

بررسی تجربی ضریب درگ در سیلندرهای دایروی با چیدمان پشت سر هم در زوایای مختلف

سیامک حاتمی
کارشناس ارشد

میترا یادگاری
دکتری

عبدالامیر

بک خوشنویس*

استاد، گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله علمی پژوهشی

دريافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

پذيرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده: آرایش های زیادی برای قرار دادن استوانه ها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. چیدمان سیلندرهای دایروی اعم از آرایش مجاور هم، پشت سر هم و متناوب در زوایای مختلف اخیراً توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. لذا در پژوهش حاضر، تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A، B و C با قطرهای ۱۵/۵، ۲۱/۳ و ۳۱ میلیمتر در زوایای ۰°، ۵°، ۱۰°، ۲۲/۵°، ۴۵° و ۹۰° در دو نسبت فاصله ۲ و ۴ برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ($14700 < Re < 48000$) به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که تغییرات ضریب پسا کاملاً به قطر استوانه ها و نسبت فاصله وابسته می باشد. تغییرات ضریب درگ در نسبت فاصله ۲ برابر قطر سیلندر اصلی در زوایای مختلف، وابستگی کمی به تغییرات عدد رینولدز دارد. همچنین با افزایش قطر سیلندر پایین دست از شدت تاثیر عدد رینولدز بر تغییرات افزایشی ضریب درگ کاسته می شود. در $L/D = 4$ ضریب پسا، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات زاویه، به جز زاویه صفر درجه از خود نشان می دهد.

واژه های راهنمایی: سیلندر دایره ای، آرایش متناوب، زوایای مختلف، ضریب درگ، بررسی تجربی

Siamak Hatami
MSc.

Mitra Yadegari
Ph.D.

Abdolamir
Bak Khoshnevis*
Professor, Department
of Mechanical
Engineering, Faculty
of Engineering,
Hakim Sabzevari
University, Sabzevar

The Experimental investigation of the drag coefficient of two tandemly-arranged circular cylinders at different angles

Abstract: Many arrangements are available for placing cylinders with respect to each other. Some arrangements of circular cylinders include side-by-side, tandem, and staggered at different angles. Thus, in the present study, the drag coefficient at three cylinders, A, B and C with diameters of 15.5, 21.3 and 31 mm at different angles (0°, 5°, 10°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90°) in $L/D=2$ and 4 at various Reynolds numbers ($14700 < Re < 48000$) is experimentally investigated. The results showed that the drag coefficient is completely dependent on the diameter of cylinders and the L/D ratio. The variation of drag coefficient in $L/D = 2$ is less dependent on the Reynolds number changes at different angles. Also, by increasing the diameter of the downstream cylinder, the effect of the Reynolds number on the drag coefficient was reduced. The drag coefficient in $L/D = 4$ is less sensitive to the angle changes except for the zero degree angle.

Keywords: Circular cylinder, Tandemly-arranged, Different angles, Drag coefficient, Experimental investigation

۱- مقدمه

فاصله، تاثیر چندانی بر پسای سیلندر کوچکتر از خود ندارد. فو و زائو^(۷) به بررسی عددی جریان ویسکوز عبوری از دو سیلندر که تحت نیروی نوسانی با فرکانس $1/7 \leq f_e/f_0 \leq 1/5$ قرار داشت، پرداختند. نتایج نشان داد در فرکانس نوسانی پایین وقتی $f_e/f_0 = 0.5$ است شکل گردابه، شبیه به جریان عبوری از دو سیلندر ثابت است. در $1/3 \leq f_e/f_0 \leq 1/5$ تغییر ناگهانی در شکل-گیری گردابه ها دیده شد و در $1/5 \leq f_e/f_0 \leq 1/3$ خطوط گردابه ها تطابق خوبی را در هر پریود و دوره زمانی نشان دادند. یانگا و همکاران^(۸) بصورت عددی و با استفاده از روش بولتزمن، محدوده گردابه ها را برای سه سیلندر دایروی در آرایش مثلثی در فواصل و اعداد رینولدز مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیانگر آن است که موقعیت دو سیلندر پایین دست، تاثیر زیادی بر سرکوب ریزش گردابه سیلندر بالا دست دارد و گردابه سیلندر بالا دست در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ توسط دو سیلندر دیگر سرکوب می‌گردد. همچنین با جابجاگی سیلندرها بگونه ای که تک سیلندر در پایین دست قرار گیرد، مشخص گردید که سرکوب ریزش گردابه تک سیلندر در پایین دست توسط دو سیلندر دیگر در اعداد رینولدز بین 10^3 تا 175 اتفاق می‌افتد. سوپرادیپان و روی^(۹) به تاثیر فاصله دو سیلندر مجاور هم بر ضریب پسا در اعداد رینولدز پایین پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش فاصله بین دو سیلندر، ضریب پسا کاهش می‌یابد. ایزدی و همکاران^(۱۰-۱۲) به بررسی تجربی ویژگی های جریان اطراف دنباله سیلندر بیضوی و تداخل دنباله با لایه مرزی بر روی صفحه تخت پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت فاصله ضریب پسای سیلندر کاهش می‌یابد.

روش‌های مختلفی برای کاهش نیروی پسای سیلندر وجود دارد که می‌توان به استفاده از میله در اطراف سیلندر اصلی، سیم اغتشاش ساز و استفاده از صفحات مارپیچ اشاره کرد. یادگاری و بک خوشنویس^(۱۳-۱۶) به بررسی تجربی و عددی مشخصه های دنباله جریان، حول سیلندر بیضوی در زاویه حمله 0° ، تحت تاثیر سیم اغتشاش ساز با قطر 1 میلی متر پرداختند. نتایج نشان داد در زاویه نصب $23/7^\circ$ ضریب پسا به میزان $5/56\%$ کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران^(۱۷) به بررسی کاهش درگ سیلندر دایروی در مقابل یک میله پرداختند. نتایج نشان داد در حالتی که $L/D=1/5$ نیروی پسای سیلندر بطور چشمگیری کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش پسا در زاویه 0° می‌باشد. همچنین در زوایای کمتر از 5° میله می‌تواند بر کاهش نیروی وارد بر سیلندر تاثیر گذار باشد. ولی برای زوایای بیشتر از 10° میله بالا دست تاثیر خود را از دست می‌دهد. لی و همکاران^(۱۸) با استفاده از میله های کوچک و با نسبت قطرهای مختلف نسبت به سیلندر اصلی، اقدام به کاهش ضریب پسا کردن. مشاهده شد، قرار دادن میله در جلوی سیلندر اصلی منجر

در سال های اخیر، مطالعه نیروها و تحلیل جریان حول دو سیلندر دایروی در آرایش های مختلف، توسعه زیادی یافته است. جریان حول اجسام جریان بند^(۱) به دلیل کاربردهای عملی در مهندسی از اهمیت بسیاری برخوردار است. آرایش های زیادی برای قرار دادن استوانه ها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. چیدمان سیلندرهای دایروی اعم از آرایش مجاورهم^(۲)، پشت سرهم^(۳) و متناوب^(۴) در زوایای مختلف، اخیراً توسط محققین مورد توجه بوده است. خطوط انتقال برق، دسته لوله مبدل های حرارتی، برجهای واکنش شیمیایی، دودکش ها، سکوهای ساحلی و پایه های سکوی نفتی در اقیانوس از جمله کاربردهای این چیدمان هستند. در ادامه به اختصار تحقیقات انجام شده روی سیلندرها مورد بررسی قرار گرفته است. هان و ژو^(۱) به بررسی تاثیر فاصله دو سیلندر دایروی با چیدمان پشت سر هم بر ضریب های کمتر از فاصله بحرانی، ضریب پسا منفی و در فواصل بیشتر، ضریب پسا مثبت است. پور یوسفی و همکاران^(۲) ضریب پسا را در سه سیلندر دایروی هم قطر با چیدمان مثلثی و چهار سیلندر دایروی با چیدمان مربعی در نسبت فواصل مختلف بررسی کردند. مشاهده شد در حالت سه سیلندری، کمترین مقدار ضریب پسا در سیلندرهای پایین دست در فاصله $2 < L/D < 5/1$ اتفاق می‌افتد. در حالی که در حالت چهار سیلندری، میانگین ضرایب پسا در سیلندرهای پایین دست در $2 < L/D < 5/1$ منفی می‌شود. متنگینی و سالتارا^(۳) به بررسی عددی دو سیلندر دایروی با چیدمان مجاور و پشت سر هم پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب پسا برای هر دو سیلندر با چیدمان مجاور، مشابه بوده و بیشترین ضریب پسا در فاصله های دو و سه برابر قطر سیلندر رخ می‌دهد. وو و همکاران^(۴) اثرات الگوی جریان را بر ضریب پسا و ضریب فشار برای دو سیلندر با چیدمان های پشت سر هم و جانبی با استفاده از مدل توربولانس SST - $\omega - k$ ارائه کردند. مشخص گردید که تغییرات الگوی جریان باعث افزایش قابل توجه ضریب پسا و ضریب فشار در آرایش پشت سرهم و کاهش آنها در آرایش جانبی می‌گردد. گائو و همکاران^(۵) به بررسی تجربی دو سیلندر پشت سر هم با قطرهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد الگوهای جریان برای نسبت فاصله های متفاوت در پشت هر دو سیلندر مختلف است. زائو و چنگ^(۶) به بررسی عددی جریان ویسکوز عبوری از دو سیلندر در قطرها و زوایای متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد، متوسط نیروی پسا روی هر دو سیلندر در زاویه 90° به حداقل مقدار خود می‌رسد. همچنین نیروی پسای سیلندر بزرگتر در حوالی زاویه 90° با افزایش نسبت فاصله، زیاد می‌شود. در حالی که افزایش نسبت

^۳ Tandem^۴ Staggered^۱ Bluff body^۲ Side by side

در نسبت فاصله کمتر از ۲ ($L/D < 2$) و بیشتر از ۴ ($L/D > 4$) تغییرات ضریب درگ انداز بوده و روند تغییرات قابل پیش‌بینی است. زوایا تا حد ممکن بگونه‌ای انتخاب گردید که تغییرات ضریب درگ در حدفاصل آنها زیاد نباشد. به همین دلیل در زوایای کم (0° و 5° و 10°) که تغییرات ضریب درگ به زاویه حساس بوده، از زوایایی با مقادیر نزدیکتر (اختلاف زوایای کمتر) استفاده شد. حد فاصل این زوایا تغییرات ضریب درگ انداز و قابل پیش‌بینی می‌باشد. انتخاب قطر سیلندرها بر مبنای محدوده عملیاتی و اجرایی سازه‌ها که بطور معمول با ابعاد برابر و یا تا سی درصد اختلاف (اطلاعات جمع آوری شده) طراحی و اجرا می‌گردد، انتخاب گردید. در اینجا اختلاف قطر بین دو سیلندر A و B برابر 27% و بین دو سیلندر B و C معادل 31% می‌باشد. محدوده اعداد رینولدز وابسته به محدوده قابل قبول کاری تونل باد دانشگاه حکیم سبزواری بوده است.

به منظور محاسبه ضریب پسا، ابتدا نیروی وارد شده به مدل در هر سرعت، توسط نیروسنجه^۱ اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۱) ضریب پسا محاسبه می‌گردد.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (1)$$

در رابطه (۱) F_D نیروی وارد بر مدل، ρ چگالی سیال، V سرعت جریان هوای ورودی تونل و A سطح مقطع مدل است که در مقابل جریان هوا قرار دارد.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه تونل باد مورد استفاده در این پژوهش از نوع دمنده مدار باز و دمشی می‌باشد. حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد این دستگاه در محفظه آرامش $1/10$ درصد است. اتفاق آزمایش دستگاه تونل باد از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی متر و سطح مقطع $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ می‌باشد. نمونه‌ها بصورت افقی و در میانه محفظه آزمایش تونل باد (200 میلی متر از کف) نصب شده است. نسبت انسداد، قطر بزرگترین استوانه تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد تعريف می‌شود، در پژوهش حاضر معادل $0.775/0.725$ می‌باشد که نشان دهنده تاثیر ناچیز دیواره بر مدل است.

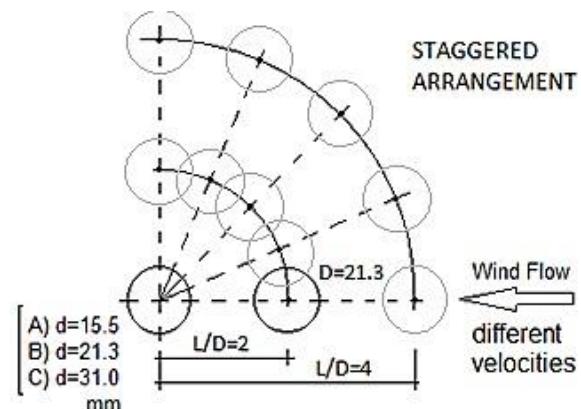
شکل (۲) شماتیک تونل باد مورد استفاده را نشان می‌دهد. دستگاه تونل باد مورد استفاده در این پژوهش، ساخت شرکت فرانسیش صبا می‌باشد. با استفاده از الکتروموتور سه فاز 7 کیلوواتی که برای تولید جریان هوا در دستگاه تونل باد به کار می‌برود، می‌توان به سرعت صفر تا 30 متر بر ثانیه دست یافت. یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری نیروی جریان سیال بر روی اجسام

به کاهش 29% ضریب پسا می‌شود. بک خوشنویس و همکاران (۱۹-۲۲) به بررسی تجربی تاثیر صفحات پیچان در سیلندر دایروی بر ضریب پسا پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از صفحات پیچان، تاثیرات متفاوتی بر ساختار دنباله دارد به طوری که مقدار ضریب پسا در سیلندر دایروی با مارپیچ، نسبت به سیلندر صاف کمتر است.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی ضریب پسا حول سیلندر، بیشتر مطالعات به بررسی ضریب درگ حول تک سیلندر یا دو سیلندر در فواصل مختلف پرداختند. در حالی که در این پژوهش، تغییرات ضریب درگ سیلندر پایین دست ناشی از سیلندرهای بالا دست در فواصل، زوایا، قطرها و اعداد رینولدز مختلف (۱۹۲) بررسی شده است که این پژوهش را نسبت به پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش به دلیل جامع بودن می‌تواند توسط طراحان صنعتی و سازه‌ای به عنوان ابزاری مناسب برای بهینه سازی، طراحی و بهبود دقت مدل‌های مهندسی استفاده شود.

۲- بیان مساله

در این پژوهش، تغییرات ضریب پسا برای سه سیلندر C, B, A با قطرهای $15.5/5$ و $21.3/3$ و $31/1$ میلیمتر تحت تاثیر سیلندر بالا دست در زوایای 0° , 5° , 10° , 45° , 22.5° و 67.5° و 90° در دو نسبت فاصله 2 و 4 برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ($4800 < Re < 47000$) بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سیلندرهای مورد استفاده در این آزمایش از جنس تفلون پلی تترافلئور اتیلن می‌باشد. آرایش و مشخصات سیلندرها در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ آرایش و مشخصات سیلندرها در پژوهش حاضر

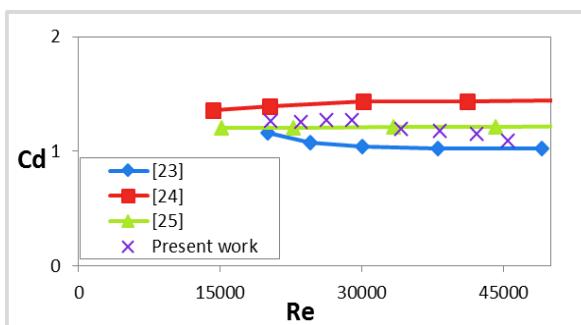
در مورد انتخاب محدوده فاصله ($L/D < 2$) این محدوده قبل و بعد از نسبت بحرانی ($L/D = 3/6$) در نظر گرفته شده است. زیرا

^۱ Load cell

در تونل باد، دستگاه نیروسنجد است. اصلی‌ترین کاربرد آن، اندازه گیری نیروی پسا می باشد. نیروسنجد استفاده شده در تونل باد فوق الذکر از نوع تک نقطه ای (sps)، است که توانایی اندازه گیری نیرو تا ۵ نیوتن را دارد. شکل (۳) شماتیک نیروسنجد مورد استفاده را نشان می دهد.

۴- اعتبار سنجی

در شکل (۴) و جدول (۱) مقادیر ضریب درگ و درصد خطای کار حاضر در مقایسه با مراجع [۲۳-۲۵] در نسبت ابعادی برابر و محدوده مشخصی از اعداد رینولدز بررسی شده است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج بدست آمده با نتایج دیگر محققین بخوبی مطابقت داشته و از دقت قابل قبولی برخوردار است. لازم به ذکر است که مراجع [۲۳-۲۵] به بررسی ضریب درگ جریان اطراف تک سیلندر استوانه‌ای صاف و صیقلی در محدوده اعداد رینولدز ۲۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ پرداخته اند.



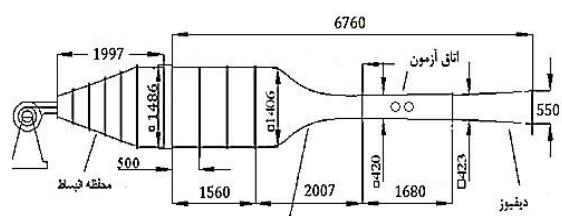
شکل ۴ مقایسه ضریب پسا سیلندر دایروی پژوهش حاضر با نتایج تجربی دیگر محققین [۲۳-۲۵]

جدول ۱ مقادیر ضریب درگ و درصد خطای کار حاضر در مقایسه با مراجع [۲۳-۲۵]

	Re	Cd	Present work	درصد خطای
Ref [۲۳]	۲۰۰۰۰	۱/۱۶۳۹۵	۱/۲۵۴۶۳	% ۷/۷۷۹۰۷۱
	۲۴۵۰۰	۱/۰۷۷۳۴	۱/۲۵۹۲۲	% ۱۹/۸۸۲۳۲
	۳۰۰۰۰	۱/۰۳۷۷۲	۱/۲۴۶۳۵	% ۲۰/۱۰۴۶۵
	۳۸۰۰۰	۱/۰۱۹۶۹	۱/۲۳۶۷۳	% ۲۱/۲۸۴۹۰
Ref [۲۴]	۲۰۲۴۶	۱/۲۹۰۷۴	۱/۲۵۷۰۹	% ۲/۶۰۷۰۳۱
	۳۰۰۸۹	۱/۳۳۰۲۶	۱/۲۴۵۲۴	% ۶/۳۹۱۲۳۱
	۴۱۱۴۸	۱/۴۳۸۰۱	۱/۲۱۲۵۹	% ۱۵/۶۷۵۸۲
Ref [۲۵]	۲۲۷۲۸	۱/۲۰۶۲۲	۱/۲۵۸۴۱	% ۴/۳۲۶۷۳۹
	۳۳۳۴۳	۱/۲۱۰۵۵	۱/۲۴۳۹۵	% ۲/۷۵۹۰۷۶
	۴۴۱۶۲	۱/۲۱۳۷۳	۱/۱۹۸۵۴	% ۱/۲۵۱۲۶۶



(الف)

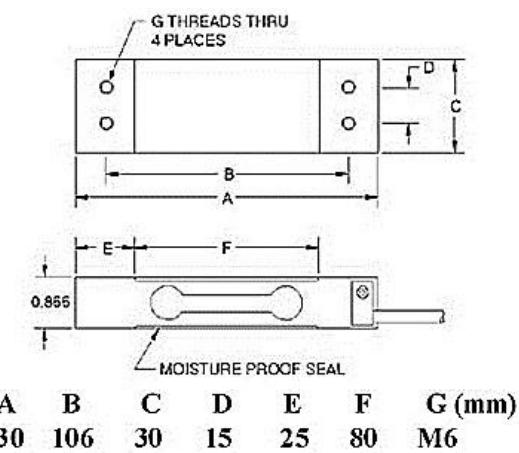


(ب)

شکل ۲ (الف)- تونل باد ب- شماتیک تونل باد مورد استفاده

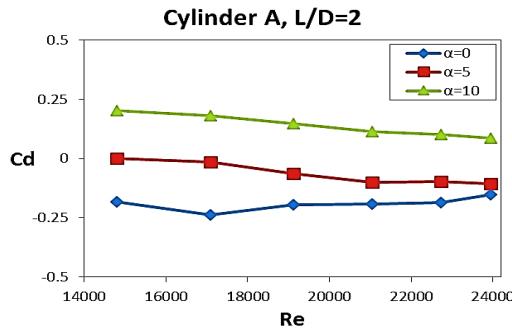


(الف)

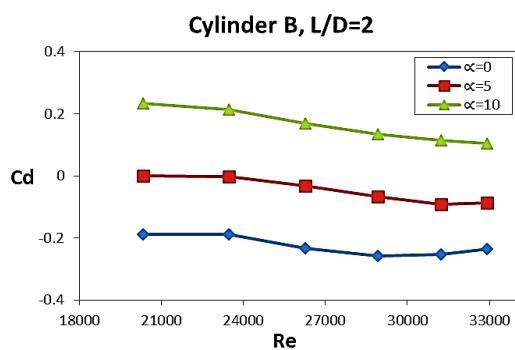


شکل ۳ (الف)- نیروسنجد نصب شده در تونل باد ب- شماتیک نیروسنجد

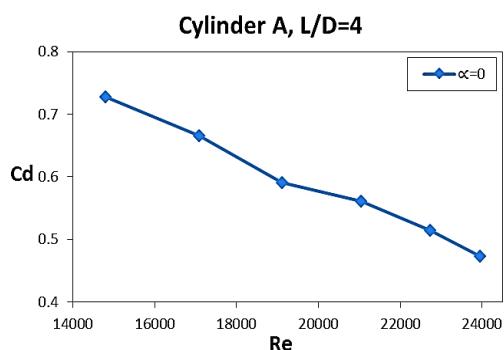
۵- نتایج و بحث



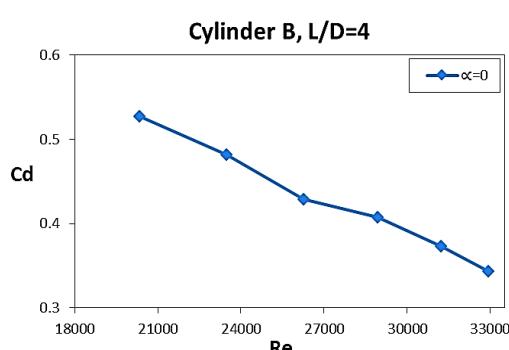
شکل ۵ ضریب پسا سیلندر A در $L/D=2$



شکل ۶ ضریب پسا سیلندر B در $L/D=2$



شکل ۷ ضریب پسا سیلندر A در $L/D=4$



شکل ۸ ضریب پسا سیلندر B در $L/D=4$

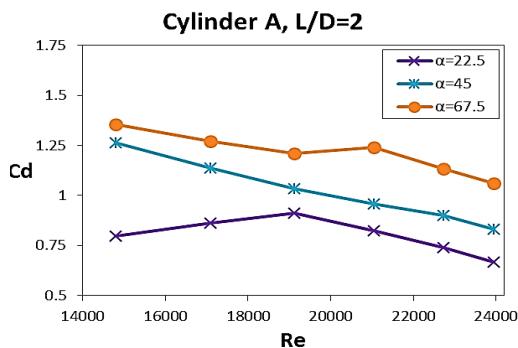
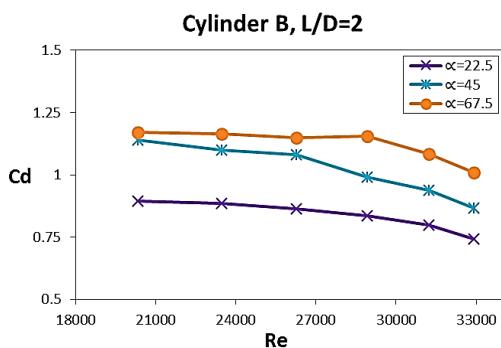
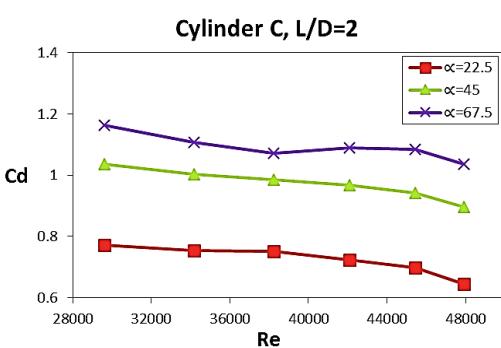
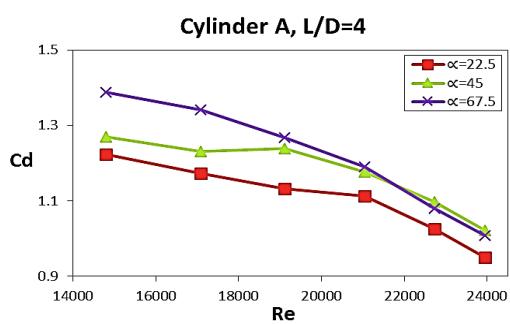
در این بخش، ضریب پسا در سیلندرهای پایین دست A، B و C در دو نسبت فاصله $4/L/D=2$ به صورت تابعی از عدد رینولدز در زوایای مختلف در سه حالت (الف) زوایای کم ($10^\circ, 5^\circ$ و 0°)، (ب) زوایای میانی ($22/5^\circ, 45^\circ, 67/5^\circ$) و (ج) زاویه 90° بررسی شده است.

۱-۵- بررسی ضریب پسا در زوایای کم

ضریب پسای دو سیلندر A و B در $L/D=2$ بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۵-۶) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در زوایای کم ($10^\circ, 5^\circ$ و 0°)، ضریب پسا خیلی متأثر از افزایش عدد رینولدز نمی باشد و تغییرات آن اندک است. در زوایای (5° و 0°) و $L/D=2$ ضریب پسا در سیلندرهای A و B منفی می باشد که حاکی از تخلی نیروی جاذبه بین سیلندرهای بالادست و پایین دست است. همچنین وقتی فاصله دو سیلندر در حد کافی کم باشد در پشت سیلندر اصلی، ریزش گردابه بوجود نمی آید. به عبارت دیگر، گردابه تنها در پشت سیلندر پایین دست تشکیل می شود و جدایش لایه های برشی از سیلندر بالا دست، شامل بدنه پایین دست می گردد، یعنی مجموع سیلندرها همانند تک سیلندر عمل می کنند. در این حالت، یک الگوی جریان متقاضی بین دو استوانه تولید می شود و گردابه های بزرگ ایجاد شده پشت استوانه دوم بصورت دوره ای جاری می شوند. در این حالت یک منطقه شبیه ثابت بین دو سیلندر تشکیل می شود و با کاهش فشار، مکش به سمت سیلندر بالا دست آغاز می گردد که منجر به منفی شدن ضریب پسا در سیلندر پایین دست می گردد. الگوی جریان در این شرایط، حالت کاواک^۱ یا حفره نامیده می شود. بررسی های منگینی [۳] نیز نشان داده است که برای نسبت فواصل کمتر از سه $(L/D<3)$ ، ضریب پسا منفی بوده و عملا سیلندر پایین دست در محدوده کم فشار ناشی از جدایش لایه های برشی سیلندر بالا دست، غوطه ور می باشد.

ضریب پسای دو سیلندر A و B در $L/D=4$ بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۷-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش نسبت فاصله ($L/D=4$) و عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا در دو سیلندر A و B به آرامی کاهش می یابد. دلیل آن کاهش ضریب فشار با افزایش عدد رینولدز می باشد. همچنین مقایسه اشکال (۵-۸) در زاویه 0° بیانگر آن است که با افزایش نسبت فاصله از ۲ به ۴، افزایش قابل توجهی در ضریب پسا سیلندر پایین دست A و B به دلیل انتقال الگوی جریان خواهیم داشت.

^۱ Cavity mode

شکل ۹ ضریب پسای سیلندر A در $L/D=2$ شکل ۱۰ ضریب پسای سیلندر B در $L/D=2$ شکل ۱۱ ضریب پسای سیلندر C در $L/D=2$ شکل ۱۲ ضریب پسای سیلندر A در $L/D=4$

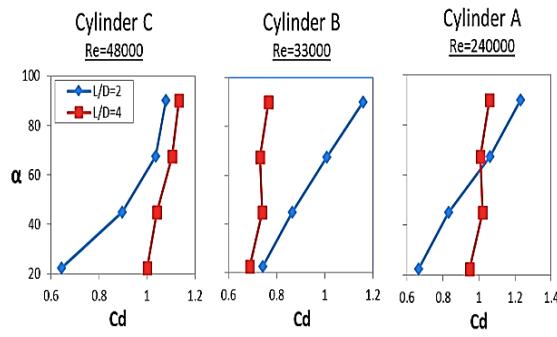
۲-۵- بررسی ضریب پسا در زوایای میانی

ضریب پسای سه سیلندر A و B و C در $L/D=2$ و $L/D=4$ بر حسب عدد رینولز در اشکال (۹-۱۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زاویه قرار گیری سیلندرها نسبت به یکدیگر و تغییر آرایش سیلندرها از حالت پشت سر هم به حالت مجاور، ضریب پسا افزایش می یابد. ضریب پسای سه سیلندر A و B و C در $L/D=2$ و $L/D=4$ بر حسب عدد رینولز در اشکال (۱۵-۱۶) نشان داده شده است. ملاحظه می شود با زیاد شدن قطر استوانه ها، ضریب پسا در هر زاویه کاهش می یابد. لذا بر اساس موقعیت سیلندر پایین دست (زاویه و نسبت فاصله) می توان رفتار سیال را به دو حالت تقسیم بندی کرد. حالت اول تداخل دنباله، زمانی که یکی از سیلندرها به صورت جزئی یا کامل در دنباله دیگری قرار گرفته است. حالت دوم در مجاورت دنباله، زمانی که دو سیلندر در دنباله یکدیگر نیستند. مطابق شکل (۱۷) با افزایش نسبت فاصله و تغییر از حالت تداخل به مجاور، حساسیت ضریب پسا نیز نسبت به افزایش زاویه، کم می گردد.

با توجه به شکل های (۹-۱۱) در زاویه 22.5° ضریب پسا در سیلندر پایین دست، کمتر از ضریب پسا در حالت تک سیلندر ($C_d \approx 1/2$) می باشد. لذا می توان زاویه های بهینه بدست آورد که در آن زاویه، فرکانس ریزش گردابه ها کاهش یابد و کمترین ضریب پسا در آن محدوده بدست آید. مطابق شکل های (۱۳-۱۲ و ۹-۱۰) متناسب با افزایش زاویه و کاهش تاثیر حوزه جریان سیلندر اصلی بر سیلندر پایین دست، ضریب پسا افزایش می یابد. همچنین با افزایش عدد رینولز، ضریب پسا در سیلندرهای A و B برای هر زاویه، نرخ نزولی خواهد داشت که برای نسبت فاصله $L/D=4$ واضح تر می باشد.

در شکل های (۱۱ و ۱۴) مشاهده می شود که متناسب با افزایش زاویه، مقدار ضریب پسا در سیلندر پایین دست (C) نیز افزایش می یابد، هر چند با نزدیک شدن به زاویه 90° (آرایش مجاور هم) و با کاهش تاثیر پذیری دو سیلندر از یکدیگر، نرخ افزایش ضریب پسا خصوصا در نسبت فاصله بیشتر، کاهش می یابد. در زاویه 45° ، دنباله سیلندر اصلی با لایه برشی سیلندر پایین دست ادغام می شود و با افزایش زاویه به 67.5° فاصله جانبه دو سیلندر نیز افزایش می یابد و استوانه ها تاثیر کمتری بر یکدیگر می گذارند و مطابق [۲۶] در این حالت تاثیر متقابل دو استوانه قابل اغماس می باشد. این الگوی جریان، اثر متقابل ناچیز^۱ نام گذاری شده است، به همین دلیل از زاویه 45° به بعد مطابق شکل (۱۴) شاهد تغییرات بسیار اندک ضریب پسا در سیلندر پایین دست (C) تا زاویه 90° هستیم.

^۱ Negligible interaction flow pattern



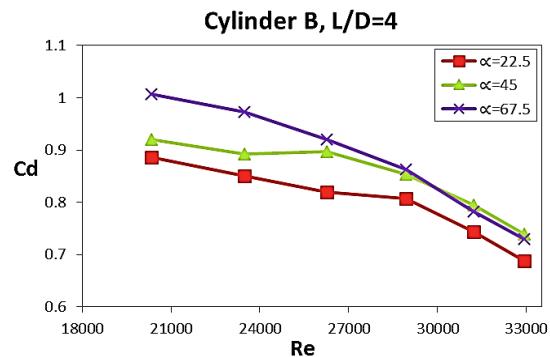
شکل ۱۷ مقایسه ضریب پسا سیلندرهای C,B,A در زوایای مختلف در حداکثر عدد رینولدز اندازه گیری شده

۳-۵- بررسی ضریب پسا در زوایه قائم

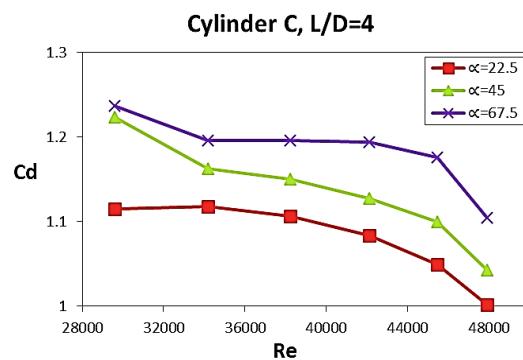
ضریب پسا سه سیلندر A و B و C در $L/D=2$ و $L/D=4$ بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۱۸-۲۳) نشان داده شده است. در حالت دو استوانه هم قطر در زوایه 90° یک ناحیه پرفشار در جلوی سیلندرها شکل می گیرد. در داخل شکاف بین سیلندرها شاهد افت فشار هستیم که بیشتر از فشار طرفین سیلندرها می باشد. شدت تغییرات و محدوده فشار در اطراف سیلندرها نیز وابسته به نسبت فاصله است [۲۷]. لذا در این حالت در $L/D=2$ نیروی دافعه بین سیلندری ایجاد می شود. همچنین در همین نسبت فاصله و در پی نوسانات دنباله، دنباله به سمت یکی از سیلندرها منحرف شده که به تناسب نسبت فاصله بر ضریب پسا تاثیر خواهد گذاشت و موجب افزایش پسا آن سیلندر می گردد. با افزایش فاصله در $L/D=4$ دنباله ها به سمت مستقل بودن از یکدیگر پیش می روند و مانند تک استوانه عمل می کنند. بیشترین مقدار ضریب پسا در استوانه B در $L/D=2$ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ می باشد که در حالت مشابه نسبت به حدود ۳۰٪ افزایش نشان می دهد.

در اشکال (۱۹ و ۲۳) در زوایه 90° و $L/D=4$ مشاهده می شود که ضریب پسا برای سیلندر B کمتر از دو سیلندرهای A و C است. زیرا تلاطم جریان در پشت سیلندر کوچکتر، بطور محسوسی بیشتر از سیلندر بزرگتر است، هر چند در فاصله دورتر، شدت اغتشاش در پشت سیلندر، بزرگتر از دیگری می گردد. همچنین دنباله گردابه های سیلندر کوچکتر، نظام کمتری دارد [۲۸] و ضریب پسا سیلندر کوچکتر (سیلندر A) در $L/D=2$ همواره بیشتر از سیلندرهای بزرگتر (سیلندر C, B) می باشد. همچنین ضریب پسا سیلندر C نیز بزرگتر از سیلندر B است (شکل های ۲۰ و ۲۲).

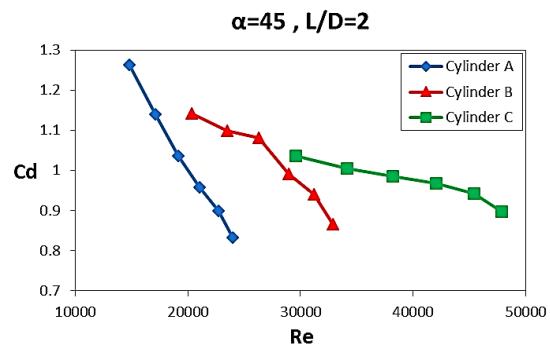
ضریب پسا در همه زوایا در $L/D=4$ مثبت است و سیلندر پایین دست در هیچ شرایطی تحت تاثیر نیروی رانش قرار ندارد و این یکی از ویژگی های بارز این آرایش است. لازم به ذکر است همانطور که با افزایش زوایه، ضریب پسا زیاد می شود، تداخل بین سیلندرها کاهش می یابد.



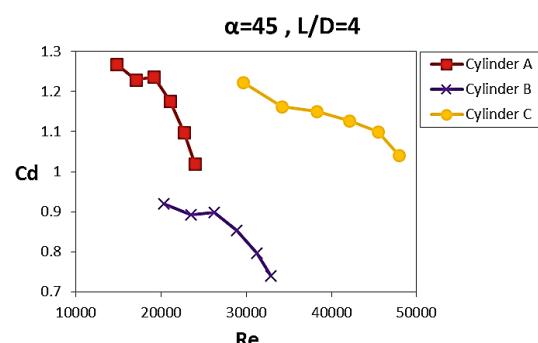
شکل ۱۳ ضریب پسا سیلندر B در $L/D=4$



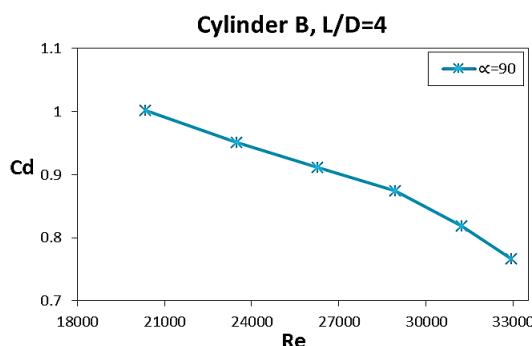
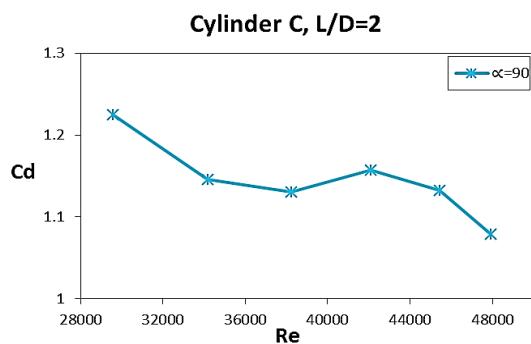
شکل ۱۴ ضریب پسا سیلندر C در $L/D=4$



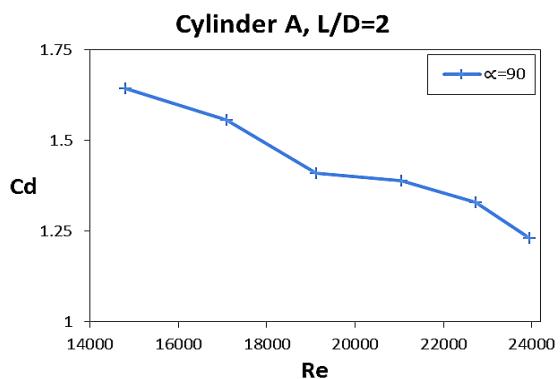
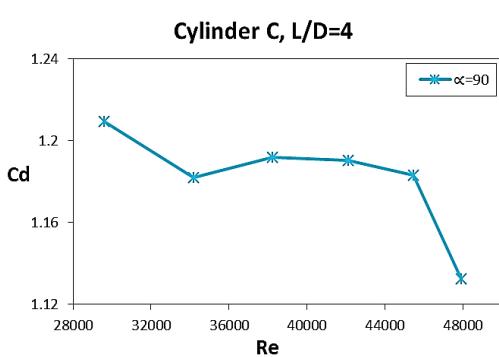
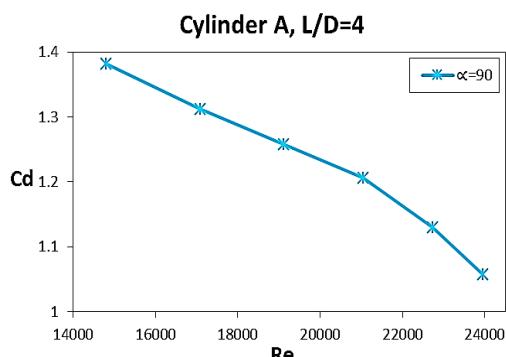
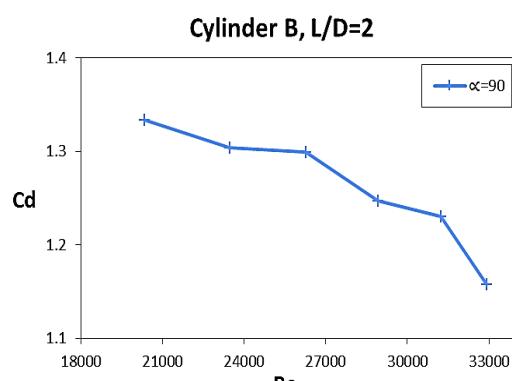
شکل ۱۵ ضریب پسا سیلندرهای A,B,C در $L/D=2$



شکل ۱۶ ضریب پسا سیلندرهای A,B,C در $L/D=4$

شکل ۲۱ ضریب پسای سیلندر B در $L/D=4$ شکل ۲۲ ضریب پسای سیلندر C در $L/D=2$

تغییرات ضریب درگ ناشی از پارامترهای نسبت فاصله، زاویه و عدد رینولدز در روند نمودارهای شکل (۲۲) و (۲۳) مرتبط با جابجایی ساختار جریان از حالتی به حالت دیگر است. بدین معنا که افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش طول دنباله در کانتورهای سرعت و گردابه و در نهایت کاهش تاثیر دو سیلندر بر یکدیگر می‌شود. با کاهش تاثیر دو سیلندر بر یکدیگر، ضریب درگ استوانه‌ها کاهش می‌یابد و به سمت ضریب درگ تک سیلندر میل می‌کند.

شکل ۱۸ ضریب پسای سیلندر A در $L/D=2$ شکل ۲۳ ضریب پسای سیلندر C در $L/D=4$ شکل ۱۹ ضریب پسای سیلندر A در $L/D=4$ شکل ۲۰ ضریب پسای سیلندر B در $L/D=2$

۶- تحلیل عدم قطعیت

نتایج دستگاه لودسل با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده (Amcells) با تقسیمات ۱۴۰۰۰ و کلاس دقیق (C3) به دست آمده. از آنجایی که حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری توسط هر E لودسل در واقع نشانگر دقیق لودسل می‌باشد، بنابراین اگر ظرفیت لودسل (در اینجا برابر ۵۰۰۰ گرم) و Y تعداد تقسیمات لودسل باشد، V حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری را نشان می‌دهد به طوریکه:

۱۰- دامنه تغییرات ضریب پسا از زاویه $22/5^\circ$ به بعد در $L/D=4$ کمتر از $L/D=2$ می باشد.

۸- فهرست علائم و اختصارات

علایم انگلیسی

A	سطح مقطع مدل [m^2]
C_d	ضریب پسا
D	قطر سیلندر بالادست [m]
d	قطر سیلندر پایین دست [m]
F_D	نیروی وارد بر مدل [$kg\ ms^{-2}$]
L	فاصله مرکز به مرکز استوانه ها [m]
Re	عدد رینولدز
V	سرعت حریان هوا [ms^{-1}]
α	زاویه فرار گیری سیلندرها نسبت به سیلندر پایین دست (deg)
ρ	چگالی سیال [kgm^{-3}]

$$V = \frac{E}{Y} = 5000 / 14000 = 0.35 \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۲) حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری لودسل مورد استفاده در اینجا معادل 0.35 گرم بدست می آید. همچنین میزان دقت اندازه گیری لودسل را می توان از رابطه (۳) مورد بررسی قرار داد.

$$\epsilon > \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_R^2 + \left(\frac{\varepsilon_Z \times L \times N}{W_1} \times t \right)^2 + (\varepsilon_S \times t)^2} \quad (3)$$

مقدار ϵ بیان کننده دقت اندازه گیری لودسل، L درصد غیرخطی، H خطای پسماند مغناطیسی، Re تکرار پذیری، Z اثر دما بر تعادل صفر، S اثر دما بر دامنه، L نرخ ظرفیت لودسل، N تعداد لودسل، W حداکثر بار قابل اندازه گیری و t دامنه تغییرات دمایی لودسل است.

۷- نتیجه گیری

- [1] Han, Z., Zhou, D., Gui, X., Flow past two tandem circular cylinders using Spectral element method, *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBA7)*, Shanghai, China, September 2-6, pp. 546-554, (2012).
- [2] Pouryoussefi, G., Mirzaei, M.A.S.O.U.D., Ardekani, M.A., Experimental investigation of force coefficients for groups of three and four circular cylinders subjected to a cross-flow, *Mechanical and Aerospace Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 87-95, (2009).
- [3] Meneghini, J.R., Saltara, F., Siqueira, C.D.L.R., Ferrari Jr, J.A., Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp. 327-350, (2001).
- [4] Vu, H.C., Ahn, J., Hwang, J.H., Numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangement at low Reynolds numbers, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 1594-1604, (2016).
- [5] Gao, Y., Etienne, S., Wang, X., Tan, S.K., Experimental study on the flow around two tandem cylinders with unequal diameters, *Journal of Ocean University of China*, Vol. 13, pp. 761-770, (2014).
- [6] Zhao, M., Cheng, L., Teng, B., Liang, D., Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters, *Applied Ocean Research*, Vol. 27, pp. 39-55, (2005).

در این پژوهش، تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C با قطرهای $15/5$ و $21/3$ و 31 میلیمتر تحت تاثیر سیلندر بالا دست در زوایای $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 45^\circ, 22/5^\circ, 40^\circ, 67/5^\circ$ در دو نسبت فاصله 2 و 4 برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ($4800 < Re < 14700$) بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد:

- ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C از زاویه $22/5^\circ$ تا 90° در $L/D=2$ به ترتیب $0.84/5$, $0.55/7$, $0.67/6$ ٪ افزایش می یابد.
- افزایش ضریب پسا در سه سیلندر مذکور در زوایای $22/5^\circ$ تا 90° در $L/D=4$ به ترتیب $0.11/4$, $0.13/1$ ٪ افزایش می یابد.
- تغییرات ضریب پسا در $L/D=2$ در زوایای مختلف، وابستگی کمی به تغییرات عدد رینولدز دارد.
- در $L/D=4$ ضریب پسا، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات زاویه، بجز زاویه صفر درجه از خود نشان می دهد.
- تغییرات ضریب پسا کاملا به قطر استوانه ها و نسبت L/D وابسته می باشد.
- مرز بین ضریب پسای مثبت و منفی در سیلندرهای A و B در اعداد رینولدز مورد بررسی، زوایای 10° و 5° می باشد.
- در زاویه $22/5^\circ$ برای $L/D=2$ با توجه به پایین بودن ضریب پسا نسبت به حالت تک سیلندر، تعیین نقطه و زاویه بهینه جهت محاسبات فنی امکان پذیر می باشد.
- با افزایش قطر سیلندر پایین دست، ضریب پسا کاهش می یابد.
- روند افزایش ضریب پسا با افزایش زاویه از $22/5^\circ$ به بعد، کاهش می یابد.

- Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 76, pp. 83-101, (2006).
- [18] Lee, S.J., Lee, S.I., and Park, C.W., Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 34, pp. 200-233, (2004).
- [19] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pp. 1-14, (2022).
- [20] Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., Yadegari, M., The investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylinder wake, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10(1), pp. 223-236, (2020).
- [21] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135(6), pp. 1-22, (2020).
- [22] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135(7), pp. 1-21, (2020).
- [23] Cengel, Y.A., and Cimbala, J.M., Properties of fluids, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, pp. 37-73, (2014).
- [24] Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., and Huebsch, W.W., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons. Inc., USA, (2006).
- [25] Achenbach, E., Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, pp. 565-575, (1972).
- [26] Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F., and Wu, K., Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 76, pp. 83-101, (2006).
- [27] Simiu E., Scanlan R.H., *Wind Effect on Structures: Fundamentals and Design*, John Wiley and Sons, New York, Vol. 688, (1996).
- [28] Lam, K.M., Wong, P.T.Y., Ko, N.W.M., Interaction of flows behind two circular cylinders of different diameters in side-by-side arrangement, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 7, pp. 189-201, (1993).
- [7] Fu, Y., Zhao, X., Wang, X., Cao, F., Computation of flow past an in-line oscillating circular cylinder and a stationary cylinder in tandem using a CIP-based model, *Mathematical Problems in Engineering*, (2015).
- [8] Yang, S., Yan, W., Wu, J., Tu, C., Luo, D., Numerical investigation of vortex suppression regions for three staggered circular cylinders, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 55, pp. 207-214, (2016).
- [9] Supradeepan, K., Roy, A., Characterisation and analysis of flow over two side by side cylinders for different gaps at low Reynolds number: a numerical approach, *Physics of Fluids*, Vol. 26, (2014).
- [10] Ezadi Yazdi, M.J., Bak Khoshnevis, A., Comparing the wake behind circular and elliptical cylinders in a uniform current, *SN Applied Sciences*, Vol. 2(5), pp. 1-13, (2020).
- [11] Ezadi Yazdi, M.J., Rad, A.S., Khoshnevis, A.B., Features of the flow over a rotating circular cylinder at different spin ratios and Reynolds numbers: Experimental and numerical study, *The European Physical Journal Plus*, Vo. 134(5), pp. 1-21, (2019).
- [12] Yazdi, M.J.E., , Khoshnevis, A.B., Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical Reynolds number, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 133(12), pp. 533, (2018).
- [13] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Numerical and Experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 45, pp. 265-285, (2021).
- [14] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(10), pp. 1-25, (2021).
- [15] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42(8), pp. 1-15, (2020).
- [16] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(1), pp. 1-19, (2021).
- [17] Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F., Wu, K., Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod,

تحلیل میکرومکانیکی خواص موثر کامپوزیت های زمینه پلیمری حاوی ذرات کروی پیزوالکتریک و نانولوله های کربنی

چکیده: در این مقاله از رویکرد میکرومکانیکی موری-تاناکا برای محاسبه خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی با زمینه ی پلی آمید و تقویت شده با ذرات پیزوالکتریک تیتانات زیرکونات سرب و نانولوله ی کربنی استفاده شده است. مدل سازی شامل دو مرحله است که ابتدا اثر توزیع نانولوله ی کربنی در زمینه ی پلی آمید محاسبه شده و در مرحله‌ی بعدی از نتایج به دست آمده برای انجام محاسبات اضافه کردن ذرات پیزوالکتریک استفاده شده است. مدل با نتایج آزمایشگاهی و مطالعات پیشین اعتبار سنجی شده است. افزایش کسر حجمی ذرات پیزوالکتریک باعث افزایش مدول های الاستیک، مدول های برشی و ثوابت پیزوالکتریک می شود. مدل سازی برای حالت پخش یکنواخت و غیر یکنواخت نانولوله های کربنی انجام شده است. نتایج نشان می دهد با افزودن نانولوله ی کربنی، مدول های الاستیک و ثوابت پیزوالکتریک افزایش می یابند. همچنین تجمع نانولوله های کربنی باعث کاهش این مدول ها خواهد شد.

واژه های راهنمایی: میکرومکانیک، موری-تاناکا، پیزوالکتریک، نانولوله ی کربنی، کامپوزیت هیبریدی

محمد کاظم
حسن‌زاده اقدم*

استادیار،
دانشکده فنی و مهندسی شرق
گیلان،
دانشگاه گیلان، رودسر-واجارگاه

یاسین کرامتی
دانشجوی دکتری

رضاء انصاری
استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه گیلان، رشت

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

Mohammad Kazem
Hassanzadeh-
Aghdam*
Assistant Professor,
Faculty of Technology
and Engineering, East of
Guilan, University of
Guilan, Rudsar-Vajargah

Yasin Keramati
Ph.D. Student

Reza Ansari
Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, University
of Guilan, Rasht

Micromechanical analysis of effective properties of polymer matrix composites containing piezoelectric spherical particles and carbon nanotubes

Abstract: In this article, the Mori-Tanaka micromechanical approach is used to obtain the elastic and piezoelectric properties of a hybrid composite with a polyamide matrix and reinforced with piezoelectric particles of lead zirconate titanate and carbon nanotubes. Modeling consists of two steps, first, the effect of carbon nanotube distribution in the polyamide matrix is calculated, In the next step, the obtained results were used to calculate the addition of piezoelectric particles. The model has been validated with experimental results and previous studies. the increase in the volume fraction of piezoelectric particles causes an increase in the elastic and shear moduli and piezoelectric constants. Modeling for uniform and non-uniform distribution of carbon nanotubes has been done. The results show that by adding carbon nanotubes, the elastic moduli and piezoelectric constants increase. Also, the agglomeration of carbon nanotubes reduces these modules.

Keywords: Micromechanics, Mori-Tanaka, Piezoelectric, Carbon nanotubes, Hybrid composite

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پیزوالکتریک سبب می‌شود که کامپوزیتی با خواص پیزوالکتریکی و با ویژگی‌های فوق العاده نانو لوله‌ی کربنی داشته باشیم. از این رو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۱۶]. وقتی کی از تقویت کننده‌ها در ابعاد نانو و دیگری در ابعاد میکرو باشد کامپوزیت ساخته شده، کامپوزیت هیبریدی نامیده می‌شود [۱۷]. بدیهی است که چنین کامپوزیت‌هایی در فناوری هوانوردی و فضانوردی، خودروسازی، مکانیک، عمران، صنایع دریایی، معماری و مهندسی پزشکی و بسیاری دیگر از صنایع مدرن مورد توجه هستند [۱۸، ۱۹]. اعتقاد بر این است که خواص منحصرفرد نانولوله‌ی کربنی، عصر جدیدی را در دنیای مواد به ویژه در زمینه پلیمرهای رسانا و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانو لوله‌ی کربنی گشوده است. از آن زمان، انواع مختلفی از تکنیک‌ها برای کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با ذرات میکرو مقیاس حاوی نانو لوله‌های کربنی با هدف ساخت مواد پیشرفته جدید با خواص چند منظوره توسعه یافته است [۸، ۱۰، ۱۹].

حقیقی و همکاران [۲۰] اثرات نسبت ابعاد، کسر حجمی و حالت تجمع را روی خاصیت رسانندگی الکتریکی کامپوزیت هیبریدی با زمینه پلیمری مت Shank از نانو لوله کربنی و فیبر کربن با جهت‌گیری تصادفی را بررسی کردند. حسین‌بور و قاسمی [۲۱] تاثیر تجمع و نسبت ابعاد نانو لوله‌ی کربنی بر روی فشار و تنش خرزشی طولانی مدت را برای کامپوزیت پوسته‌ی استوانه‌ای چند مقیاسی با زمینه پلیمری بررسی کردند. آن‌ها از روش هالپین-تسای^۱ و موری-تاناکا^۲ برای مدلسازی خود استفاده کردند و همچنین قسمت‌های دارای تجمع نانو ذرات را بصورت فاز‌های کروی در نظر گرفتند. حسن زاده اقدام و همکاران [۲۲] با استفاده از رویکرد میکرومکانیکی چند مرحله‌ای سلول واحد، خاصیت الاستیک کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تک جهته حاوی نانو لوله‌ی کربنی را بررسی کردند و نشان دادند با افزودن نانو لوله‌ی کربنی به کامپوزیت مدول الاستیک عرضی افزایش می‌یابد ولی روی مدول الاستیک طولی تاثیری ندارد. گودارا و ماهاتو [۲۳] به بررسی تاثیر وجود یا عدم وجود فاز میانی بین نانو لوله‌ی کربنی و پلی‌آمید در کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک پرداختند. آن‌ها از چند مرحله روش موری-تاناکا برای انجام مدلسازی خود استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن فاز میانی تاثیر بسیار کمی در ضربی الاستیک طولی دارد و همچنین با در نظر گرفتن فاز میانی خواص الاستیک عرضی کمی افزایش می‌یابد. حسن‌زاده و

به دلیل توانایی مواد پیزوالکتریک در تبدیل انرژی الکتریکی و مکانیکی به یکدیگر، این مواد، گزینه مناسبی برای استفاده در حسگرها و عملگرها هستند. برای برخی از کاربردها، لازم است از مواد کامپوزیتی استفاده شود که در آن یک یا چند جزء دارای خواص پیزوالکتریک باشند [۱، ۲]. خواص و رفتارهای الکترومکانیکی کلی کامپوزیت‌های پیزوالکتریک به شدت تحت تاثیر خواص و رفتار اجزای تشکیل دهنده آن است [۳]. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با ذرات پیزوالکتریک، سختی، سفتی و ضربی پیزوالکتریک بالای سرامیک‌های پیزوالکتریک را با انعطاف پذیری و چگالی کم پلیمرها ترکیب می‌کنند. این ترکیب، باعث می‌شود که این کامپوزیت‌ها برای اجزای ساختاری و عملکردی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مناسب شوند [۴، ۵]. کامپوزیت‌های پیزوالکتریک به اشکال مختلفی از جمله الیاف سرامیکی پیزوالکتریک یا ذرات تعییه شده در یک زمینه پلیمری ساخته شده‌اند [۲].

در طول دو دهه گذشته، نانو کامپوزیت‌های پلیمری به سرعت مورد توجه قرار گرفتند و محققان را در سراسر جهان به خود جذب کردند. تحقیقات اخیر در حال انجام روی نانو کامپوزیت‌های پلیمری نشان می‌دهد که این دسته از مواد می‌توانند بهبود قابل توجهی در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی ایجاد کنند [۶]. از زمان کشف نانو لوله‌ی کربنی توسط ایجیما [۷] در سال ۱۹۹۱ به دلیل خواص چشمگیری همچون استحکام استثنایی (۱۰۰-۱۰۰ برابر بیشتر از فولاد)، مدول یانگ بالا (حدود ۱ تراپاسکال)، چگالی کم، قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ بدون شکستگی، قابلیت فوق العاده برای بازگشت به ساختار اصلی بعد از تغییر شکل و رسانندگی الکتریکی و گرمایی عالی، توجه جامعه علمی و همچنین صنعت را به خود جلب کرده است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. و همچنین می‌تواند تقویت کننده‌ای ایده آل برای طیف مختلفی از کامپوزیت‌ها در نظر گرفته شود [۱۲، ۱۳]. کامپوزیت‌های تقویت شده توسط نانو مواد، به عنوان مثال، نانو لوله‌های کربنی و گرافن‌ها، خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی بیشتری را در مقایسه با خواص فیزیکی مواد زمینه خود نشان داده‌اند [۱۴]. کاربرد نانو لوله‌ها به عنوان قوی‌ترین یا سخت‌ترین عناصر در دستگاه‌های نانومقیاس انجیزه‌ای قوی برای تحقیق در زمینه کامپوزیت‌های شامل نانو لوله‌ی کربنی است [۱۵]. استفاده از نانو لوله‌ی کربنی در

^۱ Mori-Tanaka

^۲ Halpin-Tsai

بالعکس اشاره کرد [۲۹-۳۱]. می‌دانیم در عمل، توزیع یکنواخت نانو لوله‌ی کربنی کاری بسیار سخت است و در کامپوزیت‌های واقعی همیشه مقداری تجمع در نانو لوله‌های کربنی مشاهده می‌شود، به همین دلیل اثرات تجمع نانو لوله‌های کربنی بر خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت هوشمند حاوی نانو لوله‌ی کربنی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به دانش نویسنده‌گان تا الان خواص کامپوزیت هیبریدی پیزوالکتریک با تقویت کننده به شکل ذرات و نانو لوله‌های کربنی با استفاده از روش موری-تاناکا بررسی نشده است.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- مدل موری-تاناکا برای کامپوزیت پیزوالکتریک

روابط ساختاری برای مواد خطی پیزوالکتریک به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijmn}\varepsilon_{mn} + e_{nij}E_n & (1) \\ D_i &= e_{imn}\varepsilon_{mn} - k_{in}E_n & (2) \end{aligned}$$

که σ_{ij} , ε_{ij} , C_{ijmn} , D_i , E_i , e_{ijk} , e_{ijkl} , k_{ij} به ترتیب تانسور تنش، تانسور کرنش، بردار میدان الکتریکی، بردار جابجایی الکتریکی، تانسور سفتی الاستیک، تانسور پیزوالکتریک و تانسور گذرده‌ی هستند. همچنین با توجه به قانون گاووس^۱، تعادل الاستیک، معادلات کرنش-جابجایی و میدان الکتریکی-پتانسیل می‌توانیم متغیرهای الاستیک و الکتریکی را با هم ترکیب کرده و آن‌ها را در یک معادله به صورت زیر بیاوریم:

$$\Sigma_{ij} = \tilde{C}_{ijMn}Z_{Mn}$$

که در آن، متغیرها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Sigma_{ij} = \begin{cases} \sigma_{ij} & J = 1, 2, 3 \\ D_i & J = 4 \end{cases}$$

$$\tilde{C}_{ijMn} = \begin{cases} C_{ijmn} & J, M = 1, 2, 3 \\ e_{nij} & J = 1, 2, 3; M = 4 \\ e_{imn} & J = 4; M = 1, 2, 3 \\ -k_{in} & J, M = 4 \end{cases}$$

$$Z_{Mn} = \begin{cases} \varepsilon_{mn} & M = 1, 2, 3 \\ E_n & M = 4 \end{cases}$$

همکاران [۲۴] به بررسی خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک یک طرفه حاوی نانو لوله‌ی کربنی با جهت‌گیری تصادفی پرداختند. آن‌ها از روش میکرومکانیکی مبتنی بر مدل موری-تاناکا استفاده کردند و خواص الکترومکانیکی کامپوزیت مورد نظر را محاسبه کردند. آن‌ها ثابت کردند با افزودن نانو لوله‌ی کربنی به کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک می‌توان خواص کلی الکترومکانیکی آن را ارتقا داد. در مطالعات گذشته اثرات اضافه کردن نانو لوله‌ی کربنی روی کامپوزیت با تقویت کننده‌ی پیزوالکتریک در حالت ذره‌ای بررسی نشده است.

در حالت کلی روش‌های میکرومکانیکی یک هدف مهم را دنبال می‌کنند و آن پیش‌بینی خواص ماده کامپوزیتی است وقتی که خواص اجزای تشکیل دهنده آن معلوم باشد. تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌هایی برای مرتبه کردن خواص الکترومکانیکی مواد کامپوزیتی با خواص الکترومکانیکی اجزای جداگانه انجام شده است [۲۵, ۱]. چون در برخی از کاربردها خواص الاستیک و برشی و همچنین ثوابت پیزوالکتریک خاصی مورد نیاز است و با پیش‌بینی این خواص می‌توان در مورد کاربردهای احتمالی کامپوزیت ساخته شده اظهار نظر نمود. از مدل‌های میکرومکانیکی مانند مدل سلول واحد، مدل موری-تاناکا، مدل خودسازگار، جهت استخراج خواص موثر کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [۲۶]. چارچوب کلی این روش‌ها تخمین‌هایی را برای طیف وسیعی از اندازه‌ها، هندسه‌ها و جهت‌گیری‌ها ارائه می‌کنند و هر یک از این روش‌ها دارای اشکالاتی در ارتباط با دقت و راحتی محاسباتی هستند [۲۷, ۱]. روش موری-تاناکا یکی از روش‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی موثر مواد کامپوزیتی مختلف است، همچنین این روش برای کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی، استفاده شده است [۱۴, ۲۸].

در این مقاله از رویکرد میکرومکانیکی مبتنی بر مدل موری-تاناکا استفاده شده است. مدل مورد بررسی، کامپوزیت پلیمری تقویت شده با ذره‌تکیت کروی پیزوالکتریک و نانو لوله‌ی کربنی با جهت‌گیری تصادفی است که خواص الاستیک و پیزوالکتریک آن محاسبه شده است. از کاربردهای چنین کامپوزیت‌هایی که دارای مواد پیزوالکتریک‌کاری همچنین مواد نانو هستند می‌توان به استفاده در صنایع مختلف و بخصوص ساخت حسگرها و محرک‌ها و کنترل ارتعاش سازه و همچنین در برداشت کننده‌های انرژی به دلیل خاصیت نسبتاً بالای انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و

^۱ Gauss's law

روند کل مدلسازی در شکل (۱) نشان داده شده است که شامل دو مرحله است که مرحله اول محاسبات مربوط به توزیع نانولوله‌ی کربنی در زمینه پلیمری است که قبل از محاسبات مربوط به اضافه کردن مواد دارای خواص پیزوالکتریک، انجام شده است. وقتی توزیع نانولوله‌ی کربنی کاملاً بصورت جهت‌گیری تصادفی باشد، آنگاه کامپوزیت حاصل دارای خاصیت همسانگرد خواهد بود و مدول‌های حجمی و برشی آن از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۴]:

$$K = K_m + \frac{c_r(\delta_r - 3K_m\alpha_r)}{3(c_m + c_r\alpha_r)} \quad (۱۵)$$

$$G = G_m + \frac{c_r(\eta_r - 2G_m\beta_r)}{2(c_m + c_r\beta_r)} \quad (۱۶)$$

که K و G مدول حجمی و برشی نانو کامپوزیت و K_m و G_m مدول حجمی و برشی زمینه پلیمری و c_m و c_r کسر حجمی نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری است. مقادیر K_m و G_m به سادگی از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (۱۷)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (۱۸)$$

که E_m و ν_m به ترتیب مدول الاستیک و ضریب پواسون زمینه پلیمری همسانگرد می‌باشند. ضرایب α_r , β_r , δ_r و η_r که در معادلات (۱۵) و (۱۶) استفاده شده اند بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\alpha_r = \frac{3(K_m + G_m) + k_r - l_r}{3(G_m + k_r)} \quad (۱۹)$$

$$\begin{aligned} \beta_r &= \frac{1}{5} \left\{ \frac{4G_m + 2k_r + l_r}{3(G_m + k_r)} + \frac{4G_m}{G_m + p_r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2[G_m(3K_m + G_m) + G_m(3K_m + 7G_m)]}{G_m(3K_m + G_m) + m_r(3K_m + 7G_m)} \right\} \end{aligned} \quad (۲۰)$$

$$\begin{aligned} \delta_r &= \frac{1}{3} \left[n_r + 2l_r \right. \\ &\quad \left. + \frac{(2k_r + l_r)(3K_m + 2G_m - l_r)}{G_m + k_r} \right] \end{aligned} \quad (۲۱)$$

نمایش معادله (۳) در حالت ماتریسی بصورت زیر خواهد شد [۱]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 & 0 & e_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & -k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & -k_2 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

طبق روابط مبتنی بر روش موری-تانaka برای بدست آوردن خواص کامپوزیت با استفاده از خواص اجزاء تشکیل دهنده آن از رابطه زیر استفاده می‌شود [۳۳]:

$$\tilde{\mathbf{C}}^c = \tilde{\mathbf{C}}^m + v_r(\tilde{\mathbf{C}}^r - \tilde{\mathbf{C}}^m)\mathbf{B}$$

که $\tilde{\mathbf{C}}^c$, $\tilde{\mathbf{C}}^r$, $\tilde{\mathbf{C}}^m$ و به ترتیب ماتریس مدول الکتروالاستیک کامپوزیت، زمینه و تقویت‌کننده هستند و v_r کسر حجمی تقویت‌کننده می‌باشد. برای محاسبه مقادیر A و B از روابط زیر استفاده خواهد شد:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}[\nu_m \mathbf{I} + v_r \mathbf{A}]^{-1} \quad (۹)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{I} + \mathbf{P}(\tilde{\mathbf{C}}^m)^{-1}(\tilde{\mathbf{C}}^r - \tilde{\mathbf{C}}^m)]^{-1} \quad (۱۰)$$

در اینجا \mathbf{I} ماتریس همانی، ν_m کسر حجمی زمینه و مقادیر B به عنوان ماتریس غلظت پیزوالکتریک و A به عنوان ماتریس غلظت پیزوالکتریک رقیق شناخته می‌شود [۳۳]. P ماتریس اشبیی است که برای تقویت‌کننده به شکل ذره ای بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۴، ۳۵]:

$$\mathbf{P}_{1111} = \mathbf{P}_{2222} = \mathbf{P}_{3333} = \frac{7 - 5\nu_m}{15(1 - \nu_m)} \quad (۱۱)$$

$$\mathbf{P}_{1122} = \mathbf{P}_{2233} = \mathbf{P}_{3311} = \frac{5\nu_m - 1}{15(1 - \nu_m)} \quad (۱۲)$$

$$\mathbf{P}_{1212} = \mathbf{P}_{2323} = \mathbf{P}_{3131} = \frac{4 - 5\nu_m}{15(1 - \nu_m)} \quad (۱۳)$$

$$\mathbf{P}_{4141} = \mathbf{P}_{4242} = \mathbf{P}_{4343} = \frac{1}{3} \quad (۱۴)$$

که ν_m ضریب پواسون زمینه می‌باشد.

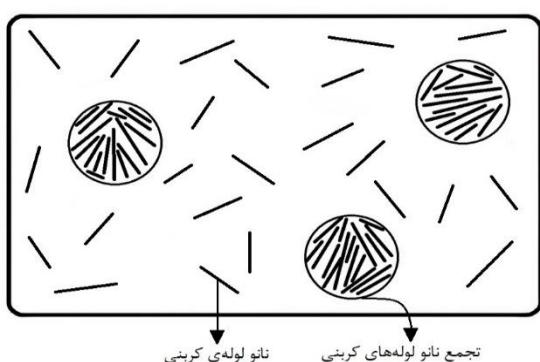
۲- توزیع نانولوله‌ی کربنی در زمینه پلیمر

ذرات پرکننده و زمینه پلیمری ایجاد کند که باعث تقویت خواص مکانیکی زمینه پلیمری می‌شود [۱۳]. با این حال، سفتی خمشی کم نانو لوله‌های کربنی (به دلیل قطر کوچک و مدول الاستیک پایین در جهت شعاعی) و نسبت ابعاد بالای آنها منجر به تجمع آنها در یک ماتریس پلیمری می‌شود [۱۸، ۱۹]. در توزیع خاص فیزیکی و مکانیکی ماده را کم می‌کند [۱۲، ۱۹]. مورفولوژی معمولی کامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی تجمع نانو لوله‌های کربنی را بصورت کاملاً آشکار نشان داده است [۳۶]. این تجمع‌ها توزیع یکنواخت ندارند به طوری که در برخی مناطق غلظت نانو لوله‌ی کربنی کمتر و در برخی مناطق غلظت آن بیشتری است [۱۶، ۱۸]. درک تأثیرات چنین ویژگی‌هایی از طریق مدل سازی محاسباتی و نظری برای طراحی و تجزیه و تحلیل نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی در کاربردهای مختلف حیاتی است [۱۴].

در این بخش از رویکردی میکرومکانیکی برای مدلسازی تاثیر تجمع استفاده خواهیم کرد. برای این کار دو ناحیه که یکی با تمرکز بالای نانو لوله‌ی کربنی و ناحیه دیگر با توزیع پراکنده نانو لوله‌ی کربنی است، در نظر می‌گیریم (شکل ۲). بدیهی است این دو ناحیه دارای خواص متفاوت از هم خواهند بود. محیط‌های متمرکز بصورت کروی فرض می‌شود. با تعریف بالا کل حجم نانو لوله‌های کربنی بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$V_r = V_r^{inc} + V_r^m \quad (۲۵)$$

که V_r^{inc} حجم نانو لوله‌ی کربنی در نواحی با غلظت بالا، حجم نانو لوله‌ی کربنی با توزیع پراکنده در زمینه و V_r حجم کل نانو لوله‌های کربنی است.



شکل ۲ تجمع بعضی از نانو لوله‌های کربنی در زمینه پلیمری و مدلسازی آن با فاز کره‌ای متراکز

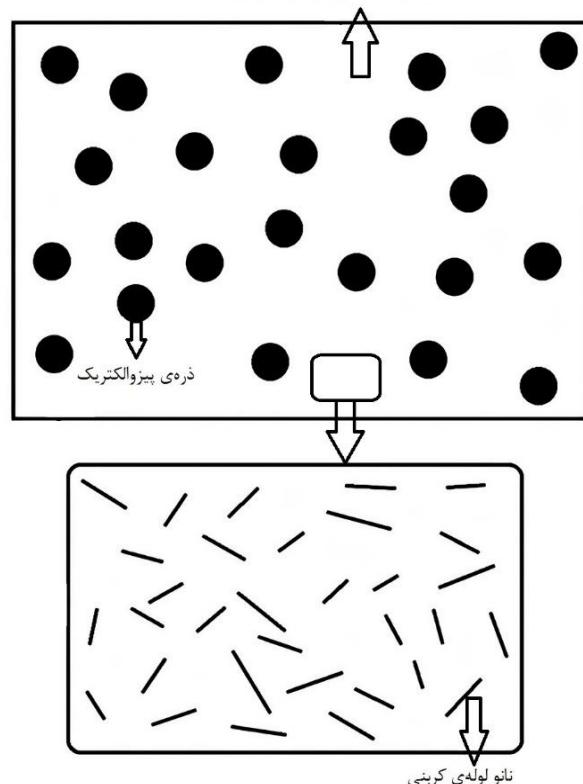
$$\begin{aligned} \eta_r &= \frac{1}{5} \left[\frac{2}{3} (n_r - l_r) + \frac{8G_m p_r}{G_m + p_r} \right. \\ &\quad + \frac{8m_r G_m (3K_m + 4G_m)}{3K_m (m_r + G_m) + G_m (7m_r + G_m)} \\ &\quad \left. + \frac{2(k_r - l_r)(2G_m + l_r)}{3(G_m + k_r)} \right] \end{aligned} \quad (۲۲)$$

که n_r ، m_r و p_r ثوابت الاستیسیته‌ی هیل هستند. در نهایت مدول الاستیسیته و ضریب پواسون موثر نانوکامپوزیت از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$E = \frac{9KG}{3K + G}$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G}$$

زمینه‌ی پلیمری حاوی نانو لوله‌ی کربنی



شکل ۱ توزیع نانو لوله‌های کربنی در زمینه‌ی پلیمری و اضافه کردن ذرات پیزوالکتریک به آن

برای به دست آوردن خواص مورد نظر برای یک کامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی، ذرات نانو باید به طور یکنواخت در زمینه پراکنده شوند [۱۹]. پراکنده‌گی یکنواخت ذرات نانو با زمینه‌ی پلیمری میتواند سطح مشترک بسیار بزرگی بین نانو

$$G_{out} = G_m + \frac{c_r(1-\zeta)(\eta_r - 2G_m\beta_r)}{2[1-\xi - c_r(1-\zeta) + c_r(1-\zeta)\beta_r]} \quad (34)$$

ماتریس اشلی براي کامپوزیت با تقویت کننده‌هایی کروی شکل مانند بخش ۱-۲ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{1111} = S_{2222} = S_{3333} = \frac{7 - 5\nu_{out}}{15(1 - \nu_{out})} \quad (35)$$

$$S_{1122} = S_{2233} = S_{3311} = \frac{5\nu_{out} - 1}{15(1 - \nu_{out})} \quad (36)$$

$$S_{1212} = S_{2323} = S_{3131} = \frac{4 - 5\nu_{out}}{15(1 - \nu_{out})} \quad (37)$$

که ν_{out} ضریب پواسون قسمت خارجی کره‌ها است که به سادگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu_{out} = \frac{3K_{out} - 2G_{out}}{6K_{out} + 2G_{out}} \quad (38)$$

سرانجام مدول حجمی و برشی نانو کامپوزیت با در نظر گرفتن تأثیر تجمع نانو لوله‌ی کربنی توسط روابط زیر بدست می‌آيند:

$$K = K_{out} \left[1 + \frac{\xi \left(\frac{K_{in}}{K_{out}} - 1 \right)}{1 + \left(\frac{1 + \nu_{out}}{3(1 - \nu_{out})} \right) (1 - \xi) \left(\frac{K_{in}}{K_{out}} - 1 \right)} \right] \quad (39)$$

$$G = G_{out} \left[1 + \frac{\xi \left(\frac{G_{in}}{G_{out}} - 1 \right)}{1 + \left(\frac{2(4 - 5\nu_{out})}{15(1 - \nu_{out})} \right) (1 - \xi) \left(\frac{G_{in}}{G_{out}} - 1 \right)} \right] \quad (40)$$

۳- نتایج و بحث

در ابتدای این بخش به بررسی اعتبارسنجی مدلسازی این مقاله پرداخته می‌شود. برای این منظور در دو مرحله محاسبات اعتبارسنجی خواهد شد. مرحله اول اعتبارسنجی، مربوط به توزیع نانو لوله‌های کربنی در پلیمر خواهد بود. برای انجام اعتبارسنجی از خواص پلی استایرن^۱ استفاده می‌شود که مدول الاستیک آن برابر $1/9$ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن برابر $0/3$ در نظر گفته می‌شود و همچنین خواص نانو لوله‌ی کربنی توسط ثوابت الاستیسیته‌ی هیل بصورت n_r برابر 450 گیگاپاسکال، k_r برابر 30 گیگاپاسکال، m_r و p_r برابر 1 گیگاپاسکال و r برابر 10 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۱۸]. جهت گیری نانو لوله‌های کربنی به صورت تصادفی است و به همین دلیل بعد

دو پارامتر ξ و ζ برای توصیف تجمع بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\xi = \frac{V_{inc}}{V} \quad (26)$$

$$\zeta = \frac{V_r^{inc}}{V_r} \quad (27)$$

که V_{inc} حجم نواحی کروی با غلظت بالا و V حجم کل نانو کامپوزیت است. وقتی ξ برابر 1 باشد یعنی نانو لوله‌های کربنی بصورت یکنواخت در زمینه توزیع شده‌اند و وقتی ζ برابر 1 باشد یعنی همه‌ی نانو لوله‌های کربنی بصورت متمرکز در نواحی کروی خواهند بود. کسر حجمی متوسط نانو لوله‌ی کربنی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_r = \frac{V_r}{V} \quad (28)$$

کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی در داخل قسمت‌های متمرکز کره‌ای و در زمینه به ترتیب توسط روابط زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{V_r^{inc}}{V_{inc}} = \frac{c_r \zeta}{\xi} \quad (29)$$

$$\frac{V_r^m}{V - V_{inc}} = \frac{c_r(1 - \zeta)}{1 - \xi} \quad (30)$$

کامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌ی کربنی به عنوان یک سیستم متشکل از اجزای کروی شکل که در یک زمینه هیبریدی تعییه شده‌اند، در نظر گرفته شده است. هر دو جز زمینه و قسمت‌های کروی حاوی نانو لوله‌ی کربنی هستند. ابتدا سفتی الاستیک مؤثر اجزای کروی و زمینه تخمین زده است و سپس ویژگی کلی کامپوزیت محاسبه می‌شود. با استفاده از روش موری-تاناکا و با همان فرض جهت گیری تصادفی و همسانگرد عرضی بودن نانو لوله‌های کربنی مدول حجمی و برشی را برای هر دو قسمت داخل و بیرون کره‌ها محاسبه می‌کنیم که بصورت خلاصه توسط روابط زیر بیان می‌شود [۱۸].

$$K_{in} = K_m + \frac{(\delta_r - 3K_m\alpha_r)c_r\zeta}{3(\xi - c_r\zeta + c_r\zeta\alpha_r)} \quad (31)$$

$$K_{out} = K_m + \frac{c_r(\delta_r - 3K_m\alpha_r)(1 - \zeta)}{3[1 - \xi - c_r(1 - \zeta) + c_r(1 - \zeta)\alpha_r]} \quad (32)$$

$$G_{in} = G_m + \frac{c_r\zeta(\eta_r - 2G_m\beta_r)}{2(\xi - c_r\zeta + c_r\zeta\beta_r)} \quad (33)$$

^۱ polystyrene

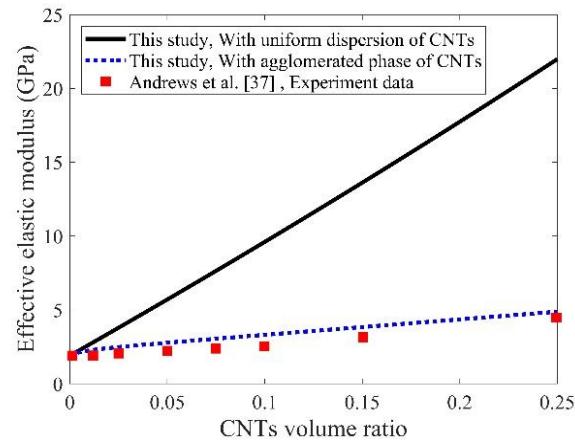
است که در کسر حجمی $0/5$ اتفاق افتاده است. دلیل این خطا می‌تواند در فرآیند استخراج خواص ماده کامپوزیتی به روش عددی و تحلیلی باشد.

جدول ۱ خواص الاستیک و پیزوالکتریک پلی آمید و PZT-7A [۱]

PZT-7A	ذرات	زمینه‌ی پلی آمید	خاصیت
۱۴۸		۸/۱	C_{11} (GPa)
۷۶/۲		۵/۴	C_{12} (GPa)
۷۴/۲		۵/۴	C_{13} (GPa)
۱۴۸		۸/۱	C_{22} (GPa)
۷۴/۲		۵/۴	C_{23} (GPa)
۱۳۱		۸/۱	C_{33} (GPa)
۲۵/۴		۱/۴	C_{44} (GPa)
۲۵/۴		۱/۴	C_{55} (GPa)
۳۵/۹		۱/۴	C_{55} (GPa)
۹/۲		.	e_{15} (C/m ²)
-۲/۱		.	e_{31} (C/m ²)
-۲/۱		.	e_{32} (C/m ²)
۹/۵		.	e_{33} (C/m ²)

در نمودارهای شکل ۵ تأثیر افزودن نانو لوله‌ی کربنی بر خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت‌های پیزوالکتریک مورد بحث قرار گرفته است. نمودارهای (۵-الف) تا (۵-ت) مدول الاستیک و برشی کامپوزیت هیبریدی با زمینه‌ی پلی آمید را در دو حالت طولی و عرضی بر حسب کسر حجمی ذرات تقویت کننده‌ی پیزوالکتریک از جنس PZT-7A نشان می‌دهند. کسر حجمی ذرات از $0/5$ تا $۰/۰/۵$ در نظر گرفته شده است. نتایج برای چهار کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی $0/۰/۰$ ، $۰/۰/۱$ ، $۰/۰/۳$ و $۰/۰/۵$ ٪ استخراج شده است. همانطور که از نمودار می‌توان دریافت افزودن نانو لوله‌های کربنی به کامپوزیت موجب افزایش مدول الاستیک و برشی در هر دو حالت طولی و عرضی شده است که از دلایل این افزایش می‌توان به زیاد بودن مدول‌های نانو لوله‌ی کربنی نسبت به زمینه و همچنین سطح تماس زیاد بین نانو لوله‌های کربنی و زمینه اشاره کرد. به عنوان مثال مدول الاستیک طولی کامپوزیت هیبریدی در نمودار شکل ۵-الف در کسر حجمی $۰/۰/۲$ ذرات تقویت کننده، بدون اضافه کردن ذرات نانو حدود $۵/۶$

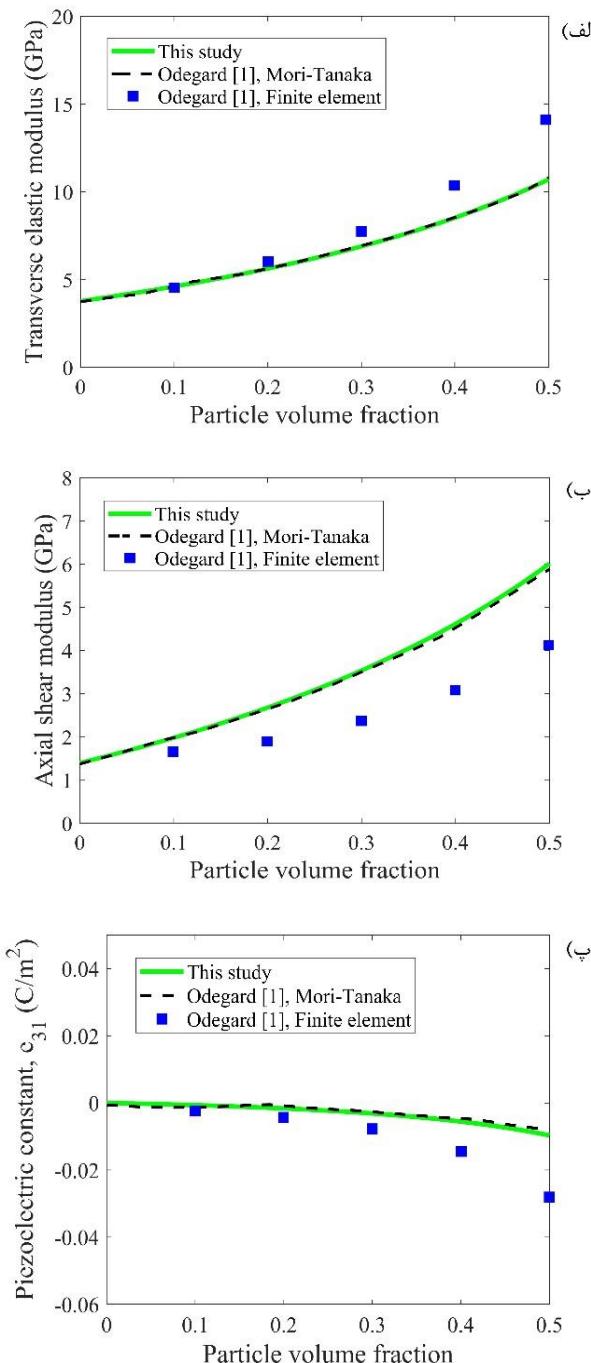
از پخش شدن در زمینه، خواص پلیمر در همه‌ی جهت‌ها یکسان افزایش می‌یابد و فقط یک مدول الاستیک موثر تعریف می‌شود. مدول موثر الاستیک بر حسب کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی در دو حالت توزیع یکنواخت و توزیع همراه با تجمع نانو لوله‌های کربنی در شکل (۳) رسم شده است. همچنین داده‌های مربوط به آزمایش اندروز و همکاران [۳۷] در این شکل نشان داده شده است. از این نمودار نتیجه گیری می‌شود که در حالت پخش یکنواخت مدول موثر بیشتر از نتایج آزمایش است اما نتایج مربوط به محاسبات همراه با تجمع که با ζ برابر $۰/۹$ و ζ برابر $۰/۱$ انجام شده است به خوبی با نتایج داده‌های آزمایش تطابق دارد.



شکل ۳ مدول الاستیک موثر در دو حالت توزیع یکنواخت و دارای تجمع نانو لوله‌های کربنی و مقایسه با داده‌های آزمایش [۳۷]

مرحله‌ی دوم اعتبارسنجی که مربوط به محاسبات مدلسازی میکرومکانیکی موری-تاناكا برای کامپوزیت پیزوالکتریک است در نمودارهای (۴) نشان داده شده است. محاسبات این مقاله برای مدول الاستیک عرضی، مدول برشی طولی و ثابت پیزوالکتریک e_{31} با نتایج محاسبات اجزای محدود و موری-تاناكای مقاله اودگارد و همکاران [۱] مقایسه شده است. زمینه از جنس پلی آمید و ذرات تقویت کننده‌ی پیزوالکتریک از جنس تیتانات زیرکونات سرب یا همان PZT-7A در نظر گرفته شد که خواص آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج به خوبی منطبق بر محاسبات روش موری-تاناكای مقاله اودگارد و همکاران است و همچنین تا حد قابل قبولی با نتایج روش اجزای محدود تطابق دارد. در کسر حجمی‌های بالا مقداری تفاوت در نتایج دیده می‌شود به عنوان مثال حداکثر خطا در بخش مدول الاستیک عرضی ۳۱ درصد

از پخش نانو ذرات با درصد نانو لوله‌ی کربنی 3% با هم مقایسه شده است. که حالت اول همان پخش یکنواخت و بدون تجمع است و حالت دوم شامل فاز‌های کروی از تجمع نانو لوله‌های کربنی است و برای مدلسازی آن ζ برابر 0.9 و ξ برابر 0.1 در نظر گرفته شده است.

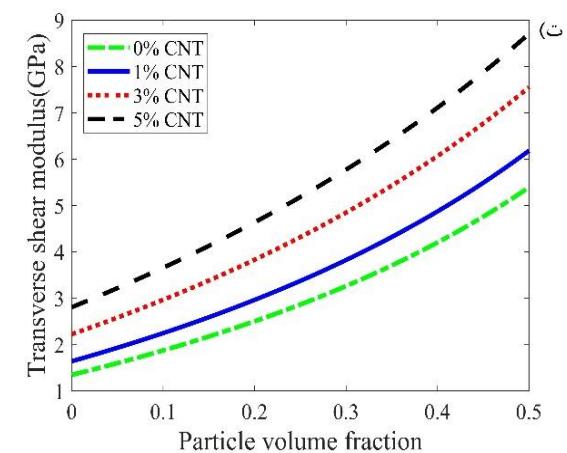
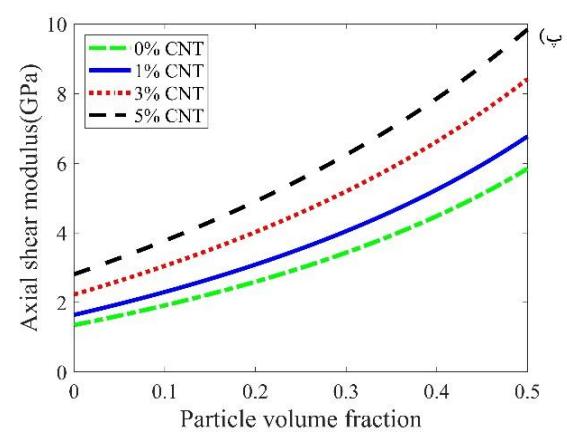
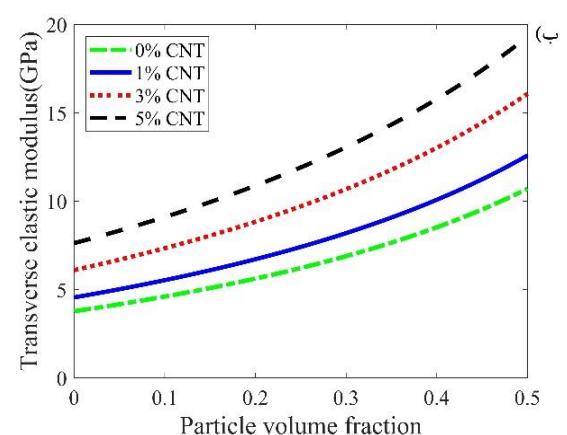
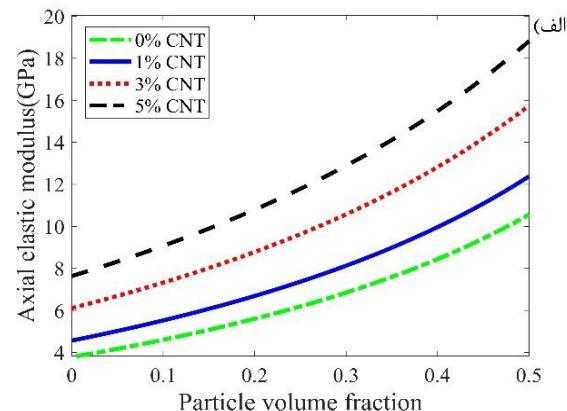
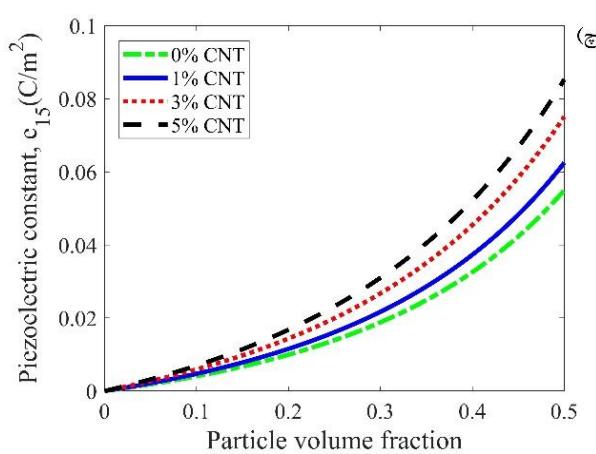
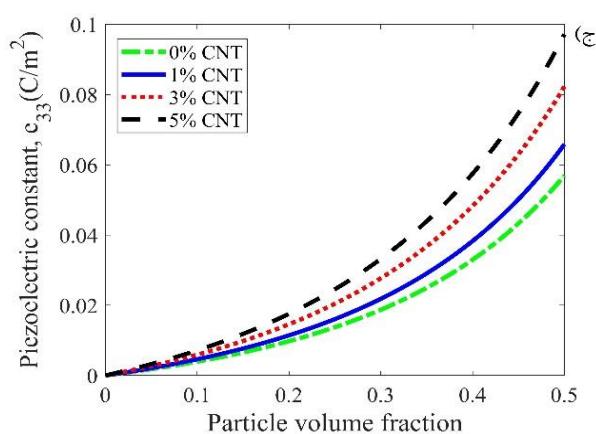
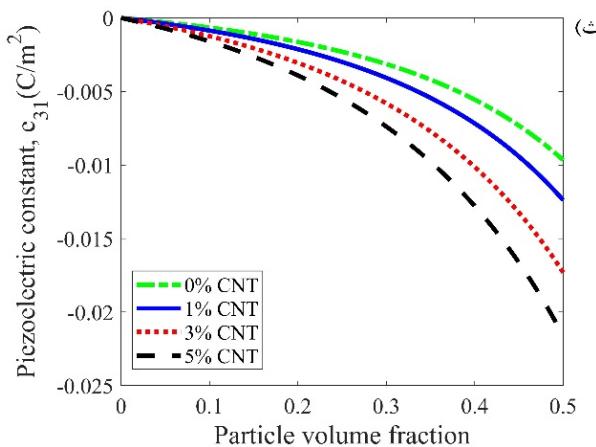


نمودار ۴ تغییرات (الف) مدول الاستیک عرضی ب) مدول برشی طولی پ) ثابت پیزوالکتریک برحسب کسر حجمی ذرات تقویت کننده و مقایسه آن با محاسبات به روش‌های موری-تانaka و اجزای محدود اودگارد [۱]

گیگاپاسکال است، اما با افزودن 5% نانو لوله‌ی کربنی این عدد به حدود $10/8$ گیگاپاسکال می‌رسد. از این مثال عددی متوجه می‌شویم که افزودن 5% نانو لوله‌ی کربنی به کامپوزیت باعث افزایش حدود 93 درصدی مدول الاستیک می‌شود. در حالت پخش یکنواخت نانو لوله‌ی کربنی کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی افزایش بیشتر داشته باشد، باعث افزایش بیشتر مدول الاستیک و برشی خواهد شد. همچنین از این نمودارها به سادگی قابل فهم است که با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک مدول الاستیک و برشی در هر دو حالت طولی و عرضی افزایش می‌یابد، چون با توجه به داده‌های آورده شده در جدول (۱) مشخص است که خواص مکانیکی ذرات تقویت کننده بیشتر از زمینه می‌باشد.

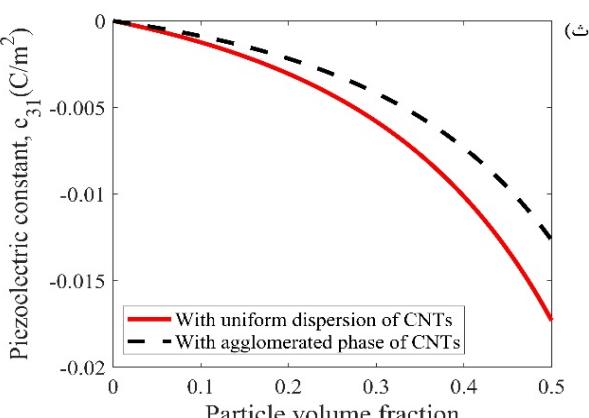
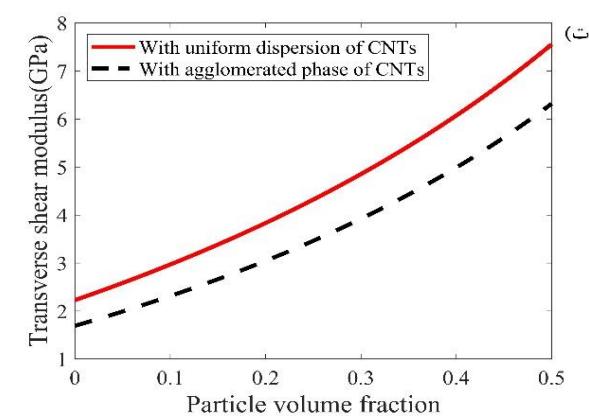
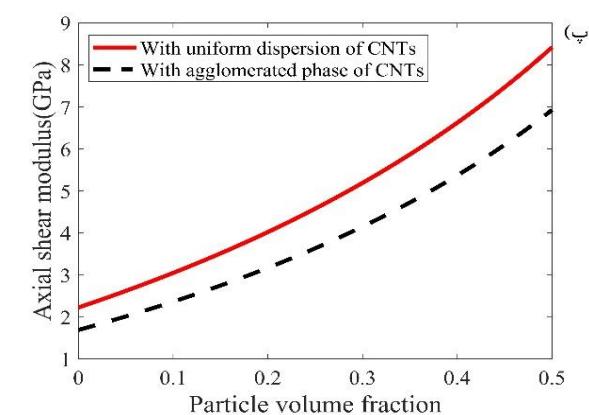
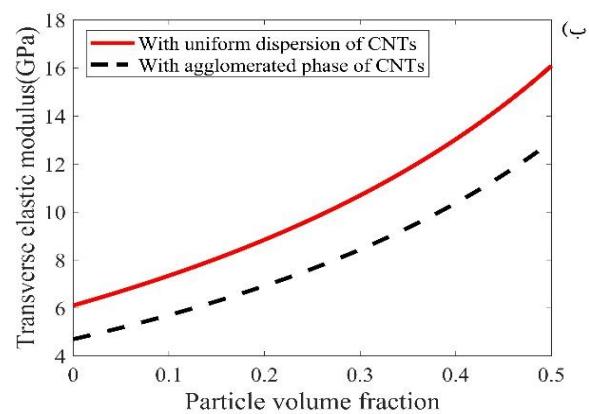
نمودارهای (۵-ث) تا (۵-ج) ثابت پیزوالکتریک e_{33} و e_{15} این کامپوزیت هیبریدی را برحسب کسر حجمی ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک نشان می‌دهند. باز هم کسر حجمی ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک از $0/0/5$ تا $0/0/0/5$ در نظر گرفته شده است و همچنین نتایج برای چهار کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی $0/0/1$ ، $0/0/3$ و $0/0/5$ % استخراج شده است. در هر سه نمودار مشاهده می‌شود که افزودن نانو لوله‌ی کربنی موجب افزایش مقدار ثابت پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی شده است و هر چقدر کسر حجمی نانو لوله‌ی اضافه شده، بیشتر باشد، افزایش ثابت پیزوالکتریک نیز بیشتر خواهد بود، چون با افزودن نانو لوله‌ی کربنی خواص مکانیکی زمینه بهبود می‌یابد و با توجه به کوبیل بودن معادلات این افزایش خواص مکانیکی سبب افزایش خواص پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی با افزودن ذرات پیزوالکتریک خواهد شد. به عنوان مثال در نمودار (۵-ث) در کسر حجمی $0/0/4$ از ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک و بدون اضافه کردن ذرات نانو، ثابت پیزوالکتریک e_{31} برابر $0/0/0/57$ کولن بر متر مربع است، اما با افزودن 5% نانو لوله‌ی کربنی به کامپوزیت این عدد به $0/0/0/130$ کولن بر متر مربع می‌رسد، که از نظر مقدار، افزایش حدود 128% را نشان می‌دهد. همچنین در هر سه نمودار مشخص است که مقادیر ثابت پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی با افزایش کسر حجمی تقویت کننده پیزوالکتریک افزایش می‌یابد که امری بدیهی است، چون تا قبل از افزودن ذرات پیزوالکتریک مشخص است که تمام ثابت پیزوالکتریک باید صفر باشد و با افزایش کسر حجمی ماده پیزوالکتریک به تدریج به خواص پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی افزوده شد.

در نمودارهای (۶) تاثیر پراکندگی و تجمع نانو لوله‌های کربنی بر خواص الاستیک و پیزوالکتریک این کامپوزیت هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دو حالت



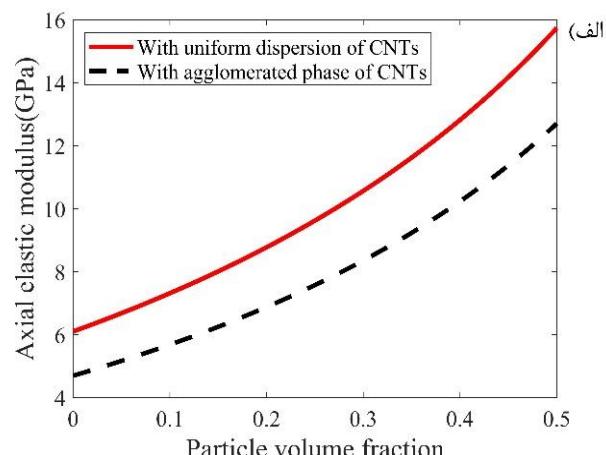
نمودار ۵ تأثیر کسر حجمی نانو لوله‌ی کربنی روی (الف) مدول الاستیک طولی (ب) مدول الاستیک عرضی (پ) مدول برشی طولی (ت) مدول برشی عرضی (ث) ثابت پیزوالکتریک e_{31} (ج) ثابت پیزوالکتریک e_{33} (چ) ثابت پیزوالکتریک e_{15}

نمودارهای (۶-الف) تا (۶-ت) مدول الاستیک و برشی کامپوزیت هیبریدی را در دو حالت طولی و عرضی بر حسب کسر حجمی



ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک نشان می‌دهند. کسر حجمی ذرات تقویت کننده از $0\text{--}0.5$ در نظر گرفته شده است. این نمودارها به خوبی نشان می‌دهند که با تجمع نانو لوله‌های کربنی مدول الاستیک و برشی کامپوزیت هیبریدی کاهش می‌یابند، دلیل اصلی این کاهش خواص، کمتر شدن سطح تماس نانو لوله‌ی کربنی با زمینه پلیمری است. به عنوان مثال در نمودار (الف) در کسر حجمی 0.2 ذرات تقویت کننده، مدول الاستیک طولی از عدد $8/8$ گیگاپاسکل در حالت پخش یکنواخت به عدد $6/9$ گیگاپاسکل در حالت همراه با تجمع رسیده است که کاهش حدود 22% را نشان می‌دهد.

نمودارهای (ج) تا (ث) ثابت پیزوالکتریک e_{33} ، e_{31} و e_{15} کامپوزیت هیبریدی را بر حسب کسر حجمی ذرات تقویت کننده پیزوالکتریک نشان می‌دهند. کسر حجمی ذرات تقویت کننده از $0\text{--}0.5$ در نظر گرفته شده است. در این نمودارها نیز به خوبی تاثیر مخرب تجمع نانو ذرات مشهود است که باعث کاهش مقدار ثابت پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی شده است. چون با افزایش تجمع نانو لوله‌های کربنی خواص مکانیکی زمینه کاهش می‌یابد و با توجه به کوپل بودن معادلات این کاهش خواص مکانیکی سبب کاهش خواص پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی خواهد شد. به عنوان مثال عددی در نمودار (ج) ثابت e_{31} در کسر حجمی 0.4 ذرات تقویت کننده، از عدد $10/0.007$ کولن بر متر مربع به عدد $10/0.007$ کولن بر متر مربع رسیده است که از نظر مقدار با کاهش حدود 30% همراه بوده است.



کربنی باعث افت مدول الاستیک و برشی و همچنین باعث کاهش مقادیر ثوابت پیزوالکتریک می‌شود.

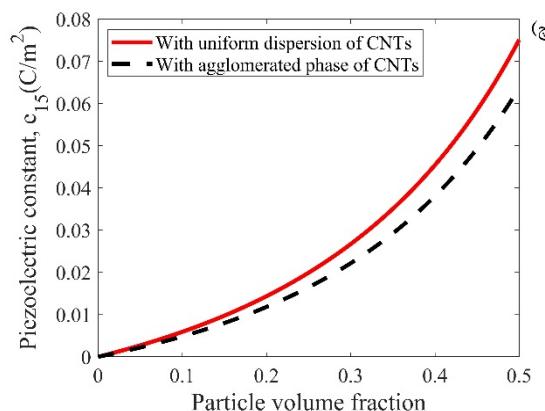
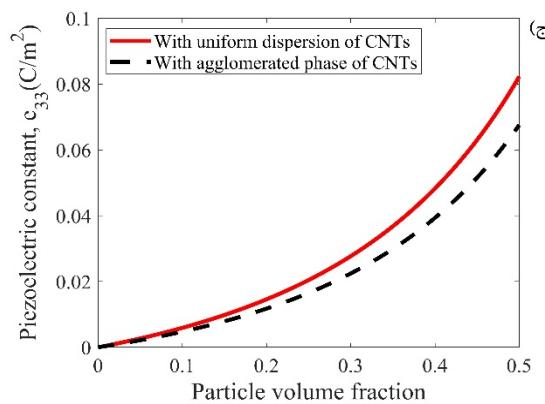
از این پژوهش نتیجه گیری می‌شود که با افزودن ذرات نانو مانند نانو لوله‌های کربنی به کامپوزیت پیزوالکتریک می‌توان خواص پیزوالکتریک را افزایش داد و با این افزایش در خواص و ثوابت پیزوالکتریک می‌توان در ساخت حسگرها و ابزارهای تبدیل انرژی استفاده نمود. بیشترین تاثیر در افزایش خواص الاستیک و پیزوالکتریک زمانی حاصل می‌شود که نانو لوله‌ها کاملاً یکنواخت در زمینه‌ی پلیمری پخش شده باشند و دارای بیشترین سطح تماس با پلیمر باشند.

روش میکرومکانیکی موری-تاناکا می‌تواند روش مناسبی برای تعیین خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی باشد حتی زمانی که یکی از مواد بکار رفته در کامپوزیت در حالت نانو باشد با داشتن خواص موثر آن می‌توان از این روش با دقت خوبی استفاده نمود.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علایم انگلیسی

A	ماتریس غلظت پیزوالکتریک رقیق
B	ماتریس غلظت پیزوالکتریک
C_{ijkl}	تانسور سفتی الاستیک
\tilde{C}	ماتریس مدول الکتروالاستیک
c	کسر حجمی
D_i	بردار جابجایی الکتریکی
E	مدول الاستیک
E_i	بردار میدان الکتریکی
e_{ijk}	تانسور پیزوالکتریک
G	مدول برشی
I	ماتریس همانی
K	مدول حجمی
k	ثابت الاستیسیته‌ی هیل
k_{ij}	تانسور گذردده‌ی
l	ثابت الاستیسیته‌ی هیل
m	ثابت الاستیسیته‌ی هیل
n	ثابت الاستیسیته‌ی هیل
P	ماتریس اشلبی برای محاسبه‌ی اضافه شدن ذرات پیزوالکتریک
p	ثابت الاستیسیته‌ی هیل
S	ماتریس اشلبی برای محاسبه‌ی تجمع نانو لوله‌های کربنی
V	حجم محیط‌های تجمع و پخش نانو لوله‌ی کربنی
v	کسر حجمی
Z	بردار ساخته شده از تانسور کرنش و بردار میدان الکتریکی
علایم یونانی	
α	پارامتری جهت ساده سازی معادلات
β	پارامتری جهت ساده سازی معادلات
γ	پارامتری جهت ساده سازی معادلات
δ	پارامتری جهت ساده سازی معادلات



نمودار ۶ تاثیر نحوه توزیع نانو لوله‌ی کربنی روی (الف) مدول الاستیک طولی (ب) مدول الاستیک عرضی (پ) مدول برشی طولی (ت) مدول برشی عرضی (ث) ثابت پیزوالکتریک e_{31} (ج) ثابت پیزوالکتریک e_{33} (ج) ثابت پیزوالکتریک e_{15}

۴- نتیجه گیری

از مدل میکرومکانیکی موری-تاناکا برای بدست آوردن خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی استفاده شد. این کامپوزیت هیبریدی شامل زمینه‌ی پلی‌آمید و تقویت کننده‌ی پیزوالکتریک PZT-7A بود. برای تقویت خواص الاستیک و پیزوالکتریک از نانو لوله‌های کربنی با کسر حجمی حداقل تا ۰.۵٪ استفاده شد. ابتدا نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات قبلی اعتبارسنجی شد. افزودن نانو لوله‌های کربنی تاثیر زیادی در بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقادیر ثوابت پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی نشان داد. در حالت پخش یکنواخت نانو لوله هرچقدر درصد نانو لوله‌های کربنی افزایش یابد باعث بهبود خواص الاستیک و پیزوالکتریک کامپوزیت هیبریدی می‌شود. در ادامه تاثیر پخش نانو لوله‌های کربنی شامل توزیع یکنواخت و تجمع آن‌ها بررسی شد. این بررسی نشان داد تجمع نانو لوله‌های

- World Journal*, Vol. 2014, Article ID 485205, pp. 1-7, (2014). (in Persian)
- [7] Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol. 354(6348), pp. 56-58, (1991).
- [8] Mohd Nurazzi, N., Asyraf, M.M., Khalina, A., Abdullah, N., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., and Sapuan, S.M., Fabrication, functionalization, and application of carbon nanotube-reinforced polymer composite: An overview, *Polymers*, Vol. 13(7), pp. 1047, (2021).
- [9] Pan, J., Bian, L., Zhao, H., and Zhao, Y., A new micromechanics model and effective elastic modulus of nanotube reinforced composites, *Computational Materials Science*, Vol. 113, pp. 21-26, (2016).
- [10] Harris, P.J., Carbon nanotube composites, *International Materials Reviews*, Vol. 49(1), pp. 31-43, (2004).
- [11] Haghghi, S., Ansari, R., and Keramati, Y., A molecular dynamics study on the vibrational behavior of perfect and defective hybrid carbon boron-nitride heteronanotubes, *Diamond and Related Materials*, Vol. 125, Article ID 108990, (2022).
- [12] Rubel, R.I., Ali, M.H., Jafor, M.A., and Alam, M.M., Carbon nanotubes agglomeration in reinforced composites: A review, *AIMS Materials Science*, Vol. 6(5), pp. 756-780, (2019).
- [13] Bal, S., Samal, S.S., Carbon nanotube reinforced polymer composites - a state of the art, *Bulletin of Materials Science*, Vol. 30(4), pp. 379-386, (2007).
- [14] Zhu, F., Park, C., and Jin Yun, G., An extended Mori-Tanaka micromechanics model for wavy CNT nanocomposites with interface damage, *Mechanics of advanced Materials and Structures*, Vol. 28(3), pp. 295-307, (2021).
- [15] Salvetat, J.P., Bonard, J.M., Thomson, N.H., Kulik, A.J., Forro, L., Benoit, W., and Zuppiroli, L., Mechanical properties of carbon nanotubes, *Applied Physics A*, Vol. 69(3), pp. 255-260, (1999).
- [16] Pan, J., and Bian, L., Influence of agglomeration parameters on carbon nanotube composites, *Acta Mechanica*, Vol. 228(6), pp. 2207-2217, (2017).
- [17] Ebrahimi, F., and Dabbagh, A., An analytical solution for static stability of multi-scale hybrid nanocomposite plates, *Engineering with Computers*, Vol. 37(1), pp. 545-559. (2021).
- [18] Shi, D.L., Feng, X.Q., Huang, Y.Y., Hwang, K.C., and Gao, H., The effect of nanotube waviness and agglomeration on the elastic property of carbon nanotube-reinforced composites, *Journal of*

ε_{ij}	تансور کرنش
ζ	پارامتری برای توصیف تجمع
η	ضریب جهت ساده سازی معادلات
v	ضریب پواسون
ξ	پارامتری برای توصیف تجمع
Σ	بردار ساخته شده توسط تansور تنش و بردار جابجایی الکتریکی
σ_{ij}	تansور تنش
زیرنویس ها	
c	کامپوزیت
m	زمینه
r	تقویت کننده
in	داخل
out	بیرون
inc	مربوط به نواحی متتمرکز نانو لوله‌ی کربنی
بالانویس ها	
c	شرایط مرتع
m	زمینه
r	تقویت کننده
inc	مربوط به نواحی متتمرکز نانو لوله‌ی کربنی

۶- مراجع

- [1] Odegard, G.M., Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites, *Acta Materialia*, Vol. 52(18), pp. 5315-5330, (2004).
- [2] Dunn, M.L., and Taya, M., Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 30(2), pp. 161-175, (1993).
- [3] Lin, C.H., and Muliana, A., Micromechanics modeling of hysteretic responses of piezoelectric composites, In *Creep and fatigue in polymer matrix composites*, Woodhead Publishing, pp. 121-155, (2019).
- [4] Mishra, N., Das, K., and Mori-Tanaka, A., based micromechanical model for predicting the effective electroelastic properties of orthotropic piezoelectric composites with spherical inclusions, *SN Applied Sciences*, Vol. 2(7), 1-14, (2020).
- [5] Zhou, Z., Ni, Y., Zhu, S., Tong, Z., Sun, J., and Xu, X. An accurate and straightforward approach to thermo-electro-mechanical vibration of piezoelectric fiber-reinforced composite cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 207, pp. 292-303. (2019).
- [6] Moghri, M., Madic, M., Omidi, M., and Farahnakian, M., Surface roughness optimization of polyamide-6/nanoclay nanocomposites using artificial neural network: genetic algorithm approach, *The Scientific*

- [28] Mori, T., Tanaka, K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metallurgica*, Vol. 21(5), pp. 571-574, (1973).
- [29] Tassi, N., Bakkali, A., Fakri, N., Azrar, L., and Aljinaidi, A., Well conditioned mathematical modeling for homogenization of thermo-electro-mechanical behaviors of piezoelectric composites, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 99, pp. 276-293, (2021).
- [30] Quinsaat, J.E.Q., de Wild, T., Nüesch, F.A., Damjanovic, D., Krämer, R., Schürch, G., and Opris, D. M., Stretchable piezoelectric elastic composites for sensors and energy generators, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 198, Article ID 108211, (2020).
- [31] Hooper, T.E., Roscow, J.I., Mathieson, A., Khanbareh, H., Goetzee-Barral, A.J., and Bell, A.J., High voltage coefficient piezoelectric materials and their applications, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 41(13), pp. 6115-6129, (2021).
- [32] Della, C.N., and Shu, D., The performance of 1–3 piezoelectric composites with a porous non-piezoelectric matrix, *Acta Materialia*, Vol. 56(4), pp. 754-761, (2008).
- [33] Pakam, N., and Arockiarajan, A., An analytical model for predicting the effective properties of magneto-electro-elastic (MEE) composites, *Computational Materials Science*, Vol. 65, pp. 19-28, (2012).
- [34] Dunn, M.L., Taya, M., An analysis of piezoelectric composite materials containing ellipsoidal inhomogeneities, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 443(1918), pp. 265-287, (1993).
- [35] Li, K., Gao, X.L., and Roy, A.K., Micromechanical modeling of viscoelastic properties of carbon nanotube-reinforced polymer composites, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 13(4), pp. 317-328, (2006).
- [36] Prashantha, K., Soulestin, J., Lacrampe, M.F., Krawczak, P., Dupin, G., and Claes, M., Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties, *Composites Science and Technology*, Vol. 69(11-12), pp. 1756-1763, (2009).
- [37] Andrews, R., Jacques, D., Minot, M., and Rantell, T., Fabrication of carbon multiwall nanotube/polymer composites by shear mixing, *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 287(6), pp. 395-403, (2002).
- [28] Mori, T., Tanaka, K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metallurgica*, Vol. 21(5), pp. 571-574, (2004).
- [29] Bisheh, H., Rabczuk, T., Wu, N., Effects of nanotube agglomeration on wave dynamics of carbon nanotube-reinforced piezocomposite cylindrical shells, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 187, Article ID 107739, (2020).
- [30] Haghgoo, M., Ansari, R., and Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Prediction of electrical conductivity of carbon fiber-carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 167, pp. 728-735, (2019).
- [31] Hosseinpour, K., Ghasemi, A.R., Agglomeration and aspect ratio effects on the long-term creep of carbon nanotubes/fiber/polymer composite cylindrical shells, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 23(4), pp. 1272-1291, (2021).
- [32] Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Ansari, R., and Darvizeh, A., Multi-stage micromechanical modeling of effective elastic properties of carbon fiber/carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 26(24), pp. 2047-2061, (2019).
- [33] Godara, S.S., Mahato, P.K., Effect of interphase between CNT and polyimide on the elastic and piezoelectric properties of hybrid smart nanocomposites, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 21, pp. 1144-1148, (2020).
- [34] Hasanzadeh, M., Ansari, R., Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Evaluation of effective properties of piezoelectric hybrid composites containing carbon nanotubes, *Mechanics of Materials*, Vol. 129, pp. 63-79, (2019).
- [35] Ansari, R., Hassanzadeh, M. K., Effects of regular and random distribution of silica nanoparticles on the thermo-elastic and viscoelastic properties of polymer nanocomposites-Micromechanics-based analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15(1), pp. 99-107, (2015). (in Persian ﺖاریخی)
- [36] Ansari Khalkhali, R., Hassanzadeh Aghdam, M.K., Mashkor, A., Study on the percolation behavior of the mechanical properties of nanoparticle reinforced polymer nanocomposites using three-dimensional micromechanical modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15(6), pp. 376-382, (2015). (in Persian ﺖاریخی)
- [37] Li, Z., Ye, J., Liu, L., Cai, H., He, W., Cai, G., and Wang, Y., Evaluation of piezoelectric and mechanical properties of the piezoelectric composites with local damages, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 29(23), pp. 3429-3446. (2022).

مقایسه‌ی توان استحصال شده در دو سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی با فنریت‌های خطی و غیرخطی

چکیده: برداشت انرژی از انرژی اتلاف شده در محیط به منظور راه اندازی ادوات الکترونیکی با توان پایین، یکی از روش‌های رایج برای به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. هدف اصلی از این فناوری، فراهم کردن منابع انرژی الکتریکی در نقاط دور از دسترس و همچنین شارژ کردن وسایل ذخیره‌ی انرژی از جمله خازن و باتری می‌باشد. مطالعه حاضر به مقایسه‌ی توان استحصال شده از دو سامانه برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی با فنریت‌های خطی و غیرخطی (در دو حالت شبیه سازی در نرم افزار کامسول و کارهای آزمایشگاهی) که با استفاده از حرکت اعضای بدن انسان مورد ارتعاش قرار می‌گیرد، می‌بردازد. از نوآوری این پژوهش می‌توان به استفاده از فنریت به کار رفته در سامانه برداشت انرژی، که از یک سو دارای فنریت خطی و از سوی دیگر تحت تاثیر فنریت غیر خطی قرار دارد و همچنین صحت سنجی نتایج شبیه سازی با استفاده از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده، اشاره نمود.

واژه‌های راهنمایی: انرژی‌های تجدیدپذیر، سامانه برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی، ادوات الکترونیکی، حرکت اعضای بدن انسان، فنریت غیرخطی

علی ریزه وندی
دانش آموخته کارشناسی ارشد

محمد رضا ذاکر زاده*
دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه فنی، دانشگاه تهران،
تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

Ali Rizehvandi
M.Sc.

Mohammad Reza
Zakerzadeh*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, College of
Engineering, University
of Tehran, Tehran

Comparing the harvested power in two electromagnetic energy harvesting systems with linear and non-linear springs

Abstract: Energy harvesting from wasted energy in the environment in order to run low-power electronic devices is one of the common methods to use renewable energy. The main purpose of this technology is to provide sources of electrical energy in remote places and also to charge energy storage devices such as capacitors and batteries. The present study compares the harvested power from two electromagnetic energy harvesting systems with linear and non-linear spring (in two condition: COMSOL software and experimental results) which are vibrated by the human motion

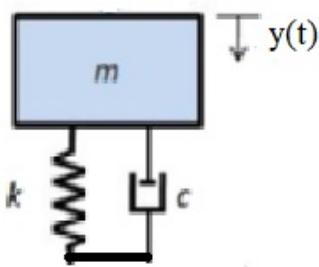
The innovation of this research is the spring that use in the energy harvesting system, which has linear spring on the one hand and is affected by non-linear spring on the other hand, as well as the validation of the simulation results using the design experimental system.

Keywords: Renewable energies, Electromagnetic energy harvesting system, Electronic devices, Human motion, Nonlinear spring

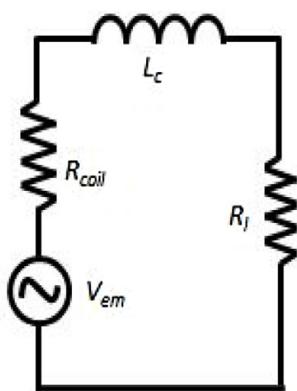
۱- مقدمه

بود، برای برداشت انرژی از حرکات بدن انسان پیشنهاد کردند. این وسیله یک لوله است که دو مغناطیس در دو انتهای ثابت شده- آند و یک مغناطیس در وسط قرار دارد که آزادانه حرکت می‌کند. این شکل از طراحی سبب ایجاد یک فتریت مغناطیسی می‌شود [۱۵]. فیسل و همکاران دو گونه از ژنراتورهای چند فرکانسی را طراحی کردند، آن‌ها نتیجه گرفتند که هنگامی که چهار ژنراتور در یک مکان تعییه شوند، بیشترین توان از آن‌ها برداشت می‌شود [۱۶]. پس از آن مانز و همکاران یک برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی که در آن از مغناطیس چند قطبی استفاده شده است، برای برداشت انرژی از ارتعاشات محیط پیشنهاد کردند [۱۷]. همچنین صلاح الدین و پارک یک تولید کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی را با یک سامانه جرم- فنر و مغناطیس- فنر ارائه دادند، آن‌ها در فرکانس ۶ هرتز توانی معادل ۲,۹۲ میلی وات برداشت کردند [۱۸]. سپس وانگ و همکاران مدل جدیدی از برداشت کننده‌ی الکترومغناطیسی را ارائه دادند که از حرکت انسان انرژی دریافت می‌کند [۱۹]. گی و همکاران نیز یک نوع ژنراتور بر اساس مغناطیس چند قطبی برای برداشت انرژی از راه رفتن انسان طراحی کردند. ماکزیمم توان دریافتی آن‌ها ۲۰ میلی وات بود [۲۰]. سپس اقبال و صلاح الدین یک برداشت کننده‌ی انرژی هیبریدی شامل پیزوالکتریک و الکترومغناطیس را به منظور بهره برداری از ارتعاشات ناشی از باد طراحی کردند [۲۱]. در [۲۲] یک برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی یکنواخت (EMEH) ارائه شد، به طوریکه از یک تشید کننده فنر آهنربایی محصور در یک لوله، مجموعه‌ای از سیم پیچ پیچیده شده در اطراف لوله و دو آهنربا در دو انتهای لوله تشکیل شده بود. همچنین سه آهنربا به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که برهمکنش در هر دو طرف آهنربایی متحرک اعمال می‌شود. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی تحت تحریک‌های هارمونیک نشان می‌دهد که سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی پیشنهادی در [۲۲] دارای توان خروجی مناسبی است به طوری که آزمایش‌های انجام شده بر روی ترمیم نشان می‌دهد که از نمونه اولیه ساخته شده در هنگام راه رفتن تقریباً نیم میلی وات توان می‌توان برداشت نمود. همانطور که مشخص است، مطالعات مختلف و قابل توجه‌ای در زمینه برداشت انرژی با استفاده از الکترومغناطیس انجام شده است، در این پژوهش، در سامانه غیرخطی گونه‌ای جدید از فنریت معرفی شده است به گونه‌ای که شش مغناطیس یکپارچه موجود درون لوله در سامانه برداشت انرژی غیرخطی از یک جهت متصل به یک فنر خطی می‌باشدند و از طرف دیگر توسط یک مغناطیس ثابت، تحت تأثیر فنریت غیرخطی قرار دارند. این فنریت ویژه معرفی شده از جمله

در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت موضوع انرژی و حیاتی بودن انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی زیادی در زمینه برداشت انرژی از مواد هوشمند (پیزوالکتریک، الکترواکتیو پلیمر (EAP)، نایلون، فیبرهای نوری و غیره) و مواد الکترومغناطیسی صورت گرفته است. کاتون و همکاران یک مدل جدیدی از برداشت کننده‌ی انرژی غیرخطی به وسیله‌ی تولید نیروی مغناطیسی پیشنهاد دادند [۳]. تانگ و یانگ یک ارتعاش کننده‌ی مغناطیسی را برای عرض کردن ناحیه‌ی روزنans برداشت کننده‌ی پیزوالکتریک به کار بردند [۴]. گائو و همکاران یک مطالعه جامع بر اثرات میرایی غیرخطی هوا و "کشش به داخل" روی برداشت کننده‌های انرژی الکترواستاتیک، انجام دادند [۵]. همچنین شی و همکاران یک برداشت کننده‌ی انرژی موج شناور نوسانی جدید بر اساس مکانیزم فضایی دوتایی X شکل برای سنسورهای خودکار در پل‌های عبوری از دریا پیشنهاد کردند [۶]. سان و همکاران مطالعاتی بر روی توسعه یک برداشت کننده‌ی انرژی ارتعاشی-بادی جدید با چگالی توان بالا همراه با ساختار بلوف- بدنه تودرتو انجام دادند [۷]. همچنین هانگ و همکاران عملکرد تولید انرژی یک ماشین برداشت پیزوالکتریک با قابلیت حمل و نقل جاده‌ای برای حذف انرژی از وسایل نقلیه عبوری را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. همچنین لی و همکاران عملکرد برداشت کننده‌های انرژی الکترومغناطیسی بر اساس آرایه‌های آهنربایی با قطبیت متناوب را در ساختارهای مختلف مورد مقایسه قرار دادند [۹]. همچنین استعمالو و همکاران آزمایشاتی بر روی برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک جدا شده از ارتعاشات پایه انجام دادند [۱۰]. تیابور و همکاران یک برداشت کننده‌ی انرژی ترکیبی چندوجهی بر اساس مکانیزم‌های پیزوالکتریک-الکترومغناطیسی برای ارتعاشات محیطی با فرکانس پایین، طراحی کردند [۱۱]. همچنین پاول و همکاران یک دستگاه برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی جدید برای تامین انرژی یک ربات یخ زدا و سنسورهای نظارت بر خطوط انتقال، طراحی کردند [۱۲]. از طرف دیگر برداشت انرژی از ارتعاشات محیط با استفاده از الکترومغناطیس، یا از طریق حرکت نسبی بین مغناطیس و سیم پیچ صورت می‌گیرد و یا از طریق یک کویل در اثر تغییرات میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد [۱۳]، برای مثال لی و همکاران مطالعاتی بر روی برداشت انرژی غیرخطی از ارتعاشات ناشی از حرکت دست انسان انجام دادند [۱۴]. سپس ساها و همکاران یک مدلی از برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی که شامل مغناطیس



شکل ۱ سامانه مکانیکی معادل



شکل ۲ سامانه الکتریکی معادل

برای بدست آوردن مدل ریاضی برای برداشت کننده از قانون دوم نیوتن و همچنین قانون القای الکترومغناطیس فارادی استفاده شده است.

طبق قانون دوم نیوتن معادله حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی به صورت زیر می‌باشد:

$$M\ddot{y} + (C_a + C_i + C_e)\dot{y} + ky + F_{mag}(y) + \frac{\dot{y}}{|y|}\mu M g = F(t)$$

در رابطه (۱)، جرم مغناطیسی، C_a ضریب میرایی هوا، C_i ضریب میرایی مکانیکی و C_e ضریب میرایی الکتریکی می‌باشد. همچنین k سختی فنر و $F_{mag}(y)$ نیروی فریت غیرخطی بین دو مغناطیس و μ ضریب اصطکاک می‌باشد. نیروی فریت غیرخطی بین دو مغناطیس را مطابق رابطه (۲) می‌توان بیان نمود.

$$F_{mag}(y) = k_3 y^3 \quad (2)$$

به طور کلی معادله حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی به صورت رابطه (۳) قابل نمایش می‌باشد:

$$M\ddot{y} + (C_a + C_i + C_e)\dot{y} + ky + k_3 y^3 + \frac{\dot{y}}{|y|}\mu M g = F(t) \quad (3)$$

نوآوری‌های این پژوهش نسبت به کارهای پیشین از جمله [۲۲] می‌باشد. مهم‌ترین نوآوری‌ها و مزایا پژوهش حاضر عبارتند از:

۱- معرفی سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی با فریت جدید خطی- غیرخطی

۲- قرارگیری متفاوت سیم‌پیچ‌ها در اطراف لوله و مغناطیس‌ها جهت استحصال انرژی بیشتر از سامانه

۳- استفاده از تعداد مغناطیس‌های متحرک بیشتر جهت تقویت میدان مغناطیسی در اطراف آن‌ها و در نتیجه برداشت توان بیشتر از سامانه

در این پژوهش هدف مطالعه بررسی ارتعاشات خطی و غیرخطی سامانه برداشت انرژی، در هنگام حرکت انسان و همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو سامانه خطی و غیرخطی و در نهایت بهبود توان دریافتی برای تامین انرژی مدارهای الکترونیکی کم مصرف می‌باشد. در بخش‌های بعدی ابتدا معادلات ریاضی حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سپس مسائل مربوط به شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس مورد تبیین و ارزیابی قرار خواهد گرفت، همچنین پس از آن سامانه آزمایشگاهی طراحی شده مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد، سپس به ارزیابی و مطالعه نتایج حاصل شده در دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی پرداخته می‌شود و درنهایت نتیجه‌گیری از پژوهش انجام شده ارائه می‌شود.

۲- معادلات ریاضی حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی (۱)

۱- تحلیل معادلات حاکم بر دو زیر سامانه مکانیکی و الکتریکی

هر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی را می‌توان به دو سامانه مکانیکی و الکتریکی جداگانه معادل تقسیم بندی کرد. سامانه مکانیکی مطابق شکل (۱) یک سامانه جرم- فر- دمپر ساده می‌باشد که در اثر فرکانس اعمالی از طرف انسان دچار ارتعاش می‌شود.

همچنین سامانه الکتریکی معادل، یک مدار الکتریکی مطابق شکل (۲) می‌باشد که جریان I از آن می‌گذرد و در آن R_{coil} مقاومت سیم‌پیچ، L_c اندوکتانس سیم‌پیچ، R_I مقاومت بار و V_{em} ولتاژ برداشت شده از سامانه می‌باشد.

لازم به ذکر است L و R به ترتیب انداخته سیم پیچ و مقاومت کلی جریان می‌باشند. در نهایت توان استحصال شده از یک سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (10)$$

از معادله (۱۰) می‌توان برای محاسبه توان آنی تقریبی استفاده نمود.

۲-۲- تحلیل نیروی الکترومغناطیسی و فریت غیرخطی بین دو مغناطیس

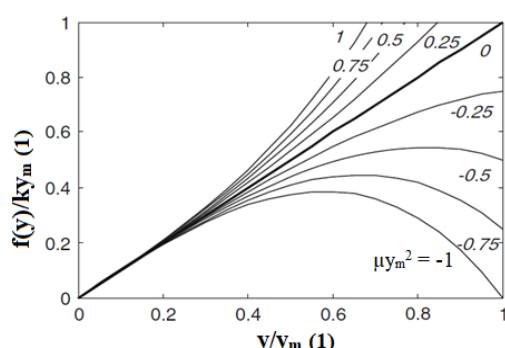
معادله نیروی الکترومغناطیسی غیر خطی بین دو مغناطیس طبق (۲۲) مطابق رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$f(y) = ky(1 + \mu_{nl}y^2) \quad (11)$$

طبق معادله (۱۱) نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس تابع ضرائب ثابتی مثل ضرائب فریت خطی و غیرخطی که به ترتیب با k و k_3 نمایش داده می‌شوند، و همچنین فاصله بین دو مغناطیس می‌باشد. که طبق (۲۲) k_3 ارتباط مستقیم با k و μ_{nl} دارد (طبق رابطه (۱۲)):

$$k_3 = k \cdot \mu_{nl} \quad (12)$$

طبق معادله (۱۱) اگر μ_{nl} برابر با صفر شود، آن‌گاه نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس خطی بوده و فقط تابع k یا ضریب فریت خطی می‌باشد. نحوه تغییرات نیروی الکترومغناطیسی با فاصله بین دو مغناطیس و μ_{nl} در نمودار بدون بعد در شکل (۳) به طور کامل مشخص می‌باشد.



شکل ۳ نحوه تغییرات نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس [۲۲]

برای پیش بینی ولتاژ در سیم پیچ اطراف آلیاژ، قانون القای فارادی را استفاده می‌کنیم. طبق این قانون هرگاه میزان شار مغناطیسی که از یک مدار بسته می‌گذرد تغییر کند، نیرو محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است. این قانون ولتاژ القا شده در یک سیم پیچ به تعداد N حلقه و مساحت مدار بسته A را به تغییرات چگالی شار مغناطیسی (B) طبق (۱۵) به فرم رابطه (۴) ارتباط می‌دهد:

$$V = -NA \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

از طرفی تغییرات شار مغناطیسی با زمان را طبق (۱۵) به صورت رابطه (۵) نیز می‌توان نمایش داد:

$$V = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{d\varphi}{dy} \left| \frac{dy}{dt} \right| \quad (5)$$

که φ شار مغناطیسی القا شده در سیم پیچ می‌باشد. همچنین سرعت نسبی سامانه و $d\varphi/dt$ گردابیان شار مغناطیسی می‌باشد. برای محاسبه شار مغناطیسی القا شده در یک دور سیم پیچ یا φ باید از معادله چگالی شار مغناطیسی یا میدان مغناطیسی (B) نسبت به سطح انتگرال بگیریم. پس از انتگرال گیری φ مطابق (۱۵) به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\varphi = \frac{\mu_0 m}{2} \left[\frac{1}{(r^2 + y^2)^{1/2}} - \frac{y^2}{(r^2 + y^2)^{3/2}} \right] \quad (6)$$

با مشتق گیری از رابطه (۶) نسبت به y داریم:

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{\mu_0 m}{2} \left[\frac{2y^3}{(r^2 + y^2)^{5/2}} - \frac{3y}{(r^2 + y^2)^{3/2}} \right] \quad (7)$$

معادله (۷) تغییرات شار مغناطیسی در یک دور سیم پیچ با شعاع حلقه‌ی r را نشان می‌دهد، به طوری که فاصله مغناطیسی متوجه از هر یک از مغناطیس‌های ثابت y می‌باشد. با تعمیم رابطه (۷) تغییرات شار مغناطیسی طبق (۱۵) برای یک سیم پیچ الکتریکی با تعداد دور N و طول ۱ به صورت رابطه (۸) حاصل می‌شود:

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{\mu_0 m}{2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} y_n \left[\frac{2y_n^2}{(r^2 + y_n^2)^{5/2}} - \frac{3}{(r^2 + y_n^2)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

$$y_n = y + n \left(\frac{l}{N-1} \right)$$

کامسول مولتی فیزیکس یک نرم افزار شبیه‌سازی عمومی برای مدل‌سازی طرح‌ها، دستگاه‌ها و فرایندها در تمام زمینه‌های مهندسی، ساخت و تحقیقات علمی است. کاربر این نرم افزار علاوه بر استفاده از مدل سازی مولتی فیزیکس برای پژوهش‌های خود، همچنین می‌تواند مدل‌های خود را به اپلیکیشن‌های شبیه‌سازی برای استفاده توسط سایر تیم‌های طراحی، بخش‌های تولید، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، تبدیل کند.

کامسول یک محیط شبیه‌سازی است که با در نظر گرفتن کاربردهای دنیای واقعی طراحی شده است. هدف از همه شبیه‌سازی‌ها تا آنجا که ممکن است بررسی تأثیراتی است که در واقعیت مشاهده می‌شوند. اگر بتوانیم تمام مواردی که در واقعیت انفاق می‌افتد را در یک پژوهه مهندسی یا علمی در شبیه‌سازی وارد کنیم، در حقیقت شبیه‌سازی بیشتر و بیشتر به مدل واقعی نزدیک می‌شود.

برای شبیه‌سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ابتدا مشخصات هندسی لوله، فنر و مغناطیس‌ها در نرم افزار وارد شده سپس محیط اطراف نیز در نرم افزار شبیه‌سازی شده و در نهایت سامانه در هنگام راه رفتن انسان در سه فرکانس مختلف $1/5$ ، $2/5$ و $1/5$ هرتز در مدت زمان 4 ثانیه در نرم افزار به طور جداگانه شبیه سازی شده است. در حقیقت پس از وارد کردن پارامترهای سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول، لوله‌ی استوانه‌ای و محیط اطراف آن شبکه بندی شده‌اند که مشخصات آن در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد.

مطابق شکل (۴)، جهت نزدیک‌تر بودن محیط شبیه سازی به واقعیت، شبکه بندی سامانه در اطراف سیم پیچ با اندازه کوچکتر و با دقت بالاتری انجام شده است. همچنین در محیط شبیه سازی شرایط مرزی با این فرض تعیین شده است که: در اطراف مغناطیس متحرک جابه‌جایی در راستای افقی (در نرم افزار با Γ نمایش داده شده است) صفر در نظر گرفته شده و در راستای عمودی (در نرم افزار با Z نمایش داده شده است) به صورت تابع هارمونیک در سه فرکانس مختلف $1/5$ ، $2/5$ و $1/5$ هرتز در نظر گرفته شده است.

در بخش ((بحث و نتایج)) به بررسی نتایج حاصل شده در محیط شبیه سازی و در نرم افزار کامسول پرداخته شده و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۵) نمایی دو بعدی از نحوه ارتعاش مغناطیس‌ها درون لوله در نرم افزار کامسول با توجه به شبکه بندی انتخاب شده برای آن قابل مشاهده است.

طبق شکل (۳) اگر $0 < \mu.ym^2$ باشد، با افزایش فاصله‌ی بین دو مغناطیس، مقدار نیروی الکترومغناطیس به صورت سهموی بیشتر می‌شود. همچنین اگر $0 = \mu.ym^2$ باشد، نیروی الکترومغناطیس بین دو مغناطیس خطي می‌باشد. در نهایت اگر $< 0 \mu.ym^2$ باشد، نیروی الکترومغناطیس بین دو مغناطیس تا وسط افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد تا در نهایت به صفر برسد. به طور کلی رابطه‌ی نیروی فنریت غیرخطی مغناطیسی بین دو مغناطیس استوانه‌ای شکل طبق (۲۲) مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$F_{mag}(y,t) = -\frac{\pi\mu_0 M^2 r^4}{4} \left[\frac{1}{y(t)^2} + \frac{1}{(y(t)+2h)^2} + \frac{2}{(y(t)+h)^2} \right] \quad (13)$$

که

$$M = \frac{B}{\mu_0}$$

در رابطه (۱۳)، $F_{mag}(y,t)$ نیروی مغناطیسی بین دو مغناطیس استوانه‌ای، M ضریب گذردهی فضای خالی (که مقدار آن برابر با $126,000,000$ هانری بر متر است)، B چگالی شار مغناطیسی (بر حسب تسلی)، t شاعع مغناطیسی، h ضخامت مغناطیسی، y جابه‌جایی و فاصله بین مغناطیس‌ها و t زمان می‌باشد. حال از حاصل تقسیم نیروی فنریت غیرخطی مغناطیسی بر جابه‌جایی بین دو مغناطیس، فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس طبق (۲۲) از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

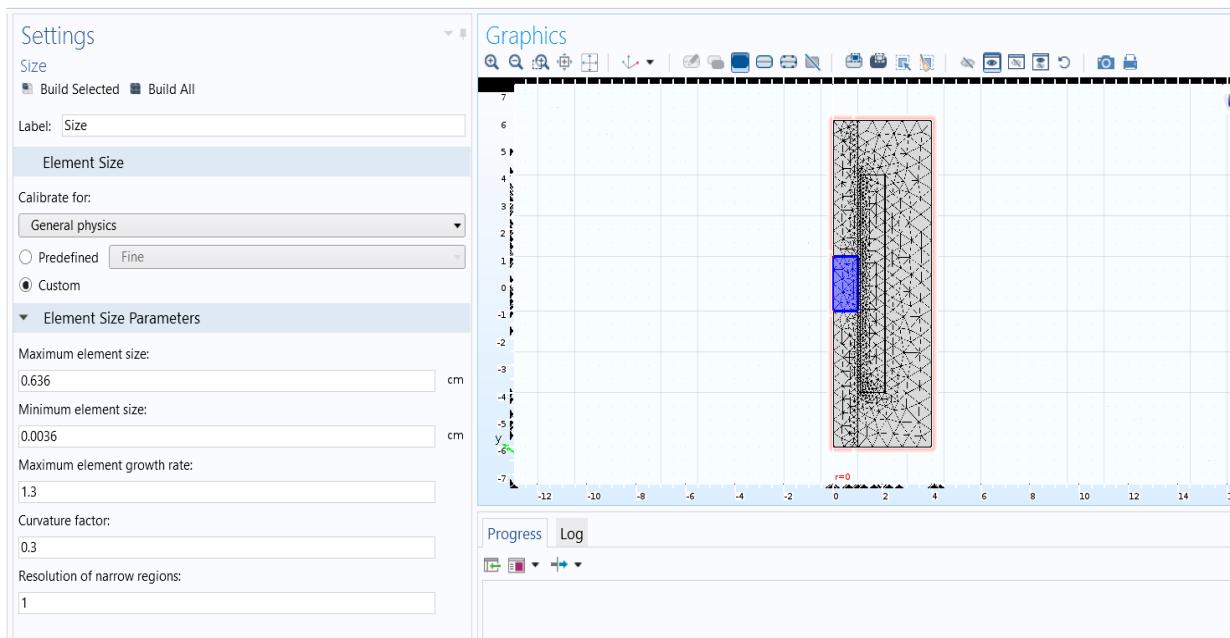
$$k_{nl} = \frac{F_{mag}(y,t)}{y(t)} = -\frac{\pi\mu_0 M^2 r^4}{4y(t)} \left[\frac{1}{y(t)^2} + \frac{1}{(y(t)+2h)^2} + \frac{2}{(y(t)+h)^2} \right] \quad (15)$$

طبق رابطه (۱۵) فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس با چگالی شار مغناطیس و شاعع مغناطیس رابطه‌ی مستقیم و با فاصله‌ی بین دو مغناطیس رابطه‌ی عکس دارد.

به عبارت دیگر با کم کردن فاصله‌ی دو مغناطیس مقدار فنریت به طور قابل ملاحظه‌ای (با توان (۳) افزایش می‌یابد، به طوری که اگر این فاصله بسیار کم شود و به صفر نزدیک شود، مقدار فنریت به سمت بی نهایت می‌کند).

۳- شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس

در این بخش چگونگی شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۴ نحوه‌ی شبک بندی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول

لازم به ذکر است که مقاومت سیم پیچ طبق رابطه‌ی ۱۶ تابع پارامترهایی می‌باشد:

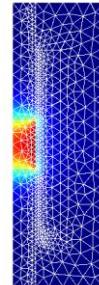
$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (16)$$

که در آن ρ مقاومت ویژه سیم پیچ، L طول سیم پیچ و A مساحت مقطع سیم پیچ می‌باشد. روابط L و A طبق (۱۷) و (۱۸) می‌باشند:

$$L = N \pi D \quad (17)$$

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (18)$$

که در آن N تعداد دور سیم پیچ، D قطر لوله، و d قطر سیم مفتوح می‌باشد. در روابط فوق با افزایش طول سیم پیچ (L) مقدار مقاومت سیم پیچ افزایش یافته و در نتیجه توان برداشت شده از سامانه کاهش می‌یابد، همچنانی با افزایش مساحت مقطع سیم پیچ (A) مقدار مقاومت سیم پیچ کاهش یافته و در نتیجه توان برداشت شده از سامانه افزایش می‌یابد، از این رو پارامترهای هندسی باید به گونه‌ای بهینه شوند که مقدار طول سیم پیچ کمترین مقدار و مساحت سیم پیچ بیشترین مقدار شوند تا مقاومت سیم پیچ کمترین مقدار شود و در نتیجه توان خروجی بیشینه شود.



شکل ۵ نمایی دو بعدی از ارتعاش مغناطیسی درون لوله و شبکه بندی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول

۴- سامانه آزمایشگاهی طراحی شده

در این بخش به بررسی سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده و نحوه‌ی بهینه سازی پارامترهای آن که در نرم افزار متلب با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده‌اند، پرداخته می‌شود. طبق رابطه‌ی (۱۰)، توان یک سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی با مجذور ولتاژ القا شده در خروجی سیم پیچ رابطه‌ی مستقیم و با مقاومت سیم پیچ (بار) رابطه‌ی عکس دارد. پس، سامانه‌ی بهینه است که در عین دریافت بیشترین ولتاژ القا شده در خروجی سیم پیچ، دارای کمترین مقدار مقاومت باشد در نتیجه برای بهینه سازی سامانه دو اصل زیر را باید در نظر گرفت:

ولتاژ برداشت شده بیشترین مقدار باشد.
مقاومت سیم پیچ تاحد امکان کمترین مقدار باشد.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک اعمالی جهت بهینه‌سازی متغیرهای سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی مطابق ذیل می‌باشند:

نوع پارامترها پیوسته، احتمال جهش $0/1$ ، احتمال جدایش $0/65$ ، نوع ادغام تک نقطه‌ای و شرط توقف حصول حداقل مقدار تابع برازندگی در نظر گرفته شده است.
در جدول (۲) مقدار بهینه پارامترها و مقدار نهایی تابع هدف (توان) آورده شده است.

جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترهای سامانه آزمایشگاهی

پارامتر	نماد	مقدار
تعداد دور	N	۱۶۰۰۰
قطر سیم مفتول	d (mm)	۰/۲
طول لوله	L (mm)	۱۵۰
طول سیم پیچ	l (m)	۷۰.۳۷
قطر لوله	D (mm)	۱۶
جرم مغناطیسی	M (g)	۶۶۷
مقاومت سیم پیچ	Rc (Ω)	۵۳۲
تابع هدف (توان)	P (mw)	۱/۸۹

این سامانه آزمایشگاهی شامل یک لوله به طول ۱۵۰ میلی متر و قطر ۱۶ میلی متر می‌باشد که در یک انتهای آن یک فنر خطی متصل شده است، به‌طوری که به فنر موردنظر شش مغناطیسی یکپارچه متصل شده و طرف دیگر مغناطیس‌ها توسط یک مغناطیس ثابت که در انتهای دیگر لوله قرار دارد، تحت تأثیر فنریت غیرخطی می‌باشد، به‌طوری که ارتفاع و قطر هر مغناطیس به ترتیب ۵ و ۱۵/۵ میلی متر می‌باشند. لازم به ذکر است که در اطراف لوله مورد نظر ۶ سیم پیچ مرکز قرار دارد که دوتای انتهایی دارای ۲۰۰۰ دور و چهارتای میانی دارای ۳۰۰۰ دور می‌باشند. در شکل‌های (۶) و (۷) سامانه آزمایشگاهی موردنظر قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مشخصات الگوریتم ژنتیک اعمال شده و نتایج همگرایی آن در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. نحوه انجام کار آزمایشگاهی بر روی سامانه آزمایشگاهی طراحی شده به این صورت است که، سامانه آزمایشگاهی بر روی ساق پا نصب شده و سپس بر اساس ارتعاش مغناطیس درون لوله آزمایشگاهی در هنگام راه رفتن انسان عملکرد سامانه آزمایشگاهی در سه فرکانس تحریک $۱/۵$ ، ۲ و $۲/۵$ هرتز مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول مورد مقایسه قرار گرفته است.

در ادامه به بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر توان برداشت شده در خروجی سیم پیچ پرداخته می‌شود.
مسئله بهینه سازی به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

Maximize:

$$\text{Power}(V, R) = \frac{V^2}{R}$$

Subject to:

$$g_1(X) = L - N \pi D \quad (19)$$

$$g_2(X) = L^* - Nd$$

$$X_k^{\min} < X_k < X_k^{\max}$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

در رابطه (۱۹) تابع برازندگی و قیدهای حاکم بر مسئله قابل مشاهده می‌باشند، به‌طوری که هر یک پارامترهای موجود در آن در توضیح روابط 16 ، 17 و 18 معرفی شده‌اند. در واقع هدف از بهینه سازی بیشینه کردن تابع برازندگی (توان خروجی) با در نظر گرفتن قید اول که در واقع رابطه‌ی مربوط به طول سیم پیچ بوده و قید دوم که رابطه‌ی مربوط به طول لوله است، می‌باشد.
هریک از پارامترهای معرفی شده نیاز به یک محدوده دارد که در جدول (۱) پارامترهای طراحی و محدوده آن‌ها معرفی شده‌اند:

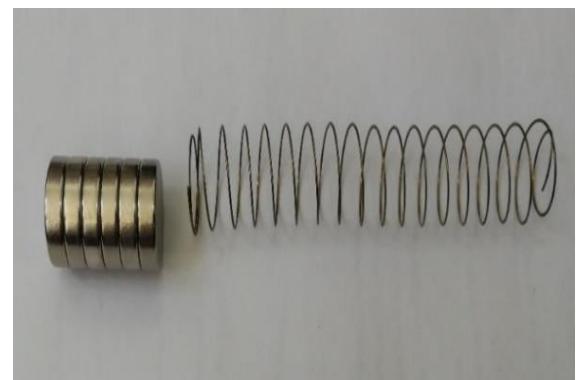
جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترها

حد بالا	حد پایین	نماینده	پارامتر	عنوان پارامتر
inf	۰/۰۵	X1	L(m)	طول سیم پیچ
۲۰۰۰۰	۲	X2	N	تعداد دور
۲۰	۱	X3	D(mm)	قطر لوله
۱۰۰۰	۰/۱	X4	R(Ω)	مقاومت سیم پیچ
۱۰۰۰۰	۰	X5	K(N/m)	سختی فنر

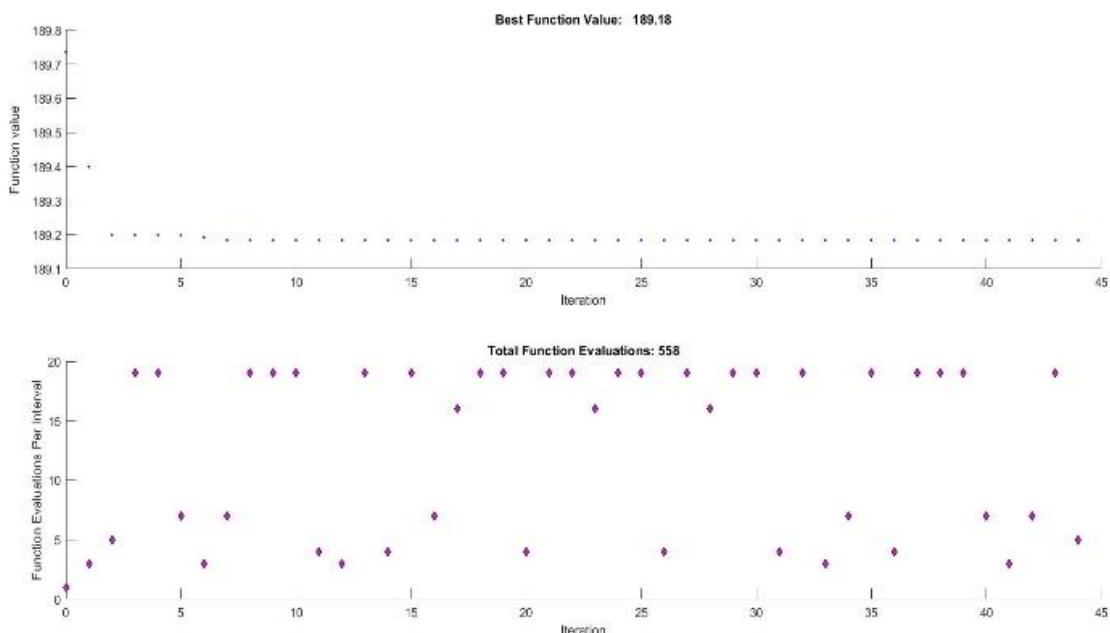
برای حل این مسئله با توجه به اینکه قیدها به صورت غیرخطی می‌باشند و مسئله دارای پیچیدگی‌های معادلاتی می‌باشد، الگوریتم ژنتیک را به عنوان روش حل انتخاب می‌کنیم. برای بهتر پیش رفتن فرآیند، حدود فوق به صورت دقیق، معقول و مناسب با سامانه آزمایشگاهی موجود انتخاب شده‌اند تا در مدت زمان کمتری به سامانه بهینه مورد نظر بررسیم.



شکل ۷ سامانه آزمایشگاهی مورد نظر



شکل ۶ فنر و مغناطیس‌های به کاربرده شده در سامانه آزمایشگاهی



شکل ۸ مشخصات الگوریتم ژنتیک به کار رفته جهت بهینه سازی پارامترهای سامانه آزمایشگاهی

سازی در نرم افزار کامپیوٹر در مدت زمان ۴ ثانیه پرداخته می‌شود. مکانیزم سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی به این صورت است که توسط مغناطیس دیگر تحت تأثیر یک فریت غیرخطی قرار می‌گیرد. همین موضوع سبب افزایش احتمال برداشت توان‌های بیشتر از سامانه نسبت به حالت فریت خطی می‌شود. در شکل (۹) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده با استفاده از فقط خطی (بدون فریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی (که بر اساس قراردادن سامانه آزمایشگاهی بر روی ساق پا در هنگام راه رفتن ثبت شده‌اند) و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامپیوٹر در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۱/۵ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.

حال در ادامه به ارزیابی نتایج حاصل از برداشت انرژی از سامانه آزمایشگاهی (شکل ۷) و شبیه سازی در نرم افزار کامپیوٹر در سه فرکانس تحریک ۱/۵، ۲، و ۲/۵ هرتز پرداخته می‌شود.

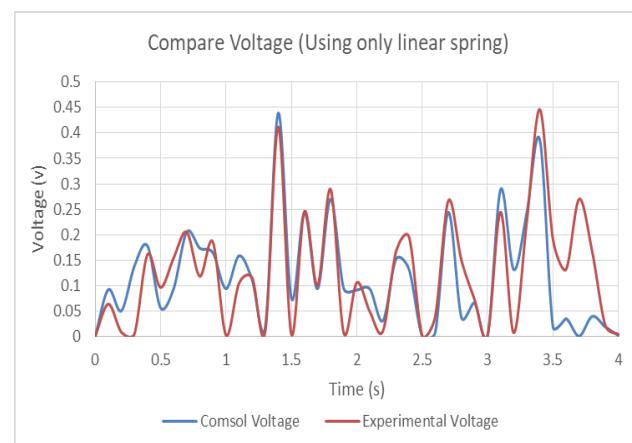
۵- بحث و نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه‌ی ولتاژ و توان استحصال شده در دو سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فریت هم‌زمان غیرخطی و خطی و سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فریت خطی در سه فرکانس ۱/۵، ۲، و ۲/۵ هرتز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه

جدول ۳ توان استحصال شده از سامانه‌های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

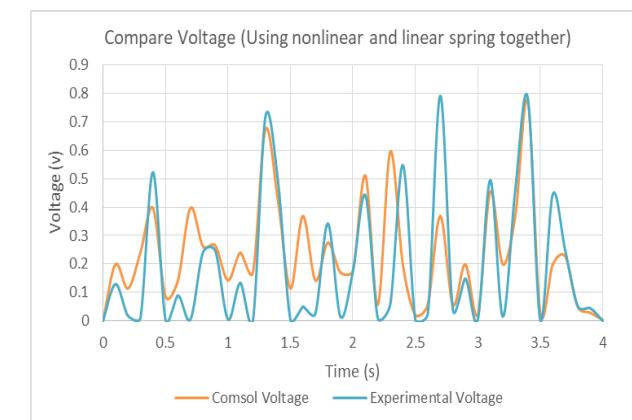
فرنریت غیرخطی	فرنریت خطی	روش	فرکانس ۱/۵ هرتز
۰/۰۳۴	۰/۰۱۱	آزمایش	توان RMS (mw)
۰/۰۳۲	۰/۰۰۹	شبیه سازی در کامسول	
۰/۲۴۸	۰/۰۶۵	آزمایش	
۰/۱۷۳	۰/۰۸۲	شبیه سازی در کامسول	توان ماکزیمم (mw)

مطابق جدول (۳)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب ۲/۱ برابر و ۲/۵ برابر شده است. همچنین مقدار توان ماکزیمم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب ۲/۸ برابر و ۱/۱ برابر شده است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در استحصال توان بیشتر در این فرکانس (فرکانس ۱/۵ هرتز) کاملاً نمایانگر می‌باشد. همچنین در شکل (۱۱) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده خطی (بدون فرنریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۲ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.

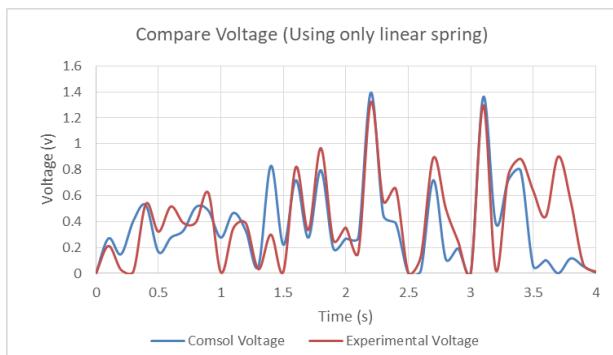


شکل ۹ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

همچنین در شکل (۱۰) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده در حالت استفاده همزمان از فرنریت و غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۱/۵ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

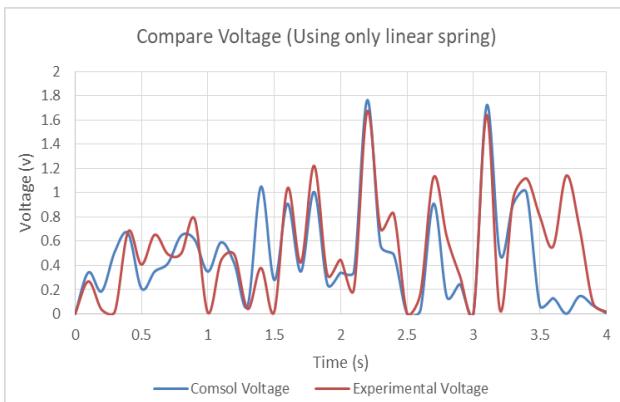


شکل ۱۱ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۲ هرتز)

در شکل (۱۲) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در فرکانس ۲ هرتز قابل مشاهده می‌باشد.

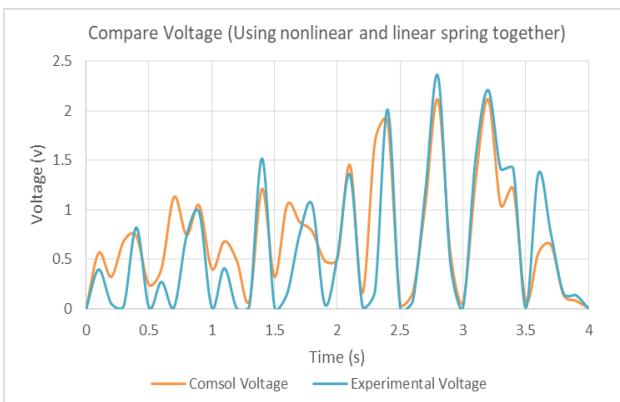
طبق شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه سازی انطباق قابل قبولی را دارا می‌باشد که این موضوع خود حاکی از دقت کارهای آزمایشگاهی گرفته شده می‌باشد. همانطور که از شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۱/۵ هرتز) مقادیر ولتاژ ماکزیمم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می‌باشد. حال با در نظر گرفتن مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به طور کامل در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

استحصال توان بیشتر در این فرکانس نیز کاملاً نمایانگر می-باشد. همچنین در شکل (۱۳) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده خطی (بدون فنریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۲/۵ هرتز، قابل مشاهده می باشد.



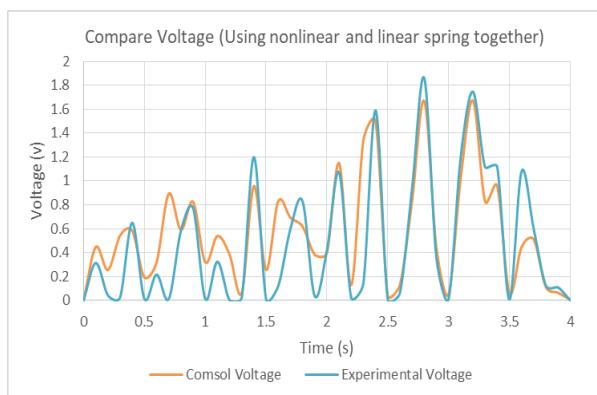
شکل ۱۳ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

در شکل (۱۴) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در فرکانس ۲/۵ هرتز قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۴ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

همانطور که از شکل های (۱۳) و (۱۴) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۲/۵ هرتز) نیز مقادیر ولتاژ ماکریم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می باشد. حال با در نظر گرفتن



شکل ۱۲ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۲ هرتز)

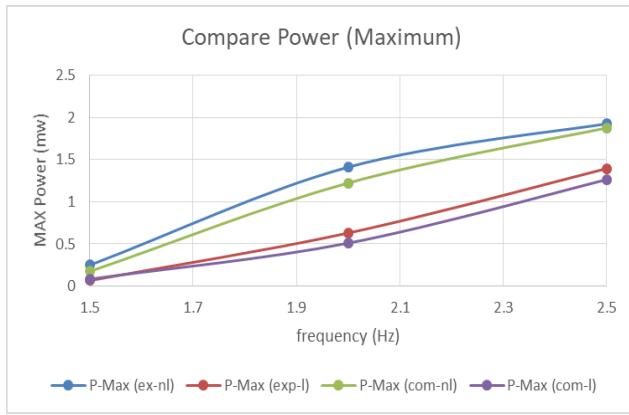
همانطور که از شکل های (۱۱) و (۱۲) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۲ هرتز) نیز مقادیر ولتاژ ماکریم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می باشد. حال با در نظر گرفتن مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به طور کامل در جدول (۴) قابل مشاهده می باشد.

جدول ۴ توان استحصال شده از سامانه های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۲ هرتز)

فرنریت غیرخطی	فرنریت خطی	روش	فرکانس ۲ هرتز
۰/۱۹	۰/۰۷۶	آزمایش	توان RMS (mw)
۰/۱۷۸	۰/۰۷۲	شبیه سازی در کامسول	
۱/۴۱۳	۰/۶۳	آزمایش	توان ماکریم (mw)
۱/۲۲۵	۰/۵۱	شبیه سازی در کامسول	

مطابق جدول (۴)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۵۰ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است.

همچنین مقدار توان ماکریم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۲۴ درصد و ۴۰ درصد افزایش یافته است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در



شکل ۱۶ مقایسه توان ماکریم استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵ و ۲/۵ هرتز برای دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه ولتاژ و توان استحصال شده در دو سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت توان غیرخطی و خطی و سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت خطی بر اساس داده های آزمایشگاهی (که از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده استخراج شده است) و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در مدت زمان ۴ ثانیه پرداخته شد. به طوری که در فرکانس ۱/۵ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه با فنریت غیرخطی و خطی همزمان نسبت به سامانه با فنریت خطی به ترتیب ۲/۱ برابر و ۲/۵ برابر شده است. همچنین در فرکانس ۲ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۵۰ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است. همچنین در فرکانس ۲/۵ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۶۲ درصد و ۶۸ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج عملکرد سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیر خطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی مطلوب تر می باشد و مقدار توان استحصال شده بیشتر می باشد. برای تحقیقات آینده می توان از سامانه برداشت انرژی معروف شده در فرکانس های بالاتر در شرایط دویدن انسان استفاده نمود و مطالعاتی را بر روی آن انجام داد. همچنین در آینده می توان بر روی سامانه برداشت انرژی هیبریدی که ترکیبی از الکترومغناطیس و پیزو الکتریک می باشد، برای بهبود توان استحصال شده مطالعاتی را انجام داد.

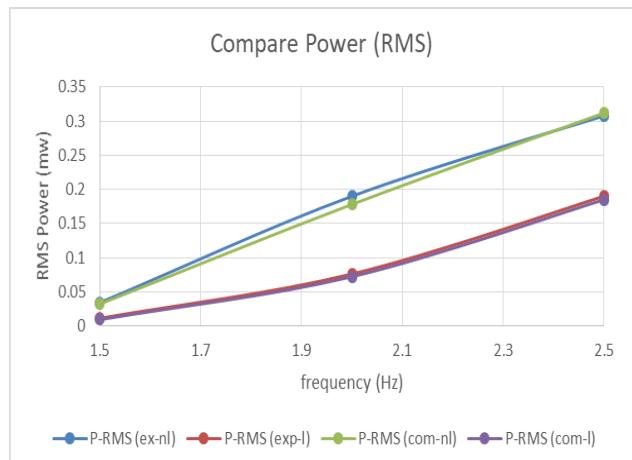
مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به طور کامل در جدول (۵) قابل مشاهده می باشد.

جدول ۵ توان استحصال شده از سامانه های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

فرنریت غیرخطی	فرنریت خطی	روش	فرکانس ۲ هرتز
۰/۳۰۸	۰/۱۹	آزمایش	توان RMS (mw)
۰/۳۱۲	۰/۱۸۵	شبیه سازی در کامسول	
۱/۹۲۹	۱/۳۹۶	آزمایش	توان ماکریم (mw)
۱/۸۷۹	۱/۲۶۵	شبیه سازی در کامسول	

مطابق جدول (۵)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۶۲ درصد و ۶۸ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار توان ماکریم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۳۷ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در استحصال توان بیشتر در این فرکانس نیز کاملاً نمایانگر می باشد.

در شکل های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب مقادیر توان های RMS و ماکریم استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۵ مقایسه توان RMS استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵ و ۲/۵ هرتز برای دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی

-۷- مراجع

- [12] Paul, S., Chang, J.H., Design of novel electromagnetic energy harvester to power a deicing robot and monitoring sensors for transmission lines, *Energy Conversion and Management*, Vol. 197, 111868, (2019).
- [13] Halim, M.A., Rantz, R., Zhang, Q., Gu, L., Yang, K., and Roundy, S., An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor, driven by pseudo-walking motion, *Appl Energy*, Vol. 217, pp. 66-74, (2018).
- [14] Liu, H., Gudla, S., Hassani, F.A., Heng , C.H., Lian, Y., and Lee, C.K., Investigation of the nonlinear electromagnetic energy harvesters from hand shaking, *IEEE Sensors Journal*, Vol.15(4), pp. 2356-64, (2015).
- [15] Saha, C.R., O'donnell, T., Wang, N., and McCloskey, P., Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147(1), pp. 248-253, (2019).
- [16] Foisal, A.R.M., and Hong, C., Chung, G.S., Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 182, pp. 106-13, (2020).
- [17] Munaz, A., Lee, B.C., and Chung, G.S., A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 201, pp. 134-40, (2013).
- [18] Salauddin, M., and Park, J.Y., Design and experiment of human hand motion driven electromagnetic energy harvester using dual Halbach magnet array, *Smart Mater Struc*, Vol. 26, 035011, (2017).
- [19] Wang, W., Cao, J., Zhang, N., Lin, J., and Liao, W.H., Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: design, modeling and experiments, *Energy Convers Manag*, Vol. 132, pp. 189-9, (2017).
- [20] Gui, P., Deng, F., Liang, Z., Cai, Y., Chen, J., Micro linear generator for harvesting mechanical energy from the human gait, *Energy*, Vol. 154, pp. 365-73, (2018).
- [21] Halim, M.A., Cho, H., Salauddin, M., and Park, J.Y., A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 249, pp. 23-31, (2016).
- [22] Kanqi, F., and Yiwei, Z., Capturing energy from ultra-low frequency vibrations and human motion through a monostable electromagnetic energy harvester, *Energy*, Vol. 169, pp. 356-3, (2019).
- [1] Colak, R., Bayindir, I., and Sefa, S., Demirbas, H., Using of alternative energy sources III, *Turkey: Renewable Energy Sources*, (2005).
- [2] Ergun, C., Yilmaz, S., Ozdemir, E., Gul, O., and Kalenderli, O., Piezoelectric materials and application areas, In: *Denizli International Materials Conference, Pamukkale*, Turkey, (2006).
- [3] Cottone, F., and Vocca, H., Gammaitoni, L., Nonlinear energy harvesting, *Physical Review Letters*, Vol. 102, Article ID. 080601, (2009).
- [4] Tang, L.H., Yang, Y.W., A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator, *Applied Physics Letters*, Vol. 101, No. 9, (2012).
- [5] Guo, X., Zhang, Y., Fan, K., and Lee, C., A comprehensive study of non-linear air damping and "pull-in" effects on the electrostatic energy harvesters, *Energy Conversion and Management*, Vol. 203, 112264, (2020).
- [6] Xie, Q., Zhang, T., Pan, Y., Zhang, Z., Yuan, Y., and Liu, Y., A novel oscillating buoy wave energy harvester based on a spatial double X-shaped mechanism for self-powered sensors in sea-crossing bridges, *Energy Conversion and Management*, Vol. 204, 112286, (2020).
- [7] Sun, W., Guo, F., and Seok, J., Development of a novel vibro-wind galloping energy harvester with high power density incorporated with a nested bluff-body structure, *Energy Conversion and Management*, Vol. 197,111880, (2019).
- [8] Hong, SD., Kim, KB., Hwang, W., Song, YS., Cho, J., Jeong, SY., Ahn, JH., Kim, GH., Cheong, H., and Sung, TH., Enhanced energy generation performance of a lanandfilled road capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles, *Energy Conversion and Management*, (2020).
- [9] Li, Z., Yan, Z., Luo, J., and Yang, Z., Performance comparision of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration, *Energy Conversion and Management*, Vol. 179, pp. 132-140, (2019).
- [10] Stamatelou, AM., and I.Kalfas, A., Testing of piezoelectric energy harvesters isolated from base vibrations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 196, pp. 717-728, (2019).
- [11] Toyabur, RM., Salauddin, M., Cho, HO., and Park, JY., A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric electromagnetic mechanisms for low frequency ambient vibrations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 168, pp. 454-466, (2018).

بررسی نرخ فرسایش ابزار فولاد تندبر حین تراشکاری فولاد ۱۰۴۵ تحت شرایط خنک کاری به وسیله مبرد R410a در مقایسه با سیال آب-صابون

چکیده: در این تحقیق با استفاده از مبرد R410a در خنک کاری لبه برندۀ ابزار و مقایسه آن با سیال سنتی آب صابون، عمر ابزار و میزان فرسایش لبه برندۀ ابزار بررسی شد. نرخ سایش ابزار فولاد تندبر (HSS) در براده برداری فولاد 1045 (ck45) در سرعت‌های برشی ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۵۵ متر بر دقیقه، عمق‌های براده برداری (HSS) در براده برداری ۱/۵ میلیمتر و مقادیر پیشروی ۰/۰۵، ۰/۱۲، ۰/۰۵ میلیمتر بر دور در دو حالت خنک کاری سیال آب صابون و مبرد R410a بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خنک کاری به وسیله مبرد R410a به علت قدرت سرمایش بالا و کنترل بهتر دمای محل برش نسبت به سیال آب صابون در فرآیند ماشینکاری، سبب کاهش میزان فرسایش ابزار گردیده و می‌تواند به عنوان یکی از سیالات مناسب خنک کاری به کار گرفته شود. بر اساس کمینه‌های مقدار فرسایش ابزار در شرایط مختلف، با استفاده از مبرد R410a می‌توان سرعت برشی را ۶۰ درصد افزایش داد و از ۲۵ به ۴۰ متر بر دقیقه رساند. همچنین در بهینه ترین حالت میزان فرسایش ابزار تا ۲۰ برابر بهبود می‌یابد و در سرعت برشی ۴۰ بر دقیقه، عمق براده برداری ۱ میلیمتر و مقدار پیشروی ۰/۰۵ میلیمتر بر دور، پس از گذشت ۶۰ دقیقه از زمان براده برداری، از ۴۰۰ به ۲۰ میکرومتر کاهش می‌یابد.

واژه‌های راهنمایی: فرسایش ابزار، خنک کاری تبریدی، زیری سطح، فولاد تندبر

محمد صادق سالاری
کارشناس ارشد

علیرضا مطهری
استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه،
ساوه

* غلامرضا خلچ
دانشیار، گروه مهندسی مواد،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه،
ساوه

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

A study on tool wear rate of HSS cutting tool in turning 1045 steel using R410A as a cutting fluid over traditional wet machining

Mohammad
Sadegh Salari
MSc.

Alireza Motahari
Assistant Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Saveh
Branch, Islamic Azad
University, Saveh

**Gholamreza
Khalaj***
Associate Professor,
Department of
Material Engineering,
Saveh Branch, Islamic
Azad University,
Saveh

Abstract: In this research, using R410a coolant in cooling the cutting edge of the tool and comparing it with the traditional fluid of soapy water, the life of the tool and the wear rate of the cutting edge of the tool were investigated. The wear rate of high speed steel (HSS) tool in steel cutting (ck45) 1045 at cutting speeds of 15, 25, 40, and 55 meters per minute, cutting depths of 0.5, 1, and 1.5 mm and feed rate of 0.05, 0.12, and 0.2 mm /rev was investigated in two modes of liquid cooling, soapy water and R410a coolant. The obtained results show that cooling with R410a coolant, due to its high cooling power and better control of the temperature of the cutting area compared to the soapy water fluid in the machining process, has reduced the amount of tool wear and can be used as one of the suitable cooling fluids. Based on the minimum amount of tool wear in different conditions, by using R410a coolant, the cutting speed can be increased by 60% from 25 m/min to 40 m/min. Also, in the most optimal mode, the amount of tool wear is improved up to 20 times, and at a cutting speed of 40/min, the cutting depth is 1 mm and the feed rate is reduced from 400 to 20 micrometers.

Keywords: Tool wear, Cryogenic cooling, Surface roughness, Tool steel

۱- مقدمه

مختلفی با استفاده از سیال خنک کننده به کار گرفته شود که از آن جمله می‌توان به پیش خنک کاری قطعه کار، خنک کاری براده، خنک کاری ابزار برش و محدوده برشکاری اشاره کرد [۱۱و۱۲]. در این روش‌ها، ابزار برش و محدوده برشکاری با انتقال دما به صورت فوق سرد، خنک می‌شوند و این کار به وسیله هدایت سیال خنک کننده به سمت محدوده برش و اسپری کردن به صورت جت سیال با کمک نازل صورت می‌پذیرد. دماهای سرد همچنین برای مستحکم کردن ابزارهای برش به وسیله عملیات تبریدی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳-۱۵].

بسیاری از مطالعات صورت گرفته برای یافتن بهترین نتایج و مقایسه‌ای بین روش‌های متداول برشکاری و روش‌های خنک‌کاری فوق سرد انجام شده است، به عنوان مثال استفاده از جت نیتروژن مایع [۱۶و۱۷]، استفاده از خنک کاری فوق سرد غیر مستقیم نسبت به اسپری کردن نیتروژن مایع و خنک کردن ابزار نسبت به خنک کاری قطعه کار در سرعت‌های بالای برش در ماشینکاری فوق سرد [۱۸-۲۰].

آلودگی‌های زیست محیطی به وجود آمده به واسطه تجزیه سیالات برش در دماهای بالا، آلودگی آب و خاک هنگام دفع، تهدید بروز بیماری‌های بیولوژیکی برای اپراتور بر اثر بخارات سیالات، تماس فیزیکی و باکتری‌های موجود و بوی نامطبوع سیالات برش از جمله معایب استفاده از سیستم‌های خنک کننده سنتی است که نیازمند فضای وسیع کاری و سیستم‌های متعددی برای پمپاژ، ذخیره، تصفیه کردن، بازیافت، خنک سازی و غیره می‌باشد [۲۱و۲۲]. افزایش عمر ابزار، خرد شدن بهتر براده‌ها، جایجا کردن راحت‌تر براده‌ها، قابلیت تولید بیشتر، کاهش هزینه‌های تولید، کیفیت سطح بهتر، محیط زیست پاک‌تر و سالم‌تر برای کارگران، از جمله مزایای خنک کاری فوق سرد (مانند نیتروژن مایع) نسبت به روش‌های خنک کاری سنتی هستند [۲۳].

یکی از مزایای اصلی خنک کاری فوق سرد، سرد کردن محدوده تماس ابزار و براده در سطح براده ابزار می‌باشد که از تولید حرارت بیش از حد به صورت ویژه جلوگیری به عمل می‌آورد که این موضوع در تحلیل‌های تنش تحت شرایط خنک کاری فوق سرد مشهود بوده و نشان داد که کاهش بیش از حد دما سبب کاهش چشمگیر تنش‌های اعمالی در سطح آزاد لبه ابزار برشی می‌شود و هیچ ترکی ایجاد نمی‌گردد [۲۴]. در پژوهش دیگر با تراشکاری فولاد تحت شرایط خنک کاری فوق سرد کیفیت سطح فوق العاده‌ای به دست آمد [۲۵]. در تحقیق دیگری انواع فولاد با ابزارهای مختلف تحت شرایط خنک کاری فوق سرد ماشینکاری شدند و نتایج حاکی از بهبود عمر ابزار در فرآیند های ماشینکاری

یکی از پارامترهای مهم و موثر در فرآیندهای ماشینکاری عمر ابزار است که از دیدگاه آکادمیک بیانگر مدت زمانی است که می‌توان پس از تیز کردن ابزار، به وسیله آن عملیات براده برداری را انجام داد. مهم‌ترین موضوع در این زمینه اتفاق زمان و هزینه‌هایی است که در اثر کوتاه بودن عمر ابزار به فرآیند تولید لطمه می‌زند [۱۹و۲۰]. بنابراین بررسی روش‌های افزایش عمر ابزار همواره مورد توجه پژوهشگران در نقاط مختلف دنیا بوده است [۲۳و۴]. یکی از رایج‌ترین روش‌های افزایش این پارامتر استفاده از سیالات خنک کننده می‌باشد که به سبب کاهش دمای ابزار از افزایش حرارت در لبه‌های برنده جلوگیری به عمل آمده و در نتیجه عمر ابزار افزایش می‌یابد [۵و۶].

گرمای بیش از حد و فرسایش ابزار مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر بهره‌وری و قابلیت تولید فلزات به روش براده برداری می‌باشند. روش‌های مختلفی همچون ماشینکاری داغ [۱]، اعمال سیال خنک کننده با فشار بالا [۲]، روش سیال حداقل [۳] به وسیله محققان مختلف به منظور بهبود فرایندهای ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از سیالات برش می‌باشد [۴]. روغن‌های برش خالص مستقیماً از روغن‌هایمعدنی و در بعضی موارد به همراه افزودنی‌هایی تولید می‌شوند و کاربرد آنها بیشتر در مواردی است که نیروی برشی بین ابزار و براده زیاد بوده و روان‌کاری در اولویت باشد [۵]. ولی مایعات حل شونده در آب برای سرعت‌های برشی بالاتر و زمانی که فشار روی ابزار نسبتاً کم باشد مناسب‌تر هستند این در حالی است که برای سرعت‌های برشی بسیار زیاد سیالات برش برای نفوذ به فضای بین ابزار و براده دچار مشکل می‌شوند [۶]. بنابراین از آنجایی که روانکارهای گازی این مشکل را ندارند، در مواردی که نفوذ سیال به فضای بین ابزار و براده سخت بوده و یا امکان پذیر نباشد از این نوع روانکار استفاده می‌شود [۷و۸].

وجود اصطکاک بین ابزار و قطعات کار حین عملیات ماشینکاری سبب افزایش دما و تاثیر منفی بر پارامترهای ماشینکاری به خصوص عمر ابزار است. خنک کاری ابزار در فرآیند ماشینکاری در افزایش سرعت برشی موثر بوده و امکان انجام فرآیند ماشینکاری در سرعت‌های بالاتر را فراهم می‌سازد. از ویژگی‌های قابل توجه خنک کاری فوق سرد در عملیات ماشینکاری می‌توان به بهبود چشمگیر عمر ابزار و پرداخت سطحی و دقت ابعادی با کاهش فرسایش ابزار و کنترل دمای ماشینکاری در محدوده برش در حد مطلوب اشاره کرد [۹و۱۰]. خنک کاری فوق سرد در عملیات برش می‌تواند با روش‌های

۲- مواد و روش کار

۱-۱- مواد مورد آزمایش

میلگرد فولاد ۱۰۴۵ (CK45) با قطر اولیه ۵۰ میلیمتر و طول اولیه ۵۰۰ میلیمتر به عنوان جنس قطعه جهت آزمایش، انتخاب شد. قطعات در قطرهای ۵۰ میلیمتر و طولهای ۳۵۰ میلیمتر آماده شده و یک سمت آنها سوراخ مته مرغک زده شد. در هر مرحله قطعات به اندازه ۴۰ میلیمتر داخل سه نظام قرار گرفته و در سمت مقابل آن توسط دستگاه مرغک مهار گردیدند. ابزارهای HSS با بعد ۱۲ در ۱۲، تحت زاویه براده ۱۴ درجه و زوایای آزاد پیشانی و جانبی ۸ درجه سنگزنانی و آماده شدند. از دستگاه تراش تبریز TN50 مجهز به دو عدد استپ موتور و گیربکس برای کنترل مقادیر حرکات سوپرت‌ها به صورت الکترونیکی و مجهز به اینورتور سه فاز AC به منظور رساندن تعداد دوران دستگاه به مقادیر دقیق مورد آزمایش استفاده شد. از میکروسکوپ دستگاه CNC امکو برای بررسی وضعیت نوک ابزار بهره گرفته شد.

۲-۲- روش تحقیق

با اعمال تغییراتی بر روی ماشین تراش TN50 تبریز امکان اندازه‌گیری پارامتر سایش ابزار فراهم گردید. این تغییرات عبارتند از:

- استفاده از دو استپ موتور و دو درایو راهانداز برای آنها و اتصال آنها به سیستم رایانه و نصب موتورها بر روی سوپرت عرضی و طولی به منظور کنترل محورهای دستگاه توسط رایانه
- استفاده از یک اینورتور ۳ فاز به منظور دستیابی به عده دوران و سرعت برشی دقیق و کنترل عده دوران از پشت گلوبی دستگاه توسط دورسنجد دیجیتالی
- نصب دوربین عکاسی بر روی میکروسکوپ دستگاه تراش سی-ان سی امکو و نصب این مجموعه بر روی ابزار گیر دستگاه تراش
- نصب نازل اعمال آب صابون بر روی ابزار گیر و ارتباط آن با پمپ و مخزن آب صابون
- نصب نازل اعمال سیال تبریدی R410a و اتصال آن به کپسول حاوی سیال

در نهایت پس از آماده سازی پیش‌نیازهای تحقیق به ترتیب با درنظر گرفتن سرعت‌های برشی مختلف و عمق بارهای متفاوت و پیشروی‌های خودکار متفاوت به ثبت نرخ فرسایش ابزار پرداخته شد.

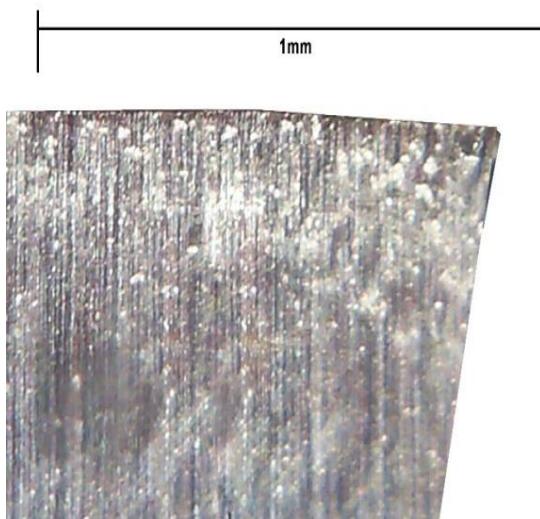
فوق سرد فلزات آهنی سخت بود که علت آن انتقال بهتر حرارت از ناحیه برش اینسرت و کاهش حرارت ابزارهای برش در دماهای بالا بود [۲۶]. همچنین عمر ابزار با استفاده از اسپری نیتروژن مایع بر روی سطح براده و سطح آزاد ابزار حدود ۵ برابر بیشتر گردیده است [۲۷].

در شرایط برشکاری خشک، احتمال چسبندگی قوی و لبه انباسته روی سطح براده وجود دارد در حالی که دماهای پایین می‌تواند ماده را سخت‌تر نماید و چسبندگی بین سطوح در تماس را کاهش دهد و بنابراین اصطکاک را کاهش دهد [۲۸]. با توجه به تحقیقات محققان، دماهای پایین برش سبب سخت‌تر و مستحکم‌تر شدن ماده قطعه کار می‌شود و این موضوع سبب افزایش نیروهای برش می‌گردد. در مطالعات مشخص شد که امکان کاهش نیروهای برش به وسیله تشکیل براده مطلوب در تراشکاری فولاد به وسیله خنک‌کاری فوق سرد با جت نیتروژن مایع وجود دارد [۲۹]. همچنین در تحقیق مشابهی، بهبودی حدود ۱۵ درصد در خنک‌کاری اسپری فوق سرد با نیتروژن مایع نسبت به حالت برش خشک برای فولاد مشاهده گردید [۳۰].

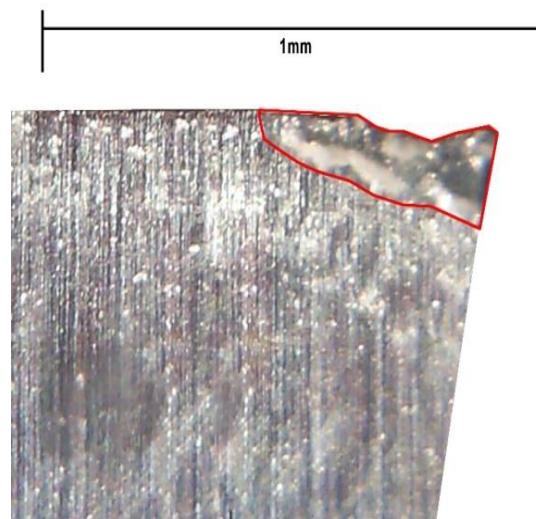
با توجه به این که فولاد 1045 با نام تجاری CK45 یکی از فلزات سخت تراش صنعت می‌باشد و همواره ماشینکاری آن توان با صدمات به ابزار و کاهش عمر ابزار و زمان عملکرد ابزار است و همچنین به علت مقاومت به سایش بالای خود یکی از پر کاربردترین فلزات در حوزه‌های مختلف صنعتی است، افزایش عمر ابزار در ماشینکاری این فولاد اهمیت بهسزایی دارد [۳۱] و [۳۲]. البته از آنجایی که تامین نیتروژن مایع و روش اعمال آن بسیار هزینه‌بر و نیازمند تجهیزات پیشرفته می‌باشد، در این تحقیق با استفاده از مبرد R410A که گازی در دسترس و بدون نیاز به تجهیزات هزینه‌بر برای اعمال است، به کاهش فوق العاده دمای لبه‌های برنده ابزار فولاد تندر (HSS) پرداخته می‌شود تا اثرات این ماده خنک‌کننده بر عمر ابزار حین عملیات تراشکاری فولاد 1045 مورد بررسی قرار گیرد. گاز مبرد R410A مخلوطی از ۵۰ درصد گاز مبرد دی فلوئورو متان (R32) و ۵۰ درصد گاز پنتا فلوئورو اتان (R125) می‌باشد. این گاز کاملاً بی‌رنگ، غیر سمی، غیر قابل اشتعال و دوست دار محیط زیست است. کاربرد اصلی مبرد R410a در صنعت تاسیسات سرمایشی می‌باشد و قابلیت کاهش دما تا -۵۰ درجه سانتیگراد را در محل اعمال دارد. انتخاب مواد در این تحقیق با توجه به اهمیت فولاد CK45 و ماشینکاری آن در صنعت و همچنین قیمت مناسب ابزار فولاد تندر نسبت به سایر ابزارهای ماشینکاری است.

در هر مرحله از سیکل روتراشی نوع سیال خنک کاری، سرعت برشی، مقدار پیشروی و عمق بار مشخص و ثابت می باشد. ضمناً داده های مربوط به میزان فرسایش ابزار توسط دوربین میکروسکوپ دستگاه سیانسی امکو در محدوده های زمانی مدنظر از روی مدل اندازه گیری و ثبت می گردد. به این ترتیب در هر سیکل آزمایش در زمان های ۵ دقیقه ای (تا ۶۰ دقیقه)، میزان فرسایش ابزار اندازه گیری و ثبت می گردد. برای این منظور، تصاویر ثبت شده توسط دوربین دیجیتال که بر روی میکروسکوپ دستگاه سیانسی امکو نصب گردیده، به رایانه منتقل و توسط نرم افزار Digimizer تحلیل می شود. شکل (۱) نمونه ای از تصاویر بررسی شده در نرم افزار Digimizer را نشان می دهد.

نمونه های آماده شده بعد از بسته شدن در داخل سه نظام تحت عملیات روتراشی قرار گرفتند. عملیات روتراشی از ابتدای قطعه آغاز و همزمان زمان سنجی شروع به شمردن دقایق می کند و عملیات تا ۶۰ دقیقه ادامه پیدا می کند. در این مرحله چنانچه قبل از رسیدن به طول ۳۰۰ میلیمتری زمان به پایان برسد، اندازه گیری در طول مربوطه و با توجه به بازه های زمانی ۵ دقیقه در موقعیتی که ابزار در بازه های زمانی ذکر شده داشته است اندازه گیری می شود و چنانچه با وجود رسیدن به انتهای مسیر ۳۰۰ میلیمتری زمان به پایان نرسیده باشد؛ ابزار به ابتدای مسیر برگشته و عملیات تا رسیدن به زمان ۶۰ دقیقه ادامه پیدا می کند. لازم به ذکر است که در چنین حالتی ابزار بدون سنگ زنی باید تا طی شدن کامل زمان به ماشینکاری ادامه دهد.



تصویر لبه ابزار قبل از فرسایش



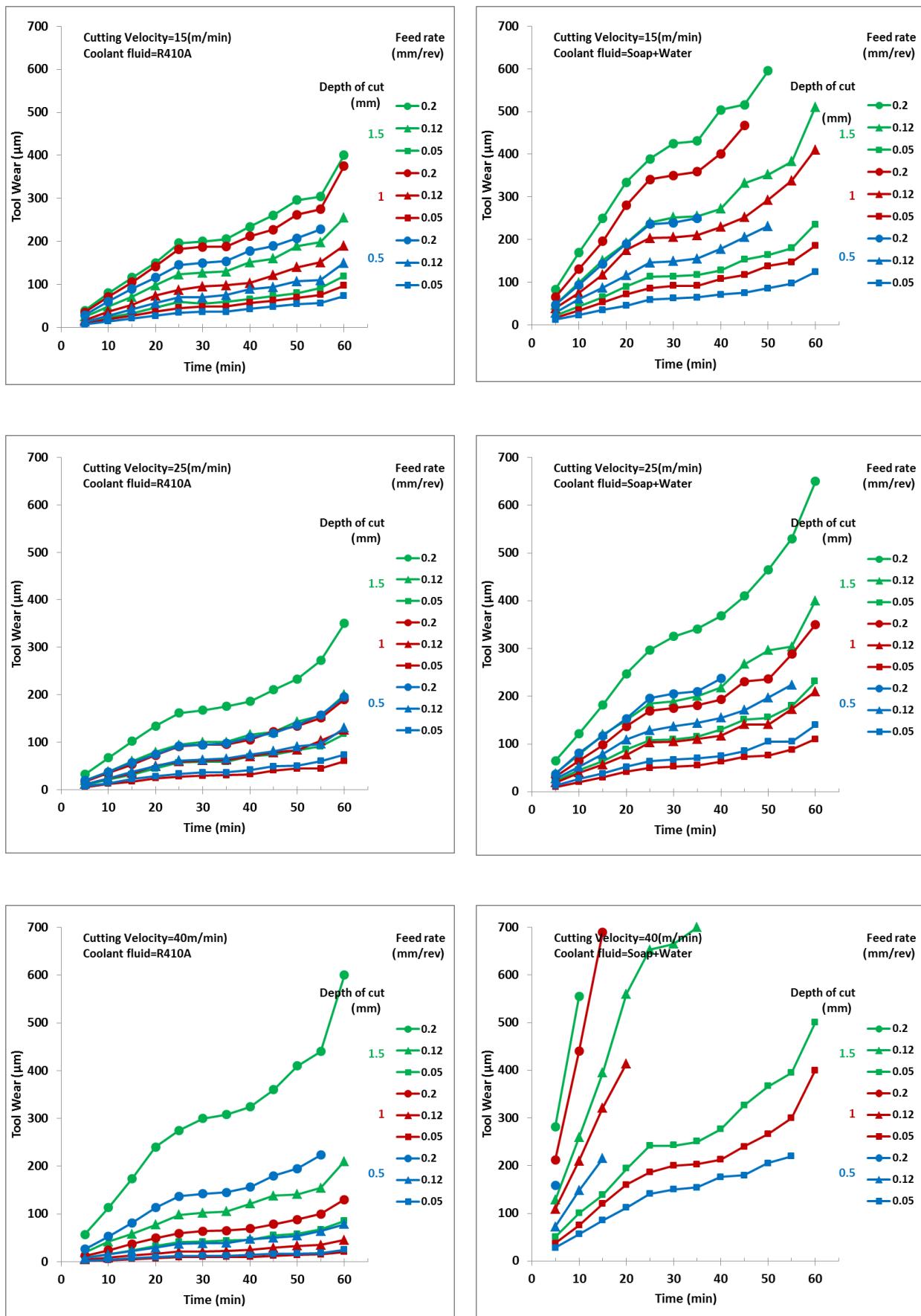
تصویر لبه ابزار بعد از فرسایش

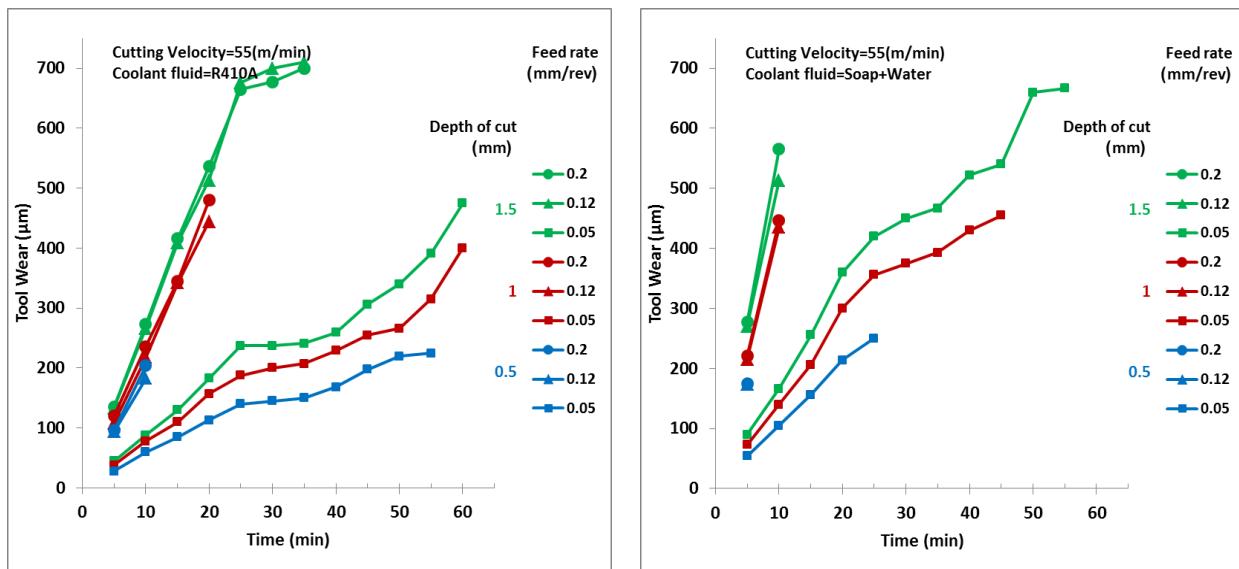
شکل ۱ نمونه ای از تصاویر بررسی شده در نرم افزار Digimizer

۳- نتایج و بحث

در جداول (۱) تا (۸) که به پیوست آمده است و شکل (۲) نتایج برای چهار سرعت برش، سه عمق بار مختلف و سه سرعت پیشروی ابزار و مقادیر فرسایش ابزار در زمان های ۵ دقیقه ای تا زمان نهایی ۶۰ دقیقه (۱۲ مرحله) ثبت گردیده است. در جداول علامت (-) به معنای از بین رفتن کامل لبه برنده ابزار در آن زمان مشخص می باشد.

سرعت های برشی در نظر گرفته شده برای آزمایش برابر ۱۵، برای آزمایش، سرعت های برشی ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۵۵ متر بر دقیقه، عمق بارهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلیمتر و پیشروی های ۰/۰۵، ۰/۱۲، ۰/۲ میلیمتر در هر دور در نظر گرفته شدند. بنابراین با توجه به اینکه کلیه پارامترها یک مرحله برای سیال آب-صابون و مرحله دیگر برای سیال R410a ثبت گردیدند مفهوم عمق برش (Depth of Cut) نصف کاوش قطر قطعه کار در هر مرحله از روتراشی است.





شکل ۲ فرسایش ابزار در شرایط مختلف سرعت برشی، عمق بار و سرعت پیشروی برای دو خنک کننده

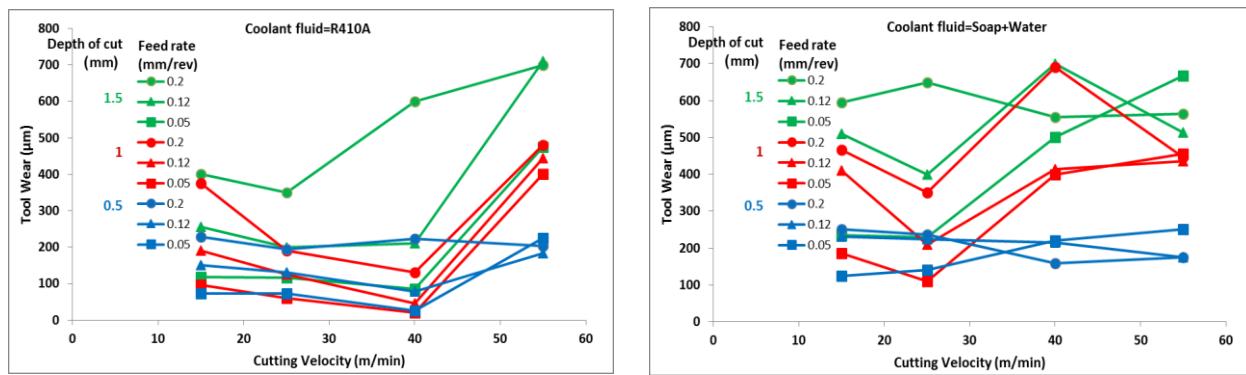
دقیقه رخ می‌دهد. تحلیل آماری نتایج با نرم افزار Minitab نیز این مطلب را تایید می‌کند (شکل ۴ و ۵).

در شکل (۴) متوسط سایش ابزار بر حسب سرعت برشی در عمق بار و سرعت پیشروی متغیر برای دو خنک کننده نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که به جز در سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه و عمق بار ۰/۵ میلیمتر، متوسط فرسایش ابزار با خنک-کننده R410a، کاهش بسیار چشمگیری نسبت به خنک کننده سنتی آب-صابون دارد.

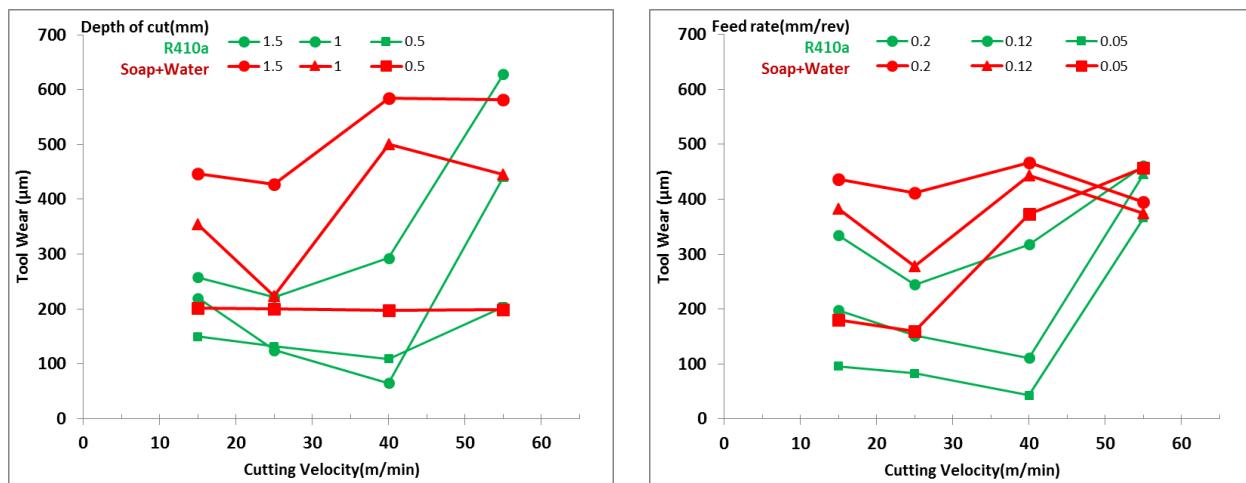
در شکل (۵) تحلیل آماری برمبنای عوامل موثر بر سایش ابزار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در مجموع متوسط سایش ابزار با خنک کننده R410a با ۲۳۸ میکرون، ۳۵ درصد کمتر از خنک کننده آب-صابون (۳۶۴ میکرون) است. در شکل (۵) (الف) در هر دو خنک کننده با تغییر سرعت‌های برشی، کمینه فرسایش ابزار مشاهده می‌شود که این مقدار برای خنک-کننده R410a و آب-صابون به ترتیب در سرعت‌های ۴۰ و ۲۵ متر بر دقیقه است. از طرفی با افزایش عمق بار و پیشروی در هر دو خنک کننده، مقدار سایش ابزار افزایش می‌یابد. در شکل (۵) (ب) با افزایش عمق برش از ۰/۵ به ۱ میلیمتر، میزان سایش ابزار در خنک کننده R410a کمتر از آب-صابون است و پس از آن شیب (سرعت) افزایش سایش ابزار در هر دو خنک کننده تقریباً برابر است. در شکل (۵) (ج) با افزایش سرعت پیشروی از ۰/۰۵ به ۰/۱۲ میلیمتر بر دور، شیب (سرعت) افزایش سایش ابزار در هر دو خنک کننده تقریباً موازی یکدیگر است و پس از آن در حالی که سایش ابزار در خنک کننده R410a با روند خطی افزایش می-یابد، این تغییرات در خنک کننده آب-صابون کمی کاهنده است.

مشاهده می‌شود فرسایش ابزار با استفاده از خنک کننده R410a در همه حالات سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه زیر میکرومتر ۴۰۰ اندازه گیری شده است. همین شرایط در سرعت برشی ۲۵ و ۴۰ متر بر دقیقه (به جز در عمق بار ۱/۵ میلیمتر و سرعت پیشروی ۰/۰۲ میلیمتر بر دور) هم وجود دارد. از طرفی در سیال آب-صابون با افزایش سرعت برشی در همه حالات، نرخ فرسایش ابزار با گذشت زمان به صورت تصاعدی افزایش یافته است و حتی در مواردی (سرعت برشی ۵۵۵ و ۴۰۰ متر بر دقیقه و عمق بار ۰/۵ میلیمتر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور؛ سرعت برشی ۵۵۵ متر بر دقیقه و عمق بار ۰/۵ میلیمتر و سرعت پیشروی ۰/۰ میلیمتر بر دور) ابزار در ۵ دقیقه نخست، کارایی خود را از دست داده است. ابزار در خنک کننده آب-صابون در سرعت‌های برشی ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ متر بر دقیقه به ترتیب در ۴، ۲، ۹ و ۷ حالت، از بین رفته و تا ۶۰ دقیقه کارایی نداشته است. در حالی که در R410a این موضوع در ۱، ۰، ۱ و ۷ مورد رخ داده است. در خنک کننده R410a کمترین و بیشترین نرخ سایش در ابزار به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۲۴ میکرومتر بر دقیقه به ترتیب برای (سرعت برشی - عمق بار - سرعت پیشروی) ۱-۴۰-۰/۰۵-۰/۰۵-۰/۰۵-۰/۰۵ و در خنک کننده آب-صابون کمترین و بیشترین نرخ سایش در ابزار به ترتیب ۱/۸۳ و ۰/۵۶ میکرومتر بر دقیقه برای ۱-۲۵-۰/۰۵-۰/۰۵-۰/۰۵-۰/۰۵ حاصل می‌شود.

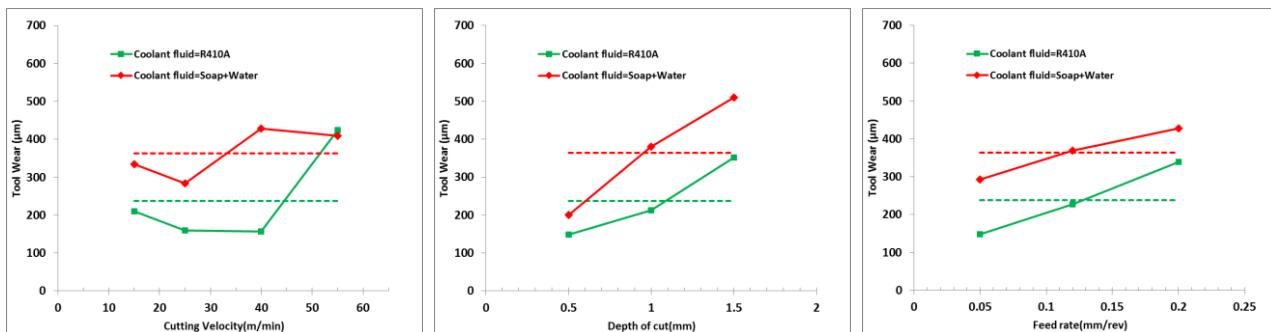
شکل (۳) سایش ابزار بر حسب سرعت برشی در عمق بار و سرعت پیشروی متغیر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در خنک کننده R410a سایش ابزار در اکثر موارد در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه حالت کمینه‌ای دارد در حالی که در خنک کننده آب-صابون حالت کمینه عمدتاً در سرعت برشی ۲۵ متر بر



شکل ۳ سایش ابزار بر حسب سرعت برشی در عمق بار و سرعت پیشروی متغیر



شکل ۴ متوسط سایش ابزار بر حسب سرعت برشی در عمق بار و سرعت پیشروی متغیر



شکل ۵ تحلیل آماری نتایج برای خنک کننده R410a و آب-صابون

در هر دور ثبت گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که خنک کاری به-وسیله مبرد R410a به علت قدرت سرمایش بالا و کنترل بهتر دمای محل برش نسبت به سیال آب-صابون در فرآیند ماشینکاری، سبب کاهش میزان فرسایش ابزار گردیده و می‌تواند به عنوان سیال مناسب خنک کاری به کار گرفته شود. در خنک-کننده R410a نرخ سایش تا $0.33/0.0$ میکرومتر بر دقیقه کاهش می‌یابد. براساس کمینه فرسایش ابزار در حالات مختلف، با استفاده از مبرد R410a می‌توان سرعت برشی را 60 درصد افزایش داد و از 25 متر بر دقیقه تا 40 متر بر دقیقه رساند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از مبرد R410a و مقایسه آن با سیال سنتی آب-صابون در خنک کاری لبه برنده ابزار، به تاثیر اعمال این سیال بر عمر ابزار و کاهش فرسایش لبه برنده ابزار پرداخته شد. با در نظر گرفتن مدل‌هایی از جنس فولاد AISI45 و تراشکاری آنها به‌وسیله ابزار HSS، اثرات سیال خنک کننده در سرعت‌های برشی 15 ، 25 ، 40 ، 55 متر بر دقیقه، عمق بارهای 0.05 ، 0.1 ، 0.2 میلیمتر و پیشروی‌های $0.05/0.12$ ، $0.12/0.2$ میلیمتر

- Cutting parameters determination in milling of AISI 1045 steel, *Universidad y Sociedad*, Vol. 12(6), pp. 207-214, (2020).
- [11] Hernández González, L.W., Seid Ahmed, Y., Pérez Rodríguez, R., Zambrano Robledo, P.D.C., and Guerrero Mata, M.P., Selection of machining parameters using a correlative study of cutting tool wear in high-speed turning of AISI 1045 steel, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 2(4), pp. 66, (2018).
- [12] Shnfir, M., Olufayo, O.A., Jomaa, W., and Songmene, V., Machinability study of hardened 1045 steel when milling with ceramic cutting inserts, *Materials*, Vol. 12(23), pp. 3974, (2019).
- [13] Bartarya, G., and Choudhury, S.K., State of the art in hard turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53(1), pp. 1-14, (2012).
- [14] Chinchanikar, S., and Choudhury, S.K., Machining of hardened steel-experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, pp. 95-109, (2015).
- [15] Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., and Budzik, G., Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production—a review, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, pp. 601-615, (2019).
- [16] Ajaja, J., Jomaa, W., Bocher, P., Chromik, R.R., Songmene, V., and Brochu, M., Hard turning multi-performance optimization for improving the surface integrity of 300M ultra-high strength steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104(1), pp. 141-157, (2019).
- [17] Li, B., Zhang, S., Yan, Z., and Zhang, J., Effect of edge hone radius on chip formation and its microstructural characterization in hard milling of AISI H13 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97(1), pp. 305-318, (2018).
- [18] Cui, X., Jiao, F., Zhao, B., and Guo, J., A review of high-speed intermittent cutting of hardened steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93(9), pp. 3837-3846, (2017).
- [19] Muñoz-Escalona, P., Díaz, N., and Cassier, Z., Prediction of tool wear mechanisms in face milling AISI 1045 steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21(6), pp. 797-808, (2012).
- [20] Costa, D.M.D., Brito, T.G., de Paiva, A.P., Leme, R.C., and Balestrassi, P.P., A normal boundary intersection with multivariate mean square error

همچنین در بهینه‌ترین حالت، میزان فرسایش ابزار تا ۲۰ برابر بهبود می‌یابد و در سرعت برشی ۴۰ بر دقيقه، عمق براده برداری ۱ میلیمتر و پیشروی ۰/۰۵ میلیمتر بر دور از ۴۰۰ به ۵۰ میکرومتر کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Yildiz, Y., and Nalbant, M., A review of cryogenic cooling in machining processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48(9), pp. 947-964, (2008).
- [2] Rahman, M., and Senthil Kumar, A., Evaluation of minimal of lubricant in end milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18(4), pp. 235-241, (2001).
- [3] Adler, D.P., Hii, W.S., Michalek, D.J., and Sutherland, J.W., Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns, *Machining Science and technology*, Vol. 10(1), pp. 23-58, (2006).
- [4] Diniz, A.E., and Micaroni, R., Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42(8), pp. 899-904, (2002).
- [5] Paul, S., and Chattopadhyay, A.B., The effect of cryogenic cooling on grinding forces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36(1), pp. 63-72, (1996).
- [6] Paul, S., and Chattopadhyay, A.B., Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling, *Machining Science and Technology*, Vol. 10(1), pp. 87-131, (2006).
- [7] Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T., and Sheikh, M.A., Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46(7-8), pp. 782-800, (2006).
- [8] Majumdar, P., Jayaramachandran, R., and Ganesan, S., Finite element analysis of temperature rise in metal cutting processes, *Applied thermal engineering*, Vol. 25(14-15), pp. 2152-2168, (2005).
- [9] Ahmed, M.I., Ismail, A.F., Abakr, Y.A., and Amin, A.N., Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder, *Journal of materials processing technology*, Vol. 185(1-3), pp. 91-96, (2007).
- [10] Hernández-González, L.W., Dumitrescu, L., Quesada-Estrada, A.M. and Reyes-Camareno, R.,

- [26] Debnath, S., Reddy, M.M., and Yi, Q.S., Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, *Journal of cleaner production*, Vol. 83, pp. 33-47, (2014).
- [27] El-Hossainy, T.M., Tool wear monitoring under dry and wet machining, *Materials and Manufacturing processes*, Vol. 16(2), pp. 165-176, (2001).
- [28] Ghosh, S., and Rao, P.V., Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 100, pp. 17-34, (2015).
- [29] Lawal, S.A., Choudhury, I.A., and Nukman, Y., A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, pp. 210-221, (2013).
- [30] Fnides, M., Yallese, M.A., Khattabi, R., Mabrouki, T., and Girardin, F., Modeling and optimization of surface roughness and productivity thru RSM in face milling of AISI 1040 steel using coated carbide inserts, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 8(4), pp. 493-512, (2017).
- [31] Masmiati, N., and Sarhan, A.A., Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress-Taguchi approach, *Measurement*, Vol. 60, pp. 267-275, (2015).
- [32] Masmiati, N., Sarhan, A.A., Hassan, M.A.N., and Hamdi, M., Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel, *Measurement*, Vol. 86, pp. 253-265, (2016).
- [21] Brito, T.G., Paiva, A.P., Paula, T.I., Dalosto, D.N., Ferreira, J.R., and Balestrassi, P.P., Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84(5), pp. 1185-1199, (2016).
- [22] Junior, A.S.A., Sales, W.F., da Silva, R.B., Costa, E.S., and Machado, Á.R., Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 156, pp. 635-647, (2017).
- [23] Iqbal, S.A., Mativenga, P.T., and Sheikh, M.A., Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds, Part 2: evaluation of flow stress models and interface friction distribution schemes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221(5), pp. 917-926, (2007).
- [24] Iqbal, S.A., Mativenga, P.T., and Sheikh, M.A., Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 1: Investigation of contact phenomena, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221(5), pp. 909-916, (2007).
- [25] Iqbal, S.A., Mativenga, P.T., and Sheikh, M.A., Contact length prediction: mathematical models and effect of friction schemes on FEM simulation for conventional to HSM of AISI 1045 steel, *International journal of machining and machinability of materials*, Vol. 3(1-2), pp. 18-33, (2008).

پیوست ها

جدول ۱ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و برای سیال R410a

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیش روی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده R410a											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
15	0.5	0.05	7	14	21	27	34	36	36	43	48	54	56	73
		0.12	13	27	42	56	70	70	75	89	94	107	110	150
		0.2	28	60	90	116	145	150	154	178	189	207	228	-
	1	0.05	9	19	27	36	45	48	48	57	62	69	76	97
		0.12	17	37	53	74	87	95	98	103	121	140	151	190
		0.2	35	71	105	142	182	187	188	212	227	262	275	375
	1.5	0.05	11	23	33	46	59	55	59	66	73	80	91	119
		0.12	25	48	71	98	123	127	130	151	160	189	198	255
		0.2	39	80	116	150	196	200	205	234	261	296	304	400

جدول ۲ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و برای سیال آب - صابون

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیش روی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده آب - صابون											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
15	0.5	0.05	12	23	35	45	59	62	64	71	75	86	97	124
		0.12	28	61	87	116	146	149	155	178	205	231	-	-
		0.2	47	94	143	190	236	239	250	-	-	-	-	-
	1	0.05	17	34	53	72	86	92	92	108	117	138	147	185
		0.12	39	75	118	175	203	205	210	229	252	293	338	410
		0.2	65	131	196	280	341	350	359	401	467	-	-	-
	1.5	0.05	22	43	65	90	113	114	117	128	153	164	180	235
		0.12	47	99	151	192	240	252	255	272	332	352	383	510
		0.2	83	170	250	334	389	425	431	504	516	595	-	-

جدول ۳ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه و برای سیال R410a

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیش روی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده R410a											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
25	0.5	0.05	7	13	22	28	33	36	36	41	49	50	60	73
		0.12	11	24	38	49	61	63	65	74	81	91	96	130
		0.2	19	37	57	74	92	94	97	110	119	136	157	195
	1	0.05	5	12	17	24	27	29	30	32	40	44	44	60
		0.12	11	24	34	50	59	61	62	70	78	83	103	125
		0.2	17	35	53	72	91	94	95	105	122	134	151	190
	1.5	0.05	10	21	32	44	57	58	58	70	74	83	91	117
		0.12	19	38	60	79	94	100	100	116	121	143	155	200
		0.2	32	67	102	134	161	167	175	186	210	233	272	350

جدول ۴ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه و برای سیال آب - صابون

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیشروی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده آب - صابون											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
25	0.5	0.05	13	27	38	52	64	67	70	75	85	105	105	140
		0.12	27	52	79	109	128	137	144	155	171	197	224	-
		0.2	37	81	117	153	196	205	210	237	-	-	-	-
	1	0.05	10	20	30	42	50	53	55	63	73	76	88	110
		0.12	19	40	57	77	103	105	110	117	141	141	173	210
		0.2	32	65	98	137	169	175	181	193	231	236	288	350
	1.5	0.05	22	45	64	88	108	109	115	130	151	155	179	230
		0.12	38	78	120	150	185	189	200	218	267	296	304	400
		0.2	65	122	182	247	297	325	341	368	410	465	530	650

جدول ۵ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه و برای سیال R410a

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیشروی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده R410a											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
40	0.5	0.05	2	4	7	9	12	12	12	14	16	17	18	25
		0.12	7	15	22	29	37	38	39	47	50	54	64	78
		0.2	26	53	81	113	137	142	145	156	180	195	223	-
	1	0.05	1	3	5	7	9	10	10	10	12	14	15	20
		0.12	4	8	13	16	21	21	22	25	29	33	35	45
		0.2	12	24	37	49	59	64	65	69	78	88	100	130
	1.5	0.05	8	15	24	33	41	42	44	45	55	58	67	85
		0.12	19	42	58	77	98	102	105	121	138	141	154	210
		0.2	57	113	174	240	275	300	308	324	360	410	440	600

جدول ۶ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه و برای سیال آب - صابون

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیشروی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده آب - صابون											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
40	0.5	0.05	28	56	85	112	141	150	154	176	180	205	220	-
		0.12	72	148	215	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	158	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	0.05	37	75	120	160	186	200	203	213	240	266	300	400
		0.12	109	210	321	414	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	212	440	690	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	0.05	50	100	138	193	241	242	250	276	326	366	394	500
		0.12	128	259	395	560	653	665	700	-	-	-	-	-
		0.2	282	555	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول ۷ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۵۵ متر بر دقیقه و برای سیال R410a

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیشروی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده R410a											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
55	0.5	0.05	28	60	85	113	140	145	150	168	198	220	225	-
		0.12	94	183	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	96	204	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	0.05	38	78	110	157	188	200	207	229	255	266	315	400
		0.12	108	218	342	444	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	120	236	345	480	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	0.05	45	88	130	183	237	237	241	259	306	340	391	475
		0.12	133	266	409	513	676	700	710	-	-	-	-	-
		0.2	135	273	416	536	665	677	700	-	-	-	-	-

جدول ۸ داده های ثبت شده برای فرسایش ابزار در سرعت برشی ۵۵ متر بر دقیقه و برای سیال آب - صابون

سرعت برش m/min	عمق بار mm	پیشروی mm/rev	مقدار فرسایش ابزار در دقیقه با خنک کننده آب - صابون											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
55	0.5	0.05	54	105	156	214	250	-	-	-	-	-	-	-
		0.12	174	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	0.05	73	140	206	300	356	375	393	430	455	-	-	-
		0.12	215	435	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	221	446	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	0.05	90	166	256	360	420	450	467	522	540	660	667	-
		0.12	270	513	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.2	277	565	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

مروری بر فرایندهای اتصال حالت جامد مبتنی بر اصطکاک دورانی

موسی ساجد*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

سید محمدحسین

سید کاشی
استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بیرجند، بیرجند

چکیده: فناوری های اتصال و فرآوری حالت جامد در حال تبدیل شدن به یک جایگزین دائمی برای اتصال آلیاژهای نرم هستند که با روش های متداول ذوبی به سختی قابل جوشکاری هستند. با گذشت سه دهه از ابداع این روش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود را به عنوان پیشتر از اتصال ورق های آلومینیومی با استحکام بالا معرفی نموده است که کاربرد اصلی آن ها در صنایع خودروسازی و صنایع فضایی است. همچنین این روش موفقیت نسبی در اتصال سایر آلیاژها نیز از خود نشان داده است. با توجه به موفقیت قابل توجه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، زمینه لازم برای استفاده در کاربردهای پیچیده تر و جوشکاری آلیاژهای فولادی است، با این حال، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تنها فرایند موفق مبتنی بر اصطکاک دورانی نیست. در سال های اخیر جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار که روشی موفق در ترمیم آسیب های سطحی و عمقی آلیاژهای فولادی است، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در مقاله حاضر، عمدۀ فرایندهای مبتنی بر اصطکاک دورانی در دو دسته اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار معرفی شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

واژه های راهنمایی: جوشکاری حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار، اصطکاک دورانی، آلیاژهای آلومینیوم، فولاد

مقاله مروی

دربافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

A review of rotary friction-based solid-state joining processes

Moosa Sajed*
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani
University, Tabriz

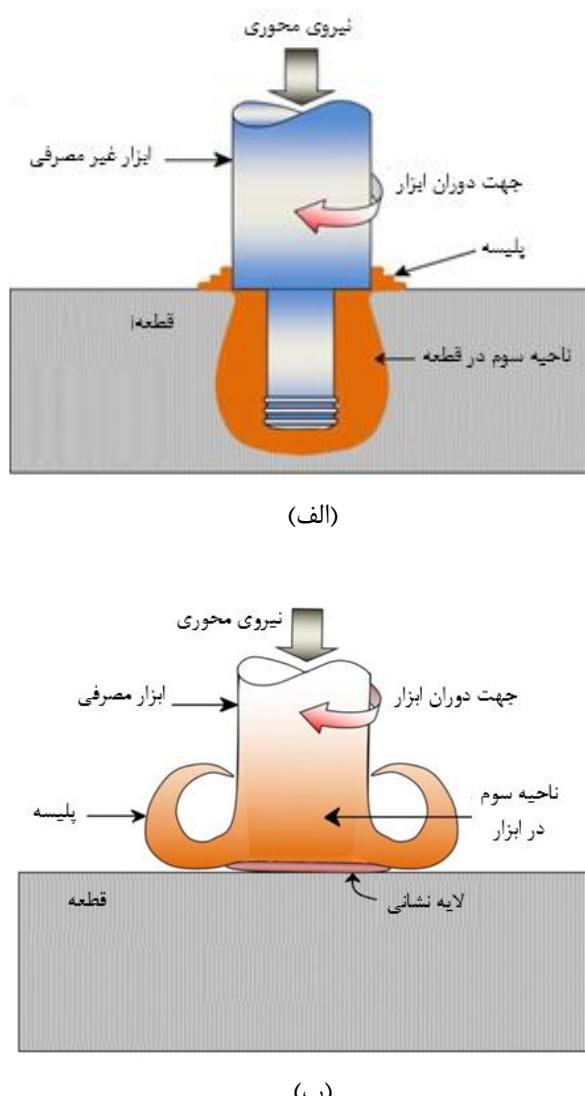
**Seyed Mohammad
Hossein Seyedkashi**
Professor, Department of
Mechanical Engineering,
University of
Birjand, Birjand

Abstract: Solid-state welding and processing methods will be an alternative to joining lightweight metals that cannot be welded using conventional fusion welding processes. After three decades after its invention, FSW is the first choice in joining high-strength aluminum alloys with an application in automotive and aerospace. The process is also capable of joining other alloys too. Due to the success of FSW, it was considered for more complicated applications and joining high-strength alloys. It should be noted that FSW is not the only successful rotary friction-based solid-state welding process. In recent years, friction hydro-pillar processing (FHPP) which is successful in repairing surface and body cracks and defects of different steel grades is also very interesting. In the present study, main rotary friction-based welding and processing methods are introduced and discussed in two major classes including friction stir welding and friction hydro-pillar processing.

Keywords: Solid-state welding, Friction stir welding, Friction hydro-pillar processing, rotary friction, aluminum alloys, Steel

نیکل و تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفته است، اما به دلیل خاصیت ذوبی روش‌های ساخت افزایشی مانند استفاده از لیزر، پرتو الکترون یا قوس الکتریکی، این روش‌ها چندان برای آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و مس مورد توجه نبوده‌اند [۴]. در این بخش به مرور روش‌های اصلاح سطح و آلیاژسازی انتخابی^۲ انجام شده تا کنون پرداخته شده است.

۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۱ تشکیل ناحیه سوم در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی.
(الف) ابزار غیرمصرفی، (ب) ابزار مصرفی [۱]

ناحیه سوم در اثر افزایش دمای ناشی از حرارت اصطکاکی بین ابزار و قطعه کار تولید می‌شود. این دما، دمایی مابین دمای تبلور مجدد و نقطه ذوب فلز است. خواص این ناحیه شامل ویسکوزیته

۱- مقدمه

فناوری اصطکاکی اغتشاشی به دو دسته عمده جوشکاری و فرآوری تقسیم می‌شود. در حوزه جوشکاری بیشتر اتصال فلزات مد نظر قرار دارد؛ این در حالی است که در فرآوری افزایش کیفیت مواد به لحاظ مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مدنظر است. به طور کلی فناوری اصطکاکی اغتشاشی شامل یک ابزار دوار است که در تماس با قطعه کار حرارت لازم را برای انجام فرایند مورد نظر تولید می‌کند. این ابزار ممکن است مصرفی یا غیر مصرفی باشد. در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی یک ناحیه سوم تشکیل می‌شود که به دلیل حرارت ورودی بالا، در عین جامد بودن قابلیت سیلان را دارد. بسته به مصرفی یا غیرمصرفی بودن ابزار، این ناحیه سوم در قطعه کار یا بر روی ابزار ایجاد می‌شود. تشکیل این ناحیه در شکل (۱ الف و ب) به ترتیب برای ابزار غیرمصرفی و مصرفی نشان داده شده است [۱].

روش‌های جوشکاری حالت جامد به دلیل مزایای ثابت شده آن‌ها نسبت به روش‌های معمول، به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. چون کل فرایند بدون ذوب کردن اتفاق می‌افتد، عیوب مربوط به فرایند انجام‌داد کاهش یافته و حتی به طور کامل حذف می‌شود. این عیوب عبارتند از تخلخل، جدایش محلول، ترک‌های انجام‌دادی، ترک‌های ذوبی و جذب گاز (اکثراً هیدروژن و نیتروژن) که در این روش‌ها در محدوده جوشکاری دیده نمی‌شوند [۲].

با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه تکنولوی نیازهای جدیدی ظهور کرده‌اند. از جمله این نیازها می‌توان به نیاز به استفاده از آلیاژهایی را اشاره نمود که لازم است در حجم و یا سطح خود یکنواخت نبوده و مشتمل بر چند آلیاژ باشد. در واقع لازم است تا در کاربردهای خاص، آلیاژهایی بسازیم که به صورت انتخابی در قسمت‌های مختلف دارای الگوهای مشخصی باشند و درصد عناصر آلیاژی در سطح و حجم آن متفاوت باشد. استفاده از تکنولوژی لیزر یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان به این مهم در سطح قطعه دست یافت. همچنین اخیراً از روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی نیز برای این مهم استفاده شده است [۳].

روش‌های ساخت افزایشی^۱ در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که این به دلیل مزایای آن نسبت به روش‌های متداول ساخت و تولید است. ساخت افزایشی به صورت موفقیت‌آمیزی برای ساخت شکل‌های پیچیده از آلیاژهای آهن،

² Selective alloying

¹ Additive Manufacturing (AM)

حرکت دورانی و خطی ابزار منجر به حرکت مواد نرم شده از قسمت جلوی پین^۴ به پشت ابزار می‌شود. شانه ابزار با اعمال نیروی آهنگری بر مواد پشت پین باعث پرشدن حفره ناشی از حرکت پین می‌شود. این عمل بسته به دما و فشار فرایند باعث اختلاط مواد به صورت نفوذ اتمی یا ترکیب مواد می‌شود که در نهایت منجر به اتصال دو قطعه می‌گردد.

۴. مرحله خروج از قطعه و خنک کاری.^۵ با رسیدن به انتهای خط جوش، ابزار از قطعه خارج می‌شود و حفره‌ای را در آن به جا می‌گذارد. فرایندهایی برای پر کردن این حفره در نظر گرفته شده است که شامل پرکردن مجدد حفره ایجاد شده یا افزایش طول خط جوش به منظور قرار گرفتن حفره در خارج از خط جوش اصلی است [۵].

وظایف اصلی ابزار تولید حرارت ناشی از تغییر شکل یا اصطکاک، کنترل سیلان مواد و نگهداری مواد نرم شده زیر شانه ابزار است. در جوشکاری ورق‌های نازک عمدۀ حرارت توسط شانه تأمین می‌شود. این در حالی است که در جوشکاری صفحات ضخیم بیشتر حرارت توسط پین تولید می‌شود. با ایجاد تغییراتی در هندسه پین یا شانه ابزار می‌توان حرارت بیشتری تولید نمود. پارامترهای اصلی جوشکاری عبارتند از سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار، عمق نفوذ شانه ابزار و زاویه ابزار. جدا از این‌ها، هندسه ابزار نیز نقش مهمی در فرایند جوشکاری دارد. سرعت دورانی و خطی میزان حرارت تولید شده و میزان تغییر شکل پلاستیک ناشی از آن و حرارت تولیدی ناشی از تغییر شکل پلاستیک را کنترل می‌کنند. این دو پارامتر در کنار میزان نفوذ شانه ابزار بر میزان فشار وارده به قطعه مؤثر هستند که به نوبه خود بر کیفیت جوش مؤثر است. به ابزار کمی زاویه داده می‌شود و شانه ابزار کمی در قطعه نفوذ داده می‌شود که هر دو این کارها به انجماد مواد در پشت پین کمک می‌کند. در حالت کلی افزایش سرعت دورانی باعث افزایش حرارت تولیدی می‌شود. این در حالی است که افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش زمان در دسترس بودن حرارت، منجر به کاهش حرارت ورودی می‌شود. در حالت کلی برای دستیابی به اتصال مناسب، میزان حرارت ورودی به ناحیه جوشکاری نباید خیلی زیاد یا خیلی کم باشد [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند غیرذوبی محسوب می‌شود که منجر به عدم ایجاد عیوب ناشی از انجماد که در جوشکاری‌های ذوبی اتفاق می‌افتد می‌شود. از این روش

بالا و تنفس سیلان پایین است. تشکیل ناحیه سوم وجه تمایز میان فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی و فرایندهای ذوبی است. در این ناحیه امکان نفوذ بین اتمی و اختلاط بین مواد را در دماهای بالاتری ممکن می‌شود. در نتیجه مواد حاضر در این ناحیه می‌تواند اتصال مستحکمی را با مواد دیگر از یک جنس همسان یا ناهمسان تشکیل دهد. بنابراین، اصلی‌ترین هدف در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی، ایجاد حرارت اصطکاکی مناسب است به صورتی که امکان ایجاد ناحیه سوم فراهم شود [۱]. در ادامه اهم فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی به اختصار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انقلابی را در زمینه اتصال مواد با استحکام پایین ایجاد کرد. در این روش از دو نوع ماشین استفاده می‌شود. ماشین با کنترل فشار یا ماشین با کنترل جابجایی. شکل (۲) طرح‌واره این فرایند را به تصویر کشیده است. ابزار غیرصرفی، اصلی‌ترین بخش فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که شامل یک شانه و یک پین است. انتخاب جنس و هندسه ابزار تابع جنس و هندسه قطعه کار و شرایط جوشکاری است. مراحل جوشکاری در شکل (۲) نشان داده شده است که شامل موارد زیر است:

۱. مرحله نفوذ: ابزار در حالی که با یک سرعت ثابت در حال دوران است توسط یک نیروی عمودی در نقطه آغازین خط جوش در قطعه کار نفوذ می‌کند تا زمانی که شانه ابزار در تماس با سطح قطعه کار قرار گیرد. این مرحله، آغازگر فرایند تغییر شکل است.

۲. مرحله نگهداری ابزار: ابزار با حفظ نیروی رو به پایین و در حالی که شانه آن در تماس با سطح قطعه کار است، بسته به جنس و ضخامت قطعه کار به مدت ۵ تا ۱۰ ثانیه دوران می‌کند. این مرحله منجر به تولید حرارت لازم برای سیلان مواد می‌شود که به نوبه خود به تولید حرارت بیشتر منجر می‌گردد. مواد نرم شده‌ای که در پیش روی ابزار قرار دارند، حرکت ملایم ابزار را در ادامه فرایند جوشکاری تضمین می‌کنند.

۳. مرحله جوشکاری: ابزار دور با شانه‌ای که حجم جوش را پوشانده است تحت فشار محوری و با پیشروی در مسیر تعیین شده اقدام به جوشکاری می‌کند. دوران ابزار با ایجاد اصطکاک و تغییر شکل به تولید حرارت ادامه می‌دهد. عملکرد مهم دیگر دوران ابزار اغتشاش یا سیلان مواد است.

⁴ Advancing side

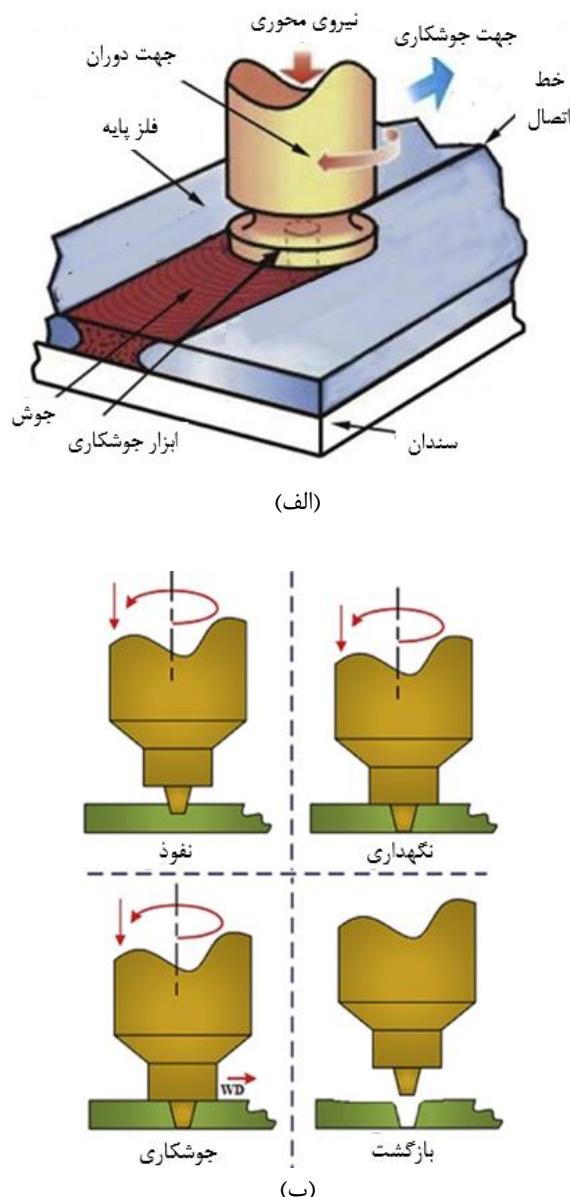
⁵ Retracting/cooling stage

¹ Plunging stage

² Dwelling stage

³ Welding stage

شده و شرایط یکنواخت تری را ایجاد می کند. این روش در شکل (۳) نشان داده شده است اما به نظر می رسد در حال حاضر نمی توان از این روش برای اتصال آلیاژهای آهن و نیکل استفاده نمود [۶].



شکل ۲ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی. (الف) ابزار در حین جوشکاری، (ب) مراحل جوشکاری نقطه‌ای [۵]

۲-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس

افزایش بیش از حد گرمای قطعه در جوشکاری صفحات ضخیم یک مشکل محسوب می شود که منجر به افت خواص مکانیکی

جوشکاری در مقیاس صنعتی برای اتصال آلیاژهای آلمینیوم استفاده شده است. بر طبق مطالعات صورت گرفته، کاربرد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای منیزیم هم مقرر به صرفه است. علاوه بر این با انتخاب صحیح جنس و شکل ابزار و پارامترهای جوشکاری مناسب، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را می توان برای آلیاژهای با استحکام بالا از جمله آلیاژهای پایه آهن، پایه مس، پایه تیتانیوم و پایه نیکل نیز به کار برد. امید آن وجود دارد که این آلیاژها نیز در آینده به صورت صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای غیرهمجنس، کامپوزیتهاي پایه فلزی، سرامیکها، پلیمرها، مورد استفاده قرار گرفته است.

بازده بالای انرژی، دوستدار محیط زیست بودن و حالت جامد بودن فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ویژگی های جذاب فیزیکی، مکانیکی و ریزاساختاری اتصالات اصطکاکی اغتشاشی و تعهد صنعتگران و پژوهشگران این حوزه به توسعه قابلیت اجرای این فرایند به دامنه وسیعی از مواد، منجر به توسعه گنجینه ارزشمندی از طراحی های ابزار، فناوری و مواد شده است. این فرایند با مشکلاتی نیز مواجه است که عبارتند از سرعت جوشکاری پایین، نیروی جوشکاری زیاد، گشتاور زیاد روی قطعه، ماشین آلات بزرگ، سایش ابزار، به کارگیری این روش برای مواد با استحکام بالا و غیره. برای حل این مسائل فرایند، ابزار و ماشین آلات مورد بازنگری قرار گرفته است. در این بخش، روش های نوین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از قبیل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس^۳، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی^۴، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوقلو^۵ و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از منبع انرژی ثانویه مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۱- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت

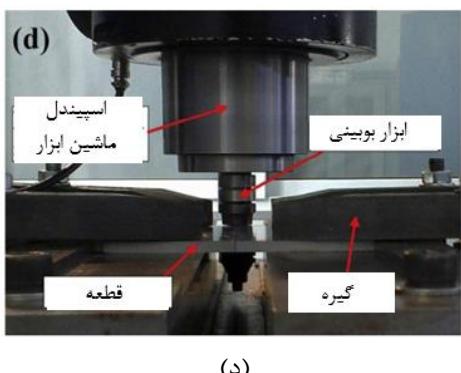
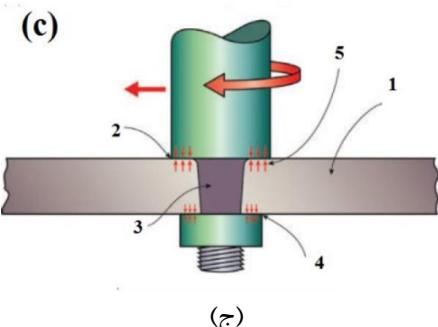
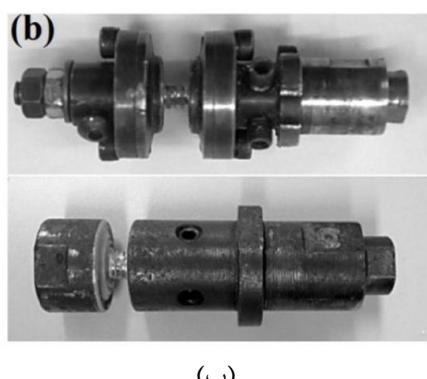
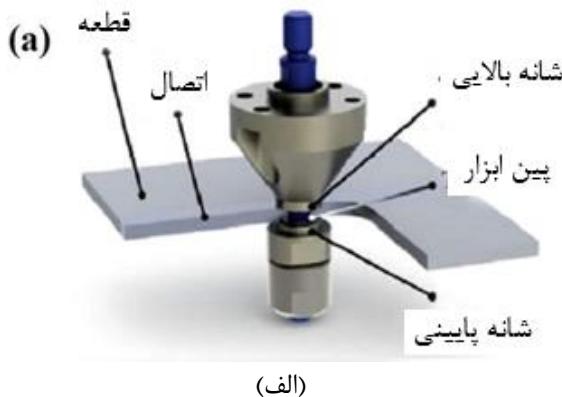
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت برای کاربرد در اتصال آلیاژهای پایه آلمینیوم ابداع شده است. در این روش شانه ثابت است و دوران ندارد و فقط یک حرکت لغزشی انجام می دهد. یک پین دوار که از داخل شانه رد می شود کار اتصال را انجام می دهد. ثابت بودن شانه باعث می شود که منطقه تحت تأثیر شانه کم شده و بار اصلی تولید حرارت بر دوش پین ابزار باشد که به نوبه خود منجر به از بین رفتن گرادیان دمایی شدید

³ Bobbin tool FSW (BTFSW)

⁴ Twin tool FSW (TTFSW)

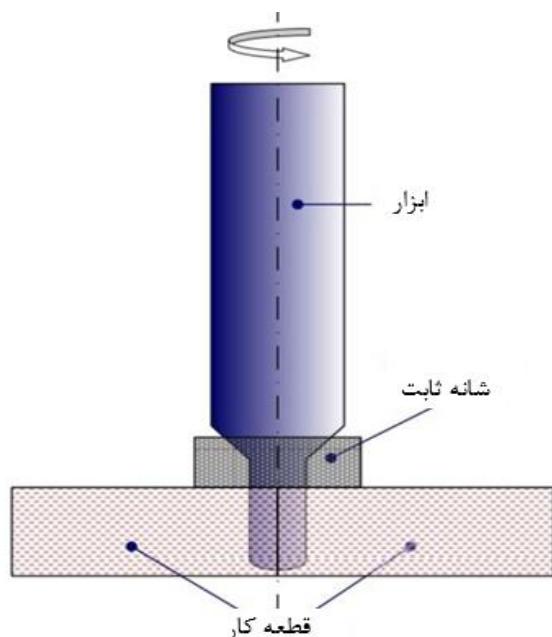
¹ Stationary shoulder FSW (SSFSW)

² Reverse dual rotation FSW (RDRFSW)



شکل ۴ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی، (الف) فرایند استفاده از ابزار بوبینی، (ب) ابزار بوبینی، (ج) حرکت ابزار و جهت فشار به قطعه کار، (د) جوشکاری با استفاده از ابزار بوبینی [۱]

اتصال می‌شود. این مورد به دلیل اختلاف زیاد بین سرعت خطی مرکز پین و بیشترین قطر شانه ایجاد می‌شود. این مشکل را می‌توان با چرخش مستقل پین و شانه حل نمود به طوری که بتوان سرعت دورانی پین را نسبت به شانه افزایش داد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس فرایندی است که در آن پین و شانه به صورت مستقل از هم و در جهت عکس یکدیگر دوران می‌کنند. اگرچه در این روش بخشی از گشتاور کلی اعمال شده به قطعه از بین می‌رود اما قطعه را نیز می‌توان با نیروی کمتری ثابت نمود [۷].



شکل ۳ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت [۱]

یک دیگر از مشکلات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تفاوت ریزساختاری بین جلوی پین و پشت آن است. با چرخش معکوس بین و شانه، این مورد تا حدود زیادی مرتفع شده و ریزساختار همگن تر می‌شود. اگرچه این روش اصلاح مناسبی از روش جوشکاری اصلی است اما مطالعات صورت گرفته در این حوزه فقط برای آلیاژهای آلومینیوم انجام پذیرفته است و کارایی آن برای سایر آلیاژها مورد مطالعه قرار نگرفته است. روش مشابه این فرایند موسوم به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو سرعته است که در آن پین و شانه به صورت مستقل از هم اما در یک جهت دوران می‌کنند. سرعت دورانی پین تأثیر زیادی در تشکیل لایه‌های پیازی و ناحیه اغتشاشی دارد. افزایش سرعت دورانی پین باعث افزایش بازدهی جوشکاری می‌شود در حالی که کاهش سرعت دورانی شانه منجر به شکل‌گیری بهتر جوش می‌شود [۷].

^۱ Dual rotation speed FSW (DRSFSW)

سیلان مواد، بازدهی فرایند، بهرهوری و کیفیت اتصال می‌شوند. این کار از طریق تولید حرارت یا دخالت مستقیم در نرم کردن مواد (جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک) انجام می‌پذیرد [۹].

۲-۵- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، شاخه‌ای از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که برای جوشکاری ورق‌هایی با قابلیت جوشکاری پایین که روی هم قرار گرفته‌اند به کار می‌رود. این فرایند شبیه جوشکاری خطی است با این تفاوت که حرکت خطی در این روش وجود ندارد. این روش را ابتدا صنعتگران شرکت هایی مثل صنایع فلزات سبک سومیتومو^۶ مزاده صنایع سنگین کاوازاکی^۷ و هیدرو نورسک^۸ به منظور حذف نیاز به پرچ کاری ابداع کردند. این روش کاربرد گسترده‌ای در جوشکاری آلیاژهای مختلف کردند. مختلط در صنایع گوناگون یافته است. در حال حاضر انواع مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل جوشکاری سنتی^۹ جوشکاری با پر کردن مجدد^{۱۰} روش‌های بدون پین از قبیل جوشکاری با سندان دوران^{۱۱} جوشکاری دو طرفه^{۱۲} وجود دارند. سایر روش‌های جوشکاری نقطه‌ای، روش‌های خطی با برد کوتاه هستند مانند جوشکاری دوختی^{۱۳} و جوشکاری الگویی^{۱۴} هستند.

شکل (۵) (الف) مراحل جوشکاری نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در مرحله نفوذ، پین رزوهدار ابزار دوران وارد ورق‌هایی که روی هم قرار گرفته‌اند می‌شود. اصطکاک بین ابزار و ورق بالایی باعث تولید حرارت می‌شود، در حالی که رزوه پین باعث سیلان مواد می‌شود. با تماس شانه ابزار با ورق، نیروی فورج زیادی تولید می‌شود. در ادامه به ابزار اجازه داده می‌شود تا بیشتر در قطعه کار نفوذ کند و ممکن است قبل از خروج ابزار، به آن اجازه داده شود تا مدت کوتاهی درون قطعه کار دوران کند. این فرایند باعث تشکیل اتصال حالت جامد در سطح مشترک دو ورق می‌شود [۱۰].

در مرحله نفوذ مواد زیر پین به سمت بالا در اطراف پین اکستروود می‌شود. این در حالی است که به دلیل تغییر شکل و نفوذ مواد

۲-۳- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی

در این روش جوشکاری ابزار شامل دو شانه است که یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی با قطعه کار درگیر می‌شود. این دو شانه توسط پین به یکدیگر متصل می‌شوند. فاصله بین این دو شانه می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. این روش جزو روش‌های خود واکنشی^{۱۵} محسوب می‌شود. خود واکنشی بودن به این معنی است که در این روش نیازی به فشار عمودی نیست یا این نیاز بسیار کاهش یافته است [۸]. شکل (۴) جوشکاری به این روش را نشان می‌دهد. قرار گرفتن نیروهای عکس العمل در داخل ابزار از تغییرشکل یا شکستن پین ممانعت می‌کند. این روش بر روی آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و آهن اعمال شده است. می‌توان با استفاده از این ابزار صفحات ضخیم را نیز جوشکاری نمود. یکی از مشکلات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده از صفحه پشت‌بند است که منجر به محدودیت کاربرد این روش به خصوص در مقاطع اکستروژن شده تو خالی می‌شود. از طرفی در صورت عدم نفوذ مناسب پین یا شانه ابزار ممکن است عیب ریشه‌ایجاد کند. کاربرد این ابزار نیاز به استفاده از صفحه پشت‌بند را از بین می‌برد و با انعطاف‌پذیری که ایجاد شده، قابلیت انجام این فرایند بر مقاطع تو خالی اکستروژن شده و مقاطع پیچیده را فراهم می‌کند. علاوه بر این، در این روش پین در کل ضخامت قطعه نفوذ می‌کند و به همین دلیل ریزساختار همگن تری را در صفحات ضخیم ایجاد می‌کند. این ویژگی جوشکاری با ابزار بوبینی که جوشکاری را از هر دو طرف به صورت همزمان انجام می‌دهد، این اطمینان را ایجاد می‌کند که در جوشکاری صفحات ضخیم عیب ریشه اتفاق نخواهد افتاد. برخی از پیشرفت‌های دیگر که مبتنی بر این روش هستند عبارتند از استفاده از ابزار دوقلوی پادچرخنده^{۱۶} و ابزار خودنگهدار^{۱۷} است [۸].

۲-۴- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انرژی‌های ثانویه

در روش‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انرژی‌های ثانویه از میدان انرژی گرمایی القا شده توسط جریان الکتریکی، لیزر، قوس یا پلاسمایا میدان انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاشات التراسونیک استفاده می‌شود. انرژی‌های ثانویه منجر به بهبود

⁸ Norsk Hydro

⁹ Conventional FSSW

¹ Refill FSSW

¹ Rotating anvil FSSW

¹ Double-sided FSSW

¹ Stitch FSSW

¹ Swing FSSW

¹ Self-reacting

² Root flaw defect

³ Counter rotating twin tool

⁴ Self-supporting tool

⁵ Sumitomo Light Metal Industries, Ltd

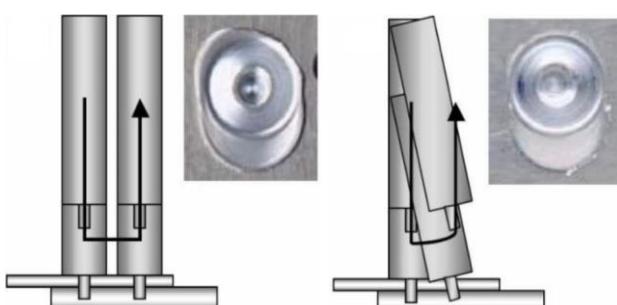
⁶ Mazda

⁷ Kawasaki Heavy Industries, Ltd

فضای کافی برای موادی که در این مرحله با ورود پین به قطعه-کار جابجا می‌شوند را فراهم کند. پس از نگهداری پین در قطعه-کار، پین از قطعه خارج شده و شانه به سطح قطعه نزدیک می-شود. این کار باعث بازگردانده شدن مواد به داخل سوراخ می‌شود. وقتی پین به طور کامل داخل شانه قرار گرفت به معنی اتمام فرایند است. این یکی از روش‌های ایجاد جوش نقطه‌ای بدون حفره است. روش‌های متنوعی در این حوزه معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱].

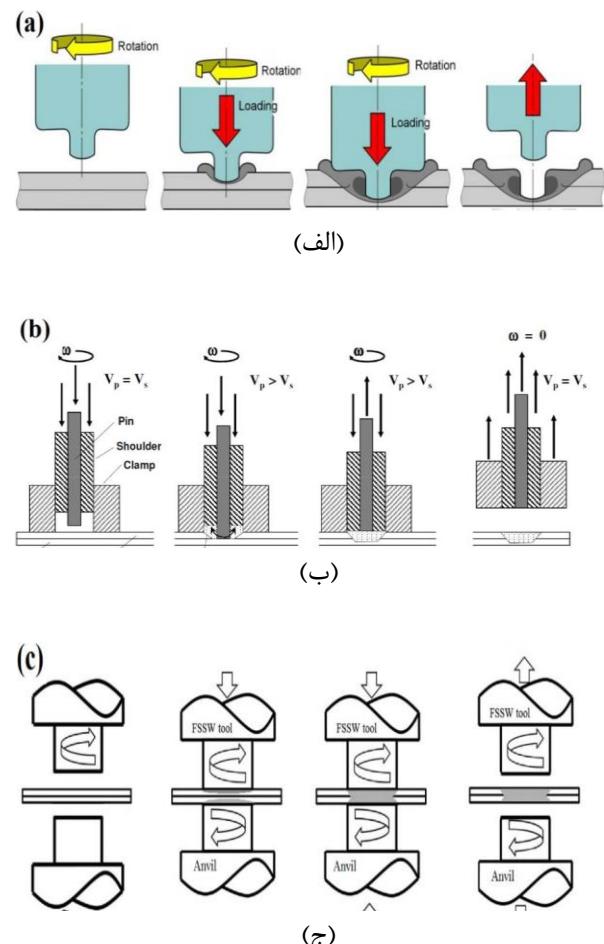
ابزارهای بدون پین جزو انواع کم هزینه جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی هستند. عدم استفاده از پین، جوشکاری را محدود به ضخامت یک میلیمتر می‌کند. برای پوشش این مشکل از جوشکاری دو طرفه که در شکل (۵) (ج) نشان داده شده است استفاده می‌شود تا بتوان ورق‌های ضخیم‌تری را جوشکاری نمود. در این روش دو ابزار بدون پین، یکی از بالا و یکی از پایین، عمل ایجاد اصطکاک دورانی و اعمال نیروی فورج را انجام می‌دهند که منجر می‌شود مواد هم در ورق پایینی و هم در ورق بالایی نرم شده و سیلان پیدا کنند و در سطح مشترک دو ورق به هم رسیده و اتصال را ایجاد کنند. شکل (۶) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با برد کوتاه را نشان می‌دهد. در این روش‌ها ابزار پس از انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای تحت یک الگوی مشخص (دایره یا مربع) حرکت می‌کند (جوشکاری الگویی) یا زاویه گرفته و حرکت می‌کند (جوشکاری دوختی) تا طول اتصال را بین ۵ تا ۱۸ میلیمتر افزایش دهد. این روش‌ها برای کاربرد در ربات‌ها ایجاد شده است. این کار منجر به افزایش استحکام اتصالات نسبت به جوشکاری نقطه‌ای معمول می‌شود.

با انتخاب صحیح جنس ابزار، هندسه ابزار و پارامترهای فرایند می‌توان روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را به دامنه وسیعی از آبیارهای آهنی و غیرآهنی و پلیمرها اعمال نمود. ترکیب این فرایند با رباتیک در بسیاری از صنایع همچون صنایع خودروسازی، هوافضا و فلزکاری برای تولید انبوه به کار گرفته شده است [۱].



شکل ۶ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با برد کوتاه [۱]

ورق‌ها حتی قبل از نفوذ ابزار در ورق پایینی، اتصال اتفاق می‌افتد. سیلان مواد شامل جایگایی افقی، عمودی و دورانی مواد است. در جوشکاری نقطه‌ای، نگهداری ابزار اجباری نیست. یکی از عیوب این روش باقی ماندن جای خالی پین ابزار پس از خروج ابزار است که می‌توان با طراحی ابزار خاص یا فرایند تکمیلی این سوراخ را از بین برد.

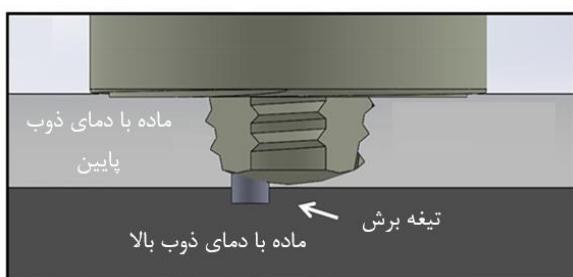


شکل ۵ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (الف) با استفاده از ابزار ساده، (ب) با استفاده از ابزار پرکننده، (ج) با استفاده از ابزار بدون پین دو طرفه [۱]

جوشکاری با پر کردن مجدد روشی برای تولید اتصالات نقطه‌ای بدون باقی ماندن سوراخ ناشی از پین است که در شکل ۵ ب نشان داده شده است. ابزار این مجموعه شامل پین، شانه و حلقه نگهدارنده است که هر کدام به صورت مستقل عمل می-کنند. در طی جوشکاری، ابتدا حلقه نگهدارنده دو ورق را نگه می‌دارد. سپس در حالی که پین عقب نگه داشته شده است، شانه دوار با سطح ورق بالایی در تماس قرار می‌گیرد. این اصطکاک منجر به تولید حرارت در سطح مشترک شانه و ورق فوکانی می‌شود. پس از تولید حرارت مناسب، شانه به عقب برمی‌گردد تا

۷-۲- حکاکی اصطکاکی اغتشاشی

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سنتی، جوشکاری آلیاژهایی که بیش از ۲۰ درصد در دمای ذوب متفاوت هستند و آنها که بیش از ۱۰ درصد در چگالی متفاوت هستند مشکل است. ماده نرم تر در این حالت بسیار سریعتر از ماده سخت تر سیلان یافته و از ناگت دور می‌شود که منجر به ایجاد اتصال ضعیف می‌گردد. علاوه بر این تشکیل لایه سخت بین فلزی در محل تماس دو آلیاژ یک مشکل محسوب می‌شود. حکاکی اصطکاکی اغتشاشی^{۱۰} روشی است که اخیرا برای اتصال ورق‌های با ترکیب شیمیایی متفاوت یا با اختلاف دمای ذوب زیاد به کار گرفته می‌شود. در این روش همانطور که در شکل(۷) نشان داده شده است علاوه بر پین، از یک زایده که از مرکز ابزار فاصله دارد استفاده می‌شود. در این روش ماده نرم تر بالا قرار داده می‌شود و این زایده به اختلاط بهتر ماده سخت تر زیری کمک می‌کند. جنس این زایده بایستی دارای استحکام و سختی بالاتر نسبت به مواد ورق‌ها باشد. حضور زایده در ابزار جوشکاری منجر به ایجاد یک اتصال مکانیکی بین دو ورق ناهمگون می‌شود که اتصال آن‌ها را تسهیل می‌کند. میزان نفوذ زایده در ورق پایینی کمتر از یا برابر طول زایده است. حرکت چرخشی ابزار منجر می‌شود تا زایده بتواند حفره‌ای را که قطر آن حداقل دو برابر فاصله زایده از مرکز ابزار است ایجاد کند. این حفره توسط مواد اکسترود شده از ورق بالایی پر شده و منجر به ایجاد اتصالی با استحکام برشی بالا بین دو ورق می‌شود. بدون حضور این زایده، لازم خواهد بود تا پین ابزار عمق بیشتری را در آلیاژ سخت نفوذ کند. برای سیلان ماده سخت تر باید از سرعت‌های دورانی بالاتر به منظور دستیابی به حرارت اصطکاکی مناسب استفاده شود که منجر به سایش ابزار می‌شود [۱۲].



شکل ۷ حکاکی اصطکاکی اغتشاشی [۱۲]

۶-۲- پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی

پرچکاری یکی از فرایندهای اتصال مکانیکی پذیرفته شده در سطح جهان است. این روش با موفقیت بر روی آلیاژهای دارای استحکام بالا اعمال می‌شود. اما در اتصال آلیاژهای سبک مثل آلومنیوم با استفاده از این روش هنوز مشکلاتی وجود دارد. با پیشرفت فناوری‌های حالت جامد، امکان طراحی بر مبنای آلیاژهای سبک فراهم آمده است.

روش‌های حالت جامد مثل فرآوری اصطکاکی هیدرولیکال، جوشکاری اصطکاکی با پیچ مخروطی^۲، پرچکاری خود سوراخکار^۳ و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای روش‌های مناسبی برای اتصال آلیاژهای سبک هستند. اما این فرایندها معایبی دارند که از جمله آن‌ها نیاز به سوراخکاری اولیه و عدم اتصال متالورژیکی بین ورق‌ها است که اتصال را محدود به اتصال مکانیکی می‌کند. این نوع از اتصالات در اثر تغییرشکل ورق پایینی در ناحیه پرچکاری دچار شکست می‌شوند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای این مسئله را حل می‌کند اما به دلیل باقی ماندن سوراخ ناشی از پین در محل جوشکاری که منجر به الزام به انجام عملیات اضافی به منظور از بین بردن این سوراخ می‌شود، هزینه اتصال افزایش می‌یابد. به منظور از بین بردن مشکلات بالا و در عین حال کاهش هزینه‌ها، در سال‌های اخیر روش‌هایی تحت عنوان پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی^۴ توسعه داده شده‌اند.

بر طبق تعریف هر فرایند حالت جامدی را که در آن یکی از طرف‌های فرایند (معمولًا ابزار غیرصرفی یا صرفی) دوران داشته باشد را می‌توان فرایند اصطکاکی اغتشاشی دانست. بر طبق این معیار فرایندهای پرچکاری متفاوتی ابداع شده‌اند که عبارتند از: پرچکاری اصطکاکی^۵، پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی کور^۶، پرچکاری با سوراخکاری اصطکاکی دوار^۷ و پرچکاری اصطکاکی خود سوراخکار^۸. علاوه بر این‌ها، اخیراً روش جدیدی در دانشگاه تولیدو^۹ ابداع شده که روش پرچکاری اصطکاکی خود سوراخکار و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در هم ادغام می‌کند. این روش پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی نامیده می‌شود. در این روش با استفاده از دستگاهی که حرکت دورانی را تأمین کند، پرج تا عمق معینی درون ورق‌هایی که روی هم قرار گرفته‌اند تا عمق از پیش تعیین شده وارد می‌شود [۱].

⁶ Friction stir blind riveting (FSBR)

⁷ Rotation friction drilling riveting (RFDR)

⁸ Friction self-piercing riveting (FSPR)

⁹ University of Toledo

¹ Friction stir scribe (FSS)

¹ Friction hydro pillar processing (FHPP)

² Friction taper stud welding (FTSW)

³ Self piercing riveting (SPR)

⁴ Friction stir riveting (FSR)

⁵ Friction riveting (FR)

از زمان معرفی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اوایل دهه ۹۰ میلادی، آلیاژسازی سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد توجه بوده است. محققین فراوانی در این حوزه به بررسی این فرایند پرداخته‌اند. کین و همکاران با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت دورانی بالا به تولید آلیاژ منیزیم قابل تجزیه پرداخته‌اند. نتایج کار ایشان به این شرح است: سرعت دورانی بالا با افزایش قابلیت شکل‌پذیری و قابلیت سیلان ماده از ایجاد عیوب ماکروسوکوپی در ناحیه اغتشاشی جلوگیری می‌کند. همچنین توصیه می‌شود که از یک پاس دوم برای افزایش میزان همگن بودن توزیع استفاده شود. ریزدانه‌تر شدن در کنار شکسته شدن دندربیت‌ها و رسوب ذرات فاز ثانویه منجر به خوردگی یکنواخت‌تری در سطح فرآوری شده می‌شود. مقاومت خوردگی بالا در قطعات فرآوری شده به صورت اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به ریزترشدن دانه‌ها و انرژی سطحی کم مرتبط دانست [۱۴].

پردازش سطح به روش اصطکاکی اغتشاشی^{۱۱} یکی از فرایندهای مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که برای بهبود خواص سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. مانه و هوسمانی [۱۵] افزایش سختی آلیاژ قابل عملیات حرارتی Al6061 با استفاده از ترکیب روش‌های اسپری گرم^{۱۲} پردازش سطحی اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی را مورد بررسی قرار داده است. دستیابی به ناحیه اغتشاشی بدون عیوب در سرعت پیش روی پایین ۱۰ میلیمتر بر دقیقه و افزایش عرض پروفیل سختی با افزایش سرعت دورانی ابزار از جمله نتایج اعلام شده توسط ایشان است. سانتوز و همکاران [۱۶] از ایجاد تغییر چهار درصدی در رسانش الکتریکی آلمینیوم در اثر انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی خبر داده‌اند.

در کامپوزیتهای هیبریدی از چند عنصر تقویت‌کننده به صورت همزمان استفاده می‌شود. عظیمی و همکاران [۱۷] ابتدا به صورت مکانیکی پودر هماتیت^۳ و آلمینیوم را مخلوط نموده‌اند و در ادامه با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به تولید نانوکامپوزیت هیبریدی بر روی آلیاژ آلمینیوم ۱۰۵۰ پرداخته‌اند. تفاوت کار ایشان با کارهای مشابه، استفاده از دو پودر تقویت‌کننده به صورت همزمان است. طبق مشاهدات ایشان،

۸-۲-آلیاژسازی سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی

روش‌های متنوعی برای اصلاح سطح فلزات و آلیاژهای مختلف به کار گرفته شده است. از آنجمله می‌توان به استفاده از کامپوزیتهای پایه فلزی^۱ اسپری پلاسمای^۲ اسپری حرارتی^۳ پوشش‌دهی الکترود^۴ و آندسازی سخت^۵ اشاره نمود [۱۳].

یکی از روش‌های پرکاربرد در اصلاح سطح و آلیاژسازی سطحی استفاده از تکنولوژی لیزر^۶ است. واحد سیگنال برای مدولارسازی پرتو لیزر از حالت پالسی به موجی ممتد استفاده می‌کند. با استفاده از یک بازتاب‌دهنده، نور لیزر به سطح قطعه تابانده می‌شود. حرکت‌های قطعه را می‌توان با استفاده از واحد کنترل، کنترل نمود. برای تولید آلیاژ، عناصر آلیاژی به شکل پودر یا سیم به حوضچه مذاب اضافه شده^۷ و تحت تأثیر حرارت ناشی از باریکه لیزر ذوب می‌شوند و با فلز پایه ایجاد پیوند متالورژیکی می‌کند. اگرچه روش‌های دیگری شامل آلیاژسازی جایگزنی^۸ و آلیاژسازی گازی^۹ نیز وجود دارد [۱۳].

یکی از روش‌های موفق پوشش‌دهی حالت جامد استفاده از اسپری سرد^{۱۰} است که برای تولید انبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند در حال حاضر به عنوان فرایندی کارآمد برای ساخت افزایشی نیز شناخته می‌شود.

فرایند اسپری سرد در دهه ۸۰ میلادی در روسیه معرفی شد. در این فرایند با استفاده از جت مافوق صوت هوای فشرده، ماده در معرض جریان پرسرعتی (۳۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بر ثانیه) از ذرات فلزی کوچک در دمایی پایین‌تر از دمای ذوب ماده قرار می‌گیرد [۱۴].

اخیراً از فرایند اصطکاکی اغتشاشی نیز برای آلیاژسازی انتخابی استفاده شده است. در این روش یک محفظه در سطح قطعه برای قرار گرفتن پودر مربوط به عنصر آلیاژی مربوطه ماشینکاری شده و پس از قرار گرفتن پودر در این محفظه با استفاده از یک ابزار بدون پین سطح محفظه بسته شده و سپس با استفاده از ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این پودر در ناحیه اغتشاشی پخش می‌شود. با افزایش تعداد پاس می‌توان به یکنواختی لازم در ناحیه اغتشاشی دست یافت [۳].

⁸ Replaced feeding

⁹ Surface gas alloying

¹ Cold Spray (CS)

¹ friction stir surface processing (FSSP)

¹ Thermal spray

¹ Hematite (Fe_2O_3)

¹ Metal matrix composites

² Plasma spraying

³ Thermal spraying

⁴ Electroplated coating

⁵ Hard anodizing

⁶ Laser surface alloying

⁷ Synchronous feeding

پیشرفت سریع جوشکاری اصطکاکی توجه ها را به روش جدیدی از تکنولوژی های جوشکاری و تعمیر به نام جوشکاری اصطکاکی الگوبی^۵ جلب کرده است. فرایнд اصطکاکی هیدروپیلار^۶ اصول این جوشکاری را در خود دارد. پایش این روش سخت است چرا که این روش شامل دوران یک میله در یک سوراخ کور است. پارامترهای مهم در این فرایند عبارتند از سرعت دورانی، میزان تغذیه محوری (مقدار سوختن ابزار) و فشار محوری. با توجه به نحوه تغییرات فشار محوری در حین فرایند می توان این فرایند را به چهار مرحله تغذیه محوری، پرس، جوشکاری و فورج تقسیم بندی نمود [۲۱]. می توان از فرایند اصطکاکی هیدروپیلار برای پرکردن ترک های سطحی و زیرسطحی در مخازن فولادی جدار ضخیم، ترک های سطحی روتور توربین بخار از جنس فولاد استحکام بالا و مقاوم در برابر حرارت استفاده نمود. روش های ذوبی جایگزین، در عمل منجر به ایجاد مشکلاتی می شود که این به دلیل قابلیت سخت شوندگی این آلیاژها و اجبار به استفاده از حرارت دهنده قبل از جوشکاری و عملیات حرارتی پس از جوشکاری است. عیوب مربوط به این فرایند وجود حباب هوا و عدم پرشدن انتهای ترک است که به دلیل عدم ایجاد حرارت کافی و نیروی ناکافی محوری ایجاد می شود [۲۲].

۱-۳- مطالعات انجام شده بر روی جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار

لی و همکاران [۴] بر اساس مدل ساخته شده برای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدلی برای شبیه سازی فرایند اصطکاکی هیدروپیلار ارایه کرده اند. ایشان حرکت و تغییر شکل لایه مشترک اصطکاکی^۷ را شبیه سازی نموده و مکانیزم مربوطه را مورد بررسی قرار داده اند. همچنین از این شبیه سازی برای پیش بینی ریز ساختار ناحیه متاثر از حرارت^۸ استفاده نموده اند. آن ها نشان دادند که روش مش دینامیکی^۹ را می توان برای توصیف تغییر شکل مداوم فصل مشترک اصطکاکی به کار برد. سویی و همکاران [۲۳] می نویسند که چهار پارامتر اصلی در این فرایند وجود دارند که عبارتند از سرعت دورانی، نیروی فشاری، نیروی فورج و میزان سوخت. سرعت دورانی، اصطکاک

سختی و استحکام کششی در نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه فرآوری شده بدون استفاده از پودر تقویتی به صورت قابل ملاحظه ای افزایش یافته است.

۳- جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار

فرایند اصطکاکی اغتشاشی هیدروپیلار، در دهه ۹۰ میلادی توسط TWI^۱ ابداع شده است. این فرایند شامل یک ابزار مصرف شدنی به شکل استوانه یا مخروط است که به صورت محوری به سمت حفره ای که از قبل ساخته شده است هدایت می شود که در شکل (۸) نشان داده شده است. تماس ایجاد شده بین میله و حفره باعث تولید حرارت در اثر اصطکاک می شود. نیروی محوری اعمالی و دوران میله با نرم کردن مواد باعث سیلان مواد می شود تا حفره پر شود. به دلیل تغییر شکل زیادی که مواد تجربه می کنند، در زمان کوتاهی اتصال بین دیواره حفره و مواد میله اتفاق می افتد. معمولاً این زمان کمتر از یک دقیقه است که به میزان زیادی به ماده مورد استفاده، سرعت دورانی، نیروی محوری و پارامترهای هندسی وابسته است [۲].

در سال ۱۹۹۲، موسسه جوشکاری TWI یک روش جوشکاری حالت جامد جدید به نام جوشکاری اصطکاکی با میله مخروطی^۲ را برای انجام کارهای تعمیراتی در زیر آب ابداع نموده است. در طی این فرایند از اصطکاک بین یک میله دوران با سر مخروطی در یک شیار برای ایجاد حرارت اصطکاکی و سیلان پلاستیکی مواد استفاده می شود و در نهایت از یک نیروی فورج که توسط میله اعمال می شود، استفاده می شود. این نیروی فورج نهایی به منظور نگه داشتن میله داخل سوراخ و اصلاح بیشتر مواد با استفاده از تغییر شکل پلاستیک، مورد استفاده قرار می گیرد [۱۸]. این روش بر پایه فرایند اصطکاکی هیدروپیلار^۳ ابداع شده و شکل مربوط به آن در شکل (۹) نشان داده شده است میله مورد استفاده است. در تعمیر ترک هایی با طول بیشتر از روشی موسوم به جوشکاری اصطکاکی الگوبی^۴ استفاده می شود که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این روش، از چندین جوش هیدروپیلار کنار هم که با هم همپوشانی دارند استفاده می شود [۲۰].

⁶ Friction hydro pillar processing (FHPP)

⁷ Friction interlayer (FI)

⁸ Heat affected zone (HAZ)

⁹ The dynamic mesh method

¹ The welding institute

² Friction taper plug welding (FTPW)

³ Friction hydro pillar processing (FHPP)

⁴ Friction stitch welding

⁵ Friction stitch welding

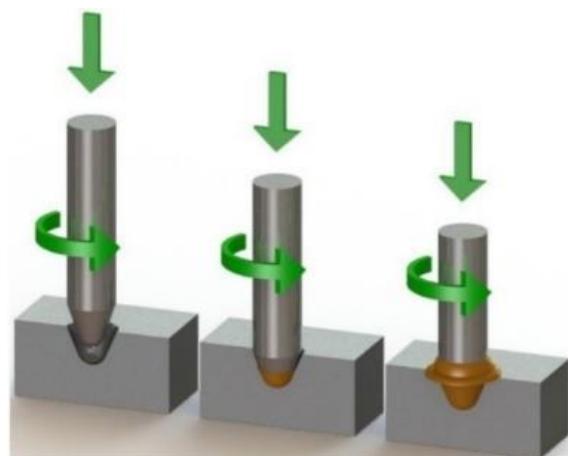
فولاد ضدزنگ از ورق به ضخامت ۳۰ میلی‌متر و میله به ضخامت ۲۵/۴ میلی‌متر استفاده نموده است. قبل از انجام فرایند در سطح قطعه، شیاری به عمق ۲۰ میلی‌متر با زاویه ۳۰ درجه ایجاد شده است و میله نیز با زاویه ۲۰ درجه به شکل مخروط درآمده است. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده، سرعت دورانی ۱۵۵ دور در دقیقه، ۱۲ میلی‌متر طول سوخت است. کنان و همکاران [۲۲] AISI 4140 فرایند اصطکاکی هیدروپیلار را بر روی آلیاژ پرکربن پیاده نموده و نتیجه گرفته‌اند که با نیروهای محوری کمتر و زمان بیشتر فرایند، پر شدن ترک بهتر اتفاق می‌افتد و اتصالی بدون عیب ایجاد می‌شود. در این مطالعه همچنین از شبیه‌سازی به منظور بررسی سیکل حرارتی استفاده شده است. خیونگ و همکاران [۲۴] جوشکاری آلیاژ X52 را مطالعه نموده‌اند. چلوذرینسکی و همکاران [۲۵] با انجام آزمایش‌های جابجایی بازشدن نوک ترک^۲ به بررسی چقلمگی آلیاژهای فولاد کربن-منگنز پرداخته‌اند. در این مقاله از یک ورق ۳۰ میلی‌متری استفاده شده است. متز و بارکی [۲۶] رفتار خستگی را در جوشکاری با استفاده از میله پر کننده^۳ آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم بررسی نموده‌اند.

۲-۳- جوشکاری زیر آب

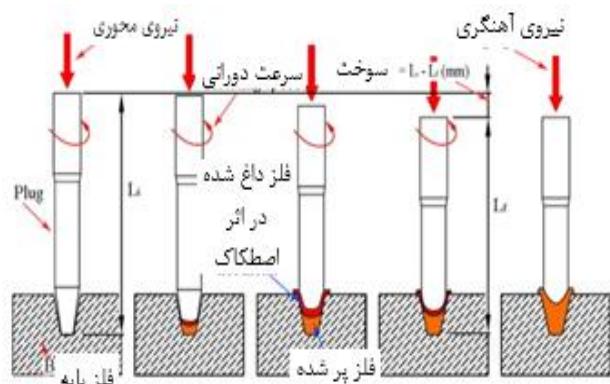
به دلیل شرایط خاص محیطی، معمولاً در مواد استفاده شده برای خطوط لوله و سازه‌های زیر آب، مشکلاتی دیده می‌شود. فرایند انجام تعمیرات در زیر آب دو مشکل عمده دارد که اولی شرایط کاری نامناسب در زیر آب و دومی سخت بودن فرایند جوشکاری در محیط مرطوب است. تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است تا با بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی الکترود و تجهیزات جوشکاری، این شرایط ببهبد یابد. اما با توجه به تغییراتی که هر روز در صنایع دریایی نفت و گاز ایجاد می‌شود، نیاز به طراحی روش‌های نوین جوشکاری و تعمیر بیش از پیش احساس می‌شود [۱۸]. یکی از مزایای عمده جوشکاری با میله مخروطی در زیر آب این است که کیفیت جوش مستقل از عمق آب است و این موردی است که امکان استفاده از این روش را در عمق زیاد دریا ممکن می‌کند [۲۷].

امبروزیاک و گول [۲۸] در قالب یک طرح اروپایی که موضوع آن ایجاد انشعاب از لوله‌های نفت و گاز عبوری از کف دریا در حین کار است، اقدام به بررسی جوشکاری فولاد در زیر آب با استفاده از فرایند اصطکاکی هیدروپیلار پرداخته‌اند. جوشکاری

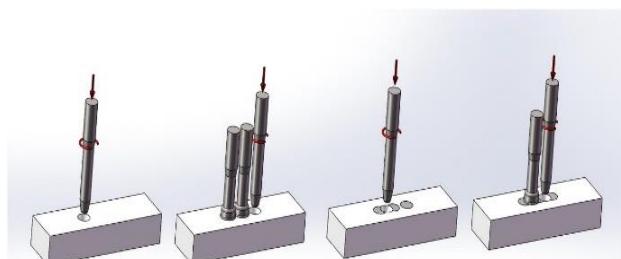
لازم را برای تولید حرارت ایجاد می‌کند. هرچه سرعت دورانی بیشتر باشد، حرارت نیز بیشتر است. همچنین سرعت دورانی بالاتر امکان تشکیل عیوب در حین جوشکاری را کاهش داده و در عین حال باعث کاهش سختی و استحکام جوش نیز می‌شود.



شکل ۸ فرایند اصطکاکی هیدروپیلار [۲]



شکل ۹ جوشکاری اصطکاکی با میله مخروطی [۱۸]



شکل ۱۰ جوشکاری اصطکاکی الگویی [۲۰]

Q325 و همکاران [۲۱] این فرایند را با استفاده از فولاد انجام داده‌اند. مین‌هارد و همکاران [۲] در جوشکاری یک آلیاژ

^۳ Friction plug welding

^۱ UNS S31803 DSS

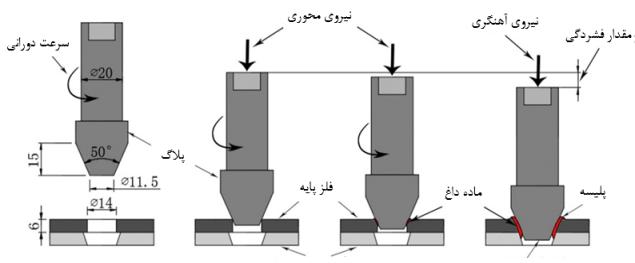
^۲ Crack tip opening displacement (CTOD)

(۱۳) نحوه انجام فرایند و پارامترهای هندسی مورد استفاده را نشان می‌دهد. نکته مهم در این فرایند انتهای باز سوراخ ایجاد شده است که به منظور اطمینان از خروج قسمتی از آلومینیوم که در اثر حرارت ایجاد شده کیفیت خود را از دست می‌دهد الزامی است.

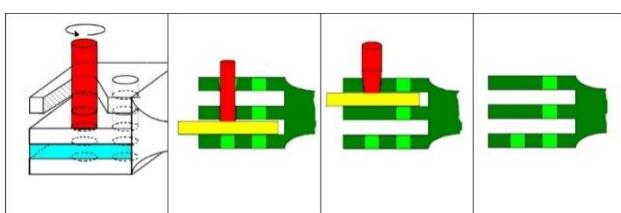
هاتینگ و همکاران [۳۵] به بررسی کاربرد روش اصطکاکی هیدروپیلار و جوشکاری با میله مخروطی برای تعمیر سوراخ‌های پره توربین پرداخته است. شکل (۱۴) استفاده از این روش برای انجام این کار را نشان می‌دهد. مشکلاتی از قبیل ایجاد ترک شعاعی، بیضی شدن مقطع سوراخ و عدم هماستایی سوراخ‌ها ممکن است در حین سوراخ‌کاری حادث شود. با استفاده از فرایند هیدروپیلار می‌توان سوراخ‌های معیوب را پر نموده و مجدداً فرایند را انجام داد.



شکل ۱۲ ابزار جوشکاری نقطه‌ای پرکننده [۳۲].



شکل ۱۳ نحوه انجام فرایند و پارامترهای هندسی برای آلیاژ آلومینیوم [۳۳] ۲۲۱۹



شکل ۱۴ تعمیر سوراخ‌های پره توربین با استفاده از روش اصطکاکی هیدروپیلار [۳۵]

فولاد خطوط لوله X65 در زیر آب مورد مطالعه قرار گرفته است اما به دلیل نرخ بالای خنک‌کاری، ریزساختار کاملاً مارتنتزیتی به دست آمده است [۲۹]. جوشکاری زیر آب فولاد ضد زنگ نیز مورد اشاره قرار گرفته است [۳۰].

خیونگ و همکاران [۲۴] جوشکاری زیر آب را برای لوله فولادی کم آلیاژ X52، مورد مطالعه قرار داده‌اند. تنگ و همکاران [۲۰] از فرایند اصطکاکی دوختی برای تعمیر قطعات جوشکاری قوسی شده از جنس آلیاژ DH36 استفاده نموده‌اند. شکل (۱۱) این فرایند را نشان می‌دهد. کار مشابهی توسط وانگ و همکاران [۳۱] نیز کار مشابهی را به انجام رسانیده‌اند.



شکل ۱۱ فرایند اصطکاکی دوختی زیر آب [۲۰]

۳-۳-۳- فرایندهای مشابه و کاربرد صنعتی

فرایند اصطکاکی اغتشاشی هیدروپیلار چون ذاتا برای تعمیر ترک‌های ایجاد شده در قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، عموماً میله و ورق هر دو از یک جنس انتخاب می‌شوند. با این حال در یک سری از مطالعات نیز از آلیاژهای متفاوت استفاده شده است. یین و همکاران [۳۰] از میله از جنس فولاد ضد زنگ 316L برای جوشکاری ورق از جنس فولاد Q345 استفاده نموده‌اند. هان و همکاران [۳۲] در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با استفاده از روشی مشابه با روش هیدروپیلار به تولید اتصال بدون حفره پرداخته‌اند. در عین حال ایشان به این منظور از دو آلیاژ متفاوت آلومینیوم استفاده کرده‌اند. آن‌ها از میله‌ای از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، برای پرکردن حفره باقی مانده در جوشکاری ورق‌هایی از جنس آلومینیوم ۲۲۱۹ استفاده نموده‌اند. شکل (۱۲) ابزار مود استفاده در این فرایند را نشان می‌دهد. ژانگ و همکاران [۳۷] در جوشکاری آلیاژ S355 از دو میله از جنس-های S355 و LF2 استفاده نموده‌اند.

دو و همکاران [۳۳ و ۳۴] فرایندهای مشابه فرایند اصطکاکی هیدروپیلار را بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ پیاده نموده‌اند. شکل

- [6] Ahmed, M.M.Z., Wynne, B.P., Rainforth, W.M., and Threadgill, P.L., Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium, *Scripta Materialia*, Vol. 64(1), pp. 45-48, (2011).
- [7] Shi, L., Wu, C.S., and Liu, H.J., The effect of the welding parameters and tool size on the thermal process and tool torque in reverse dual-rotation friction stir welding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 91, pp. 1-11, (2015).
- [8] Sued, M.K., Pons, D., Lavroff, J., and Wong, E.H., Design features for bobbin friction stir welding tools: Development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process, *Materials and Design (1980-2015)*, Vol. 54, pp. 632-643, (2014).
- [9] Padhy, G.K., Wu, C.S., and Gao, S., Auxiliary energy assisted friction stir welding—status review, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20(8), pp. 631-649, (2015).
- [10] Sajed, M., and Bisadi, H., Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys, *Welding in the World*, Vol. 60(1), pp. 33-40, (2016).
- [11] Sajed, M., Parametric study of two-stage refilled friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 307-317, (2016).
- [12] Upadhyay, P., Hovanski, Y., Jana, S., and Fifield, L.S., Joining dissimilar materials using friction stir scribe technique, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139(3), pp. 034501, (2017).
- [13] Chi, Y., Gu, G., Yu, H., and Chen, C., Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review., *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 100, pp. 23-37, (2018).
- [14] Qin, D., Shen, H., Shen, Z., Chen, H., and Fu, L., Manufacture of biodegradable magnesium alloy by high speed friction stir processing, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 36, pp. 22-32, (2018).
- [15] Mane, K.M., and Hosmani, S.S., Friction stir surface processing of Al 6061 alloy: role of surface alloying with copper and heat-treatment, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 71(6), pp. 1411-1425, (2018).
- [16] Santos, T.G., Miranda, R.M., Vilaça, P., and Teixeira, J.P., Modification of electrical conductivity by friction stir processing of aluminum alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57(5), pp. 511-519, (2011).

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر عمدۀ روش‌های جوشکاری و فراوری حالت جامد مبتنی بر اصطکاک دورانی در دو بخش اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار معرفی شده و مطالعات صورت گرفته در این حوزه به اختصار مورد بررسی قرار داده شد. با توجه به جدید بودن این فرایندها و معرفی فرایندهای بیشتر که توسط محققین این حوزه انجام می‌شود، لازم است تا مطالعات بیشتری با استفاده از آلیاژها و پودرهای مختلف و محدوده وسیع‌تری از پارامترها انجام شوند تا تمام جوانب این فرایندها روشن شود. همچنین به دلیل مشکلات موجود در پایش برخط این فرایندها، شبیه‌سازی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در پی داشته باشد. در زیر پیشنهاداتی برای پژوهش در این حوزه ارایه می‌شود:

۱. مطالعه آلیاژسازی به روش اصطکاکی هیدروپیلار با استفاده از پودرهای نانو.

۲. امکان‌سنجی ارایه روشی به منظوری کاهش گردیان سختی بین ناحیه جوش و فلز پایه در اتصالات هیدروپیلار.

۵- مراجع

- [1] Padhy, G.K., Wu, C.S., and Gao, S., Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: A review, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 34(1), pp. 1-38, (2018).
- [2] Meinhardt, C.P., Chludzinski, M., Ribeiro, R.F., Rocha, C.L.F., Santos, A.C.S., and Strohaecker, T.R., Evaluation of friction hydro-pillar processing welding in duplex stainless steels (UNS S31803), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 246, pp. 158-166, (2017).
- [3] Karthik, G.M., Ram, G.J., and Kottada, R.S., Friction stir selective alloying, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 684, pp. 186-190, (2017).
- [4] Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., and Lupoi, R., Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review, *Journal of materials science and technology*, Vol. 34(3), pp. 440-457, (2018).
- [5] Zhong, Y.B., Wu, C.A. and Padhy, G.K., Effect of ultrasonic vibration on welding load, temperature and material flow in friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 239, pp. 273-283, (2017).

- International journal of fatigue*, Vol. 43, pp. 178-187, (2012).
- [27] Zhang X., Deng, C., Wang, D., Wang, Z., Teng, J., Cao, J., Xu, W., and Yang, F., "Improving bonding quality of underwater friction stitch welds by selecting appropriate plug material and welding parameters and optimizing joint design," *Materials and Design*, Vol. 91, pp. 398-410, (2016).
- [28] A. Ambroziak and B. Gul, "Investigations of underwater FHPP for welding steel overlap joints," *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 67-76, 2007.
- [29] Y. Yin, X. Yang, L. Cui, F. Wang, and S. Li, "Material flow influence on the weld formation and mechanical performance in underwater friction taper plug welds for pipeline steel," *Materials and Design*, Vol. 88, pp. 990-998, (2015).
- [30] Yin, Y., Yang, X., Cui, L., Cao, J., and Xu, W., "Microstructure and mechanical properties of underwater friction taper plug weld on X65 steel with carbon and stainless steel plugs", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 21, No. 4, pp. 259-266, (2016).
- [31] Wang, Z., Teng, J., Wang, T., Cui, L., Liu, H., Yang, J., Zhang, Y., and Zhu, H., "Observations of repair process by friction stitch welding in simulated wet conditions-Flaws, microstructure and hardness evolutions in overlapping welds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 264, pp. 220-233, (2019).
- [32] Han, B., Huang, Y., Lv, S., Wan, L., Feng, J., and Fu, G., "AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding", *Materials and Design*, Vol. 51 ,pp. 25-33, (2013).
- [33] Du, B., Cui, L., Yang, X., Wang, D., and Sun, Z., "Weakening mechanism and tensile fracture behavior of AA 2219-T87 friction plug welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 693, pp. 129-135, (2017).
- [34] Du, B., Sun, Z., Yang, X., Cui, L., Song, J., and Zhang, Z., "Characteristics of friction plug welding to 10 mm thick AA2219-T87 sheet: Weld formation, microstructure and mechanical property", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 654, pp. 21-29, (2016).
- [35] Hattingh, D., James, M., Newby, M., Scheepers, R., and Doubell, P., "Damage assessment and refurbishment of steam turbine blade/rotor attachment holes", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 83, pp. 125-134, (2016).
- [17] Azimi-Roeen, G., Kashani-Bozorg, S.F., Nosko, M., Nagy, Š., and Maťko, I., Formation of Al/(Al13Fe4+Al₂O₃) nano-composites via mechanical alloying and friction stir processing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 27(2), pp. 471-482, (2018).
- [18] Cui, L., Yang, X., Wang, D., Hou, X., Cao, J., and Xu, W., Friction taper plug welding for S355 steel in underwater wet conditions: Welding performance, microstructures and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 611, pp. 15-28, (2014).
- [19] Hattingh, D.G., Bulbring, D.L.H., Els-Botes, A., and James, M.N., Process parameter influence on performance of friction taper stud welds in AISI 4140 steel, *Materials and Design*, Vol. 32(6), pp. 3421-3430, (2011).
- [20] Teng, J., Wang, Z., Zhang, X., Li, Y., Cao, J., Xu, W., and Yang, F., Repair of arc welded DH36 joint by underwater friction stitch welding. *Materials and Design*, Vol. 118, pp. 266-278, (2017).
- [21] Li, W., Jiang, D., Yang, L., Pan, J., Qu, R., and Sun, T., Numerical simulation of temperature field and prediction of microstructure in friction hydro pillar processing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 252, pp. 370-380, (2018).
- [22] Kanan, L.F., Vicharapu, B., Bueno, A.F.B., Clarke, T., and De, A., Friction hydro-pillar processing of a high carbon steel: joint structure and properties, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 49(2), pp. 699-708, (2018).
- [23] Cui, L., Yang, X., Wang, D., Cao, J., and Xu, W., "Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: welding process, defects, microstructures and mechanical properties", *Materials and Design*, Vol. 62, pp. 271-281, (2014).
- [24] Xiong, J., Yang, X., Lin, W., and Liu, K., "Microstructural characteristics and mechanical heterogeneity of underwater wet friction taper plug welded joints for low-alloy pipeline steel," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 695, pp. 279-290, (2017).
- [25] Chludzinski, M., Paes, M., Bastian, F., and Strohaecker, T., "Fracture toughness of friction hydro-pillar processing welding in C-Mn steel", *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 340-344, (2012).
- [26] Metz, D., and Barkey, M., "Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al-Li alloy",

بررسی مکانیزم های بهبود خواص مکانیکی با افزودن نانو ذرات به کامپوزیت ها

مهدی ثابت‌قدم
کارشناسی ارشد

چکیده: نانوذره یا ذره بی نهایت ریز معمولاً به عنوان ذره ای از ماده تعریف می شود که قطری بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (nm) دارد. خواص نانوذرات اغلب به طور قابل توجهی با ذرات بزرگتر ماده متفاوت است. نانوذرات مکانیک نابجایی متفاوتی را نشان می دهد که همراه با ساختار سطحی منحصر به فردشان، منجر به خواص مکانیکی متفاوت از مواد توده ای می گردد. امروزه با افزودن نانوذرات خواص مکانیکی کامپوزیت ها را بهبود می بخشنند. نانوذرات به دلیل ریز بودن باعث افزایش سطح میان ماده زمینه و تقویت کننده شده و لذا باعث بهبود خواص مکانیکی خواهند شد. نوع نانوذره مورد استفاده، ابعاد، درصد وزنی و نحوه توزیع نانوذره از عوامل تعیین کننده در بهبود خواص مکانیکی می باشند. در مطالعه حاضر ضمن ارائه مفاهیم مربوط به نانوکامپوزیت، تاثیر پنج نانوذره مختلف بر خواص مکانیکی رایج مد نظر طراحان سازه بررسی می شود. نتایج نشان می دهند افزودن نانوذرات تا درصد وزنی مشخصی باعث بهبود خواص شده و بیش از آن مقدار گاهاً اثر عکس خواهد داشت که یکی از دلایل آن کلوخه شدن نانوذرات می باشد.

واژه های راهنمایی: کامپوزیت، نانوکامپوزیت، خواص مکانیکی، نانوذرات، نانورس، نانولوله

روح الله حسینی*

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

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

Mahdi Sabet
Ghadam
M.Sc.

Rouhollah
Hosseini*
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Imam Hossein
Comprehensive
University,
Tehran

Investigating the mechanisms of improving mechanical properties by adding nanoparticles to composites

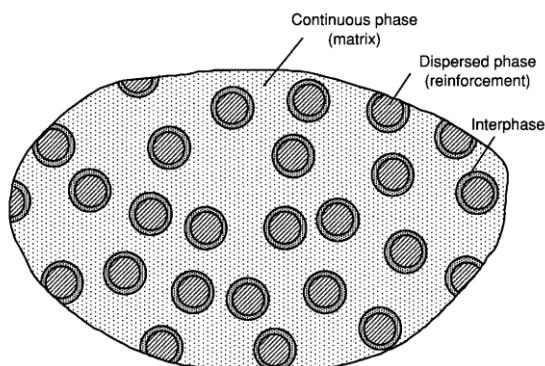
Abstract: A nanoparticle or an infinitesimal particle is usually defined as a particle of matter that has a diameter between 1 and 100 nanometers (nm). The properties of nanoparticles often differ significantly from larger particles of matter. Nanoparticles show different dislocation mechanics, which together with their unique surface structure, lead to different mechanical properties from bulk materials. Nowadays, by adding nanoparticles, the mechanical properties of composites are improved. Due to their small size, nanoparticles increase the surface area between the base material and the reinforcement and therefore improve the mechanical properties. The type of nanoparticle used, dimensions, weight percentage and the way of nanoparticle distribution are determining factors in improving mechanical properties. In the present study, while presenting the concepts related to nanocomposite, the effect of five different nanoparticles on the common mechanical properties considered by structural designers is investigated. The results show that the addition of nanoparticles up to a certain weight percentage improves the properties, and more than that amount sometimes has the opposite effect, one of the reasons for which is the clumping of nanoparticles.

Keywords: Composite, Nanocomposite, Mechanical properties, Nanoparticles, Nanoclay, nanotube

گاهی اوقات به دلیل وجود برهمنکنندهای شیمیایی، بخش دیگری به نام بین فاز^۳ میان تقویتکننده و زمینه وجود دارد.

شکل (۱) نمایانگر یک کامپوزیت میباشد.

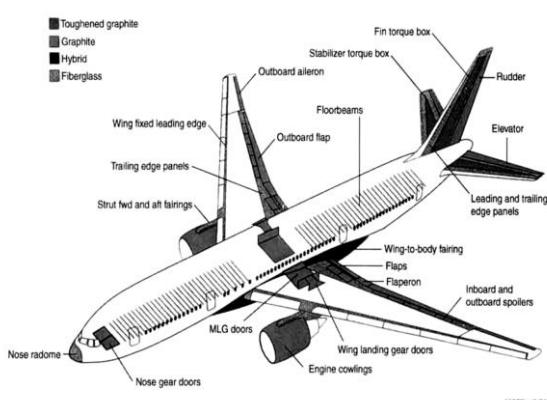
از عوامل مهم در خواص کامپوزیت، خاصیت هر کدام از مواد تشکیل دهنده، هندسه آنها و نحوه توزیع فاصله است. توزیع فاز تقویتکننده، همگنی و یکنواخت بودن را تعیین خواهد کرد. همچنین جهتگیری و هندسه تقویتکننده در ناهمسانگری^۴ موثر است [۴].



شکل ۱ اجزای مختلف کامپوزیت [۴]

کامپوزیت در زمینههای زیادی از جمله هوافضا، هواپیما، خودرو، دریا، انرژی و زیست پزشکی کاربرد دارد. در شکل (۲) بخشی از کاربردهای کامپوزیت در مورد هواپیما نشان داده شده است [۴].

کامپوزیت‌ها را میتوان به دو شکل دسته‌بندی نمود؛ بر اساس ویژگی‌های تقویتکننده و بر اساس ماده تشکیل‌دهنده زمینه. شکل (۳) نمایانگر این دسته‌بندی میباشد.



شکل ۲ کاربرد کامپوزیت در هواپیما [۴]

۱- مقدمه

آشنایی با مواد دارای قابلیت‌های بالاتر نظیر موادی با نسبت استحکام به وزن بالاتر همواره مطلوب بشر بوده است. بدین ترتیب بشر به استفاده از کامپوزیت‌ها روی آورده. از نخستین کامپوزیت‌ها میتوان به کاهش اشاره نمود. کامپوزیت‌ها را میتوان به نحوی طراحی نمود که در راستاهای خاصی استحکام بسیار بالایی داشته باشند، لذا این خاصیت است که منجر به کاربرد گسترده کامپوزیت‌ها در صنعت هواپیماها و خودروهای مدرن شده است. از مزایای کامپوزیت‌ها میتوان به این موارد اشاره نمود:

نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت به ضربه بالا، انعطاف‌پذیری در طراحی، نارسانایی، خواص غیرمغناطیسی، هدایت گرمایی پایین و دوام بالا [۱].

در کامپوزیت‌ها به منظور دستیابی به خواص بهتر، ترکیب اجزای تشکیل دهنده در مقیاس اتمی انجام نمیگیرد [۲]. با توسعه علم نانو و ورود آن به حوزه‌های مختلفی از جمله کامپوزیت و دسترسی به خواصی منحصر به فرد، انقلابی در این حوزه پدید آمد [۳].

با توجه به کاربرد گسترده کامپوزیت‌ها در صنایعی همچون هوافضا، خودروسازی و دریایی؛ بهبود کیفیت و افزایش طول عمر کامپوزیت‌ها به کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان قطعات کمک شایانی کرده است. یکی از راههای تحقق این امر استفاده از نانوذرات در کامپوزیت‌ها میباشد. امروزه تحقیقات زیادی راجع به این مبحث انجام شده است.

در این پژوهش، مفاهیم اصلی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها بیان شده و اثر چند نانوذره نسبتاً پرکاربرد در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و مکانیزم بهبود آنها، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- کامپوزیت

کامپوزیت ماده‌ای چند جزئی است که خواص آن از خواص تک‌تک اجزای تشکیل‌دهنده بهتر میباشد و این ترکیب در مقیاس اتمی قرار نداشته و به صورت ماکروسکوپی بررسی میشود. یک فاز کامپوزیت محکم‌تر، سفت‌تر و ناپیوسته است که بخش تقویتکننده^۱ نام دارد و بخش دیگر که نسبتاً ضعیفتر بوده و به صورت پیوسته است زمینه^۲ نام دارد. البته

^۳ Interphase

^۴ Anisotropy

^۱ Reinforcement

^۲ Matrix

استحکام مقاوم‌تر می‌باشند. این تقویت‌کننده‌ها می‌توانند به صورت موازی بوده و یا جهت‌گیری‌های متفاوت داشته باشند.

۲-۲- بر اساس ماده زمینه

این کامپوزیت‌ها به دسته‌های زمینه پلیمری، زمینه فلزی و زمینه سرامیکی و زمینه کربنی تقسیم می‌شوند. جدول (۱) انواع مواد رایج مربوط به هر دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

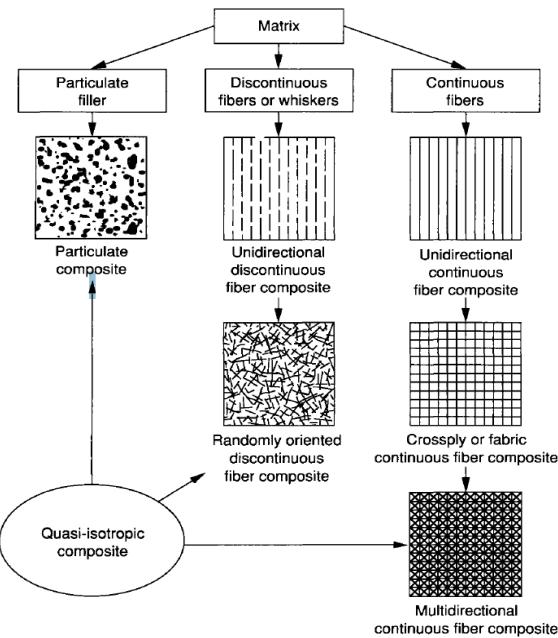
جدول ۱ انواع مواد کاربردی بر اساس دسته بندی ماده زمینه [۴]

نام ماده	نام ماده تقویت‌کننده	نام ماده
پلی‌کسی	E-glass	پلیمر
فنولیک	S-glass	
پلی‌آمید	کربن (گرافیت)	
Bismaleimide	آرامید (کولار)	فلز
آلومینیم	بورن	
تیتانیوم	کربن	
مس	سیلیکون کاربید	سرامیک
سیلیکون کاربید	سیلیکون کاربید	
سرامیک-شیشه	سیلیکون نیترات	
کربن	کربن	کربن

۳- نانوکامپوزیت

کامپوزیتی که دارای تقویت‌کننده‌ای با اندازه نانو (بین یک تا صد نانومتر) باشد را نانوکامپوزیت گویند. بخش‌های مختلف یک نانوکامپوزیت عبارتند از پایه نانو (فاز اول) و پرکننده (فاز دوم) که درصد وزنی فاز دوم نسبت به فاز اول بیشتر می‌باشد. افزودن فاز دوم به فاز اول به جهت بهبود خواصی از قبیل استحکام و مقاومت حرارتی می‌باشد [۵]. همان‌طور که قبل اشاره شد هدف استفاده از کامپوزیت دستیابی به مواد با خواص مطلوب‌تر است. چنانچه از نانوکامپوزیت استفاده شود به دلیل ریز بودن پرکننده‌ها، سطح تماس بیشتری بین ماده زمینه و تقویت‌کننده وجود خواهد داشت که باعث بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. بر اساس ماده زمینه، نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: نانوکامپوزیت زمینه پلیمری، نانوکامپوزیت زمینه فلزی، نانوکامپوزیت زمینه کربنی و نانوکامپوزیت زمینه سرامیکی [۶]. نانوذرات تقویت‌کننده عموماً به شکل‌های ذرات، الیاف و صفحات می‌باشند که در شکل (۴) نشان داده شده است.

[۸]



شکل ۳ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس ماده تقویت‌کننده [۴]

۲- بر اساس تقویت‌کننده

۱-۱-۲- کامپوزیت‌های ذره‌ای؛ که در آن ذرات با اندازه و اشکال مختلف به صورت تصادفی در ماده زمینه توزیع شده‌اند. این کامپوزیت‌ها می‌توانند به صورت‌های زیر باشد:

- زمینه غیرفلز- تقویت‌کننده غیرفلز؛ مانند: پلیمرهای ترد تقویت‌شده با ذرات لاستیک، نانوکامپوزیت‌های پلیمر/رس.

- زمینه غیر فلز- تقویت‌کننده فلز؛ لاستیک پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات آلومینیوم.

- زمینه فلز- تقویت‌کننده فلز؛ ذرات سرب در آلیاژ مس جهت بهبود ماشین کاری.

- زمینه فلز- تقویت‌کننده غیرفلز؛ آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیکون کاربید.

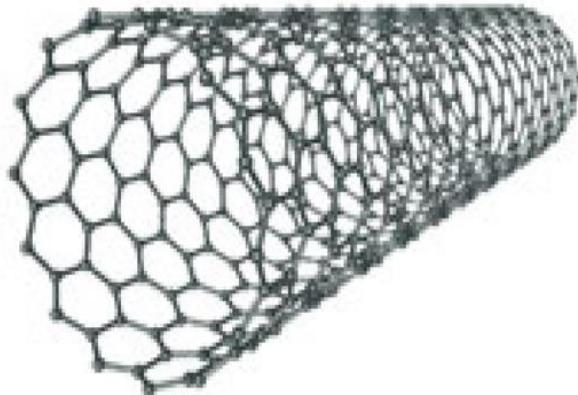
۱-۲-۱- کامپوزیت‌های با الیاف کوتاه یا ناپیوسته؛ که از فیبرهای کوتاه، نانو لوله‌ها یا ویسکر^۲ به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. این الیاف می‌توانند دارای جهت‌گیری یکسان و یا متفاوت باشند. از نمونه‌های این دسته نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله (دارای طول ۱۰۰۰ نانومتر و قطر ۱ نانومتر) را می‌توان نام برد.

۱-۲-۲- کامپوزیت‌های با الیاف تقویت‌کننده پیوسته؛ که دارای تقویت‌کننده‌هایی با طول بلند هستند و از نظر سختی و

² Whisker

^۱ Particulate composites

ضخامت یک یا چند نانومتر و طولی به اندازه صدها تا هزاران نانومتر است [۱۰, ۱۵, ۱۶].



شکل ۵ نانو لوله [۷]

۴-۳- اثر نانو ذرات بر خواص نانوکامپوزیت

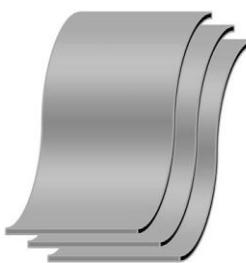
بهبود خواص مکانیکی پلیمرها باعث افزایش طول عمر، کیفیت و در مواردی هم موجب ایجاد قابلیت‌های جدیدی می‌شود. برای نخستین بار گروه تحقیقاتی تویوتا با استفاده از نانوذرات رس خواص نایلون-۶ را بهبود بخشیدند [۱۷, ۱۸].

تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی پیرامون بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها صورت پذیرفته است. در ادامه تاثیر چند نانوذره بر خواص نانوکامپوزیت‌ها بیان می‌گردد.

- نانو صفحات گرافن

با توزیع نانوصفحات گرافن در شبکه پلیپروپیلن خواص پایداری حرارتی و بلورینگی افزایش یافته و خاصیت الکتریکی نانوکامپوزیت نیز بهبود پیدا کرد [۱۹]. نانوصفحات گرافیتی ورقه شده از طریق اختلاط مذاب در شبکه پلیپروپیلن توزیع شده و نتایج بدین شکل شد که طی افزودن تا ۵٪ نانوصفحات گرافیتی، استحکام خمشی، استحکام ضربه و مدول یانگ بهبود داشته و در مقادیر بیش از ۵٪ به دلیل کلوخه شدن، خواص مذکور کاهش یافته و روند معکوس شد [۲۰]. طی اختلاط توده‌ای نانوصفحات گرافیتی ورقه‌ای شده تا ۲,۵٪ در شبکه پلیپروپیلن، استحکام تسلیم ۶۰٪ و مدول یانگ ۱۰۰٪ بهبود پیداکرد [۲۱]. نتایج توزیع یکنواخت اکسید گرافن در پلیپروپیلن به روش اختلاط محلولی نشان می‌دهد که افزودن ۰/۱٪، ۰/۳٪، ۰/۵٪ باعث افزایش ۴/۲۵٪، ۱۳/۲۵٪ و ۴۷٪ در استحکام تسلیم می‌گردد [۲۲].

Sheet-like filler
Thickness ~1 nm



Fiber or tube filler

Diameter < 100 nm



Spherical filler
Diameter < 100 nm

شکل ۴ انواع پرکننده [۸]

۳- نانوکامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

سرامیک‌ها ترد بوده و به راحتی می‌شکنند که علت آن انتشار ترک می‌باشد. البته جهت ایجاد سرامیک مناسب کاربردهای مهندسی کارهایی صورت گرفته که از طریق ترکیب فاز چکش خوار یا سرامیک دیگر به ماده زمینه می‌باشد. این امر منجر به بهبود خواص مکانیکی مانند سختی و چقرمگی شکست می‌شود [۹].

۲- نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی

نانوکامپوزیت‌های ماتریس فلزی، کامپوزیت‌هایی با زمینه مت Shankل از یک فلز یا آلیاژ هستند که تقویت‌کننده آن در اندازه نانو باشند. این مواد ویژگی‌های فلز و سرامیک، یعنی شکل‌پذیری و چقرمگی را با استحکام و مدول بالا ترکیب می‌کنند. بنابراین نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی برای تولید مواد با استحکام بالا مناسب می‌باشند [۹].

۳- نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری

تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در این نانوکامپوزیت‌ها براساس ابعاد دسته‌بندی می‌شوند [۱۰]. به عنوان مثال، هنگامی که بحث سه‌بعدی مطرح است، به آن‌ها نانوذرات ایزودایمنشن گفته می‌شود و هر سه بعد آن‌ها در مقیاس نانو بررسی می‌شوند، مانند ذرات کروی سیلیکا-فلز [۱۱]. نوع دوم تقویت‌کننده‌ها که در دو بعد مورد بحث بوده و اجزای طویلی را شکل می‌دهند نانولوله‌ها می‌باشند که دو بعد آن‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. شکل (۵) یک نمونه نانو لوله را نشان می‌دهد.

نوع سوم عبارت است از تقویت‌کننده‌هایی که به صورت یک بعدی بررسی می‌شوند [۱۲-۱۴]، بدین صورت که صفحاتی با

اپوکسی استحکام فشاری و مدول الاستیک به ترتیب $13/5\%$ و $6/1\%$ بهبود می‌یابند [۲۸].

نانوذرات کلسیم کربنات تا 3% وزنی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت، استحکام خمثی، مدول خمثی، استحکام کششی و مدول کششی را به ترتیب تا 28% ، 35% ، 20% و 30% افزایش می‌دهند که این امر از افزایش توانایی انتقال بار میان ماده زمینه و تقویت‌کننده و همچنین بهبود خواص مکانیکی ماده زمینه ناشی می‌گردد [۲۹].

استحکام ضربه کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانوذرات کلسیم کربنات در طی افزایش نانوذرات تا کمتر از 6 درصد وزنی بهبود می‌یابد، ولی بیش از 6% وزنی نانوذرات، استحکام ضربه کاهش خواهد یافت. این نتیجه نشان‌دهنده این است که میزان زیاد نانوذرات باعث آگلومره شدن ذرات در ماده زمینه و در نتیجه کاهش چقرومگی کامپوزیت می‌شود [۳۰]. اضافه کردن 3 درصد وزنی نانوذرات کربنات کلسیم اصلاح شده سبب می‌گردد تا استحکام برشی بین لایه‌ای، استحکام خمثی و مدول خمثی به ترتیب 25% ، 26% و 27% بهبود یابد [۳۱].

- نانوذرات خاک رس

افزودن نانوذرات خاک رس به نانوکامپوزیت ترموبلاستیک الاستومر موجب افزایش سختی شده که بیشینه آن در 5 درصد وزنی نانوذره خاک رس رخ می‌دهد [۳۲]. نانوذرات رس در ماده زمینه پلیمری باعث بهبود مدول کششی، مقاومت کششی و سختی می‌شود که این امر از ساختار لایه‌ای این پرکننده و در نتیجه پراکنش بهتر ذرات در ماده زمینه ناشی می‌گردد [۳۳]. وجود نانوذرات رس در کامپوزیت سوس برنج-پلاستیک، مقاومت کششی و مدول کششی را تا 5% افزایش خواهد داد، چرا که چسبندگی بین سطوح نانوذرات رس و ماده زمینه افزایش یافته است. از طرفی افزایش مقدار نانوذرات به 7% باعث کاهش مدول کششی و مقاومت کششی می‌شود که این امر به علت تجمع و تراکم نانوذرات و تشکیل توده‌های درهم‌رفته می‌باشد [۳۴].

وجود نانوذرات خاک رس با درصد وزنی 3% در نانوکامپوزیت لاستیک نیتریل-خاک رس مدول کششی و مقاومت کششی را به ترتیب 30% و 219% بهبود می‌بخشد [۳۵]. طی افزودن 1% نانوذره رس به نانوکامپوزیت چوب پلاستیک، مقاومت خمثی 20% ، مقاومت کششی 24% و مدول کششی 13% افزایش یافت [۳۶]. استحکام خمثی، کششی، سختی و ضربه نانوکامپوزیت مونتموریلوئیت-پلیپروپیلن با افزودن 2% خاک رس افزایش خواهد یافت و مقدار بیشتر نانو رس این خاصیت‌ها

- نانوالماس

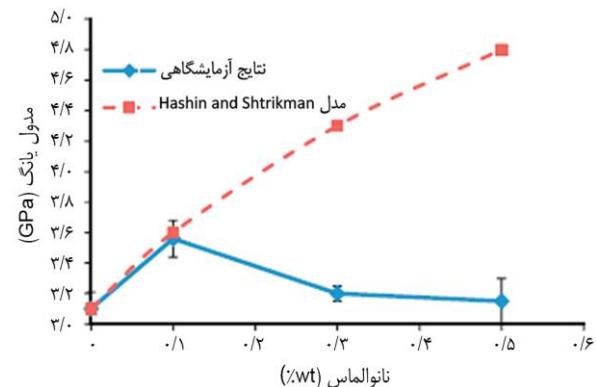
نانوالماس تولید شده با فرایند انفجاری دارای خواص مکانیکی و رسانندگی بالایی هستند و در زیست پزشکی، سامانه‌های تحویل دارو، الکتروشیمی، روانکاری و هم‌چنین نانوکامپوزیت پرکاربرد است که قیمت پایینی نیز دارد و اولین بار در سال 1960 به روش انفجاری تولید شد [۲۳، ۲۴]. برخی از مزایای نانوذرات الماس عبارتند از:

- سطح زیادی دارد که بیشترین تماس را با ماده زمینه ممکن می‌سازد.

- سطح غنی شیمیایی که جهت طراحی سطح، انعطاف پذیری زیادی را ایجاد می‌نماید.

- مدول یانگ و سختی زیاد، رسانندگی گرمایی بالا، ضریب اصطکاک کم و پایداری شیمیایی [۲۵].

در کامپوزیت اپوکسی-نانوالماس با درصد حجمی نانوالماس تا 35% مدول یانگ و سختی این کامپوزیت به ترتیب 300% و 700% افزایش یافته است [۲۳]. مدول یانگ بعد از افزودن نانوالماس با درصد وزنی بیش از 10% نانوالماس به نانوکامپوزیت اپوکسی-نانوالماس دچار افت می‌شود که این مطلب در شکل (۶) نیز بیان شده است. این کاهش، ناشی از کلوجه شدن ذرات نانوالماس و در نتیجه جلوگیری از انتقال تنفس به تقویت‌کننده نانوالماس می‌باشد [۲۶].

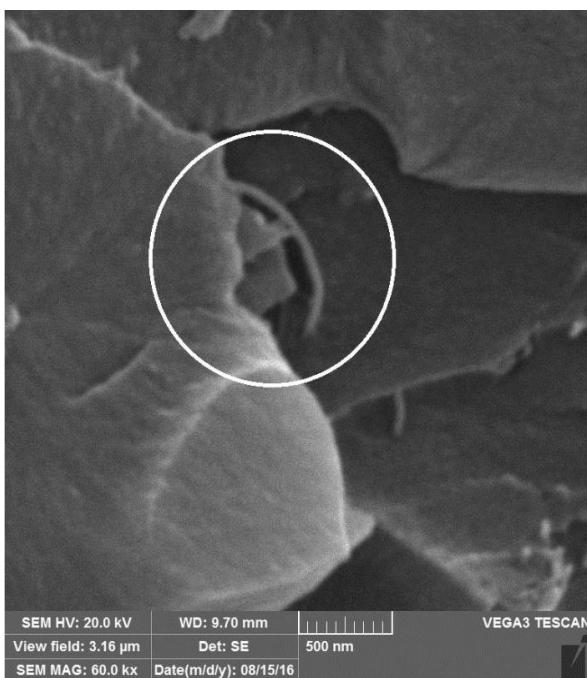


شکل ۶ تغییرات مدول یانگ در درصدهای وزنی نانوالماس [۲۶]

در اثر افزودن نانوذرات الماس اصلاح شده با درصد وزنی $0/3\%$ در پلی‌استر غیراشباع، مدول یانگ نسبت به پلیمر خالص 55% افزایش داشته است [۲۷].

- نانوذرات کربنات کلسیم

از مزایای این نانو ذره می‌توان به ارزان بودن، دردسترس بودن، سبکی، سهولت در تولید و قابلیت تحمل بار بالا اشاره کرد. با افزودن 4% وزنی نانو ذره اصلاح شده به نانوکامپوزیت کلسیم-



شکل ۷ مکانیزم پل زدن نanolوله‌های کربنی [۴۲]

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مکانیزم بهبود خواص مکانیکی نanolامپوزیت‌ها از طریق افزودن نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که اثر چند نانوذره پرکاربرد نانوگرافن، نانو الیاس، نانو رس، نanolوله‌های کربنی و نانوذرات کلسیم کربنات بر خواصی همچون استحکام کششی، مدول کششی، مدول خمشی و چقرمگی بیان گردید. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها با افزودن نانوذرات بهبود می‌یابند. البته درصد نانوذره حد مشخصی داشته و بیش از آن باعث کند شدن و در برخی موارد اثر معکوس بر روند بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. توزیع نانوذرات در ماده زمینه بسیار حائز اهمیت می‌باشد، به طوری که در صورت زیاد بودن درصد نانو ذره و یا توزیع نامناسب آن، امکان کلوخه شدن و عدم انتقال صحیح تنش به تقویت‌کننده وجود داشته که خود باعث کاهش خواصی مانند مدول یانگ می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] Ahmad, J., Machining of Polymer Composites, Springer US, pp. XII, Vol. 315, (2009).
- [2] Soltani, M., Sotoudeh, A., and Sokhandani, N., Explaining the factors affecting the construction of composites by vacuum injection method, *Scientific*

را کاهش می‌دهد که علت آن را می‌توان بدین صورت بیان کرد که با افزایش نانورس، تراکم رس‌ها، خاصیت‌های مکانیکی را کاهش می‌دهد [۳۷]. عوامل ساختاری مانند نسبت حجمی، ضریب ظاهری نانورس و فاصله میان ذرات و میزان درهم‌رفتگی ذرات نانورس بر خواص مکانیکی نanolامپوزیت‌های پلیمر خاک رس تاثیر دارد. دیگر آنکه درصد رس هم بسیار موثر است [۳۸]. البته با افزایش درصد رس، در ساختمان‌های جدید درهم‌رفتگی و نهایتاً توده‌های رس ایجاد خواهد شد و پس از عبور از مقدار مشخصی روند افزایش خواص کم و یا معکوس می‌گردد. افزایش مدول در کامپوزیت را می‌توان به قابلیت رس در برقراری اتصال قوی با ماده زمینه پلیمر نسبت داد [۳۷].

- نanolوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی بین نانو ذرات مختلف مورد استفاده در نanolامپوزیت‌های پلیمری، بیشتر مطرح بوده‌اند؛ علت آن را می‌توان مدول یانگ و استحکام کششی بالا، طبیعی بودن، وزن پایین و پایداری بالا عنوان کرد [۳۹]. افزودن ۱٪ نanolوله به پلی‌اتیلن باعث افزایش مقاومت برشی به اندازه ۱۰ برابر می‌شود [۴۰]. با اضافه کردن نanolوله‌های کربنی با درصد وزنی ۱٪ به رزین وینیل استر، مدول یانگ ۵۳/۱۶٪ افزایش می‌یابد. دیگر آن که با افزایش درصد وزنی نanolوله‌های کربنی چند دیواره، چقرمگی شکست و استحکام کششی کاهش خواهد یافت که علت آن را می‌توان توزیع نامناسب‌تر نanolوله‌ها در پی افزایش درصد نanolوله دانست که نهایتاً باعث ایجاد مناطق دارای تمرکز تنش بالا می‌شود. از همین مناطق ترک شروع شده و موجب شکست زود هنگام قطعات می‌گردد [۴۱]. افزایش ۰/۵ phr نanolوله کربنی باعث می‌شود مدول کششی، مدول خمشی و مقاومت خمشی به ترتیب ۱۰٪، ۲۵٪ و ۷٪ بهبود یابد [۳۹]. طی افزودن ۱٪ درصد وزنی نanolوله کربنی به رزین اپوکسی، استحکام کششی ۱۸/۸۳ درصد افزایش می‌یابد. البته افزایش بیش از حد درصد نanolوله‌ها (۰/۷۵٪ درصد وزنی) باعث کلوخه شدن نanolوله‌ها شده که منجر به کاهش استحکام نهایی نanolامپوزیت خواهد شد. دیگر آنکه با افزودن نanolوله‌های کربنی به رزین وینیل استر چقرمگی افزایش می‌یابد. علت آن را می‌توان به عواملی مانند پل زدن نسبت داد. مکانیزم پل زدن موجب قرارگیری نanolوله در مسیر پیشرفت ترک شده و به بسته ماندن ترک کمک خواهد کرد. در شکل (۷) مکانیزم پل زدن نشان داده شده است [۴۲].

- [15] Schmidt, D., Shah, D., and Giannelis, E., New advances in polymer/layered silicate nanocomposites, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, pp. 205-212, (2002).
- [16] Ray, S.S., and Okamoto, M., Polymer - layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing, *Progress in Polymer Science*, pp. 1539-1641, (2003).
- [17] Shokrieh, M., Zeinedini, A., and Ghoreishi S.M., Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, pp. 125-133, (2015).
- [18] Shameli, M., Choupani, N., and Razavi, M.K., Measurement of mixed-mode fracture toughness of polypropylene using multispecimen J-integral method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 333-334, (2016). (in Persian فارسی)
- [19] Yang, F., Jin, C., Yang, D., Jiang, Y., Li, J., Di, Y., Hu, J., Wang, C., Ni, Q., and Fu, D., Magnetic functionalised carbon nanotubes as drug vehicles for cancer lymph node metastasis treatment, *European Journal of Cancer*, Vol. 47, pp. 1873-1882, (2011).
- [20] Kalaitzidou, K., Fukushima, H., and Drzal, L.T., A new compounding method for exfoliated graphite-polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 2045-2051, (2007).
- [21] Torkelson, J., and Wakabayashi, K., Polymer-graphite nanocomposites via solid-state shear pulverization, *US Patent No. US 7906053 B1*, (2011).
- [22] Gharehbeyglou, M., S.Izadkhah, M., Erfannya, H., and Entezami, A., Improvement of mechanical and thermal properties of chemically modified graphene oxide/polypropylene nanocomposite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 206-196, (1395). (in Persian فارسی)
- [23] Neitzel, I., Mochalin, V., Knoke, I., Palmese G.R., and Gogotsi, Y., Mechanical properties of epoxy composites with high contents of nanodiamond, *Composites Science and Technology*, Vol. 71, pp. 710-716, (2011).
- [24] Mochalin, V.N., Shenderova, O., Ho, D., and Gogotsi, Y., The properties and application of nanodiamonds, *Nature Nanotechnology*, Vol. 7, pp. 11-23, (2012).
- [25] Mochalin, V.N., and Gogotsi, Y., Nanodiamond-polymer composites, *Diamond & Related Materials*, Vol. 58, pp. 161-171, (2015).
- [3] Fischer, H., Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications, *Materials Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 763-772, (2003).
- [4] Daniel, I.M., and Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd Edition, *Oxford University Press*, New York, (2006).
- [5] Ghamati, M., and Sadeghian, M.S.S., Nano Composite, *The third national conference of new technologies of chemistry and chemical engineering*, (2014). (in Persian فارسی)
- [6] Guo, Z., Chen, Y., and Lu, N.L., Multifunctional Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, *John Wiley & Sons*, Vol. 1, (2018).
- [7] Bikaris, D., Microstructure and properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites, *Materials*, pp. 2884-2946, (2010).
- [8] Fu, Sh., Sun, Z., Huang, P., Li, Y., and Hu, N., Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review, *Nano Materials Science*, Vol. 1, pp. 2-30, (2019).
- [9] Camargo, P.H.C., Satyanarayana, K.G., and Wypych, F., Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, Vol. 12, pp. 1-39, (2009).
- [10] Alexandre, M., and Dubois, P., Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 28, pp. 1-63, (2000).
- [11] Herron, N., and Thorn, D.L., Nanoparticles: uses and relationships to molecular cluster compounds, *Advanced Materials*, pp. 1173-1184, (1998).
- [12] Favier, V., Cavaille, J.Y., Canova, G.R., and Shrivastava, S.C., Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites, *Polymer Engineering Science*, pp. 1732-1739, (1997).
- [13] Chazeau, L., Cavaillé, J.Y., Canova, G., Dendievel, R., and Boucherin, B., Viscoelastic properties of plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers, *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1797-1808, (1999).
- [14] Ogawa, M., and Kazuyuki, K., Preparation of inorganic-organic nanocomposites through intercalation of organoammonium ions into layered silicates, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, pp. 2593-2618, (1997).

- [35] Bagheryan Mahmoudabadi, A., Nodehi, A., and Ataei, M., Properties of nitrile rubber/clay nanocomposites prepared by in situ emulsifier-free emulsion polymerization, *Polymer Science and Technology*, Vol. 28, pp. 242-233, (1394). (in Persian فارسی)
- [36] Wu, Q., Lei, Y., Yao, F., Xu, Y., and Lian, K., Properties of HDPE/clay/wood Nanocomposites, *Journal of Plastic Technology*, Vol. 27, pp. 108-115, (2007).
- [37] Samal, S.K., Nayak, S.K., Mohanty, S., Polypropylene nanocomposites: effect of organo-modified layered silicates on mechanical, thermal and morphological performance, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 8, pp. 243-263, (2008).
- [38] Zhao, Y., Wang, K., Zhu, F., Xue, P., and Jia, M., Properties of poly(vinylchloride)/woodflour/montmorillonite composites: effects of coupling agents and layered silicate, *Journal of Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, pp. 2874-2883, (2006).
- [39] Rezanezhad, S., Hour, M., Joudat, H., and Shaabani, H., Investigating the effect of increasing carbon nanotubes on the mechanical properties of pre-impregnated glass fibers/epoxy resin used in wind turbine blades, *The second specialized conference on nanotechnology in the electricity and energy industry*, (2014). (in Persian فارسی)
- [40] Frankland, S.J.V., Caglar, A., Brenner, D.W., and Griebel, M., Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces, *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 106, pp. 3046-3048, (2002).
- [41] Dehghan Baniyani, D., J.Jahromi, S.A., and Zebarjad, S.M., Investigating the role of carbon nanotubes on the tensile behavior of vinyl ester nanocomposite, *New Processes in Material Engineering*, Vol. 8, pp. 64-57,(2013). (in Persian فارسی)
- [42] Vahedi, F., Shahverdi, H.R., Shokrieh, M.M., and Esmkhani, M., Effects of carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of epoxy-based composites, *New Carbon Materials*, Vol. 29, pp. 419-425, (2014).
- [26] Ayatollahi M.R., Alishahi, E., Doagou-R, S., and Shadlou, S., Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond/epoxy nanocomposites, *Composites Part B*, Vol. 43, pp. 3425-3430, (2012).
- [27] Hashemi, M., and Shojaei, A., Morphology development and mechanical properties of unsaturated polyester resin containing nanodiamond, *Polymer International*, Vol. 66, pp. 950-959, (2017).
- [28] He, H., Zhang, Z., Wang, J. and Li, K., Compressive properties of nano-calcium carbonate/epoxy and its fibre composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, pp. 919-924, (2013).
- [29] Abdi, A., Eslami Farsani, R., and Khosravi, H., Evaluating the mechanical behavior of basalt fibers/epoxy composites containing surface-modified CaCO₃ nanoparticles, *Fibers and Polymers*, Vol. 19, pp. 635-640, (2018).
- [30] Li, L., Zou, H., Shao, L., Wang, G., Chen, J., Study on mechanical property of epoxy composite filled with nano-sized calcium carbonate Particles, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 1297-1299, (2005).
- [31] Shahbakhsh, S., Khosravi, H., Tohidlou, E., Improvement in interlaminar shear strength and flexural properties of carbon fiber/epoxy composite using surface-modified carbonate calcium, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, Issue 3, pp. 343-350, (2019).
- [32] Farahba, I., Manafi, S., Shahedi Asl, M., and Nayebi, B., Investigating mechanical and thermal properties of NBR/PP elastomer thermoplastic nanocomposite and clay nanoparticles, Vol. 8, pp. 28-17, (1397). (in Persian فارسی)
- [33] Wang, L., Wang, K., Chen, L., Zhang, Y., and He, C., Preparation, morphology and thermal/ mechanical properties of epoxy/clay nanoclay composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 37, Issue 11, pp. 1890-1896, (2006).
- [34] Alinaghizadeh, E., Hashemyan, S., and Nateghi, M., The use of nanoclay particles in improving the functional properties of rice bran-plastic composite, *Journal of Textile and Clothing Science and Technology*, Vol. 8, pp. 30-25, (2018). (in Persian فارسی)