

## آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر نرخ براده برداری و زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی

**چکیده:** مهم ترین هدف صنعت گران، به حداکثر رساندن نرخ براده برداری در حین کنترل کیفیت سطح می باشد. در این مقاله با توجه به معادله رگرسیون به دست آمده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، به بررسی میزان و نحوه تأثیرگذاری هفت پارامتر فرآیند شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب بر دو مشخصه نرخ براده برداری و زبری سطح با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخته شده است. هدف از این تحقیق، انتخاب بهینه ترین پارامتر در فرآیند ماشین کاری به منظور افزایش نرخ براده برداری و کاهش زبری سطح می باشد. طبق نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت سوبل مشاهده می شود که فاکتور زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس هر یک به ترتیب با ۵۹٪ و ۲۸٪ تأثیر، اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب هر یک به ترتیب با ۸۱٪ و ۱۸٪ تأثیر، اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می باشند.

**واژه های راهنما:** ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی، زبری سطح، نرخ براده برداری، آنالیز حساسیت، سوبل

حامد فرجی

دانشجوی کارشناسی ارشد

معین طاهری\*

دانشیار،

گروه مهندسی ساخت و تولید،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

Hamed Faraji  
MSc Student

Moein Taheri\*  
Associate Professor,  
Manufacturing  
Engineering, Faculty  
of Engineering,  
Arak University,  
Arak

## Sensitivity analysis of the effective parameters on the material removal rate and surface roughness in the wire electrical discharge machining process

**Abstract:** The most important goal of the craftsmen is to maximize the material removal rate while controlling the surface quality. In this article, according to the regression equation obtained from the design of the experiment using the response surface method, to investigate the extent and manner of influence of seven process parameters including, pulse on time, pulse off time, arc off time, gap voltage, wire feeding rate, wire tension and water pressure has been studied on two characteristics of material removal rate and surface roughness using Sobol sensitivity analysis method. The purpose of this research is to select the most optimal parameter in the machining process in order to increase the material removal rate and reduce the surface roughness. According to the results obtained from the sensitivity analysis, it can be seen that the factor of pulse on time and pulse off time each have an effect of 59% and 28%, respectively, the most effective parameters on the material removal rate, and the parameters of pulse on time and water pressure, respectively, with 81% and 18% influence are the most effective parameters on surface roughness.

**Keywords:** Wire electrical discharge machining, Surface roughness, Material removal rate, Sensitivity analysis, Sobol

## ۱- مقدمه

نوین مانند روش ماشین کاری الکتروشیمیایی<sup>۱</sup> مشکلاتی را سر راه مصرف‌کنندگان قرار داده است. افزایش زبری سطح هم‌زمان با افزایش جریان، طولانی بودن زمان ماشین کاری مخصوصاً در حالت پرداخت کاری و مشکلات دیگر مانع توسعه سریع این روش شده است. استفاده از دی‌الکتریک‌های مخلوط شده با پودرهای خاص در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی باعث افزایش چشم‌گیری در راندمان این نوع ماشین کاری و رفع معایب آن می‌شود [۵]. یک واقعیت شناخته‌شده این است که نرخ براده‌برداری بالا و یک سطح بسیار صاف و بی‌نقص هرگز نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی حاصل شود.

انتخاب پارامترهای ماشین کاری بهینه‌شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک موضوع مهم است. پارامترهای نادرست انتخاب‌شده ممکن است منجر به مشکلات جدی مانند اتصال کوتاه سیم، شکستگی سیم و آسیب به سطح قطعه کار شود که محدودیت‌های خاصی را به برنامه تولید اعمال می‌کند و در نهایت باعث کاهش بهره‌وری در تولید می‌شود [۶].

از آنجایی که نرخ براده‌برداری و زبری سطح، مهم‌ترین پارامترهای خروجی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی هستند؛ تحقیقات مختلفی توسط محققان مختلف در سراسر جهان برای بهبود میزان نرخ براده‌برداری و زبری سطح صورت گرفته که در ادامه به شرح مختصری از آن‌ها پرداخته شده است.

کبلوتی و همکاران [۷] به انجام مطالعه‌ای جهت بررسی اثر پارامترهای ورودی برش بر روی ارتعاش ابزار، نرخ براده برداری و زبری سطح پرداختند. جنس انتخابی آن‌ها فولاد AISI 4140 بوده و طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ صورت گرفته است. نتایج آن‌ها بیانگر این موضوع بوده است که نرخ پیشروی بر روی زبری سطح اثرگذار است.

برغم‌دی و همکاران [۸] با استفاده از روش سطح پاسخ<sup>۷</sup> و طراحی مرکب مرکزی<sup>۸</sup> به بررسی تأثیر پارامترهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار، بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی فولاد ایمپلنت زنگ نزن 316L ماشین کاری شده طی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان

ماشین کاری تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> یکی از اولین فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی برای برش مواد سخت و رسانا است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی<sup>۲</sup> شکل خاصی از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی می‌باشد که در آن الکتروود یک سیم رسانا و در حال حرکت مداوم است. الکتروود استفاده‌شده در این فرآیند، سیم‌هایی از جنس مس، برنج یا تنگستن می‌باشند. قطر این سیم‌ها از ۰/۰۵ تا ۰/۳ و همچنین فاصله بین ابزار و قطعه کار از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر متغیر می‌باشد که با سرعت قابل تنظیم از شکاف برش عبور می‌کند [۱].

از آنجایی که قطعات با اشکال پیچیده‌تر و جدیدتری در چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند، فرآیندهای ماشین کاری سنتی با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده‌اند. همچنین افزایش استفاده از ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی در تولید، از زمان اولین کاربرد صنعتی آن در بیش از ۳۰ سال پیش، با سرعت بسیار بالایی در حال رشد بوده است [۲].

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی بر اساس انرژی ترموالکتریک<sup>۳</sup> بین قطعه کار و یک الکتروود کار می‌کند. اساس کار براده‌برداری در این فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی است، به‌طوری‌که حرارت بسیار زیاد تولیدشده سبب ذوب و تبخیر مقادیر بسیار کوچکی از قطعه می‌شود. مواد ذوب یا تبخیر شده از الکتروود جدا شده و سپس توسط دی‌الکتریک شسته می‌شوند [۳].

از جمله کاربردهای مختلف فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی می‌توان به تولید حفره‌های پیچیده در قالب‌ها اشاره کرد؛ که ساخت آن‌ها با استفاده از فرآیند ماشین کاری معمولی دشوار است. همچنین از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی به شکل گسترده‌ای در بخش‌های هوافضا، صنعت خودرو و اجزای جراحی استفاده می‌شود [۴].

علاوه بر این که امروزه ماشین کاری تخلیه الکتریکی در صنعت، کاربردهای فراوانی پیدا کرده است، اما زبری سطوح<sup>۴</sup> قطعاتی که با این روش ماشین کاری می‌شوند و همچنین نرخ براده برداری<sup>۵</sup> کم آن نسبت به سایر روش‌های ماشین کاری

<sup>۱</sup> Electro discharge machining (EDM)<sup>۲</sup> Wire electrical discharge machining (WEDM)<sup>۳</sup> Thermoelectric<sup>۴</sup> Surface roughness ( $R_a$ )<sup>۵</sup> Material removal rate (MRR)<sup>۷</sup> Electrochemical machining<sup>۸</sup> Surface response methodology<sup>۹</sup> Central composite design

تأثیر بسیار زیادی بر زبری سطح دارند، درحالی که زمان روشنی پالس و جریان تأثیر قابل توجهی بر نرخ براده برداری دارند و همچنین مشاهده شده است که تغذیه سیم و برهم کنش بین جریان و زمان خاموشی پالس تأثیر قابل توجهی بر نرخ مصرف سیم داشته است.

نگوین و همکاران [۱۱] اثر ارتعاش فرکانس پایین متصل به قطعه کار از جنس SKD61 را به منظور بهبود نرخ براده برداری و زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مطالعه کرده‌اند. اثر پارامترهای فرآیند شامل جریان پالس، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و فرکانس ارتعاش بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح توسط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر بهینه شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از مسئله چندهدفه مبتنی بر TOPSIS انجام شده است. نتایج تجربی نشان داده است، که دقت عملکرد در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاش فرکانس پایین به ۸۶/۶ درصد افزایش یافته است.

سیف و روات [۱۲] فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی را برای فولاد AA6061 بررسی کرده‌اند تا متغیرهای مختلف فرآیند، از جمله زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان اوج را برای دستیابی به میزان نرخ براده برداری و زبری سطح بالا و مناسب بهینه کنند. ماتریس L18 تاگوچی، نسبت ANOVA, S/N و تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری برای بهینه سازی زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که زمان روشنی پالس و جریان اوج بیشترین تأثیر را برای نرخ براده برداری و زبری سطح با مشارکت به ترتیب ۱۳/۳۳ و ۱۶/۲۵ درصد دارند.

چاوداری و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی از جمله زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، غلظت نانو پودر آلومینا بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته‌اند. مقادیر پارامترهای خروجی بهینه با استفاده از رویکرد L9 سه سطحی تاگوچی پیش‌بینی و با آزمایش‌های ترکیبی تأیید شده‌اند. روش تحلیل واریانس برای تأیید مجدد اهمیت و کفایت مدل رگرسیون به دست آمده اجرا شده است. قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه از جنس آلیاژ حافظه دار بوده است. آن‌ها در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با افزودن نانو پودر آلومینا به سیال دی‌الکتریک قابلیت ماشین کاری را افزایش داده‌اند. طبق نتایج به دست آمده مشاهده شده است که نانو پودر آلومینا با ۷۶/۱۳ درصد بیشترین اثر را بر نرخ براده برداری داشته است. همچنین زمان روشنی پالس با ۹۱/۸۸ درصد، بیشترین تأثیر را

می‌دهند که نیروی برنیشینگ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. به طوری که پس از نیروی برنیشینگ، تعداد عبور ابزار و سرعت پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. همچنین ترکیب نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار نیز بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است.

اسکوئیان و همکاران [۹] به بررسی اثر استفاده از دو نانوذره اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به صورت هم‌زمان با دی‌الکتریک در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم V-6Al-Ti4 پرداخته‌اند. پس از بررسی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک نانوذرات، پارامترهای شدت جریان، غلظت، زمان روشنی پالس و ترکیب نسبی ذرات به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. اثر هر یک از این پارامترها در سه سطح، بر نرخ براده برداری، سایش نسبی ابزار و صافی سطح نهایی قطعه بررسی شده است. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داده است که هرچقدر ترکیب نانو ذرات اکسید آلومینیوم تا یک اندازه مشخص بیشتر شود، به همان نسبت نرخ براده برداری هم در جریان بالاتر افزایش می‌یابد. با افزایش شدت جریان تا ۱۲ آمپر در زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه، انرژی زیاد تخلیه الکتریکی تأثیر محسوسی برافزایش سایش ابزار با ترکیب نسبی ۷۵٪ از نانو ذرات نداشته است و می‌توان به نرخ براده برداری بالا و حداقل سایش ابزار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی دست یافت.

راماسوامی و همکاران [۱۰] به پیش‌بینی مجموعه بهینه پارامترهای فرآیند مانند جریان، زمان روشن/خاموش پالس، کشش سیم و تغذیه سیم برای دستیابی به حداقل زبری سطح و نرخ مصرف سیم و حداکثر نرخ براده برداری پرداخته‌اند. آزمایش‌ها با تخلیه‌های پالس تولیدشده بین سیم برنجی و قطعه نمونه (فولاد قالب D3) معلق در آب، به عنوان دی‌الکتریک انجام شده است. آزمایش‌ها بر اساس پنج عامل و پنج سطح آن با استفاده از طرح مرکب مرکزی فاکتوریل کامل بر اساس روش سطح پاسخ طراحی شده‌اند. نتایج آزمایش توسط نرم افزار MINITAB به صورت تحلیلی و گرافیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل رگرسیون مرتبه دوم برای پیش‌بینی زبری سطح، نرخ مصرف سیم و نرخ براده برداری از نظر پارامترهای ماشین کاری تعاملی و برای مرتبه‌های بالاتر از طریق روش سطح پاسخ توسعه داده شده است. نتایج نشان داده‌اند که کشش سیم، جریان و برهم کنش‌های میان آن‌ها

بر زبری سطح داشته است.

چاوداری و همکاران [۱۴] با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی به بررسی تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان و غلظت پودر نانو گرافن بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری پرداخته‌اند. در تحقیقات آن‌ها، آرایه متعامد L16 برای انجام آزمایش‌ها اجرا شده است. آن‌ها به کمک روش تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA)، سطوح بهینه پارامترهای ورودی را به منظور به کاهش زبری سطح و افزایش نرخ براده برداری تعیین کرده‌اند. همچنین الگوریتم جستجوی انتقال حرارت (HTS) برای به دست آوردن ترکیب بهینه پارامترهای ورودی برای خروجی‌های زبری سطح و نرخ براده برداری اجرا شده است. نتایج بهینه‌سازی، حداکثر مقدار  $1/55 \text{ mm}^3/\text{s}$  را برای نرخ براده برداری و حداقل مقدار  $2/68$  میکرومتر را برای زبری سطح نشان داده است.

نواز و همکاران [۱۵] با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی به بررسی تأثیر عوامل مختلف ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی با سرعت بالا (HS-WEDM) بر ویژگی‌های ماشین‌کاری مانند نرخ براده برداری، عرض شکاف و زبری سطح فولاد دای DC53 پرداخته‌اند. عواملی مانند زمان روشن شدن پالس، شدت جریان، زمان خاموش شدن پالس و سرعت سیم انتخاب شده‌اند. آرایه متعامد تاگوچی L27 برای آزمایش انتخاب شده است. از آنالیز واریانس (ANOVA) برای یافتن فاکتور مهم در هر مشخصه ماشین‌کاری استفاده شده، در حالی که از تحلیل میانگین (ANOM) نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای یافتن مقدار بهینه عوامل برای بهبود هر مشخصه ماشین‌کاری استفاده شده است. در انتها نتایج نشان داده است که شدت جریان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر نرخ براده برداری و زبری سطح است، در حالی که زمان روشنی پالس مهم‌ترین عامل مؤثر بر عرض شکاف است.

آلدین راج و همکاران [۱۶] با اجرای طرح آزمایش‌های سطح پاسخ دربرش بهینه برای فولاد پر منگنز (AST A128) با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری الکتریکی سیمی، اثر پارامترهای مختلف مانند تغذیه سیم، جریان اوج، ولتاژ مدار باز و زمان خاموشی پالس را بر نرخ براده برداری، سختی و زبری سطح بررسی نموده‌اند. از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای چیدمان پارامترهای ورودی استفاده شده است. بررسی دقیق آنالیز واریانس نشان داده که پارامتر جریان اوج مهم‌ترین عامل تأثیرگذار فرآیند برای پارامترهای نرخ براده برداری و زبری سطح است. ولتاژ مدار باز و تغذیه سیم اصلی‌ترین عوامل مؤثر فرآیند بر سختی هستند. نتایج آزمون تأیید نشان داده که

مدل‌های ریاضی توسعه یافته با دقت کافی خوب بوده‌اند. نارش و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل پیش‌بینی شده سیستم استنتاج فازی عصبی مصنوعی (ANFIS) رابطه بین پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را گزارش داده‌اند. آن‌ها به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی از جمله، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، ولتاژ شکاف، جریان اوج بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داده است که مقادیر پیش‌بینی شده ویژگی‌های پارامترهای خروجی مطابقت خوبی با مقادیر واقعی دارد. ضریب همبستگی (R) برای هر دو پارامتر نرخ براده برداری و زبری سطح تقریباً  $0/9945$  بود که تقریباً برابر با یک است و ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین خطا ( $\%$ ) ایجاد شده برای زبری سطح به ترتیب  $0/9891$  و  $2/04$  بود در حالی که برای نرخ براده برداری، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین خطا ( $\%$ ) به ترتیب  $0/9738$  و  $1/70$  درصد بوده است.

ولینگیری و همکاران [۱۸] با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، به بررسی اثر پارامترهای مهم ماشین‌کاری مانند، زمان روشنی پالس، زمان خاموش شدن پالس و جریان ورودی که بر معیارهای عملکرد از جمله زبری سطح و نرخ براده برداری تأثیر می‌گذارند، پرداخته‌اند. در مرحله اول آلیاژ آلومینیوم LM13 و کامپوزیت‌های LM13/SiC با فرآیند ریخته‌گری تحت فشار تحت شرایط پارامتریک بهینه برای دست‌یابی به سختی و استحکام کششی بهتر ساخته شده است. در مرحله دوم، به مطالعه ماشین‌کاری آلیاژ LM13 و کامپوزیت‌های LM13/SiC از طریق تکنیک‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است. مقادیر پارامترهای خروجی بهینه با استفاده از روش تاگوچی پیش‌بینی شده‌اند.

آنالیز حساسیت، روشی است که برای شناسایی پارامترهای ورودی مؤثر و غیر مؤثر بر پارامترهای خروجی یک مدل استفاده می‌شود و همچنین بررسی نتایج باعث افزایش دقت نتایج می‌شود. یکی از اهداف آنالیز حساسیت تأیید و بررسی کدهای کامپیوتری است. با آنالیز حساسیت می‌توان عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی کرد [۱۹].

بررسی تحقیقات انجام شده در گذشته نشان از عدم بررسی دقیق و کمی پارامترهای مؤثر بر فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی به‌ویژه با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت آماری دارد. آنالیز حساسیت موجب فهم عمیق‌تری از مدل در راستای کاهش عدم قطعیت در خروجی مدل می‌شود. در این

روش سطح پاسخ بر پایه طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طراحی آزمایش‌ها به‌عنوان ابزاری به‌منظور رفع عیوب، صرفه‌جویی در وقت و هزینه به کمک مهندسان آمده، همچنین استفاده به‌موقع از طراحی آزمایش‌ها موجب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها می‌شود. فرم کلی معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم با توجه به متغیرها به‌صورت رابطه (۱) می‌باشد [۲۱]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

در معادله (۱) ثابت‌های  $\beta$  پارامترهای ناشناخته یا ضرایب رگرسیون، همچنین  $x_i$  و  $x_j$  پارامترهای ورودی یا مستقل می‌باشند. مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق که از طریق بررسی تحقیقات انتخاب شده‌اند در جدول (۱) ذکر شده‌اند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده از مرجع [۲۲] مدل نرخ براده‌برداری و زبری سطح به‌صورت کد<sup>۲</sup> شده برحسب متغیرهای ورودی ماشین‌کاری به‌صورت روابط (۲) و (۳) به شرح زیر می‌باشند.

$$MRR = 0.31376 + (4.69889 \times 10^{-1} \times A) - (7.92525 \times 10^{-3} \times B) - (2.38186 \times 10^{-3} \times C) - (3.89559 \times 10^{-3} \times D) + (2.21461 \times 10^{-3} \times G) \quad (2)$$

$$Ra = -1.05897 + (4.40811 \times A) + (4.80613 \times 10^{-2} \times G) \quad (3)$$

جدول ۱ مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای ورودی

واحد	سطح			ضرایب ورودی فرآیند
	۳	۲	۱	
A: زمان روشن‌پالسی μs	-	۰/۵	۰/۴	
B: زمان خاموشی پالسی μs	۱۶	۱۴	۱۲	
C: زمان قطع قوس μs	۱۶	۱۴	۱۲	
D: ولتاژ گپ V	۴۶	۴۴	۴۲	
E: نرخ تغذیه سیم m/min	۱۰/۸	۹/۶	۸/۴	
F: کشش سیم gf	۱۷۶۷/۶۶	۱۶۲۰	۱۴۷۳/۳۳	
G: فشار آب bar	۱۵/۰۰	۱۲/۸۵	۱۰/۷۰	

پژوهش ابتدا به بررسی کلی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و تشریح روش‌های مختلف آنالیز حساسیت پرداخته شده است. سپس برای نخستین بار به بررسی پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی شامل زمان روشن‌پالسی، زمان خاموشی پالسی، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای خروجی نرخ براده‌برداری و زبری سطح به روش آنالیز حساسیت سوپل پرداخته شده است.

## ۲- مدل‌سازی

در این تحقیق مدل‌سازی به دو بخش تقسیم شده است. در بخش ابتدایی به‌طور مختصر به ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. سپس آنالیز حساسیت و دسته‌بندی کلی روش‌های کلی آن شامل روش غربال کردن، روش آنالیز حساسیت محلی و روش آنالیز حساسیت جامع به شکل مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز مسئله به بررسی تأثیر متقابل بین پارامترهای ورودی پرداخته شده است. بعد از آن با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل به شناسایی پارامترهای مؤثر و غیر مؤثر بر خروجی مدل پرداخته شده است.

### ۲-۱- ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک روش ماشین‌کاری غیر سنتی می‌باشد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یک فرآیند تخصصی ماشین‌کاری حرارتی است که قادر به ماشین‌کاری دقیق قطعاتی است که دارای درجه سختی‌های مختلف، شکل‌های پیچیده و لبه‌های تیز هستند که توسط فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی بسیار دشوار می‌باشند. نرخ براده‌برداری و زبری سطح از خروجی‌های مهم در طی این فرآیند می‌باشند.

### ۲-۲- معادله رگرسیون نرخ براده‌برداری و زبری سطح

روش سطح پاسخ از جمله روش‌های آماری و ریاضی می‌باشد که به‌منظور مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ خروجی تحت تأثیر چندین متغیر ورودی قرار گرفته، استفاده می‌شود که هدف نهایی این روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ‌ها است [۲۰].

## ۳-۲- بررسی روش‌های آنالیز حساسیت

درک رفتار مدل و تجزیه روابط ورودی‌ها و خروجی‌ها و تعیین پارامترهای حساس

ساده‌سازی مدل کامپیوتری و معادلات (کاهش ابعاد)

کاربرد در شناسایی خواص

مقایسه نتایج

روش سوبل برای مدل تعریف‌شده با تابع  $Y = F(X)$  که  $Y$  خروجی مدل و  $X(X_1 X_2 \dots X_n)$  بردار پارامترهای ورودی می‌باشد و واریانس خروجی مدل ( $V$ ) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه‌شده به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1-n} \quad (4)$$

که در آن،  $V_i$  تأثیر مرتبه اول برای هر فاکتور ورودی ( $V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - x_i(V_i = V[E(Y|x_i)])$ ) تا  $V_{1..n}$  برهمکنش بین  $n$  فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند  $S_i = \frac{V_i}{V}$  شاخص حساسیت مرتبه اول،  $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$  شاخص حساسیت مرتبه دوم و...). شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (5)$$

روابط سوبل در مرجع [۲۴] به طور کامل ارائه شده است.

## ۴-۲- الگوریتم کلی فرآیند آنالیز حساسیت

در این پژوهش پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند همچنین پارامترهای خروجی شامل نرخ براده برداری و زبری سطح هستند. شکل (۱) الگوریتم کلی آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، ابتدا باید پارامترهای ورودی انتخاب شوند. سپس دامنه تغییرات پارامترهای ورودی انتخاب شوند که این دامنه تغییرات در شکل مشخص شده است.

از روش آنالیز حساسیت به منظور بررسی و تعیین میزان تأثیرگذاری متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی سیستم‌ها استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت به منظور ساده‌سازی و افزایش میزان اعتماد به مدل و ارائه ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های آن استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت را می‌توان به چند بخش طبقه‌بندی کرد که برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری و همچنین از نظر روش‌های مختلف آن به سه بخش غربال کردن، روش آنالیز حساسیت محلی و روش آنالیز حساسیت جامع طبقه‌بندی می‌شوند.

روش غربال کردن: روش غربال کردن، برای مدل‌هایی که تعداد زیادی فاکتور ورودی و محاسبات گران دارند، مفید می‌باشد و از این روش جهت شناسایی اثرگذارترین فاکتورهای ورودی بر روی خروجی‌ها استفاده می‌شود.

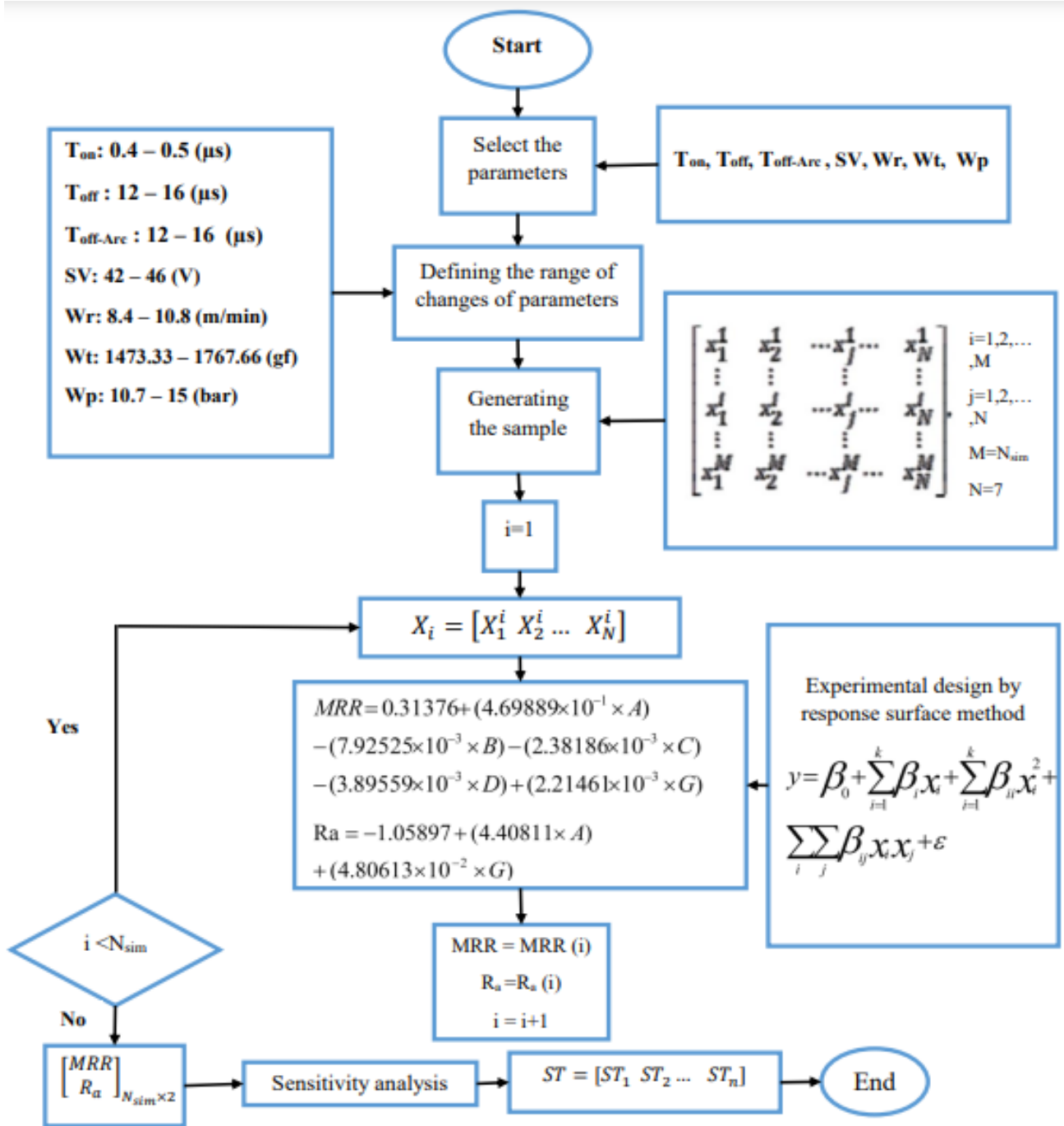
روش آنالیز حساسیت محلی: این روش، بیشتر با محوریت فاکتورهای مدل می‌باشد. این روش محاسباتی مشتق شده از توابع خروجی با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی می‌باشد که به وسیله روش‌های محاسبات عددی انجام می‌گیرد. روش‌های آنالیز حساسیت محلی، در مواقعی که هدف استخراج سهم ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها است، کمتر استفاده می‌شوند.

آنالیز حساسیت جامع (عمومی): خروجی غیرشخصی را با عامل‌های ورودی آن سهم‌بندی می‌کند و انواع توابع توزیع که پوشش می‌دهد، رنج قابل قبول فاکتورها را بیان می‌کند.

روش‌های اولیه آنالیز حساسیت مربوط به روش‌های محلی می‌باشد. این روش مبتنی بر محاسبه مشتقات جزئی مدل در یک نقطه معین است. به دلیل محدودیت‌های این روش گروه جدیدی به نام آنالیز حساسیت جامع توسعه داده شد. چون تمام بازه تغییرات متغیرهای ورودی را در نظر می‌گیرد. روش‌های آنالیز حساسیت واریانس محور شامل دو روش فست<sup>۱</sup> و سوبل هستند که شاخص‌های اصلی در این روش نشان‌دهنده اثر جزئی و کلی پارامترهای ورودی بر روی واریانس خروجی هستند. روش سوبل، یک روش آنالیز حساسیت جامع یا عمومی می‌باشد که بر پایه تجزیه و تحلیل واریانس است که واریانس در خروجی مدل را به هریک از پارامترهای ورودی و اثر متقابل پارامترها ربط می‌دهد [۲۳].

اهداف اصلی آنالیز حساسیت به شرح زیر می‌باشند:

<sup>1</sup> Fast



شکل ۱ الگوریتم کلی برای آنالیز حساسیت

کمک طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ به دست آمده است، که در بخش‌های قبل راجع به آن توضیح داده شد. مقدار پارامترهای خروجی در نرم‌افزار متلب آ صورت می‌پذیرد و مجدداً نرم‌افزار سیملب با استفاده از روش سوبل به تولید اندیس‌های حساسیت می‌پردازد و آنالیز حساسیت به پایان می‌رسد.

سپس دامنه تغییرات پارامترهای ورودی انتخاب شوند که این دامنه تغییرات در شکل مشخص شده است. پس از انتخاب دامنه پارامترهای ورودی، نرم‌افزار سیملب<sup>۱</sup> به تولید نمونه‌ها می‌پردازد و پس از تولید نمونه، پارامترهای خروجی با توجه به معادله رگرسیون کد شده تولید خواهند شد. معادله رگرسیون موجود، از مدل‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به

<sup>۱</sup>Matlab

<sup>۱</sup>Simlab

شکل (۲-ب) تأثیر زمان خاموشی پالس بر میزان نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان خاموشی پالس، میزان نرخ براده برداری به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که به دلیل کاهش تعداد جرقه‌ها در زمان مشخص که به نوبه خود، اندازه دهانه‌های تشکیل شده روی سطح ماشین‌کاری شده را کاهش می‌دهد، منجر به کاهش نرخ براده برداری می‌شود. از طرفی باید به این نکته توجه داشت که کم کردن بیش‌ازحد زمان خاموشی پالس باعث می‌شود تا زمان کافی به دی یونیزه شدن دی‌الکتریک داده نشود و شرایط پس از اسپارک اول برای اسپارک بعدی آماده نگردد و منجر به جرقه ناخواسته گردد که این امر هم سبب ناپایداری فرآیند ماشین‌کاری می‌شود [۲۵].

پارامتر تأثیرگذار بعدی، میزان فشار آب بر نرخ براده برداری است. شکل (۲-پ) نیز بیانگر این موضوع است که با افزایش فشار آب، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. توضیح این نکته ضروری است که این تأثیر بسیار اندک و ناچیز می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که افزایش سرعت تغذیه معمولاً منجر به افزایش سرعت انرژی گرمایی و سرعت ذوب و تبخیر می‌شود؛ بنابراین افزایش فشار آب برای کاهش تمایل قوس و همچنین غلبه بر مشکل افزایش تعداد حباب‌های گاز و حجم بیشتر مذاب بسیار ضروری است.

در شکل (۲-ت) تأثیر پارامتر ولتاژ گپ بر نرخ براده برداری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ولتاژ، میزان نرخ براده برداری به صورت نسبتاً خطی کاهش خواهد یافت. دلیل آن این است که با افزایش ولتاژ گپ، شکاف جرقه‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین شدت جرقه را کاهش می‌دهد که منجر به کاهش نرخ براده برداری می‌شود. در نتیجه مواد کمتری ذوب می‌شوند و براده برداری کمتری صورت می‌گیرد [۲۶] بیان این نکته مهم است که به‌طور کلی همان‌طور که در تحلیل نمودار مشخص است، تغییرات ولتاژ گپ ممکن است در مشخصه‌های ماشین‌کاری اثر قابل توجهی نداشته باشد.

شکل (۲-ث) تأثیر ناچیز پارامتر زمان قطع قوس بر روی میزان نرخ براده برداری را نشان می‌دهد که با افزایش زمان قطع قوس، نرخ براده برداری با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد اما این کاهش چشم‌گیر نیست و می‌توان آن را به‌عنوان پارامتر غیرحساس در نظر گرفت.

تأثیر پارامتر ورودی نرخ تغذیه سیم بر نرخ براده برداری در شکل (۲-ج) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، تغییرات بسیار

### ۳- آنالیز حساسیت پارامترها

هدف اصلی آنالیز حساسیت بررسی تأثیر متغیرهای مستقل در یک بازه مشخص بر پاسخ‌های سیستم است. آنالیز حساسیت به منظور بهینه‌سازی پارامترهای اثرگذار و حذف پارامترهای غیرضروری می‌باشد. در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت، پرداخته و تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری و زبری سطح بررسی شده است. دو نکته کلیدی این است که زبری سطح پایین و راندمان پردازش بالا باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند؛ بنابراین، باید به بررسی آنالیز حساسیت پرداخت. نرخ براده برداری و زبری سطح به‌عنوان دو هدف در نظر گرفته می‌شوند.

شکل‌های (۲) و (۳) پراکندگی نقاط نرخ براده برداری و زبری سطح با تغییرات هم‌زمان هفت پارامتر ورودی، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب را نشان می‌دهد.

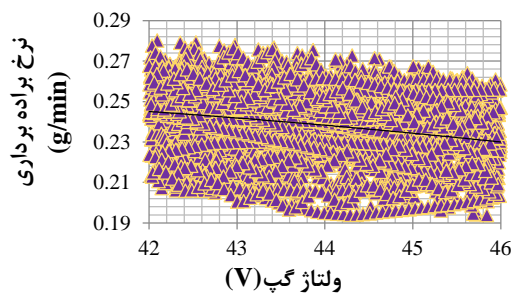
#### ۳-۱- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر نرخ براده برداری

شکل (۲) تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر نرخ براده برداری را نشان می‌دهد. اثرات فاکتورهای ورودی به صورت کیفی مشخص شده است.

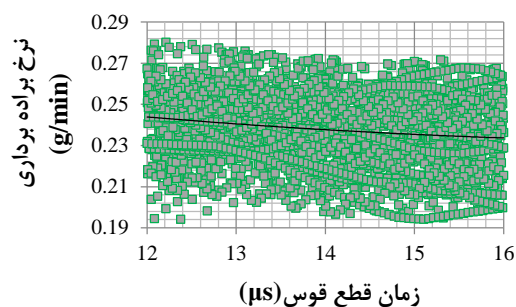
مطابق شکل (۲-الف) با افزایش زمان روشنی پالس، میزان نرخ براده برداری افزایش می‌یابد دلیل این مسئله را این‌طور می‌توان توضیح داد که بعد از تشکیل کانال پلاسما، پدیده ذوب و تأخیر در محل اتصال کانال پلاسما به الکترودها حادث می‌شود. در این هنگام، در اثر افت شدید فشار در داخل کانال بخار، جوشش حجمی در چاله مذاب فوق داغ اتفاق می‌افتد و در نتیجه بخشی از مواد مذاب به خاطر انفجار ناشی از این پدیده، به خارج چاله مذاب پرتاب می‌شود. تکرار پدیده‌های فوق باعث براده برداری در مقیاس ریز به ازای هر جرقه از سطح الکتروود و قطعه کار می‌شود. هرچه انرژی جرقه‌ها بیشتر باشد، نرخ ذوب، تبخیر و پرتاب مواد به خارج از حوضچه مذاب در اثر پدیده جوشش حجمی و در نتیجه سرعت براده برداری افزایش می‌یابد. انرژی هر جرقه با توجه به مفهوم الکتریکی آن تابعی از شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس و ولتاژ جرقه است؛ بنابراین هرچه مقادیر این پارامترها افزایش یابد، نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد [۲۵].



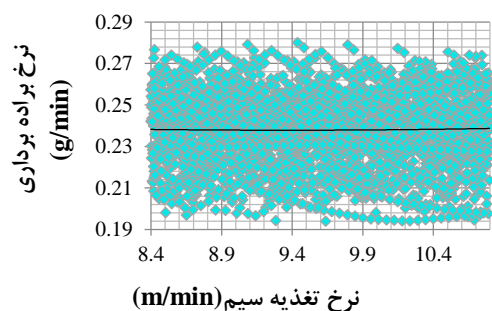
ناچیز نرخ براده برداری در اثر افزایش یا کاهش نرخ تغذیه سیم مشاهده می‌شود که این پارامتر ورودی قابل صرف نظر می‌باشد. اثر پارامتر کشش سیم بر روی نرخ براده برداری در شکل (۲-ج) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل، از تأثیر این پارامتر نیز مانند پارامترهای زمان قطع قوس و نرخ تغذیه سیم در طی فرآیند می‌توان صرف نظر نمود.



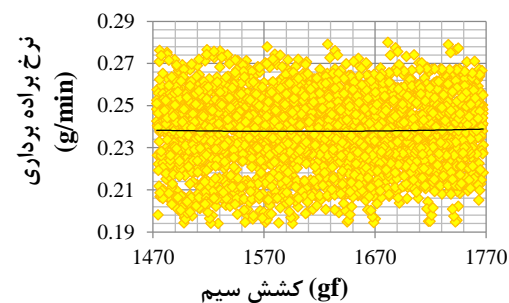
(ت) ولتاژ گپ



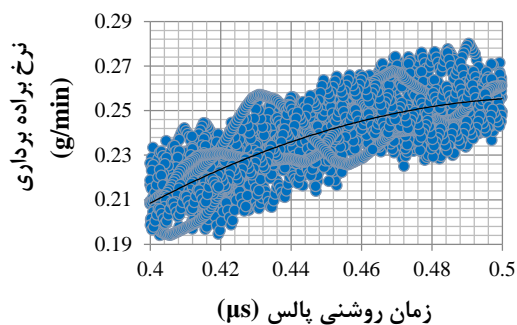
(ث) زمان قطع قوس



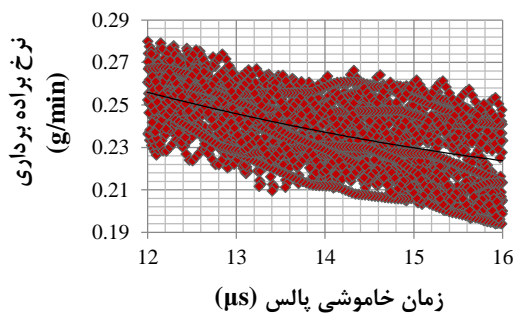
(ج) نرخ تغذیه سیم



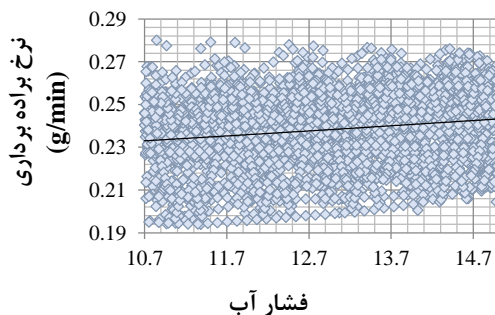
(چ) کشش سیم



(الف) زمان روشن پالس



(ب) زمان خاموشی پالس



(پ) فشار آب

شکل ۲ تأثیر فاکتورهای ورودی بر نرخ براده برداری

### ۳-۲- بررسی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر زبری سطح

شکل (۳) تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، فشار آب، ولتاژ گپ، زمان قطع قوس، نرخ تغذیه سیم و کشش سیم بر روی زبری سطح را نشان می‌دهد. اثرات فاکتورهای ورودی به صورت کیفی مشخص شده است.

با توجه به شکل (۳-الف) در صورتی که به بررسی مستقل اثر پارامتر زمان روشنی پالس بر زبری سطح پرداخته شود، نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس، زبری سطح به طور خطی و قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد زیرا انرژی تخلیه با افزایش زمان روشنی پالس افزایش می‌یابد. هرچه انرژی تخلیه بیشتر باشد، انفجار قوی‌تر و عمق و حجم دهانه ایجاد شده روی سطح ماشین‌کاری شده بیشتر می‌شود و در نتیجه سطح ناهموارتری ایجاد می‌شود. از این رو، برای به دست آوردن یک سطح با کیفیت مناسب از یک قطعه کار، زمان روشنی پالس باید تا حد امکان پایین باشد.

شکل (۳-ب) نشان می‌دهد که با افزایش میزان زمان خاموشی پالس، زبری سطح به طور نسبتاً خطی و با نرخ بسیار کم کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ ذوب پایین می‌آید و میزان ذوب پایین در مقادیر بالای زمان خاموشی پالس باعث کاهش زبری سطح می‌شود.

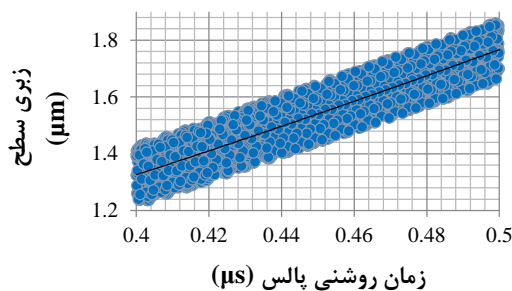
تأثیر پارامتر فشار آب بر روی زبری سطح نیز در شکل (۳-پ) قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش فشار آب منجر به افزایش چشم‌گیر و قابل ملاحظه زبری سطح می‌شود. از این تغییرات زیاد و چشم‌گیر می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر فشار آب همانند زمان روشنی پالس در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی، اثرگذارترین پارامتر بر خروجی زبری سطح می‌باشد.

شکل (۳-ت) نشان‌دهنده تأثیر پارامتر ورودی ولتاژ گپ بر روی زبری سطح می‌باشد. اثر این پارامتر بر روی زبری سطح، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تقریباً ثابت بوده و میزان تغییرات آن بسیار کم و ناچیز می‌باشد.

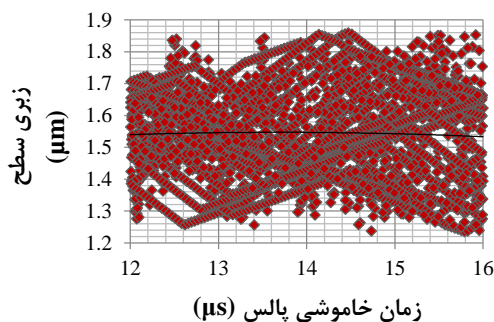
پارامتر بعدی که تأثیر آن بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است، زمان قطع قوس می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-ث) مشاهده می‌شود، زمان قطع قوس نیز همانند پارامتر ولتاژ گپ تأثیر مستقیم بر روی زبری سطح ندارد، یعنی با افزایش زمان قطع قوس، زبری سطح تغییر نمی‌کند.

پارامتر بعدی نرخ تغذیه سیم می‌باشد که تأثیر آن در شکل (۳-ج) آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده شده است، افزایش یا کاهش نرخ تغذیه سیم نیز بر روی تغییر میزان زبری سطح بی‌تأثیر می‌باشد.

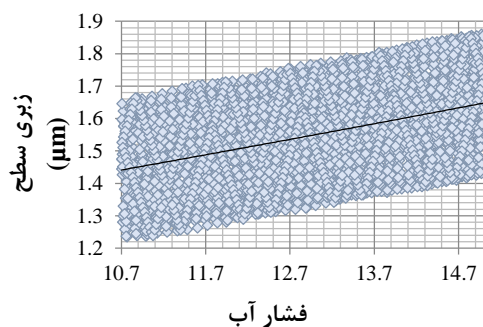
پارامتر آخری که تأثیر آن بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است، کشش سیم می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-چ) نیز قابل مشاهده است، می‌توان به تأثیر ناچیز کشش سیم بر روی زبری سطح پی برد.



الف) زمان روشنی پالس



ب) زمان خاموشی پالس



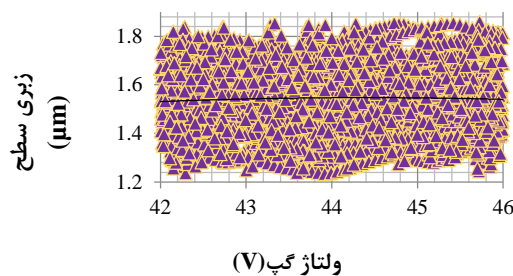
پ) فشار آب

### ۳-۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر نرخ براده برداری با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل

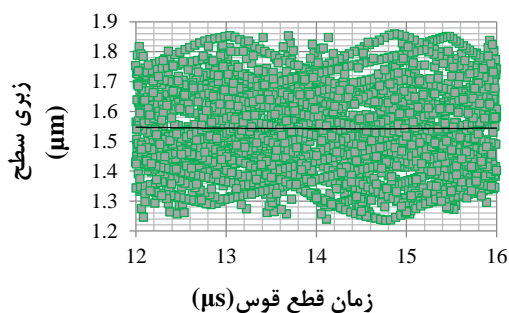
برتری روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، مشاهده تأثیر کمی و دقیق پارامترهای ورودی به‌طور هم‌زمان بر روی پارامترهای خروجی می‌باشد؛ بنابراین در این بخش از تحقیق، پس از بررسی اثرگذاری‌های کیفی نمودارهای گرافیکی به تحلیل و بررسی نمودارهای کمی پرداخته‌شده است تا به میزان دقیق تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی پرداخت. بررسی اثرگذاری کمی این امکان را فراهم می‌آورد تا با تغییر پارامترها به خروجی مناسب دست‌یافت. مطابق شکل (۴)، پارامترهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به ترتیب با ۵۹٪ و ۲۸٪ تأثیر، بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری دارند. همچنین پارامتر ورودی زمان روشنی پالس رابطه مستقیمی با پارامتر خروجی دارد و افزایش آن باعث افزایش میزان نرخ براده‌برداری می‌شود. ولتاژ گپ، زمان قطع قوس و فشار آب هرکدام به ترتیب با ۷٪، ۳٪ و ۳٪ تأثیر در مراتب بعدی به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ براده‌برداری خواهند بود. نتایج شکل (۴) نشان‌دهنده تأثیر ناچیز نرخ تغذیه سیم و کشش سیم بر نرخ براده‌برداری با میزان هرکدام ۰٪ می‌باشند، یعنی با افزایش یا کاهش دو پارامتر نرخ تغذیه و کشش سیم، تغییری در میزان خروجی نرخ براده‌برداری رخ نمی‌دهد.

### ۳-۴- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر زبری سطح با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل

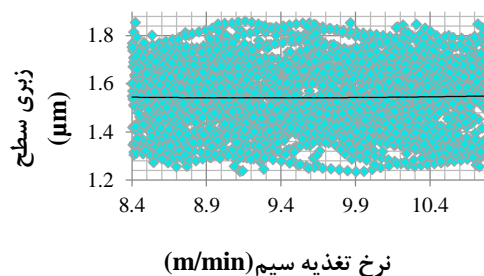
در شکل (۵) به مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر زبری سطح فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته‌شده است. با توجه به شکل (۵)، پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب به ترتیب با ۸۱٪ و ۱۸٪ در جایگاه اول و دوم به‌عنوان اثرگذارترین پارامترها بر زبری سطح می‌باشند. پارامتر کشش سیم با تأثیر بسیار کمی به میزان ۱٪، به‌عنوان پارامتر اثرگذار بعدی به‌حساب می‌آید. هرچند این پارامتر در دسته پارامترهای غیرضروری در نظر گرفته‌شده است. نتایج شکل (۵) همچنین نشان‌دهنده تأثیر ناچیز پارامترهای زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم و زمان خاموشی قوس، بر سرعت برشی هرکدام با میزان



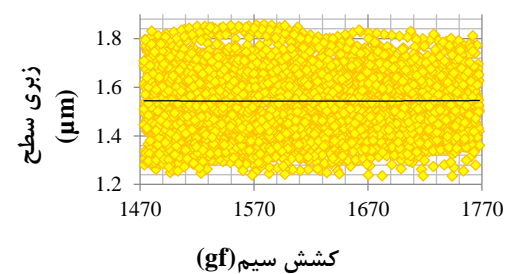
ت) ولتاژ گپ



ث) زمان قطع قوس



ج) نرخ تغذیه سیم



چ) کشش سیم

شکل ۳ تأثیر فاکتورهای ورودی بر زبری سطح

#### ۴- نتیجه گیری

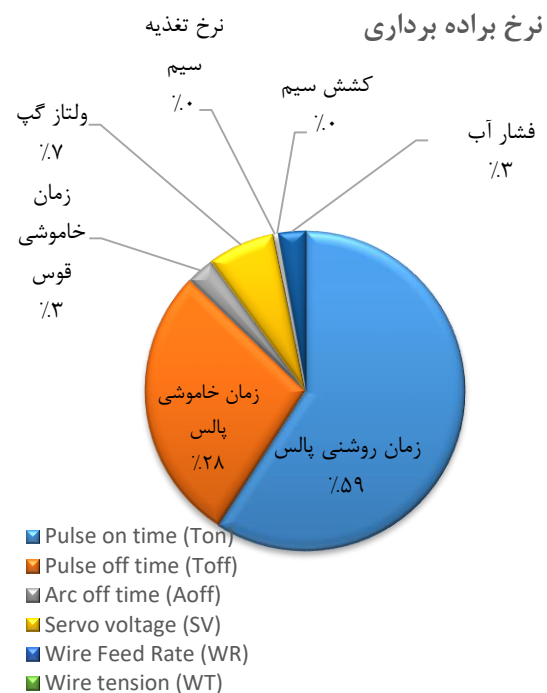
انتخاب پارامترهای بهینه برش نقش مهمی برای به دست آوردن سرعت برش بالاتر یا میزان نرخ براده برداری مناسب و کیفیت سطح خوب دارد.

روش آنالیز حساسیت میزان اثرگذاری فاکتورهای ورودی مناسب را به صورت کمی و کیفی ارائه می‌دهد. تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های پیشین به این صورت است که، در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل که از دقت بالایی نسبت به سایر روش‌های آماری آنالیز حساسیت برخوردار می‌باشد، برای اولین بار به بررسی تأثیر هفت پارامتر ورودی شامل، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، زمان قطع قوس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم، کشش سیم و فشار آب در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی پرداخته شده است. تاکنون تأثیر این هفت پارامتر بر روی این خروجی‌ها از طریق آنالیز حساسیت سوپل بررسی نشده است. در روش‌های گرافیکی، تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شوند ولی در روش سوپل تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کنند. بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله بیانگر این است که پارامترهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس اثرگذارترین فاکتور بر خروجی نرخ براده برداری می‌باشند که سهم تأثیر هرکدام از این پارامترها به ترتیب ۵۹٪ و ۲۸٪ می‌باشند. همچنین پارامترهای ولتاژ گپ، زمان خاموشی قوس، فشار آب، کشش سیم و نرخ تغذیه سیم تأثیر ناچیزی بر نرخ براده برداری دارند که سهم اثرگذاری هرکدام به ترتیب ۷٪، ۳٪، ۳٪، ۰٪ و ۰٪ می‌باشند. پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب به ترتیب اثرگذارترین فاکتور بر خروجی زبری سطح هستند که میزان تأثیر آن‌ها به ترتیب ۸۱٪ و ۱۸٪ می‌باشند. پارامترهای کشش سیم، زمان خاموشی پالس، ولتاژ گپ، نرخ تغذیه سیم و زمان خاموشی قوس را می‌توان کم‌اثرترین پارامتر بر زبری سطح دانست که سهم اثرگذاری کشش سیم ۱٪ و ۴ پارامتر دیگر ۰٪ می‌باشد.

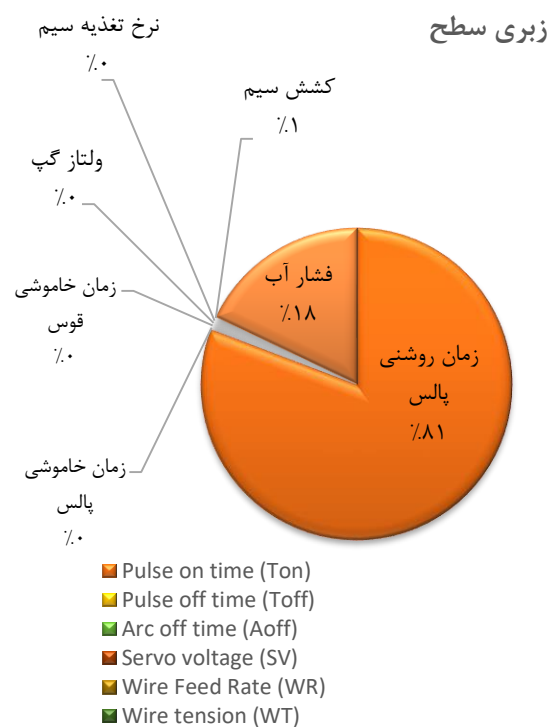
#### ۵- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله، از نتایج طراحی آزمایش‌های موجود در مقاله مرجع [۲۲] استفاده شده است. در مقاله مرجع برای به دست آوردن یک رابطه تجربی بین فاکتورهای ورودی و خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی از روش سطح پاسخ و ادغام روش‌های

تأثیر ۰٪ می‌باشد و می‌توان از این پارامترها به‌عنوان پارامترهای غیر حساس نام برد.



شکل ۴ اثر کمی پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری



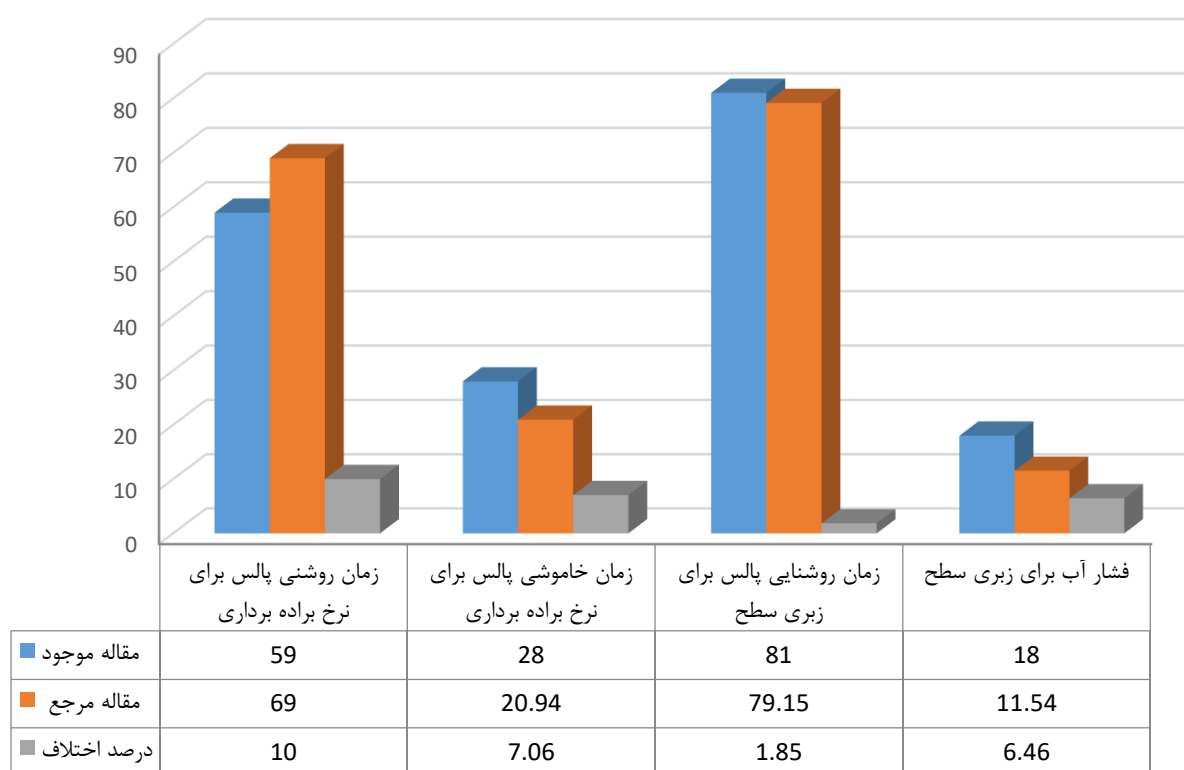
شکل ۵ اثر کمی پارامترهای ورودی بر زبری سطح

پالس برای فاکتور خروجی نرخ براده برداری و فاکتورهای زمان روشنی پالس و فشار آب برای خروجی زبری سطح صورت گرفته است.

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان دهنده این موضوع است که همانند مرجع [۲۲] پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس اثرگذارترین پارامترها بر نرخ براده برداری و پارامترهای زمان روشنی پالس و فشار آب اثرگذارترین پارامترها بر خروجی زبری سطح هستند.

الگوریتم شبکه عصبی پس انتشار و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. همچنین مقایسه‌ای بین این دو روش صورت گرفته است. در مقاله مرجع [۲۲] اثرات اصلی فاکتورها با ادغام روش‌های الگوریتم شبکه عصبی پس انتشار و الگوریتم ژنتیک و در این پژوهش با استفاده از مدل آنالیز حساسیت سوبل بررسی شده است.

در شکل (۶) به مقایسه کمی بین نتایج این مقاله و مقاله مرجع [۲۲] پرداخته شده است. به منظور مختصر شدن صحت‌سنجی، از پارامترهای حساس استفاده شده است و مقایسه بین فاکتورهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی



شکل ۶ مقایسه نتایج مقاله موجود و مقاله مرجع برای خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح

## ۷- مراجع

- [1] V. K. Jain, Advanced machining processes. Allied publishers, 2009, Pvt. Limited, Twelfth Reprint, Printing Division, A-104 Mayapuri Phase II, New Delhi - 11006, India, 2009, ISBN: 81-7764-294-4, india.
- [2] A. B. Puri and B. Bhattacharyya, "An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 2, pp. 151-159, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00158-X).

## ۶- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی و اختصارات

زمان روشنی پالس ( $\mu\text{s}$ )	$T_{\text{on}}$
زمان خاموشی پالس ( $\mu\text{s}$ )	$T_{\text{off}}$
زمان قطع قوس ( $\mu\text{s}$ )	$T_{\text{off-Arc}}$
ولتاژ گپ (V)	SV
نرخ تغذیه سیم (m/min)	Wr
کشش سیم (gf)	Wt
فشار آب (bar)	Wp
نرخ براده برداری (g/min)	MRR
زبری سطح ( $\mu\text{m}$ )	Ra

- surface roughness," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 4, pp. 284-291, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.05.002>.
- [12] M. SAIF, R. Rawat, and Sciences, "Investigation of aluminum alloy 6061 in Wire-EDM regarding surface roughness and material removal rate by adopting optimization techniques," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* pp. 9410-9420, 2023, doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.17.1.2023.10.0744>.
- [13] R. Chaudhari, P. Prajapati, S. Khanna, J. Vora, V.K. Patel, "Multi-response optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowder-mixed wire electrical discharge machining process parameters of nitinol shape memory alloy," *Materials*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15062018>.
- [14] R. Chaudhari, J. Vora, L. López de Lacalle, S. Khanna, V. K. Patel, and I. J. Ayesta, "Parametric optimization and effect of nano-graphene mixed dielectric fluid on performance of wire electrical discharge machining process of Ni55. 8Ti shape memory alloy," *Materials*, vol. 14, no. 10, p. 2533, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14102533>.
- [15] Y. Nawaz, S. Maqsood, K. Naeem, R. Nawaz, M. Omair, and T. Habib, "Parametric optimization of material removal rate, surface roughness, and kerf width in high-speed wire electric discharge machining (HS-WEDM) of DC53 die steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 7, pp. 3231-3245, 2020/04/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05175-3>.
- [16] K. Balasubramanian, D. Palanisamy, E. AGS, and M. Processes, "Experimental investigations on WEDM process for machining high manganese steel," *aterials and Manufacturing Processes*, vol. 35, no. 14, pp. 1612-1621, 2020, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2020.1779941>.
- [17] C. Naresh, P. Bose, and C. Rao, "ANFIS based predictive model for wire edm responses involving material removal rate and surface roughness of Nitinol alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 93-101, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.216>.
- [18] S. Vellingiri, R. Soundararajan, N. Mohankumar, K. Nithyananthakumar, and K. Muthuselvam, "Exploration on WEDM process parameters effect on LM13 alloy and LM13/SiC composites using Taguchi method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 997-1003, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.050>.
- [3] M. Ghoreishi and A. J. J. A. M. Naderifard, "Thermal and Mechanical Modeling of Electro Discharge Machining Process Using Finite Element Method (FEM)," vol. 8, no. 4, pp. 1-11, 2012, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00158-X).
- [4] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 13, pp. 1287-1300, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7).
- [5] M. Asadi and M. Ghoreyshi, "Investigation of Electro Discharge Machining Parameters Using Aluminium Powder Suspended in Dielectric," 2005.
- [6] V. Kumar, A. Babu, R. Venkatasamy, and M. Raajenthiren, "Optimization of the WEDM parameters on machining Incoloy800 super alloy with multiple quality characteristics," *Optimization*, vol. 2, no. 6, pp. 1538-154, 2010.
- [7] K. Ouahid, B. Lakhdar, A. Mohamed Walid, and B. Abderrahim, "Multi response optimization of surface roughness in hard turning with coated carbide tool based on cutting parameters and tool vibration," *Structural Engineering and Mechanics, An Int 'l Journal*, vol. 70, pp. 395-405, 2019, doi: <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.3.285>.
- [8] M. Barghamadi, S. Rahmati, and E. Shakouri, "Study of the effect of burnishing process on the surface roughness, micro hardness and corrosion of 316 L stainless steel implant machined by the electrical discharge machining process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 129-142, 2021, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.21.3.2.0>.
- [9] S. Oskueyan, V. Abedini, and A. Hajialimohammadi, "Statistical Modeling of the Effective Parameters in Electrical Discharge Machining Process of Ti-6Al-4V Alloy Using the Mixtures of Aluminum Oxide and Silicon Oxide in Dielectric," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1449-1462, 2020, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.20.6.4.5>.
- [10] A. Ramaswamy, A. Perumal, J. Jagadeesan, P. kaladharan, and H. V. Nagarajan, "Optimization of WEDM process parameters for D3 die steel using RSM," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2063-2069, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.505>.
- [11] H. P. Nguyen, N. V. Ngo, and Q. T. Nguyen, "Optimizing process parameters in edm using low frequency vibration for material removal rate and

- [23] J. Rezaeian, S. Jahanbakhshi, and S. J. J. o. P. R. Jamshidi, "Sensitivity Analysis of Production Parameters of an Iranian Oilfield Using Sobol Method," vol. 30, no. 99-4, pp. 37-46, 2020, doi: <https://doi.org/10.22078/pr.2020.4111.2861>.
- [24] M. H. Korayem and Z. Rastegar, "Application of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Nano-Particle": *FE Simulation International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8, no. 1, pp. 35-50, 2012.
- [25] V. Tahmasbi, M. Ghoreishi, and M. J. M. M. E. Taheri, "Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 13, pp. 382-386, 2016, doi: <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.13.57.7>.
- [26] P. Sharma, D. Chakradhar, S. J. M. Narendranath, and Design, "Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application," *Materials & Design*, vol. 88, pp. 558-566, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.036>.
- [19] A. Saltelli, "Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices," *Computer Physics Communications*, vol. 145, no. 2, pp. 280-297, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1).
- [20] A. Saltelli, S. Tarantola, and K.-S. J. T. Chan, "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output," *Technometrics*, vol. 41, no. 1, pp. 39-56, 1999, doi: <https://doi.org/10.2307/1270993>.
- [21] A. Nekahi and K. Dehghani, "Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology," *Materials & Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3845-3851, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.038>.
- [22] C. J. Tzeng, Y. K. Yang, M. H. Hsieh, and M. C. Jeng, "Optimization of wire electrical discharge machining of pure tungsten using neural network and response surface methodology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, no. 6, pp. 841-852, 2011, doi: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM2021>.

## طراحی بهینه سازه دیسک دوار یک موتور توربینی با روش های بهینه سازی مدرن

**چکیده:** در پژوهش حاضر تحلیل اولیه سازه دیسک دوار مورد استفاده در یک موتور توربینی هوایی و بهینه سازی هندسه آن جهت رسیدن به کمترین جرم در کنار اطمینان مناسب انجام شده است. دیسک مورد بحث همگن و تحت بارگذاری های مکانیکی و حرارتی قرار دارد. جهت تحلیل ترموالاستیک دیسک مفروض روابط حاکم با فرض شرایط تنش صفحه ای استخراج و به کمک نرم افزار محاسباتی متلب تحلیل شده است. به منظور بهینه سازی هندسه از روش های بهینه سازی گرادیانی شمارشی (CSA) و غیر گرادیانی الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) استفاده شده است. مقایسه نتایج به ترتیب نشان دهنده کاهش ۳۶/۴۹، ۳۹/۵۱ و ۳۶/۴۳ درصدی جرم اولیه دیسک با روش های بهینه سازی مورد استفاده است. همچنین زمان تقریبی لازم جهت رسیدن به نتایج بهینه سازی در این روش ها به ترتیب برابر با ۳۵۰۰، ۱۲۰ و ۱۰۰ دقیقه بوده است. نتایج نشان می دهند که بیشترین میزان بهبود نتایج مربوط به روش غیرگرادیانی الگوریتم GA است. همچنین سرعت همگرایی در روش های غیرگرادیانی الگوریتم GA و ABC در حدود ۳۰ تا ۳۵ برابر بیشتر از روش CSA است. در نتیجه با توجه به زمان بر بودن تحلیل های گرادیانی اهمیت روش های غیر گرادیانی در صرفه جویی زمان و هزینه های محاسباتی نیز بیشتر نمایان شده و با توجه به نتایج استفاده از روش GA به عنوان یک روش دقیق و با سرعت مطلوب در بهینه سازی مسائل دوار در معرض بارگذاری های ترموالاستیک پیشنهاد شده است.

**واژه های راهنما:** دیسک دوار، بهینه سازی غیر گرادیانی و گرادیانی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

بهروز شهریاری\*

استادیار،  
مجتمع دانشگاهی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

## Optimal design of the rotating disk structure of a turbine engine utilizing modern optimization methods

Behrooz  
Shahriari\*

Assistant Professor,  
Faculty of Mechanics,  
Malek Ashtar  
University of  
Technology

**Abstract:** This paper presents the initial structural analysis and geometric optimization of a rotating disk used in an aircraft turbine engine. The disk is homogeneous and subject to mechanical and thermal loads. The governing equations for the thermoelastic analysis of the assumed disk were derived under the assumption of plane stress conditions and subsequently analyzed using the MATLAB computational software. Three different optimization methods were implemented for the geometric optimization of the rotating disk: The Counting Sort Algorithm (CSA), the non-gradient Genetic Algorithm (GA), and the Artificial Bee Colony algorithm (ABC). The optimization methods resulted in a reduction of the disk mass by 36.49%, 39.51%, and 36.43%, respectively. Also, the approximate time required to reach the optimization results was 3,500, 120, and 100 minutes, respectively. The results show that the non-gradient genetic algorithm (GA) method has the greatest improvement in results. The convergence speed of the non-gradient GA and ABC methods is also about 30 to 35 times faster than the CSA method. As a result, the importance of non-gradient methods in saving time and computational costs has become more evident, due to the time-consuming nature of gradient-based analyses. Based on the results, the use of the GA method has been proposed as an accurate and efficient method for the optimization of rotating problems under thermoelastic loading.

**Keywords:** Rotating disk, Gradient and non-gradient optimization, Counting Sort Algorithm (CSA), Genetic Algorithm (GA), Artificial Bee Colony (ABC)



## ۱- مقدمه

[۳]. در سال ۲۰۱۸ ژنگ و همکاران به مطالعه رفتار دیسک‌های دوار همگن و مدرج تابعی با پروفیل ضخامت غیریکنواخت و بررسی اثر سرعت دوران بر تغییرات رفتار آن پرداختند [۴]. در سال ۲۰۲۰ یوسفی و همکاران تحلیل الاستیک یک درام اسپول کمپرسور محوری موجود در یک توربین گاز هوایی را مورد بررسی قرار دادند [۵]. در سال ۲۰۲۲ شهریاری و همکاران به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار درام دوار با در نظر گرفتن جنس و شرایط حرارتی متفاوت پرداختند [۶]. در کنار بررسی اولیه سازه دیسک دوار با توجه به اهمیت خاص پارامترهایی مانند استحکام و لزوم پایین بودن وزن، بررسی و تلاش برای بهینه‌سازی این سازه‌ها نیز به‌طور جدی مورد توجه طراحان و مهندسان بوده است. در نتیجه در سال‌های اخیر کارهای عددی و تحلیلی مهمی در این زمینه انجام شده است.

پراگر و همکاران در سال ۱۹۷۰ تحلیل‌هایی را در زمینه بهینه‌سازی دیسک متقارن ارائه کردند [۷]. در سال ۱۹۷۶ توسط مالکوف و همکاران استفاده از روش‌های عددی برای بهینه‌سازی دیسک مطرح شد [۸]. در سال ۲۰۰۴ فرشی و همکاران، مقادیر تنش در یک دیسک غیر همگن تحت تأثیر گرادیان حرارتی را با استفاده از تقسیم دیسک به چندین حلقه محاسبه نموده و سپس از روش ابر کره‌های محاطی به بهینه‌سازی پروفیل هندسه دیسک دوار پرداختند [۹]. در سال ۲۰۰۵ جاهد و همکارانش [۱۰]، با استفاده از روش حلقه کردن دیسک، به ارائه روشی نیمه‌تحلیلی برای بهینه‌سازی وزن دیسک غیر همگن دوار که تحت گرادیان‌های حرارتی نیز قرار دارد پرداختند. در سال ۲۰۱۳ موهان و همکاران با استفاده از روش ژنتیک به بهینه‌سازی سازه دیسک‌های دوار پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۱۸ خرسند و تانگ با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و با هدف رسیدن به وزن کمینه، به تحلیل و بازطراحی هندسی یک دیسک دوار FGM در معرض بارهای ترموالاستیک پرداختند [۱۲]. در سال ۲۰۱۹ شهریاری و همکاران رفتار اسپول کمپرسور توربوجت برای حالات همگن و مدرج تابعی را با ضرایب ثابت به‌صورت تحلیلی استخراج و مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش برای رسیدن به حداقل جرم اسپول از روش بهینه‌سازی شمارشی استفاده شده است [۱۳]. در سال ۲۰۱۹ ثارون و همکاران با استفاده از تحلیل رابطه‌ای خاکستری و روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه‌سازی تنش در دیسک‌های دوار FGM را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که این روش می‌تواند تنش،

تجهیزات دوار به‌عنوان یکی از اجزای اصلی صنایع مختلف نقش ایفا می‌کنند. از جمله اجزا دواری که در صنعت کاربرد فراوانی دارند و نقش مهمی ایفا می‌کنند، می‌توان به دیسک‌های دوار اشاره نمود. کاربرد روزافزون این جزء دوار در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی، صنایع دریایی و غیره حاکی از اهمیت و جایگاه مهم این جزء دوار در صنعت می‌باشد. با توجه به نقش دیسک دوار در صنایع مختلف، تجزیه و تحلیل دیسک‌ها در شرایط متفاوت بارگذاری از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار است. مهمترین زمینه استفاده از دیسک دوار در صنعت هوایی، استفاده در موتورهای هوایی از جمله توربوجت و مینی توربوجت‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها یعنی توربین‌ها و کمپرسورها می‌باشد [۱]. سازه موتور همچون سایر سازه‌های مهندسی برای پاسخ به نیازهای موجود در صنایع وابسته نظیر هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی، توربین‌ها، صنایع هسته‌ای، نظامی و غیره ساخته شده و همواره دارای محدودیت‌هایی در طراحی و عملکرد بوده است. از این‌رو طراحان همواره در تلاش‌اند تا با ارائه ایده‌های نو و با تغییر در جنس اجزای سازنده موتور موجود، باعث افزایش راندمان کل و کاهش محدودیت‌های موجود در موتورهای نسل‌های پیشین گردند. یکی از پارامترهای مهم در افزایش عملکرد موتور توربین‌گازی هوایی کاهش وزن موتور بوده و روتور درصد بالایی از وزن موتور را به خود اختصاص می‌دهد. لذا بهینه‌سازی وزنی سازه روتور جهت بهبود رفتار دینامیکی، کاهش بار یاتاقان‌ها و کاهش وزن کل موتور حائز اهمیت است. لذا طراحی بهینه دیسک توربین به‌عنوان یکی از اجزای روتور با توجه به شرایط کاری سخت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل تنش دیسک‌های دوار دارای تاریخچه‌ی پژوهشی گسترده‌ای بوده و به‌عنوان موضوعی مهم در مبحث طراحی‌های مهندسی مطرح بوده است. تنش‌های حاصل از بارگذاری گریز از مرکز می‌توانند اثرات قابل‌توجهی بر استحکام و ایمنی دیسک داشته باشند. از این‌رو تعیین میدان‌های تنش و جابجایی به‌عنوان اهدافی جدی در طراحی این سازه‌ها مطرح می‌باشند. در سال ۱۹۷۰ تیموشنکو و همکاران یک راه‌حل تحلیلی متقارن محوری برای تحلیل دیسک‌های دوار همسانگرد همگن به دست آوردند [۲]. در سال ۲۰۱۰ ولوو و همکاران به حل دیسک‌های ضخامت متغیر دوار الاستوپلاستیک با کرنش سختی غیرخطی پرداختند

<sup>1</sup> Particle swarm optimization

به منظور دستیابی به این هدف در ابتدا به بررسی و تحلیل اولیه رفتار سازه دیسک دوار مورد استفاده در یک موتور توربینی هوایی پرداخته شده است. دیسک مدنظر همگن و دارای سرعت ثابت بوده و در معرض فشارهای داخلی و خارجی ناشی از تماس داخلی دیسک با شفت و نیروی گریز از مرکز پره‌های روی سطح خارجی است. همچنین اثر حرارتی بر رفتار دیسک با در نظر گرفتن رفتار دیسک به صورت ترموالاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین پس از استخراج روابط حاکم بر دیسک اولیه، اصول روش‌های بهینه‌سازی گرادیانی شمارشی (CSA) و غیرگرادیانی الگوریتم ژنتیک (GA) و کلونی زنبورعسل مصنوعی (ABC) معرفی شده است. سپس با معرفی شرایط حاکم بر دیسک مفروض تحلیل اولیه دیسک و نتایج حاصل از بهینه‌سازی دیسک با سه روش مورد اشاره و سرعت همگرایی این روش‌ها استخراج و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حصول به کمترین جرم ممکن در کنار اطمینان از قرارگیری حداقل ضریب اطمینان سازه در محدوده ایمن از جمله شروط اساسی بهینه‌سازی دیسک مدنظر است. تحلیل رفتاری سازه و بهینه‌سازی سه روش مورد بحث در محیط نرم افزار متلب<sup>۲</sup> و با استفاده از کدنویسی حاصل شده است.

## ۲- تحلیل ترموالاستیک دیسک دوار همگن

در این بخش به بررسی روابط و معادلات اساسی حاکم بر دیسک‌های دوار نظیر تعیین معادله حرکت، تنش‌های حاکم بر دیسک، نیروی معادل ناشی از دوران پره‌های روی دیسک، محاسبه جرم دیسک در حالت‌های ضخامت ثابت و با پروفیل ضخامت متغیر، معیار تسلیم مورد استفاده جهت پایش وقوع پدیده تسلیم و فراهم‌سازی امکان تحلیل اولیه رفتار دیسک دوار مورد بحث و انجام بهینه‌سازی در ادامه پرداخته شده است.

### ۲-۱- معادلات حاکم بر رفتار دیسک دوار

در شکل (۱) تصویر شماتیک یک دیسک دوار توخالی نشان داده شده است. دیسک مفروض دارای شعاع داخلی  $r_i$  و شعاع خارجی  $r_o$  بوده و تحت بارگذاری‌های یکنواخت داخلی ناشی از تماس با شفت داخلی و خارجی ناشی از دوران پره‌های خارجی است و به ترتیب با  $P_i$  و  $P_o$  نشان داده شده و با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$  در حال دوران است.

جایابی و جرم دیسک را به حداقل برساند [۱۴]. در سال ۲۰۲۰ عبدالله و همکاران رفتار تنش‌های ترمومکانیکی در دیسک‌های چرخان توخالی محوری با ضخامت متغیر FGM را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و آن را با هدف کاهش حداکثر تنش معادل در راستای شعاع بهینه‌سازی کردند [۱۵].

در سال ۲۰۲۲ احمد و همکاران بهینه‌سازی سازه دیسک ترمز را با استفاده از روش اجزای محدود و الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۲۲ رحمان با مطالعه اثرات میدان تنش، حرارت، سرعت زاویه‌ای و ضخامت بر رفتار دیسک‌های با مقطع دایره‌ای و با هدف کمینه‌سازی تنش‌های وارد بر آن به بهینه‌سازی هندسی و خواص دیسک‌ها پرداختند [۱۷]. در سال ۲۰۲۲ وانگ و همکاران با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی و با هدف کمینه کردن وزن به بهینه‌سازی دیسک‌های متقارن در معرض بارگذاری‌های ترموالاستیک پرداختند [۱۸].

در سال ۲۰۲۳ یان و همکاران بهینه‌سازی تنش‌های یک دیسک توربین در معرض بارگذاری‌های گریز از مرکز و قیود طراحی مربوط به دیسک را با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. در سال ۲۰۲۳ مدان و بومیگ تأثیر خواص مادی و هندسه دیسک بر سرعت الاستیک حدی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای مواد و هندسه، سرعت الاستیک حدی دیسک‌های چرخان را به‌طور قابل توجهی افزایش داد [۲۰]. در سال ۲۰۲۳ رحمان و علی به توسعه روشی برای بهینه‌سازی توزیع مواد در دیسک‌های FGM برای دستیابی به توزیع تنش کمینه پرداختند. مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده از معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم برای تعیین توزیع مواد بهینه استفاده می‌کند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که طراحی دیسک‌های FGM با توزیع مواد بهینه برای دستیابی به توزیع تنش کمینه امکان‌پذیر است [۲۱].

هدف از پژوهش حاضر اجرای مطالعه‌ای مقایسه‌ای میان مدل‌های شناخته شده بهینه‌سازی گرادیانی و غیر گرادیانی برای نمونه مطالعاتی دیسک دوار یک موتور توربینی و تعیین هندسه بهینه حاصل و مقایسه نتایج حاصل از روش‌های اتخاذ شده بعنوان یک نمونه دوار در معرض بارگذاری‌های ترموالاستیک با کاربردهای قابل توجه صنعتی بوده که تاکنون در پژوهش‌های پیشین مشاهده نشده است.

<sup>2</sup> Matlab

<sup>1</sup> Topology optimization

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta) \\ &= \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{du}{dr} + \nu\frac{u}{r}\right)\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r) \\ &= \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{u}{r} + \nu\frac{du}{dr}\right)\end{aligned}$$

با قرار دادن رابطه (3) در رابطه (1) معادله حرکت دیسک حاصل شده است:

$$\begin{aligned}\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} \\ = -\frac{(1-\nu^2)\rho\omega^2r}{E}\end{aligned}\quad (4)$$

معادله حاصل دارای دو جواب عمومی و خصوصی است. که جواب عمومی طبق رابطه (5) برابر است با:

$$u = C_1r + \frac{C_2}{r}\quad (5)$$

به سهولت می‌توان نشان داد که جواب خصوصی نیز به صورت رابطه (6) برابر است با:

$$u_p = -(1-\nu^2)\frac{\rho\omega^2r^3}{8E}\quad (6)$$

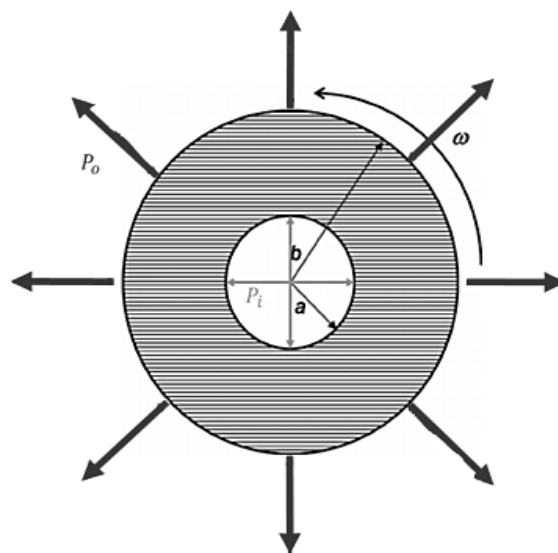
در نتیجه جواب کلی رابطه به صورت رابطه (7) خواهد بود:

$$u = -\frac{\rho\omega^2r^3(1-\nu^2)}{8E} + C_1r + \frac{C_2}{r}\quad (7)$$

با ترکیب روابط (3) و (7)، تنش‌های شعاعی و محیطی بر حسب ثابت‌های  $C_1$  و  $C_2$  برابر است با:

$$\begin{aligned}\sigma_r \\ = \frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{-(3+\nu)(1-\nu^2)\rho\omega^2r^2}{8E} + (1+\nu)C_1 - (1-\nu)\frac{C_2}{r^2}\right]\end{aligned}\quad (8)$$

برای تحلیل با توجه به نوع هندسه مسئله از سیستم مختصات قطبی استفاده شده و با توجه به تقارن موجود فرض می‌شود جابجایی شعاعی تنها تابعی از شعاع باشد ( $u = u(r)$ )، و از جابجایی در راستای محیطی صرف نظر شده است ( $v = 0$ ).



شکل 1 دیسک دوار توخالی در معرض بارگذاری

با نوشتن معادله تعادل حاکم بر سازه دیسک دوار در راستای شعاعی و با فرض ثابت بودن ضخامت دیسک در راستای طولی، معادله تعادل طبق رابطه (1) به دست می‌آید [3]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho\omega^2r = 0\quad (1)$$

$\sigma_\theta$  و  $\sigma_r$  به ترتیب نشان دهنده مؤلفه‌های شعاعی و محیطی تنش و  $\rho$  چگالی ماده می‌باشد. در رابطه (2) مجموعه معادلات سازگاری که نشان دهنده روابط بین کرنش و جابجایی‌ها با توجه به فرض تقارن محوری است، نشان داده شده است:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \gamma_{r\theta} = 0\quad (2)$$

در روابط (2)،  $\varepsilon_r$ ،  $\varepsilon_\theta$  و  $\gamma_{r\theta}$  به ترتیب برابر با کرنش‌های قائم در راستای شعاعی، محیطی و کرنش برشی در صفحه  $r\theta$  می‌باشند. با استفاده از روابط میان مؤلفه‌های تنش و کرنش برای مواد همگن و رابطه (2)، رابطه میان مؤلفه‌های تنش بر حسب مؤلفه‌های جابجایی طبق رابطه (3) عبارت است از:

$$\begin{aligned} @ r = i &\rightarrow k \frac{dT}{dr} = h_a(T - T_i) \\ @ r = o &\rightarrow -k \frac{dT}{dr} = h_b(T - T_o) \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)،  $T_o$  و  $T_i$  به ترتیب دمای سطوح داخلی و خارجی استوانه و  $h_i$  و  $h_o$  به ترتیب برابر با ثابت‌های انتقال حرارت جابجایی در سطوح داخلی و خارجی استوانه است. با حل کلی رابطه (۱۰)، تابع توزیع حرارت طبق رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$T(r) = T_1 \ln\left(\frac{r}{a}\right) + T_2 \quad (12)$$

که در رابطه‌ی (۱۲)، ثابت‌های  $T_1$  و  $T_2$  طبق رابطه‌ی (۱۳) به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{(T_b - T_a)}{k\left(\frac{1}{ah_a} + \frac{1}{bh_b}\right) + \ln\left(\frac{1}{\chi}\right)} \\ T_2 &= \frac{k\left(\frac{T_b}{bh_b} - \frac{T_a}{ah_a}\right) + T_i \ln\left(\frac{1}{\chi}\right)}{k\left(\frac{1}{ah_a} + \frac{1}{bh_b}\right) + \ln\left(\frac{1}{\chi}\right)} \end{aligned} \quad (13)$$

### ۲-۳- استخراج نیروهای گریز از مرکز دوران پره‌ها

برای دیسک در معرض نیروی گریز از مرکز حاصل از دوران پره‌ها، بارگذاری وارده بر سطح اعمالی طبق رابطه‌ی (۱۴) برابر است با [۲۲]:

$$\sigma_r = \frac{F_{Tb}}{A_r} = \frac{m_b r_b \omega^2 \times N_b}{2\pi \times r_r \times t_b} \quad (14)$$

که در اینجا  $F_{Tb}$  و  $A_r$  به ترتیب برابر با نیروی گریز از مرکز پره‌ها و مساحت مرکز سطح دوران پره است. همچنین  $m_b$ ،  $r_b$  و  $t_b$  به ترتیب برابر جرم یک پره، مختصات شعاعی پره، پهنای پره و تعداد پره‌های در حال دوران می‌باشد. بنابراین در تحلیل دیسک مورد بحث شرط مرزی ارائه شده در رابطه (۹) به رابطه و فرم دقیق‌تر (۱۵) تبدیل شده است:

$$\begin{aligned} &\text{Boundary Condition} \\ &= \begin{cases} r = i \rightarrow \sigma_r = -P_i \\ r = o \rightarrow \sigma_r = \frac{m_b r_b \omega^2 \times N_b}{2\pi \times r_r \times t_b} \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{E}{1 - \nu^2} \left[ \frac{-(3 + \nu)(1 - \nu^2)\rho\omega^2 r^2}{8E} + (1 + \nu)C_1 + (1 - \nu)\frac{C_2}{r^2} \right] \end{aligned}$$

ثابت‌های  $C_1$  و  $C_2$  از شرایط مرزی به دست می‌آیند. در دیسک توخالی مدنظر تنش شعاعی در مرزهای داخل ( $r = i$ ) و خارج ( $r = o$ ) به ترتیب برابر با فشار ناشی از تماس پرسی با روتور و کشش ناشی از پره‌ها می‌باشد. در نتیجه شرایط مرزی به صورت رابطه (۹) برابر است با:

$$\begin{aligned} (\sigma_r)_{r=i} &= -P_i \\ (\sigma_r)_{r=o} &= +P_o \end{aligned} \quad (9)$$

با اعمال شرایط مرزی رابطه (۹) ثابت‌های  $C_1$  و  $C_2$  قابل محاسبه است. بدیهی است با جایگذاری ثوابت محاسبه شده در روابط (۷) و (۸) جابجایی و تنش‌های وارد بر دیسک دوار مفروض در معرض بارگذاری ترموالاستیک به دست می‌آید. لازم به ذکر است برای محاسبه شرایط تسلیم در سازه دیسک مورد بحث معیار تسلیم فون میزز در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه نتایج برای یک دیسک با ضخامت غیر ثابت کافی است دیسک به  $n$  زیر دیسک با ضخامت ثابت تقسیم شده، با محاسبه و تحلیل یک به یک دیسک‌ها و اعمال شروط پیوستگی تحلیل ارائه شده به هندسه با ضخامت غیریکنواخت تعمیم می‌یابد.

### ۲-۲- تابع توزیع حرارت در حالت همگن

با توجه به تغییرات حرارتی پایدار دیسک مورد بحث در تمامی راستای طولی، همچنین با توجه به این که این توزیع ناشی از اختلاف حرارت بین سطوح داخلی و خارجی پیوسته و تابعی از تغییرات مختصات شعاعی است، برای محاسبه تابع توزیع حرارت از معادله‌ی حاکم بر توزیع حرارت برای مسائل با متغیر یک بعدی در سیستم مختصات قطبی به صورت رابطه‌ی (۱۰) استفاده شده است [۱۸].

در این رابطه  $k$  برابر با ضریب هدایت حرارتی ماده است. برای حل رابطه (۱۰) و در نتیجه محاسبه تابع توزیع حرارت  $T(r)$ ، شرایط مرزی به صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته شده است.

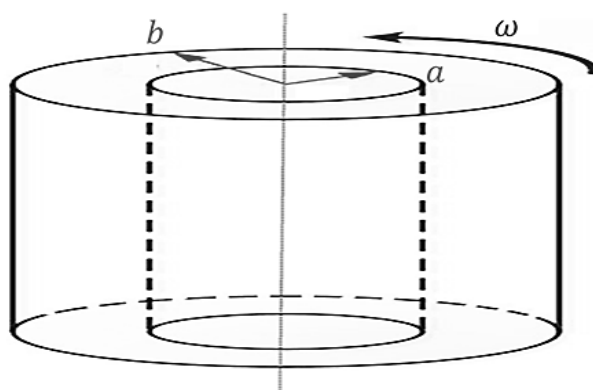
$$\frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (10)$$

## ۴-۲- محاسبه جرم دیسک در حالت همگن

برای محاسبه جرم دیسک مورد بررسی که هندسه آن در شکل (۲) مشابه با یک دیسک نشان داده شده است، از رابطه (۱۶) به صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$m = \rho \times V \rightarrow \rho \times h \times \pi \times (o^2 - i^2) \quad (16)$$

که در این رابطه  $h$  برابر با ارتفاع دیسک مورد بحث و بر حسب متر است.



شکل ۲ نمای سه بعدی دیسک

بدیهی است به منظور محاسبه جرم دیسک با ضخامت غیر ثابت پس از تقسیم بندی هندسه دیسک به  $n$  دیسک ضخامت ثابت و محاسبه تمامی ریز دیسک‌ها، مجموع جرم دیسک‌های ضخامت ثابت برابر با جرم کلی سازه دیسک مطلوب خواهد بود.

## ۳- روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده

بهینه‌سازی فرآیندی است که برای ارتقا یک متغیر مؤثر سازه دنبال می‌شود. فکر، ایده و یا طرحی که به وسیله یک محقق مطرح می‌شود، طی روال بهینه‌سازی بهبود می‌یابد. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه حل مسائل مختلف به کار می‌رود. امروزه فرایند طراحی مهندسی در ابعاد گسترده و پیچیده خود نیازمند روش‌های بهینه‌سازی قدرتمندتری است. روش‌هایی که مخصوصاً در بهینه‌سازی توابع غیر صریح و متغیرهای پیچیده تر کارآمد باشند. در میان روش‌های متعدد بهینه‌سازی موجود می‌توان

آن‌ها را به دو دسته روش‌های گرادیانی و غیرگرادیانی تقسیم نمود. در روش‌های گرادیانی عموماً با بررسی یک دامنه وسیع جستجو از میان تمامی دامنه جستجوی موجود به بررسی پاسخ بهینه پرداخته می‌شود. روش‌های غیرگرادیانی اغلب بر اساس صفات و رفتار بیولوژیکی، مولکولی، رفتار گروهی حشرات، و سیستم‌های طبیعی توسعه یافته‌اند و به لحاظ تکنیکی بر مبنای برنامه‌نویسی ریاضی قابل استفاده هستند [۲۳]. در ادامه به معرفی اصول اساسی روش بهینه‌سازی گرادیانی CSA و غیرگرادیانی GA و ABC پرداخته شده است.

## ۳-۱- روش بهینه‌سازی شمارشی (CSA)

روش بهینه‌سازی شمارشی به‌عنوان یک روش قدیمی، کلاسیک، مطمئن و پرکاربرد مطرح است. در روش‌های شمارشی، در هر تکرار فقط یک نقطه متعلق به فضای دامنه تابع هدف بررسی می‌شود. این روش‌ها برای پیاده‌سازی، ساده‌تر از روش‌های دیگر می‌باشند؛ اما به محاسبات قابل توجهی نیاز دارند. در این روش‌ها سازوکاری برای کاستن دامنه جستجو وجود ندارد و دامنه فضای جستجو شده با این روش بزرگ است. این روش اغلب در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بازه تغییرات تابع هدف محدود باشد [۲۴]. روش CSA روندی همچون روش اجزاء محدود دارد. به همان صورت که در حل المان محدود مسئله در قالب تعداد مشخصی گره از یک مسئله پیوسته به یک مسئله گسسته تغییر شکل داده و حل می‌شود و چون روشی عددی است با افزایش تعداد گره‌ها و یا کاهش فاصله بین حالات بررسی، همگرایی حل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا نیز روش شمارشی فرآیندی مشابه را طی می‌کند. به این صورت که اگر تمامی حالات ممکن قابل شمارش و گسسته باشند، تمامی آن‌ها را یک‌به‌یک حل کرده و بهترین حالت را گزارش می‌کند و اگر تمامی حالات در یک بازه محدود پیوسته باشند، در ابتدا با توجه به محدود بودن بازه تغییرات تابع، مسئله از یک تحلیل برای بی‌نهایت نقطه پیوسته ممکن به  $n$  نقطه در میان بازه با  $n$  حالت حل گسسته تقسیم شده و مسئله برای تمامی حالات به صورت مجزا تحلیل شده که این گسسته‌سازی به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. در پایان بهترین نتیجه در بین حالات حل شده به‌عنوان نتیجه بهینه گزارش خواهد شد. بدیهی است هرچه تعداد نقاط بیشتر باشد جواب به واقعیت نزدیک‌تر خواهد شد؛ بنابراین همچون مسائل المان محدود با افزایش حالات حل از یک حالت حل تک نقطه‌ای تا جایی که پاسخ همگرا شود و افزایش بیشتر

آنچه تاکنون به عنوان ساختار کلی GA ارائه شده است، به وسیله گرفنتست<sup>۱</sup> و بیکر<sup>۲</sup> ارائه گردیده است. در ادامه مراحل پیاده سازی این روش در قالب ۶ مرحله معرفی و خلاصه آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

مرحله ۱: در این مرحله تعداد مناسبی از زوج کروموزومها بر اساس میزان برازندگی آنها انتخاب می شوند تا در مراحل بعدی مورد استفاده قرار بگیرند. کروموزومهایی که دارای مقدار برازندگی بالایی هستند، ممکن است چندین بار در مراحل تولید انتخاب شوند، در حالی که کروموزومهایی که مقدار برازندگی آنها کم می باشد، ممکن است هیچ گاه انتخاب نگردند.

مرحله ۲: در این مرحله عملگر ترکیب با احتمال  $P_c$  بر روی کروموزومهای والد عمل کرده و با ترکیب آنها، کروموزومهای جدیدی (فرزندان) را تولید می کند. در عمل ترکیب، اطلاعات جدید به طور معمول فقط بر اساس اطلاعات موجود در کروموزومهای فعلی (کروموزومهای حاضر در جمعیت والدین) استخراج می گردد.

مرحله ۳: در این مرحله عمل جهش با احتمال  $P_m$  بر روی کروموزومهای حاصل از عمل ترکیب انجام شده و با تغییر بیت های این کروموزومها، راهی را برای ورود اطلاعات جدید به وجود می آورد.

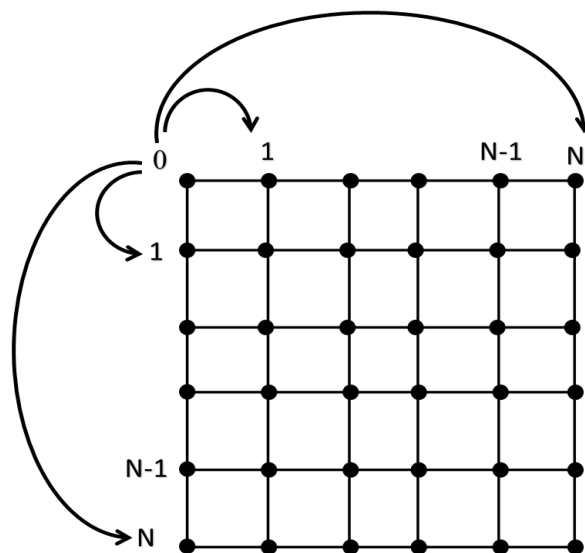
مرحله ۴: در این مرحله به منظور ارزیابی فرزندان، مقدار برازندگی کروموزومهای جدید محاسبه می گردد.

مرحله ۵: در این مرحله جمعیت جدید برای ورود به مرحله بعد الگوریتم، انتخاب می گردد. این کار با مقایسه مقدار برازندگی کروموزومها انجام می شود.

مرحله ۶: در این مرحله همه افراد جمعیت جدید مورد ارزیابی قرار می گیرند. چنان چه شرایط خاتمه الگوریتم فراهم باشد، الگوریتم پایان می پذیرد و در غیر این صورت جمعیت موجود به عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعد مورد استفاده قرار می گیرد. شرایط GA می تواند به وسیله مسئله مشخص شود و یا شرایطی مانند زمان اجرای الگوریتم، تعداد محدودی تولید در انجام الگوریتم و یا تغییر نکردن بهترین جواب برای تعداد مشخصی از مراحل تولید باشد.

همچنین پارامترهای اتخاذ شده در این پژوهش جهت پیاده سازی این روش با در نظر گرفتن اندازه جمعیت برابر با ۱۰۰، نرخ جهش برابر با ۰/۲، نرخ انتخاب ۰/۵ و انتخاب از نوع رتبه بندی لحاظ شده است.

تعداد نقاط حل دیگر منجر به افزایش دقت حل نشود، ادامه خواهد یافت (مشاهده کمتر از ۱ درصد تغییر در جواب با افزایش دامنه جستجو می تواند شرط همگرایی پاسخ در نظر گرفته شود). دیسک حاضر با احتساب ۳ گره منجر به تولید ۲۷ هندسه منحصر به فرد بعنوان حالت آغازین بررسی های این روش آغاز شده است.



شکل ۳ المان بندی سازه و انتخاب تمامی حالت های ممکن حل در روش بهینه سازی شمارشی

### ۳-۲- الگوریتم ژنتیک (GA)

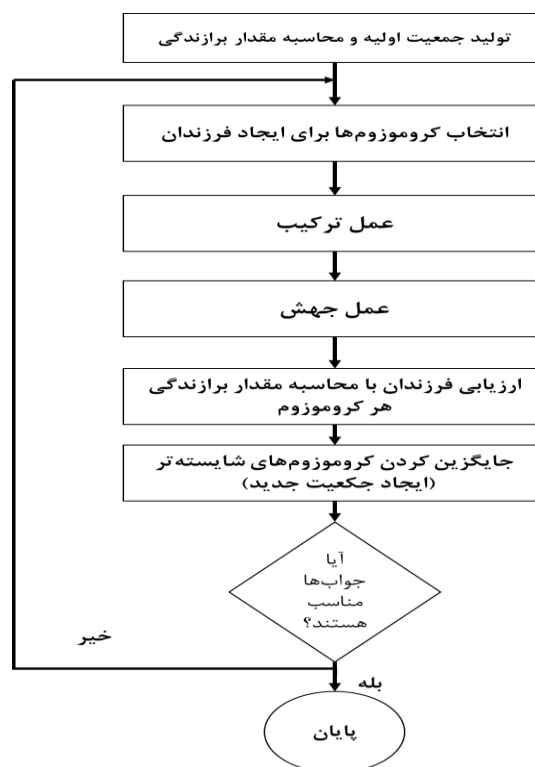
الگوریتم های ژنتیکی بر اساس نظریه تکاملی داروین بنا شده و جواب مسئله ای که از طریق GA حل می شود رفته رفته بهبود می یابد. فرآیند GA با یک مجموعه از جوابها که از طریق کروموزومها نشان داده می شوند شروع می شود. این مجموعه جوابها جمعیت اولیه نام دارد. در این الگوریتم جوابهای حاصل از یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می شوند. در این فرآیند امید است که جمعیت جدید نسبت به جمعیت قبلی بهتر باشد. انتخاب بعضی از جوابها از میان کل جوابها (والدین) به منظور ایجاد جوابهای جدید یا همان فرزندان بر اساس میزان برازندگی آنها می باشد. طبیعی است که جوابهای مناسب تر شانس بیشتری برای تولید مجدد داشته باشند. این فرآیند تا برقراری شرطی که تعیین شده است (مانند تعداد جمعیتها یا میزان بهبود جواب) ادامه پیدا می کند [۲۵].

<sup>2</sup> Baker

<sup>1</sup> Gerfenstet



شکل ۵ روند اجرای الگوریتم ABC



شکل ۴ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

همچنین پارامترهای اتخاذ شده در این پژوهش جهت پیاده سازی این روش با در نظر گرفتن تعداد زنبورها ( $N$ ) برابر با ۱۰۰، تعداد فاز ( $M$ ) برابر با ۵۰، میزان فریب ( $P$ ) ۰/۲ و میزان پخش ( $Q$ ) ۰/۳ لحاظ شده است.

#### ۴- تعریف مسئله بهینه سازی

در یک مسئله بهینه سازی باید قبل از هر چیز دیگری متغیرهای طراحی تعیین گردند. شکل (۶) یک دیسک حلقه حلقه شده را نشان می دهد. همان گونه که در شکل نیز مشخص است، متغیرهای طراحی این دیسک ضخامت تمامی حلقه های داخلی فرض خواهد شد. ضخامت دو حلقه بیرونی و داخلی بایستی جزء پارامترهای قیدی طراحی وارد در محدوده ای مشخص قرار گیرند، گرچه در مراجع برای اندازه آنها معیارهایی وجود دارد. با توجه به مطالب فوق اگر دیسک را به  $N$  حلقه تقسیم کنیم، در این صورت تعداد متغیرهای طراحی  $N$  عدد خواهد بود. بنابراین بردار متغیرهای طراحی  $h$  بصورت رابطه (۱۷) بیان می شود:

$$h = \{h_1, h_2, \dots, h_N\} \quad (17)$$

### ۳-۳- الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)

ترشکوا<sup>۱</sup> یک مدل از رفتار جستجوی کلونی زنبور عسل بر اساس معادلات واکنش-انتشار را توسعه داد [۲۶]. این مدل منجر به ظهور هوش جمعی از انبوه زنبوران عسل شده که شامل سه جزء اساسی منابع غذایی، زنبورهای جستجوگر کارگر، و زنبورهای جستجوگر بیکار است و دو حالت رفتاری استخدام به یک منبع غذایی و رها کردن یک منبع برای زنبورهای عسل تعریف می شود.

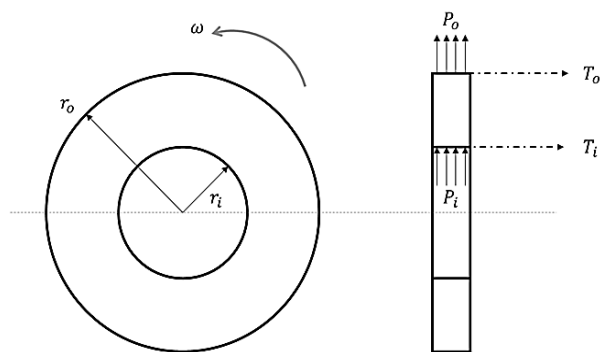
در الگوریتم ABC، موقعیت یک منبع غذایی نشان دهنده یک راه حل ممکن برای مسئله بهینه سازی و مقدار شهد از یک منبع غذایی مربوط به کیفیت (شایستگی) راه حل موجود است [۲۷]. تعداد زنبورهای کارگر و یا تماشاچی برابر با تعداد راه حل های جامعه است. در گام اول، ABC جمعیت اولیه  $P(C=0)$  موقعیت منبع غذایی را به طور توزیع تصادفی تولید می کند، که در آن  $SN$  نشان دهنده اندازه زنبور عسل های کارگر یا تماشاچی است. هر راه حل  $x_i (i = 1, 2, \dots, SN)$  یک بردار  $D$  بعدی است. در اینجا،  $D$  تعداد پارامترهای بهینه سازی است. جزئیات اجرای الگوریتم ABC در شکل (۵) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Tereshko

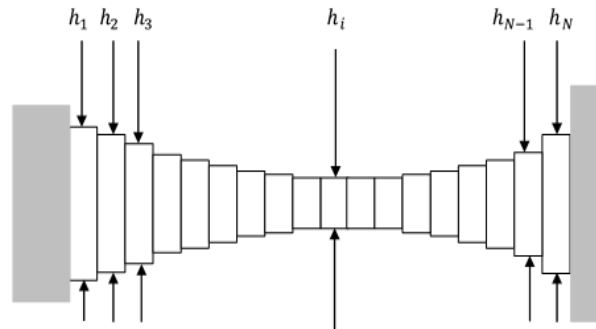
دیسک در حالات بهینه حاصل با نتایج اولیه پیش از بهینه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. دیسک مورد بحث تحت شرایط بارگذاری مشخص شده در شکل (۷) قرار گرفته است.

جنس دیسک مدنظر از  $Ti6Al4V$ -Anealed و دارای شعاع داخلی ۲۰ و شعاع خارجی ۱۲۵ میلی‌متر و با سرعت زاویه‌ای برابر با ۲۲۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. دیسک در سطح داخلی و خارجی به ترتیب در معرض دمای ۲۵ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. تنش شعاعی ناشی از انطباق دیسک و شفت و همچنین پرها در سطوح داخلی و خارجی به ترتیب از نوع فشاری و کششی و برابر با ۶۰- و ۲۰۰+ مگاپاسکال است. هندسه اولیه با ضخامت اولیه ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ادامه به منظور محاسبه و بررسی پاسخ‌های تحلیل، خواص ترمومکانیکی وارد بر دیسک طبق جدول (۱) مشخص شده است. در پایان لازم به ذکر است در بخش بهینه‌سازی به‌طور کلی تابع هدف وزن نهایی سازه دیسک و قیود و محدودیت‌های مسئله، عدم تجاوز تنش مؤثر فون میزز از حد تسلیم ماده، مثبت بودن جرم و عدم تجاوز از جرم هندسه اولیه و مقید بودن ضخامت در سطوح داخلی و خارجی در نظر گرفته شده است. تحلیل هندسه اولیه، اعمال روش‌های بهینه‌سازی و استخراج پروفیل بهینه دیسک مفروض با کد نویسی این الگوریتم‌ها در محیط برنامه‌نویسی Matlab، انجام شده است.

در شکل‌های (۸) تا (۱۲) به ترتیب نتایج مربوط به نمودار توزیع تنش شعاعی، محیطی، تنش معادل و تغییرات ضریب اطمینان و پروفیل ضخامت در دیسک اولیه و بهینه همگن از جنس  $Ti6Al4V$ -Anealed به دست آمده با استفاده از روش‌های  $GA$ ،  $CSA$  و  $ABC$  بر حسب مختصات شعاعی نشان داده شده است. در اینجا نیز نتایج به دست آمده نشان‌دهنده همخوانی قابل قبول و نتایج بسیار نزدیک پروفیل بهینه به دست آمده از روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده با یکدیگر دارد که به نوعی نشان‌دهنده صحت نتایج این روش‌ها در قیاس با یکدیگر است.



شکل ۷ هندسه و شرایط بارگذاری‌های وارده بر دیسک اولیه مفروض



شکل ۶ متغیرهای طراحی دیسک

همچنین، شکل استاندارد تابع هدف به منظور کمینه‌سازی جرم به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$f = \sum_{i=1}^N (n\sigma_y - \sigma_{e_i})^2 \leq 0 \quad (18)$$

در این رابطه  $n$  ضریب ایمنی طراحی بوده و توسط طراح و بر اساس کاربرد موتور تعیین می‌شود و حداقل برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. برای یک دیسک خاص می‌توان قیودی را وضع نمود که طراحی بیش‌ازپیش قابل کنترل باشد.

این قیود می‌تواند توسط طراح و یا کارفرما تعیین شده و مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، باید به این نکته توجه داشت که با توجه به محدودیت‌های طراحی و ساخت، قیدهای زیر باید در هنگام تحلیل بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. در دیسک مطلوب قیود حاکم مطابق با رابطه (۱۹) بیان شده است:

$$\begin{aligned} g_1 &= \max\{h - ub\} \leq 0 \\ g_2 &= \min\{lb - h\} \leq 0 \\ g_3 &= \max\{mass\} \geq 0 \\ g_4 &= \min\{mass\} \leq \text{Initial Mass} \\ g_5 &= \min\{n\} \geq 1.0 \end{aligned} \quad (19)$$

$ub$  و  $lb$  به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده اند.

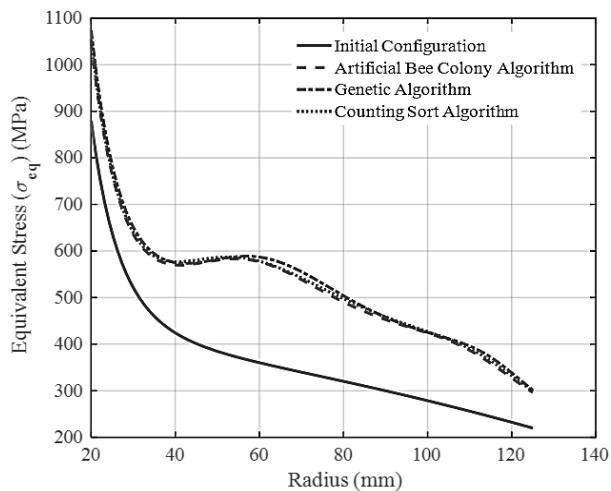
## ۵- تحلیل دیسک اولیه دوار موتور توربین هوایی

پس از فراگیری نکات لازم و روابط مورد نیاز جهت تحلیل رفتار ترموالاستیک دیسک دوار و آشنایی با اصول بهینه‌سازی مختلف و معرفی توابع و قیود مدنظر مسئله، در ادامه ابتدا به بررسی دیسک اولیه موجود با ساختار یک دیسک با هندسه اولیه ضخامت ثابت پرداخته خواهد شد. سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی  $GA$ ،  $CSA$  و  $ABC$  هندسه بهینه محاسبه و رفتار

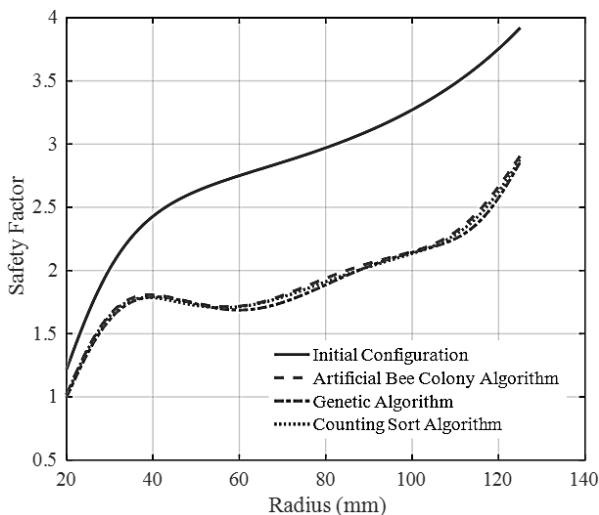


جدول ۱ مشخصات ترمومکانیکی دیسک مفروض

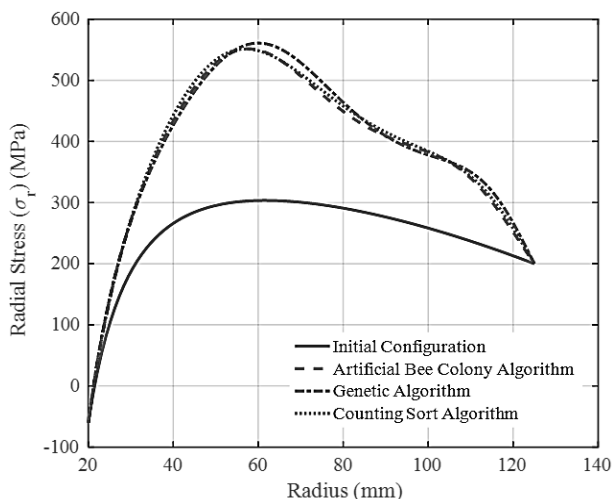
مشخصات مکانیکی		جنس ماده
سطح داخلی	سطح خارجی	مشخصه
۲۵	۱۵۰	حرارت (°C)
-۶۰	۲۰۰	تنش شعاعی (MPa)
۲۰	۱۲۵	شعاع (mm)
۱۰۷۰	۸۶۲	استحکام تسلیم کششی (MPa)
۱۱۹		مدول الاستیسیته ینگ (GPa)
۴۴۲۸/۷۸		چگالی ( $Kg/m^3$ )
۲۲۰۰۰		سرعت زاویه‌ای (rpm)
۹e-۶		ضریب انبساط حرارتی ( $1/°C$ )
۰/۳۱		ضریب پواسون
۷۸۶		حد تسلیم الاستیک (MPa)
۳۰		ضخامت اولیه دیسک (mm)



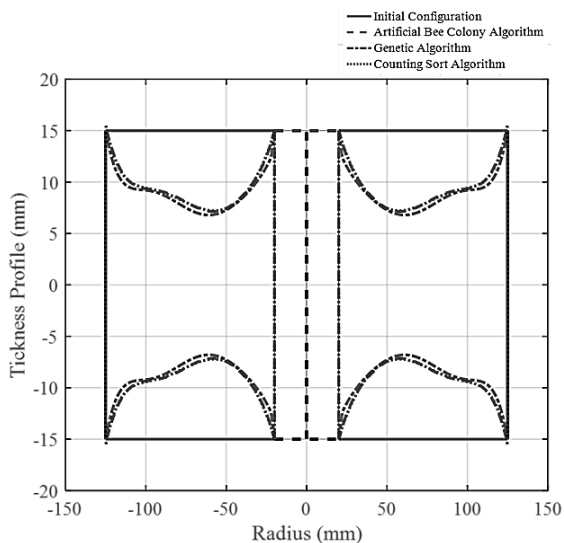
شکل ۱۰ نمودار مقایسه توزیع تنش معادل دیسک اولیه و بهینه با استفاده از روش‌های ABC، GA، CSA، برحسب مختصات شعاعی



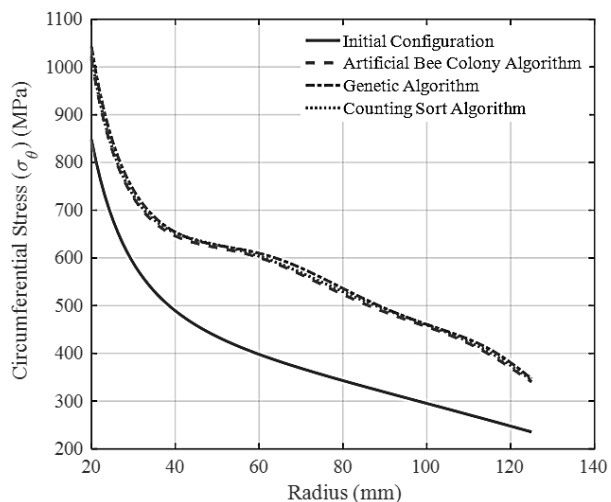
شکل ۱۱ نمودار مقایسه تغییرات ضریب اطمینان دیسک اولیه و بهینه با استفاده از روش‌های ABC، GA، CSA، برحسب مختصات شعاعی



شکل ۸ نمودار مقایسه توزیع تنش شعاعی دیسک اولیه و بهینه با استفاده از روش‌های ABC، GA، CSA، برحسب مختصات شعاعی



شکل ۱۲ نمودار مقایسه توزیع پروفیل ضخامت دیسک اولیه و بهینه با استفاده از روش‌های ABC، GA، CSA، برحسب مختصات شعاعی



شکل ۹ نمودار مقایسه توزیع تنش محیطی دیسک اولیه و بهینه با استفاده از روش‌های ABC، GA، CSA، برحسب مختصات شعاعی

جدول ۲ مقایسه نتایج و میزان بهبود سازه دیسک مفروض در قیاس با هندسه اولیه

روش بهینه‌سازی	زمان تقریبی حل (دقیقه)	حداقل ایمنی	جرم بهینه دیسک (کیلوگرم)	درصد بهبود نسبت به هندسه اولیه
هندسه اولیه	۱	۱/۲۱	۶/۳۵	-
الگوریتم شمارشی	۳۵۰۰	۱/۰۱	۴/۰۳	۳۶٪/۴۹
الگوریتم ژنتیک	۱۲۰	۱/۰۰	۳/۸۴	۳۹٪/۵۱
کلونی زنبور عسل	۱۰۰	۱/۰۲	۴/۰۴	۳۶٪/۴۳

GA و ABC با یکدیگر نزدیکی و تطابق بسیار خوب و قابل قبولی را نشان می‌دهند. همچنین در حالت بهینه به دست آمده در قیاس با هندسه و ماده اولیه، جرم نهایی از ۶/۳۵ کیلوگرم به حدود ۴/۰۳ کیلوگرم کاهش یافت که در حدود ۳۶ درصد بهبود و کاهش جرم در اثر بهینه‌سازی را نشان داده است. در هر دو حالت اولیه و بهینه میزان تنش محیطی بیش از سایر مؤلفه‌های تنش و به نوعی مؤلفه بحرانی تنش شناخته شد. همچنین با استفاده از معیار فون میزس مشاهده شد، سطح داخلی دیسک در هر دو حالت به نسبت سطح خارجی تحت تنش‌های شدیدتری قرار گرفته که می‌توان با مقاوم‌سازی این نواحی، با توجه به محدودیت‌های طراحی استحکام این نواحی که بحرانی‌تر از سایر نقاط می‌باشند را افزایش داد. با تحلیل دیسک به ازای مقادیر مختلف ضخامت می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ضخامت ضریب اطمینان آن ناحیه، بهبود چشمگیری پیدا می‌کند. اما از طرفی منجر به افزایش شدید جرم نهایی خواهد شد که بایستی در طراحی آن را در نظر گرفت. لذا در صورت عدم مغایرت با محدودیت‌های طراحی می‌توان از ایده افزایش ضخامت به عنوان راه‌حلی پیشنهادی جهت امکان‌سنجی کاهش تنش بر سازه و متعاقباً افزایش ضریب اطمینان آن نام برد.

## ۷- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

E	مدول الاستیک (GPa)
k	ضریب هدایت حرارتی ( $1/^\circ C$ )
m	جرم دیسک (Kg)
n	ضریب اطمینان
r	موقعیت شعاعی دیسک (m)
t	ضخامت دیسک
T	حرارت ( $^\circ C$ )
u	جابجایی دیسک (m)

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\nu$	ضریب پواسون
$\omega$	سرعت زاویه‌ای (rpm)
$\sigma$	تنش (استحکام) (MPa)

### زیرنویس‌ها

e	معادل
i	سطح داخلی دیسک
o	سطح خارجی دیسک
r	شعاعی
$\theta$	محیطی

در پایان با توجه به نتایج حاصل از هر سه روش بهینه‌سازی ارائه شده شامل GA، CSA و ABC پروفیل هندسی دیسک با جرم بهینه، ضریب اطمینان قابل قبول و ضخامت مقید در سطوح داخلی و خارجی به دست آمد. نزدیکی و انطباق قابل قبول نتایج به دست آمده خود به نوعی نشان‌دهنده صحت نتایج می‌باشد. نتایج نشان داد استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای سازه دیسک مفروض می‌تواند منجر به کاهش در حدود ۳۶ تا ۴۰ درصد در جرم نهایی آن گردد که با توجه به اهمیت بسیار بالای فاکتور وزن بسیار قابل توجه می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت و کاربرد قابل توجه سازه دیسک در موتورهای توربینی و سهم قابل توجه آن در وزن کل موتور در پژوهش حاضر به بررسی تنش این سازه در معرض شرایط کاری شامل دوران با سرعت ثابت، گرادیان حرارتی و تنش‌های داخلی و خارجی ناشی از تماس با شفت داخلی و اثر دوران پره‌ها به صورت ترموالاستیک پرداخته شد. دیسک اولیه ساخته شده از ماده همگن Ti6Al4V-Anealed و با هندسه ضخامت ثابت و مشخص محاسبه و با محاسبه ضریب اطمینان به دست آمده امکان‌سنجی ساخت آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پس از معرفی وزن به عنوان هدف بهینه‌سازی و معرفی قیود بهینه‌سازی، روش‌های گرادیانی CSA و غیرگرادیانی GA و ABC به منظور بهینه‌سازی دیسک بکار گرفته شد.

پس از مقایسه نتایج می‌توان مشاهده کرد، پروفیل بهینه به دست آمده در اثر بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های CSA،

vol. 82, no. 1, pp. 35-41, 2005. doi: 10.1016/j.ijpvp.2004.06.006.

- [11] S. Mohan and D. Maiti, "Structural optimization of rotating disk using response surface equation and genetic algorithm," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 14, no. 2, pp. 124-132, 2013. doi: 10.1080/15502287.2012.698712.
- [12] M. Khorsand and Y. Tang, "Design functionally graded rotating disks under thermoelastic loads: Weight optimization," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 161, pp. 33-40, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.02.002>.
- [13] B. Shahriari, M. Sadeghinezhad, and S. Yousefi, "Thermoelastic analysis of compressor spool in turbojet engine and redesign it using functionally graded materials with optimal coefficients," *Mechanics of Advanced Composite Structures*, vol. 6, no. 2, pp. 167-179, 2019. doi: 10.22075/mac.2019.14686.1144.
- [14] P. Tharun, M. Dharshan Siddarth, D. Prakash, and K. Babu, "Analysis and optimization on functionally graded rotating disk using grey relational method," in *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of ICEMMM 2018*, 2019: Springer, pp. 297-308. doi: 10.1007/978-981-13-1724-8\_29.
- [15] H. M. A. Abdalla, D. Casagrande, and L. Moro, "Thermo-mechanical analysis and optimization of functionally graded rotating disks," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 55, no. 5-6, pp. 159-171, 2020. doi: 10.1177/0309324720904793.
- [16] F. Ahmad, Vishvajeet, V. Yadav, and S. Chauhan, "Finite Element Analysis-Based Geometry Optimization of a Disk Brake," in *Advancement in Materials, Manufacturing and Energy Engineering*, Vol. I: Select Proceedings of ICAMME 2021, 2022: Springer, pp. 225-240, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5371-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5371-1_20).
- [17] S. Rahman, "Optimum material distributions for minimizing stresses in a rotating functionally graded material circular disk," 2022.
- [18] B. Wang, G. Wang, Y. Shi, L. Huang, and K. Tian, "Stress-constrained thermo-elastic topology optimization of axisymmetric disks considering temperature-dependent material properties," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 28, pp. 7459-7475, 2022. doi: 10.1080/15376494.2021.2000080.
- [1] B. MacIsaac and R. Langton, *Gas turbine propulsion systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] S. Timoshanko and T. Goodier, "Theory of elasticity McGraw-Hill," ed: New York, USA, 1970.
- [3] F. Vivio and L. Vullo, "Elastic-plastic analysis of rotating disks having non-linearly variable thickness: residual stresses by overspeeding and service stress state reduction," *Annals of Solid and Structural Mechanics*, vol. 1, pp. 87-102, 2010.
- [4] Y. Zheng, H. Bahaloo, D. Mousanezhad, E. Mahdi, A. Vaziri, and H. Nayeb-Hashemi, "Stress analysis in functionally graded rotating disks with non-uniform thickness and variable angular velocity," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 119, pp. 283-293, 2016. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.10.018.
- [5] S. Yousefi, B. Shahriari, and M. s. Sadeghinezhad, "Elastic analysis of the rotating FGM spool drum of the axial compressor in aero gas turbine engine," (in Persian), *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 55-66, 2020. [Online]. Available: [https://www.astjournal.ir/article\\_38496\\_0c8f98c5e9590bbb9e60d7bf027ae630.pdf](https://www.astjournal.ir/article_38496_0c8f98c5e9590bbb9e60d7bf027ae630.pdf).
- [6] B. Shahriari, and M. S., Sadeghi Nezhad, "Investigation on Effective Factors in Thermoelastic Analysis of FGM Rotating Drum in Air Turbine Engine under Nonlinear Thermal Loading," *Mechanics of Advanced and Smart Materials*, vol. 1, no. 2, pp. 106-135, 2022. [in Persian] doi:10.52547/masm.1.2.106.
- [7] J. Chern and W. Prager, "Optimal design of rotating disk for given radial displacement of edge," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 6, pp. 161-170, 1970. doi:10.1007/BF00927049.
- [8] V. Malkov and E. SALGANSKAIA, "Optimal material distribution in rotating discs for maximal strength," *Soviet Aeronautics*, vol. 19, no. 3, pp. 46-50, 1976.
- [9] B. Farshi, H. Jahed, and A. Mehrabian, "Optimum design of inhomogeneous non-uniform rotating discs," *Computers & structures*, vol. 82, no. 9-10, pp. 773-779, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.02.005>.
- [10] H. Jahed, B. Farshi, and J. Bidabadi, "Minimum weight design of inhomogeneous rotating discs," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*,

- [23] S. S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2019.
- [24] D. Kirk, "Optimal Control Theory: An Introduction, Courier Corporation," *Courier Corporation*, 2012.
- [25] C. Karr and L. M. Freeman, *Industrial applications of genetic algorithms*. CRC press, 1998.
- [26] V. Tereshko and T. Lee, "How information-mapping patterns determine foraging behaviour of a honey bee colony," *Open Systems & Information Dynamics*, vol. 9, no. 2, pp. 181-193, 2002. Doi: 10.1023/A:1015652810815.
- [27] D. Karaboga and B. Akay, "A comparative study of artificial bee colony algorithm," *Applied mathematics and computation*, vol. 214, no. 1, pp. 108-132, 2009. doi: 10.1016/j.amc.2009.03.
- [19] Y. Cheng, L. Ce, D. Han, W. Cunfu, and Y. Zeyong, "Topology optimization of turbine disk considering maximum stress prediction and constraints," *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023. doi: 10.1016/j.cja.2023.03.019.
- [20] R. Madan and S. Bhowmick, "Optimum FG rotating disk of constant mass: lightweight and economical alternatives based on limit angular speed," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 1019-1033, 2023. doi: 10.1007/s40997-022-00553-6.
- [21] S. Rahman and M. A. Ali, "A Novel Approach to Optimize Material Distributions of Rotating Functionally Graded Circular Disk under Minimum and Prescribed Stresses," *Materials Today Communications*, p. 106620, 2023. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.106620.
- [22] J. D. Mattingly, K. M. Boyer, and H. von Ohain, *Elements of propulsion: gas turbines and rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Reston, VA, 2006.

## تکامل تاریخی مدل های ویسکوزیته گردابی در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ جریان های متلاطم

**چکیده:** به دلیل پیچیدگی جریان های متلاطم، حل معادلات حاکم با جزئیات کامل امکان پذیر نیست. بنابراین از دیرباز روش های مختلفی برای حل معادلات و بررسی مشخصه های جریان متلاطم پیشنهاد شده است. از مهم ترین این روش ها می توان به شبیه سازی عددی مستقیم، شبیه سازی گردابه های بزرگ و میانگین گیری رینولدز معادلات نویر-استوکس اشاره کرد. شبیه سازی گردابه های بزرگ از لحاظ دقت و هزینه محاسبات، بین دو روش دیگر قرار دارد. در این روش، با اعمال یک فیلتر پایین گذر ساختار های بزرگ و کوچک جریان از یکدیگر جدا می شوند. ساختار های بزرگ حل و ساختار های کوچک مدل می شوند. تا کنون مدل های مختلفی برای ساختار های کوچک یا زیر شبکه پیشنهاد شده است. مدل های ویسکوزیته گردابی از معمول ترین این مدل ها هستند. اولین و ساده ترین مدل ویسکوزیته گردابی مدل اسماگورینسکی استاندارد است. دقت این مدل به ویژه برای هندسه های پیچیده بسیار کم است، به همین دلیل پژوهش های مختلفی به منظور افزایش دقت مدل اسماگورینسکی استاندارد انجام شده است که منجر به ارائه مدل های ویسکوزیته گردابی دقیق تر شده است. مدل اسماگورینسکی دینامیکی، مدل دینامیکی موضعی و مدل دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس از دیگر مدل های پر کاربرد هستند. در این مقاله، سیر پیشرفت مدل های ویسکوزیته گردابی مورد استفاده در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ به تفسیر ارائه شده است.

**واژه های راهنما:** جریان متلاطم، روش های عددی، شبیه سازی گردابه های بزرگ، مدل های ویسکوزیته گردابی، مدل اسماگورینسکی

فرنگیس مهدی  
زاده قوهه  
دانشجوی دکتری

**لیلا نصر آزادانی\***

استادیار،  
دانشکده مهندسی شیمی،  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر،  
تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

Farangis  
Mahdizadeh  
Ghohe  
PhD Student

**Leila N. Azadani\***  
Assistant Professor,  
Department of Chemical  
Engineering,  
Amirkabir University of  
Technology, Tehran

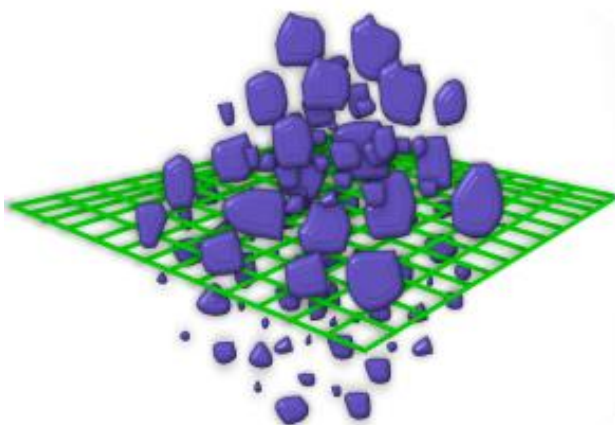
## Historical evolution of eddy viscosity models in large eddy simulation of turbulent flows

**Abstract:** Due to the complexity of turbulent flows, it is not possible to solve the governing equations in full detail. Therefore, different numerical approaches have been proposed to solve the governing equations and analyze the flow characteristics. The most important methods include Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES) and Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS). In terms of accuracy and computational cost, large eddy simulation is in between two other methods. In this method, large and small scales are separated by applying a low-pass filter. Large scales are solved and small scales are modeled. So far, various models have been presented for small or subgrid scales. Eddy viscosity models are the most common models used for this purpose. The first and simplest eddy viscosity model is the standard Smagorinsky model. The accuracy of this model is low, especially for complex geometries. Therefore, various studies have been conducted to increase the accuracy of this model. The dynamic Smagorinsky model, dynamic localization model, and scale-dependent dynamic model are among the most widely used models. In this paper, the progress of eddy viscosity models used in large eddy simulation is presented.

**Keywords:** Turbulent flow, numerical methods, large eddy simulation, eddy viscosity models, Smagorinsky model

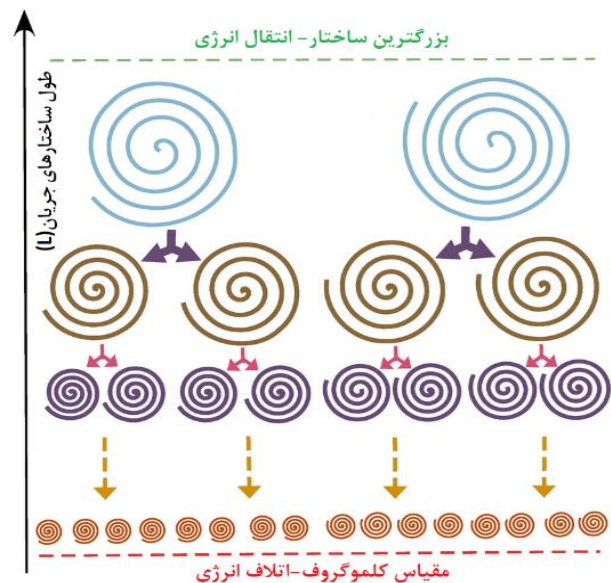
## ۱- مقدمه

نیاز است [۳]. جریان های متلاطم براساس سه روش عددی شبیه سازی عددی مستقیم<sup>۴</sup>، شبیه سازی گردابه های بزرگ<sup>۵</sup> و میانگین گیری رینولدز معادلات نویر-استوکس<sup>۶</sup> مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرند [۴]. در روش شبیه سازی عددی مستقیم با اعمال یک شبکه محاسباتی ریز همه ساختار های جریان حل می شوند. در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، با اعمال یک فیلتر پایین گذر<sup>۷</sup>، ساختار های جریان متلاطم به ساختار های بزرگ و ساختار های کوچک یا زیر شبکه<sup>۸</sup> تقسیم می شوند. معادلات حاکم بر جریان برای ساختار های بزرگ حل می شوند، در حالی که ساختار های کوچک مدل می شوند [۵]. شکل (۲) جداسازی ساختار های جریان توسط فیلتر شبکه محاسباتی را نشان می دهد. در روش میانگین گیری رینولدز معادلات نویر-استوکس، متغیر های جریان به صورت مجموع یک مقدار متوسط و اغتشاشات نوشته می شوند. معادلات حاکم بر جریان برای مقادیر متوسط حل می شوند و تاثیر اغتشاشات مدل می شود. روش شبیه سازی گردابه های بزرگ از لحاظ دقت و زمان محاسبات بین دو روش دیگر قرار دارد. مدل سازی ساختار های کوچک در این روش از طریق روش های مختلف انجام می شود. از مهم ترین این روش ها می توان به مدل های ویسکوزیته گردابی<sup>۹</sup> اشاره کرد [۶]. با گذشت زمان و تحقیقات بیشتر، دقت این مدل ها افزایش یافته است. در این پژوهش سعی شده است تا روند تغییرات و پیشرفت مدل های ویسکوزیته گردابی در جهت توسعه روش شبیه سازی گردابه های بزرگ به تفصیل بیان شود.



شکل ۲ جداسازی ساختار های جریان متلاطم با استفاده از فیلتر شبکه محاسباتی [۷]

جریان های جوی و اقیانوسی، جریان خون در رگ های نزدیک به قلب، جریان هوا اطراف هواپیما، جریان آب اطراف کشتی و جریان نفت در لوله های انتقال نمونه های رایج جریان متلاطم در طبیعت و صنعت هستند. با توجه به گستردگی جریان های متلاطم، مطالعه و بررسی ویژگی های این جریان ها از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از تئوری های متداول برای تحلیل رفتار فیزیکی جریان های متلاطم تئوری آبشار انرژی ریچاردسون<sup>۱</sup> است. به طور کلی تصور می شود که جریان های متلاطم از گردابه هایی با مقیاس های زمانی و مکانی مختلف تشکیل شده اند. طبق تئوری آبشار انرژی ریچاردسون، انرژی از ساختار های بزرگ جریان به ساختار های کوچک انتقال می یابد و این انتقال تا زمانی ادامه پیدا می کند که انرژی به کوچکترین ساختار جریان، که ساختار کولموگوروف<sup>۳</sup> نامیده می شود، منتقل شود. سرانجام در ساختار های کوچک انرژی به صورت گرما تلف می شود [۱]. شکل (۱) تئوری آبشار انرژی را نشان می دهد.



شکل ۱ انتقال انرژی بین ساختار های جریان متلاطم بر اساس تئوری آبشار انرژی ریچاردسون [۲]

جزئیات و پیچیدگی های جریان متلاطم را می توان با استفاده از روش های عددی بررسی کرد. اما برای انجام شبیه سازی عددی به ابررایانه های قوی و صرف مدت زمان طولانی

<sup>6</sup> Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

<sup>7</sup> Low-pass Filter

<sup>8</sup> Sub-grid Scale

<sup>9</sup> Eddy viscosity

<sup>1</sup> Richardson

<sup>2</sup> Eddy

<sup>3</sup> Kolmogorov

<sup>4</sup> Direct Numerical Simulation (DNS)

<sup>5</sup> Large Eddy Simulation (LES)

## ۲- معادلات حاکم بر روش شبیه سازی گردابه های بزرگ

در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، با اعمال یک فیلتر بر متغیرهای جریان شامل سرعت و فشار ساختارهای بزرگ جریان که متناظر با فرکانس های کم هستند و ساختارهای کوچک جریان که متناظر با فرکانس های زیاد هستند از هم جدا می شوند. اگر تابع فیلتر با  $G$  نشان داده شود و  $\phi$  یک متغیر دلخواه جریان باشد، مقدار متغیر فیلتر شده،  $\bar{\phi}$ ، طبق رابطه (۱) بدست می آید [۸]:

$$\bar{\phi}(x, t) = \iint_{-\infty}^{\infty} \phi(\mathbf{r}, \tau) G(\mathbf{x} - \mathbf{r}, t - \tau) d\mathbf{r} d\tau \quad (1)$$

و رابطه بین مقدار متغیر فیلتر شده و مقدار متغیر زیرشبکه،  $\phi'$ ، به صورت زیر است:

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x, t) + \phi'(x, t) \quad (2)$$

معادلات حاکم بر روش شبیه سازی گردابه های بزرگ برای جریان های متلاطم تراکم ناپذیر با اعمال یک فیلتر بر روی معادلات نویر-استوکس به دست می آیند. معادلات به دست آمده به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

که  $x, u, P, \nu$  و  $\tau_{ij}$  به ترتیب مکان، سرعت، فشار، ویسکوزیته سینماتیکی و تنش زیر شبکه<sup>۱</sup> یا تنش رینولدز هستند. تنش زیر شبکه طبق معادله (۵) تعریف می شود [۹]:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

تاکنون مدل های مختلفی مانند بازسازی سرعت زیرشبکه<sup>۲</sup>، تشابه مقیاسی<sup>۳</sup>، آماری<sup>۴</sup> و ویسکوزیته گردابی برای مدل کردن رفتار ساختارهای زیر شبکه ارائه شده است. در مدل بازسازی سرعت زیرشبکه، سرعت ساختارهای کوچک با استفاده از سرعت ساختارهای بزرگ و با کاربرد روش های مناسب محاسبه می شود [۱۰، ۱۱]. در مدل تشابه مقیاسی فرض می شود که تبادل انرژی از تمام ساختارهای بزرگ حل شده به ساختارهای

کوچک مدل شده، مشابه انتقال انرژی از کوچکترین ساختار حل شده به بزرگترین ساختار مدل شده است [۱۲]. در مدل های آماری میدان سرعت ساختارهای زیرشبکه از طریق متغیرهای تصادفی مدل می شود [۱۳]. ولی پرکاربردترین مدل زیرشبکه در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، مدل های ویسکوزیته گردابی هستند. این مدل ها اغلب از فرضیه بوزینسک<sup>۵</sup> تبعیت می کنند. طبق این فرضیه تنش رینولدز رابطه ای خطی با تنسور نرخ کرنش دارد [۱۴].

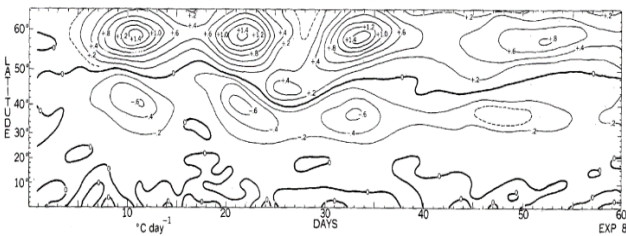
مدل های تنش زیرشبکه بر اساس ویسکوزیته گردابی به صورت زیر بیان می شوند:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

که  $\delta_{ij}$ ،  $\nu_t$  و  $\bar{S}_{ij}$  به ترتیب تابع دلتا دیراک<sup>۶</sup>، ویسکوزیته گردابی و تنسور نرخ کرنش بر اساس سرعت فیلتر شده هستند [۱۵]. مدل های مختلف ویسکوزیته گردابی براساس نوع مدل و روشی که برای تخمین ویسکوزیته گردابی پیشنهاد می دهند متمایز می شوند.

## ۳- انواع مدل های ویسکوزیته گردابی



شکل ۳ عکس جوزف اسماگورینسکی بنیانگذار روش شبیه سازی گردابه های بزرگ به همراه نمودار توزیع شارحرارتی جو نصف النهاری توسط گردابه های متلاطم به عنوان تابعی از زمان و عرض جغرافیایی در اولین پژوهش او [۱۶]

<sup>4</sup> Stochastic

<sup>5</sup> Boussinesq

<sup>6</sup> Dirac delta function

<sup>1</sup> Subgrid stress

<sup>2</sup> Subgrid velocity reconstruction

<sup>3</sup> Scale similarity

نیوتنی، از این روش برای بررسی جریان متلاطم سیالات غیرنیوتنی مختلف نیز استفاده شده است. به طوری که اوتا و میاشیتا در سال ۲۰۱۴ از روش های شبیه سازی عددی مستقیم و شبیه سازی گردابه های بزرگ برای بررسی جریان متلاطم سیالات غیرنیوتنی مدل قانون توان<sup>۳</sup> و کیسون<sup>۴</sup> بین دو صفحه موازی استفاده کردند. آنها تلاطم نزدیک دیواره را برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی درون کانال در اعداد رینولدز پایین بررسی کردند تا انحراف رفتار ساختارهای جریان متلاطم کاملا توسعه یافته غیرنیوتنی در نزدیکی دیواره از سیال نیوتنی را مشاهده کنند. سپس قابلیت مدل اسمگورینسکی تعمیم یافته را با استفاده از روش شبیه سازی عددی مستقیم ارزیابی کردند. در مدل اسمگورینسکی تعمیم یافته<sup>۵</sup> پارامترهایی شامل تابع میرایی دیواره ون درایست<sup>۶</sup> ( $f_s$ ) و تابع تصحیح<sup>۷</sup> ( $f_n$ ) برای در نظر گرفتن غیرنیوتنی بودن سیال به معادله اسمگورینسکی اضافه شد. ویسکوزیته گردابی در مدل اسمگورینسکی تعمیم یافته برای سیالات غیرنیوتنی طبق رابطه ی زیر تعریف می شود [۲۷]:

$$\nu_t = C_s f_s (f_n \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

$C_s$  در این رابطه ضریب اسمگورینسکی و برابر با مقدار ثابت ۰/۱ است. مدل تعمیم یافته ی اسمگورینسکی با اینکه می تواند تنش رینولدز را برای هر دو سیال غیرنیوتنی رقیق شونده برشی<sup>۸</sup> و غلیظ شونده ی برشی<sup>۹</sup> با دقت معقولی پیش بینی کند، اما ضعف ثابت بودن ضریب اسمگورینسکی را به همراه دارد [۲۸].

در سال ۱۹۹۱ جرمانو و همکاران برای محاسبه دقیق تر ضریب اسمگورینسکی مدلی را ارائه کردند. مطالعه آنها سرآغاز مدل های اسمگورینسکی دینامیکی است. در مدل جرمانو ضریب اسمگورینسکی از پیش تعیین نمی شود بلکه براساس نتایج محاسبات انجام شده ضریب اسمگورینسکی در هر لحظه از زمان و در هر مکان به صورت دینامیک تعیین می شود. در این روش از دو فیلتر با اندازه مختلف استفاده می شود، معمولا یک فیلتر شبکه محاسباتی است و فیلتر دیگر به عنوان فیلتر آزمون شناخته می شود. با اعمال فیلتر آزمون بر روی رابطه (۴) رابطه (۱۱) به دست می آید:

روش شبیه سازی گردابه های بزرگ اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط جوزف اسمگورینسکی مدیر آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیک اداره ملی اقیانوس شناسی و جوی<sup>۱</sup> آمریکا برای پیش بینی جریان های جوی پیشنهاد شد و کاربردهای اولیه نیز در همین زمینه بوده است. شکل (۳) توزیع شارحرارتی توسط گردابه های متلاطم در نخستین مطالعه اسمگورینسکی را نشان می دهد [۱۶].

در مدل اسمگورینسکی ویسکوزیته گردابی با مربع عرض فیلتر و اندازه تنسور نرخ کرنش متناسب است. با این مفروضات، ویسکوزیته گردابی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\nu_t = C_s \Delta^2 |\bar{S}| \quad (8)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (9)$$

که  $C_s$ ،  $\Delta$  و  $|\bar{S}|$  به ترتیب ضریب اسمگورینسکی، عرض فیلتر و اندازه تنسور نرخ کرنش هستند. مقدار ضریب اسمگورینسکی در مدل اولیه و استاندارد عددی ثابت است [۱۶]. در سال ۱۹۷۰، دیردوف از مدل اسمگورینسکی برای مطالعه جریان متلاطم داخل کانال استفاده کرد و مقدار ضریب اسمگورینسکی را حدود ۰/۱ پیشنهاد کرد [۱۷]. در همان سال لیلی ضریب اسمگورینسکی را اصلاح کرد و در مدل لیلی-اسمگورینسکی مقدار ۰/۲۳ را پیشنهاد کرد [۱۸]. در سال ۱۹۷۵ شومان برای مطالعه جریان بین دو صفحه موازی و در لوله از این روش عددی استفاده کرد [۱۹]. به دلیل ثابت بودن ضریب اسمگورینسکی، مدل اسمگورینسکی استاندارد دقت کمی دارد. همچنین برای ارضای شرایط مرزی باید ویسکوزیته گردابی در نزدیکی دیواره ها کاهش یابد، به همین دلیل این مدل قادر به پیش بینی دقیق ویسکوزیته گردابی نیست [۲۰]. با وجود این به دلیل سادگی، در شبیه سازی گردابه های بزرگ به طور گسترده استفاده شده است. به طور مثال می توان به کاربرد این مدل در شبیه سازی فرآیند احتراق در کوره [۲۱]، جریان لایه مرزی اتمسفری خنثی<sup>۲</sup> [۲۲]، جریان جوی برای پیش بینی هوا [۲۳]، جریان داخل کانال ها [۲۴]، جریان لایه مرزی اطراف پره های توربین های بادی [۲۵] و جریان اطراف سرریز های جانبی کنگره ای [۲۶] اشاره کرد. با گذشت زمان و کاربرد هرچه بیشتر روش شبیه سازی گردابه های بزرگ برای شبیه سازی جریان متلاطم سیالات

<sup>6</sup> Wall damping function Van Driest

<sup>7</sup> Correction function

<sup>8</sup> Shear thinning

<sup>9</sup> Shear thickening

<sup>1</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>2</sup> Neutral atmospheric boundary layer

<sup>3</sup> Power-law model

<sup>4</sup> Casson model

<sup>5</sup> Extended Smagorinsky model



$$C_s = \frac{1}{2\bar{\Delta}^2} \langle L_{ij}\bar{S}_{ij} \rangle \quad (19)$$

که  $\langle \quad \rangle$  نشان دهنده عملیات متوسط گیری روی صفحه ای به موازات دیواره های کانال هست [۲۹].

در سال ۱۹۹۲ متیاس و لسیر مدل تابع ساختار<sup>۲</sup> را ارائه کردند. در این مدل ویسکوزیته گردابی با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\nu_t = C\Delta \sqrt{\bar{F}_2(\mathbf{x}, \Delta)} \quad (20)$$

که  $C$  مقداری ثابت است و  $\bar{F}_2$  تابع ساختار سرعت مرتبه دوم است و طبق رابطه (۲۱) تعریف می شود:

$$\bar{F}_2(\mathbf{x}, \Delta) = \langle [\bar{u}_i(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - \bar{u}_i(\mathbf{x})] [\bar{u}_i(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - \bar{u}_i(\mathbf{x})] \rangle \quad (21)$$

که  $|\mathbf{r}| = \Delta$  [۳۰].

نوراللهی و همکاران از مدل تابع ساختار اصلاح شده برای پیش بینی رفتار جریان متلاطم بر روی یک استوانه با سطح مقطع مربع و یک استوانه با سطح مقطع مستطیل با نسبت منظری بزرگ استفاده کردند. در مدل اصلاح شده ضریب ثابت در رابطه (۲۰)، به صورت دینامیک محاسبه شد. نتایج آنها نشان داد مدل تابع ساختار اصلاح شده دقت و پایداری بیشتری نسبت به مدل های پیشین دارد [۳۱].

در سال ۱۹۹۴ لیلی در جهت توسعه مدل پیشنهادی جرمانو راهکاری پیشنهاد کرد که در آن ضریب اسماگورینسکی را از روش حل کمترین خطای مربعات<sup>۳</sup> محاسبه می کرد.  $C_s$  تنها مجهول معادله (۱۷) است. اما چون این معادله برای بدست آوردن  $C_s$  دارای خطا است. خطای آن را می توان با تعریف معادله (۲۲) بیان کرد:

$$Q = \left( L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} - 2C_s \bar{\Delta}^2 M_{ij} \right)^2 \quad (22)$$

که  $Q$  خطاست. برای حداقل کردن  $Q$  باید مقدار  $\frac{\partial Q}{\partial C_s}$  صفر باشد. طبق مدل پیشنهادی لیلی  $C_s$  از معادله (۲۳) بدست می آید. این مدل به نام مدل دینامیکی لیلی-اسماگورینسکی مشهور است [۳۲].

$$C_s = \frac{1}{2\bar{\Delta}^2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

علامت  $\bar{\quad}$  نشان دهنده فیلتر ناشی از شبکه محاسباتی و علامت  $\tilde{\quad}$  نشان دهنده عملیات فیلتر آزمون است.  $T_{ij}$  تنش زیر شبکه است و مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$T_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (12)$$

$T_{ij}$  و  $\tau_{ij}$  را می توان با استفاده از تساوی جرمانو به صورت رابطه (۱۳) به هم مرتبط کرد:

$$L_{ij} = T_{ij} - \tilde{\tau}_{ij} \quad (13)$$

که  $L_{ij}$  به عنوان تنسور لئونارد<sup>۱</sup> شناخته می شود. با قرار دادن عبارت های مناسب به جای  $T_{ij}$  و  $\tilde{\tau}_{ij}$  تنسور لئونارد به صورت زیر بیان می شود:

$$L_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (14)$$

اگر  $T_{ij}$  و  $\tau_{ij}$  هر دو بر اساس مدل اسماگورینسکی استاندارد با ضریب یکسان مطابق روابط زیر تعریف شوند:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2C_s \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (15)$$

$$T_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} T_{kk} = -2C_s \tilde{\Delta}^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} \quad (16)$$

رابطه (۱۷) برای  $L_{ij}$  به دست می آید:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} = 2C_s \bar{\Delta}^2 M_{ij} = -2C_s \bar{\Delta}^2 \left( \frac{\tilde{\Delta}^2}{\bar{\Delta}^2} |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} - |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \right) \quad (17)$$

در این رابطه  $\bar{\Delta}$  و  $\tilde{\Delta}$  به ترتیب عرض فیلتر شبکه محاسباتی و عرض فیلتر آزمون هستند و  $M_{ij}$  پارامتری با مفهومی مشابه تنش رینولدز در مدل اسماگورینسکی دینامیکی است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$M_{ij} = \frac{\tilde{\Delta}^2}{\bar{\Delta}^2} |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} - |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (18)$$

با ضرب کردن طرفین معادله (۱۸) در  $\bar{S}_{ij}$  و متوسط گیری از طرفین رابطه،  $C_s$  طبق مدل ارائه شده توسط جرمانو برای جریان داخل کانال از رابطه زیر محاسبه می شود:

<sup>3</sup> Least-squares solution

<sup>1</sup> Leonard tensor

<sup>2</sup> Structure function model

در سال ۱۹۹۵ مدل دینامیکی موضعی<sup>۱</sup> توسط کاراتی و همکاران و گوسال و همکاران ارائه شد [۳۷، ۳۸]. بر اساس این مدل ضرایب  $C_s$  و  $C_\varepsilon$  به صورت دینامیک محاسبه می شوند. معادلاتی که در مدل اسمگورینسکی دینامیکی موضعی استفاده می شوند به صورت زیر هستند:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk} = -2C_s\bar{\Delta}k^{1/2}\bar{S}_{ij} \quad (28)$$

$$T_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}T_{kk} = -2C_s\tilde{\Delta}K^{1/2}\tilde{S}_{ij} \quad (29)$$

$K$  و  $k$  به ترتیب انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه بر اساس فیلتر شبکه محاسباتی و فیلتر آزمون هستند.  $k$  طبق رابطه (۲۵) تعریف می شود و  $K$  با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2}(\overline{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{1}{2}T_{ii} \\ &= \tilde{k} + \frac{1}{2}L_{ij} \end{aligned} \quad (30)$$

در نهایت ضریب اسمگورینسکی از رابطه (۳۱) حاصل می شود. این ضریب در مدل اسمگورینسکی دینامیکی موضعی، تابعی از زمان و مکان بوده و برای هردو فیلتر یکسان است [۳۸].

$$C_s = \frac{\langle L_{ij} \rangle}{4\langle \bar{\Delta}^2 |\bar{S}|^2 - \bar{\Delta}^2 |\tilde{S}|^2 \rangle} \quad (31)$$

در سال ۲۰۰۶ گراومیر روش جدیدی برای محاسبه  $C_s$  در مدل دینامیکی موضعی ارائه کرد. او مدل جدید را برای بررسی جریان متلاطم در یک کانال و در یک دیفیوزر صفحه‌ای نامتقارن امتحان کرد و نتایج قابل قبولی به دست آورد [۳۹]. پروار و همکاران جریان متلاطم را در هندسه پله با استفاده از دو مدل اسمگورینسکی و اسمگورینسکی دینامیکی موضعی به صورت دوبعدی مدل کردند. آنها این دو مدل را از لحاظ دقت و هزینه محاسباتی مقایسه کردند. طبق نتایج آنها مدل اسمگورینسکی دینامیکی موضعی به دلیل محاسبه ضریب اسمگورینسکی با توجه به شرایط جریان و در نظر گرفتن پدیده بازگشت انرژی مدل مناسب تری است، اما هزینه محاسباتی بیشتری دارد [۴۰].

همان طور که بررسی شد ضریب اسمگورینسکی در مدل های دینامیکی و دینامیکی موضعی در هر دو فیلتر استفاده شده یکسان است. منویو و لوند با استفاده از نتایج روش شبیه سازی عددی مستقیم متوجه شدند که این فرض مناسب نیست.

از مدل اسمگورینسکی دینامیکی در شبیه سازی جریان های متلاطم بسیاری استفاده شده است. برای مثال خانی و ویت برای مدل سازی جریان های متلاطمی که در راستای عمودی توسط گرانش کنترل می شوند از مدل اسمگورینسکی دینامیکی استفاده کردند [۳۳]. یون و همکاران نیز برای بررسی تاثیر عدد رینولدز بر روی میدان جریان در یک تانک همزن دار از مدل اسمگورینسکی دینامیکی استفاده کردند [۳۴]. کیانوش راد و نایت برای پیش بینی رفتار لایه مرزی روی یک صفحه تخت برای جریان متلاطم مافوق صوت از مدل اسمگورینسکی دینامیکی استفاده کردند. نتایج آنها نشان می دهد که روش شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل اسمگورینسکی دینامیکی نسبت به روش میانگین گیری رینولدز معادلات نویر-استوکس دقت بیشتری دارد [۳۵].

مهم ترین ضعف مدل اسمگورینسکی دینامیکی این است که فقط برای هندسه هایی که حداقل در یک راستا همگن باشند، قابل استفاده است. یک مدل زیرشبکه یک معادله ای در سال ۱۹۹۵ توسط کیم و منون ارائه شد. از تحلیل ابعادی، ویسکوزیته متلاطم حاصل ضرب یک سرعت مشخصه و یک مقیاس طولی است. جذر انرژی جنبشی ساختارهای زیرشبکه به عنوان سرعت و عرض فیلتر به عنوان مقیاس طول در نظر گرفته شد. در نتیجه ویسکوزیته گردابی با استفاده از رابطه (۲۴) تعریف می شود:

$$\nu_t = C_s \Delta k^{1/2} \quad (24)$$

که  $k$  انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه است و برابر است با:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{1}{2}\tau_{ii} \quad (25)$$

و با حل معادله انتقال زیر محاسبه می شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(k\bar{u}_i)}{\partial x_i} = -\tau_{ij}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i}\right) \quad (26)$$

که  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی تلاطم است و با رابطه زیر مدل می شود:

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{1/2}}{\Delta} \quad (27)$$

که  $C_\varepsilon$  در مدل اولیه مقداری ثابت از مرتبه یک در نظر گرفته شد. یکی از جنبه های این مدل این است که فرضی در مورد تعادل بین انرژی تولید شده توسط ساختارهای زیرشبکه و نرخ اتلاف انرژی در نظر نمی گیرد [۳۶].

<sup>1</sup> Dynamic localization model

دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی<sup>۲</sup> انجام شد. ضریب اسماگورینسکی در مدل دینامیکی وابسته به مقیاس از طریق متوسط گیری بدست می آید، در صورتی که در مدل وابسته به مقیاس لاگرانژی از طریق متوسط گیری لاگرانژی حاصل می شود. مدل وابسته به مقیاس لاگرانژی در شبیه سازی لایه مرزی جوی و در طیف وسیعی از سرعت و دما در دو حالت پایدار و ناپایدار دارای نتایج دقیقی است. کلیسل و همکاران برای مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی، شبیه سازی را در طول یک چرخه روزانه انجام دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که پیش بینی ضریب اسماگورینسکی بدست آمده از مدل مستقل از مقیاس بسیار کوچک است، در حالی که نتایج به دست آمده از مدل وابسته به مقیاس با نتایج تجربی سازگارتر است [۴۳]. وو و پورته-آجل در سال ۲۰۱۱ برای شبیه سازی جریان دنباله ایک توربین بادی از مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی همراه با مدل های توربین بادی استفاده کردند. نیروهای ناشی از توربین، با استفاده از دو مدل دیسک محرک استاندارد و دیسک محرک چرخشی بررسی شدند. نتایج بدست آمده برای هر دو مدل دیسک محرک استاندارد و چرخشی با نتایج بدست آمده از بادسنج سیم داغ<sup>۵</sup> مقایسه شد. به طور خاص مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی، سرعت متوسط را برای مدل دیسک محرک استاندارد، بیش از حد و شدت تلاطم را کمتر تخمین می زند، در حالی که برای مدل دیسک محرک چرخشی، پیش بینی های دقیق تری از تلاطم ارائه می دهد [۴۴]. مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی برای جریان های لایه مرزی با عدد رینولدز بزرگ بر روی سطوح هموار و ناهموار توسط بوزید و همکارانش بررسی شده است. آن ها نتایج حاصل از مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی را با سایر مدل های ویسکوزیته گردابی مقایسه کردند. برخلاف مدل اسماگورینسکی-لیلی که دارای اتلاف زیادی است و یا مدل دینامیکی وابسته به مقیاس که دارای اتلاف کم است، مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی ویژگی های اتلاف خوبی دارد [۴۵].

افستاتیو و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل دینامیکی وابسته به مقیاس ارائه کردند. این مدل در واقع بهبود یافته مدل ارائه شده توسط بوزید و همکاران بود. زمان محاسباتی این مدل دو برابر مدل اسماگورینسکی دینامیکی است.

بنابراین اولین بار بررسی مدل اسماگورینسکی دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس<sup>۱</sup> توسط منویو و لوند در سال ۱۹۹۷ مطرح شد. مدل پیشنهادی آن ها انقلابی در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ ایجاد کرد [۴۱]. بعد از مطالعات منویو و لوند، در سال ۲۰۰۰ استفاده از مدل اسماگورینسکی دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس، توسط پورته-آجل و همکاران برای شبیه سازی لایه مرزی اتمسفری خنثی استفاده شد. آن ها با در نظر گرفتن دو فیلتر آزمون و بدون فرض برابری آن ها، روابط زیر را در نظر گرفتند [۴۲]:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} = 2C_s(\tilde{\Delta}) \tilde{\Delta}^2 N_{ij} \quad (32)$$

که  $N_{ij}$  مفهومی مشابه  $M_{ij}$  در مدل اسماگورینسکی دینامیکی دارد و طبق معادله زیر در نظر گرفته می شود:

$$N_{ij} = \left| \widehat{S} \right| \widehat{S}_{ij} - 4^2 \frac{C_s(\tilde{\Delta})}{C_s(\widehat{\Delta})} \left| \widehat{S} \right| \widehat{S}_{ij} \quad (33)$$

در این معادلات  $C_s(\tilde{\Delta})$  و  $C_s(\widehat{\Delta})$  ضرایب اسماگورینسکی برای دو فیلتر آزمون هستند، با فرض این که عرض فیلتر آزمون اول  $\tilde{\Delta}$  و عرض فیلتر آزمون دوم  $\widehat{\Delta} = 2\tilde{\Delta}$  باشد. علامت  $\widehat{\quad}$  نشان دهنده عملیات فیلتر آزمون دوم است.  $C_s$  که در این مدل تابعی از زمان، مکان، و عرض فیلتر است پس از ضرب طرفین رابطه (۳۲) در  $N_{ij}$  و متوسط گیری از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_s = \frac{1}{2\tilde{\Delta}^2} \frac{\langle L_{ij} N_{ij} \rangle}{\langle N_{ij} N_{ij} \rangle} \quad (34)$$

به طور خلاصه، نتایج اساسی پژوهش پورته-آجل و همکارانش نشان داد که: (۱) مدل دینامیکی اسماگورینسکی را می توان تعمیم داد تا امکان وابستگی ضریب اسماگورینسکی به مقیاس را به روشی کاملاً دینامیکی و خودسازگار فراهم کند. (۲) شبیه سازی ها با چنین مدلی پایدار هستند و روند های مورد انتظار ضریب را به عنوان تابعی از مقیاس حاصل می کنند. و (۳) استفاده از این مدل باعث بهبود خواص اتلافی شده و در نتیجه پروفایل های سرعت متوسط به مقادیر واقعی نزدیکتر می شوند. محاسبات آن ها نشان داد که استفاده از این مدل نتایج را حتی در نزدیکی دیواره بهبود می بخشد [۴۲].

در سال ۲۰۰۶ شبیه سازی جریان لایه مرزی اتمسفری روی یک سطح هموار توسط کلیسل و همکاران با استفاده از مدل

<sup>4</sup> Movable disk

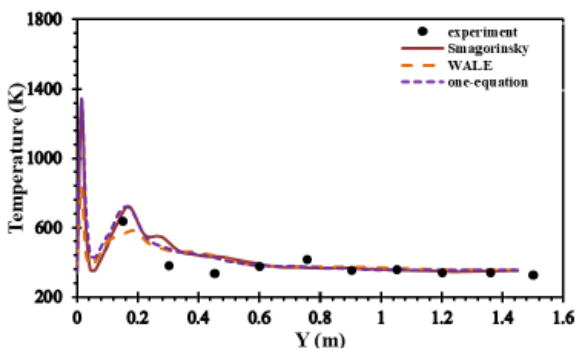
<sup>5</sup> Hot-wire anemometry

<sup>1</sup> Scale-dependent dynamic model

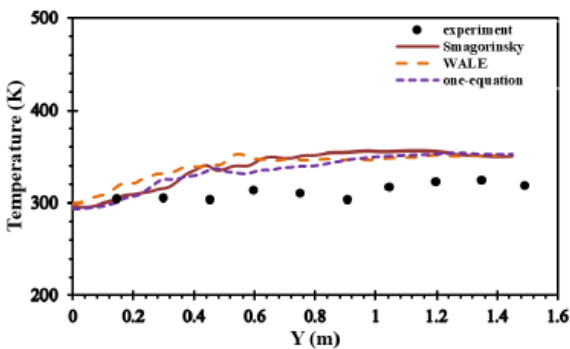
<sup>2</sup> Lagrangian scale-dependent dynamic model

<sup>3</sup> Wake

از میدان جریان حول یک ایرفویل استفاده کردند [۴۸]. مزیدی شرف آبادی و فتیح طی مطالعه ای دقت مدل های اسمگورینسکی استاندارد، دینامیکی، دینامیکی لاگرانژی و ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره را در شبیه سازی مزارع بادی مقایسه کردند. مدل اسمگورینسکی و مدل سازگار با دیواره به ترتیب کمترین و بیشترین سرعت متوسط را نشان دادند. مدل سازگار با دیواره و مدل دینامیکی لاگرانژی به ترتیب بیشترین و کمترین توان تولیدی را در توربین داشتند. به عنوان یک نتیجه کلی مدل اسمگورینسکی استاندارد در پیش بینی اتلاف انرژی جنبشی و سرعت متوسط پره های توربین بیشترین خطا را داشت [۴۹]. صفرزاده و همکاران آتش چرخشی در فضایی با ارتفاع زیاد را با مدل های ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره، اسمگورینسکی و یک معادله ای شبیه سازی کردند و با نتایج تجربی مقایسه کردند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود نتایج آن ها نشان داد که در خط مرکزی مدل ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره نسبت به دو مدل دیگر بهتر است. درحالی که در نواحی دور از مرکز هر سه مدل دقت یکسانی دارند [۵۰].



(الف)



(ب)

شکل ۴ مقایسه نتایج عددی مدل های ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره (WALE)، اسمگورینسکی و یک معادله ای و نتایج تجربی دمای متوسط در محفظه احتراق در الف) خط مرکزی و ب) نواحی نزدیک دیواره [۵۰]

ضریب اسمگورینسکی مطابق رابطه (۳۴) محاسبه می شود با این تفاوت که  $N_{ij}$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$N_{ij} = |\overline{S}| \overline{S}_{ij} f_m(Ri) - 16\beta^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} \tilde{f}_m(Ri) \quad (35)$$

$f_m(Ri)$  تابع پایداری<sup>۱</sup> مومنوم است که به عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) وابسته است.  $\beta$  نسبت ضریب اسمگورینسکی در فیلتر آزمون به فیلتر شبکه محاسباتی است و برخلاف  $C_s$  که وابسته به مقیاس است،  $\beta$  مستقل از مقیاس است و طبق رابطه (۳۶) بدست می آید:

$$\beta = \frac{C_{s_{4\Delta}}}{C_{s_{2\Delta}}} = \frac{C_{s_{2\Delta}}}{C_{s_{\Delta}}} \quad (36)$$

که  $C_{s_{4\Delta}}$ ،  $C_{s_{2\Delta}}$ ،  $C_{s_{\Delta}}$  ضریب اسمگورینسکی برای فیلترهایی با عرض  $\Delta$ ،  $2\Delta$  و  $4\Delta$  هستند [۴۶].

مدل سازی جریان در نزدیکی دیواره بسیار مهم است. یک مدل ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره<sup>۲</sup> (WALE) در هندسه های پیچیده توسط نیکود و داکروس پیشنهاد شد. این مدل که بر اساس مربع تنسور گرادیان سرعت است، اثرات نرخ کرنش و نرخ چرخش کوچکترین ساختارهای جریان را در نظر می گیرد. ویسکوزیته گردابی در این مدل با استفاده از رابطه زیر داده می شود:

$$\nu_t = (C_w \Delta)^2 \frac{(\delta_{ij}^d \delta_{ij}^d)^{3/2}}{(\overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij})^{5/2} + (\delta_{ij}^d \delta_{ij}^d)^{5/4}} \quad (37)$$

که  $C_w$  یک مقدار ثابت است و  $\delta_{ij}^d$  طبق رابطه (۳۸) تعریف می شود:

$$\delta_{ij}^d = \overline{S}_{ik} \overline{S}_{kj} + \overline{\Omega}_{ik} \overline{\Omega}_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} (\overline{S}_{mn} \overline{S}_{mn} - \overline{\Omega}_{mn} \overline{\Omega}_{mn}) \quad (38)$$

$\overline{\Omega}_{ij}$  تنسور نرخ چرخش است و طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$\overline{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (39)$$

با اینکه نیکود و داکروس از مدل اسمگورینسکی استاندارد برای شبیه سازی جریان استفاده کردند اما توانستند ویسکوزیته گردابی ساختارهای نزدیک دیواره را بدون نیاز به روش دینامیکی بازیابی کنند [۴۷]. کاویانی و بشتالم نیز از مدل ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره برای بررسی صوت ایروآکوستیک ناشی

<sup>2</sup> Wall-adapting local eddy viscosity

<sup>1</sup> Stability function

اسماگورینسکی دینامیکی استفاده کردند و در مدل دیواره پیشنهادی شرط عدم لغزش را با شرط لغزش جایگزین کردند. نتایج مدل دیواره پیشنهادی با نتایج تجربی همخوانی داشت [۵۳].

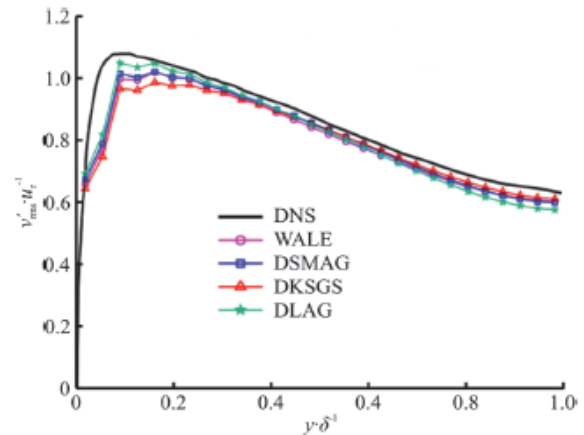
اغلب گزارش می شود که ضریب اسماگورینسکی دینامیکی موضعی در صورت عدم اعمال میانگین گیری به مقادیر بسیار بزرگی می رسد که باعث ناپایداری شبیه سازی می شود. تعیین ضریب اسماگورینسکی دینامیکی با روش حداقل مربعات موضعی<sup>۲</sup> دارای نقطه تکین<sup>۳</sup> است. این نقطه تکین می تواند مقادیر بسیار بزرگی از ضریب اسماگورینسکی دینامیکی را در شبیه سازی ایجاد کند و فرض بر این است که این یکی از دلایلی است که مدل اسماگورینسکی دینامیکی اغلب برای جلوگیری از ناپایداری به میانگین گیری نیاز دارد. روزما و همکارانش در سال ۲۰۲۲ با پیشنهاد مدل اسماگورینسکی گرادیان دینامیکی موضعی<sup>۴</sup> و با جایگزینی مستقیم تنسورهای نرخ کرنش حل شده، در مدل اصلی اسماگورینسکی با تنسور گرادیان سرعت حل شده، موارد شناسایی شده تکین را حذف کردند. مشخص شد که با این جایگزینی به طور قابل توجهی پایداری مدل با همان دقت مدل اسماگورینسکی دینامیکی افزایش می یابد. معادلات زیر روابط استفاده شده در مدل اسماگورینسکی گرادیان دینامیکی موضعی را نشان می دهد:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2C_s \bar{\Delta}^2 |\nabla \tilde{u}| (\partial_j \tilde{u}_i) \quad (41)$$

$$|\nabla \tilde{u}| = \sqrt{2 \partial_j \tilde{u}_i \partial_j \tilde{u}_i} \quad (42)$$

در این مدل  $|\nabla \tilde{u}|$  تنسور گرادیان سرعت و  $\bar{\Delta}$  عرض فیلتر آزمون است. پایداری، دقت خوب و کاهش پیچیدگی محاسباتی در مقایسه با روش اسماگورینسکی دینامیکی، مدل اسماگورینسکی گرادیان دینامیکی موضعی را به یک مدل امیدوارکننده برای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ تبدیل کرده است. با این حال بررسی بیشتر این مدل برای جریان های پیچیده تر و با تعداد شبکه محاسباتی کمتر نیاز به ارزیابی دارد [۵۴]. آگراوال و همکاران در سال ۲۰۲۲ طی مطالعه ای در دانشگاه استنفورد<sup>۵</sup> مدلی غیر بوزینسکی<sup>۶</sup> برای ساختارهای زیرشبکه پیشنهاد کردند. یک اشکال عمده مدل های تنش متلاطم نوع بوزینسک که در شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده می

زاو و همکاران به بررسی تاثیر مدل های زیرشبکه ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره (WALE)، اسماگورینسکی دینامیکی (DSMAG)، یک معادله ای (DKSGS) و دینامیکی لاگرانژی (DLAG) در شبیه سازی جریان متلاطم در یک کانال پرداختند. شکل (۵) نشان می دهد که نتایج مدل دینامیکی لاگرانژی به نتایج شبیه سازی عددی مستقیم نزدیک تر است و نسبت به مدل های دیگر عملکرد بهتری نشان می دهد [۵۱].



شکل ۵ مقایسه عملکرد مدل های ویسکوزیته گردابی سازگار با دیواره (WALE)، اسماگورینسکی دینامیکی (DSMAG)، یک معادله ای (DKSGS) و دینامیکی لاگرانژی (DLAG) در شبیه سازی جریان متلاطم در یک کانال [۵۱]

در سال ۲۰۱۶ مدل سازی جریان رادیواکتیو متلاطم در تانک همزن دار توسط مالک و همکارانش با استفاده از روش اسماگورینسکی بهبود یافته برشی<sup>۱</sup> انجام شد. این مدل با دقت کافی قادر به مدل سازی جریان متلاطم در نزدیکی دیواره است و تنش برشی میانگین ناشی از ناهمسانگردی جریان را نیز در نظر می گیرد. علاوه بر این، در مقایسه با مدل اسماگورینسکی استاندارد هزینه محاسباتی کمتری دارد. مدل اسماگورینسکی بهبود یافته ی برشی مانند مدل اسماگورینسکی استاندارد است با این تفاوت که ویسکوزیته متلاطم بر اساس معادله (۴۰) بدست می آید [۵۲]:

$$\nu_t = C_s \Delta^2 (|\bar{S}| - |\overline{S}|) \quad (40)$$

با و همکاران یک مدل دینامیکی لغزشی دیواره برای شبیه سازی گردابه های بزرگ جریان متلاطم روی صفحه تخت و داخل کانال در نزدیکی دیواره ارائه کردند. آن ها از مدل

<sup>4</sup> Local dynamic gradient Smagorinsky model

<sup>5</sup> Stanford University

<sup>6</sup> Non-Boussinesq subgrid-scale model

<sup>1</sup> Shear improved Smagorinsky model

<sup>2</sup> Local least-squares

<sup>3</sup> Singularity

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل های ویسکوزیته گردابی مورد استفاده در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ بررسی و روند تغییرات و پیشرفت آنها مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده می توان به این نتیجه رسید که ثابت بودن ضریب اسماگورینسکی در مدل استاندارد اسماگورینسکی علت دقت پایین این مدل است و باعث می شود این مدل قادر به پیش بینی ویسکوزیته گردابی در نزدیکی مرزها نباشد. بنابراین در مطالعات بیشتر مدل اسماگورینسکی دینامیکی برای رفع این موضوع پیشنهاد شد. ضریب اسماگورینسکی در مدل اسماگورینسکی دینامیکی به صورت دینامیکی نسبت به زمان و مکان تغییر می کند، بنابراین می تواند شرایط ویسکوزیته گردابی در مرزها را ارضا کند. اما این مدل فقط برای جریان هایی با حداقل یک راستای همگن قابل استفاده است. به همین دلیل پژوهشگران با بررسی بیشتر، مدل اسماگورینسکی دینامیکی موضعی را ارائه کردند که معایب دو مدل قبلی را رفع می کرد. اما ضریب اسماگورینسکی در این مدل در صورت عدم اعمال میانگین گیری به مقادیر بزرگی می رسد که باعث ناپایداری عددی می شود. در نهایت مدل اسماگورینسکی دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس مطرح شد. مدل اسماگورینسکی دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس با اینکه معایب سایر مدل های قبلی را ندارد و بیشترین دقت را دارا است، اما هزینه محاسبات این مدل با توجه به اینکه ضریب اسماگورینسکی در این مدل طبق مقیاس های جریان در طول شبکه محاسباتی تغییر می کند بیشتر از دیگر مدل ها است. اما در این بین محققان با اصلاحات مختلف در مدل های ویسکوزیته گردابی سعی در افزایش دقت و پایداری آن دارند. برای مثال استفاده از میانگین گیری لاگرانژی در مدل دینامیکی وابسته به مقیاس لاگرانژی و انجام اصلاحات بر مدل های قبلی از این موارد است. نقش چرخش ساختارهای جریان متلاطم با ارائه مدلی با ساختار زیرشبکه ای غیرخطی در محاسبه ویسکوزیته گردابی در نظر گرفته شد و این عبارت غیرخطی منجر به بهبود پیش بینی ناهمسانگردی تنش رینولدز شد. جایگزینی مستقیم تنسورهای نرخ کرنش حل شده در مدل اصلی اسماگورینسکی با تنسور گرادیان سرعت حل شده موضعی، موارد شناسایی شده تکین ضریب اسماگورینسکی را حذف کردند و پایداری مدل را بهبود بخشیدند. در مدل اسماگورینسکی با ضریب تنسور دینامیکی فرض می شود که تنش زیرشبکه لزوما

شوند، فرض متناسب بودن تنش ساختارهای زیرشبکه ای با نرخ کرنش ساختارهای حل شده است. درحالی که نتایج عددی نشان می دهد تنش ساختارهای زیرشبکه با نرخ کرنش ساختارهای حل شده همبستگی ضعیفی دارند. با اینکه روش دینامیکی نسبت به روش اسماگورینسکی استاندارد دقیق تر است، اما این روش نیز، خطای ذاتی تمام مدل های زیر شبکه ای بوزینسک را برطرف نمی کند. بنابراین آگروال و همکاران یک رابطه دینامیکی جدید برای مدل اسماگورینسکی پیشنهاد کردند. این مدل مبتنی بر ضریب تنسوری است و فرض متناسب بودن تنش ساختار زیرشبکه و نرخ کرنش ساختارهای حل شده را کاهش می دهد. این مدل، که به عنوان مدل اسماگورینسکی با ضریب تنسور دینامیکی<sup>۱</sup> شناخته می شود، در شبیه سازی جریان های متلاطم همگن و جریان متلاطم در کانال ها با اعداد رینولدز بالا آزمایش شده است. نتایج این مدل نشان می دهد که تنش های رینولدز الزامات سازگاری معادلات حاکم بر روش شبیه سازی گردابه های بزرگ را برآورده می کنند و در جریان آرام و در مرزهای جامد ناپدید می شوند و رفتار درستی در ناحیه نزدیک دیواره دارند. در برخی از مدل های غیربوزینسکی قبلی مشکلاتی در ارائه عبارت اتلاف انرژی جنبشی متلاطم مشاهده می شد، اما طبق این مدل می توان نرخ اتلاف را به طور معقول با استفاده از ضرایب دینامیکی ارائه کرد. تنش رینولدز در این مدل مطابق زیر تعریف می شود:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -(C_{ik} S_{kj} + C_{jk} S_{ki}) |S| \Delta^2 \quad (43)$$

این مدل شامل نه ضریب مستقل است:

$$C_{11} = C_{22} = C_{33}; C_{ij} = -C_{ji} (i \neq j) \quad (44)$$

در نهایت از طریق مفهوم تنش متلاطم طبق تساوی جرمانو، می توان این نه ضریب را به چهار ضریب مستقل کاهش داد و به معادله زیر رسید:

$$L_{ij} = C_{ik} \Delta^2 M_{kj} + C_{jk} \Delta^2 M_{ki} \quad (45)$$

مقایسه نتایج مدل اسماگورینسکی با ضریب تنسور دینامیکی با نتایج شبیه سازی عددی مستقیم و داده های تجربی، دقت بهبود بیشتر این مدل نسبت به مدل اسماگورینسکی دینامیکی را نشان می دهد.

هزینه محاسباتی با این مدل تا ۱۵ درصد بیشتر از مدل اسماگورینسکی دینامیکی است [۵۵].

<sup>1</sup> Dynamic tensor-coefficient Smagorinsky model

$\rho$	دانسیته
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی
$\nu_t$	ویسکوزیته گردابی
$\bar{\Omega}_{ij}$	تنسور چرخش کرنش فیلتر شده
$\tau_{ij}$	تنسور تنش متلاطم
$\tau_{kk}$	تنش همسانگرد

### ۵- مراجع

- [1] C. Kleinstreuer, *Modern fluid dynamics*. Springer, 2018.
- [2] S. Banerjee, "Compressible turbulence in space and astrophysical plasmas: Analytical approach and in-situ data analysis for the solar wind," Paris 11, 2014.
- [3] M. Eckert, *Arnold Sommerfeld: Science, Life and Turbulent Times 1868-1951*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] M. Oskouhi and K. Esmaili, "A Historical Review of Turbulence Flow Modeling and Simulation in Hydraulics," (in Persian), *Journal of Water and Sustainable Development*, vol. 5, no. 2, pp. 49-60, 2019, doi: <https://doi.org/10.0.86.51/JWSD.V5I2.68927>.
- [5] O. A. Doronina, "Turbulence Model Development Using Approximate Bayesian Computation," University of Colorado at Boulder, 2020.
- [6] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," in *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*: Elsevier, 1983, pp. 96-116.
- [7] L. N. Azadani and A. E. Staples, "Large-eddy simulation of turbulent barotropic flows in spectral space on a sphere," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 72, no. 5, pp. 1727-1742, 2015, doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0183.1>.
- [8] P. Sagaut, *Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [9] E. Balaras, C. Benocci, and U. Piomelli, "Finite-difference computations of high Reynolds number flows using the dynamic subgrid-scale model," *Theoretical and computational fluid dynamics*, vol. 7, no. 3, pp. 207-216, 1995, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00312363>.
- [10] A. Scotti and C. Meneveau, "A fractal model for large eddy simulation of turbulent flow," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 127, no. 3-4, pp. 198-232, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(98\)00266-8](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(98)00266-8).

متناسب با تنسور نرخ کرنش نیست. نتایج نشان داد که علاوه بر افزایش دقت، مشکلاتی که مدل های زیرشبکه ای بوزینسک در ارائه عبارت اتلاف انرژی جنبشی متلاطم دارند برطرف شد. با اینکه محققان تاکنون مدل های مختلفی با دقت قابل قبول برای مطالعه جریان متلاطم به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ ارائه کرده اند اما با توجه به پیچیدگی و رفتار غیرقابل پیش بینی این جریان مطالعات و بررسی برای رسیدن به مدلی جامع تر با پایداری و دقتی بیشتر همچنان ادامه دارد.

### علائم انگلیسی

$C$	ثابت مدل تابع ساختار
$C_{ij}$	ضرایب تنسوری دینامیکی
$C_s$	ضریب اسماغورینسکی
$C_w$	ثابت مدل سازگار با دیواره
$\bar{F}_2$	تابع ساختار سرعت مرتبه دوم
$f_m$	تابع پایداری
$f_n$	تابع تصحیح
$f_s$	تابع میرایی
$G$	تابع فیلتر
$i$	مشخصه مختصاتی
$j$	مشخصه مختصاتی
$k$	انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه بر اساس فیلتر شبکه محاسباتی
$K$	انرژی جنبشی در مقیاس زیرشبکه بر اساس فیلتر آزمون
$L_{ij}$	تنسور لئونارد
$M_{ij}$	معادل مفهوم تنش رینولدز در مدل اسماغورینسکی دینامیکی
$N_{ij}$	معادل مفهوم تنش رینولدز در مدل اسماغورینسکی دینامیکی با ضرایب وابسته به مقیاس
$n$	شاخص سیال غیرنیوتنی
$P$	فشار
$Q$	تابع خطای مربعات
$r$	مشخصه مکانی
$Re$	عدد رینولدز
$R_i$	عدد ریچاردسون
$\bar{S}_{ij}$	تنسور نرخ کرنش فیلتر شده
$ \bar{S} $	اندازه نرخ کرنش
$T_{ij}$	تنسور تنش زیر فیلتر آزمون
$T_{kk}$	تنش زیر فیلتر آزمون همسانگرد
$t$	زمان
$u$	سرعت
$x$	مکان
<b>علائم یونانی</b>	
$\beta$	نسبت ضریب اسماغورینسکی در فیلتر آزمون به فیلتر شبکه محاسباتی
$\delta_{ij}$	تابع دلتا دیراک
$\Delta$	اندازه فیلتر

- flamelet generated manifold," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 40, p. 101795, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101795>.
- [22] A. R. Brown, J. Hobson, and N. Wood, "Large-eddy simulation of neutral turbulent flow over rough sinusoidal ridges," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 98, no. 3, pp. 411-441, 2001, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1018703209408>.
- [23] P. Carlotti, "Two-point properties of atmospheric turbulence very close to the ground: Comparison of a high resolution LES with theoretical models," *Boundary-layer meteorology*, vol. 104, no. 3, pp. 381-410, 2002, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1016544705265>.
- [24] J. Gullbrand and F. K. Chow, "The effect of numerical errors and turbulence models in large-eddy simulations of channel flow, with and without explicit filtering," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 495, pp. 323-341, 2003, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112003006268>.
- [25] M. Calaf, C. Meneveau, and J. Meyers, "Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers," *Physics of fluids*, vol. 22, no. 1, 2010, doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2482-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2482-2_38).
- [26] F. Attarzadeh, S. R. Khodashenas, and A. N. Ziaei, "Numerical Modeling over a Labyrinth Side Weirs by Using Large Eddy Simulation method (LES)," (in persian), *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, vol. 14, no. 1, pp. 286-300, 2020, doi: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.1.2.5.8>.
- [27] T. Ohta and M. Miyashita, "DNS and LES with an extended Smagorinsky model for wall turbulence in non-Newtonian viscous fluids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 206, pp. 29-39, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.02.003>.
- [28] P. Gnamboe, P. Orlandi, M. Ould-Rouiss, and X. Nicolas, "Large-eddy simulation of turbulent pipe flow of power-law fluids," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 54, pp. 196-210, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.05.004>.
- [29] M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W. H. Cabot, "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 3, no. 7, pp. 1760-1765, 1991, doi: <https://doi.org/10.1063/1.857955>.
- [30] O. Métais and M. Lesieur, "Spectral large-eddy simulation of isotropic and stably stratified turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 239, pp. 325-382, 1992, doi: <https://doi.org/10.1017/S002225750000561>.
- [11] F. K. Chow, R. L. Street, M. Xue, and J. H. Ferziger, "Explicit Filtering and Reconstruction Turbulence Modeling for Large-Eddy Simulation of Neutral Boundary Layer Flow," (in English), *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 62, no. 7, pp. 2058-2077, 01 Jul. 2005, 2005, doi: <https://doi.org/10.1175/JAS3456.1>.
- [12] J. Bardina, J. Ferziger, and W. Reynolds, "Improved subgrid-scale models for large-eddy simulation," in *13th fluid and plasmadynamics conference*, 1980, p. 1357, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1980-1357>.
- [13] P. J. Mason and D. J. Thomson, "Stochastic backscatter in large-eddy simulations of boundary layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 242, pp. 51-78, 1992, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112092002271>.
- [14] F. G. Schmitt, "About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity," *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 335, no. 9-10, pp. 617-627, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.08.004>.
- [15] R. A. Clark, *Evaluation of Subgrid-Scale Turbulence Models Using a Fully Simulated Turbulent Flow*. Stanford University, 1977.
- [16] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment," *Monthly weather review*, vol. 91, no. 3, pp. 99-164, 1963, doi: <https://doi.org/10.1175/1520-0493>.
- [17] J. W. Deardorff, "A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 41, no. 2, pp. 453-480, 1970, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112070000691>.
- [18] D. Lilly, "NCAR MANUSCRIPT 70-182," 1970, doi: <https://doi.org/10.1029/EO052i006pIU332>.
- [19] U. Schumann, "Subgrid scale model for finite difference simulations of turbulent flows in plane channels and annuli," *Journal of computational physics*, vol. 18, no. 4, pp. 376-404, 1975, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(75\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(75)90093-5).
- [20] W. Wenquan, Z. Lixiang, Y. Yan, and G. Yakun, "Finite Element Analysis of Turbulent Flows Using LES and Dynamic Subgrid-Scale Models in Complex Geometries," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2011, 2011, doi: <https://doi.org/10.1155/2011/712372>.
- [21] E. S. Joe and D. A. Perumal, "Combustion modelling of sequential combustion in steam-methane reformation (SMR) furnace using adiabatic



- [41] C. Meneveau and T. S. Lund, "The dynamic Smagorinsky model and scale-dependent coefficients in the viscous range of turbulence," *Physics of fluids*, vol. 9, no. 12, pp. 3932-3934, 1997, doi: <https://doi.org/10.1063/1.869493>.
- [42] F. Porté-Agel, C. Meneveau, and M. B. Parlange, "A scale-dependent dynamic model for large-eddy simulation: application to a neutral atmospheric boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 415, pp. 261-284, 2000, doi: <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000020353.03398.20>.
- [43] J. Kleissl, V. Kumar, C. Meneveau, and M. B. Parlange, "Numerical study of dynamic Smagorinsky models in large-eddy simulation of the atmospheric boundary layer: Validation in stable and unstable conditions," *Water resources research*, vol. 42, no. 6, 2006, doi: <https://doi.org/10.1029/2005WR004685>.
- [44] Y.-T. Wu and F. Porté-Agel, "Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: evaluation of turbine parametrisations," *Boundary-layer meteorology*, vol. 138, pp. 345-366, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9569>.
- [45] E. Bou-Zeid, C. Meneveau, and M. Parlange, "A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows," *Physics of fluids*, vol. 17, no. 2, 2005, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1839152>.
- [46] G. Efstathiou, R. Plant, and M.-J. Bopape, "Simulation of an evolving convective boundary layer using a scale-dependent dynamic Smagorinsky model at near-gray-zone resolutions," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 57, no. 9, pp. 2197-2214, 2018, doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0318.1>.
- [47] F. Nicoud and F. Ducros, "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor," *Flow, turbulence and Combustion*, vol. 62, no. 3, pp. 183-200, 1999, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009995426001>.
- [48] E. B. H. Kaviani, "Using large eddy simulation to investigate the effect of changing the flow angle in acoustic calculations," (in persian), *12th Int. Conf. on Acoustics and Vibrations*, 2022, doi: <https://civilica.com/doc/1611154>.
- [49] V. M. Sharafabadi and M. Fathali, "Comparison of effects of four subgrid-scale turbulence models in large eddy simulation of a large wind farm," (in persian), *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp. 1-11, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0420-y>.
- pp. 157-194, 1992, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112092004361>.
- [31] M. Nouroollahi, "Modified Structure Function Model Based on Coherent Structures," (in persian), *International Journal of Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 523-532, 2013, doi: <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2013.26.05b.09>.
- [32] D. K. Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 4, no. 3, pp. 633-635, 1992, doi: <https://doi.org/10.1063/1.858280>.
- [33] S. Khani and M. L. Waite, "Large eddy simulations of stratified turbulence: the dynamic Smagorinsky model," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 773, pp. 327-344, 2015, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.249>.
- [34] H. S. Yoon, S. Balachandar, and M. Y. Ha, "Large eddy simulation of flow in an unbaffled stirred tank for different Reynolds numbers," *Physics of fluids*, vol. 21, no. 8, 2009, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3210776>.
- [35] N. Kianvashrad and D. Knight, "Large Eddy Simulation of Hypersonic Turbulent Boundary Layers," *Fluids*, vol. 6, no. 12, p. 449, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids6120449>.
- [36] W.-W. Kim and S. Menon, "A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations," in *33rd aerospace sciences meeting and exhibit*, 1995, p. 356, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1995-356>.
- [37] D. Carati, S. Ghosal, and P. Moin, "On the representation of backscatter in dynamic localization models," *Physics of Fluids*, vol. 7, no. 3, pp. 606-616, 1995, doi: <https://doi.org/10.1063/1.868585>.
- [38] S. Ghosal, T. S. Lund, P. Moin, and K. Akselvoll, "A dynamic localization model for large-eddy simulation of turbulent flows," *Journal of fluid mechanics*, vol. 286, pp. 229-255, 1995, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112095000711>.
- [39] V. Gravemeier, "A consistent dynamic localization model for large eddy simulation of turbulent flows based on a variational formulation," *Journal of Computational Physics*, vol. 218, no. 2, pp. 677-701, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.03.001>.
- [40] A. A. S. Parvar, H. R. Anbarloui, M. A. Parvar, "Turbulent flow simulation with large eddy simulation (LES) approach and Smagorinsky (SM) and local dynamic (LDSM) subgrid models in stair geometry," (in persian), *The 22nd Annual Int. Conf. on Mech. Engineering*, 2014, doi: <https://civilica.com/doc/277468>.

- [53] H. J. Bae, A. Lozano-Durán, S. T. Bose, and P. Moin, "Dynamic slip wall model for large-eddy simulation," *Journal of fluid mechanics*, vol. 859, pp. 400-432, 2019, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.838>.
- [54] W. Rozema, H. J. Bae, and R. W. Verstappen, "Local dynamic gradient Smagorinsky model for large-eddy simulation," *Physical Review Fluids*, vol. 7, no. 7, p. 074604, 2022, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.074604>.
- [55] R. Agrawal, M. P. Whitmore, K. P. Griffin, S. T. Bose, and P. Moin, "Non-Boussinesq subgrid-scale model with dynamic tensorial coefficients," *Physical Review Fluids*, vol. 7, no. 7, p. 074602, 2022, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.074602>.
- [50] Q. H. M. Safarzadeh, H. Pasdar Shahri, "Investigating the accuracy of subgrid models in modeling internal rotating fire by large eddy simulation," (in persian), *Fuel and Combustion*, 2020, doi: <https://civilica.com/doc/1386457>.
- [51] W.-w. Zhao, F.-c. Zhou, G.-q. Fan, and D.-c. Wan, "Assessment of subgrid-scale models in wall-modeled large-eddy simulations of turbulent channel flows," *Journal of Hydrodynamics*, pp. 1-10, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s42241-023-0039-6>.
- [52] S. Malik *et al.*, "Shear improved Smagorinsky model for large eddy simulation of flow in a stirred tank with a Rushton disk turbine," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 108, pp. 69-80, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.035>.



## فرایند سخت کاری سطحی با سنگ زنی، مقایسه و کاربرد

**چکیده:** سنگ زنی به عنوان یکی از فرایندهای ماشینکاری، از مهمترین فرایندهای پایانی تولید محسوب می شود. در حین این فرایند حرارت بسیار بالایی ایجاد می گردد که در فرایند ماشینکاری یک مشکل بوده و تلاش برای حذف آن صورت می گیرد. اخیرا تلاش هایی صورت گرفته تا از این مشکل به عنوان فرصت استفاده گردد. با کنترل مقدار حرارت منتقل شده به قطعه کار، سطح آن می تواند عملیات حرارتی سطحی شود. بنابراین سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند جدید و غیر سنتی ماشینکاری است که برای سخت کاری سطحی و سنگ زنی قطعات فلزی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. این روش دارای پتانسیل مناسبی جهت جایگزینی روش های سنتی عملیات حرارتی با یکپارچه سازی آن در فاز سنگ زنی است. مزیت کلیدی این روش حذف جابجایی قطعه کار در حین تولید و کاهش تنظیمات اضافی، کاهش هزینه تولید و بالا بردن راندمان می باشد. در این پژوهش اصول عملکردی فرایند، آخرین پیشرفت های این روش و مقایسه ی بین این فرایند و روش های عملیات حرارتی سطحی بحث شده است. چالش های آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و فرصت ها و موقعیت های موجود بکارگیری سخت کاری سطحی با سنگ زنی بیان شده است.

**واژه‌های راهنما:** سنگ زنی، سخت کاری سطحی، عملیات حرارتی، سخت کاری سطحی با سنگ زنی، حرارت ماشینکاری

محمد خوران\*

استادیار  
گروه مهندسی مکانیک،  
مجتمع آموزش عالی فنی و  
مهندسی اسفراین، اسفراین

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

Mohammad  
Khoran\*

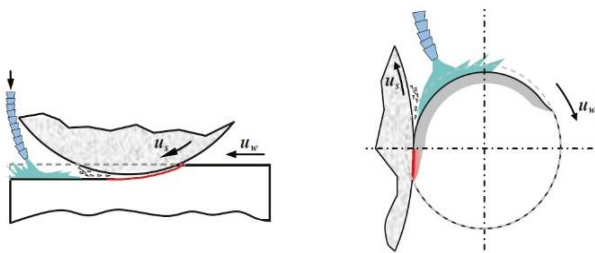
Assistant Professor of  
Mechanical  
Engineering, Esfarayen  
University of  
Technology, Esfarayen

## Surface hardening process with grinding (Grind hardening), comparison and application

**Abstract:** Grinding, as one of the machining processes, is considered as one of the most important final production processes. During this process, very high heat is generated, which is a problem in the machining process, and efforts are made to remove it. Recently, efforts have been made to use this problem as an opportunity. By controlling the amount of heat transferred to the workpiece, its surface can be heat treated. Therefore, grind hardening is a new and non-traditional machining process that can be used for surface hardening and grinding of metal parts. Grind hardening process has the potential to replace the traditional methods of surface heat treatment by integrating this process in the grinding phase. The key advantage of this method is the elimination of workpiece movement during production, reduce cost, increase efficiency, and the reduction of redundant setups. In this research, the functional principles of the process, the latest developments of this method and a comparison between this process and alternative methods of surface heat treatment have been discussed. Its challenges have been discussed and examined, and the opportunities and situations of using grind hardening by have been stated.

**Keywords:** Grinding, Surface hardening, Heat treatment, Grind hardening, Machining heat

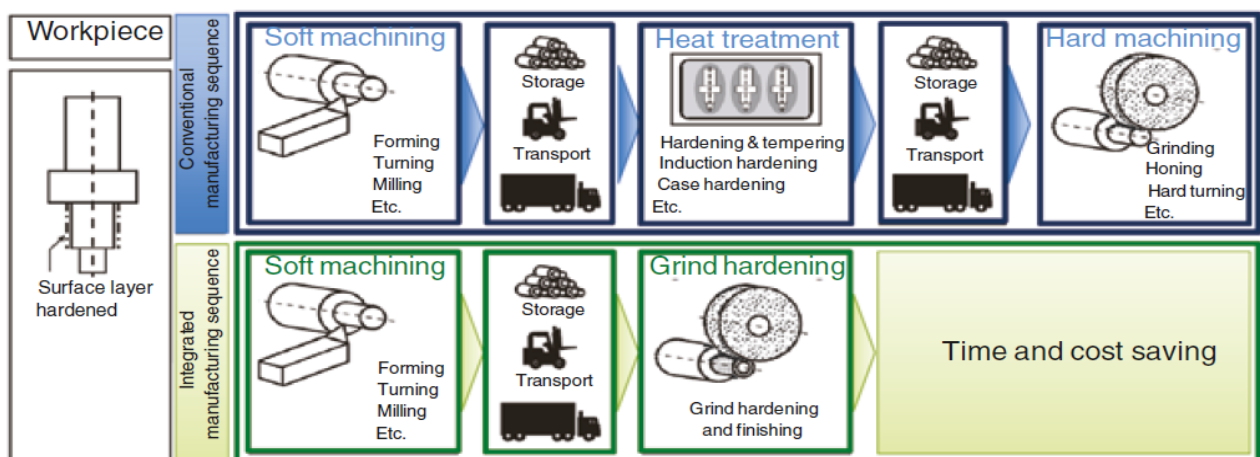
خنک کاری و یا پشتیبانی خنک کننده محیطی به دست خواهد آمد.



شکل ۱- شماتیک فرایند سخت کاری با سنگ زنی

با توجه به شرایط تماس دینامیکی در سنگ زنی، سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند متالورژیکی سریع است که در کسری از ثانیه، سطح را آستنیته می کند. معمولاً روش های عملیات حرارتی رایج منجر به مصرف انرژی بالاتر و آلودگی های زیست محیطی (نمک های عملیات حرارتی، اسیدشویی، شستشوی قطعات و ...) خواهد شد. لذا با انجام عملیات حرارتی سخت کاری سطحی توسط فرایند سنگ زنی به صورت همزمان، علاوه بر کاهش جابجایی قطعات، منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود اثرات زیست محیطی می گردد (شکل ۲). سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند ترکیبی است که می تواند برای سخت کاری سطح قطعات فلزی (همزمان با سنگ زنی) با حذف کردن تمام مراحل ذکر شده در بالا استفاده شود [۲].

فرایند سخت کاری با سنگ زنی اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط بروکهورف مطرح گردید [۱]. در این فرایند، از حرارت ایجاد شده حین سنگ زنی برای سخت کاری سطحی قطعات فولادی استفاده می شود. حرارت معمولاً در فرایند سنگ زنی منجر به آنیل و یا سخت شدگی مجدد قطعه کار می گردد که یک مقوله نامطلوب است. در صورت آنیل شدن سطح، سختی لایه سطحی به طور قابل توجهی کاهش می یابد، که باعث کاهش مقاومت در برابر سایش و استحکام تماسی می گردد. از سوی دیگر در صورت دوباره سخت شدن لایه سطحی قطعه کار، به دلیل وجود لایه آنیل در زیر لایه سطحی مارتنزیت و گرادیان سختی بسیار بالا، وجود تنش های پسماند کششی و انتشار ترک، عمر قطعه کار را پایین می آورد. در سخت کاری با سنگ زنی از گرمای هدر رفته در منطقه تماس بین چرخ سنگ و قطعه کار (که در بالا مضر بودن آن بیان شد) برای آستنیته کردن لایه های سطحی مواد استفاده می شود. بنابراین فرایند متکی بر کنترل حرارت تولید شده برای گرم کردن موضعی قطعه کار به منظور افزایش سختی سطح است. تغییر متالورژیکی مورد نیاز برای سخت شدن از القا تحول مارتنزیتی در سطح قطعه کار با گرم کردن سطح، بالاتر از دمای آستنیته شدن و خنک کاری سریع بدست می آید (شکل ۱)). لازم به ذکر است این فرایند عمدتاً توسط مکانیزم خود



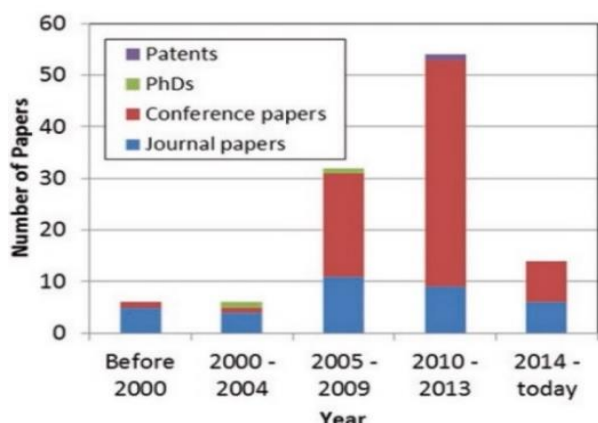
شکل ۲- مقایسه فرایند سخت کاری با سنگ زنی و عملیات های حرارتی رایج

مقاومت به ضربه و تمایل برای شکنندگی استفاده می شود. کنترل گرما و خنک کاری از پارامترهای مهم عملیات حرارتی برای تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات است. رایج ترین روش برای سخت کردن فولاد استفاده از روش مارتنزیتی کردن

## ۲- اصول و مکانیزم

روش های عملیات حرارتی به منظور تغییر خواصی مانند استحکام، مقاومت در برابر سایش، استحکام خستگی، سختی،

<sup>1</sup> T. Brockhoff



شکل ۳- تعداد تحقیقات علمی صورت گرفته در بازه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ [۴]

چریسولریس و همکاران [۵] اثر سخت کاری با سنگ زنی را بر روی فولاد AISI 52100 (فولاد یاتاقان کم آلیاژ با کربن بالا و کروم) مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان نمودند حداکثر سختی که می‌توان به دست آورد، نزدیک به  $HV^3 800$  با عمق نفوذ سختی  $300$  میکرومتر است. عمق نفوذ سختی برابر با فاصله سطح تا عمقی از قطعه کار که سختی آن  $80$  درصد سختی سطح است، می‌باشد. ولی در پژوهشی دیگر، عمق نفوذ سختی نزدیک به  $1$  میلی‌متر در هنگام استفاده از سرعت‌های پیشروی پایین گزارش شده است [۶]. در اغلب موارد نتایج نمودار تنش پسماند نشان دهنده تنش پسماند فشاری نزدیک به سطح است و می‌تواند با اعمال دقیق پارامترهای سنگ زنی کنترل شود [۷]. زوریتا و همکاران [۸] اثر این فرایند را بر روی فولاد AISI 1045 مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش نمودند که سختی قابل دستیابی با این روش، پایین و در حدود  $HV 250$  و عمق نفوذ سختی حدود  $0.5$  میلی‌متر است. این فولاد قابلیت سخت کاری کلی کمی دارد و برای ساخت قطعاتی چون چرخ دنده‌ها، محورهای که نیاز به سخت شدن موضعی توسط شعله یا سخت کاری القایی دارند، استفاده می‌شود. لیو و همکاران [۹، ۱۰] این فرایند را بر روی فولاد  $1065$  و  $1060$  مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشخص نمودند که سختی و عمق نفوذ سختی به ترتیب  $HV 810-870$  و  $2$  میلی‌متر قابل دستیابی است. وانگ و همکاران [۱۱] مرفولوژی و زبری سطح فولاد  $42 Cr Mo4$  را در فرایند سخت کاری به کمک سنگ زنی مورد مطالعه قرار دادند.

آنها نشان دادند که در محل ورود و خروج چرخ سنگ عیوب مورفولوژی همچون میکروتورک وجود دارد. نگابت و همکاران [۱۲، ۱۳] اثر خنک کننده برودتی را بر میزان سختی و حداکثر

سطح می‌باشد. فولاد قبل از هر گونه عملیات حرارتی، از مخلوطی از فریت و کاربیدها تشکیل شده است، که معرفی کننده ساختار پرلیت می‌باشد. هنگامی که به فولاد حرارت داده و یا خنک شود، تغییراتی در ساختار شبکه کریستالی بوجود می‌آید که حاصل از تغییرات آلوتروپیک<sup>۱</sup> است. فریت و پرلیت دارای یک شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار<sup>۲</sup> بوده که با بالا رفتن دما، کاربیدهای چند لایه موجود در پرلیت شروع به حل شدن در آهن می‌کنند، تا فولاد کاملی از یک محلول جامد کربن در آهن به نام آستنیت که دارای ساختار شبکه مکعب با وجوه مرکزدار است، بوجود آید. سپس خنک کاری سریع (کوئنچ کاری) مورد نیاز است. مارتنزیت به دلیل خنک کاری سریع، به منظور جلوگیری از تغییر و تحول وابسته به نفوذ که تولید فریت-پرلیت می‌کند، ایجاد می‌شود (مکانیسم برشی برای تشکیل مارتنزیت در مقابل تحول نفوذ که بر اساس حرکت اتم به اتم درون صفحه‌ای است بر پایه حرکت گروهی و همزمان اتم‌ها است). شرایط خنک کاری دقیق که منجر به ساختار مارتنزیت می‌شود در هر نوع آلیاژ فولاد به شدت وابسته به درصد کربن، آلیاژ سازها و اندازه دانه آستنیتی است. علاوه بر این، ریزساختار حاصل به طور مستقیم وابسته به سرعت خنک کاری می‌باشد. در نتیجه هر گونه ساختار بلوری چند لایه (پرلیت، بینیت و یا مارتنزیت) ممکن است تشکیل شود. هدف اصلی از کوئنچ فولاد تولید مارتنزیت است. بنابراین، ضروری است که نرخ خنک کنندگی بالایی بکار گرفته شود تا فولاد در دماهای بالا، جایی که پرلیت یا بینیت تشکیل می‌شود، ماندگار نباشد. سختی دقیق مارتنزیت وابسته به میزان کربن موجود در فولاد خواهد بود [۳].

### ۳- مروری بر ادبیات موضوع

فرآیند سخت کاری با سنگ زنی سابقه‌ای ۲۸ سال دارد. تاکنون تحقیقات و مطالعات بسیاری بر روی جنبه‌های مختلف فرایند از جمله تاثیر پارامترهای فرایند، شرایط چرخ سنگ، مدل سازی و غیره انجام شده است. از زمان معرفی این فرایند، علاقه‌مندی به انجام پژوهش در سطح بین المللی افزایش یافته است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، تنها از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۵، حدود ۱۱۲ مقاله مرتبط، دو پایان نامه دکترا و ثبت اختراع در فرایند سخت کاری با سنگ زنی ارائه شده و این روند در سال‌های اخیر سرعت بیشتری گرفته است [۴].

<sup>3</sup> Hardness Vickers

<sup>1</sup> Allotropic transformation

<sup>2</sup> FCC: Face Center Cubic

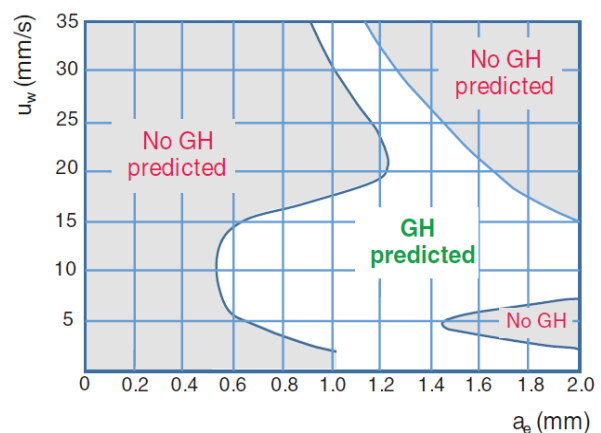
مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیندهای سنگ‌زنی امروزه مورد استقبال محققان قرار گرفته است. مدل‌سازی فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی، به عنوان یک فرآیند ساینده، بر پایه مدل‌سازی ارائه شده برای دیگر فرآیندهای رایج سنگ‌زنی است. مدل‌های مختلفی برای تخمین توزیع حرارت در قطعه‌کار، برآورد عمق نفوذ سختی و یا تنش‌های پسماند بر پایه روش المان محدود ارائه گردیده است. با این حال، در بسیاری از موارد تخمین حرارت تولید شده بین چرخ سنگ و قطعه‌کار بصورت تجربی و یا با استفاده از مدل تحلیلی انجام گرفته است. سالونتیس و چریسوریس [۱۹] حداکثر عمق را بر اساس فرضیه رسیدن دمای سطح به دمای ذوب، برآورد کردند. در کنترل سختی قطعه‌کار مهم‌ترین پارامترهای فرایند، عمق برش و سرعت پیشروی است. سرعت برشی (سرعت چرخ سنگ) را نیز می‌توان برای کنترل فرایند استفاده نمود. مدل‌سازی فرایند با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیلی و المان محدود برای اولین بار توسط سالونتیس [۲۰] در تعدادی از مطالعات معرفی شد. لرا و همکاران [۲۱] از یک رویکرد جدید برای مدل‌سازی فرایند و پیش‌بینی عمق نفوذ سختی بر اساس تبدیل آستنیت-مارتنزیت برای فولاد 42 Cr Mo4 استفاده نمودند. این پژوهش اولین تلاش برای شبیه‌سازی فرایند سنگ‌زنی با استفاده از سنگ‌زنی چند دانه، هندسه دانه‌های واقعی، اثر چسب و سینماتیک واقعی چرخ سنگ-قطعه کار بود.

#### ۴- حرارت

این فرایند از جریان گرمایی تولید شده در ناحیه تغییر شکل و اصطکاک به منظور دستیابی به سختی سطحی بالا استفاده می‌کند. نحوه تولید و چگونگی تقسیم و توزیع حرارت، با دانش نسبت به جنبه‌های سینماتیکی فرایند و شکل‌گیری براده امکان پذیر است. در فرایند سنگ‌زنی چندین تماس وجود دارد. تماس بین دانه و قطعه‌کار، چسب و قطعه‌کار، براده و چسب که فقط تماس و ارتباط بین دانه و قطعه‌کار نیاز فرایند براده برداری است که منجر به براده برداری خواهد شد و تماس‌های دیگر، نامطلوب بوده و منجر به سایش و حرارت خواهد شد. شکل (۵) مناطق تغییر شکل پلاستیک و نواحی اصطکاکی در حالت تماس بین براده و قطعه‌کار را نشان می‌دهد [۲۲]. بیشتر انرژی تولید شده در اثر اصطکاک، سایش و همچنین مقدار انرژی صرف شده در اثر پدیده شخم‌زنی به صورت حرارت به قطعه‌کار منتقل می‌شود [۲۳].

عمق قابل سخت‌کاری مورد بررسی قرار داد. آنها مشخص نمودند برای فولاد ۱۰۴۵ سختی در حالت خشک تا ۷۰۰ HV و با کمک خنک کننده نیتروژن مایع تا ۱۰۰۰ HV قابل دستیابی است. عمق نفوذ سختی در حدود ۰/۵ میلی‌متر برای هر دو حالت به دست آمد. تحقیقات مختلفی نشان دادند که با کنترل پارامترهای ورودی می‌توان مقادیر تنش‌های باقی مانده را کنترل نمود [۱۴].

شرایط چرخ سنگ به شدت بر روی حرارت تولیدی تاثیر گذار است. چرخ سنگ کراندم به علت خاصیت هدایت حرارتی پایین‌تر آن نسبت به دیگر جنس‌های دانه ساینده (این موضوع باعث می‌شود گرمای بیشتری وارد قطعه‌کار شود) معمولاً بیشتر مورد استقبال محققان است. فریکر و همکاران [۱۶] دستیابی به عمق نفوذ سختی ۲ میلی‌متری با چرخ سنگ CBN برای فولاد ۴۱۴۰ را گزارش نمودند. سالونتیس و همکاران [۱۷، ۱۸] تاثیر مشخصات چرخ سنگ (اندازه دانه، سختی و ساختار) بر نیروهای فرایند و عمق نفوذ سختی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشخص نمودند، استفاده از چرخ نرم‌تر منجر به کاهش نیروهای فرایند می‌شود، چرا که شکست دانه و چسب آسان‌تر رخ می‌دهد. چرخ سنگ متراکم‌تر نشان دهنده القاء نیروهای فرآیندی بالاتری است. همانطوری که در شکل (۴) دیده می‌شود فرایند سخت-کاری با سنگ‌زنی در یک بازه مشخصی از ترکیب پارامترهای ورودی رخ می‌دهد. لذا انتخاب درست پارامترهای پیشروی و عمق برش بر عملی شدن و یا نشدن سخت‌کاری با سنگ‌زنی تاثیر گذار است و صرف اینکه عمق بالا و پیشروی پایین باشد نمی‌توان پیش‌بینی کرد که سخت‌کاری با سنگ‌زنی اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۴- انتخاب ورودی سنگ‌زنی بر روی امکان سخت شونده‌گی به کمک فرایند سنگ‌زنی [۱۶]

که  $q_t$  ( $W/mm^2$ ) نرخ شار حرارتی کل،  $l_g$  (mm) طول تماس هندسی،  $F_c$  (N) نیروی برشی ویژه،  $v_c$  (mm/s) سرعت برشی است.

### ۵- رقبای سخت کاری سطحی با سنگ زنی

برای شناخت بیشتر قابلیت‌های فرایند سخت کاری با سنگ زنی نیاز است رقبای این فرایند (فرایندهای جایگزین) مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. روش سخت کاری سطحی به دو گروه عمده تقسیم بندی می‌شود:

#### ■ فرایندهای حرارتی-شیمیایی

در فرایندهای حرارتی-شیمیایی با افزودن یک عنصر (کربن، نیتروژن، گوگرد، بور و یا اکسیژن) به سطح قطعه کار، سختی را بالا می‌برند.

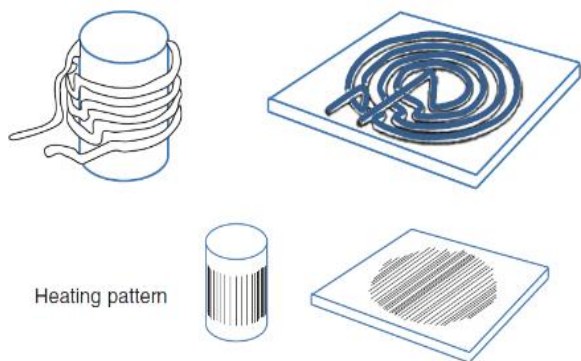
#### ■ فرایندهای حرارتی

در این روش از تغییر فاز سطح فولاد استفاده می‌گردد. فولاد باید دارای کربن کافی باشد تا اجازه دهد آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود.

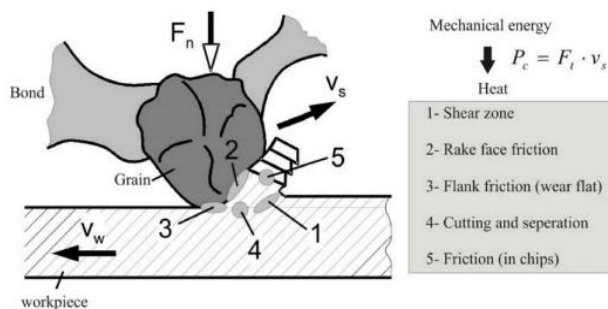
در ادامه، به صورت خلاصه رقبای سخت کاری با سنگ زنی معرفی شده است. مشکل این روش‌ها این است که نمی‌توان به سادگی آنها را با خط تولید یکپارچه کرد. در نتیجه معایب اقتصادی در برابر فرایند سخت کاری با سنگ زنی دارند.

### ۵-۱- سخت کار القایی

با گذراندن جریان متناوب با فرکانس بالا (از طریق یک سیم پیچ به شکل مناسب) سطح قطعه‌ای که در میدان الکترومغناطیسی قرار گرفته، گرم می‌شود (گرمایش قطعه به دلیل پدیده هیستریزیس و جریان‌های گردابی در مواد است). محدودیت این روش رسانای الکتریکی بودن قطعه کار است (شکل (۷)).

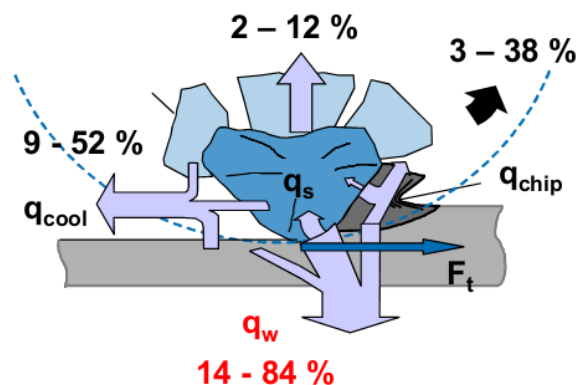


شکل ۷- شماتیک فرایند سخت کاری القایی (اینداکشن) [۴]



شکل ۵- محل‌های تولید حرارت در تماس بین دانه و قطعه کار [۲۲]

کلاکه [۲۴] مقادیر شار حرارتی چهار جز اصلی فرایند سنگ زنی را مشخص کرده است (شکل (۶)). همانطوری که در شکل (۶) دیده می‌شود، مشخص است سهم حرارتی هر یک از اجزا دارای بازه‌ای می‌باشد که با تغییر در پارامترهای ورودی می‌تواند متفاوت باشد. نرخ شار حرارتی کل ( $q_t$ ) در ناحیه سنگ زنی به چهار قسمت شار قطعه کار ( $q_w$ )، شار چرخ سنگ ( $q_s$ )، شار براده ( $q_{ch}$ ) و شار مایع خنک کننده/روان کننده ( $q_{kss}$ ) تقسیم می‌شود. سهم هر یک از موارد بالا بستگی به پارامترهای سنگ زنی و ضریب هدایت حرارتی قطعه کار، چرخ سنگ و مایع خنک کننده دارد [۲۵].



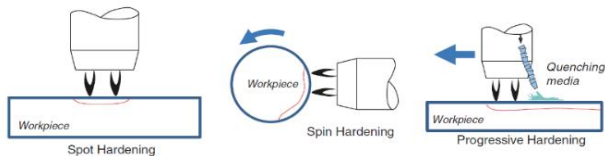
شکل ۶- میزان شار حرارتی به هر جزء در فرایند سنگ زنی [۲۴]

کسر شار حرارتی هر یک از اجزای شرکت کننده در سنگ زنی به میزان  $R_w$  (کسر شار حرارتی به قطعه کار)،  $R_s$  (کسر شار حرارتی به چرخ سنگ)،  $R_{sp}$  (کسر شار حرارتی به براده)،  $R_{kss}$  (کسر شار حرارتی به مایع خنک کننده) است که از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$R_w + R_s + R_{sp} + R_{kss} = 1 \quad (1)$$

$$R_w = \frac{q_w}{q_t} \quad (2)$$

$$q_t = P''_c = \frac{F'_c \cdot v_c}{l_g} \quad (3)$$



شکل ۹- شماتیک فرایند سخت کاری شعله‌ای [۴]

#### ۴-۵- سخت کاری با پرتو لیزر

لیزر با توان ۰/۵ تا ۱۵ کیلو وات برای سخت کاری فولاد استفاده می‌شود. گرمای تولید شده در اثر برخورد پرتوی لیزر با سطح قطعه کار منتج به گرمایش یک لایه سطحی نازک تا دمای آستنیت شده می‌شود، لذا می‌توان سخت کاری سطحی انجام داد. حداقل ۰/۳ درصد کربن یک پیش نیاز برای سخت کاری فولاد به روش لیزر است. این روش نیاز به خنک کاری ندارد و معمولاً از بدنه خنک خود قطعه کار استفاده می‌گردد. لذا ضخامت قطعه باید ۵ تا ۸ برابر ضخیم‌تر از نقطه مورد سخت کاری توسط پرتو لیزر باشد. عمق لایه سخت شده بستگی به سختی پذیری مواد دارد. عمق نفوذ سختی به طور معمول در محدوده ۰/۱-۲ میلی‌متر و مقدار سختی قابل دستیابی در محدوده HV ۴۹۰-۸۲۰ است.

#### ۵-۵- سخت کاری با پرتوی الکترونی

این فرایند از یک پرتوی متمرکز شده از الکترون‌های سرعت بالا به عنوان یک منبع انرژی استفاده می‌کند. بمباران سطح با الکترون منتج به گرم کردن سریع لایه‌های سطحی (در ۰/۵ تا ۳ ثانیه دمای آستنیت شده بدست می‌آید) می‌شود. مشابه سخت کاری با لیزر، خنک کاری مورد نیاز نیست و تشکیل مارتنزیت از طریق خود خنک کاری به دست می‌آید. موادی که می‌تواند توسط روش پرتوی الکترونی سخت شود باید شامل کربن کافی و عناصر آلیاژی باشد. علاوه بر این، قطعه کار باید به اندازه کافی بزرگ بوده تا اجازه فرایند خود خنک کاری را بدهد (ضخامت ۸ برابری). حداکثر سختی قابل دستیابی HRC ۶۲ و عمق سخت شده ۱-۲ میلی‌متر خواهد بود.

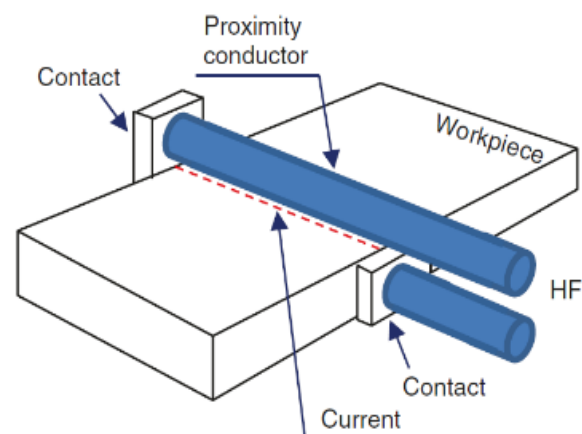
#### ۶-۵- سخت کاری الکترولیتی

سخت کاری سطح الکترولیتی یک روش سخت کاری ویژه است که الکترولیز را در یک محلول آبی تحت شرایط خاص بکار می‌گیرد. الکترولیت، ولتاژ و جریان از متغیرهای فرایند هستند.

سخت شدن القایی را می‌توان برای طیف گسترده‌ای از انواع فولاد و چدن بکار گرفت. فولادهای کربن متوسط (۰/۳۵-۰/۵ درصد کربن)، با یا بدون عناصر آلیاژی، را می‌توان با این روش بطور مطمئن و رضایت بخش سخت نمود. عمق لایه سخت شده می‌تواند بر اساس نیاز و یا مشخصات مورد نظر متفاوت باشد. عمق تابعی از فرکانس جریان AC است، با فرکانس پایین‌تر عمق لایه سخت شده، بیشتر خواهد شد. به طور معمول، محدوده عمق نفوذ سختی از ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر و سختی HRC ۵۰-۶۰ قابل دستیابی است.

#### ۲-۵- سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا

برای سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا (۴۰۰ کیلو هرتز) هر نوار از هر شکلی را می‌توان بین دو نقطه گرم کرد (شکل (۸)). سختی قابل دستیابی به HRC ۶۲ می‌رسد. عمق لایه سخت شده برای فولاد بسته به زمان حرارت دادن و سطح قدرت متفاوت است و در بازه ۰/۶۴-۰/۸۹ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸- شماتیک فرایند سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا [۴]

#### ۳-۵- سخت کاری شعله‌ای

در این روش به منظور آستنیت کردن سطح از برخورد مستقیم شعله مشعل بر روی سطح استفاده می‌گردد (شکل (۹)). عمق سخت شوندگی با طراحی سر مشعل، زمان حرارت دادن و سختی پذیری مواد کنترل می‌شود. ماده ایده‌آل برای سخت کاری شعله‌ای، فولادهای کربن متوسط با ۰/۴-۰/۵ درصد است. عمق سخت کاری تا ۱۲ میلی‌متر بصورت موردی امکان پذیر است، به طور معمول عمق سختی در محدوده ۰/۲۵-۶ میلی‌متر و میزان سختی HRC ۵۰-۶۰ قابل دستیابی است.

<sup>1</sup> Hardness Rockwell C



سختی سطحی می‌باشد. شکل (۱۰) نمایی از تمامی پارامترهای ورودی و خروجی فرایند را نمایش می‌دهد.

علاوه بر این، ساختار اولیه (قبل از سخت‌کاری با سنگ‌زنی) مواد مهم است. در سخت‌کاری با سنگ‌زنی، فولادهای که آنیل یا تمپر شده هستند، قابلیت سخت شدن دارند. ولی عمق نفوذ سختی عمیق‌تری را می‌توان برای ماده تمپر شده نسبت به یک ماده آنیل به دست آورد (مواد تمپر شده در دمای پایین‌تری تبدیل به آستنیت می‌شوند، که این موضوع معادل عمق بیشتر سخت‌شوندگی است).

برای نرخ براده برداری ویژه ثابت، افزایش عمق برش منتج به HPD عمیق‌تری می‌شود. حداکثر HPD در منطقه‌ای بین سنگ-زنی معمولی و خزشی به دست می‌آید. افزایش بیشتر عمق برش منجر به کاهش HPD و ورود به منطقه سنگ‌زنی خزشی می‌گردد.

سرعت پیشروی به طور مستقیم تاثیر بر گرمای ورودی به قطعه‌کار دارد. برای سرعت‌های پیشروی بسیار پایین، توان تولیدی سنگ‌زنی و در نتیجه گرمای تولید شده برای آستنیت‌کردن خیلی کم است. با افزایش سرعت پیشروی، حرارت تولید شده و HPD افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر سرعت پیشروی منتج به زمان تماس کوتاه و منجر به کاهش HPD خواهد گردید. بنابراین، حداکثر HPD را می‌توان در سرعت پیشروی متوسط به دست آورد. تاثیر سرعت برش بسیار پیچیده است و نیاز به مطالعات بیشتر و در عین حال ترکیب با پارامترهای دیگر و بهینه‌سازی دارد.

#### ۷- محدودیت فرایند

گرچه سخت‌کاری با سنگ‌زنی یک فرایند نوآورانه محسوب می‌گردد، معرفی صنعتی آن با تعدادی از عوامل محدود می‌شود. یکی از مشکلات این تکنولوژی به وجود آمدن مناطق هم تداخل (آورلپ) است. این اتفاق در هنگام سخت‌کاری قطعات استوانه‌ای ایجاد می‌گردد. یعنی یک سطح سخت شده دوباره در معرض حرارت فرایند سنگ‌زنی قرار می‌گیرد. این مناطق آورلپ در سخت‌کاری القایی نیز در هنگام سخت‌کاری استوانه پس از یک چرخش قطعه‌کار می‌تواند رخ دهد. زمانیکه یک سطح سخت شده دوباره در معرض حرارت فرایند سنگ‌زنی قرار گیرد، در منطقه آورلپ، لایه سخت شده قطعه‌کار آنیل می‌شود، در نتیجه

اگر یک فیلم هیدروژن پایدار تشکیل شود و تخلیه الکتریکی شامل الکترون و یون به مقدار بالا رخ دهد، قطعه‌کار، به عنوان کاند عمل می‌کند و به شدت تا درجه حرارت آستنیت‌شدن به علت تولید مقاومت گرمایی، گرم می‌شود. با قطع مدار الکتریکی، فیلم هیدروژن از بین می‌رود و سطح قطعه‌کار خنک می‌شود، لذا سطح قطعه‌کار سخت خواهد شد.

#### ۵-۷- تحلیل و مقایسه زمانی

سخت‌کاری با سنگ‌زنی به همراه سخت‌کاری لیزری و سخت‌کاری القایی با توجه به زمان بسیار کوتاه مورد نیاز برای گرمایش و سپس سرمایش، به عنوان فرآیندهای عملیات حرارتی سریع طبقه بندی می‌شوند. این فرایندها در تضاد با فرآیندهایی است که نیاز به گرمایش در کوره و خنک‌کاری با سرعت متوسط دارند و به عنوان فرآیندهای زمانبر شناخته می‌شوند. زمان موثر گرمایش در سخت‌کاری با سنگ‌زنی به طور معمول کمتر از یک ثانیه است، در حالی که عملیات حرارتی کامل با در نظر گرفتن تمام زمان چرخه فرایند (گرمایش، نرمالیزه، خنک‌کاری، تمپرینگ و غیره) ممکن است نیازمند ۲۴ ساعت باشد.

#### ۶- پارامترهای تاثیر گذار بر فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی

انتخاب مناسب پارامترهای فرایند سنگ‌زنی برای تولید حرارت کافی در منطقه تماس که قادر به عملیات حرارتی قطعه‌کار باشد، مهم است. این پارامترها باید دارای شرایط مناسبی برای خنک‌کاری ماده به منظور دستیابی به حداکثر سختی سطحی باشد. سختی سطحی و عمق نفوذ سختی<sup>۱</sup> (HDP)، عمدتاً متاثر از نوع ماده و توزیع دما در قطعه‌کار است. سختی سطحی به درصد کربن قطعه‌کار و نرخ خنک‌کنندگی بستگی دارد. در صورتی که، HPD بستگی به وسعت گسترش دما در قطعه‌کار دارد. با افزایش انتقال حرارت به قطعه‌کار، سختی سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد (زیرا در صورت افزایش سرعت خنک‌کاری سطح، سطح سخت‌تر می‌گردد). لذا نرخ انتقال حرارت بالای ماده، باعث سختی بیشتر سطح خواهد شد.

پارامترهای اصلی ورودی فرایند سنگ‌زنی عبارتند از: سرعت قطعه‌کار، عمق برش، سرعت برشی، جنس قطعه و نوع چرخ سنگ. خروجی‌های اصلی فرایند نیز عمق نفوذ سختی (HPD) و

بسیار بالا است ولی چون سرعت پیشروی بسیار پایین می‌باشد به سنگ‌زنی خزشی معروف است.

<sup>۱</sup> HDP= hardness penetration depth

<sup>۲</sup> سنگ‌زنی خزشی فرایندی است که معمولاً برای سنگ‌زنی فرم‌هایی چون ریشه پره توربین و ... در یک مرحله استفاده می‌شود. در این فرایند عمق بار

با توجه به مطالب بیان شده در این مقاله، هنوز مطالعاتی برای استفاده از این فرایند در صنعت نیاز است و باید راه‌حل‌های مناسبی برای مشکلات بیان شده یافت گردد.

## ۹- مراجع

- [1] T. Brockhoff and E. Brinksmeier, "Grind-Hardening: A Comprehensive View," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 255-260, 1999/01/01/ 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63178-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63178-3).
- [2] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer, and D. McIntosh, "Hybrid processes in manufacturing," *Cirp Annals-manufacturing Technology*, vol. 63, pp. 561-583, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- [3] M. A. G. Ed, *Fundamentals and Application of Heat Treatment of Steels and Cast Irons*. IUT Publication, 1998, p. 750.
- [4] K. Salonitis, *Grind Hardening Process*. Springer International Publishing, 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19372-4>.
- [5] G. Chryssolouris, K. Tsirbas, and K. Salonitis, "An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, 2005/01/01/ 2005, doi: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(05\)70076-1](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(05)70076-1).
- [6] K. B. Foeckerer T, Heinzl C, Zaeh MF "Experimental and numerical analysis of transient behavior during grind-hardening of AISI 52100," *Prod Eng Res Devel*, vol. 6, no. 6, pp. 559-568, 2012, <https://doi.org/10.1007/s11740-012-0414-6>.
- [7] N. D. Shah SM, Zain-ul-abdein M, Coret M, "Numerical simulation of grinding induced phase transformation and residual stresses in AISI-52100 steel," *Finite Elem Anal*, vol. 61, pp. 1-11, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.05.010>.
- [8] O. Zurita, A. Acosta, and D. Moreno, "Superficial hardening in the plane grinding of AISI 1045 steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 12, no. 3, pp. 298-303, 2003/06/01 2003, doi: [10.1361/105994903770343141](https://doi.org/10.1361/105994903770343141).
- [9] J. Liu, J. Xiong, and W. Yuan, "Experiment Study on Grinding Force of 65Mn Steel in Grinding-Hardening Machining," in *Future Control and Automation*, Berlin, Heidelberg, W. Deng, Ed., 2012: Springer Berlin Heidelberg, pp. 239-246, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31003-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31003-4_30).
- [10] L. Judong, Y. Wei, H. Songwei, and X. Zhilong, "Experimental Study on Grinding-hardening of 1060

کاهش سختی و کاهش عمق نفوذ سختی را به دنبال دارد. بنابراین تکنولوژی سخت‌کاری با سنگ‌زنی در حالت‌هایی که آورلپ ایجاد نمی‌گردد مانند سنگ‌زنی سطحی یا جایی که ایجاد مناطق آورلپ پذیرفته شده باشد، محدود می‌شود. معمولاً قطعاتی را می‌توان به کمک سنگ‌زنی سخت کرد که حداقل حاوی ۰/۳ درصد کربن باشد. ولی تحقیقات بر روی فولاد ۱۰۲۰ [۲۶، ۲۷] نشان می‌دهد که می‌توان این فرایند را برای فولاد با کربن کمتر از مقدار مشخص شده نیز استفاده نمود.

یک عامل محدود کننده‌ی دیگر سخت‌کاری با سنگ‌زنی، عمق نفوذ سختی است. مقدار عمق نفوذ سختی، به علت نیروهای بالای سنگ‌زنی و خواص فیزیکی مواد، محدود به حدود ۲/۵ میلی‌متر است. در فرآیندهای عملیات حرارتی زمان-کوتاه به طور کلی زمان آستنیت‌شدن با افزایش چگالی انرژی در لایه سطحی برای جلوگیری از ذوب مواد کاسته می‌شود. در نتیجه، عمق نفوذ سختی قابل دستیابی کاهش می‌یابد.

علاوه بر مطالب بیان شده، سخت‌کاری با سنگ‌زنی با سایش چرخ سنگ و در نتیجه نسبت G (نسبت حجم ماشین‌کاری شده از قطعه‌کار به حجم سایش چرخ سنگ) تقریباً کم و کاهش صرفه‌جویی در هزینه ابزار محدود می‌شود.

## ۸- نتیجه‌گیری

فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی از حرارت ایجاد شده حین سنگ‌زنی که یک پدیده مطلوب محسوب نمی‌گردد، برای ایجاد تحول مارتزیتی و سخت‌کاری سطحی قطعات فولادی استفاده می‌نماید. معمولاً قطعاتی را می‌توان به کمک سنگ‌زنی سخت کرد که حداقل حاوی ۰/۳ درصد کربن باشد. این فرایند به عنوان فرآیند عملیات حرارتی زمان-کوتاه طبقه‌بندی می‌شود و در مقایسه با رقبای خود در کاهش اثرات زیست محیطی و کاهش هزینه تولید، بسیار موثر بوده است. علاوه بر پارامترهای ورودی عمومی سنگ‌زنی (عمق برش، سرعت برشی و پیشروی)، شرایط و نوع چرخ سنگ، وجود و نوع مایع خنک‌کننده، شرایط قطعه‌کار و ... بر حرارت تولیدی و در نتیجه بر میزان سختی و عمق نفوذ سختی و میزان تنش پسماند تاثیرگذار است. باید توجه شود حداکثر عمق سختی قابل دستیابی با این روش ۲/۵ میلی‌متر است که مقدار متوسطی محسوب می‌گردد. یکی دیگر از چالش‌های کلیدی برای استفاده از این فرآیند در هندسه‌های دایره‌ای و پیچیده، تمپر شدن سطح در هنگام عبور بیش از یکبار چرخ‌سنگ از مجاورت سطحی که قبلاً عملیات حرارتی شده است، می‌باشد.

- [18] K. Salonitis, T. Chondros, and G. Chryssolouris, "Grinding wheel effect in the grind-hardening process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 48-58, 2008/07/01 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1078-9.
- [19] C. G. Salonitis K, "Thermal analysis of grind-hardening process," *Int J Manuf Technol Manage*, vol. 12, pp. 72-92, 2007, doi: 10.1504/IJMTM.2007.014143.
- [20] K. Salonitis, "A methodology for the prediction of the hardness distribution and the hardness penetration depth caused by grind-hardening process," Ph.D. dissertation, Patras University, 2006.
- [21] F. Lerra, A. Ascari, and A. Fortunato, "Hardness Penetration Depth Prediction in the Grind-Hardening Process through a Combined FEM model," *Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 194-198, 2022/01/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.034.
- [22] M. Rabiey and E. Westkämper, "Dry Grinding with CBN Wheels, The Effect of Structuring," Ph.D, Mechanical Engineering, Stuttgart university Germany, 2010.
- [23] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008.
- [24] F. Klocke. "Cutting with geometrically undefined cutting edges, Simulation Techniques in Manufacturing Technology, Lecture 10." (accessed).
- [25] F. Klocke and A. Kuchle, *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [26] H. Z. Yang G, Du C, "External grind-hardening experiments and its grinding force," *Journal Shanghai University (English Ed)*, vol. 13, no. 2, pp. 169-173, 2009, https://doi:10.1007/s11741-009-0215-1.
- [27] G. P. Zhang J, Jen T-G, Zhang L, "Experimental and numerical studies of AISI1020 steel in grind-hardening," *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 52, pp. 787-795, 2009, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.037.
- Steel," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 103-108, 2012/01/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.019.
- [11] C. Wang, G. Wang, and C. Shen, "Analysis and Prediction of Grind-Hardening Surface Roughness Based on Response Surface Methodology-BP Neural Network," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, p. 12680, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/12680.
- [12] T. Nguyen, I. Zarudi, and L. C. Zhang, "Grinding-hardening with liquid nitrogen: Mechanisms and technology," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 1, pp. 97-106, 2007/01/01/ 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.010.
- [13] T. Nguyen and L. C. Zhang, "Grinding-hardening using dry air and liquid nitrogen: Prediction and verification of temperature fields and hardened layer thickness," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 10, pp. 901-910, 2010/10/01/ 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.06.002.
- [14] K. Salonitis and A. Kolios, "Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 Steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, no. 9, pp. 1443-1452, 2015/08/01 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6912-x.
- [15] K. Salonitis, "On Surface Grind Hardening Induced Residual Stresses," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 264-269, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.045.
- [16] D. C. Fricker, T. R. A. Pearce, and A. J. L. Harrison, "Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 218, no. 10, pp. 1339-1356, 2004/10/01 2004, doi: 10.1243/0954405042323577.
- [17] K. Salonitis, P. Stavropoulos, and A. Kolios, "External grind-hardening forces modelling and experimentation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 523-530, 2014/01/01 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5260-y.

## پیشرفت های اخیر در روش های ساخت افزودنی مبتنی بر فناوری های اصطکاکی اغتشاشی

**چکیده:** ساخت افزودنی مجموعه ای از فرایندهای نوین تولید است که با رویکردی متفاوت در تولید محصولات، انقلابی را در روش های تولید ایجاد نموده است. استفاده از این روش ها محدودیت های پیش روی طراحان را که هنگام استفاده از روش های سنتی تولید ایجاد می شود تا حدود زیادی مرتفع ساخته است. با توجه به اینکه منبع مناسبی به زبان فارسی در حوزه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی وجود ندارد، در مقاله حاضر یافته های جدید در حوزه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی برای استفاده در تولید افزودنی فلزات، آلیاژها و کامپوزیت های زمینه فلزی، مورد بررسی قرار گرفته و خلاصه شده است. فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد است که در آن ساختارهایی کاملاً متراکم و همگن با بهبود قابل توجه ریزساختاری تشکیل می شود که عاری از هرگونه نقص ذوب و انجماد مجدد مانند حفره های کوچک انقباضی، تخلخل ها و ترک است. در ادامه مقاله ابتدا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان فرایند پایه توضیح داده خواهد شد. سپس دو روش اصلی ساخت افزودنی مبتنی بر آن شامل ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

**واژه های راهنما:** ساخت افزودنی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی، لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی

سروش سلطانی  
دانشجوی کارشناسی ارشد

موسی ساجد\*  
استادیار

شاهین مصطفی زاده  
دانشجوی کارشناسی ارشد،  
گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،  
تبریز

مقاله مروری  
دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

Soroush Soltani  
MSc Student

Moosa Sajed\*  
Assitant Professor

Shahin  
Mostafazadeh  
MSc Student,  
Mechanical Engineering  
Department, Azarbaijan  
Shahid Madani  
University, Tabriz

## Recent Development in Friction Stir-based Additive Manufacturing Processes

**Abstract:** Additive manufacturing is a set of modern manufacturing technologies with a novel revolutionary point of view that addresses most of limitations that were around due to using conventional manufacturing methods. Due to the lack of references for additive friction stir manufacturing, in the present paper the new developments in friction stir additive manufacturing of metals, alloys, and metal matrix composites are presented and summarized. Friction stir additive manufacturing is a solid-state process that yields a dense and homogeneous structure with a significant microstructural refinement with no fusion defects such as shrinkage cavities, porosity, and cracks. The rest of the paper was arranged as follows: friction stir welding is discussed as the base technology. Then, the two additive manufacturing methods that are based on friction stir welding, i.e. additive friction stir manufacturing and additive friction stir deposition are presented.

**Keywords:** Additive Manufacturing (AM), Friction Stir Welding (FSW), Additive friction stir manufacturing (AFSM), Additive Friction Stir Deposition (AFSD)

## ۱- مقدمه

به یکدیگر متصل می‌شوند و ۲) ساخت افزایشی از طریق لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۶</sup> که در آن از یک ابزار پردازش اصطکاکی اغتشاشی توخالی برای تغذیه مواد جهت لایه نشانی در حالت جامد استفاده می‌شود [۵].

## ۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی برای اتصال در حالت جامد است که در ابتدا در موسسه جوشکاری بریتانیا<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۱ توسعه یافت و برتری خود را در جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن که جوشکاری آنها با روشهای مرسوم چالش برانگیز بود، به اثبات رساند. در ابتدا از آلیاژهای آلومینیوم برای این فرایند استفاده می‌شد. قبل از ابداع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، برخی از سری های آلیاژهای آلومینیوم مانند سری ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ به دلیل رفتار انجمادی ضعیف در ناحیه جوش غیرقابل جوش بودند و خواص مکانیکی ضعیفی در مقایسه با ماده پایه داشتند. این فناوری شامل فرو بردن یک ابزار غیر مصرفی با چرخش سریع است که دارای یک پین و یک شانه است. پین با فشار محوری وارد سطح می‌شود و ابزار در سراسر سطح حرکت داده می‌شود. با دوران ابزار حرارت اصطکاکی بین شانه ابزار و سطح قطعه کار ایجاد شده و تغییر شکل پلاستیک ناحیه جوش را ایجاد می‌کند و به نرم شدن مواد منجر می‌شود. سپس مواد نرم شده به هم زده می‌شود و توسط پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت دایره ای جریان می‌یابد. در طول هم زدن، جریان مواد مانند یک فرایند اکستروژن است که حفره ایجاد شده توسط ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را پر می‌کند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای مزایای فوق العاده ای است. از جمله اینکه منطقه متأثر از حرارت در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ورود گرمای کمتر و محدود در مقایسه با روش های جوشکاری متداول باریک است که به نوبه خود به دانه های ریزتر و خواص مکانیکی بهتر در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر می‌شود. همه این ویژگی ها جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را به یکی از مناسب ترین فرایندها برای اتصال در حالت جامد تبدیل کرده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کاربردهای زیادی در صنایع خودرو، کشتی سازی، دفاع، هوافضا و غیره دارد [۶]. این روش جوشکاری همچنین به عنوان روشی که قابلیت استفاده در سطح کره ماه را

فناوری ساخت افزودنی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ اختراع شده است. این فرایند را می‌توان به عنوان فرایند افزایش لایه به لایه مواد برای ساخت قطعات تعریف کرد که مزایای زیادی مانند ایجاد امکان نوآوری در طراحی، کاهش مصرف مواد اولیه به کمترین سطح، صرفه جویی در زمان پردازش و کاهش موثر هزینه ساخت را منجر می‌شود. از این رو، در ۲۰ سال گذشته، تحقیق و مطالعه در حوزه ساخت افزودنی یکی از موضوعات داغ بوده است. به دلیل ذوب و انجماد مجدد، عیوب متالورژیکی مانند حساسیت به ترک و تخلخل به طور اجتناب ناپذیری در ساختار قطعات ساخته شده با روشهای ساخت افزودنی مبتنی بر جوشکاری های ذوبی به ویژه در آلیاژهای سبک مانند تیتانیوم و آلومینیوم ایجاد می‌شود [۱]. دلیل ایجاد تخلخل، به دام افتادن گاز است که در حین اتمیزه شدن ذرات پودر اتفاق می‌افتد. تبخیر عناصر آلیاژی عیب دیگری است که در حین استفاده از فرایندهای ذوبی اتفاق می‌افتد. ایجاد ترک در اثر مکانیزم های مختلف از جمله ترک در حین انجماد و ذوب موضعی نیز از جمله عیوب رایج فرایندهای ذوبی است [۲]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۲</sup> روشی جدید بر پایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۳</sup> است که در سالهای اخیر به عنوان یکی از فناوری های جدید ساخت افزودنی معرفی شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک نوع جوشکاری حالت جامد با ابزار غیر مصرفی است [۱]. همچنین فناوری ساخت افزودنی به روش اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به عنوان طرح های فرایندی مختلف برای تولید یک جزء سه بعدی از طریق رسوب لایه به لایه مواد در حالت جامد با استفاده از مکانیزم پردازش اصطکاکی اغتشاشی<sup>۴</sup> تعریف کرد [۳]. علاوه بر این، فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی یک رویکرد ساخت افزودنی حالت جامد نوپا است که امکان لایه نشانی لایه به لایه مواد را فراهم می‌کند. مفهوم لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا به عنوان فرایند روکش دهی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۵</sup> استفاده از ابزار چرخشی توخالی معرفی شد که یک فناوری مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است [۴].

دو نوع اصلی ساخت افزودنی اغتشاشی اصطکاکی وجود دارد: (۱) ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی مبتنی بر ورق که در آن ورق های یک ماده با کمک ابزار جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی

<sup>5</sup> Friction Stir Surfacing

<sup>6</sup> Additive Friction Stir Deposition

<sup>7</sup> The Welding Institute

<sup>1</sup> Additive Manufacturing

<sup>2</sup> Friction Stir Additive Manufacturing

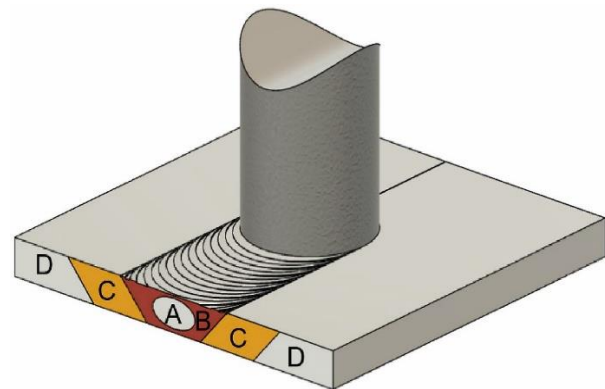
<sup>3</sup> Friction Stir Welding

<sup>4</sup> Friction Stir Processing

است. دلیل ریزساختار بهتر و به طبع آن خواص مکانیکی بهتر قطعات تولید شده به این روش به فرایند تبلور مجدد دینامیکی مربوط می شود. به دلیل تغییر شکل شدید پلاستیکی که در حین فرایند توسط ماده تجربه می شود و همچنین دمای بالا که تا ۸۰٪ دمای ذوب ماده می رسد، در مرز دانه های قدیم، جوانه زنی اتفاق افتاده و دانه های جدیدی شروع به رشد می کنند و جای دانه های قبلی را می گیرند. این دانه های جدید به دلیل زمان کوتاه قرار گرفتن در معرض دمای بالا عموماً کوچکتر از دانه های قبلی هستند و در نتیجه استحکام و سختی ماده نسبت به قبل از فرآوری کاهش می یابد. اگر چه فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی از نظر عملکرد ساختاری تأثیر مثبتی دارد، اما معایبی نیز وجود دارد. این موارد مربوط به بستن قطعه، سایش ابزار در طول زمان، ایجاد تنش های پسماند و هندسه قطعه است [۱۱]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در ۲۰۰۲ ثبت شده است و از این روش برای تولید آلیاژهای با استحکام بالا نیز استفاده شده است [۲]. ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی را می توان به عنوان طرح های فرایندی مختلف برای تولید یک قطعه سه بعدی از طریق رسوب لایه به لایه مواد در حالت جامد با استفاده از مکانیزم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تعریف کرد. اگرچه برای رسیدن به تolerانس ابعادی مطلوب، معمولاً نیاز به فرایند های ساخت مانند ماشین کاری یا سنگ زنی وجود دارد. در حالی که در حال حاضر، ساخت افزودنی به عنوان فرایندی برای تولید قطعات فلزی به خوبی تثبیت شده است، بهینه سازی آلیاژهای موجود و طراحی آلیاژهای پیشرفته که به طور خاص برای ساخت افزودنی حالت جامد طراحی شده اند، همچنان نیاز به مطالعات بیشتری دارد. در این فرایند همانطور که به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است، ورق ها به صورت انباشته و مانند یک ساندویچ از ورق ها با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل می شوند. یک ابزار دوار معمولی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، شامل شانه و پین در ورق ها فرو می رود و به سطح بالایی ورق های زیرین نفوذ می کند. سپس پس از تماس با سطح ورق و گرمایش اصطکاکی، با حرکت در امتداد خط مورد نظر، اتصال ورق ها به یکدیگر انجام می شود [۳].

طول پین و نسبت ابعاد آن به قطر شانه عامل مهمی در طراحی ابزار و در تولید گرمای اصطکاکی کافی برای ادامه فرایند است. برای پوشاندن کل سطح و ساخت یک قطعه سه بعدی، می توان این فرایند را به صورت چند پاس در کنار یکدیگر انجام داد. شکل (۳) اجرای فرایند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی برای ساخت قطعاتی از ورق های روکش دار انباشته را نشان می

دارد مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. این فرایند در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است. فناوری های متنوعی برپایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ابداع و صنعتی سازی شده است که در مقاله مروری ساجد و سیدکاشی [۸] دسته بندی و ارائه شده است. مطالعات گسترده ای در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. از آن جمله احمدی و همکاران [۹] به مطالعه اتصال مس به آلومینیوم با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند و ترکیبات بین فلزی تولید شده در حین جوشکاری را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. امامی خواه و همکاران [۱۰] به مطالعه عددی و تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ پرداخته و تحولات ریزساختاری را هم از مدل المان محدود و هم به صورت تجربی ارزیابی کرده اند. با توجه به این مطالعه، شکست در اتصال از نواحی با سختی کمتر گزارش شده است.



شکل ۱ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۷]

### ۳- ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی

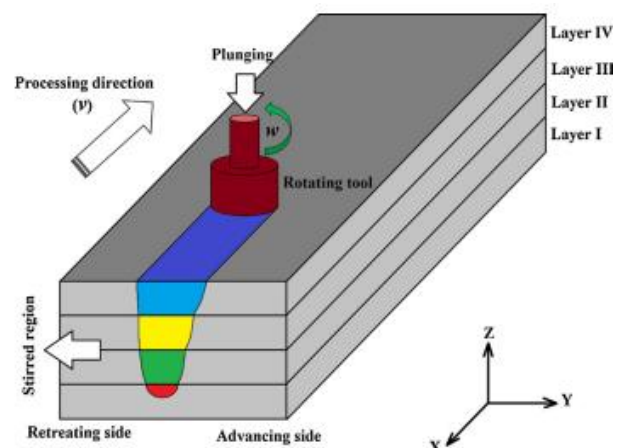
ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی مبتنی بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و یک فرایند ساخت افزودنی حالت جامد برای تولید آلیاژهای سبک وزن با کارایی بالا و هندسه ساده است. ذات این فرایند که شامل استفاده از یک ابزار غیرمصرفی چرخان است که با یک فشار محوری لایه های تشکیل دهنده قطعه را به هم متصل کند، هندسه های قابل دستیابی را محدود می کند. در صورت نیاز به ساخت قطعاتی با هندسه های پیچیده، لازم است از ترکیب این روش با ماشینکاری استفاده نمود. یک کاربرد بالقوه ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی بهبود خواص مکانیکی است. استحکام بالاتر در ساخت آلیاژ های سبک مانند آلیاژهای منیزیم پس از فرایند ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی نشان دهنده پتانسیل این روش برای بهبود ریزساختار

دهد [۳]. یک روش دیگر برای اجرای این فرایند به این صورت است که ابتدا دو ورق به هم جوش داده می شوند و سپس ورق سوم به این دو ورق جوش داده می شود و بعد ورق چهارم جوش داده می شود و فرایند به همین ترتیب ادامه می یابد تا ضخامت مورد نظر ساخته شود. به این دلیل که در این شرایط، در هر مرحله از فرایند، فقط به اندازه ضخامت دو لایه درگیر فرایند جوشکاری هستند، عملاً محدودیتی برای ضخامت قابل دستیابی وجود ندارد، مگر محدودیت های ماشین مورد استفاده برای فرایند که عموماً دستگاه فرز است. همچنین با استفاده از این روش می توان آلیاژهای مختلفی را در لایه های متفاوت به کار گرفت و در نتیجه به قطعه ای دست یافت که در هر لایه یا ضخامت مشخصی، خواص متفاوتی دارد.

۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی متر در دقیقه استفاده کردند و گزارش دادند که ریز ساختار مطلوب با سرعت چرخش ۸۰۰ دور در دقیقه به دست می آید. سرباستاوا و همکاران [۱۳] مروری بر پیشرفت های انجام شده در زمینه ساخت افزودنی حالت جامد مواد فلزی مبتنی بر اصطکاک و به طور مشخص روش های ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی انجام داده و اشاره ای به نمونه سازی سریع<sup>۱</sup> و ابزار سازی سریع داشتند. سرباستا و همکاران [۱۴] مروری بر تولید ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی با استفاده از ابزاری نوآورانه برای افزایش خواص مکانیکی و دستیابی به ریزساختاری مطلوب داشتند. در طول لایه نشانی اصطکاکي اغتشاشی Al-Mg-Si، چرخش ابزار باعث چرخش مواد در منطقه رسوب می شود. شن و همکاران [۱۵] مطالعه ای بر تکامل ریزساختار موضعی و عملکرد مکانیکی آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم ساخته شده به روش افزایشی اصطکاکي اغتشاشی داشتند و سختی و استحکام نمونه ها را ارزیابی کردند. آقاجانی و همکاران [۱۶] به ارزیابی ساختار کامپوزیتی ورق چند لایه پلیمری-فلزادی تولید شده با فناوری ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی پرداختند. بخش های مختلف ساختار ورق چند لایه کامپوزیتی با آزمایشهای خمشی و کششی برای رفتار مکانیکی سازه تولید شده شرح داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، اتصال بین لایه ها دوام بیشتری را در طول آزمایش خمشی در مقایسه با نمونه کششی با نسبت افزایش مقاومت تا ۹۰٪ نشان داده است. در استفاده از فرایندهای اصطکاکي اغتشاشی برای پلیمرها باید توجه داشت که با توجه به دمای فرایند، ذوب موضعی برای پلیمرها اتفاق می افتد که عموماً منجر به تغییر ساختار در ناحیه اتصال و مشکلاتی در حین اجرای فرایند می شود. در شرکت بوئینگ نیز مطالعاتی برای امکان سنجی استفاده از فرایند ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی به صورت تجاری انجام پذیرفته است [۲].

لیو و همکاران [۱۷] موفق شده اند با استفاده از ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی زیر آب قطعه ای از جنس مس خالص با ابعاد ۱۰۰×۲۶×۵ میلیمتر با استفاده از ورق های ۲ میلیمتری بسازند به نحوی که استحکام کششی آن به ۴۳۶ مگاپاسکال و استحکام خستگی آن به ۱۳۰ مگاپاسکال رسیده است. داس و همکاران [۱۸] به بررسی هیبریدسازی ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی با ماشینکاری به منظور صنعتی سازی این فرایند پرداخته و استراتژی های مختلف را مورد بررسی قرار دادند.

شکل ۲ شماتیک ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی [۳]

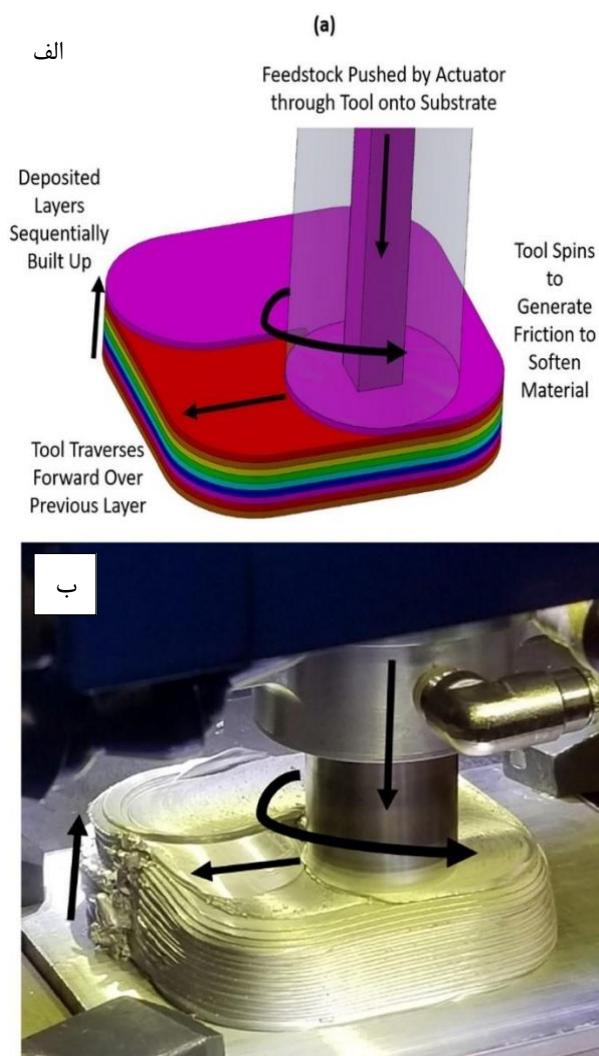


شکل ۲ شماتیک ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی [۳]

سلمان و همکاران [۱۲] چهار لایه کامپوزیت با پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و پودر آلومینا را از طریق ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی متر در دقیقه برای ابزار و با استفاده از اندازه های مختلف پودر آلومینا تولید کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که کامپوزیت های تولید شده در مقایسه با قطعات ساخته شده بدون افزودن پودر آلومینا خواص مکانیکی بهتری دارند. ژائو و همکاران [۱] ویژگی های اتصال بین لایه ای یک آلیاژ آلومینیوم لیتیوم ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزودنی اصطکاکي اغتشاشی را بررسی کردند و تأثیر شکل پین ابزار و پارامترهای فرایند بر ویژگی های پیوند بین لایه ای در میان لایه ها را مورد بحث قرار دادند و اثرات عیوب سطحی بر عملکرد ساخت افزودنی از نظر ریزساختارها، پروفایل های سختی و خواص مکانیکی را بررسی کرده اند. آنها از سرعت های چرخش ابزار ۸۰۰، ۹۰۰ و

<sup>1</sup> Rapid Prototyping

مرحله از لایه نشانی، یک فاصله بین کف ابزار و لایه زیرین برای ایجاد لایه ای دیگر از مواد لایه نشانی شده حفظ می شود. حرکت چرخشی ابزار باعث تولید گرما می شود، بنابراین مواد نرم شده و به شکاف بین شانه ابزار و لایه هایی که قبلاً لایه نشانی شده جریان می یابد [۴].



شکل ۴ (الف) شکل شماتیک ابزار، میله مصرفی، جهت دوران و نیروها در حین فرایند (ب) فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی [۴]

فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی شامل سه مرحله تغذیه، حرکت خطی و انتقال لایه تشکیل شده است. در مرحله تغذیه، میله تغذیه چرخان به آرامی توسط دستگاه تغذیه از مرکز سر ابزار به سمت پایین رانده می شود تا با بستر ثابت تماس پیدا کند. در ابتدا، گرما توسط اصطکاک در محل اتصال میله تغذیه و بستر ایجاد می شود تا زمانی که ماده به طور قابل ملاحظه ای نرم شده و وارد فاز پلاستیک شود. مواد تغذیه شونده



شکل ۳ ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی [۳]

#### ۴- لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی

فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی یک رویکرد ساخت افزودنی حالت جامد نوپا است که امکان لایه نشانی لایه به لایه مواد را فراهم می کند. این مفهوم در ابتدا به عنوان فرایند روکش دهی اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از ابزار چرخشی توخالی معرفی شد که یک فناوری مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تولید گرمای اصطکاکی از اصطکاک شانه ابزار در سطح بالایی صفحات جوش داده شده و هم زدن بین ابزار درون مواد جوش داده شده ناشی می شود. از آنجایی که ابزار فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی پینی ندارد که به داخل ماده فرو رود، تولید گرمای اصطکاکی عمدتاً از چرخش شانه ابزار در بالای سطح مواد لایه نشانی شده ناشی می شود. فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی چندین مزیت را نسبت به جوشهای مبتنی بر جوشکاری سنتی ارائه می کند که شامل تخلخل کمتر، تنش های پسماند کمتر، عمر خستگی بیشتر، شکل پذیری و چقرمگی بهتر، و کاهش مسائل زیست محیطی و ایمنی است که این به دلیل باقی ماندن دمای مواد زیر نقطه ذوب در حین فرایند است. اخیراً، تحقیقات تجربی بر روی فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی برای مواد مختلف از جمله آلیاژهای سخت مانند آلیاژهای پایه نیکل، مس و فلزات سبک مانند آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم انجام شده است. به طور خاص، این فرایند از طریق لایه نشانی مواد بر روی یک بستر، بدون نیاز به تبدیل فاز جامد به مایع ماده در حال لایه نشانی اتفاق می افتد. شکل (۴)، فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی را با فشردن یک ابزار به طول ۳۰۰ میلی متر به عنوان میله مواد اولیه که با یک روان کننده گرافیتی پوشیده شده است را با استفاده از یک ابزار تو خالی دوار نشان می دهد. در هر



لایه های AA6082-T6 را افزایش داد. این فرایند حالت جامد را می توان برای طیف وسیعی از فلزات و آلیاژها و برای تولید قطعات چند لایه پیوسته و کامپوزیتی استفاده کرد. رابینسون و همکاران [۲۱] به ساخت آلیاژ منیزیم AZ31B-F با استفاده از روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی دست پیدا کردند. نتایج نشان می دهد رسوب کاملاً متراکم بوده است و نقص هایی فقط در لبه قطعه تولید شده دیده می شود. البته برای رسیدن به محصول نهایی لبه قطعه ماشینکاری می شود. ویلیامز و همکاران [۲۲] یک قطعه هشت لایه با ماده اولیه WE43-T5 با استفاده از روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی تولید کردند. نتایج نشان می دهد که ریزساختاری مطلوب و همگن بدست آمده است و اندازه دانه ها از ۴۵ میکرون به ۲/۷ میکرون رسیده است.

آلیاژهای منیزیم (Mg) یکی از سبک ترین مواد فلزی با چگالی تقریباً ۳۶ درصد کمتر از آلیاژهای آلومینیوم هستند. این چگالی کم با استحکام ویژه و سختی بالا در آلیاژهای منیزیم همراه است. آلیاژهای منیزیم خواص جذاب دیگری مانند قابلیت محافظت الکترومغناطیسی خوب و زیست سازگاری عالی به دلیل غیر سمی بودن دارند. بنابراین آلیاژهای منیزیم مواد مناسبی برای کاربرد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و زیست پزشکی هستند. محققان به طور گسترده روش های پردازش پیشرفته را برای آلیاژهای منیزیم بررسی کرده اند تا شکل پذیری، عملکرد سطح و خواص حجمی را بهبود دهند. این تلاش ها در زمینه جدید ساخت افزودنی آلیاژهای منیزیم نیز گسترش یافته است. استراتژی های ساخت افزودنی برای آلیاژهای منیزیم، هنوز در مراحل ابتدایی خود هستند. این روشها شامل ساخت افزودنی با استفاده از پرتو لیزر، قوس الکتریکی و ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی هستند [۲۳].

در مطالعه ای که توسط فارابی و همکاران [۵] انجام شده است، لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی Ti6Al4V با استفاده از یک محفظه فشار مثبت پاکسازی شده با گاز آرگون با خلوص بالا برای به حداقل رساندن اکسیداسیون در دماهای بالا انجام شده است. در این لایه نشانی به دلیل استحکام مناسب در دمای بالا، از یک ابزار تنگستنی استفاده شد. در این مطالعه از دور دورانی ۴۵۰ و ۵۰۰ دور در دقیقه، دو سرعت پیشروی ۱/۱۲ و ۱/۴۹ میلیمتر در دقیقه و دو سرعت تغذیه ۲/۵۴ و ۳/۳۸ میلیمتر در دقیقه استفاده شده است. برای کاهش دما در حین فرایند، افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی در نظر گرفته شده است. البته لازم است به منظور ثابت نگه داشتن نرخ لایه نشانی حجمی، نسبت نرخ تغذیه به سرعت پیشروی، ثابت نگه داشته شود. دمای اندازه گیری شده در حین فرایند با استفاده از

که وارد فاز پلاستیک شده اند پیوسته به صورت شعاعی اکستروود می شوند تا جایی که فضای زیر ابزار دوار اشباع شود. سپس مرحله حرکت درون صفحه شروع می شود، جایی که بستر نسبت به ابزار دوار در حرکت قرار می گیرد. در نتیجه، مواد به طور مداوم بر روی بستر لایه نشانی می شود. هنگامی که هندسه مورد نظر توسط حرکت درون صفحه ایجاد شد و یک لایه ایجاد کرد، مرحله انتقال لایه خارج از صفحه شروع می شود، که در آن بستر لایه نشانی در جهت عمودی به اندازه ضخامت لایه مورد نظر پایین می آید [۶].

تکامل ریز ساختار به شدت به متغیرهای فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی بستگی دارد که شامل سرعت چرخش سر ابزار ( $\Omega$ )، سرعت حرکت خطی ( $V$ ) و سرعت تغذیه مواد ( $F$ ) می شود. به طور کلی سرعت چرخش ( $\Omega$ ) نرخ تولید گرما و نرخ کرنش را کنترل می کند، در حالی که ( $V$ ) مدت زمان موجود برای تغییر شکل مواد را تعیین می کند. در نتیجه، نسبت معیاری برای کنترل دما و تغییر شکل پلاستیک است. ( $\Omega/V$ ) سرعت تغذیه مواد ( $F$ ) مقدار مواد تغذیه شده است که در واحد زمان اندازه گیری می شود. در چرخش سر ابزار، گرمای شدید می تواند باعث آسیب به سر ابزار، گیر کردن مواد تغذیه در داخل ابزار توخالی، یا ذوب شدن در موارد شدید شود. کم یا زیاد شدن مقدار مواد تغذیه ممکن است منجر به کیفیت پایین سطح و تشکیل تخلخل شود، زیرا مواد کافی برای لایه نشانی عرضه نمی شود. در صورت درک پارامترهای فرایند و نحوه تغییر ریز ساختار می توان از طریق طراحی فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی، ریز ساختار مطلوب را برای کاربردهای معین تنظیم نمود. به عنوان مثال، با کنترل  $\Omega$ ،  $V$ ، و  $F$ ، می توان به ریز ساختارهایی با دانه های بسیار ریز برای تقویت مرزدانه یا ریز ساختارهایی متشکل از مرزهای دانه ویژه برای جلوگیری از شکست خستگی یا شکنندگی ناشی از نفوذ هیدروژن شد [۱۹].

در ساخت افزودنی به روش لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان به جای میله جامد از پودر استفاده کرد که تولید پوشش های کامپوزیت سطحی را امکان پذیر می کند. این پودرها می توانند سرامیکی یا مخلوطی از پودرهای سرامیکی و فلزی باشند. گاندر و همکاران [۲۰] سه لایه به قطر ۲۰ میلی متر از جنس کامپوزیت سطحی AA6082/SiC را بر روی یک صفحه بستر از جنس AA2024-T3 تولید کردند. آنها از روش میله مصرفی پر شده با استفاده از اندازه های مختلف پودر SiC استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سختی لایه های کامپوزیتی لایه نشانی شده بالاتر از لایه های لایه نشانی شده بدون SiC است. علاوه بر این، افزودن ذرات SiC عملکرد سایشی

ممکن است. همچنین در فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان از نمای جانبی مستقیماً بر سطح جریان مواد نظارت نمود. هدف از این کار، دستیابی به بینش فیزیکی در مورد اصول فرایند لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی از طریق توصیف مستقیم تکامل دما، جریان مواد و روش های تولید گرما با استفاده از رویکردهای نظارت درجا<sup>۱</sup> است. از فناوری تصویربرداری حرارتی مادون قرمز برای نظارت بر تکامل دما در مواد لایه نشانی شده از نمای جانبی استفاده می شود و ترموکوپل ها برای اندازه گیری تکمیلی دما مستقیماً در زیر مواد لایه نشانی شده و در صفحه زیرین قرار داده می شود. در همین حال، بر جریان مواد نیز نظارت می شود تا بینش ارزشمندی در مورد نحوه تولید گرما به دست آید [۶].

## ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، سه روش تولید مورد بررسی قرار گرفتند. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان فرایند اصلی و فرایندهای ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی به عنوان دو روش ساخت افزودنی برگرفته شده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قابل اعمال به طیف وسیعی از فلزات و پلیمرها و همچنین آلیاژهای غیرهمجنس است. پارامترهای موثر در کیفیت جوش شامل هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار است. با توجه به ماهیت حالت جامد این فرایند، عیوب ناشی از ذوب و انجماد در نمونه های تولیدی مشاهده نمی شود و عمدتاً کیفیت بالایی در نمونه های تولید شده مشاهده می گردد. با استفاده از روش ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می توان به یک قطعه یکپارچه دست پیدا کرد که نتایج نشان می دهد ابزار نقش بسیار مهمی در ترکیب ورق ها دارد. این فرایند به دو روش قابل اجرا است. در روش اول لایه ها در یک مرحله و همزمان جوشکاری می شوند. روش دوم شامل جوشکاری دو به دو لایه ها به یکدیگر است که منجر به افزایش ضخامت قابل دسترسی می شود اما زمان فرایند را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. چون عملاً این فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالتی است که ورق ها روی هم قرار می گیرند، همان پارامترهای موثر در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در بالا اشاره شد، در این فرایند نیز اثرگذار است.

دوربین مادون قرمز بین ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد است [۵].

عمده مطالعات صورت پذیرفته در حوزه لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی همانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به فلزات سبک محدود شده و کمتر آلیاژهای استحکام بالا مانند انواع گریدهای فولاد و سوپر آلیاژها مورد مطالعه قرار می گیرد. این در صورتی است که این آلیاژها و به صورت مشخص فولادها شکل پذیری مناسبی دارند. دلیل این امر را باید در سه حوزه جستجو کرد. اول اینکه، عمدتاً این روشها قابلیت خود را در فرآوری آلیاژهایی نشان می دهند که خواص انجماد ضعیفی دارند که مثال روشن آن برخی از گریدهای آلومینیوم است. فولادها عمدتاً گزینه مناسبی برای جوشکاری و به طبع آن ساخت افزودنی ذوبی هستند. دلیل دوم دقیقاً به استحکام بالای این آلیاژها بر می گردد. تغییرشکل پلاستیکی جز جدانشدنی فرایندهای حالت جامد مبتنی بر اصطکاک است. در مورد فولاد و سایر آلیاژهای استحکام بالا، نیاز به استفاده از نیروهای بیشتر و به دنبال آن دستگاه های با تناژ بالاتر است که خود عاملی محدود کننده در کاربرد این آلیاژها است. دلیل سوم سایش بالای ابزار در پردازش آلیاژهای استحکام بالا است که منجر می شود تا این فرایندها به سرعت مزیت اقتصادی بودن خود را از دست بدهند.

دما در طول فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد دمای ذوب ماده پایه است. دماهای بالاتر باعث سایش ابزار در حین لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی می شود. برای اندازه گیری مستقیم تکامل دما در مواد لایه نشانی شده، جاسازی ترموکوپل ها در منطقه پردازش چالش برانگیز است زیرا مقادیر زیاد تغییر شکل پلاستیکی احتمالاً هر حسگر فیزیکی را از بین می برد. علاوه بر این، ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پردازش اصطکاکی اغتشاشی و لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی، ناحیه اغتشاشی یا منطقه لایه نشانی را پنهان می کند و نظارت بر تکامل دما را چالش برانگیز می کند. با این حال، یک تفاوت مهم در لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی این است که مواد لایه نشانی شده در بالای بستر قرار می گیرند، در حالی که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یا پردازش اصطکاکی اغتشاشی منطقه اغتشاشی در داخل قطعه کار است. در نتیجه، در فرایند لایه نشانی افزودنی اصطکاکی اغتشاشی امکان اندازه گیری مستقیم تکامل دما در مواد لایه نشانی شده فقط با استفاده از روش های غیر تماسی

<sup>1</sup> In situ monitoring

فلزی باشند. سرعت بیش از حد ابزار تولید گرمای شدید می کند که منجر به اتصال مواد لایه گذاری شده به ابزار شده و ابزار را دچار آسیب می کند. کیفیت سطح قطعه به نرخ تغذیه بستگی دارد. قطعات تولید شده به روش لایه نشانی افزایشی اصطکاکی اغتشاشی خواص مکانیکی مطلوبی دارند که این خواص وابسته به ریز ساختار قطعه است. به عنوان مثال، در نمونه های تولید شده به این روش، ریز ساختار همگن و اندازه دانه ها کوچک تر از نمونه تجاری است که برای آلیاژ T5-WE43 این مورد به خوبی قابل مشاهده هست. به منظور مقایسه بهتر این روشها، اطلاعات مربوط به فرایندهای مورد مطالعه در مقاله حاضر در جدول (۱) خلاصه شده است.

در فرایند ساخت افزایشی اصطکاکی اغتشاشی می توان از لایه هایی با مواد مختلف استفاده کرد و به قطعه ای رسید که در هر لایه خواص مکانیکی متفاوتی داشته باشد. همچنین با استفاده از این روش می توان لایه های فلزی و غیر فلزی باهم ترکیب کرد. روش لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی شامل ابزار مصرفی است و در هر مرحله یک لایه از ابزار روی بستر قرار می گیرد و بنابراین تفاوت قابل ملاحظه ای از نظر فرایندی با روش قبلی دارد. پارامترهای موثر در فرایند لایه نشانی افزایشی اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و نرخ تغذیه پودر یا میله است. برای رسیدن به ضخامت لایه مورد نظر باید شانه ابزار از بستر فاصله پیدا کند. مواد تغذیه شونده می تواند به صورت پودر یا میله جامد باشد. این پودرها می توانند سرامیکی یا مخلوطی از پودرهای سرامیکی و زمینه

جدول ۱ مقایسه روش های تولید مورد مطالعه در این مقاله

معایب	مزایا	پارامترهای موثر	روش تولید
سایش بالای ابزار در جوشکاری آلیاژهای با سختی بالا نظیر فولاد، نیاز به ابزار خاص با عوض شدن ضخامت یا جنس قطعه	حالت جامد بودن فرایند، عدم نیاز به آماده سازی، سبز بودن فرایند، قابلیت اتصال آلیاژهای غیرهمجنس	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
محدودیت هندسه قطعه قابل تولید، محدودیت در ضخامت قابل تولید	حالت جامد بودن فرایند، قابلیت تولید قطعات با لایه های ناهمجنس، تولید قطعات در زمان کوتاه	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی تک مرحله
محدودیت هندسه قطعه قابل تولید، زمان زیاد تولید قطعه در صورت افزایش ضخامت	حالت جامد بودن فرایند، قابلیت تولید قطعات با لایه های ناهمجنس، عدم وجود محدودیت در ضخامت قطعه تولیدی	هندسه ابزار، سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، نیروی محوری، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار	ساخت افزودنی اصطکاکی اغتشاشی با جوشکاری دو به دو ورق ها
مصرفی بودن ابزار، امکان عدم اتصال مناسب بین لایه ها در صورت استفاده از آلیاژهای ناهمجنس	حالت جامد بودن فرایند، عدم وجود محدودیت در ضخامت قطعه تولیدی	سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و نرخ تغذیه پودر یا میله	لایه نشانی اصطکاکی اغتشاشی

## ۶- مراجع

- Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 18, pp. 10090-10121, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/09544062221101754>.
- [3] F. Khodabakhshi and A. Gerlich, "Potentials and strategies of solid-state additive friction-stir manufacturing technology: A critical review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 77-92, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.030>.
- [4] G. G. Stubblefield, K. Fraser, B. J. Phillips, J. B. Jordon, and P. G. Allison, "A meshfree
- [1] Z. Zhao, X. Yang, S. Li, and D. Li, "Interfacial bonding features of friction stir additive manufactured build for 2195-T8 aluminum-lithium alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 38, pp. 396-410, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.042>.
- [2] H. Venkit and S. K. Selvaraj, "Review on latest trends in friction-based additive manufacturing techniques," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of*

- [13] M. Srivastava, S. Rathee, S. Maheshwari, A. Noor Siddiquee, and T. K. Kundra, "A Review on Recent Progress in Solid State Friction Based Metal Additive Manufacturing: Friction Stir Additive Techniques," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 44, no. 5, pp. 345-377, 2019/09/03 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1490250>.
- [14] A. Kumar Srivastava, N. Kumar, and A. Rai Dixit, "Friction stir additive manufacturing – An innovative tool to enhance mechanical and microstructural properties," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 263, p. 114832, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114832>.
- [15] Z. Shen et al., "Local microstructure evolution and mechanical performance of friction stir additive manufactured 2195 Al-Li alloy," *Materials Characterization*, vol. 186, p. 111818, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111818>.
- [16] H. A. Derazkola, F. Khodabakhshi, and A. Simchi, "Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology," *Polymer Testing*, vol. 90, p. 106690, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106690>.
- [17] M. Liu et al., "Achieving high fatigue strength of large-scale ultrafine-grained copper fabricated by friction stir additive manufacturing," *Materials Letters*, vol. 346, p. 134531, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134531>.
- [18] A. Das, T. Medhi, S. Kapil, and P. Biswas, "Different build strategies and computer-aided process planning for fabricating a functional component through hybrid-friction stir additive manufacturing," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 1-22, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2228258>.
- [19] R. J. Griffiths et al., "Solid-state additive manufacturing of aluminum and copper using additive friction stir deposition: Process-microstructure linkages," *Materialia*, vol. 15, p. 100967, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100967>.
- [20] J. Gandra, P. Vigarinho, D. Pereira, R. M. Miranda, A. Velhinho, and P. Vilaça, "Wear characterization of functionally graded Al-SiC composite coatings produced by Friction Surfacing," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 52, pp. 373-383, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.059>.
- [21] T. W. Robinson, M. Williams, H. Rao, R. P. Kinser, P. Allison, and J. Jordon, "Microstructural and computational framework for the numerical simulation of the solid-state additive manufacturing process, additive friction stir-deposition (AFS-D)," *Materials & Design*, vol. 202, p. 109514, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109514>.
- [5] E. Farabi, S. Babaniaris, M. R. Barnett, and D. M. Fabijanic, "Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloys fabricated by additive friction stir deposition," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 2, p. 100034, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addlet>.
- [6] D. Garcia et al., "In situ investigation into temperature evolution and heat generation during additive friction stir deposition: A comparative study of Cu and Al-Mg-Si," *Additive Manufacturing*, vol. 34, p. 101386, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101386>.
- [7] C. Strawn and A. M. Strauss, "Investigation of friction stir welding for lunar applications," *Acta Astronautica*, vol. 210, pp. 364-371, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.035>.
- [8] M. Sajed and S. Seyedkashi, "Analysis of Material Flow and Phase Transformation in Friction Hydro-Pillar Processing of 1045 Steel," *ADMT Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 31-37, 2020, doi: <https://doi.org/10.30495/admt.2020.1900258.1198>.
- [9] M. Ahmadi, H. R. Ahmadi, M. R. Khanzadeh, and H. Bakhtiari, "Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA1050 aluminum alloy to copper," (in eng), *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, Research vol. 9, no. 1, pp. 31-38, 2023. [Online]. Available: <http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-426-en.html>.
- [10] A. Emamikhah, A. Kazerooni, M. Rakhshkhorshid, Numerical and experimental study of microstructural and mechanical evolutions in dissimilar friction stir welding of AA5083-O and AA6061-T6 aluminum alloys," (in persian), *Journal of Mechanical Engineering of University of Tabriz*, Vol. 53, pp. 121-130, 2023, doi: <https://doi.org/10.22034/JMEUT.2023.54083.3199>.
- [11] N. Gotawala, N. Kumar Mishra, and A. Shrivastava, "Solid-state depositions of multilayer SS304 by friction stir metal deposition," *Materials Letters*, vol. 314, p. 131881, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131881>.
- [12] M. M. El-Sayed Seleman et al., "The Additive Manufacturing of Aluminum Matrix Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Produced via Friction Stir Deposition Using Different Initial Material Conditions," *Materials*, vol. 15, no. 8, p. 2926, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15082926>.

[23] S. S. Joshi et al., "Additive friction stir deposition of AZ31B magnesium alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 10, no. 9, pp. 2404-2420, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.03.011>.

mechanical properties of a solid-state additive manufactured magnesium alloy," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 144, no. 6, p. 061013, 2022.

[22] M. B. Williams et al., "Elucidating the Effect of Additive Friction Stir Deposition on the Resulting Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy WE43," *Metals*, vol. 11, no. 11, p. 1739, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/met11111739>.

## بررسی مقایسه‌ای رفتار رئولوژی نانو روغن‌های دارای درصد ترکیب مختلف نانوذرات در روغن پایه و تعیین بهینه‌ترین نانو روانکار

**چکیده:** بررسی خواص دو نانو روانکار هیبریدی ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 و ZnO(50%)-MWCNT(50%)/SAE40 در شرایط مختلف به روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی و معرفی نانو روانکار بهتر در این مطالعه انجام می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۲۵-۵۰°C، کسر حجمی ۰/۰۶۲۵-۱ درصد و نرخ برشی  $666.5-9331 \text{ s}^{-1}$  و با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد CAP 2000+ انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد هر دو نانو روانکار دارای رفتار غیر نیوتونی و از نوع شبه پلاستیک می‌باشند. بیشترین افزایش ویسکوزیته برای نانو روانکار ZnO(50%)-MWCNT(50%)/SAE40 و به میزان ۲۸٪ و بیشترین افت ویسکوزیته برای نانو روانکار ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 و به میزان ۳٪ اتفاق افتاد و بنابراین نانو روانکار ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است و همچنین  $R^2 = 0.9999$  بدست آمد. مقدار  $3\% < \text{MOD} < 3\%$  - بدست آمد و بیانگر خطای کم مدل‌سازی است.

واژه‌های راهنما: نانو روغن هیبریدی، ویسکوزیته، MWCNT، رفتار رئولوژیکی، RSM

محمد همت اسفه\*

دانشیار،  
گروه مهندسی مکانیک،  
دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه جامع امام حسین (ع)،  
تهران

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

Mohammad  
Hemmat Esfe\*  
Associate Professor,  
Mechanical Engineering,  
Department of  
Mechanical Engineering,  
Imam Hossein University,  
Tehran

## A comparative study of the rheological behavior of nano-oils containing different percentages of nanoparticles in the base oil and determining the most optimal nano-lubricant

**Abstract:** The investigation of the properties of two hybrid nano-lubricants MWCNT (30%)/ZnO(70%)-SAE40 and MWCNT(50%)/ZnO(50%)-SAE40 in different conditions by experimental and modeling methods and introducing a better nano-lubricant are done in this study. Experiments are performed in the temperature range of 25-50°C, volume fraction of 0.0625-1% and shear rate of 666.5-9331s<sup>-1</sup> and the viscometer of Brookfield CAP 2000+ is used the results showed that both nano-lubricants have non-Newtonian and pseudo-plastic behavior. The highest increase of viscosity is occurred for nano lubricant of MWCNT-ZnO (50%-50%)/SAE40 by 28%, and the highest drop is occurred for nanolubricant MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40 by 3% and therefore MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40 nanolubricant has better performance. The results of the correlation provided by rsm method are in good agreement with the experimental data and  $R^2 = 0.9998$  is obtained. The value of  $-0.95\% < \text{MOD} < 1.10\%$  is obtained and indicates a low modeling error. The sensitivity of nano-oil also increased with increasing the volume fraction.

**Keywords:** Hybrid Nano Oil, Viscosity, Nanofluid, MWCNT, Rheological Behavior, RSM

## ۱- مقدمه

افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد و کیفیت سیالات و دسترسی به مواد در اندازه مولکولی بسیار کوچک با نسبت سطح به حجم زیاد توجه محققان زیادی را در صنعت به خود جلب کرده است. نسبت سطح به حجم یک ذره ۱۰ نانومتری حدود ۱۰۰۰ برابر بیشتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد که این نسبت علاوه بر افزایش انتقال حرارت باعث کاهش چگالی و افزایش ویسکوزیته می‌شود [۱-۳].

رشد قابل توجه صنعت خودرو در سال‌های اخیر باعث پیشرفت در سایر صنایع مرتبط شده است. یکی از این صنایع، تولید روغن موتور است. روغن موتور نقش اساسی در روغن کاری و خنک سازی موتورها دارد. روغن موتورهای با کیفیت پایین، باعث کاهش طول عمر قطعات موتور می‌شوند [۴-۷].

طی سالهای اخیر، تلاش‌های زیادی برای بهبود کیفیت و کارایی روغن موتور انجام شده است. یکی از آنها افزودن ذرات در اندازه نانو به روغن‌های خالص است که نانوروغن نامیده می‌شوند [۸-۱۱]. نانوروغن‌ها دارای خواص رئولوژیکی ویژه و متفاوت در مقایسه با روغن‌های پایه هستند [۱۲-۱۴]. یکی از مهمترین پارامترها در بررسی خواص رئولوژیکی نانوروغن‌ها، ویسکوزیته آن‌ها است. ویسکوزیته یک پارامتر مؤثر در روان کننده‌های مانند روغن موتور که به دما، سرعت برش، کسر حجمی جامد و سایر پارامترها بستگی دارد [۱۵-۱۸]. بررسی اثرات ویسکوزیته بر کارایی روغن‌های پایه توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۱۹].

اسدی و همکارانش [۲۰] تغییرات ویسکوزیته نانوسیال MWCNTs-MgO/SAE40 در دمای ۲۵-۵ درجه سانتی‌گراد و در غلظت ۲۵-۲ درصد را گزارش کردند. آزمایشات رئولوژیکی نانوسیال نشان داد که نانوسیال ساخته شده دارای رفتار نیوتنی مانند روغن پایه است. همچنین با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و حداکثر افزایش ویسکوزیته در غلظت ۲٪ در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۶۵٪ و حداقل افزایش آن در غلظت ۲۵٪ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۴/۴٪ است.

همت اسفه و همکاران [۲۱] به بررسی تغییرات ویسکوزیته نانوروغن کننده MWCNT-ZnO(10%-90%)/5W50 در دما و نرخ برش‌های مختلف پرداختند. نتیجه بهینه سازی ویسکوزیته نانوسیال نشان داد که در دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۱٪، حداقل مقدار ویسکوزیته برابر ۳۸/۱۶٪ است. سپیانی و همکارانش [۲۲] تغییرات ویسکوزیته و خصوصیات

رئولوژیکی روغن پایه SAE50 تحت تأثیر نانوذرات ZnO در کسر حجمی‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات بدست‌آمده نشان می‌دهد در دمای پایین و کسر حجمی ۱/۵ درصد، بیشترین میزان افزایش ویسکوزیته به میزان ۱۲ درصد است. همچنین مشاهده شده که با افزایش دما، ویسکوزیته ۴۰۰ درصد کاهش یافته است.

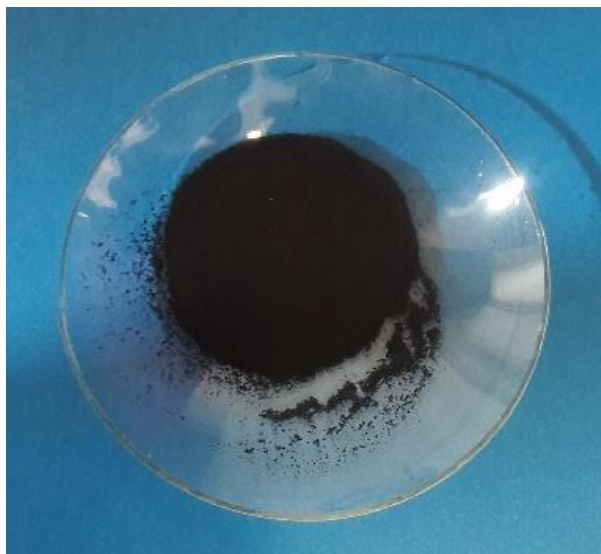
حوزین و همکاران [۲۳] به بررسی انتقال حرارت و ویسکوزیته سه نانوسیال بر پایه آب و با حضور نانوذرات TiO<sub>2</sub>، ZnO و نقره پرداختند. اندازه نانوذرات ZnO، TiO<sub>2</sub> و نقره به ترتیب برابر با ۱۴، ۲۰ و ۱۶ نانومتر گزارش شد. نانوسیالات با غلظت‌های حجمی ۰/۲۵٪ تهیه شدند و به منظور بررسی کیفیت توزیع نانوذرات از تست پتانسیل زتا استفاده شد. نتایج نشان داد نانوسیالات دارای پایداری و توزیع خوبی هستند و میزان افزایش ویسکوزیته برای نانوسیالات ZnO، TiO<sub>2</sub> و نقره بر پایه آب به ترتیب برابر با ۵/۳، ۵/۱ و ۴/۷ بدست آمد.

همت اسفه و همکاران [۲۴] به بررسی تغییرات ویسکوزیته دینامیکی نانوروغن کننده ترکیبی MWCNT-ZnO/SAE40 در دمای ۶۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۱-۰٪ پرداختند. نتایج این گونه آزمایشات در دماها و کسر حجمی‌های مختلف نشان داد که نانوروغن کننده رفتار نیوتنی دارد. اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز نشان می‌دهد که با افزایش دما ویسکوزیته کاهش می‌یابد و با افزایش کسر حجمی، افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر افزایش ویسکوزیته نانوروغن کننده برابر ۳۳/۳ درصد است.

داردان و همکاران [۲۵] تغییرات رفتار رئولوژیکی و ویسکوزیته سیال پایه SAE40 با افزودن نانوذرات MWCNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دما و کسر حجمی‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده است. آزمایشات رئولوژیکی نانوسیال نشان داد که نانوسیال ساخته شده دارای رفتار نیوتنی مانند روغن پایه است. نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نشان داد با افزایش کسر حجمی و کاهش دما، ویسکوزیته نانوسیال افزایش پیدا می‌کند.

همت اسفه و همکاران [۲۶] به بررسی ویسکوزیته روغن پایه SAE40 در اثر افزودن نانوذره MWCNTs-SiO<sub>2</sub> در دماهای مختلف و کسر حجمی بین ۰/۰۶۲۵ تا ۲ درصد پرداختند. نتایج بدست آمده در آن تحقیق به افزایش ۳۰/۲ درصدی ویسکوزیته در بهترین حالت اشاره می‌کند. جیلین [۲۷] تأثیر دما و کسر حجمی جامد بر ویسکوزیته پویای روغن موتور SAE50 در حضور نانوذره ZnO را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در محدوده دمای ۶۵-

ترکیب های مختلف ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ در روغن پایه SAE40 استفاده گردید. در شکل (۱) و جدول (۱)، نانوذرات، مشخصات فیزیکی و خواص شدتی گزارش شده است.



الف) MWCNT



ب) ZnO

شکل ۱ نمونه های نانوذرات تهیه شده با روش دومرحله ای

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و خواص شدتی نانوذرات

نانوذرات	MWCNTs	ZnO
خلوص	>۹۵ wt%	۹۹%
رنگ	سیاه	سفید
چگالی واقعی	~۱/۲ g.cm <sup>۳</sup>	۵/۶۰۶g/cm <sup>۳</sup>
APS	ID: ۳-۵ nm OD: ۱۵-۵ nm ~۵۰ um (Length)	۳۰-۱۰ nm
SSA	>۲۳۳ m <sup>۲</sup> .g	۶۰-۲۰ m <sup>۲</sup> /g
ساختار	استوانه ای	شبه به کره

۲۵ درجه سانتی گراد و کسر حجمی های مختلف، با افزایش غلظت، ویسکوزیته به مقدار ۲۵/۳ درصد نسبت به روغن پایه افزایش یافته است موسوی و همکاران [۱۲] در مطالعه ای تجربی به مطالعه خواص رئولوژیکی نانوسیالات ZnO و MoS<sub>2</sub> بر پایه روغن دیزل پرداختند. تأثیر دما و کسر حجمی نانوذرات بر روی ویسکوزیته هر دو نانوسیال مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیالات شامل ZnO دارای ویسکوزیته دینامیکی بالاتری نسبت به نانوسیالات شامل MoS<sub>2</sub> هستند. همچنین حداکثر افزایش ویسکوزیته سینماتیکی در کسر وزنی ۰/۷٪ برای هر دو نانوسیال حاصل شد. محتوای بهینه نانوذرات ZnO و MoS<sub>2</sub> به ترتیب ۰/۴ و ۰/۷ درصد وزنی گزارش شد.

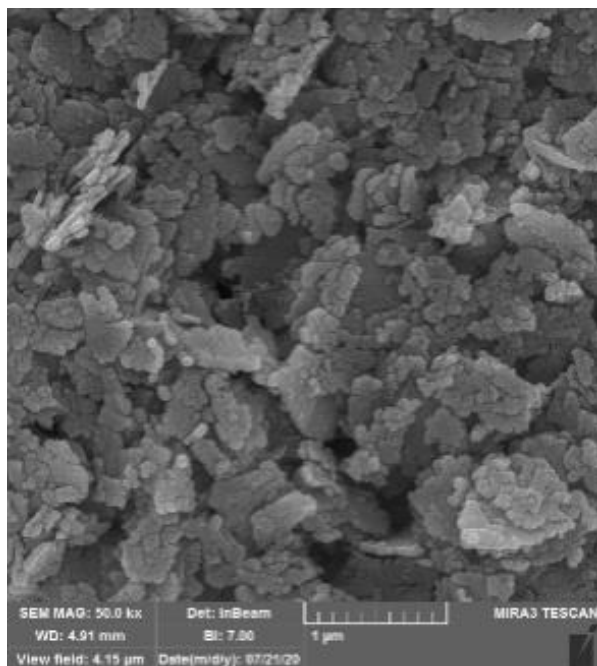
عبداللهی مقدم و همکاران [۲۸] تغییرات رئولوژیکی نانو روان کننده هیبریدی با پراکندگی نانوذرات اکسید مس (CuO) و نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNT) به روغن موتور SAE40 و ویسکوزیته نانوسیال در کسرهای حجمی ۱٪-۰/۶۲۵ و دمای ۵۰-۲۵ درجه سانتیگراد و نرخ برشی متفاوت اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که در غلظت ۱٪، ویسکوزیته نانو روان کننده ترکیبی، ۴۷/۲۹ درصد بیشتر از ویسکوزیته روغن پایه است. مطالعه انجام شده بر روی رفتار رئولوژیکی ثابت کرد که نانو روغن روان کننده و روغن خالص نیوتونی نبوده است. در این مطالعه به بررسی و مقایسه خواص رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی ZnO - MWCNT بر پایه روغن موتور SAE40 در نسبت های مختلف از نانوذرات پرداخته می شود. در ابتدا روند تهیه نانو روغن ها به همراه مشخصات نانوذرات ZnO و MWCNT و سپس نحوه اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیالات و دستگاه های مورد استفاده بیان می گردد. به منظور بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی، عدم قطعیت مربوط به ویسکوزیته نانو روغن محاسبه می شود. ارائه نتایج که شامل بررسی رفتار رئولوژیکی نانوروغن با استفاده از روش های مختلف، تحلیل ویسکوزیته نسبی و تأثیر پارامتر دما بر ویسکوزیته می باشد در ادامه بیان می گردد. به منظور پیش بینی ویسکوزیته نانو سیال با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه ای بر حسب دما، کسر حجمی و نرخ برشی نانو روغن ارائه گردید و دقت آن با استفاده از پارامترهای مختلف ارزیابی شد.

## ۲- فرآیند تجربی

### ۲-۱- تهیه نمونه

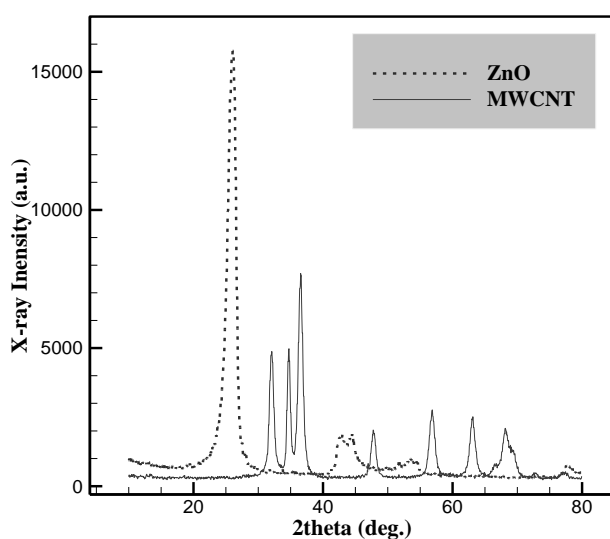
برای تهیه نانوروانکار نیاز به نانوذرات و روغن پایه است. به همین منظور از نانوذرات اکسید روی و نانولوله کربنی با نسبت





ZnO (ب)

شکل ۲ تصاویر SEM از نانوذرات مختلف



شکل ۳ آنالیز XRD برای نانوذرات مختلف

## ۲-۲- اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی

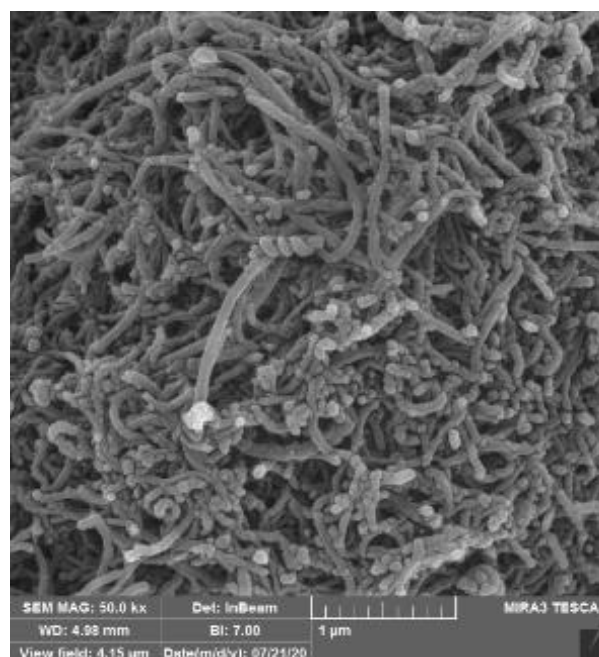
برای تحلیل رفتار رئولوژیکی نانوروغن ها، نیاز به کسب اطلاعات از خواص ترموفیزیکی از جمله ویسکوزیته است. به همین منظور از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد CAP2000+ برای اندازه گیری ویسکوزیته در محدوده شرایط آزمایش برای هر یک از نانوروانکارها استفاده شد (جدول ۲). قبل از اندازه گیری، فرآیند کالیبراسیون برای کاهش خطا در اندازه گیری انجام گردید. همچنین برای افزایش دقت در نتایج تحلیل رئولوژی، آزمایش ها دوبار اندازه گیری و سپس میانگین داده ها ثبت

برای تعیین مشخصات فیزیکی و بررسی مورفولوژی سطح نمونه (شناسایی اولیه مواد، اندازه گیری ابعاد ذرات، شکل هندسه و آنالیز ساختاری مواد نانوذرات) از روشهای عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز اشعه پراش ایکس استفاده گردید. در شکل های (۲) و (۳)، نمونه تصاویر مربوط به عکس برداری ها مشاهده می شود.

برای محاسبه مقدار نانومواد مصرفی با نسبت ترکیب های مختلف از رابطه (۱) استفاده گردید. همچنین از یک ترازوی دیجیتال محفظه دار (برای افزایش دقت در اندازه گیری و حذف تاثیرات محیطی از جمله هوا) برای توزین بکار گرفته شد.

$$\varphi = \left( \frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{NP} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{MWCNT}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{MWCNT} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{NP} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{base-oil}} \right) \times 100 \quad (1)$$

بعد از تهیه نانوروغن ها در کسر حجمی های مختلف، از دستگاه همزن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه برای مخلوط و همگن سازی اولیه استفاده گردید. همچنین برای کاهش ناپایداری و شکاندن خوشه های نانوذرات از دستگاه لرزاننده مافوق صوت به مدت ۱ ساعت استفاده شد. در طول ارتعاش، دمای دستگاه در ۶۰°C به منظور تسهیل در جداسازی نانوذرات و کاهش خوشه ها ثابت بود.



MWCNT (الف)

## ۲-۳- عدم قطعیت

ویسکومتر CAP2000+ که در این مطالعه استفاده شد دارای دقت  $\pm 2$  برای ویسکوزیته و  $\pm 1$  برای دما می باشد. عدم قطعیت به صورت اثر تجمعی خطاها بر نتایج نهایی تعریف می شود و برای محاسبه آن می توان از فرمول (۲) استفاده کرد.

$$U = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

U نشان دهنده عدم قطعیت، S بیانگر انحراف از معیار و N تعداد تست ها می باشد. S را از رابطه (۳) می توان محاسبه کرد.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$\bar{X}$  و  $X_i$  برابر با مقدار اندازه گیری شده و مقدار میانگین است.

برای نانوسیال MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40 در دمای ۳۵ درجه سانتی، کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ و نرخ برشی  $s^{-1}$  ۶۶۶۵ مقادیر جدول (۵) بدست آمد. بنابر این مقدار عدم اطمینان برابر با ۰/۱۲۱ می باشد.

جدول ۵ عدم اطمینان در اندازه گیری ویسکوزیته

شماره آزمایش	ویسکوزیته اندازه گیری شده	
۱	۱۷۸/۹	۱۷۸/۹
۲	۱۷۸/۳	۱۷۸/۳
۳	۱۷۹/۲	۱۷۹/۲
میانگین	۱۷۸/۸	
S	۰/۲۱	
U	۰/۱۲۱	

## ۳- بحث و نتیجه گیری

## ۳-۱- رفتار رئولوژیکی

رئومتر دستگاهی است که توانایی اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی مواد مختلف در طیف وسیعی از نرخ برش و درجه حرارت را دارد. پارامتر مهمی که در مطالعه رفتار رئولوژیکی نانوسیالات کاربرد دارد، ویسکوزیته است که برای توصیف بافت سیال استفاده می شود [۲۹-۳۰].

گردید. برخی از داده های اندازه گیری شده در جدول (۳) گزارش شده است. در جدول (۴) مشخصات فنی و شرایط محیطی استفاده از دستگاه ویسکومتر ذکر شده است.

جدول ۲ مشخصات اندازه گیری نانوروغن ها

نانوسیال	MWCNT(30%)/ZnO (70%)-SAE40	MWCNT(50%)/ZnO (50%)-SAE40
تنش برشی ( $s^{-1}$ )	۶۶۶/۹۳۳۱-۵	۶۶۶/۹۳۳۱-۵
کسر حجمی (%)	۰/۱-۰۶۲۵	۰/۱-۰۶۲۵
دما ( $^{\circ}C$ )	۵۰-۲۵	۵۰-۲۵

جدول ۳ برخی از داده های اندازه گیری شده با ویسکومتر CAP2000+

نانوسیال	کسر حجمی (%)	دما ( $^{\circ}C$ )	نرخ برشی ( $s^{-1}$ )	$\mu$ (mPa.s)
MWCNT(50%)/ZnO(50%)-SAE40	۰/۰۶۲۵	۲۵	۱۳۳۳	۳۵۶
	۱	۳۰	۱۳۳۳	۳۲۶
	۰/۲۵	۴۵	۲۶۶۶	۱۱۴/۴
MWCNT(30%)/ZnO(70%)-SAE40	۰/۰۶۲۵	۲۵	۱۳۳۳	۳۴۵
	۰/۲۵	۴۵	۲۶۶۶	۱۱۵/۳
	۱	۳۰	۱۳۳۳	۳۰۸

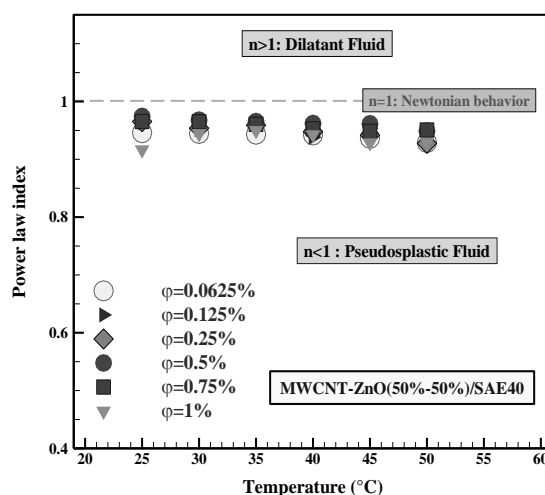
جدول ۴ مشخصات تکنیکی دستگاه ویسکومتر

مشخصات	CAP ۲۰۰۰+
ولتاژ ورودی	۱۱۵-۲۳۰ V
فرکانس ورودی	۵۰-۶۰ Hz
توان مصرفی	کمتر از ۳۴۵ ولت
رنج گشتاور	۱۸۱۰۰ rpm
سرعت	۵-۱۰۰۰ rpm
دما	۵-۵۵ $^{\circ}C$
جنس ماده	دوک های مخروطی و صفحات حرارتی از کاربید تنگستن و نگهدارنده نمونه از تفلون ساخته شده اند.
تأثیر عوامل محیطی	شرایط دمای محیطی ویسکومتر: $5-20^{\circ}C$ شرایط میزان رطوبت ویسکومتر: ۲۰-۸۰٪

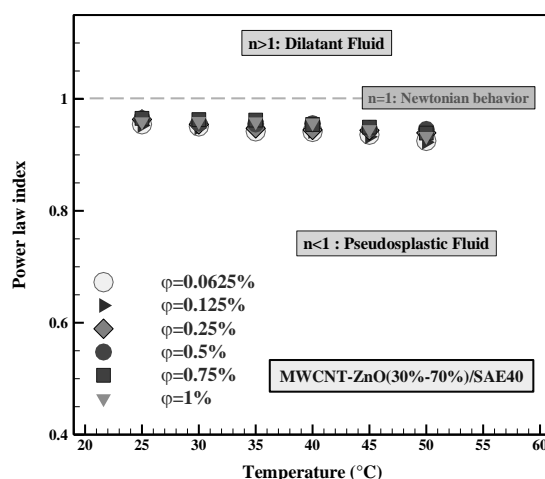
### ۳-۱-۱- شاخص قاعده توانی<sup>۱</sup>

از روش‌های مهم برای تشخیص رفتار رئولوژیکی نانوروغن‌ها، استفاده از مدل قاعده توانی<sup>۱</sup> است. نمودار قاعده توانی براساس تغییرات دما برای هر دو نانوروغن رسم شده است. در این قسمت به بررسی و مقایسه رفتار رئولوژیکی نانوروغن‌های هیبریدی و دسته‌بندی آن‌ها در گروه‌های نیوتنی و غیرنیوتنی با استفاده از شاخص توانی پرداخته می‌شود. در معادله (۴)، پارامترهای  $m$  و  $n$  به ترتیب بیانگر ضریب قدرت سیال و شاخص جریان در محدوده دمایی مختلف برای تشخیص رفتار نیوتنی و غیر نیوتنی نانوذرات است.

$$\tau = m(\dot{\gamma})^n \quad (۴)$$



الف) MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40



ب) MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40

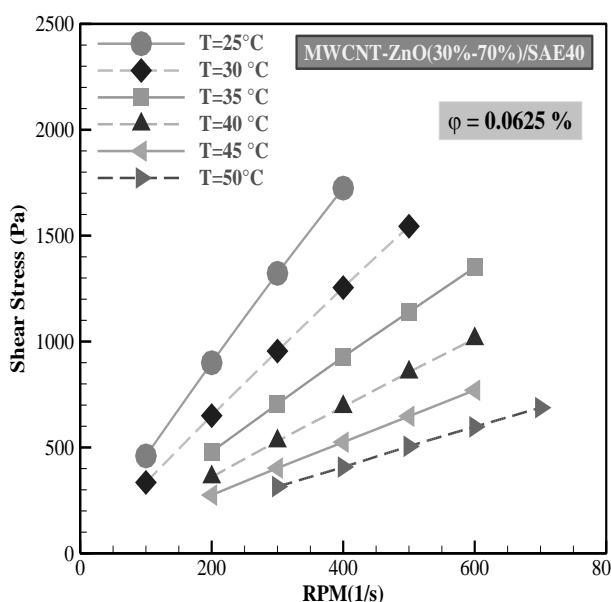
شکل ۴ اثر دما و کسر حجمی بر روی شاخص قاعده توانی

شکل (۴)، محدوده مقادیر  $n$  را با توجه به تغییرات دما در پارامترهای مختلفی چون کسر حجمی و نرخ برش نشان می‌دهد که رفتار غیرنیوتنی نانوروغن را آشکار می‌کند. بنابراین یکی از شروط لازم برای بکارگیری ترکیب نانوساختار در صنعت، نوسانی بودن ویسکوزیته است که در مقادیر  $n < 1$  محقق می‌شود.

### ۳-۱-۲- رابطه بین تنش برشی (τ) و نرخ برشی (γ̇)

رفتار رئولوژیکی هر سیال از رابطه بین تنش برشی (τ) و نرخ برشی (γ̇) تعریف می‌شود. تنش برشی، نیروی برشی در واحد سطح است. این نسبت به عنوان معیاری از ویسکوزیته (η) می‌باشد. ویسکوزیته یک پارامتر اساسی برای تعیین رفتار رئولوژیکی سیالات شناخته شده است. ویسکوزیته می‌تواند به عنوان اندازه گیری مقاومت در طی جریان توسط لایه‌های مجاور به یکدیگر تعریف شود [۳۱-۳۲]. با توجه به شکل (۵)، شیب منحنی‌های جریان در محدوده دمایی مختلف برای تشخیص رفتار نیوتنی و غیرنیوتنی نانوذرات مرد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت هر سه نانو روغن در گروه سیالات غیرنیوتنی و از نوع شبه پلاستیک و رفتار رقیق گردانی برش<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. این ویژگی برای روغن موتورها و روانکارهای دیگر در صنعت، امتیاز محسوب می‌شود.



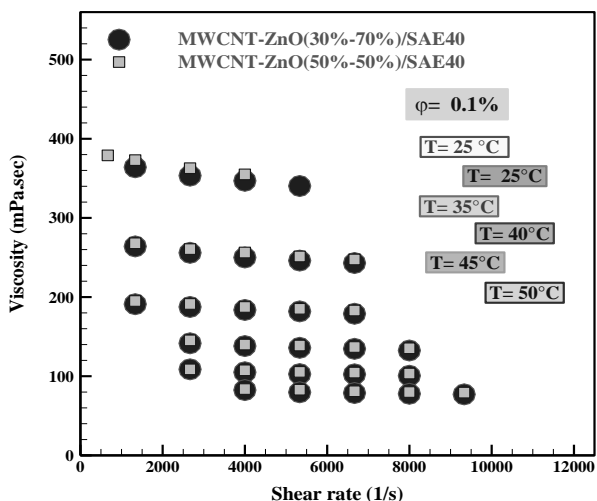
الف) MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40 و  $\phi = 0.0625\%$

<sup>3</sup> Shear thinning

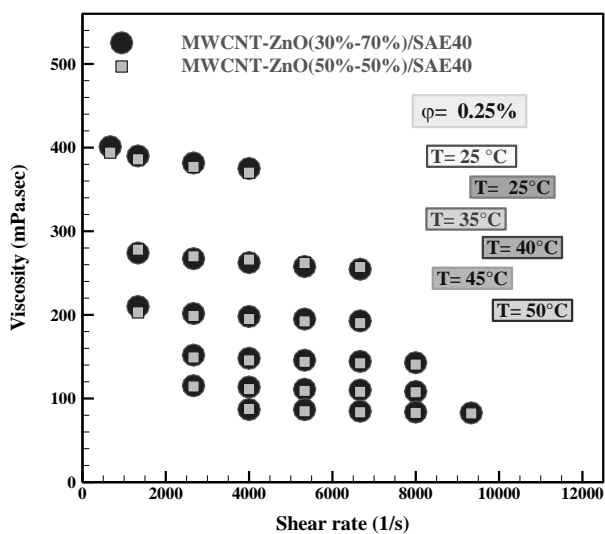
<sup>1</sup> Power law Index

۳-۱-۳- ویسکوزیته-نرخ برش

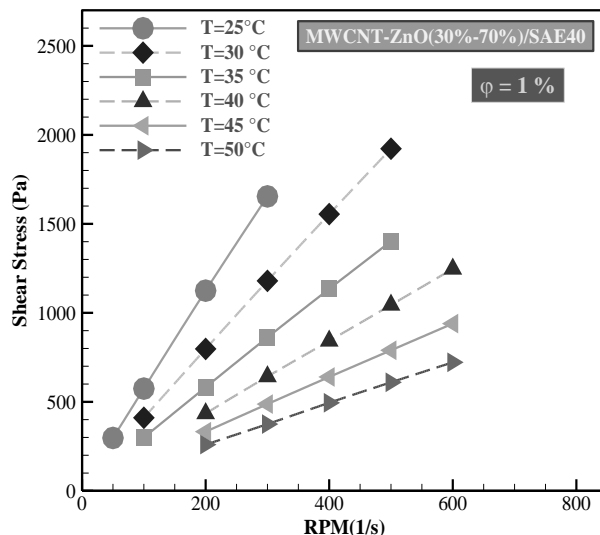
یکی از مناسب‌ترین و مهم‌ترین عوامل در تعیین نوع نانوسیال، رفتار رئولوژیکی نانوسیالات در برابر نرخ برش اعمال شده می‌باشد. نانوسیالات با توجه به رفتاری که در مقابل اعمال تنش برشی از خود نشان می‌دهند، به دو گروه از سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم بندی می‌شوند. در شکل (۶) تاثیرپذیری ویسکوزیته نانوروغن از نرخ برش‌های مختلف در دما و کسر حجمی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. شیب نمودارها نشان دهنده وابستگی ویسکوزیته نانوروغن به تغییرات نرخ برش می‌باشد، که این تغییر شیب در دماهای ابتدایی بیشتر نشان داده می‌شود.



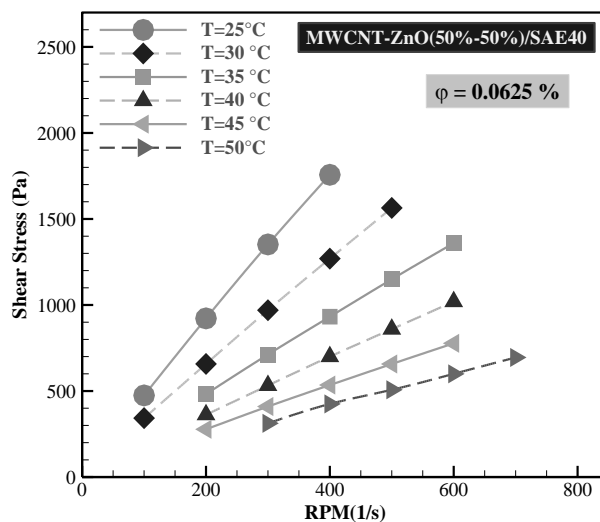
الف)  $\phi = 0.1\%$



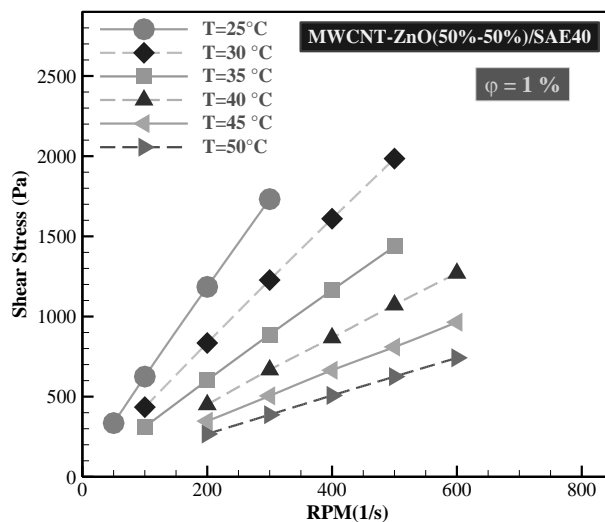
ب)  $\phi = 0.25\%$



ب) MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40 و  $\phi = 1\%$

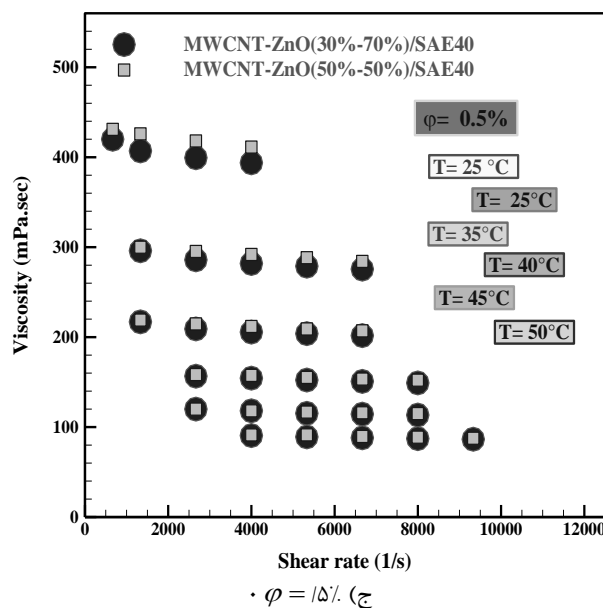
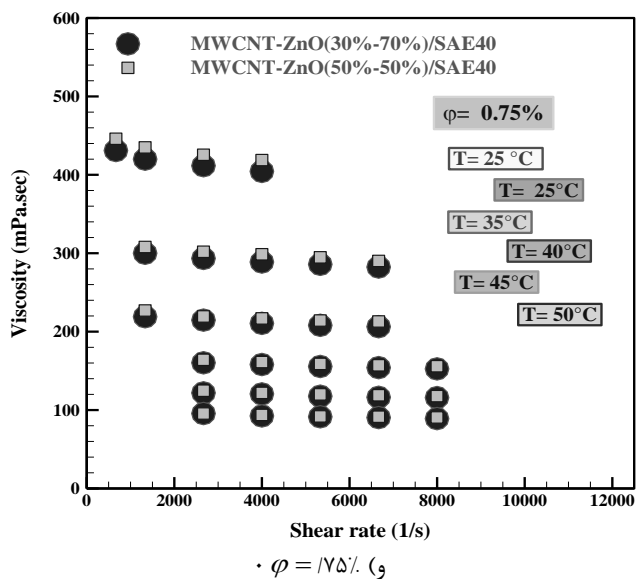


ج) MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40 و  $\phi = 0.0625\%$



د) MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40 و  $\phi = 1\%$

شکل ۵ منحنی تغییرات نرخ برشی-تنش برشی در دماها و کسرهای حجمی مختلف



شکل ۶ وابستگی ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در دماها و کسر حجمی های مختلف

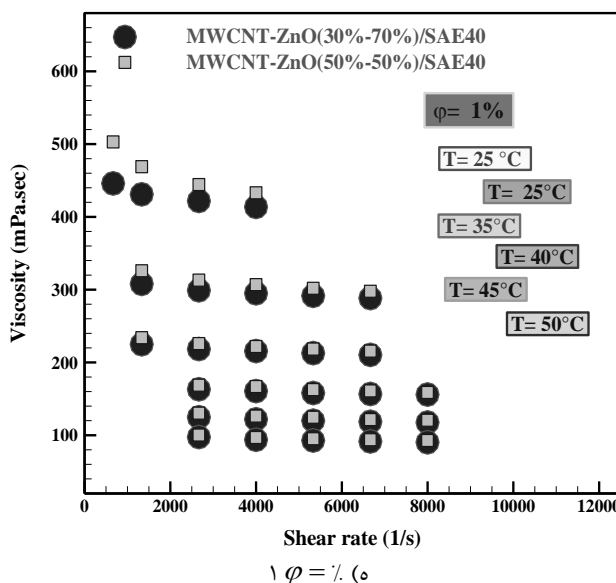
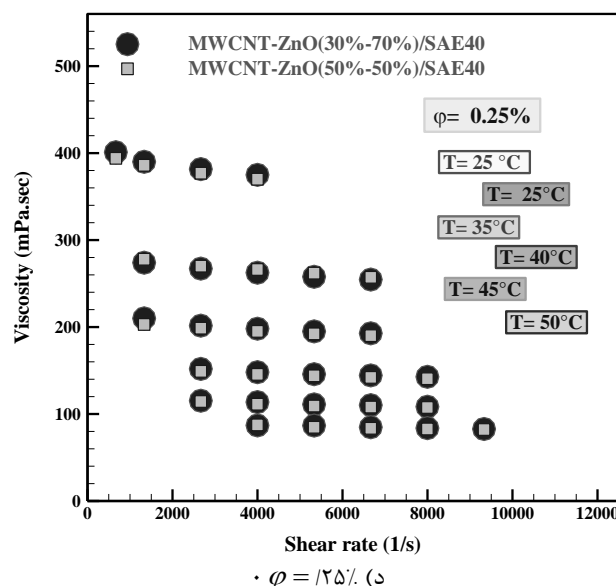
در جدول های (۶) و (۷) درصد های دقیق تغییرات ویسکوزیته نسبت به نرخ برش برای نانوروغن ها در تمامی دماها و کسر حجمی ها گزارش شده است. بیش ترین و کمترین درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT-ZnO(50%-50%)/SAE40 به ترتیب برابر با ۶۹/۹- و ۳/۶- درصد است.

### ۳-۲- ویسکوزیته نسبی

ویسکوزیته نسبی یکی از مفاهیم مهم در مقایسه بین نانوروغن ها با روغن خالص بعد از افزودن نانوذرات است [۳۲]. با افزودن نانوذرات به روغن پایه، ویسکوزیته روغن افزایش می یابد. ویسکوزیته نسبی با استفاده از رابطه ی (۵) از تقسیم ویسکوزیته ی نانوروغن بر ویسکوزیته روغن خالص قابل محاسبه است.

$$Relative\ viscosity = \left( \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right) \quad (5)$$

بدیهی است که در مواردی که ویسکوزیته نانوروغن نسبت به سیال پایه اش افزایش داشته است دارای مقادیر ویسکوزیته ی نسبی بیشتر از ۱ و در مواردی که ویسکوزیته ی نسبی کمتر از ۱ بدست آمده یعنی ویسکوزیته ی نانوروغن نسبت به روغن خالص کاهش یافته است. باتوجه به شکل (۷)، ویسکوزیته نسبی نانوروغن MWCNT-ZnO(50:50)/SAE40 بالاتر از خط ۱ واقع شده است در حالی که در نانوروغن MWCNT-ZnO(3:7)/SAE40 مقدار ویسکوزیته نسبی در کسر حجمی 0.0625% کمتر از خط ۱ مشاهده شده است و ویسکوزیته ی نانو روغن نسبت به سیال پایه کاهش داشته است.

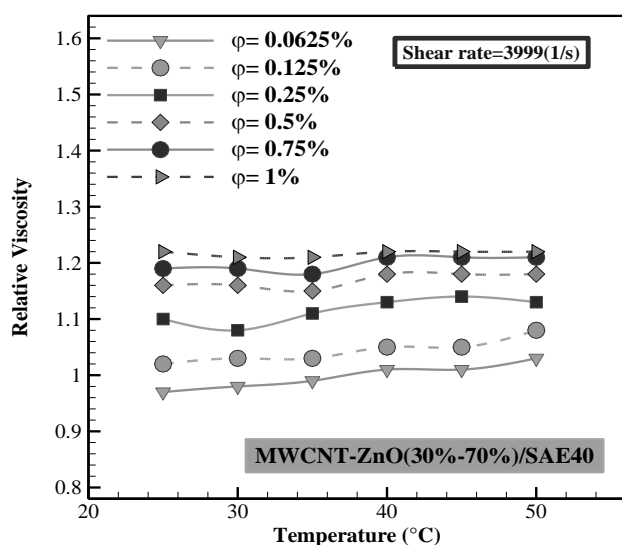


جدول ۶ درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT ZnO (30%-70%)/SAE40 در کسر حجمی‌های مختلف

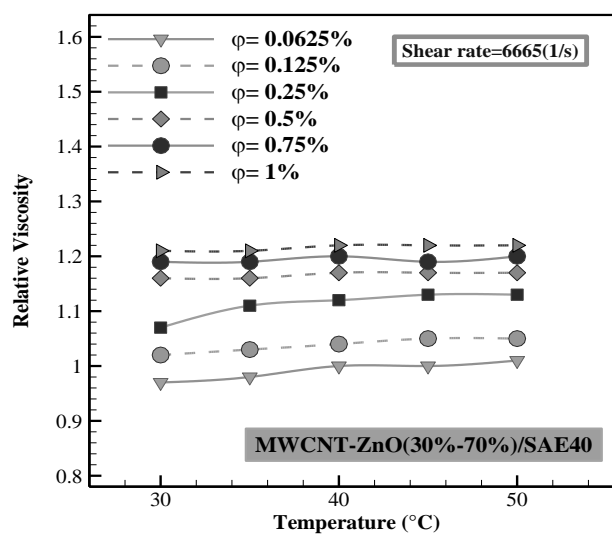
نانوسیال	کسر حجمی (%)	تغییرات ویسکوزیته					
		۲۵°C	۳۰°C	۳۵°C	۴۰°C	۴۵°C	۵۰°C
MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40	۰/۰۶۲۵	-۲۱/۶	-۱۹/۳	-۱۱/۲	-۸/۴	-۶/۸	-۵/۱
	۰/۱۲۵	-۲۳/۷	-۲۱	-۱۲/۱	-۹/۱	-۸/۱	-۵/۴
	۰/۲۵	-۲۶	-۱۹/۴	-۱۷/۲	-۹/۱	-۶/۹	-۴/۱
	۰/۵	-۲۶/۲	-۲۰/۴	-۱۵/۳	-۷/۵	-۶/۶	-۴/۱
	۰/۷۵	-۲۶/۶	-۱۷/۶	-۱۲/۷	-۷/۸	-۶	-۶/۵
	۱	-۳۲/۳	-۱۹/۶	-۱۴/۶	-۷/۲	-۷	-۷/۲

جدول ۷ درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT-ZnO (50%-50%)/SAE40 در کسر حجمی‌های مختلف

نانوسیال	کسر حجمی (%)	تغییرات ویسکوزیته					
		۲۵°C	۳۰°C	۳۵°C	۴۰°C	۴۵°C	۵۰°C
MWCNT-ZnO (50%- 50%)/SAE40	۰/۰۶۲۵	-۲۶/۵	-۲۲/۳	-۱۰/۹	-۸/۴	-۶/۹	-۳/۶
	۰/۱۲۵	-۲۴	-۲۰/۵	-۱۲	-۱۰	-۵/۳	-۴/۵
	۰/۲۵	-۲۴	-۲۰/۸	-۱۲/۹	-۸/۵	-۶/۹	-۵/۳
	۰/۵	-۱۹/۷	-۱۲/۸	-۱۲	-۶/۲	-۵	-۳/۷
	۰/۷۵	-۲۷/۲	-۱۷/۸	-۱۴	-۸/۲	-۶/۹	-۵
	۱	-۶۹/۹	-۲۸/۲	-۱۸/۴	-۱۰	-۹/۷	-۷/۵

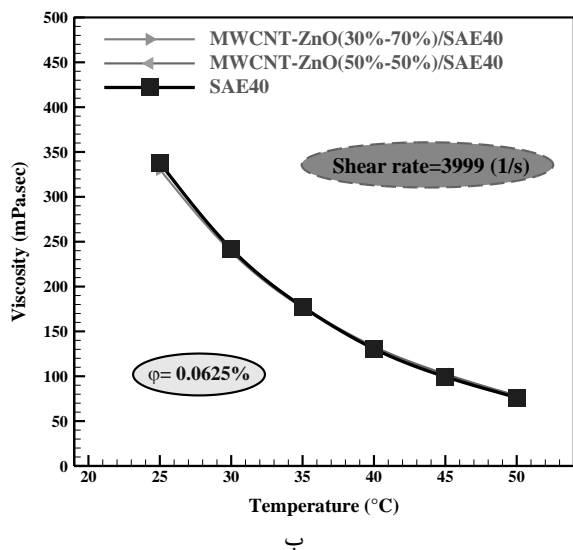
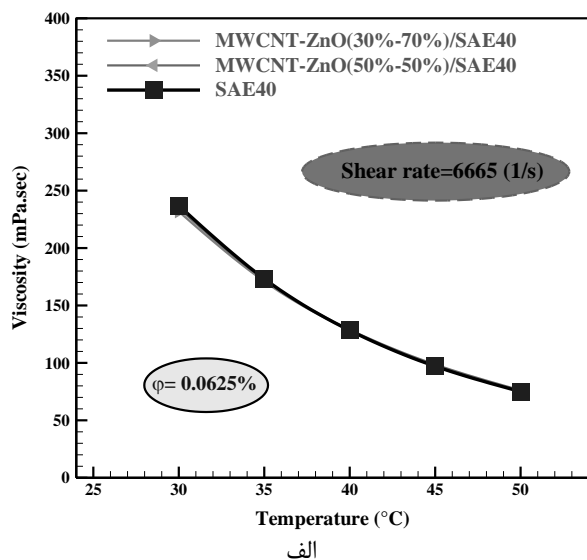


ب

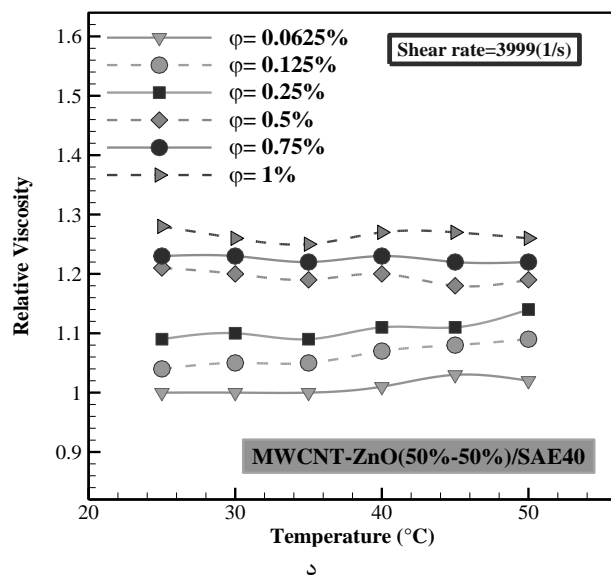
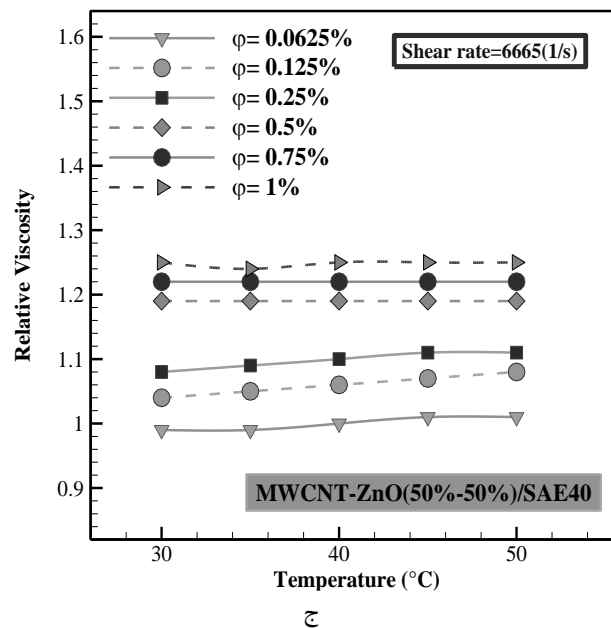


الف

دما با ویسکوزیته رابطه ذاتی دارد. کل جامعه تحقیقاتی، دما را مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای ویسکوزیته نانوسیالات توصیف می‌کند. با افزایش دما، جاذبه بین ملکولی نانوذرات و سیالات پایه تضعیف می‌شوند و از این رو، ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۱]. در آخرین مقایسه‌ی این تحقیق، نمودارهای ویسکوزیته-دما ارائه شده است که تأثیر پارامتر دمای آزمایش بر ویسکوزیته‌ی نانوروغن را بیان می‌کند. در این مرحله تأثیر نانوذرات به روغن خالص در کسر حجمی‌های ۰/۰۶۲۵٪ با دور موتورهای بالا و پایین مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. طبق شکل (۸)، کاهش ویسکوزیته در نانوروغن MWCNT-ZnO(30%-70%) دیده می‌شود اما نانوروغن دیگر مماس با خط روغن پایه است.



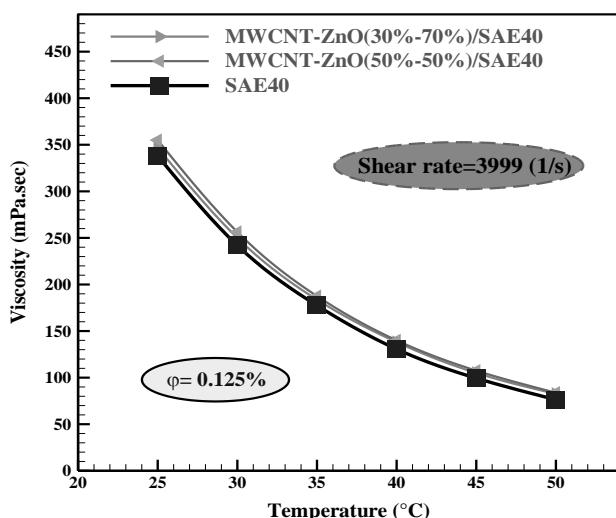
شکل ۸ مقایسه تأثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵٪



شکل ۷ ویسکوزیته‌ی نسبی بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف

طبق نتایجی که در جدول (۸) گزارش شده است، کمترین مقدار ویسکوزیته نسبی مربوط به نانوروغن MWCNT-ZnO(3:7)/SAE40 در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵٪ در دمای ۲۵ °C و نرخ برش ۳۹۹۹ (1/s) و به میزان (۰/۳٪) گزارش شده است. بیشترین ویسکوزیته نسبی مربوط به نانوروغن MWCNT-ZnO(5:5)/SAE40 در کسر حجمی ۱٪، دمای ۲۵ °C و نرخ برش ۳۹۹۹ (1/s) بوده است که برای این شرایط ویسکوزیته نسبی ۲۸٪ گزارش شده است.

### ۳-۲-۱- تأثیر دما بر ویسکوزیته



ب

شکل ۹ مقایسه تاثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۱۲۵٪

### ۳-۲-۲- بیان همگرایی

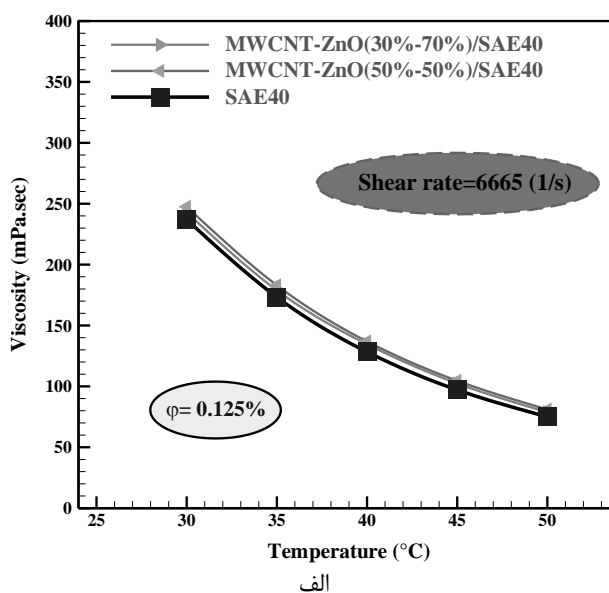
مدلسازی ویسکوزیته نانوسیال MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 بر مبنای داده‌های تجربی و با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. روش سطح پاسخ با استفاده از روش‌های آماری و ریاضی، رابطه‌ای را ارائه می‌دهد که متشکل از پارامترهای مستقل و وابسته است که در اینجا پارامترهای مستقل عبارتند از کسر حجمی، نرخ برشی و دما و پارامتر وابسته یا هدف، ویسکوزیته می‌باشد. مدل‌های مختلفی در روش سطح پاسخ می‌توان ارائه داد که شامل رابطه‌های دو، سه، چهار و پنج درجه‌ای می‌باشد و بر اساس پارامترهای ارزیابی دقت مانند  $R^2$ ،  $Adj-R^2$  و انحراف استاندارد می‌توان مدل مناسب را انتخاب کرد. در صورتی که پراکندگی داده‌ها قابل توجه باشد بهتر است از تابع انتقال استفاده کرد که در این مطالعه تابع انتقال لگاریتمی به صورت معادله (۶) در نظر گرفته شد. جدول (۱۱) که بیانگر پارامترهای دقت مربوط به رابطه (۶) می‌باشد نیز ارائه شد که بر اساس آن  $R^2=0/9999$  و  $Adjusted R^2 = 0/9999$  می‌باشد که مقادیر خوبی برای مدل سازی هستند.

$$\begin{aligned} \text{Log}(\text{Viscosity}) = & 3.82659 - 0.086902T + 0.561283\varphi - \\ & 0.000032\gamma - 0.002844T\varphi + 1.02994E - 06T\gamma + \\ & 3.57150E - 06\varphi\gamma + 0.002092T^2 - 1.02122\varphi^2 + \\ & 3.17641E - 09\gamma^2 + 0.000027T^2\varphi - 2.52444E - 08T^2\gamma + \\ & 2.20069E - 11T\gamma^2 - 2.08619E - 06\varphi^2\gamma - 0.000032T^3 + \\ & 0.979565\varphi^3 - 4.20169E - 13\gamma^3 + 1.59687E - 12T^2 * \gamma^2 - \\ & 7.59353E - 15T * \gamma^3 + 2.08343E - 07T^4 - 0.342556\varphi^4 + \\ & 2.97145E - 17\gamma^4 \end{aligned} \quad (6)$$

در جدول (۹) به بررسی و مقایسه دقیق و آماری اختلاف ویسکوزیته نانوروغن‌های ذکر شده با سیال پایه در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵ درصد در دور موتور پایین ( ۳۹۹۹ (1/s) (دماهای پایین‌تر)) و دور موتور بالا ( ۶۶۶۵ (1/s) (دماهای بالاتر)) پرداخته شده است. با دقت به اعداد این جدول، نانوروغن MWCNT-ZnO (30-70%)/SAE40 در دور عملکرد پایین، افت ویسکوزیته‌ی بیشتری نسبت به سیال پایه در مقایسه با نانوروغن دیگر داشته و از طرفی اختلاف ویسکوزیته این نانوروغن با سیال پایه در نرخ برش بالا و دمای ۵۰°C به عدد صفر رسیده است که گویای بازگشت ویسکوزیته نانوروغن مذکور به ویسکوزیته سیال پایه است و همچنین نشان‌دهنده عملکرد عالی این نانوروغن در فصول گرم و در نواحی گرمسیر است.

در شکل (۹)، مقایسه در کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ انجام شده است. در این کسر حجمی، افزایش ویسکوزیته برای هر دو نانوروغن نسبت به روغن پایه دیده شده است.

مقادیر دقیق تغییرات ویسکوزیته نانوروغن بر حسب دما در جدول (۱۰) برای کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ گزارش شده است. طبق داده‌های جدول (۱۰)، برای هر دو نانوروغن در دمای ابتدایی، افت ویسکوزیته گزارش نشده است اما در نانوروغن MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 در همه دماها، افزایش ویسکوزیته کمتر از نانوروغن MWCNT-ZnO(50:50)/SAE40 است.





جدول ۸ داده‌های آماری درصد تغییرات ویسکوزیته نسبی نانوروغن‌ها

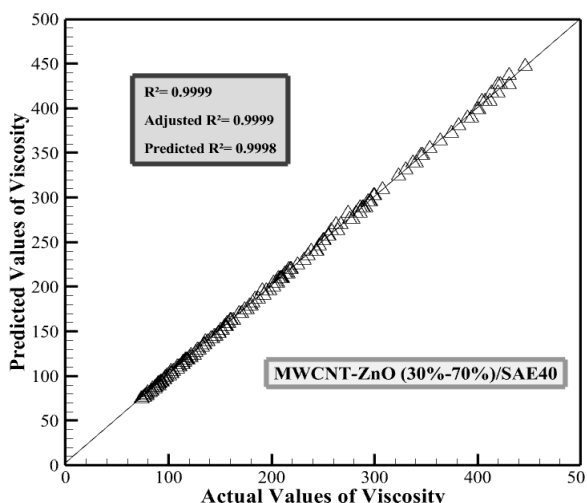
روغن نانو	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	T (°C)	$\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right)$			
			$\phi = 0\%/0.625$	$\phi = 0\%/1.125$	$\phi = 0\%/1.75$	$\phi = 1\%$
MWCNT-ZnO (30%-70%) /SAE40	۳۹۹۹ (۳۰۰rpm)	۲۵°C	۰/۹۷(-۰/۳)	۱/۰۲	۱/۱۹	۱/۲۲
		۳۰°C	۰/۹۸	۱/۰۳	۱/۱۹	۱/۲۱
		۳۵°C	۰/۹۹	۱/۰۳	۱/۱۸	۱/۲۱
		۴۰°C	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۲۱	۱/۲۲
	۶۶۶۵ (۵۰۰rpm)	۳۵°C	۰/۹۸	۱/۰۳	۱/۱۹	۱/۲۱
		۴۰°C	۱	۱/۰۴	۱/۲	۱/۲۲
		۴۵°C	۱	۱/۰۵	۱/۱۹	۱/۲۲
		۵۰°C	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۲	۱/۲۲
			$\phi = 0\%/0.625$	$\phi = 0\%/1.125$	$\phi = 0\%/1.75$	$\phi = 1\%$
MWCNT-ZnO (50%-50%) /SAE40	۳۹۹۹ (۳۰۰rpm)	۲۵°C	۱	۱/۰۴	۱/۲۳	۱/۲۸(۰/۲۸)
		۳۰°C	۱	۱/۰۵	۱/۲۳	۱/۲۶
		۳۵°C	۱	۱/۰۵	۱/۲۲	۱/۲۵
		۴۰°C	۱/۰۱	۱/۰۷	۱/۲۳	۱/۲۷
	۶۶۶۵ (۵۰۰rpm)	۳۵°C	۰/۹۹	۱/۰۵	۱/۲۲	۱/۲۴
		۴۰°C	۱	۱/۰۶	۱/۲۲	۱/۲۵
		۴۵°C	۱/۰۱	۱/۰۷	۱/۲۲	۱/۲۵
		۵۰°C	۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۲۲	۱/۲۵

جدول ۹ بررسی مقایسه‌ای تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f   \phi = 0.625$	$\Delta(\mu_{n-b})_f   \phi = 1.625$
		MWCNT-ZnO(30%-70%) /SAE40	MWCNT-ZnO(50%-50%) /SAE40
۳۹۹۹	T=۲۵°C	-۷/۵(-۲/۰/۲۱)	۱(۰/۰/۲۹)
	T=۳۰°C	-۳/۱	۰/۶
	T=۳۵°C	-۱/۲	۰/۶
	T=۴۰°C	-۱/۹	۲/۵
۶۶۶۵	T=۴۰°C	۰	۰/۷
	T=۴۵°C	۰	۱/۵
	T=۵۰°C	۰/۸	۱/۱

جدول ۱۰ بررسی مقایسه‌ای تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f   \phi = 0.125$	$\Delta(\mu_{n-b})_f   \phi = 0.125$
		MWCNT-ZnO(30%-70%) /SAE40	MWCNT-ZnO (50%-50%) /AE40
۳۹۹۹	T=۲۵°C	۸/۸(۲/۶۰/۰/۰)	۱۶/۹(۴/۹۹/۰/۰)
	T=۳۰°C	۸/۱	۱۴/۴
	T=۳۵°C	۶/۲	۱۰
	T=۴۰°C	۷/۵	۹/۴
۶۶۶۵	T=۴۰°C	۶/۳	۸/۶
	T=۴۵°C	۵/۳	۷/۵
	T=۵۰°C	۳/۸	۶



شکل ۱۰ میزان همبستگی داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی

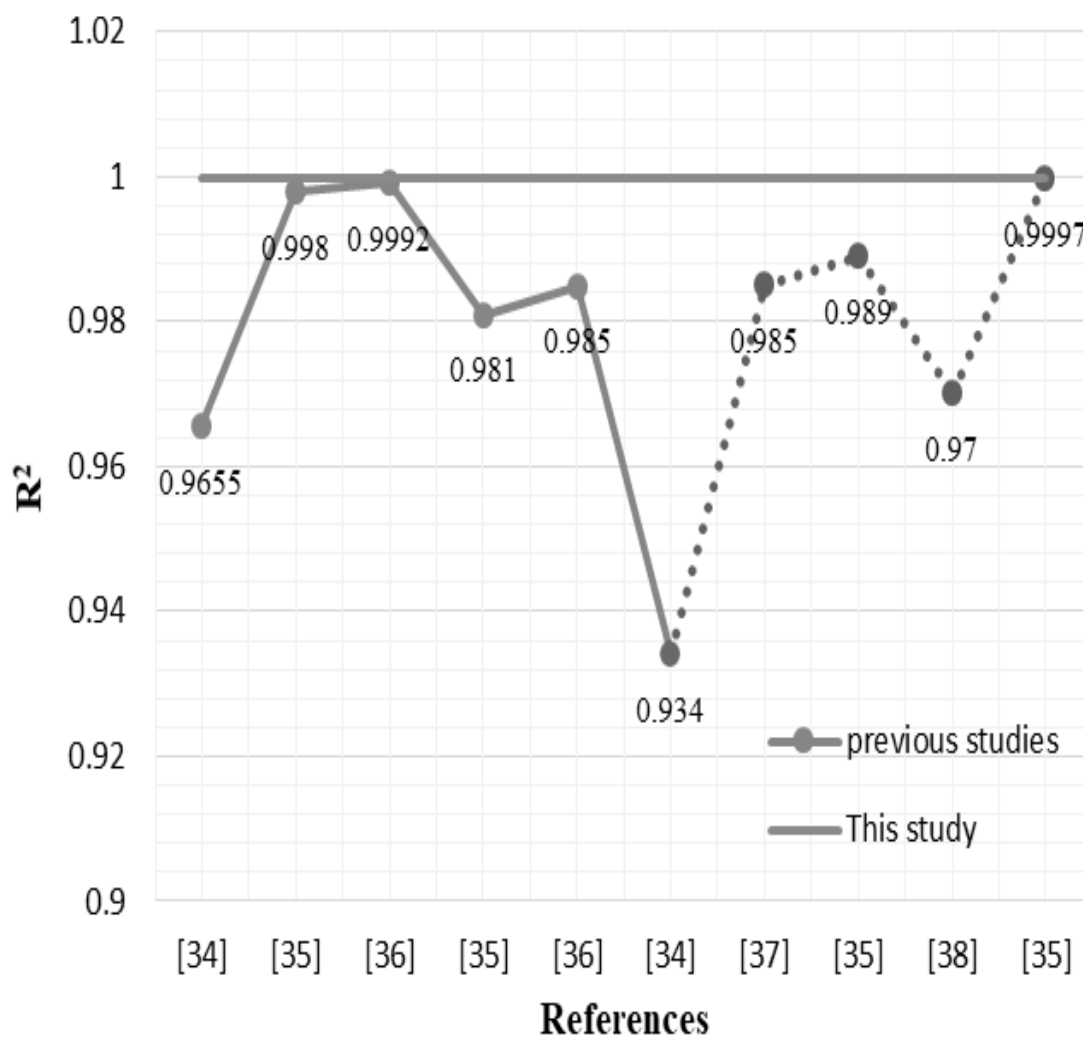
همان طور که در شکل مشخص است مقدار  $R^2 = 0.9999$  که برای این مطالعه بدست آمد نسبت به سایر مطالعات بیشتر است.

جدول ۱۱ دقت مدل‌ساز استفاده شده سه‌درجه‌ای بهینه شده

انحراف استاندارد	۰/۰۰۲۶	$R^2$	۰/۹۹۹۹
میانگین	۲/۲۳	$R^2_{adj}$	۰/۹۹۹۹
C.V. %	۰/۱۱۴۹	$R^2_{Pre}$	۰/۹۹۹۸
Adeq Precision	۸۵۵/۲۳۰۵		

شکل (۱۰)، تطابق خوب داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را برای ویسکوزیته نانوسیال MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 نشان می‌دهد.

به منظور بررسی دقت مدل‌سازی، پارامتر آماری  $R^2$  که بیانگر دقت می‌باشد در شکل (۱۱) با کارهای قبلی مقایسه شده است. در این شکل خط یکپارچه بیانگر ویسکوزیته و خط نقطه چین مربوط به هدایت حرارتی می‌باشد.

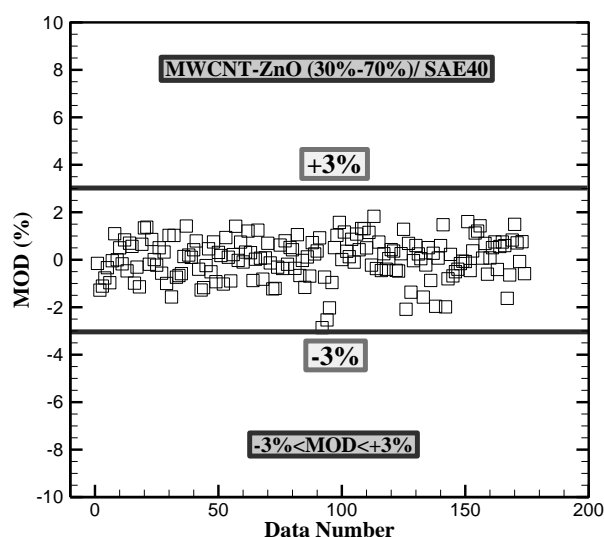


شکل ۱۱ مقایسه مقادیر  $R^2$  در مطالعه حاضر و مطالعات قبلی

### ۳-۲-۳- انحراف از معیار

معیار MOD که به صورت معادله (۷) تعریف می‌شود برای بررسی دقت رابطه ارائه شده برای محاسبه ویسکوزیته (رابطه ۶) به کار می‌رود. کم بودن مقدار MOD نشان می‌دهد مدلسازی ارائه شده از دقت خوبی برخوردار است. در شکل (۱۲) مقادیر MOD برای این مطالعه ارائه شده است که در محدوده  $3\% < MOD < 3\%$  می‌باشد و بنابراین مدلسازی دقت خوبی دارد.

$$MOD = \frac{\mu_{exp} - \mu_{pre}}{\mu_{exp}} \times 100 \quad (7)$$



شکل ۱۲ محدوده مقادیر حاشیه انحراف در کل داده‌های آزمایشگاهی

توانی نشان داد که این مقدار برای کسر حجمی‌های مختلف کوچک‌تر از ۱ می‌باشد و بنابر این نانوروانکارها رفتاری غیر نیوتونی داشتند. تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی در دماها و کسر حجمی‌های مختلف، دارای روندی خطی و با شیب‌های مختلف بود و بنابراین نانوروانکارها دارای رفتاری غیر نیوتونی و از نوع شبه پلاستیک بودند. تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی نیز نشان از وابستگی ویسکوزیته به نرخ برشی داشت به گونه‌ای که در دماهای کمتر این وابستگی بیش‌تر بود. مقایسه مقادیر ویسکوزیته نسبی نانوسیالات MWCNT-ZnO (30%-50%)/SAE40 و (50%-70%)/SAE40 در نرخ برش‌های ثابت نشان داد که میزان افزایش ویسکوزیته نسبی در نانوسیال (50%-70%)/SAE40 بیشتر است و این به علت توانایی کمتر نانوسیال نسبت به نانوسیال رقیب در حرکت کردن و جریان یافتن است که ناشی از حضور بیش‌تر نانوذرات MWCNT است. بررسی تغییرات ویسکوزیته نانوروانکارهای مورد بررسی نشان داد عملکرد نانوروانکار (30%-70%)/SAE40 برای استفاده به عنوان روغن موتور بهتر از نانوروانکار (50%-70%)/SAE40 است. همگرایی ارائه شده برای نانوروانکار منتخب دارای مقادیر  $R^2 = 0.9999$  و  $R^2_{adj} = 0.9999$  بدست آمد که دقت بالای مدلسازی را نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به انحراف از معیار نیز در محدوده  $3\% < MOD < 3\%$  قرار گرفت.

### ۵- مراجع

- [1] D. Huang, Z. Wu, & B. Sundén, Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72, 190-196, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.009>.
- [2] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, & S. Wongwises, Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 1084-1097, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070>.
- [3] M. K. A. Ali, H. Xianjun, R. F. Turkson, Z. Peng, & X. Chen, Enhancing the thermophysical properties and tribological behaviour of engine oils using nano-

### ۴- نتیجه‌گیری

خواص نانو روانکار شامل نانوذرات MWCNT و ZnO و بر پایه روغن SAE40 برای نسبت‌های مختلف ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ به صورت آزمایشگاهی و برای اولین بار بررسی شد و نانو روانکار با عملکرد بهتر بیان شد. آزمایش‌ها برای حالت‌های مختلفی از دما، کسر حجمی و نرخ برشی انجام شد و مقادیر ویسکوزیته هر دو نانوروانکار ارائه شد. نتایج مربوط به عدم قطعیت نشان داد که این مقدار برابر با ۰/۱۲۱ می‌باشد. نتایج مربوط به بررسی رفتار رئولوژیکی نانوروانکارها حاکی از رفتار غیرنیوتونی بود. این بررسی‌ها با استفاده از شاخص قاعده توانی، روند تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی و روند تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی برای هر دو نانو روانکار MWCNT ZnO و MWCNT ZnO (30%-70%)/SAE40

- Filter integrated with feed-forward neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172, 121159, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121159>.
- [12] S. B. Mousavi, S. Z. Heris, & P. Estellé, Viscosity, tribological and physicochemical features of ZnO and MoS<sub>2</sub> diesel oil-based nanofluids: An experimental study. *Fuel*, 293, 12048, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120481>.
- [13] A. Keykhosravi, M. B. Vanani, & C. Aghayari, TiO<sub>2</sub> nanoparticle-induced Xanthan Gum Polymer for EOR: Assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108756, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108756>.
- [14] M. Farbod, & N. Bahmani, Fabrication of AlN nanoparticles by arc discharge method and investigation of thermal conductivity of AlN transformer oil-based nanofluid. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 1-8, 2022, <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00791-6>.
- [15] H. F. Asl, G. Zargar, A. K. Manshad, M. A. Takassi, J. A. Ali, & A. Keshavarz, Effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the performance of L-Arg and L-Cys surfactants for enhanced oil recovery in carbonate porous media. *Journal of Molecular Liquids*, 300, 112290, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112290>.
- [16] Y. M. Chu, M. Ibrahim, T. Saeed, A. S. Berrouk, E. A. Algehyne, & R. Kalbasi, Examining rheological behavior of MWCNT-TiO<sub>2</sub>/5W40 hybrid nanofluid based on experiments and RSM/ANN modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115969, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115969>.
- [17] A. Heydari, M. Goharimanesh, & M. R. Gharib, Dynamic viscosity analysis of hybrid nanofluid MWCNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/engine oil using statistical models with evaluating its performance in a double tube heat exchanger. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11608-w>.
- [18] M. Rejvani, A. Heidari, & S. Seadodin, Simultaneous effects of MWCNT and SiO<sub>2</sub> on the rheological behavior of cooling oil and sensitivity analysis. *Heliyon*, e12942, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12942>.
- [19] S. Ganapathy, K. R. Viswanathan, S. Raju, & A. K. Appanacheal, Comparative study of different nanolubricants for automotive applications (No. 2016-01-0486). *SAE Technical Paper*, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0486>.
- lubricant additives, *RSC advances*, 6(81), 77913-77924, 2016, <https://doi.org/10.1039/C6RA10543B>.
- [4] H. Pourpasha, S. Z. Heris, & M. Mohammadpourfard, The effect of TiO<sub>2</sub> doped multi-walled carbon nanotubes synthesis on the thermophysical and heat transfer properties of transformer oil: A comprehensive experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41, 102607, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102607>.
- [5] M. Mokarian, & E. Ameri, The effect of Mg (OH) 2 nanoparticles on the rheological behavior of base engine oil SN500 HVI and providing a predictive new correlation of nanofluid viscosity. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(6), 103767, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103767>.
- [6] H. Cheng, A. M. Abed, A. A. Alizadeh, A. A. Ghabra, F. M. Altalbawy, R. Sabetvand, ... & Y. Riadi, The effect of temperature and external force on the thermal behavior of oil-based refrigerant inside a nanochannel using molecular dynamics simulation. *Journal of Molecular Liquids*, 369, 120893, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120893>.
- [7] X. X. Tian, R. Kalbasi, C. Qi, A. Karimipour, & H. L. Huang, Efficacy of hybrid nano-powder presence on the thermal conductivity of the engine oil: an experimental study. *Powder Technology*, 369, 261-269, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.004>.
- [8] R. Khoramian, R. Kharrat, & S. Golshokooh, The development of novel nanofluid for enhanced oil recovery application. *Fuel*, 311, 122558, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122558>.
- [9] M. Sepehrnia, M. Lotfalipour, M. Malekiyan, M. Karimi, & S. D. Farahani, Rheological Behavior of SAE50 Oil-SnO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> Hybrid Nanofluid: Experimental Investigation and Modeling Utilizing Response Surface Method and Machine Learning Techniques. *Nanoscale Research Letters*, 17(1), 117, (2022). <https://doi.org/10.1186/s11671-022-03756-7>.
- [10] M. Sepehrnia, K. Mohammadzadeh, M. M. Veyseh, E. Agah, & M. Amani, Rheological behavior of engine oil based hybrid nanofluid containing MWCNTs and ZnO nanopowders: Experimental analysis, developing a novel correlation, and neural network modeling. *Powder Technology*, 404, 117492, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117492>.
- [11] M. Jamei, I. A. Olumegbon, M. Karbasi, I. Ahmadianfar, A. Asadi, & M. Mosharaf-Dehkordi, On the Thermal Conductivity Assessment of Oil-Based Hybrid Nanofluids using Extended Kalman

- [28] M. A., Moghaddam, & K. Motahari, Experimental investigation, sensitivity analysis and modeling of rheological behavior of MWCNT-CuO (30–70)/SAE40 hybrid nano-lubricant. *Applied thermal engineering*, 123, 1419-1433, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.200>.
- [29] N. Nayeypashae, & S. M. M. Hadavi, Thermal conductivity and rheological studies for graphene-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ethylene glycol-water hybrid nanofluid at low temperatures. In *Journal of Nano Research* (Vol. 73, pp. 139-160). Trans Tech Publications Ltd, 2022, <https://doi.org/10.4028/p-h9do2u>.
- [30] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, & A. R. Dixit, Rheological behaviour of nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 779-791, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.033>
- [31] P. C. Mishra, S. Mukherjee, S. K. Nayak, & A. Panda, A brief review on viscosity of nanofluids. *International nano letters*, 4(4), 109-120, 2014, <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>.
- [32] H. Khodadadi, S. Aghakhani, H. Majd, R. Kalbasi, S. Wongwises, & M. Afrand, A comprehensive review on rheological behavior of mono and hybrid nanofluids: effective parameters and predictive correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 997-1012, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.103>.
- [33] X. Hu, D. Yin, J. Xie, X. Chen, & C. Bai, Experimental study of viscosity characteristics of graphite/engine oil (5 W-40) nanofluids. *Applied Nanoscience*, 1-14, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01240-w>.
- [34] H. Adun, D. Kavaz, M. Dagbasi, H. Umar, & I. Wole-Osho, An experimental investigation of Thermal conductivity and dynamic viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ternary hybrid nanofluid and development of machine learning model. *Powder Technology*, 394, 1121-1140, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.039>.
- [35] L. Li, Y. Zhai, Y. Jin, J. Wang, H. Wang, & M. Ma, Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and Thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ethylene glycol nanofluids. *Powder Technology*, 363, 360-368, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.006>.
- [36] M. H. Esfe, F. Zabihi, H. Rostamian, & S. Esfandeh, Experimental investigation and model development of the non-Newtonian behavior of CuO-MWCNT-10w40 hybrid nano-lubricant for lubrication purposes. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 112045, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112045>.
- [20] A. Asadi, M. Asadi, M. Rezaei, M. Siahmargoi, & F. Asadi, The effect of temperature and solid concentration on dynamic viscosity of MWCNT/MgO (20–80)–SAE50 hybrid nano-lubricant and proposing a new correlation: An experimental study. *International communications in heat and mass transfer*, 78, 48-53, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.021>.
- [21] M. Hemmat Esfe, M. Goodarzi, M. Reiszadeh, & M. Afrand, Evaluation of MWCNTs-ZnO/5W50 nanolubricant by design of an artificial neural network for predicting viscosity and its optimization. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 921-931, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.047>.
- [22] K. Sepyani, M. Afrand, & M. Hemmat Esfe, An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 198-204, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.016>.
- [23] O. Hozién, W. M. El-Maghlany, M. M. Sorour, & Y. S. Mohamed, Experimental study on thermophysical properties of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Ag water base nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116128, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116128>.
- [24] M. H. Esfe, M. Afrand, S. H. Rostamian, & D. Toghraie, Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO-*SAE40* hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 384-390, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.011>.
- [25] E. Dardan, M. Afrand, & A. M. Isfahani, Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. *Applied Thermal Engineering*, 109, 524-534, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.103>.
- [26] M. Hemmat Esfe, M. Afrand, W. M. Yan, H. Yarmand, D. Toghraie & M. Dahari, Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO<sub>2</sub> (20–80)-*SAE40* hybrid nano-lubricant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 133-138, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.015>.
- [27] J. Ma, A. Shahsavari, A. A. Al-Rashed, A. Karimipour, H. Yarmand, & S. Rostami, Viscosity, cloud point, freezing point and flash point of zinc oxide/*SAE50* nanolubricant. *Journal of Molecular Liquids*, 298, 112045, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112045>.

- [38] M. Ghazvini, H. Maddah, R. Peymanfar, M. H. Ahmadi, & R. Kumar, Experimental evaluation and artificial neural network modeling of Thermal conductivity of water based nanofluid containing magnetic copper nanoparticles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 551, 124, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.124127>.
- 249, 677-687, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.020>.
- [37] S. Zhang, Y. Li, Z. Xu, C. Liu, Z. Liu, Z. Ge, & L. Ma, Experimental investigation and intelligent modeling of Thermal conductivity of R141b based nanorefrigerants containing metallic oxide nanoparticles. *Powder Technology*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.019>.