ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org



مسعود پور^{1*}، حسین رضایی²، منصور باقری²، حسن فرامرزی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

2-دانشجوی کارشناسی، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه فنی و حرفهای خراسان رضوی، دانشگاه شهید محمد منتظری مشهد، مشهد، ایران

* قوچان، كدپستى m.pour@qiet.ac.ir ،94771-67335

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در سالهای اخیر افزودن نانوذرات مختلف در دی الکتریک فرآیند تخلیه الکتریکی به منظور بهبود نرخبرداشتماده و زبری سطح مطرح شده است. در همین راستا، اثرات افزودن نانوذرات اکسیدفلزی نظیر مس، آلومینیوم، اکسید آلومینیوم،کربن، سیلیسوم، کاربیدسیلیسوم، تنگستن، در دیالکتریکهای مختلف مانند آب دیونیزه شده، نفتسفید، روغن معدنی و روغن سیلیکون بررسی شده است. نتایج نشان میدهد که پارامترهایی از جمله چگالی، اندازه ذرات، غلظت ذرات و ضریب مقاومت الکتریکی و ضریب هدایت حرارتی نانوذرات می	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 25 اسفند 1398 داوری اولیه: 6 اردیبهشت 1399 پذیرش: 2 شهریور 1399
عملکرد فرآیند تأثیر بگذارد. اکسیدروی یکی از اکسیدهای فلزی است که دارای ضریب هدایت حرارتی پایین و مقاومت الکتریکی بالایی است و لذا میتواند عملکرد فرآیند تخلیه الکتریکی را بهبود دهد. در این مقاله، اثرات غلظت جرمی نانو ذرات اکسیدروی به ازای هر لیتر (1تا 4 گرم/لیتر) در دیالکتریک فرآیند تخلیه الکتریکی و تغییر شدت جریان (بین 6A تا A24)، بر میزان نرخبرداشتماده و زبریسطح در فولادهای AISI1045، AISI1045 و AISI 105 در دو محدوده ماشین کاری خشن کاری و پرداخت کاری بررسی شده است. در ماشین کاری خشن، نتایج نشان میدهد که غلظت جرمی 4 گرم/لیتر نانوذره اکسیدروی میتواند مقادیر نرخبرداشتماده و زبری ها ماشین کاری خشن، نتایج نشان میدهد که غلظت جرمی 4 گرم/لیتر نانوذره اکسیدروی میتواند مقادیر نرخبرداشتماده را در	کلیدواژگان: فرآیند تخلیه الکتریکی نانو ذره اکسیدروی نرخ برداشت ماده زبری سطح
حرارتی فولادهای مذکور دارد، اما با چگالی آنها مرتبط نیست. در پرداختکاری (با شدت جریانA 6)، نتایج نشان میدهد که زبری سطح قطعات در حالت پرداختکاری در AISI4140 و AISI D3 حداقل 30% بهبود یافته است، اما در AISI1045 بهبود ایجاد شده تنها 10% می باشد.	

Experimental evaluation of the simultaneous effect of Nanoparticle ZnO and spark peak current on MRR, surface roughness and surface micro cracks of the AISI1045, AISI 4140 and AISI D3

Masoud Pour^{1*}, Hossein Rezaee², Mansour Bagheri², Hassan Faramarzi² 1-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering ,Quchan University of Technology, Quchan, Iran

2-B.Sc, Department Of Mechanical Engineering. Faculty of shahid Mohammad Montazeri, Mashhad Branch, Technical and Vocational University, Mashhad, Iran

* P.O.B. 94771-67335 Quchan, Iran, m.pour@qiet.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 15 March 2020 First Decision: 25 April 2020 Accepted: 23 August 2020	In recent years, the addition of the various nanoparticles in dielectric of EDM process has been considered in order to improve the material removal rate (MRR) and surface roughness. In this regard, the effects of the addition of metal oxide nanoparticles including Cu, Al, Al ₂ O ₃ , C, Si, SiC, Gr and W, in different dielectric such as deionized water, kerosene, mineral oil and silicon oil, are surveyed. The results illustrate that the
Keywords: EDM process ZnO nanoparticle MRR Surface roughness	parameters such as the density, particle size, particle concentration and electrical and thermal conductivity of the nanoparticles can be affected on the process performance. ZnO is one of metal oxides which has high thermal and electrical conductivity so that it can improve the performance of EDM process. In this paper, the effects of the mass concentration of ZnO particle per liter (1 to 4 gr/liter)in dielectric of EDM process and the variation of peak current (between 6A to 24 A) on MRR and surface roughness in AISI 1045 (AISI 4140, AISI D3 steels are investigated. The studies are done in two classifications that are including the rough and the finish machining. In rough machining, the results illustrate that the mass concentration 4 gr/liter of ZnO nanoparticle mass increase the MRR values up to %10, %50 and %40, in AISI1045, AISI4140 and AISID3, respectively. Although, these changes are directly related to the thermal conductivity of these steels, they are not related to density. In finish machining (with the peak current 6A), the results are shown that the surface roughness in finishing in the AISI 4140 and AISI D3 was significantly improved, but the improvement of AISI 1045 is just %10.

Please cite this article using:



1– مقدمه

امروزه استفاده از موادی با سختی، مقاومت مکانیکی و حرارتی بالا برای بهبود شرایط عملکردی قطعات بکارگرفته شده در صنایع مختلف نظیر پزشکی، هوافضا، نفت و گاز به شدت مطرح است. این مواد شامل کامیوزیتها، فولادهای ابزار، کاربایدها و سرامیکها میباشند. ماشینکاری با تخلیه الکتریکی یکی از روشهایی است که در تولید محصولات این صنایع کاربرد داشته و بهبود عملکرد آن با روشهای نوین مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش تولیدی، میدان الکتریکی محلى بسيار قوى در فاصله بين الكترود و قطعه كار ايجاد شده و مولکولها و یونهای دیالکتریک پولاریزه و جهتدار گردیده و در زمان تخليهجريان الكترونها به فرم يك كانال تخليه پلاسما جریان پیدا می کنند. حرارت و فشار تولید شده در این فاصله سبب برداشت براده می شود، که دلیل آن آزادسازی انرژی جنبشی از الکترونهای و یونهای موجود میباشد [1، 2]. این حرارت فوق العاده سبب ذوب شدن، بخار شدن و در نهایت سایش ابزار و قطعه کار می شود [3]. با وجود مزایای تولید در روش تخلیه الکتریکی، در ماشینکاری با این روش محدودیتهایی نظیر؛ پایین بودن نرخبرداشتماده، ناپایداری سطح در اثر تنشهای حرارتی و ایجاد ترکهای حرارتی، عدم ایجاد کیفیت سطح مطلوب قطعه کار [4]، مانع استفاده گسترده از این روش شدهاند. برای رفع برخی از مشکلات ذکر شده، استفاده از ترکیب پودرهای مواد رسانا و نارسانا در اصلاح فرآيند تخليه الكتريكي، از حدود سه دهه قبل مطرح شده است.

در روشهای نوین استفاده شده در فرآیند تخلیه الکتریکی، که برپایه استفاده از پودرهای فلزی و غیرفلزی در مایع دیالکتریک [5] میباشند، در ابتدا اثر پودرهای فلزی نظیر پودر آهن، مس، آلومینیوم در دیالکتریک نفت سفید برای ماشینکاری قطعات فولادی توسط اردان و بیلگین در مرجع [6] مورد ارزیابی قرار گرفت. وجود نانو ذرات به واسطه افزایش ظرفیت حرارتی مایع دیالکتریک، موجب افزایش فرکانس تخلیه شده [7] و در نتیجه جرقه سریعتر ایجاد شده که بدین ترتیب نرخبرداشتماده از سطح قطعهکار افزایش مییابد [8]. نکته مهم این است که پودرهای مختلف اثرات متفاوتی برروی عملکرد فرآیند تخلیهالکتریکی دارند[9] و اضافهکردن نانو ذرات به دیالکتریک میتواند سبب بهبود کیفیت سطح و نیز حذف یا کاهش ریز ترکهای سطحی میشود. از طرف دیگر پارامترهایی نظیر؛ سایز، چگالی، جنس،

اگرچه اثر سایز ذرات به خوبی مورد ارزیابی قرار نگرفته است، اما در مرجع [10] اثر سایز نانو ذرات در بهبود پارامترهای ماشین کاری بررسی شده است که نتایج آنها نشان میدهد که افزایش سایز نانو ذرات سبب کاهش نرخبرداشتماده میشود. از طرف دیگر، در زمانیکه از پودر با سایز نانو استفاده شود کیفیت سطح قطعه تولیدی میتواند به کیفیت سطح پرداخت نهایی برسد [11]. موضوع حائز اهمیت دیگر، تاثیر غلظت جرمی نانوذره اضافه شده در ایجاد شرایط بهینه ماشین کاری نظیر (نرخبرداشتماده، زبری سطح و ریز ترکهای سطحی و سوراخهای میکرونی) در شرایط مختلف پارامترهای ماشین کاری نظیر شدت جریان، زمان روشن بودن جرقه میباشد، که در مراجع [15-15] به آنها پرداخته شده است.

به منظور بررسی اثر جنس، پودرهای مختلف نظیر اکسید آلومینیوم، کاربیدتیتانیوم، مس، کربن ،ژرمانیوم، سیلیسوم، کاربیدسیلسیوم، کروم و تنگستن در نفت سفید در مراجع [16 [17] بررسی شده است. اگرچه رسانایی بالا این مواد سبب بهبود عملکرد ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی شده است، اما برخی از آنها گران قیمت هستند و باید استفاده از آنها مقرون به صرفه باشد. در ادامه نتایج بررسی برخی مواد استفاده شده، ارائه می گردد.

نانو لولههای تک و چند جداره کربنی یکی از شاخص ترین نانوذرات میباشند که به دلیل دارا بودن شرایط یکنواخت و عالی در ضرایب مقاومت الکتریکی پایین و هدایت حرارتی بالا مورد توجه ویژه قرار گرفتهاند. تحقیقات زیادی با این نانو ذرات برروی فولادهای D2 AISI ماینکول 825، اینکول 817، برروی فولادهای تک جداره کربنی در ماشین کاری 23، 19] از نانو لولههای تک جداره کربنی در ماشین کاری 23، 19] 825 از نانو لولههای تک جداره کربنی در ماشین کاری 23، 19 مایناده شده است. در مرجع [21] نشان داده شده است که استفاده شده است. در مرجع [21] نشان داده شده است که 80% نرخبرداشتماده و 67% زبری سطح 20 AISI شود. در مرجع [22] از نانولوله ای چند جداره کربنی برای AISI شود. در استفاده شده که سایش کمتر ایزار، مورفولوژی بهتر سطح قطعه کار و همچنین نرخبرداشتماده بهتر با اضافه کردن این نانو ذره در دی الکتریک مشاهده شد. از طرف دیگر در [23]

ارزیابی عملکرد این نانوذره در ماشین کاری فولاد ناک80 روی پارامترهای کیفیت سطح و نرخبرداشتماده انجام شده است. نتایج حاکی از بهبود 70% کیفیت سطح و 60% نرخبرداشتماده میباشند. همچنین در مرجع [24] نشان داده شده است که اضافه کردن گرافن در دیالکتریک نمیتواند بهبود بیش از 20% در نرخ برداشت ماده را برای ماشین کاری اینکول 718 ایجاد کند.

علىرغم آنكه در تحقيقات قبل وجود ضريب مقاومت الكتريكي و هدايت حرارتي بالا به عنوان عامل بهبود دهنده شرایط ماشین کاری مدنظر قرار گرفته است، اما بررسی نانوپودرها با رسانایی پایین نیز نتایج قابل ملاحظهای را ایجاد كردند. در اين زمينه تاكنون بجز برخي مقالات نظير [25، 26] که به نانو پودرهای اکسید آلومینیوم توجه خاصی شده است، به نانو پودرهایی با رسانایی پایین برای بهبود شرایط ماشین کاری تخلیهالکتریکی توجه نشده است. در مرجع [25] نشان داده شده است که این نانو ذره میتواند در ماشین کاری اینکول 825 سبب بهبود 57% در نرخبرداشتماده و بهبود 63% در زبریسطح می شود. از طرف دیگر در [27] نشان دادند که این نانو ذره می تواند در ماشین کاری AISI D2، نرخبرداشتماده را به میزان 43/5% کاهش دهد و زبریسطح را به میزان 33/7% بهبود دهد. مقایسه نتایج ارائه شده در مرجع [21] با مرجع [27] در ماشین کاری AISI D2 حاکی از بهبود تقریباً 50% نرخبرداشتماده و زبریسطح در نانولولههای کربنی نسبت به اکسیدآلومینیوم میباشد. به منظور بررسی اثر سایر نانو ذرات نظير اکسيد تيتانيوم، اکسيد روی و اکسيد آلومينيوم در ماشین کاری AISI H13 در [28] آزمایشاتی انجام شد. نتایج نشان دادهاند که، اکسیدروی سایش ابزار کمتر و نرخبرداشتماده و زبری سطح بالاتری را نسبت به سایر نانو ذرات ایجاد میکند و این در حالی است که اکسیدآلومینیوم زبری سطح بهتری را ایجاد میکند. لازم به ذکر است که بیشترین نرخبرداشتماده در تمامی نانوذرات مورد بررسی در 3gr/L ایجاد شده است.

از آنجا که استفاده از نانوذره اکسیدروی تنها در مرجع [28] ارزیابی شده است و اثر هدایت حرارتی قطعه کار و چگالی آنها [29] بررسی نشده است، لذا در این مقاله به بررسی اثر آن در فرآیند تخلیهالکتریکی سه فولاد AISI4140،AISI 1045 و AISI D2 پرداخته خواهد شد. برای این منظور ابتدا سنتز نانو ذرات اکسیدروی انجام شده و سپس با انجام تستهای XRD و DLS به ترتیب صحت ایجاد این نانوذرات و سایز نانو ذره تولید شده ارزیابی شده است. در مرحله بعد با انجام آزمایشهایی اثر

تغییرات، غلظت جرمی (gr/L) نانو ذره معلق شده در دیالکتریک (گازوئیل)، شدت جریان و جنس قطعه کار در زبری سطح، نرخبرداشتماده و ریز ترک سطحی مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش تحقیق و آزمونها 2-1- سنتز نانو ذرات

در این مقاله به دلیل بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی و پایین بودن مقاومت الکتریکی اکسیدروی نسبت به سایر اکسیدهای فلزی نظیر TiO2 و Al₂O3 [28]، این نانو ذره مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای سنتز نانو ذره اکسیدروی از روش رسوبی استفاده شده است. سنتز نانو ذره اکسیدروی در 2 مرحله صورت گرفته است. در بخش اول پس از ساخت محلول و تشکیل رسوبات حاصل، آنها را در آون قرار داده شده تا رطوبت مواد خارج شود. در مرحله بعد رسوبات را در کوره قرار داده تا مواد اکسید شوند [30]. روش رسوبی با توجه به کم هزینه بودن آن یکی از روشهای پرکاربرد در زمینه سنتز نانو ذرات بشمار میآید. این روش به صورت تجربی میباشد و استفاده از نمکهای نیترات یا نمک سولفات در شده است که استفاده از هرکدام از این نمکها رسوبات بهتر با اندازه بیشتری برجا میگذارند. در شکل 1 به صورت شماتیک روش سنتز انجام شده برای هریک از مواد نشان داده شده است.

روش سنتز استفاده شده بدین شکل است که در مرحله نخست محلول 50 میلی لیتر محلول روی نیترات (3/71 گرم) یک مولار تهیه کرده و آنرا بخوبی همزده، سپس در یک بشر جداگانه 50 میلی لیتر آب مقطر ریخته و به آن 2 گرم سدیم هیدروکساید اضافه شده و به محلول قبلی اضافه کرده تا حجم محلول در بالون حجمی به 100 میلی لیتر برسد. سپس محلول محلول در بالون حجمی به 100 میلی لیتر برسد. سپس محلول معمر زده شده است. پس از آن این محلول همگن را بوسیله آب مقطر و کاغذ صافی شستشو داده تا 2(OH) مرسوب کند و PH آن به 7 برسد. رسوبات را در آون به مدت 18 ساعت قرار داده تا رطوبت آن از بین برود. سپس آنرا در کوره قرار داده تا اکسیدروی حاصل گردد.

 $\begin{aligned} Zn(NO_3)_2 &\Leftrightarrow Zn^{2+} + 2NO_3^- \\ Zn^{2+} + 2OH^- &\to Zn(OH)_2 \\ Zn(OH)_2 + &\gtrsim ZnO + H_2O \end{aligned} \tag{1}$ prove the set of the set of

حاصل شده 1/62gr میباشد که سنتز استفاده شده دارای راندمان قابل توجهی میباشد و بایستی تایید وجود نانوذره اکسیدروی با آزمایش XRD انجام شود.

در شکل 2 نتایج XRD بدست آمده ارائه داده شده است. زاویه تابش بین 10 تا 80 میباشد. نتایج XRD از نانو ذره اکسیدروی مشابه نتایج ارائه شده در مرجع [30] میباشند که تاییدی بر صحت تولید نانو ذرات مورد نظر است. پس از تایید شکل گیری نانو ذرات، اندازه گیری سایز نانوذره ایجاد شده با استفاده از آزمایش DLS انجام شده است. سایز نانوذره ایجاد شده در حدود 400 نانومتر میباشد (شکل 3).

2-2- آماده سازی نانو دیالکتریک

به منظور معلقسازی نانو ذرات اکسیدروی در گازوئیل، از

دستگاه اولتراسونیک با فرکانس 200Hz به مدت 75 دقیقه با شرایط 7 ثانیه تحریک و 3 ثانیه توقف استفاده شده است. به منظور جلوگیری از بالا رفتن دمای گازوئیل و آتشسوزی در دستگاه، نمونهها در درون بشری که خود در درون بشر 250CC شامل آب سرد بود، قرار گرفتهاند. در شکل 4 دستگاه اولتراسونیک در زمان تحریک نمونهها مشاهده می گردد.

2-3- تنظيمات و شرايط آزمايش

به منظور انجام آزمایش از فرآیند تخلیهالکتریکی با تنظیم شدت جریان، زمان جرقه و الکترود مسی استفاده شده است. هرچند نتایج ارائه شده در [31] کیفیت بالاتر سطح قطعه تولیدی در زمان آند بودن الکترود را مطرح کرده است، اما در این مقاله الکترود به عنوان کاتد در نظر گرفته شده است.





 30
 -80

 70
 -80

 60
 -60

 50
 -40

 30
 -20

 10
 -20

شکل **3** سایز ذرات اکسیدروی سنتز شده با روش DLS Fig 3 Nanoparticle size by DLS tests

Fig.2 The XRD of ZnO

زهرا شیربند و همکاران



شکل **4** آماده سازی دیالکتریک بههمراه نانو ذره **Fig 4** Providing dielectric with Nanoparticle

لازم بهذکر است که تمام آزمایشها با ولتاژ 80۷ انجام شده است و شرایط آزمایشها در جدول 1 ارائه شده است. همچنین آنالیز شیمیایی انجام شده برای هریک از فولادها در جدول 2 ارائه شده است که با مقایسه با مقادیر استاندارد، تایید صحت مواد انجام شده است.

به منظور ثابت بودن شرایط آزمایش در هریک از آزمایشها، نانو ذرات در غلظتهای جرمی ذکر شده جدول 1، در mL 500 دیالکتریک جداگانه آمادهسازی شده و برای هر آزمایش به صورت مستقل استفاده شدهاند. به منظور ثابت بودن شرایط آزمایش، ابزار پس از هر آزمایش، تراشکاری و سنگ زده شده است. از طرف دیگر برای آشکارسازی اثر نانو ذرات اکسیدروی، آزمایشاتی نیز بدون اضافه کردن نانو ذرات اکسیدروی با دیالکتریک برروی نمونهها انجام شده است. برای تایید تکرارپذیری هر آزمایش، 5 تکرار در نظر گرفته شده است و مقدار median آنها در نمودارها گزارش شده است.

در شکل 5 دستگاه تخلیه الکتریکی مدل آذرخش که در آزمایشات استفاده شده است مشاهده می شود. به منظور جلوگیری از رسوب احتمالی نانو ذرات، دی الکتریک با استفاده از یک پمپ در درون مخزن، حرکت داده شده است (شکل 6). شرایط ماشین کاری در زمان 3min انجام تخلیه الکتریکی به صورت، 2 ثانیه روشن و 2 ثانیه خاموش در نظر گرفته شدند، که در شکل 7 نمونه های تولید شده نشان داده شده است.

جدول 1 پارامترهای مورد بررسی در آزمایش

Table 1 The experimental parameters				
جنس قطعه	غلظتجرمی نانوذرہ (gr/L)	شدت جریان (A)		
aisi 1045				
aisi 4140	1 .2 .3 .4	۲۴،۱۸، 6، 12		
aisi d3				

جدول 2 أناليز تركيب شيميايي فولادها Table 1 The chemical composition analysis of steels

Table 1 The chemical composition analysis of seeds						
جنس قطعه	С	Mn	Mo	Cr	Si	Р
aisi1045	0/46	0/72	-	-	-	0/03
aisi4140	0/39	0/7	0/2	0/8	-	-
aisi d3	0/47	0/31	-	11/6	0/26	-



شکل 5 بستر آزمایش –دستگاه تخلیه الکتریکی Fig. 5 The experimental setup- EDM machine



شکل 6 سیکل بسته ایجاد شده در فرآیند تخلیه الکتریکی Fig. 6 The closed loop is made for EDM process



شکل **7** نمونههای تخلیه الکتریکی شده Fig. 7 The machined samples by EDM process

8- بحث و تحلیل نتایج
8-1- بررسی نرخ براشت ماده و زبری سطح در خشن کاری
۱۰- این نانو ذره دارای ضریب مقاومت الکتریکی بالا و ضریب
۸ هدایت حرارتی پایین میباشند که سبب تغییر دما در فاصله
۱۰ بین ابزار و قطعه کار میشود[32]. در جدول 3 مقایسهای بین



شکل **8** اثر نانو ذرات در توزیع جرقهها [15] Fig. 8 The effect of nanoparticles in sparks distribution [15]

شکل 13 حاکی از آن است که در ماشین کاری AISI D3، در حالت اضافه کردن 4gr/L اکسیدروی، نرخ براده برداری در تمامی جریان های 6A، 12A، 18A و 24A نسبت به حالت بدون نانو ذره اضافه شده و بهبود چشمگیری ایجاد شده است. این بهبود به ترتیب جریان های ذکر شده فوق، 25%، 14/28% این بهبود به ترتیب جریان های ذکر شده فوق، 25%، 14/28% دیالکتریک دارای نانو ذره اکسیدروی به مقدار 4gr/L در جریان 18A میتواند نرخ برداشت ماده با جریان 24A دیالکتریک بدون نانو ذره را ایجاد کند و سبب کاهش مصرف انرژی گردد. هرچند در سایر غلظت های جرمی نیز افزایش نرخ برداشت مشاهده می شود اما تغییرات ایجاد شده در نرخ برداشت ماده کمتر از 18A است.

با بررسی همزمان شکلهای 9 و 10 مشاهده می شود که استفاده از 4gr/L نانو اكسيدروى در AISI1045 سبب افزايش نرخبرداشتماده و بهبود زبری سطح میشود، اما 4gr/L علاوه بر تغییر نرخبرداشتماده، سبب بهبود زبریسطح به ترتیب در جریانهای 18A و 24A به میزان 11/3% و 9/7% می شود. از طرف دیگر، با ارزیابی "شکل 10" میتوان این نتیجه را استخراج کرد که استفاده از 2gr/L اکسیدروی، بهبود زبری سطح به میزان 16/66% میسر شده است (اما توجه شود که براساس شکل 9، این حالت نرخ برداشتماده را کاهش می دهد.). در شکل 12 نیز مشاهده می شود که در حالت 4gr/L نانو اکسیدروی اضافه شده و شدت جریان 24A، کاهش زبری سطح به میزان 12/5% ایجاد شده است. متاسفانه در شکل 14 مشاهده می شود که در حالت 4gr/L نانو ذره اکسیدروی در ماشین کاری AISI D3 زبریسطح افزایش می یابد که می تواند ناشی از افزایش عمق حفره تولید شده باشد. برای بررسی این موضوع تغییرات زبری سطح در شرایط خشن تراشی در بخش تحلیل تصاوير بافت سطح با استناد به تصاوير بافت سطح انجام شده است. ضرایب مقاومت الکتریکی [33] و ضریب هدایت حرارتی[34] نانوذره اکسید روی و برخی نانوذرات [16] انجام شده است. همانطور که مشاهده میشود، تفاوت قابل ملاحظهای بین مقاومتالکتریکی و ضریبهدایتحرارتی اکسیدروی با سایر نانو ذرات وجود دارد.

جدول 3 ضرايب مقاومت الكتريكي و هدايت حرارتي برخي نانو ذرات Table 3 The Electrical resistance and thermal conductivity of some

مقاومت الكتريكي	ضریب هدایت حرارتی
(μΩ-cm)	(W/mK)
103	25/1
1/71	401
50	4000
270	2
	مقاومت الکتریکی (μΩ-cm) 103 1/71 50 270

معمولاً در مقالات ذکر شده است که با قرار گرفتن نانو ذرات در فاصله بین ابزار و قطعه کار جرقههای بزرگ به جرقههای کوچک تبدیل میشود. این موضوع میتواند سبب بهبود زبریسطح و همچنین افزایش نرخبرداشت براده گردد که در مرجع [15] براساس شکل 8 تشریح شده است. براین اساس تحلیل های شرایط مختلف در ادامه انجام شده است و همچنین مشخص کردن نوع حفرههای ایجاد شده و تفاوت آنها در بخش تحلیل تصاویر میکروسکوپی سطوح ایجاد شده بررسی خواهد شد.

در شکل 9 تغییرات نرخبرداشتماده به ازای تغییر غلظت جرمی (gr/L) نانو ذره در ماشینکاری AISI 1045 مشاهده میشود. این نمودار نشان میدهد که در ماشینکاری AISI 1045، درحالت جریان A81 و A42 به همراه غلظت جرمی 4gr/L اکسیدروی، بهبود نرخبرداشتماده به ترتیب به میزان 17/01% و 5/88% حاصل شده است. در شکل 11 ماشینکاری 10/71 مشاهده میشود که نرخبرداشتماده ماشینکاری AISI4140 مشاهده میشود که نرخبرداشتماده در حالت اضافه کردن 4gr/L اکسیدروی در جریانهای 124، اکمی در حالت اضافه کردن 4gr/L اکسیدروی در جریانهای 124، در حالت اضافه کردن 4gr/L مشاهده میشود که نرخبرداشتماده در حالت اضافه کردن 4gr/L و 26% در جریانهای 124، در حالت اضافه کردن 4gr/L مشخص میشود که دیالکتریک قابل ملاحظهای دارد، که به ترتیب 50%، 3/38% و 13% میباشند. با بررسی شکل مشخص میشود که دیالکتریک دارای نانو ذره اکسیدروی به مقدار 4gr/L در جریان A84، میتواند نرخبرداشتماده با جریان 24A (در حالت دیالکتریک میتواند نرخبرداشتماده با جریان 24A (در حالت دیالکتریک



شکل 10 روند تغییر زبری سطح در فولاد AISI1045 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 10 The variation of surface roughness of AISI 1045 per current and ZnO nanoparticle mass



شکل 12 روند تغییر زبری سطح در فولاد AISI4140 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 12 The variation of surface roughness of AISI 4140 per current and ZnO nanoparticle mass



شکل 14 روند تغییر زبری سطح در فولاد AISI D3 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 14 The variation of surface roughness of AISI D3 per current and ZnO nanoparticle mass



شکل 9 روند تغییر نرخبرداشتماده در فولاد AISI1045 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 9 The variation of MRR of AISI 1045 per current and ZnO nanoparticle mass



شکل 11 روند تغییر نرخبرداشتماده در فولاد AISI4140 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 11 The variation of MRR of AISI 4041 per current and ZnO nanoparticle mass



شکل 13 روند تغییر نرخبرداشتماده در فولاد AISI D3 به ازای تغییر آمپر و جرم نانوذره اکسیدروی اضافه شده

Fig. 13 The variation of MRR of AISI D3 per current and ZnO nanoparticle mass

همانطور که مشاهده می شود، در نرخبرداشتماده با افزایش غلظت جرمی نانوذره از 3gr/L به 4gr/L تغییرات قابل

کاهش مقاومت فاصله بین ابزار و قطعه کار و در نتیجه افزایش انرژی تخلیهالکتریکی اعلام نمودهاند. اما دلیل تفاوت ایجاد شده در نرخبرداشتماده بین فولادهای مختلف را باید در ضریب هدایت حرارتی آنها نیز جستجو کرد که در مرجع [32] به آن اشاره شده است.

نتایج نشان میدهند که افزایش نرخ برداشتماده در ماشین کاری تمامی فولادها در غلظت جرمی 4gr/L نانو ذره اکسیدروی رخ داده است، که در اثر کاهش مقاومت الکتریکی دیالکتریک در این شرایط میباشد. در فولادهای AISI1045 و AISI4140 افزایش نرخبرداشتماده به همراه کاهش زبری سطح در 4gr/L از غلظت جرمی نانو ذره اکسیدروی ایجاد شده است که این موضوع به دلیل افزایش جرقههای تولید شده بین الكترود و قطعه كار مىباشد. اين افزايش همراه با كاهش عمق حفرههای تولیدی می باشد که در بخش 4 با ارائه تصاویر سطح با جزئیات کامل به بررسی این پرداخته شده است. از طرف دیگر در AISID3 افزایش نرخبرداشتماده به همراه افزایش زبریسطح است که به دلیل کاهش جرقههای ایجاد شده می باشد که سبب افزایش عمق حفره شده است (در بخش 4 با جزئیات در مورد آن بحث خواهد شد.). به طور کلی می توان نتيجه گرفت که در زمان ماشينکاری AISI1045 و AISI4140 یونها و الکترونهای بیشتری توسط نانوذرات اکسیدروی آزاد می شود، که بدین ترتیب جرقه های بیشتر اما با قدرت کمتری توليد مى شود. اين موضوع در ماشين كارى AISID3 رخ نداده و سبب جرقههایی با قدرت بیشتر شده است که نتیجه آن افزایش زبرىسطح است.

از آنجا که دما در سطح قطعه کار در زمان ایجاد جرقه تا حدود 1000 درجه سانتی گراد افزایش می یابد [35]، در مقاله حاضر ضریب هدایت حرارتی در این دما برای فولادهای مورد بررسی مدنظر قرار گرفته است. در جدول 4 ضریب هدایت حرارتی و چگالی فولادها ارائه شده است. با بررسی روند تغییرات ضریب هدایت حرارتی فولادها با روند افزایش نرخبرداشت ماده ضریب هدایت حرارتی فولادها با روند افزایش نرخبرداشت ماده تعییر نرخبرداشتماده از AISI1045 به AISI4140 و در نهایت به 30 AISI را تغییر در ضریب هدایت حرارتی عنوان کرد. توجه شود که برخلاف نظر ارائه شده در [32] تغییر نرخبرداشتماده با چگالی مواد ارتباط معناداری را ایجاد نمی کند. در بخش 2-3 براساس شرایط ماشین کاری، نقاط بهینه در حالت پرداخت کاری تعیین شدهاند.

برای مقایسه نرخبرداشتماده در حالت 4gr/L شکل 15

ترسیم شده است. با مشاهده این شکل مشخص می شود بهترین درصد بهبود نرخبرداشتماده در غلظت جرمی 4gr/L نانو ذره اکسیدروی به ترتیب در AISI1045 در جریان 18A به میزان 10/71 ، در AISI 4140 در جریان 424% می باشد. AISI D3 در جریان 45/45 می باشد.

جدول 4 مشخصات ترمودینامیکی و فیزیکی فولادها

Table 4 The thermodynamic and physical properties of steels			
جنس قطعه	چگالی(kg/m ³)	ضريب هدايت حرارتي	
	در دمای محیط	(W/mK) در دمای ^C	
aisi1045	7870[39]	26/61[36]	
aisi4140	7850 [40]	29/4 [37]	
aisi d3	7670[29]	28/5 [38]	



شکل 15 مقایسه ت**ن**ییر نرخبرداشتماده در جنسهای مختلف در 4gr/L نانو ذره

Fig. 15 The comparison of the variation of the MRR of different material in $4 \mbox{gr/L}$ nanoparticle

3-2- بررسی نرخ براشت ماده و زبری سطح در پرداخت کاری در بخش قبل شرایط بهینه نرخبرداشت ماده و زبری سطح در شدت جریانهای بالا مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. در این بخش با توجه به مقالات پیشین، به ارزیابی اثر نانوذرات در ایجاد شرایط پرداخت کاری مطلوب تر پرداخته می شود.

به منظور بهینه سازی راندمان تولید در ماشین کاری حالت پرداخت، شرایط شدت جریان 6A بررسی شده است. همان طور که در شکلهای 16 تا 18 مشاهده می شود، در AISI1045 تنها در حالت 2gr/L بهبود زبری سطح حاصل شده است. این حالی است که در 2gr/L بهبودی در شرایط است. این حالی Jgr/L و در AISI 4140 بهبودی در شرایط بویژه در 3gr/L در شده است. همچنین مشاهده می شود که در حالتهای 4gr/L در فولادهای AISI 4140 و AISI D3 علاوه بر بهبود کیفیت سطح، نرخ برداشت ماده نیز افزایش یافته است که نتیجه حائز اهمیتی است، زیرا هر دو پارامتر به صورت همزمان بهبود یافته اند.

ľ



شکل 16 مقایسه بهبود نرخبرداشتماده و زبری سطح در فولادAISI 1045

با نانو ذره و بودن نانو ذره

Fig. 16 Comparison of the improvement percentage of the MRR and surface roughness of AISI1045 by NPMEDM and EDM $\,$



شکل 17 مقایسه بهبود نرخبرداشتماده و زبری سطح در فولاد4140 A140 در با نانو ذره و بودن نانو ذره

Fig. 17 Comparison of the improvement percentage of the MRR and surface roughness of AISI4140 by NPMEDM and EDM



شکل 18 مقایسه بهبود نرخبرداشتماده و زبری سطح در جریان 6A در فولادAISI D3 در حالتهای تخلیه الکتریکی با نانو ذره و بودن نانو ذره Fig. 18 Comparison of the improvement percentage of the MRR and surface roughness of AISID3 by NPMEDM and EDM

از طرف دیگر می توان مشاهده کرد که استفاده از این نانو ذره در شدت جریان 6A رفتاری تقریباً مشابه در فولادهای AISI D3 و AISI L3 ایجاد می کند در حالیکه رفتار آن در نرخبرداشتماده و زبری سطح فولاد AISI 1045 متفاوت است. از آنجاییکه استفاده از 4gr/L نانو ذره اکسیدروی می تواند در

خشن کاری و پرداخت کاری در فرآیند تخلیه الکتریکی حالتهای بهینه را بوجود آورد، در ادامه به ارزیابی بافت سطح ایجاد شده با دیالکتریک دارای 4gr/L نانو ذره و بدون نانو ذره پرداخته می شود.

4- بررسی سطح و ریزترکهای سطحی نمونهها

بررسی شکلهای 9 و 10 مربوط به AISI1045 و شکلهای 11 و 12 مربوط به AISI4140 نشان می دهد که در شدت جریانهای بالا و غلظت جرمی 4gr/L اکسیدروی، در حالی که نرخبرداشتماده زیاد است، اما زبریسطح بهبود یافته است. بنابراین میتوان ادعا کرد، عمق حفرههای تولید شده در حالت نانو ذره نسبت به حالت دی الکتریک بدون نانوذره کمتر است. از طرف دیگر بررسی شکلهای 13 و 14 مربوط به AISI حاکی از آن است که وجود 4gr/L اکسیدروی در دی الکتریک سبب افزایش نرخبرداشتماده در شدت جریانهای بالا میشود اما زبری سطح نیز افزایش یافته است. بدین ترتیب میتوان نتیجه گرفت عمق حفرههای تولید شده در این فولاد در شرایط بکارگیری نانوذره اکسیدروی از حالت بدون استفاده از نانو ذره بیشتر است. برای بررسی دقیق این موضوع و همچنین بررسی ریزترکهای سطحی ایجاد شده در سطوح تولید شده، در ادامه بررسی میکروسکوپی سطوح انجام شده است.

به منظور بررسی دقیق زبری سطح و ریز ترکهای سطحی ایجاد شده، تصاویر میکروسکوپی سطوح ماشینکاری شده با بزرگنمایی 100 برابر با میکروسکوپ صاایران مدل 420- IMM گرفته شده است (شکل 19). از لحاظ قطر حفرهها و وجود ریز ترکهای سطحی در حفرههای میکروسکوپی بررسی میشود.



شکل 19 تجهیزات تصویربرداری Fig. 19 The equipment of capturing image

همانطور که در شکلهای 20 تا 22 مشاهده میشود، افزایش غلظت جرمی نانو ذره در دیالکتریک در شدت

جریانهای 24A و 18A، سبب ایجاد ریز ترکهای سطحی قابل حفرههای تولید شده است، که می تواند دلیل افزایش دی الکتریک بکارگرفته شده وجود نداشته باشد. نرخبرداشتماده باشد. شدت ریز ترکهای سطحی ایجاد شده به قدری است که در برخی از تصاویر سبب تخریب دیوار حفره شده است که ازآن جمله میتوان به شکلهای20- الف و ب در فولاد AISI 1045 اشاره کرد. از طرف دیگر با مشاهده تصاویر سطوح ایجاد شده در شدت جریانهای 12A و 6A در شکلهای20- ج نانو ذره، دارای تعداد ریز ترکهای سطحی تقریباً مشابه سطح بیشتر از حالت بدون نانو ذره می باشد.



ا) 4gr/L اکسیدروی در شدت جریان 24A A) 4gr/L of ZnO in 24 A current



ج) 4gr/L اکسیدروی در شدت جریان 12A C) 4gr/L of ZnO in 12A current



ه) بدون اکسیدروی در شدت جریان 24A E) Without ZnO in 24 A current



ح) بدون اکسیدروی در شدت جریان 12A G) Without ZnO in 12 A current

توليد شده با دىالكتريك بدون نانو ذره مىباشد. اين موضوع ملاحظه (نسبت به حالت دیالکتریک بدون نانو ذره)، در دیواره سبب شده است اختلاف حائز اهمیتی بین نرخبرداشتماده در دو

از طرف دیگر، ریز ترکهای سطحی ایجاد شده در تصاویر شكل 21- الف، ب و ج و تصاوير شكل 22- الف، ب و ج كاملاً قابل مشاهده میباشد. توجه شود که در حالتهای بدون نانو ذره نیز ریز ترکهای سطحی وجود دارد، اما به عنوان مثال در شرایط مشابه شکل 22-و و شکل 22- ب مشخص است که ریز و د، مشاهده می شود که سطح تولید شده با دی الکتریک دارای ترکهای سطحی ایجاد شده در دی الکتریک دارای نانو ذره،



ب) 4gr/L اکسیدروی در شدت جریان 18A ب B) 4gr/L of ZnO in 18 A current



6A اکسیدروی در شدت جریان 4 gr/L (د D) 4gr/L of ZnO in 6 A current



و) بدون اکسیدروی در شدت جریان 18A F) Without ZnO in 18 A current



ز) بدون اکسیدروی در شدت جریان 6A H) Without ZnO in 6 A current

شکل 20 مقایسه سطح تولید شده در فولاد AISI1045 در دیالکتریک نانو ذره اکسیدروی و بدون نانو ذره Fig 20 The comparison of surface texture of AISI1045 with and without ZnO Nanoparticle mixed in dielectric

ایجاد این ریز ترکهای سطحی نیز یکی دیگر از دلایل افزایش نرخبرداشتماده در حالت ماشینکاری با نانو ذره در دیالکتریک نسبت به حالت بدون نانو ذره در دیالکتریک است. توجه شود که باتوجه به ضریب هدایت حرارتی نانو ذره که سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی دیالکتریک شده است، ریز ترکهای سطحی بیشتری روی سطح ایجاد شده است.

به منظور بررسی دلیل ایجاد تفاوتهای ایجاد شده در زبریسطح قطعات، عمق حفرههای تولید شده در حالت غلظت جرمی 4gr/L با نانواکسیدروی و بدون نانو ذره در شدت جریانهای 24A و 18A ارزیابی شدهاند. با مقایسه شکلهای 20- الف و 20- ه و شکلهای20- ب و 20-و، عمق بیشتر



24A اکسیدروی در شدت جریان 4gr/L (ا A) 4gr/L of ZnO in 24 A current



ج) 4gr/L اکسیدروی در شدت جریان 12A C) 4gr/L of ZnO in 12 A current



24A ه) بدون اکسیدروی در شدت جریان E) Without ZnO in 24 A current



ح) بدون اکسیدروی در شدت جریان 12A G) Without ZnO in 12 A current

حفرههای شکلهای 20- ه و 20-و قابل درک است. برای اثبات این اظهار نظر می توان از تار شدن تصویر استفاده کرد. همان طور که مشخص است تصاویر گرفته شده در فاصله خاصی از عدسی میکروسکوپ شفاف هستند و با فاصله گرفتن از آن تصاویر مات و غیر شفاف خواهند شد. همان طور که در تصاویر مشخص است، شکلهای 20- ه و 20- و به ترتیب نسبت به شکلهای20- الف و 20- ب مات تر می باشند. بدین ترتیب می توان اثبات کرد عمق حفرههای تولید شده با نانوذره کمتر از عمق حفرههای تولید شده بدون نانو ذره می باشد. این موضوع در شکلهای 21- الف و 12-ه و شکلهای 21- ب و 21-و نیز قابل مشاهده است.



ب) 4gr/L اکسیدروی در شدت جریان 18A B) 4gr/L of ZnO in 18 A current



6A اکسیدروی در شدت جریان 4gr/L (D) 4gr/L of ZnO in 6 A current



و) بدون اکسیدروی در شدت جریان 18A F) Without ZnO in 18 A current



6A ز) بدون اکسیدروی در شدت جریان H) Without ZnO in 6 A current

شکل **11** مقایسه سطح تولید شده در فولاد AISI4140 در دیالکتریک نانو ذره اکسیدروی و بدون نانو ذره Fig 21 The comparison of surface texture of AISI4140 with and without ZnO Nanoparticle mixed in dielectric



ز) بدون اکسیدروی در شدت جریان 6A H) Without ZnO in 6 A current

بیشتر از حالت بدون استفاده از نانوذره می باشد در شکلهای زیر خطوط ضخیم حالتهای دارای نانوذره و حالتهای دارای

خطوط نازک شرایط بدون نانوذره را نشان میدهند. تعداد ترکهای ایجاد شده اختلاف چندانی، در دوحالت استفاده از

نانوذره اکسید روی و بدون استفاده از آن، بوجود نیاورده است (شکلهای 23 مشاهده شود.)، اما عرض ترکها و نیز عمق

ترکها میتواند عامل مهمتری از تعداد ترکها باشد که

متاسفانه تجهیزاتی برای ارزیابی آن وجود ندارد.

Fig 22 The comparison of surface texture of AISI D3 with and without ZnO Nanoparticle mixed in dielectric

اما در شکلهای 22- الف و 22-ه و شکلهای 22- ب و 22-و می شود در تمامی فولادهای ترکهای ایجاد شده در دیواره عملکرد نانو ذره برعکس قطعه کارهای قبل است. در این وغرهها در حالت استفاده از نانو ذره اکسیدروی در دیالکتریک، شکل ها مشاهده می شود که تصاویر قطعات تولید شده با نانوذره دارای عمق بیشتری میباشند، که تأییدی از افزایش زبریسطح

G) Without ZnO in 12 A current

شکل 22 مقایسه سطح تولید شده در فولادAISI D3 در دیالکتریک نانو ذره اکسیدروی و بدون نانو ذره

اندازه گیری شده در شکل 14 می باشد. به منظور ارزیابی کمی تعداد ریزترکهای ایجاد شده در فولادهای مختلف در قطعات تولید شده با غلظت جرمی 4gr/L و بدون نانو ذره در دیالکتریک، میدین¹ تعداد ریز ترکهای سطحی در تعداد 30 حفره از 5 قطعه تولید شده برای هر آزمایش مورد شمارش قرار گرفته شد. همانطور که مشاهده

¹ Median



شكل 23 مقايسه ريز تركهاى ايجاد شده مواد مختلف Fig 23 The comparison of microcrack in different workpieces

5- نتيجەگىرى

در این تحقیق به بررسی اثر وجود نانو ذره اکسیدروی در دیالکتریک (گازوئیل) در غلظتهای جرمی، شدت جریان و جنسهای مختلف قطعهکار پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از این نانو ذره با غلظت جرمی 4gr/L میتواند در بهبود نرخبرداشتماده در AISI1045، AISI4140 و میتواند در بهبود نرخبرداشتماده با افزایش ضریب هدایت حرارتی فولاد افزایش مییابد. بیشترین تاثیر آن در

فولادهای AISI4140 و AISI D3 میباشد و بیشترین بهبود در نرخبرداشتماده در AISI1045 و AISI4140 و AISI D3 به ترتیب 10%، 50% و 40% میباشد.

از طرف دیگر بکارگیری این نانو ذره در ماشین کاری نهایی (پرداخت کاری) نیز تاثیر مثبتی داشته به طوریکه می تواند (بدون در نظر گرفتن کاهش نرخبرداشت ماده) با اضافه نمودن 2gr/L 2gr/L ، 3gr/L نانو ذره اکسیدروی، به ترتیب در فولادهای AISI1045 ، AISI1045 و AISI D3 بهبود کیفیت سطوح به میزان 20%، 30% و 60% نسبت به دی الکتریک بدون نانو ذره ایجاد نمود.

با بررسی بهبودهای حاصل شده در فولادها میتوان این نتیجه را استخراج کرد که این نانو ذره تاثیر چندان قابل ملاحظهای در فولاد AISI1045 ندارد، در حالیکه در فولادهای AISI4140 و AISI D3 بهبود ایجاد شده در شرایط خشنکاری و پرداختکاری قابل ملاحظه میباشد که دلیل آن تفاوت قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی این دو فولاد نسبت به AISI1045 میباشد. نتایج نشان میدهند در زمان حضور نانوذره در سیال دیالکتریک با افزایش ضریب هدایت حرارتی فولاد افزایش نرخبرداشتماده ایجاد میشود. این تغییرات روندی مدر حرارتی فولادهای AISI D3 و 100% و 10% در ضریب هدایت حرارتی فولادهای AISI D3 و 200% و 50% خواهد شد.

بررسی تصاویر میکروسکوپی حاکی از آن است که افزایش نرخبرداشتماده در فولادهای AISI1045 و AISI4140 به دلیل افزایش ریز ترکهای سطحی ایجاد شده در زمان استفاده از نانوذره میباشد، در حالی که در AISI D3 افزایش عمق حفرههای تولید شده سبب افزایش نرخبرداشتماده شده است.

نکته قابل توجه این نانو ذره (در شرایط مقدار 4gr/L) این است که برخلاف برخی نانو ذرات دیگر، بهبود همزمان نرخبرداشتماده و زبری سطح در شرایط پرداختکاری ایجاد شده است که میتواند در کاهش هزینه تولید و افزایش کیفیت محصول تولیدی تاثیر گذار باشد.

6- مراجع

- B. Ekmekci, A.E. Tekkaya, A. Erden, A semiemprcal approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM), *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 47, pp. 1214-1228, 2007.
- [2] M. Kunieda, B. Lauwers, K.P. Rajurkar, B.M. Schumacher, Adancing EDM through fundamental insight into the process, *CIRP Annals Manf. Technol.* Vol. 54, pp. 64-87, 2005.

Heliyon 5, pp. 1-12, 2019, Doi: https://doi.org/10.1016/ j.heliyon.2019.e02963.

- [17] H. Rajkumar, M. Vishwakamra, Performance Parameters Characteristics of PMEDM: A Review, *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 13, Number 7 (2018), pp. 5281-5290.
- [18] Prabhu S, Vinayagam BK. Analysis of surface characteristics of AISI D2 tool steel material using electric discharge machining process with single wall carbon nano tubes. *IACSIT Int J Eng Technol*, Vol.2, No.1, pp.35–41, 2010.
- [19] Bhattacharya A, Batish A, Singh G, Singla VK Optimal parameter settings for rough and finish machining of die steels in powder-mixed EDM. *Int J Adv Manuf Technol* Vol. 61, pp. 537–548, 2012.
- [20] Prabhu S, Vinayagam BK, AFM nano analysis of inconel 825 with single wall carbon nano tube in die sinking EDM process using taguchi analysis. *Arab J Sci Eng* Vol. 38, pp.1599–1613, 2013.
- [21] H. Kumar , Development of mirror like surface characteristics using nano powder mixed electric discharge machining (NPMEDM), *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 76, No. 1-4, pp. 105–113, 2015.
- [22] Sari MM, Noordin MY, Brusa E. Role of multi-wall carbon nanotubes on the main parameters of the electrical discharge machining (EDM) process. J Adv Manuf. Technol.Vol.68, pp.1095–102, 2013.
- [23] C. Mai, H. Hocheng, S. Huang, Advantages of carbon nano tubes in electrical discharge machining, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 111-117. 2011.
- [24] Kamlesh Paswan, A. Pramanik & S. Chattopadhyaya, Machining performance of Inconel 718 using graphene nanofluid in EDM, *Materials and manufacturing processes*, 2020, https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1711924
- [25] A. Kumar, A. Mandal, A. R. Dixit, A. Kumar Das,S. Kumar, R. Ranjan, Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al₂O₃ nanopowder as an impurity in DI water dielectric, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, pp. 5-8, 2017, https://doi.org/10.1007/s00170-018-3126-z.
- [26] A. Saravanakumar, K. Santarao, G. Nandin, Influence of Alumina Nano Powder Mixed Dielectric Fluid In Electric Spark Machining Of AISI D3 Steel, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. Vol. 8, No. 2, pp.1257-1264, 2018.
- [27] Abrol Abhishek, Sharma Sunil, Effect Of Chromium Powder Mixed Dielectric on Performance Characteristics of AISI D2 Die Steel Using EDM. International Journal of Research in Engineering And Technology, Vol. 04 No.1, pp. 232-246, 2015.
- [28] H. Fattahi, A. Pak, Investigation of Ultrasonic Assisted Electro Discharge Machining with Al₂O₃, TiO and ZnO Nano-Powder, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, Vol. 50, No. 3, pp. 177-180, 2018. DOI:

- [3] G. Zhang, J. Guo, W. Ming, Y. Huang, X. Shao, Z. Zhang, Study of the machining process of nanoelectrical discharge machining based on combined atomistic- continuum modeling method, *Appl. Surf. Sci.* Vol. 290, pp. 359-367, 2014.
- [4] Pallavi Chaudhury, Sikata Samantaray, Role of Carbon Nano Tubes in Surface Modification on Electrical Discharge Machining -A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, pp. 4079-4088, 2017.
- [5] H. Marashi, Ahmad A. D. Sarhan, M. Hamdi, Employing Ti nano-powder dielectric to enhance surface characteristics in electrical discharge machining of AISI D2 steel, *Applied surface science*, Vol. 357, 892-907, 2015.
- [6] Erden, A.,Bilgin, S., Roleof impurities in electric discharge machining, *Proceeding of 21st international Machine Tool Design and Research Conference*, Swansea, London, Sept pp. 8-12,1980.
- [7] Boopathi R., Sundaram S., influence of process parameters for electrical discharge machine using nano particle and brass electrode, *Int. J. Res. Adv. Technol*, Vol. 2 No.11, pp. 45-49, 2014.
- [8] Kuldeep O, Garg RK, Singh RK, Experimental investigation and modeling of PMEDM process with chromium powder suspended dielectric, *int. J Appl Sci Engg*, Vol. 9, No. 2, pp. 65-81, 2011.
- [9] M. Jawahar, Ch. Sridhar Reddy, Ch. Srinivas, A review of performance optimization and current research in PMEDM, *material today*, Vol. 19, No. 2, pp. 742-747, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.122.
- [10] Tan PC, Yeo SH, Tan YV,Effects of nano-sized powder additives in micro-electrical discharge machining. *Int J Precis Eng Manuf*, Vol. 9, No. 3, pp. 22-26, 2008.
- [11] Kumar H, Development of mirror like surface characteristics using nano powder mixed electric discharge machining (NPMEDM). *Int J Adv Manuf Technol* Vol. 76, pp. 105-113, 2014. https://doi. org/10.1007/s00170-014-5965-6.
- [12] H. Raj kumar, M. Vishwakamra, Performance Parameters Characteristics of PMEDM: A Review, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, No.7, pp. 5281-5290, 2018.
- [13] Kolli M, Kumar A. Surfactant and graphite powderassisted electrical discharge Machining of titanium alloy. *Proc IMechE*, *Part B: J Engineering Manufacture*; Vol. 231, pp. 641-657, 2017.
- [14] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, Investigation of carbon nanotube added dielectric on the surface characteristics and machining performance of Ti– 6Al–4V alloy in EDM process, *Journal Of Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 212–219, 2017.
- [15]S. Mohal, H. Kumar, Study on the Multiwalled Carbon Nano tube Mixed EDM of AlSiCp Metal Matrix Composite, *Materials Today:* Proceedings Vol. 4, pp. 3987–3993, 2017.
- [16] A. Y. Joshi, A. Y. Joshi, A systematic review on powder mixed electrical discharge machining,

of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 73, pp. 460–464, 2012.

- [34] T. Olorunyolemi, A. Birnboim, Y. Carmel, O.W. Jr., I. K. Lloyd, Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 85, No. 5, pp. 1249–53, 2002.
- [35] LinGu, Yingmou Zhu, Guojian He, Ahmad Farhadi, Wansheng Zhao, Coupled numerical simulation of arc plasma channel evolution and discharge crater formation in arc discharge machining, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 135, pp. 674-684, 2019.
- [36] W.S. Woo, C.M. Lee, A study of the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with a cylindrical shape in laser-assisted milling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, pp. 33-42, 2015.
- [37] K Punitharani, N Murugan, S M Sivagami, Finite element analysis of residual stresses and distortion in hard faced gate valve, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 69, pp. 129-134, 2010.
- [38] <u>http://www.premiumsteel.co.uk/images/filedownloa</u> ds /datasheets/BD3.pdf
- [39] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9153
- [40] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6116

10.22060/ mej.2017. 11875.5205

- [29] G. Bharath Reddy,G.Naveen Kumar, K. Chandrashekar, Experimental Investigation on Process Performance of Powder Mixed Electric Discharge Machining of AISI D3 steel and EN-31 steel, *International Journal of Current Engineering* and Technology, Vol.4, No.3, pp. 1218-1222, 2014.
- [30] Z. M. Khoshhesab, M. Sarfaraz, M. A. Asadabad, "Preparation of ZnO Nanostructures by Chemical Precipitation Method, *Taylor & Francis*, Vol 41, No.7, PP. 814-819, 2011.
- [31] Ji R, Liu Y, Diao R, Xu C, Li X. Influence of Electrical Resistivity and Machining Parameters on Electrical Discharge Machining Performance of Engineering Ceramics. *PLoS ONE*, Vol. 9, No.11: e110775. 2014, doi:10.1371/journal.pone.0110775.
- [32] G. Bharath Reddy,G.Naveen Kumar, K. Chandrashekar, Experimental Investigation on Process Performance of Powder Mixed Electric Discharge Machining of AISI D3 steel and EN-31 steel, *International Journal of Current Engineering* and Technology, Vol.4, No.3, pp. 1218-1222, 2014.
- [33] K.K. Choudhary, Analysis of temperature-dependent electrical resistivity of ZnO nano-structures, *Journal*