

تأثیر تیغه بدنه دارای توپرکل بر کاهش توان مصرفی شناور کانتینربر در حالت خودران

چکیده: با توجه به اهمیت روزافزون انتشارات آلاینده در حمل و نقل دریایی و ضرورت کاهش مصرف سوخت کشتی ها، تلاش هایی به عمل آمده است تا این مسئله مورد توجه قرار گیرد. به تازگی، تیغه بدنه که به عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی در ناحیه پاشنه کشتی نصب شده و مقاومت را کاهش می دهد، معرفی شده است. به علاوه، مطالعاتی بر روی استفاده از برآمدگی در لبه حمله هیدروفویل (توبرکل) نیز از موضوعات درحال بررسی است. هدف از این مطالعه ارزیابی تأثیر تیغه بدنه با و بدون توپرکل بر ضریب مقاومت کل و ضرایب پروانه در شرایط خودران است، همچنین تأثیر آنها بر مصرف انرژی کشتی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهند که برای کشتی ای که دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است، ضریب مقاومت کل ۱/۷۷٪، ضریب تراست ۲/۸۵۳٪ و ضریب گشتاور ۱/۱۴٪ نسبت به کشتی بدون تیغه بدنه کاهش یافته است. علاوه بر این، برای کشتی ای که دارای تیغه بدنه با توپرکل های لبه حمله است، این ضرایب به ترتیب ۱/۸۵٪، ۳/۴۸۸٪ و ۱/۹۴٪ کاهش یافته اند. علاوه بر این، مصرف انرژی در کشتی دارای تیغه بدنه با توپرکل های لبه حمله نسبت به کشتی دارای تیغه بدنه معمولی ۷۸۹٪ کاهش یافته است.

واژه های راهنما: کاهش مصرف سوخت، تیغه بدنه، توپرکل، خودران

حسن صیادی*
استاد

حمیدرضا
حمرانی سالمی

کارشناسی ارشد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

Hassan Sayyaadi*
Professor

Hamidreza
Hamrani Salemi

MSc. Student,
Department of
Mechanical
Engineering, Sharif
University of
Technology, Tehran

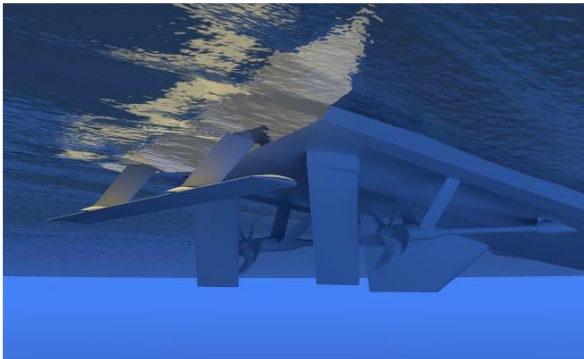
The effect of hull vane with tubercles on reducing the power consumption of the container ship in self-propulsion mode

Abstract: Given the growing importance of emissions in maritime transportation and the need to reduce ship fuel consumption, efforts have been made to address this concern. Recently, the hull vane, serving as an energy storage device, has been introduced to the ship's stern area, reducing resistance. Additionally, recent studies have explored the use of tubercles on hydrofoils. This study aims to assess the impact of hull vane, with and without tubercles, on total resistance and propeller coefficients in self-propulsion conditions, as well as their effect on vessel power consumption. Results show that for a vessel with a smooth leading-edge hull vane, the total resistance coefficient decreased by 1.77%, propeller thrust coefficient by 2.853%, and torque coefficient by 1.14% compared to a vessel without a hull vane. Furthermore, for a vessel with a leading-edge tubercles hull vane, these coefficients decreased by 1.85%, 3.488%, and 1.94% respectively. Additionally, power consumption decreased by 0.789% compared to a vessel with a regular hull vane.

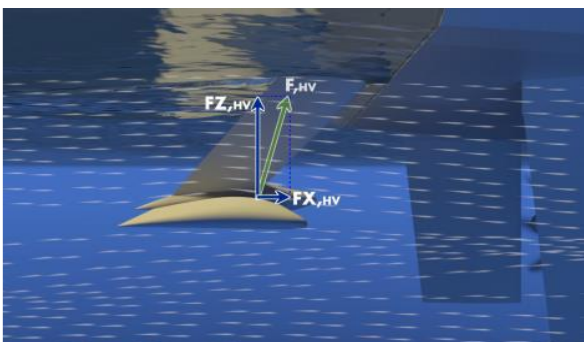
Keywords: Emission Reduction, Hull Vane, Tubercles, Self-Propulsion

۱- مقدمه

با توضیحات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که تیغه بدنه یک ابزار کارآمد برای ذخیره انرژی و به تبع آن کاهش مصرف سوخت، و همچنین بهبود کیفیت دریامانی با کاهش حرکت پیچ نیز می‌باشد.



شکل ۱ پیکربندی تیغه بدنه [۱]



شکل ۲ نیروی رانش ایجاد شده از نیروی لیفت زاویه‌دار [۱]

تعدادی از مطالعات در مورد تیغه بدنه نشان می‌دهد که یک ابزار مؤثر برای کاهش قابل توجه مقاومت کشتی است. که برای جابجایی نسبتاً بالا در سرعت‌های عملیاتی گسترده‌تر مناسب است. همچنین مؤثرترین منطقه عدد فرود برای کشتی با تیغه بدنه بین ۰/۲ تا ۰/۷ است [۳]. در زیر این ناحیه سرعت، نقش مؤلفه اصطکاکی یا درگ اضافی پررنگ‌تر خواهد شد. و فراتر از این منطقه سرعت، مؤلفه عمودی لیفت، ممان بسیار بالایی ایجاد می‌کند که سبب افزایش مقاومت کل می‌شود. همچنین شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی CFD نشان می‌دهند که تیغه بدنه اعمال شده در مدل ۱/۵ متری سری AMERCRC منجر به کاهش ۱۴/۳۳، ۱۰/۵۳ و ۸/۰۵ درصد مقاومت برای اعداد فرود به ترتیب ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ می‌شود [۳]. علاوه بر این، تحقیق بر M اساس روش CFD برای تیغه بدنه بر روی ناوشکن DTB ۵۴۱۵ انجام شد [۴]. در این تحقیق نشان داده است که زمانی که سرعت به ترتیب ۱۸، ۲۴ و ۳۰ گره باشد، مقاومت به ترتیب ۱/۱۷٪، ۸/۴٪ و ۶/۷٪ کاهش خواهد

در اواخر دهه هشتاد میلادی سازمان بین‌المللی دریانوردی فعالیت در زمینه کاهش آلودگی هوا توسط کشتی‌ها را آغاز نمود و حاصل آن تصویب ضمیمه شش مارپل و اجباری شدن آن از سال ۲۰۰۵ میلادی می‌باشد. از آن زمان با توجه به افزایش اهمیت میزان انتشار آلاینده‌ها در صنعت حمل‌ونقل دریایی و مقررات سخت‌گیرانه‌تر سازمان بین‌المللی دریانوردی و هزینه بالای سوخت کشتی‌ها، مالکان کشتی به دنبال روش‌های کاهش مصرف سوخت می‌باشند. بدین منظور فعالیت‌های مختلفی در رابطه با کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها انجام شد. از این میان استفاده از دستگاه‌های ذخیره انرژی، می‌تواند راهگشا باشد. اخیراً تیغه بدنه به‌عنوان یک فویل ثابت زیر آب که در ناحیه پاشنه کشتی نصب شده است، به‌عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی به بازار معرفی شده است، که بیان می‌کند توانایی ذخیره انرژی با کاهش مقاومت را دارد. این وسیله توسط ون اوسانن در سال ۱۹۹۲ اختراع شد [۱].

پس از سال‌ها آزمایش و بهینه‌سازی، در سال ۲۰۱۴ با ادعای کاهش مصرف سوخت به میزان ۲۹٪ به طور موفقیت آمیزی آغاز شد. تیغه بدنه از لحاظ ظاهری مشابه هیدروفویل‌های سنتی است، اما اصل کاهش درگ در تیغه بدنه با هیدروفویل متفاوت است. کاهش مقاومت کلی توسط تیغه بدنه را می‌توان به چهار اثر مجزا تجزیه کرد [۱]:

- ۱- ایجاد مؤلفه رو به جلو در جهت طولی لیفت، باعث ایجاد نیروی اضافی رانشی می‌شود؛
- ۲- مؤلفه عمودی لیفت به طور مؤثر با ایجاد گشتاور، باعث اصلاح تریم کشتی می‌شود؛
- ۳- فشار منفی بر روی قسمت بالایی فویل، بر روی موج و تولید دنباله پاشنه تاثیر گذاشته و آن را کاهش می‌دهد؛
- ۴- در امواج، تیغه حرکات و مقاومت افزوده کشتی را کاهش می‌دهد.

شکل (۱) پیکربندی تیغه بدنه را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌شود تیغه بدنه را در دسته‌بندی تجهیزات ذخیره انرژی پس‌چرخش قرار داد، که با توجه به جهت حرکت جریان سیال در پاشنه کشتی، نیرویی مطابق شکل (۲) بوجود می‌آید، که با تجزیه آن به مؤلفه‌های افقی و عمودی، یک نیروی تراست در راستای حرکت شناور و یک نیروی لیفت، عمود بر جهت حرکت ایجاد می‌شود.

درجه در محدوده عدد فرود 0.6 تا 1.3 ، با بار سرویس 2 کیلوگرم انجام شده است. از تجزیه و تحلیل نتایج مدل شبیه‌سازی شده با بارگذاری مختلف نتیجه گرفته شد که فویل در بار 2 کیلوگرم، چه با استفاده از فویل در زاویه حمله 3 درجه و چه صفر درجه، به‌طور بهینه کار می‌کند. در زاویه حمله 3 درجه، کاهش بهینه مقاومت در عدد فرود 1.1 تا 1.3 ، با کاهش پی‌درپی $26/26\%$ ، $21/86\%$ و $21/45\%$ رخ داد که در عدد فرود 1.1 بیش‌ترین کاهش را داشت. درحالی‌که برای زاویه حمله صفر درجه، کاهش بهینه مقاومت در عدد فرود 0.7 تا 0.9 ، به ترتیب $79/7\%$ ، $18/86\%$ و $26/7\%$ کاهش می‌یابد که در عدد فرود 0.9 بیش‌ترین کاهش مقاومت کل را دارد. درباره اثر موقعیت تیغه بر مقامت شناور با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی نیز مطالعه‌ای صورت گرفته است [۸]. در این تحقیق فویل استفاده‌شده از نوع $NACA 2415$ با زاویه حمله 5 درجه، طول دهانه $9/76$ متر و طول وتر $1/15$ متر بود. این پژوهش برای شش مدل تیغه مختلف انجام شد (در مقاله این شش حالت آورده شده است). نتایج نشان داد که در حالت فویل تکی که در 50% آبخور یعنی $2/9$ متر قرار دارد هنگامی که شناور با عدد فرود 0.342 در حال حرکت است، مقاومت به‌طور بهینه‌ای کاهش می‌یابد. که این کاهش مقاومت در مقایسه با بدنه بدون تیغه $20/135\%$ خواهد بود. علاوه بر این، تقلید از طبیعت، یکی از راه‌های کلیدی در افزایش بازدهی مصنوعات ساخته‌شده به دست بشر است. اخیراً مطالعاتی در مورد برآمدگی‌های لبه حمله باله نهنگ گوژپشت انجام شده است (شکل ۳)، که نشان می‌دهد این باله‌ها قدرت مانور نهنگ گوژپشت را در هنگام تعقیب طعمه، با به تأخیر انداختن جدایش جریان در زوایای حمله بزرگ‌تر، به شکل مؤثری افزایش می‌دهند [۹]. در نتیجه این باله‌ها عملکرد هیدرودینامیکی و توانایی این وال‌ها را برای ایجاد حرکات تند باوجود بدن حجیم را افزایش می‌دهند [۱۰]. این نوع از بال‌ها کاربردهای متنوعی را در صنایع مختلف دارا می‌باشند.

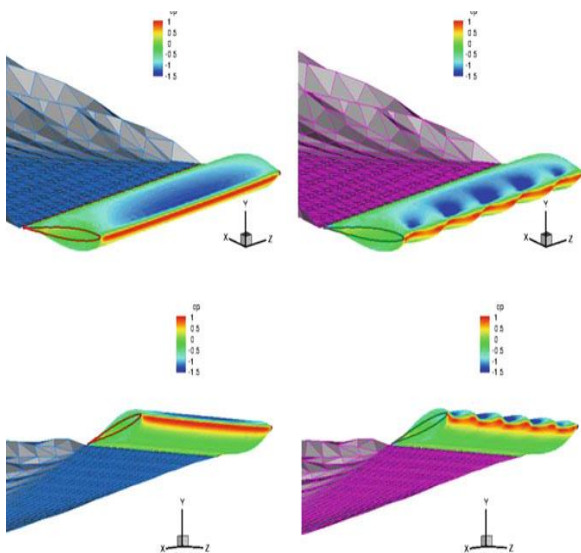


۳ نهنگ گوژپشت [۱۱]

یافت. همچنین ثابت‌شده است که تیغه بدنه قادر به کاهش مقاومت کل به میزان $15/3\%$ برای $Holland Class OPV$ 10.8 متری است [۱].

مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی همچنین عملکرد کشتی در امواج را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است، مشاهده شد که استفاده از تیغه بدنه می‌تواند حرکت هیو را به میزان $4/2\%$ ، پیچ را به میزان $8/1\%$ مقاومت را به میزان $4/9\%$ در امواج 2 متری کاهش دهد. مطالعه دیگر بر اساس شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که کاربرد تیغه بدنه بر روی 13 AMEREC می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر مقاومت و تریم کشتی در امواج تأثیر بگذارد [۱]. همچنین کاهش مقاومت تا $32/4\%$ مشاهده می‌شود، کاهش مقاومت به موقعیت عمودی و افقی تیغه بستگی دارد. همچنین اشاره شده است که موقعیت طولی پره یا تیغه تأثیر بیشتری بر عملکرد، نسبت به موقعیت عمودی دارد.

علاوه بر این، شبیه‌سازی کد دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی تأثیر فویل پاشنه بر مقاومت کشتی انجام گرفت و آزمایش در حوضچه کشش برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شد. یک مدل از بدنه 40 متری $Orela$ برای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که، ضریب مقاومت کل، وقتی که عدد فرود پایین است، بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود (در مانع مقاومتی)، شروع به کاهش می‌کند. همچنین دریافت شد، مقاومت، برای اعداد فرود کمتر از 0.45 ، تا بیش از 13.9% افزایش می‌یابد و در اعداد فرود بیش از 0.55 ، مقاومت تا بیش از 10% کاهش می‌یابد، این درحالی‌که است که مانع مقاومتی در عدد فرود تقریبی 0.47 اتفاق می‌افتد [۵]. مطالعه دیگری در رابطه با تیغه بدنه انجام شد [۶]. در این پژوهش تیغه بدنه در ناحیه پاشنه بر روی شناورهای با ناحیه بیلج گرد نصب شد، برای شکل تیغه از هیدرو فویل $NACA 4412$ استفاده شد. این کار بر روی شناورهای سری AMECRC و مدل‌های $\#3$ ، $\#4$ ، $\#8$ ، $\#11$ و $\#13$ انجام شد. مدل‌های $\#8$ ، $\#11$ و $\#13$ کاهش قابل توجه 7 تا 29 درصدی در مقاومت را با میانگین کاهش $17/3\%$ با قرارگیری تیغه بدنه، از خود نشان دادند. این در حالی است که مدل‌های $\#3$ ، $\#4$ هیچ بهبود قابل توجهی در مقاومت نشان ندادند. و در واقع مدل $\#4$ افزایش مقاومت را در هنگام قرار دادن تیغه بدنه از خود نشان داد. همچنین در پژوهشی، به تجزیه و تحلیل کاهش مقاومت در کشتی‌های گشتی با سرعت بالا با استفاده از فویل عقب از طریق مدل شبیه‌سازی پرداخته است [۷]. این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و با زاویه حمله 3 و 0



شکل ۴ روش پانل برای شبیه‌سازی بال با طول دهانه محدود تحت زاویه ۱۰ درجه، با لبه حمله صاف (سمت چپ) و برای لبه حمله دارای برآمدگی (سمت راست)، رنگ قرمز نشان دهنده فشار زیاد و آبی نشان دهنده فشار کم و سبز نشان دهنده فشار متوسط است [۱۵].

شبیه‌سازی RANS نشان داد که فویل با توپرکل، کانتورهای فشار سطحی، خطوط جریان و الگوی جداسازی جریان را در مقایسه با یک بخش فویل با لبه حمله صاف تغییر داده است (شکل ۵). فویل صاف (بدون توپرکل)، جدایش و تلاطم جلوی لبه فرار را در طول فویل نشان داد. از طرفی برای فویل دارای توپرکل، جداسازی تقریباً تا لبه فرار برای نواحی پایین دست تاج توپرکل به تاخیر افتاد. این تغییر در جریان به افزایش فشار در سمت مکش مربوط می‌شود که به طور محلی گرادبان فشار معکوس را کاهش می‌دهد. توپرکل‌ها، گردابه‌های جدا شده و خمیده را در قعرها با زاویه حمله بالا تولید می‌کنند. از آنجا که جریان به طور عمودی به لبه حمله برخورد نمی‌کند، جریان در مرکز فرورفتگی‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود. این گرداب‌ها در طول وتر منظم می‌شوند و در طول وتر انتقال پیدا می‌کنند.

این اثرات مانع از جدا شدن لایه مرزی محلی در پایین دست توپرکل‌ها شده و خط واماندگی را به سمت لبه فرار هل می‌دهد. یک آزمایش تجربی از اثر توپرکل با استفاده از یک مدل وال گوژپشت فرضی در تونل باد در آکادمی نیروی دریایی ایالات متحده انجام شد [۱۸]. دو مدل با مقیاس ۱:۴ از بال‌هایی با مقطع NACA ۰۰۲۰ با و بدون توپرکل ساخته شدند. تست‌های استاتیک بر روی طیف وسیعی از زوایای حمله در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰۰ اجرا شدند که با سرعتی که تقریباً نصف

بوشنل و مور (۱۹۹۱) اولین کسانی بودند که نشان دادند که توپرکل‌ها می‌توانند در کنترل جریان بر روی باله وال گوژپشت نقش داشته باشند. آن‌ها پیشنهاد کردند که توپرکل‌ها ممکن است درگ را روی باله کاهش بدهند. همچنین این برآمدگی‌ها می‌توانند برای تولید گردابه به عنوان استریک در هواپیماها مورد استفاده قرار گیرند [۱۲]. همچنین توپرکل‌های وال گوژپشت به عنوان استریک به کار رفته در هواپیما در نظر گرفته شده‌اند [۱۲].

استرک‌ها^۱ ژنراتورهای گردابه هستند که ویژگی‌های واماندگی^۲ یک بال را تغییر می‌دهند [۱۳]. همچنین در زوایای حمله بزرگ، استریک‌ها در مقایسه با بال‌های بدون استریک تاخیر ایجاد می‌کنند، اگر چه حداکثر لیفت از تغییرات جریان توسط استریک‌ها افزایش نمی‌یابد [۱۳].

در مرجع [۱۴] با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی اولین مطالعه مرتبط با طراحی منحصر به فرد بال وال گوژپشت را انجام دادند. یک روش پانل سه‌بعدی غیر لزج برای مدلسازی میدان جریان روی بخش‌های بال، با و بدون توپرکل در زاویه حمله ۱۰ درجه استفاده شد. مشخص شد که تنش برشی کل، بین توپرکل‌ها ۱۰٪ بیشتر از دیگر مکان‌ها در امتداد لبه حمله است (شکل ۴). نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که یک بال با برآمدگی لبه حمله می‌تواند لیفت را افزایش دهد در حالی که درگ القا شده را در مقایسه با بال با لبه حمله صاف کاهش می‌دهد. روش پانل افزایش ۴/۸ درصدی در لیفت، کاهش ۱۰/۹ درصدی در درگ القایی، و افزایش ۱۷/۶ درصدی در نسبت لیفت به درگ برای بخش‌های بال با توپرکل را نشان داد [۱۴]. همچنین فرض بر این است که توپرکل‌ها می‌توانند جدایی لایه مرزی را تغییر داده، به تاخیر انداخته و در نتیجه باعث تاخیر در واماندگی شوند.

شبیه‌سازی غیر دایم^۳ (RANS) برای جریان تراکم ناپذیر توسط جان ریفرنبرگ از دانشگاه کارنگی ملون و اریک پاترسون از دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا انجام شد. تحلیل آن‌ها برای بررسی اثرات توپرکل‌ها بر جداسازی جریان و عملکرد هیدروفویل متقارن برای فویل پایه NACA ۶۳-۰۲۱ در یک زاویه حمله ۱۰ درجه به کار گرفته شد [۱۵]. شرایط شبیه‌سازی برای عدد رینولدز یک میلیون در نظر گرفته شد.

مقایسه بخش‌های بال با و بدون توپرکل، الگوهای جریان متفاوتی را نشان داد که بر عملکرد هیدرودینامیکی تاثیر می‌گذارد [۱۶].

³ Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes

¹ Strake

² Stall

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادلات فوق U_i و $\overline{u_i}$ به ترتیب بیان‌گر سرعت متوسط و نوسانات سرعت در راستای محور مختصات x_i ، فشار P ، متوسط، چگالی و ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. علاوه بر این، ترم $\overline{u_i u_j}$ بیان‌گر تنش رینولدز است، که از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3)$$

که در آن ν_t ویسکوزیته ادی است، که با توجه به اینکه در این فصل از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده می‌شود، به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\omega} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (5)$$

که در آن C_μ ثابت تجربی و k انرژی جنبشی و ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته است.

به‌منظور شبیه‌سازی جریان اطراف کشتی به‌صورت خودرانش، از مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\omega$ استفاده شده است، که روابط آن به شکل زیر است.

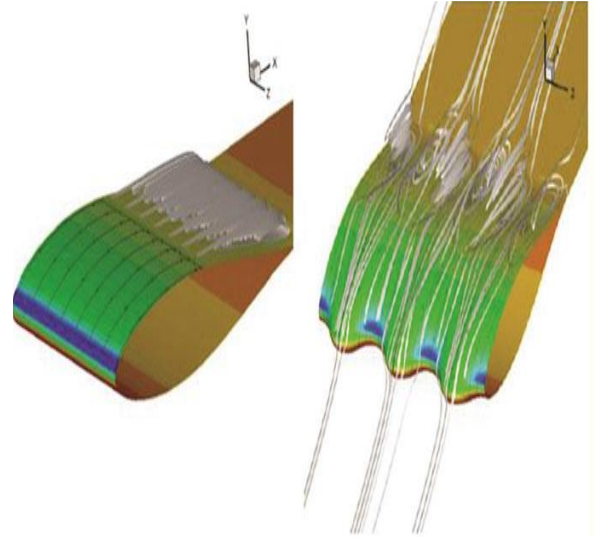
معادله انرژی جنبشی آشفتگی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k^*} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \beta^* k \omega \quad (6)$$

و سپس معادله ω به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j \omega})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega^*} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 \quad (7)$$

سرعت یک وال بود (۲/۶ متر بر ثانیه) صورت گرفت. لذا در پژوهش حاضر از مزایای تیغه بدنه و تورکل‌ها به منظور بهبود عملکرد پروانه و کاهش مصرف سوخت بهره برده می‌شود. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس استفاده خواهد شد.



شکل ۵ کانتور فشار و خطوط جریان در زاویه حمله ۱۰ درجه برای مقطع NACA 63-021 با لبه حمله صاف (سمت چپ) و لبه حمله دارای برآمدگی (سمت راست)، که از معادلات ناویر استوکس میانگیری شده رینولدز ناپایا استفاده شده است. خطوط جدایش بر روی بال با لبه حمله صاف مشاهده می‌شوند؛ در حالی که برای بال با لبه حمله دارای برآمدگی گردابه‌های تشکیل شده قابل مشاهده است که خطوط جریان بدون جدایش را نشان می‌دهد [۱۷]

۲- روش انجام پژوهش

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی جهت حل جریان بر پایه معادلات ناویر استوکس میانگیری شده رینولدز ناپایدار^۱ انجام شده است.

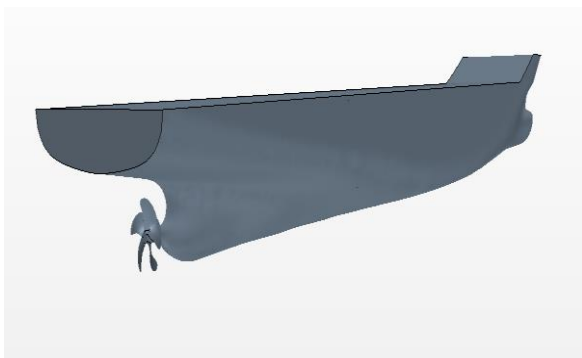
همچنین برای شبیه‌سازی از کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی اسارسی‌سی‌ام‌پلاس^۲ استفاده شده است. از این‌رو معادلات حاکم معادلات بقاء جرم و بقاء ممنتوم برای جریان ناپایدار سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر با سرعت متوسط می‌باشد. از این‌رو معادله پیوستگی نیز به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

همچنین معادله ممنتوم نیز به‌صورت زیر خواهد بود:

² STAR CCM+

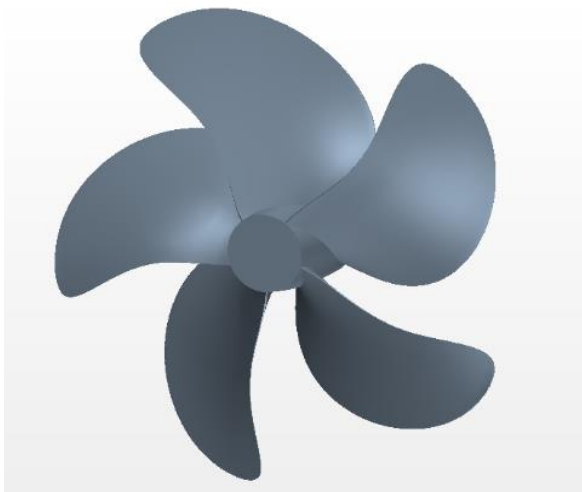
¹ URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes)



شکل ۶ نماهایی از شناور KCS با حضور پروانه و بدن سکان

جدول ۲ ابعاد و مشخصات کشتی KCS

عنوان	نماد واحد	کشتی اصلی	کشتی مدل
	λ	۱	۳۱/۶
طول بین دو عمود	$L_{pp}(m)$	۳۲۰	۷/۲۷۸
عرض کلی	$B(m)$	۳۲/۲	۱/۰۱۹
آبخور	$T(m)$	۱۰/۸	۰/۳۴۲
ضریب بلوکی	C_B	۰/۶۵	۰/۶۵
سرعت	$V(m/s)$	۱۲/۳۵	۲/۱۹۶
عدد فرود	F_r	۰/۲۶	۰/۲۶



شکل ۷ هندسه پروانه KP505

جدول ۳ مشخصات پروانه KP505

قطر	نسبت هاب	نسبت نوع گام	نسبت سطح پره گسترش یافته	تعداد پره	پروفیل پره
۰/۲۵	۰/۱۸	FPP	۰/۵	۵	NACA66

ضرایب موجود در معادلات فوق در جدول (۱) آورده شده است:

جدول ۱ مقادیر مربوط به ضرایب مدل آشفتگی کا-اومگا

ضریب	σ_{ω}^*	σ_k^*	β^*	β	α
مقدار	۲	۲	۰/۰۹	۰/۰۷۵	۰/۵۵

۲-۱- مدل سازی سطح آزاد

جهت مدل سازی سطح آزاد، از روشی به منظور حل جریان دو فازی به نام کسر حجمی سیال استفاده می شود. با تعریف α به عنوان نسبت حجم سیال ۱ به کل سیال، به منظور تعیین سطح آزاد از معادله زیر استفاده می شود:

$$\phi = \phi_1 \alpha + \phi_2 (1 - \alpha) \quad (۸)$$

در معادله فوق ϕ به عنوان یک خاصیت فیزیکی همانند چگالی، ویسکوزیته و غیره، بیان می شود.

$$\begin{cases} \alpha = 1 & \text{درون سیال ۱} \\ \alpha = 0 & \text{درون سیال ۲} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{مشترک دو سیال} \end{cases} \quad (۹)$$

در معادلات بالا اگر برابر ۰/۵ باشد، بدین معناست که سلول محاسبه شده با ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد هوا پر شده، که موقعیت سطح برخورد بین آب و هوا که موسوم به سطح آزاد است را بیان می کند.

۲-۲- مدل هندسی، دامنه حل و شبکه بندی

در پژوهش حاضر شناور مورد استفاده، شناور کانترینر بر KCS است. همچنین پروانه مورد استفاده برای شبیه سازی خودرانش، پروانه KP ۵۰۵ می باشد. مشخصات و ابعاد شناور و پروانه نیز به ترتیب در جداول (۲) و (۳) قابل مشاهده است.

همچنین برای بررسی تأثیر تیغه بدنه با و بدون توپرکل، بر روی مقاومت و ضرایب پروانه مدل هندسی این تیغه به شکل (۸) و (۹) به بدنه شناور متصل شده است که برای کاهش حجم محاسباتی از قرار دادن استراتها اجتناب شده است.

¹ Volume of Fluid (VOF)

انتخاب دامنه حل یا دامنه محاسباتی، متناسب با نوع مسئله، یکی از بخش‌های مهم شبیه‌سازی و تحلیل کشتی می‌باشد. زیرا اگر دامنه محاسباتی مناسب نباشد می‌تواند سبب بروز خطا در حل و یا افزایش هزینه محاسباتی شود. از این رو دامنه محاسباتی و شرایط مرزی متناسب با نوع مسئله به صورت شکل (۱۰) نیز انتخاب گردیده است.

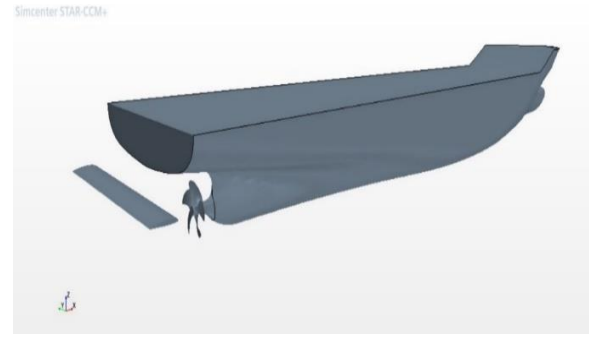
جدول ۴ ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

مرزها	موقعیت	شرط مرزی
Inlet	1.5L From FP	Velocity Inlet
Outlet	2.5L From AP	Pressure Outlet
Sides	2.5L From CL	Velocity Inlet
Bottom	2.5L From Free Surface	Velocity Inlet
Top	1.5L From Free Surface	Velocity Inlet
Interface	1.15D (Propeller Diameter)	Internal Interface

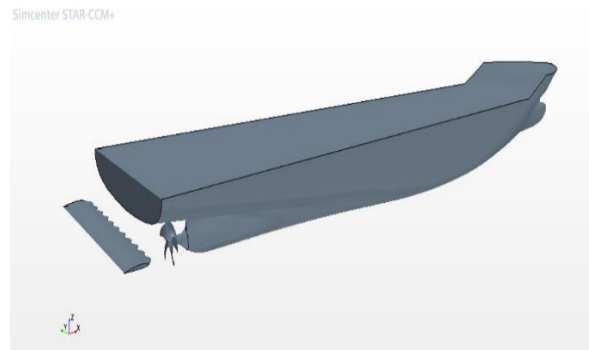
دامنه حل و شرایط مرزی در جدول (۴) نشان داده شده است. علاوه بر این بر روی بدنه شناور شرط عدم لغزش و شرط عدم نفوذ حاکم است. بنا به شرط عدم لغزش، سرعت جریان برابر سرعت بدنه شناور خواهد بود و یا به عبارت دیگر سرعت نسبی بدنه و سیال صفر خواهد بود. پس اگر V سرعت در هر یک از جهات x, y, z ، در نظر گرفته شود در این صورت $V_{wall} = 0$ خواهد بود. در شرط مرزی ورودی تمامی سرعت‌ها در جهات x, y, z ثابت در نظر گرفته شده و همچنین گرادیان فشار برابر صفر است $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. همچنین در شرط مرزی خروجی نیز معادلات به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial^2 V}{\partial n^2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

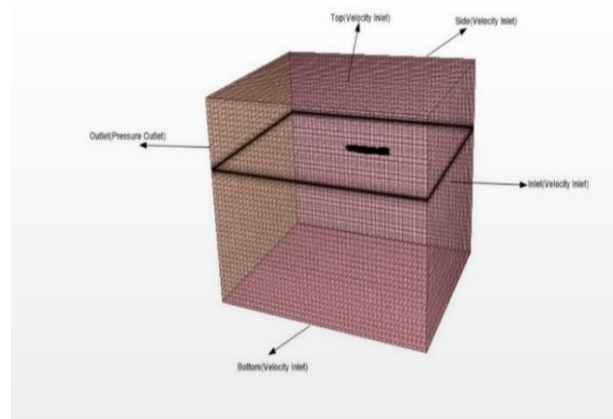
که در آن p فشار و V سرعت در جهات x, y, z است. به منظور شبکه‌بندی از شبکه‌های چهارگوشه (شش‌وجهی) به منظور تولید شبکه با کیفیت بسیار بالا که مناسب برای مسائل پیچیده چند فازی به‌ویژه زمانی که سطح آزاد آب وجود دارد همراه با یکسری اصلاحیه‌ها در اندازه شبکه و لایه‌های مرزی در طول دیواره بدنه شناور استفاده گردید. همچنین برای ناحیه دوار، حول پروانه از شبکه چندوجهی استفاده شد. فرایند تولید



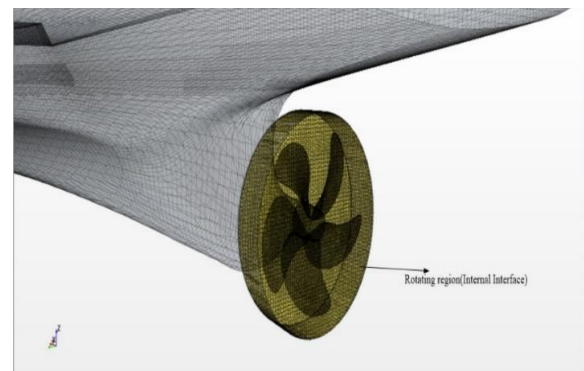
شکل ۸ هندسه تیغه بدنه بدون برآمدگی لبه حمله



شکل ۹ هندسه تیغه بدنه با برآمدگی لبه حمله

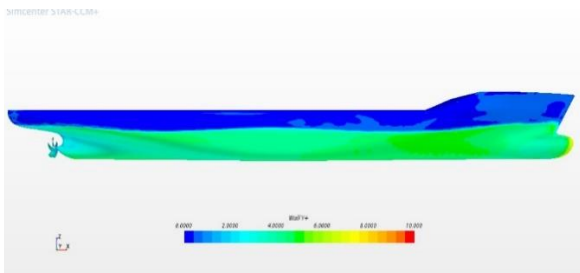
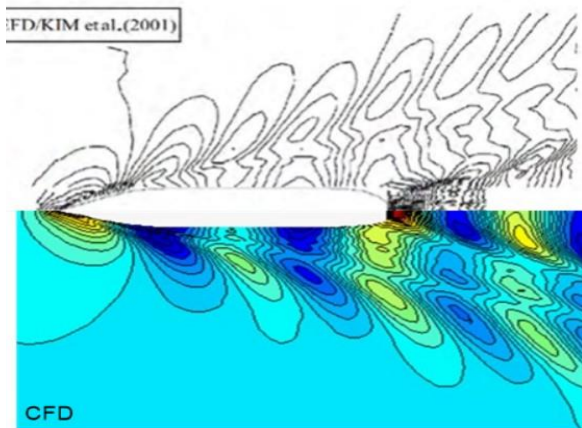


شکل ۱۰ دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی خودرانش



شکل ۱۱ ناحیه دوار حول پروانه

¹ Trimmed mesh

شکل ۱۴ توزیع Y^+ بر روی بدنه و پروانه

شکل ۱۵ مقایسه بین الگوی موج کلویین شناور به صورت عددی و تجربی

۲-۳- روش مدل سازی خودرانش و انتخاب گام زمانی

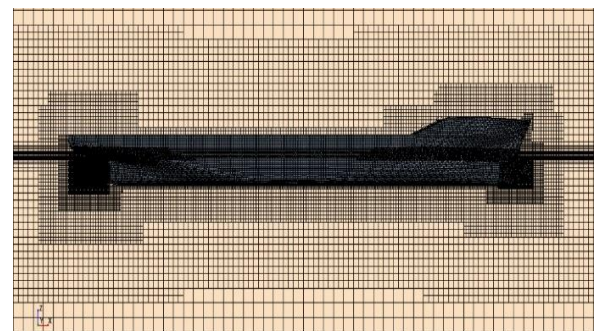
برای پیدا کردن نقطه خودرانش دو راه وجود دارد. یکی از این راه‌ها شبیه‌سازی به صورت تست تجربی است. تست تجربی که برای تست خودرانش شناور KCS انجام پذیرفته، بدین شکل است که شناور در حوضچه کشش با استفاده از ارابه کشش، کشیده شده و پروانه نیز با دور ثابت ۹/۵ دور بر ثانیه دوران می‌کند؛ این در حالی است که ارابه شناور را با عدد فرود ۰/۲۶ می‌کشد. این کار برای تعادل بین نیروها انجام می‌پذیرد. در این روش یک نیروی اضافی با عنوان اصلاح اصطکاک پوسته‌ای^۳ به وجود می‌آید که باید در نظر گرفته شود. اصلاح اصطکاک پوسته‌ای به منظور اصلاح عدم برابر بودن عدد رینولدز در مقیاس مدل و شناور با ابعاد اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله زیر نشان‌دهنده تعادل نیروهاست [۲۰]:

$$SFC = R_T - T \quad (11)$$

در معادله فوق R_T نیروی مقاومت کل بدنه و T نیروی تراست تولیدشده توسط پروانه است. اما راه دیگری که برای یافتن نقطه

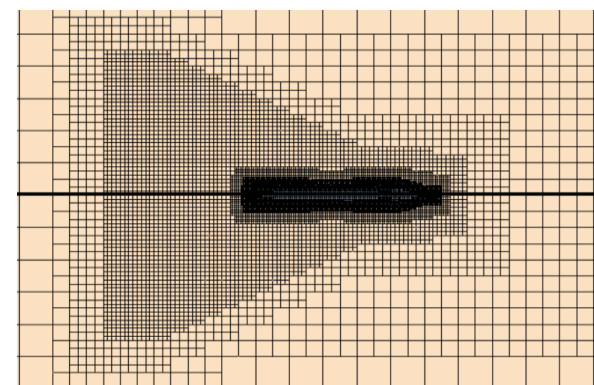
شبکه با تعیین یک اندازه پایه^۱ صورت می‌گیرد و نسبت به آن همه‌ی فاصله‌ها شامل: ضخامت لایه مرزی، اندازه‌ی سلول در نواحی مورد نظر و... تعیین می‌شود [۱۹]. همچنین برای جلوگیری از افزایش تعداد سل‌ها در نواحی که به آن‌ها نیازی نیست، در نواحی مانند سینه، پاشنه و اطراف بدنه شناور مش ریزتری استفاده شده است.

علاوه بر این برای مدل‌سازی پروانه شناور از شبکه لغزان^۲ استفاده شده است (شکل ۱۱). به منظور تنظیم این شبکه ابتدا شناور و دیسک حول پروانه از کل دامنه حل کم شده و با یک ناحیه به شکل دیسک که پروانه از آن کم شده است، در تبادل اطلاعات است.



شکل ۱۲ توزیع مش حول بدنه برای شبیه‌سازی خودرانش

برای بهتر مدل کردن موج کلویین ایجادشده ناشی از حرکت شناور، شبکه در این نواحی ریزتر شده است که در شکل (۱۳) می‌توان آن را مشاهده کرد.



شکل ۱۳ شبکه ریز شده برای مدل کردن موج کلویین

همچنین با توجه به اینکه مدل آشفتگی $k-\omega$ برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، فاصله بدون بعد اولین سلول محاسباتی از دیواره به صورت شکل (۱۴) خواهد شد. علاوه بر این شکل (۱۵) نشان‌دهنده الگوی موج کلویین تولیدشده توسط شناور است.

³ Skin Friction Correction (SFC)

¹ Base size

² Sliding Mesh

برای انتخاب گام زمانی چون از حل ضمنی نا پایا استفاده شده است، از پیشنهادهای ITTC استفاده شده است. بدین منظور برای بدنه، گام زمانی برابر ۰/۰۱۵ و برای پروانه نیز طبق پیشنهاد ITTC در یک گام زمانی، پروانه باید در بازه ۰/۵ تا ۲ درجه بچرخد، بدین علت گام زمانی پروانه برابر ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شده است.

۳- صحت‌سنجی و اعتبارسنجی

$$\delta_G = C_G \frac{\varepsilon_{G21}}{r_G^{PG} - 1} \quad (15)$$

$$U_{GC} = \begin{cases} 2.4(1 - C_G)^2 + 0.1 & |\delta_{REG}^*| |1 - C_G| < 0.125 \\ |1 - C_G| |\delta_{REG}^*| & |1 - C_G| \geq 0.125 \end{cases} \quad (16)$$

اگر C_G ، به اندازه کافی کم‌تر یا بیش‌تر ۱ باشد، فقط عدم قطعیت عددی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{GC} = \begin{cases} 9.6(1 - C_G)^2 + 1.1 & |\delta_{REG}^*| |1 - C_G| < 0.125 \\ (2|1 - C_G| + 1) |\delta_{REG}^*| & |1 - C_G| \geq 0.125 \end{cases} \quad (17)$$

همانطور که اشاره شد سه شبکه با ابعاد g_1 ، g_2 و g_3 ، به منظور صحت‌سنجی شبکه اتخاذ شده است. شبکه برای سه حالت ذکر شده فقط در سایز پایه باهم متفاوت‌اند. که g_1 ، شبکه ریز (۷،۰۱۲،۰۱۹)، g_2 ، شبکه متوسط (۳،۷۰۸،۲۶۹) و g_3 ، شبکه درشت (۱،۵۴۶،۱۸۱) است.

جدول ۵ پارامترهای خودرانش برای صحت‌سنجی شبکه

	g_1	g_2	g_3	R_G	P_G	C_G	δ_G^*	U_{GC}	S_C	U_G
C_T	۰/۰۰۳۸۱	۰/۰۰۳۷۸	۰/۰۰۳۶۹	۰/۳۵۶	۲/۹۸	۱/۸	۰/۰۱۷	۰/۰۴۴۲	۰/۰۰۳۸	-
K_T	۰/۱۵۸۲	۰/۱۵۴۸	۰/۱۴۶۲	۰/۳۹۵	۲/۶۸	۱/۵۲۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۶۸	۰/۱۵۸۲	-
K_Q	۰/۰۲۶۴	۰/۰۲۷۲	۰/۰۲۴۳	-۰/۲۸	-	-	-	-	-	۰/۰۰۲۹

جدول (۵) نشان‌دهنده پارامترهای صحت‌سنجی شبکه برای خودرانش است.

مراحل صحت‌سنجی و اعتبارسنجی به منظور افزایش دقت در نتایج حل عددی، توسط ITTC پیشنهاد شده است [۲۱] که شامل طبقه‌بندی خطاها و عدم قطعیت‌های بوجود آمده از مدل و حل عددی، بر اساس فرآیند پیشنهادی در مطالعات قبلی

خودرانش استفاده می‌شود استفاده از کنترلر است. یک کنترلر سرعت دورانی پروانه برای به حداقل رساندن خطا در عدم تعادل سرعت‌ها یا مقاومت/رانش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی معمولی که برای این منظور به کار می‌رود به صورت زیر پیاده‌سازی می‌شود:

$$n = Pe + I \int_0^t e dt \quad (12)$$

که در آن n سرعت دورانی پروانه برحسب دور بر ثانیه (RPS)، e خطا و P و I ، به ترتیب ثابت‌های تناسبی و انتگرالی هستند. که انتخاب خطا، به مواردی که در ادامه ذکر خواهد شد بستگی دارد.

• اگر کد، قابلیت شش درجه آزادی داشته باشد، پس خطا تفاوت بین سرعت کشتی V و سرعت هدف V_{target} است و سرعت دورانی پروانه توسط کنترلر برای رسیدن به سرعت هدف تغییر می‌کند [۲۱].

$$e = V_{target} - V \quad (13)$$

• اگر کد دینامیک سیالات محاسباتی دارای قابلیت شش درجه آزادی نباشد، یک کنترل‌کننده می‌تواند با استفاده از عدم تعادل در مقاومت F_x و نیروی رانش T برای تعریف خطا به صورت زیر اعمال شود [۲۱]:

$$e = F_x - T \quad (14)$$

از این‌رو در پژوهش حاضر از روش اول استفاده خواهد شد. برای حل سریع‌تر، مسئله به دو بخش تقسیم می‌شود. در ابتدای حل به اندازه ۲۰ ثانیه، با گام زمانی بدنه برای به دست آوردن مقاومت و سطح خیس، حل جلو رفته و سپس برای ادامه تا ۲۴ ثانیه، با گام زمانی پروانه، حل می‌گردد.

¹ Proportional-integral controller (PI)

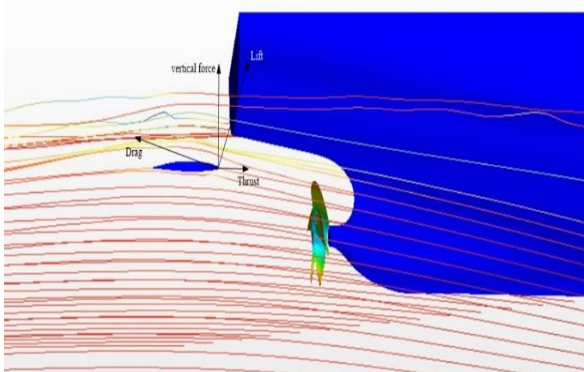
۴- نتایج

پس از صحت سنجی نتایج عددی، تأثیر تیغه بدنه با و بدون برآمدگی لبه حمله بر مقاومت و ضرایب پروانه مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۷) مقایسه بین نتایج بدون تیغه بدنه و با تیغه بدنه با و بدون توپرکل در لبه حمله را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقایسه بین شناور بدون تیغه بدنه و با تیغه بدنه با و بدون توپرکل لبه حمله

نتایج	ضریب مقاومت کل ($\times 10^3$)	ضریب تراست (K_T)	ضریب گشتاور (K_Q)
بدون تیغه بدنه	۳/۷۸۱	۰/۱۵۴۸	۰/۰۲۶۲
با تیغه بدنه معمولی	۳/۷۱۴	۰/۱۵۰۸	۰/۰۲۵۹
با تیغه بدنه دارای توپرکل در لبه حمله	۳/۷۱۱	۰/۱۴۹۴	۰/۰۲۵۶۹

با توجه به نتایجی که در جدول (۷) آمده است، برای حالتی که شناور دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است نسبت به حالت بدون تیغه بدنه، ضریب مقاومت کل ۱/۷۷ درصد، ضریب تراست پروانه ۲/۸۵۳ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۱۴ درصد کاهش یافته است. همچنین برای حالتی که بدنه شناور مجهز به تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی است نسبت به حالتی که شناور مجهز به تیغه بدنه نیست، ضریب مقاومت کل ۱/۸۵ درصد، ضریب تراست پروانه ۳/۴۸۸ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۹۴ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۶ جریان سیال در پاشنه شناور KCS با حضور تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی و نیروهای ایجادشده توسط تیغه بدنه

انجام شده است [۲۲] از این رو به منظور صحت‌سنجی نتایج حلگر عددی، سه شبکه مختلف با نرخ اصلاح شبکه $r = \sqrt{2}$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، پارامترهایی که برای صحت‌سنجی مورد نیاز هستند، عبارتند از: R_G ، که نشان‌دهنده نرخ همگرایی، P_G ، نشان‌دهنده بزرگی دقت، C_G ، نشان‌دهنده فاکتور اصلاح ۳ و δ_G^* ، نیز بیان‌کننده خطای شبکه ۴ است، و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۲]:

$$R_G = \varepsilon_{G_{21}} / \varepsilon_{G_{32}}; \varepsilon_{G_{ij}} = S_{Gi} - S_{Gj} \quad (18)$$

$$P_G = \frac{\ln(\varepsilon_{G_{32}} / \varepsilon_{G_{21}})}{\ln(r_G)} \quad (19)$$

$$C_G = \frac{r_G^{P_G} - 1}{r_G^{P_{Gest}} - 1} \quad (20)$$

$$\delta_G^* = \frac{\varepsilon_{G_{21}}}{r_G^{P_G} - 1} \quad (21)$$

که در آن P_{Gest} تخمینی برای محدود کردن بزرگی دقت است، و مقدار پیشنهادی آن برابر ۲ است. برای همگرایی نوسانی ($R_G < 0$)، عدم قطعیت به این صورت تخمین زده می‌شود:

$$U_G = 1/2(S_U - S_L) \quad (22)$$

که در آن S_U و S_L ، ماکسیمم و مینیمم نوسان حل‌ها است. برای همگرایی مونوتونیک^۵ که در آن ($0 < R_G < 1$)، تخمین عدم قطعیت، به دامنه C_G ، وابسته است و به این صورت محاسبه می‌شود که: اگر $C_G \approx 1$ ، خطای عددی δ_G^* و عدم قطعیت U_{GC} ، به صورت زیر قابل تعریف است:

جدول ۶ مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج تجربی

نتایج تجربی [۲۰]	ضریب مقاومت کل ($\times 10^3$)	ضریب تراست (K_T)	ضریب گشتاور (K_Q)	SFC
نتایج تجربی [۲۰]	۳/۹۶۶	۰/۱۷	۰/۰۲۸۸	۳۰/۲۵
پژوهش حاضر	۳/۷۸۱	۰/۱۵۴۸	۰/۰۲۶۲	۳۱/۴۲
درصد اختلاف	٪۴/۶۶۴	٪۸/۹۴	٪۹/۰۲	٪۳/۸۶۷

⁴ grid error

⁵ monotonic

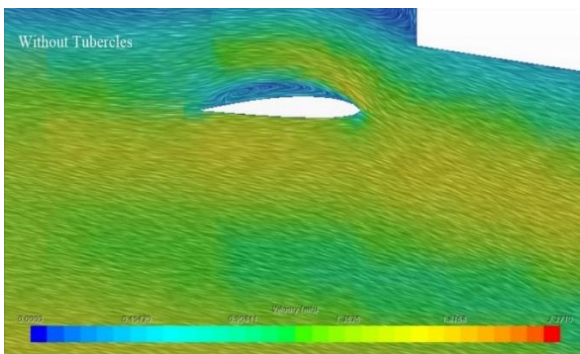
¹ Convergence ratio

² order of accuracy

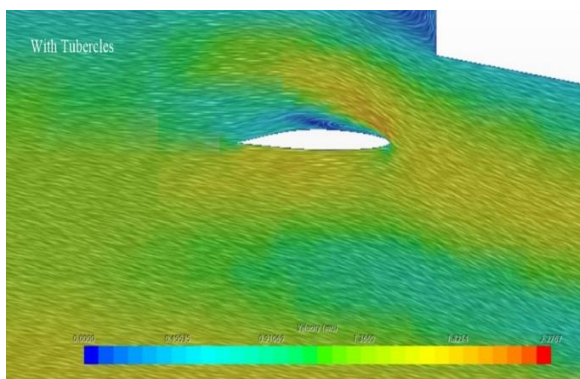
³ correction factor

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد یکی از دلایل کاهش مقاومت بدنه در حضور تیغه بدنه، کاهش موج پاشنه با ایجاد یک فشار منفی در زیر سطح آب می‌باشد. شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نیز به ترتیب مقایسه‌ای بین شناور بدون تیغه بدنه و شناور با تیغه بدنه معمولی، شناور بدون تیغه بدنه با شناور با تیغه بدنه دارای برآمدگی در لبه حمله و مقایسه بین شناور مجهز به تیغه بدنه با و بدون برآمدگی لبه حمله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های فوق نیز مشاهده می‌شود، وجود تیغه بدنه سبب کاهش موج پاشنه و در نتیجه کاهش مقاومت می‌شود. از طرفی مقایسه شناور دارای تیغه بدنه با و بدون توبرکل، اختلاف زیادی را در موج پاشنه نشان نمی‌دهد، اما به دلیل ایجاد تأخیر در جدایش جریان برای تیغه بدنه دارای توبرکل مقاومت کل و در نتیجه تراست و گشتاور لازم نیز کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۲۰) و (۲۱) بردارهای سرعت را به ترتیب بر روی تیغه بدنه با و بدون توبرکل در پاشنه شناور را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ بردارهای سرعت برای تیغه بدنه بدون توبرکل

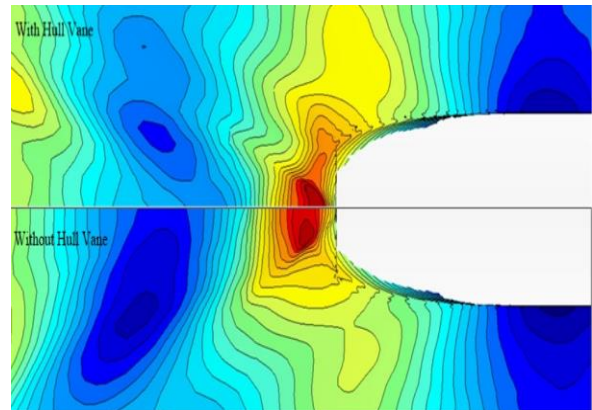


شکل ۲۱ بردارهای سرعت برای تیغه بدنه دارای توبرکل

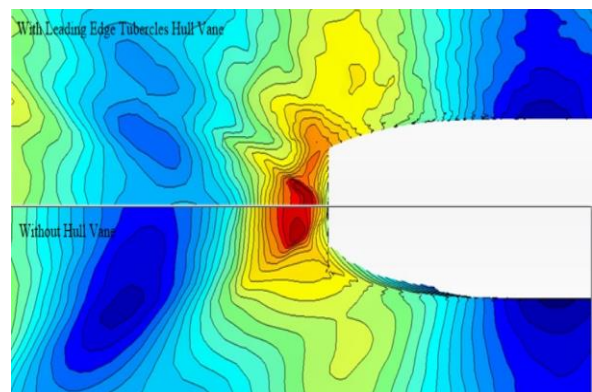
همان‌طور که از شکل‌های (۲۰) و (۲۱) برمی‌آید، حضور توبرکل در لبه حمله سبب به تأخیر افتادن جدایش جریان به علت افزایش ممنوم جریان شده است، که این امر موجب افزایش لیفت، کاهش فشار زیر سطح آب و کاهش مقاومت

در نتیجه بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد که تیغه بدنه دارای برآمدگی در لبه حمله نسبت به تیغه بدنه با لبه حمله صاف، تأثیر مناسب‌تری را بر روی مقاومت و ضرایب پروانه شناور بر جای می‌گذارد.

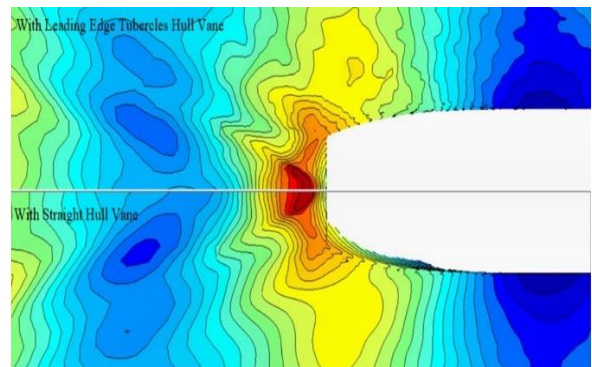
همان‌طور که در فصل اول و دوم نیز اشاره شد علت عملکرد مؤثر تیغه بدنه در پاشنه شناور، جهت حرکت جریان سیال در این ناحیه است که در شکل (۱۶) این امر در شبیه‌سازی صورت گرفته نشان‌دهنده شده است.



شکل ۱۷ مقایسه موج پاشنه برای شناور با و بدون تیغه بدنه



شکل ۱۸ مقایسه موج پاشنه برای شناور با و بدون تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی



شکل ۱۹ مقایسه موج پاشنه برای شناور مجهز به تیغه بدنه با و بدون توبرکل لبه حمله

جدول ۸ توان مصرفی برای شناور بدون تیغه بدنه، با تیغه بدنه معمولی و با تیغه بدنه دارای توپرکل

توان مصرفی (وات)	حالت‌های مختلف
۲۱/۸۵	بدون تیغه بدنه
۲۱/۶۶	با تیغه بدنه معمولی
۲۱/۴۸۹	با تیغه بدنه دارای توپرکل در لبه حمله

همان‌طور که در جدول (۸) آمده است توان مصرفی برای حالتی که کشتی دارای تیغه بدنه با برآمدگی در لبه حمله است نسبت به حالتی که دارای تیغه بدنه معمولی است ۰/۷۸۹٪ کاهش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه‌شده در بخش قبل، تیغه بدنه به‌خودی‌خود می‌تواند تأثیر مناسبی را بر روی مقاومت و بازدهی پروانه بگذارد. با این وجود اضافه کردن توپرکل به لبه حمله آن، این نتایج را بهبود می‌بخشد. البته این نتایج به پارامترهای دیگری از جمله موقعیت تیغه بدنه در پاشنه شناور، زاویه حمله، شکل توپرکل‌ها، تعداد، دامنه و طول موج توپرکل‌ها بستگی دارد. در نتیجه برای به دست آوردن نتایج بهتر پارامترهای ذکر شده باید بهینه شوند. علت بهبود نتایج پس از قرارگیری توپرکل بر لبه حمله تیغه بدنه همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد به تأخیر افتادن جدایش جریان به علت تولید گردابه و افزایش ممنوم جریان به وسیله توپرکل‌ها می‌باشد. تأخیر در جدایش جریان سبب افزایش نسبت لیفت به درگ می‌شود که این امر موجب افزایش نیروی تراست اضافی توسط تیغه بدنه می‌شود، از طرفی با ایجاد ناحیه‌ای با فشار کم‌تر در قسمت بالایی تیغه بدنه، موج پاشنه کاهش می‌یابد و در نهایت مقاومت موج‌سازی نیز کاهش خواهد یافت. یکی دیگر از تأثیراتی که تأخیر در جدایش به همراه دارد، کاهش مقاومت ویسکوز فشاری است که به صورت اختلاف فشار سینه و پاشنه شناور تعریف می‌شود. با تأخیر در جدایش جریان، فشار لبه فرار نسبت به حالتی که توپرکل‌ها حضور ندارند بیشتر شده و اختلاف فشار سینه و پاشنه نیز کاهش می‌یابد. که این به معنای کاهش مقاومت ویسکوز فشاری است.

نتایج پژوهش حاضر حاکی از بهبود عملکرد تیغه بدنه در حضور توپرکل هست که نتایج آن بر ضریب مقاومت کل، ضریب تراست و ضریب گشتاور پروانه در بخش قبل مورد بحث قرار

موج‌سازی می‌شود و همچنین به علت افزایش فشار در ناحیه لبه فرار به سبب کاهش سرعت، باعث کاهش مقاومت ویسکوز فشاری شده است.

همچنین، توان مؤثر، نیروی لازم جهت حرکت روبه‌جلوی کشتی با سرعت ثابت است. بنابراین به‌صورت تابعی از سرعت و مقاومت کل بیان می‌شود. از توان مؤثر می‌توان به‌منظور مؤلفه‌ای جهت محاسبه مصرف سوخت شناور استفاده کرد. از طرفی مصرف سوخت به عواملی همچون بار موتور، مصرف سوخت مخصوص، سرعت پروانه و بسیاری از دیگر موارد مرتبط با شرایط عملیاتی کشتی و ... بستگی دارد، امکان محاسبه مستقیم آن وجود ندارد، با این حال می‌توان درصد کاهش توان ناشی از کاهش ضریب مقاومت کل با حضور تیغه بدنه با و بدون لبه حمله دارای برآمدگی، نسبت به شناور بدون تیغه بدنه از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\%Decrease P_E = \frac{C_{T,WOHV} - C_{T,HWOT}}{C_{T,WOHV}} \times 100 \quad (23)$$

$$\%Decrease P_E = \frac{C_{T,WOHV} - C_{T,HWT}}{C_{T,WOHV}} \times 100 \quad (24)$$

در معادلات فوق، $C_{T,WOHV}$ ضریب مقاومت کل شناور بدون حضور تیغه بدنه، $C_{T,HWOT}$ ضریب مقاومت کل شناور با حضور تیغه بدنه بدون توپرکل و $C_{T,HWT}$ ضریب مقاومت کل شناور با حضور تیغه بدنه با وجود توپرکل و P_E توان مؤثر می‌باشد.

با فرض ثابت بودن راندمان و مصرف سوخت مخصوص کشتی، معادلات (۲۲) و (۲۳) نشان‌دهنده درصد کاهش مصرف سوخت کشتی و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسیدی است. از این رو زمانی که شناور مجهز به تیغه بدنه بدون توپرکل است، مصرف سوخت ۱/۷۷٪ و برای تیغه بدنه با توپرکل ۱/۸۵٪ کاهش می‌یابد.

علاوه بر این توان مصرفی (توان تحویل داده‌شده به پروانه) که برابر حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای است، برای حالت‌های مختلف مورد بررسی، در جدول (۸) آمده است.

$$P_D = \omega Q \quad (25)$$

در معادله فوق P_D توان تحویلی به پروانه، ω دور پروانه و Q گشتاور پروانه است.

² SFOC: Specific Fuel Oil Consumption

¹ Engine Load

in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 649, no. 1: IOP Publishing, p. 012051, DOI: 10.1088/1755-1315/649/1/012051.

- [8] F. E. Fish, L. E. Howle, and M. M. Murray, "Hydrodynamic flow control in marine mammals," *Integrative and comparative biology*, vol. 48, no. 6, pp. 788-800, 2008, <https://doi.org/10.1093/icb/icn029>.
- [9] J. Hain, G. Carter, S. Kraus, C. Mayo, and H. Winn, "Megaptera Novaeangliae, in the Western North Atlantic," *Fish Bull*, vol. 80, p. 259, 1982 <https://books.google.com/books>.
- [10] F. E. Fish, P. W. Weber, M. M. Murray, and L. E. Howle, "The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology," ed: Oxford University Press, 2011, <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>.
- [11] F. E. Fish and J. M. Battle, "Hydrodynamic design of the humpback whale flipper," *Journal of morphology*, vol. 225, no. 1, pp. 51-60, 1995, <https://doi.org/10.1002/jmor.1052250105>.
- [12] R. S. Shevell, "Aerodynamic anomalies-Can CFD prevent or correct them?," *Journal of Aircraft*, vol. 23, no. 8, pp. 641-649, 1986, <https://doi.org/10.2514/3.45356>.
- [13] P. Watts and F. E. Fish, "The influence of passive, leading edge tubercles on wing performance," in *Proc. Twelfth Intl. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol*, 2001: Auton. Undersea Syst. Inst. Durham New Hampshire. <http://www.appliedfluids.com/UUST01.pdf>.
- [14] E. G. Paterson, R. V. Wilson, and F. Stern, "General-purpose parallel unsteady RANS ship hydrodynamics code: CFDSHIP-IOWA," *IIHR report*, vol. 432, 2003, <https://doi.org/10.5957/FAST-2015-012>.
- [15] F. Fish and G. V. Lauder, "Passive and active flow control by swimming fishes and mammals," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, pp. 193-224, 2006, <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092201>.
- [16] F. E. Fish, "Biomimetics and the application of the leading-edge tubercles of the humpback whale flipper," *Flow control through bio-inspired leading-edge tubercles: morphology, aerodynamics, hydrodynamics and applications*, pp. 1-39, 2020, https://doi.org/10.1007/978-3-030-23792-9_1.
- [17] D. Miklosovic, M. Murray, L. Howle, and F. Fish, "Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (Megaptera novaeangliae)

گرفت. برای حالتی که شناور دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است نسبت به حالت بدون تیغه بدنه، ضریب مقاومت کل $1/77$ درصد، ضریب تراست پروانه $2/853$ درصد و ضریب گشتاور پروانه $1/14$ درصد، کاهش یافته است. همچنین برای حالتی که بدنه شناور مجهز به تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی است، نسبت به حالتی که شناور مجهز به تیغه بدنه نیست، ضریب مقاومت کل $1/85$ درصد، ضریب تراست پروانه $3/488$ درصد و ضریب گشتاور پروانه $1/94$ درصد کاهش یافته است.

۶- مراجع

- [1] B. Bouckaert, K. Uithof, N. Moerke, and P. Van Oossanen, "Hull Vane on 108m Holland-Class OPVs: Effects on Fuel Consumption and Seakeeping," in *Proceeding of MAST Conference*, 2015. <https://www.hullvane.com/wp-content/uploads/2017/01/MAST-2016-Paper-Hull-Vane-on-108-m-Holland-Class-OPV-effects-on-fuel-consumption-and-seakeeping-1.pdf>.
- [2] I. Andrews, V. K. Avala, P. K. Sahoo, and S. Ramakrishnan, "Resistance characteristics for high-speed hull forms with vanes," in *SNAME International Conference on Fast Sea Transportation*, 2015: SNAME, p. D011S003R001, <https://doi.org/10.5957/FAST-2015-012>.
- [3] H. Hou, M. Krajewski, Y. K. Ilter, S. Day, M. Atlar, and W. Shi, "An experimental investigation of the impact of retrofitting an underwater stern foil on the resistance and motion," *Ocean Engineering*, vol. 205, p. 107290, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107290>.
- [4] K. Suastika, A. Hidayat, and S. Riyadi, "Effects of the application of a stern foil on ship resistance: A case study of an Orela crew boat," *International Journal of Technology*, vol. 8, no. 7, pp. 1266-1275, 2017, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.691>.
- [5] V. K. Avala, "CFD Analysis of Resistance Characteristics of High-Speed Displacement Hull Forms fitted with Hull Vane®," 2017. <https://repository.fit.edu/etd/1127/>.
- [6] M. A. Budiyanto, M. A. Murdianto, and M. F. Syahrudin, "Study on the resistance reduction on high-speed vessel by application of stern foil using cfd simulation," *CFD Letters*, vol. 12, no. 4, pp. 35-42, 2020. <https://scholar.ui.ac.id/en/publications/study-on-the-resistance-reduction-on-high-speed-vessel-by-applica>.
- [7] U. Budiarto and A. Firdhaus, "Analysis of the effect of hull vane on ship resistance using CFD methods,"

- flippers," *Physics of fluids*, vol. 16, no. 5, pp. L39-L42, 2004, <https://doi.org/10.1063/1.1688341>.
- [18] F. Fish, "The humpback whale flipper for application of bio-inspired tubercle technology," in *INTEGRATIVE AND COMPARATIVE BIOLOGY*, 2011, vol. 51: OXFORD UNIV PRESS INC JOURNALS DEPT, 2001 EVANS RD, CARY, NC 27513 USA, pp. E42-E42, <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>.
- [19] J. Kim, "Experimental Data for KCS Resistance, Sinkage, Trim, and Self-propulsion," in *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*, 2021: Springer, pp. 53-59, https://doi.org/10.1007/978-3-030-47572-7_3.
- [20] I. R. Procedures, "Uncertainty analysis in CFD verification and validation, methodology and procedures," *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*, pp. 7.5-03, 2017. <https://www.itc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf>.
- [21] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—part 1: methodology and procedures," *J. Fluids Eng.*, vol. 123, no. 4, pp. 793-802, 2001, <https://doi.org/10.1115/1.1412235>.
- [22] A. Hasanvand, A. Hajivand, and N. A. Ali, "Investigating the effect of rudder profile on 6DOF ship course-changing performance," *Applied Ocean Research*, vol. 117, p. 102944, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102944>.

مطالعه تجربی و ارزیابی اثر ضخامت ماده متخلخل پشم بر تولید آب شیرین، توزیع دما و بازده انرژی و انرژی آب شیرین کن پله ای خورشیدی

چکیده: در این پژوهش از ماده متخلخل پشم بر روی پله های یک آب شیرین خورشیدی پله ای استفاده شده و اثر ضخامت ماده متخلخل پشم بر روی بازده انرژی و انرژی، میزان تولید آب شیرین و دماهای فضای داخل و پله های آب شیرین کن به صورت تجربی مطالعه می شود. آزمایش ها با ماده متخلخل با ضخامت ۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلیمتر و بدون ماده متخلخل انجام شده اند. نتایج حاصل از این آزمایش ها نشان می دهد که میزان تشعشع بر تولید آب شیرین تاثیر گذار بوده و ماده متخلخل پشم بر روی پله های آب شیرین کن، علاوه بر تاثیر گذاری بر دماهای فضای داخلی آب شیرین کن و پله ها، تولید آب شیرین و بازده بالاتری نسبت به آب شیرین کن بدون ماده متخلخل دارد. به عنوان مثال، تولید آب شیرین و بازده آب شیرین کن با محیط متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر نسبت به آب شیرین کن بدون محیط متخلخل به ترتیب ۰/۳۵ لیتر و ۷/۰۸ درصد بیشتر می باشد.

واژه های راهنما: آب شیرین کن پلکانی، ماده متخلخل پشم، ضخامت، انرژی، انرژی

محمد علیزاده

کارشناسی ارشد

محمدرضا عساری

استاد

میلاستاره*

استادیار،

دانشکده مهندسی

مکانیک، دانشگاه

صنعتی جندی شاپور

دزفول، دزفول

حسن بصیرت تبریزی

استاد، دانشکده مهندسی

مکانیک، دانشگاه صنعتی

امیرکبیر، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

Mohammad
Alizadeh
MSc.

Mohammad Reza
Assari
Professor

Milad Setareh*
Assistant Professor,
Mechanical Engineering
Department, Jundi-
Shapur University of
Technology, Dezful

Hassan Basirat
Tabrizi
Professor, Mechanical
Engineering Department,
Amirkabir University of
Technology, Tehran

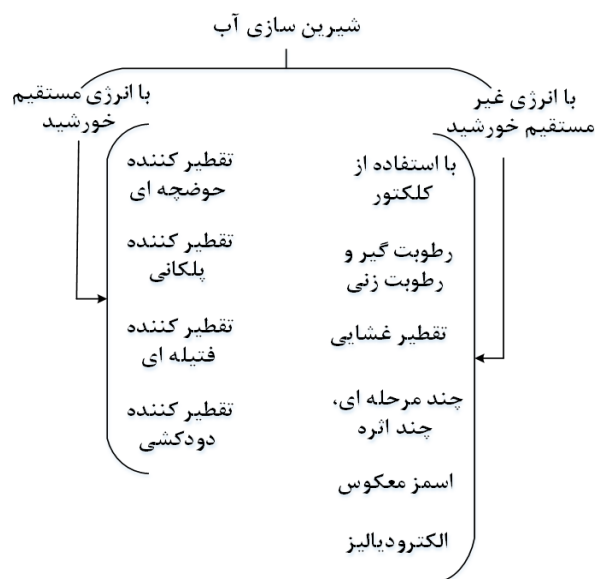
Experimental study and evaluation of the effect of wool porous material thickness on the distilled water production, temperature distribution and energy and exergy efficiencies of stepped solar still

Abstract: In the present study, the wool porous material is used to cover the steps of a stepped solar still and the effect of wool porous material thickness on the energy and exergy efficiencies, distilled water production rate and the temperatures of internal zone and steps are studied experimentally. Experiments are carried out for porous material thicknesses of 4, 6, 8 and 12 mm and without it. Results indicate that solar irradiation affects the amount of distilled water, and the porous material besides affecting the internal temperature of the solar still, causes to produce higher distilled water and higher efficiency than the solar still without the porous material. For example, the amount of distilled water and energy efficiency of solar still with 12 mm-thick of porous material are 0.35 litre and 7.8% higher than the system without porous material.

Keywords: Stepped Solar Still, Wool Porous Material, Thickness, Energy, Exergy

۱- مقدمه

خورشیدی جهت شیرین‌سازی آب وجود دارد [۲] (شکل ۱): ۱- روش مستقیم که تبخیر آب شور در یک سامانه ثابت خورشیدی در همان مکان فراهم می‌آید و در طی یک مرحله انجام می‌شود و به این روش تقطیر خورشیدی می‌گویند [۳] و ۲- روش غیرمستقیم که آب شیرین کن خورشیدی از دو زیر سیستم کلکتور خورشیدی و واحد نمک زدایی تشکیل شده است. انواع مختلف کلکتورهای خورشیدی مانند صفحه تخت، لوله خلاء، لوله حرارتی و غیره را می‌توان همراه با فرآیندهای نمک زدایی حرارتی مانند رطوبت زن-رطوبت گیر^۱، تقطیر چند اثره^۲، تقطیر ناگهانی^۳ و غیره استفاده کرد [۴].



شکل ۱ دسته بندی روش های شیرین سازی آب با انرژی خورشیدی

آب شیرین کن خورشیدی پلکانی یکی از روش های شیرین سازی آب با انرژی مستقیم خورشید است که از چندین پله و یک حوضچه تشکیل شده است. در آب شیرین کن پلکانی، آب شور از مخزنی که در ارتفاعی بالاتر نسبت به دیگر اجزای سامانه قرار دارد، از طریق یک لوله وارد محفظه آب شیرین کن می‌شود. درون محفظه، پلکانی طراحی شده که آب به صورت یک لایه نازک روی آن جریان می‌یابد. صفحه کف هر کدام از پله ها به عنوان یک صفحه جاذب نور خورشید عمل کرده و عملیات تبخیر آب شور در این مرحله انجام می‌شود. بخار آب درون محفظه بالا رفته و بر روی پوشش شفاف عموماً از جنس شیشه تقطیر می‌گردد. با تشکیل قطرات آب خالص روی پوشش شفاف به دلیل مورب بودن شیشه و نیروی جاذبه، قطرات آب به سمت پایین حرکت کرده و از طریق ناودان تعبیه شده جمع آوری می‌شوند

از مجموع کل آب‌های جهان، ۹۷/۴ درصد آن را آب شور دریاها و اقیانوس ها تشکیل می‌دهند. ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب های سطح زمین را تشکیل می‌دهد که بخش بیشتر آن به صورت یخ در قطب های کره زمین و یخچال های طبیعی و آب های زیرزمینی وجود دارد. به این ترتیب، از مجموع آب های کره زمین تنها ۰/۰۱۴ درصد آن قابل استفاده بوده و در واقع، حیات آدمی وابسته به همین مقدار ناچیز آب است. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین تری قرار دارد، در حالی که یک درصد از جمعیت جهان به ایران اختصاص دارد، سهم آن از منابع آب شیرین تنها ۰/۳ درصد است. بررسی ها نشان می‌دهد در حالی که متوسط میزان بارندگی سالانه در جهان ۸۱۳ میلیمتر است، میزان بارندگی در ایران تنها ۲۲۸ میلیمتر بوده که کمتر از یک سوم متوسط بارندگی جهان است [۱]. از این رو ایران با مشکل اساسی تامین آب رو به رو بوده و نیازمند تامین آب شیرین به روش های متنوع است. یکی از راه هایی که برای تولید آب شیرین پیشنهاد می‌شود تبدیل آب شور دریاها به آب شیرین با استفاده از روش های نمک زدایی است. روش های شیرین سازی آب در واحدهای تصفیه سازی به کمک گرم کردن و تبخیر آب صورت گرفته که جهت تامین انرژی از سوخت های فسیلی استفاده می‌گردد. اما باید به دنبال روشی بود که مصرف سوخت کمتر، آلودگی کمتر و هزینه کمتری داشته باشد. بدین منظور استفاده از انرژی تجدید پذیر خورشید در آب شیرین کن های خورشیدی روشی است که پیشنهاد می‌شود. از انرژی تجدید پذیر خورشید می‌توان برای راه اندازی واحدهای نمک زدایی با اثرات زیست محیطی صفر، حداقل تعمیر و نگهداری، هزینه عملیات کم استفاده کرد.

مکانیزم آب شیرین کن خورشیدی در حالت کلی به این صورت است که انرژی خورشید از طریق پوشش شفاف مانند شیشه وارد محفظه آب شده و توسط صفحه جاذب تیره رنگ محفظه، جذب می‌گردد. نور بازتاب شده از صفحه جاذب، به دلیل مات عمل کردن شیشه شفاف، درون محفظه محبوس شده و باعث تجمع انرژی و در نتیجه گرم شدن آب می‌شود. در این حالت انرژی مورد نیاز برای تبخیر آبی که در روش های معمول توسط سوخت فسیلی تامین می‌شود، توسط انرژی خورشید تامین می‌گردد. به طور کلی دو روش برای استفاده از انرژی

³ Multi stage flashing

¹ Humidification–Dehumidification

² Multiple effect distillation

وری روزانه آب شیرین کن پس از اصلاح از ۶/۹ به ۸/۹ کیلوگرم بر متر مربع افزایش یافت. ابوجادر و همکاران [۱۱] عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پلکانی از جنس فلز مس را در مناطق گرمسیری مورد بررسی قرار دادند. آنها با هدف افزایش عملکرد سامانه، از سینی های شیبدار استفاده نمودند. ضریب انتقال حرارت جابجایی، مقدار تبخیر، بهره وری آب و بازده سیستم را برای هر ساعت محاسبه نمودند. براساس نتایج، حداکثر بهره وری ساعتی برای آب شیرین کن، ۶۰۵ میلی لیتر بر متر مربع در ساعت بدست آمد. پانچال و همکاران [۱۲] مطالعات تئوری و تجربی بر روی آب شیرین کن خورشیدی با قطعات مرمر و ماسه سنگ به عنوان مواد ذخیره انرژی گرمایی انجام دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با آب شیرین کن معمولی، مقدار آب شیرین تولید شده با آب شیرین کن خورشیدی با ماسه سنگ و مرمر به ترتیب ۳۰ و ۱۴ درصد افزایش می یابد. شرشیر و همکاران [۱۳] اثر استفاده از نانو ذرات و خنک کاری شیشه کلکتور به منظور افزایش بازده آب شیرین کن را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از نانو ذرات اکسید مس، بهره وری آب شیرین کن با و بدون خنک کاری سطح شیشه کلکتور به ترتیب ۴۴/۹۱ و ۳۷/۰۲ درصد بیشتر از آب شیرین کن بدون استفاده از نانو ذرات در عمق آب شور ۰/۵۵ سانتی متر و با غلظت ۱ درصد است. رشیدی و همکاران [۱۴] تاثیر قرار دادن یک لایه متخلخل مشبک در بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد تولید ساعتی آب شیرین با قرار دادن لایه متخلخل مشبک در حوضچه، بهبود می یابد و حداکثر افزایش بهره وری ساعتی ایجاد شده با استفاده از لایه متخلخل مشبک حدود ۳۳/۷ درصد بیشتر از حالت بدون استفاده از لایه متخلخل در ساعت ۱ بعد از ظهر می باشد. همچنین حداکثر بازده آب شیرین کن با استفاده از لایه متخلخل در ساعت حدود ۱ بعد از ظهر رخ داده و ۳۵/۴ درصد بیشتر از حالت بدون استفاده از لایه متخلخل است. آگراوال و همکاران [۱۵] استفاده از پارچه پنبه ای به عنوان یک ماده متخلخل برای افزایش تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تئوری تجربی مورد بررسی و ارزیابی کردند. سلامی و همکاران [۱۶] تاثیر پوشاندن صفحه جاذب با اسفنج سیاه رنگ بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پوشاندن صفحه جاذب با اسفنج باعث شده که صفحه جاذب حتی در زمانی که تشعشع خورشید کم است، گرم بماند. همچنین از نتایج ارایه شده، دریافت می شود که با استفاده از لایه اسفنج با ضخامت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر بر روی صفحه

و در مخزن آب شیرین تخلیه می گردند. آب شور تبخیر نشده نیز در انتهای مسیر خود از دستگاه خارج و تخلیه می گردد. مزیت آب شیرین کن پلکانی این است که به دلیل فاصله کم میان صفحه جاذب نور خورشید و پوشش شفاف، رطوبت نسبی هوا، بسیار زیاد و نزدیک به ۱۰۰ درصد بوده و هوای محبوس در محفظه، سریعاً اشباع می شود. به همین دلیل نرخ تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، بیشتر از سایر آب شیرین کن های خورشیدی خواهد بود [۵، ۶].

به منظور بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی، روش های متنوعی مانند استفاده از کندانسور، فین، مواد تغییر فزدهنده و غیره پیشنهاد شده است. اخیراً، مواد متخلخل در سامانه های مختلف انرژی خورشیدی که در آن انتقال حرارت به کمک همرفت و تابش به طور همزمان از اهمیت خاصی برخوردارند، استفاده شده است و نتایج حاکی از بهبود عملکرد و بازده سامانه ها می باشد. به طور کلی مواد جامدی که در ساختارشان حاوی حفره و منفذ هستند به عنوان مواد متخلخل مورد تعریف می شوند. یکی از مفاهیم مهمی که در مواد متخلخل مورد بررسی قرار می گیرد، تخلخل می باشد. تخلخل از تقسیم حجم حفره ها به حجم کلی ماده بدست می آید [۷].

آب شیرین کن خورشیدی پلکانی توسط محققین متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیر پارامترهای مختلف بر بهبود عملکرد و بازده آنها ارزیابی شده است. سدیننی و همکاران [۸] یک آب شیرین کن پلکانی شیبدار را طراحی کرده و ساختند. در این پژوهش آزمایشگاهی مشخص گردید که بهره وری آب شیرین کن های پلکانی ۲۰ درصد بیشتر از نوع حوضچه ای آن است. امارا و همکاران [۹] با استفاده از منعکس کننده های داخلی در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، سعی در افزایش بازده و بهره وری آب شیرین کن داشتند. ارتفاع و عرض پله در سامانه آزمایشگاهی مورد بررسی آنها به ترتیب ۵ و ۱۲۰ میلی متر بود. براساس آزمایش های آنها مشخص شد که بهره وری با استفاده از منعکس کننده داخلی از ۵۷ درصد به ۷۵ درصد افزایش می یابد. همچنین بازده روزانه برای آب شیرین کن با و بدون منعکس کننده داخلی به ترتیب برابر ۵۶ و ۵۳ درصد بود. مفتاح و همکاران [۱۰] استفاده از بازتاب دهنده های داخلی و خارجی، فین و کندانسور خارجی و تاثیر آنها بر عملکرد آب شیرین کن پلکانی را به صورت تجربی بررسی کردند. به منظور مقایسه عملکرد آب شیرین کن قبل و بعد از اعمال تغییرات از مدل تعادل انرژی استفاده کردند. با کمک پارامترهایی از جمله اختلاف دما بین آب شور و پوشش شیشه ای، بهره وری و ضریب انتقال حرارت، تأثیر تغییرات اعمال شده را بررسی کردند. بهره

۲- سامانه آزمایشگاهی و تشریح آزمون‌های تجربی

سامانه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. سامانه آزمایشگاهی از یک کلکتور پله ای، مخزن آب شور ورودی، مخزن جمع آوری آب شور خروجی و همچنین مخزن جمع آوری آب شیرین تولید شده تشکیل شده است. برای ساختن کلکتور از ورق گالوانیزه به ضخامت ۰/۶ میلی متر استفاده شده است. کلکتور متشکل از ۵ پله به عرض ۱۰ سانتی متر و طول ۱۰۰ سانتی متر و ضخامت ۰/۵ سانتی متر و عرض سینی ۱۲ سانتی متر می باشد (۲ سانتی متر جلو آمدگی هر پله به جز پله آخر که عرض پله برابر عرض سینی، ۱۰ سانتی متر دارد) همچنین سطح کلکتور برابر با ۰/۵۸ متر مربع می باشد. یکی از پارامترهای مهم برای افزایش بهره وری آب شیرین کن، کاهش اتلافات حرارتی است که این کار با استفاده از عایق مناسب ممکن می شود. برای اینکه اتلاف حرارتی از کف و بدنه آب شیرین کن به محیط بیرون به حداقل مقدار ممکن برسد تمام سامانه آزمایشگاهی به خوبی عایق کاری شده است. عایق استفاده شده از جنس پلی استایرن و همچنین پی وی سی (برای چارچوب بندی) با ضخامت ۴ سانتی متر در بدنه کناری و به ضخامت ۵ سانتی متر در کف کلکتور می باشد. در وسط پله اول (بالترین پله) مجرای ورودی آب شور به کلکتور تعبیه شده است. این مجرا از طریق شیلنگ ست سرم به مخزن نگهداری آب شور که در ارتفاع بالاتری نسبت به پله اول قرار دارد، متصل می شود. ماده متخلخل پشم به رنگ سیاه که بیشترین خاصیت جذب را در بین رنگ ها دارد با ضخامت های مختلف شامل ۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر بر روی پله های آب شیرین کن استفاده می شود به طوریکه تمامی کف ۵ پله پوشانده شود.

برای انجام آزمون های تجربی، مقدار ۲۰ گرم نمک را با ترازو وزن کرده و سپس آنرا در یک لیتر آب مقطر حل کرده و بدین ترتیب آب شور با غلظت ۰/۰۲ گرم بر لیتر آماده شده و در مخزن آب شور قرار داده می شود. این مخزن توسط ست سرم برای تنظیم کردن میزان دبی آب شور، به آب شیرین کن متصل می گردد. دیتالاگر را در نزدیکی کلکتور قرار داده و حسگرهای مورد نیاز از سوراخ های مشخص شده در بدنه کلکتور، درون محفظه آب شیرین کن قرار داده می شوند و دیتاهای مورد نیاز در فاصله های زمانی مشخص ثبت می گردند. سنسورهای دمایی در نقاط مختلف آب شیرین کن از جمله بر روی ۳ پله کلکتور جهت اندازه گیری دمای آب بر روی پله ها، سطح بیرونی شیشه جهت اندازه گیری دمای بیرونی شیشه، محیط درون آب شیرین کن، نزدیک مجرای آب شور خروجی بر روی پله آخر و در خارج از دستگاه

جاذب، تولید آب شیرین به ترتیب به مقدار ۵۸، ۲۳/۰۳ و ۳۰ درصد بیشتر از حالتی است که از اسفنج استفاده نمی شود. ارزیابی انرژی و انرژی یک سیستم آب شیرین کن هیبریدی شامل پنل خورشیدی و آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با پیش گرم کردن آب شور و مواد متخلخل توسط البار و حسن [۱۷] بررسی شد. پیش گرم کردن آب با استفاده از عبور آب از پنل های خورشیدی انجام شد و بدین وسیله، خنک کاری پنل ها نیز انجام گردید. نتایج نشان داد که با پیش گرم کردن ۶۰ درصد آب شور، تولید آب شیرین، بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۲۰/۹، ۲۰ و ۶۰/۶۴ درصد نسبت به حالت بدون پیش گرم کن افزایش می یابد. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از مواد متخلخل و پیش گرم کن ۶۰ درصد آب شور، بهترین عملکرد برای سامانه آزمایشگاهی بدست می آید و در این حالت، تولید آب شیرین، بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۱۱/۸، ۱۳/۵ و ۳۲/۴۵ درصد نسبت به سامانه بدون پیش گرم کن و مواد متخلخل افزایش می یابد.

شرشیر و همکاران [۱۸] اثر استفاده همزمان از نانو ذرات، بازتاب دهنده، خنک کاری شیشه کلکتور و پارچه پشمی متخلخل را بر بهبود عملکرد و ارزیابی اقتصادی و بازده انرژی آب شیرین کن هرمی را به صورت تجربی بررسی کردند. پنج سناریو مختلف با بکارگیری روش های مختلف بهبود عملکرد آب شیرین کن در نظر گرفتند که در همه آنها، استفاده از پارچه پشمی متخلخل به صورت معلق در محفظه آب شیرین کن بکار برده شده بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از همه روش های مذکور شامل نانو ذرات اکسید تیتانیوم، خنک کاری شیشه کلکتور، بازتاب دهنده و پارچه پشمی متخلخل باعث بهبود ۱۲۷/۲۷ درصد در تولید آب شیرین می شود. باتوجه به مطالب فوق، هدف اصلی مطالعات و پژوهش های انجام گرفته، بررسی افزایش بازده آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از روش های مختلف است. با مطالعه و بررسی روش های بکار گرفته شده پیشین، پژوهش های قابل توجهی در زمینه بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پله ای انجام نشده و لذا در این پژوهش اثر پوشاندن پله های یک آب شیرین کن خورشیدی پله ای با مواد متخلخل پشم به عنوان روشی نوین بر بهبود تولید آب شیرین و بازده انرژی و انرژی به صورت تجربی مورد بررسی قرار می گیرد. آزمایش های تجربی در شهر شوشتر با موقعیت جغرافیایی ۴۸/۸۵ درجه شرقی و ۳۲/۰۴ درجه شمالی انجام می شود. با مطالعه موردی تاثیرات ضخامت ماده ماده متخلخل پشم بررسی شده و بهترین عملکرد برای سامانه تعیین می گردد.

نرخ تابش خورشیدی در طول شبانه روز در این منطقه از کشور در هر فصل، تقریباً ثابت بوده، لذا فاصله زمانی بر روی نتایج بدست آمده، تأثیری قابل توجهی ندارد. در زمان انجام آزمون ها، جهت قرارگیری آب شیرین کن ثابت و رو به جنوب می باشد. به منظور ارزیابی دقت تجهیزات اندازه گیری بر عدم قطعیت پارامترهای مشتق شده مانند بازده انرژی و انرژی، دقت تجهیزات اندازه گیری در جدول (۲) نوشته شده است. برای محاسبه مقادیر انحراف و درصد خطا از رابطه های (۱) و (۲) که استفاده می شود.

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} (x_1 - x_{ave})^2 + (x_2 - x_{ave})^2 + \dots + (x_n - x_{ave})^2} \quad (1)$$

$$x_{ave} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (2)$$

که در اینجا U_n خطای آزمایش و x_1 تا x_n پارامترهای اندازه گیری شده و x_{ave} مقدار میانگین پارامتر مورد نظر است. با محاسبه مقدار متوسط آب در طول روز از طریق رابطه (۲) و قرار دادن آن در رابطه (۱)، حداکثر مقدار خطای آب شیرین تولید شده در این پژوهش برابر با ۱۳/۷۷ درصد بدست می آید.

جدول ۲ دقت تجهیزات اندازه گیری

ردیف	نام دستگاه	دقت
۱ <td>تابش سنج <td>$\pm 1 \text{ W/m}^2$ برای مقادیر کمتر از 200 W/m^2</td> </td>	تابش سنج <td>$\pm 1 \text{ W/m}^2$ برای مقادیر کمتر از 200 W/m^2</td>	$\pm 1 \text{ W/m}^2$ برای مقادیر کمتر از 200 W/m^2
۲ <td>دیتالاگر دمایی <td>$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</td> </td>	دیتالاگر دمایی <td>$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$</td>	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
۳ <td>ترازو <td>$\pm 0.1 \text{ g}$</td> </td>	ترازو <td>$\pm 0.1 \text{ g}$</td>	$\pm 0.1 \text{ g}$

۴- بازده انرژی و انرژی

بازده انرژی و انرژی با استفاده از روابط ترمودینامیکی ارایه شده توسط البار و همکاران به صورت زیر محاسبه می شوند [۱۷]:

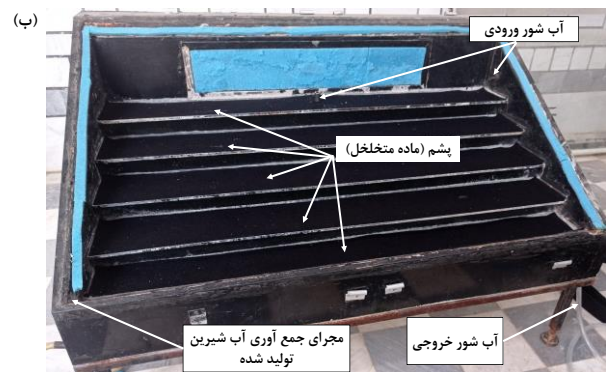
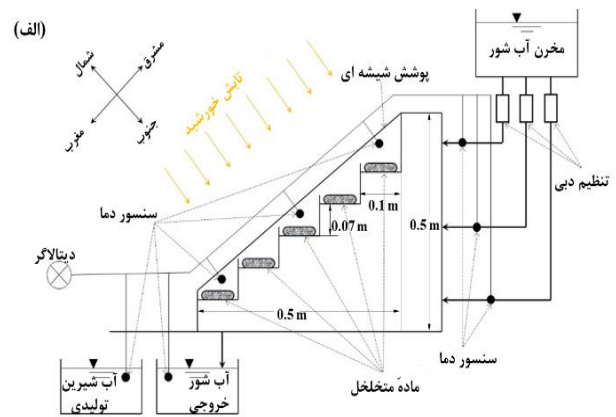
$$\eta_{th} = \frac{\sum \dot{m}_{evp} L_{evp}}{A_p \times \sum R \times 3600} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{x,in} = \dot{E}_{x,sun} = A_p R \left[1 - \frac{4}{3} \times \left[\frac{T_{amb} + 2731.5}{T_{sun}} \right] + \frac{1}{3} \times \left[\frac{T_{amb} + 273.15}{T_{sun}} \right]^4 \right] \quad (4)$$

$$\dot{E}_{x,out} = \dot{E}_{x,evp} = \frac{\dot{m}_{evp} L_{av}}{3600} \times \left[1 - \frac{T_{amb} + 273.15}{T_w + 273.15} \right] \quad (5)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}_{x,out}}{\dot{E}_{x,in}} = \frac{\dot{E}_{x,evp}}{\dot{E}_{x,sun}} \quad (6)$$

در سایه جهت اندازه گیری دمای هوای محیط بیرون قرار داده شده اند. همچنین در فاصله های زمانی از پیش تعیین شده میزان تشعشع خورشید توسط دستگاه تشعشع سنج ثبت می شود.



شکل ۲ سامانه آزمایشگاهی، (الف) نمای شماتیک، (ب) تصویر واقعی

در جدول (۱) حالت های مختلف آزمون های تجربی نشان داده شده است. آزمون ها از ساعت ۸ الی ۱۷ انجام می شوند. توسط ست سرم و با دبی مشخص، آب شور از ورودی های مشخص وارد آب شیرین کن پلکانی شده و در ساعت های مشخص شده، میزان آب شیرین خروجی جمع آوری و اندازه گیری می شود. پس از اتمام زمان آزمون، از داده های اندازه گیری شده برای تحلیل عملکرد و بازده سامانه آزمایشگاهی استفاده می شود.

جدول ۱ حالت های مختلف آزمون های تجربی

آزمون	۱	۲	۳	۴	۵
ضخامت نمد (میلی متر)	بدون نمد	۴	۶	۸	۱۲
نماد نشان داده شده در نمودارها	۰	۴	۶	۸	۱۲

۳- تجهیزات اندازه گیری و آنالیز عدم قطعیت

درون آب شیرین کن، حرارت جذب شده در پلکان به دلیل عایق بودن پشم، از سطح زیرین پلکان خارج نشده و حرارت را به محیط درون آب شیرین کن اضافه می کند.

شکل (۵) دمای ثبت شده در آزمون های مختلف برای پله بالا را نشان می دهد. در ساعات اولیه آزمایش، دماها تقریباً با هم برابر هستند زیرا ورودی آب شور در سامانه آزمایشگاهی از پلکان بالا است بنابراین آب ورودی، پله بالا و پشم تقریباً هم دما می شوند. همچنین با گذشت زمان، دمای پله بالا در آزمایش بدون مواد متخلخل نسبت به آزمایش های با مواد متخلخل، کمتر می شود زیرا پشم جاذب حرارت است و تشعشع خورشید را به خوبی جذب کرده و سبب افزایش دمای سطح پله می شود. در شکل (۶) دمای ثبت شده در پله وسط و در شکل (۷) دمای پله پایین ترسیم شده اند. با مقایسه شکل های (۴) تا (۷) دریافت می شود که کمترین میزان دمای ثبت شده، مربوط به دمای پله پایین آب شیرین کن می باشد و پس از دمای داخل کلکتور، بیشترین دما متعلق به دمای پله بالا می باشد. این مطلب نشان می دهد که بیشترین تشعشع جذب شده در پله بالای آب شیرین کن می باشد. با مقایسه دماهای اندازه گیری شده در شکل های (۴) تا (۷)، به وضوح مشاهده می شود که در ساعت ۸، تفاوت قابل توجهی در بین تمامی دماها وجود ندارد. دلیل این است که در ساعت ۸، آزمایش ها به تازگی شروع شده و دمای های ثبت شده بسیار نزدیک به دمای محیط بوده است که تقریباً برای تمام روزهای آزمایش مشابه است. همانطور که از شکل ها مشخص است، در فاصله زمانی بین ساعت ۹ الی ۱۷ تفاوت دمایی بین آب شیرین کن با محیط متخلخل و آب شیرین کن بدون محیط متخلخل واضح و قابل مشاهده است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که هر چه ضخامت ماده متخلخل افزایش یابد، دمای فضای داخلی کلکتور و دمای پله ها نیز افزایش می یابند. بعبارت دیگر، دمای آب شیرین کن با محیط متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر از ۸ میلی متر و ۸ میلی متر از ۶ میلی متر و ۶ میلی متر از ۴ میلی متر و ۴ میلی متر از آب شیرین کن بدون نمد بیشتر است. حداکثر مقادیر دمایی ثبت شده، برای آب شیرین کن خورشیدی با محیط متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر بوده است. در واقع ماده متخلخل از جنس پشم پس از چسبیدن بر روی پله های آب شیرین کن، اتلاف حرارتی به محیط را کاهش می دهد. علاوه بر این، وجود ماده متخلخل از جنس پشم به رنگ سیاه، انرژی خورشیدی بیشتری را جذب می کند. کمترین مقادیر ثبت شده دما مابین ساعت ۸ الی ۱۷، مربوط به آب شیرین کن خورشیدی بدون محیط متخلخل است. همانطور که بیان شد، از جمله خواص پشم این است که بسیار رطوبت گیر و جاذب انرژی

که در آن \dot{m}_{evp} دبی آب شیرین تولید شده برحسب L_{evp} ، kg/h گرمای نهان تبخیر برحسب A_b ، J/kg مساحت صفحه جاذب بر حسب m^2 ، R شدت تابش ساعتی برحسب W/m^2 و η_{th} بازده انرژی می باشند. همچنین $\dot{E}_{x,in}$ نشان دهنده انرژی ورودی و $\dot{E}_{x,out}$ نشان دهنده انرژی خروجی، η_{Ex} بازده انرژی، T_a دمای محیط، T_w دمای آب برحسب درجه سانتیگراد و T_{sun} دمای خورشید و برابر با ۵۷۰۰ کلوین است.

۵- ارائه نتایج

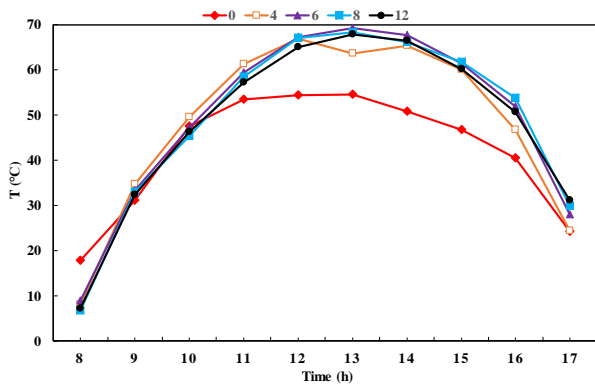
در این بخش بعد از ساخت سامانه آزمایشگاهی و انجام آزمون های تجربی طی چندین روز، پارامترهای موثر بر آب شیرین کن پله ای با مواد متخلخل و تاثیر ضخامت های متفاوت ماده متخلخل بر تولید آب شیرین و بازده مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در این بخش، حاصل حداقل دو بار تکرار آزمایش ها می باشد و میانگین داده های اندازه گیری شده نشان داده می شوند.

شکل (۳) تغییرات ساعتی تشعشع خورشید و دمای محیط در آزمون های مختلف را نشان می دهد. شدت تابش اثر مستقیم بر عملکرد آب شیرین کن دارد. به وضوح مشاهده می شود که تفاوت قابل توجهی بین دماهای ساعتی و میزان تشعشع بین آزمون های مختلف وجود ندارد که به دلیل این است، آزمایش ها در روزهای متوالی انجام شده اند. نمودار فوق نشان می دهد که تا ساعت ۱۳ شدت تابش خورشید روند افزایشی دارد و در این ساعت به مقدار ماکزیمم خود می رسد. بعد از این ساعت کاهش شدت تشعشع خورشید مشاهده می گردد به طوری که در ساعت پایانی آزمایش یعنی ساعت ۱۷، کمترین مقدار تشعشع خورشید ثبت شده است.

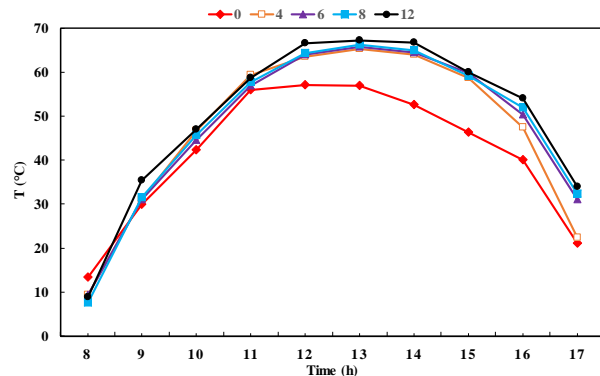
دمای محیط درون کلکتور برای ضخامت های مختلف ماده متخلخل و بدون آن در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود دمای محیط درون برای حالت های آزمون با استفاده از ماده متخلخل، بسیار به هم نزدیک هستند ولی دمای محیط درون کلکتور برای حالت بدون مواد متخلخل اختلاف قابل توجهی با سایر حالت های آزمون دارد. استفاده از مواد متخلخل بر روی پله های کلکتور باعث شده که انرژی حرارتی خورشید توسط این مواد جذب و انباشته شود و در نتیجه به تدریج و با گذشت زمان سبب گرم نگه داشتن فضای داخل کلکتور شود. همچنین بیشترین مقدار دما بین دماهای اندازه گیری شده، متعلق به آزمایش با ماده متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر است که به دلیل این است، علاوه بر وجود گرما در

و ۰/۸ لیتر است. کمترین مقدار هم مربوط به آب شیرین کن خورشیدی بدون مواد متخلخل با تولید آب شیرین به میزان ۰/۶۳ لیتر می باشد.

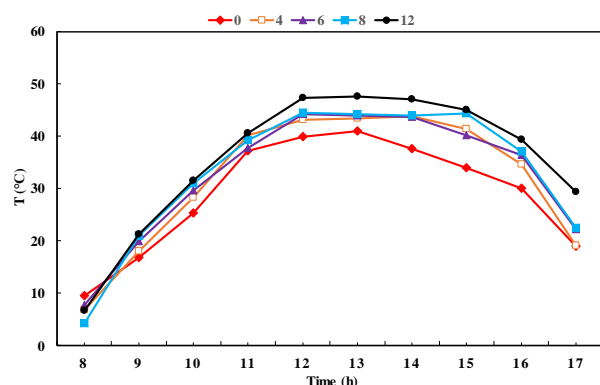
و گرما می باشد و این موضوع استنباط می شود که هر چه میزان ضخامت نمد به رنگ مشکی بیشتر باشد جاذب بهتری برای انرژی خورشیدی و گرما می باشد.



شکل ۵ مقایسه دمای پلکان بالا در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف پشم

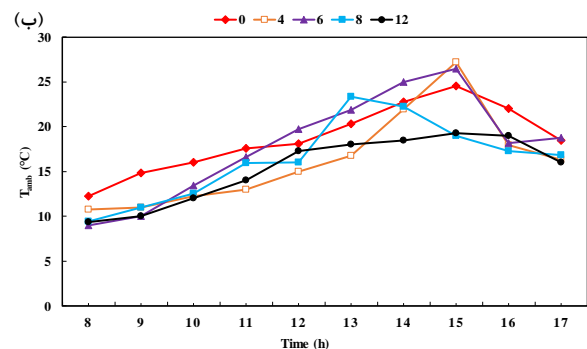
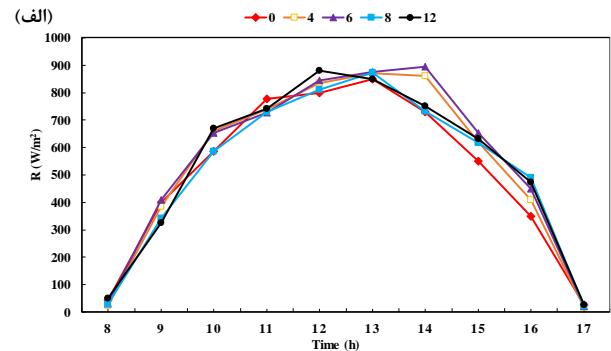


شکل ۶ مقایسه دمای پله وسط در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف پشم

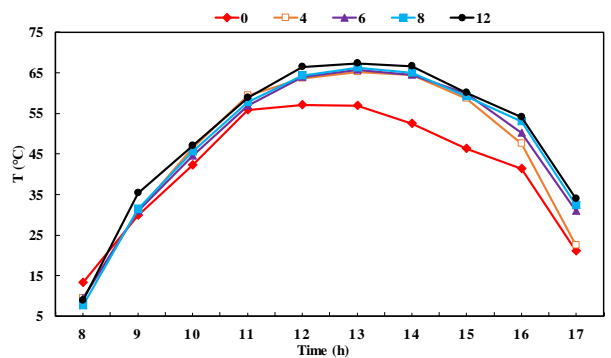


شکل ۷ مقایسه دمای پله پایین در آب شیرین کن با ضخامت های مختلف نمد

بازده انرژی برای حالت های مختلف آزمایش با حضور مواد متخلخل و همچنین بدون استفاده از مواد متخلخل در جدول (۳) محاسبه و نوشته شده است. نتایج نشان می دهد، بازده آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم به ضخامت ۰،۸، ۶ و ۴ میلی



شکل ۳ (الف) میزان تشعشع خورشیدی و (ب) دمای محیط در ساعت های مختلف آزمون ها

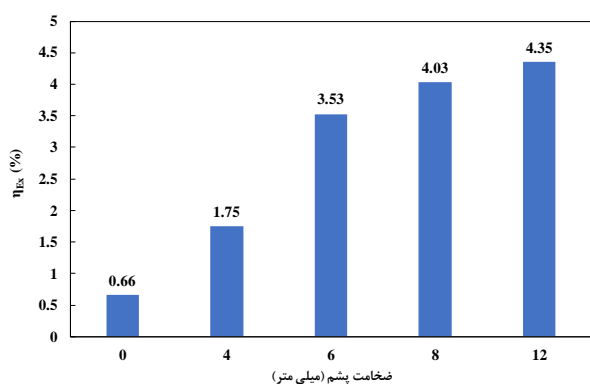


شکل ۴ مقایسه دمای درون در آب شیرین کن با ضخامت های متفاوت پشم

تولید ساعتی آب شیرین برای حالت های مختلف آزمون های تجربی در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که طی ۹ ساعت آزمایش در طول روز، میزان بهره وری آب شیرین به ترتیب از آب شیرین کن بدون مواد متخلخل تا آب شیرین کن با مواد متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر، در حال افزایش بوده است. بیشترین مقدار آب شیرین جمع آوری شده در آب شیرین کن خورشیدی با مواد متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر بود که مقدار آن ۱ لیتر است. در ضخامت های ۸، ۶ و ۴ میلی متر، میزان تولید آب شیرین به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۵

با توجه به اینکه مقدار بازده برای ماده متخلخل با ضخامت ۱۲ میلی متر از بقیه حالت ها، بیشتر شده است و به منظور بررسی دقیق تر، مقدار تشعشع ساعتی (R) و دماهای محیط (T_E)، شیشه کلکتور (T_G)، پله بالا (T_{S1})، پله وسط (T_{S2})، پله پایین (T_{S3})، آب شور ورودی (T_{in}) و آب شیرین خروجی (T_{out}) بر حسب درجه سانتی گراد در طی زمان آزمون، در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد مقدار تشعشع ساعتی از ساعت ۸ تا ساعت ۱۲ افزایش می یابد و در نتیجه، مقدار دمای محیط، شیشه، پله ها و آب شور ورودی و آب شیرین تولید شده نیز افزایش یافته است. پس از ساعت ۱۲، مقدار تشعشع ساعتی کاهش می یابد ولی ماکزیمم دماها در ساعت ۱۳ رخ می دهد. بدلیل انباشت انرژی حرارتی خورشید توسط ماده متخلخل از زمان شروع آزمایش و همچنین با توجه به اینکه ماکزیمم دمای محیط در ساعت ۱۳ بوده، لذا می توان استدلال کرد که ماکزیمم دمای پله ها، شیشه کلکتور و آب شیرین خروجی نیز در ساعت ۱۳ رخ خواهد داد.

واضح است که بازده انرژی نمی تواند دید جامعی از عملکرد آب شیرین کن ارائه دهد. بنابراین، تحلیل انرژی نیز برای بررسی برگشت ناپذیری برای آزمایش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در شکل (۸) بازده انرژی نشان داده شده است. در روند آزمایش و با توجه به مقادیر به دست آمده مشخص گردید که انرژی ورودی به شدت به مقدار تابش خورشید وابسته است. همچنین انرژی خروجی وابستگی شدیدی به میزان آب حاصل شده در هر ساعت دارد و مقدار آب شیرین تولید شده در هر ساعت به دمای داخلی ککتور، پله ها و صفحه جاذب وابسته است. نتایج نشان می دهد که بیشترین مقدار بازده انرژی برای آزمایش با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر بوده و برابر با ۴/۳۵ درصد بدست می آید.



شکل ۸ بازده انرژی

برای مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش های پیشین، مقدار بازده انرژی و روش بهبود عملکرد در جدول (۵) مقایسه شده اند.

متر از بازده آب شیرین کن بدون ماده متخلخل به ترتیب به مقدار ۰/۰۸، ۶/۵، ۲/۷۶ و ۲/۴۷ درصد بیشتر است. از مقایسه بازده ها این مطلب دریافت می شود که هر چه میزان ضخامت پشم (از ۴ میلی متر تا ۱۲ میلی متر) در آب شیرین کن بیشتر شود، بازده آب شیرین کن نیز بیشتر می شود.

جدول ۳ میزان تولید ساعتی آب شیرین

ضخامت ماده متخلخل (میلی متر)	۰	۴	۶	۸	۱۲
حجم آب شیرین تولید شده (لیتر)	۰/۶۵	۰/۸	۰/۸۵	۰/۹۳	۱
ساعت	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵
۱۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳
۱۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷
۱۲	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲	۰/۲۱	۰/۲۱
۱۳	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۵
۱۴	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۴۵	۰/۱۵۵
۱۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۹
۱۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷
۱۷	۰/۰۶۵	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۹۳	۰/۱
میانگین (لیتر)	۷/۰۷	۸/۶۷	۹/۱۳	۹/۲۶	۱۱/۰۴
عدم قطعیت (درصد)	۱۷/۶۳	۲۰/۱	۲۰/۳۹	۲۴/۱۳	۲۴/۷۱
بازده (درصد)					

جدول ۴ دماهای محیط، درون، پله ها و آب شور ورودی و آب شیرین خروجی بر حسب درجه سانتیگراد برای ضخامت ۱۲ میلی متر

T_{out}	T_{in}	T_m	T_{S3}	T_{S2}	T_{S1}	T_G	T_E	R	h
-	۳/۵۰	۷/۷۵	۴/۱۹	۶/۱۹	۶/۶۳	۷/۶۳	۹/۴۴	۲۸	۸
-	۸/۸۹	۳۱/۴۵	۲۱/۰۰	۲۹/۲۹	۳۳/۰۰	۲۳/۰۰	۱۱/۰۰	۳۴۲	۹
۳۱/۰۰	۱۰/۲۵	۴۵/۶۳	۳۱/۰۰	۴۰/۸۹	۴۵/۳۶	۳۵/۳۵	۱۲/۵۵	۵۸۵	۱۰
۳۷/۱۵	۱۰/۸۱	۵۷/۶۹	۳۹/۲۵	۵۲/۸۸	۵۸/۳۸	۴۰/۰۰	۱۵/۹۴	۷۳۰	۱۱
۴۳/۳۰	۱۴/۶۹	۶۴/۲۵	۴۴/۴۴	۶۰/۶۳	۶۷/۰۰	۴۴/۰۶	۱۷/۰۴	۸۱۰	۱۲
۴۴/۸۵	۲۴/۳۸	۶۶/۲۵	۴۴/۹۰	۶۲/۸۱	۶۸/۲۵	۴۶/۷۵	۲۳/۳۸	۷۸۲	۱۳
۴۳/۵۶	۲۶/۷۵	۶۵/۰۰	۴۳/۵۶	۶۱/۲۵	۶۶/۰۶	۴۴/۳۱	۲۲/۲۲	۷۳۳	۱۴
۴۰/۱۰	۲۶/۶۳	۵۹/۱۳	۴۰/۴۴	۵۶/۵۶	۶۱/۷۵	۴۲/۰۶	۱۹/۰۰	۶۱۸	۱۵
۳۷/۰۰	۲۵/۹۴	۵۳/۰۶	۳۷/۰۶	۵۰/۶۹	۵۳/۸۱	۳۸/۳۸	۱۷/۲۵	۴۹۰	۱۶
۲۲/۱۲	-	۳۲/۳۱	۲۲/۴۴	۲۹/۵۰	۲۹/۸۸	۱۹/۸۱	۱۶/۸۵	۲۱	۱۷

ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر بدست آمد که برابر با ۴/۳۵ درصد می باشد. پس از نتایج بدست آمده، دریافت می شود که استفاده از پشم سیاه رنگ با ضخامت ۱۲ میلی متر، بهره وری ۱ لیتر و بازده ۲۴/۷۱ درصد، ایده آل ترین حالت در بین ضخامت های متفاوت ماده متخلخل برای افزایش بهره وری و بازده در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی می باشد.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A_b	مساحت صفحه جاذب (m^2)
\dot{E}_x	نرخ انرژی (W)
h	زمان (h)
L	انتالپی تبخیر آب (J/kg)
\dot{m}	دبی آب شیرین تولید شده (kg/h)
R	تشعشع خورشید (W/m^2)
T	دما ($^{\circ}C$)

علائم یونانی

η بازده

زیرنویس ها

amb	محیط
evp	تبخیر
in	ورودی
out	خروجی
sun	خورشید
w	آب

۷- مراجع

- [1] H. Bagheri Esfeh, R. Rostam Zadeh, and M. Rostam Zadeh, "Review on different solar still systems," (in Persian), *Scientific journal of the Iranian Mechanical Engineering Association*, vol. 28, no. 1, pp. 24-34, 2019, doi: <https://doi.org/10.16059719.1398.28.1.3.9>.
- [2] G. Peng and S. W. Sharshir, "Progress and performance of multi-stage solar still – A review," *Desalination*, vol. 565, p. 116829, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116829>.
- [3] P. K. Chaurasiya et al., "A review of techniques for increasing the productivity of passive solar stills," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102033, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102033>.
- [4] P. Negi, R. Dobriyal, D. B. Singh, and G. K. Badhotiya, "A review on passive and active solar still using phase change materials," *Materials Today*:

جدول ۵ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش های پیشین

پژوهشگر	روش بهبود	بازده (درصد)
سلامی و همکاران [۱۶]	استفاده از لایه های اسفنج سیاه شده در آب شیرین کن	۲۳/۰۳
عبدالله و همکاران [۱۹]	استفاده از مواد متخلخل	۲۸
رشیدی و همکاران [۱۴]	استفاده از مواد متخلخل مشبک	۱۷/۳۵
پژوهش حاضر	استفاده از پشم به عنوان ماده متخلخل (ضخامت ۱۲ میلی متر)	۲۴/۷۱

۶- نتیجه گیری

مشکل اساسی آب شیرین کن هایی خورشیدی، بازده پایین آن ها می باشد به همین جهت در این پژوهش برای افزایش بهره وری و بازده آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، از ماده متخلخل پشم برای پوشاندن پله ها استفاده شد و تاثیر ضخامت ماده متخلخل (۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر) بر بهبود بهره وری آب شیرین کن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. آزمون های تجربی از ساعت ۸ الی ۱۷ انجام شدند و با اندازه گیری تشعشع خورشید، دمای محیط، دمای فضای داخل کلکتور، دمای پله ها و مقدار آب شیرین تولید شده، عملکرد آب شیرین کن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از پشم سیاه رنگ در آب شیرین کن، دما فضای داخل آب شیرین کن با ماده متخلخل از آب شیرین کن بدون ماده متخلخل بیشتر است. همچنین با تحلیل نتایج دریافت شد که هر چه میزان ضخامت ماده متخلخل پشم بیشتر باشد، دماهای فضای داخلی، پله بالا، پله وسط و پله پایین در یک ساعت مشخص، نیز بیشتر می شود. مقایسه نتایج نشان داد که هر چه ضخامت ماده متخلخل پشم بیشتر باشد، مقدار تولید آب شیرین نیز بیشتر می شود. به عنوان مثال تولید آب شیرین در آب شیرین کن با پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از آب شیرین کن بدون پشم به میزان ۳۵۰ میلی لیتر بیشتر بوده است. از محاسبه بازده و مقایسه آن ها نیز نتیجه شد که بازده آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از ۸ میلی متر و ۸ میلی متر از ۶ میلی متر و ۶ میلی متر از ۴ میلی متر بیشتر است به طوریکه اختلاف بازده بین آب شیرین کن با ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱۲ میلی متر از آب شیرین کن بدون پشم ۷/۰۸ درصد می باشد. همچنین به منظور بررسی جامع تر، بازده انرژی در حالت های مختلف آزمایش محاسبه شد و مقدار ماکزیمم بازده انرژی برای حالت آب شیرین کن با

- Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 221-229, 2018/04/03 2018, doi: 10.1080/01430750.2017.1298059.
- [13] S. W. Sharshir *et al.*, "Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 684-693, 2017/02/25/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.085>.
- [14] S. Rashidi, N. Rahbar, M. S. Valipour, and J. A. Esfahani, "Enhancement of solar still by reticular porous media: Experimental investigation with exergy and economic analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 1341-1348, 2018/02/05/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.089>.
- [15] A. Agrawal and R. S. Rana, "Theoretical and experimental performance evaluation of single-slope single-basin solar still with multiple V-shaped floating wicks," *Heliyon*, vol. 5, no. 4, p. e01525, 2019/04/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01525>.
- [16] M. H. Sellami, T. Belkis, M. L. Aliouar, S. D. Meddour, H. Bouguettaia, and K. Loudiyi, "Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 5, pp. 111-117, 2017/09/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.004>.
- [17] A. R. Abd Elbar and H. Hassan, "Energy, exergy and environmental assessment of solar still with solar panel enhanced by porous material and saline water preheating," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 124175, 2020/12/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124175>.
- [18] S. W. Sharshir, M. A. Rozza, M. Elsharkawy, M. M. Youns, F. Abou-Taleb, and A. E. Kabeel, "Performance evaluation of a modified pyramid solar still employing wick, reflectors, glass cooling and TiO₂ nanomaterial," *Desalination*, vol. 539, p. 115939, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115939>.
- [19] S. Abdallah, M. M. Abu-Khader, and O. Badran, "Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills," *Desalination*, vol. 242, no. 1, pp. 128-137, 2009/06/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.036>.
- Proceedings*, vol. 46, pp. 10433-10438, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.996>.
- [5] S. S. Adibi Toosi, H. R. Goshayeshi, and S. Zeinali Heris, "Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser," *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102681, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102681>.
- [6] H. Amiri, "Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser," *Solar Energy*, vol. 248, pp. 88-102, 2022/12/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.006>.
- [7] B. Darbari and S. Rashidi, "Performance analysis for single slope solar still enhanced with multi-shaped floating porous absorber," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101854, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101854>.
- [8] S. B. Sadineni, R. Hurt, C. K. Halford, and R. F. Boehm, "Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still," *Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 71-80, 2008/01/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.08.003>.
- [9] Z. M. Omara, A. E. Kabeel, and M. M. Younes, "Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 876-881, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.092>.
- [10] A. F. Muftah, K. Sopian, and M. A. Alghoul, "Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts," *Desalination*, vol. 435, pp. 198-209, 2018/06/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>.
- [11] M. S. S. Abujazar, S. Fatihah, E. R. Lotfy, A. E. Kabeel, and S. Sharil, "Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate," *Desalination*, vol. 425, pp. 94-103, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.022>.
- [12] H. Panchal, D. K. Patel, and P. Patel, "Theoretical and experimental performance analysis of sandstones and marble pieces as thermal energy storage materials inside solar stills," *International Journal of Ambient*

مطالعه رفتار ارتعاشی یک روتور با استفاده از مدل ۸ درجه آزادی جفکات و مقایسه با آزمون تجربی

چکیده: حل تحلیلی، عددی و تجربی محورهای دوار در مراحل طراحی، ساخت و عملیات، به منظور جلوگیری از وقوع پدیده تشدید از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش، تحلیل عددی و تجربی یک سیستم روتور با استفاده از مدل هشت درجه آزادی جفکات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. استخراج معادلات حاکم بر سیستم با در نظر گرفتن اثرات ژيروسکوپی و جرم یاتاقان‌ها، با استفاده از روش لاگرانژ انجام می‌شود. بدین منظور، پس از معرفی یک مدل برای سیستم، عبارت‌های انرژی کرنشی، جنبشی و اتلافی با توجه به شرایط مرزی بدست می‌آیند. سپس با جایگذاری پارامترهای سیستم، فرکانس‌های طبیعی و نمودار کمپیل به منظور پیش بینی سرعت‌های بحرانی استخراج می‌شود. اعتبار سنجی مدل ارائه شده به وسیله مقایسه با نتایج حل المان محدود (انسیس)، و نتایج تجربی صورت گرفته است. پس از آن، تاثیر پارامتر موقعیت قرارگیری دیسک نسبت به یاتاقان اول بر فرکانس‌های طبیعی سیستم بررسی شده است. در انتها نمودار پاسخ فرکانسی سیستم تحت نابالانسی جرمی در فواصل مختلف نابالانسی ارائه شده و تاثیر پارامتر موقعیت قرارگیری دیسک بر روی آن بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد تغییرات فاصله نابالانسی و موقعیت قرارگیری دیسک، فرکانس و قله تشدید سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های راهنما: روتور، مدل جفکات، فرکانس‌های طبیعی، نمودار کمپیل، نابالانسی جرمی

سارا اناری

دانشجوی دکتری،
دانشگاه شهید بهشتی،
دانشکده مهندسی مکانیک
و انرژی، تهران

عباس رهی*

دانشیار،
دانشگاه شهید بهشتی،
دانشکده مهندسی مکانیک
و انرژی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

Sara Anari
PhD Candidate

Abbas Rahi*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering and
Energy,
Shahid Beheshti
University, Tehran

Vibration behavior study of a rotor using Jeffcott's 8 DOF model and comparing with the experimental test

Abstract: Analytical, numerical, and experimental solution of the rotating system in the stages of design, construction, and operation is important in order to prevent resonance phenomenon. In this research, the numerical and experimental analysis of a rotor is studied using Jeffcott's 8 DOF model. The equations of motion by considering the gyroscopic effects and the mass of the bearings are formulated using the Lagrange method. After introducing a model of the system, the terms of potential, kinetic, and dissipation energy are obtained according to the boundary conditions. Then, by placing the system parameters, the natural frequencies of the system and the Campbell diagram have been obtained in order to predict the critical speeds. Validation of the presented model has been done by comparing with the results of Finite Element Solution (ANSYS) and approximate solution, and also percentage error of the first critical frequency compared to the experimental value is 15%. Then, the effect of changing the position of the disk from the first bearing on the natural frequencies of the system is studied. In the end, the system's frequency response is presented at the different unbalanced distances and the position of the disk. Observations show that changes in unbalanced distance and position of the disk can affect the frequency and resonance peak of the system.

Keywords: Rotor, Jeffcott model, Natural frequencies, Campbell diagram, Mass imbalance

۱- مقدمه

جدید از روتور غیرخطی با منبع ایده آل را به منظور بررسی ارتعاشات عرضی پیچشی تحت شرایط کاری غیر ثابت را توسعه دادند. آنها روتور مورد نظر را به صورت الاستیک و با شش درجه آزادی مدلسازی و اثر متغیرهایی همچون اندازه و فاز نامیزانی جرمی و گشتاور احتمالی از سوی موتور بر روی افزایش سرعت زاویه ای روتور در ناحیه عبور از سرعت های بحرانی سیستم بررسی کردند. آن ها نشان دادند با اضافه شدن نامیزانی به میزان ناچیزی، روتور قادر به عبور از سرعت های بحرانی خود نخواهد بود. جمشیدی و همکاران [۱۱] یک مدل تحلیلی مناسب، جهت بررسی رفتار ارتعاشات غیرخطی روتورهای متقارن و نامتقارن تحت نیروهای ناهم محوری و نامیزانی جرمی در دستگاه مختصات دوار ارائه دادند. برای تحلیل ارتعاشی دقیق تر، از تئوری تیر تیموشنکو و جهت مدل سازی نیروی ناهم محوری، از معادلات گیبنز استفاده شده است. با بکارگیری روش ریلی-ریتز، متغیرهای مکانی و زمانی روابط انرژی از یکدیگر جدا شده و سپس با بهره گیری از اصل همپلتون، معادلات حرکت بدست آمده اند. آنها در این مطالعه، تاثیر هرکدام از عیوب عدم تقارن محوری، نیروی ناهم محوری، نامیزانی جرمی و همچنین جمله های غیرخطی، را روی رفتار دینامیکی روتور بررسی کردند. امیرزادگان و همکاران [۱۲] ارتعاشات غیرخطی روتور انعطاف پذیر را حین عبور از سرعت های بحرانی مورد بررسی قرار دادند. معادلات حرکت روتور به صورت ۶ درجه آزادی استخراج شده و سپس با استفاده از روش المان محدود حل شده اند. آنها نشان دادند، افزایش میزان نامیزانی روتور می تواند باعث افزایش دامنه ارتعاشات جانبی، و جلوگیری از افزایش سرعت دورانی روتور و نهایتاً عدم عبور از سرعت های بحرانی شود. کرووز و همکاران [۱۳] یک مدل المان محدود را به منظور پیش بینی پدیده های ارتعاش جانبی ناشی از روتور چند مرحله ای (هفت مرحله) با عدم تعادل، از جمله اثرات میرایی و ژبروسکویی پیشنهاد کردند. نتایج آنها نشان داد با در نظر گرفتن اثرات عدم تعادل، سرعت های بحرانی به سمت فرکانس های پایین تر حرکت می کنند. کیم و همکاران [۱۴] یک مدل دینامیکی غیرخطی را به منظور بررسی یک سیستم روتور-پره با حرکت چرخشی پیشنهاد دادند که در آن روتور صلب و پره ها به ترتیب به عنوان روتور جفکات و تیرهای اوپلر-برنولی مدل سازی شده اند. اثرات افزایش سفتی پره های دوار را با استفاده از مجموعه ای ترکیبی از تغییر شکل ها محوری و شعاعی در نظر گرفتند. آنها پاسخ های دینامیکی غیرخطی سیستم روتور-پره بر حسب فرکانس های طبیعی برای حرکت چرخشی بررسی کردند. ایزا و همکاران [۱۵] یک روش تحلیلی جدید را با استفاده از ترکیب دینامیک چند جسمی و المان

محورهای دوار در بسیاری از ماشین آلات از جمله موتورهای هوایی و توربین های بخار که همگی دارای ساختار دورانی هستند، مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به اهمیت محورهای دوار در صنعت و کاربرد گسترده آن ها، پیش بینی سرعت های بحرانی و فرکانس های طبیعی آن ضروری می باشد. بدین منظور باید فرآیند تحلیل عددی در طول مراحل طراحی، ساخت و عملیات انجام گیرد. تاریخچه مطالعات رفتار دینامیکی محورهای دوار به نیمه قرن نوزدهم بر می گردد، زمانی که لزوم بررسی سرعت های دورانی بالا در ماشین آلات صنعتی مطرح شد. چپو و چن [۱] ارتعاشات روتور به همراه دیسک و پره، با یک تا سه دیسک دارای دو تا شش پره را مورد مطالعه قرار دادند. آنها معادلات حرکت را با استفاده از روش لاگرانژ و روش مودهای فرضی بدست آوردند. خطی و همکاران [۲] با استفاده از روش اصلاح سفتی و جرم، شکل مودهای بدست آمده از روش تحلیل مودال محیطی را میزان کردند. آنها به منظور بررسی دقیق این روش از سه نمونه مطالعاتی بهره بردند. ابتدا روش اصلاح جرم و سفتی را برای یک تیر یک سر گیردار که به صورت تئوری مدل شده بود پیاده کردند و توانستند شکل مودهای اول تیر را میزان کنند. همچنین آنها این روش را با دو آزمون تجربی اجرا کردند. آزمون اول مربوط به تیر یک سر گیردار و آزمون دوم مربوط به یک صفحه یک سر گیردار بود. لو و همکاران [۳] به بررسی یک سیستم روتور صلب با یاتاقان های دارای روانکاری پرداختند. کویین [۴] ارتعاشات غیرخطی یک روتور جفکات را تحت نابالانسی های چرخشی بررسی کرد. یابونو و همکاران [۵] تشدیدهای اولیه یک روتور جفکات افقی را مطالعه کردند. آنها تاثیر عوامل غیرخطی ناشی از نیروی بازگرداننده و گرانش را بررسی کردند. جورجیادس [۶] به تحلیل دینامیکی یک محور با سرعت زاویه ای متغیر پرداخت. محمودی و همکاران [۷] اثر تغییر شکل های بزرگ بر روی ارتعاشات یک محور دوار که از سرعت بحرانی خود عبور می کند را بررسی کردند. وانگ و ژیانگ [۸] به صورت عددی و تجربی مشخصه های ارتعاشی یک روتور که شامل دو شفت را با در نظر گرفتن عیب های ناهم محوری و نامیزانی جرمی مورد مطالعه قرار دادند. وانگ و گنگ [۹] رفتار دینامیکی دو روتور که دارای ناهم محور و جرم نامیزانی بودند، را مورد تحلیل قرار دادند. این دو روتور که به یکدیگر متصل اند با ۶ درجه آزادی مدل شدند. به عنوان نتیجه، فرکانس $2x$ در ناهم محوری موازی و $2x$ ، $4x$ و $6x$ در نامحوری زاویه ای مشاهده شده اند. رکن آبادی و همکاران [۱۰] یک مدل

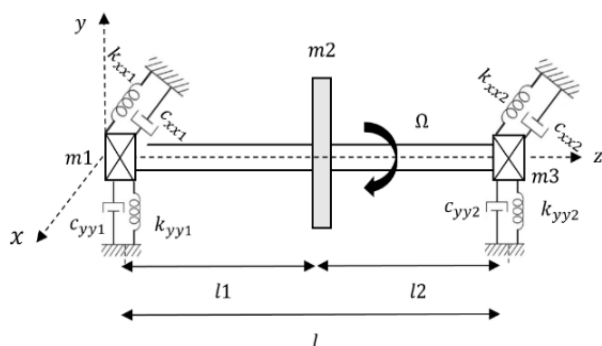
ریلی و آزمون تجربی مقایسه می‌شود. همچنین پاسخ فرکانسی سیستم تحت نابالانسی دیسک رسم شده و تاثیر پارامتر فاصله نابالانسی و موقعیت قرار دیسک بررسی می‌شود.

۲- استخراج معادلات

در این بخش مشخصات فیزیکی و معادلات حاکم بر سیستم با استفاده از روش لاگرانژ استخراج می‌شود. در شکل (۱) تصویر واقعی دستگاه آزمون آزمایشگاهی و شماتیک مدلسازی آن نشان داده شده است که دارای یک دیسک در مرکز شفت و دو یاتاقان غلتشی در هر دو انتهای آن می‌باشد، $E, I, e, I_T, I_P, m_2, l_1$ ، l_2 و l به ترتیب مدول یانگ، گشتاور دوم سطح، فاصله نابالانسی، گشتاور لختی حول محورهای عرضی X و Y ، گشتاور لختی حول محور Z ، جرم دیسک، فاصله یاتاقان سمت راست تا مرکز دیسک، فاصله مرکز دیسک تا یاتاقان سمت چپ و طول کل شفت می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) سیستم آزمون آزمایشگاهی و (ب) مدلسازی

شفت انعطاف پذیر و دیسک صلب فرض شده و زاویه شیب شفت در هر دو یاتاقان برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. هر یک از یاتاقان‌ها دارای سفتی و میرایی در دو جهت X و Y و جرم

محدود به منظور شبیه سازی ارتعاش جانبی و پیچشی یک سیستم روتور ارائه دادند. این روش پیشنهادی می‌تواند ارتعاش جانبی و پیچشی و همچنین سایر ویژگی‌های ارتعاش تک روتور را تحت سرعت‌های چرخشی و خروج از مرکز مختلف شبیه‌سازی و تحلیل کند. الصالح و همکاران [۱۶] ارتعاشات جانبی یک سیستم روتور جفکات دارای نامیزانی که در چندین شرایط نامیزانی کار می‌کند، را به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. جیا و همکاران [۱۷] سیستم روتور جفکات را با استفاده از یک مدل غیر احتمالی برای توصیف پارامترهای نامشخص بررسی کردند. با معرفی تابع بسط چبیشف، روش محدب چبیشف را مطرح کردند. سپس از این روش به منظور محاسبه پاسخ روتور، زمانی که جرم و سفتی یاتاقان‌ها به ترتیب پارامترهای نامشخص هستند، استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی آنها نشان داد که روش پیشنهادی برای کمی کردن پارامترهای نامشخص سیستم روتور جفکات معتبر و مؤثر می‌باشد [۱۷]. وی و همکاران [۱۸] یک مدل دینامیکی آب بندی شده روتور برآش عمودی جفکات را توسعه دادند. آن‌ها تاثیرات پارامترهای ساختاری و عملیاتی مانند سرعت دورانی، جرم روتور، فاصله نصب آب بندی‌ها و میرایی سیستم را بر رفتار دینامیکی غیرخطی سیستم عمودی تحلیل کردند. نتایج نشان داد که دامنه یک سیستم روتور عمودی کمتر از یک سیستم روتور افقی می‌باشد و همچنین کاهش جرم روتور باعث افزایش پایداری سیستم روتور می‌شود. رکن آبادی و همکاران [۱۹] یک مدل جدید به منظور بررسی شتاب زاویه‌ای روتور غیرخطی که از سرعت‌های بحرانی در شرایط عملیاتی غیر ثابت عبور می‌کند، توسعه دادند. روتور به صورت الاستیک و با لحاظ کردن اثرات اینرسی غیرخطی و انعطاف پذیری یاتاقان‌ها مدل گردید. معادلات غیرخطی حرکت با استفاده از روش لاگرانژ به دست آمده و با روش المان محدود حل شد. آن‌ها اثرات پارامترهایی مانند خروج از مرکز شفت، میرایی و سفتی تکیه‌گاه‌ها بر افزایش سرعت زاویه‌ای روتور در عبور از سرعت بحرانی در نظر گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار کمی خروج از مرکز می‌تواند از ورود به محدوده سرعت بحرانی الاستیک روتور جلوگیری کند.

در این مقاله یک نمونه آزمایشگاهی روتور به همراه دیسک و دو یاتاقان در هر دو انتهای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم به صورت یک مدل تحلیلی جفکات هشت درجه آزادی مدلسازی شده و با استفاده از روش لاگرانژ معادلات حاکم بر آن استخراج می‌شود. فرکانس‌های طبیعی، نمودار کمپبل و اولین سرعت بحرانی بدست آمده و نتایج با حل المان محدود، تقریبی

در رابطه (۴) مشاهده می‌شود اثرات ژيروسکوپی لحاظ شده اند. به علت وجود میرایی در یاتاقان ها و جرم نابالانسی، رابطه انرژی اتلافی (۷) و نیروهای ناپایستار (۸) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$D.F = \frac{1}{2} [c_{xx1}\dot{x}_1^2 + c_{xx3}\dot{x}_3^2 + c_{yy1}\dot{y}_1^2 + c_{yy3}\dot{y}_3^2] \quad (7)$$

$$\partial W = m_2 e \Omega^2 \cos(\Omega t) \partial x_2 + m_2 e \Omega^2 \sin(\Omega t) \partial y_2 \quad (8)$$

که در روابط بالا $\dot{x}_1, \dot{x}_3, \dot{y}_1, \dot{y}_3$ به ترتیب سرعت تغییر مکان در جهت X, X, Y و Y جهت تغییر مکان در جهت Y و جهت X می‌باشد و $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta}_x$ و $\ddot{\theta}_y$ به ترتیب شتاب در جهت X, X شتاب در جهت Y و شتاب دورانی در جهت X و Y می‌باشد. در ادامه با قرار دادن روابط انرژی کرنشی، جنبشی، اتلافی و نیروهای ناپایستار در معادله لاگرانژ زیر، معادلات حاکم بر سیستم بدست می‌آید:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j ; j = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

که در آن $L = T - V$ تابع لاگرانژ، q_j درجات آزادی سیستم و $Q_j = \frac{\partial W}{\partial q_j}$ نیروی غیر پایستار می‌باشند. پس داریم:

$$m_1 \ddot{x}_1 + \dot{x}_1 c_{xx1} + x_1 \left(k_{xx1} + \frac{12EI}{l_1^3} \right) - \frac{12EI}{l_1^3} x_2 + \frac{6EI}{l_1^2} \theta_y = 0 \quad (10)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 + \dot{y}_1 c_{yy1} + y_1 \left(k_{yy1} + \frac{12EI}{l_1^3} \right) - \frac{12EI}{l_1^3} y_2 - \frac{6EI}{l_1^2} \theta_x = 0 \quad (11)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + x_2 \left(\frac{1}{l_1^3} + \frac{1}{l_2^3} \right) 12EI - x_3 \frac{12EI}{l_2^3} - x_1 \frac{12EI}{l_1^3} + \theta_y \left(\frac{1}{l_2^2} - \frac{1}{l_1^2} \right) 6EI = m_2 \Omega^2 e \cos(\Omega t) \quad (12)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + y_2 \left(\frac{1}{l_1^3} + \frac{1}{l_2^3} \right) 12EI - y_3 \frac{12EI}{l_2^3} - y_1 \frac{12EI}{l_1^3} + \theta_x \left(\frac{1}{l_2^2} - \frac{1}{l_1^2} \right) 6EI = m_2 \Omega^2 e \sin(\Omega t) \quad (13)$$

$$I_T \ddot{\theta}_x + I_p \Omega \dot{\theta}_y + \theta_x \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) 4EI - y_1 \frac{6EI}{l_1^2} + y_3 \frac{6EI}{l_2^2} + y_2 \left(\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2} \right) 6EI = 0 \quad (14)$$

$$I_T \ddot{\theta}_y + I_p \Omega \dot{\theta}_x + \theta_y \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) 4EI + x_1 \frac{6EI}{l_1^2} - x_3 \frac{6EI}{l_2^2} + x_2 \left(\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2} \right) 6EI = 0 \quad (15)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + \dot{x}_3 c_{xx3} + x_3 \left(k_{xx3} + \frac{12EI}{l_3^3} \right) - \frac{12EI}{l_3^3} x_2 - \frac{6EI}{l_3^2} \theta_y = 0 \quad (16)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 + \dot{y}_3 c_{yy3} + y_3 \left(k_{yy3} + \frac{12EI}{l_3^3} \right) - \frac{12EI}{l_3^3} y_2 + \frac{6EI}{l_3^2} \theta_x = 0 \quad (17)$$

m_1 و m_3 هستند. $x_1, y_1, x_2, y_2, \theta_x, \theta_y, x_3$ و y_3 به ترتیب تغییر شکل یاتاقان یک در راستای X و Y ، تغییر شکل دیسک در راستای X و Y ، زاویه چرخشی دیسک حول محور X و Y ، تغییر شکل یاتاقان دوم در راستای X و Y می‌باشند که بیانگر مدل هشت درجه آزادی جفکات است و Ω سرعت دورانی محور می‌باشد. $c_{yy3}, c_{xx3}, k_{yy3}, k_{xx3}, c_{yy1}, c_{xx1}, k_{yy1}, k_{xx1}$ به ترتیب مقدار سفتی و میرایی یاتاقان ها هستند.

به منظور استخراج معادلات سیستم با استفاده از روش لاگرانژ، باید روابط انرژی کرنشی، انرژی جنبشی و انرژی اتلافی بدست آیند. انرژی کرنشی سیستم شامل دو بخش V_1 (سفتی یاتاقان‌ها) و V_2 (شفت ارتجاعی) می‌باشد که با استفاده از مقادیر گشتاور M_{yz} و M_{xz} و متناسب با شرایط مرزی بدست می‌آید [۲۰].

$$V_1 = \frac{1}{2} [k_{xx1}x_1^2 + k_{xx3}x_3^2 + k_{yy1}y_1^2 + k_{yy3}y_3^2] \quad (1)$$

$$V_2 = \int_0^l \frac{M_{xz}^2 + M_{yz}^2}{2EI} dz . M_{xz} = EIX'' . M_{yz} = EIY'' \quad (2)$$

که در آن مقادیر X'' و Y'' با استفاده از چهار شرط مرزی انتقالی و زاویه شیب در دو بازه $z = 0: l_1$ و $z = l_1: l$ بدست آمده و از مجموع انرژی کرنشی یاتاقان ها و شفت انعطاف پذیر، مقدار انرژی کرنشی کل سیستم بدست می‌آید.

$$V = \frac{2EI}{l_1^3} [l_1^2 \theta_x^2 + l_1^2 \theta_y^2 + 3l_1 x_1 \theta_y - 3l_1 x_2 \theta_y - 3l_1 y_1 \theta_x + 3l_1 y_2 \theta_x + 3x_1^2 - 6x_1 x_2 + 3x_2^2 + 3y_1^2 - 6y_1 y_2 + 3y_2^2] + \frac{2EI}{l_2^3} [\theta_x^2 l_2^2 + \theta_y^2 l_2^2 + 3l_2 x_2 \theta_y - 3l_2 x_3 \theta_y - 3l_2 y_2 \theta_x + 3l_2 y_3 \theta_x 3x_2^2 - 6x_2 x_3 + 3x_3^2 + 3y_2^2 - 6y_2 y_3 + 3y_3^2 + \frac{1}{2} [k_{xx1}x_1^2 + k_{xx3}x_3^2 + k_{yy1}y_1^2 + k_{yy3}y_3^2]] \quad (3)$$

همچنین انرژی جنبشی سیستم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_T (\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) + \frac{1}{2} I_p (\omega_1^2 - 2\omega_1 \theta_x \dot{\theta}_y) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) \quad (4)$$

که در آن I_T و I_p به ترتیب ممان اینرسی عرضی و قطبی دیسک می‌باشد و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$I_T = \frac{1}{4} m_2 R^2 \quad (5)$$

$$I_p = \frac{1}{2} m_2 R^2 \quad (6)$$

۳- نتایج حاصل از حل تحلیلی، عددی و آزمون تجربی

جدول (۲) مقادیر فرکانس طبیعی بدست آمده از حل تحلیلی و حل المان محدود را نشان می‌دهد. درصد خطای سه فرکانس طبیعی اول بدست آمده از هر دو روش کمتر از ۱۵ درصد به دست آمده است. شکل (۲)، بیانگر چهار شکل مود اول سیستم بوده که حالت‌های خمش و پیچش شفت را نشان می‌دهد. جدول (۳) بیانگر اولین سرعت بحرانی بدست آمده از روش‌های تحلیلی، المان محدود و روش تقریبی ریلی می‌باشد که درصد خطای آن‌ها نسبت به مقدار تجربی کمتر از ۱۵ درصد است.

به منظور بررسی نقاط تشدید در نمونه مورد نظر، نمودار کمپیل در محدوده سرعت دورانی صفر تا ۴۰۰ دور بر دقیقه با مرتبه تحریک موتور در شکل (۳) رسم شده است. محل تقاطع خط تحریک شیب دار با خطوط افقی، نقاط تشدید و سرعت‌های بحرانی را نشان می‌دهند. جدول (۴) بیان کننده سرعت‌های بحرانی و فرکانس متناظر با آن‌ها می‌باشد، همچنین قابل ذکر است که فرکانس‌های پسر و پیشرو^۱ در سرعت‌های کمتر از ۳۰۰ دور بر دقیقه بر هم منطبق هستند. یکی از پارامترهای مورد بررسی در سیستم، موقعیت قرارگیری دیسک روی شفت می‌باشد که جابجایی آن می‌تواند روی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها تاثیر گذار باشد. این پارامتر با تغییرات طول l_1 (فاصله مرکز دیسک تا یاتاقان اول) در سه موقعیت ۳۱۰ (مرکز شفت)، ۴۱۰ و ۵۱۰ میلی‌متر در جدول (۵) نشان شده است.

شکل (۴)، نمودار کمپیل مربوط به تغییرات طول l_1 را در سه شکل مود اول نشان می‌دهد. طبق شکل (۴) و جدول (۵)، با افزایش فاصله مرکز دیسک تا یاتاقان اول، فرکانس شکل مود اول افزایش و فرکانس شکل مود دوم و سوم کاهش می‌یابد و باعث تغییرات سرعت‌های بحرانی و نواحی تشدید می‌شود. این روند افزایشی/کاهشی فرکانس در سه شکل مود اول به علت نوع شکل مود می‌باشد.

جدول ۲ مقایسه فرکانس‌های طبیعی سیستم در حل تحلیلی و حل المان محدود

فرکانس (هرتز)	مود اول	مود دوم	مود سوم
حل تحلیلی	۲۰/۵۸	۱۶۲/۴۵	۳۵۷/۴۵
حل المان محدود	۲۰/۳۷	۱۴۷/۸۴	۳۲۰/۷
درصد خطا	٪ ۱۰/۲۴	٪ ۹/۴۵	٪ ۱۰/۳

با جداسازی ماتریس‌های جرم $[M]$ ، سفتی $[K]$ ، میرایی $[C]$ و نیروهای نابالانسی $[F]$ ، در معادلات (۱۰) الی (۱۷)، معادله کلی سیستم به شکل ماتریسی $[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = [F]$ بدست می‌آید.

به منظور یافتن فرکانس‌های طبیعی سیستم، از معادله (۱۸) استفاده می‌شود:

$$\det\{-\Omega^2[M] + i\Omega[C] + [K]\} = 0 \quad (18)$$

مقادیر پارامترهای مورد استفاده در محاسبه عددی برای یاتاقان و پارامترهای هندسی و داده‌های دیسک در جدول (۱) آمده است که در آن m_2 جرم دیسک، ρ چگالی، R شعاع دیسک، r شعاع محور، E مدول یانگ، l_1 و l_2 فاصله یاتاقان راست تا مرکز دیسک و فاصله یاتاقان چپ تا مرکز دیسک، k_{xx} ، c_{yy} و k_{yy} به ترتیب سفتی و میرایی یاتاقان‌های ۱ و ۲ در راستای X و Y ، ω سرعت دورانی سیستم می‌باشد.

به منظور ساده‌سازی مسئله، مقدار سفتی و میرایی یاتاقان‌ها در صفحه X و Y یکسان هستند و دیسک در مرکز شفت قرار گرفته است. پس از جایگذاری مشخصات سیستم و حل معادلات، فرکانس‌های طبیعی و نمودار کمپیل بدست می‌آیند. حل تحلیلی معادلات در نرم‌افزار متلب و حل المان محدود در نرم افزار انسیس ورک بِنج انجام شده و نتایج حاصل مقایسه می‌شوند. مدل شبیه‌سازی شده در انسیس دارای ۳۵۰ المان و ۱۶۷۷۷ گره می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات دستگاه آزمایشگاهی محور دوار

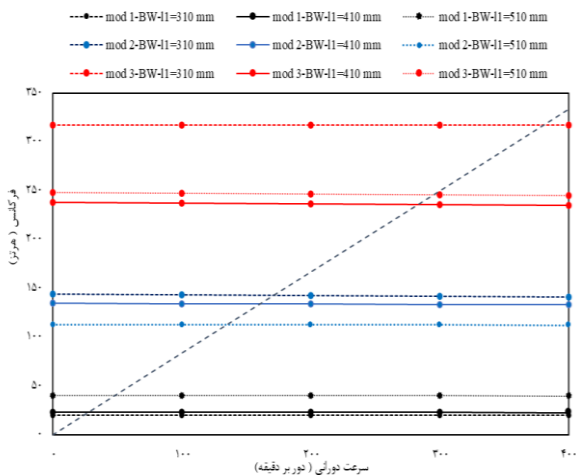
پارامتر	مقدار	واحد
m_2	۰/۷۸۵۰	(kg)
چگالی	۷۸۵۰	kg/m^3
شعاع دیسک	۴۰	mm
شعاع شافت	۶/۳۳	mm
مدول یانگ	۲۰۵	GPa
طول سمت چپ دیسک	۳۱۰	mm
طول سمت راست دیسک	۳۱۰	mm
$k_{xx1} = k_{xx3}$	۵۰۰۰	kN/m
$k_{yy1} = k_{yy3}$	۵۰۰۰	kN/m
$c_{xx1} = c_{xx3}$	۵۰۰	$k. s/m$
$c_{yy1} = c_{yy3}$	۵۰۰	$k. s/m$
سرعت دورانی	۴۰۰-۰	rpm

² Forward

¹ Backward

جدول ۴ فرکانس های بحرانی سیستم بر حسب هرتز

شکل مود	سرعت بحرانی (دور بر دقیقه)	فرکانس (هرتز)
اول	۲۴/۴۲	۲۰/۳۶
دوم	۱۷۱/۳۵	۱۴۵
سوم	۳۸۱	۳۱۷/۴



شکل ۴ نمودار کمپبل در بازه سرعت دورانی صفر تا ۴۰۰ دور بر دقیقه

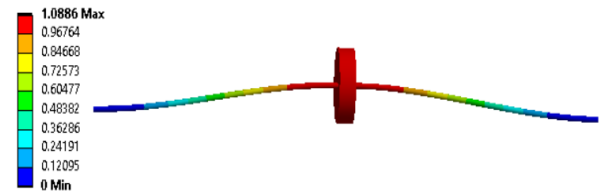
جدول ۵ بررسی اثر موقعیت قرارگیری دیسک روی شفت بر سرعت بحرانی سیستم بر حسب هرتز

شکل مود سوم پسرو	شکل مود دوم پسرو	شکل مود اول پسرو	طول سمت چپ (mm)
۳۱۷/۵	۱۴۸/۴۱	۲۰/۳۵۴	۳۱۰
۲۴۸/۱۵	۱۳۴/۳۷	۲۳/۵۵	۴۱۰
۲۳۷/۰۹	۱۱۳	۴۰/۳۱۳	۵۱۰

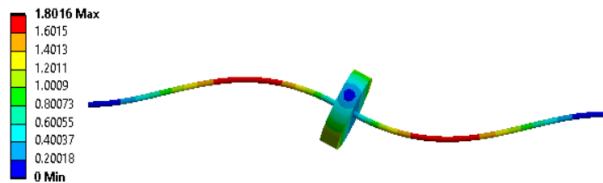
۴- پاسخ فرکانسی سیستم تحت اثر نابالانسی دیسک

به منظور بررسی خصوصیات دینامیکی روتور و بررسی سرعت بحرانی محاسبه شده از نمودارهای کمپبل، پاسخ فرکانسی تحت نابالانسی در محیط هارمونیک آنالیز بررسی می‌شود. شکل (۵) نمودار پاسخ فرکانسی در فواصل مختلف نابالانسی را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله نابالانسی نسبت به مرکز دیسک، دامنه جابجایی در اولین قله تشدید، افزایش می‌یابد.

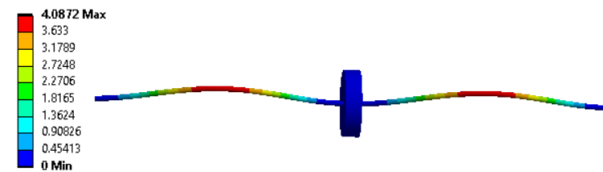
شکل (۶) بیانگر اثر موقعیت قرارگیری مرکز دیسک در فواصل ۳۱۰، ۴۱۰ و ۵۱۰ میلی‌متر نسبت به یاتاقان اول با فاصله نابالانسی ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. با جابجایی دیسک به سمت یاتاقان دوم، دامنه جابجایی تشدید افزایش و شیفت فرکانسی مثبت ایجاد می‌شود. شکل (۷) تغییرات جرم نابالانسی بر پاسخ



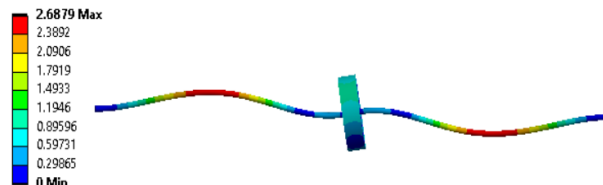
الف) شکل مود اول



ب) شکل مود دوم



ج) شکل مود سوم

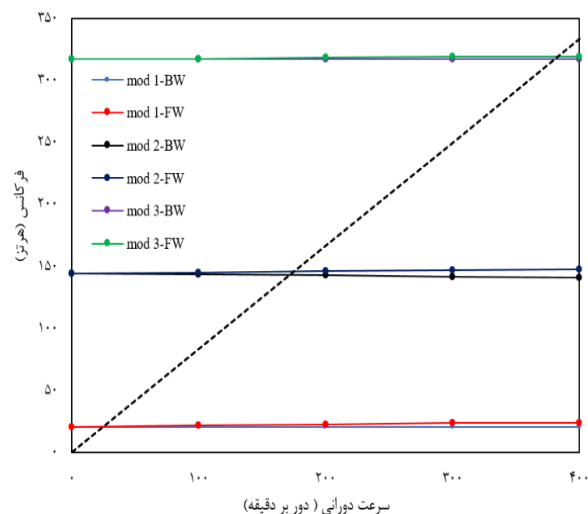


د) شکل مود چهارم

شکل ۲ مدهای سیستم در چهار فرکانس اول

جدول ۳ مقایسه اولین سرعت بحرانی سیستم بر حسب هرتز

سرعت بحرانی	آزمون تجربی	حل تقریبی	حل المان محدود	حل تحلیلی	
				درصد خطا	حل
۱۷	۲۰/۶	۲۰/۳۶	۲۰/۵۸	۱۵	%



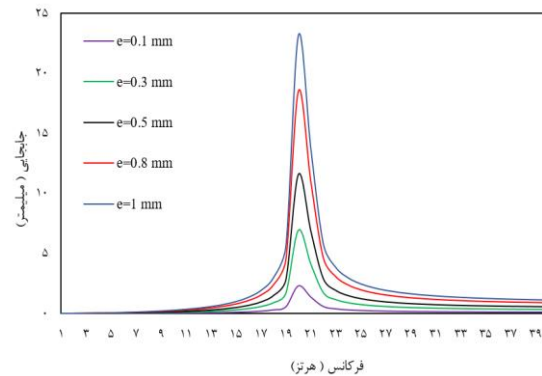
شکل ۳ نمودار کمپبل در بازه سرعت دورانی صفر تا ۴۰۰ دور بر دقیقه

مقایسه شد. حل تحلیلی سیستم مورد نظر به صورت جفکات هشت درجه آزادی مدل سازی شده و معادلات حاکم بر آن با استفاده از روش لاگرانژ استخراج گردید. نتایج بدست آمده از حل تحلیلی با نتایج حل المان محدود مقایسه شده و درصد خطا در مقادیر فرکانس های طبیعی اول تا سوم کمتر از ۱۵ درصد می باشد. به منظور پیش بینی سرعت های بحرانی، نمودار کمپیل در بازه صفر تا ۴۰۰ دور بر دقیقه رسم گردیده و سه نقطه احتمالی تشدید تشخیص داده شد. اولین سرعت بحرانی سیستم در هر دو روش حل تحلیلی و عددی در مقایسه با مقدار تجربی آن دارای خطای کمتر از ۱۵ درصد می باشد که با توجه به عوامل خارجی و خطاهای آزمایشگاهی موجود، معقول می باشد. در ادامه پاسخ فرکانسی سیستم تحت فواصل نابالانسی مختلف و جرم نابالانسی مشخص بدست آمد، که بیانگر آن است که با افزایش فاصله نابالانسی، دامنه جابجایی در اولین قله تشدید بدون تغییر در مقدار فرکانس مربوطه روند افزایشی دارد. همچنین فاصله بیشتر دیسک از مرکز شفت باعث افزایش دامنه جابجایی و فرکانس پیک تشدید می شود. یکی دیگر از نتایج بدست آمده تاثیر جرم نابالانسی بر پاسخ فرکانسی سیستم می باشد که با افزایش آن دامنه جابجایی تشدید نیز افزایش می یابد.

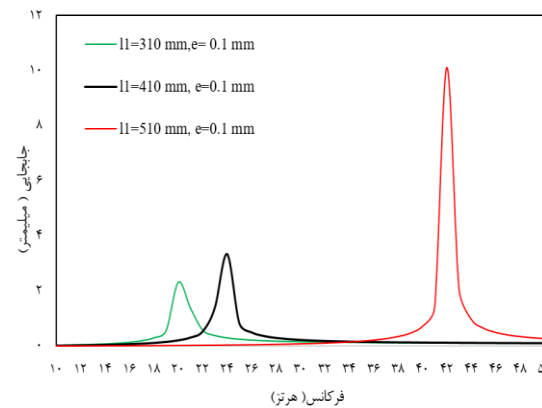
۶- مراجع

- [1] Y.J. Chiu and D.Z. Chen, "The coupled vibration in a rotating multi-disk rotor system," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, no. 1, pp. 1-10, 2011. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.10.001.
- [2] M. Khatibi, M. Ashory, A. Malekjafarian, and R. Brincker, "Mass-stiffness change method for scaling of operational mode shapes," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 26, pp. 34-59, 2012. doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.07.012.
- [3] Y. Lu, Y. Zhang, X. Shi, W. Wang, and L. Yu, "Nonlinear dynamic analysis of a rotor system with fixed-tilting-pad self-acting gas-lubricated bearings support," *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, pp. 877-890, 2012. doi.org/10.1007/s11071-011-0310-1.
- [4] D.D. Quinn, "Resonant dynamics in a rotordynamic system with nonlinear inertial coupling and shaft anisotropy," *Nonlinear Dynamics*, vol. 57, pp. 623-633, 2009. doi.org/10.1007/s11071-009-9502-3.
- [5] H. Yabuno, T. Kashimura, T. Inoue, and Y. Ishida, "Nonlinear normal modes and primary resonance of horizontally supported Jeffcott rotor," *Nonlinear Dynamics*, vol. 66, no. 3, pp. 377-387, 2011. doi.org/10.1007/s11071-011-0011-9.

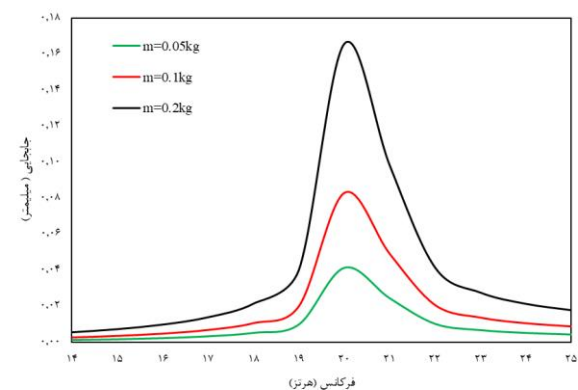
فرکانسی را نشان می دهد، با افزایش جرم نابالانسی در فاصله مشخص ۰/۳ میلیمتر میزان دامنه جابجایی تشدید افزایش می یابد.



شکل ۵ بررسی اثر فاصله نابالانسی در پاسخ فرکانسی سیستم



شکل ۶ بررسی اثر موقعیت قرارگیری دیسک بر پاسخ فرکانسی سیستم در فاصله نابالانسی ۰/۱ میلیمتر



شکل ۷ بررسی اثر جرم نابالانسی در پاسخ فرکانسی سیستم

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، حل تحلیلی، عددی و تجربی یک سیستم آزمایشگاهی روتور مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر

- industry, 1400. <https://civilica.com/doc/1238214>. [In Persian].
- [13] W. Cruz, N. Arzola, and O. Araque, "Modeling and experimental validation of the vibration in an unbalance multi-stage rotor," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 5703-5716, 2019. doi.org/10.15282/jmes.13.3.2019.30.0456.
- [14] J. Kim, J.-G. Hong, and J. Chung, "Nonlinear dynamic modeling and response analysis of a rotor-blade system with whirling motion," *Nonlinear Dynamics*, vol. 98, no. 2, pp. 953-970, 2019. doi.org/10.1007/s11071-019-05238-5.
- [15] A. I. Eisa, L. Shusen, and W. M. Helal, "Study on the lateral and torsional vibration of single rotor-system using an integrated multi-body dynamics and finite element analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 10, p. 1687814020968336, 2020. doi.org/10.1177/1687814020968336.
- [16] A. Alsaleh, H. M. Sedighi, and H. M. Ouakad, "Experimental and theoretical investigations of the lateral vibrations of an unbalanced Jeffcott rotor," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 14, pp. 1024-1032, 2020. doi.org/10.1007/s11709-020-0647-y.
- [17] Z. Jia, Y. Yang, Q. Zheng, and W. Deng, "Dynamic analysis of Jeffcott rotor under uncertainty based on Chebyshev convex method," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 167, p. 108603, 2022. doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108603.
- [18] Y. Wei, X. Ran, T. Sun, S. Liu, H. Zhang, and D. Zhao, "Dynamic characteristics analysis of a vertical Jeffcott rotor-brush seal system," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 45, no. 3, pp. 245-254, 2022. doi.org/10.1080/02533839.2022.2034049.
- [19] M. Rokn-Abadi, S. Amirzadegan, R. Firouzabadi, and M. A. Kouchakzadeh, "Nonlinear modeling of a misaligned rotor under non-stationary operating conditions," *Journal of Vibration and Control*, p.10775463231174269, 2023. doi.org/10.1177/10775463231174269.
- [20] M. L. Adams, *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. CRC Press, 2009.
- [6] F. Georgiades, "Nonlinear dynamics of a spinning shaft with non-constant rotating speed," *Nonlinear Dynamics*, vol. 93, no. 1, pp. 89-118, 2018. doi.org/10.1007/s11071-017-3888-0.
- [7] A. Mahmoudi, S. Hosseini, and M. Zamanian, "Nonstationary analysis of nonlinear rotating shafts passing through critical speed excited by a nonideal energy source," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 232, no. 4, pp. 572-584, 2018. doi.org/10.1177/0954406216684364.
- [8] N. Wang and D. Jiang, "Vibration response characteristics of a dual-rotor with unbalance-misalignment coupling faults: Theoretical analysis and experimental study," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 125, pp. 207-219, 2018. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.03.009.
- [9] H. Wang and J. Gong, "Dynamic analysis of coupling misalignment and unbalance coupled faults," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 38, no. 2, pp. 363-376, 2019. doi.org/10.1177/1461348418821582.
- [10] M. Roknabadi, p. Amirzadegan, F. Mehralian, R. A. Dehghani Firouzabadi, M. A. Kochzadeh, and M. R. Mousavi, "Investigation of high-order nonlinear rotor vibrations with an ideal source under non-steady working conditions," presented at the 29th annual international conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers and the 8th conference of the thermal power plant industry, 1400. <https://civilica.com/doc/1238500>. [In Persian].
- [11] H. Jamshidi, A. A. Jafari, and N. Mohammadi, "Nonlinear analysis of asymmetric rotor vibrations with misaligned coupling using Timoshenko beam model," 1400. <https://civilica.com/doc/1282198>. [In Persian].
- [12] P. Amirzadegan, M. Roknabadi, and R. A. Dehghani Firouzabadi, "Investigation of nonlinear vibrations of a flexible rotor when passing through the critical speeds of rigid and bending modes," presented at the 29th annual international conference of the Iranian Mechanical Engineers Association and the 8th conference of the thermal power plant

مروری بر پارامترهای مؤثر در ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی

چکیده: امروزه به علت نیاز روزافزون صنایع مختلف نظامی، هوافضا، خودروسازی و ... به مواد با نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوب در مقابل سایش و خستگی و ... استفاده از مواد کامپوزیتی، به خصوص کامپوزیت های پایه فلزی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. ماشین کاری جهت نیل به دقت ابعادی بالا جزء جدایی ناپذیر فرآیند تولید محصولات ساخته شده با کامپوزیت های پایه فلزی می باشد. به دلیل وجود ماده تقویت کننده همچون کاربید سیلیسیوم و ... ماشین کاری این دسته از مواد همواره با چالش های فراوانی از جمله سایش ابزار، افزایش نیروهای ماشین کاری، کاهش کیفیت سطح و ... روبه رو می گردد. لذا مطالعه پارامترهای مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی امری ضروری و اجتناب ناپذیر می باشد. مطالعات زیادی در این حوزه توسط پژوهشگران مختلف صورت پذیرفته است. در این مقاله تلاش شده است با بررسی مهم ترین مقالات منتشر شده در این حوزه، اطلاعات جامع و درعین حال خلاصه وار از عوامل تأثیرگذار در فرآیندهای سنتی ماشین کاری از قبیل تراش کاری، فرز کاری و ... یا فرآیندهای غیر سنتی ماشین کاری همچون تخلیه الکتریکی، ماشین کاری الکتروشیمیایی و ... در اختیار خوانندگان قرار گیرد. همچنین نحوه عملکرد انواع ابزار مختلف در هنگام ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی بررسی شد. در پایان به خلاء های موجود و موضوعات جدید و قابل مطالعه برای محققان اشاره شد.

واژه های راهنما: کامپوزیت های زمینه فلزی، ماشین کاری، زبری سطح، عمر ابزار، تراش کاری

امین سوسن آبادی
فراهانی

دانشجوی دکتری

مهدی مدبری فر*
دانشیار

معین طاهری
دانشیار

**محمد رضا شیخ
الاسلامی بورقانی**
استادیار،

گروه مهندسی ساخت و تولید،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

**Amin
Sousanabadi
Farahani**
PhD Student

**Mehdi
Modabbarifar***
Associate Professor

Moein Taheri
Associate Professor

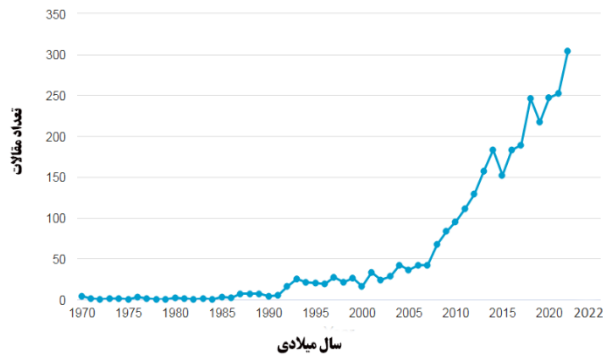
**Mohammad Reza
Sheykholeslami
Borghani**
Assistant Professor,
Department of
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

A review of effective parameters in the machining of metal matrix composites

Abstract: Nowadays, due to the increasing need of various military, aerospace, automotive, etc. industries for materials with high strength-to-weight ratio, good resistance to wear and fatigue, etc. the use of composite materials, especially metal-based composites, has increased significantly. Machining to achieve high dimensional accuracy is an integral part of the production process of products made with metal-based composites. Due to the presence of reinforcing materials such as silicon carbide, etc. the machining of this category of materials always faces many challenges, including tool wear, increased machining forces, decreased surface quality, etc. Therefore, it is to study the parameters affecting the machining of metal composites. Many studies have been done in this field by different researchers. In this article, by reviewing the most important articles published in this field, comprehensive and at the same time summary information on the influencing factors in conventional machining processes such as turning, milling, etc. or non-conventional machining processes such as electrical discharge, electrochemical machining, etc. has been tried to be available to the readers. Also, the performance of different types of tools during the machining of metal composites was investigated. In the end, the existing gaps and new and studyable topics for researchers were pointed out.

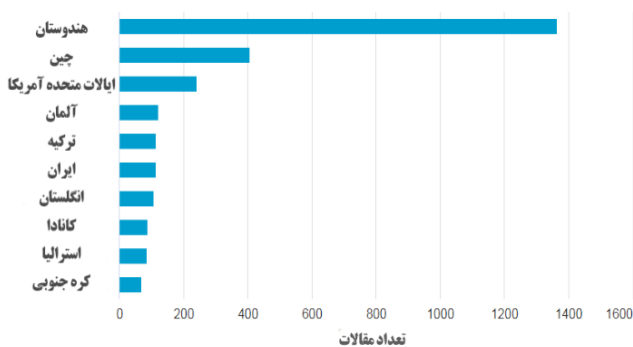
Keywords: Metal matrix composite, Machining, Surface roughness, Tool Life, Lathing

۱- مقدمه



شکل ۱ تعداد مقالات چاپ شده تا سال ۲۰۲۲ بر اساس گزارش پایگاه استنادی اسکوپوس

همان طور که از نمودار (۲) مشخص است، کشورهای صاحب صنعت نظیر چین، ایالات متحده آمریکا، آلمان و ... بر روی مطالعه ماشین کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی سرمایه‌گذاری خوبی انجام داده‌اند. این امر خود می‌تواند نشان‌دهنده اهمیت این موضوع باشد.



نمودار ۲ تعداد مقالات چاپ شده ۱۰ کشور اول فعال در حوزه ماشین کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی تا سال ۲۰۲۳ بر اساس گزارش پایگاه استنادی اسکوپوس

در این مقاله سعی بر این شده است مروری کلی بر پارامترهای مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی انجام شود. برای درک صحیح‌تر رفتار این مواد فرآیندهای ماشین کاری سنتی از قبیل تراش کاری، فرز کاری، سوراخ کاری و سنگ زنی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین از آنجاکه در بسیاری از موارد فرآیندهای سنتی پاسخگوی نیازهای ما نیستند روش‌های ماشین کاری غیر سنتی مانند تخلیه الکتریکی، ماشین کاری الکتروشیمیایی، ماشین کاری لیزری و آلتراسونیک نیز به صورت خلاصه بررسی شد.

مطالعات در زمینه توسعه علم مواد به سمت ارائه و معرفی مواد مهندسی سبک که دارای نسبت استحکام به وزن بالا، سختی قابل قبول در دماهای بالا، خزش مناسب و مقاومت سایشی و خستگی مطلوب باشند در حال حرکت است. فن‌آوری‌های پیشرفته خودروسازی و هوافضا به چنین خصوصیت‌هایی برای مواد نیاز دارند تا کارایی تولیدات خود را افزایش دهند. این ویژگی‌ها با آلیاژهای تیتانیوم، آلومینیوم و منیزیم قابل‌دستیابی نیست [۱]. در نتیجه طراحان گونه‌های جدیدی از کامپوزیت‌ها نظیر پلاستیک‌های تقویت‌شده با فیبر^۱، کامپوزیت‌ها با زمینه فلزی^۲ و کامپوزیت‌ها با زمینه سرامیکی^۳ را معرفی کرده‌اند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی به خاطر دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالایی که دارند قابل‌استفاده در دماها و نیروهای نسبتاً بالا می‌باشند. چگالی اغلب این کامپوزیت‌ها تقریباً یک‌سوم چگالی فولاد بوده که منجر به نسبت استحکام به وزن ویژه بالا و سختی قابل قبول برای این مواد شده است [۲]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی کاربردهای متنوعی در صنعت دارند از جمله کاربرد در صنایع هوافضا (برای دماغه مدارگرد شاتل فضایی و مقطع عمودی در دم‌جنگنده‌های پیشرفته)، بخش‌های مختلف صنعت خودروسازی (پیستون، بوش‌های سیلندر و لنت‌های ترمز)، تجهیزات ورزشی و دریایی. آلیاژهای آلومینیم تقویت‌شده با کاربید سیلیکون نسبتاً جدید بوده و موادی با قابلیت ساختاری مفید همراه با استحکام ویژه بالا و مقادیر استاندارد قابل قبول هستند [۳]. ماشین کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی به خاطر وجود دو یا بیشتر فاز مشخص که یکی از آن‌ها بسیار ساینده بوده و همچنین به خاطر اختلاف قابل ملاحظه بین دو ماده تشکیل‌دهنده یعنی ماده تقویت‌کننده سرامیکی سخت و زمینه فلزی شکننده کار بسیار مشکلی خواهد بود. به همین دلیل، تلاش‌هایی برای ساخت کامپوزیت زمینه فلزی نزدیک به شکل نهایی انجام شده است. به‌رحال چنین بخش‌هایی همواره باید برای تطبیق با نیازهای طراحی نهایی، ماشین کاری شوند. به دلیل افزایش کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنعت و نیاز به حصول درک صحیح از رفتار پارامترهای مؤثر بر ماشین کاری آن محققان فعال در حوزه ماشین کاری تمرکز نسبتاً زیادی بر روی این دست مواد داشته‌اند. نمودار (۱) رشد افزون تعداد مقالات در این زمینه را نشان می‌دهد.

³ Ceramic Matrix composite (CMC)

¹ Fiber Reinforced Polymer (FRP)

² Metal matrix composite (MMC)

مشاهده می‌شود [۶]. عمق برش و نرخ تغذیه تأثیر زیادی بر نیروهای برش و کیفیت سطح دارند. افزایش معینی در مقدار عمق برش و نرخ تغذیه، سایش ابزار را افزایش و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. کیفیت سطح نهایی نیز تحت تأثیر جنس ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

طهماسبی و همکاران گزارش کردند در عمق برش بالا (تقریباً ۱ میلی‌متر)، ابزار در معرض نیروهای برشی بالا با بارگذاری حرارتی و مکانیکی بالا قرار می‌گیرد که منجر به شکستگی یا سایش جانبی ابزار می‌شود. در تراشکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزایش نرخ پیشروی با توجه به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین‌کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می‌آید ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین‌کاری از پرداخت‌کاری به خشن‌تراشی حجم براده برداری افزایش یافته و راندمان تولید بیشتر خواهد شد [۸]. سرعت برش همراه با کسر حجمی و اندازه ذرات تقویت‌کننده از عوامل مؤثر بر سایش ابزار هستند. در بعضی از گزارش‌ها ابزارهای پوشش داده شده عمر ابزار بیشتری را در برابر ابزارهای بدون پوشش دارند. از طرف دیگر، کیفیت سطح ابزارهای بدون پوشش در مقایسه با ابزارهای پوشش داده شده به‌ویژه در سرعت برش پایین، بهتر است [۹]. مواد ابزار باید سخت‌تر از ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت باشند، زیرا در صورتی که سختی ذرات تقویت‌کننده از ابزار بیشتر باشد به‌جای برداشت ماده از قطعه کار، ذرات تقویت‌کننده بر روی ابزار خراش ایجاد کرده و باعث کاهش عمر ابزار می‌شوند.

از مطالعات، همچنین به نظر می‌رسد که کاربرد تنگستن^۱، ابزار الماس پلی کریستالی^۲، نیتريد بور مکعبی^۳ و ابزار کاربید پوشش داده شده با الماس در ماشین‌کاری مواد کامپوزیت خوب هستند و می‌توانند پرداخت سطحی و عمر ابزار مطلوب را محقق کنند [۱۰]. با توجه به اینکه، عمدتاً، از ابزار دارای پوشش استفاده می‌شود. سایش، مکانیزم اصلی برای تخصیص عمر ابزار در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب ابزار مناسب برای ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها بسیار دشوار است. در بسیاری از مقالات، گزارش شده است که ابزار برش PCD برای تراش‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی مناسب‌تر است. این به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی قوی PCD برای فرآیند ماشین‌کاری است. ابزارهای PCD به اندازه

به دلیل آنکه انتخاب ابزار و عوامل مؤثر بر آن در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی یک چالش بزرگ می‌باشد. بخش جداگانه‌ای برای ابزارهای مورد استفاده در هنگام ماشین‌کاری سنتی این مواد در مقاله گنجانده شد.

در پایان به حلاء‌های موجود در این حوزه اشاره شده و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده جهت استفاده هر چه بهتر محققان ارائه گردید.

۲- ماشین‌کاری سنتی کامپوزیت‌های پایه فلزی

به‌مانند سایر محصولات فلزی، برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های فلزی ترجیح بر آن است که از فرآیندهای سنتی نظیر تراش‌کاری، فرز‌کاری سوراخ‌زنی و ... نسبت به سایر فرآیندهای غیر سنتی استفاده شود. به دلیل وجود ذرات سخت تقویت‌کننده در ماده زمینه کامپوزیت‌ها، شناخت دقیق عوامل مؤثر بر پارامترهای ورودی و خروجی در ماشین‌کاری سنتی این مواد کاری مشکل و دشوار است. به‌منظور دستیابی به راه‌حلی جامع برای در این خصوص مطالعات بسیاری توسط محققان صورت پذیرفته است [۴].

۱-۲- تراش‌کاری

تراش‌کاری متداول‌ترین فرآیند ماشین‌کاری برای تولید محصولات صنعتی است. این فرآیند برای دستیابی به اندازه و شکل نهایی در مرحله پرداخت‌کاری یا آماده‌سازی برای سایر فرآیندهای تولید محصولات مدور استفاده می‌شود. مطالعات زیادی توسط محققان در مورد ابعاد مختلف پارامترهای مؤثر بر تراش‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی انجام شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که بیشتر عواملی که بر تراش‌کاری این مواد تأثیر می‌گذارند، عمدتاً به نوع ماده کامپوزیتی وابسته است. نیروی برشی به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم سایش ابزار در فرآیند ماشین‌کاری شناخته می‌شود. بسیاری از محققین به‌طور تجربی تأثیر نیروی برشی بر سایش ابزار را بررسی کرده‌اند [۵].

دیویم و همکاران رابطه بین سایش ابزار و نیروی برش ابزار PCD را در حین تراش‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بررسی کردند. با افزایش نیروهای ماشین‌کاری به علت به وجود آمدن ارتعاش در نوک ابزار سایش به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سایش ابزار در سرعت برش بالاتر

³ Cubic Boron Nitride (CBN)

¹ Tungsten carbide (WC)

² Polycrystalline Diamond (PCD)

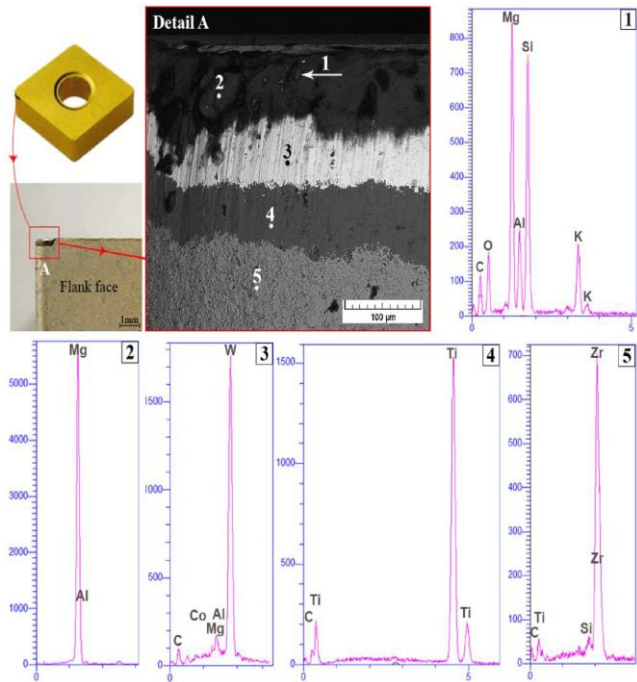
اوزبن و همکاران [۱۴] تأثیر پارامترهای فرآیند را در خصوص نسبت تقویت کننده کامپوزیت زمینه فلزی بر خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که افزایش نسبت ذرات تقویت کننده خواص بسیار خوبی مانند استحکام کششی، چقرمگی و سختی ایجاد می‌کند، اما از طرف دیگر در فرآیند ماشین کاری، سایش ابزار و زبری سطح بیشتری اتفاق خواهد افتاد.

علیپور و همکاران [۱۵] گزارش کردند که در فرزکاری، نرخ تغذیه اصلی ترین پارامتر برای ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی در نظر گرفته می شود. نرخ تغذیه بالاتر تشکیل لبه انباشته شده^۱ را ایجاد می کند. هانگ سون و همکاران [۱۶] مشاهده کردند که نیروی برش با نرخ تغذیه و عمق برش افزایش و با افزایش سرعت برش کاهش می یابد. کیفیت سطح با افزایش عمق برش و نرخ تغذیه دچار کاهش خواهد شد. باین حال، کیفیت سطح مناسب با افزایش سرعت برش به دست می آید.

طهماسبی و همکاران [۱۷] فرآیند ماشین کاری مواد Al/SiCp را در عملیات فرز انگشتی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها دریافتند سرعت برش و سرعت تغذیه بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح دارند، درحالی که عمق برش تأثیر ناچیزی بر زبری سطح دارد. همچنین توسط چندین محقق گزارش شده است که نرخ تغذیه به طور جدی بر سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت های زمینه فلزی تأثیر می گذارد [۱۸-۲۰].

مطابق با مطالعات صورت پذیرفته توسط طهماسبی و همکاران با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده، میزان سایش ابزار به صورت نسبتاً خطی افزایش می یابد. با توجه به خاصیت سایشی شدید ذرات SiC، با افزایش ذرات تقویت کننده در ماده زمینه سایش بسیار شدیدی بین ذرات تقویت کننده و سطح جانبی ابزار رخ خواهد داد که سبب کاهش عمر ابزار خواهد گردید. همچنین آن ها گزارش کردند با افزایش سرعت دوران اسپیندل، سایش ابزار افزایش می یابد. با افزایش سرعت برشی اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین دمای ناحیه برش بیشتر شده که امکان افزایش سایش ابزار را بیشتر می کند. علاوه بر این با افزایش سرعت برشی تمایل تشکیل لبه انباشته بر روی لبه ی برشی ابزار کاهش می یابد. اگرچه لبه ی انباشته باعث افت کیفیت سطح نهایی قطعه کار شده ولی در بحث عمر ابزار کمک قابل توجهی به افزایش عمر ابزار می کند. با افزایش سرعت برشی مواد قطعه کار چسبیده شده بر روی لبه ی ابزار به طور مداوم از لبه ابزار جدا شده و مجدداً می چسبند که این امر باعث سایش

کافی سخت هستند و از نظر شیمیایی با مواد زمینه واکنش نمی دهند [۱۱]. به علت بالا بودن عمر ابزار PCD در هنگام ماشین کاری کامپوزیت ها می توان از سرعت های برش بالاتر استفاده نمود. این امر منجر به حصول کیفیت سطح ماشین کاری شده بهتر می شود [۱۲].



شکل ۳ آنالیز EDS سطح ساییده شده در هنگام ماشین کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی [۱۳]

شکل (۳) آنالیز EDS سطح ساییده شده در هنگام ماشین کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی با استفاده از ابزار کاربردی پوشش دار را نشان می دهد. مطابق با این تصویر در هنگام ماشین کاری کامپوزیت زمینه منیزیمی به دلیل ماهیت نرم زمینه منیزیم، بخش زیادی از ماده زمینه بر روی لبه برنده ابزار می نشیند. همچنین به وضوح مشخص است به علت وجود سایش شدید در هنگام ماشین کاری کامپوزیت ها لایه های موجود بر روی سطح جانبی اینسرت مورد استفاده از بین رفته است [۱۳].

۲-۲- فرزکاری

فرزکاری یکی از روش های ماشین کاری قطعات است که به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد. تاکنون مطالعات بسیار زیادی در حوزه فرزکاری مواد کامپوزیت زمینه فلزی انجام شده است.

¹ Built-up edge (BUE)

۲-۴- سنگ‌زنی

فرآیند ماشین‌کاری سنگ‌زنی برای به دست آوردن کیفیت سطح خوب و افزایش دقت ابعادی قطعه کار موردنیاز است [۳۲]. سنگ‌زنی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل پرداخت سطح خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً چرخ‌های سنگ‌زنی الماس توصیه می‌شود. در بیشتر موارد، ماشین‌کاری سنگ‌زنی برای عملیات تکمیلی در عمق برش‌های کم در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.

تیاگاراگان و همکاران [۳۳] کیفیت سطح و سطوح بدون آسیب را در سنگ‌زنی استوانه‌ای Al/SiC مورد مطالعه قرار دادند تا تأثیر پارامترهای مختلف سنگ‌زنی مانند عمق برش، سرعت تغذیه، سرعت قطعه کار و درصد کسر حجمی SiC را بیابد. زبری سطح، نیروی سنگ‌زنی و دما نشان می‌دهد که سطح بهتر و بدون آسیب در نیروی سنگ‌زنی کم و سرعت چرخ بالاتر تولید می‌شود. باین‌حال، عمق بالای برش و سرعت تغذیه در هنگام سنگ‌زنی استوانه‌ای به سطح آسیب می‌رساند و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. همچنین ذکر شده است که در سرعت‌های بالای سنگ، عمق برش و سرعت پایین تغذیه، هیچ نقص و ترکی بر روی سطوح مشاهده نمی‌شود [۳۴].

۳- ماشین‌کاری غیر سنتی کامپوزیت‌های زمینه فلزی

فرآیندهای تولید سنتی به دلیل وجود سایش ابزار بسیار زیاد که تحت تأثیر حضور ذرات تقویت‌کننده سخت است، همیشه برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد نمی‌شود. استفاده از فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی با افزایش کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف نظامی و صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در اغلب این فرآیندها با توجه به عدم وابستگی به سختی جنس قطعه کار، نداشتن تماس مستقیم ابزار و قطعه کار، عملکرد مناسبی در ماشین‌کاری این مواد مشاهده شده است.

پیشنهاد می‌شود که روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی احتمالاً بهترین انتخاب برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها باشند. روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی، از جمله ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی^۱، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی^۲، ماشین‌کاری پرتو لیزر^۳

ابزار و یا حتی لب پر شدن بخشی از ابزار شود [۲۱]. در فرزکاری این مواد، ابزار PCD عمر بیشتری را ارائه می‌دهد. ابزارهای برشی کاربردی با پوشش و بدون پوشش و همچنین CVD خیلی مؤثر نیستند. آن‌ها عمر ابزار کمتری نسبت به PCD دارند [۲۲].

۲-۳- سوراخ‌کاری

سوراخ‌کاری یک عملیات ماشین‌کاری است که از مته برای ایجاد سوراخ مقطع دایره‌ای شکل در ماده استفاده می‌کند. مته با اعمال نیرو به همراه سرعت دورانی مناسب وارد قطعه می‌شود. تحقیقات زیادی برای بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند و ابزارهای برشی مورد استفاده برای عملیات سوراخ‌کاری انجام شده است [۲۳].

هوانگ و همکاران [۲۴] گزارش دادند که عملکرد سوراخ‌کاری عمدتاً تحت تأثیر تغییر نرخ تغذیه در حین ماشین‌کاری Al/SiCp با ۵۶٪ SiCp است. به طور مشابه، راجمهان و همکاران [۲۵] تأثیر ناچیزی از سرعت سوراخ‌کاری بر روی قطعه کار مشاهده کردند، اما از سوی دیگر، نویسندگان نرخ تغذیه را به عنوان یک پارامتر ماشین‌کاری مؤثر در حین سوراخ‌کاری هیبریدی Al356/SiC یافتند. در بیشتر موارد نرخ تغذیه عمر ابزار را کاهش می‌دهد [۲۶]. ترکیبات آلیاژهای به کار رفته در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و کسر حجمی و سختی ذرات تقویت‌کننده مهم‌ترین عواملی هستند که بر عمر ابزار در طول فرآیند سوراخ‌کاری تأثیر می‌گذارند. جدا از مکانیزم‌های سایش ابزار، این عوامل بر نوع براده تشکیل شده در فرآیند نیز تأثیر می‌گذارند [۲۷]. عوامل متعددی وجود دارد که می‌تواند به طور قابل توجهی بر کیفیت نهایی سطح مؤثر باشند، مانند جنس ابزار برش، جنس ماده زمینه، سرعت برشی و نرخ تغذیه [۲۸].

طهماسبی و همکاران گزارش کردند با افزایش سرعت دوران مته نیروهای سوراخ‌کاری افزایش و زبری سطح کاهش می‌یابد. و افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش نیروها و زبری سطح خواهد شد. همچنین با افزایش درصد کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده SiC نیروهای سوراخ‌کاری و زبری سطح به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد [۲۹]. دیویم نشان داد که مکانیزم سایش غالب در سطح جانبی مته است. نیروی ویژه برشی و زبری سطح سوراخ با رگرسیون خطی چندگانه به دست آمد [۳۰]. مکانیزم سایش غالب در ابزارهای CBN و کاربردی به ترتیب سایش ساییدگی و چسبندگی در ماشین‌کاری Ti-MMC مشاهده شد [۳۱].

³ Laser Beam Machining (LBM)

¹ Electrical discharge machining (EDM)

² Electrochemical machining (ECM)

دادند. نتایج نشان می‌دهد که مس به‌عنوان ماده الکتروود بهتر عمل می‌کند و جریان مهم‌ترین عامل است.

بر اساس مطالعات صفرآبادی و همکاران [۴۱] شدت جریان تنظیمی بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و زبری سطح دارد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یا وایرکات برای اولین بار در حدود سال ۱۹۶۰ وارد فاز صنعتی شد [۴۲]. فرآیند وایرکات اساساً یک فرآیند ترموالکتریک است. مواد قطعه کار توسط تعدادی جرقه از طریق یک الکتروود سیم (ابزار برش) جدا شده و توسط دی‌الکتریک از محدودده ماشین‌کاری جدا می‌شوند. سیال دی‌الکتریک به طور مداوم در منطقه ماشین‌کاری استفاده می‌شود تا یک شکاف نازک بین قطعه کار و ابزار برش ایجاد کند. به‌منظور دستیابی به دقت مطلوب و شکل‌های سه بعدی قطعه کار، حرکت سیم با قطر بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر توسط سیستم کنترل عددی کنترل می‌شود [۴۳].

ماریگودار و همکاران [۴۴] تأثیر پارامترهای مختلف مانند نرخ تغذیه سیم، نرخ براده برداری^۳، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس را در طول ماشین‌کاری Al6061/SiCp با وایرکات را مطالعه کردند. مطابق با مطالعات انجام شده ولتاژ به‌عنوان یک عامل مهم برای نرخ براده برداری مشاهده می‌شود درحالی‌که نرخ تغذیه سیم و زمان خاموش شدن پالس عوامل کم‌اهمیت‌تری هستند. حداکثر مقادیر سرعت حذف مواد در ولتاژ پایین به دست آمد.

پرامانیک [۴۵] ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با وایرکات را با متغیرهای ماشین‌کاری مختلف مانند زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ براده برداری با مدت‌زمان روشنی پالس و جریان افزایش می‌یابد، درحالی‌که زمان خاموشی پالس کمتر مؤثر بود. ذرات تقویت‌کننده تأثیر منفی بر نرخ براده برداری دارد. کامپوزیت با SiCp ۱۵٪ مانعی برای حرکت مستقیم سیم ایجاد می‌کند.

صفرآبادی و همکاران گزارش کردند عوامل اثرگذار بر روی نرخ سایش ابزار به ترتیب جریان پیک تخلیه، زمان روشنی پالس، اثر تعاملی زمان روشنی پالس و جریان پیک تخلیه و اثر تعاملی جریان تخلیه و زمان خاموشی پالس هستند. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد. با افزایش زمان خاموشی پالس، نرخ سایش الکتروود ابزار نیز بیشتر می‌شود. رابطه این دو عامل باهم به‌صورت خطی و مستقیم است [۴۶].

و ماشین‌کاری اولتراسونیک^۱، در حال حاضر برای این مواد استفاده شده‌اند [۳۵].

۳-۱- ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

در میان فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی، تخلیه الکتریکی و وایرکات^۲ مناسب‌ترین روش برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد شده است [۳۶]. تخلیه الکتریکی یک روش ماشین‌کاری غیر سنتی است که به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در EDM، الکتروود و قطعه کار از تماس مستقیم اجتناب می‌کنند، مکانیزم حذف مواد به انرژی الکتریکی بستگی دارد. EDM از طریق یک سری تخلیه الکتریکی مجزا که بین الکتروود و قطعه کار غوطه‌ور در یک سیال دی‌الکتریک براده برداری از سطح قطعه کار را انجام می‌دهد. مزیت EDM توانایی بالای آن در تولید قطعات پیچیده با شکل، اندازه و ابعاد دقیق موردنیاز مانند قالب‌های تزریق، ابزارهای برش و اقلام مختلف با اشکال پیچیده است. مکانیزم EDM ذوب و تبخیر مواد توسط کانال پلاسما است که باعث جدا شدن ذرات تقویت‌کننده می‌شود. EDM در کاربردهای صنعتی مختلف مانند صنایع الکترونیک، خودرو، ماشین‌آلات، مخابرات لوازم‌خانگی، بسته‌بندی، ساعت‌سازی، ابزار جراحی و هوانوردی استفاده می‌شود. استفاده از تخلیه الکتریکی برای اولین بار در سال ۱۹۴۳ استفاده شد. تخلیه الکتریکی برای مواد سخت مانند تنگستن یا کاربید تنگستن بسیار مفید بود [۳۷]. اثرات فرسایشی در EDM از طریق اصل تخلیه جرقه الکتریکی روی الکتروودها کنترل می‌شود؛ بنابراین، این فرآیند سایشی حرارتی است. جرقه بین قطعه کار و الکتروود در یک مایع دی‌الکتریک، به‌طور کلی روغن یا آب تولید می‌شود. جرقه دمایی را تولید می‌کند که از ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۸] یا تا ۲۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است [۳۹]. همچنین این جرقه به‌نوعی به‌عنوان یک ابزار برش کار می‌کند. هیچ‌گونه تماس مکانیکی بین قطعه کار و ابزار در طول فرآیند وجود ندارد. گپ ماشین‌کاری در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۵۰ میلی‌متر است. ما بین ابزار و قطعه کار یک سیال دی‌الکتریک غوطه‌ور می‌شود.

نارایانان و همکاران [۴۰] عملکرد مواد مختلف الکتروود مانند تنگستن، مس و برنج و زمان ماشین‌کاری بهینه را در حین ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مواد Al/SiCp مورد مطالعه قرار

³ Material removal rate (MRR)

¹ Ultrasonic machining (USM)

² WIRE Electrical discharge machining (WEDM)

۲-۲- ماشین کاری الکتروشیمیایی

ماشین کاری الکتروشیمیایی اغلب برای مواد با قابلیت ماشین کاری پایین مانند کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل عمر ابزار طولانی و نرخ براده برداری بالا به طور گسترده استفاده شده است. ECM بر اساس اصل انحلال الکتروشیمیایی عمل می‌کند. انحلال الکتروشیمیایی مستقل از چقرمگی و سختی مواد است و کیفیت سطح خوبی ایجاد می‌کند [۴۷].

سنتیل کومارا و همکاران [۴۸] ECM of 15% Al/SiCp را مطالعه کردند و مدل ریاضی نرخ براده برداری و کیفیت سطح را توسعه دادند. ترکیب بهینه این پارامترها از طریق داده‌های تجربی به دست می‌آید و با موفقیت به حداکثر رساندن نرخ براده برداری و حداقل زبری سطح دست می‌یابد.

کومار و همکاران [۴۹] تلاش کردند تا Al356/SiCp را با استفاده از ECM ماشین کاری کند. آرایه متعامد L27 تاگوچی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری مانند غلظت الکترولیت، نرخ تغذیه، ولتاژ اعمال شده و درصد تقویت‌کننده مانند ۵، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد وزنی بر به حداکثر رساندن سرعت براده برداری انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که درصد SiC به همراه پارامترهای فرآیند مانند نرخ تغذیه، غلظت الکترولیت و ولتاژ اعمالی تأثیر بیشتری بر نرخ براده برداری دارد. ایپان و همکاران [۵۰] اثر متغیرهای فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی را در معیارهای عملکرد ارائه کردند. نتایج نهایی نشان داد که متغیرهای فرآیند شامل نرخ تغذیه، ولتاژ و جریان به طور قابل توجهی بر هزینه‌های عملیاتی تأثیر می‌گذارند در حالی که تحت تأثیر همه پارامترها است.

۳-۳- ماشین کاری لیزری

ماشین کاری پرتو لیزر به طور گسترده به عنوان یک فرآیند پیشرفته برای شکل‌دهی کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شود. ماشین کاری به کمک لیزر یک فرآیند ماشین کاری مبتنی بر انرژی حرارتی برای برش مواد بدون تماس با قطعه کار است. این روش روی اصل ذوب و تبخیر مواد قطعه کار عمل می‌کند تا شکل موردنیاز قطعه را ایجاد کند. موادی با ظرفیت رسانایی حرارتی کم بدون در نظر گرفتن سختی یا شکنندگی برای ماشین کاری لیزری مطلوب هستند. این روش می‌تواند عرض برش بسیار باریک تا ۰/۲۵ میلی‌متر و همچنین هندسه پیچیده ایجاد کند [۵۱]. هونگ و همکاران [۵۲] ماشین کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی را با استفاده از لیزر CO₂ و موج

پیوسته ۳ کیلوواتی مورد مطالعه قرار دادند. اثرات پارامترهای لیزر مانند گاز محافظ، توان لیزر و سرعت برش بر روی کیفیت برش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که MMC Al6061 به طور مؤثر با استفاده از لیزر بریده شدند.

منجوت و همکاران [۵۳] به طور تجربی عملکرد ماشین کاری به کمک لیزر کامپوزیت Al7075-TiB2 را مورد مطالعه قرار دادند. زبری سطح، نرخ براده برداری و دقت ابعادی در ماشین کاری پرتو لیزر مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برخی از پارامترهای ورودی مانند قطر نازل و توان ثابت در نظر گرفته شد. مشاهده شد که سرعت برای کیفیت سطح بیشترین اهمیت را دارد. باین‌حال، فشار گاز و فاصله نازل تا سطح قطعه کار حداقل تأثیر را بر کیفیت سطح دارد.

مولر و همکاران [۵۴] گزارش کردند استفاده از پرتو لیزر به دلیل وجود کیفیت سطح پایین و همچنین تأثیرات حرارتی بسیار زیاد در ماده زمینه کامپوزیت‌های فلزی پیشنهاد نمی‌گردد.

۴-۳- ماشین کاری آلتراسونیک

ماشین کاری به کمک امواج آلتراسونیک به‌طور کلی بر اساس قرار گرفتن ذرات ساینده سخت در بین سطح ابزار و قطعه کار و اعمال نوسان بر ابزار عمل می‌کند. در این فرایند با برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه کار بخشی از ماده قطعه کار جدا شده و توسط دوغاب ساینده از محیط ماشین کاری خارج می‌شود. در فرآیند آلتراسونیک، گرمای کمی در طول فرآیند ماشین کاری تولید می‌شود همچنین هزینه ماشین کاری و خطرات ایمنی نسبت به سایر روش‌های غیر سنتی کمتر است. در ماشین کاری به کمک امواج آلتراسونیک، ابزار برش به‌صورت طولی در فرکانس ۲۰ تا ۳۰ کیلوهرتز با دامنه بین ۰/۱ و ۰/۰۶ میلی‌متر نوسان می‌کند [۵۵].

ژونگ و همکاران [۵۶] به طور تجربی نرخ براده برداری را با تجزیه و تحلیل‌های آماری و مدل رگرسیون بررسی کردند. بر اساس این مطالعه سه عامل اصلی (فشار تغذیه، نرخ تغذیه و دانه‌بندی ساینده) بر نرخ براده برداری مؤثر هستند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل رگرسیون به درستی اثر پارامترهای فرآیند را بر پاسخ نشان می‌دهد. دانه‌بندی ساینده تأثیر بیشتری بر نرخ براده برداری دارد و به دنبال آن فشار تغذیه و سرعت تغذیه می‌باشد.

سیواکنان و همکاران [۵۷] نرخ براده برداری برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی با کسرهای مختلف وزن SiCp بررسی کردند. از نتایج تجربی این نتیجه حاصل می‌شود که نرخ

جهت بهبود بازدهی عمر ابزار نیست [۶۵]. همچنین گزارش شده است که استفاده از ابزار کاربید روکش دار بازده صافی سطح پایانی را در مقایسه با ابزار کاربید بدون پوشش بهبود داده است [۶۶]. مطالعات متعددی نشان می‌دهند مکانیزم اصلی سایش ابزار در ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی از نوع خراشیدگی^۱ است. به این ترتیب، هرگونه بهبود در طول عمر ابزار به عنوان یک تابع از افزایش سختی نوک یا روکش ابزار نمایش داده می‌شود [۶۷].

۴-۲- الماس چند کریستال (PCD)

ابزارهای PCD برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی سال‌هاست که موفقیت زیادی داشته‌اند [۶۸]. این موفقیت به سبب این واقعیت است که سختی ابزار PCD نسبت به اکثر ذرات تقویت‌کننده و الیافی که فاز تقویت‌کننده را تشکیل می‌دهند بیشتر است. در استفاده از ابزار PCD یک اجماع عمومی در میان محققان وجود دارد که این ابزار منجر به افزایش قابل توجهی در عمر ابزار به نسبت ابزار کاربیدی می‌شود. بنابراین PCD را جنس ابزار ایدئال برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی معرفی کرده‌اند [۶۹].

یک تحقیق توسط چمبرس و استفنس [۷۰] نشان می‌دهد که ابزار PCD نسبت به دیگر ابزار در هنگام تراش کاری کامپوزیت‌های 5% shafil, 12% SiC Al برتر هستند.

چن و میاک [۷۱] گزارش کرده‌اند که عمر بهینه ابزار در آزمایش یک آلیاژ Al-MG5 به همراه تقویت‌کننده با shafil تراش کمتر از انتظار است. در این پژوهش عمر ابزار فقط دو برابر شده در حالی که هنگام ماشین کاری مواد سنتی عمر ابزار افزایش قابل توجهی دارد. چمبرس و استفنس مشاهده کرده‌اند که مکانیزم سایش اصلی در زمان ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی با ابزار PCD به وسیله پدیده خراشیدگی است. بسیاری از مطالعات دیگر نشان می‌دهد که سایش مشاهده در درجه اول خراشیدگی است [۷۲].

یک پژوهش در مقیاس میکرو از براده در یک ابزار PCD نشان داد که افزایش نرخ تغذیه و عمق برش در به حداکثر رساندن نرخ براده برداری^۲ ناموفق خواهند بود. این نتیجه‌گیری متضاد دریافت‌های تجربی حاصل از ابزار کاربیدی است زیرا در این ابزار، افزایش این پارامترها باعث به حداکثر رساندن نرخ براده برداری در طول عمر ابزار می‌گردد. با افزایش سرعت برش، نرخ سایش، شبیه ابزار کاربیدی افزایش می‌یابد [۷۳].

براده برداری بالاتر با افزایش مقدار مواد ساینده سخت‌تر از قطعه کار و با غلظت دوغاب بالاتر به دست می‌آید.

ژونگ و همکاران [۵۸] قابلیت ماشین کاری Al/SiCp را با استفاده از تراش کاری با کمک ارتعاشات اولتراسونیک بررسی کردند. اثر پارامترهای مختلف ماشین کاری بر پارامترهای خروجی مانند زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان می‌دهد که زبری سطح تولیدشده با ارتعاش اولتراسونیک در مقایسه با سطح بدون کمک اولتراسونیک کاهش یافته است.

۴- ابزارهای مورد استفاده در ماشین کاری کامپوزیت‌های فلزی

۴-۱- ابزارهای کاربیدی

امکان استفاده از ابزار کاربیدی برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی یک نقطه بحث میان جامعه علمی است. بسیاری از محققان پیشنهاد کرده‌اند که ابزار کاربیدی برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی مناسب نیست [۱۳].

تعدادی از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ابزارهای کاربیدی تحت شرایط خاصی برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی مفیدند. آن‌ها دریافته‌اند ابزارهای کاربیدی در ماشین کاری کوتاه‌مدت برای کیفیت سطح قابل قبول مناسب هستند [۳۱]. همچنین پیشنهاد می‌شود ابزار کاربیدی برای سرعت‌های برش پایین (۳۰-۲۰ m/min) استفاده گردد [۵۹]. در استفاده از ابزار کاربیدی در سرعت برش ۲۵۰ m/min مشاهده شده است که عمر آن‌ها برای تراشکاری کامپوزیت Al/SiC ۴۰ دقیقه می‌باشد [۶۰].

تحقیقات انجام شده توسط هانگ و همکارانش در مورد انواع مختلف ابزارها نشان می‌دهد که ابزارهای کاربیدی مقرون به صرفه ترین ابزار، برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی هستند [۶۱]. تحقیق در مورد استفاده از پوشش در نوک ابزار کاربیدی در ماشین کاری کامپوزیت‌های نشان می‌دهد که پوشش اثر کمی بر عمر ابزار دارد زیرا به سرعت پوشش از طریق سایش حذف می‌شود [۶۲، ۶۳].

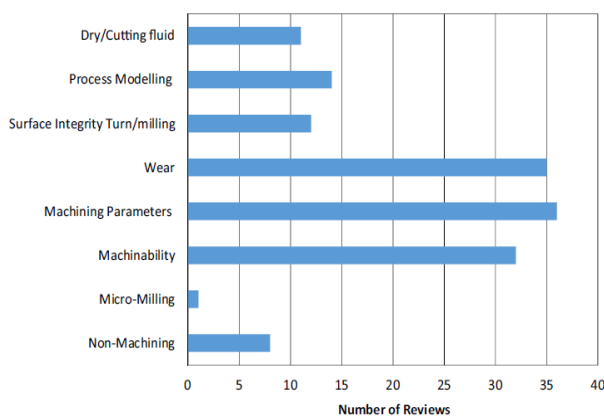
سان و همکاران گزارش کرده‌اند که عمر قابل قبول ابزار وابسته به سایش پوشش کاربیدی ابزار است [۶۴]. چند پژوهش، نتیجه‌گیری کرده‌اند که روکش ابزار کاربیدی عامل مهمی در

² Material removal rate (MRR)

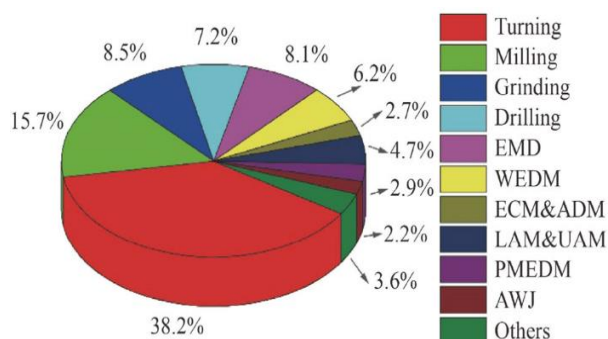
¹ Abrasion

۵- پیشنهادها برای مطالعات آتی

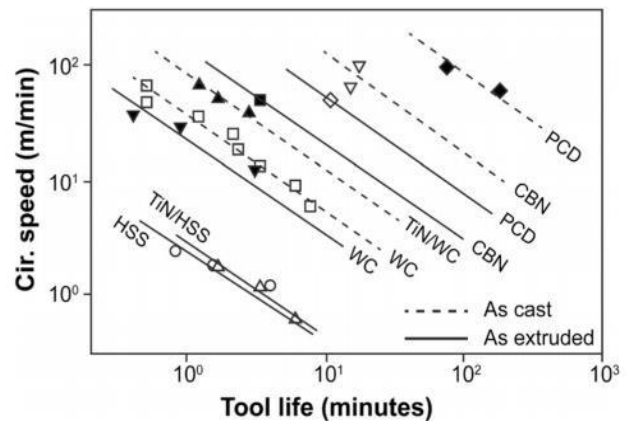
با آنکه مطالعات نسبتاً مناسبی در خصوص ماشین‌کاری سنتی کامپوزیت‌های زمینه فلزی صورت پذیرفته است اما پیشنهاد می‌گردد مطالعات تکمیلی در حوزه استفاده از ابزارهای جدیدتر نظیر CBN و... انجام گردد. همچنین استفاده از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی به علت بالا بودن سایش ابزار در روش‌های سنتی بسیار توصیه می‌گردد. لذا لازم است پژوهش‌های جامع‌تری در خصوص ماشین‌کاری غیر سنتی این مواد صورت پذیرد. همچنین تمرکز مطالعات انجام شده تاکنون بر روی کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی بوده است. نیاز است تحقیقات بیشتری پیرامون سایر آلیاژها همچون تیتانیوم، منیزیم و... انجام شود. از ماشین‌کاری سبز این مواد در مطالعات گزارش شده غفلت شده است. این موضوع نیز می‌تواند یکی از موضوعات مورد توجه برای محققین در مطالعات پیش رو باشد.



شکل ۵ تعداد مطالعات انجام شده در حوزه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بر اساس موضوع [۷۹].



شکل ۶ توزیع متفاوت مطالعات انجام شده بر اساس نوع فرآیند ماشین‌کاری برحسب درصد [۸۰].



شکل ۴ عمر ابزار با جنس‌های مختلف [۷۴].

۴-۳- ابزار نیتريد بور مکعبی CBN^۱

ابزار CBN، سختی بسیار بیشتری از ابزار کاربیدی معمولی دارند؛ اما از ابزار PCD سخت‌تر نیستند [۷۵]. در مقایسه ابزارهای CBN و PCD معلوم شد که مانند ابزارهای بدون پوشش کاربیدی برای انجام کارهای خاص مناسب است. در این پژوهش مقایسه CBN و PCD در ماشین تراش با سرعت برش 400 m/min ، عمق برش 0.3 mm و پیشروی 0.1 mm/rev نشان می‌دهد که ابزار PCBN به طور قابل توجهی از تشکیل لبه انباشته رنج می‌برد که این امر باعث کوتاه‌تر شدن عمر ابزار می‌شود این یافته‌ها در تضاد کارهایی است که توسط هانگ و لونی انجام شده است [۷۶]. هانگ جنس ابزار مختلفی را تست کرد و دریافت که استفاده از ابزار CBN عمر مفید ابزار را تقریباً با ضریب ۵ برابر نسبت به ابزارهای کاربیدی بهبود می‌دهد. همین مطالعه‌ی دیگری نشان داد که ابزارهای PCD عمر ابزار را با ضریب نزدیک به ۴ برابر بیشتر از CBN بهبود می‌بخشد. لب پر شدن ابزار در ماشین‌کاری CBN ها یک مسئله مهم محسوب می‌شود [۷۷]. مشاهده‌ای که توسط سیفتسی و همکارانش صورت گرفت [۷۸]. به شناسایی شکست ابزار به‌عنوان مورد اصلی سایش در ابزار CBN زمانی که ۱۶٪ Al/SiC با اندازه ذرات تقویت $40 \text{ m}\mu$ ماشین‌کاری می‌شود می‌پردازد. در طول مطالعه مشابه در کامپوزیت زمینه فلزی با اندازه ذرات تقویت‌کننده $30 \text{ m}\mu$ و $40 \text{ m}\mu$ ، خراشیدگی^۲ به‌عنوان عامل اصلی سایش سطح جانبی شناسایی شد.

پژوهش انجام شده در مورد CBN ها نسبتاً محدود است و هنوز هم برای درک صحیح رفتار پارامترهای ماشین‌کاری با استفاده از این ابزار مطالعات بیشتری مورد نیاز است.

^۲ Abrasion

^۱ Chemical vapour deposition

۷ - مراجع

- [1] J. P. Davim, *Machining composites materials*. John Wiley & Sons, 2013.
- [2] A. Mortensen and J. Llorca, "Metal matrix composites," *Annual review of materials research*, vol. 40, pp. 243-270, 2010, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104511>.
- [3] P. S. Bains, S. S. Sidhu, and H. Payal, "Fabrication and machining of metal matrix composites: a review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 5, pp. 553-573, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025976>.
- [4] R. A. Laghari, J. Li, A. A. Laghari, and S.-q. Wang, "A review on application of soft computing techniques in machining of particle reinforcement metal matrix composites," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, pp. 1363-1377, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09340-0>.
- [5] N. Brili, M. Ficko, and S. Klančnik, "Tool condition monitoring of the cutting capability of a turning tool based on thermography," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6687, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21196687>.
- [6] J. P. Davim and A. M. Baptista, "Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium," *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 3, pp. 417-423, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00495-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00495-7).
- [7] A. sousanabadi Farahani and M. modabbarifar, "Investigating the Effect of Machining Parameters on the Cutting Force and Surface Quality of RZ5/TiB2 Magnesium Based Metal Matrix Composite by Sobel Sensitivity Analysis Method," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 63-67, 2023, <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.1.2.2>.
- [8] V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, D. Ghazi khansari, and M. H. Baghi, "Investigating the Parameters Affecting Surface Quality, Metal Removal Rate, and Tool Wear in Machining of Hybrid Metal Matrix Composites," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 155-161, 2023, doi: <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.2.7.7>.
- [9] P. Bansal and L. Upadhyay, "Experimental investigations to study tool wear during turning of alumina reinforced aluminium composite," *Procedia*

شکل (۵) و شکل (۶) تعداد مطالعات انجام شده بر اساس موضوع را به خوبی نشان می‌دهند. مطابق با این اشکال مطالعه پارامترهای مؤثر بر فرآیندهایی همچون میکروفورزکاری، برشکاری با جت آب و ... کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا این دست از روش‌های ماشین‌کاری می‌تواند یک موضوع مناسب تحقیقات برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیش رو باشد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به خواص مکانیکی و حرارتی خوب کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به سایر کامپوزیت‌های دیگر، این مواد از پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده در صنایع مختلف برخوردار هستند. ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها به دلیل وجود ذرات تقویت‌کننده با سختی بالا بسیار چالش‌برانگیز است. از این رو مطالعه همه‌جانبه پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

مطالعات فراوانی توسط دانشمندان مختلف در این حوزه صورت پذیرفته است. در این مقاله تلاش شد تا یک نگاه مناسبی بر عوامل مؤثر بر ماشین‌کاری سنتی و غیر سنتی این مواد ارائه گردد.

۱- با مطالعه بر روی فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی از قبیل، تراش‌کاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و ... مشخص شد ابزارهای PCD و بعداز آن CBN بهترین عملکرد را بر روی این مواد را دارند. استفاده از ابزارهای کاربردی که در صنایع به‌وفور از آن‌ها استفاده می‌شود در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشنهاد نمی‌گردد.

۲- به علت ماهیت ساینده ذرات تقویت‌کننده، سایش ابزار و به طبع آن کاهش کیفیت سطح و ... مهم‌ترین چالش پیش رو در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی است.

۳- فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرکاربردترین روش از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی این مواد است. شدت جریان پارامتر اصلی در فرآیند تخلیه الکتریکی است.

۴- استفاده از ماشین‌کاری لیزری به دلیل کیفیت سطح پایین و اثرات حرارتی ناشی از آن مرسوم نیست.

۵- مطالعه فرآیندهایی نظیر میکرو فرزکاری، سوراخ‌کاری و ماشین‌کاری سبز کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبتاً مورد غفلت واقع شده است. پیشنهاد می‌گردد بر روی این موارد مطالعات بیشتری توسط محققان فعال در حوزه ماشین‌کاری انجام شود.

- reinforced aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 233, no. 3, pp. 307-314, 2019,doi: <https://doi.org/10.1177/1464420718809516>.
- [19] S. Sarfraz, M. Jahanzaib, A. Wasim, S. Hussain, and H. Aziz, "Investigating the effects of as-casted and in situ heat-treated squeeze casting of Al-3.5% Cu alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 3547-3561, 2017,doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9350-5>.
- [20] J. Li and R. A. Laghari, "A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, pp. 2929-2943, 2019,doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2837-5>.
- [21] V. Tahmasbi, S. Aeinehbandy, M. H. Baghi, and A. Sousanabadi Farahani, "Sensitivity analysis modeling and optimization of cutting Forces and stool wear in milling of aluminum matrix composite," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 8, pp. 475-483, 2023, <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.8.4.0>.
- [22] A. P. Markopoulos, I. S. Pressas, I. G. Papantoniou, N. E. Karkalos, and J. P. Davim, "Machining and machining modeling of metal matrix composites—A review," *Modern manufacturing engineering*, pp. 99-141, 2015,doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20152-8_4.
- [23] A. Sousanabadi Farahani, O. Khalili, and A. Torabi, "Sensitivity analysis of effective parameters on bone drilling force by using E-fast method," *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 83-94, 2023,doi: <https://doi.org/10.61186/masm.3.1.83>.
- [24] S. Huang, L. Zhou, J. Chen, and L. Xu, "Drilling of SiCp/Al metal matrix composites with polycrystalline diamond (PCD) tools," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 10, pp. 1090-1094, 2012,doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.654152>.
- [25] T. Rajmohan, K. Palanikumar, and M. Kathirvel, "Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, no. 6, pp. 1286-1297, 2012,doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61317-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61317-4).
- [26] A. R. Ahamed, P. Asokan, S. Aravindan, and M. Prakash, "Drilling of hybrid Al-5% SiC p-5% B 4 C *Engineering*, vol. 51, pp. 818-827, 2013,doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.117>.
- [10] J. P. Davim, "Machining: fundamentals and recent advances," 2008.
- [11] D. Jani, "Machining of Sic—metal matrix composite (MMC) by polycrystalline diamond (PCD) tools and effect on quality of surface by changing machining parameters," *Int. J. Sci. Res. Dev*, vol. 2, pp. 106-108, 2014,doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203583>.
- [12] N. Muthukrishnan, M. Murugan, and K. Prahada Rao, "Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, pp. 211-218, 2008,doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1220-8>.
- [13] A. Asgari, A. Sousanabadi, and M. Sedighi, "Cutting fluid role in the machinability of AZ91/SiC composite: Tool wear and surface roughness," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 1-13, 2023,doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203583>.
- [14] T. Ozben, E. Kilickap, and O. Cakır, "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC," *Journal of materials processing technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 220-225, 2008,doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.082>.
- [15] M. A. Sougavabar, S. A. Niknam, and B. Davoodi, "Experimental characterization of tool wear morphology in milling of Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 571-585, 2023,doi: <https://doi.org/10.3390/met10111459>.
- [16] S.-J. Hong, H.-M. Kim, D. Huh, C. Suryanarayana, and B. S. Chun, "Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 347, no. 1-2, pp. 198-204, 2003,doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00593-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00593-2).
- [17] V. Tahmasbi, M. H. Baghi, S. Aeinehbandy, and A. Sousanabadi Farahani, "Sensitivity analysis and optimization of material removal rate and surface quality in aluminum matrix composite," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 395-404, 2023, <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.7.1.5>.
- [18] R. Muraliraja, R. Arunachalam, I. Al-Fori, M. Al-Maharbi, and S. Piya, "Development of alumina

- [35] N. Bharat and P. Bose, "A study on conventional and non-conventional machining behaviour of metal matrix composites: a review," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 7600-7616, 2022,doi: <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2073265>.
- [36] S. S. Thakur, B. Patel, R. K. Upadhyay, D. K. Bagal, and A. Barua, "Machining characteristics of metal matrix composite in powder-mixed electrical discharge machining—A review," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 1755-1777, 2023,doi: <https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2030089>.
- [37] P. Srikanth and C. P. Kumar, "Electrical discharge machining characteristics of aluminium metal matrix composites-a review," *Int J Sci Res*, vol. 4, pp. 1-15, 2013,doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203542>.
- [38] G. Boothroyd, "Non-conventional machining processes," *Fundamentals of machining and machine tools*, vol. 491, 1989.
- [39] J. McGeough, "Advanced methods of machining: Springer Science & Business Media," 1988.
- [40] V. Balasubramaniam, N. Baskar, and C. S. Narayanan, "Optimization of electrical discharge machining parameters using artificial neural network with different electrodes," in *5th international & 26th all India manufacturing technology, design and research conference*, 2014.
- [41] A. Safarabady, V. Tahmasbi, A. sousanabadi farahani, and m. zolfaghari, "Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 59-69, 2022,doi: <https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160942>.
- [42] E. C. Jameson, *Electrical discharge machining*. Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [43] K. Raju, M. Balakrishnan, C. Priya, M. Sivachitra, and D. Narasimha Rao, "Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining in AA7075 Metal Matrix Composite," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, 2022,doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4438419>.
- [44] R. N. Marigoudar and K. Sadashivappa, "Effect of machining parameters on MRR and surface roughness in machining of ZA43/SiCp composite by WEDM," *International journal of applied science and engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 317-330, 2013,doi: [https://doi.org/10.6703/IJASE.2013.11\(3\).317](https://doi.org/10.6703/IJASE.2013.11(3).317).
- p metal matrix composites," *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 49, no. 9-12, pp. 871-877, 2010,doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2453-5>.
- [27] V. Songmene and M. Balazinski, "Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, 1999,doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63135-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63135-7).
- [28] G. Tosun and M. Muratoglu, "The drilling of an Al/SiCp metal-matrix composites. Part I: microstructure," *composites science and technology*, vol. 64, no. 2, pp. 299-308, 2004,doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00290-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00290-2).
- [29] V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, Baghi, and Ghazi khansari, "Statistical Modeling and Optimization of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Hybrid Aluminum Matrix Composites," (in persian), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 149-154, 2023, <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1402.23.10.2.6.6>.
- [30] J. P. Davim, "Study of drilling metal–matrix composites based on the Taguchi techniques," *Journal of materials processing technology*, vol. 132, no. 1-3, pp. 250-254, 2003,doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00935-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00935-4).
- [31] S. A. Niknam, S. Kamalizadeh, A. Asgari, and M. Balazinski, "Turning titanium metal matrix composites (Ti-MMCs) with carbide and CBN inserts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 253-265, 2018,doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1926-9>.
- [32] C. Thiagarajan, R. Sivaramakrishnan, and S. Somasundaram, "Modeling and optimization of cylindrical grinding of Al/SiC composites using genetic algorithms," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 34, pp. 32-40, 2012,doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000100005>.
- [33] C. Thiagarajan, R. Sivaramakrishnan, and S. Somasundaram, "Cylindrical grinding of SiC particles reinforced aluminium metal matrix composites," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 14-20, 2011,doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203583>.
- [34] K. C. Nayak, P. R. Deshmukh, A. K. Pandey, P. Vemula, and P. P. Date, "Microstructural, physical and mechanical characterization of grinding sludge based aluminium metal matrix composite," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 773, p. 138895, 2020,doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138895>.

- parameters for Al7075-TiB2 in-situ composite," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012013>, vol. 149, no. 1: IOP Publishing, p. 012013.
- [54] F. Müller and J. Monaghan, "Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 9, pp. 1351-1366, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00121-2).
- [55] Z. Yang, L. Zhu, G. Zhang, C. Ni, and B. Lin, "Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 156, p. 103594, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2020.103594>.
- [56] G. Zhong, J. Xu, Y. Wu, and S. Yang, "Statistical Analyses and Regression Modeling for Influence of Process Parameters on Material Removal Rate in Ultrasonic Machining," *Glob. J. Technol. Optim*, vol. 6, pp. 1-6, 2015, doi: <https://doi.org/10.4172/2229-8711.1000187>.
- [57] C. Sivakandhan *et al.*, "Material characterization and unconventional machining on synthesized Niobium metal matrix," *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 015018, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab624d>.
- [58] G. Lin and Z. Zhong, "Ultrasonic assisted turning of an aluminium-based metal matrix composite," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, pp. 1077-1081, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2320-3>.
- [59] N. Tomac, K. Tannessen, and F. O. Rasch, "Machinability of particulate aluminium matrix composites," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 55-58, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61151-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61151-2).
- [60] P. Chen and T. Hoshi, "High-performance machining of SiC whisker-reinforced aluminium composite by self-propelled rotary tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 59-62, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61152-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61152-4).
- [61] N. Hung, F. Boey, K. Khor, C. Oh, and H. Lee, "Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 48, no. 1-4, pp. 291-297, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01661-J](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01661-J).
- [62] A. Abdullah, "Machining of aluminium based metal matrix composite (MMC)," University of
- [45] A. Pramanik, "Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 86, pp. 44-61, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2014.07.003>.
- [46] A. Safarabady, V. Tahmasbi, A. Sousanabadi Farahani, and M. Zolfaghari, "Investigating factors affecting electrode wear rate in electrical discharge machining of AZ91 magnesium alloy metal matrix composite reinforced with silicon carbide microparticles," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 13, no. 4, pp. 119-134, 2023, doi: <https://doi.org/10.22044/JSFM.2023.12837.3711>.
- [47] K. Rajurkar and D. Zhu, "Improvement of electrochemical machining accuracy by using orbital electrode movement," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 139-142, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63150-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63150-3).
- [48] C. Senthikumar, G. Ganesan, and R. Karthikeyan, "Electrochemical machining of Al/15% SiCp composites through a response surface methodology-based approach," *International journal of materials research*, vol. 103, no. 3, pp. 378-382, 2012, doi: <https://doi.org/10.3139/146.110641>.
- [49] K. S. Kumar, R. Sivasubramanian, and K. Kalaiselvan, "Selection of optimum parameters in non conventional machining of metal matrix composite," *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 27, no. 4, pp. 477-486, 2009, doi: <http://dx.doi.org/10.4152/pea.200904477>.
- [50] S. Ayyappan, M. Kalaimathi, and G. Venkatachalam, "Cost-tolerance prediction models for electrochemical machining of metal matrix composites," *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva*, vol. 35, no. 3, pp. 299-307, 2015, doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203583>.
- [51] S. Marimuthu, J. Dunleavy, Y. Liu, M. Antar, and B. Smith, "Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite," *Optics & Laser Technology*, vol. 117, pp. 251-259, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.029>.
- [52] L. Hong, R. Vilar, and W. Youming, "Laser beam processing of a SiC particulate reinforced 6061 aluminium metal matrix composite," *Journal of materials science*, vol. 32, pp. 5545-5550, 1997, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1018668322943>.
- [53] S. Manjoth, R. Keshavamurthy, and G. P. Kumar, "Optimization and analysis of laser beam machining

- [72] A. Chambers, "The machinability of light alloy MMCs," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 2, pp. 143-147, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00001-I](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00001-I).
- [73] M. Brun, M. Lee, and F. Gorsler, "Wear characteristics of various hard materials for machining SiC-reinforced aluminum alloy," *Wear*, vol. 104, no. 1, pp. 21-29, 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90243-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90243-1).
- [74] N. Hung, F. Boey, K. Khor, C. Oh, and H. Lee, "Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 48, no. 1-4, pp. 291-297, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01661-J](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01661-J).
- [75] G. T. Smith, *Cutting tool technology: industrial handbook*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [76] L. Looney, J. Monaghan, P. O'Reilly, and D. Taplin, "The turning of an Al/SiC metal-matrix composite," *Journal of materials processing technology*, vol. 33, no. 4, pp. 453-468, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90279-2](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90279-2).
- [77] V. Songmene and M. Balazinski, "Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, 1999.
- [78] I. Ciftci, M. Turker, and U. Seker, "CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs," *Wear*, vol. 257, no. 9, pp. 1041-1046, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.07.005>.
- [79] C. J. Nicholls, B. Boswell, I. J. Davies, and M. N. Islam, "Review of machining metal matrix composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, pp. 2429-2441, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9558-4>.
- [80] J.-P. Chen, L. Gu, and G.-J. He, "A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites," *Advances in Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 279-315, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00313-2>.
- Warwick, 1996, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.179>.
- [63] W. Pedersen and M. Ramulu, "Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools," *Journal of materials processing technology*, vol. 172, no. 3, pp. 417-423, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.07.016>.
- [64] F. H. Sun, Z. Wu, J. W. Zhong, and M. Chen, "High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts," in *Key Engineering Materials*, 2004, doi: High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts, vol. 274: Trans Tech Publ, pp. 457-462.
- [65] F. H. Sun, Z. Wu, J. W. Zhong, and M. Chen, "High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts," *Key Engineering Materials*, vol. 274, pp. 457-462, 2004, doi: <https://doi.org/10.1177/09544062231203583>.
- [66] O. Quigley, J. Monaghan, and P. O'Reilly, "Factors affecting the machinability of an Al/SiC metal-matrix composite," *Journal of materials processing technology*, vol. 43, no. 1, pp. 21-36, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90159-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90159-7).
- [67] S. Barnes and I. Pashby, "Machining of aluminium based metal matrix composites," *Applied Composite Materials*, vol. 2, no. 1, pp. 31-42, 1995, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00567375>.
- [68] W. Bai, A. Roy, R. Sun, and V. V. Silberschmidt, "Enhanced machinability of SiC-reinforced metal-matrix composite with hybrid turning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 268, pp. 149-161, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.017>.
- [69] D. Das, S. K. Pradhan, A. K. Sahoo, A. Panda, M. P. Satpathy, and C. Samal, "Tool wear and cutting force investigations during turning 15 wt% SiCp-Al 7075 metal matrix composite," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 854-859, 2020.
- [70] A. Chambers and S. Stephens, "Machining of Al-5Mg reinforced with 5 vol.% Saffil and 15 vol.% SiC," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 135, pp. 287-290, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90577-A](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90577-A).
- [71] P. Chen and Y. Miyake, "Machining Characteristics of SiC Whisker Reinforced Aluminum," in *Proceedings of 1989 ASM Int. Conf. on Machinability*, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61152-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61152-4), pp. 69-75.

بررسی عددی اثر نانولوله های کربنی بر خواص مکانیکی و رفتار شکست نانوکامپوزیت پلیمری با استفاده از مدل الیاف ناپیوسته

چکیده: استفاده از مدل های تجربی و شبه تجربی برای مدل کردن خواص نانوکامپوزیت ها به منظور پیش بینی خواص مکانیکی و شکست آن ها می تواند به کاهش هزینه و زمان و طراحی بهینه آن ها منجر شود. در این پژوهش به منظور مدل کردن خواص مکانیکی و رفتار شکست نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده با نانولوله های کربنی در درصدهای حجمی ۰/۵ درصد، ۰/۷۵ درصد و ۱ درصد از مدل الیاف ناپیوسته (کوتاه) استفاده شده است. مدل الیاف ناپیوسته در پژوهش های پیشین برای مدل کردن خواص کامپوزیت ها با الیاف تقویت کننده ناپیوسته در مقیاس ماکرو مورد استفاده قرار گرفته است که با توجه به هندسه استوانه ای شکل نانولوله ها، از این روش در کار حاضر استفاده شده است، همچنین با استفاده از این مدل و نیز مدل توزیع تصادفی نانولوله ها در ماتریس اپوکسی شبیه سازی اجزای محدود خواص مکانیکی و رفتار شکست در مقیاس نانو و مزو با بهره گیری از برنامه نویسی زبان پایتون انجام گرفته است.

واژه های راهنما: مدل الیاف ناپیوسته، رفتار شکست، نانوکامپوزیت پلیمری، نانولوله های کربنی، روش اجزای محدود

حامد بازوندی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد
اسلامی، خرم آباد

هومن فراشزاده

کارشناسی ارشد،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد
اسلامی، خرم آباد

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

Hamed Bazvandi*

Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Khorramabad Branch,
Islamic Azad University,
Khorram Abad

Hooman Farashzade

MSc., Department of
Mechanical Engineering,
Khorramabad Branch,
Islamic Azad University,
Khorram Abad

Numerical investigation of the effect of carbon nanotubes on mechanical properties and fracture behavior of polymeric nanocomposite using discontinuous fiber model

Abstract: The use of empirical and semi-empirical models to model the properties of nano composites to predict mechanical properties and failure leads to cost and time reduction and optimal design. In this study, discontinuous (short) fiber models were used to model the mechanical properties and fracture behavior of carbon nanotube reinforced polymer nanocomposites with volume fractions of 0.5%, 0.75%, and 1%. In previous studies, the discontinuous fiber model was used to determine the macro scale properties of composites reinforced with discontinuous fibers. In this study, a model that considers the geometric similarity between short fibers and nanotubes was used. Using this model and the model of random distribution of nanotubes in the epoxy matrix, simulations were performed using the Python programming language and the mechanical properties and fracture behavior were investigated at the Nano and mesoscales.

Keywords: Discontinuous fiber model, Fracture behavior, Polymeric nanocomposite, Carbon nanotube, FEM

۱- مقدمه

کشیدگی و تنش بحرانی سطح میانی نسبت به تغییرات پارامترهای طول و قطر تا حدودی موثر است. زابری و است [۹] با استفاده از روش اجزای محدود با مدل کردن المان حجمی نماینده به تخمین مدول یانگ موثر نانوکامپوزیت پلیمری برای انواع نانولوله شامل مدل دسته صندلی، کایرال و زیگزاگی پرداختند، نتایج نشان داد مدل دسته صندلی برای کاربردهای استحکام بالا مناسب می باشد در حالی که مدل زیگزاگی در جاهای که استحکام نسبتاً کمتر است مناسب می باشد و همچنین نشان دادند بین نتایج عددی و تئوری مطابقت خوبی وجود دارد. آلیان، کاندوول و مگناید خواص الاستیک موثر با تاثیر انباشتگی نانولوله های کربنی در کامپوزیت با زمینه اپوکسی را با توسعه مدل دینامیک مولکولی و مدل چند مقیاس محاسبه کردند. آنها نشان دادند که درجه بالاتری از ارتوتروپی فیبر در مقیاس نانو به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تأثیر می گذارد [۱۰]. اورا و پاتاک مدلی محاسباتی برای محاسبه خواص الاستیک در بارگذاری های مختلف (محوری و برشی) با استفاده از روش اجزای محدود ارائه کردند، از نتایج عددی مشاهده شد که رابطه ماتریس و پرکننده به طور قابل توجهی بر استحکام الاستیک کامپوزیت های پلیمری تأثیر می گذارد [۱۱]. نگی و همکاران [۱۲] ابتدا با استفاده از مدل هالپین-تسای اصلاح شده مدول الاستیک در نانوکامپوزیت با ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی تک و چند دیواره پرداختند و سپس با استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافته رشد ترک را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند نانولوله های کربنی تک دیوار در مقایسه با نانولوله های کربنی چند دیواره اثر قابل توجه تری روی طول ترک و ماندگی دارد. اسماعیلی [۱۳] انرژی شکست و استحکام کششی پایه اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی چند دیواره را به روش تجربی بررسی و نتایج را با روش عددی اجزای محدود اعتبار سنجی کردند، نتایج نشان داد انرژی شکست و استحکام کششی با افزودن نانولوله های کربنی چند دیواره به اپوکسی، افزایش می یابد. ترونک و چوی [۱۴] اثر افزودن نانولوله های کربنی چند دیواره کوتاه در درصد های وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ را بر چقرمگی شکست در حالت بازشدگی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را با سه روش تئوری تیر اصلاح شده، روش کالیبراسیون منطبق و روش کالیبراسیون منطبق اصلاح شده و همچنین به روش تجربی مورد مطالعه قرار دادند، که نتایج بدست آمده بیانگر افزایش چقرمگی شکست با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی و قرابت نتایج بدست آمده از روش های یادشده بود. آن ها همچنین یک مدل تئوری را بر مبنای قانون پل برای تخمین چقرمگی شکست نانوکامپوزیت پلیمری با نانولوله های کربنی ارائه دادند که انطباق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد. احمدی و همکاران [۱۵] با استفاده از روش اجزای محدود چند مقیاس به تحلیل کماتش در میله ساخته شده از پلی آمید و هیبرید الیاف کربن و نانولوله

پلیمرها با پرکننده های گوناگون در اندازه و شکل های مختلف به منظور دستیابی به خواص بهتر فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی، مغناطیسی و اپتیکی تقویت می شوند که در سه دهه اخیر پرکننده های در مقیاس نانو مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. پرکننده های مقیاس نانو به سه دسته اصلی صفر بعدی (مانند نانوذرات سیلیکا)، یک بعدی (مانند نانولوله های کربنی) و دو بعدی (مانند نانو صفحات گرافن) تقسیم بندی می شوند [۱]. نانوکامپوزیت های پلیمری مواد با دو مؤلفه ماتریس پلیمری و پرکننده های در مقیاس نانو هستند که می توان آنها را بر اساس ریخت شناسی، ابعاد نانوذرات، نوع پلیمر و پاسخ حرارتی دسته بندی کرد [۲].

نانوکامپوزیت های پلیمری با روش های بسیاری تهیه می شوند که سه روش مهم آن شامل مخلوط سازی مکانیکی، پلیمریزاسیون و اختلاط ذوبی است [۳].

نانوکامپوزیت های پلیمری با بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی، مغناطیسی و اپتیکی در طیف گسترده ای از صنایع هوافضا، خودروسازی، پزشکی، حسگرها، تصفیه آب بسته بندی و محافظ الکترومغناطیسی کاربرد دارند [۱، ۴].

مقصودلو و همکاران [۵] تاثیرات فاز میانی، انحنا و انباشتگی نانولوله های کربنی تک دیواره را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلیمری با روش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود با تعریف شش مورد المان حجمی نماینده با درصد های وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد از نانولوله کربنی مورد ارزیابی قرار دادند، که بهترین انطباق میان نتایج تجربی و عددی با لحاظ کردن هم زمان پارمترهای انحنا و انباشتگی در نمونه ۰/۱ درصد از نانولوله با درصد خطای ۴/۱ مشاهده شد.

محسن زاده و همکاران [۶] با بهره گیری از روش اجزای محدود و دینامیک مولکولی تأثیر پارامترهایی چون طول، قطر و کایرالتی برمدول یانگ و مدول برشی نانولوله های معیوب را بررسی و نشان دادند که پارامتر قطر نسبت به طول تأثیر بیشتری بر مدول یانگ نانولوله ها دارد، و عیب جای خالی برای نانولوله های کایرال اثرگذاری بیشتری بر مدول یانگ، نسبت به انواع زیگزاگی و آرچیپر دارد.

دستگرد، انصاری و روحی با شبیه سازی نانولوله های کربنی، سیلیکونی، ژرمانیومی و قلعی با مقید کردن با قید محبوس سازی در مقیاس نانو به روش اجزای محدود، به تخمین مدول یانگ پرداخته و برتری نانولوله کربنی بر افزایش سختی نانوکامپوزیت را نسبت به سایر نانولوله ها نشان دادند [۷].

یزدان پرست و رفیعی [۸] تاثیر سرعت بیرون کشی نانولوله های کربنی در ماتریس پلیمری بر تنش برشی بحرانی سطح میانی نانولوله های کربنی و ماتریس پلیمری را با روش دینامیک مولکولی شبیه سازی کرده و نشان دادند که تغییرات انرژی بیرون

پلیمری اپوکسی را از منظر روش اجزای محدود و دینامیک مولوکولی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند فاز میانی بازده انتقال بار از زمینه به نانولوله کربنی را کاهش می دهد. موریا، جاوید و چاکریرتی با بهره گیری از روش اجزای محدود رفتار خمشی صفحات نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی با اثر انباشتگی در توزیع یکنواخت و تابعی مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد نانولوله های کربنی تمایل دارند در کسرهای حجمی بسیار کم تجمع پیدا کنند و عدم در نظر گرفتن اثر تجمع نانولوله های کربنی ممکن است منجر به تخمین بیش از حد خواص الاستیک نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی شود که منجر به پیش بینی غیر دقیق رفتار ساختاری می شود. [۲۳]. در کنار روش هایی مانند روش عددی اجزای محدود، دینامیک مولوکولی و روش های تجربی می توان به مدل هایی مانند مدل هالپین-تسای، مدل راس، مدل الیاف ناپیوسته، مدل لویس و نیلسون، مدل انیشتن، مدل جی، مدل ویت، مدل گات و گلد اشاره کرد که برای تخمین خواص نانوکامپوزیت ها به خصوص در محدوده الاستیک قابل استفاده می باشند [۲۴].

در نگاهی کلی به پیشینه های بیان شده بررسی نانوکامپوزیت های پلیمری و اثر نانو تقویت کننده ها از منظرهای گوناگون نانومقیاس، میکرو مقیاس، مزو مقیاس و ماکرو مقیاس قابل بررسی بوده و روش تجربی و عددی (عمدتاً اجزای محدود) و نیز دینامیک مولوکولی چارچوب پژوهش های انجام شده بوده و روش عددی اجزای محدود در مقیاس های گوناگون جهت پیش بینی در اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده بوده است.

در مقاله حاضر خواص الاستیک و انرژی شکست و همچنین تمرکز تنش در نانولوله کربنی و نانوکامپوزیت پلیمری با ماتریس اپوکسی و اثر نانولوله های کربنی در درصدهای وزنی متفاوت با استفاده از مدل چند مقیاس و روش اجزای محدود توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات و روابط

۲-۱- مدل الیاف ناپیوسته

به منظور تخمین استحکام و انرژی شکست در کامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی، می توان نانولوله های کربنی را با الیاف ناپیوسته که به طور تصادفی در ماتریس توزیع شده است معادل دانست که مطابق این مدل استحکام شکست به صورت زیر نشان داده شده است [۲۵].

$$\sigma_c = C\sigma_f V_f \left(1 - \frac{L_e}{2L}\right) + \sigma_m(1 - V_f) \quad (1)$$

که در اینجا σ_c استحکام کامپوزیت، σ_f و σ_m به ترتیب استحکام الیاف و استحکام ماتریس، V_f کسر حجمی الیاف، L_e و L به ترتیب طول مؤثر و طول میانگین الیاف و C ضریب اصلاحی اثر

های کربنی به عنوان تقویت کننده پرداختند، نشان داده شد وقتی که پلی آمید با هیبرید الیاف کربن و نانولوله های کربنی تقویت می شود مدول یانگ و مقاومت به کمانش به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. چاری توزا و همکاران [۱۶] به ارائه مدلی در مقیاس میکرو به منظور پیش بینی مدول الاستیک موثر نانوله های کربنی در ماتریس پلیمری از جنس پلی اتیلن کم دانسیته خطی پرداختند یافته های این تحقیق نشان داد که مدل تحلیلی ارائه شده دارای دقت مناسب جهت پیش بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت های پلیمری است. شین [۱۷] سازوکارهای سفت شوندگی نانوکامپوزیت های پلیمری که با نانولوله ها تقویت شده را از سه منظر جدایش سطحی، تسلیم پلاستیک ناشی از فضای خالی در مقیاس نانو و بیرون زدگی نانولوله کربنی رابه منظور دستیابی به اصول کلی چقرمگی شکست در نانوکامپوزیت های پلیمری با بهره گیری از مدل چندمقیاس مورد بررسی قرار داد، این مطالعه نشان داد تسلیم پلاستیک ناشی از فضای خالی و بیرون زدگی نانولوله کربنی در تقویت چقرمگی شکست نانوکامپوزیت های پلیمری / نانولوله های کربنی بسیار مهم است. شیروودکار، چنگ و سیدل [۱۸] در یک مطالعه تجربی تاثیر نانولوله های کربنی و نانوصفات گرافن بر رفتار شکست اپوکسی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند انرژی شکست بحرانی و ضریب شدت تنش بحرانی در تمامی نمونه های حاوی نانولوله های کربنی و نانوصفات گرافن نسبت به نمونه اپوکسی خالص افزایش می یابد و نمونه پلیمری / نانولوله کربنی با درصد وزنی ۰/۵ درصد بالاترین افزایش در انرژی شکست بحرانی و ضریب شدت تنش بحرانی را نشان داد. شو و همکاران [۱۹] با استفاده از روش تجربی به بررسی تاثیر قطر نانولوله کربنی چند دیواره بر رفتار مکانیکی و سفتی شکست نانوکامپوزیت پایه اپوکسی در درصد های وزنی مختلف پرداختند، آنها نتیجه گرفتند قطر بهینه نانولوله کربنی چند دیواره ۲۵ نانومتر است که در درصد وزنی ۰/۷ بهترین چقرمگی را نشان می دهد. بوهمیک [۲۰] اثر نانولوله های کربنی چند دیواره را بر روی رفتار مکانیکی و رفتار آسیب کامپوزیت پلیمری با ماتریس اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن با اثر کلوخه شدن نانولوله ها مورد بررسی قرار داد و همچنین با استفاده از مدل آسیب هاشین و روش اجزای محدود توسعه یافته رفتار آسیب را مدل سازی و شبیه سازی کردند آنها نتیجه گرفتند استحکام کششی به علت استحکام بالاتر نانو لوله های کربنی افزایش می یابد اما ازدیاد طول در هنگام شکست به دلیل ماهیت ترد نانولوله های کربنی کاهش می یابد. وگاس و همکاران [۲۱] با استفاده از روش عددی به بررسی اثر انباشتگی نانولوله های کربنی چند دیواره با درصد پلیمری پرداختند و مشخص شد انباشتگی نانولوله های کربنی چند دیواره تاثیرات منفی بر عملکرد مکانیکی نمونه های حاوی درصد بالای نانولوله های کربنی دارد. سونگ و همکاران [۲۲] خواص الاستیک فاز میانی ما بین نانولوله کربنی و ماتریس

انرژی جذب شده توسط الیاف از رابطه زیر قابل محاسبه شده است [۲۶]:

$$G_s = \frac{\pi}{2} d_f \tau l^2 e^{f\varphi} \quad (5)$$

که در اینجا τ استحکام چسبندگی مابین الیاف و ماتریس است و $U(g)$ تابع پله واحد به شکل زیر است:

$$U(g) = \begin{cases} 1 & g > 0 \\ 0 & g \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

و l طول جاسازی یا نفوذ نانولوله در ناحیه ترک است:

$$l = \left(\frac{L_f}{2} \right) - (z / \cos \varphi) \quad (7)$$

و همچنین مقدار g از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$g = z - \left(\frac{L_f}{2} - L_c e^{f\varphi} \right) \quad (8)$$

در رابطه بالا L_c طول بحرانی الیاف است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$L_c = \frac{d_f \sigma_f}{4\tau} \quad (9)$$

در رابطه بالا d_f قطر الیاف ناپیوسته را می‌دهد.

۲-۲- مدل هالپین-تسای

مدل هالپین-تسای یک مدل شبه تجربی است که به منظور تخمین مدول الاستیک کامپوزیت های تقویت شده با الیاف در جهت های طولی و عرضی توسعه داده شده است و برای نانوکامپوزیت های پلیمری به خصوص با تقویت نانولوله های کربنی قابل استفاده است [۲۷]، [۲۴]. معادله هالپین - تسای برای تخمین مدول الاستیک به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۷]:

$$E_C = E_m \left[\frac{1 + \zeta \eta \phi_f}{1 - \eta \phi_f} \right] \quad (10)$$

که در اینجا E_C مدول الاستیک کامپوزیت، E_m مدول الاستیک ماتریس، ϕ_f کسر حجمی تقویت کننده و η نیز به صورت زیر ارائه شده است [۲۷]:

$$\eta = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \zeta} \quad (11)$$

و همچنین پارامتر ζ که به هندسه تقویت کننده ها وابسته است عبارت است از [۲۷]:

جهت گیری الیاف است. باتوجه به رابطه (۱) مدول الاستیک کامپوزیت به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۵]:

$$E_C = C E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

در رابطه بالا E_C ، E_m و E_f به ترتیب مدول الاستیک کامپوزیت، ماتریس و الیاف هستند. همچنین انرژی شکست با استفاده از این مدل به شکل زیر ارائه شده است [۲۶]:

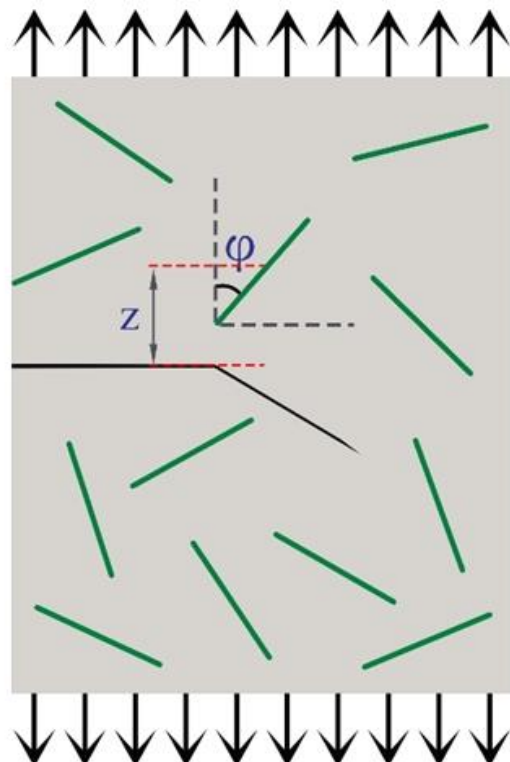
$$G = \frac{V_f}{A_f} \int_0^{L_f/2} \left[\int_{\varphi} G_s(L_f, d_f, \varphi) U(g) \rho(\varphi) d\varphi \right] \rho(z) dz \quad (3)$$

$$\rho(z) = \frac{2}{L_f} \cdot \rho(\varphi) = \sin \varphi$$

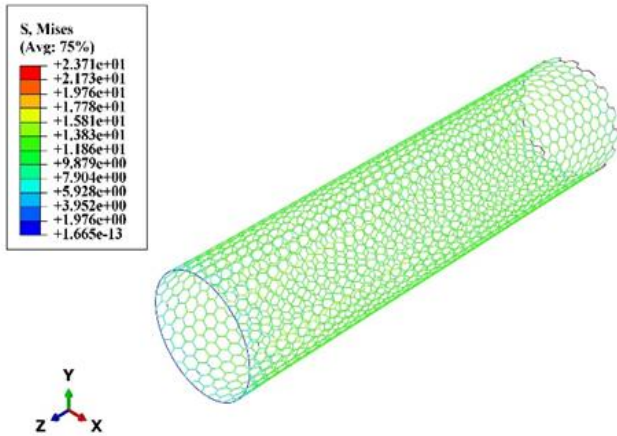
در اینجا A_f سطح مقطع الیاف، L_f طول الیاف، φ زاویه الیاف نسبت به راستای نیروی کشش، $\rho(\varphi)$ و $\rho(z)$ توابع چگالی احتمال هستند و z فاصله مرکز الیاف نسبت به ترک است و مقادیر زیر را اختیار می‌کنند (شکل ۱) [۲۶]:

$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$0 \leq z \leq \frac{L_f}{2}$$



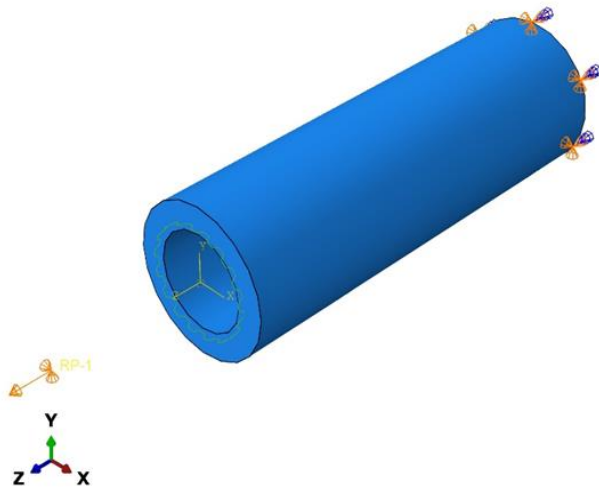
شکل ۱ جهت گیری الیاف ناپیوسته



شکل ۲ مقادیر تنش فون میسز در نانولوله های کربنی

در آخر برای مش بندی کامل نمونه با توجه به هندسه استوانه ای نمونه از الگوی جاروبی استفاده شده است و از المان شش وجهی هشت گره ای با انتگرال گیری کاهش یافته برای ماتریس و المان خرپا دو گره ای برای نانولوله کربنی استفاده شده است (شکل ۴).

در شکل (۵) موقعیت ترک داخل المان حجمی نماینده نشان داده شده است و در ادامه توزیع تنش در ماتریس و نانوکامپوزیت در مقیاس نانو بررسی شده است (شکل ۶، ۷)، مشاهده می شود تنش به میزان قابل توجهی در نانوکامپوزیت نسبت به حالت ماتریس تغییر می کند. برای دستیابی به دقت و صحت نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود، تعداد المان ها را تا زمانی که پاسخ به مقدار معینی همگرا شود و پس از آن افزایش تعداد المان ها نتایج به دست آمده را تغییر ندهد ادامه پیدا کرده است. بدین منظور دو نقطه متمایز در نانولوله کربنی و ماتریس انتخاب شده است.



شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده در مقیاس نانو

$$\zeta = \frac{2L}{D} \quad (12)$$

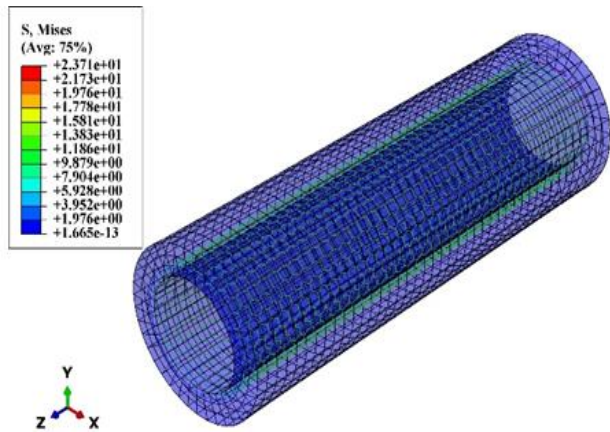
که در اینجا D و L به ترتیب قطر و طول تقویت کننده است و برای مقدار $\zeta=2$ نتایج قابل قبولی گزارش شده است [۲۷].

۳- نتایج عددی

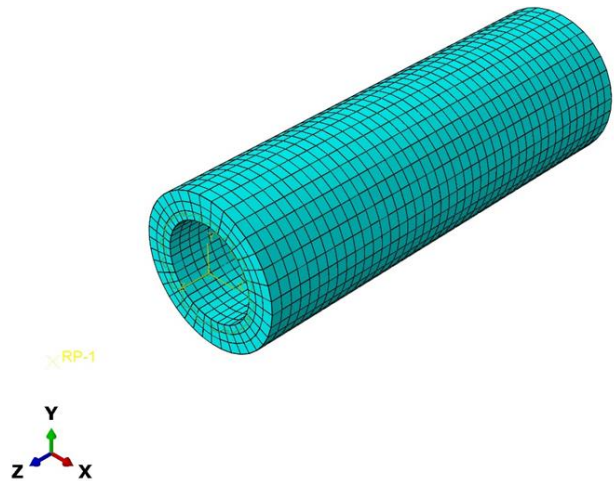
به منظور تخمین خواص مکانیکی و شکست نانوکامپوزیت های پلیمری با زمینه اپوکسی از مدل الیاف گسسته استفاده شده است. این مدل به همراه نحوه توزیع تصادفی نانولوله ها در ماتریس با استفاده از برنامه نویسی با نرم افزار پایتون نسخه ۲،۷،۳ [۲۸] و در نرم افزار اجزای محدود آباکوس [۲۹] نسخه ۲۰۱۶ اجرا شده است. در این پژوهش شبیه سازی در مقیاس های نانو و میکرو انجام گرفته است. در مقیاس نانو، نانولوله کربنی با ساختار شش ضلعی منتظم که طول هر ضلع 0.14 نانومتر است حول محور گذرنده از مرکز نانولوله کربنی (شکل ۲) طراحی شده است. همچنین ماتریس اپوکسی به صورت یک استوانه با قطر درونی و بیرونی به ترتیب 2 و 3 نانومتر و طول 20 نانومتر (شکل ۳) برای محیط کردن نانولوله مدل شده است پس از تعریف خواص نانولوله های کربنی و ماتریس اپوکسی (جدول ۱) هر قسمت به طور جداگانه، نانولوله با استفاده از قید جاسازی ابر همکنش میان ماتریس و نانولوله، درون ماتریس قرار داده شده است به طوری که مماس به سطح درونی ماتریس باشد و سختی بالای نانولوله در المان های مشترک با ماتریس اعمال شده است. سطح پشتی در تمامی جهات مقید شده است و برای اعمال بارکششی به سطح جلویی استوانه، یک نقطه مرجع در آباکوس تعریف شد و این نقطه با سطح جلویی استوانه جفت شد و سپس در نقطه مدنظر جابه جایی 0.1 نانومتری در راستا محوری لحاظ شد و در جهت های دیگر مقید شده است (شکل ۳).

جدول ۱ خواص نانولوله ها و ماتریس اپوکسی

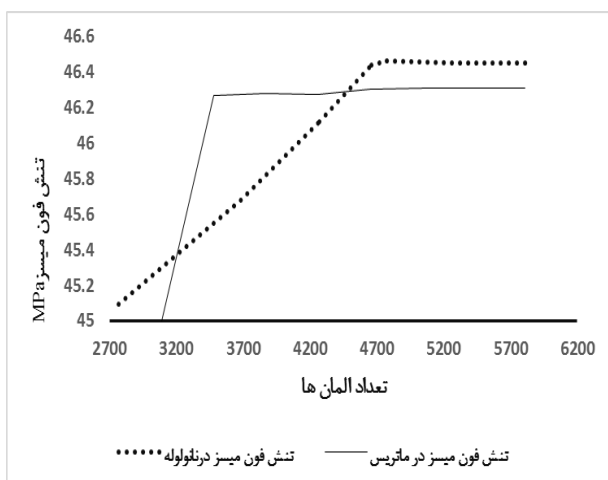
خواص ماده	اپوکسی [۳۰]	نانو لوله کربنی [۳۱]
چگالی	۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
مدول یانگ	۲/۸ گیگاپاسکال	۱۰۰۰ گیگاپاسکال
نسبت پواسن	۰/۳	-
استحکام نهایی	۳۵ مگاپاسکال	۱۰۰۰ مگاپاسکال
کشیدگی در نقطه شکست	٪ ۱	-



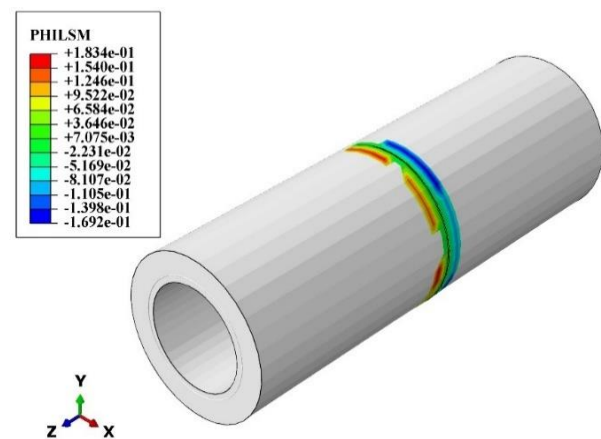
شکل ۷ مقادیر تنش فون میسز در نانوکامپوزیت پلیمری



شکل ۴ شبکه بندی نمونه

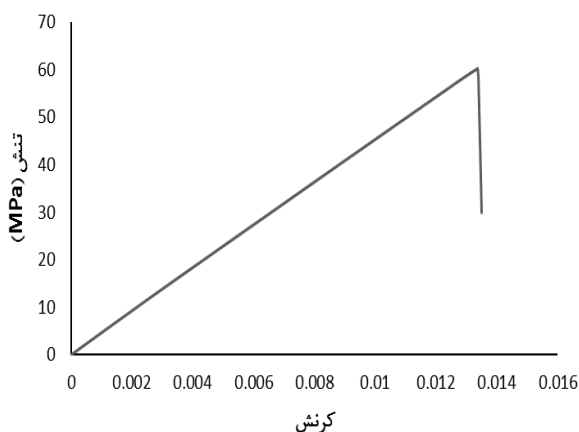


شکل ۸ مقادیر تغییر تنش فون میسز در نانولوله و ماتریس با تغییر تعداد المان‌ها

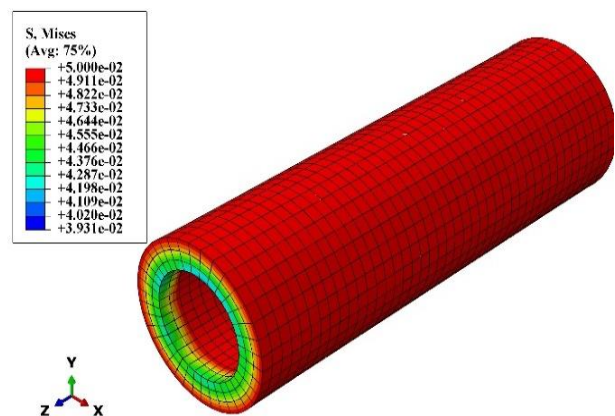


شکل ۵ رشد ترک در نانوکامپوزیت پلیمری در مقیاس نانو

همچنین با استفاده از نتایج به دست آمده از شبیه سازی در مقیاس نانو که در (شکل ۹) نشان داده شده است، مدول الاستیک و استحکام کششی ماتریس اپوکسی به ترتیب ۵۸/۹۳ درصد و ۲۰/۷۲ درصد افزایش پیدا کرده است.



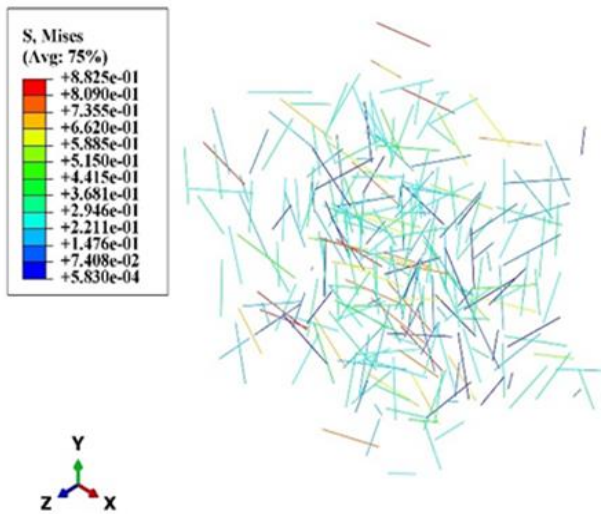
شکل ۹- تنش-کرنش



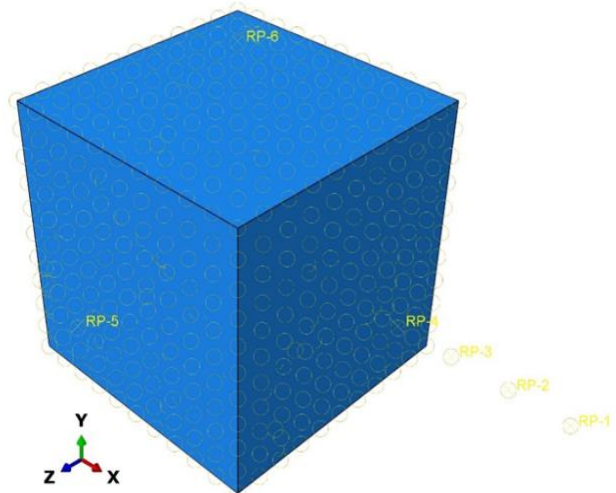
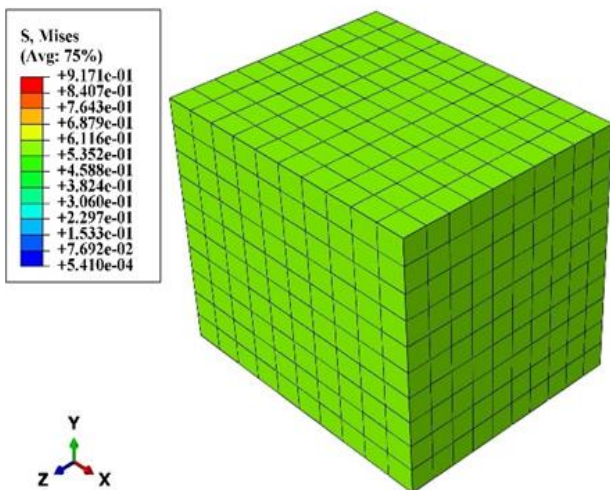
شکل ۶ مقادیر تنش فون میسز در ماتریس

مشاهده شد مقادیر تنش فون میسز در آن نقاط با افزایش تعداد المان‌ها تا ۴۷۷۷ عدد برای نانولوله کربنی و ۴۶۶۲ عدد برای ماتریس تغییر می‌یابد و پس از آن نتایج نسبت از تعداد المان‌ها مستقل شده و افزایش تعداد المان‌ها تغییری در نتایج ایجاد نمی‌کند (شکل ۸).

نانولوله های کربنی کاهش می یابد و متعاقبا کاهش بار بر تمامی حجم نماینده نانوکامپوزیت مشاهده می شود (شکل ۱۲).

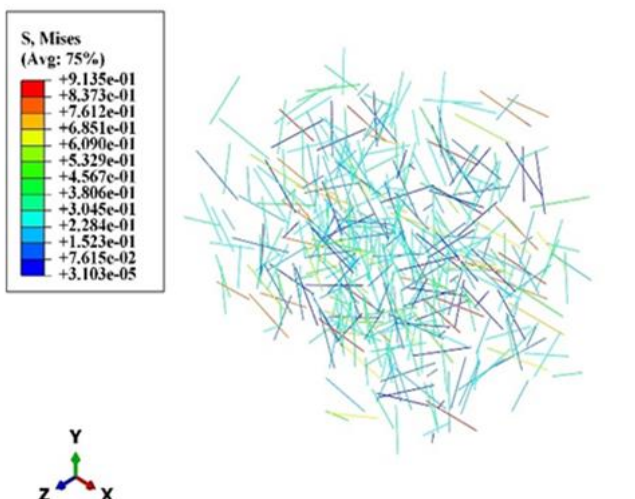


در ادامه برای شبیه سازی در مقیاس مزو یک مکعب با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ نانومتر به عنوان حجم نماینده تعریف شده است و نانولوله کربنی با قطر و طول متوسط به ترتیب ۲ نانومتر و ۲۰ نانومتر در نظر گرفته شده است، همچنین مشبندی در مقیاس مزو نیز با استفاده از المان شش وجهی با ۸ گره برای ماتریس و المان خریا برای نانولوله انجام گرفته است، و باتوجه به اینکه حجم نماینده برای محاسبه خواص الاستیک بارگذاری باید به گونه ای باشد که در جهت های مختلف به دیگر المان های حجم نماینده متصل شود و باید جابه جایی گره ها را کنترل نماید (شکل ۱۰)، لذا ضروری است که هر کدام از گره ها در صفحات متوازی در هنگام اعمال بار دارای مقدار جابه جایی ثابت باشند؛ بنابراین برای ایجاد برهمکنش بین نقاط متناظر از قید معادله استفاده شده است. باتوجه به تعداد بالای گره ها در حجم نماینده اعمال شرایط مرزی متناوب بر هر گره به کمک برنامه نویسی پایتون در نرم افزار آباکوس انجام شده است.

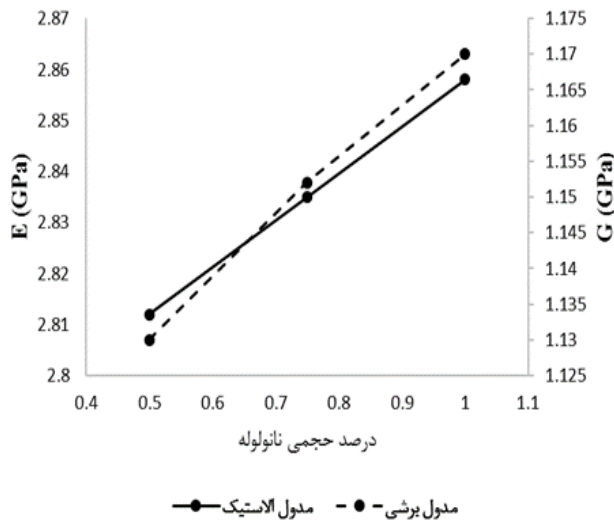


شکل ۱۱ تنش فون میسز در ۰/۵ درصد حجمی نانولوله ها و حجم نماینده

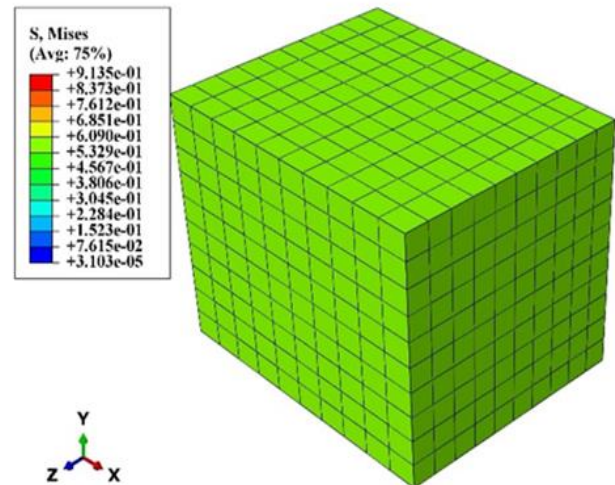
شکل ۱۰ شرایط مرزی متناوب به حجم نماینده



در ادامه کانتورهای تنش فون میسز در مقیاس مزو برای درصد های حجمی ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد برای نانولوله های کربنی و ماتریس در المان حجم نماینده نشان داده شده است (شکل ۱۱، ۱۲، ۱۳). در شکل (۱۱) مشاهده می شود بیشترین تنش به نانولوله های کربنی وارد می شود که نشان می دهد باریشتر بر سطح نانولوله های کربنی نسبت به ماتریس اعمال شده است، و در میان نانولوله ها کربنی، بار بیشینه به نانولوله کربنی اعمال می شود که کمترین زاویه را نسبت به راستای بارکشی دارد و تنش با افزایش زاویه جهت گیری نانولوله کربنی نسبت به راستای بارکشی کاهش می یابد. با افزایش تعداد نانولوله های کربنی به درصد حجمی ۰/۷۵ تنش اعمال شده بر



شکل ۱۴ مقادیر مدول الاستیک و برشی در درصد های حجمی مختلف نانولوله ها

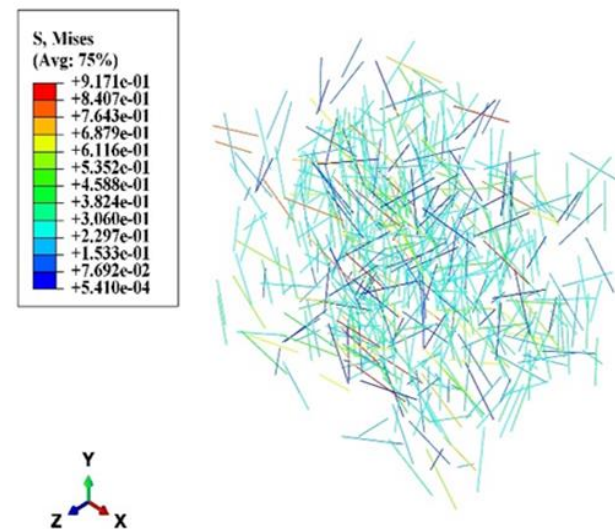


شکل ۱۲ تنش فون میسز در ۰/۷۵ درصد حجمی نانولوله ها و حجم نماینده

در آخر باتوجه به افزایش حجم نانولوله های کربنی به ۱ درصد مشاهده می شود تعداد نانولوله های کربنی که کمترین بار بر آنها اعمال می شود افزایش می یابد که حاکی از افزایش استحکام کششی حجم نماینده است (شکل ۱۳).

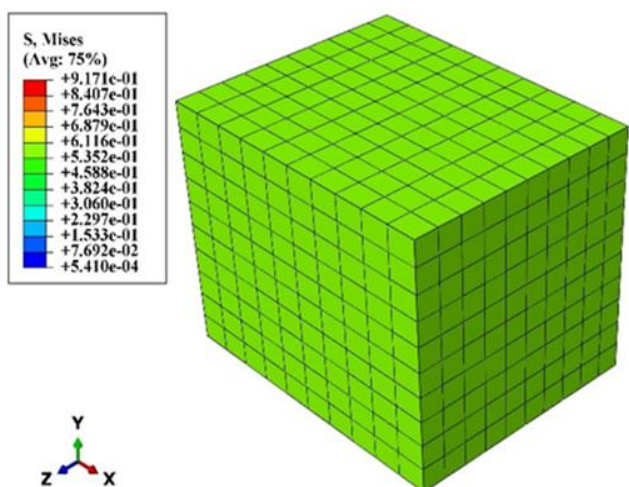
باتوجه به توزیع تصادفی نانولوله های کربنی در ماتریس، نانوکامپوزیت را می توان همسانگرد فرض کرد و مقادیر مدول الاستیک و مدول برشی را از نتایج به دست آمده استخراج کرد، نتایج در شکل (۱۴) نشان داده شده است می توان مشاهده کرد مقادیر مدول الاستیک و مدول برشی با افزایش درصد حجمی نانولوله های کربنی افزایش می یابد.

در تحقیقات گسترده ای با روش های مختلف تجربی و عددی و از منظرهای گوناگون اثر نانولوله های کربنی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت های پلیمری با درصد های وزنی مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



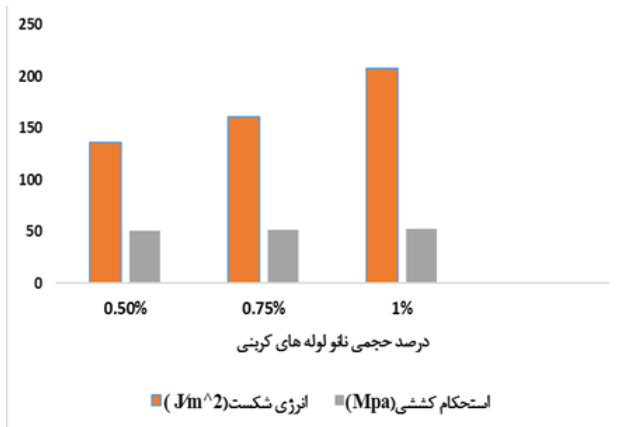
جدول ۲ تاثیر نانولوله های کربنی بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت پایه اپوکسی

درصد حجمی نانولوله	نتایج تجربی کوان و همکاران [۳۲]	نتایج تجربی کوان و همکاران [۳۲]	نتایج پژوهش حاضر	تفاوت با نتایج تجربی
۰/۵	۳/۴۲	۲/۸۴۲	۲/۸۱۲	۱۷/۷۷
۰/۷۵	-	۲/۸۶۲	۲/۸۳۵	-
۱	۳/۳۷	۲/۸۸۴	۲/۸۵۸	۱۵/۱۹



شکل ۱۳ تنش فون میسز در ۱درصد حجمی نانولوله ها و حجم نماینده

- با افزودن نانولوله‌های کربنی در درصدهای حجمی ۰/۵ درصد، ۰/۷۵ درصد و ۱ درصد مقادیر استحکام کششی به ترتیب ۵۰/۵۴، ۵۱/۳۶ و ۵۲/۲۴ مگاپاسکال است که نشان‌دهنده افزایش استحکام کششی با افزایش درصد حجمی نانولوله‌های کربنی است.

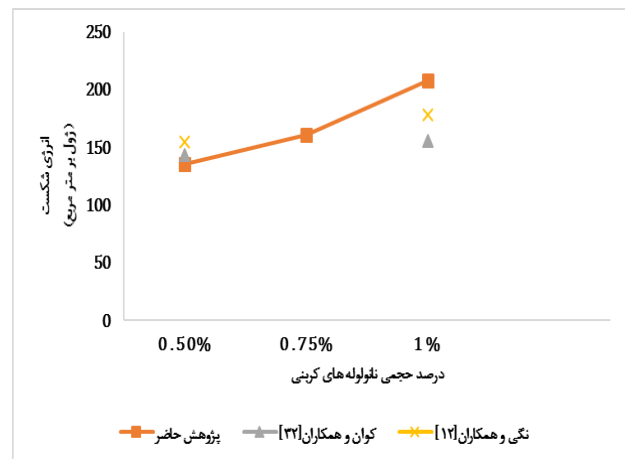


شکل ۱۶ مقادیر استحکام و انرژی شکست در درصد‌های حجمی مختلف نانولوله‌ها

۵- مراجع

- [1] S. Fu, Z. Sun, P. Huang, Y. Li, and N. Hu, "Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review," *Nano Materials Science*, vol. 1, no. 1, pp. 2-30, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.006>.
- [2] Z. U. Haq Khan *et al.*, "Brief review: Applications of nanocomposite in electrochemical sensor and drugs delivery," *Frontiers in Chemistry*, vol. 11, p. 1152217, 2023. DOI: 10.3389/fchem.2023.1152217.
- [3] D. Venkatesan, J. Aravind Kumar, and R. Mohana Prakash, "Synthesis, Properties, and Applications of Polymer Nanocomposite Matrices," *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*, pp. 465-485, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-10614-0_65-1.
- [4] M. S. Darwish, M. H. Mostafa, and L. M. Al-Harbi, "Polymeric nanocomposites for environmental and industrial applications," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 3, p. 1023, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031023>.
- [5] M. A. Maghsoudlou, R. B. Isfahani, S. Saber-Samandari, and M. Sadighi, "Effect of interphase, curvature and agglomeration of SWCNTs on mechanical properties of polymer-based nanocomposites: Experimental and numerical investigations," *Composites Part B: Engineering*,

با توجه به درصدهای حجمی موردنظر در این پژوهش به‌منظور صحت‌سنجی نتایج عددی به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود نتایج به‌دست‌آمده برای مدول الاستیک نانوکامپوزیت پلیمری در درصد‌های وزنی مختلف با نتایج تجربی مقاله کوان [۳۲] و نیز مدل هالپین-تسای [۳۲] مقایسه شده است که نشان‌دهنده هم‌خوانی قابل‌قبول میان نتایج است (جدول ۲). در ادامه (شکل ۱۵) نتایج بدست آمده برای انرژی شکست در این پژوهش با نتایج تجربی مراجع [۳۲] و [۱۲] مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۱۵ اثر نانولوله‌های کربنی بر انرژی شکست

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نانولوله‌های کربنی با توزیع تصادفی و همچنین با مقادیر بالای سختی و استحکام به نسبت ماتریس پلیمری و همچنین استحکام ناشی از چسبندگی به هنگام اعمال بار خارجی، سختی و استحکام ماتریس را افزایش می‌دهند و منجر به بهبود خواص مکانیکی و شکست ماتریس می‌شوند، همچنین مقادیر استحکام کششی و انرژی شکست برای درصد‌های وزنی مختلف (شکل ۱۶) با استفاده از روش الیاف ناپیوسته با کدنویسی پایتون در نرم افزار اجزای محدود آباکوس با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان کرد:

- مدل الیاف ناپیوسته با درصدهای خطای زیر ۲۰ درصد نسبت به نتایج تجربی دقت قابل‌قبولی برای تخمین مدول الاستیک نانوکامپوزیت پلیمری دارد.
- با استفاده از مدل الیاف ناپیوسته با در نظر گرفتن قطر، طول و فاصله مرکز نانولوله از ترک و جهت‌گیری آن‌ها انرژی شکست برای درصدهای حجمی ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد به ترتیب ۱۳۶، ۱۶۱ و ۲۰۸ ژول بر مترمربع است که بیشترین مقدار مربوط به نمونه ۱ درصد است.

- [14] G. T. Truong and K.-K. Choi, "Effect of short multi-walled carbon nanotubes on the mode I fracture toughness of woven carbon fiber reinforced polymer composites," *Construction and Building Materials*, vol. 259, p. 119696, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119696>.
- [15] M. Ahmadi, R. Ansari, and H. Rouhi, "Studying buckling of composite rods made of hybrid carbon fiber/carbon nanotube reinforced polyimide using multiscale FEM," *Scientia Iranica*, vol. 0, no. 0, pp. 0-0, 2018. DOI: 10.24200/sci.2018.5722.1444.
- [16] I. Charitos, A. Drougkas, and E. Kontou, "Prediction of the elastic modulus of LLDPE/CNT nanocomposites by analytical modeling and finite element analysis," *Materials Today Communications*, vol. 24, p. 101070, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101070>.
- [17] H. Shin, "Multiscale model to predict fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites," *Composite Structures*, vol. 272, p. 114236, 2021. DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.101070.
- [18] N. Shirodkar, S. Cheng, and G. D. Seidel, "Enhancement of Mode I fracture toughness properties of epoxy reinforced with graphene nanoplatelets and carbon nanotubes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 224, p. 109177, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109177>.
- [19] T. Xu, Z. Qi, Y. Tan, J. Tian, and X. Li, "Effect of multiwalled carbon nanotube diameter on mechanical behavior and fracture toughness of epoxy nanocomposites," *Materials Research Express*, vol. 8, no. 1, p. 015014, 2021. DOI: 10.1088/2053-1591/abd864.
- [20] K. Bhowmik *et al.*, "Influence of multiwalled carbon nanotube on progressive damage of epoxy/carbon fiber reinforced structural composite," *Polymer Composites*, vol. 43, no. 11, pp. 7751-7772, 2022. DOI: 10.1002/pc.26877.
- [21] S. Tamayo-Vegas, A. Muhsan, C. Liu, M. Tarfaoui, and K. Lafdi, "The effect of agglomeration on the electrical and mechanical properties of polymer matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes," *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1842, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14091842>.
- [22] Z. Song, Y. Li, A. Carpinteri, S. Wang, and B. Yang, "Interphase elastic properties of carbon nanotube-epoxy composites and their application in multiscale analysis," *Materials & Design*, vol. 221, p. 110996, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110996>.
- vol. 175, p. 107119, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107119>.
- [6]p. Mohsenzadeh mobarakeh, H. Golestanian, and Y. tadi beni, "Investigating the effects of length, diameter and chirality on the mechanical properties of defective carbon nanotubes," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME*, vol. 21, no. 1, pp. 188-217, 2019. DOI: 10.30506/IJMEP.2021.526938.1774.
- [7] M. Dastmard, R. Ansari, and S. Rouhi, "Prediction of axial Young's modulus of epoxy matrix reinforced by group-IV nanotube: A finite element investigation," *Mechanics of Materials*, vol. 157, p. 103819, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103819>.
- [8] R. Yazdanparast and R. Rafiee, "Investigating the influence of pull-out speed on the interfacial properties and the pull-out behavior of CNT/polymer nanocomposites," *Composite Structures*, vol. 316, p. 117049, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117049>.
- [9] M. J. S. Zuberi and V. Esat, "Investigating the mechanical properties of single walled carbon nanotube reinforced epoxy composite through finite element modelling," *Composites Part B: Engineering*, vol. 71, pp. 1-9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.020>.
- [10] A. Alian, S. Kundalwal, and S. Meguid, "Multiscale modeling of carbon nanotube epoxy composites," *Polymer*, vol. 70, pp. 149-160, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.014>.
- [11] G. Arora and H. Pathak, "Modeling of transversely isotropic properties of CNT-polymer composites using meso-scale FEM approach," *Composites Part B: Engineering*, vol. 166, pp. 588-597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.061>.
- [12] A. Negi, G. Bhardwaj, J. Saini, and N. Grover, "Crack growth analysis of carbon nanotube reinforced polymer nanocomposite using extended finite element method," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 5, pp. 1750-1770, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406218776034>.
- [13] A. Esmaili *et al.*, "An experimental and numerical investigation of highly strong and tough epoxy based nanocomposite by addition of MWCNTs: Tensile and mode I fracture tests," *Composite Structures*, vol. 252, p. 112692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112692>.

- [29] ""Abaqus Analysis User's Manual,Version 2016", 2016 ed, 2016.
- [30] H. Van Quy and S. T. T. Nguyen, "Experimental analysis of coir fiber sheet reinforced epoxy resin composite," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 642, no. 1, p. 012007: IOP Publishing.
- [31] S. Abdalla, F. Al-Marzouki, A. A. Al-Ghamdi, and A. Abdel-Daiem, "Different technical applications of carbon nanotubes," *Nanoscale research letters*, vol. 10, pp. 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1056-3>.
- [32] D. Quan, J. L. Urdániz, and A. Ivanković, "Enhancing mode-I and mode-II fracture toughness of epoxy and carbon fibre reinforced epoxy composites using multi-walled carbon nanotubes," *Materials & Design*, vol. 143, pp. 81-92, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.051>.
- [23] M. C. Maurya, S. Jawaid, and A. Chakrabarti, "Flexural Behaviour of Nanocomposite Plate with CNT Distribution and Agglomeration Effect," *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, vol. 10, no. 1, pp. 123-136, 2023. DOI: 10.22075/MACS.2022.28078.1426.
- [24] R. H. Alasfar, S. Ahzi, N. Barth, V. Kochkodan, M. Khraisheh, and M. Koç, "A review on the modeling of the elastic modulus and yield stress of polymers and polymer nanocomposites: effect of temperature, loading rate and porosity," *Polymers*, vol. 14, no. 3, p. 360, 2022. DOI: 10.3390/polym14030360.
- [25] P. Curtis, M. Bader, and J. Bailey, "The stiffness and strength of a polyamide thermoplastic reinforced with glass and carbon fibres," *Journal of Materials Science*, vol. 13, pp. 377-390, 1978. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101070.
- [26] M. Maalej, V. C. Li, and T. Hashida, "Effect of fiber rupture on tensile properties of short fiber composites," *Journal of engineering mechanics*, vol. 121, no. 8, pp. 903-913, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:8\(903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:8(903)).
- [27] S. Kareem, L. S. Al-Ansari, and L. A. Gömze, "Modeling of Modulus of elasticity of Nano-Composite Materials: Review and Evaluation," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2315, no. 1, p. 012038: IOP Publishing.
- [28] ""Python 2.7.3. Python Software Foundation", ed, 2012.

تخمین ضرایب آیرودینامیکی هواپیما با روش حداقل مربعات بهبود یافته بر مبنای داده های آزمایشی

چکیده: این مقاله با هدف بررسی پایداری و تخمین ضرایب آیرودینامیکی هواپیما بر مبنای داده های پرواز آزمایشی تهیه شده است. روش حداقل مربعات پیشنهادی برای تخمین این ضرایب با استفاده از داده های واحد اندازه گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت یاب جهانی (GPS) مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش برای نخستین بار تخمین این ضرایب را بر روی یک هواپیمای بال بالا و در مانورهای پروازی مختلف اعم از: بلند شدن، نشست، انواع گردش ها و با بهره گیری از داده های پاسخ زمانی و فرکانسی مبتنی بر داده های پرواز حقیقی اجرا کرده است. در این مقاله تطابق مسیر پروازی ضبط شده هواپیما با مسیر پروازی رسم شده از خروجی نرم افزار MATLAB ارزیابی شده است و خروجی مدل تطابق مسیر پروازی را تأیید کرده است. همچنین، برای بهبود تخمین ضرایب آیرودینامیکی، تغییری در روش حداقل مربعات با استفاده از ورودی های گذشته برای تخمین یک مقدار اعمال شده است. روش توضیح داده شده در این مقاله در 5 آزمایش با استفاده از داده های پروازی واقعی از هواپیما ارزیابی شده است. در نهایت، حداکثر خطای تخمین ایجاد شده توسط روش بهبود یافته 6/7% است که مربوط به ضریب ممان پیچشی بوده است.

واژه های راهنما: تخمین ضرایب آیرودینامیکی، روش حداقل مربعات، شناسایی سیستم، بررسی میدانی، هواپیمای بال بالا

عطا عمادیان

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمدرضا سجادی*

استادیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه شیراز، شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: 1402/07/16

بازنگری: 1402/09/13

پذیرش: 1402/10/23

Ata Emadian
MSc. Student

Mohammad Reza
Sajjadi*

Assistant Professor,
School of Mechanical
Engineering,
Shiraz University,
Shiraz

Estimating aerodynamic coefficients of aircraft by improved least squares method based on experimental data

Abstract: This article aims to investigate the stability and estimate the aerodynamic coefficients of an aircraft based on experimental flight data. The least squares method was used to estimate these coefficients by using data from an inertial measurement unit (IMU) and global positioning system (GPS). This research, for the first time, has estimated these coefficients for a high-wing aircraft and during various flight maneuvers, including takeoff, landing and variant turns. It has been conducted utilizing time and frequency response data based on actual flight. In this article, the match between the recorded flight path of the aircraft and the flight path plotted by MATLAB software output was evaluated, and the output of the flight path model confirmed this match. Moreover, to improve the estimation of aerodynamic coefficients, the least squares method was modified using past inputs to estimate a value. The method explained in this article was evaluated in 5 experiments using actual flight data from the aircraft. Finally, the maximum estimation error generated by the modified method is 6.7%, which was related to the pitching moment coefficient.

Keywords: Estimation of aerodynamic coefficients, Least squares method, System Identification, Field investigation, High Wing aircraft

1- مقدمه

استفاده از داده‌های تجربی پروازی نسبت به روش‌های تونل باد و نرم‌افزارهای کامپیوتری دارای مزایای مهمی است. این داده‌ها باعث دستیابی به دقت و واقعیت بیشتر در محاسبه ضرایب آیرودینامیکی می‌شوند، زیرا شرایط واقعی پرواز را با تمام عوامل ناپایداری جریان هوا و توربولانس‌ها بررسی می‌کند. همچنین، این روش از نظر اقتصادی و زمانی بهتر از تونل باد است؛ زیرا به تجهیزات گران‌قیمت و آزمون‌های آیرودینامیکی طولانی‌مدت نیاز ندارد و امکان تنظیم شرایط آزمایش در طول پرواز را فراهم می‌سازد.

ژانگ و همکاران یک روش ارزیابی کمی را برای امنیت پرواز آزمایشی بر اساس تئوری فازی پیشنهاد و ارزیابی جامعی از عوامل ایمنی ارائه می‌کند [6]. پاموک استفاده از روش‌های چابک را در آزمایش‌های پروازی بررسی می‌کند و کاربرد یک مدل چابک را پیشنهاد می‌کند [7].

ژینگ و همکاران عوامل انسانی را در حوادث هوایی با استفاده از شبیه‌سازهای پرواز، با تمرکز بر حجم کار و رفتار خلبانان در سناریوهای حوادث ناگهانی تجزیه و تحلیل می‌کند [8]. کوناکی و همکاران تحقیقاتی را در مورد فرود دقیق مولتی کوپترها و پهپادهای عمود پرواز بر روی سکوه‌های فرود متحرک ارائه می‌کند که با استفاده از فیلتر گسترده کالمن و سیستم UWB¹ به دقت فرود بالا دست می‌یابد [9].

آلانز و همکاران با توجه به اهمیت ضرایب آیرودینامیکی اقدام به تخمین ضرایب آیرودینامیکی یک هواپیمای بدون سرنشین عمود پرواز با در نظر گرفتن باد، کرده‌اند. بدین منظور ابتدا در یک شبیه‌ساز رباتیک تحت عنوان گازبو² حرکت پهپاد مدل‌سازی شده و سپس در شرایط واقعی این مدل آزمایش و ضرایب آیرودینامیکی در این شرایط تخمین زده شده است [10]. شمای جسم مورد استفاده در این پژوهش یک پهپاد بود.

در این پژوهش از یک هواپیمای سرنشین دار و بال بالا برای نخستین بار از روش پیشنهادی و در آزمایشات استفاده شد.

کومار و غوش، روشی برای تخمین پارامترهای آیرودینامیکی از داده‌های پروازی یک هواپیمای تجاری ارائه می‌کنند. آنها تنها از مانورهای محدود در پرواز استفاده کرده‌اند. در مقابل، در این پژوهش با انجام مانورهای گسترده‌تر و غیرمعمول (مانند: کاهش سرعت تا واماندگی، گردش‌های سریع، پرواز با حداقل سرعت و غیره) مدل جامع‌تری از سیستم در محدوده وسیع‌تری از شرایط پروازی ارائه شد [11].

برآورد ضرایب آیرودینامیکی با استفاده از داده‌های حقیقی پرواز یک حوزه فعال تحقیقاتی در صنعت هوافضا است. این پژوهش مطالعه‌ای را در مورد تخمین ضرایب آیرودینامیکی هواپیما با استفاده از داده‌های پروازی ارائه می‌دهد. هدف از این پژوهش بهبود درک رفتار دینامیکی هواپیما در پرواز و کمی کردن روابط بین ورودی‌های کنترلی و حرکت هواپیما است. در این تحقیق، از داده‌های پرواز آزمایشی جمع‌آوری شده از هواپیما در طول مانورهای مختلف پروازی برای تخمین ضرایب آیرودینامیکی استفاده شده است. در این پژوهش از ترکیب داده‌های تجربی و مدل‌سازی با استفاده از روش حداقل مربعات پیشنهادی برای تخمین ضرایب آیرودینامیکی استفاده شده است.

جانسون و همکاران، در این تحقیق از داده‌های آنلاین برای پیاده‌سازی حداقل مربعات معمولی استفاده کرده‌اند، اما از داده‌های تاخیر یافته استفاده ننموده‌اند. در مقایسه این پیاده‌سازی در کتابخانه‌های پرطرفدار پایتون، تفاوت‌های قابل توجهی در نتایج آن‌ها مشاهده شده است [1]. یانگ روش‌های المان محدود حداقل مربعات ناپیوسته را برای مسائل الاستیسیته خطی روی مش‌های نامناسب، با در نظر گرفتن شرایط مختلف و الزامات مختلف، پیشنهاد و تحلیل می‌کند [2]. کای و همکارانش بر روی روش‌های المان محدود حداقل مربعات تطبیقی برای مسائل انتشار واکنش تحت همرفت تمرکز دارد و تخمین‌ها و خطا را ارائه می‌کند [3]. لی و همکارانش یک روش المان محدود حداقل مربعات تثبیت شده را برای کاهش رفتار نوسانی در تقریب چند جمله‌ای ارائه می‌دهد [4]. حل دوگانه معادلات دیفرانسیل جزئی باعث افزایش حجم محاسبات در این روش گردیده است. در روش پیشنهادی در این پژوهش حجم محاسبات حتی با توجه به در نظر گرفتن وابستگی زمانی بین داده‌ها، کاهش یافته است.

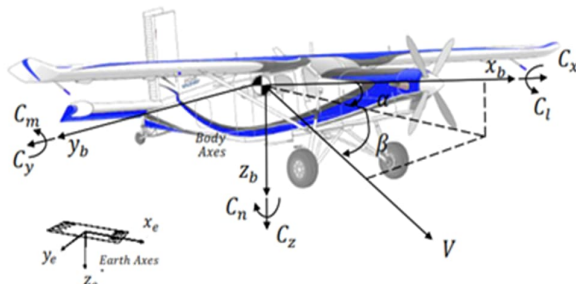
در پژوهش سجادی و عمادیان، ضرایب آیرودینامیکی یک هواپیما با استفاده از روش حداقل مربعات با داده‌های تأخیر یافته تخمین زده شده و با روش حداقل مربعات معمولی مقایسه شده است. برای به‌دست‌آوردن انحراف سطوح فرمان از شبیه‌سازی مسیر حرکت در نرم‌افزار سیمولینک استفاده شده و ورودی دسته‌گاز به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است [5]. در پژوهش حاضر، از اندازه‌گیری دقیق انحراف سطوح فرمان و ورودی متغیر دسته‌گاز در طول پرواز استفاده شده است. نمودار انحراف سطوح فرمان و تغییرات دسته‌گاز در این پژوهش ارائه شده است.

² Gazebo¹ Ultra Wide Band

برای مدل‌سازی این هواپیما از داده‌های حقیقی هواپیما در مانورهای پروازی گسترده و خاص اعم از: پرواز تا سرعت واماندگی، انواع گردش‌ها، سرعت با حداقل پرواز و غیره استفاده شده است. ثانیاً، پژوهش به بررسی تطابق مسیر پروازی ضبط شده هواپیما با مسیر پروازی رسم شده از خروجی نرم‌افزار متلب پرداخته است. نتایج نشان داده‌اند که خروجی مدل به طور کامل تطابق مسیر پروازی را تأیید کرده و این ارتباط باعث افزایش اعتماد به دقت و اعتبار پژوهش می‌شود.

2- تئوری پژوهش

مروری بر دینامیک هواپیما و نظریه پژوهش در این بخش ارائه شده است. فریم‌های مرجع، چارچوب‌ها، نیروها و گشتاورهای اعمال شده بر روی هواپیما در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل 1 فریم‌های مرجع هواپیمای بال بالا در محورهای بدنی¹ (x_b, y_b, z_b) و محورهای زمین (x_e, y_e, z_e)

معادلات حالت پیوسته و خروجی را می‌توان به صورت معادلات (1) و (2) بیان کرد.

$$\dot{h}(\tau) = \kappa[h(\tau), u(\tau), w(\tau), \tau] \quad (1)$$

$$j(\tau) = \lambda[h(\tau), u(\tau), \tau] \quad (2)$$

در اینجا عبارت $h \in \mathbb{R}^{n_h}$ نشانگر بردار حالت، عبارت $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ اشاره به ورودی کنترلی، $j \in \mathbb{R}^{n_o}$ به خروجی سیستم و w نشان‌دهنده نویز سیستم با میانگین صفر است. تمام فرایندها از زمان τ_0 تا زمان $\tau \geq \tau_0$ متغیر است. نمایش کلی مدل پرواز شامل توابع $\kappa(\cdot)$ و $\lambda(\cdot)$ می‌شود. برای مدل‌سازی هواپیما، فرض می‌شود که این وسیله به عنوان یک جسم صلب عمل می‌کند، به گونه‌ای که حرکت کلی آن با استفاده از قانون دوم نیوتن قابل توصیف است.

دای و همکاران باتوجه به نیاز پارامترهای آیرودینامیکی در طراحی سیستم کنترل هواپیمای الکتریکی، یک الگوریتم شناسایی پارامترهای آیرودینامیکی بر اساس تخمین حداکثر احتمال ارائه شده است. ابتدا از مدل آیرودینامیک خطی برای استخراج معادله حالت و معادله مشاهده مورد نیاز برای شناسایی استفاده می‌شود. سپس بر اساس معیار تخمین حداکثر احتمال و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی نیوتن - رافسون، شناسایی پارامترهای آیرودینامیکی انجام می‌شود [12].

وانگ و همکاران یک روش جدید برای شناسایی پارامترهای آیرودینامیکی هواپیما با استفاده از روش شناسایی گام به گام و ترکیبی ارائه داده‌اند. این روش شامل حل پارامترهای آیرودینامیکی توسط معادلات تعادل و شناسایی آنها به صورت مرحله‌ای است [13].

ورما و پیادا، شبکه‌های عصبی بازگشتی برای تخمین پارامترهای آیرودینامیکی طولی مورد بررسی قرار داده‌اند. نشان داده شده است که رویکرد شبکه‌های عصبی بازگشتی برای نمایش مدل فضای حالت قابل قبول است و می‌تواند برای نمایش مشتقات آیرودینامیکی استفاده شود. در این پژوهش کارایی روش شبکه‌های عصبی بازگشتی با استفاده از داده‌های پرواز شبیه‌سازی شده و داده‌های پرواز واقعی نشان داده شده است [14]. تحقیق بر روی مدل‌سازی آیرودینامیکی هواپیمای متقارن با استفاده از روش حداقل مربعات متعامد انجام شده است. الگوریتم حداقل مربعات متعامد، همراه با کاهش خطا، برای مدل‌سازی ضرایب آیرودینامیکی غیرخطی و برآورد پارامترها استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی هواپیمای F-16 در طول مانورهای دامنه بزرگ آزمایش شده است [15].

یکی دیگر از پیشرفت‌های اخیر استفاده از رویکردهای مبتنی بر مدل است که در آن از مدل‌های ریاضی برای توصیف رفتار دینامیکی هواپیما و روابط بین ورودی‌های کنترل و حرکت هواپیما استفاده می‌شود. مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایش پرواز پارامترسازی می‌شوند و ضرایب آیرودینامیکی به عنوان بخشی از این فرایند برآورد می‌شوند.

نوآوری در این پژوهش از دو جهت حائز اهمیت است. اولاً، از روش حداقل مربعات پیشنهادی با بهره‌گیری از ورودی‌های گذشته و با در نظر گرفتن وابستگی زمانی بین داده‌ها برای مدل‌سازی و تخمین ضرایب آیرودینامیکی یک هواپیمای بال بالا استفاده شده است. این رویکرد، امکان بهبود دقت و کارایی مدل را فراهم می‌کند.

¹ Body Axes

1-2- دینامیک هواپیما

با استفاده از قانون دوم نیوتن در شکل‌های انتقالی و چرخشی، نیروهای F_x ، F_y و F_z در فرم اجزای محور دستگاه بدنی¹ را می‌توان با معادلات (3) - (5) به دست آورد (روابط این بخش از مرجع [16] انتخاب شده است).

$$F_x = m(\dot{u} + qw - rv) \quad (3)$$

$$F_y = m(\dot{v} + ru - pw) \quad (4)$$

$$F_z = m(\dot{w} + pv - qu) \quad (5)$$

در اینجا، اجزای برداری شامل $\mathbf{V}_b = [u, v, w]$ مؤلفه‌های سرعت انتقالی هواپیما در دستگاه بدنی، $\boldsymbol{\omega}_b = [p, q, r]$ نرخ چرخش هواپیما در دستگاه بدنی و m جرم شمای جسم² است.

باتوجه به ممان‌های اینرسی هواپیما، نرخ‌های زاویه‌ای و شتاب‌های زاویه‌ای، ممان‌ها طبق معادلات (6) تا (8) تعریف می‌شوند:

$$M_x = I_{xx}\dot{p} - I_{xz}(\dot{r} + pq) - (I_{yy} - I_{zz})qr \quad (6)$$

$$M_y = I_{yy}\dot{q} - I_{xz}(r^2 - p^2) - (I_{zz} - I_{xx})rp \quad (7)$$

$$M_z = I_{zz}\dot{r} - I_{xz}(\dot{p} - qr) - (I_{xx} - I_{yy})pq \quad (8)$$

که در آن I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} درایه‌های ماتریس اینرسی متقارن هواپیما هستند.

در جدول (1) درایه‌های ماتریس اینرسی هواپیمای مورد نظر در آزمایش گزارش شده است.

جدول 1 ممان اینرسی هواپیمای مورد نظر در آزمایش

درایه‌های ماتریس اینرسی	
$I_{xx} (Kg.m^2)$	1285
$I_{yy} (Kg.m^2)$	1824
$I_{zz} (Kg.m^2)$	2666
$I_{xz} (Kg.m^2)$	0

2-2- نیروها و گشتاورهای اعمال شده

نیروها و گشتاورهای اعمال شده در سمت چپ معادلات (3) تا (8) از آیرودینامیک وسیله پرنده، گرانش و نیروی محرکه ناشی می‌شوند. ورودی‌های اولیه شامل کنترل غلت، فراز و سمت هواپیما به ترتیب از شهپرها، سکان افقی و سکان عمودی ناشی می‌شوند. از آنجاکه نیروی گرانشی از طریق مرکز جاذبه عمل می‌کند و به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، هیچ گشتاور گرانشی روی شمای جسم تولید نمی‌شود؛ بنابراین معادلات فوق را می‌توان به‌عنوان مؤلفه‌های دستگاه بدنی برای نیروها و گشتاورهای اعمال شده به‌صورت معادلات (9) و (10) نوشت:

$$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_A = m\dot{\mathbf{V}}_b + \boldsymbol{\omega}_b \times m\mathbf{V}_b \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_T + \mathbf{M}_A = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}}_b + \boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}_b \quad (10)$$

نیروهای اعمال شده در این معادلات از نیروی گرانش (\mathbf{F}_G)، رانش (\mathbf{F}_T) و آیرودینامیک (\mathbf{F}_A) ناشی می‌شوند. گشتاورها نیز حاصل رانش (\mathbf{M}_T) و آیرودینامیک (\mathbf{M}_A) هستند. سهم نیروی گرانش در شکل برداری همانند معادله (11) است:

$$\mathbf{F}_G = \begin{bmatrix} -mg\sin(\theta) \\ mg\sin(\phi)\cos(\theta) \\ mg\cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

در این رابطه، ϕ و θ نمایانگر زوایای اوپلر هستند. در این فرمول وابستگی اجزای نیروی گرانش به جهت‌گیری هواپیما نسبت به محور زمین را نشان داده می‌شود. نیروی رانش موتور به شرح معادله (12) است.

$$\mathbf{F}_T = T \begin{bmatrix} \Gamma_{T_x} \\ \Gamma_{T_y} \\ \Gamma_{T_z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\Gamma_{T(i)}$ به عنوان ثابت چرخش افست خط رانش³ تعریف می‌شود و رانش موتور با تابع $T = f(\Omega, V)$ توصیف می‌شود که تابعی از سرعت چرخش موتور هواپیما (Ω) و سرعت هواپیما (V) است. گشتاور رانش موتور توسط معادله (13) بیان می‌شود.

$$\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} -F_{T_y}\Gamma_{cg_z} + F_{T_z}\Gamma_{cg_y} \\ F_{T_x}\Gamma_{cg_z} + F_{T_z}\Gamma_{cg_x} \\ -F_{T_x}\Gamma_{cg_y} + F_{T_y}\Gamma_{cg_x} \end{bmatrix} \quad (13)$$

³ Thrust-line Offset Rotation Constants

¹ Body Coordinates Frame

² Platform

است. سایر پارامترها با توجه به سرعت واقعی V ، میانگین وتر آیرودینامیکی بال \bar{c} و دهانه بال b بدون بعد هستند.

3-1- رهیافت تخمین پارامتر

این رهیافت شامل یافتن مقادیر پارامتر مدل ناشناخته Θ برای یک ساختار مدل فرضی بر اساس اندازه‌گیری مشاهدات نویز \mathbf{z} است. برآوردگر تابعی از این مشاهدات است که مقدار تخمینی $\hat{\Theta}$ را برای پارامترهای ناشناخته Θ ایجاد می‌کند.

برای مدلی که خطی فرض می‌شود، خروجی y توسط معادله (16) داده می‌شود.

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\Theta \quad (16)$$

در اینجا ماتریس \mathbf{X} ورودی سیستم است که عبارت است از:

$$\mathbf{X} = [V \quad \dot{V} \quad \omega \quad \alpha \quad \beta \quad \phi \quad \theta \quad \psi \quad \delta]$$

معادله مشاهده‌گر³ مطابق معادله (17) عبارت است از:

$$\mathbf{z} = \mathbf{X}\Theta + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (17)$$

در فرمول بالا، متغیر \mathbf{z} نمایانگر مشاهدات انجام‌شده و متغیر $\boldsymbol{\varepsilon}$ نمایانگر نویز اندازه‌گیری است. این مشاهدات می‌توانند با ترتیب مجدد معادلات (9) تا (14) به دست آیند و می‌توانند به صورت معادلات (18) و (19) نمایش داده شوند:

$$\mathbf{z}_F = \frac{1}{\bar{q}S} [(m\dot{\mathbf{V}}_b + \boldsymbol{\omega}_b \times m\mathbf{V}_b) - \mathbf{F}_G - \mathbf{F}_T] \quad (18)$$

$$\mathbf{z}_M = \frac{1}{\bar{q}S\zeta} [(\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}}_b + \boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}_b) - \mathbf{M}_T] \quad (19)$$

در معادله (18) $\mathbf{z}_F = [C_X \quad C_Y \quad C_Z]$ و در معادله (19) $\mathbf{z}_M = [C_l \quad C_m \quad C_n]$ می‌باشد. مقدار ζ برای محاسبه C_m برابر مقدار \bar{c} و برای محاسبه C_l و C_n برابر مقدار b می‌باشد.

اکنون، تخمین $\hat{\Theta}$ را می‌توان با حل معادله (17) به دست آورد. در نهایت برآورد خروجی $\hat{\mathbf{y}}$ را می‌توان بر اساس مدل برآورد شده همانند معادله (20) بازسازی کرد.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\Theta} \quad (20)$$

$\Gamma_{CG(i)}$ انحراف خط رانش نسبت به مرکز جاذبه (CG) هواپیما را نمایش می‌دهد. در نهایت مشکل شناسایی سیستم به تعیین نیروهای آیرودینامیکی (\mathbf{F}_A) و گشتاورها (\mathbf{M}_A) کاهش می‌یابد. این نیروها را می‌توان برحسب ضرایب بی‌بعد توسط معادله (14) بیان کرد:

$$\mathbf{F}_A = \bar{q}S \begin{bmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_Z \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_A = \bar{q}S \begin{bmatrix} bC_l \\ \bar{c}C_m \\ bC_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

در این معادله، S ناحیه مرجع بال، b دهانه بال، $\bar{q} = \frac{1}{2}\rho V^2$ فشار دینامیکی، ρ چگالی هوا، V سرعت و \bar{c} میانگین وتر آیرودینامیکی بال است. میانگین وتر آیرودینامیکی¹ به میانگین وتر بال در یک ناحیه خاص از بال یا برخی از بخش‌های آن اطلاق می‌شود.

ضرایب بی‌بعد نیرو ($C_X \quad C_Y \quad C_Z$) و گشتاور ($C_l \quad C_m \quad C_n$) به طور غیرخطی به مؤلفه‌های سرعت انتقالی و زاویه‌ای، زاویه برخورد با جریان هوا² نسبت به بدنه هواپیما، انحرافات سطوح کنترلی و سایر کمیت‌های بی‌بعد بستگی دارند [17]. این وابستگی معمولاً به صورت ریاضی با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم پارامتریک همان‌طور که در [18] و [19] ارائه شده است، مشخص می‌شود.

3- مدل آیرودینامیک

ضرایب آیرودینامیکی بی‌بعدی که در معادله (14) ارائه شده‌اند، می‌توانند به دو دسته حالت طولی و حالت جانبی تقسیم شوند. حالت‌های طولی شامل نیروی روبه‌جلو C_X ، نیروی رو به پایین C_Z ، گشتاور فراز C_m . حالت‌های جانبی شامل نیروی جانبی C_Y ، گشتاور غلت C_l و گشتاور سمت C_n .

ضرایب طولی در درجه اول به حالات طولی و ورودی سکان افقی و ضرایب جانبی به حالات جانبی و ورودی سکان عمودی هواپیما بستگی دارد. وابستگی عملکردی را می‌توان به صورت معادله (15) نمایش داد:

$$C_i = C_i \left(\frac{V}{V_0}, \alpha, \beta, \frac{pb}{2V}, \frac{qc}{2V}, \frac{rb}{2V}, \frac{\dot{\alpha}\bar{c}}{2V}, \frac{\dot{\beta}b}{2V}, \delta \right) \quad (15)$$

برای $i = X, Y, Z, l, m, n$ ، زاویه حمله α ، زاویه لغزش جانبی β و δ نشان‌دهنده تمام ورودی‌های کنترل اعمال‌شده

³ Observer Equation

¹ Mean aerodynamic chord

² Air-relative velocity

3-2- مدل پارامتری

• $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon(1) \ \varepsilon(2) \ \dots \ \varepsilon(M)]^T$ بردار اندازه گیری
خطا $M \times 1$ می باشد.

بردار رگرسیون شامل ساختار مدل فرضی و توابع متغیرهای مستقل است. همان طور که قبلاً ذکر شد، برای مدل حداقل مربعات هیچ احتمال مرتبطی روی پارامترهای مدل $\boldsymbol{\theta}$ یا نویز اندازه گیری $\boldsymbol{\varepsilon}$ وجود ندارد. با این وجود، $\boldsymbol{\varepsilon}$ با میانگین صفر و واریانس ثابت فرض می شود. این موضوع را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) = 0 \quad (23)$$

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T) = \sigma^2 \mathbf{I} \quad (24)$$

اکنون تخمین گر $\boldsymbol{\theta}$ را می توان با حداقل رساندن مجموع مربعات خطا بین اندازه گیری ها و مدل تعیین کرد.

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta})^T (\mathbf{z} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}) \quad (25)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}} = -\mathbf{X}^T \mathbf{z} + \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0} \quad (26)$$

تابع هزینه به شکل $J(\boldsymbol{\theta})$ در معادله (25) ارائه شده است و با کمینه کردن خطا در تابع هزینه و حل معادله (26) می توان به تخمین پارامتر $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ دست یافت. حاصل تخمین گر حداقل مربعات معمولی به شکل زیر می باشد:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{z} \quad (27)$$

باید توجه داشت که $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ یک ماتریس عادی با بردارهای ویژه متعامد⁶ است. مشکلات در ماتریس $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ زمانی پیش می آید که رگرسیون های متشکل از ماتریس \mathbf{X} دارای درجه بالایی از همبستگی⁷ هستند و همچنین مستقل خطی نمی باشند. در این حالت ممکن است مقادیر ویژه نزدیک به صفر باشند. هنگامی که پارامترها برآورد شدند، فرمول اندازه گیری می تواند به صورت زیر بازسازی شود:

$$\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (28)$$

که در آن $\hat{\mathbf{z}}$ تخمین اندازه گیری است. ماتریس کوواریانس مربوط به پارامتر تخمینی $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ یا خطای تخمین $\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}$ به شکل زیر محاسبه می شود:

عبارات مربوط به ضرایب مدل در معادله (17) با روش های مختلفی مانند حداقل مربعات معمولی [19]، حداکثر احتمال [18] و حداقل مربعات بازگشتی [20] قابل محاسبه هستند. در این مقاله، ضرایب مدل با فرمول بندی مسئله به عنوان یک برآوردگر حداقل مربعات ارائه می شود (روابط این بخش از مرجع [21] انتخاب شده است).

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{z} \quad (21)$$

4- مدل سازی سیستم با روش حداقل مربعات

4-1- مفروضات

به منظور ساده سازی مدل، مفروضات خاصی در نظر گرفته شده است که این مفروضات عبارتند از: اولاً، ورودی های سیستم، فرایندهای مستقل و ثابتی¹ هستند. این بدان معنی است که توزیع احتمال مشترک² در فضای ورودی تغییر نمی کند. ثانیاً فرآیند زیربنایی قبلی³ دارای میانگین صفر است.

4-2- برآوردگر حداقل مربعات

در روش حداقل مربعات، مجموع مجذور خطای بین مقدار تخمین زده شده و مقدار اندازه گیری شده به حداقل می رسد. این موضوع هیچ اظهار نظر احتمالی در مورد پارامترها و نویز اندازه گیری شده در اختیار ما قرار نمی دهد. با این حال، اگر نویز گاوسی فرض شود، مدل حداقل مربعات به مدل فیشر⁴ تبدیل می شود که برآوردگر حداکثر احتمال⁵ است [17]. فرم عمومی معادله که برای حداقل مربعات باید به صورت بردار و ماتریس حل گردد، به شکل زیر است:

$$\mathbf{z} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (22)$$

در عبارت فوق:

$$\mathbf{z} = [z(1) \ z(2) \ \dots \ z(M)]^T \bullet$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_D]^T \bullet$$

$$\mathbf{X} = [1 \ \kappa_1 \ \dots \ \kappa_D]^T \bullet$$

⁵ Maximum likelihood estimator

⁶ Orthogonal eigenvectors

⁷ Correlation

¹ Stationary

² Joint probability distribution

³ Prior underlying process

⁴ Fisher model

این معیار نمایانگر دقت برآوردها و دارای عبارات قطری \mathbf{D}^5 می‌باشد: d_{jj} کران پایینی کرامر-رائو برای پارامتر θ_j می‌باشد که در آن $j = 1, 2, \dots, D$ و D تعداد کل رگرسیون‌ها را نشان می‌دهد.

$$\varphi_j = \sqrt{d_{jj}} \quad (35)$$

این معیار نمایانگر بهترین دقت ممکن برای θ_j با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌های اندازه‌گیری z است. اگر θ_j قابل مشاهده باشد، مقدار φ_j کوچک خواهد بود، در حالی که اگر θ_j بزرگ باشد، پارامتر θ_j در این مورد مقادیر کمتری خواهند داشت.

یکی از مشکلات مرتبط با رگرسیون حداقل مربعات این است که این روش فاقد معیار مرتبط با کیفیت پیش‌بینی می‌باشد. به عبارت دیگر، پیش‌بینی‌های انجام شده برای اسکالرها در هر نقطه آزمایش به طور کامل بدون معیار اطمینان یا توزیع پیش‌بینی کامل نمایش داده می‌شود.

5- پیاده‌سازی

این بخش یک نمای کلی از روش پیاده‌سازی برای یادگیری ضرایب آیرودینامیکی از آزمایش مدل را ارائه می‌دهد. چارچوب را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد: آموزش مدل، آزمایش مدل و تخمین از طریق روش حداقل مربعات.

آزمایش مدل برای شناسایی سیستم معمولاً شامل انجام مانورهای برای به حداکثر رساندن محتوای اطلاعات و جمع‌آوری داده‌های پروازی است. در مرحله بعد از ورودی و خروجی سیستم برای یادگیری فرآیندهای مدل پرواز استفاده می‌شود. در نهایت، مدل حداقل مربعات برای تخمین ضرایب آیرودینامیکی با توجه به ورودی‌های سیستم استفاده می‌شود. تمرکز این پژوهش بر آموزش مدل و استنتاج است.

نیروهای آیرودینامیکی حاصل و گشتاورها را می‌توان با استفاده از معادله (14) محاسبه کرد. سپس به همراه بردار گرانش و مدل رانش برای محاسبه کل نیروها و گشتاورهای اعمال شده بر روی شمای جسم استفاده می‌شود. با استفاده از تخمین‌های جدید $\{\mathbf{F}(\cdot), \mathbf{M}(\cdot)\}$ و بردار وضعیت فعلی هواپیما، مشتقات حالت را می‌توان تعیین کرد. اکنون می‌توان از خروجی

$$\text{cov}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = E[(\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta})(\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta})^T] \quad (29)$$

$$= E[(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T (\mathbf{z} - \hat{\mathbf{y}})(\mathbf{z} - \hat{\mathbf{y}})^T \mathbf{X} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}] \quad (30)$$

از ماتریس بالا، می‌توان کرانه‌های کرامر - رائو¹ که جذر عناصر مورب² هستند را تعیین کرد [22]. کران‌های کرامر-رائو از این رو مهم هستند که یک شاخص کلیدی برای شناسایی پارامترها هستند. این معیار بهترین دقت ممکن برای $\boldsymbol{\theta}$ از اطلاعات موجود در داده‌های اندازه‌گیری z است [23]. این موضوع از این رو مهم است که اگر هیچ عملکردی در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده وجود نداشته باشد، هیچ اطلاعاتی در \mathbf{X} وجود نخواهد داشت که بتوان از آن برای شناسایی $\boldsymbol{\theta}$ استفاده کرد؛ بنابراین هرچه پاسخ بزرگ‌تر یا نسبت سیگنال به نویز بزرگ‌تر باشد، اطلاعات بیشتری برای شناسایی پارامترها وجود دارد. این موضوع را می‌توان با دانستن مقدار اطلاعات جمع‌آوری شده در داده‌های اندازه‌گیری شده نیز تعیین کرد. این رویکرد، جایگزین استفاده از حداکثر احتمال³ است. ابتدا باید حساسیت $\mathbf{z}(i)$ به $\boldsymbol{\theta}$ تعیین شود. ماتریس حساسیت $\mathbf{S}(i)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{S}(i) = \left. \frac{\partial \mathbf{z}(i)}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right|_{\boldsymbol{\theta}=\hat{\boldsymbol{\theta}}} \quad (31)$$

که در آن $i = 1, 2, \dots, M$. همچنین ماتریس کوواریانس نویز \mathbf{R} عبارت است از:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{z}(i) - \hat{\mathbf{y}}(i))^T (\mathbf{z}(i) - \hat{\mathbf{y}}(i)) \quad (32)$$

با ترکیب معادلات (25) و (26) می‌توان ماتریس اطلاعات \mathbf{M} را به دست آورد. این یک اندازه‌گیری مستقیم از اطلاعات موجود در داده‌ها است و توسط فرمول زیر داده می‌شود:

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^M \mathbf{S}(i)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(i) \quad (33)$$

معکوس معادله (33) ماتریس پراکندگی \mathbf{D}^4 است که با ماتریس کوواریانس $\boldsymbol{\theta}$ مطابقت دارد و کران پایینی کرامر - رائو را می‌توان از آن یافت. ماتریس پراکندگی عبارت است از:

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1} = \left[\sum_{i=1}^M \mathbf{S}(i)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(i) \right]^{-1} \quad (34)$$

⁴ Dispersion matrix

⁵ Diagonal elements

¹ Cramér-Rao

² Diagonal elements

³ Maximum likelihood

هواپیمای موردنظر، دارای یک دهانه بال با ابعاد 15.9 متر و ظرفیت حمل باری برابر با 2646 پوند (حدود 1200 کیلوگرم) است. وزن برخاستی حداکثر این وسیله هوایی به مقدار 28000 نیوتن محدود شده است. این هواپیما توانایی پرواز با حداکثر سرعت 151 نات را دارا می‌باشد و از یک موتور با توان 550 اسب بخار در سطح دریا برخوردار است.

کنترل این وسیله هوایی از طریق سکان عمودی، افقی و شهپرها انجام می‌شود که این امکان را به آن می‌دهد تا به صورت کامل کنترل شود. هواپیما قادر به پرواز به حداکثر مسافتی حدود 1612 کیلومتر می‌باشد، که این امکان را به آن می‌دهد تا مسافت‌های زیادی را با پایداری و کارایی حداکثری طی کند.

2-6- شبیه‌سازی

در این تحقیق، آزمایش‌ها در دامنه‌های ارتفاع و سرعت‌های متنوعی اجرا شدند. هر یک از آزمایش‌ها، به صورت جداگانه و با دقت ویژه، به بررسی حالت‌های متفاوت هواپیما پرداخته است. این حالت‌ها شامل بلندشدن از زمین، نشست، صعود، نزول و مانورهای مشابه بوده‌اند.

در پژوهش حاضر از 5 آزمایش پروازی مختلف به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی برای داده‌های تجربی استفاده شده است. این آزمایشات از نظر عملیاتی و آب و هوایی گوناگون، از جمله مناطق کوهستانی، شهری، کویری و غیره، انجام شدند. انتخاب تنوع مکانی و شرایط محیطی این امکان را فراهم می‌کند تا پایداری و کارایی الگوریتم در شرایط واقعی متغیر و متنوع بررسی شود. پیچیدگی‌های زیادی نظیر نصب سنسورها، جمع‌آوری داده‌های متنوع، تست پرواز در شرایط جوی مختلف و انجام مانورهای متنوع این پژوهش را همراه ساخته‌اند. با اجرای چندین پرواز و مانورهای مختلف، دقت در انجام تخمین‌ها به حداکثر رسید و الگوریتم به خوبی در شرایط مختلف پروازی به چالش کشیده شد.

در طول هر آزمایش، هواپیما به واکنش‌های مختلف در مقابل محیط پرداخته و این امکان را پیدا کرده است که با شرایط مختلف مواجه شود و عملکرد خود را بهبود بخشد.

3-6- سنسورها

جهت مکان‌یابی و ثبت داده‌های پروازی، از تجهیزاتی چون واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) بهره‌برداری می‌شود. این دو سیستم به طور هم‌زمان به

برای طراحی کنترلر پرواز، توسعه شبیه ساز و درک کیفیت کنترل هواپیما استفاده کرد.

6- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش مدل پارامتری حداقل مربعات پیشنهادی را برای مقایسه عملکرد، پیاده‌سازی و آزمایش می‌کنیم. این آزمایش‌ها بر روی هواپیما انجام می‌شود که در آن ساختار مدل مشخص است. در شکل (2) وسیله پرنده انتخاب شده که یک هواپیما بال بالا می‌باشد، نشان داده شده است.

6-1- شمای جسم

شمای جسم مورد استفاده برای انجام آزمایش، یک وسیله پروازی فراگیر و چندمنظوره است که از طراحی هواپیمای بال بالا بهره می‌برد. این هواپیما، به عنوان یک هواپیمای تک‌موتوره چندمنظوره، با قابلیت نشست و برخاست کوتاه، توربوپراپ و استفاده از باندهای نامناسب، یک سیستم چندکاره فوق‌العاده است. همچنین، این وسیله پرنده به دلیل توانایی زود پروازی، در مدت زمان کوتاهی قابل تغییر از حالت باربری به حالت مسافری می‌باشد. این امکان به این هواپیما اجازه می‌دهد تا در مأموریت‌های گوناگونی از قبیل تجسس و نجات، آمبولانس هوایی، جستجوی هوایی و عکس‌برداری، فروریختن چتربازان، بذریاشی گیاهان، آتش‌نشانی و حتی باران‌زا کردن ابرها به کار گرفته شود.

این هواپیما با قابلیت چندوجهی، می‌تواند از باندهای مختلف نظیر سفت، چمنی، برفی و یا حتی آبی بهره‌مند شود. همچنین، این وسیله با انطباق بالا به انجام مأموریت‌های دوربرد نیز قابل استفاده است که این ویژگی آن را به یک ابزار چندمنظوره و چندکاره برای اهداف مختلف تبدیل کرده است.



شکل 2 هواپیما مورد نظر در آزمایش‌ها

با تجهیزات ناوبری مدرن و کارآمد، تضمین‌کننده فعالیت‌های هوایی با ایمنی و کیفیت بالا هستند.

شکل (3) فرودگاه بین‌المللی شیراز را به وضوح نشان می‌دهد که فرودگاه و باند آن در مرکز تصویر قرار دارد. این منطقه از اهمیت بالا و با امکانات کامل ناوبری، به عنوان یک نقطه مهم در ترتیب فرآیندهای هوایی در کشور شناخته می‌شود.



شکل 3 محل انجام آزمایشات.

کار گرفته می‌شوند تا اطلاعات دقیقی از حرکت و موقعیت وسیله پرنده را به ثبت برسانند.

قبل از هرگونه ثبت اطلاعات، توجه به تراز و کالیبراسیون حسگرهای مرتبط حائز اهمیت است. این عملیات از جهت اطمینان از دقت و صحت داده‌های دریافتی از حسگرها انجام می‌شود.

در فرآیند ثبت اطلاعات، داده‌های اینرسی از واحد IMU با فرکانس 200 هرتز ثبت می‌شوند. همچنین، داده‌های GPS نیز با همان فرکانس ثبت می‌گردند. این اطلاعات جهت ارائه یک تخمین دقیق از وضعیت و مکان وسیله پرنده به کار می‌روند. با ترکیب این دو منبع داده، امکان بهبود دقت و قابلیت پیش‌بینی در مورد مسیر و حرکت وسیله پرنده فراهم می‌شود. به این ترتیب، از اطلاعات به‌دست‌آمده می‌توان در تحلیل‌های مختلف مرتبط با پرواز و ناوبری بهره‌مند شد.

4-6- اندازه‌گیری‌ها

مؤلفه‌های نیرو در چارچوب بدنی، با بهره‌گیری از داده‌های ثبت‌شده از سنسور IMU داخلی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا، گشتاورها از طریق نرخ چرخش ω_b ، نرخ تغییرات آن $\dot{\omega}_b$ و اینرسی محاسبه شده‌اند.

برای اندازه‌گیری زوایای حمله (α) و زاویه لغزش جانبی (β)، مستقیماً از سنسورهای اختصاصی استفاده نشده و به جای آن، از یک تقریب با استفاده از روابط زیر استفاده شده است:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{w}{v} \right) \quad (36)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{v}{V} \right)$$

در اینجا، V نمایانگر سرعت واقعی است، w مؤلفه سرعت روبه‌پایین و v مؤلفه سرعت جانبی را نمایان می‌کند.

7- محل انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در فرودگاه بین‌المللی شیراز با مختصات جغرافیایی $29^{\circ}32'21''$ شمالی و $52^{\circ}35'24''$ شرقی به انجام رسید. این فرودگاه که در کلان‌شهر شیراز و در ارتفاع 1500 متری از سطح دریا واقع شده است.

این فرودگاه با مساحتی در حدود 7500 مترمربع، یکی از فرودگاه‌های ایمن و پیشرفته کشور محسوب می‌شود. در این فرودگاه که ارتفاع آن 1500 متر از سطح دریاست، دو باند پروازی آسفالتی به طول 4272 متر و 4334 متر وجود دارد. این باندها

8- آموزش مدل

در راستای آموزش مدل، مجموعه‌ای از مانورها به کار گرفته شده‌اند تا بتوان بهینه‌کردن محتوای اطلاعات موجود در داده‌ها را انجام داد. این مانورها با هدف شناسایی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. اجرای این مانورها باید به گونه‌ای باشد که حالات سیستم به نحوی تحریک شوند که حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به پارامترها بالا بوده و همبستگی کمی بین پارامترها وجود داشته باشد [24].

برای انجام این مانورها، مراحل در نظر گرفته شده‌اند که به‌طور کلی شامل تلاش برای به حداکثر رساندن محتوای اطلاعات و داده‌های پروازی می‌شوند. در پایان این مراحل، مدل حداقل مربعات برای تخمین ضرایب آبرودینامیکی باتوجه‌به ورودی‌های سیستم ارائه می‌شود.

قبل از استفاده از داده‌ها برای آموزش و آزمایش مدل، دقت داده‌ها بررسی می‌شود. این بررسی شامل بازسازی پاسخ حالت هواپیما با استفاده از معادلات سینماتیک و مقایسه پاسخ بازسازی‌شده با پاسخ اندازه‌گیری شده می‌شود. همچنین، اطمینان از عدم تأثیر خطای دستگاه بر دقت داده‌ها حائز اهمیت است و فقط داده‌هایی که این شرایط را دارا هستند در آزمایش‌ها استفاده می‌شوند.

در این بخش، جنبه‌های سخت‌افزاری هواپیما، اجزای آن و سایر جنبه‌های سیستم که برای انجام آزمایش استفاده شده‌اند، به طور دقیق شرح داده شده‌اند. این آزمایش به‌منظور بررسی

داده از این آزمایش برای آموزش مدل سیستم نمونه برداری شده است.

در این آزمایش، بیشترین سرعت ثبت شده 265 کیلومتر بر ساعت بوده و بیشترین ارتفاع از سطح دریا به ارتفاع 2467 متر می رسد. مسافت زمینی طی شده نیز 147.9 کیلومتر، میانگین سرعت 117.9 کیلومتر بر ساعت و مدت زمان آزمایش 1 ساعت و 5 دقیقه بوده است. شرایط هوایی در زمان اجرای آزمایش نیز به صورت آرام، با سرعت باد کم، دمای سطح زمین 23 درجه سانتی گراد و فشار 1018 میلی بار یا 3007 اینچ جیوه برابر با فشار هوا در سطح دریا بوده اند.

3-8- آزمایش 3: آزمایش مدل

در این آزمایش، هدف بررسی عملکرد تقریب مدل حداقل مربعات برای ارزیابی پایداری هواپیما و تخمین ضرایب آیرودینامیکی به کمک آزمایش های پروازی می باشد. در این سنجش، تعداد 1800375 داده از پرواز آزمایشی جمع آوری و به منظور آموزش مدل حداقل مربعات، داده های آزمایش اول و دوم به کار گرفته شده اند، در حالی که داده های آزمایش سوم برای تأیید عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفته است.

در این بخش، جزئیات آموزش مدل و فرایند آزمایش پروازی تشریح شده اند. همچنین، نتایج به دست آمده از این آزمایش ارائه شده اند. آموزش مدل شامل مانورهایی است که هم دینامیک جانبی و هم طولی را با ورودی هایی نظیر سکان عمودی و شهرها تحریک می کند. این مانورها شامل بلندشدن، صعود، نزول، به ثبات رساندن، انواع گردش ها و کاهش سرعت تا سرعت واماندگی می شوند.

برای یادگیری دینامیک جانبی⁷ (C_Y, C_l, C_n) هواپیما، مانورهایی با ورودی های سکان عمودی و شهرها و برای یادگیری دینامیک طولی⁸ (C_x, C_z, C_m) ، عمدتاً از ورودی های سکان افقی استفاده شده است.

در طول این آزمایش، ارتفاع وسیله پرنده از سطح زمین تا ارتفاع 2496 متر از سطح دریا⁹ متغیر بوده و میانگین سرعت پرواز 124 کیلومتر بر ساعت، بیشترین سرعت 267 کیلومتر بر ساعت، مدت زمان آزمایش 1 ساعت و 6 دقیقه و مسافت طی شده 161.3 کیلومتر بوده است.

عملکرد روش حداقل مربعات ارائه شده و شامل دو بخش است: آموزش مدل و آزمایش مدل. نتایج و نمودارهای مربوط به این آزمایش و تخمین با استفاده از روش حداقل مربعات در پایان ارائه شده اند.

8-1- آزمایش 1: آموزش مدل

آزمایش انجام شده با هدف آموزش مدل به اجرای مانورهایی در حالات مختلف سیستم می پردازد. این مانورها شامل اجرای حرکات با استفاده از سکان عمودی، افقی و شهرها توسط هواپیما هدفمند می شوند. سکان افقی برای حفظ پایداری هواپیما در وضعیت مشخص به کار گرفته می شوند. در این آزمایش، تنوع ورودی ها به منظور افزایش اطلاعات در داده ها به کاررفته است.

آموزش مدل در فرودگاه بین المللی شیراز با ارتفاع 1500 متر از سطح دریا انجام گرفته است. این آزمایش با شروع از سطح زمین، با انجام عملیات بلندشدن به ارتفاع 3424 متر از سطح دریا ادامه یافته و سپس با اجرای عملیات نشست و کاهش ارتفاع به سطح زمین به پایان رسیده است. تعداد 1393274 داده از این آزمایش برای یادگیری مدل سیستم نمونه برداری شده است. در طی این آموزش، مانورهای بلندشدن، صعود، نزول، به ثبات رساندن¹، گردش سریع هواپیما²، نیم گردش سریع هواپیما³ و گردش استاندارد⁴ انجام گرفته است. بیشترین سرعت طی شده در این آزمایش 283 کیلومتر بر ساعت بوده و مسافت زمینی طی شده 140 کیلومتر می باشد. میانگین سرعت در این آزمایش 108.4 کیلومتر بر ساعت و مدت زمان کل آزمایش یک ساعت و 7 دقیقه می باشد. در زمان انجام آزمایش، سرعت باد آرام⁵، دما در سطح زمین 20 درجه سانتی گراد و فشار هوا 1013 میلی بار یا 2994 اینچ جیوه برابر با 1013 میلی بار بوده است.

8-2- آزمایش 2: آموزش مدل

در این بخش از آزمایش، مجموعه ای از مانورها به منظور شناسایی سیستم اجرا شد. این مانورها از اقدامات مختلفی شامل بلندشدن، صعود، نزول، به ثبات رساندن، انواع گردش ها و کاهش سرعت تا سرعت واماندگی⁶ تشکیل شده اند. تعداد 1808080

⁶ Stall

⁷ Lateral

⁸ Longitudinal

⁹ Mean Sea Level(MSL)

¹ Level Off

² Steep Turn

³ Half Steep Turn

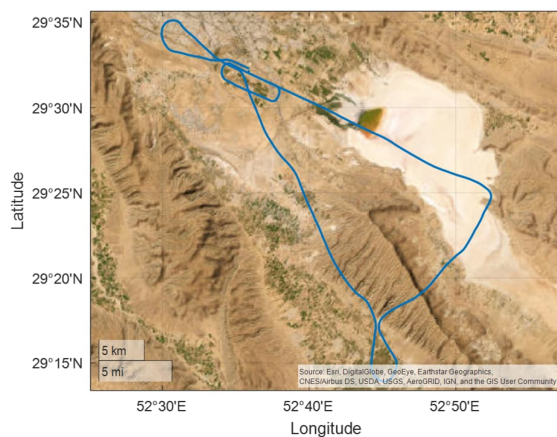
⁴ Standard Turn

⁵ Calm

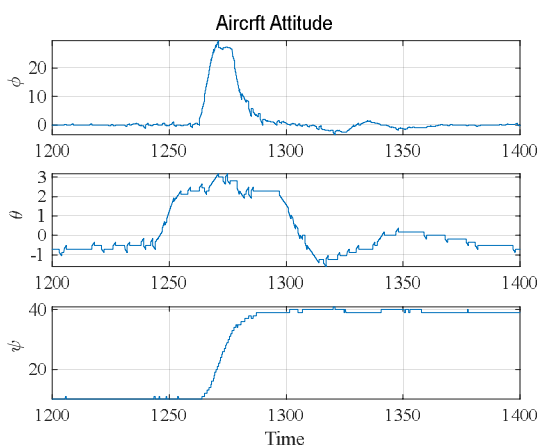
نمایی از مسیر طی شده به صورت برخط در شکل (4)، نمای مسیر طی شده در مدل شبیه‌سازی در شکل (5)، وضعیت هواپیما در شکل (6)، انحراف سطوح فرامین در شکل (7) و موقعیت دسته‌گاز هواپیما در شکل (8) نمایش داده شده‌اند.



شکل 4 مسیر پروازی ضبط شده هواپیما



شکل 5 نمودار سطح سه بعدی¹ مسیر پروازی



شکل 6 وضعیت هواپیما

در طول انجام این آزمایش، سرعت باد آرام، دما در سطح زمین 8 درجه سانتی‌گراد و همچنین فشار 1020 میلی‌بار یا 3012 اینچ جیوه برابر با 1020 میلی‌بار بوده است.

8-4- آزمایش 4: آزمایش مدل

در این پرواز، مانورهای مختلفی به منظور آزمایش دینامیک طولی و جانبی سیستم انجام گردید. این مانورها شامل بلندشدن، صعود، نزول، به ثبات رساندن، کاهش سرعت تا سرعت واماندگی و گردش با حداقل سرعت و غلت بوده‌اند.

در طی این آزمایش، ارتفاع پرواز از سطح زمین به ارتفاع 2440 متر از سطح دریا انجام شده است. میانگین سرعت در این آزمایش 166 کیلومتر بر ساعت بوده و بیشترین سرعت به 233 کیلومتر بر ساعت افزایش یافته است. مدت‌زمان طی شده در این پرواز 1 ساعت و 2 دقیقه بوده و مسافت طی شده حدود 146.3 کیلومتر می‌باشد. تعداد داده جمع‌آوری شده در این آزمایش برابر با 1707929 است.

در حین اجرای این آزمایش باد سرعت 4 نات در جهت 120 درجه، دمای سطح زمین به 9 درجه سانتی‌گراد و فشار به 1025 میلی‌بار یا همان 3029 اینچ جیوه افزایش یافته است.

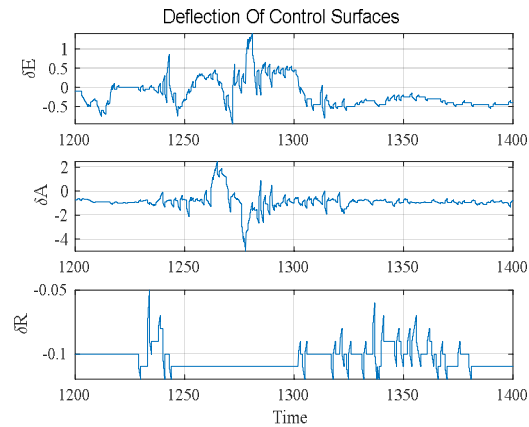
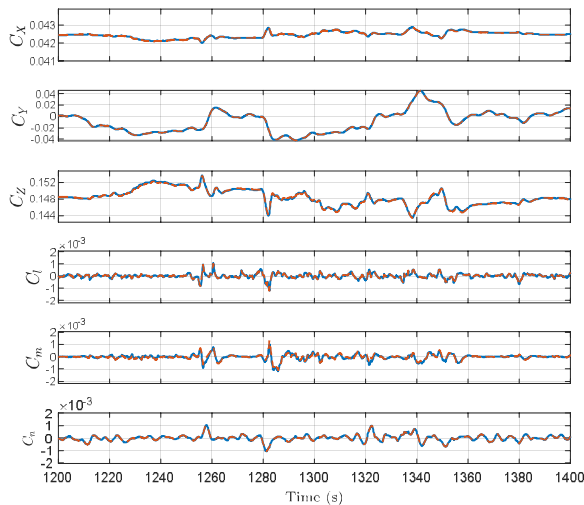
8-5- آزمایش 5: آزمایش مدل

در این آزمایش، مانورهایی با هدف بررسی دینامیک طولی و عرضی هواپیما اجرا شد. این مانورها شامل بلندشدن، نشست، صعود، نزول، به ثبات رساندن، کاهش سرعت تا نزدیکی سرعت واماندگی و گردش نیمه استاندارد بودند.

ارتفاع آزمایش از سطح زمین به ارتفاع 2519 متر از سطح دریا انجام شد. میانگین سرعت در این آزمایش 161 کیلومتر بر ساعت بوده و بیشترین سرعت به مقدار 266 کیلومتر بر ساعت رسیده است. مدت‌زمان آزمایش 50 دقیقه بوده و مسافت طی شده 129.6 کیلومتر است. تعداد داده‌های ضبط شده در این آزمایش 1525566 بوده است.

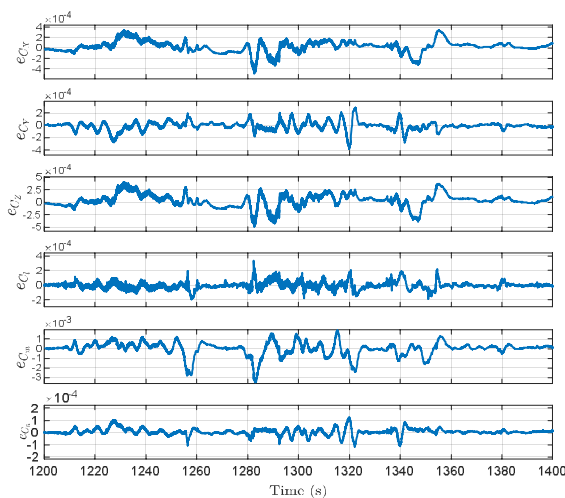
در حین انجام آزمایش، باد با سرعت 8 نات در جهت 160 درجه و دمای سطح زمین 13 درجه سانتی‌گراد حاکم بوده است. همچنین، فشار محیطی به مقدار 1019 میلی‌بار یا 3010 اینچ جیوه اندازه‌گیری شده است.

¹ Three dimension surface plot



شکل 7 انحراف سطوح کنترلی هواپیما

شکل 9 ضرایب اندازه‌گیری شده (خط آبی رنگ)، استفاده از برآوردگر حداقل مربعات (خط قرمز رنگ)

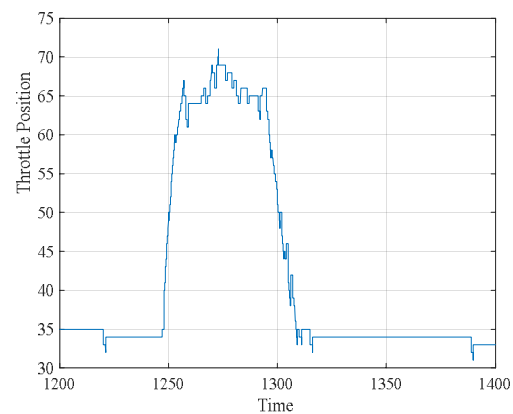


شکل 10 خطای میانگین مربعات ضرایب اندازه‌گیری شده و ضرایب تخمین زده‌شده

در جدول (2) خلاصه‌ای از 5 آزمایش انجام‌شده ارائه شده است.

جدول 2 خلاصه آزمایش

Purpose	Avg. Speed (km/h)	Dis. (km)	Max Speed (km/h)	Max Height (m)	ردیف
Training	108/4	140	283	3424	اول
Training	117/9	147/9	265	2647	دوم
Testing	124	161/3	267	2496	سوم
Testing	166	146/3	233	2440	چهارم
Testing	161	129/6	266	2519	پنجم



شکل 8 موقعیت دسته گاز هواپیما

9- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، مدل پارامتریک حداقل مربعات پیشنهادی برای ارزیابی عملکرد، پیاده‌سازی و آزمایش بررسی می‌شود. آزمایش‌ها به صورت اختصاصی بر روی یک هواپیما انجام شده‌اند که دارای ساختار بال بالا است که این موضوع باعث می‌شود تا به چالشی برای شناسایی سیستم تبدیل گردد. در این بخش، دو آزمایش به منظور آموزش مدل و سه آزمایش به منظور ارزیابی مدل در نظر گرفته شده‌اند.

در این قسمت، تخمین‌های ضرایبی که برای بخش آموزش و آزمایش مدل شبیه‌سازی شده است، ارائه می‌شود. این تخمین‌ها از مدل حداقل مربعات به دست آمده‌اند. سپس این ضرایب با ضرایب اندازه‌گیری شده که از شبیه‌سازی به دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند. ضرایب تخمینی پرواز آزمایشی در شکل (9) نمایش داده شده‌اند. همچنین در شکل (10)، خطاهای نسبی در پارامترهای برآورد شده نسبت به ضرایب حاصل از شبیه‌سازی که برای کل بخش پرواز آزمایشی به دست می‌آید، محاسبه و نمایش داده شده‌اند.

جدول 3 خطای میانگین مربعات ضرایب تخمین زده شده

C_n	C_m	C_l	C_z	C_y	C_x	ردیف
$2/846 \times 10^{-04}$	$1/223 \times 10^{-01}$	$3/528 \times 10^{-03}$	$7/746 \times 10^{-01}$	$1/688 \times 10^{-03}$	$5/323 \times 10^{-03}$	اول
$1/509 \times 10^{-05}$	$1/028 \times 10^{-04}$	$7/309 \times 10^{-07}$	$1/961 \times 10^{-04}$	$8/538 \times 10^{-05}$	$1/399 \times 10^{-04}$	دوم
$7/311 \times 10^{-04}$	$8/751 \times 10^{-02}$	$3/643 \times 10^{-04}$	$8/273 \times 10^{-04}$	$5/067 \times 10^{-03}$	$5/797 \times 10^{-04}$	سوم
$7/9 \times 10^{-03}$	$1/367 \times 10^{-01}$	$1/653 \times 10^{-03}$	$2/366 \times 10^{-02}$	$5/061 \times 10^{-03}$	$1/663 \times 10^{-02}$	چهارم
$1/731 \times 10^{-04}$	$6/668 \times 10^{-02}$	$8/464 \times 10^{-04}$	$5/907 \times 10^{-03}$	$9/819 \times 10^{-04}$	$4/114 \times 10^{-03}$	پنجم

معمولی می‌باشد. مدل پیشنهادی به صورت پارامتریک طراحی شده است و از شبیه‌سازی در نرم‌افزار سیمولینک متلب برای مدل‌سازی حرکات هواپیما در مراحل مختلف اجرایی، از جمله برخاستن، نشست، صعود، نزول و مانورها، استفاده شده است. اعتبارسنجی نتایج با مقایسه مسیرهای ضبط شده توسط هواپیما و مسیرهای شبیه‌سازی در متلب انجام گرفته است.

نتایج روش حداقل مربعات نشان می‌دهد، میانگین خطای ضرایب جانبی (C_l, C_z, C_m) و طولی (C_x, C_y, C_n) تخمین زده شده در آزمایش اول 2.82×10^{-02} ، دوم 1.08×10^{-04} ، سوم 1.9×10^{-02} ، چهارم 3.7×10^{-02} و پنجم 1.57×10^{-02} می‌باشد. همچنین کمترین خطای تخمین زده شده 7.309×10^{-07} بوده است، که مربوط به ضریب C_l در آزمایش دوم می‌باشد.

در این تحقیق، اثبات شده است که این رویکرد با آموزش و آزمایش با داده‌های واقعی یک هواپیما بال بالا قابل استفاده است. نتایج تأیید کرد که امکان استفاده از این تکنیک برای ساخت یک مدل مناسب برای یک وسیله پرنده وجود دارد. این مدل‌ها آموزنده هستند و این رویکرد می‌تواند تا حدودی هزینه‌های گزاف در آزمایش‌های پرواز را کاهش دهد. متمرکز شدن پژوهش‌های آینده بر تخمین دقیق ضرایب آیرودینامیکی امکان بهبود شبیه‌سازی‌های پرواز را فراهم می‌کند. با استفاده از این ضرایب تخمین زده شده، شبیه‌سازی‌های آینده می‌توانند نمایشی واقع‌گرایانه‌تر از رفتار هواپیما ارائه دهند و به مهندسان اجازه می‌دهند تا عملکرد پرواز را در شرایط مختلف تحلیل و بهینه‌سازی کنند. این قابلیت بهبودیافته در شبیه‌سازی، می‌تواند نقش مهمی در کاهش نیاز به نمونه‌های فیزیکی هزینه‌بر و زمان‌بر ایفا کند. با استفاده از این ضرایب در مدل‌های محاسباتی، مهندسان می‌توانند آزمون‌های مجازی انجام داده و تأثیر تغییرات طراحی بر عملکرد هواپیما را ارزیابی کنند. این فرایند امکان شناسایی تنظیمات طراحی بهینه را برای تحقق معیارهای عملکرد خاص مانند بهبود کارایی سوخت یا افزایش پایداری فراهم می‌کند.

11- مراجع

[1] S. Johnson *et al.*, "Are They What They Claim: A Comprehensive Study of Ordinary Linear Regression Among the Top Machine Learning Libraries in Python,"

نتایج آزمایش‌ها از نظر ارتفاع و سرعت در 5 آزمایش مختلف متفاوت بوده و این اطلاعات به صورت خلاصه در جدول (3) آورده شده است. آزمایش اول بیشترین ارتفاع و سرعت را نشان داده است، در حالی که آزمایش چهارم دارای کمترین ارتفاع و سرعت بوده است. برای بهبود دقت نتایج، خطای میانگین مربعات¹ با استفاده از روش حداقل مربعات برای هر ضریب محاسبه و ارائه شده است.

برخی از متغیرهایی که توسط تخمین به دست آمده است در مقایسه با متغیرهای دیگر، پارامترهای بیشتری در آن دخیل است و ممکن است دینامیک حاکم بر این متغیرها پیچیده‌تر باشد و همچنین تغییرات سریع‌تری را نسبت به بقیه متغیرها دارند. از طرف دیگر در این پژوهش، هواپیما به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفت شده است، اما تفاوت در وزن هواپیما و مقدار سوخت در طول آزمایش‌ها در تخمین ضرایب آیرودینامیکی تأثیرگذار هستند. این عوامل باعث ایجاد خطاهای متفاوتی برای ضرایب مختلف می‌گردد.

10- نتیجه‌گیری و تحقیقات آینده

در این مقاله، یک رویکرد جدید برای شناسایی سیستم هواپیما با استفاده از روش حداقل مربعات ارائه شده است. در این رویکرد، برای تخمین مقادیر، علاوه بر ورودی فعلی $u(t)$ ، از ورودی‌های گذشته، مانند $u(t-1)$ و $u(t-2)$ نیز استفاده می‌شود. این رویکرد باعث در نظر گرفتن وابستگی زمانی بین داده‌ها می‌شود. نتایج حاکی از بهبود عملکرد این رویکرد نسبت به روش حداقل مربعات

¹ Mean Square Error

- [12] G. Dai, L. Cheng, D. Li, H. Ma, and L. Zhang, "Identification of Aerodynamic Parameters Based on Maximum Likelihood Estimation," in *2022 8th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC)*, 2022: IEEE, pp. 923-929, doi: <https://doi.org/10.1109/ICNISC57059.2022.00186>.
- [13] L. Wang, R. Zhao, and Y. Zhang, "Aircraft Lateral-Directional Aerodynamic Parameter Identification and Solution Method Using Segmented Adaptation of Identification Model and Flight Test Data," *Aerospace*, vol. 9, no. 8, p. 433, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace9080433>.
- [14] H. Verma and N. Peyada, "Estimation of longitudinal aerodynamic parameters using recurrent neural network," *The Aeronautical Journal*, vol. 127, no. 1308, pp. 255-267, 2023, doi: <https://doi.org/10.1017/aer.2020.95>.
- [15] J. Wang, D. Wang, and Y. Zhang, "Research on Aerodynamic Modeling of Axisymmetric Aircraft Based on Orthogonal Least Squares," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2252, no. 1: IOP Publishing, p. 012041, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2252/1/012041>.
- [16] R. C. Nelson, *Flight stability and automatic control*. WCB/McGraw Hill New York, 1998. [https://home.engineering.iastate.edu/~shermanp/ARE355/lectures/Flight Stability and Automatic Control N.pdf](https://home.engineering.iastate.edu/~shermanp/ARE355/lectures/Flight%20Stability%20and%20Automatic%20Control_N.pdf).
- [17] S. Carnduff, "Aircraft System Identification: Theory and Practice V. Klein and EA Morelli American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1801 Alexander Bell Drive, Suite 500, Reston, VA 20191-4344, USA. 2006. 484pp. Illustrated. 119.95 (non-members). ISBN 1-56347-832-3," *The Aeronautical Journal*, vol. 111, no. 1123, pp. 602-603, 2007, doi: <https://doi.org/10.1017/S0001924000087194>.
- [18] R. K. Mehra, D. E. Stepner, and J. S. Tyler, "Maximum likelihood identification of aircraft stability and control derivatives," *Journal of Aircraft*, vol. 11, no. 2, pp. 81-89, 1974, doi: <https://doi.org/10.2514/3.60327>.
- [19] V. Klein, "Estimation of aircraft aerodynamic parameters from flight data," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 26, no. 1, pp. 1-77, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(89\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0376-0421(89)90002-X).
- [20] R. E. Maine and K. W. Iliff, "Application of parameter estimation to aircraft stability and control: The output-error approach," 1986. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19870020066/download/19870020066.pdf>.
- [21] A. A. Giordano and F. M. Hsu, *Least square estimation with applications to digital signal processing*. 2023. [Online]. Available: <https://kdd.org/kdd2023/wp-content/uploads/2023/08/johnson2023are.pdf>.
- [2] F. Yang, "The Least Squares Finite Element Method for Elasticity Interface Problem on Unfitted Mesh," *arXiv preprint arXiv:2306.08801*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112902>.
- [3] Z. Cai, B. Chen, and J. Yang, "Adaptive Least-Squares Methods for Convection-Dominated Diffusion-Reaction Problems," *arXiv preprint arXiv:2301.11582*, 2023, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.11582>.
- [4] E. Lee and H. Na, "Dual least-squares finite element method with stabilization," *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/num.22996>.
- [5] M. R. Sajjadi and A. Emadian, "Estimation of aerodynamic coefficients of a high wing aircraft using the least squares method with delayed data and comparison with the ordinary least squares method," presented at the The second conference of electricity, mechanics, aerospace, computer and engineering sciences, Sydney - Australia, 16 Jun 2023, 2023. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1680438/>.
- [6] Q. Zhang, J. Wang, H. Zhang, and C. Jia, "Research on quantitative evaluation method of test flight risk based on fuzzy theory," in *International Conference on Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2022)*, 2023, vol. 12604: SPIE, pp. 1114-1122, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2674598>.
- [7] B. Pamuk, "Agile Methods on Flight Tests," in *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, 2023: IEEE, pp. 01-05, doi: <https://doi.org/10.1109/RAST57548.2023.10197997>.
- [8] G. Xing *et al.*, "Analysis of Human Factors in Typical Accident Tests of Certain Type Flight Simulator," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2791, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15032791>.
- [9] C. Kownacki *et al.*, "Precision landing tests of tethered multicopter and VTOL UAV on moving landing pad on a lake," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2016, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23042016>.
- [10] D. Aláez, X. Olaz, M. Prieto, J. Villadangos, and J. Astrain, "VTOL UAV digital twin for take-off, hovering and landing in different wind conditions," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 123, p. 102703, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102703>.
- [11] A. Kumar and A. Ghosh, "Regularization regression methods for aerodynamic parameter estimation from flight data," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 95, no. 5, pp. 820-830, 2023, doi: <https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2019-0179>.

determined coefficients,"
1981. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19810019327>.

[24] J.-H. Kim and S. Sukkarieh, "Airborne simultaneous localisation and map building," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, 2003, vol. 1: IEEE, pp. 406-411, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241629>.

John Wiley & Sons, Inc., 1985.
<https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/577191>.

[22] V. Klein, "Aircraft parameter estimation in frequency domain," in *4th Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 1978, p. 1344, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1978-1344>.

[23] R. E. Maine and K. W. Iliff, "The theory and practice of estimating the accuracy of dynamic flight-