به اثرات خلاف جهت لایه دچار سوختگی سخت‌شدگی مجدد و لایه دچار سوختگی نرم‌شدگی حرارتی بر نفوذپذیری مغناطیسی، مربوط می‌باشد. در این نمونه، سهم لایه نرم شده در تغییرات ریزساختاری غالب است و تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی تحت تأثیر این عامل با افزایش روبرو شده است. با افزایش تعداد پاس سنگ‌زنی (در عمق بار ثابت) در نمونه 6 نسبت به نمونه 5 که افزایش در ضخامت لایه سخت‌شده را به دنبال دارد، نتایج اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های دچار سوختگی نشان می‌دهد که سهم لایه دچار سخت‌شدگی مجدد در تغییرات ریزساختاری غالب خواهد بود. بنابراین، کاهش در بیشینه نفوذپذیری تفاضلی در این نمونه نسبت به نمونه 5 صورت گرفته است.

در شکل 8- الف، منحنی‌های تغییرات ولتاژ القایی ثبت شده توسط سنسور هال (پس از پردازش‌های اولیه) بر حسب زمان برای نمونه‌های مورد مطالعه آورده شده است. این شکل‌ها به وضوح نشان می‌دهند با تغییر شرایط سنگ‌زنی، رفتار مغناطیسی (یا به عبارت دیگر، پاسخ ریزساختارها به میدان مغناطیسی خارجی) تحت تأثیر قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیق‌تر، مشخصه بیشینه ولتاژ القایی از این منحنی‌ها برای ریزساختارهای مختلف استخراج شدند (شکل 8- ب). این شکل نشان می‌دهد که تغییرات خروجی آزمون غیرمخرب نشت شار مغناطیسی، روندی معکوس با تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی دارد. پژوهش‌های مرتبط صورت گرفته در زمینه مشخصه‌یابی تغییرات ریزساختاری با روش نشت شار مغناطیسی نیز مؤید این ارتباط معکوس می‌باشند [34، 35]. در واقع، در شرایطی که نفوذپذیری ریزساختار کاهش می‌یابد، نشت شار مغناطیسی از سطح افزایش یافته و ولتاژ القایی بیشتری توسط سنسور هال حس و ثبت می‌شود. تغییرات ولتاژ القایی، غالب بودن اثر هر کدام از دو نوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی و

چرخش ممان‌ها و قرارگیری آن‌ها در جهت میدان اعمالی در نمونه 1 با موانع بیشتری همچون نابجایی‌های حاصل از تغییر شکل پلاستیک سطح روبرو است. بدین ترتیب، روند مغناطیسی شدن نمونه 1 نسبت به نمونه شاهد مشکل‌تر شده و به دنبال آن شاهد کاهش بیشینه نفوذپذیری تفاضلی هستیم. با وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی در نمونه‌های 2 و 3 و به دلیل بازپخت ساختار مارتنزیتی نمونه، فرایند مغناطیسی شدن نمونه تسهیل می‌شود [29، 30]. همچنین، با کاهش موانع بر سر راه حرکت دیواره حوزه‌ها و چرخش ممان‌ها در اثر بازپخت ساختار در نمونه 2 و 3، نفوذپذیری مغناطیسی افزایش یافته است. در [29] نیز نتایج مشابهی از روند صعودی خروجی‌های آزمون جریان گردابی (که متناسب با نفوذپذیری مغناطیسی است) با تغییرات ریزساختاری ناشی از افزایش دمای بازپخت برای فولادهای ساده کربنی گزارش شده است.

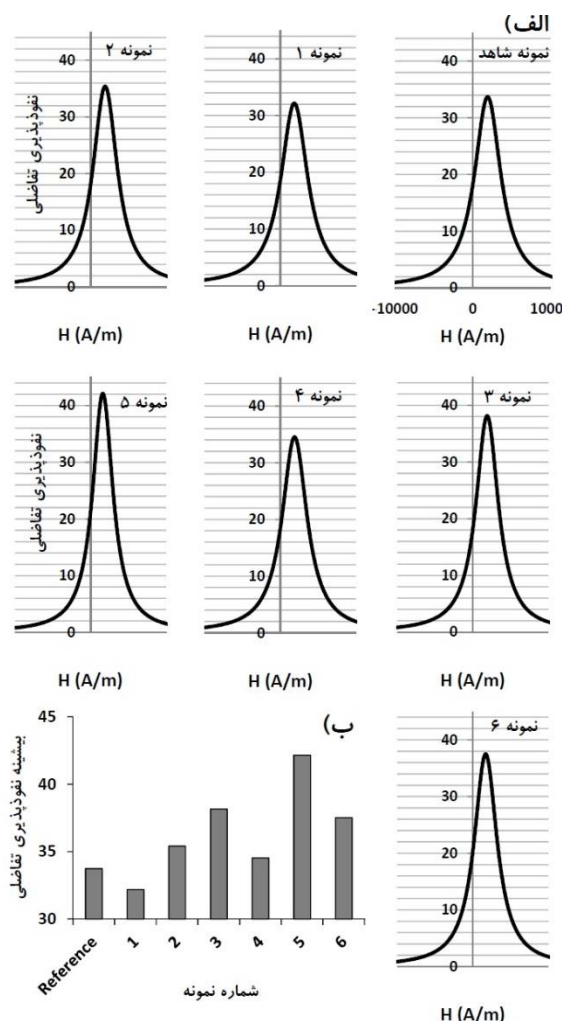


Fig. 7 a) Differential permeability curves versus magnetic field strength and b) variations of maximum differential permeability, obtained for the test samples.

شکل 7 الف) منحنی نفوذپذیری تفاضلی بر حسب شدت میدان مغناطیسی و ب) تغییرات بیشینه نفوذپذیری تفاضلی مغناطیسی، برای نمونه‌های تحت آزمون.



#### 4- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت کاوشگرهای الکترومغناطیسی برای تشخیص غیرمخرب تغییرات ریزساختاری ناشی از سوختگی سنگ‌زنی انجام شد و نتایج ذیل حاصل گردید:

- سوختگی نرم‌شدگی حرارتی در اثر حذف سیال خنک‌کننده و در عمق باردهی 0/01 ایجاد شده است. در اثر افزایش عمق باردهی از 0/01 به 0/1 میلی‌متر با افزایش حرارت تولیدی سوختگی سخت‌شدگی مجدد به ضخامت 25 میکرومتر ایجاد شده است. همچنین با عمق باردهی ثابت 0/1 میلی‌متر، افزایش تعداد پاس سنگ‌زنی از 10 تا 30 منجر به افزایش ضخامت لایه‌های دچار سوختگی مجدد، از 110 تا 200 میکرومتر، شده است. با استفاده از مشاهدات میکروسکوپی و ریزسختی‌سنجی، وقوع سوختگی، نوع و ضخامت آن قابل تعیین است. بیشترین مقادیر برای ضخامت لایه‌های سخت شده، بازپخت شده و متأثر از حرارت به ترتیب 60، 140 و 200 میکرومتر هستند.

- نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های نفوذپذیری مغناطیسی و ولتاژ القایی سنسور اثر حال (نشت شار مغناطیسی) نشان می‌دهند که با وقوع سوختگی نرم‌شدگی حرارتی تا عمق 40 میکرومتر، بیشینه نفوذپذیری تفاضلی و ولتاژ القایی، نسبت به نمونه بدون عیب، به ترتیب به اندازه 18/5% افزایش و 13/6% کاهش می‌یابند که میزان این تغییرات متناسب با ضخامت لایه نرم شده است. همچنین، در اثر وقوع سوختگی سخت‌شدگی به ضخامت 110 میکرومتر، 10/5% کاهش و 11/3% افزایش به ترتیب در بیشینه نفوذپذیری تفاضلی و ولتاژ القایی، نسبت به نمونه تنها نرم شده، رخ می‌دهد. اما، برای نمونه‌های دارای سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح و نرم‌شدگی حرارتی در لایه‌های زیرین، نسبت ضخامت لایه سخت‌شده به ضخامت لایه متأثر از حرارت (HL/HAL) ارتباط معکوس با بیشینه نفوذپذیری تفاضلی و ارتباط مستقیم با نشت شار مغناطیسی دارد.

- نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که هر دو نوع کاوشگر اندازه‌گیری نفوذپذیری و نشت شار مغناطیسی قابلیت تشخیص غیرمخرب وقوع سوختگی ناشی از سنگ‌زنی در مراحل اولیه (نرم‌شدگی حرارتی که در صنعت اغلب این نوع سوختگی رخ می‌دهد)، را دارا هستند. همچنین، برای نمونه‌های دارای سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح، اثرات غیر همسو ناشی از سخت شدن در سطح و نرم شدن در لایه‌های زیرین بر

سخت‌شدگی مجدد در تغییرات ریزساختاری نمونه پس از سنگ‌زنی را مشخص خواهد کرد. برای نمونه‌های دارای سوختگی سخت‌شدگی مجدد در سطح و نرم‌شدگی حرارتی در لایه‌های زیرین، تغییرات ولتاژ القا شده در سنسور حال متناسب با سهم لایه‌های دچار سوختگی نسبت به کل لایه متأثر از حرارت می‌باشد. به طور خلاصه، در نمونه‌های شماره 2 و 3 که تنها سوختگی نرم‌شدگی حرارتی در نمونه ایجاد شده است، با افزایش ضخامت لایه بازپخت شده، نفوذپذیری مغناطیسی افزایش و در نتیجه نشت شار کاهش یافته است. با وقوع سوختگی سخت‌شدگی مجدد، در نمونه شماره 4، با کاهش نفوذپذیری مغناطیسی، نشت شار و ولتاژ القایی افزایش یافته است. در نمونه 5، اثر سوختگی نرم‌شدگی (با توجه به اندازه‌گیری ضخامت لایه نرم شده و لایه سخت شده) غالب است و با حداکثر شدن نفوذپذیری، کمینه ولتاژ القایی مشاهده می‌شود. در نمونه شماره 6، با توجه به افزایش ضخامت لایه سخت شده، اثر سوختگی سخت‌شدگی مجدد غالب بوده و خروجی آزمون نشت شار مغناطیسی افزایش یافته است.

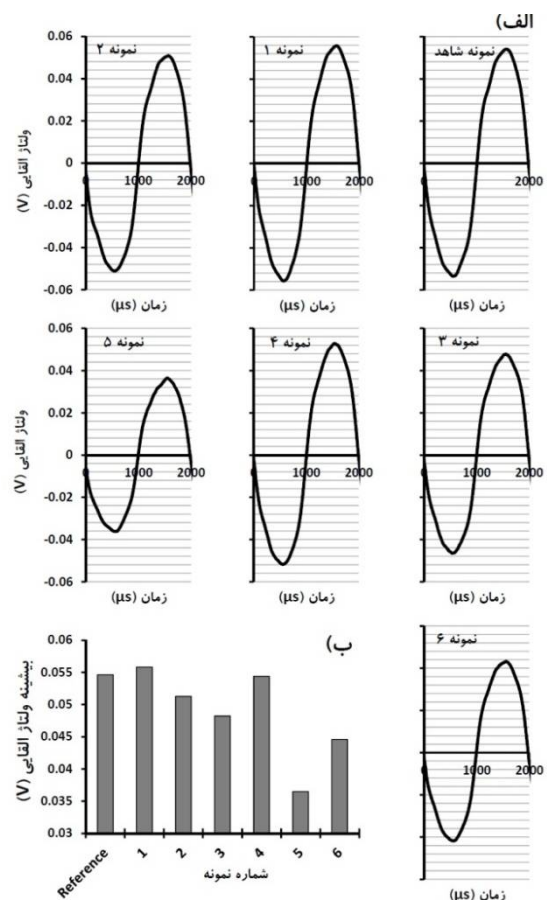


Fig. 8 a) Induced voltage curves versus time and b) variations of maximum induced voltage obtained from magnetic flux leakage test.

شکل 8 الف) منحنی تغییرات ولتاژ القایی بر حسب زمان و ب) تغییرات بیشینه ولتاژ القایی آزمون نشت شار مغناطیسی.

- by the Magnetic Barkhausen Noise, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 36, No. 4, pp. 1-9, 2017.
- [11] Y. Shi, C. Zhang, R. Li, M. Cai, G. Jia, Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection, *Sensors*, Vol. 15, No. 12, pp. 31036-31055, 2015.
- [12] Z. D. Wang, Y. Gu, Y. S. Wang, A Review of Three Magnetic NDT Technologies, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 4, pp. 382-388, 2012.
- [13] Z. Usarek, K. Warnke, Inspection of Gas Pipelines Using Magnetic Flux Leakage Technology, *Advances in Materials Science*, Vol. 17, No. 3, pp. 37-45, 2017.
- [14] Y. Gao, G. Y. Tian, K. Li, J. Ji, P. Wang, H. Wang, Multiple Cracks Detection and Visualization using Magnetic Flux Leakage and Eddy Current Pulsed Thermography, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 234, pp. 269-281, 2015.
- [15] E. Li, Y. Kang, J. Tang, J. Wu, A New Micro Magnetic Bridge Probe in Magnetic Flux Leakage for Detecting Micro-Cracks, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 37, No. 3, pp. 1-9, 2018.
- [16] J. W. Kim, S. Park, Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation, *Sensors*, Vol. 18, No. 1, pp. 109, 2018.
- [17] Y. Li, J. Wilson, G. Y. Tian, Experiment and Simulation Study of 3D Magnetic Field Sensing for Magnetic Flux Leakage Defect Characterization, *NDT & E International*, Vol. 40, No. 2, pp. 179-84, 2007.
- [18] A. G. Antipov, A. A. Markov, Evaluation of Transverse Cracks Detection Depth in MFL Rail NDT, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 50, No. 8, pp. 481-90, 2014.
- [19] J. W. Kim, J. Park, B. J. Yu, S. Park, MFL Sensing based NDE Technique for Defect Detection of Railway Track, *8th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Bilbao, Spain, July 5-8, 2016.
- [20] B. Karpuschewski, O. Bleicher, M. Beutner, Surface integrity inspection on gears using Barkhausen noise analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 19, pp. 162-171, 2011.
- [21] M. Čilliková, B. Mičieta, M. Neslušan, D. Blažek, Nondestructive Magnetic Monitoring of Grinding Damage, *Procedia Materials Science*, Vol. 12, pp. 54-59, 2016.
- [22] S. Akcan, W. S. Shah, S. P. Moylan, S. Chandrasekar, P. N. Chhabra, H. T. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.
- [23] B. J. Griffiths, Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and خروجی‌های نشت شار مغناطیسی مشاهده و بررسی شده است.
- با وجود این که میزان تفکیک‌پذیری دو کاوشگر اندازه‌گیری نفوذپذیری و نشت شار در جداسازی نمونه‌های سالم و دچار سوختگی شده، تقریباً یکسان است، با توجه به کاربرد صنعتی کاوشگرهای نشت شار مغناطیسی (سرعت بالاتر آزمون با توجه به امکان به کار بردن فرکانس تحریک بالاتر و همچنین تنها نیاز به برداشت اطلاعات از سطح به ویژه در نمونه‌های با ضخامت بالا)، این روش غیرمخرب در تشخیص سوختگی سنگ‌زنی پیشنهاد می‌شود.
- ### 5- مراجع
- [1] S. Malkin, C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press Inc., 2008.
- [2] S. Malkin, C. Guo, Thermal Analysis of Grinding, *CIRP annals*, Vol. 56, No. 2, pp. 760-782, 2007.
- [3] International Standard, ISO 14104: *Gears-Surface temper etch inspection after grinding, chemical method*, 3rd edition, published 2017-04, ISO copyright office, Switzerland.
- [4] B. R. Höhn, K. Stahl, P. Oster P, T. Tobie, S. Schwienbacher, P. Koller, Grinding Burn on Gears: Correlation Between Flank-load-carrying Capacity and Material Characteristics, In *Power Transmissions*, pp. 113-123, 2013.
- [5] L. Wang, X. Tian, Q. Liu, X. Tang, L. Yang, H. Long, Surface Integrity Analysis of 20CrMnTi Steel Gears Machined Using the WD-201 Microcrystal Corundum Grinding Wheel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 5, pp. 2903-2912, 2017.
- [6] A. Thanedar, G. G. Dongre, R. Singh, S. S. Joshi, Surface Integrity Investigation Including Grinding Burns Using Barkhausen Noise (BNA), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, pp. 226-40, 2017.
- [7] L. Wang, X. Tang, L. Wang, N. Yang, X. Chen, P. Li, G. Liu, G. Liu, Mechanism of Grinding-Induced Burns and Cracks in 20CrMnTi Steel Gear, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 34, No. 10, pp. 1143-1150, 2019.
- [8] S. Kahrobaee, T. H. Hejazi, I. A. Akhlaghi, Electromagnetic Methods to Improve the Nondestructive Characterization of Induction Hardened Steels: A Statistical Modeling Approach, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 380, pp. 125074, 2019.
- [9] W. Zhu, W. Yin, S. Dewey, P. Hunt, C. L. Davis, A. J. Peyton, Modeling and Experimental Study of a Multi-Frequency Electromagnetic Sensor System for Rail Decarburisation Measurement, *Ndt & E International*, Vol. 86, pp. 1-6, 2017.
- [10] A. Stupakov, R. Farda, M. Neslušan, A. Perevertov, T. Uchimoto, Evaluation of a Nitrided Case Depth

- AISI D2 Tool Steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 382, pp. 359-65, 2015.
- [31] S. Kahrobaee, T. H. Hejazi, I. A. Akhlaghi, M. Koohestani, F. Salmani, A Magnetic Nondestructive Evaluation Method to Simultaneously Determine Chemical Composition and Heat Treatment Characteristics of Plain Carbon Steels: A Statistical Modeling Approach, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 29, pp. 2560-2573, 2020.
- [32] C. Zhang, N. Bowler, C. Lo, a Magnetic characterization of surface-hardened steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, pp. 3878-3887, 2009.
- [33] S. Kobayashi, H. Takahashi, Y. Kamada, Evaluation of case depth in induction-hardened steels: Magnetic hysteresis measurements and hardness-depth profiling by differential permeability analysis, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 343, pp. 112-118, 2013.
- [34] A. Mirzaee, S. Kahrobaee, I. Ahadi Akhlaghi, Non-destructive determination of microstructural/mechanical properties and thickness variations in API X65 steel using magnetic hysteresis loop and artificial neural networks, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 35, No. 2, pp. 190-206, 2020.
- [35] E. Ahmadzade-Beiraki, S. Kahrobaee, M. Kashefi, I. Ahadi Akhlaghi, M. Mazinani, Quantitative Evaluation of Deformation Induced Martensite in Austenitic Stainless Steel Using Magnetic NDE Techniques, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-9, 2020.
- Deformation Processes, *Journal of Tribology*, Vol. 109, No. 3, pp. 525-530, 1987.
- [24] B. J. Griffiths, White Layer Formations at Machined Surfaces and Their Relationship to White Layer Formations at Worn Surfaces, *Journal of Tribology*, Vol. 107, No. 2, pp. 165-171, 1985.
- [25] B. Lin, K. Zhou, J. Guo J, Q. Y. Liu, W. J. Wang, Influence of Grinding Parameters on Surface Temperature and Burn Behaviors of Grinding Rail, *Tribology International*, Vol. 122, pp. 151-62, 2018.
- [26] S. B. Hosseini, U. Klement, Y. Yao, K. Rytberg, Formation Mechanisms of White Layers Induced by Hard Turning of AISI 52100 Steel, *Acta Materialia*, Vol. 89, pp. 258-67, 2015.
- [27] A. Ramesh, S. N. Melkote, L. F. Allard, L. Riester, T. R. Watkins, Analysis of White Layers Formed in Hard Turning of AISI 52100 steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 390, No. 1-2, pp. 88-97, 2005.
- [28] C. Mao, Z. X. Zhou, D. W. Zhou, D. Y. Gu, The Properties and the Influence Factors of the White Layer in the Surface Grinding, *In Advanced Materials Research*, Vol. 53, pp. 285-292, 2008.
- [29] A. Sahebalam, M. Kashefi, S. Kahrobaee, Comparative Study of Eddy Current and Barkhausen Noise Methods in Microstructural Assessment of Heat Treated Steel Parts, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 29, No. 3, pp. 208-218, 2014.
- [30] S. Kahrobaee, M. Kashefi, Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Tempering Process in