

پیشرفت های اخیر در روش های ساخت افزودنی مبتنی بر چاپ چهار بعدی

چکیده: امروزه ساخت افزودنی که با عنوان چاپ سه بعدی نیز شناخته می شود، نقش مهمی در تولید قطعات با هندسه پیچیده و خواص متفاوت در صنایع مختلف دارد. چاپ چهاربعدی فناوری دیگری در این زمینه است که بر پایه چاپ سه بعدی توسعه یافته است. بعد چهارم در این فناوری زمان است که سازه با گذشت زمان نسبت به محرک های خارجی واکنش نشان داده و تغییر شکل از خود نشان می دهد که نیازمند محرک های اضافی و مواد پاسخگو به محرک است. از فناوری چاپ سه بعدی برای سازه های استاتیکی و از فناوری چاپ چهار بعدی در سازه های دینامیکی استفاده می شود که مهم ترین نقطه تمایز بین چاپ سه بعدی و چاپ چهار بعدی به شمار می آید. در مطالعه حاضر ابتدا به بررسی تاریخچه این فناوری پرداخته شد. سپس روش های مورد استفاده در این فناوری مورد بررسی قرار گرفته و مواد هوشمند مورد استفاده جهت پاسخ به محرک های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با پیشرفت این فناوری و نیازهای جدید در حوزه های مختلف، مطالعات بیشتری بر روی این فناوری در حال انجام است. در مطالعه حاضر علاوه بر پیشرفت ها چالش های پیش رو نیز مورد توجه بوده است و چشم انداز آینده این فناوری مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های راهنما: چاپ سه بعدی، چاپ چهار بعدی، خواص مکانیکی، مواد حافظه دار

هادی صفی ولیلو
دانشجوی کارشناسی

موسی ساجد*
استادیار

علی رضا محمدی
دانشجوی کارشناسی،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

Hadi Safi Valilu
BSc Student

Moosa Sajed*
Assistant Professor

Alireza Mohammadi
BSc Student,
Department of Mechanical
Engineering,
Azarbaijan Shahid Madani
University, Tabriz

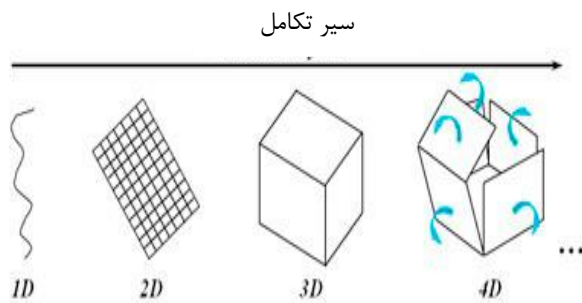
Recent advances in additive manufacturing based on 4D-printing

Abstract: Nowadays, additive manufacturing, which is known as 3D printing, plays a significant role in producing parts with complex geometries and various properties that are used in different industries. 4D printing is another technology that is developed based on 3D printing. The fourth dimension in this technology is time, during which the structure responds to external stimuli and undergoes deformation, requiring additional actuators and responsive materials. 3D printing is used for static structures, while 4D printing is applied in dynamic structures, which is the most important distinguishing factor between the two technologies. In this study, the history of the technology is discussed. Then, the methods used in this technology and the smart materials employed to respond to various stimuli are explored. Because of the advancements in this technology and the diverse needs across different fields, more investigations are carrying out in the field. In addition to advances, challenges are also noticed and the future prospects of the technology are also discussed.

Keywords: 3D printing, 4D printing, Mechanical properties, Shape memory materials

۱- مقدمه

عددی که چاپ شامل پنج جنبه مختلف است: تسهیلات چاپ سه‌بعدی، اجزای هوشمند (یعنی مواد حساس به محرک)، مدل‌سازی ریاضی، نوع محرک و مکانیزم تعامل.



چاپ سه‌بعدی + زمان = چاپ چهاربعدی

شکل ۱ تصویر شماتیک مفاهیم یک‌بعدی، دوبعدی، سه‌بعدی و چاپ چهاربعدی [۵]

در این مطالعه مروری ابتدا بعد از اشاره به مفهوم فناوری چاپ چهاربعدی، نحوه تولید این سازه‌ها و نوع ماده مصرفی اولیه برای ساخت این سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس روش‌های چاپ، انواع و تولید کامپوزیت‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفت. بعد از توضیحات کلی خود این فناوری کاربردهایی که امروزه این فناوری در صنایع گوناگون دارد مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که مشخص است هر فناوری علاوه بر مزیت‌های خود چالش‌هایی نیز به همراه دارد که مورد بررسی قرار گرفت. امروزه در مطالعات مختلف این چالش‌ها توسط پژوهشگرها مورد بررسی قرار می‌گیرد که هر راه حل برای این چالش‌ها پیشرفتی در این زمینه محسوب می‌شود که این مورد نیز مورد بررسی قرار گرفت. هدف کلی از ارائه این مقاله بررسی مختصر و مفید این فناوری و در اختیار گذاشتن پیشرفت‌های جدید برای اولین گام در مطالعه پژوهشگران جدید علاقه‌مند به این حوزه می‌باشد.

۲- اصول فناوری چاپ چهار بعدی

چاپ چهاربعدی به‌طور کلی با پیشرفت و توسعه چاپ سه‌بعدی حاصل شد. پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه‌بعدی به محققان این امکان را داده است که اشکال پیچیده‌ای را ایجاد کنند که تولید آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های سنتی قدیمی غیرممکن بود [۶]. برای تولید انواع سازه‌ها به روش چاپ سه‌بعدی روش‌های مختلفی مانند استریولیتوگرافی (SLA)، سینتر لیزری انتخابی

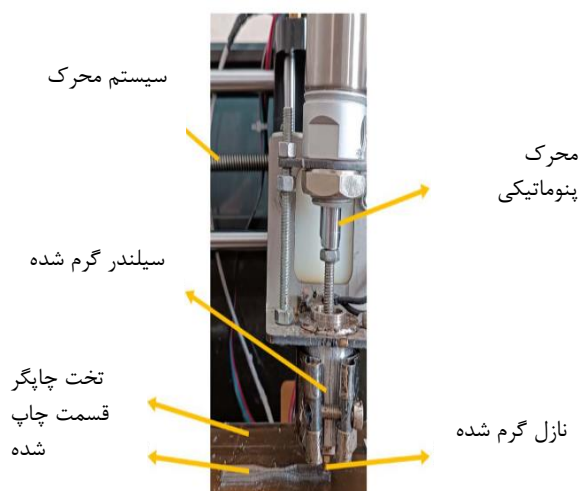
ساخت افزودنی^۱ در حالت کلی به‌عنوان نمونه‌سازی سریع یا تولید لایه‌به‌لایه شناخته می‌شود [۱]. تولید افزودنی یا چاپ سه‌بعدی به تولید کالاهای پیچیده و با ارزش در صنایع مختلف کمک کرده است. پیشرفت در مواد و ماشین‌آلات، این فناوری را قادر به ایجاد طراحی‌های پیچیده، کاهش ضایعات و تولید سریع کرده است. این فناوری به‌ویژه در صنایع کالاهای مصرفی، بهداشت و درمان، خودرو و هوافضا پتانسیل بالا در پیشرفت دارد. همچنین تولید افزودنی امکان ساخت ایمپلنت‌ها و پروتزهای شخصی‌سازی‌شده را فراهم می‌کند. مزایای این فناوری شامل انعطاف‌پذیری طراحی، کاهش ضایعات، بهبود سازگاری زیستی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها است. با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی می‌توان انواع قطعات پیچیده را تولید کرد که امروزه در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

باتوجه به گستره کاربرد چاپ سه‌بعدی، می‌توان گفت از چاپ سه‌بعدی برای ساخت و تولید سازه‌هایی استفاده می‌شود که در تعادل استاتیکی هستند و نسبت به عوامل مختلف هیچ واکنشی را نشان نمی‌دهند [۳]. اما در صنعت گاهی نیاز به سازه‌هایی می‌باشد که به عوامل مختلف واکنش نشان دهد، به دیگر سخن سازه قابلیت پاسخ گویی دینامیکی را داشته باشد. برای پاسخ به این نیاز از فناوری جدید به نام «چاپ چهاربعدی» در صنعت استفاده می‌شود. در فناوری چاپ چهاربعدی بعد چهارم زمان است. یعنی فناوری چاپ چهاربعدی به نمونه چاپ شده این قابلیت را می‌دهد که بعد از گذشت زمان تحت تاثیر عوامل خارجی واکنش نشان داده و یا عملکرد خود را تغییر دهد. از جمله عوامل خارجی می‌توان به اشعه فرابنفش، انرژی مغناطیسی، فشار، دما و ضربه اشاره کرد که ماده تولید شده نسبت به این عوامل واکنش نشان می‌دهد [۴].

شکل (۱) تصویر شماتیک از سازه‌های یک‌بعدی، دوبعدی، سه‌بعدی و چهاربعدی را نشان می‌دهد که سازه چهاربعدی ساختار تغییرشکل یافته سازه سه‌بعدی را باگذشت زمان نشان می‌دهد. پس می‌توان گفت چاپ چهاربعدی می‌تواند یک سازه ساده را به یک سازه پیچیده تبدیل کند و در کنار فناوری چاپ سه‌بعدی عمل کند. مومنی و همکاران نیز در یک مطالعه مروری به این فناوری پرداختند [۶]. موضوعات تحقیق در چاپ چهاربعدی به سه دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند: بهبود در سخت‌افزار، بهبود در اجزای تغییرشکل‌دهنده و تحلیل‌های

¹ Additive manufacturing

روش می‌توان به نوعی نحوه فرآیند را تغییر داد، به‌طور مثال بیاتی و همکاران در یک مطالعه به جای استفاده از فیلامنت‌های رشته از گلوله‌های الاستومری استفاده کردند. شکل (۲) نمونه‌ای از چاپ به روش FFF را نشان می‌دهد که به جای فیلامنت از گلوله‌های تویی استفاده شد [۱۴].



شکل ۲ دستگاه چاپ و اجزاء آن (FFF) [۱۴].

۲-۲- مواد مورد استفاده در چاپ چهار بعدی

مهم‌ترین بخش در چاپ چهار بعدی مواد هوشمند مورد استفاده در آنها می‌باشد. همانگونه که اشاره شد بعد چهارم زمان است، پس باید در انتخاب مواد سازنده از موادی هوشمند استفاده کنیم که نسبت به تغییرات مشخص واکنش نشان دهد. بنابراین، مواد هوشمند هسته اصلی چاپ چهاربعدی هستند و یکی از رایج‌ترین مواد هوشمند، مواد پاسخ‌دهنده به محرک‌ها هستند. این مواد پاسخ‌دهنده در دسته‌بندی‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند.

نوع اول آنها تک متغیره نام دارد که با اعمال تحریک، سازه واکنش نشان داده و تغییر شکل می‌دهد اما پس از حذف محرک سازه به حالت اولیه خود باز می‌گردد که در این سازه‌ها از مواد تغییر شکل‌دهنده استفاده می‌شود.^۹ نوع دوم آنها در دو حالت وجود دارد و از مواد حافظه شکل‌دار^{۱۰} استفاده می‌شود. حالت اول این نوع یک راه نام دارد که پس از پاسخ به محرک برای اینکه شکل اصلی از شکل موقت بازیابی شود، یک مرحله برنامه‌نویسی جدید لازم است تا شکل موقت را در هر چرخه

(SLS)، مدل‌سازی با ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت (FFF)، چاپ سه‌بعدی جت (3DP)، ذوب لیزری انتخابی (SLM)، نوشتن مستقیم جوهر (DIW)، ذوب با پرتو الکترون (EBM) وجود دارند، که هر روش بسته فرآیند تولید خود دارای نوع ماده اولیه متفاوت هستند [۸]. بیشتر مواد برای چاپ سه‌بعدی مانند فلزات، پلاستیک‌ها و سرامیک‌ها، برای چاپ چهار بعدی مناسب نیستند. بنابراین مواد که خواص خود را در طول زمان در پاسخ به محرک‌های خارجی مانند آب، دما و میدان مغناطیسی تغییر می‌دهند، برای چاپ چهاربعدی بسیار مهم هستند [۹]. طبق تحقیقات و نظرسنجی‌های انجام شده، روش ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت (FFF) محبوب‌ترین روش برای استفاده در این فناوری می‌باشد، به‌طوری که طبق نظرسنجی‌های انجام شده بین این روش‌ها، روش ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت ۴۱٪ آراء را به خود اختصاص داده است [۱۰]. در ادامه این روش را به علت محبوبیت بالا بین روش‌ها انتخاب کرده و توضیح داده‌ایم، سپس در بخش بعد از آن مواد مورد استفاده برای چاپ چهاربعدی مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱- مدل رسوب ذوب‌شده^۱

مدل‌سازی رسوب‌گذاری ذوب شده همچنین به‌عنوان ساخت فیلامنت ذوب شده شناخته می‌شود که شامل استفاده از یک ماده ترموپلاستیک است. مواد اولیه مورد استفاده در این روش ترموپلاستیک‌ها می‌باشند که به‌طور رشته‌ای^۲ از ماده مورد استفاده وارد دستگاه می‌شود [۱۱]. این فرآیند شامل تغذیه یک فیلامنت از یک کلاف بزرگ به سر اکسترودر چاپگر حرارتی متحرک^۳ می‌باشد. سر اکسترودر توسط یک کامپیوتر کنترل می‌شود که شکل شیء چاپ شده را تعریف می‌کند. عملکرد دستگاه چاپ سه‌بعدی در این روش بر مبنای لایه‌لایه‌سازی مدل سه‌بعدی می‌باشد که برای ساخت هر لایه به صورت دوبعدی، فایل کامپیوتری طراحی شده به اسکریپت‌ها تبدیل می‌شوند [۱۲]. فیلامنت‌های مورد استفاده در این روش معمولاً ترموپلاستیک‌ها می‌باشند که شامل آکریلونیتریل بوتادین استایرن^۴، پلی لاکتیک اسید^۵، پلی کربنات^۶، پلی آمید^۷، ترفتالات گلیکول اصلاح شده پلی اتیلن^۸ و پلی استایرن استفاده می‌شود که اکثر آنها زیست تخریب‌پذیر نیز می‌باشند [۱۳]. همچنین در این

^۶ PC

^۷ Nylon

^۸ PTEG

^۹ Shape Changing Materials (SCM)

^{۱۰} Shape Memory Materials (SMM)

^۱ Fusion deposition modeling

^۲ Filament

^۳ Nozzle

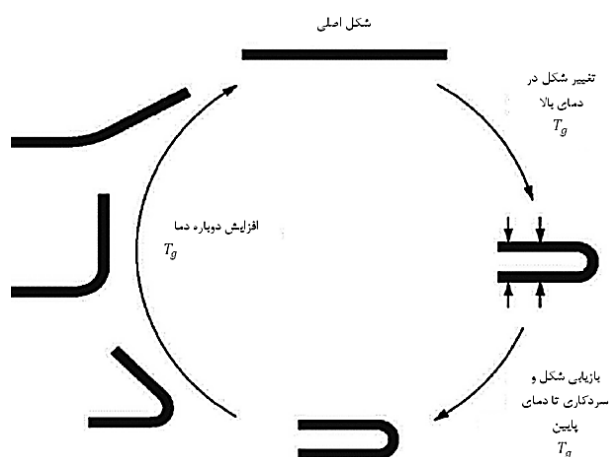
^۴ ABS

^۵ PLA

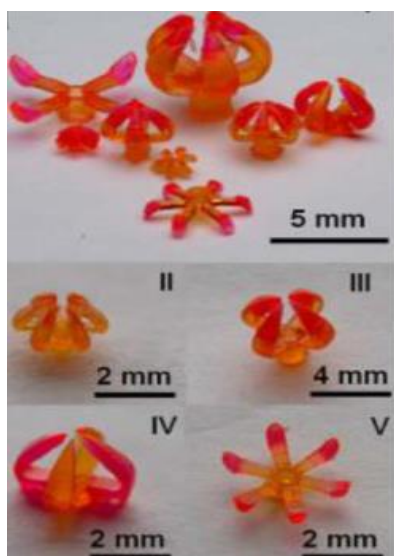
می‌تواند به‌طور نامحدود با یک شکل موقتی متفاوت در هر چرخه تکرار شود [۹]. جی و همکاران [۱۸] یک تکنیک چاپ چهاربعدی را فرموله کردند که قادر به ایجاد ساختارهای چند ماده‌ای پلیمرهای حافظه شکل از طریق مجموعه‌ای از شبکه‌های کوپلیمر مبتنی بر متاکریلات بود که قابلیت سخت شدن با نور را داشتند. رویکرد آن‌ها منجر به ساخت یک گیره پلیمری حافظه شکل چند ماده‌ای شد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

۲-۳- مواد پاسخ‌گو به انواع محرک

حال در این قسمت می‌خواهیم به موادی بپردازیم که در برابر انواع محرک‌ها مانند دما، نور، رطوبت و PH حساس هستند و همچنین به پاسخ سازه در برابر این محرک‌ها می‌پردازیم.



شکل ۳ اثر حافظه شکل پلیمری گرم شده [۹]



(الف)

دوباره ایجاد کند. حالت دوم این نوع دو طرفه نام دارد که مواد حافظه شکل دوطرفه نیازی به فرآیند دوباره برنامه‌ریزی برای بازیابی شکل موقت ندارند. نوع سوم آنها نیز در دو حالت وجود دارد. حالت اول تغییر سه‌گانه و حالت دوم تغییر چند شکل است به‌طوری که مواد حافظه سه‌گانه با اثر حافظه سه‌گانه دارای یک شکل دائمی و دو شکل موقت هستند. پس به‌طور کلی می‌توان گفت مواد حافظه شکل دار می‌توانند شکل خود را تا زمانی که محرک مناسب اعمال شود حفظ کنند؛ در حالی که مواد تغییر شکل‌دهنده نمی‌توانند شکل موقت خود را هنگام برداشتن محرک حفظ کنند [۱۵]. زمان لازم برای انتقال یک ماده اعم از پاسخ به محرک و یا بازیابی می‌تواند تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی قرار گیرد. عوامل مؤثر داخلی به خواص ماده مربوط می‌شوند که غیر قابل تغییر هستند مانند چگالی ماده و ظرفیت حرارتی آن. تأثیرات خارجی شرایط محیطی هستند، برای مثال، دما، نرخ گرمایش و ضخامت هندسی که می‌توان آن‌ها را تغییر داد تا زمان بازیابی مدیریت شود [۱۶]. پس در حالت کلی می‌توان گفت فرآیند اثر حافظه شکلی شامل دو مرحله مهم برنامه‌ریزی و بازیابی می‌باشد. به‌طوری که ماده در مرحله برنامه‌ریزی به پیکربندی موقت خود تغییر کرده و پس از آن به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. اما این روش دارای محدودیت می‌باشد زیرا بسته به خواص مکانیکی ماده متغیر است. به‌عنوان مثال، نسبت بازیابی می‌تواند به خاصیت کشسانی ماده بستگی داشته و نتواند به‌طور کامل به حالت اولیه خود بازگردد [۱۷]. پس انتخاب نوع ماده مناسب برای کاربردهای مختلف کلیدی‌ترین گام است.

پلیمرهایی که ویژگی‌های حافظه شکل دارند به‌عنوان پلیمرهای حافظه شکل^۱ شناخته می‌شوند و در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند. پلیمرهای حافظه شکل قادرند هنگامی که در معرض یک محرک خارجی قرار می‌گیرند از یک شکل موقتی به یک شکل حفظ‌شده تبدیل شوند که به این پدیده "اثر حافظه شکل"^۲ گفته می‌شود. شکل (۳) اثر حافظه شکل یک پلیمر حافظه شکل گرم‌شده را نشان می‌دهد. یک ماده که از پلیمر حافظه شکل تشکیل شده است، ابتدا تحت یک محرک خارجی گرم شده و تغییر شکل می‌دهد تا به دمای ذوب خود برسد. شکل حفظ‌شده آن پس از خنک‌شدن به زیر دمای انتقال شیشه‌ای^۲ به دست می‌آید. شکل موقتی تا زمانی که دوباره به دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود، حفظ می‌شود که پلیمر حافظه شکل را به شکل اولیه خود بازگرداند. این فرآیند

^۳ Tg

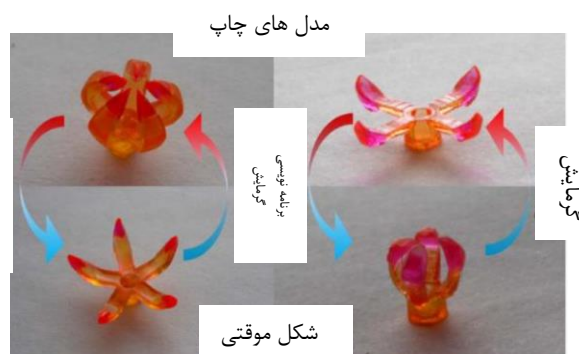
^۱ Shape memory polymers (SMPs)

^۲ Shape memory Effect (SME)

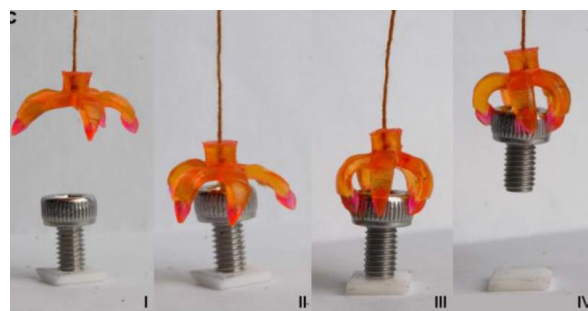
استفاده از تکنیک جت چسب مورد بررسی قرار گرفته است که در آن قطعات چاپ شده توانایی تبدیل شکل معکوس را در هنگام سرد شدن و گرم شدن نشان دادند. آلیاژهای حافظه شکل مبتنی بر مس نیز برای چاپ چهاربعدی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ زیرا می‌توانند به‌خوبی فرآورده‌های پس از چاپ را تحمل کنند و از نظر هزینه مقرون به صرفه هستند [۱۹].

مواد پاسخ‌گو به نور: نور همچنین به‌عنوان یک محرک غیرمستقیم برای تغییر شکل مواد هوشمند عمل می‌کند. زمانی که ناحیه‌ای از یک ماده هوشمند که به نور حساس است که به آن ماده فوتو-حساس نیز گفته می‌شود و در معرض نور قرار می‌گیرد، نور را جذب کرده و در نهایت پدیده گرمایش را در آن ایجاد می‌کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، گرما به‌عنوان یک محرک برای تغییر شکل مواد هوشمند عمل می‌کند؛ بنابراین تغییر شکلی در ماده فوتو-حساس اتفاق می‌افتد. به همین دلیل است که نور به‌عنوان یک محرک غیرمستقیم عمل می‌کند؛ زیرا تغییر را به‌طور مستقیم مانند گرما و رطوبت ایجاد نمی‌کند. ساختار خودجمع‌شونده متوالی توسط لیو و همکاران [۲۰] نشان داده شد که در آن نور توسط اتصالات جذب شده و آن‌ها گرم می‌شوند و در نتیجه تغییر شکل ایجاد می‌شود. نرخ جذب گرما توسط اتصالات بستگی به منبع نورهای استفاده شده و رنگ اتصالات دارد. در مطالعات انجام شده، نور به روشی متفاوت برای ایجاد تغییر شکل در ماده فوتو-حساس استفاده شد. از یک کروموفور که حساس به نور است، در برخی نقاط مشخص از یک بلوک پلیمری نفوذ داده شد تا تنها آن نقاط هنگام تابش نور به ساختار دچار تغییر شکل شوند. گزارش‌های دیگری نیز وجود دارد که در آن‌ها از نور فرابنفش ضعیف و نور مرئی برای تغییر شکل ساختار چهاربعدی استفاده شده است [۲۱].

مواد پاسخ‌گو به رطوبت: موادی که به رطوبت یا آب واکنش نشان می‌دهند به دلیل دامنه وسیعی از کاربردها توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این نوع مواد هیدروژل‌ها نامیده می‌شوند؛ زیرا توانایی فوق‌العاده‌ای در واکنش به آب یا رطوبت دارند. در واقع آن‌ها یک نوع از شبکه‌های سه‌بعدی زنجیره‌های پلیمری هستند که از طریق پیوند متقابل تشکیل شده‌اند و می‌توانند تا ۲۰۰٪ از حجم اصلی خود پس از تماس با رطوبت منبسط شوند. هیدروژل‌ها به دلیل قابلیت‌های بالای خود در چاپ و توانایی انبساط، خم شدن و کشش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد زیست‌سازگار و آسان برای چاپ هستند، اما پاسخ معکوس آن‌ها کند است و زمان زیادی برای خشک شدن نیاز دارند. برای حل



(ب)



(ج)

شکل ۴ الف- گیره‌های چند ماده‌ای با طراحی‌های مختلف، ب- انتقال بین شکل چاپ شده و شکل موقت، ج- فرآیند گرفتن یک شیء [۱۸].

مواد پاسخ‌گو به دما: مواد هوشمند به محرک‌های حرارتی یا دما پاسخ می‌دهند و تغییر شکل آنها عمدتاً به دو مکانیزم اثر تغییر شکل و اثر حافظه شکل بستگی دارد. اثر حافظه شکل به توانایی مواد در بازگشت به شکل اصلی خود پس از تغییر شکل اشاره دارد و این مواد به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند، مانند پلیمرهای حافظه شکل و آلیاژهای حافظه شکل^۱. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، آلیاژهای حافظه شکلی به سه دسته یک‌طرفه، دوطرفه و سه‌طرفه تقسیم می‌شوند که بسته به تعداد تغییرات شکل متفاوت است. پلیمرهای حافظه شکل به دلیل ویژگی چاپ آسان، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و قادرند پس از تغییر شکل با استفاده از محرک مناسب به شکل اصلی خود بازگردند. پلیمرهای حافظه شکل دارای دمای انتقال شیشه‌ای هستند که بر ویژگی‌های آنها تأثیر می‌گذارد.

نیتینول (نیکل-تیتانیوم) به دلیل خواص خوب حافظه شکل، قابلیت کشش و استحکام بالا و ویژگی‌های پایدار چرخه‌ای به‌عنوان پرکاربردترین آلیاژ حافظه شکل شناخته می‌شود که آن را برای کاربردهای بیولوژیکی و عملکرد مناسب‌تر می‌سازد. آلیاژ مبتنی بر نیکل-منگنز-گالیم نیز برای چاپ قطعات چهاربعدی با

¹ Shape memory alloys

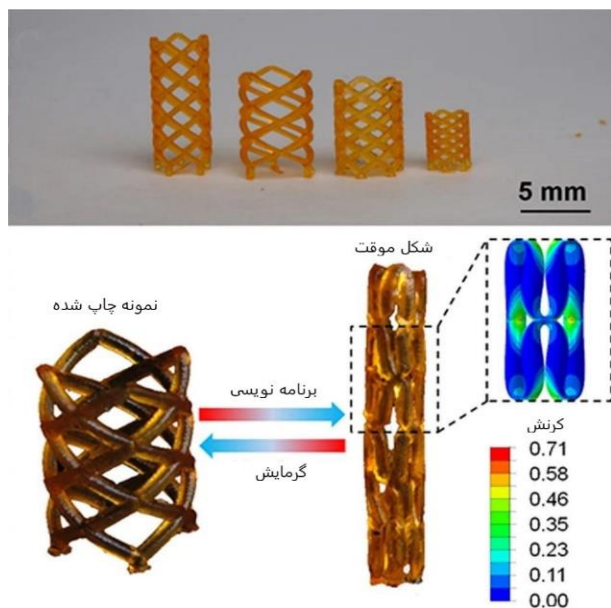
انقلابی در ساخت ایمپلنت‌های هوشمند ایجاد کرده که قادرند با تغییرات آناتومیک بدن تطبیق پیدا کنند. تولید داربست‌های بافتی پویا که همراه با رشد سلول‌ها تکامل می‌یابند، سیستم‌های رهایش داروی هوشمند پاسخگو به محرک‌های بیولوژیکی و پروتوزهای فعال با قابلیت تغییر شکل دینامیک از جمله پیشرفت‌های چشمگیر این حوزه است. همچنین ساخت اندام‌های مصنوعی با عملکردی مشابه بافت‌های زنده، افق‌های جدیدی در پیوند اعضا گشوده است [۲۳-۲۶]. صنعت رباتیک نیز از مزایای این فناوری بهره‌مند شده است. توسعه ربات‌های نرم با قابلیت تغییر شکل پویا، ساخت عضلات مصنوعی پاسخگو به محرک‌های مختلف، تولید مفاصل رباتیک خودتنظیم و ایجاد پوست‌های مصنوعی حساس به فشار و دما، همگی از دستاوردهای چاپ چهاربعدی در این زمینه هستند [۲۳، ۲۴]. در صنایع هوافضا و خودروسازی این فناوری امکان تولید قطعات سبک‌وزن با قابلیت تغییر شکل در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم کرده است. توسعه سیستم‌های بال و سطوح کنترلی هوشمند برای هواپیماها، ساخت قطعات خودترمیم‌شونده برای کاربردهای فضایی و تولید سیستم‌های خنک‌کننده فعال و خودتنظیم از دیگر کاربردهای مهم آن محسوب می‌شود. حوزه‌های نوظهوری مانند تولید منسوجات هوشمند با قابلیت تغییر ویژگی‌های فیزیکی، ساخت حسگرهای پوشیدنی تطبیق‌پذیر، توسعه سیستم‌های میکروسیال پویا و تولید فیلترهای هوشمند خودتنظیم نیز از این فناوری بهره می‌برند. با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به توسعه مواد هوشمند با حساسیت بالاتر، مسائل مقیاس‌پذیری و تولید انبوه و ضرورت استانداردسازی جدید همچنان وجود دارند. ادغام این فناوری با هوش مصنوعی برای ایجاد سیستم‌های خودیادگیر از جمله جهت‌گیری‌های آینده این حوزه به شمار می‌رود [۲۵]. در راستای پیشرفت‌های علمی و فناوری، تولید داربست‌های بافتی پویا که می‌توانند با رشد سلول‌ها تکامل یابند، به توسعه ربات‌های نرم با قابلیت تغییر شکل و تطبیق پویا با محیط و همچنین ساخت عضلات مصنوعی با پاسخگویی به محرک‌های مختلف منجر شده است؛ در حالی که تولید مفاصل رباتیک خودتنظیم با قابلیت یادگیری حرکتی، ایجاد پوست‌های مصنوعی حساس به فشار و دما برای ربات‌ها، ایمپلنت‌های استخوانی با قابلیت تطبیق با رشد بافت، سیستم‌های رهایش داروی فعال‌شونده با نشانگرهای زیستی و پوشش‌های هوشمند با قابلیت خودترمیمی برای کاربردهای صنعتی را نیز ممکن ساخته است [۳۶]. نمونه‌های موفق پیاده‌سازی این فناوری شامل استنت‌های عروقی با قابلیت تنظیم قطر بر اساس شرایط فیزیولوژیک، ایمپلنت‌های استخوانی

این مشکل، برنامه‌ریزی و ایجاد انبساط آنیزوتروپیک ضروری است. تحقیقات نشان داده‌اند که با ترکیب الیاف سلولزی و جوهر هیدروژل، می‌توان انبساط را کنترل کرد. همچنین، تغییر دما می‌تواند به کنترل عملکرد هیدروژل‌ها کمک کند. طراحی‌های خاص مانند لولا نیز برای جلوگیری از انبساط بیش از حد مؤثر بوده‌اند. در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در این زمینه امکان توسعه ساختارهای پیچیده و کارآمدتری را فراهم کرده است [۱۹].

مواد پاسخگو به PH این مواد هوشمند قادرند به تغییرات PH پاسخ دهند و بر اساس مقدار PH دچار تغییر شکل و حجم شوند، این تغییر شکل در پاسخ به مقادیر مختلف PH ، این مواد را برای فناوری چاپ چهاربعدی مناسب می‌سازد. پلی‌الکترولیت‌ها از جمله پلیمرهایی هستند که به PH حساس بوده و در چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ زیرا این پلیمر به دلیل وجود یک گروه جانبی قابل یونیزه می‌تواند پروتون‌ها را در هنگام تغییر PH دریافت یا اهداء کنند. هنگامی که یک پروتون آزاد می‌شود، زنجیره پلیمر به دلیل دافعه الکترواستاتیکی کشیده می‌شود که منجر به تغییر شکل در ساختار می‌گردد و هنگامی که پروتون پذیرفته می‌شود، ساختار خنثی می‌شود. پلی‌الکترولیت‌ها شامل پلی‌کاتیون‌ها یا پلی‌پایه‌ها (مانند نمک آمونیوم) هستند که به عنوان گروه عملکردی و پلی‌آنیون‌ها یا پلی‌اسیدها (گروه‌های کربوکسیل یا سولفونیک) به عنوان زنجیره‌های جانبی قابل یونیزه هستند. زنجیره‌های جانبی پروتون را در مقادیر PH بالاتر آزاد می‌کنند (کشیده می‌شوند) و در مقادیر PH پایین‌تر پروتون را قبول می‌کنند (خنثی می‌شوند). در حالی که گروه عملکردی پروتون را در مقادیر PH پایین‌تر آزاد کرده و در مقادیر PH بالاتر پروتون را قبول می‌کند [۱۹].

۳- کاربردهای چاپ چهار بعدی

فناوری چاپ چهاربعدی با قابلیت منحصر به فرد تغییر شکل و تطبیق‌پذیری در پاسخ به محرک‌های محیطی، تحولات گسترده‌ای در صنایع مختلف ایجاد کرده است. در حوزه معماری و ساخت‌وساز، این فناوری امکان تولید مصالح هوشمند با قابلیت تغییر شکل بر اساس شرایط محیطی را فراهم آورده که منجر به خلق سازه‌های خودتاشونده و خودسازمان‌ده با فرم‌های پیچیده‌ای شده که پیش از این با روش‌های سنتی غیرقابل دستیابی بودند. سیستم‌های پوسته‌ای هوشمند با قابلیت تنظیم دینامیک از دیگر دستاوردهای این فناوری در این حوزه محسوب می‌شود [۲۲]. در پزشکی و مهندسی پزشکی، چاپ چهاربعدی



شکل ۵ نمونه استنت چاپ شده و واکنش آن به حرارت [۲۶]

چالش دیگر به پیچیدگی‌های طراحی و مدل‌سازی مربوط می‌شود. برخلاف چاپ سه‌بعدی که در آن طراحی‌ها ایستا هستند، در چاپ چهاربعدی باید رفتار دینامیک ماده و نحوه تغییر شکل آن در طول زمان را پیش‌بینی کرد. این امر نیازمند نرم‌افزارهای پیشرفته شبیه‌سازی چندفیزیکی است که بتوانند رفتار مواد هوشمند را تحت شرایط مختلف محیطی مدل‌سازی کنند. همچنین طراحی هندسه‌های مناسب که بتوانند به صورت کنترل‌شده‌ای تغییر شکل دهند به تخصص ویژه‌ای نیاز دارد. به عنوان مثال، طراحی الگوهای شبکه‌بندی خاص یا مناطق با ضخامت‌های متفاوت در یک قطعه می‌تواند نحوه و جهت تغییر شکل را کنترل کند. فقدان استانداردهای طراحی و ابزارهای نرم‌افزاری کاربرپسند، ورود طراحان به این حوزه را با مشکل مواجه کرده است. در زمینه فرآیندهای تولید نیز چالش‌های فنی متعددی وجود دارد. چاپ چهاربعدی نیازمند دقت بسیار بالایی در پارامترهای فرآیند مانند دمای چاپ، سرعت رسوب‌گذاری، الگوی پرینت و شرایط پسا پردازش است. هرگونه انحراف در این پارامترها می‌تواند منجر به نقص در عملکرد تغییر شکل شود. به عنوان مثال، در چاپ پلیمرهای حافظه‌شکل، توزیع نادرست دما ممکن است باعث شود برخی مناطق زودتر یا دیرتر از مناطق دیگر تغییر شکل دهند. همچنین، هماهنگ کردن رفتار مواد مختلف در چاپ چندماده‌ای (مانند ترکیب پلیمرهای با پاسخ دمایی متفاوت) نیاز به کنترل دقیق فرآیند دارد. محدودیت‌های فعلی در سرعت چاپ و ابعاد قابل تولید نیز از موانع مهم در مسیر تولید انبوه محسوب می‌شوند. از دیدگاه اقتصادی، هزینه بالای مواد هوشمند و تجهیزات تخصصی مورد نیاز برای چاپ

تطبیق‌پذیر با رشد بافت، سیستم‌های رهایش داروی فعال‌شونده با نشانگرهای زیستی و پوشش‌های هوشمند خودترمیم‌شونده برای کاربردهای صنعتی هستند که همگی گواه پتانسیل بالای این فناوری در تحول صنایع مختلف می‌باشند. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است یک استنت قلبی و عروقی با استفاده از این فناوری تولید شده است. این استنت که از پلیمرهای حافظه‌شکل در ساخت آن استفاده شده است پتانسیل بهتری نسبت به نمونه فلزی نشان داده است. در نتیجه این استنت دارای قابلیت تغییر شکل است و می‌تواند به محرک‌های حرارتی پاسخ دهد و مورفولوژی استنت تحت شرایط مورد نیاز تغییر کند [۲۶].

۴- چالش‌های چاپ چهار بعدی

چاپ چهاربعدی به عنوان تحولی نوین در فناوری‌های ساخت افزوده، امکان تولید اشیایی با قابلیت تغییر شکل و عملکرد پویا در پاسخ به محرک‌های محیطی مانند دما، رطوبت، نور یا میدان‌های الکترومغناطیسی را فراهم می‌کند. این فناوری که تکامل یافته چاپ سه‌بعدی محسوب می‌شود کاربردهای امیدوارکننده‌ای در حوزه‌های پزشکی (مانند ایمپلنت‌های هوشمند)، هوافضا (سازه‌های خودتغییر شکل)، رباتیک نرم و صنایع پیشرفته دارد. با این حال، توسعه و تجاری‌سازی این فناوری با چالش‌های متعددی روبرو است که نیازمند توجه جدی محققان و صنعتگران می‌باشد.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در زمینه مواد هوشمند مورد استفاده است. این مواد باید بتوانند به صورت کنترل‌شده‌ای به محرک‌های خارجی پاسخ داده و خواصی مانند حافظه شکلی، الاستیسیته قابل برنامه‌ریزی و پایداری مکانیکی در چرخه‌های متعدد تغییر شکل را از خود نشان دهند. در حال حاضر محدودیت‌های جدی در تنوع و عملکرد مواد هوشمند وجود دارد. به عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکل اگرچه قابلیت تغییر شکل دارند؛ اما معمولاً به محرک‌های دمایی محدود شده و زمان پاسخ‌دهی کندی دارند. هیدروژل‌ها که به محرک‌های رطوبتی پاسخ می‌دهند اغلب از استحکام مکانیکی پایینی برخوردارند. آلیاژهای حافظه‌دار نیز با وجود استحکام بالا، هزینه تولید بالایی داشته و کنترل دقیق دمای تبدیل آن‌ها چالش برانگیز است. توسعه مواد کامپوزیتی جدید که بتوانند چندین محرک مختلف (مثلاً همزمان به دما و رطوبت) پاسخ دهند و در عین حال خواص مکانیکی مطلوبی داشته باشند از نیازهای اساسی این حوزه محسوب می‌شود.

شیمیایی و بیولوژیکی واکنش نشان دهند. این ویژگی‌ها کاربردهای متنوعی نظیر مهندسی بافت، سیستم‌های تحویل دارو و حسگرها را فراهم می‌کنند. به‌عنوان مثال، مواد چاپ شده به صورت چهاربعدی می‌توانند به‌طور خودکار شکل خود را در پاسخ به تغییرات دما تغییر دهند که این امر در درمان‌های پزشکی به ویژه در زیرساخت‌های توموری و درمان‌های ضد درد بسیار مفید است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که برقراری تعامل میان طراحان و مواد اولیه می‌تواند به ایجاد مواد چندکاربردی با قابلیت پاسخگویی به چندین محرک مختلف منجر شود. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است ساختار مواد هوشمند در پاسخ به محرک‌های محیطی خود تغییر می‌کنند که در اکثر زمینه‌ها کاربرد دارند [۳۵].

این مواد به‌طور الهام گرفته از طبیعت طراحی شده و قابلیت تغییر شکل دارند که آنها را برای ساخت اجزای پزشکی مانند استنت‌ها و ایمپلنت‌ها بسیار مناسب می‌سازد. با چاپ چهاربعدی، امکان ایجاد اندام‌های مصنوعی با ویژگی‌های مورد نیاز بیماران و همچنین چاپ بافت‌های زیستی امکان‌پذیر شده است. شایان ذکر است که فناوری چاپ چهاربعدی با وجود چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای راه‌اندازی، زمان پایین چاپ و نیاز به مواد اولیه مناسب، همچنان با پتانسیل‌های بزرگ در حال پیشرفت است. به‌خصوص در زمینه‌های نوآوری و تغییر شکل‌های هوشمند، انتظارات زیادی برای آینده این فناوری وجود دارد. این انتظار می‌رود که با گذر زمان، چاپ چهار بعدی به یکی از ارکان اصلی تجارت و تولید در صنایع مختلف تبدیل شود و نقش مهمی در تسهیل فرایند تولید و بهبود کیفیت محصولات ایفا کند. همانطور که در شکل (۷) نشان‌دهنده واکنش یک ماده هوشمند به تغییرات دما است که با تغییرات دما سازه تغییر شکل می‌دهد [۳۶].

چاپ چهار بعدی به‌عنوان یک فناوری نوظهور در زمینه مهندسی بافت عروقی بسترهای جدیدی برای ایجاد بافت‌های پیچیده و عملکردی فراهم کرده است. این تکنیک که بر پایه چاپ سه بعدی بنا نهاده شده است، با افزودن بعد چهارم، یعنی زمان، به فرایند تولید امکان ایجاد ساختارهایی را فراهم می‌آورد که می‌توانند به محرک‌های محیطی واکنش نشان دهند و به‌طور دینامیک تغییر شکل دهند. در گذشته، مهندسی بافت عروقی بسیاری از چالش‌ها را از جمله نیاز به تأمین اکسیژن و مواد مغذی برای سلول‌ها با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در زمینه چاپ چهار بعدی می‌تواند این مشکلات را به شکل چشمگیری حل کند. به‌عنوان مثال، این فناوری قادر است تا با استفاده از مواد هوشمند که به شرایط

چهاربعدی، سرمایه‌گذاری در این حوزه را برای بسیاری از صنایع محدود کرده است. قیمت مواد هوشمند ممکن است ده‌ها برابر مواد معمولی مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی باشد. همچنین، نبود زنجیره تأمین مطمئن برای این مواد و نیاز به شرایط خاص نگهداری (مانند کنترل رطوبت یا دما) بر پیچیدگی‌های لجستیکی می‌افزاید. از سوی دیگر، عدم بلوغ فناوری و نبود استانداردهای صنعتی مشخص، ریسک سرمایه‌گذاری در این حوزه را افزایش داده است. مسائل مربوط به مالکیت فکری و حفاظت از طراحی‌های نوآورانه نیز نیاز به توجه ویژه دارد. در حوزه کاربردهای پزشکی، چالش‌های ویژه‌ای مانند نیاز به مواد زیست‌سازگار با قابلیت تغییر شکل کنترل‌شده در محیط بدن وجود دارد. ایمپلنت‌های هوشمند باید بتوانند در پاسخ به محرک‌های فیزیولوژیکی (مانند تغییر PH یا دما) تغییر شکل داده و در عین حال از نظر مکانیکی با بافت‌های اطراف سازگار باشند. نگرانی‌هایی درباره سمیت احتمالی برخی مواد هوشمند و محصولات تجزیه آنها نیز وجود دارد که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. در کاربردهای صنعتی نیز مسائلی مانند دوام درازمدت مواد در چرخه‌های مکرر تغییر شکل، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در شرایط محیطی مختلف نیاز به بررسی دارند. برای غلبه بر این چالش‌ها، رویکردهای چند رشته‌ای ترکیب‌کننده تخصص در علوم مواد، مهندسی مکانیک، علوم کامپیوتر و حوزه‌های کاربردی مورد نیاز است. سرمایه‌گذاری در تحقیقات پایه‌ای برای توسعه نسل جدید مواد هوشمند، بهبود روش‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار مواد، استانداردسازی فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌ها از اولویت‌های اصلی محسوب می‌شوند. همکاری نزدیک بین دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و صنایع می‌تواند شتاب‌دهنده پیشرفت در این حوزه باشد. با وجود تمام چالش‌ها، چاپ چهاربعدی پتانسیل ایجاد تحول در بسیاری از صنایع را دارد و انتظار می‌رود در سال‌های آینده شاهد پیشرفت‌های چشم‌گیری در این فناوری باشیم [۹، ۱۹، ۲۷-۳۴].

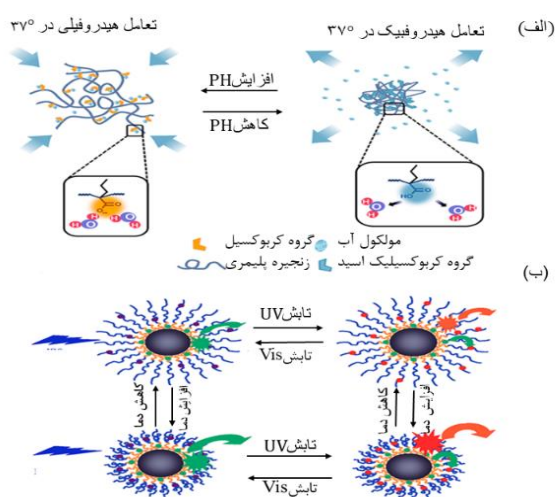
۵- پیشرفت‌های اخیر و آینده چاپ چهار بعدی

پیشرفت‌های اخیر در حوزه چاپ چهاربعدی تحولی عمده در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در علوم زیستی و پزشکی به شمار می‌روند. برخلاف چاپ سه‌بعدی که مواد را به صورت استاتیک تولید می‌کند، چاپ چهاربعدی امکان تغییر شکل و عملکرد مواد را با توجه به تحریکات خاص فراهم می‌آورد. این تکنولوژی مبتنی بر مواد پلیمری و نانوکامپوزیت‌های پیشرفته‌ای است که قادرند به تغییرات محیطی مانند دما، نور، PH و سایر محرک‌های

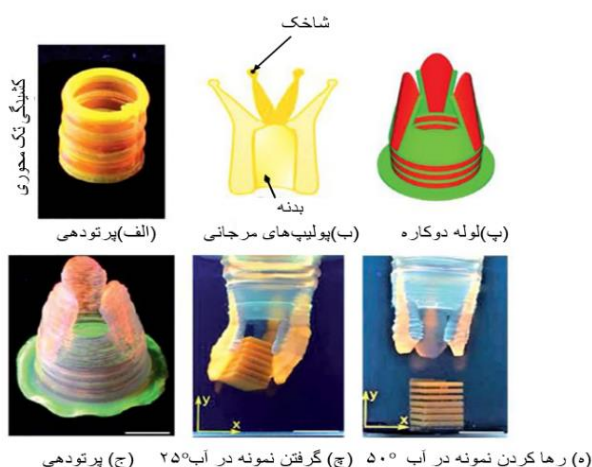
به‌طور کلی، چاپ چهار بعدی به‌عنوان یک راهکار نوآورانه در مهندسی بافت، نه تنها برای فراهم آوردن ساختارها و مدل‌های عروقی کارآمد، بلکه برای بهبود و توسعه روش‌های درمانی در تقریباً تمامی بیماری‌های مربوط به سیستم عروقی، پتانسیل فوق‌العاده‌ای دارد. با ادامه تحقیقات و پیشرفت در این زمینه، انتظار می‌رود که چاپ چهار بعدی به یکی از روش‌های کلیدی در آینده درمان‌های پزشکی و مهندسی بافت تبدیل شود [۳۷]. به‌عنوان مثال، تکنیک‌های نوین چاپ چهار بعدی می‌توانند به تولید ساختارهای میکرو قابل تنفس و متناسب با نیازهای بیمار کمک کنند. به‌علاوه، استفاده از مواد هوشمند در این چاپ به جای مواد سنتی می‌تواند فرآیند بهبود و ترمیم بافت‌ها را شتاب بخشد و کیفیت زندگی بیماران را ارتقاء دهد. در آینده، انتظار می‌رود که چاپ چهار بعدی با پیشرفت مواد و تکنولوژی‌های جدیدی که بتوانند به‌طور مؤثرتری به نیازهای بالینی پاسخ دهند به یکی از روش‌های اصلی در مهندسی بافت‌های عروقی تبدیل شود. با بکارگیری این تکنیک‌ها می‌توان به تولید بافت‌های عروقی پیچیده و کامل نزدیک‌تر شد و در نهایت از آن‌ها در درمان بیماری‌های قلبی و عروقی در کنار سایر زمینه‌های بالینی استفاده کرد. به این ترتیب، چاپ چهار بعدی نه تنها قابلیت‌های علمی و تکنولوژیک را متحول خواهد کرد؛ بلکه امیدی به رویارویی با چالش‌های موجود در حوزه پزشکی و ترمیم بافت نیز خواهد بود [۳۷].

چاپ چهار بعدی به‌عنوان یک تکنولوژی نوظهور در زمینه ساخت و تولید مواد بیوداروها، سرعت بالایی در پیشرفت‌های خود داشته و به‌عنوان نقطه عطفی در تحولات عرصه پزشکی شناخته می‌شود. این تکنیک به مواد هوشمند این امکان را می‌دهد که بر اساس محرک‌های محیطی مانند دما، رطوبت و PH تغییر شکل و عملکرد دهند. استفاده از چاپ سه بعدی در ایجاد ابزارها و ساختارهای پیچیده به ویژه در زمینه مهندسی بافت، دارورسانی، ابزارهای جراحی و تشخیصی و همچنین ایمپلنت‌ها و پروتزها گسترش یافته است. تحقیقات اخیر نشان داده است که ترکیب مواد مختلف می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و زیستی آن‌ها منجر شود. به‌عنوان مثال، ادغام هیدروژل‌ها و پلیمرهای زیستی می‌تواند به ایجاد ساختارهای جدیدی منجر شود که در فرآیندهای ترمیم بافت و دارورسانی دارای کارایی بهتری هستند [۳۸]. از جمله موادی که به‌طور گسترده در چاپ چهار بعدی استفاده می‌شوند، می‌توان به پلیمرهای حافظه‌شکل و الاستومرهای مایع کریستالی اشاره کرد. این مواد به‌خصوص به دلیل قابلیت تغییر شکل و واکنش به محرک‌های خارجی، به‌طور فزاینده‌ای در پروژه‌های صنعتی و

محیطی پاسخ می‌دهند، ساختارهای توخالی با قابلیت رشد و تطابق با بافت‌های طبیعی را ایجاد کند. چاپ چهار بعدی می‌تواند در ترکیب با تکنیک‌های زیست‌پرینتینگ، به تولید بافت‌های عروقی متنوعی کمک کند، که می‌تواند قابلیت‌های بهتری نسبت به روش‌های سنتی در ایجاد بافت‌های عروقی از خود نشان دهد. این تکنیک نه تنها به تولید ساختارهای عروقی با دقت بالا کمک می‌کند، بلکه همچنین می‌تواند فرآیند بلوغ و تعدیل بافت‌ها بعد از چاپ را بهبود بخشد.



شکل ۶ الف- پاسخ یک ماده به تغییرات رطوبت و PH محیط،
 ب- پاسخ یک ماده به تغییرات پرتوهای محیط [۳۵].



شکل ۷ تغییر شکل مواد هوشمند چاپ شده چهار بعدی؛

الف- انبساط یک محوری یک لوله دو شکل پذیر، ب- ساختار یک پلیپ مرجانی، پ- نمایش شماتیک یک لوله با دو عملکرد، ج- لوله چاپ شده در چاپ چهار بعدی و پرتو دهی شده، چ- گرفتن (سپس بلند کردن) مکعب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به دلیل انبساط یک محوری لوله هنگام معلق بودن در آب، ه- با گرم شدن به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، انگشتان باز شدند تا مکعب را آزاد کنند [۳۶].

علمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، چاپ چهاربعدی می‌تواند به تولید دستگاه‌های هوشمند، مواد متافیزیکی و حتی کاربردهای پزشکی مانند مهندسی بافت منجر شود. تکنیک‌های نوین مانند چاپ چند ماده‌ای و چاپ با استفاده از هیدروژل‌های کامپوزیتی نیز به سرعت در حال رشد هستند و قابلیت‌های جدیدی را برای کاربردهای پیچیده‌تری فراهم می‌آورند [۳۹]. به عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکل، الاستومرهای مایع بلورین و آلیاژهای حافظه‌دار، موانع خاص خود را دارند که نیاز به تحقیق بیشتر دارد. در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به ویژه یادگیری ماشین به عنوان راهکاری بی‌نظیر برای تسریع در طراحی و کشف مواد و ساختارهای جدید مطرح شده است. با این حال، محدودیت‌های مربوط به نقص تفکر منطقی و قابل توضیح بودن در روش‌های متداول هوش مصنوعی، محققان را به سوی رویکردهای جدیدی مانند هوش مصنوعی نوروسیمبلیک سوق می‌دهد. این رویکرد با ترکیب توانایی‌های یادگیری شبکه‌های عصبی با استدلال منطقی و درک معنایی هوش مصنوعی سمبلیک، می‌تواند محیطی بهتر برای کاوش و کشف مواد فعال و ساختارهای پیچیده ایجاد کند. آینده چاپ چهاربعدی به پیشرفت در زمینه‌های مختلفی وابسته است. بهبود اتوماسیون در طراحی و چاپ، بهینه‌سازی ارزش‌های عملکردی و ایجاد مواد جدید با قابلیت‌های بیشتر می‌تواند امکان استفاده وسیع‌تری از این فناوری را در صنایع مختلف فراهم کند. پژوهش‌های آینده نیاز به تمرکز بر روی توسعه مواد هوشمند نسل آینده و ساختارهای تغییرشکل‌پذیر دارند تا بتوانند به ویژگی‌های مطلوب‌تری دست یابند و در نهایت به کاربردهای جدید و نوآورانه منجر شوند. با توجه به نوآوری‌ها و پیشرفت‌های پیوسته در این حوزه، فرصت‌های بیشتری برای بهره‌برداری از پتانسیل‌های چاپ چهاربعدی در آینده وجود خواهد داشت [۴۰]. چاپ چهاربعدی در مقیاس میکروسکوپی هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد. هیدروژل‌ها، مواد کریستالی مایع و مواد کامپوزیتی به عنوان مهم‌ترین دسته‌های مواد در این حوزه شناخته شده‌اند. هیدروژل‌ها به دلیل قابلیت جذب آب و تطبیق‌پذیری خود در محیط‌های بیولوژیکی، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد می‌توانند به طور قابل توجهی تغییر حجم دهند و به آن‌ها اجازه می‌دهند که به محرک‌های خارجی پاسخ دهند. از سوی دیگر، مواد کریستالی مایع، به دلیل توانایی آن‌ها در تغییر حالت در پاسخ به نور یا درجه حرارت، علاقه‌مندی‌های زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یک چالش اصلی در این زمینه، توسعه مواد با قابلیت‌های پاسخگو و همچنین ناپایداری ساختارها است. به علاوه، برای تحقق

قابلیت‌های چاپ چهاربعدی در مقیاس میکروسکوپی، نیاز به بهبود تکنیک‌های چاپ و طراحی مواد جدید وجود دارد. در آینده، انتظار می‌رود که از این فناوری در کاربردهای پیچیده‌تری مانند طراحی ساختارهای پیچیده‌تر و دقیق‌تر، تولید ربات‌های نرم و ایجاد سنسورهای پیشرفته بهره‌برداری شود. به طور کلی، پیشرفت‌های اخیر در زمینه چاپ چهاربعدی نویدبخش آینده‌ای روشن برای این فناوری هستند و لازم است که محققان بر روی چالش‌ها و محدودیت‌های موجود کار کنند تا بتوانند این فناوری را به صورت گسترده‌تری در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار دهند [۴۱]. در بین این مواد، ژل‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و مدت‌زمان طولانی در کنار ویژگی‌های چالشی، در حوزه رباتیک نرم به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. چاپ چهاربعدی به محققان اجازه می‌دهد اشیاء پیچیده‌ای را طراحی کنند که به طور پیش‌برنامه‌ریزی شده قادر به تغییرشکل می‌باشند. این سوابق پیشرفت‌های اخیر در این زمینه، پتانسیل‌های عظیمی را در علم و فناوری، به ویژه در زمینه رباتیک نرم و دستگاه‌های بیونیک به نمایش می‌گذارد. با توجه به پیشرفت‌های جدید در زمینه چاپ چهار بعدی، محققان به دنبال ارائه راهکارهایی هستند که این فناوری را به کاربردهای گسترده‌تری در پزشکی، سنسورها و سیستم‌های رباتیک نرم برسانند. این فناوری به وابستگی کمتری به تأسیسات پیچیده و امکان ساخت سیستم‌های هوشمند و خودکار منجر می‌شود. در نهایت، محققان بر این باورند که با تمرکز بر بهبود ویژگی‌های مواد، روش‌های ساخت، طراحی و مدل‌سازی، می‌توانند چالش‌های موجود را برطرف کرده و آینده‌ای روشن برای چاپ چهاربعدی ایجاد کنند [۴۲]. تحقیقات اخیر نشان داده است که پرینت چهاربعدی می‌تواند به طراحی محصول‌های تطبیق‌پذیر کمک کند که به انرژی‌های محیطی نظیر رطوبت، دما و فشار پاسخ دهند. از طریق چاپ قابل برنامه‌ریزی، قطعات می‌توانند به صورت جمع‌شونده و با کارایی بالا تولید شوند؛ به گونه‌ای که حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آن‌ها بهینه شود. همچنین این فناوری پتانسیل تغییر چشمگیری در زمینه رباتیک نرم دارد، جایی که می‌توان با استفاده از ساختارهای چاپی چهاربعدی بعدی، نیاز به موتورهای الکتریکی و حسگرهای پیچیده را کاهش داد. مواد هوشمند که در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند، به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند، از جمله مواد حافظه‌دار که قادر به یادآوری شکل‌های مختلف هستند. این مواد می‌توانند به سرعت به شکل اصلی خود بازگشته و یا به اشکال جدیدی تغییر یابند، که این ویژگی‌ها موجب کاربردهای گسترده‌تری برای آن‌ها در آینده خواهد شد. انتظار می‌رود که چاپ چهاربعدی در آینده نه تنها در توسعه

سنسورها و ارگان‌های مصنوعی کاربردی شود؛ بلکه در طراحی و تولید قطعاتی که خود به‌خود بهبود یافته و ترمیم می‌شوند نیز پیشرفت کند. با پیشرفت در این فناوری، چالش‌هایی همچون ارتباط بین خواص فیزیکی و دیجیتال مواد و برنامه‌ریزی مناسب برای دستیابی به تحولات مورد نظر در زمان مشخص وجود دارند که نیازمند توجه و تحقیق بیشتر هستند. به‌طور کلی، آینده چاپ چهاربعدی با تمرکز بر توسعه مواد جدید، بهبود فرآیندهای چاپ و شناسایی کاربردهای نوآورانه نویدبخش ابداعات و تغییرات چشمگیری در صنایع مختلف خواهد بود [۴۳]. مهم‌ترین پیشرفت‌ها در چاپ چهاربعدی در سال‌های اخیر شامل تولید مواد زیست‌ماده‌ای و تجدیدپذیر است که کاهش زیاله و مصرف انرژی را در ساخت‌وساز ممکن می‌سازد. این مواد به ویژه در ترکیب با فناوری چاپ چهاربعدی می‌توانند به‌طور خودکار اصلاح شوند یا خودراست‌سازی داشته باشند که به کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری دستی کمک می‌کند. همچنین، چاپ چهاربعدی به معماران و مهندسان این اجازه را می‌دهد که طرح‌های پیچیده‌تری را خلق کنند که با استفاده از روش‌های سنتی قابل دستیابی نیستند. با این پیشرفت‌ها آینده چاپ چهاربعدی به سمت مقیاس‌پذیری بیشتر و کاهش هزینه‌ها حرکت می‌کند. تحقیقات در زمینه افزایش قابلیت‌های مواد و بهبود فناوری‌های چاپ باید ادامه یابد. به‌علاوه، رویکردهای بین‌رشته‌ای بین دانشمندان مواد و مهندسان برای توسعه موارد جدید و بهبود سازگاری با استانداردها و مقررات ساختمان ضروری است. پذیرش عمومی از زیرساخت‌های چاپ‌شده به این فناوری بستگی دارد و همکاری بین نهادهای قانون‌گذار و صنعت برای به‌روزرسانی کدها و استانداردها برای استفاده از چاپ چهاربعدی حیاتی است. در نهایت، اگرچه چاپ چهاربعدی در مراحل اولیه تحقیقات قرار دارد، پتانسیل آن برای تغییر روش‌های طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌ها شگفت‌انگیز است و می‌تواند به ساخت یک محیط زیست هوشمندتر، کارآمدتر و پایدارتر برای نسل‌های آینده کمک کند [۴۴].

در پیشرفت‌ها و مطالعه‌های جدید انجام شده صمدی اقدم و همکاران [۴۵] به توسعه یک راه‌حل المان محدود برای تحلیل پاسخ ارتعاشی تیرهای کامپوزیتی چندلایه از آلایژ حافظه‌دار پرداختند. با استفاده از معادلات حرکت تیر اوپلر-برنولی و مدل پوراسادیون، روش نیومارک و تکنیک نیوتن-رافسون استفاده و اعتبارسنجی نتایج خود را با شبیه‌سازی تطبیق دادند. آنها در مطالعه خود به بررسی ویژگی‌های دینامیکی تیرهای آلایژی

حافظه‌شکل دو لایه و سه لایه پرداخته و پروفایل‌های انحراف-زمان، تنش-کرنش و سرعت-انحراف را پرداختند و نتیجه گرفتند که خاصیت هیستریزس آلایژهای حافظه‌شکل به کاهش دامنه‌های ارتعاشی در مراحل اولیه کمک کرده و ویژگی انرژی‌پذیری آن‌ها در تغییر فاز، آن‌ها را برای کنترل عملکرد دینامیکی در کاربردهای مهندسی مناسب می‌سازد. رحمت آبادی و همکاران [۴۶] نیز جهت بهبود اثر حافظه‌شکل برای پاسخ به حرارت-مغناطیس نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول^۱ برای چاپ چهاربعدی توسعه دادند که در آن نانوذرات اکسید آهن^۲ به ماتریس پلی‌اتیلنی افزوده شد. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید آهن به‌طور قابل توجهی مدول ذخیره و دمای انتقال شیشه‌ای کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده بهبود سختی و خواص حرارتی است. به‌ویژه، کامپوزیت حاوی ۱۵٪ اکسید آهن به‌عنوان ترکیب بهینه شناخته شد و بالاترین استحکام کششی و تعادلی مطلوب بین یکپارچگی مکانیکی و انعطاف‌پذیری را نشان داد. همچنین آنها در مطالعه‌ای دیگر [۴۷] به بررسی نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول اصلاح‌شده با کربن سیاه^۳ پرداختند که نوعی پلیمر حافظه‌شکلی هستند و به روش چاپ چهاربعدی تولید می‌شوند. نانوکامپوزیت‌ها با غلظت‌های مختلف کربن سیاه (۰/۵٪، ۱٪ و ۳٪) طراحی کردند تا عملکرد پلی‌اتیلن را در کاربردهای چاپ چهاربعدی بهبود بخشند. آنها نتیجه گرفتند که افزودن کربن سیاه دمای انتقال شیشه‌ای را تغییر داده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، به‌طوری‌که کامپوزیت با ۱٪ کربن سیاه بهترین عملکرد را داشت. همچنین توزیع یکنواخت ذرات کربن سیاه تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی و قابلیت چاپ داشت.

رحمت آبادی و همکاران [۴۸] در مطالعه‌ای جدید به بررسی هم‌افزایی بین ترکیب پلیمرهای حافظه‌شکل، چاپ چهاربعدی و برنامه‌ریزی سرد پرداختند تا عملکرد اثر حافظه‌شکل را بهبود بخشند و کاربردهای پزشکی ساختارهای متخلخل را افزایش دهند. ساختارهای متخلخل پلی‌لاکتیک اسید-پلی‌اورتان با الگوهای چاپ مختلف و تغییر شکل‌های اعمال شده تحت روش‌های فشرده‌سازی محدود و غیرمحدود در دمای اتاق برنامه‌ریزی سرد شدند و در فاز الاستیک بازیابی شدند. نسبت‌های تثبیت شکل و بازیابی شکل محاسبه و مورفولوژی مقطع عرضی با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. مقادیر تثبیت شکل در محدوده ۳۹/۷۵٪ تا ۷۱/۲۷٪ بود، در حالی‌که نسبت‌های تقریباً کامل بازیابی شکل (۱۰۰٪) برای تمامی

³ PETG-CB¹ (PETG)-Fe₃O₄² Fe₃O₄

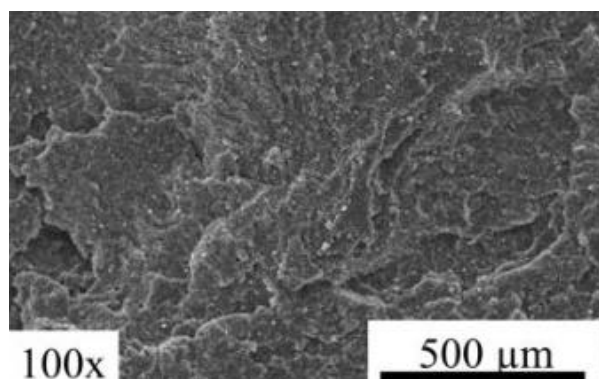
درجه بلورینگی و ویژگی‌های ویسکوالاستیک این کامپوزیت منجر به بهبود خواص حافظه‌شکلی مانند ثبات شکل و بازیابی شکل شد. مطالعه آنها نشان داد که پتانسیل استفاده از پلیمرهای حافظه‌دار کامپوزیتی توسعه‌یافته از طریق فناوری چاپ چهاربعدی برای ایجاد اشکال پیچیده در ساختارهای خودجمع‌شونده و دستگاه‌های بیومدیکال هوشمند در آینده وجود دارد. همچنین ستوده و همکاران [۵۰] ترکیبی از پلی‌لاکتیک اسید و میکروذرات فریت استرانسیوم برای ایجاد یک فیلامنت کامپوزیتی ساختند. پس از چاپ و بازیابی شکل از حالت خمیده، برگشت‌پذیری قطعات چاپ شده با استفاده از آهنربای نئودیمیوم با درجه N42 آزمایش شد و برگشت‌پذیری قطعات به‌طور موفقیت‌آمیزی انجام شد. قابلیت کنترل فرآیند بازیابی شکل از طریق یک آزمایش تجربی با استفاده از مدل به‌دست‌آمده نشان داده شد. تفاوت ۳/۶۵٪ بین بازیابی شکل نمونه تجربی و مقدار بازیابی شکلی که از نرم‌افزار به‌دست آمده، دقت بالای مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

لی و همکاران [۵۱] پلی‌کربنات را به‌عنوان ماده پایه انتخاب کردند که دمای تغییر شکل حرارتی آن ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است و با فیبر کربن و نانولوله‌های کربنی ترکیب شد. این کامپوزیت سه‌گانه با مسیرهای هدایت‌پذیری "نقطه + خط" ساخته شد. این ماده تحت ولتاژ مستقیم ۵۰ ولت عملکرد الکتریکی برتر و رفتار حافظه‌دار شکل را از خود نشان داد. مسیر هدایت‌پذیری "نقطه + خط" عملکرد الکتریکی مطلوبی را بدون مانع شدن در عملکرد حافظه‌دار شکل پلی‌کربنات ارائه داد. نمونه‌های حافظه‌دار را به شکل U طراحی کردند تا خواص بازیابی شکل را افزایش دهند. یافته‌های آنها پتانسیل کاربردهای وسیع این ماده را در حوزه هوافضا برجسته می‌کند.

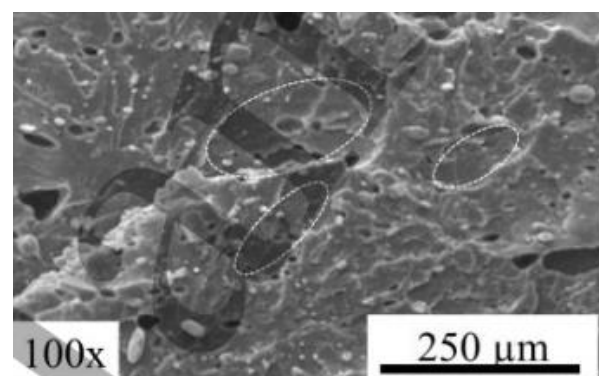
همانگونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، چاپ چهار بعدی در زمینه‌های پزشکی پیشرفت بالقوه‌ای داشته است. در این خصوص کانتاروس و همکاران [۵۲] به بررسی پتانسیل کاربردهای بهداشتی چاپ چهاربعدی پرداختند و به کاربردهایی همچون ایمپلنت‌های خودترمیم‌شونده، استنت‌های هوشمند، سیستم‌های تحویل داروی شخصی‌سازی‌شده و دستگاه‌های پروتزهای پاسخ‌محور اشاره کردند. آنها به وضوح مطرح کردند که پیشرفت‌های حاصل از چاپ سه‌بعدی بستر مناسبی برای این نوآوری‌ها را فراهم کرده است، در حالی که ویژگی‌های منحصر به فرد مواد هوشمند روش‌های جدیدی برای مقابله با مسائل بهداشتی موجود ایجاد می‌کند. کاربرد گسترده چاپ چهاربعدی در پزشکی در حال حاضر با محدودیت‌های مواد، چالش‌های مقرراتی و چالش‌های مالی مواجه است. با وجود این چالش‌ها،

نمونه‌های متخلخل مشاهده شد. نسبت‌های پایین تثبیت شکل به وجود دو مرحله بازگشت و آرامش ساختار پس از بارگذاری در برنامه‌ریزی سرد نسبت داده می‌شود که ناشی از رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک است. دمای انتقال شیشه‌ای ترکیب پلی‌لاکتیک‌اسید-پلی‌اورتان برابر با ۶۹ درجه سانتی‌گراد بود و به مواد خام منتقل شد که نشان‌دهنده احتمال وجود تعامل بین دو جزء است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توزیع یکنواخت ذرات پلی‌اورتان و مورفولوژی قطره‌ای ماتریس در ترکیب پلی‌لاکتیک‌اسید-پلی‌اورتان را نشان داد. پس از چاپ، قطرات پلی‌اورتان کشیده شدند و مورفولوژی دریا-زیره‌ای در برخی نواحی مشاهده شد.

شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پلی‌لاکتیک اسید-پلی‌اورتان: الف- فیلامنت، ب- نمونه‌های چاپ شده [۴۸].

دگزیت و همکاران [۴۹] در یک مطالعه جدید یک سیستم کامپوزیت پلیمر حافظه‌دار حساس به دما که با استفاده از پلی‌لاکتیک اسید و شیشه بیواکتیو با چاپ چهاربعدی مبتنی بر حلال ایجاد کردند. تأثیر شیشه بیواکتیو بر قابلیت‌های حرارتی و حافظه‌شکلی کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار دادند. افزایش

هوشمند و طراحی‌های محاسباتی، تحولی اساسی در صنایع مختلف ایجاد کرده است. در پزشکی، چاپ چهاربعدی امکان تولید ایمپلنت‌ها و استنت‌های هوشمندی را فراهم می‌کند که می‌توانند در بدن بیمار با توجه به شرایط فیزیولوژیکی تغییر شکل دهند. به عنوان مثال، رگ‌های خونی یا ساختارهای استخوانی چاپ‌شده می‌توانند به تدریج با رشد بافت‌های اطراف سازگار شوند. در مهندسی بافت، داربست‌های هوشمند چاپ‌شده قادرند با تحریک‌های مکانیکی یا شیمیایی، سلول‌ها را برای رشد هدایت کنند. در صنعت ساختمان، مصالحی مانند بتن یا کامپوزیت‌های هوشمند می‌توانند در برابر تغییرات دما یا رطوبت واکنش نشان داده و ترک‌ها را ترمیم کنند یا خواص عایق خود را تنظیم نمایند. کاربردهای نظامی و هوافضا نیز از این فناوری بهره می‌برند، مانند بال‌های هواپیما یا ماهواره‌هایی که قادرند در شرایط مختلف جوی یا مداری شکل خود را تغییر دهند تا کارایی بهینه داشته باشند. در رباتیک، ساختارهای نرم چاپ‌شده با قابلیت تغییر شکل، امکان حرکت و انطباق با محیط‌های پیچیده را فراهم می‌کنند. صنعت پوشاک نیز از این فناوری برای تولید لباس‌های هوشمند استفاده می‌کند که می‌توانند بر اساس دما یا رطوبت تغییر کنند یا حتی انرژی حرکتی را ذخیره نمایند. در حوزه انرژی، صفحات خورشیدی یا پنل‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند با تغییر جهت یا ساختار، بازدهی خود را افزایش دهند. سیستم‌های هوشمند آبیاری در کشاورزی که بر اساس رطوبت خاک منبسط یا منقبض می‌شوند نیز از دیگر کاربردهای این فناوری هستند. چاپ چهاربعدی حتی در تولید محصولات مصرفی مانند مبلمان یا اسباب‌بازی‌هایی که بتوانند خود را مونتاژ یا تنظیم کنند نیز استفاده می‌شود. یکی از جذابترین کاربردها در تولید سیستم‌های میکروسیال است که می‌توانند جریان مایعات را بر اساس محرک‌های شیمیایی کنترل کنند. این فناوری با کاهش نیاز به مونتاژ دستی، افزایش بهره‌وری انرژی و امکان ایجاد سیستم‌های خودترمیم‌شونده، آینده صنعت را متحول خواهد کرد. هرچند چالش‌هایی مانند هزینه بالای مواد هوشمند نیاز به طراحی‌های پیچیده محاسباتی و محدودیت در اندازه چاپ وجود دارد، اما پتانسیل آن برای ایجاد انقلابی در تولید و طراحی غیرقابل انکار است. با پیشرفت مواد و الگوریتم‌ها انتظار می‌رود کاربردهای چاپ چهاربعدی در حوزه‌های بیشتری ظهور کند و زندگی روزمره را دگرگون سازد.

۷- مراجع

- [1] E. Pei, J. Shen, and J. Watling, "Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and

پیشرفت‌های مداوم در فناوری‌ها، همراه با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، پتانسیل غلبه بر این مشکلات را فراهم می‌آورد و بهبود دقت، کارایی و شخصی‌سازی دستگاه‌های پزشکی را ممکن می‌سازد. همچنین وو و همکاران [۵۳] نیز در یک مطالعه مروری به توسعه مواد هوشمند لیگنین و پتانسیل آن‌ها برای چاپ چهار بعدی پرداختند. لیگنین، دومین منبع فراوان زیست‌توده تجدیدپذیر و پایدار است. آن‌ها در مطالعه خود وضعیت فعلی چاپ سه‌بعدی مواد لیگنین را دسته‌بندی کردند که شامل انتخاب و فرمولاسیون مواد لیگنین بر اساس تکنیک‌های مختلف چاپ، اصلاح شیمیایی لیگنین برای بهبود قابلیت چاپ و زمینه‌های کاربرد مرتبط است.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه ساخت افزودنی با کاربرد گسترده‌ای که در صنعت ایجاد کرده است موجب شده تا ساخت سازه‌های پیچیده آسان شود. چاپ سه‌بعدی که همان ساخت افزودنی است توجه بسیار زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. چاپ چهاربعدی نیز فناوری جدیدی می‌باشد که حالت پیشرفته چاپ سه‌بعدی است. بعد چهارم در این فناوری زمان می‌باشد. سازه‌های چاپ‌شده در چاپ چهاربعدی به محرک‌های خارجی پاسخ می‌دهند و این امر به آن‌ها اجازه می‌دهد تا برخی از ویژگی‌های خود را تغییر دهند. این رفتار پایه‌ای برای پیشرفت‌های انقلابی در زمینه رباتیک، بیومکانیک و صنعت فراهم می‌کند. مواد حافظه‌دار، شامل آلیاژها و پلیمرها، می‌توانند به یک پیکربندی موقت برنامه‌ریزی شوند و سپس در پاسخ به یک محرک خارجی (مانند تغییر دما، رطوبت، مواد مغناطیسی، حرارت و گرما یا PH، یا تماس با آب) به شکل اصلی که در آن پردازش شده‌اند، بازگردند. به خاطر این رفتار، مواد حافظه‌دار در حال حاضر توجه زیادی را در زمینه داروسازی جلب کرده‌اند؛ جایی که می‌توانند نوآوری‌های مهمی در درمان‌های کنونی ایجاد کنند. چاپ چهاربعدی شامل پردازش مواد حافظه‌دار از طریق چاپ سه‌بعدی است و بدین ترتیب تغییر شکل در طول زمان را به امکانات شخصی‌سازی متعدد این فناوری جدید تولید اضافه می‌کند. امروزه با تحقیق و دستیابی به مواد هوشمند و ساخت آن‌ها می‌توان به اهداف مورد نظر جهت پاسخ سازه به یک محرک رسید.

فناوری چاپ چهاربعدی یکی از پیشرفته‌ترین نوآوری‌های عصر حاضر است که با افزودن بعد زمان به چاپ سه‌بعدی، امکان تغییر شکل، عملکرد یا ویژگی‌های مواد چاپ‌شده را در پاسخ به محرک‌های محیطی فراهم می‌کند. این فناوری با استفاده از مواد

- [12] J. Gardan, "Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends," *Virtual and physical prototyping*, vol. 14, no. 1, pp. 1-18, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016>.
- [12] N. Van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, "Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective," *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100962, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>.
- [13] C. Duty *et al.*, "What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 526-537, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.008>.
- [14] A. Bayati *et al.*, "3D printed elastomers with superior stretchability and mechanical integrity by parametric optimization of extrusion process using Taguchi Method," *Materials Research Express*, vol. 12, no. 1, p. 015301, 2025, doi: <https://DOI.org/10.1088/2053-1591/ada1a6>.
- [15] H. Ding, X. Zhang, Y. Liu, and S. Ramakrishna, "Review of mechanisms and deformation behaviors in 4D printing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 4633-4649, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03871-0>.
- [16] M. H. Ali, A. Abilgazyev, and D. Adair, "4D printing: a critical review of current developments, and future prospects," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 701-717, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04258-0>.
- [17] A. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 663-674, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.014>.
- [18] Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang, and M. L. Dunn, "Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, p. 31110, 2016, doi: <https://doi.org/10.1038/srep31110>.
- [19] A. Ahmed, S. Arya, V. Gupta, H. Furukawa, and A. Khosla, "4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges," *Polymer*, vol. 228, p. 123926, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926>.
- [20] Y. Liu, B. Shaw, M. D. Dickey, and J. Genzer, "Sequential self-folding of polymer sheets," *Science Advances*, vol. 3, no. 3, p. e1602417, 2017, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602417>.
- applications," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 556-571, 2015, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0126>.
- [2] M. H. Mobarak *et al.*, "Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication—A review," *Applied Surface Science Advances*, vol. 18, p. 100462, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100462>.
- [3] J. C. Breger *et al.*, "Self-folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 7, no. 5, pp. 3398-3405, 2015, doi: <https://doi.org/10.1021/am508621s>.
- [4] S. Miyashita, S. Guitron, M. Ludersdorfer, C. R. Sung, and D. Rus, "An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades," in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 2015: IEEE, pp. 1490-1496, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139386>.
- [5] M. Quanjing, M. Rejab, M. Idris, N. M. Kumar, M. Abdullah, and G. R. Reddy, "Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 1210-1219, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.434>.
- [6] Y. Y. C. Choong, S. Maleksaeedi, H. Eng, S. Yu, J. Wei, and P.-C. Su, "High speed 4D printing of shape memory polymers with nanosilica," *Applied Materials Today*, vol. 18, p. 100515, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100515>.
- [7] A. Nishiguchi, H. Zhang, S. r. Schweizerhof, M. F. Schulte, A. Mourran, and M. Möller, "4D printing of a light-driven soft actuator with programmed printing density," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 12, no. 10, pp. 12176-12185, 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c02781>.
- [8] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials today*, vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- [9] H. A. Alshahrani, "Review of 4D printing materials and reinforced composites: Behaviors, applications and challenges," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 6, no. 2, pp. 167-185, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.03.006>.
- [10] Y. S. Alshehly, M. Nafea, M. S. M. Ali, and H. A. Almurib, "Review on recent advances in 4D printing of shape memory polymers," *European Polymer Journal*, vol. 159, p. 110708, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110708>.

- [31] C. de Kergariou, F. Demoly, A. Perriman, A. Le Duigou, and F. Scarpa, "The design of 4D-printed hygomorphs: state-of-the-art and future challenges," *Advanced Functional Materials*, vol. 33, no. 6, p. 2210353, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202210353>.
- [32] M. C. Biswas, S. Chakraborty, A. Bhattacharjee, and Z. Mohammed, "4D printing of shape memory materials for textiles: mechanism, mathematical modeling, and challenges," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 19, p. 2100257, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202100257>.
- [33] H. Chu *et al.*, "4D printing: a review on recent progresses," *Micromachines*, vol. 11, no. 9, p. 796, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/mi11090796>.
- [34] A. Mahmood, T. Akram, H. Chen, and S. Chen, "On the evolution of additive manufacturing (3D/4D printing) technologies: Materials, applications, and challenges. *Polymers*, 14 (21), 4698," ed, 2022.
- [35] W. Zhou *et al.*, "4D-printed dynamic materials in biomedical applications: chemistry, challenges, and their future perspectives in the clinical sector," *Journal of medicinal chemistry*, vol. 63, no. 15, pp. 8003-8024, 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.9b02115>.
- [36] U. K. Vates, S. Mishra, and N. J. Kanu, "Biomimetic 4D printed materials: A state-of-the-art review on concepts, opportunities, and challenges ",*Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3313-3319, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.148>.
- [37] L. Zeenat, A. Zolfagharian, Y. Sriya, S. Sasikumar, M. Bodaghi, and F. Pati, "4D printing for vascular tissue engineering: Progress and challenges," *Advanced Materials Technologies*, vol. 8, no. 23, p. 2300200, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202300200>.
- [38] G. A. Appuhamillage, S. S. Ambagasipitiya, R. S. Dassanayake, and A. Wijenayake, "3D and 4D printing of biomedical materials: Current trends, challenges, and future outlook," *Exploration of Medicine*, vol. 5, no. 1, pp. 17-47, 2024, doi: <https://doi.org/10.37349/emed.2024.00203>.
- [39] X. Kuang *et al.*, "Advances in 4D printing: materials and applications," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 2, p. 1805290, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>.
- [40] O. Bougzime, C. Cruz, J.-C. André, K. Zhou, H. J. Qi, and F. Demoly, "Neuro-Symbolic Artificial Intelligence in Accelerated Design for 4D Printing: Status, Challenges ,and Perspectives," *Materials & Design*, p. 113737, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113737>.
- [21] J. Wu, Z. Zhao, X. Kuang, C. M. Hamel, D. Fang, and H. J. Qi, "Reversible shape change structures by grayscale pattern 4D printing," *Multifunctional Materials*, vol. 1, no. 1, p. 015002, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/2399-7532/aac322>.
- [22] A. Kantaros, T. Ganetsos, and D. Piromalis, "4D printing: technology overview and smart materials utilized," Kantaros, A., Ganetsos, T. & Piromalis, D.(2023). *4D Printing: Technology Overview and Smart Materials Utilized. Journal of Mechatronics and Robotics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-14, 2023, doi: <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2023.1.14>.
- [23] R. Sajjad *et al.*, "A review of 4D printing–technologies, shape shifting, smart polymer based materials, and biomedical applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 7, no. 1, pp. 20-36, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.08.002>.
- [24] S. Li, "Review on development and application of 4D-printing technology in smart textiles," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 18, p. 15589250231177448, 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/15589250231177448>.
- [25] P. E. Antezana *et al.*, "4D printing: The development of responsive materials using 3D-printing technology," *Pharmaceutics*, vol. 15, no. 12, p. 2743, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15122743>.
- [26] I. Sahafnejad-Mohammadi, M. Karamimoghadam, A. Zolfagharian, M. Akrami, and M. Bodaghi, "4D printing technology in medical engineering: a narrative review," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 6, p. 233, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03514-x>.
- [27] S. Joshi *et al.*, "4D printing of materials for the future: opportunities and challenges. *Appl Mater Today* 18: 100490," ed, 2019.
- [28] M. Ramezani and Z. Mohd Ripin, "4D printing in biomedical engineering: Advancements, challenges, and future directions," *Journal of functional biomaterials*, vol. 14, no. 7, p. 347, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jfb14070347>.
- [29] J. Andre and F. Demoly, "The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing," *Materials & Design*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110193>.
- [30] F. K. Aldawood, "A comprehensive review of 4D printing: state of the arts, opportunities, and challenges," in *Actuators*, 2023, vol. 12, no. 3: MDPI, p. 101, doi: <https://doi.org/10.3390/act12030101> .

- [48] D. Rahmatabadi *et al.*, "4D printing of porous PLA-TPU structures: effect of applied deformation, loading mode and infill pattern on the shape memory performance," *Physica Scripta*, vol. 99, no. 2, p. 025013, 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad1957>.
- [49] G. Dixit and P. M. Pandey, "Experimental investigations of temperature-sensitive shape memory polymer composites for 4D printing," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 38, no. 2, pp. 537-563, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/08927057241254322>.
- [50] S. M. R. Sotoudeh, M. S. Yazdi, M. H. Hosseinzadeh, and M. Hassanpour, "Investigating the reversible performance of shape memory composites in 4D printing using magnetic field stimulation: Case study of polylactic acid/SrFe12O19 composite filament," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 327-337, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00625-w>.
- [51] G. Li *et al.*, "4D printing of polycarbonate ternary composites and the biomimetic folding deployment mechanisms," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01090-3>.
- [52] A. Kantaros, F. I. T. Petrescu, and T. Ganetsos, "From stents to smart implants employing biomimetic materials: The impact of 4D printing on modern healthcare," *Biomimetics*, vol. 10, no. 2, p. 125, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10020125>.
- [53] T. Wu *et al.*, "From 3D to 4D printing of lignin towards green materials and sustainable manufacturing," *Materials Horizons*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1039/D4MH01680G>.
- [41] C. A. Spiegel *et al.*, "4D printing at the microscale," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 26, p. 1907615, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201907615>.
- [42] K. Ahmed, M. N. I. Shiblee, A. Khosla, L. Nagahara, T. Thundat, and H. Furukawa, "Recent progresses in 4D printing of gel materials," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 3, p. 037563, 2020, doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab6e60>.
- [43] E. Pei and G. H. Loh, "Technological considerations for 4D printing: an overview," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 3, pp. 95-107, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0047-1>.
- [44] A. A. Firoozi and A. A. Firoozi, "A systematic review of the role of 4D printing in sustainable civil engineering solutions," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20982>.
- [45] K. Samadi-Aghdam, P. Fahimi, H. Shahsavari, D. Rahmatabadi, and M. Baghani, "Vibration Analysis of Shape Memory Alloy Enhanced Multi-Layered Composite Beams with Asymmetric Material Behavior," *Materials*, vol. 18, no. 5, p. 1181, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18051181>.
- [46] D. Rahmatabadi *et al.*, "4D printing thermo-magneto-responsive PETG-Fe3O4 nanocomposites with enhanced shape memory effects," *Applied Materials Today*, vol. 40, p. 102361, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102361>.
- [47] D. Rahmatabadi *et al.*, "Poly (ethylene terephthalate) glycol/carbon black composites for 4D printing," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 325, p. 129737, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129737>.

کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص سلول سرطانی در جریان خون

چکیده: تشخیص سلول های سرطانی در جریان خون، به عنوان یک نشان گر زیستی ارزشمند کم تهاجمی انقلابی در مدیریت سرطان ایجاد کرده است. این مقاله به مرور جامع کاربردهای هوش مصنوعی شامل یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در شناسایی و شمارش خودکار سلول های سرطانی در جریان خون از نمونه های خونی واقعی می پردازد. با بررسی سیستماتیک مطالعات پیشین، مزایا مانند سرعت و دقت بالا و معایب مانند وابستگی شدید به حجم و کیفیت داده های آموزشی در هر روش تحلیل شده است. یافته ها نشان می دهند که عملکرد مدل های هوش مصنوعی به طور قابل توجهی به کیفیت تصاویر وابسته است و همچنین فرآیند آموزش آن ها اغلب زمان بر می باشد. برای غلبه بر این چالش، راهکارهایی مانند پیش پردازش داده، تکنیک های تقویت مصنوعی داده و استفاده از حلقه های بازخوردی پیشنهاد می شوند. با وجود نتایج امیدوار کننده ای که از پژوهش های انجام شده پیشین بدست آمده است برای کاربردی کردن این روش در محیط های بالینی واقعی، نیاز مبرمی به توسعه الگوریتم های عمومی تر، قوی تر و کمتر وابسته به داده های حجیم به عنوان نیاز اصلی این حوزه تحقیقاتی باقی است.

واژه های راهنما: سلول سرطانی در جریان خون، نشان گر زیستی، خون، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق

هاجر مقدس*

استادیار

حمید پاکباز

دانشجوی کارشناسی ارشد،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشگاه یاسوج، یاسوج

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

Hajar Moghadas*
Assistant Professor

Hamid Pakbaz
MSc Student,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Yasouj University, Yasouj

Application of artificial intelligence in the detection of circulating tumor cell

Abstract: The detection of circulating cancer cells in the blood as a valuable minimally invasive biomarker has revolutionized cancer management. This paper provides a comprehensive review of the applications of artificial intelligence in the automatic identification and enumeration of circulating cancer cells in the real blood samples. By reviewing previous studies, the advantages, such as high speed and accuracy, and the disadvantages, such as strong dependence on the volume and quality of training data in each method, are analyzed. The findings show that the performance of artificial intelligence models is significantly dependent on the quality of images, and also their training process is often time-consuming. To overcome this challenge, solutions such as data preprocessing, artificial data augmentation techniques, and the use of feedback loops are proposed. Despite the promising results obtained from previous research to apply this method in real clinical settings, there remains an urgent need to develop more general, robust, and less dependent on large data sets as the main need of this research area.

Keywords: Circulating tumor cell, Biomarker, Blood, Machine learning, Deep learning

۱- مقدمه

نمونه‌های واقعی خون استفاده کرده‌اند. در ادامه، ساختارهای عمومی و مبانی هوش مصنوعی به کار رفته در این حوزه توضیح داده خواهد شد. سپس، مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های هر یک از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بررسی می‌شود.

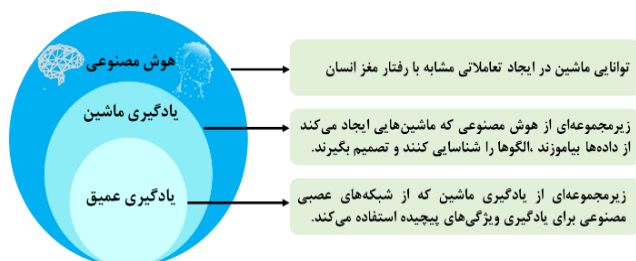
۲- هوش مصنوعی

هوش مصنوعی به عنوان یک فناوری نوین و رو به گسترش، کاربردهای وسیعی در تمامی حوزه‌های علمی پیدا کرده است [۱۶-۱۷]. این فناوری با خودکارسازی فرآیندها منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های انسانی و رفع چالش‌های وابسته به آن شده است [۱۸-۱۹].

در حوزه پزشکی، هوش مصنوعی در تشخیص انواع بیماری‌ها از جمله سرطان پستان [۲۰]، دیابت [۲۱]، بیماری‌های قلبی-عروقی [۲۲]، بیماری‌های ریوی [۲۳، ۲۴]، بیماری روده بزرگ [۲۵] و بیماری مزمن کلیه [۲۶] به نتایج قابل قبولی دست یافته است.

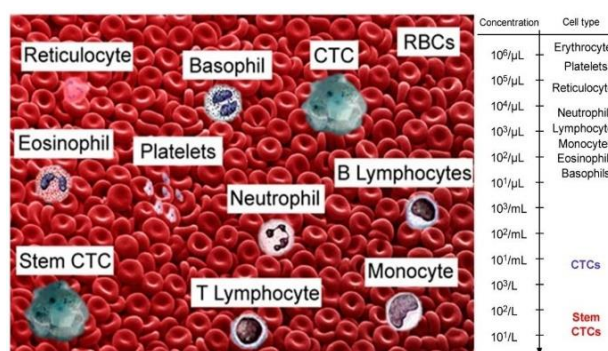
هوش مصنوعی شاخه‌ای از علوم کامپیوتر است که به ماشین آموزش می‌دهد مشابه هوش انسانی عمل کند. در این حوزه، مفاهیم یادگیری ماشین^۴ و یادگیری عمیق^۵ به عنوان زیرشاخه‌های اصلی مطرح می‌شوند. یادگیری ماشین، زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی است که با استفاده از داده‌ها، توانایی یادگیری خودکار را برای سیستم فراهم می‌کند. یادگیری عمیق نیز به عنوان پیشرفته‌ترین شاخه یادگیری ماشین از شبکه‌های عصبی مصنوعی با معماری عمیق برای پردازش و یادگیری از داده‌های پیچیده استفاده می‌نماید.

سلسله مراتب و رابطه بین مفاهیم هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در شکل (۲) نشان داده شده است. این مفاهیم در ادامه به صورت جزئی‌تر توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲ سلسله مراتب و رابطه بین هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

سلول‌های سرطانی در گردش خون^۱ (CTCs) هستند که از تومور اصلی جدا شده و وارد جریان خون می‌شوند. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که CTCs می‌توانند به عنوان یک نشان‌گر زیستی^۲ موثر برای تشخیص زودهنگام سرطان، پیشرفت بیماری و ارزیابی اثربخشی درمان به کار روند [۱-۲]. در شکل (۱) نسبت اندازه ذرات مختلف خون و CTC به همراه تعداد به واحد حجم آنها نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود CTCها در میان انبوهی از گلبول‌های قرمز و سفید و سایر اجزای خون محصور شده‌اند. تعداد این سلول‌ها در مقایسه با سایر یاخته‌های خونی به طور قابل توجهی کمتر است. این مسئله شناسایی و شمارش آن‌ها را به یک چالش عمده تبدیل کرده است [۳-۴].



شکل ۱ نسبت اندازه ذرات مختلف اجزای موجود در خون و CTC به همراه تعداد به واحد حجم متناظر هر ذره [۵]

با توجه به اهمیت بالینی CTCs، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام و روش‌های متنوعی برای جداسازی آن‌ها توسعه داده شده است. این روش‌ها شامل استفاده از آنتی‌بادی‌های اختصاصی متصل‌شونده به CTCs [۶]، تفکیک بر اساس اندازه [۷]، چگالی [۸]، چسبندگی [۹]، خواص آکوستیک [۱۰] و اصول هیدرودینامیک [۱۱-۱۲] هستند. اخیراً هوش مصنوعی^۳ به عنوان یک فناوری نوظهور، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. این فناوری پتانسیل آن را دارد که شناسایی و شمارش CTCs را با دقت و سرعت قابل توجهی و به صورت کاملاً خودکار انجام دهد [۱۳-۱۵].

هدف از این مقاله ارائه یک مرور ساختاریافته بر مطالعاتی است که از هوش مصنوعی برای تشخیص و شمارش CTCs در

⁴ Machine learning

⁵ Deep learning

¹ Circulating Tumor Cells

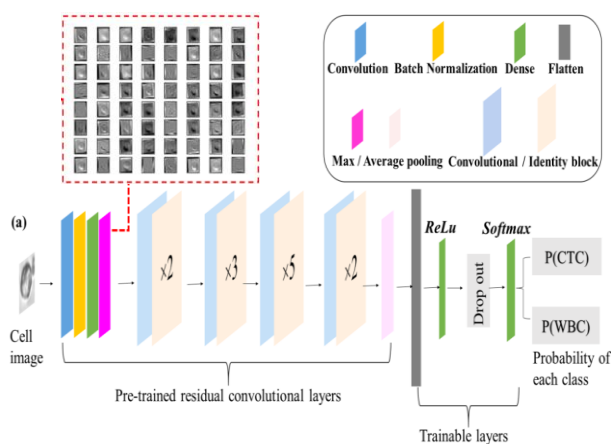
² Biomarker

³ Artificial Intelligence

۲-۱- یادگیری ماشین

یادگیری ماشین زیرشاخه‌ای از هوش مصنوعی است که در آن، یک مدل کامپیوتری با استفاده از یک مجموعه داده آموزشی و به کارگیری الگوریتم‌های خاص، راهکار عملیاتی خود را تولید می‌کند [۱۵]. به عنوان مثال، با نمایش مجموعه‌ای از تصاویر برچسب‌دار^۱ (به عنوان سلول) به مدل، الگوریتم یاد می‌گیرد که الگوهای مرتبط با تشخیص کلاس «سلول» را شناسایی کند. سپس می‌تواند تصاویر جدید را بررسی کرده و پیش‌بینی کند که آیا در آن تصویر، سلولی وجود دارد یا خیر. معمولاً از ۸۰٪ داده‌های موجود برای آموزش مدل و از ۲۰٪ برای آزمون آن استفاده می‌شود. اگرچه فرآیند آموزش مدل، زمان‌بر است با این حال، مدل آموزش دیده، در مدت زمان کوتاهی قادر است داده‌های جدید را ارزیابی و دسته‌بندی کند. عملکرد مدل‌های موجود در تشخیص داده‌های درست متفاوت بوده و به عوامل مختلفی بستگی دارد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۲-۲- یادگیری عمیق



شکل ۳ ساختار شبکه عمیق کانولوشنی پنجاه لایه‌ای برای تشخیص سلول‌های سرطانی در گردش و گلبول‌های سفید. لایه‌های مختلف که با رنگ‌های متفاوت مشخص شده‌اند، عملیات خاصی را انجام می‌دهند. در لایه‌های ابتدایی ویژگی‌های سلول استخراج می‌شود. هر لایه مربوط به بررسی یک ویژگی خاص است. در لایه‌های میانی شرایط CTC بودن سلول بررسی می‌شود. در لایه انتهایی احتمال CTC بودن سلول مشخص می‌شود (تصویر از مرجع [۳۴] با کمی تغییر، با مجوز بازنشر).

یادگیری عمیق زیرمجموعه‌ای از یادگیری ماشین است که از شبکه عصبی^۲ چندلایه برای شناسایی خودکار الگو در داده‌ها استفاده می‌کند [۲۷-۲۸]. یکی از پرکاربردترین ساختارها در این حوزه، شبکه عصبی کانولوشنی^۳ (CNN) است که به طور خاص برای داده‌های تصویری طراحی شده است [۳۰-۳۳]. شبکه‌های عصبی معمولاً از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند. در لایه ورودی، داده‌ها به مدل ارائه می‌شوند. لایه‌های پنهان، شامل نورون‌هایی هستند که عملیات وزن‌دهی و محاسبات بر روی ورودی‌ها را انجام می‌دهند. در نهایت، لایه خروجی، نتیجه نهایی را برای دسته‌بندی تولید می‌کند. نمونه‌ای از یک ساختار CNN پنجاه لایه‌ای برای یادگیری انتقالی و طبقه‌بندی در شکل (۳) نشان داده شده است [۳۴].

۲-۳- الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تشخیص CTC

به طور کلی هوش مصنوعی الگوریتم‌های زیاد و متنوعی دارد. در این بخش از مقاله صرفاً الگوریتم‌هایی معرفی می‌شوند که در پژوهش‌های پیشین برای تشخیص و شمارش CTC بکار رفته‌اند. الگوریتم‌های مختلفی به صورت یادگیری نظارت‌شده^۴، یادگیری بدون نظارت^۵ و یادگیری تقویتی^۶ برای تشخیص CTC به کار رفته‌اند که در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در یادگیری نظارت‌شده، مدل بر اساس مجموعه‌ای از داده‌های برچسب‌دار که تحت نظارت مستقیم انسان آماده شده است، آموزش می‌بیند [۳۵] ولی در یادگیری بدون نظارت، مدل سعی می‌کند بدون داشتن برچسب‌های از پیش تعیین‌شده، الگوها و ساختارهای نهفته در داده‌های غیرساختاریافته را کشف کند [۳۶]. یادگیری نظارت‌شده به دو دسته اصلی طبقه‌بندی^۷ و رگرسیون^۸ تقسیم می‌شود.

در طبقه‌بندی، ورودی‌ها به کلاس‌های از پیش تعیین‌شده تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های پرکاربرد در طبقه‌بندی عبارت از طبقه‌بند خطی^۹، ماشین‌های بردار پشتیبان^{۱۰}، درخت‌های تصمیم‌گیری^{۱۱} و جنگل‌های تصادفی^{۱۲} می‌باشند.

⁷ Classification

⁸ Regression

⁹ Linear classifiers

¹⁰ Support vector machines

¹¹ Decision trees

¹² Random forest

¹ Labeled

² Neural network

³ Convolutional Neural Network

⁴ Supervised learning

⁵ Unsupervised learning

⁶ Reinforcement learning

عملکرد مدل‌های مختلف معمولاً با پارامترهای دقت^۴، حساسیت^۵ و ویژگی^۶ سنجیده می‌شود. نحوه محاسبه این پارامترها عبارت است از [۴۰]:

$$\text{دقت} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۱)$$

$$\text{حساسیت} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۲)$$

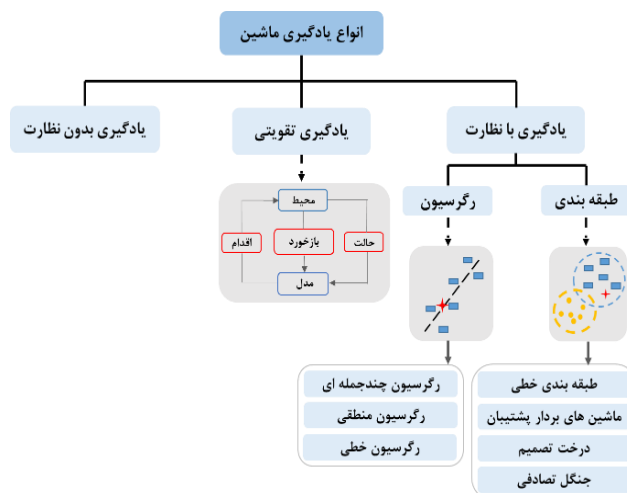
$$\text{ویژگی} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (۳)$$

در اینجا TP تعداد نمونه‌های مثبتی است که مدل به درستی آنها را مثبت تشخیص داده، TN تعداد نمونه‌های منفی است که مدل به درستی آنها را منفی شناسایی کرده، FP تعداد نمونه‌هایی است که مدل آنها را مثبت تشخیص داده اما در واقع منفی هستند، FN تعداد نمونه‌هایی است که مدل آنها را منفی تشخیص داده، اما در واقع مثبت هستند.

دقت معیاری برای بیان تعداد مثبت‌ها و منفی‌هایی که مدل به درستی تشخیص داده تقسیم به کل داده‌های موجود است. حساسیت نسبت تعداد موارد مثبت تشخیص داده شده توسط مدل تقسیم به کل مثبت‌های موجود است. به عبارتی حساسیت بیان می‌کند که مدل چند درصد از موارد مثبت را توانسته شناسایی کند. ویژگی بیانگر درصد نمونه‌های منفی واقعی است که مدل به درستی تشخیص داده است. معیار دیگر برای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی، منحنی ROC و مساحت زیر آن AUC^۷ است [۴۱]. این معیار، توانایی مدل در تمایز بین کلاس‌ها بدون در نظر گرفتن توزیع آنها نشان می‌دهد.

۳- پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی در تشخیص CTC

تا کنون مقالات متنوعی در مورد استفاده از هوش مصنوعی در تشخیص انواع سرطان‌ها با استفاده از داده‌های بالینی یا تصاویر پزشکی بافت ارائه شده است که به موضوع مقاله حاضر مرتبط نمی‌شود. زیرا تمرکز این مقاله بر کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص CTCs است. به‌طور کلی محققان هوش مصنوعی برای شناسایی CTCs از دو دسته اطلاعات شامل تصاویر میکروسکوپی یا داده‌های ژنومیک استفاده کرده‌اند [۴۲-۴۳].



شکل ۴ انواع یادگیری ماشین و زیر مجموعه‌های آن که برای تشخیص CTC به کار رفته‌اند.

طبقه‌بند خطی، الگوریتم‌های ساده‌ای هستند که با ترسیم یک مرز تصمیم‌گیری خطی یا صفحه‌ای، داده‌ها را دسته‌بندی می‌کنند. روش ماشین‌های بردار پشتیبان مشابه طبقه‌بند خطی است، اما با این تفاوت که به حداکثر کردن حاشیه اطمینان^۱ بین دو کلاس می‌پردازد تا مدل در برابر داده‌های جدید مقاوم‌تر باشد. درخت‌های تصمیم‌گیری با استفاده از یک ساختار درختی و پرسیدن سؤالات سلسله‌مراتبی، داده‌ها را تقسیم‌بندی می‌کند. جنگل‌های تصادفی یک روش یادگیری گروهی^۲ است که از ترکیب چندین درخت تصمیم‌گیری برای بهبود دقت و کاهش overfitting استفاده می‌کند [۳۷].

در رگرسیون از رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل برای تقسیم‌بندی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های پرکاربرد آن عبارت از رگرسیون خطی، رگرسیون منطقی^۳ و رگرسیون چند جمله‌ای می‌باشد [۳۸].

رگرسیون خطی برای مدل‌سازی از یک رابطه خطی بین یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل استفاده می‌کند. در رگرسیون منطقی از یک تابع منطقی برای تخمین احتمال تعلق به یک کلاس خاص استفاده می‌شود. در رگرسیون چند جمله‌ای از روابط غیرخطی برای دسته‌بندی بین متغیرها استفاده می‌شود. الگوریتم‌های دیگری نیز در یادگیری ماشین استفاده می‌شوند که از ترکیب الگوریتم‌های موجود یا تقویت آنها با استفاده از بازخورد سیستم برای بهبود عملکرد خود استفاده می‌کنند و به یادگیری تقویتی معروف هستند [۳۹].

⁵ Sensitivity

⁶ Specificity

⁷ Area Under the Curve

¹ Margin

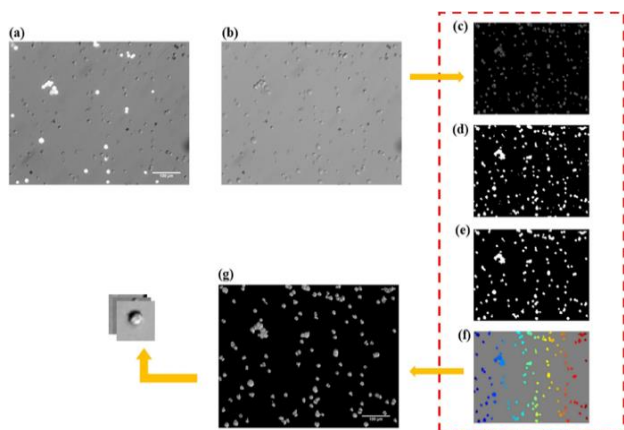
² Ensemble

³ Logistic regression

⁴ Accuracy

شد. نتایج مدل ترکیبی با حساسیت ۹۲/۸۷٪ و ویژگی ۹۹/۹۸٪ عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های جداگانه داشت.

زیون و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل CNN ترکیبی با روش‌های تجسم ارائه کردند که سرعت بالایی در تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ داشت [۴۷]. آنها توانستند ۲۳/۳۷۷ تصویر تک‌سلولی را در کمتر از ۳ دقیقه بر روی یک رایانه معمولی در پنج گروه مختلف CTCs، وژیکول‌های خارج سلولی، گلبول‌های سفید، هسته‌های برهنه و ذرات دیگر دسته‌بندی کنند. حساسیت و ویژگی آن مدل به ترتیب ۹۷/۳٪ و ۹۸/۸٪ گزارش شد. داده‌های آنها از ۴۹۹ بیمار سرطانی متاستاتیک استخراج شده بود [۴۸]. ونگ و همکاران (۲۰۲۰) در مدل خود تعداد لایه‌های شبکه عصبی را افزایش داده و یک شبکه عصبی ۵۰ لایه مدل ResNet را ایجاد کردند [۳۴]. آنها برای تهیه داده‌ها از میکروسکوپ میدان روشن با بزرگنمایی ۲۰ برابر بزرگ‌تر استفاده کردند. مراحل آماده‌سازی تصاویر آن در شکل (۵) نشان داده شده‌است. در مرحله پردازش اولیه، تصاویر فیلتر شدند. سپس فضاهای خالی را پر و بر اساس مشخصات مورفولوژی سلولی، نواحی غیرمرتبط را حذف کردند. در ادامه تصاویر را برش دادند به گونه‌ای که در هر تصویر فقط یک سلول مجزا وجود داشته باشد. در آن پژوهش همچنین از تکنیک چرخش و انعکاس تصاویر برای تولید داده مصنوعی استفاده شد. نمونه خونی از بیماران دارای سرطان کلیه تهیه شده بود. این مدل برای نمونه خون دستکاری شده با حذف گلبول‌های قرمز با دقت ۹۷٪ شناسایی را انجام داد. با این حال برای خون کامل با دقت ۸۸/۶٪ عملکرد مطلوبی در تشخیص CTCها نداشت.



شکل ۵ مراحل پیش‌پردازش تصویر داده‌های خام؛ (a) تصویر فلورسنت برچسب‌گذاری شده، (b) تصویر میدان روشن، (c) فیلتر کردن بر اساس مرز سلول، (d) عملیات انباشتن سیلابی تصویر، (e) اعمال فیلتر مورفولوژیکی برای شناسایی سلول و حذف نقاط غیرمرتبط، (f) تبدیل واترشد برای بخش‌بندی و (g) تصویر پردازش شده که برای تهیه تصاویر سلول‌های مجزا بکار می‌رود، با مجوز بازنشر [۳۴].

تمرکز این مقاله بر پژوهش‌های مرتبط به داده‌های تصویری است. تصاویر مورد استفاده به دو صورت تصاویر خون کامل دستکاری‌نشده (حاوی تمامی اجزای خون) و یا تصاویر خون دستکاری‌شده (مانند CTCهای کشت‌شده در محیط مصنوعی یا نمونه‌های خونی که گلبول‌های قرمز یا سفید آنها حذف شده‌اند) به کار گرفته شده‌اند. در این مرور، تنها مقالاتی که از تصاویر خون کامل دستکاری‌نشده استفاده کرده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شولتنز و همکاران (۲۰۱۲) را می‌توان از پیشگامان این عرصه دانست. آنها برای اولین بار با به کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی در نرم‌افزار متلب، یک روش خودکار برای شمارش CTCs بر اساس تصاویر سیتومتری ارائه دادند [۴۴]. این مدل با استخراج ویژگی‌های بافت و مورفولوژی سلول، قادر به شناسایی و دسته‌بندی CTCها، CTCهای آپوپتوز، بقایای سلولی، لکوسیت‌ها و ذرات غیرمرتبط بود. داده‌های این مطالعه از ۶۸ بیمار سرطانی و ۹ فرد سالم جمع‌آوری شده بود. نمونه‌ها با استفاده از غنی‌سازی مغناطیسی و رنگ‌آمیزی فلورسنت (DAPI برای هسته، آنتی‌بادی سیتوکراتین برای CTCها و CD45 برای لکوسیت‌ها) آماده شدند. معیارهای شناسایی شامل قطر حداقل ۴ میکرومتر، مورفولوژی گرد تا بیضی، وجود هسته مشخص، مثبت بودن سیتوکراتین و منفی بودن CD45 بود.

موکان و همکاران (۲۰۱۸) با ارائه یک مدل U-Net اصلاح‌شده متشکل از یک شبکه کانولوشنی هفت لایه، دقت در تشخیص CTCs را افزایش دادند [۴۵]. آنها با استفاده از تکنیک‌های تقویت داده مانند جابجایی، مقیاس‌گذاری، چرخش و ورق زدن تصاویر، تعداد داده‌ها را از ۱۲۰ تصویر به ۵۶,۰۰۰ تصویر تک‌سلولی افزایش دادند. بدین ترتیب با افزایش تعداد داده‌های آموزشی مدل موفق به دستیابی به دقت قابل توجه ۹۹/۸٪ در تشخیص شد. این داده‌ها از نمونه خون سالم رنگ‌آمیزی‌نشده حاوی رده سلولی سرطان روده بزرگ با استفاده از میکروسکوپ میدان تاریک تهیه شده بود.

سیورته و همکاران (۲۰۱۸) روش‌های تقویت‌کننده در CNN و الگوریتم Adaboost به همراه روش فیلتر تصاویر (بر اساس ویژگی سلول) را بکار بردند [۴۶]. آنها رده‌های سلول سرطان پستان Hs 578T و MCF7 و رده سلول سرطان روده بزرگ DLD-1 را به خون انسان سالم اضافه کردند. با استفاده از میکروسکوپ میدان تاریک ۲۶۳ تصویر تهیه کردند. تصاویر این نوع میکروسکوپ شرایط ثبت ویژگی و مشخصه‌های سلول را فراهم می‌کند. آنها چهار مدل را با داده‌های مختلف و هدفمند آموزش دادند. سه مدل به‌طور مستقل با داده‌های مجزای سه رده سلولی آموزش دیدند. برای آموزش مدل چهارم، به صورت ترکیبی از تمام داده‌های سه رده سلولی به‌طور همزمان استفاده

نمی‌توان عملکرد آنها را به راحتی با یکدیگر مقایسه کرد. با این حال تمامی مدل‌های ارائه شده در مقایسه با روش‌های سنتی شمارش و دسته‌بندی CTC، سرعت و دقت بیشتری نشان دادند. به طور کلی افزودن مراحل پیش پرداز تصاویر، حذف نویزها و نواحی غیرمرتبط بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیک و بافتی سلول، سرعت مدل‌ها را افزایش می‌دهد.

جدول ۱ خلاصه مطالعات پیشین مربوط به استفاده از هوش مصنوعی در تشخیص CTC شامل نوع مدل، عملکرد مدل و نمونه خونی

منبع	مدل	عملکرد مدل	نمونه خونی
۲۰۱۲ [۴۴]	جنگل تصادفی	دقت ۸۹/۸٪	۶۸ بیمار و ۹ فرد سالم غنی سازی مغناطیسی رنگ آمیزی فلورسنت تصاویر سیتومتری
۲۰۱۸ [۴۵]	U-Net اصلاح شده با CNN هفت لایه	دقت ۹۹/۸٪	۱۲۰ تصویر خون سالم رده سلولی سرطان روده میکروسکوپ میدان تاریک
۲۰۱۸ [۴۶]	CNN و الگوریتم Adaboost	حساسیت ۹۲/۸٪ ویژگی ۹۹/۹٪	۲۶۳ تصویر رده MCF7.Hs 578T و DLD-1 خون انسان سالم میکروسکوپ میدان
۲۰۲۰ [۴۷]	CNN ترکیبی با روش‌های تجسم	حساسیت ۹۷/۳٪ ویژگی ۹۸/۸٪	۲۳،۳۷۷ تصویر تک سلولی ۴۹۹ بیمار سرطانی متاستاتیک
۲۰۲۰ [۳۴]	CNN، ۵۰ لایه با ResNet	دقت ۹۷٪ خون دستکاری شده، دقت ۸۸/۶٪ خون کامل	بیماران سرطان کلیه میکروسکوپ میدان روشن با بزرگنمایی ۲۰ برابر
۲۰۲۰ [۴۹]	CNN	دقت ۹۲/۱٪ حساسیت ۹۳/۷٪	۶۰۰ بیمار با انواع مختلف سرطان رنگ آمیزی سلولی
۲۰۲۱ [۴۰]	ماشین‌های بردار	دقت ۸۲/۳٪ در داده‌های آموزشی دقت ۹۰٪ در داده‌های کور	۴۱ بیمار سرطانی روده بزرگ و ۴۱ فرد سالم
۲۰۲۲ [۵۰]	VGG16، VGG19، ResNet18، ResNet50 و AlexNet	دقت VGG16 با دقت ۹۴٪ و حساسیت ۹۷/۲٪ بهترین نتیجه	۶۹۴ تصویر دارای CTC و ۱۳۴۷۲ بدون CTC از ۷۷۶ بیمار و فرد سالم

هی و همکاران (۲۰۲۰) برای افزایش دقت مدل CNN تعداد نمونه‌های بیشتر و متنوع‌تری را به کار گرفتند [۴۹]. آنها مدل خود را با انواع مختلف سلول‌های سرطانی که از نمونه خونی ۶۰۰ بیمار بدست آمده بود، آموزش دادند. علاوه برای بهبود تشخیص مدل، آنها قسمت‌های مختلف سلول‌ها (هسته و سیتوپلاست) را با رنگ‌های متمایز، رنگ آمیزی کردند. با این حال مدل آنها با حساسیت ۹۳/۷٪، توانست به دقت ۹۲/۱٪ دست یابد. این مدل بهترین عملکرد را در تشخیص سلول‌های ریوی داشت که بیشترین تعداد در داده‌های آموزشی را داشتند.

هاتزیداک و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ماشین‌های بردار پشتیبان را ایجاد دادند [۴۰]. نمونه‌های خونی را از ۴۱ بیمار سرطانی روده بزرگ و ۴۱ فرد سالم تهیه کردند. آنها ۳۱ نمونه را برای آموزش مدل و ۱۰ نمونه دیگر را به صورت داده کور بکار بردند. داده کور تصاویری هستند که در مرحله آموزش به ماشین نمایش داده نمی‌شوند و ماشین بر اساس داده برداری از نمونه‌های آموزشی، نمونه‌های کور را که قبلاً ندیده است، ارزیابی می‌کند. دقت آن مدل برای داده‌های آموزشی ۸۲/۳٪ و برای داده‌های کور ۹۰٪ گزارش شد.

گوا و همکاران (۲۰۲۲) در یک پژوهش قابلیت مدل‌های مختلف VGG16، VGG19، ResNet18، ResNet50 و AlexNet را با یکدیگر مقایسه کردند [۵۰]. نمونه‌ها شامل ۶۹۴ تصویر دارای CTC و ۱۳۴۷۲ بدون CTC بود که از ۷۷۶ بیمار و فرد سالم بدست آمده بود. آنها تکنیک‌های افزایش و تنوع تعداد تصاویر آموزشی، حذف نویز، برش و افزایش کیفیت تصاویر و اعمال ویژگی‌های سلول را به کار بردند. در نهایت از بین این مدل‌ها، VGG16 با دقت ۹۴٪ و حساسیت ۹۷/۲٪ بهترین نتیجه را داشت.

خلاصه مطالعات پیشین شامل نوع مدل، عملکرد مدل و نمونه خونی به ترتیب سال در جدول (۱) نشان داده شده است. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عملکرد همگی مدل‌های هوش مصنوعی به تعداد و کیفیت تصاویر آموزشی بستگی دارد. هر چه تعداد داده‌های آموزشی بیشتر باشد، حساسیت و دقت مدل بهتر می‌شود. محققان برای افزایش تعداد داده‌های آموزشی از دو راهکار افزایش تعداد بیماران برای نمونه برداری و یا روش‌های تولید داده مصنوعی مانند جابجایی، مقیاس گذاری، چرخش و ورق زدن تصادفی عکس‌ها استفاده می‌کنند. در تصاویر با کیفیت، تفکیک و مرزبندی انواع گونه‌ها برای ماشین راحت‌تر و سریع‌تر است. از آنجایی که مدل‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین بر روی داده‌های مختلف با شرایط آماده سازی متفاوت و انواع سلول‌های متنوع انجام شده‌اند،

استفاده از مدل‌های سریع در پردازش تصاویر پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، چالش ارتقاء عملکرد مدل‌ها در تشخیص داده‌های کور همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر برای کاربردی شدن این مدل‌ها در کلینیک دارد.

۵- مراجع

- [1] R. Lawrence, M. Watters, C. R. Davies, K. Pantel, and Y.-J. Lu, "Circulating tumour cells for early detection of clinically relevant cancer," *Nature Reviews Clinical Oncology*, vol. 20, no. 7, pp. 487-500, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41571-023-023>.
- [2] H. Yao, L. Wen, Z. Li, and C. Xia, "Analysis of diagnostic value of CTC and CTDNA in early lung cancer," *Cellular and Molecular Biology*, vol. 69, no. 6, pp. 57-62, 2023, <https://doi.org/10.14715/cmb>.
- [3] A. Strati, A. Markou, E. Kyriakopoulou, and E. Lianidou, "Detection and molecular characterization of circulating tumour cells: challenges for the clinical setting," *Cancers*, vol. 15, no. 7, p. 2185, 2023, <https://doi.org/10.3390/cancers15072185>.
- [4] M. Vidlarova et al., "Recent advances in methods for circulating tumor cell detection," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 4, p. 3902, 2023, <https://doi.org/10.3390/ijms24043902>.
- [5] Galanzha, E.I.; Zharov, V.P. Circulating Tumor Cell Detection and Capture by Photoacoustic Flow Cytometry in Vivo and ex Vivo. *Cancers*, 5, 1691-1738, 2013, <https://doi.org/10.3390/cancers5041691>.
- [6] T. N. A. Nguyen, P.-S. Huang, P.-Y. Chu, C.-H. Hsieh, and M.-H. Wu, "Recent progress in enhanced cancer diagnosis, prognosis, and monitoring using a combined analysis of the number of circulating tumor cells (CTCs) and other clinical parameters," *Cancers*, vol. 15, no. 22, p. 5372, 2023, <https://doi.org/10.3390/cancers15225372>.
- [7] M. Li, J. Shi, Y. Zhang, S. Cui, L. Zhang, and Q. Shen, "ECL cytosensor for sensitive and label-free detection of circulating tumor cells based on hierarchical flower-like gold microstructures," *Analytica Chimica Acta*, vol. 1303, p. 342505, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342505>.
- [8] J. Bialek, A. Muthe, S. Yankulov, F. Kawan, G. Gakis, and G. Theil, "Optimizing CTC isolation techniques for molecular characterization of circulating tumor cells in clear cell renal cell carcinoma: A comparative study of EpCAM-based and density-based methods," *Cancer Research*, vol. 84, no. 6_Supplement, pp. 3689-3689, 2024, <https://doi.org/10.1158/1538-7445.AM2024-3689>.

تحقیقات نشان می‌دهد که با حذف گلبول‌های قرمز و سفید از نمونه خونی، شانس شناسایی سلول‌های سرطانی برای مدل هوش مصنوعی افزایش می‌یابد. این درحالی است که استفاده از لایزکننده گلبول قرمز و فرآیند جداسازی گلبول‌های سفید می‌تواند باعث ترکیدن و از بین رفتن CTC‌های موجود در نمونه شوند. در این حالت تعداد CTC‌های شمارش شده با تعداد CTC‌های واقعی موجود در نمونه اصلی، مطابقت نخواهد داشت. در واقع دستکاری نمونه‌های خونی منجر به خطا در نتایج می‌شود. با توجه به تعداد کم CTC‌ها اعمال روش‌هایی که منجر به حذف ناخواسته آنها می‌شود قابل توجه نمی‌باشد. آنچه مطلوب است ارائه روشی سریع و دقیق برای شناسایی CTC در خون واقعی بدون حذف اجزای مختلف خون و رنگ‌آمیزی است. حضور اجزای مختلف خون در تصاویر، شناسایی CTC را چالشی می‌کند. ذرات اضافی باعث ایجاد نویز در تصاویر می‌شوند. همچنین دانسیته بالای ذرات خونی شناسایی مرز CTC را سخت می‌کند. به نظر می‌رسد که استفاده از یک سیال رقیق‌کننده بتواند مشکل تعداد ذرات بر واحد سطح تصویر را کاهش دهد. افزودن رقیق‌کننده به نمونه خونی منجر به فاصله گرفتن ذرات از یکدیگر می‌شود و از این رو شناسایی دقیق‌تر مرز ذرات راحت‌تر می‌شود. البته این پیشنهاد منجر به افزایش حجم نمونه مورد آزمایش و افزایش تعداد تصاویر می‌شود. این روش برای مدل‌های سریع که مشکلی با پردازش داده‌های حجیم ندارند، مناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله کاربردهای روش یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در تشخیص سلول‌های سرطانی در گردش در خون بررسی شد. هرکدام از این روش‌ها با استفاده از الگوریتم‌های متنوع قابلیت‌های متفاوتی در تشخیص سلول‌های هدف نشان دادند. با این حال همگی آنها در مقایسه با روش‌های سنتی، عملکرد بهتری داشتند. به‌طور کلی دقت این روش‌ها با افزایش تعداد داده‌های آموزشی و ارتقاء کیفیت تصاویر افزایش می‌یابد. همچنین اعمال پیش‌پردازش و حذف داده‌های اضافی نقش به‌سزایی در افزایش سرعت و دقت مدل‌ها دارد. از میان انواع الگوریتم‌هایی که در این حوزه بکار گرفته شدند، مدل‌های تقویت‌شده و مدل‌های ترکیبی نتایج بهتری را ارائه دادند. یافته‌ها نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند نقش مؤثری در حل چالش‌های تشخیص و شمارش CTCs داشته باشد. به‌عنوان تحقیقات آتی طراحی مدل‌های که با داده‌های محدود نیز قادر به یادگیری باشند و یا

- [20] B. S. Abunasser, M. R. J. AL-Hiealy, I. S. Zaqout, and S. S. Abu-Naser, "Literature review of breast cancer detection using machine learning algorithms," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2808, no. 1: AIP Publishing, <https://doi.org/10.1063/5.01336>.
- [21] B. Y. Kasula, "Machine Learning Applications in Diabetic Healthcare: A Comprehensive Analysis and Predictive Modeling," *International Numeric Journal of Machine Learning and Robots*, vol. 7, no. 7, 2023, https://researchgate.net/Machine_Learning.
- [22] E. K. Oikonomou and R. Khera, "Machine learning in precision diabetes care and cardiovascular risk prediction," *Cardiovascular Diabetology*, vol. 22, no. 1, p. 259, 2023, <https://10.1186/s12933-023>.
- [23] S. N. A. Shah and R. Parveen, "An extensive review on lung cancer diagnosis using machine learning techniques on radiological data: state-of-the-art and perspectives," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 8, pp. 4917-4930, 2023, <https://10.1007/s11831-023>.
- [24] Q. Gao, L. Yang, M. Lu, R. Jin, H. Ye, and T. Ma, "The artificial intelligence and machine learning in lung cancer immunotherapy," *Journal of Hematology & Oncology*, vol. 16, no. 1, p. 55, 2023, <https://10.1186/s13045-023-01456-y>.
- [25] L. Chen *et al.*, "Machine Learning Predicts Oxaliplatin Benefit in Early Colon Cancer," *Journal of Clinical Oncology*, vol. 42, no. 13, pp. 1520-1530, 2024, <https://doi.org/10.1200/JCO.23.01080>.
- [26] M. A. Islam, M. Z. H. Majumder, and M. A. Hussein, "Chronic kidney disease prediction based on machine learning algorithms," *Journal of pathology informatics*, vol. 14, p. 100189, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jpi.2023.100189>.
- [27] S. F. Ahmed *et al.*, "Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, no. 11, pp. 13521-13617, 2023, <https://10.1007/S10462-023-10466-8>.
- [28] C. Shen *et al.*, "Automatic detection of circulating tumor cells and cancer associated fibroblasts using deep learning," *Scientific reports*, vol. 13, no. 1, p. 5708, 2023, <https://s41598-023-32955>.
- [29] Y. Kumar, R. Singh, M. R. Moudgil, and Kamini, "A systematic review of different categories of plant disease detection using deep learning-based approaches," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 8, pp. 4757-4779, 2023, <https://10.1007/s11831-023-09958-1>.
- [30] W. Duan and B. Ren, "Application Effects of NNN-link Care Model in Patients with Coronary Heart
- [9] X. Ye *et al.*, "An adhesion-based method for rapid and low-cost isolation of circulating tumor cells," *Clinica Chimica Acta*, vol. 547, p. 117421, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2023.117421>.
- [10] Y. Zhang, Z. Zhang, D. Zheng, T. Huang, Q. Fu, and Y. Liu, "Label-free separation of circulating tumor cells and clusters by alternating frequency acoustic field in a microfluidic chip," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 4, p. 3338, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2023.117421>.
- [11] Y. Li *et al.*, "Label-free detection and simultaneous viability determination of CTCs by lens-free imaging cytometry," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, pp. 1-13, 2024, DOI: [10.1007/s00216-024-05624-y](https://doi.org/10.1007/s00216-024-05624-y).
- [12] S. Zhu *et al.*, "Liquid Biopsy Instrument for Ultra-Fast and Label-Free Detection of Circulating Tumor Cells," *Research*, vol. 7, p. 0431, 2024, <https://doi.org/10.34133/research.0431>.
- [13] M. J. Poellmann *et al.*, "Nanotechnology and machine learning enable circulating tumor cells as a reliable biomarker for radiotherapy responses of gastrointestinal cancer patients," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 226, p. 115117, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115117>.
- [14] K. Pastuszak *et al.*, "Detection of circulating tumor cells by means of machine learning using Smart-Seq2 sequencing," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 11057, 2024, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024>.
- [15] J. Ma *et al.*, "Artificial intelligence based on blood biomarkers including CTCs predicts outcomes in epithelial ovarian cancer: A prospective study," *OncoTargets and therapy*, pp. 3267-3280, 2021, <https://doi.org/10.2147/OTT.S307546>.
- [16] K. Sharifani and M. Amini, "Machine learning and deep learning: A review of methods and applications," *World Information Technology and Engineering Journal*, vol. 10, no. 07, pp. 3897-3904, 2023, https://papers.ssrn.com/sol3/abs_id=4458723.
- [17] M. M. Taye, "Understanding of machine learning with deep learning: architectures, workflow, applications and future directions," *Computers*, vol. 12, no. 5, p. 91, 2023, <https://doi.org/10.3390/compu>.
- [18] D. Sengupta and L. Kumar, "Machine learning approaches in cancer detection and treatment," IIIT-Delhi, 2023, <http://repository.iiitd.edu.in/xmlui/han>.
- [19] R. Rejuan *et al.*, "Validation of a Microfluidic Device Prototype for Cancer Detection and Identification: Circulating Tumor Cells Classification Based on Cell Trajectory Analysis Leveraging Cell-Based Modeling and Machine Learning," *bioRxiv*, 2024, <https://doi.org/10.1002/cnm.70037>.

- on circulating tumor cells and machine learning," *Entropy*, vol. 23, no. 10, p. 1248, 2021, <https://doi.org/10.3390/s22103776>.
- [41] H. Li *et al.*, "Digital Quantitative Detection for Heterogeneous Protein and mRNA Expression Patterns in Circulating Tumor Cells," *Advanced Science*, p. 2410120, 2025, <https://doi.org/10.1002>.
- [42] P. Chen *et al.*, "Detection of circulating plasma cells in peripheral blood using deep learning-based morphological analysis," *Cancer*, vol. 130, no. 10, pp. 1884-1893, 2024, <https://doi.org/10.1002/cncr.352>.
- [43] L. Gerratana *et al.*, "Integrating machine learning-predicted circulating tumor cells (CTCs) and circulating tumor DNA (ctDNA) in metastatic breast cancer: A proof of principle study on endocrine resistance profiling," *Cancer Letters*, vol. 609, p. 217325, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2024>.
- [44] T. M. Scholtens, F. Schreuder, S. T. Ligthart, J. F. Swennenhuis, J. Greve, and L. W. Terstappen, "Automated identification of circulating tumor cells by image cytometry," *Cytometry Part A*, vol. 81, no. 2, pp. 138-148, 2012, <https://doi.org/10.1002/cyto.a>.
- [45] I. Mocan, R. Itu, A. Ciurte, R. Danescu, and R. Buiga, "Automatic Detection of Tumor Cells in Microscopic Images of Unstained Blood using Convolutional Neural Networks," in *2018 IEEE 14th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2018: IEEE, pp. 319-324, [10.1109/ICCP.2018.8516638](https://doi.org/10.1109/ICCP.2018.8516638).
- [46] A. Ciurte, C. Selicean, O. Soritau, and R. Buiga, "Automatic detection of circulating tumor cells in darkfield microscopic images of unstained blood using boosting techniques," *PloS one*, vol. 13, no. 12, p. e0208385, 2018, <https://doi.org/10.1371/journal>.
- [47] L. L. Zeune *et al.*, "Deep learning of circulating tumour cells," *Nature Machine Intelligence*, vol. 2, no. 2, pp. 124-133, 2020, <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0153>.
- [48] L. Zeune *et al.*, "Quantifying HER-2 expression on circulating tumor cells by ACCEPT," *PloS one*, vol. 12, no. 10, p. e0186562, 2017, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186562>.
- [49] B. He *et al.*, "A new method for CTC images recognition based on machine learning," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, p. 897, 2020, <https://www.frontiersin.org/journals/bioeng>.
- [50] Z. Guo, X. Lin, Y. Hui, J. Wang, Q. Zhang, and F. Kong, "Circulating tumor cell identification based on deep learning," *Frontiers in Oncology*, vol. 12, p. 843879, 2022, <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.843879>.
- Disease," in *The Heart Surgery Forum*, 2023, vol. 26, no. 5, pp. E592-E599, <https://doi.org/10.59958/hsf.58>.
- [31] A. K. Swain, A. Swetapadma, J. K. Rout, and B. K. Balabantaray, "A Review on Lung Cancer Detection and Classification using Shallow Learning and Deep Learning," in *2023 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, 2023: IEEE, pp. 570-573, [10.1109/OCIT59427.2023.10431005](https://doi.org/10.1109/OCIT59427.2023.10431005).
- [32] M. T. Ahad, Y. Li, B. Song, and T. Bhuiyan, "Comparison of CNN-based deep learning architectures for rice diseases classification," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 9, pp. 22-35, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.07.001>.
- [33] G. E. Rao, B. Rajitha, P. N. Srinivasu, M. F. Ijaz, and M. Woźniak, "Hybrid framework for respiratory lung diseases detection based on classical CNN and quantum classifiers from chest X-rays," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 88, p. 105567, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105567>.
- [34] S. Wang, Y. Zhou, X. Qin, S. Nair, X. Huang, and Y. Liu, "Label-free detection of rare circulating tumor cells by image analysis and machine learning," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, p. 12226, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69056>.
- [35] J. A. Pruneski *et al.*, "Supervised machine learning and associated algorithms: applications in orthopedic surgery," *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 31, no. 4, pp. 1196-1202, 2023, <https://doi.org/10.1007/s00167-022>.
- [36] S. Naeem, A. Ali, S. Anam, and M. M. Ahmed, "An unsupervised machine learning algorithms: Comprehensive review," *International Journal of Computing and Digital Systems*, 2023, <https://www.researchgate.net/publication/368111111>.
- [37] D. Valkenborg, M. Geubbelmans, A.-J. Rousseau, and T. Burzykowski, "Supervised learning," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 164, no. 1, pp. 146-149, 2023, <https://doi.org/10.1007/978-3-540>.
- [38] S. Patil and S. Patil, "Linear with polynomial regression: Overview," *Int J Appl Res*, vol. 7, pp. 273-275, 2021, <https://doi.org/10.1007/978-3-540>.
- [39] J. Isabona, A. L. Imoize, and Y. Kim, "Machine learning-based boosted regression ensemble combined with hyperparameter tuning for optimal adaptive learning," *Sensors*, vol. 22, no. 10, p. 3776, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22103776>.
- [40] E. Hatzidaki, A. Iliopoulos, and I. Papasotiriou, "A novel method for colorectal cancer screening based

شبیه سازی عددی میدان های جریان و دما در محفظه احتراق توربین گاز V94.2

چکیده: در این پژوهش محفظه احتراق توربین گاز V94.2 از خروجی کمپرسور تا خروجی محفظه احتراق با استفاده از نرم افزار Ansys CFX شبیه سازی شده است. از آنجایی که این محفظه احتراق دارای ۸ عدد مشعل بوده که بطور متقارن روی محفظه احتراق قرار گرفته اند، برای کاهش هزینه های سنگین اجرا و زمان یک هشتم محفظه احتراق مدل سازی شده است. برای مدل سازی اغتشاشی از مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ قابل تحقق و تشعشعی از مدل P-1 استفاده شده است. نتایج نشان داده است که احتراق تنها با استفاده از مدل اتلاف گردابه ای eddy dissipation تشکیل شده است. پس از استقلال حل از شبکه با مقایسه دمای خروجی محفظه حاصل از حل عددی و نتایج تجربی، تطابق خوبی بین این دو نتیجه مشاهده شد. حداکثر خطای حاصل از تحلیل کمتر از ۹ درصد بدست آمده است. با بررسی تغییرات فشار هوای ورودی محفظه احتراق روی میدان های جریان و دما مشخص گردید که افزایش فشار هوای ورودی کمپرسور تا حد ۱۲ bar باعث خاموش شدن محفظه احتراق می شود. در نهایت با تغییر دمای ورودی سوخت مشخص گردید که با افزایش دمای سوخت گاز پروفیل دمای خروجی یکنواخت تر شده و میزان آلودگی نیز کاهش می یابد.

واژه های راهنما: شبیه سازی عددی، محفظه احتراق، توربین گاز V94.2، میدان های جریان و دما

صادق نیکبخت
ناصر آباد

استادیار،
گروه مهندسی انرژی،
دانشکده نفت و گاز گچساران،
دانشگاه یاسوج، گچساران

محمدرضا علیگودرز*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت دبیر
شهید رجایی،
تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

Sadegh Nikbakht
Naserabad

Assistant Professor,
Energy Engineering
Department, Faculty of
Gas and Petroleum,
Yasouj University,
Gachsaran

Mohammad Reza
Aligoodarz*

Associate Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Shahid
Rajaee Teacher Training
University,
Tehran

Numerical simulation of flow and temperature fields in the V94.2 gas turbine combustion chamber

Abstract: In this study, the V94.2 gas turbine combustor has been simulated from the compressor outlet to the combustion chamber outlet using Ansys CFX software. Since this combustion chamber has eight flames that are symmetrically placed, one-eighth of the combustion chamber has been modeled to reduce the heavily implementation costs and time. The realizable $k-\epsilon$ two-equation model and P-1 models were used for turbulence and radiation modeling, respectively. The results showed that combustion was formed only using the eddy dissipation model. After verifying the independence of the mesh run, a good agreement has been seen between numerical and experimental data. The maximum error obtained from the analysis was less than 9%. By examining the changes in the combustion chamber inlet air pressure on the flow and temperature fields, it was determined that increasing the compressor outlet air pressure to 12 bar causes the combustion chamber to shut down. Finally, by adjusting the fuel inlet temperature, it was determined that increasing the fuel temperature results in a more uniform gas profile outlet temperature and a reduction in pollution level.

Keywords: Numerical simulation, Combustion chamber, V94.2 gas turbine, Flow and temperature fields

۱- مقدمه

امروزه برای تولید برق و به حرکت در آوردن کمپرسورها در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، توربین‌های گازی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. محفظه احتراق به‌عنوان یکی از مهمترین قسمت‌های توربین گاز از دو جنبه اقتصادی و زیست محیطی قابل بررسی است. جنبه اقتصادی شامل راندمان و طول عمر است و جنبه زیست محیطی نیز شامل آلودگی هوا می‌باشد. آلودگی هوا در توربین‌های گازی ناشی از احتراق در محفظه احتراق است. موضوعی که بسیار حائز اهمیت است وجود تعداد زیادی از واحدهای توربین گاز V94.2 در ایران می‌باشد که بر اهمیت این تحقیق افزوده است. یکی از قسمت‌های بسیار مهم و پیچیده توربین گاز محفظه احتراق آن است. این پیچیدگی‌ها ناشی از هندسه پیچیده و وجود همزمان احتراق، جریان‌های اغتشاشی، انتقال حرارت تشعشعی، جابجایی، هدایت و انتقال جرم می‌باشد که برای بررسی میدان‌های جریان و دما با این پیچیدگی نیازمند مدل‌سازی سه بعدی است. امروزه با استفاده از CFD می‌توان به این امر مهم دست یافت. با انجام این تحقیق می‌توان نحوه خنک کاری دیواره محفظه و نحوه کنترل دمای شعله جهت کاهش آلودگی و نحوه ترکیب سوخت و هوا را به‌طور کامل و دقیق بررسی کرد.

کارهای مختلفی در سطوح متفاوت بر روی محفظه احتراق توربین گاز انجام شده است. رسولی و همکاران ترکیب کد یک-بعدی و CFD را جهت بدست آوردن منحنی عملکرد مناسب برای کد یک‌بعدی، صفر بعدی با شرایط طراحی و خارج از طراحی و کد سیکل دینامیکی انجام دادند. هدف تولید این کد امکان تحلیل سریع محفظه احتراق در شرایط عملکردی مختلف و رسیدن به خروجی‌های مورد نیاز است [۱]. در مقاله‌ای دیگر دیجوبجای و همکاران از مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای رفع مشکل سوختگی محفظه احتراق در ناحیه رقیق‌سازی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که این مشکل به علت طراحی نامناسب سوراخ‌های خنک‌کاری در قسمت رقیق‌سازی به وجود آمده است [۲].

احمدیان حسینی و همکاران با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی اثر میزان چرخش را روی رفتار دینامیک جریان در شعله دیفیوژن یک محفظه احتراق توربین گاز بررسی نمودند [۳]. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش عدد چرخش هوای ورودی موجب افزایش راندمان تابش شار و کاهش آلاینده‌گی NO_x شده است. آزادی و همکاران شبیه‌سازی محفظه احتراق را برای ساده‌سازی نیمی از سوراخ‌های خنک‌کاری انجام

دادند. در این تحقیق از نرم‌افزارهای Gambit و Fluent برای مدل‌سازی و تحلیل هندسه با ۲۹۴۶۲۶۸ مش استفاده شده است [۴]. تحقیق حاضر برای دستیابی به دقت بیشتر از ۳۳۰۰۰۰۰ مش در نرم‌افزار Ansys-CFX با شرط مرزی متفاوت استفاده نموده است. علاوه بر این نقاط بحرانی دما و فشار و شرایط کنترل آلودگی در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است. حاتمی و مقیمان محفظه احتراقی مشابه مدل ارائه شده توسط واتانیب و ساوا [۵] را با دو سوخت گازوئیل و متان مدل‌سازی و تحلیل نمودند. نتایج نشان داده است که ماکزیمم دما و فشار سوخت متان به ترتیب ۸/۳۳ و ۳۱ درصد نسبت به ماکزیمم دما و فشار سوخت گازوئیل کاهش یافته است. همچنین در سوخت متان ماکزیمم مقدار NO_x تولیدی و حجم دوده خروجی به محیط به‌طور چشمگیری کاهش یافته است [۶]. آدامو و همکاران، طراحی، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی محفظه‌های احتراق یک میکروتوربین گاز دمای بالا را انجام دادند. نتایج نشان داده است که طرح جدید محفظه احتراق منجر به کاهش قابل توجه انتشار آلاینده‌ها، به ترتیب تا ۷۵ و ۴۰ درصدی در اکسیدهای نیتروژن و مونوکسیدهای کربن شده است [۷]. چن و همکاران مشخصات میدان جریان احتراق توربین گاز صنعتی تحت شرایط مختلف اختلاط سوخت را به صورت عددی با استفاده از مدل SST k- ω بررسی نمودند. برای دستیابی به انتشار NO کم، دمای خروجی یکنواخت و اطمینان از عملکرد ایمن و طولانی مدت توربین گاز، نسبت ترکیب سوخت ۰/۳ تا ۰/۳۵ توصیه می‌شود [۸]. زونگ و همکاران تأثیر تنظیمات هوای احتراق بر ویژگی‌های احتراق و میزان انتشارات آلاینده‌های یک میکرو توربین گاز را مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. یانگ و همکاران تأثیر نوع ساختار محفظه‌ای احتراق را بر ویژگی‌های احتراق یک محفظه‌ای توربین هوا-گاز مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که نازل نصب شده بر روی دیواره خارجی لوله شعله، با توجه به مزایای اختلاط سوخت/هوا و عملکرد احتراق برای این نوع محفظه‌ای احتراق، بهتر از نازل نصب شده بر روی سر محفظه است [۱۰]. گرشاسبی و تحسینی اثر فشار بر عملکرد محفظه‌ای احتراق یک توربین SGT-100 را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار مشخصه‌های شعله تغییر چندانی ندارند. همچنین آلاینده NO_x در فشارهای بالاتر افزایش می‌یابد [۱۱]. ایلباس با در نظر گرفتن تشعشع، احتراق غیر پیش مخلوط متان و اکسیژن را در محفظه احتراق بررسی نمود. وی در پژوهش خود به مقایسه مدل‌های تشعشعی P-1 و DTRM نیز پرداخته است. استفاده از هر دو مدل تابشی باعث ایجاد اختلاف دمایی در تمام سطوح پایین‌تر برای تمام ترکیبات سوخت در مقایسه با نتایج

به کمیت‌های جریان متوسط و بالاخص گردان‌های موجود در جریان متوسط می‌باشد.

روش لزجت گردابه‌ای یک روش مستقیم برای بررسی معادله مومنتم است. با وجود دقت قابل قبول آن، تنها دارای یک نوع خروجی یعنی سرعت و برش اغتشاشی می‌باشد و نمی‌تواند انرژی اغتشاش یا مؤلفه‌های نوسانی را محاسبه کند. مدل‌های صفر، یک و دو معادله‌ای با استفاده از این مفهوم و با افزودن معادلات دیگر ایجاد شده‌اند. در اینجا از روش دو معادله‌ای استفاده شده است. مدلی شامل انرژی جنبشی اغتشاش، به همراه یک مدل برای افت انرژی ϵ ، مقیاس طولی اغتشاش L یا نوسانات چرخش ω می‌باشد. مدل‌های دو معادله‌ای به‌عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریانات آشفته، بالاخص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی (که در عین قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتاً ساده‌ای نیز می‌باشند) مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آنها حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن مقیاس سرعت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی به‌طور مستقل می‌شوند.

مدل آشفتگی در مشخص کردن طول شعله و ناحیه بازچرخش بسیار مهم است و از آنجای اغلب محفظه‌های احتراق پیش مخلوط سوپرلر دارند، بنابراین مدل اغتشاشی پارامتر بسیار حساسی است. اصولاً مدل‌های اغتشاشی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: LES^1 و $RANS^2$ که مدل LES بسیار دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر می‌باشد، ولی بسیار زمان‌بر است. از جمله مدل‌های رایج در صنعت برای مدل‌سازی اغتشاشی، می‌توان به مدل‌های $k-\epsilon$ و RSM^3 اشاره نمود. در سوپرلرها مدل $realizable k-\epsilon$ بهتر از مدل RSM عمل می‌نماید. از آنجایی که مدل $k-\epsilon$ $realizable$ با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد [۱]، برای پیش‌بینی جریان اغتشاشی این مدل بسیار مناسب است.

در مدل‌های $k-\epsilon$ میدان آشفته بر حسب دو متغیر بیان می‌شود:

- انرژی جنبشی جریان آشفته
- نرخ افت انرژی اغتشاش

در این مدل، معادلات پیوستگی و مومنتم به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۶-۱۹].

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

به‌دست‌آمده با استفاده از مدل بدون تابش شده است [۱۲]. در تحقیق دیگر کونگ و همکاران شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق یک توربین گاز را با استفاده از سوخت متان هوای تهویه انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که عواملی مانند فشار ورودی، دما و ترکیب توربین‌های گازی بر احتراق و انتشار آلاینده‌ها تأثیر دارند [۱۳]. وانگ و همکاران با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-SST$ ، ω ، مدل احتراقی غیر مخلوط و مدل تشعشع $P-1$ محفظه احتراق یک توربین گاز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که نقطه داغ در خروجی محفظه احتراق باعث ایجاد شوک حرارتی قوی‌تر به پایین‌دست پره راهنمای مرحله اول فشار بالا در طول فرآیند می‌شود [۱۴]. قمری و همکاران دقت مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ را در شبیه‌سازی محفظه احتراق بدون شعله به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد بیشترین خطا در مدل منتر-لچنر نسبت به نتایج آزمایشگاهی برابر با ۵ درصد است در حالی که در مدل $k-\omega$ SST بیشترین خطا برابر ۱۴ درصد است که بدترین نتایج را نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده دارد [۱۵].

در این مقاله قطاع یک هشتم از محفظه احتراق توربین گاز V94.2 با ۳۳۰۰۰۰۰ مش در نرم‌افزار Ansys-CFX مدل‌سازی و تحلیل شده است. با هدف دستیابی به نتایج واقعی و قرار داشتن سوراخ‌های خنک‌کاری روی مرز سمت راست به جای شرط مرزی پرئودیک، در تحقیق حاضر از شرط مرزی متقارن استفاده شده است. در این مقاله نقاط بحرانی فشار و دما، شرایط یکنواختی دما و کاهش میزان NO_x در محفظه احتراق تعیین گردید. نحوه خنک‌کاری دیواره محفظه احتراق بر اساس نقاط بحرانی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت اثر تغییر فشار و دمای هوای ورودی روی میدان جریان و دما، یکنواختی پروفیل دمای خروجی و آلودگی NO_x بررسی گردید.

۲- معادلات حاکم جهت شبیه‌سازی محفظه احتراق

جهت تحلیل رفتار جریان برای تمام جریان‌ها، معادلات بقای جرم و مومنتم حل می‌شود. برای جریان‌های تراکم‌پذیر یا جریان‌های شامل انتقال حرارت، معادلات بقای انرژی نیز حل می‌گردند. هنگامی که جریان مغشوش باشد باید از معادلات مدل‌سازی اغتشاش استفاده نمود. هدف از مدل‌سازی جریانات آشفته تعیین ترم‌هایی از قبیل تنش رینولدز، شار جرمی آشفته و یا شار حرارتی آشفته با استفاده از ارتباط دادن مقادیر کمیت‌های مزبور

³ Reynolds Stress Model

¹ Large Eddy Simulation

² Reynolds Averaged Navier Stokes

معادله مومنتم:

نرم‌افزار CFX شامل مدل‌های است که با آنها می‌توان جریان‌های که شامل احتراق است را نیز مدل‌سازی کرد. به‌طور کلی نرم‌افزار CFX شامل مدل‌های احتراقی زیر است:

- Eddy dissipation model (EDM)
- Finite rate chemistry (FRC)
- Combined EDM/FRC
- Laminar flamelet model

مدل eddy dissipation برای محدوده وسیعی از جریان‌های اغتشاشی که دارای احتراق نیز هستند استفاده می‌شود. این مدل شعله‌های پیش‌مخلوط و دیفیوژنی را نیز پوشش می‌دهد. به‌دلیل سادگی و قوی بودن در پیش‌بینی جریان‌های اغتشاشی احتراقی از این مدل به‌طور وسیع در مدل‌سازی شعله‌های صنعتی استفاده می‌شود. تمامی مدل‌های احتراقی در CFX از معادله انتقالی زیر استفاده می‌کنند [۲۳]:

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{eff} \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right] + S_i \quad (۸)$$

تمام معادله انتقال تشعشع بر اساس راهنمای Ansys-CFX استخراج شده است [۲۴]. برای یک محیط جاذب، ناشر و پخش کننده در موقعیت r و جهت s به‌صورت زیر است:

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s)I(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \phi(s,s') d\Omega' \quad (۹)$$

شدت تشعشع کلی به موقعیت r و جهت s بستگی دارد. ضریب شکست n در مواقع یاز اهمیت زیادی برخوردار است که محیط نیمه‌شفاف باشد.

هدف از مدل‌سازی تشعشعی حل معادله انتقال تشعشع، بدست آوردن ترم S و میزان انتقال حرارت تشعشعی در دیواره‌ها است. معادله (۹) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dI_v(r,s)}{ds} = -(K_{av} + K_{sv})I_v(r,s) + K_{av}I_b(v,T) + \frac{k_{sv}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \phi(s,s') d\Omega' + S \quad (۱۰)$$

بطوریکه معادله RTE یک معادله انتگرالی دیفرانسیلی مرتبه اول برای جهت ثابت s است. برای حل این معادله در یک محدوده، شرایط مرزی برای I_v مورد نیاز است. در CFX شرایط مرزی زیر برقرار است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ = - \frac{\partial P'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \end{aligned} \quad (۲)$$

P' فشاری که با رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (۳)$$

مدل $k-\varepsilon$ بر مفهوم لزجت گردابه‌ای بیان شده و $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ می‌باشد. در این مدل فرض می‌شود که μ_t مطابق رابطه زیر به انرژی جنبشی جریان و افت انرژی بستگی دارد [۲۱، ۲۰]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۴)$$

که C_μ عددی ثابت است. مقدار k و ε مستقیماً از معادلات دیفرانسیلی انتقال انرژی جنبشی و نرخ افت انرژی اغتشاش زیر به دست می‌آیند [۲۱، ۲۰]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{eb}) \end{aligned} \quad (۶)$$

$C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، σ_k و σ_ε ثابت هستند. P_{eb} و P_{kb} تأثیر نیروهای بویانسی را بیان می‌کنند. P_k تولید اغتشاش بر اثر نیروهای ویسکوز است [۲۲].

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (۷)$$

برای بدست آوردن کل انتشار جسم سیاه، نسبت به فرکانس انتگرال می‌گیریم:

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_b(x, T) dx = n^2 \sigma T^4 \quad (16)$$

انتقال حرارت تشعشعی شدیداً به دما وابسته است و چون دمای احتراق بین 1000-2000 K است. اوج طیف آن در ناحیه اشعه-های مادون قرمز است. توجه داشته باشید پیک طیف، تابع طول موج است و داریم:

$$h\nu \approx 4k_b T \quad (17)$$

شار حرارتی طیف تشعشعی که از مکان r با بردار نرمال واحد n عبور می‌کند برابر است با:

$$q_v^R(r, n) = \int (s.n) I_v(r, s) d\Omega_s \quad (18)$$

که دیورژانس شار حرارتی برابر است با:

$$-\nabla \cdot q_v^R = k_a (G_v - 4E_{bv}) \quad (19)$$

به‌طوری که:

$$G_v = \int I_v d\Omega_s \quad (20)$$

شار حرارتی کل با انتگرال‌گیری از معادله (۱۹) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot q_v^R &= \int_0^\infty q_v^R dv \\ &= \int_0^\infty k_{av} G_v dv - 4 \int_0^\infty k_{av} E_{bv} dv \end{aligned} \quad (21)$$

ضخامت نوری کمیت بی‌بعدی است. آن معرف توانایی که برابر است با:

$$\tau = \int_0^s K_\lambda(s^*) ds^* \quad (22)$$

در رابطه بالا مقدار بالای τ نشانگر جذب بالای تشعشع است. یکی از روش‌های مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی در Ansys CFX مدل P-1 است. مدل P-1 دارای کاربرد بیشتری نسبت به مدل تشعشعی انتقال گسسته می‌باشد. در روش P-1 معادله RTE به صورت یک معادله دیفیوژن است. برای حل این مدل به پردازنده ضعیف‌تری نیاز است. این مدل شامل تأثیرات پخش است و می‌توان به آسانی برای مدل‌های پیچیده نیز استفاده کرد. این مدل شار حرارتی تشعشعی را از روی چشمه‌ها یا چاه‌های

* مرزهای کدر انعکاسی ساطع و منتشرکننده:

$$\begin{aligned} I_v(r_w, s) &= -\varepsilon_v(r_w) I_b(v, T) \\ &+ \frac{(r_w) \rho_w}{\pi} \int_{n.s' < 0} I_v(r_w, s') |n.s'| d\Omega' \end{aligned} \quad (11)$$

* شرط مرزی انتشار پخشی و طیف انعکاسی:

$$I_v(r_w, s) = \left[\begin{aligned} &\varepsilon_v(r_w) I_b(v, T) \\ &+ \frac{\rho_v^d(r_w)}{\pi} \int_{n.s' < 0} I_v(r_w, s') |n.s'| d\Omega' \\ &+ \rho_v^s(r_w) I_v(r_w, s_s) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

به‌طوری که:

• کسر انتشار را α در نظر می‌گیریم

• ρ_v^d : پخش قابل انعکاس که برابر است با:

$$\rho_v^d = (1 - \varepsilon_v) * \alpha$$

• ρ_v^s : طیف انعکاسی که برابر است با: $\rho_v^s = (1 - \varepsilon_v) * (1 - \alpha)$

• ρ_v : طیف انعکاسی برابر است با: $\rho_v^d + \rho_v^s = (1 - \varepsilon_v)$

• S_s : جهت طیف

• دیواره‌های نیمه‌شفاف (فقط مدل مونت کارلو)

به علت وابستگی به مختصات سه‌بعدی، دو جهت مختصاتی محلی، S و فرکانس، راه‌حل‌های عادی معادله انتقال حرارت تشعشعی بسیار وقت‌گیر می‌باشند که مدل‌های تشعشعی با تقریب جهت و وابستگی طیفی انجام می‌دهند. برای تقریب جهت، CFX شامل مدل‌های روزلند، پی-۱، انتقال گسسته و مونت کارلو و برای تقریب طیفی CFX شامل Gray Multibund, Weighted Sum of Gray Gases است. طیف انرژی برای تشعشع منتشر شده در جسم سیاه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} E_b(v, T) &= \frac{2\pi v^2}{c^2} \frac{n^2 h v}{e^{\frac{h v}{k_b T}} - 1} (W m^{-2} H Z^{-1}) \\ &= \pi I_b(v, T) \end{aligned} \quad (13)$$

اگر $x = \frac{h v}{k_b T}$ نوشته شود خواهیم داشت:

$$E_b(x, T) = n^2 \sigma T^4 \left(\frac{h}{k T} \right) \left(\frac{15}{\pi^4} \frac{x^3}{e^x - 1} \right) \quad (14)$$

$$\sigma \equiv \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} \right) \quad (15)$$

(شکل (۷)). برای اینکه قسمت بالایی محفظه احتراق (دام، مشعل^۲، سوپرلر^۳، زانوی^۴) شبکه‌ای منظم و ساختاریافته داشته باشد، سعی شده است که این قسمت‌ها به هندسه‌هایی تقسیم کرد که نرم‌افزار Meshing بتواند مش منظم و ساختاریافته ایجاد کند. بهترین شبکه‌ای که نرم‌افزار Meshing می‌تواند ایجاد کند، مش از روش سوپ^۵ می‌باشد. برای ایجاد این نوع مش باید هندسه ایجاد شده تحت صفحه‌ای جاروب شده باشد. در این روش نرم افزار، ابتدا بر روی صفحه منبع، مش را تولید کرده و سپس در راستای جاروب هندسه، مش را ایجاد می‌کند (شکل (۳)). قابل ذکر است که شکل بالا متقارن است؛ یعنی یک دوم از هندسه (بجز سوپرلر) نشان داده شده است. از آنجایی که قسمت سوپرلر دارای گرادین‌های شدید می‌باشد از شبکه محاسباتی ریزتر و همچنین لایه مرزی اطراف پره‌ها استفاده شده است (شکل (۴)).

مرحله نهایی قبل از ورود به حلگر نرم‌افزار CFX، تعیین شرایط مرزی است. تعیین شرایط مرزی به شدت روی نتایج، دقت حل و زمان همگرایی تأثیر می‌گذارد. شرایط مرزی که برای محفظه احتراق سیلویی استفاده شده عبارتند از:

- دبی جرمی هوای ورودی به محفظه احتراق در حالت تمام‌بار
 - دبی جرمی سوخت گاز در حالت تمام‌بار^۶
 - فشار استاتیک صفر در خروجی محفظه احتراق
 - شرط مرزی متقارن^۷ در طرفین محفظه
- از آنجایی که نیمی از سوراخ‌های خنک‌کاری روی مرز سمت راست محفظه قرار دارد نمی‌توان از شرط مرزی پریودیک استفاده کرد و باید از شرط مرزی متقارن بهره گرفت. دبی جرمی هوای خروجی از کمپرسور در حالت تمام بار 525.7 kg/s است که با توجه به اینکه توربین دارای دو محفظه سیلویی است و در این شبیه‌سازی هم یک هشتم هندسه مدل شده است باید این مقدار را بر عدد ۱۶ تقسیم کرده و به عنوان دبی جرمی هوای ورودی محفظه در نظر گرفت. دبی جرمی سوخت ورودی در حالت تمام بار 9.417 kg/s است که برای اعمال آن همانند شرط مرزی دبی جرمی هوا عمل می‌شود.

دمای گازهای از خروجی محفظه احتراق به عنوان پارامتر مبنا برای استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شد است. دمای دود خروجی محفظه احتراق سیلویی V94.2 در عمل ۱۰۶۰ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به شکل (۸) دریافت می‌شود که بعد از این که المان‌های محاسباتی به تعداد ۳۳۰۰۰۰ می‌رسد

حرارتی محلی پیش بینی می‌کند. مدل P-1 بر مبنای انتشار شدت تشعشع به صورت مجموع پرتوهای هماهنگ کروی عمود بر هم می‌باشند.

۳- جزئیات طراحی و شبیه‌سازی محفظه احتراق

هندسه محفظه احتراق توربین گاز V94.2 توسط محیط Design Modeler نرم افزار Ansys ساخته شده است. از آنجایی که محفظه احتراق توربین گاز بسیار پیچیده است، ساخت هندسه با جزئیات و دقت بالایی انجام شده است. تمام قسمت‌های سیالاتی محفظه احتراق مدل شده است. کل محفظه احتراق به ۲۳۲ جسم بریده شده است. برش‌های فوق جهت ایجاد شبکه محاسباتی ساختار یافته و با کیفیت بالاتر انجام شده است. هندسه محفظه احتراق سیلویی توربین گاز V94.2 متقارن است. جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی یک هشتم هندسه رسم شده است. در شکل (۱) حوزه سیالاتی رسم شده محفظه احتراق مشهود است. همانطور که مشاهده می‌شود کل دام^۱ محفظه به هشت قسمت تقسیم شده است. با رسم یک هشتم هندسه تمامی سوراخ‌های خنک‌کاری نیز به هشت قسمت تقسیم می‌شود. سوراخ خنک‌کاری در ۳۶ ستون قرار گرفته‌اند که با رسم یک هشتم هندسه سوراخ‌های خنک‌کاری به صورت ۴ ستون کامل و یک ستون نیمه در مرز قرار می‌گیرد (شکل (۲) و (۳)). پیچیده‌ترین بخش این هندسه سوپرلر آن می‌باشد که این بخش نیز در شکل (۴) ترسیم است. جهت تولید مش، نواحی با گرادین بالا نیازمند شبکه ریزتری می‌باشد. در این مدل‌سازی در تمام دیواره‌ها از شبکه لایه‌مرزی استفاده شده است. در شکل (۵) شبکه لایه‌مرزی در دیواره محفظه احتراق مشاهده می‌شود. برای کاهش المان‌های محاسباتی و همچنین افزایش دقت حل و کاهش زمان همگرایی، استفاده از المان‌های ساختاریافته می‌تواند کارساز باشد. از این قاعده در این پروژه نیز استفاده شده است (شکل (۶)).

برای خنک‌کاری دیواره محفظه و همچنین برای رقیق‌سازی هوای ورودی توربین از سوراخ‌های خنک‌کاری روی دیواره محفظه احتراق استفاده شده است که با درایت تمام این سوراخ‌ها مش زده شده است. از آنجایی که گرادین سرعت و دما در این سوراخ‌ها شدید است برای تخمین دقیق میدان دما و جریان و دبی جرمی در این سوراخ‌ها باید مش ریز و لایه مرزی ایجاد شود

⁵ Sweep

⁶ Full load

⁷ Symmetry

¹ Dome

² Burner

³ Swiler

⁴ Elbow

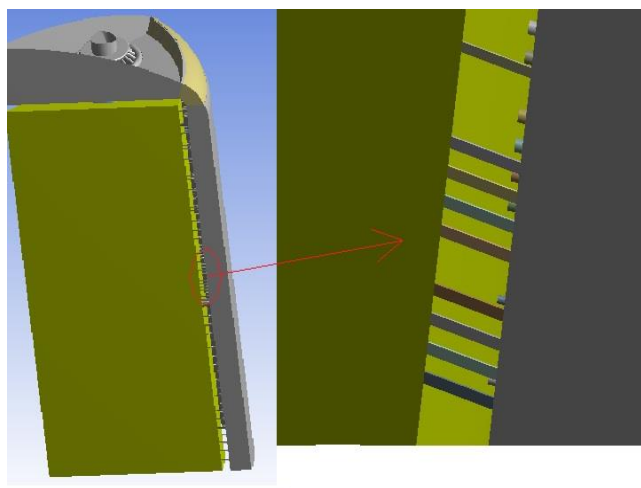
متوسط دمای خروجی تغییر نمی‌کند و این تعداد المان مناسب-ترین شبکه محاسباتی می‌باشد.

۴- نتایج و تحلیل

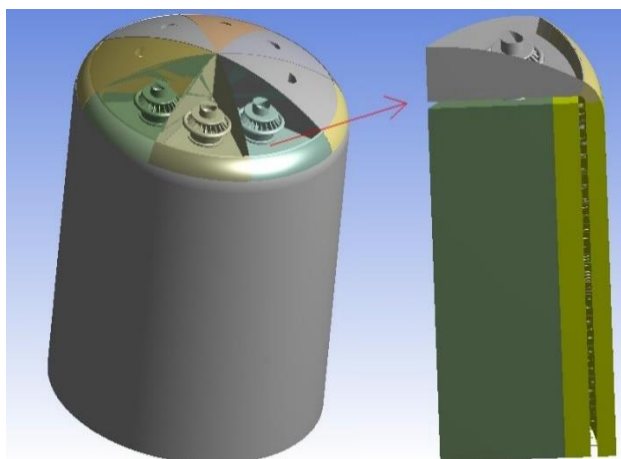
در این شبیه‌سازی دمای خروجی محفظه احتراق مورد بررسی قرار می‌گیرد. معیار همگرایی برای حل عددی 10^{-4} در نظر گرفته شده است. دمای متوسط خروجی از محفظه احتراق بدست آمده از تحلیل عددی ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است که این مقدار با نتایج حاصل از حل عددی تطابق خوبی دارد.

جدول ۱ اعتبارسنجی دمای دود خروجی محفظه احتراق

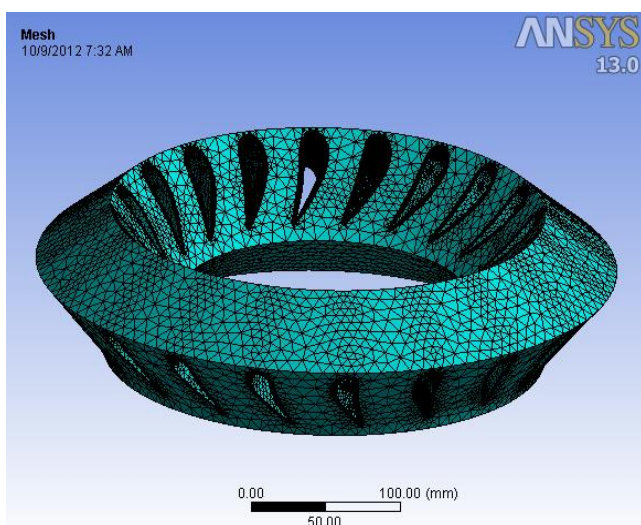
میزان خطا (%)	دمای دود در مرجع (°C)	مرجع
۰/۹۶	۱۰۴۰	[۲۶]
٪۹۴	۱۰۶۰	[۲۶]
۲/۸	۱۰۸۰	[۲۷]
۷/۴	۱۱۳۴	[۲۸]
۸/۱	۹۷۱	[۲۹]



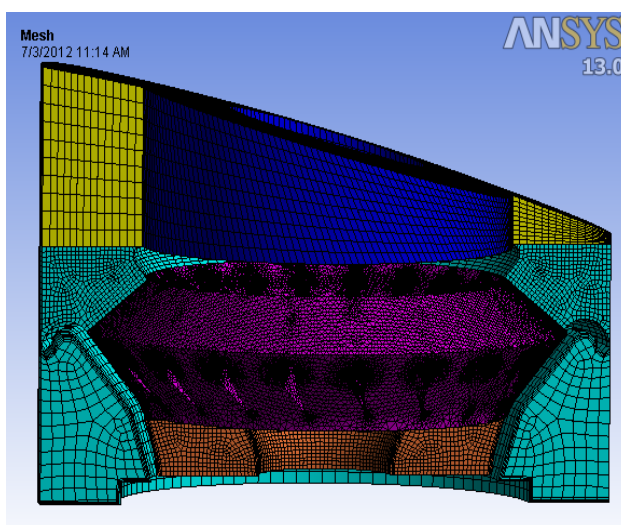
شکل ۲ استفاده از شرط مرزی متقارن



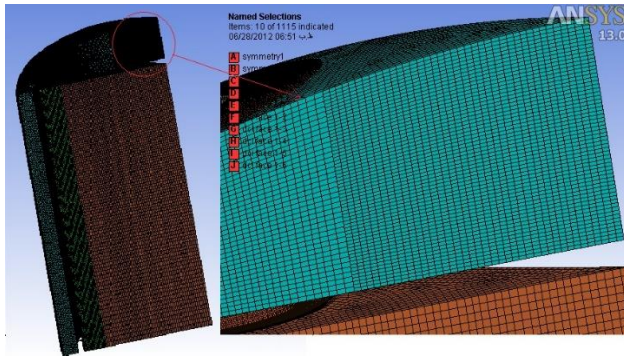
شکل ۱ هندسه محفظه احتراق سیلوی V94.2



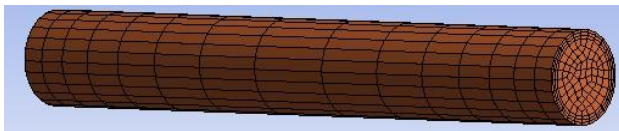
شکل ۴ شبکه محاسباتی سوپرلر گاز



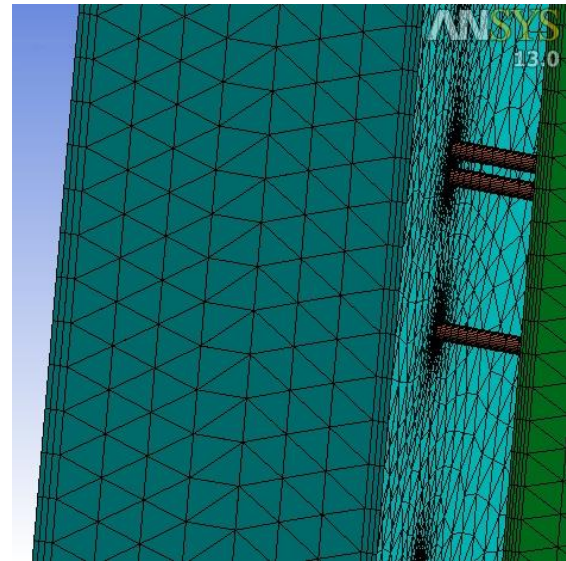
شکل ۳ شبکه محاسباتی برنر محفظه احتراق



شکل ۶ شبکه محاسباتی ساختار یافته

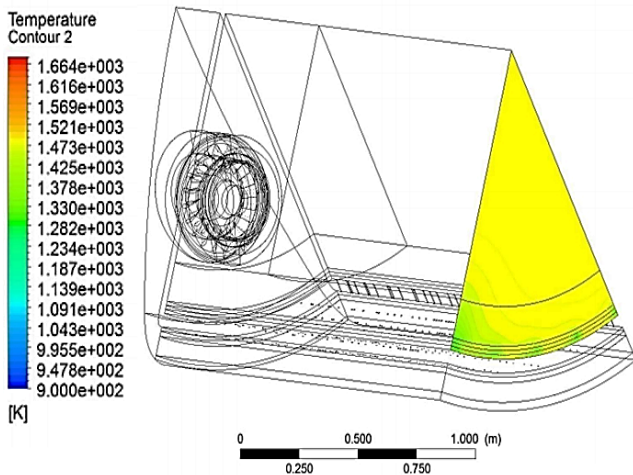


شکل ۷ شبکه محاسباتی در سوراخ خنک‌کاری

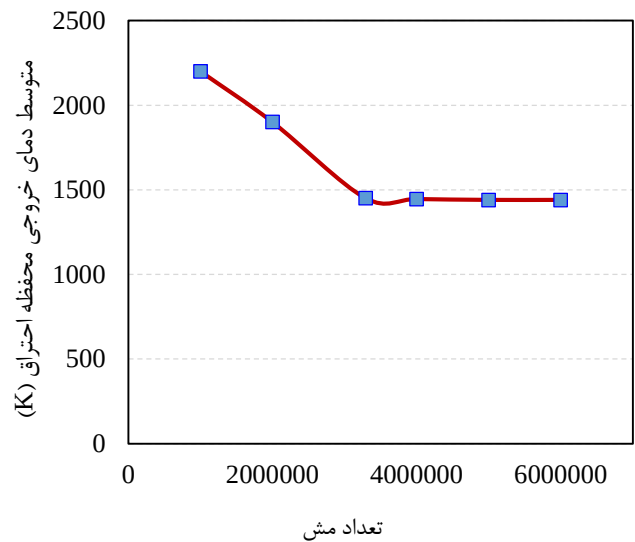


شکل ۵ شبکه لایه مرزی دیواره ورودی هوای کمپرسور محفظه احتراق

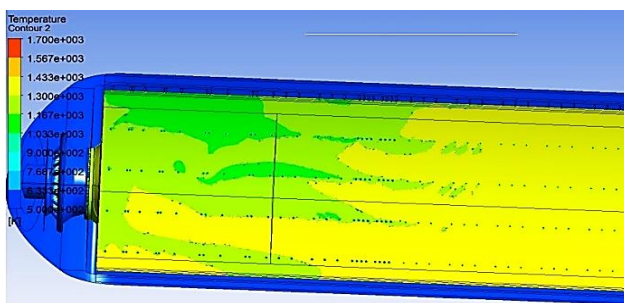
محفظه‌ی احتراق مشاهده کرد. در شکل (۱۰) اثر هوای خنک-کاری روی دمای دیواره محفظه احتراق مشاهده می‌شود.



شکل ۹ پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق



شکل ۸ نمودار متوسط دمای خروجی محفظه احتراق بر حسب تعداد مش



شکل ۱۰ پروفیل دمای دیواره‌ی محفظه احتراق V94.2

نقاط بحرانی دما و فشار مهم‌ترین نتیجه تحلیل بوده تا بتوان جنس و مواد بخش‌های داغ و پرفشار را تعیین کرد تا محفظه در مقابل شوک‌های حرارتی و فشاری دچار مشکل نشود.

در شکل (۹) پروفیل دمای خروجی مشاهده می‌شود که با توجه به اینکه متوسط دمای خروجی محفظه احتراق ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است مقدار خطای این حل در حدود ۹ درصد است. نتیجه فوق حاکی از شبکه‌بندی دقیق، انتخاب مدل اغتشاشی، احتراقی، تشعشعی مناسب و تعیین مطلوب شرایط مرزی است. مهم‌ترین تفاوت مدل‌سازی سه‌بعدی و یک‌بعدی، توان رسم کانتورهای دما در قسمت‌های مختلف محفظه احتراق است؛ این قابلیت فقط در مدل‌سازی سه‌بعدی وجود دارد، با استفاده از این کانتورها هم می‌توان دمای قسمت‌های مختلف محفظه را مشاهده کرد و هم می‌توان اثر پارامترهای مختلف مانند دمای سوخت ورودی، دمای هوای ورودی و تلورانس ساخت هندسه را بر روی دمای محفظه، یکنواختی پروفیل دمای خروجی، راندمان

مشعل محفظه‌ی احتراق توربین گازی زمینس مدل V94.2 از نوع DLE (Dry low emission) است. این محفظه از نوع پیش‌مخلوط بوده که هوا با گازهای خروجی از سوراخ‌های قرار گرفته روی پره‌های سوپرلر مخلوط شده و سپس وارد ناحیه اشتعال می‌شود. از آنجایی که سوراخ‌های گاز دقیقاً عمود بر جریان هوا قرار دارد، جت گاز باعث مخلوط همگن سوخت گاز و هوا شده و باعث کاهش نقطه‌های داغ و در نتیجه باعث کاهش آلودگی NOx می‌شود. شکل (۱۳) جت‌های گاز خروجی از سوراخ‌های قرار گرفته روی دو طرف پره سوپرلر را نشان می‌دهد. برای کاهش نقطه داغ، ایجاد یکنواختی بیشتر در مخلوط سوخت و هوا تأثیر به‌سزایی دارد که برای انجام این مقوله با استفاده از پره‌های سوپرلر، گردابه‌هایی تولید می‌شود. علاوه بر چرخش جریان بر اثر سوپرلر دو گردابه بزرگ هم در محفظه ایجاد می‌شود که این دو گردابه هم باعث رقیق شدن محصولات احتراق با هوای ورودی از سوراخ خنک‌کاری می‌شود که با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که یکی از این گردابه‌ها دقیقاً کنار دیواره ایجاد می‌شود. به‌طور کلی پدیده فوق باعث کاهش دما و کاهش آلودگی می‌گردد.

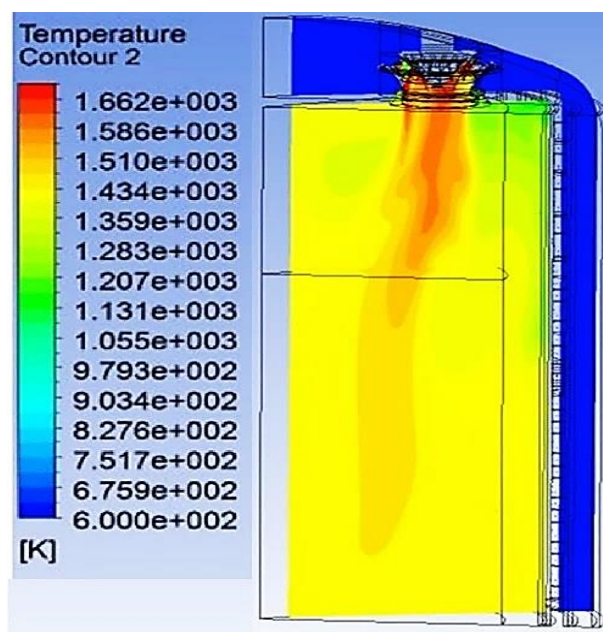
در شکل (۱۵) کانتور سرعت محوری مشاهده می‌شود که سرعت منفی به سمت خروجی محفظه احتراق و سرعت مثبت به سمت سوپرلر است. در مرز گردابه‌ها سرعت تغییر جهت داده که با توجه به کانتور سرعت محوری قابل تشخیص است.

در شکل (۱۶) کانتور دما روی پلان‌های عرضی مختلف محفظه احتراق مشاهده می‌شود. دما در اولین پلان نزدیک به سوپرلر در مرکز محفظه احتراق بالا بوده و بر اثر وجود دبی سوراخ خنک‌کاری در ابتدای محفظه کاهش دمای قابل ملاحظه‌ای در ابتدای دیوار محفظه احتراق دیده می‌شود. این کاهش دما به تدریج بر اثر گردابه‌های ایجاد شده در محفظه احتراق و همچنین سوراخ‌های خنک‌کاری اتفاق افتاده است. یکنواختی بیشتر دما باعث کاهش آلودگی NOx می‌شود. اثر تمامی موارد ذکر شده در بالا در کانتور NO رسم شده در خروجی محفظه احتراق دیده می‌شود (شکل (۱۷)).

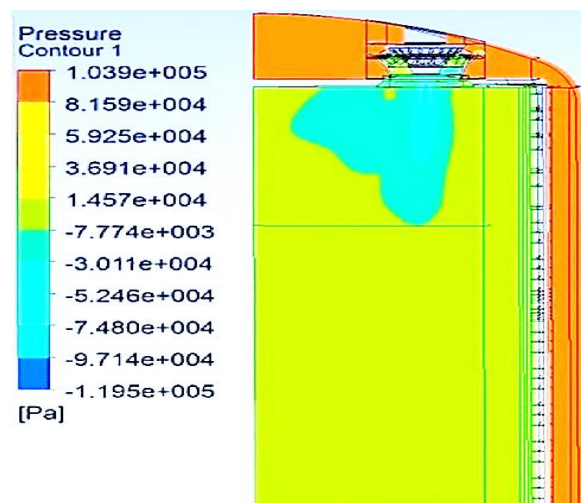
برای خنک‌کاری دیواره محفظه، سوراخ‌هایی که در آن هوای خنک با دمای برابر دمای خروجی کمپرسور جریان دارد، تعبیه شده است. تعداد این سوراخ‌ها ۱۴۷۶ است که به‌طور یکنواخت در ۳۶ ستون با ۴۱ ردیف قرار گرفته‌اند.

میزان دبی هوای عبوری از این سوراخ‌ها متفاوت است؛ زیرا ناحیه اشتعال بالای محفظه بوده و نیاز به فشار کمتر جهت دبی بیشتر هوای خنک‌کاری است. با توجه به میدان جریان مشاهده می‌شود لوپ جریانی در بالای محفظه نزدیک دیواره جهت کاهش

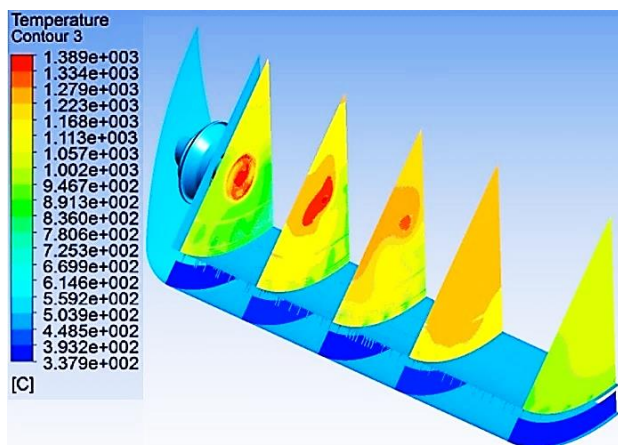
شکل (۱۱) و (۱۲) کانتورهای دما و فشار حاصل از حل عددی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های مذکور دریافت می‌شود که هندسه جریان به گونه‌ای است که احتراق در وسط محفظه احتراق تشکیل شده است ذکر این نکته نیز خالی از لطف نیست که احتراق نزدیک به سوپرلر بوده و باعث بالا رفتن دمای محدوده‌های ورودی محفظه‌ی احتراق و پره‌های سوپرلر شده است. با توجه به کانتور فشار مشخص است که فشار داخل محفظه کمتر از بیرون محفظه است که باعث جریان هوا از سوراخ‌های خنک‌کاری و سوپرلر می‌شود. در قسمت‌هایی که شکست جریان وجود دارد فشار منفی که باعث معکوس شدن جریان و به‌وجود آمدن گردابه‌ها می‌شود که این پدیده باعث نگه داشتن شعله می‌شود. نواحی فوق در شکل (۱۲) به رنگ آبی مشهود است که فشار منفی است.



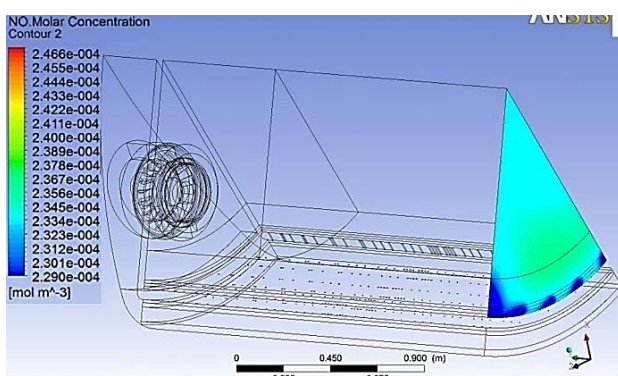
شکل ۱۱ کانتور دما روی پلان عبوری از مرکز محفظه احتراق



شکل ۱۲ کانتور فشار روی پلان عبوری از مرکز محفظه احتراق

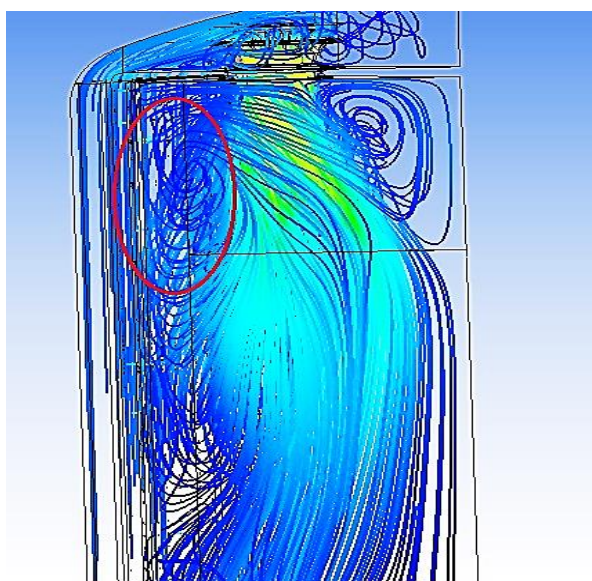


شکل ۱۶ کانتور دما روی پلان عرضی محفظه احتراق



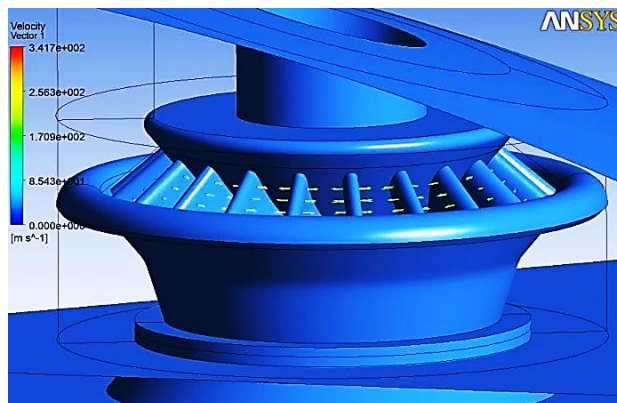
شکل ۱۷ پروفیل میزان NO در خروجی محفظه احتراق

در شکل (۱۹) کسر جرمی CO_2 نشان داده شده است. در این شکل نحوه خنک‌کاری دیواره به وسیله سوراخ‌های خنک‌کاری تعبیه‌شده روی دیواره قابل مشاهده است. نواحی که به رنگ سبز و آبی هستند بیانگر نحوه خنک‌کاری هستند و نواحی به رنگ قرمز حوزه اشتعال می‌باشد.

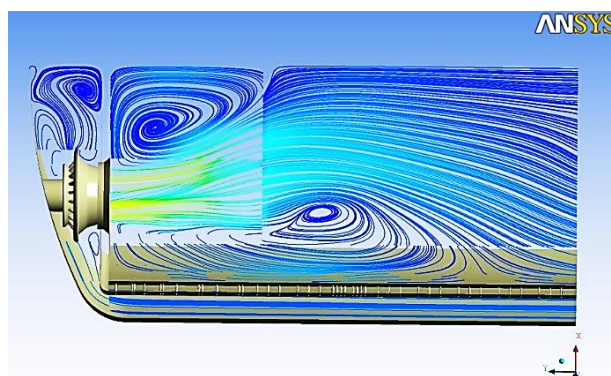


شکل ۱۷ خط جریان در محفظه احتراق توربین گاز

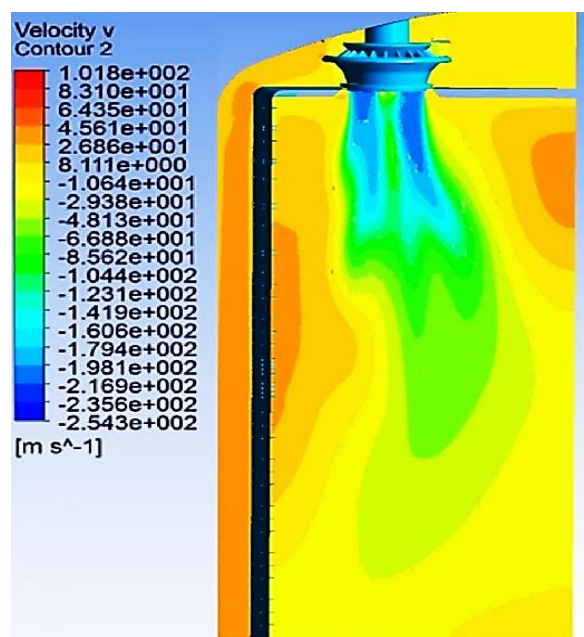
دمای دیواره ایجاد شده است، کاهش دما از آن جهت می‌باشد که لوپ جریان فشار را کاسته و در نتیجه باعث افزایش دبی هوا عبوری از سوراخ‌های خنک‌کاری می‌شود، این امر مهم با توجه به خط جریان رسم شده در شکل (۱۸) مشهود است.



شکل ۱۳ کانتور سرعت در خروجی سوراخ گاز برنر محفظه احتراق

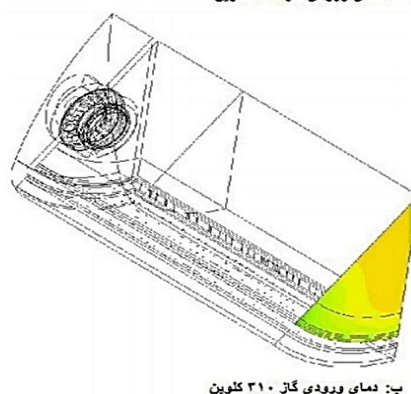
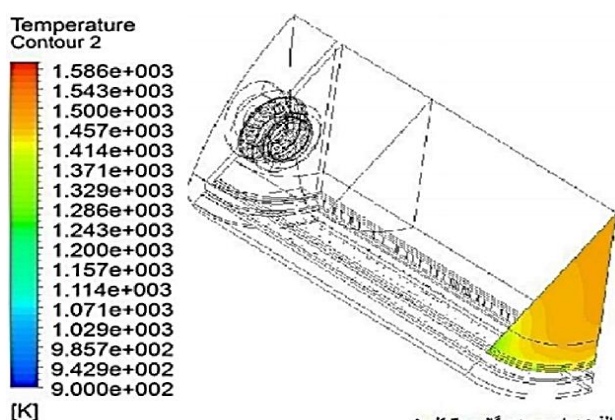


شکل ۱۴ خط جریان دو بعدی عبوری از مرکز محفظه احتراق

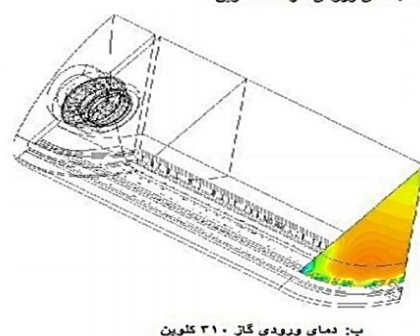
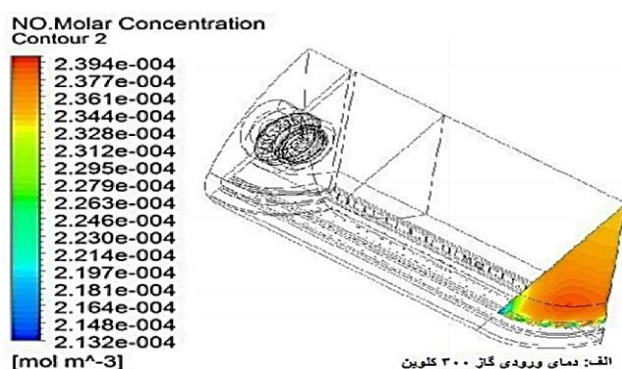


شکل ۱۵ کانتور سرعت محوری در امتداد طولی محفظه احتراق

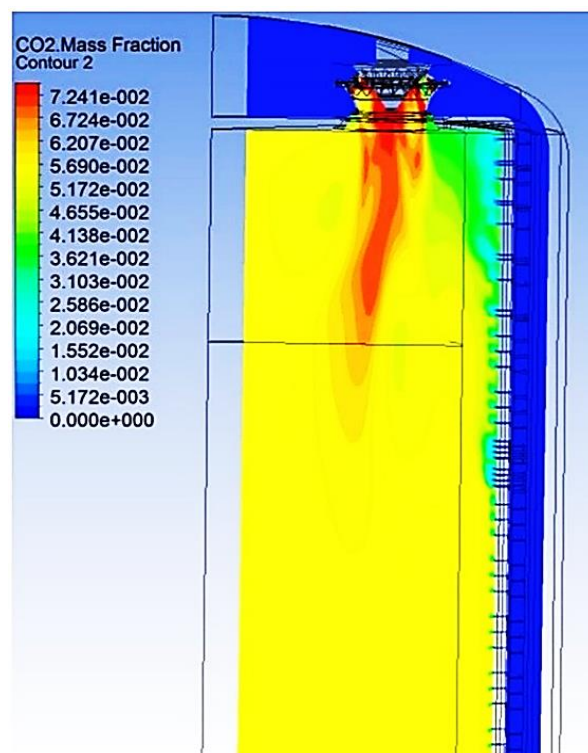
گاز افزایش یافته و باعث مخلوط شدن بهتر هوا و سوخت شده و در نتیجه آلودگی NO در خروجی محفظه احتراق کاهش می‌یابد (شکل‌های (۲۰) و (۲۱)).



شکل ۲۰ پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق بر حسب دو دمای مختلف ورودی سوخت گاز



شکل ۲۱ پروفیل میزان آلودگی NO محفظه احتراق بر حسب دو دمای مختلف ورودی سوخت گاز



شکل ۱۹ کانتور کسر جرمی CO_2 پلان عبوری از محفظه احتراق

با توجه به اینکه سه مدل احتراقی EDM، FRC و EDM/FRC برای این محفظه به کار برده شد، تنها مدلی که توانست احتراق را تشکیل دهد مدل EDM بوده و بقیه مدل‌ها میدان دمایی را بدست آوردند که هم‌دمای با هوای ورودی می‌باشند. بدین معنی که این مدل‌ها نتوانستند برای این شبیه‌سازی محفظه احتراق، احتراق را تشکیل دهند. سایر مدل‌ها به دلیل بالا بودن هزینه محاسبات و زمان امتحان نگردیدند. همچنین در این تحلیل برای جداسازی معادلات مومنتم از معادله درجه دوم استفاده شده است. به صورت مشابه و با حل‌های متوالی مشخص گردید که با افزایش فشار بالای ۱۲ بار شعله خاموش می‌شود.

آلودگی و یکنواختی پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق یکی از مهم‌ترین مبحث توربین‌های گازی است هرچه میزان یکنواختی پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق بیشتر باشد هم آلودگی کاهش می‌یابد و هم هرچه هوای خروجی محفظه احتراق یکنواخت‌تر باشد، لکه‌های داغ کاهش یافته و برای پره‌های توربین مناسب است و در نتیجه باعث افزایش طول عمر پره‌های توربین می‌شود. در این پروژه دمای ورودی گاز ۱۰ درجه افزایش یافت و با مقایسه پروفیل دمای خروجی و پروفیل میزان آلودگی NO در خروجی محفظه احتراق برای زمان قبل و بعد از افزایش دمای گاز مشخص گردید که با افزایش دمای گاز پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق یکنواخت‌تر می‌شود. این نتیجه از آن‌جایی حاکم می‌شود که با افزایش دمای گاز فشار گاز افزایش یافته و با ثابت ماندن سطح مقطع خروجی سوخت گاز، سرعت

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله محفظه احتراق یک توربین گاز V94.2 با استفاده از نرم‌افزار Ansys CFX مدل‌سازی شده است. با توجه به تقارن مشعل‌های محفظه احتراق و بالا بودن حجم محاسبات، یک هشتم این تجهیز مدل‌سازی گردید. نتایج استقلال از شبکه نشان داده است که پارامتر استقلال از شبکه که در اینجا دمای دود خروجی از محفظه احتراق می‌باشد، پس از ۳۳۰۰۰۰ شبکه تغییری ننموده است. بر این اساس تحلیل کامل محفظه احتراق با تعداد مش مذکور انجام گرفته است. متوسط دمای دود خروجی از محفظه احتراق با خطایی ۹ درصدی برابر ۱۱۵۰°C بدست آمده است. مدل اغتشاشی مورد استفاده در تحلیل این هندسه، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ می‌باشد. همچنین در این تحلیل از مدل تشعشی P-1 استفاده شده است. نتایج نشان داده است که:

- تنها مدل احتراقی که امکان تولید احتراق در مدل‌سازی را فراهم نموده است، مدل اتلاف گردابه‌ای eddy dissipation می‌باشد.
- بحرانی‌ترین نقاط از نظر افزایش دما سویلرها می‌باشند.
- برخورد عمودی جت گاز و هوا خروجی از سوراخ‌های سویلر باعث کاهش تنش‌های حرارتی و همچنین آلاینده‌ی NOx می‌شود.
- در فشارهای بالای ۱۲ Bar شعله در محفظه احتراق خاموش می‌شود.
- ایجاد یکنواختی بیشتر در مخلوط سوخت و هوا تأثیر به‌سزایی بر کاهش نقطه داغ دارد.
- یکنواختی بیشتر دما باعث کاهش آلودگی NOx می‌شود.
- با افزایش دمای گاز پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق یکنواخت‌تر شده و آلودگی NO کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

ϵ	افت انرژی
ϵ_v	انتشار طیفی
$\emptyset$	تابع فاز پخش ورودی
I	شدت تشعشع کل
I_b	شدت انتشار جسم سیاه
I_v	شدت تشعشی
k_a	ضریب جذب
k_s	ضریب پخش
L	مقیاس طول اغتشاش
μ	ویسکوزیته مولکولی (kg/m.s)

μ_t	ویسکوزیته توربولانسی (kg/m.s)
v	فرکانس
Ω	زاویه جامد
Ω'	زاویه فضائی
P	فشار متوسط استاتیک (kPa)
P_k	تولید اغتشاش بر اثر نیروهای ویسکوز
ρ	چگالی (kg/m ³)
S	طول مسیر
S_I	ترم تولید نرخ واکنش شیمیایی
ϕ	تابع حالت
T	دما (K)
σ	ثابت استفان بولتزمن (J/s.m.K)
σ_s	ضریب پخش
S_M	مجموع نیروهای جسمی
t	زمان (s)
u_i	مؤلفه‌های سرعت (kg/s)
γ_i	نسبت جرمی

۷- مراجع

- [1] N. Rasooli, S. Besharat Shafiei, and H. Khaledi, "Combination of 1D Code and CFD for Performance Analysis of a Silo Type Gas Turbine Combustor," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2010, vol. 43970, pp. 1015-1023, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2010-23319>.
- [2] D. B. Kulshreshtha, S. Channiwala, and S. B. Dikshit, "Numerical simulation as design optimization tool for gas turbine combustion chambers," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2010, vol. 43970, pp. 737-746, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2010-22889>.
- [3] A. A. Hosseini, M. Ghodrat, M. Moghiman, and S. H. Pourhoseini, "Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a Methane-Air Diffusion Flame on its combustion characteristics," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 18, p. 100610, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100610>.
- [4] H. Azadi, M. Zia Bashar Hagh, and R. Ebrahimi, "Numerical simulation of combustion chamber of V94.2 gas turbine," Master Thesis, Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, 2010.
- [5] H. Watanabe and Y. Suwa, "Numerical investigation of spray combustion in jet mixing type combustor for low NOx emission," *Energy conversion and management*, vol. 49, no. 6, pp. 1530-1537, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.12.002>.

- p. 105345, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105345>.
- [15] M. Ghamari, M.A. Zamani, M.H. Saidi, "Investigation of accuracy and precision of $k-\omega$ and $k-\epsilon$ turbulence models in the furnace with the flameless combustion mode," (in Persian), *Journal of Fuel and Combustion*, vol. 17, no. 3, pp. 1-18, 2024, doi: 10.22034/jfnc.2024.467667.1402.
- [16] J. J.D. Anderson, *Governing Equations of Fluid Dynamics*. Ansys Inc, 2022.
- [17] M. M. S. H. Arhami, "Numerical simulation of combustion with the aim of obtaining temperature distribution, identifying and eliminating power reduction factors of a gas turbine engine," *Journal of Aerospace Science and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 97-109, 2022, doi: <https://doi.org/10.22034/jast.2022.302883.1097>.
- [18] J. Wei, M. Ye, S. Zhang, J. Qin, and O. J. Haidn, "Modeling of a 7-elements GOX/GCH₄ combustion chamber using RANS with Eddy-Dissipation Concept model," *Aerospace Science and Technology*, vol. 99, p. 105762, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105762>.
- [19] H. Arjmandi, R. Amini, A. Ghaffari, H. Rahmani, and A. Chamkha, "Effects of baffles and vortex generators on cooling performance of a gas turbine combustion chamber: Numerical assessment," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4467-4478, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.005>.
- [20] D. Chen, S. Serbin, and K. Burunsuz, "Features of a gas turbine combustion chamber in operation with gaseous ammonia," *Fuel*, vol. 372, p. 132149, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132149>.
- [21] M. Sheikholeslami *et al.*, "Simulation of turbulent flow of nanofluid due to existence of new effective turbulator involving entropy generation," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 291, p. 111283, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111283>.
- [22] H. I. Kassem, K. M. Saqr, H. S. Aly, M. M. Sies, and M. A. Wahid, "Implementation of the eddy dissipation model of turbulent non-premixed combustion in OpenFOAM," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 3, pp. 363-367, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.12.012>.
- [23] A. Agarwal, O. Molwane, and I. Pitso, "Analytical investigation of the influence of natural gas leakage & safety zone in a pipeline flow," *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 547-552, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.335>.
- [6] M. M. Hatami, M. Moghiman, "Comparison of combustion results of two fuels: natural gas and diesel in a high-flow rotary kiln," presented at the 19th Annual Iranian Mechanical Engineering Conference, University of Birjand, 2011-05-10, 2011. [Online]. Available: <https://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1023269.pdf>.
- [7] A. Adamou, J. Turner, A. Costall, A. Jones, and C. Copeland, "Design, simulation, and validation of additively manufactured high-temperature combustion chambers for micro gas turbines," *Energy Conversion and Management*, vol. 248, p. 114805, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114805>.
- [8] J. Che, J. Du, Y. Liu, L. Liu, A. Li, J. Jiang, P. Sun, "Numerical study of combustion flow field characteristics of industrial gas turbine under different fuel blending conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 251, p. 123573, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123573>.
- [9] X. Zhang, Y. Wu, W. Zhang, Q. Wang, and A. Wang, "System Performance and Pollutant Emissions of Micro Gas Turbine Combined Cycle in Variable Fuel Type Cases," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 9113, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15239113>.
- [10] Y. Yang, A. Liu, X. Wang, L. Xi, and W. Zeng, "Influence of structure on the combustion characteristics of a small aero-gas turbine engine combustor," *Fuel*, vol. 321, p. 124018, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124018>.
- [11] Sh. Garshasbi, and A. M. Tahsini, "Pressure Effects on Combustion Chamber Performance of the Turbine Engines," *Journal of Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 53, no. 2, pp. 165-174, 2023, doi: 10.22034/jmeut.2023.54724.3223.
- [12] M. Ilbas, "The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modelling," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 10, pp. 1113-1126, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.009>.
- [13] L. Cong, Z. Shi, D. Liang, Q. Fan, L. Yimin, and Z. Zhongning, "Numerical simulation of VAM assisted combustion gas turbine," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 104858, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104858>.
- [14] C.-j. Wang, H.-y. Tao, P.-y. Xu, and Y.-d. Sha, "Numerical study on flow and heat transfer of combustion chamber and turbine under thermal shock test," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 63,

- (IJE), *TRANSACTIONS B: Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 781-793, 2015.
- [28] S. A. H. Mohammad Bagher Karimi Shavaki, "Analysis of Energy and Exergy and Modeling of Thermal Water Desalination Coupled with Combined Cycle and Solar Power Plant in Hot and Humid Regions," *AUT Journal of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 299-314, 2024, doi: 10.22060/ajme.2024.23230.6117.
- [29] M. Ameri, P. Ahmadi, and S. Khanmohammadi, "Exergy analysis of a 420 MW combined cycle power plant," *International journal of energy research*, vol. 32, no. 2, pp. 175-183, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1351>.
- [24] Ansys CFX-Pre User's Guide - CFD EXPERTS.
- [25] S. Nikbakht Naserabad, A. Mehrpanahi, K. Mobini, and M. R. Aligoodarz, "Exergy-energy analysis of full repowering of a steam power plant," *Frontiers in Energy*, vol. 6, pp. 54-67, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s11708-014-0342-6>.
- [26] S. N. Naserabad, A. Mehrpanahi, and G. Ahmadi, "Multi-objective optimization of HRSG configurations on the steam power plant repowering specifications," *Energy*, vol. 159, pp. 277-293, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.130>.
- [27] S. Nikbakht Naserabad, A. Mehrpanahi, K. Mobini, and M. R. Aligoodarz, "Technical Analysis of Conversion of A Steam Power Plant to Combined Cycle, Using Two Types of Heavy Duty Gas Turbines," *International Journal of Engineering*

بهینه سازی انرژی جنبشی توربالانسی در مخازن همزن دار با استفاده از پروانه های اصلاح شده جریان محوری: مطالعه عددی

چکیده: در این تحقیق، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، تأثیر پروانه های اصلاح شده جریان محوری (PBT) بر توزیع انرژی جنبشی توربالانسی و توان مصرفی در مخازن همزن دار بررسی شد. برای شبیه سازی جریان دو فاز جامد-مایع از مدل اولرین-اولرین (E-E) و برای تحلیل جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردید. به منظور شبیه سازی ناحیه چرخشی پروانه از روش چارچوب مرجع چندگانه (MRF) استفاده گردید. در این پژوهش، ابتدا توزیع فشار اطراف تیغه ها و سپس توزیع انرژی جنبشی آشفتگی و یکنواختی آن بررسی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که اصلاح تیغه ها با کاهش انرژی جنبشی توربالانسی و بهبود در یکنواختی توزیع آن می تواند توان مصرفی را کاهش دهد. به طور مشخص اصلاح تیغه ها در جهت عرضی باعث افزایش ۷۱٪ یکنواختی آشفتگی و کاهش ۱۰٪ توان مصرفی و اصلاح در جهت طولی باعث افزایش ۶۸٪ یکنواختی و کاهش ۲۲٪ توان مصرفی می شود.

واژه های راهنما: مخزن همزن دار، پروانه های اصلاح شده، انرژی جنبشی توربالانسی، توان مصرفی، دینامیک سیالات محاسباتی

راضیه صفا*

دکتری مهندسی شیمی،
مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه
مهندسی مکانیک، گروه شرکت های
ایپکو، کرمان/
استاد مدعو، دانشکده مهندسی
شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان،
کرمان

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

Raziyeh Safa*
PhD. of Chemical
Engineering, Department of
Mechanical Engineering
Research and
Technological
Development, IBKO Group
of Companies, Kerman/
Lecture, Department of
Chemical Engineering,
Shahid Bahonar University
of Kerman, Kerman

Optimizing turbulent kinetic energy in agitated tanks using modified axial flow impellers: A numerical study

Abstract: In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) was employed to investigate the impact of modified pitched blade turbines (PBT) on turbulent kinetic energy distribution and power consumption in agitated tanks. The solid-liquid two-phase flow was simulated using the Eulerian-Eulerian (E-E) approach combined with the Multiple Reference Frame (MRF) method, while the standard $k-\epsilon$ turbulence model was applied to capture the turbulent flow characteristics. The pressure distribution around the impeller blades was first analyzed, followed by an evaluation of turbulent kinetic energy distribution and mixing homogeneity. The simulation results demonstrated that modifying the blade geometry can significantly reduce turbulent kinetic energy and lower power consumption. Specifically, transverse blade modifications improved turbulence uniformity by 71% and reduced power consumption by 10%, while longitudinal modifications enhanced turbulence uniformity by 68% and achieved a 22% reduction in power consumption.

Keywords: Agitated tank, Modified impellers, Turbulent kinetic energy, Power consumption, Computational Fluid Dynamics

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهای مهم در صنایع مهندسی و معدنی، جداسازی جامد از مایع است که به دلیل کاربرد فراوان، این فرایند توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. مخازن همزن دار یکی از ابزارهایی هستند که این فرآیند در آنها انجام می شود. انرژی جنبشی توربالانسی^۱ (TKE) در فرآیند همزنی و اختلاط نقش کلیدی دارد و بر جنبه های مختلف همزنی تأثیر می گذارد. مقدار انرژی جنبشی توربالانسی به ازای واحد جرم سیال، مستقیماً بر میزان اختلاط و پراکندگی مواد تأثیرگذار است. برای دستیابی به بهترین نتیجه، توزیع یکنواخت انرژی جنبشی توربالانسی در مخزن لازم است. اما عواملی مانند نوع پروانه، ساختار مخزن و موقعیت بفل ها می توانند باعث شکل گیری نواحی با انرژی جنبشی توربالانسی بالا و نواحی ساکن با انرژی جنبشی توربالانسی پایین شوند که این امر مانع از اختلاط بهینه می شود. اگر مقدار انرژی جنبشی توربالانسی بسیار بالا باشد، ناآرامی شدید بین سیال و تجهیزات درون مخزن به وجود می آید که باعث فرسایش و خرابی احتمالی تجهیزات می شود. از این رو، بهینه سازی شدت آشفتگی برای بهبود فرآیند اختلاط و کاهش مصرف انرژی ضروری است. استفاده از پروانه های جدید با طراحی بهینه می تواند به کاهش شدت آشفتگی و بهبود یکنواختی آن، کمک کند. در ادامه، به بررسی یافته های پژوهشی در این زمینه پرداخته شده است.

لی و همکاران [۱]، نشان دادند که پروانه های فراکتال به دلیل طراحی منحصر به فرد خود باعث ایجاد الگوهای پیچیده تر جریان و توزیع یکنواخت تر انرژی جنبشی در داخل مخازن همزن دار می شوند. این نوع پروانه ها توانایی بالایی در افزایش راندمان اختلاط دارند، زیرا باعث کاهش نقاطی با آشفتگی بیش از حد یا بسیار کم در محیط سیال می شوند. در نتیجه، اتلاف انرژی کاهش و بهره وری کلی فرایند، افزایش می یابد. استفاده از این نوع پروانه ها نه تنها می تواند باعث کاهش مصرف انرژی در سیستم های صنعتی شود، بلکه همچنین عمر تجهیزات را به دلیل کاهش تنش های مکانیکی ناشی از جریان های توربالانسی بالا افزایش می دهد. همچنین گو و همکاران نیز [۲،۳] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ رفتار مخلوط های جامد-مایع را در حضور پروانه های فراکتال مطالعه کردند. آنها پارامترهایی نظیر

سرعت چرخش و اندازه ذرات را جهت سنجش بهبود اختلاط بررسی کردند و نشان دادند که پروانه های فراکتال قادر به افزایش کارایی اختلاط و کاهش مصرف انرژی در مخازن همزن دار هستند.

ژانگ و همکاران [۴] عملکرد سه نوع پروانه شامل پروانه پیچ بلید پانچ شده^۳، پیچ بلید تیغه برش بیونیک^۴ و پیچ بلید پانچ شده برش بیونیک^۵ را بر عملکرد اختلاط مواد جامد و مایع، به ویژه در مخلوط های شامل تغییر فاز^۶ با کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که این پروانه ها منجر به بهبود اختلاط ذرات جامد، کاهش زمان اختلاط و کاهش مصرف انرژی در مقایسه با پروانه های سنتی می شوند. همچنین استفاده از این پروانه ها در سرعت های بالای همزنی و در سیالات با ویسکوزیته بالا، نتایج بهتری را ارائه می دهد، که نشان دهنده توانایی بالای این پروانه ها برای فرآیندهای اختلاط در مقیاس بزرگ، به ویژه در کاربردهای تغییر فاز است. سریگو و همکاران [۵]، جریان آشفتگی و گردابه های ایجاد شده توسط پروانه های جدید با تیغه های شیاردار (U و V شکل) در یک مخزن همزن دار را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، محققین با استفاده از شبیه سازی گردابه های جداشونده^۷ و آزمایش های تجربی با تکنیک پایش تصویر ذرات^۸ نشان دادند که پروانه های شیار دار با شکل های U و V، به طور موثری انرژی جنبشی توربالانسی را در مقایسه با پروانه های معمولی کاهش می دهند. همچنین باعث کاهش مصرف انرژی (۴ تا ۶ درصد) و بهبود کارایی در محدوده عدد رینولدز مشخص، نسبت به پروانه های معمولی می شوند.

استلماچ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۲ به بررسی کارایی پروانه های پلیمری نوع جریان محوری با مقاطع عرضی متفاوت پرداختند. این تحقیق تأثیر هندسه تیغه ها بر توزیع سرعت و انرژی اختلاط در یک مخزن همزن دار را با استفاده از تکنیک های پایش تصویر ذرات بررسی کرده است. نتایج نشان می دهد که پروانه ها با تیغه های متقارن، انرژی کمتری برای اختلاط نیاز دارند و این میزان تا ۲۰٪ کمتر از پروانه استاندارد جریان محوری است. این موضوع نشان می دهد که با استفاده از پروفیل های مناسب تیغه ها می توان به بهبود کارایی در فرایند اختلاط دست یافت و از مصرف انرژی کاست. لی و همکاران [۷]، با استفاده از روش های المان گسسته^۹ و VOF^{۱۰} به شبیه سازی رفتار

^۶ Phase Change Material (PCM)^۷ Detached Eddy Simulation (DES)^۸ Particle Image Velocimetry (PIV)^۹ Discrete Element Method (DEM)^{۱۰} Volume of Fluid (VOF)^۱ Turbulent Kinetic Energy (TKE)^۲ Computational Fluid Dynamics (CFD)^۳ Pitched-Blade Punched Turbine (PBPT)^۴ Bionic Cut Blade Turbine (BCBT)^۵ Bionic Cut punched Blade Turbine (BCBT)

دارای سوراخ‌های فرکتالی باعث کاهش مصرف انرژی نسبت به پره‌های سنتی در سرعت‌های همزنی برابر می‌شود. همچنین، آنها بیان کردند که افزایش تعداد تکرارهای آرایش فرکتالی موجب افزایش مصرف انرژی و توان مصرفی می‌شود، اما همچنان این افزایش از نمونه‌های مرسوم و سنتی کمتر است. این طراحی نوین باعث افزایش شدت آشفته‌گی، تقویت اثر برش در سیال، کاهش ابعاد گردابه‌های پشت پره‌ها و بهبود گردش محوری ذرات جامد شده که در نهایت کیفیت تعلیق ذرات جامد را نسبت به پره‌های تیغه‌ای زاویه‌دار بهبود می‌بخشد. در مطالعه دیگری توسط گو و همکاران [۱۱]، پره‌های با برش‌های فرکتال دارای الگوی H بر روی همزن مخزن مایع-جامد متراکم پیاده‌سازی و به صورت تجربی و عددی با پره‌های سنتی جریان محوری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که پره‌های فرکتال نسبت به پره‌های سنتی در سرعت همزن برابر، مصرف توان و عدد توان کمتری دارند و افزایش تعداد تکرارهای فرکتالی بر روی پره‌ها به کاهش بیشتر این مقادیر کمک می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، انرژی جنبشی توربالانسی نقشی کلیدی در فرایند اختلاط ایفا می‌کند و نوسانات زیاد یا کم این انرژی می‌تواند مشکلات جدی برای فرایند ایجاد کند. تاکنون تأثیر پارامترهای هیدرودینامیکی مختلف مانند نرخ اتلاف انرژی، انرژی جنبشی آشفته و سرعت جریان بر اختلاط، توسط محققان بسیاری بررسی شده است. با این حال، تحقیقات کمی به بررسی تأثیر اصلاحات در طراحی پروانه بر عملکرد مخزن‌های اختلاط، انرژی جنبشی توربالانسی و میزان توان مصرفی پرداخته‌اند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر اصلاحات در پروانه جریان محوری بر عملکرد مخزن اختلاط انجام شده است.

۲- توصیف سیستم

در این پژوهش از یک ظرف همزن‌دار که توسط مرکز پژوهش و توسعه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های ایپکو طراحی شده است، استفاده شده است. این ظرف دارای شکل استوانه‌ای استاندارد با کف عدسی شکل و قطر $T=1300$ mm است. پروانه‌ای که برای هم‌زدن سیال به کار برده شده است، یک پروانه جریان محوری چهار پره است که زاویه حمله منفی ۴۵ درجه دارد. قطر پروانه برابر با $D=T/3$ و فاصله آن از کف مخزن معادل $C=T/3$ است. به منظور جلوگیری از چرخش مماسی سیال و ایجاد جریان محوری در مخزن، از چهار بفل با عرض $T/12$

هیدرودینامیکی و مشخصات اختلاط در تانک‌های همزن‌دار دارای سطح آزاد پرداختند. هدف این پژوهش، بهبود کارایی فرآیند اختلاط از طریق تغییر در طراحی پره‌های پروانه جریان محوری بوده است. آنها با ایجاد تغییراتی مانند افزودن شیارها یا قطعاتی به پره‌های پروانه جریان محوری، انواع مختلفی از پروانه‌های اصلاح‌شده را به دست آوردند. آنها عنوان کردند که تغییر در طراحی پروانه‌های جریان محوری می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در فرایندهای صنعتی منجر شود.

گونزالس-نریا و همکاران [۸] با استفاده از تکنیک تصویربرداری PIV و روش شبیه‌سازی مقیاس بزرگ^۱، به تحلیل رفتار جریان و اختلاط در سیستم‌های همزن‌دار با هدف اصلی، درک بهتر نحوه ایجاد جریان‌های آشفته و اختلاط در سیستم‌های همزن‌دار با تیغه‌های خاص که می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی این تجهیزات کمک کند، پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تیغه‌ها با شیار V شکل، تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و فرآیند اختلاط دارند و با علم بر این موضوع، می‌توان به بهبود عملکرد و کارایی همزن‌ها کمک کرد. آنها همچنین گزارش کردند که همزن با تیغه V شکل، نیروی شعاعی کمتری نسبت به یک همزن با تیغه تخت معمولی ایجاد می‌کند، که ناشی از ایجاد گردابه توسط همزن با تیغه V شکل در نزدیکی نوک همزن است.

لی و همکاران [۹]، جریان چندفازی جامد-مایع در تانک مجهز به همزن با طراحی نوین پره‌های Intermig را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. صحت نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های مدل آبی تأیید گردید و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد. مقایسه دقیق عملکرد اختلاط و تعلیق جامد در نمونه‌های مختلف همزن Intermig نشان داد که نسخه بهبود یافته این همزن، علاوه بر افزایش کیفیت اختلاط و تعلیق ذرات جامد، بیش از ۲۰٪ مصرف انرژی را نسبت به نمونه استاندارد کاهش می‌دهد. همچنین، تأثیر پره‌های داخلی بر مصرف توان ناچیز بوده و زاویه بهینه آنها ۴۵ درجه است، در حالی که پره‌های خارجی نقش مهمی در مصرف توان دارند و زاویه بهینه آنها نیز ۴۵ درجه تعیین گردید.

گو و همکاران [۱۰] با استفاده از طراحی جدیدی از پروانه‌ها که شامل آرایش فرکتالی با سوراخ‌های مشبک است به بررسی ویژگی‌های اختلاط جریان دو فاز جامد-مایع در مخزن‌های همزن‌دار پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از پره‌ها

¹ Large Eddy Simulation (LES)

۲-۱- معادلات حاکم و شرط مرزی

برای ساده‌سازی محاسبات، سیال تراکم‌ناپذیر و ذرات جامد، به شکل کروی و با اندازه یکسان در نظر گرفته شدند. همچنین جریان به صورت هم‌دما و به صورت دو فاز مایع-جامد مدل‌سازی شد. معادلات پیوستگی برای هر دو فاز (معادلات (۱) و (۲)) و معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) به‌طور هم‌زمان و به صورت جداگانه حل شدند [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\beta \rho_\beta) + \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) + \bar{U}_\alpha \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = \bar{F}_\alpha \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) + \bar{U}_\beta \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) = \bar{F}_\beta \quad (4)$$

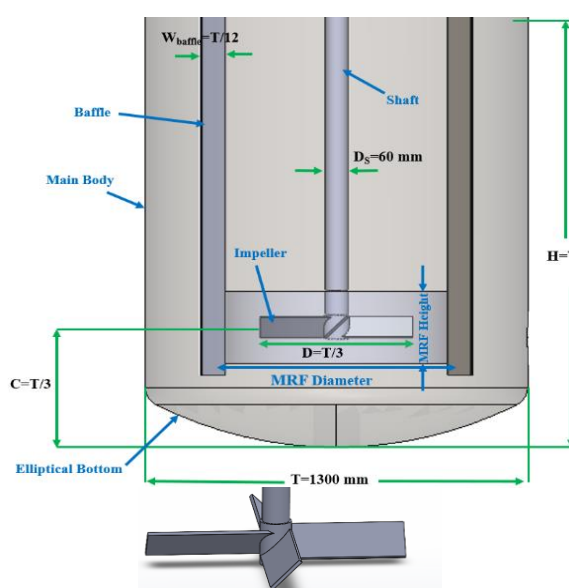
در معادلات فوق، زیرنویس‌های α و β به ترتیب نشان‌دهنده فازهای پیوسته و پراکنده است. r کسر حجمی، ρ چگالی و U سرعت متوسط است و به‌طور واضح، $r_\alpha + r_\beta = 1$ می‌باشد. نیروهای وارد بر فازهای مایع (F_α) و جامد (F_β) که در معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) معرفی شده‌اند، شامل گرادیان فشار، نیروی گرانش و نیروی مومنتوم بین فاز می‌باشند که در ادامه در معادلات (۵) و (۶) تعریف شده‌اند.

$$\begin{aligned} \bar{F}_\alpha = & \nabla \cdot (r_\alpha (\mu_\alpha + \mu_t) (\nabla \bar{U}_\alpha + (\nabla \bar{U}_\alpha)^T)) \\ & - r_\alpha \nabla P + r_\alpha \rho_\alpha \bar{g} + \bar{M}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

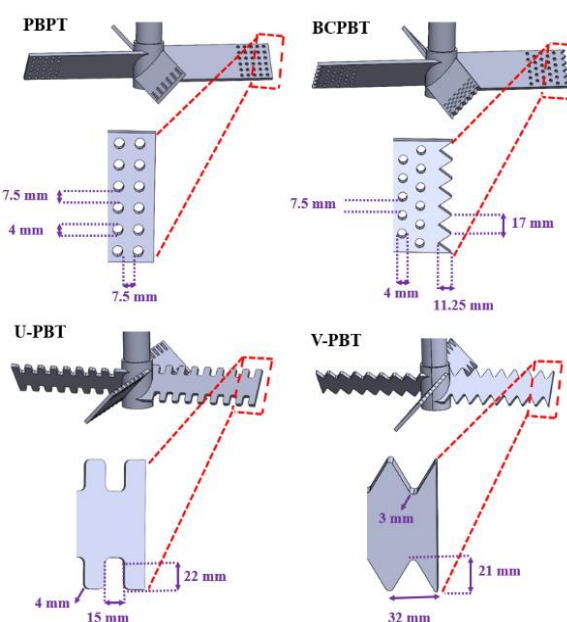
$$\begin{aligned} \bar{F}_\beta = & \nabla \cdot (r_\beta \mu_\beta (\nabla \bar{U}_\beta + (\nabla \bar{U}_\beta)^T)) \\ & - r_\beta \nabla P + r_\beta \rho_\beta \bar{g} + \bar{M}_{\beta\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

پارامترهای g شتاب گرانش، μ ویسکوزیته و P فشار (با فرض میدان فشار یکسان برای هر دو فاز) در معادلات فوق لحاظ شده‌اند. همچنین، نیروی مومنتوم بین فاز با نماد M در نظر گرفته شده است. در مدل مرجع چرخان، نیروی گریز از مرکز به عنوان نیروی حجمی در معادلات فوق گنجانده می‌شود. از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ همگن (معادلات (۷) و (۸)) برای شبیه‌سازی جریان نا آرام استفاده شده است که نتایج مناسبی را در این زمینه ارائه می‌دهد. همچنین ترم S و μ_t در معادلات (۷) و (۸) نیز در ادامه در معادلات (۹) تا (۱۱) معرفی شده‌اند.

استفاده شده است. سرعت چرخش پروانه $N=150$ rpm لحاظ شده است، که معادل با سرعت $U_{tip} = \pi DN = 4.5$ m/s در نوک پروانه است. دوغاب داخل مخزن، مخلوطی از آب با چگالی 1000 kg/m^3 است و ذرات جامد با چگالی برابر با 2500 kg/m^3 است. اندازه متوسط ذرات جامد $106 \mu\text{m}$ و درصد حجمی این ذرات تقریباً ۱۸٪ می‌باشد. سایر مشخصات هندسی این تجهیز نیز در شکل (۱) آورده شده است. همچنین در شکل (۲) شماتیک پروانه‌های اصلاح‌شده PBT به همراه دیگر مشخصات ساختاری آنها نمایش داده شده است. پروانه‌های U-PBT و V-PBT به لحاظ طولی اصلاح شده‌اند، در حالی که پروانه‌های PBT و BCPBT تغییرات عرضی داشته‌اند.



شکل ۱ شماتیک مخزن همزن‌دار به همراه پروانه PBT



شکل ۲ شماتیک پره‌های اصلاح‌شده PBT

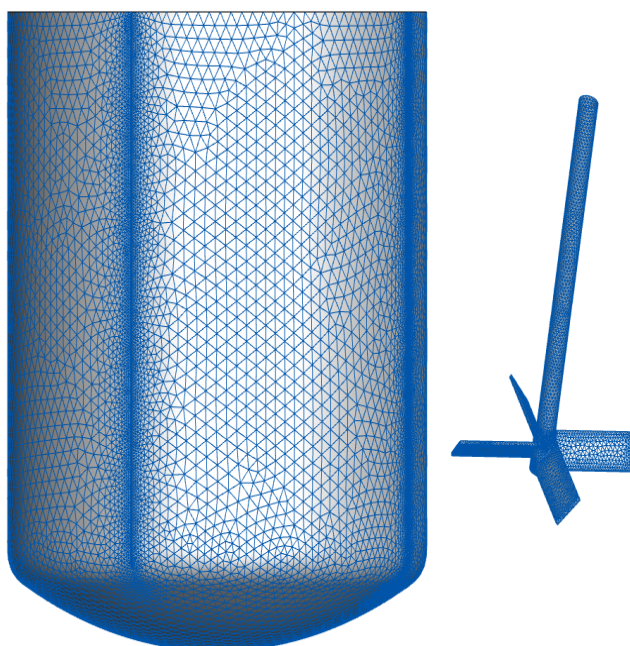
در مخزن دو فازی جامد-مایع موجود، برای ناحیه MRF، شرط مرزی Frame Motion، برای دیوار مخزن و پروانه از شرط مرزی دیوار، برای شفت، از شرط مرزی دیوار متحرک و چرخان استفاده شده است.

۳- روش حل عددی

در این مطالعه، به منظور مدل سازی جریان دو فازی مایع-جامد که درصد حجمی ذرات جامد بالا است، از نرم افزار فلوئنت و روش شبیه سازی عددی E-E استفاده شد [۱۳، ۱۴]. شبیه سازی به صورت غیر دائم و با گام زمانی ۰/۰۱ s انجام گرفت. از آنجا که سیال تراکم ناپذیر فرض شده است، از حل گر مبتنی بر فشار استفاده گردید و برای شبیه سازی چرخش پره ها از رویکرد MRF بهره گرفته شد.

به منظور در نظر گرفتن تعاملات بین فاز مایع و جامد، از ضریب درگ شیلر-نیومن استفاده شد. برای حل میدان های سرعت و فشار، از الگوریتم Simple استفاده گردید و معادله فشار با روش مرتبه دوم حل شد. معادلات مومنتوم، کسر حجمی، انرژی سینماتیکی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی با روش Upwind مرتبه اول حل گردیدند.

جهت بررسی همگرایی، مقدار باقی مانده ها برابر ۱۰^{-۵} انتخاب شد. همچنین برای ارزیابی تأثیر شبکه بندی بر نتایج، سه شبکه غیر سازمان یافته با اندازه های مختلف (درشت، متوسط و ریز) مورد استفاده قرار گرفت (شکل (۳)).



شکل ۳ شماتیکی از شبکه به همراه مش پروانه

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}k) + \nabla \cdot \left[r_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}k - r_{\alpha}\left(\mu_{\alpha} + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k \right] = r_{\alpha}S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}\varepsilon) + \nabla \cdot \left[r_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}\varepsilon - r_{\alpha}\left(\mu_{\alpha} + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla \varepsilon \right] = r_{\alpha}S_{\varepsilon} \quad (8)$$

$$S_k = \mu_t \nabla \vec{U}_{\alpha} (\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T) - \rho_{\alpha} \varepsilon \quad (9)$$

$$S_{\varepsilon} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \nabla \vec{U}_{\alpha} (\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T) - C_2 \rho_{\alpha} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho_{\alpha} C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

معادلات تلاطم، تنها برای فاز پیوسته (مایع) به کار رفته و برای ذرات در نظر گرفته نشده است. علیرغم اینکه هیچ شرط تبادل آشفتگی در نظر گرفته نشده است، برهمکنش بین فازها در حضور اغتشاش در عبارت نیروی پسا که شامل تأثیر اغتشاش جریان آزاد مایع بر روی ضریب درگ ذرات (C_D) است، در نظر گرفته می شود. برهمکنش های بین دو فاز مستقیماً فقط با شرط نیروی کشش بین فازی در معادلات مومنتوم، مدل سازی شده است (کوپلینگ دو طرفه):

$$\vec{M}_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta} (\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}) = \left[\frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} r_{\beta} \rho_{\alpha} |\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}| \right] (\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}) \quad (12)$$

$$\vec{M}_{\beta\alpha} = -\vec{M}_{\alpha\beta} \quad (13)$$

در اینجا $C_{\alpha\beta}$ ضریب درگ بین فازی، d_p قطر میانگین ذره و C_D ضریب درگ ذرات است. سایر ترم های مومنتوم بین فازی مانند، نیروی روانکاری، نیروی جرم مجازی و نیروی لیفت به طور کلی سهم کمی در هیدرودینامیک جامد-مایع دارند، به خصوص اگر نسبت چگالی ذره به مایع بیش از ۲ باشد و در این تحقیق، نادیده گرفته شده اند [۱۲].

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی حاضر به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل، از نتایج تجربی گویدا و همکاران [۱۵] و نتایج عددی وندرکار و همکاران [۱۶] استفاده شد. مشخصات هندسه مورد استفاده، در مرجع [۱۶] شرح داده شده است. در این اعتبارسنجی، درصد جرمی فاز ثانویه (ذرات جامد) ۲۰٪ و سرعت چرخش پروانه ۴۸۰ rpm در نظر گرفته شده است.

تغییرات غلظت محوری بدون بعدشده ذرات جامد در راستای طول مخزن (Y/H) و در موقعیت شعاعی نوک پروانه ($r/R=0.5$) با داده‌های تجربی گویدا و همکاران [۱۵] و نتایج عددی وندرکار و همکاران [۱۶] در شکل (۵) مقایسه گردید.

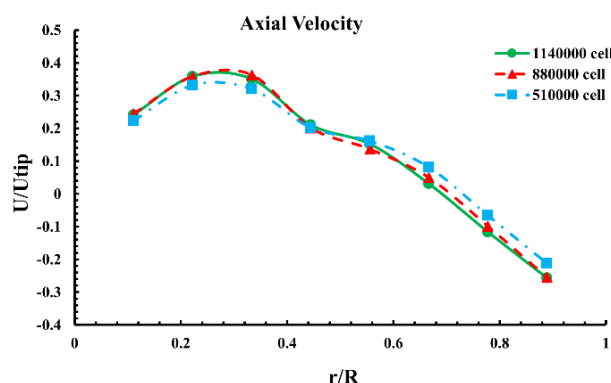
نتایج نشان می‌دهد که غلظت بدون بعدشده فاز ثانویه در بخش بالایی مخزن کمتر از ۱ و در قسمت پایینی بیشتر از ۱ است که بیانگر نشست ذرات جامد در کف مخزن و کاهش حضور آن‌ها در بالای مخزن می‌باشد. در میانه مخزن، غلظت بدون بعدشده تقریباً برابر با ۱ است که نشان‌دهنده همگنی کامل فاز ثانویه در این ناحیه است.

مقایسه غلظت‌های بدون بعدشده حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج گویدا و همکاران [۱۵] مطابقت بهتری نسبت به نتایج وندرکار و همکاران [۱۶] دارد. این اعتبارسنجی نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی انتخاب‌شده برای مخزن طراحی‌شده توسط مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های ایپکو، با دقت و اعتبار مناسبی، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۴-۲- تأثیر اصلاح پره‌ها بر توزیع فشار اطراف پروانه

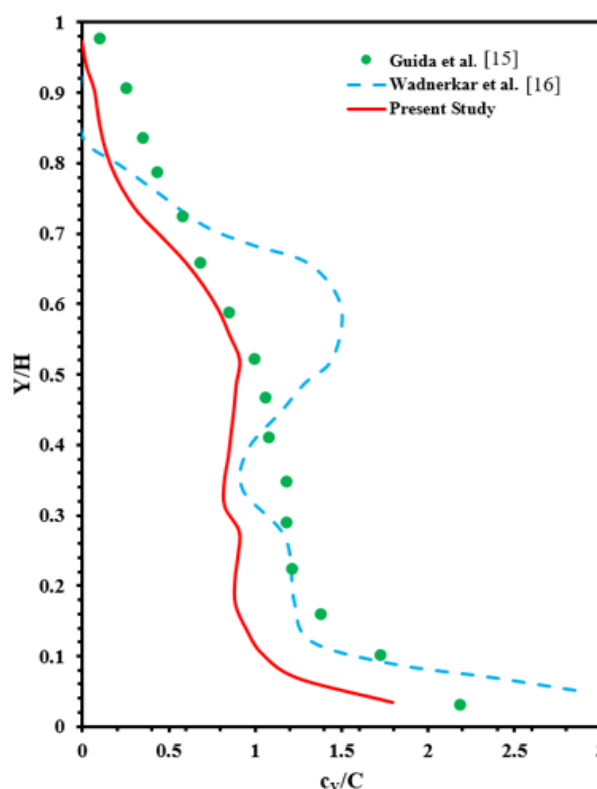
در سیستم‌های اختلاط، پارامتر فشار به عنوان نیرو محرکه اصلی عمل کرده و نقش مستقیمی در میزان مصرف انرژی الکتریکی مخازن همزن‌دار دارد. در شکل‌های (۶) و (۷) کانتور فشار در اطراف پروانه گزارش شده است. این گزارش در صفحه‌ای صورت گرفته است که از میان پره‌های پروانه عبور کرده است. نتایج حاکی از آن است که توزیع فشار در اطراف پره‌های پروانه وجود دارد و در سمت مکش پروانه، فشار منفی شکل می‌گیرد. بنابراین، برای جبران این اختلاف فشار و ایجاد اختلاط مؤثر در زمان چرخش پروانه، به انرژی ورودی نیاز است. در این میان، پروانه PBT نسبت به سایر پروانه‌ها اختلاف فشار بیشتری ایجاد می‌کند. اما پروانه‌های جدید طراحی‌شده قادر هستند این اختلاف فشار را کاهش‌دهنده و مانع از انسداد جریان شوند. علت این امر وجود جت‌های کوچکی در اطراف شکاف‌ها و روزنه‌های موجود بر روی پره‌های پروانه‌های جدید است، که منجر به ایجاد

در نهایت، تغییر پارامترهایی مانند گشتاور، توان مصرفی و کسر حجمی ذرات جامد در ناحیه چرخان تحلیل شد. در آخر، تأثیر اندازه شبکه بر روی مؤلفه سرعت محوری بدون بعد در راستای شعاع مخزن (شکل (۴)) بررسی و مشاهده گردید با ریزترشدن شبکه تغییر قابل توجهی در توزیع مؤلفه بدون بعد سرعت محوری سیال مشاهده نمی‌شود و تنها زمان محاسبات افزایش می‌یابد. در نتیجه، شبکه متوسط با ۸۸۰ هزار سلول برای ادامه شبیه‌سازی انتخاب گردید.

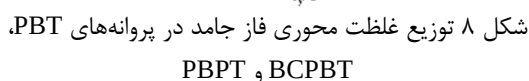


شکل ۴ بررسی استقلال از شبکه با مؤلفه سرعت محوری بدون بعد

۴-۱- اعتبارسنجی

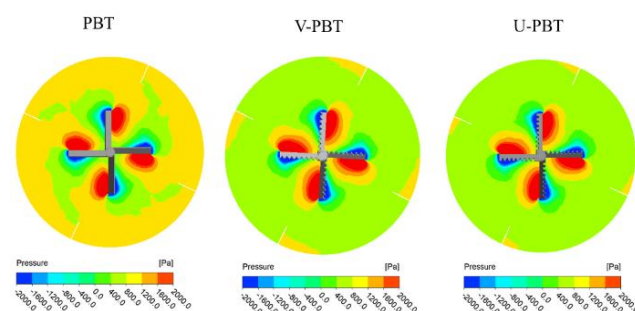


شکل ۵ مقایسه پروفایل غلظت محوری بدون بعد ذرات جامد در راستای محور مخزن با داده‌های تجربی [۱۵] و عددی [۱۶].



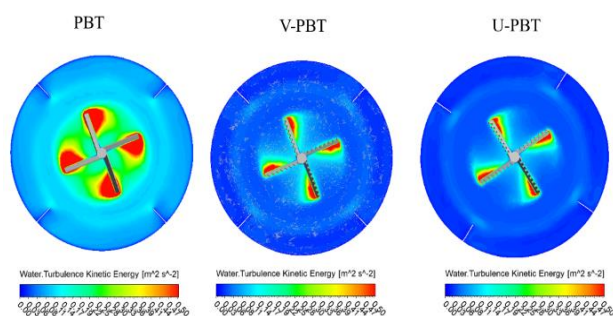
شکل ۹ توزیع غلظت محوری فاز جامد در پروانه‌های PBT، U-
PBT و V-PBT

شکل ۶ توزیع فشار در صفحه عبوری از میان پره پروانه‌های PBT، PBPT و BCPBT



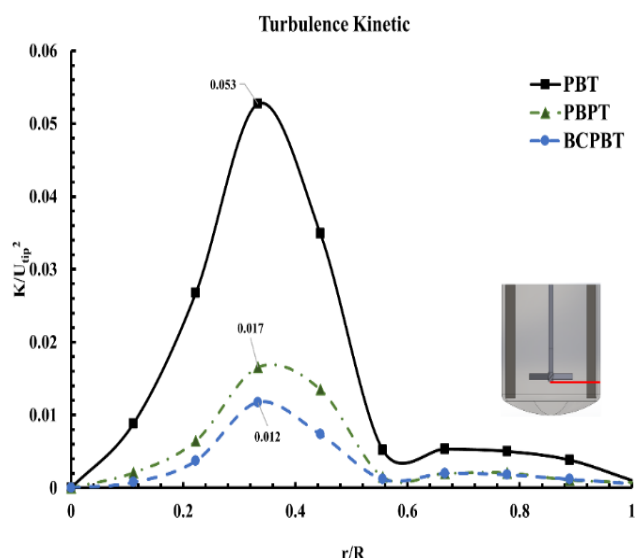
شکل ۷ توزیع فشار در صفحه عبوری از میان پره پروانه‌های PBT، U-PBT و V-PBT

کمی‌سازی توزیع فاز جامد، برای درک دقیق هیدرودینامیک مخازن همزن‌دار جامد-مایع ضروری است، زیرا کمی‌سازی درک دقیقی از شدت انتقال جرم دو فاز ارائه می‌کند و بیان می‌کند که نحوه توزیع و تماس سطح ذرات جامد با سیال به چه صورت است. بر این اساس در ادامه در شکل‌های (۸) و (۹) توزیع کسر حجمی ذرات جامد در راستای محور مخزن گزارش شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، تجمع و نشست ذرات در کف مخزن برای تمامی انواع پره‌ها غیر قابل اجتناب است ($Cy/C > 1$). نشست ذرات برای پروانه‌های اصلاح‌شده بیشتر از پروانه PBT است؛ این در حالی است که کیفیت اختلاط در راستای محور مخزن برای پروانه‌های اصلاح‌شده نسبت به پروانه PBT بهبود یافته است. در نزدیکی سطح مخزن نیز کاهش کیفیت اختلاط برای پروانه‌های طرح جدید قابل مشاهده است و ضخامت لایه مایع شفاف در سطح مخزن بزرگتر از پروانه PBT است.



شکل ۱۱ انرژی جنبشی آشفتگی پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT

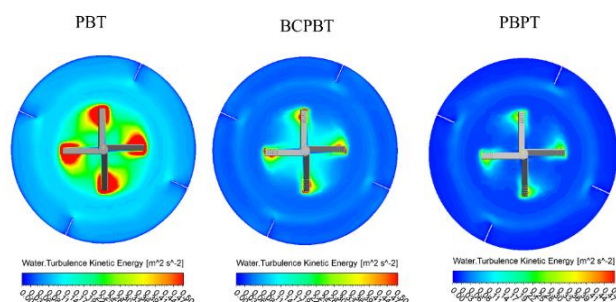
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع انرژی جنبشی توربالانسی را در پروانه‌های اصلاح‌شده در راستای شعاع مخزن، نشان می‌دهند. در تمام انواع پروانه‌ها (چه پروانه‌های اصلاح‌شده در نوک و چه پروانه‌های اصلاح‌شده در طول)، انرژی جنبشی توربالانسی در نزدیکی نوک تیغه پروانه بالاترین مقدار است. روند تغییر انرژی جنبشی در راستای شعاع مخزن بدین صورت است که از مرکز پروانه تا نوک پروانه، تغییرات انرژی جنبشی افزایشی است. بعد از محدوده پروانه، تغییرات انرژی جنبشی کاهش می‌یابد تا اینکه در دیواره مخزن به صفر می‌رسد. مقدار بیشینه این انرژی برای پروانه‌های طرح جدید خیلی کمتر از پروانه PBT است که نشان‌دهنده این موضوع است که گردابه‌های دنباله‌دار کوچک‌تر در پشت پره‌های طرح جدید، در فاصله کوتاه‌تری از بین می‌روند. کاهش مقدار انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه BCPBT نسبت به پروانه PBPT، ۲۹٪ و نسبت به PBT، ۷۱٪ است. این کاهش برای پروانه U-PBT نسبت به V-PBT، ۲۱٪ و نسبت به پروانه PBT، ۶۸٪ است.



شکل ۱۲ تغییرات انرژی جنبشی بدون بعد برای پروانه‌های PBT، PBPT و BCPBT در راستای شعاع مخزن

۴-۴- انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه‌های اصلاح‌شده

در این بخش، ویژگی شدت توربالانسی (گردابه‌های دنباله‌دار) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کانتور گردابه‌های دنباله‌دار را در پشت پره‌های مختلف نشان می‌دهد. دنباله‌هایی که در پشت پره پروانه‌ها ایجاد می‌شود، باعث می‌شود که بخش زیادی از انرژی پروانه در اثر این اغتشاش و تولید گردابه، مصرف شود. فقط بخش کوچکی از انرژی می‌تواند به میدان جریان، برای فرآیند تعلیق ذرات جامد منتقل شود. مطابق شکل (۱۰) مشخص است که اغتشاش و گردابه دنباله‌دار که باعث مصرف انرژی و برق می‌شوند، برای پروانه PBT دارای شدت و بزرگی بیشتری است. اما در طرح پروانه PBPT و BCPBT این شدت و اغتشاش به طور قابل توجهی تغییر کرده و گردابه دنباله‌دار مشاهده شده در پشت پره‌ها، با گردابه‌های ضعیف‌تر جایگزین شده‌اند.



شکل ۱۰ کانتور انرژی جنبشی آشفتگی پروانه‌های PBT، BCPBT و PBPT

همان‌گونه که از شکل (۱۰) مشخص است پروانه PBPT فقط دارای سوراخ‌هایی در نوک است، نسبت به پروانه BCPBT که علاوه بر سوراخ‌های موجود در نوک پروانه، دارای شکاف نیز در نوک پروانه می‌باشد، مثبت‌تر در زمینه کاهش اغتشاشات توربالانسی عمل کرده است.

انرژی جنبشی توربالانسی برای پروانه‌های U-PBT و V-PBT در شکل (۱۱) رسم شده است. در مورد پروانه U-PBT و V-PBT به دلیل حضور شکاف‌های U و V شکل در کل طول پره، اغتشاش و گردابه دنباله‌دار در کل طول پره کشیده شده است و از بزرگی انرژی جنبشی توربالانسی نسبت به حالت بدون شکاف (PBT) کاسته شده است. در نهایت می‌توان ثابت کرد که پروانه‌های جدید می‌توانند به‌طور مؤثر اندازه گرداب دنباله‌دار را از طریق شکاف‌های اطراف تیغه‌های پروانه کاهش دهند که منجر به بهبود مصرف انرژی و افزایش راندمان اختلاط می‌شود. این کاهش میزان اغتشاش نیز تابع شکل شکاف‌ها می‌باشد.

جدول ۱ مقایسه گشتاور، توان و عدد توان در پره‌های PBT، PBPT و BCPBT

نوع پروانه	گشتاور (N.m)	توان (w)	عدد توان
PBT	۹۴/۱۵	۱۴۷۸/۱۵	۱/۴۳
PBPT	۸۹/۲۱	۱۴۰۰/۶	۱/۳۵
BCPBT	۸۵/۱۷	۱۳۳۷/۸	۱/۲۹

جدول ۲ مقایسه گشتاور، توان و عدد توان در پره‌های PBT، U-PBT و V-PBT

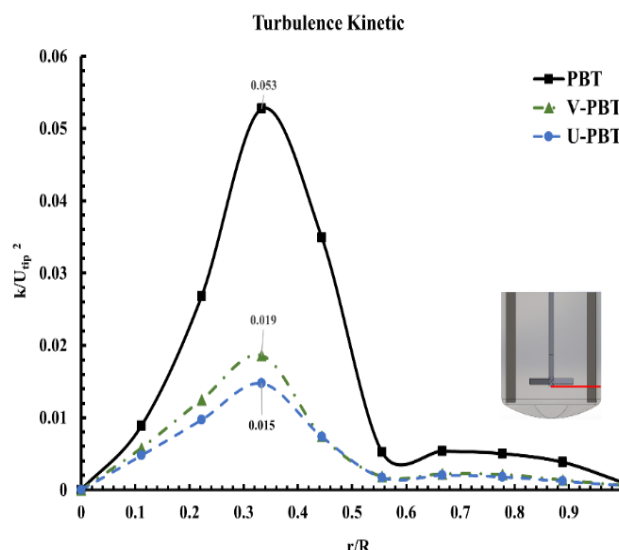
نوع پروانه	گشتاور (N.m)	توان (w)	عدد توان
PBT	۹۴/۱۵	۱۴۷۸/۱۵	۱/۴۳
U-PBT	۷۵/۳۷	۱۱۸۳/۳۰	۱/۱۵
V-PBT	۷۳/۴۲	۱۱۵۲/۷	۱/۱۱

مکان‌های اصلی برای تولید انرژی آشفته و تلفات توان در یک مخزن همزن‌دار، جت خروجی از نوک پروانه و جریان سیال متلاطم در اطراف ناحیه پروانه است. ساختار پروانه‌های مورد مطالعه در اینجا نشان می‌دهد که سهم تلفات توربالانسی از جریان سیال اطراف پروانه بیشتر از جت خروجی از نوک پروانه است. بدین ترتیب تغییر ساختار پروانه‌ها در جهت طول آن‌ها، نسبت به تغییرات عرضی آن‌ها در کاهش توان با فرض یکنواختی برابر اتلاف توربالانسی، مؤثرتر است. در نتیجه، کاهش مصرف برق در پروانه V-PBT بیشتر از پروانه BCPBT است.

۵- نتیجه‌گیری

پایداری دینامیکی مخزن همزن‌دار دو فازي جامد-مایع با استفاده از یک پروانه چهار پره‌ای جریان محوری و به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی در این پژوهش شبیه‌سازی شد. برای توصیف جریان آشفته، مدل استاندارد $k-\epsilon$ و برای شبیه‌سازی جریان دو فازي، مدل اولرین-اولرین (E-E) به کار گرفته شد. همچنین، از روش چارچوب مرجع چندگانه برای مدل سازی ناحیه چرخشی استفاده شد. در این تحقیق به بررسی تأثیر اصلاح پره‌ها بر توزیع فاز جامد در مخزن و توزیع انرژی جنبشی توربالانسی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در ادامه آورده شده است.

- اصلاح پره‌ها در جهت طولی و عرضی باعث شکست گردابه‌های بزرگ‌تر به گردابه‌های کوچک‌تر شده و در نهایت کاهش افت فشار در جلو و پشت پره‌ها و توزیع یکنواخت‌تر انرژی جنبشی توربالانسی را به دنبال دارد.



شکل ۱۳ تغییرات انرژی جنبشی بدون بعد برای پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT در راستای شعاع مخزن

۴-۵- توان مصرفی در پروانه‌های اصلاح‌شده

توان مصرفی (P) و عدد توان (Np) به عنوان یک مشخصه اصلی در طراحی مخازن همزن‌دار استفاده می‌شوند. در ادامه توان مصرفی پروانه‌ها بر اساس گشتاور اعمال‌شده (T) بر روی پروانه (رابطه (۱۴)) و طریقه محاسبه عدد توان نیز گزارش شده است.

$$P = 2\pi NT \quad (14)$$

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (15)$$

همان‌گونه که از جدول (۱) و (۲) مشخص است گشتاور اعمال‌شده بر روی شفت با تغییر طراحی پروانه تغییر کرده است و مقدار آن کاهش یافته است. این کاهش گشتاور به دلیل تغییر در گردابه‌های دنباله‌دار است که باعث شده است گشتاور اعمال‌شده در مخزن تغییر کند. کاهش گردابه‌های دنباله‌دار باعث کاهش اختلاف فشار در اطراف پره‌ها شده است و همچنین فشار در مرکز این گردابه‌های مقیاس کوچک که در اطراف شکاف‌ها و روزنه‌ها ایجاد می‌شود کم است و می‌تواند مقداری نیروی محرکه اضافی به پروانه دهد و مصرف انرژی را تا حدی کاهش دهد.

با توجه به جدول‌های (۱) و (۲) کاهش مصرف برق ۲۲ درصدی زمانی که پروانه‌های اصلاح طولی به جای پروانه PBT استفاده می‌شود و کاهش مصرف برق ۱۰ درصدی، زمانی که پروانه‌های اصلاح عرضی به جای پروانه PBT به کار برده می‌شود، قابل مشاهده است.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های اییکو به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این پژوهش تشکر می‌نمایند.

۸- مراجع

- [1] H. Li, X. Li, J. Zhan, W. Chen, and W. Zong, "Study of turbulent kinetic energy and dissipation based on fractal impeller," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7772, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15107772>.
- [2] D. Gu, M. Ye, X. Wang, and Z. Liu, "Numerical Investigation on Mixing Characteristics of Floating and Sinking Particles in a Stirred Tank with Fractal Impellers," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 116, pp. 51-61, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.11.013>.
- [3] D. Gu, C. Cheng, Z. Liu, and Y. Wang, "Numerical Simulation of Solid-Liquid Mixing Characteristics in a Stirred Tank with Fractal Impellers," *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, No. 10, pp. 2126-2138, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.06.028>.
- [4] W. Zhang, Z. Gao, Q. Yang, S. Zhou, and D. Xia, "Study of novel punched-bionic impellers for high efficiency and homogeneity in PCM mixing and other solid-liquid stirs," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 21, p. 9883, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11219883>.
- [5] S. A. Martínez-Delgadillo, A. Alonzo-Garcia, V. X. Mendoza-Escamilla, I. González-Neria, and J. Antonio Yáñez-Varela, "Analysis of the Turbulent Flow and Trailing Vortices Induced by New Design Grooved Blade Impellers in a Baffled Tank," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 358, pp. 225-235, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.015>.
- [6] J. Stelmach, R. Musoski, C. Kuncewicz, T. Jirout, and F. Rieger, "Efficiency of PBT Impellers with Different Blade Cross-Sections," *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 585, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15020585>.
- [7] B. Li and J. Wang, "Mixing Intensification through Modifications of PBT Impellers Studied by DEM-VOF Method," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 177, p. 109001, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109001>.
- [8] I. González-Neria, A. Alonzo-Garcia, S. A. Martínez-Delgadillo, V. X. Mendoza-Escamilla, J. A. Yáñez-Varela, P. G. Verdin, and G. Rivadeneyra-Romero, "PIV and Dynamic LES of the Turbulent Stream and

- پروانه‌های اصلاح‌شده به دلیل تولید گردابه‌های پایدار در مقیاس کوچک، سرعت توزیع انرژی محلی در اطراف پروانه را افزایش می‌دهند که باعث بهبود اثر اختلاط در راستای محور مخزن می‌شود.
 - توزیع یکنواخت انرژی جنبشی توربالانسی در پره‌های اصلاح‌شده نسبت به پره‌های سنتی باعث کاهش ۲۲٪ توان مصرفی در پره‌های اصلاح‌شده می‌شود.
- در پایان می‌توان نتیجه گرفت برای مخازن همزن‌دار با هدف انجام اختلاط بهینه با کمترین میزان توان مصرفی، کاهش انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه‌ها دارای اولویت است. در این راستا باید از پروانه‌های که خاصیت شکست گردابه‌های دنباله‌دار را دارند استفاده کرد؛ به گونه‌ای که کیفیت اختلاط در راستای محور مخزن تحت تاثیر قرار نگیرد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

C	فاصله پروانه از کف (mm)
C _D	ضریب درگ
C _{aβ}	ضریب درگ بین فازی
D	قطر پروانه (mm)
d _p	قطر میانگین ذرات جامد (dp)
D _s	قطر شفت (mm)
F	نیروی حجمی (N)
g	شتاب جاذبه (m/s ²)
G _k	تولید تلاطم ناشی از گرداب‌های سرعت
H	ارتفاع سیال (mm)
N	سرعت چرخش (rpm)
N _p	عدد توان
P	توان (W)
T	قطر مخزن (mm)
U	بردار سرعت (m/s)
U _{tip}	سرعت نوک پروانه (m/s)
W _{baffel}	عرض بفل (mm)

علائم یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)
r	درصد حجمی ذرات (/.)
α	فاز پیوسته
β	فاز پراکنده
ρ	دانسیته (kg/m ³)
σ	عدد پراتل
τ	تنسور تنش

- [13] R. Safa, E. Soltani, and M. Abdolzadeh, "Investigation of the Impeller Angle Effect on the Performance of Mixing Tanks," [in Persian], *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 47-59, 2023, doi: <https://doi.org/10.30506/mmep.2023.2009634.2103>.
- [14] R. Safa and A. Soltani Goharrizi, "CFD Simulation of an Industrial Hydrocyclone with Eulerian–Eulerian Approach: A Case Study," *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 643-648, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.07.010>.
- [15] A. Guida, A. W. Nienow, and M. Barigou, "PEPT Measurements of Solid–Liquid Flow Field and Spatial Phase Distribution in Concentrated Monodisperse Stirred Suspensions," *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, No. 6, pp. 1905-1914, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.005>.
- [16] D. Wadnerkar, M. O. Tade, V. K. Pareek, and R. P. Utikar, "CFD Simulation of Solid–Liquid stirred Tanks for Low to Dense Solid Loading Systems," *Particuology*, Vol. 29, pp. 16-33, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.01.012>.
- Mixing Induced by a V-grooved Blade Axial Agitator," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 374, pp. 1138-1152, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.06.033>.
- [9] X. Li, H. Zhao, Z. Zhang, Y. Liu, and T. a. Zhang, "Numerical optimization for blades of Intermig impeller in solid–liquid stirred tank," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 57-66, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.044>.
- [10] D. Gu, J. Chen, Y. Song, and Q. Chen, "Modification of impeller blades for the efficient mixing of particulate suspensions in a stirred tank," *Advanced Powder Technology*, vol. 35, no. 5, p. 104444, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104444>.
- [11] D. Gu, C. Li, X. Gu, and J. Wang, "Solid-liquid mixing characteristics in a fractal cut impeller stirred reactor with dense solid loading," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 196, p. 109655, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109655>.
- [12] A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale, A. Brucato, and M. Ciofalo, "CFD Simulations of Dense Solid–Liquid Suspensions in Baffled Stirred Tanks: Prediction of Suspension Curves," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 178, pp. 324-341, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.016>.

سیستم تولید همزمان توان و تبرید بر مبنای چرخه دو حلقه ای

چکیده: در مقاله حاضر، یک سیستم نوآورانه برای تولید همزمان توان، سرمایش، گرمایش و هیدروژن با استفاده از ترکیب چرخه توان جذبی، چرخه تبرید تراکمی و الکترولایزر غشای پروتونی ارائه شده است. معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار EES تدوین شده و مدلسازی کامل انرژی و انرژی سیستم انجام شده است. همچنین عملکرد ترمودینامیکی سیستم بررسی گردیده و تأثیر تعدادی از پارامترهای مختلف بر کارایی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور دستیابی به شرایط بهینه، بهینه سازی تک هدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نیز انجام شده است. تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه نشان می دهد که در شرایط پایه و طراحی اولیه، این سیستم قادر به تولید توان الکتریکی خالص حدود ۱۷/۱۲ کیلووات، توان سرمایش حدود ۲۰۱/۵ کیلووات، توان گرمایش حدود ۶۹۷/۱ کیلووات و هیدروژن خالص با نرخ ۰/۱۵۳ مترمکعب بر ساعت می باشد. نسبت بهره وری انرژی سیستم برابر با ۱/۳۴۶ و بازده انرژی آن ۳۶/۵۸ درصد است. علاوه براین، در بهینه سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت بهره وری انرژی از ۱/۳۴۶ به ۳/۳۳ افزایش یافته و در بهینه سازی مبتنی بر بازده انرژی، این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا یافته است. نتایج حاصل از بهینه سازی نشان دهنده بهبود عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و انرژی می باشد.

واژه های راهنما: تولید همزمان، تبرید تراکمی، تولید توان، تحلیل انرژی و انرژی

محمد معصومی فرد

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد مشکین شهر،
دانشگاه آزاد اسلامی،
مشکین شهر

هادی غائبی*

استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه محقق اردبیلی،
اردبیل

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

Mohammad Masoumifard
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Meshkinshahr Branch,
Islamic Azad University,
Meshkinshahr

Hadi Ghaebi*
Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
University of Mohaghegh
Ardabili, Ardabil

Combined power and cooling generation system based on a two-loop cycle

Abstract: In the present study, an innovative system is proposed for the simultaneous generation of power, cooling, heating, and hydrogen, by integrating an absorption power cycle, a compression refrigeration cycle, and a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. The governing equations were formulated using EES software, and a comprehensive energy and exergy modeling of the proposed system was performed. The thermodynamic performance of the system was then analyzed, and the effects of several key parameters on system performance were investigated. To achieve optimal performance, a single-objective optimization based on a genetic algorithm was also carried out. Thermodynamic analysis of the multi-generation system indicates that, under the base design conditions, the system is capable of producing a net electrical power of approximately 12/17 kW, cooling power of 5/201 kW, heating power of 1/697 kW, and pure hydrogen at a rate of 153/0 m³/h. The system exhibits an energy efficiency ratio of 346/1 and an exergy efficiency of 58/36%. Furthermore, in the energy-based optimization, the energy efficiency ratio increased from 346/1 to 33/3, while in the exergy-based optimization, the exergy efficiency improved from 58/36% in the base case to 94/63% in the optimized case. The optimization results clearly demonstrate a significant enhancement in system performance from both energy and exergy perspectives.

Keywords: Cogeneration, Compression refrigeration, Power generation, Energy and exergy analysis

۱- مقدمه

تأمین انرژی یکی از نگرانی‌های مستمر کشورها و از مهم‌ترین نیازهای بشر محسوب می‌شود. بازیابی انرژی از منابع گرمایی با دمای پایین، مانند حرارت زباله‌های صنعتی، یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی فسیلی است. با توجه به محدودیت منابع سوخت فسیلی و آثار مخرب زیست‌محیطی آن، بهینه‌سازی روش‌های بهره‌برداری از این سوخت‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. یکی از راهکارهای پیشنهادی، افزایش بازده سیستم‌های انرژی با منابع حرارتی دمای پایین است [۱]. مصرف بالای سوخت‌های فسیلی، کمبود منابع انرژی، افزایش قیمت انرژی و آلودگی محیط زیست ناشی از گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن، ضرورت بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی را دوچندان می‌کند [۲]. تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی معمولاً با ضایعات قابل توجهی همراه است؛ حتی در بهترین شرایط تولید مرتبط با چرخه ترکیبی، بیش از ۵۰ درصد انرژی حرارتی وارد شده به سیستم به انرژی الکتریکی تبدیل نمی‌شود و به صورت گرما از طریق دودکش، کندانسور و سایر تجهیزات دفع می‌شود. بنابراین، استفاده از سیستم‌های تولید همزمان با بازده کاری بالا به عنوان راهکاری مؤثر مطرح است [۳].

چرخه‌های ارگانیک رانکین^۱ [۴] و کالینا^۲ [۵] از جمله سیستم‌هایی هستند که می‌توانند با استفاده از منابع حرارتی دمای پایین، توانایی تولید توان با بازده قابل قبول داشته باشند. این سیستم‌ها گرمای با دمای پایین را به توان مکانیکی یا الکتریسته تبدیل می‌کنند و به‌طور سنتی از سیال عامل آلی استفاده می‌کنند [۶]. در سال‌های اخیر، چرخه رانکین ارگانیک توسط پژوهشگران توسعه و بهبود یافته است و در مواردی که منابع حرارتی دمای پایین مانند منابع زمین‌گرمایی و خورشیدی در دسترس هستند، از این چرخه برای تولید توان و سرمایش استفاده می‌شود [۷]. این چرخه به‌منظور بهبود بازده و بهره‌وری در تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی از طریق چرخه ترمودینامیکی در منابع گرمایی با دماهای متوسط یا کم توسعه یافته و در سال‌های اخیر به‌عنوان راهکارهای مؤثر در تولید انرژی مطرح شده است. چرخه رانکین ارگانیک به‌عنوان یک فناوری مهم در بازیابی گرما از منابع گرمایی با دماهای پایین و متوسط مانند منابع زمین‌گرمایی، منابع خورشیدی و همچنین گازهای خروجی از موتورهای دیزلی، توسط بسیاری از محققان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات تچانچه و همکارانش [۸] نشان داده است که این چرخه می‌تواند به‌عنوان

یک راه حل مؤثر برای بازیابی گرما و تبدیل آن به انرژی الکتریکی در منابع حرارتی با دماهای پایین و متوسط مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش‌های دیگر توسط تچانچه و همکارانش [۹]، عملکرد ترمودینامیکی و اثرات زیست‌محیطی سیالات ارگانیک مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. این تحقیقات به مقایسه بازده و اثرات زیست‌محیطی سیالات ارگانیک در چرخه‌های رانکین ارگانیک کمک کرده و اطلاعات مفیدی برای بهبود بهره‌برداری از این چرخه‌ها در تولید انرژی فراهم کرده‌اند.

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که انتخاب مناسب سیال عامل و استفاده از مخلوط‌های دوتایی در چرخه‌های توان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بازده انرژی داشته باشد. چرخه‌هایی مانند کالینا با استفاده از آب و آمونیاک به‌عنوان سیال عامل، قابلیت تبدیل بیشتری از گرما به توان را دارند و و این امر می‌تواند در بهبود بازده تولید انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی مؤثر باشد. این نتایج به توسعه پایدارتر و کارآمدتر فناوری‌های تبدیل انرژی کمک کرده و وابستگی به منابع انرژی فسیلی را کاهش می‌دهد، که در حفاظت از محیط زیست و تأمین انرژی پایدار اهمیت زیادی دارد [۷]. مطالعات سورین نشان می‌دهد که در صنایع نیازمند بهره‌گیری از گرمای اتلافی، چرخه‌های کالینا نسبت به چرخه‌های رانکین قادر به تبدیل بیشتری از این گرما به توان هستند و می‌توانند تا ۳۲ درصد توان بیشتری تولید کنند. این افزایش توان در کاربردهای صنعتی می‌تواند منجر به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها شود [۱۰].

السااید در تحقیقات خود نشان داد که در شرایطی که هر دو چرخه رانکین و کالینا به‌عنوان چرخه‌های پایین در دماهای مشابه برای منابع حرارتی با دمای زیر ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرند، چرخه کالینا از نظر بازده، بهبود ۲۰-۱۰ درصدی نسبت به چرخه رانکین ساده دارد. این امر نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر چرخه کالینا در شرایط خاص مربوط به دمای منابع حرارتی است [۱۱]. بنابراین، این تحقیقات نشان می‌دهند که چرخه کالینا، به ویژه در کاربردهایی با دمای منبع حرارتی زیر ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد، به‌عنوان یک گزینه مؤثر و کارآمد در تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی از طریق چرخه ترمودینامیکی مطرح می‌شود.

ویژگی برجسته چرخه کالینا در مقایسه با دیگر چرخه‌های توان، وجود سیال عامل منحصربه‌فردی مانند آب و آمونیاک است. در چرخه کالینا، در طول فرآیندهای تبخیر در اواپراتور، فشار ثابت است، اما دما تغییر می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود

² Kalina cycle¹ Organic Rankine cycle

سیستم‌ها، مشاهده شد که با افزایش تابش عادی مستقیم^۱ (DNI) این شاخص از ۱/۶۵۰۴ به ۰/۶۸۰۱ کاهش یافت. علاوه بر این، ضریب پایداری اگزرتیک، که نشان‌دهنده پایداری تخریب اگزرتی در سیستم‌ها است، با سطوح DNI بالاتر از ۰/۳۷۷۳ به ۰/۵۹۵۲ افزایش یافت. این یافته‌ها یک همبستگی را نشان می‌دهد که در آن DNI بالاتر منجر به کاهش تأثیر اگزرتو-محیطی و بهبود پایداری در تخریب اگزرتی در سیستم‌ها می‌شود.

در مطالعه انجام شده توسط شوکتی و همکاران [۱۶]، چرخه‌های توان جذبی لیتیوم برماید-آب و آب-آمونیاک به همراه چرخه رانکین از نظر اگزرتوآکونومیکی مقایسه شدند. این تحلیل‌ها با بهره‌گیری از روش هزینه اگزرتی ویژه انجام شد. نتایج نشان داد که چرخه لیتیوم بروماید-آب از نظر بازده قانون اول، عملکرد بهتری نسبت به سایر چرخه‌ها دارد؛ با این حال، هزینه واحد تولید برق توسط توربین در این چرخه بیش از چرخه رانکین است. به بیان دیگر، چرخه لیتیوم بروماید-آب اگرچه بازده بالاتری دارد، اما مستلزم صرف هزینه بیشتری است. غایبی و همکاران [۱۷] در تحقیقی از ترکیب دو چرخه تبرید اجکتوری (ERC) و ORC برای تولید سرمایه و توان انرژی استفاده کردند. در این ترکیب، کندانسور چرخه تبرید اجکتوری به‌عنوان اواپراتور چرخه ORC عمل می‌کند. ایزوبوتان به‌عنوان عامل در چرخه تبرید اجکتوری مورد استفاده قرار گرفته و برای چرخه ORC از سیالات عامل مختلفی از جمله R113، R141B، R11، R123، R245fa و ایزوبوتان استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین کارایی مربوط به ترکیب ایزوبوتان و R113 برای چرخه تبرید و چرخه ORC به‌ترتیب حاصل می‌شود. مقاله یو و همکاران [۱۸] یک سیستم تولید سه‌گانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد^۲ (SOFC) را برای تولید برق، سرمایه و گرمایش به‌طور همزمان پیشنهاد می‌کند. این سیستم از یک SOFC، یک توربین گاز (GT)، یک چرخه رانکین آلی، یک یخچال اجکتور بخار^۳ (SER) و یک مبدل حرارتی تشکیل شده است. مدل‌های ترمودینامیکی، اگزرتوآکونومیک و اگزرتو-محیطی برای سیستم پیشنهادی توسعه داده شده‌اند و اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی SOFC، فشار w، اختلاف دمای نقطه پینچ و فشار تبخیر ژنراتور، میانگین هزینه محصول سیستم و اثرات زیست‌محیطی بر واحد اگزرتی افزایش می‌یابد؛ در مقابل، این مقادیر با افزایش

که تطابق دمایی بین پروفیل دمای جریان‌های منبع گرما و پروفیل دمای آب و آمونیاک در اواپراتور و کندانسور بهبود یابد. به دلیل بهبود تطابق دمایی، تخریب اگزرتی در اواپراتور و کندانسور کاهش یافته و فرآیندهای انتقال حرارت در این بخش‌ها بهینه انجام می‌شوند. با توجه به امکان تنظیم غلظت آمونیاک در مخلوط آب و آمونیاک، این چرخه انعطاف‌پذیری بیشتری برای بهینه‌سازی بازیابی گرما فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، محققین بسیاری از جمله دمیرکایا و همکارانش [۱۲] چرخه‌های تولید همزمان توان و سرمایه را پیشنهاد داده‌اند که از ادغام چرخه‌های تولید توان مانند کالینا و رانکین و چرخه‌های خنک‌کننده جذبی ساخته شده‌اند و در این چرخه‌ها از سیال عامل آب و آمونیاک استفاده شده است. این چرخه‌های تولید همزمان توان و تبرید، تاکنون به‌عنوان راهکاری مؤثر در بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش و تبرید مطرح شده‌اند. از طریق استفاده از این چرخه‌ها، می‌توان گرمای تولید شده در سیستم‌های تولید توان را به تولید برودت مفید تبدیل کرد و بدین ترتیب انرژی را به‌صورت کامل بهره‌برداری کرد.

احمدی و همکارانش [۱۳] در تحقیقات خود، تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی را بر روی چرخه‌های تولید سه‌گانه انجام دادند. این چرخه‌ها شامل چرخه توربین گاز، چرخه ORC و چرخه جذبی تک‌اثره بودند. در این تحلیل‌ها، از مفهوم اگزرتوآکونومیک برای ارزیابی بهره‌وری و هزینه‌های این چرخه‌ها استفاده شد. این تحقیقات اطلاعات ارزشمندی درباره عملکرد و بهره‌وری این چرخه‌های تولید انرژی ارائه کردند و به مهندسان امکان تصمیم‌گیری بهتر در زمینه طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها را می‌دهد. تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی که باقرنژاد و همکارانش [۱۴] انجام دادند، مثال دیگری از کاربرد قدرتمند این روش در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی است. در نتیجه این تحلیل‌ها مشخص شد که در شرایط بهینه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این سیستم‌ها به میزان ۱۳/۳ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی، می‌توان به بهبود عملکرد و هزینه‌های سیستم‌های خورشیدی دست یافت و در عین حال به محیط زیست نیز کمک کرد. در یک تحلیل اگزرتو-محیطی که از طرف خان و همکاران [۱۵] در مقایسه عملکرد چرخه‌های رانکین آلی ادغام شده با سیکل ترکیبی مبتنی بر خورشید صورت گرفت، با استفاده از شاخص تأثیر بر محیط زیست برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

³ Steam Ejector Refrigerator¹ Direct normal irradiation² Solid Oxide Fuel Cell

پیل سوختی اکسید جامد-توربین گازی، که به عنوان چرخه تولید توان عمل می کند و یک سیستم تبرید جذبی، که به عنوان چرخه تولید برودت عمل می کند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که چرخه ترکیبی پیشنهادی دارای یک بازده انرژی بسیار بالاتر از چرخه پیل سوختی- توربین گازی در شرایط مشابه است، که این بهبود در بازده انرژی می تواند منجر به افزایش توان الکتریکی تولیدی و تولید برودت باشد. در پژوهش فراهانی و همکارانش [۲۳] با توجه به وضعیت زیست محیطی جهان امروزی و تلاش جامعه جهانی برای کاهش استفاده از سوخت های فسیلی و جلب منابع انرژی پاک تر، به معرفی یک چرخه تولید همزمان توان حرارتی و برودت با استفاده از انرژی زمین گرما پرداختند. این پژوهش نشان می دهد که با استفاده از انرژی زمین گرما در یک سیستم تولید همزمان توان حرارتی و برودت، می توان بهبود قابل توجهی در بهره وری انرژی و کاهش مصرف سوخت های فسیلی داشت. در پژوهشی توسط غایبی و همکارانش [۲۴]، از سیستم جذبی محلول لیتیم بروماید-آب به عنوان یک روش جدید برای تولید توان استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از چرخه توان جذبی باعث بهبود راندمان این چرخه می شود. افزایش راندمان در این چرخه به عنوان یک نتیجه اصلی با کاهش اختلاف دمای سیال های خارجی گرم و سرد در این چرخه مرتبط است. همچنین مشاهده شده است که استفاده از این چرخه جذبی به افزایش کار ویژه منجر می شود. این نتایج نشان می دهد که سیستم جذبی محلول لیتیم بروماید-آب می تواند یک گزینه مؤثر برای تولید توان و بهبود راندمان در چرخه های حرارتی باشد.

تمرکز اصلی این مقاله بر درک بهتر فناوری های موجود برای منابع انرژی دما پایین و استفاده همزمان از آن ها در زمینه های مختلف است، به منظور جلوگیری از هدر رفتن انرژی مفید و کاهش اثرات زیست محیطی و هزینه ها. نوآوری اصلی مطالعه در طراحی یک سیستم یکپارچه تولید چندگانه است که توان الکتریکی، سرمایش، گرمایش و هیدروژن را به صورت همزمان تولید می کند. سیستم پیشنهادی شامل ترکیب چرخه توان جذبی و چرخه تبرید تراکمی همراه با واحد تولید هیدروژن از طریق الکترولایزر غشاء پروتونی^۳ (PEM) است. واقعیت پذیری این سیستم با استفاده از تحلیل های ترمودینامیکی انرژی و انرژی بررسی شده و نشان داده می شود که عملکرد آن در شرایط عملی قابل اعتماد و عملیاتی است. مقایسه با پژوهش های پیشین نشان می دهد که سیستم پیشنهادی قادر است عملکرد

چگالی جریان سلول سوختی کاهش پیدا می کنند. همچنین، بهینه سازی مبتنی بر انرژی برای دستیابی به عملکرد مطلوب انجام شده است که اگرچه به کاهش راندمان انرژی سیستم منجر می شود، اما میانگین هزینه محصول و اثرات زیست محیطی سیستم را در واحد انرژی کاهش می دهد. در تحقیقی که توسط رشیدی و همکارش [۱۹] انجام شد، عملکرد هفت سیال عامل مختلف در چرخه ترکیبی تولید توان و تبرید اجکتوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که R124 به عنوان یکی از سیالات عامل، عملکرد بهتری نسبت به سایر سیالات دارد. این به دلیل افزایش دما و نسبت انبساط توربین و دمای تبخیرکننده بوده و باعث افزایش بازده انرژی در این چرخه می شود. به عبارت دیگر، R124 بهترین سیال عامل برای بهینه سازی عملکرد چرخه ترکیبی توان و تبرید اجکتوری به شمار می رود.

در مقاله خیمی و همکاران [۲۰] یک سیستم خنک کننده و تولید توان ترکیبی (CCPP) را بررسی می کند، که از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی خود استفاده می کند. این سیستم از یک چرخه رانکین آلی (ORC) برای تولید نیرو و یک سیکل تبرید اجکتوری (ERC) برای ظرفیت خنک کننده استفاده می کند. این تحقیق بر روی تأثیر استفاده از دو سیال عامل R-11 و R-2545fa و همچنین مخلوط های ژئوتروپیک به دست آمده از ترکیب این دو سیال متمرکز است. یک فرآیند بهینه سازی چند هدفه برای انتخاب سیال کاری مناسب با هدف به حداقل رساندن نرخ کل هزینه^۱ (TCR) و به حداکثر رساندن بازده انرژی سیستم استفاده می شود. این مطالعه نتیجه می گیرد که استفاده از مخلوط های ژئوتروپیک R-11 و R-2545fa منجر به عملکرد بهتر، با بهبود ۸/۵ درصدی در بازده انرژی و تنها افزایش ۱/۵ درصدی در TCR می شود. در تحقیقات زندگی و همکارانش [۲۱] که به مطالعه عملکرد سیالات مختلف در چرخه ترکیبی توان و تبرید پرداختند، از رویکرد تحلیل انرژی نیز استفاده شد. نتایج تحقیقات نشان می دهد که در تحلیل انرژی و انرژی برای چرخه ترکیبی توان و تبرید با استفاده از نرم افزار EES^۲ و با بررسی مبردهای مختلف، مبرد R290 بالاترین راندمان انرژی را داشته و در چرخه مربوط به R12، ضریب عملکرد سیکل بیشترین مقدار را با عدد ۱/۴۳۸ نشان داده است. در پژوهشی انجام شده توسط خانی و همکاران [۲۲] امکان استفاده از یک چرخه ترکیبی جدید برای تولید همزمان توان و تولید برودت مورد بررسی قرار گرفته است. این چرخه پیشنهادی شامل ترکیبی از دو سیستم است: یک سیستم

^۳ Proton Exchange Membrane^۱ Total Cost Rate^۲ Engineering Equation Solver

در ادامه به منظور شرح نحوه عملکرد سیستم پیشنهادی، به توضیح تک تک سیستم‌های به کار برده شده خواهیم پرداخت.

۲-۲- چرخه توان جذبی

جریان بخار خروجی از ژنراتور به سمت توربین فرستاده می‌شود (حالت ۱) و باعث تولید توان می‌شود که قسمتی از آن صرف تأمین توان الکتریکی لازم برای فرآیند الکترولیزر غشاء پروتونی می‌شود. جریان خروجی توربین با جریان خروجی از کمپرسور (حالت ۳) ترکیب شده، وارد چگالنده (حالت ۴) می‌شود. جریان محلول رقیق (حالت ۱۳) وارد مبدل حرارتی جهت گرمایش جریان محلول غلیظ شده (حالت ۱۱) و از آن خارج می‌شود (حالت ۱۴). در ادامه، جریان محلول رقیق توسط شیر خفانش ۲ (حالت ۱۵) به فشارکاری جاذب بازگردانده می‌شود.

محلول رقیق در جاذب با بخشی از جریان آمونیاک خالص خروجی از چگالنده مخلوط شده و به محلول غلیظ تبدیل می‌شود (حالت ۱۰). جریان غلیظ خروجی در ادامه وارد پمپ شده تا فشار جریان افزایش یابد (حالت ۱۱). در نهایت جریان متراکم شده قبل از ورود به ژنراتور بخار توسط مبدل حرارتی محلول بازگرمایش شده است (حالت ۱۲) و وارد ژنراتور شده و با جذب گرما و جداسازی آمونیاک، فرآیند چرخه دوباره از اول آغاز می‌شود.

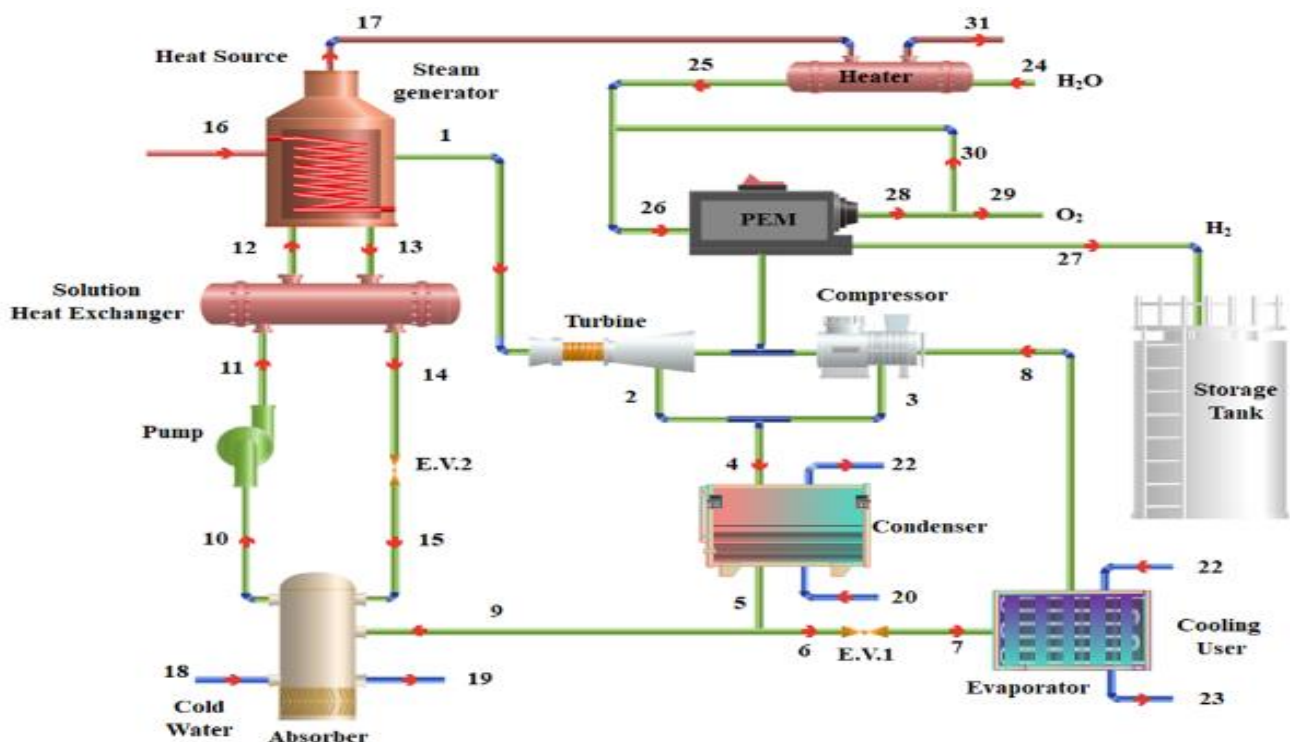
کلی بهتری ارائه دهد و نوآوری آن در همزمان سازی تولید چند محصول و بهبود بهره‌وری انرژی و بازده انرژی، آن را از سیستم‌های مشابه متمایز می‌کند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده پیشرفت و ارزش افزوده روش پیشنهادی نسبت به مطالعات گذشته در زمینه تولید همزمان انرژی و هیدروژن است.

۲- روش کار

۲-۱- توصیف سیستم

طرحواره سیستم تولید چندگانه پیشنهادی در این مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. سیستم پیشنهادی حاصل از ادغام چرخه توان جذبی و چرخه تبرید تراکمی به منظور تولید همزمان توان، گرمایش و سرمایش می‌باشد. همچنین به منظور تولید هیدروژن که کاربرد زیادی در صنایع مختلف دارد از یک واحد الکترولیزر غشاء پروتونی استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، چرخه توان جذبی شامل اجزایی مانند توربین، جاذب، پمپ محلول، ژنراتور بخار، شیر فشارشکن (۲) و مبدل حرارتی محلول است.

اجزای اصلی چرخه تبرید تراکمی شامل شیر فشارشکن (۱)، کمپرسور، اواپراتور و کندانسور هستند که به عنوان جزء مشترک چرخه ترکیبی استفاده می‌شوند و همچنین الکترولیزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن به صورت جداگانه به کار می‌رود.



شکل ۱ شماتیک سیستم مورد مطالعه

۲-۳- چرخه تبرید تراکمی

در ابتدا، سیال عامل آمونیاک در اواپراتور گرما را از محیط تبرید جذب کرده و به طور کامل تبخیر می‌شود. این فرآیند تبرید مورد نیاز برای کاربردهای خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. سپس سیال عامل (بخار آمونیاک) به صورت بخار اشباع (حالت ۸) وارد کمپرسور شده و متراکم می‌گردد. جریان خروجی کمپرسور (حالت ۳) پس از اختلاط با بخار خروجی از توربین (حالت ۴)، وارد چگالنده می‌شود. در این بخش، گرمای ناشی از تراکم بخار آمونیاک دفع می‌شود که می‌تواند برای تأمین گرمایش مورد نیاز در مصارف خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. بخشی از جریان خروجی چگالنده (حالت ۵) وارد شیر خفانش ۱ (حالت ۶) شده و در یک فرآیند آنتالپی ثابت با کاهش فشار، به اواپراتور (حالت ۷) می‌رسد.

۲-۴- الکترولایزر غشاء پروتونی

در ابتدا، آب مایع در دما و فشار محیط وارد گرم‌کن می‌شود (حالت ۲۴). در این‌جا، آب گرم تبادل حرارت با منبع حرارتی را تجربه می‌کند و دمای آن به دمای کاری الکترولایزر افزایش می‌یابد (حالت ۲۵). سپس، آب گرم تولیدی به الکترولایزر وارد می‌شود و در طی فرآیند شیمیایی، مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن از آب جدا می‌شوند. هیدروژن تولیدی پس از ترک کاتد خود، گرمای خود را به محیط منتقل می‌کند و به دمای محیط می‌رسد (حالت ۲۷). سپس مخلوطی از اکسیژن و آب از آند الکترولایزر خارج می‌شود (حالت ۲۸) و وارد واحد جداکننده اکسیژن می‌شود. در اینجا اکسیژن از آب جدا می‌شود و به محیط دفع می‌شود (حالت ۲۹). در نهایت، آب باقی‌مانده به منظور ادامه فرآیند تولید هیدروژن وارد چرخه می‌شود. در کل، الکترولایزر غشاء پروتونی وظیفه تبدیل آب به هیدروژن و اکسیژن را دارد و از دمای منبع حرارتی و توان توربین برای این فرآیند استفاده می‌کند.

۲-۵- فرضیات

چرخه تولیدچندگانه در این پژوهش با در نظر گرفتن تعدادی فرضیه ترمودینامیکی مدل‌سازی شده است:

- همه فرآیندها در حالت پایا انجام می‌شوند.
- تمام حجم کنترل‌ها بر اساس فرض شرایط آدیاباتیک مدل‌سازی شده‌اند، به‌این‌معنا که تغییرات دما و فشار در سیستم

در طول فرآیندها بدون تبادل حرارت با محیط اطراف در نظر گرفته شده‌اند.

- افت فشار در تمام اعضاء نادیده گرفته شده است، به‌این‌معنا که فشار در ورود و خروج از اعضاء ثابت در نظر گرفته شده و تغییرات آن در نظر گرفته نشده است.
- در فرآیند انبساط آنتالپی ثابت، اختناق در شیر در نظر گرفته شده است.
- توربین و پمپ با بازده آیزنتروپیک مشخصی کار می‌کنند.
- مقدار انرژی جنبشی در ورود و خروج اجزاء نادیده گرفته می‌شود و به‌عنوان اثر ناچیز در نظر گرفته نمی‌شود.
- سیال کاری سیکل توان جذبی، آب-آمونیاک است.
- سیال کاری سیکل تبرید تراکمی، آمونیاک خالص است.
- حالت خروجی از چگالنده به‌صورت مایع اشباع و حالت خروجی از تبخیرکننده و ژنراتور به‌صورت بخار اشباع مدل‌سازی شده‌اند.
- برخی دیگر از فرضیات ترمودینامیکی جهت شبیه‌سازی سیستم در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۶- تحلیل انرژی و اگزرژی

برای تعیین گرمای ورودی، آهنگ اتلاف اگزرژی و بازده انرژی، نیاز به به‌کارگیری موازنه جرم، موازنه انرژی و موازنه اگزرژی می‌باشد. موازنه کلی جرم را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

موازنه کلی انرژی را با صرف‌نظر کردن از انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$

$\dot{Q}$ نشان‌دهنده آهنگ انتقال گرما و $\dot{W}$ نشان‌دهنده آهنگ انجام کار می‌باشد.

موازنه کلی اگزرژی را نیز می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest} \quad (3)$$

$\dot{E}x_{in}$ و $\dot{E}x_{out}$ به‌ترتیب، نشان‌دهنده آهنگ اگزرژی ورودی و خروجی انتقال‌یافته به‌وسیله گرما، کار و جرم می‌باشد و $\dot{E}x_{dest}$ نشان‌دهنده آهنگ تخریب اگزرژی می‌باشد. شکل دیگر معادله (۳) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

بالانویس $\dot{Q}$ و $\dot{W}$ به ترتیب، آهنگ انتقال حرارت و کار را نشان می‌دهند. انتقال انرژی توسط گرما به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}x^{\dot{Q}} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (5)$$

$\dot{Q}$ نشان‌دهنده آهنگ انتقال حرارت و T_0 نشان‌دهنده دمای مرجع می‌باشد [۲۸]. انرژی قابلیت تبدیل به کار مفید است و انتقال انرژی توسط کار را به صورت ساده زیر می‌توان بیان کرد.

$$\dot{E}x^{\dot{W}} = \dot{W} \quad (6)$$

جرم دارای انرژی، انرژی و آنتروپی است و محتوی انرژی، انرژی و آنتروپی یک سیستم متناسب با جرم آن است. همچنین، آهنگ‌های انتقال انرژی، آنتروپی و انرژی به داخل (یا خارج) یک سیستم با آهنگ جریان جرم متناسب‌اند [۲۹].

$$\dot{E}x_{mass} = \dot{m} ex \quad (7)$$

انرژی ویژه (جریان) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

h و s آنتالپی و آنتروپی مبرد، T_0 دمای مرجع و h_0 و s_0 آنتالپی و آنتروپی مبرد در دما و فشار مرجع می‌باشند که خواهیم داشت:

$$\dot{E}x_D = \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W} + \sum (\dot{m} ex)_{in} - \sum (\dot{m} ex)_{out} \quad (9)$$

$\dot{E}x$ نشان‌دهنده آهنگ انرژی انتقالی و زیرنویس $dest$ نشان‌دهنده انرژی تخریب می‌باشد.

۲-۷- روابط ریاضی حاکم بر واحد الکترولایزر غشاء پروتونی

در گام اول محاسبه میزان انرژی تئوری برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیت ضروری به نظر می‌رسد که کل انرژی مورد نیاز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (10)$$

ΔG انرژی الکتریکی مورد نیاز (انرژی آزاد گیبس) و $T\Delta S$ انرژی گرمایی مورد نیاز در واحد ژول بر مول هیدروژن می‌باشد. مقادیر گیبس، آنتالپی و آنتروپی برای آب، هیدروژن و اکسیژن در جداول ترمودینامیکی موجود می‌باشند. انرژی تئوری لازم برای الکترولیز آب بدون اتلافات در نظر گرفته شده است.

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x^{\dot{Q}} - \dot{E}x^{\dot{W}} + \dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} \quad (4)$$

جدول ۱ برخی از پارامترهای ورودی استفاده شده در شبیه‌سازی سیستم [۲۵، ۲۶ و ۲۷]

پارامتر	مقدار
دمای حالت مرجع (K)	۲۹۸/۱۵
فشار حالت مرجع (bar)	۱/۰۱۳
دمای بخار آب منبع حرارتی (k)	۴۲۳/۱۵
دبی جرمی بخار آب منبع حرارتی	۰/۲۸۵
دمای بخار ورودی توربین (K)	۴۱۳/۱۵
فشار بخار ورودی توربین (bar)	۲۰
دمای خروجی جاذب (K)	۳۲۳/۱۵
غلظت آمونیاک خروجی جاذب (%)	۶۰
بازده آیزنتروپیک پمپ (%)	۸۵
بازده آیزنتروپیک کمپرسور (%)	۸۵
بازده آیزنتروپیک توربین (%)	۸۵
اثربخشی مبدل حرارتی (%)	۸۲
دمای خروجی اواپراتور (K)	۲۸۶
دمای ورودی کندانسور (K)	۳۷۵
اختلاف دمای گرم ژنراتور	۱۰
اختلاف دمای سرد ژنراتور	۳
دمای آب سردکن ورودی اواپراتور (K)	۲۹۸/۱۵
دمای آب سرد ورودی جاذب (K)	۲۹۸/۱۵
دمای آب سرد ورودی کندانسور (K)	۲۹۵/۱۵
دمای الکترولایزر، T_{PEM} (K)	۳۵۳
انرژی فعال‌سازی در سمت آند، $E_{act,a}$ (kJ.mol^{-1})	۷۶
انرژی فعال‌سازی در سمت کاتد، $E_{act,c}$ (kJ.mol^{-1})	۱۸
محتوی آب سطح غشاء در سمت آند، λ_a ($1.\Omega^{-1}$)	۱۴
محتوی آب سطح غشاء در سمت کاتد، λ_c ($1.\Omega^{-1}$)	۱۰
ضخامت غشاء، D (μm)	۱۰۰
فاکتور پتانسیل اولیه در سمت آند، j_a^{ref} (A.m^{-2})	$1/7 \times 10^{-7}$
فاکتور پتانسیل اولیه در سمت کاتد، j_c^{ref} (A.m^{-2})	$4/6 \times 10^{-2}$
ثابت فارادی، F (C.mol^{-1})	۹۶۴۸۶

$\lambda(x)$ محتوی آب در موقعیت x (عمق غشاء اندازه گیری شده از سطح کاتد) که می تواند به صورت زیر بیان گردد [۲۷]:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D}x + \lambda_c \quad (18)$$

در رابطه فوق، λ_a و λ_c به ترتیب محتوی آب در سطح غشاء در سمت آند و کاتد می باشند و D نیز نشانگر ضخامت غشاء می باشد. با استفاده از روابط فوق می توان مقاومت اهمی کل را به صورت زیر محاسبه کرد [۲۷]:

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (19)$$

در نهایت می توان پتانسیل اهمیک را بر اساس تعریف قانون اهم این چنین محاسبه کرد [۲۷]:

$$V_{ohm,PEM} = JR_{PEM} \quad (20)$$

همچنین پتانسیل فعال سازی الکترودها $V_{act,c}$ و $V_{act,a}$ که انرژی لازم برای واکنش های الکتروشیمیایی را فراهم می کنند، می توان از روابط زیر محاسبه کرد [۳]:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right), i = a, c \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) $J_{0,i}$ تبادل چگالی جریان بوده و به صورت زیر بیان می گردد [۲۷]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left(-\frac{E_{act,i}}{RT} \right), i = a, c \quad (22)$$

که در رابطه (۲۲)، $E_{act,i}$ و J_i^{ref} به ترتیب، انرژی فعال سازی و فاکتور پتانسیل الکترودها می باشد که در جدول (۱) ارائه شده اند. با به کار بردن معادلات فوق، معادلات موازنه جرم، انرژی و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی به دست می آید که در جدول (۲) ارائه شده اند.

۳- ارزیابی کلی عملکرد سیستم تولید چندگانه پیشنهادی

برای درک بهتر سیستم تولید چندگانه پیشنهادی، ارزیابی عملکرد کل سیستم پیشنهادی ضروری می باشد.

آهنگ جریان مولی هیدروژن تولیدی از رابطه (۱۱) به دست می آید [۳۰]:

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (11)$$

در معادله فوق، F بیانگر ثابت فارادی و J بیانگر چگالی جریان می باشد. به طور مشابه آهنگ جریان مولی اکسیژن تولیدی و آب باقیمانده می تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (12)$$

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F} \quad (13)$$

آهنگ جریان مولی آب ورودی $\dot{N}_{H_2O,in}$ پارامتری مشخص می باشد و برابر ۱ مول بر ثانیه فرض شده است.

انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند الکتروشیمیایی از طریق توان الکتریکی تولیدی در توربین چرخه توان جذبی به صورت زیر بیان می گردد [۲۷]:

$$E_{electric} = \dot{W}_{turbine} \times 10^3 = JV \quad (14)$$

$E_{electric}$ انرژی ورودی به الکترولایزر و پارامتر V نیز به صورت زیر بیان می گردد [۲۷]:

$$V = V_0 + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohm} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، V_0 پتانسیل برگشت پذیر می باشد که توسط معادله نرنست^۱ به دست می آید و V_{ohm} ، $V_{act,c}$ و $V_{act,a}$ به ترتیب، بیانگر پتانسیل اهمیک^۲، پتانسیل فعال کننده کاتد و آند می باشند [۲۷]:

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{PEM} - 298) \quad (16)$$

به منظور محاسبه V_{ohm} نیاز به معرفی چند پارامتر می باشد. از جمله این پارامترها رسانایی یونی محلی الکترولایزر غشاء پروتونی می باشد (σ_{PEM}) که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۷]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (17)$$

² Ohmic over potential

¹ Nernst equation

جدول ۲ معادلات بقای جرم، انرژی و انرژی برای هر یک از اعضای سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی

معادله بالانس انرژی	معادله بالانس انرژی
$\dot{E}_{D,SG} = (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}) - (\dot{E}_{13} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{12})$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{12}, \dot{m}_1 + \dot{m}_{13}X_{13}$ $= \dot{m}_{12}X_{12}$ $= \dot{Q}_{SG} = \dot{m}_{16}(h_{16} - h_{17})$ $= \dot{Q}_{SG} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_1h_1 - \dot{m}_{12}h_{12}$ ژنراتور بخار
$\dot{E}_{D,Tur} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) - \dot{W}_{Tur}$	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_1(h_1 - h_2),$ $\eta_{P,Tur} = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_{2s})$ توربین
$\dot{E}_{D,Cond} = (\dot{E}_4 - \dot{E}_5) - (\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20})$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21}),$ $\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_4(h_5 - h_4)$ کندانسور
$\dot{E}_{D,Abs} =$ $(\dot{E}_9 + \dot{E}_{15} - \dot{E}_{10}) - (\dot{E}_{19} - \dot{E}_{18})$	$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{18}(h_{19} - h_{18})$ $\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{15}h_{15} - \dot{m}_{10}h_{10}$ جاذب
$\dot{E}_{DEV2} = \dot{E}_{14} - \dot{E}_{15}$	$h_{14} = h_{15}$ شیر انبساط ۲
$\dot{E}_{D,Pum} = \dot{W}_{Pum} - (\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10})$	$\dot{W}_{Pum} = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10}),$ $\eta_{is,Pum} = (h_{11s} - h_{10})/(h_{11} - h_{10})$ پمپ
$\dot{E}_{D,S.H.E} = (\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}) - (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11})$	$\dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14}) = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$ $\varepsilon_{S.H.E} = \frac{T_{13} - T_{14}}{T_{13} - T_{11}}$ مبدل حرارتی محلول
$\dot{E}_{D,Com} = \dot{W}_{Com} - (\dot{E}_3 - \dot{E}_8)$	$\dot{W}_{Com} = \dot{m}_3(h_3 - h_8)$ $\eta_{P,Com} = (h_{3s} - h_8)/(h_3 - h_8)$ کمپرسور
$\dot{E}_{D,Eva} = (\dot{E}_7 - \dot{E}_8) - (\dot{E}_{23} - \dot{E}_{22})$	$\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$ $\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_{22}(h_{22} - h_{23})$ اوپراتور
$\dot{E}_{D,EV2} = \dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$h_6 = h_7$ شیر انبساط ۱
$\dot{E}_{D,Hea} = (\dot{E}_{17} - \dot{E}_{31}) - (\dot{E}_{25} - \dot{E}_{24})$	$\dot{Q}_{Hea} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{31})$ $\dot{Q}_{Hea} = \dot{m}_{24}(h_{25} - h_{24})$ گرم کن
$\dot{E}_{D,PEM} = (\dot{E}_{26} + \dot{W}_{PEM}) - (\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28})$	از روابط ریاضی حاکم بر واحد الکترولایزر غشاء پروتونی الکترولایزر

در رابطه (۲۵)، $\dot{W}_{net}$ بیانگر کار خالص تولیدی می باشد و برابر است با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Tur} - \dot{W}_{Com} - \dot{W}_{Pu} - \dot{W}_{PEM} \quad (25)$$

۴- بهینه سازی سیستم پیشنهادی

در نرم افزار EES چندین روش کاربردی و مفید برای بهینه سازی وجود دارد که از جمله می توان به روش های الگوریتم مستقیم^۲،

با توجه به این موضوع، تعریف معیار عملکرد بر اساس قانون های اول و دوم ترمودینامیک یعنی نسبت عملکرد انرژی^۱ (EPR) و بازده انرژی (η_{exergy,total}) به صورت زیر تعریف شده است.

$$EPR = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{cooling} + \dot{Q}_{Heating} + \dot{m}_{27}LHV_{H_2}}{\dot{Q}_{SG} + \dot{Q}_{Hea}} \quad (23)$$

² Direct algorithm

¹ Energy Performance Ratio

جدول ۴ محدوده در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصمیم‌گیری

پارامتر	مقدار
دمای ورودی منبع حرارتی	$400 \leq T_{in,HS} \text{ (K)} \leq 450$
دبی جرمی ورودی منبع حرارتی	$0.1 \leq \dot{m}_{HS} \leq 0.5$
اختلاف دمای گرم ژنراتور بخار	$10 \leq \Delta T_{hot,SG} \text{ (K)} \leq 20$
غلظت آمونیاک خروجی جاذب	$0.55 \leq X_{ammonia} \leq 0.67$
دمای خروجی	$315 \leq T_{absorber} \text{ (K)} \leq 335$
فشار ورودی به توربین	$15 \leq P_{in,Tur} \text{ (bar)} \leq 25$
دمای اواپراتور	$275 \leq T_{Eva} \text{ (K)} \leq 290$

۵- یافته‌ها

۵-۱- اعتبارسنجی

۵-۱-۱- اعتبارسنجی چرخه تولید توان جذبی

به‌منظور نشان دادن دقت روابط ارائه شده و صحت مدل‌سازی کد نوشته شده در نرم‌افزار EES، چرخه توان جذبی با سیال کاری آب-آمونیاک با مطالعه تئوری شوکاتی و همکاران [۱۶] تحت شرایط یکسان مقایسه و درصد خطای نسبی بین دو مطالعه در جدول (۵) بیان شده است. با توجه به این که تمامی درصد خطای ارائه شده برای پارامترهای عملکردی چرخه توان جذبی بین دو مطالعه در جدول (۵) زیر ۵ درصد می‌باشد، بنابراین مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

۵-۱-۲- اعتبارسنجی واحد الکترولایزر غشاء پروتونی

در ادامه به‌منظور نشان دادن درستی مدل واحد تولید هیدروژن، شکل (۲)، تغییرات پتانسیل سلول^۳ (V) را با افزایش چگالی جریان^۴ (J) نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۲)، روابط به کار برده شده و کد نوشته شده بر اساس روابط ریاضی ارائه شده به‌اندازه کافی دقیق بوده و می‌توان با اعمال فرضیات در نظر گرفته شده در واقعیت نیز به نتایج حاصل از شبیه‌سازی استناد کرد.

روش کمکی متغیر^۱، روش مسیره‌های توأمان^۲ و غیره اشاره نمود. در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. پارامترهای موردنیاز در فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) ارائه شده‌اند. این پارامترها شامل تعداد افراد در جمعیت، تعداد نسل‌ها، حداکثر نرخ جهش، حداقل نرخ جهش، نرخ جهش اولیه و احتمال تقاطع هستند. پارامترهای ورودی بهینه‌سازی در این پژوهش بر اساس اثر قابل توجه آن‌ها بر عملکرد سیستم و اهمیت ترمودینامیکی‌شان انتخاب شده‌اند، زیرا تغییرات هر یک از این پارامترها تأثیر مستقیمی بر بازده انرژی، بازده انرژی و نرخ تولید محصولات دارد. سه پارامتر نخست به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار، بر اساس مرجع [۳۱] انتخاب شده‌اند، در حالی که سه پارامتر دیگر به‌صورت پیش‌فرض توسط نرم‌افزار تعیین می‌شوند و قابلیت تغییر ندارند.

در این پژوهش دو پارامتر خروجی، یعنی EPR و $\eta_{exergy,total}$ سیستم به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند و دمای کاری منبع حرارتی، آهنگ جرمی جریان منبع حرارتی، فشار بالای توربین، دمای خروجی جاذب، غلظت آمونیاک در خروجی جاذب، اختلاف دمای گرم ژنراتور و دمای خروجی اواپراتور به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در محدوده موردنظر مطابق با جدول (۴) انتخاب شده‌اند. مشخصاً هدف اصلی از بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی، حداکثر کردن بازده انرژی و سیستم است. در بهینه‌سازی تک‌هدف سیستم تولید همزمان ارائه شده، توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری به این صورت در نظر گرفته شده‌اند:

$$\text{Maximize , } EPR \text{ or } \eta_{exergy,total} \quad (26)$$

$$(T_{in,HS}, \dot{m}_{HS}, \Delta T_{hot,SG}, X_{ammonia}, T_{absorber}, P_{in,Tur}, T_{Eva})$$

جدول ۳ پارامترهای الگوریتم ژنتیک [۳۱]

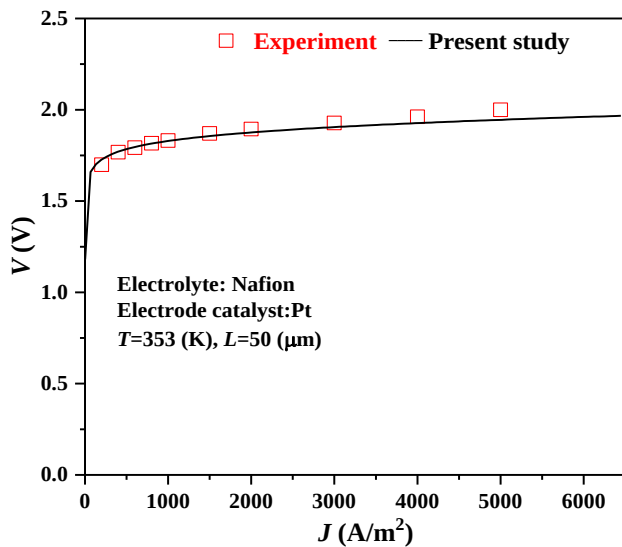
پارامتر	مقدار
تعداد افراد در جمعیت	۳۲
تعداد نسل‌ها	۶۴
حداکثر نرخ جهش	۰/۲۵
حداقل نرخ جهش	۰/۰۰۰۵
نرخ جهش ابتدایی	۰/۲۵
احتمال تقاطع	۰/۸۵

^۳ Cell potential

^۴ Current density

^۱ Variable metric method

^۲ Conjugate directions method



شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی چرخه الکترولایزر غشاء پروتونی بین مرجع [۲۴] و مطالعه حاضر تحت شرایط یکسان

جدول ۵ اعتبارسنجی چرخه توان جذبی با مرجع [۱۷]

پارامتر خروجی	مطالعه حاضر	مرجع [۱۳]	خطای نسبی %
بازده قانون اول	۱۰/۷۲	۱۰/۷۱	۰/۱۸۶
دبی جرمی بخار آمونیاک عبوری از توربین (kg/s)	۴/۴۲۳	۴/۳۵۶	۱/۵۳
ظرفیت ژنراتور بخار (MW)	۹/۳۵۲	۹/۳۳۵	۰/۱۸۲
فشار کاری جاذب (bar)	۴/۰۵۸	۴/۰۵۸	۰
کار مصرفی پمپ (kW)	۴۷/۵۶	۴۸/۲۷	۱/۴۷
کار تولیدی توربین (kW)	۱۰۴۸	۱۰۴۸	۰

۵-۲- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

در این بخش از مطالعه با استفاده از فرضیات ترمودینامیکی ذکر شده در بخش قبلی و روابط موازنه جرم، انرژی، اگزرژی ارائه شده برای تک تک اجزای سیستم تولید چندگانه پیشنهادی نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اولین قدم برای تحلیل عملکرد سیستم ارائه شده، محاسبه خواص ترمودینامیکی مهم نظیر: دما، فشار، آنتالپی، آنتروپی، آهنگ جریان جرم، آهنگ اگزرژی جریان برای هر یک از نقاط سیستم پیشنهادی است که مطابق با جدول (۶) گردآوری شده است. با در دست داشتن این خواص، می‌توان به پارامترهای مهم ارزیابی کلی سیستم دست یافت.

جدول ۶ خواص ترمودینامیکی نقاط سیستم پیشنهادی

مرحله	سیال کاری	دما T (K)	فشار P (bar)	آنتالپی h (kJ/kg ⁻¹)	آنتروپی s (kJ/kg ⁻¹ K ⁻¹)	دبی $\dot{m}$ (kg/s)	اگزرژی ویژه ex (kJ/kg ⁻¹)	آهنگ اگزرژی $\dot{Ex}$ (kW)
۱	آمونیاک	413.2	20	1758	5.79	0.3625	453	164.2
۲	آمونیاک	362.4	10.16	1656	5.84	0.3625	336.8	122.1
۳	آمونیاک	316.9	10.16	1538	5.49	0.1745	322.6	56.3
۴	آمونیاک	347.1	10.16	1618	5.731	0.537	330.7	177.6
۵	آمونیاک	298.6	10.16	319.7	1.415	0.537	319.4	171.5
۶	آمونیاک	298.6	10.16	319.7	1.415	0.1745	319.4	55.72
۷	آمونیاک	286	6.782	319.7	1.422	0.1745	317.5	55.39
۸	آمونیاک	286	6.782	1475	5.46	0.1745	268.4	46.84
۹	آمونیاک	298.6	10.16	319.7	1.415	0.3625	319.4	115.8
۱۰	آب-آمونیاک	323.2	10.16	0.2112	0.5916	0.821	60.22	49.44
۱۱	آب-آمونیاک	323.3	20	1.734	0.5923	0.821	61.53	50.52
۱۲	آب-آمونیاک	352.9	20	187.6	1.136	0.821	85.31	70.04

۱۳	آب-آمونیاک	413.2	20	437.7	1.75	0.4584	82.15	37.66
۱۴	آب-آمونیاک	339.5	20	104.9	0.8639	0.4584	13.41	6.147
۱۵	آب-آمونیاک	339.7	10.16	104.9	0.8672	0.4584	12.42	5.692
۱۶	بخار	423.2	4.757	2746	6.838	0.285	712.2	203
۱۷	بخار	355.9	4.757	347	1.108	0.285	21.17	6.034
۱۸	آب	298.2	1.013	104.8	0.3669	7.832	0	0
۱۹	آب	303.2	1.013	125.8	0.4365	7.832	0.1734	1.358
۲۰	آب	298.2	1.013	104.8	0.3669	3.793	0	0
۲۱	آب	342.1	1.013	288.6	0.9419	3.793	12.34	46.82
۲۲	آب	298.2	1.013	104.8	0.3669	5.265	0	0
۲۳	آب	289	1.013	66.57	0.2365	5.265	0.5996	3.157
۲۴	آب	298.2	1.013	104.8	0.3669	0.000379	0	0
۲۵	آب	353.2	1.013	335	1.075	0.000379	18.94	0.007173
۲۶	آب	353.2	1.013	335	1.075	0.01802	18.94	3.341
۲۷	هیدروژن	353.2	1.013	4723	55.81	0.000424	65.15	4.949
۲۸	آب-اکسیژن	353.2	1.013	50.5	1.058	0.01797	250.6	4.545
۲۹	اکسیژن	353.2	1.013	50.5	0.1556	0.000336	4.176	0.04294
۳۰	آب	353.2	1.013	50.5	0.1556	0.01764	8.662	0.1528
۳۱	بخار	355.9	4.757	346.7	1.107	0.285	21.12	6.019

جدول ۷ پارامترهای عملکردی سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی

مقادیر	پارامترها/نمادها
۱۱/۰۲	توان الکتریکی مصرفی کمپرسور، $\dot{W}_{Com}(kW)$
۱/۲۵	توان الکتریکی مصرفی پمپ، $\dot{W}_{Pu}(kW)$
۷/۳۵	توان الکتریکی مصرفی الکترولایزر، $\dot{W}_{PEM}(kW)$
۳۶/۷۴	توان الکتریکی تولیدی توربین، $\dot{W}_{Tur}(kW)$
۱۷/۱۲	توان الکتریکی خالص تولیدی سیستم، $\dot{W}_{net}(kW)$
۲۰۱/۵	میزان بار سرمایشی تبخیرکننده، $\dot{Q}_{Cooling}(kW)$
۶۹۷/۱	میزان بار گرمایشی چگالنده کننده، $\dot{Q}_{Heating}(kW)$
۰/۱۵۳	دبی هیدروژن تولیدی، $\dot{m}_{H_2}(m^3/h)$
۶۸۳/۹	آهنگ انرژی دریافتی از منبع انرژی دما پایین، $\dot{Q}_{Total}(kW)$
۱/۳۴۶	نسبت عملکرد انرژی سیستم تولید چندگانه، EPR
۳۶/۵۸	بازده انرژی کلی سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی، $\eta_{exergy,tot}(\%)$

در ادامه برخی از پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی تحت شرایط کاری پایه در جدول (۷) ارائه شده است. مطابق جدول (۶) چرخه توان جذبی سیستم تولید چندگانه به ازای دریافت $683/9 \text{ kW}$ انرژی از منبع حرارتی دما پایین توانایی تولید $36/74 \text{ kW}$ توان الکتریکی را دارد که از این مقدار توان الکتریکی در دسترس حدود $11/02 \text{ kW}$ توسط کمپرسور چرخه تبرید تراکمی، $1/25 \text{ kW}$ توسط سیستم پمپاژ و $7/35 \text{ kW}$ توسط الکترولایزر واحد تولید هیدروژن مصرف شده است، بنابراین، توان خالص تولیدی سیستم حدود $17/12 \text{ kW}$ می باشد. همچنین سیستم پیشنهادی به ترتیب، قابلیت تولید $201/5 \text{ kW}$ ، $697/1 \text{ kW}$ و $0/153 \text{ m}^3/h$ ظرفیت سرمایش، گرمایش و هیدروژن خالص را دارد. در نهایت، با توجه به مقادیر تولیدی سیستم پیشنهادی، نسبت بهره‌وری انرژی و بازده انرژی به ترتیب، $1/346$ و $36/58$ درصد به دست آمده است.

۵-۳- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

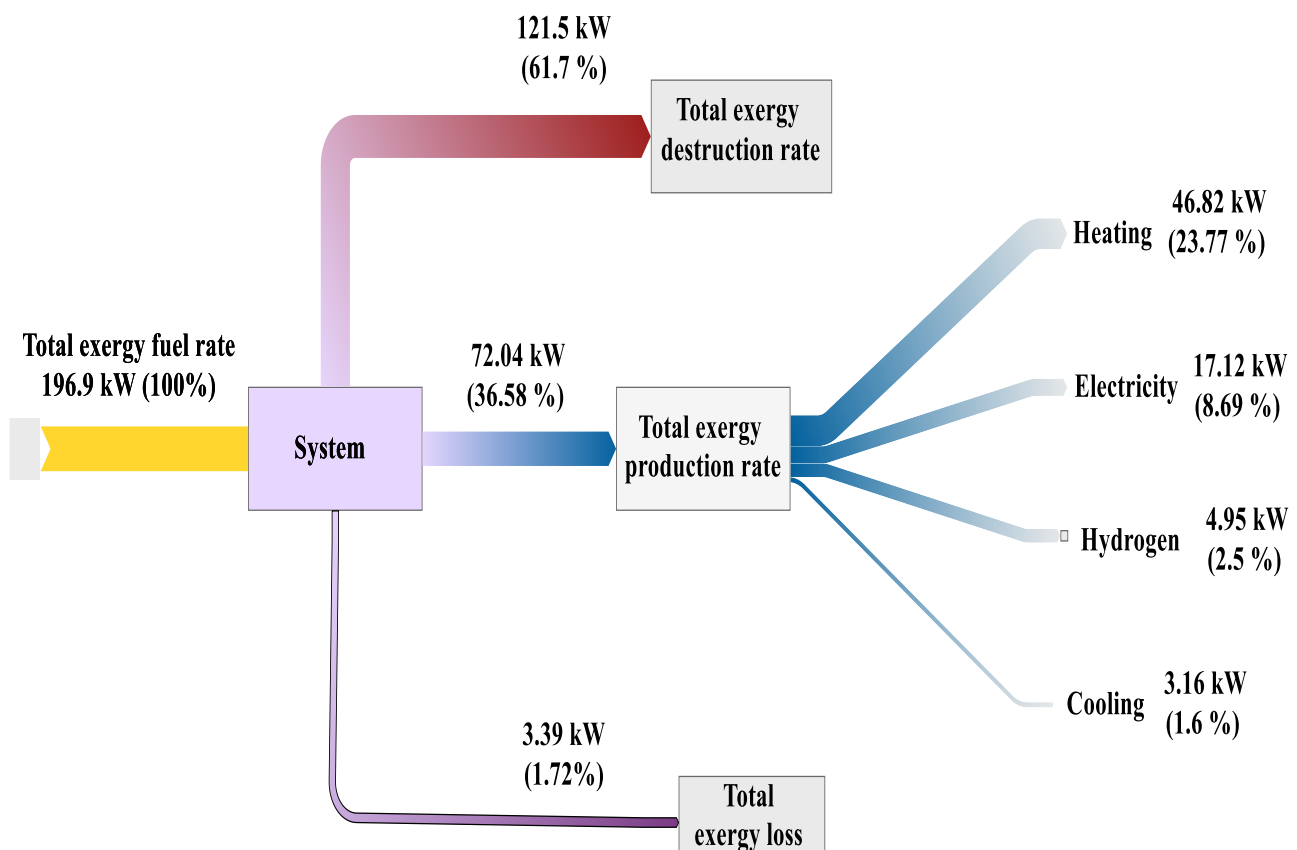
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جاذب به دلیل انجام فرآیند تبادل حرارت و جذب آمونیاک بیشترین مقدار تخریب انرژی را به خود اختصاص داده است. پس از جاذب، ژنراتور بخار بیشترین میزان تخریب انرژی را داراست که دلیل اصلی آن، وقوع فرآیند تبادل حرارت در دماهای بالا است.

۵-۴- نتایج حاصل از مطالعه پارامتری سیستم پیشنهادی

۵-۴-۱- تأثیر آهنگ گرمی منبع حرارتی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

شکل (۴) تأثیر افزایش دبی گرمی منبع حرارتی را بر توان خالص تولیدی، ظرفیت سرمایش تولیدی، ظرفیت گرمایش تولیدی، آهنگ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و آهنگ کل تخریب انرژی نشان می‌دهد. در شکل (۴-الف)، اثر افزایش دبی گرمی منبع حرارتی بر آهنگ محصولات تولیدی شامل ظرفیت سرمایش، ظرفیت گرمایش، توان خالص خروجی و آهنگ تولید هیدروژن در بازه ۰/۱ تا ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه بررسی شده است.

به‌منظور نشان دادن موازنه جریان‌های انرژی، نمودار گراسمان (۱) برای سیستم ارائه شده مطابق شکل (۳) رسم شده است. مطابق شکل، کل آهنگ انرژی سوخت ورودی برابر با 196.9 kW می‌باشد، که از این مقدار انرژی ورودی به سیستم، حدود 121.5 kW (61.7%) مربوط به آهنگ انرژی تخریب شده توسط اجزای سیستم می‌باشد. همچنین حدود 72.04 kW (36.58%) تبدیل به بار گرمایشی، توان الکتریکی، هیدروژن و بار سرمایشی تولیدی شده است که به ترتیب، سهم هریک برابر با 46.82 kW (23.77%)، 17.12 kW (8.69%)، 4.95 kW (2.5%) و 3.16 kW (1.6%) و 3.39 kW (1.72%) از کل سوخت ورودی می‌باشد و در نهایت، 3.39 kW (1.72%) از طریق جریان خروجی جاذب و پسماند واحد تولید هیدروژن به‌هدر رفته است. ارزیابی جامع عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در جدول (۸) گردآوری شده است. در این جدول مقادیر آهنگ انرژی سوخت، آهنگ انرژی تخریب و آهنگ انرژی محصولات هر یک از اجزای سیستم، به‌همراه سهم هر کدام از اجزای سیستم از سوخت ورودی ارائه شده است.



شکل ۳ نمودار موازنه جریان‌های انرژی سیستم پیشنهادی

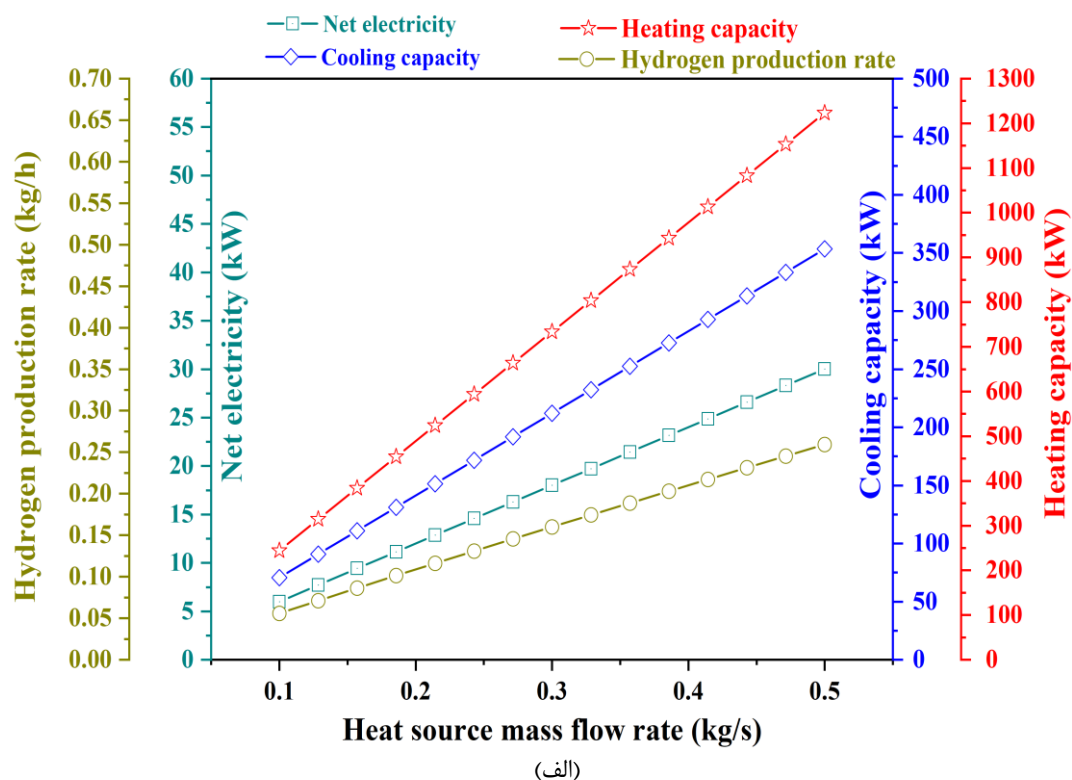
جدول ۸ مقادیر آهنگ انرژی ورودی، تولیدی و تخریب اجزای سیستم ترکیبی

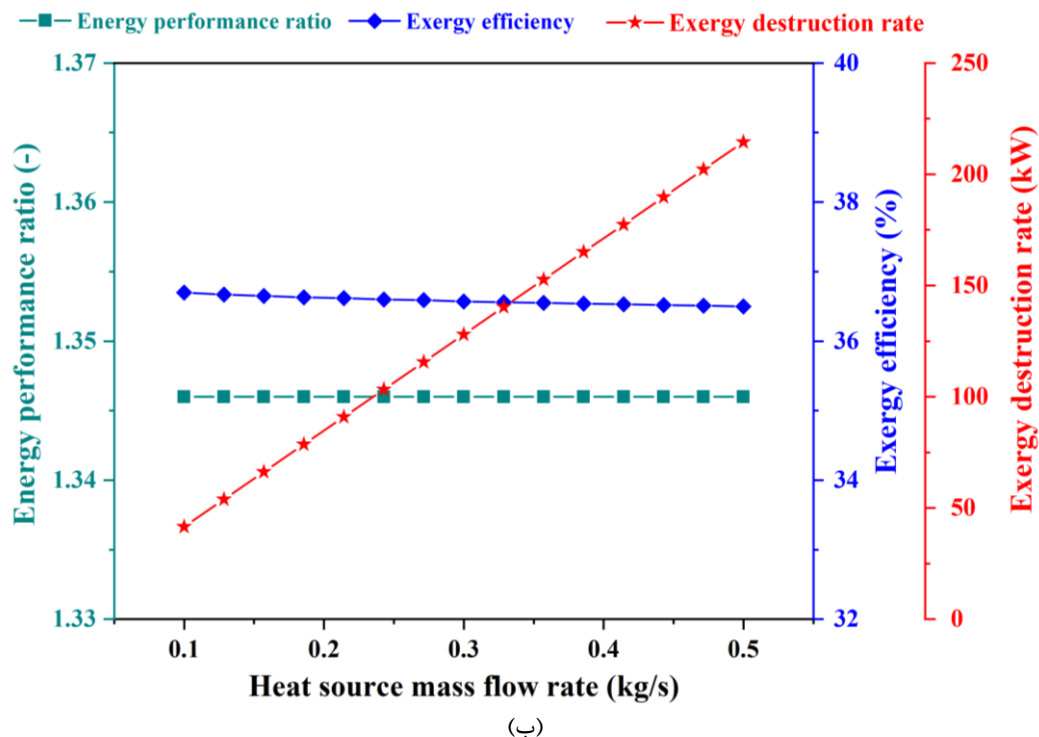
اجزای سیکل	$\dot{E}x_F$ (kw)	$\dot{E}x_P$ (kw)	$\dot{E}x_D$ (kw)	η_{ex} (%)	y_D (%)
ژنراتور بخار	۱۹۶/۹۰	۱۳۱/۹۰	۶۵/۰۷	۶۶/۹۹	۳۳/۰۵
توربین	۴۲/۱۲	۳۶/۷۴	۵/۳۹	۸۷/۲۳	۲/۷۴
مبدل حرارتی محلول	۳۱/۵۱	۱۹/۵۲	۱۱/۹۹	۶۱/۹۵	۶/۰۹
پمپ	۱/۲۵	۱/۰۸	۰/۱۷	۸۶/۱۶	۰/۰۹
شیر فشارشکن (۲)	۶/۱۵	۵/۶۹	۰/۴۵	۹۲/۶۰	۰/۲۳
جاذب	۷۲/۰۳	۱/۳۶	۷۰/۶۷	۱/۸۹	۳۵/۸۹
چگالنده	۴۸/۰۹	۴۶/۸۲	۱/۲۷	۹۷/۳۵	۰/۶۵
تبخیر کننده	۸/۵۵	۳/۱۶	۵/۴۰	۳۶/۹۲	۲/۷۴
کمپرسور	۱۱/۰۲	۹/۴۶	۱/۵۶	۸۵/۸۲	۰/۷۹
شیر فشارشکن (۱)	۵۵/۷۲	۵۵/۳۹	۰/۳۳	۹۹/۴۱	۰/۱۷
الکترو لایزر	۱۰/۶۹	۹/۴۹	۱/۱۹	۸۸/۸۱	۰/۶۱
گرم کن	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۵۰/۶۹	۰/۰۰
جدا کننده اکسیژن	۴/۵۵	۰/۲	۴/۳۵	۴/۳۱	۲/۲۱
کل	۱۹۶/۹	۷۲/۰۴	۱۲۱/۵	۳۶/۵۸	۶۱/۷

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی، ظرفیت تولید سرما، ظرفیت تولید گرما و همچنین توان خالص تولیدی افزایش می یابد. دلیل این موضوع، افزایش دبی جرمی در چرخه تبرید تراکمی و نیز افزایش دبی جرمی در چرخه توان جذبی است.

ظرفیت هیدروژن تولیدی نیز رابطه مستقیم با توان تولیدی دارد و با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی از ۰/۰۵۶ kg/h به ۰/۲۵۹ kg/h افزایش یافته است.

شکل (۴-ب)، تأثیر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولید چندانگانه، بازده انرژی کل و آهنگ تخریب انرژی نشان می دهد. نسبت عملکرد انرژی سیستم، مطابق رابطه، به میزان محصولات تولیدی و انرژی ورودی به سیستم وابسته است که با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی هر دو پارامتر به طور همزمان افزایش یافته و بنابراین، نسبت عملکرد انرژی سیستم تقریباً ثابت باقی مانده است. بازده انرژی نیز به آهنگ انرژی محصولات و میزان آهنگ انرژی سوخت ورودی بستگی دارد که با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی هر دو به یک میزان افزایش داشته و بنابراین، بازده انرژی تقریباً ثابت باقی مانده است. در نهایت، آهنگ تخریب انرژی کل به دلیل افزایش تخریب انرژی اجزای سیستم به طور فزاینده ای افزایش یافته است.





شکل ۴ تأثیر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

تأمین می‌شود که با کاهش توان تولیدی آن میزان هیدروژن نیز کاهش می‌یابد. با افزایش فشار خروجی توربین، دمای خروجی آن نیز افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث افزایش دمای کاری چگالنده می‌شود و همچنین به دلیل کاهش دبی چرخه تبرید تراکمی، دبی عبوری از چگالنده کاهش می‌یابد و در نتیجه، ظرفیت گرمایش تولیدی سیستم نیز کاهش می‌یابد.

شکل (۵-ب)، تأثیر افزایش دمای خروجی جاذب را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولیدچگالنده، بازده انرژی کل و آهنگ تخریب انرژی نشان می‌دهد. نسبت عملکرد انرژی سیستم، مطابق رابطه، به میزان محصولات تولیدی و انرژی ورودی به سیستم وابسته است که با افزایش دمای جاذب میزان محصولات تولیدی سیستم کاهش می‌یابد، در حالی که انرژی ورودی ثابت است، که باعث کاهش قابل توجه نسبت عملکرد انرژی می‌شود.

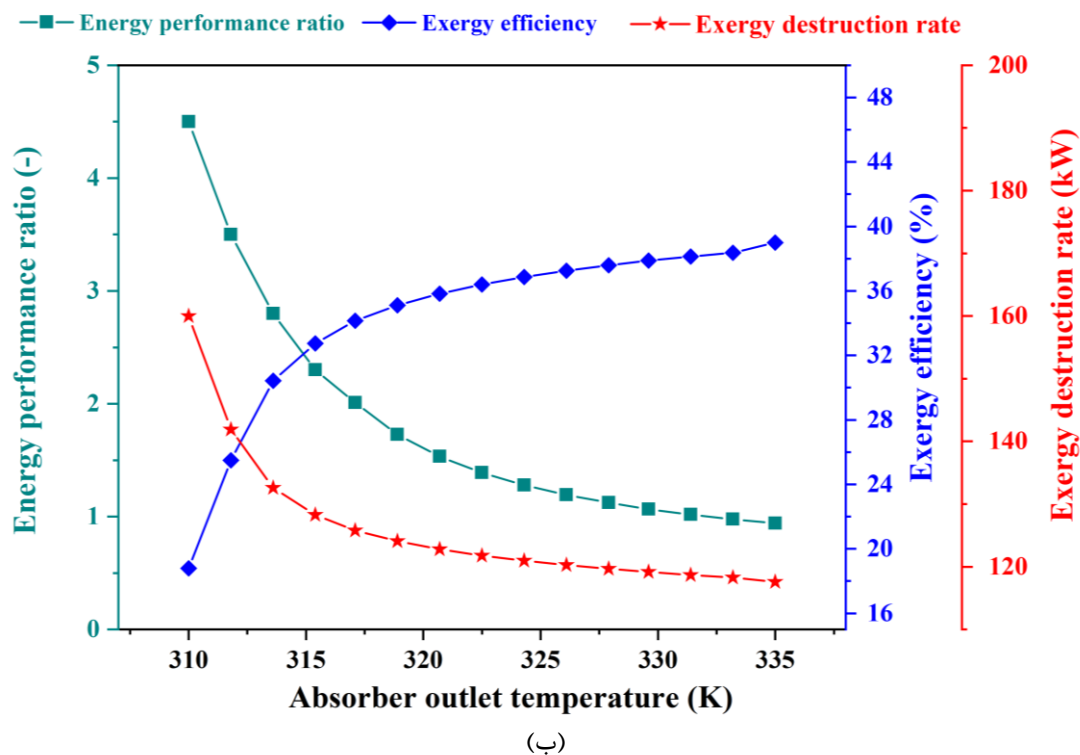
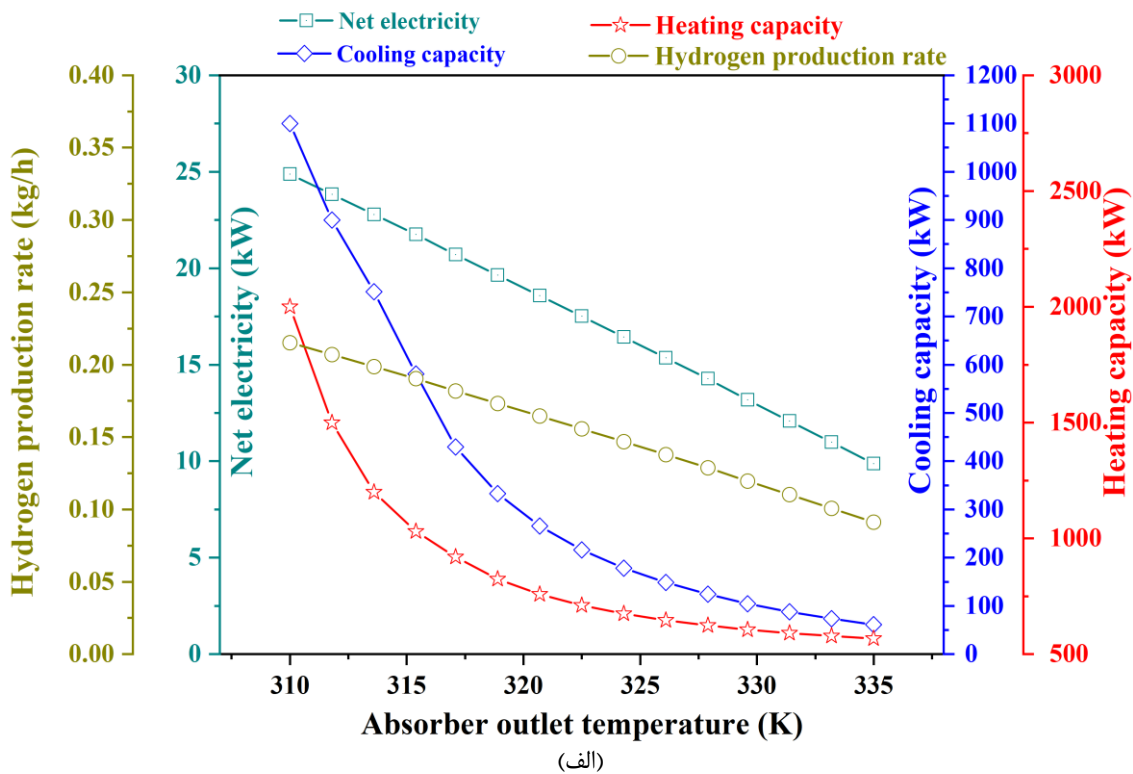
همان‌طور که اشاره شد، افزایش فشار خروجی توربین باعث افزایش دمای کاری چگالنده و در نتیجه، افزایش کیفیت و انرژی جریان عبوری آن شده، بنابراین افزایش آهنگ انرژی تولیدی چگالنده بر کاهش آهنگ انرژی سایر محصولات غالب بوده و با افزایش کاری جاذب، بازده انرژی افزایش می‌یابد. در نهایت، آهنگ تخریب انرژی کل به دلیل کاهش تخریب انرژی اجزای سیستم نیز کاهش می‌یابد.

۵-۴-۲- تأثیر افزایش دمای کاری جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

شکل (۵) تأثیر افزایش دمای کاری جاذب را بر توان خالص تولیدی، ظرفیت سرمایش تولیدی، ظرفیت گرمایش تولیدی، آهنگ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و آهنگ کل تخریب انرژی نشان می‌دهد.

در شکل (۵-الف)، اثر دمای خروجی جاذب بر آهنگ محصولات تولیدی شامل ظرفیت سرمایش، ظرفیت گرمایش، ظرفیت تولید هیدروژن و توان خالص خروجی در بازه دمایی ۳۰۵ تا ۳۳۵ کلوین بررسی شده است.

افزایش دمای کاری جاذب موجب افزایش فشار پایینی سیستم می‌شود، که در نتیجه فشار و آنتالپی خروجی توربین افزایش یافته و اختلاف آنتالپی در دو سر توربین کاهش می‌یابد. بنابراین، توان الکتریکی تولیدی توربین کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه توان مصرفی کمپرسور با نسبت مشخصی از توان توربین تعریف شده است، کاهش توان تولیدی توربین باعث کاهش توان مصرفی کمپرسور و کاهش دبی جرمی عبوری از تبخیرکننده می‌شود، که نهایتاً منجر به کاهش ظرفیت سرمایش تولیدی می‌گردد. از طرفی، توان مورد نیاز برای واحد تولید هیدروژن به‌طور مستقیم از توربین چرخه توان جذبی



شکل ۵ تأثیر افزایش دمای کاری جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

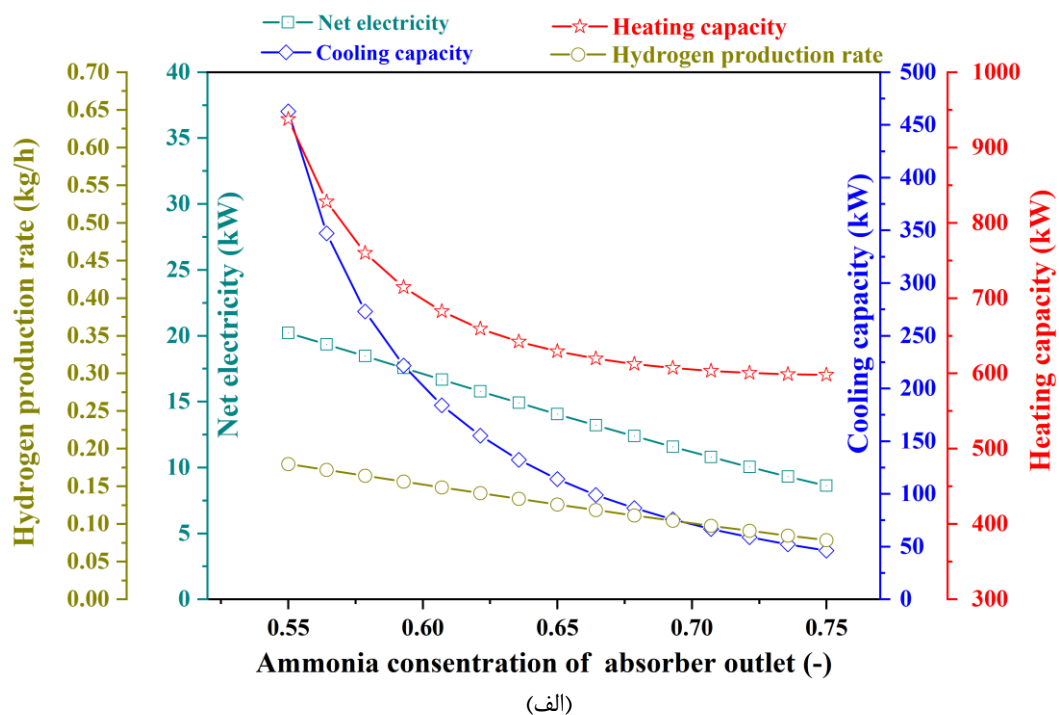
تولیدی، ظرفیت سرمایش و گرمایش، نرخ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و میزان کل تخریب انرژی. همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب در بازه ۰/۷۵ تا ۰/۸۵، فشار پایینی سیستم افزایش می‌یابد. این افزایش فشار، فشار و آنتالپی

۵-۴-۳- تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

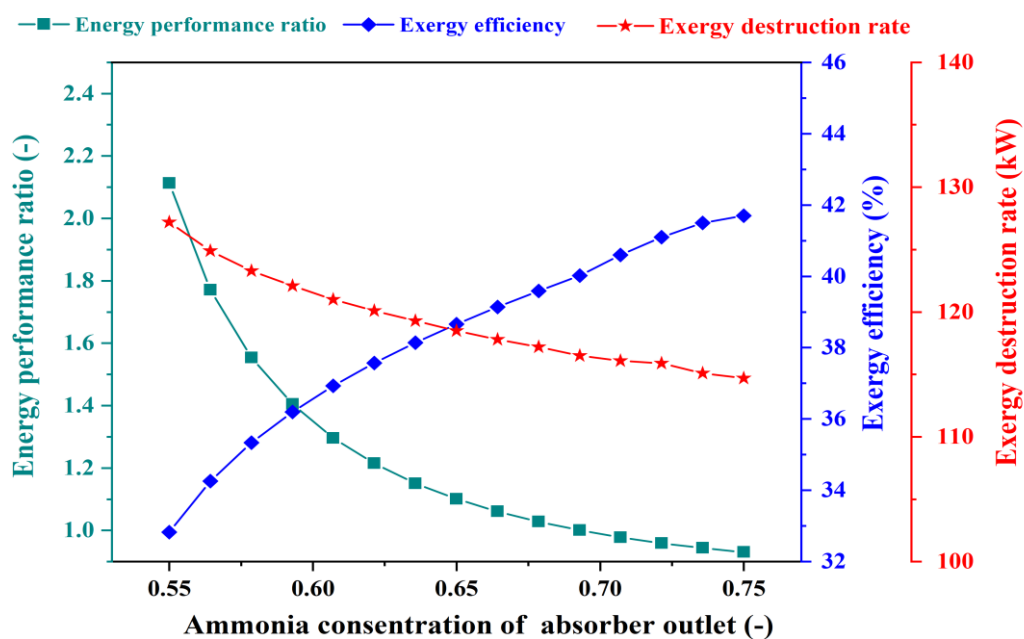
شکل (۶) تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب بر عملکرد سیستم را از جنبه‌های مختلف نشان می‌دهد؛ شامل توان خالص

افزون بر این، افزایش فشار خروجی توربصصین باعث افزایش دمای خروجی آن شده و در پی آن، دمای کاری چگالنده نیز افزایش می‌یابد. همزمان، کاهش دبی چرخه تبرید تراکمی موجب کاهش دبی عبوری از چگالنده می‌شود و در نتیجه ظرفیت گرمایش تولیدی سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین، تغییر غلظت آمونیاک خروجی جاذب اثرات متعددی بر عملکرد کل سیستم دارد که هم شامل توان و سرمایش و گرمایش و هم شامل تولید هیدروژن و بازده انرژی می‌شود.

خروجی توربین را بالا می‌برد و اختلاف آنتالپی در دو سر توربین کاهش می‌یابد، که در نهایت منجر به کاهش توان الکتریکی تولیدی توربین می‌شود. با توجه به اینکه توان مصرفی کمپرسور بر اساس نسبت مشخصی از توان توربین تعیین می‌شود، کاهش توان توربین باعث کاهش توان مصرفی کمپرسور و کاهش دبی جرمی عبوری از تبخیرکننده می‌شود؛ نتیجه آن کاهش ظرفیت سرمایش تولیدی سیستم است. همچنین، واحد تولید هیدروژن که مستقیماً به توان توربین وابسته است، با کاهش توان توربین، کاهش تولید هیدروژن را تجربه می‌کند.



(الف)



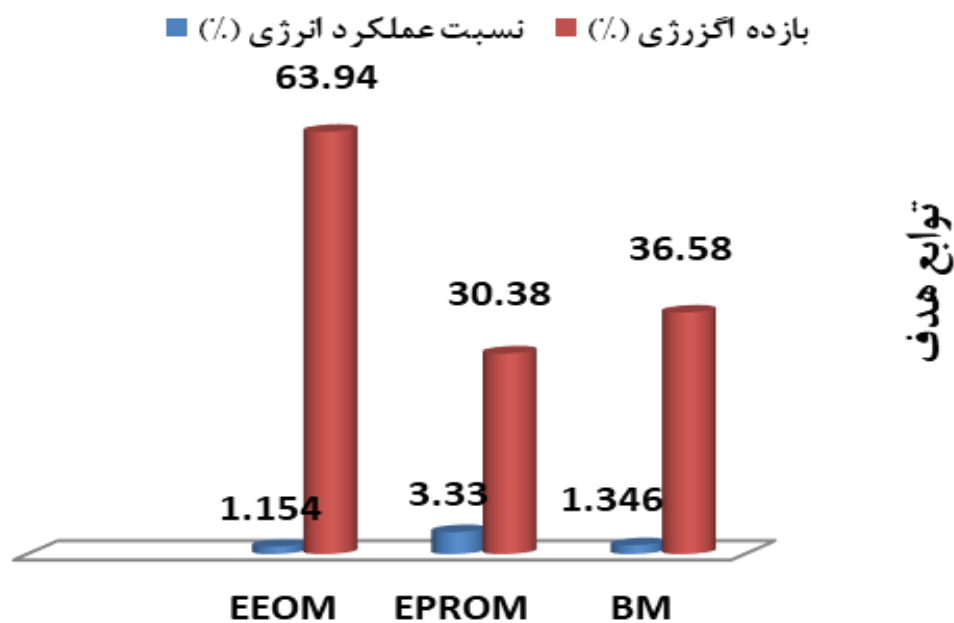
(ب)

شکل ۶ تأثیر افزایش غلظت آمونیاک جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

۵-۵- نتایج بهینه‌سازی سیستم

در این بخش از پژوهش، به‌منظور بهبود عملکرد سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی از دیدگاه انرژی و اگزرژی، بهینه‌سازی تک‌هدفه بر اساس متغیرهای تصمیم و توابع هدف، انجام شده است. به‌این‌منظور، دو حالت مطالعاتی تک‌هدفه شامل بهینه‌سازی نسبت عملکرد انرژی (EPROM)^۱ و بهینه‌سازی بازده اگزرژی (EEOM)^۲ انجام و با حالت پایه (BM) مقایسه شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشانگر عملکرد مطلوب بهینه‌سازی بوده، به‌گونه‌ای که در بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت عملکرد انرژی از ۱/۳۴۶ در حالت پایه به ۳/۳۳ در حالت بهینه افزایش یافته و در بهینه‌سازی مبتنی بر بازده اگزرژی این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا می‌یابد (شکل (۷) و جدول (۹)).

شکل (۶ ب)، تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولیدچندگانه، بازده اگزرژی کل و آهنگ تخریب اگزرژی نشان می‌دهد. با افزایش غلظت آمونیاک، میزان محصولات تولیدی سیستم کاهش می‌یابد در حالی که انرژی ورودی ثابت باقی می‌ماند؛ این موضوع منجر به کاهش قابل‌توجه نسبت عملکرد انرژی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، افزایش فشار خروجی توربین باعث افزایش دمای کاری چگالنده و در نتیجه بهبود کیفیت و اگزرژی جریان عبوری از آن می‌شود. بنابراین، افزایش آهنگ اگزرژی تولیدی چگالنده اثر غالبی بر کاهش آهنگ اگزرژی سایر محصولات دارد و در نتیجه با افزایش غلظت آمونیاک، بازده اگزرژی سیستم افزایش می‌یابد. در نهایت، آهنگ کل تخریب اگزرژی نیز به دلیل کاهش تخریب اگزرژی اجزای سیستم کاهش می‌یابد.



شکل ۷ نتایج حاصل از بهینه‌سازی و مقایسه آن با حالت پایه

جدول ۹ نتایج حاصل از بهینه‌سازی

EEOM	EPROM	BM	متغیرهای تصمیم و پارامترهای عملکردی سیستم
۰	۱	۰	ضریب وزنی، W_1
۱	۰	۰	ضریب وزنی، W_2
۴۴۱/۴	۴۳۵/۲	۴۲۳/۱۵	$T_{in,HS}$ (K)
۰/۱۰۲	۰/۱	۰/۲۸۵	$\dot{m}_{HS}$ (kg/s)
۱۰/۲۸	۱۱/۲	۱۰	$\Delta T_{hot,SH}$ (K)

^۲ Exergy Efficiency Optimal Mode^۱ Energy Performance Ratio | Optimal Mode

۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۶	$X_{ammonia} (-)$
۳۲۵/۷	۳۲۵	۳۲۳/۱۵	$T_{absorber} (K)$
۱۵/۹۶	۲۵	۲۰	$P_{in,Tur}(\text{bar})$
۲۸۹/۳	۲۹۰	۲۸۶	$T_{Eva} (-)$
۲/۴۴	۵/۴۰	۱۱/۰۲	$\dot{W}_{Com}(\text{kW})$
۰/۱۹۷	۰/۷۷	۱/۲۵	$\dot{W}_{Pu}(\text{kW})$
۱/۶۳	۳/۶	۷/۳۵	$\dot{W}_{PEM}(\text{kW})$
۸/۱۴	۱۷/۹۹	۳۶/۷۴	$\dot{W}_{Tur}(\text{kW})$
۳/۸۷	۸/۲۵	۱۷/۱۲	$\dot{W}_{net}(\text{kW})$
۵۰/۲۲	۳۰۳/۴	۲۰۱/۵	$\dot{Q}_{Cooling}(\text{kW})$
۲۳۳/۱	۴۶۵/۴	۶۹۷/۱	$Q_{Heating}(\text{kW})$
۰/۰۳۶	۰/۰۷۷	۰/۱۵۳	$\dot{m}_{H_2}(m^3/h)$
۲۵۰	۲۳۴/۰۴	۶۸۳/۹	$\dot{Q}_{Total}(\text{kW})$
۷۷/۸	۱۴۵/۱	۱۹۶/۹	$\dot{E}x_{F,total}(\text{kW})$
۲۵/۴۸	۹۶/۸۱	۱۲۱/۵	$\dot{E}x_{D,total}(\text{kW})$
۴۹/۷۴	۴۴/۴	۷۲/۰۴	$\dot{E}x_{P,total}(\text{kW})$
۲/۵۷	۳/۵۸	۳/۳۸	$\dot{E}x_{L,total}(\text{kW})$

۶- بحث و نتیجه گیری

- در حالت پایه، مقدار کل آهنگ انرژی سوخت ورودی از طریق منابع دما پایین برابر با $196/9 \text{ kW}$ می باشد، که از این مقدار انرژی $121/5 \text{ kW}$ ($61\%/7$) از طریق اجزای سیستم تخریب شده و از بین می رود، همچنین ظرفیت $3/39 \text{ kW}$ ($1\%/72$) از طریق آب خنک کن جاذب و پسماند واحد تولید هیدروژن بدون استفاده باقی مانده هدر می رود و حدود $49/74 \text{ kW}$ ($25\%/58$) مربوط به آهنگ انرژی محصولات تولیدی می باشد.

• سهم کل بار گرمایشی، توان الکتریکی، هیدروژن و بار سرمایشی تولیدی از کل آهنگ انرژی ورودی به ترتیب، برابر با $46/82 \text{ kW}$ ($23\%/77$)، $17/12 \text{ kW}$ ($8\%/69$)، $4/95 \text{ kW}$ ($2\%/5$) و $3/16 \text{ kW}$ ($1\%/6$) می باشد.

• با افزایش مقدار دبی جرمی ورودی منبع حرارتی، نرخ تولیدات و آهنگ تخریب انرژی افزایش یافته است، در حالی که، عملکرد انرژی و بازده انرژی به دلیل افزایش مصرف انرژی به میزان اندکی کاهش یافته اند.

• در مقادیر پایین غلظت آمونیاک خروجی جاذب، سیستم دارای نرخ تولیدات بالا همراه با نسبت عملکرد انرژی بالا می باشد

در این پژوهش، یک سیستم ترمودینامیکی جدید با قابلیت تولید محصولات متنوع از منابع حرارتی با دمای پایین ارائه شده است. برای این سیستم، تحلیل های دقیق انرژی و انرژی انجام گرفته و نمودار گراسمان، که نتایج کلی حاصل از تحلیل انرژی را نشان می دهد، ترسیم شده است. همچنین، به منظور دستیابی به حالت بهینه عملکرد سیستم پیشنهادی، بهینه سازی تک هدفه بر اساس الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در ادامه، برای بررسی رفتار پارامترهای عملکردی سیستم در اثر تغییر شرایط طراحی، مطالعه پارامتری انجام شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده از تحلیل سیستم پیشنهادی عبارتند از:

- در حالت پایه، وقتی که سیستم تحت شرایط طراحی اولیه کار می کند، توانایی تولید $17/12 \text{ kW}$ توان خالص الکتریکی و $201/5 \text{ kW}$ ، $697/1 \text{ kW}$ و $0/153 \text{ m}^3/\text{h}$ به ترتیب، ظرفیت سرمایش، گرمایش و هیدروژن خالص از $683/9 \text{ kW}$ انرژی ورودی را دارد. به طوری که نسبت بهره وری انرژی و بازده انرژی به ترتیب، $1/346$ و $36/58\%$ به دست آمده است.

and desalination." *International Journal of Thermofluids* 25 (2025): 101046.
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101046>

[5] Shahad, Haroun AK, Abdulkhodor Kathum Nassir, and Ali M. Tukkee. "Experimental and theoretical analysis for the enhancement of Kalina cycle by the addition of heat exchangers." *Applied Thermal Engineering* (2025): 127701.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127701>

[6] Dubey, Rakesh, et al. "Thermodynamic performance evaluation of low-GWP working fluids combined with polymeric material in advanced organic rankine cycle configurations." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 3045. No. 1. IOP Publishing, 2025.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/3045/1/012011>

[7] R. K. Jurgen, "The promise of the Kalina cycle: Using an ammonia-water mixture, the Kalina steam cycle may permit thermal-mechanical-electrical energy conversion efficiencies of 45 percent," *IEEE Spectrum*, vol. 23, pp. 68–70, 1986,
<https://doi.org/10.1109/MSPEC.1986.6370873>.

[8] B. F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, and G. Papadakis, "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3963–3979, 2011,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>.

[9] B. F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, and A. Frangoudakis, "Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 2468–2476, 2009,
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>.

[10] E. Thorin, "Power cycles with ammonia-water mixtures as working fluid," *Kemiteknik*, 2000.

[11] A. Elsayed, M. Embaye, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, and A. Rezk, "Thermodynamic performance of Kalina cycle system 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 8, pp. i69–i78, 2013, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt020>.

[12] G. Demirkaya, R. Vasquez Padilla, A. Fontalvo, M. Lake, and Y. Y. Lim, "Thermal and exergetic analysis of the Goswami cycle integrated with mid-grade heat sources," *Entropy*, vol. 19, p. 416, 2017,
<https://doi.org/10.3390/e19080416>.

[13] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Exergo-environmental analysis of an integrated organic Rankine cycle for trigeneration," *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 447–453, 2012,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.001>.

که با افزایش غلظت میزان مقادیر فوق کاهش، اما عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم بهبود می‌یابد به‌طوری‌که بازده انرژی افزایش و آهنگ تخریب انرژی کاهش می‌یابد.

• در بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت عملکرد انرژی از ۱/۳۴۶ در حالت پایه به ۳/۳۳ در حالت بهینه افزایش یافته و در بهینه‌سازی مبتنی بر بازده انرژی این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا می‌یابد که نشانگر عملکرد مطلوب بهینه‌سازی می‌باشد.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که انرژی ورودی به شکل بهینه میان محصولات مختلف توزیع می‌شود؛ با این حال، بخشی از انرژی در اجزای سیستم تخریب شده و بخشی دیگر بدون استفاده باقی می‌ماند و تنها قسمتی به‌صورت انرژی مفید استخراج می‌گردد. تغییر پارامترهای عملیاتی مانند دبی جرمی و غلظت آمونیاک بر تعادل میان نرخ تولیدات و کارایی سیستم اثرگذار است؛ به‌طوری‌که افزایش دبی ورودی موجب افزایش تولید انرژی می‌شود، اما اندکی از بازده نسبی کاسته می‌شود. در مقابل، تنظیم غلظت آمونیاک می‌تواند بازده انرژی را بهبود بخشد. همچنین، بهینه‌سازی سیستم منجر به افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب انرژی شده و عملکرد کلی سیستم را به شرایط ایده‌آل ترمودینامیکی نزدیک‌تر می‌سازد.

۷- مراجع

- [1] A. Soroureddin, A. Mehr, S. Mahmoudi, and M. Yari, "Thermodynamic analysis of employing ejector and organic Rankine cycles for GT-MHR waste heat utilization: A comparative study," *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 125–137, Jan. 2013,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.015>.
- [2] V. Zare, S. Mahmoudi, and M. Yari, "On the exergoeconomic assessment of employing Kalina cycle for GT-MHR waste heat utilization," *Energy Conversion and Management*, vol. 90, pp. 364–374, Jan. 2015,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.039>.
- [3] M. Feili, H. Rostamzadeh, and H. Ghaebi, "A new high-efficient cooling/power cogeneration system based on a double-flash geothermal power plant and a novel zeotropic bi-evaporator ejector refrigeration cycle," *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 2126–2152, Jan. 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.011>.
- [4] Chandio, Mohammad Waqas, et al. "Thermodynamic, economic, and environmental evaluation of internal combustion engine exhaust gas-driven Organic Rankine cycles for power generation

- [22] L. Khani, A. S. Mehr, M. Yari, and S. S. Mahmoudi, "Multi-objective optimization of an indirectly integrated solid oxide fuel cell-gas turbine cogeneration system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 21470–21488, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.023>.
- [23] R. Z. Farahani, N. Asgari, and H. Davarzani, *Supply Chain and Logistics in National, International and Governmental Environment: Concepts and Models*, Springer Science & Business Media, 2009, <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2156-7>.
- [24] H. Ghaebi, B. Farhang, H. Rostamzadeh, and T. Parikhani, "Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of using city gate station (CGS) heater waste for power and hydrogen production: A comparative study," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 1855–1874, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.093>.
- [25] N. Garcia-Hernando, M. De Vega, A. Soria-Verdugo, and S. Sanchez-Delgado, "Energy and exergy analysis of an absorption power cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 55, pp. 69–77, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.044>.
- [26] H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, "A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis," *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 513–527, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.082>.
- [27] M. Feili, H. Rostamzadeh, T. Parikhani, and H. Ghaebi, "Hydrogen extraction from a new integrated trigeneration system working with zeotropic mixture, using waste heat of a marine diesel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 21969–21994, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.208>.
- [28] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2010.
- [29] I. Dincer and M. A. Rosen, "Exergy as a driver for achieving sustainability," *International Journal of Green Energy*, vol. 1, pp. 1–19, 2004, <https://doi.org/10.1081/GE-120027881>.
- [30] S. H. Mannaerts, "Extensive quantities in thermodynamics," *European Journal of Physics*, vol. 35, no. 3, p. 035017, 2014, <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/3/035017>.
- [31] M. Feili, H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, "Exergoeconomic analysis and optimization of a new combined power and
- [14] A. Baghernejad and M. Yaghoubi, "Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2193–2203, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>.
- [15] Y. Khan, R. S. Mishra, and A. P. Singh, "Performance comparison of organic Rankine cycles integrated with solar based combined cycle: A thermodynamic and exergoenvironmental analysis," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 1, pp. 233–248, 2024, <https://doi.org/10.1177/09544062231167069>.
- [16] N. Shokati, F. Ranjbar, and M. Yari, "A comparative analysis of rankine and absorption power cycles from exergoeconomic viewpoint," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 657–668, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.015>.
- [17] H. Ghaebi, M. Saidi, and P. Ahmadi, "Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm," *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, pp. 113–125, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.069>.
- [18] H. You, Y. Xiao, J. Han, A. Lysyakof, and D. Chen, "Thermodynamic, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses and optimization of a solid oxide fuel cell-based trigeneration system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 66, pp. 25918–25938, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.183>.
- [19] M. Rashidi, A. Aghagoli, and R. Raoofi, "Thermodynamic analysis of the ejector refrigeration cycle using the artificial neural network," *Energy*, vol. 129, pp. 201–215, 2017, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.089>.
- [20] M. Kheimi, S. K. Salamah, and H. A. Maddah, "Thermal design and zeotropic working fluids mixture selection optimization for a solar waste heat driven combined cooling and power system," *Chemosphere*, vol. 335, p. 139036, 2023, <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.139036>.
- [21] S. Zandi, K. G. Mofrad, A. Moradifaraj, and G. R. Salehi, "Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of a CPC driven solar combined cooling and power cycle with different working fluids," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 24, pp. 151–170, 2021, <https://doi.org/10.5541/ijot.873456>.

Progress, vol. 18, p. 100513, 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100513>

freshwater system driven by waste heat of a marine diesel engine," Thermal Science and Engineering

تحلیل ارتعاشات میکروورق های مدرج تابعی دو جهته با لحاظ کردن اثر اندازه بر اساس تئوری ردی

چکیده: تاکنون هیچ پژوهشی جهت بررسی رفتار مکانیکی سازه های کامپوزیتی مدرج تابعی دو جهته گزارش نشده است. در این مقاله، ارتعاشات آزاد میکروورق های مدرج تابعی دو جهته با استفاده از تئوری تنش کوپل اصلاح شده و تئوری بهینه یافته ردی برای اولین بار بررسی شده است. فرض می شود که تمام خواص مکانیکی به جز نسبت پواسون در امتداد عرض و ضخامت طبق توابع غیر خطی تغییر می کنند. به منظور در نظر گرفتن پارامتر اثر اندازه از تئوری تنش کوپل اصلاح شده استفاده شده است. معادلات حرکت با در نظر گرفتن اثرات برشی با استفاده از اصل همیلتون به دست آمده و سپس به روش نویر، معادلات حل شده است. پس از حل معادلات، فرکانس های ارتعاشی ورق مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیرات پارامترهایی مثل ابعاد میکروورق و اثرات اندازه بر روی فرکانس طبیعی آن مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج ارائه شده می تواند به عنوان معیارهایی برای تحلیل مکانیکی سازه های کامپوزیتی دو بعدی و سه بعدی مدرج تابعی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های راهنما: اثر اندازه، تئوری ورق ردی، میکروورق، تئوری تنش کوپل اصلاح شده، فرکانس طبیعی، مدرج تابعی دو جهته

داوود هوشیار

دانشجوی کارشناسی ارشد

عبدالرضا راستی طلب*

استادیار،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون،

داریون

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

Davood Hooshyar
MSc Student

Abdolreza
Rastitalab*

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering,
Darion Azad University,
Darion

Vibration analysis of bidirectional functionally graded microsheets considering size effect based on Reddy theory

Abstract: No research has been reported to investigate the mechanical behavior of bidirectional functionally graded composite structures. In this paper, the free vibrations of bidirectional functionally graded microplate are investigated for the first time using the modified coupled stress theory and the optimized Reddy theory. It is assumed that all mechanical properties except Poisson's ratio vary along the width and thickness according to nonlinear functions. In order to consider the size effect parameter, the modified coupled stress theory is used. The equations of motion are obtained by considering shear effects using Hamilton's principle and then the equations are solved using the Navier method. After solving the equations, the vibration frequencies of the sheet are analyzed and the effects of parameters such as microplate dimensions and size effects on its natural frequency are analyzed. The presented results can be used as criteria for the mechanical analysis of 2D and 3D functionally graded composite structures in the future.

Keywords: Size effect, Reddy sheet theory, Microsheet, Modified coupled stress theory, Natural frequency

۱- مقدمه

توصیف تغییرات مدول یانگ و چگالی پوسته‌های FG به کار گرفته شده‌اند.

صفحات ساخته شده از مواد مدرج تابعی کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی هوافضا، عمران و مکانیک پیدا کرده‌اند. برای برآورده کردن نیازهای گسترده صنعتی، این صفحات از بریدگی‌هایی با اشکال مختلف طراحی می‌شوند. علاوه بر این برای افزایش سفتی و کاهش وزن، این سازه‌ها با تیرها تقویت می‌شوند. با این حال، آنها اغلب در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند که می‌توانند باعث خم شدن، ارتعاش و به‌طور بالقوه منجر به آسیب خستگی شوند. بنابراین، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی این صفحات از طریق روش‌های مختلف به‌طور گسترده مشاهده شده است [۸-۱۰].

زمانی و همکارانش تحلیل مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت فشار داخلی را مورد بررسی قرار دادند. از روش حل مرزی به منظور تعیین تنش‌های طولی استفاده شده است. همچنین معادلات مکانیکی بر اساس روش سری‌های توانی تعیین گردیده شده است [۱۱].

ردی و همکارانش به آنالیز غیرخطی میکروتیرهای مدرج تابعی پرداخته‌اند. آنها تغییرات خواص مکانیکی میکروتیر را فقط در راستای ضخامت در نظر گرفتند. همچنین معادلات حرکت میکروتیرها را با در نظر گرفتن خواص مدرج تابعی تیرها بر اساس مدل دیفرانسیلی غیرموضعی ارینگن به‌دست آورده‌اند [۱۲].

آنالیز خمشی میکروورق‌های مدرج تابعی بر اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده توسط تای و همکارانش انجام گردیده است. آنالیز شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر شاخص توانی، خیز ورق افزایش یافته و با افزایش نسبت طول به ضخامت ورق، جابه‌جایی آن کاهش می‌یابد [۱۳].

منتاری و همکارانش به آنالیز استاتیکی ورق‌ها و پوسته‌های چندلایه با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر پرداختند. آنها معادلات حرکت را با استفاده از اصل همپلتون به‌دست آوردند و با استفاده از متد نویر معادلات را حل کردند. همچنین آنها بارهای خارجی وارد شده بر پوسته را به‌صورت سینوسی، گسترده و نقطه‌ای در نظر گرفتند. در پایان، نتایج به‌دست آمده را با سایر تئوری‌های مشابه مقایسه کردند [۱۴].

تحلیل خمشی میکروورق‌های مدرج تابعی بر اساس تئوری-های تغییرشکل برشی و تئوری تنش کوپل اصلاح شده توسط لی و همکارانش انجام شده است. تأثیر پارامترهای مختلف بر خیز سازه مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵].

تأکید روز افزون بر دستگاه‌های مینیاتوری پژوهشگران را بر آن ساخته است تا مشاهداتی عمیق‌تر به موادی داشته باشند که می‌توانند در مقیاس اتم مورد استفاده قرار گیرند. در این بین، سازه‌های در مقیاس نانو و میکرو مورد اهمیت بیشتری واقع شدند و توجه دانشمندان را در زمینه‌های مختلف فناوری نانو و میکرو سیستم‌های الکترومکانیک به خود جلب کرده‌اند. بیشتر ریزساختارها به‌عنوان مثال نانو و میکروورق‌ها، نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها جهت استفاده در سیستم‌های نانوالکترومکانیک ساخته شده‌اند. جهت اطمینان طولانی مدت به دستگاه‌هایی در ابعاد ریزساختارها، محققین باید درک عمیقی از فناوری نانو و خواص مکانیکی نانومواد داشته باشند [۱].

میکروورق‌ها به ورق‌هایی اطلاق می‌شود که ابعاد و اندازه‌های آنها در حدود میکرون هستند. میکروورق‌ها به خاطر شکلی که دارند خواص الکتریکی، مکانیکی، مغناطیسی و گرمایی خاصی دارند. به خاطر داشتن همین خواص به‌طور گسترده‌ای در وسایل میکروالکترومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو ارائه مدلی مناسب جهت تحلیل این اجزاء، برای یافتن پاسخ صحیح استاتیکی و دینامیکی بسیار شایان توجه است [۲].

مواد مدرج تابعی^۱ نوع جدیدی از مواد کامپوزیتی ناهمگن هستند که از مخلوطی از فلزات و سرامیک‌ها ساخته می‌شوند. از آنجایی که خواص مکانیکی مواد مدرج تابعی به‌طور مداوم در جهت ضخامت تغییر می‌کند، این نوع مواد خواص مؤثر شگفت‌انگیزی دارند. اگرچه تحقیقات کافی به خواص مکانیکی سازه‌های FG مانند صفحات و پوسته‌ها اختصاص داده شده است، که در آنها خواص مکانیکی آنها فقط در جهت ضخامت تغییر می‌کند، مطالعات کمی برای تجزیه و تحلیل رفتار مکانیکی سازه‌های FG دو بعدی گزارش شده است [۳].

در سازه‌های مدرج تابعی دوبعدی و سه‌بعدی، خواص مؤثر مواد FG به ترتیب در دو و سه جهت به‌طور مداوم یا نمایی تغییر می‌کنند. سازه‌هایی با مواد FG چند جهته، خواص مکانیکی شگفت‌انگیزی دارند که توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است.

توابع متعددی برای توصیف دقیق تغییرات خواص مکانیکی مواد FG وجود دارد. طبق نتایج پژوهش وانگ و همکاران [۴] تابع نمایی و تابع توزیع توانی دو شکل توزیع رایج هستند که می‌توانند تغییرات خواص مکانیکی مواد تابعی را به‌طور دقیق توصیف کنند [۵-۷]. بنابراین در این مقاله، توابع نمایی برای

^۱ Functionally graded

برشی با در نظر گرفتن تئوری تغییر شکل برشی غیر خطی لحاظ می‌شود. روابط تنش-کرنش در این مقاله، بر اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده لحاظ می‌گردد. همچنین میدان جابه‌جایی در نظر گرفته شده، سه‌بعدی بر اساس تئوری ورق ردی می‌باشد که از دقت بالایی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش به تحلیل و دینامیکی میکروورق مدرج تابعی دو جهته با در نظر گرفتن اثرات اندازه پرداخته می‌شود. از دیگر نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به پژوهش مورد نظر میدان جابه‌جایی سه‌بعدی و دقیق در نظر گرفته شده بر اساس تئوری ورق ردی در این مقاله می‌باشد.

۲- فرضیات مسئله

فرضیات لحاظ شده در این مقاله شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- هندسه ساختاری میکروورق، مستطیلی می‌باشد.
- ۲- تکیه‌گاه‌های سازه ساده در نظر گرفته شده است.
- ۳- به‌منظور در نظر گرفتن اثر اندازه، از تئوری تنش کوپل اصلاح شده استفاده می‌شود.
- ۴- میدان جابه‌جایی با در نظر گرفتن اثرات برشی بر اساس تئوری ورق ردی می‌باشد.

۲-۱- تئوری تنش کوپل اصلاح شده

ساختار تئوری تنش کوپل اصلاح شده به‌گونه‌ای است که برخلاف تئوری گرا دیان کرنشی اصلاح شده، بخش‌هایی که سبب افزایش مرتبه مشتق معادلات حرکت می‌شود را شامل نمی‌شود. بر خلاف تئوسری کلاسیک تنش اصلاح شده، تئوری تنش کوپل اصلاح شده شامل یک پارامتر مقیاس طولی و تانسور متقارن تنش کوپل شده می‌باشد که سبب می‌شود علاوه بر کاهش حجم معادلات، نتایج دقیق‌تری به‌دست آید. بر اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده، تغییرات انرژی پتانسیل سیستم با در نظر گرفتن اثر اندازه، طبق رابطه (۱) ارائه می‌شود [۱۹].

$$\delta U = \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V m_{ij} \delta \chi_{ij} dV \quad (1)$$

در رابطه (۱)، تغییرات انرژی پتانسیل کرنشی سیستم بر- اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده ارائه گردیده است. در رابطه فوق، σ_{ij} و ε_{ij} به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های تانسور تنش و کرنش هستند. همچنین m_{ij} مؤلفه‌های تانسور متقارن تنش کوپل می‌باشد و χ_{ij} بیانگر مؤلفه‌های تانسور متقارن انحنای میکروورق می‌باشد که از رابطه (۲) تعیین می‌شود.

آنالیز استاتیکی ورق‌های هدفمند بر اساس یک تئوری جدید تغییر شکل برشی توسط فرزام و همکارانش انجام شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان تغییرات خواص مکانیکی بر میزان خمش ورق‌ها تأثیر مستقیمی دارد [۱۶].

آنالیز خمشی ورق‌های مدرج تابعی با تغییرات در راستاهای ضخامت و طولی، انجام شده توسط فرزام و همکارانش، نزدیک-ترین پژوهش به مقاله حاضر می‌باشد. مهمترین تفاوت مقاله حاضر با پژوهش مورد نظر در تئوری بیان‌کننده روابط تنش-کرنش می‌باشد. در این مقاله، روابط تنش-کرنش بر اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده در نظر گرفته می‌شود در حالیکه در پژوهش فرزام و همکارانش، روابط تنش-کرنش بر اساس قانون هوک در نظر گرفته شده است. همچنین در این مقاله برخلاف پژوهش فرزام و همکارانش از تئوری تغییر شکل برشی غیرخطی استفاده شده است. این تئوری نسبت به تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول دقت بیشتری دارد. از دیگر نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به پژوهش مورد نظر، میدان جابه‌جایی سه‌بعدی و دقیق در نظر گرفته شده بر اساس تئوری ورق ردی در این مقاله می‌باشد.

آنالیز استاتیکی ورق‌های ساندویچی هدفمند با استفاده از تئوری ورق چهار توسط دمیرهان و همکارانش انجام گردیده است. معادلات حرکت و شرایط مرزی بر اساس اصل کار مجازی تعیین شده است. اثر پارامترهای گوناگون هندسی را بر خیز ورق در نظر شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر شاخص توان در توزیع توانی خواص مکانیکی میزان خمش استاتیکی سازه افزایش می‌یابد [۱۷].

تحلیل ارتعاشات ورق‌های ویسکوالاستیک مدرج تابعی بر بستر وینکلر-پاسترناک با شرایط مرزی مختلف توسط وینه و همکارانش ایجاد شده است. مدل فونداسیون ویسکوالاستیک پیشنهادی، ضریب میرایی جدیدی را برای در نظر گرفتن اثرات ویسکوز در لایه برشی معرفی کرده و درک جامع‌تری از رفتار ارتعاشی ورق‌ها ارائه می‌دهد. معادلات حاکم بر حرکت با استفاده از یک تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر ساده و اصل همیلتون استخراج شده و یک روش تحلیلی برای حل این معادلات تحت شرایط مرزی مختلف اعمال شده که سازگاری مدل را نشان می‌دهد. [۱۸].

در اغلب پژوهش‌های انجام شده، خواص مواد به‌صورت مدرج تابعی یک جهته در نظر گرفته شده است. همچنین روابط جابه‌جایی در نظر گرفته شده اغلب دوبعدی بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول می‌باشد. در این پژوهش، میکروورق در نظر گرفته شده، مدرج تابعی دوجته می‌باشد. همچنین اثرات

$$\gamma_{xz} = (1 - 3c_1 z^2) \left(\phi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\gamma_{yz} = (1 - 3c_1 z^2) \left(\phi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

در رابطه فوق، $c_1 = -\frac{4}{3h^2}$ می‌باشد. حال که میدان کرنش-جابجایی مربوط به میکروورق تعیین شد با جای گذاری رابطه (۴) در (۳) به تعیین مؤلفه‌های بردار چرخش می‌پردازیم.

$$\begin{aligned} \theta_x &= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \phi_y \right) + 3c_1 z^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \phi_y \right) \right) \\ \theta_y &= -\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \phi_x \right) + 3c_1 z^2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \phi_x \right) \right) \\ \theta_z &= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + (z - c_1 z^3) \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial x} - \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

با جای گذاری رابطه (۶) در رابطه (۲) مؤلفه‌های تانسور انحنای میکروورق طبق رابطه (۷) تعیین می‌گردند.

$$\begin{aligned} \chi_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) + \frac{3c_1 z^2}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \\ \chi_y &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right) - \frac{3c_1 z^2}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right) \\ \chi_z &= \frac{z - 3c_1 z^2}{2} \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial x} - \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right) \\ \chi_{xy} &= \frac{1 + 3c_1 z^2}{4} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ &\quad + \frac{1 - 3c_1 z^2}{4} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial x} - \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right) \\ \chi_{xz} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) \\ &\quad + \frac{z - c_1 z^3}{4} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} \right) \\ &\quad + \frac{3c_1 z}{2} \left(\phi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \chi_{yz} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ &\quad + \frac{z - c_1 z^3}{4} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial y^2} \right) \\ &\quad - \frac{3c_1 z}{2} \left(\phi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\chi_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \theta_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، θ_i بردار چرخش مربوط به میدان جابه‌جایی (u_1, u_2, u_3) می‌باشد و از رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} \theta_x &= \theta_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) \\ \theta_y &= \theta_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \theta_z &= \theta_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه فوق، u_1, u_2 و u_3 به ترتیب بیانگر جابه‌جایی میکروورق در جهات x_1, x_2 و x_3 می‌باشند.

۲-۲- تعیین میدان کرنش-جابجایی

تئوری تغییرشکل برشی مرتبه سوم بر این فرض استوار است که تغییرشکل برشی عرضی و در نتیجه تنش برشی بر روی کف و پایین سطح ورق صفر می‌باشد و در تمامی جاهای دیگر، غیر صفر می‌باشد. بنابراین میدان جابه‌جایی میکروورق بر اساس تئوری ورق ردی، طبق رابطه (۳) ارائه شده است [۲۰].

$$\begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= u(x, y, t) - \frac{4z^3}{3h^2} \left(\phi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + z\phi_x \\ u_2(x, y, z, t) &= v(x, y, t) - \frac{4z^3}{3h^2} \left(\phi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + z\phi_y \\ u_3(x, y, z, t) &= w(x, y, t) \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه فوق، u, v و w به ترتیب مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستاهای x, y و z می‌باشند. همچنین ϕ_x و ϕ_y به ترتیب چرخش صفحات میانی در جهات x و y ناشی از تنش برشی می‌باشند و h بیانگر ضخامت ورق می‌باشند. با مشتق‌گیری از میدان جابه‌جایی، میدان کرنش-جابجایی ورق مستطیلی تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \phi_x}{\partial x} - c_1 z^3 \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \phi_y}{\partial y} - c_1 z^3 \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + z \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \\ &\quad - c_1 z^3 \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned}$$

۳-۲- میکروورق مدرج تابعی دو جهته

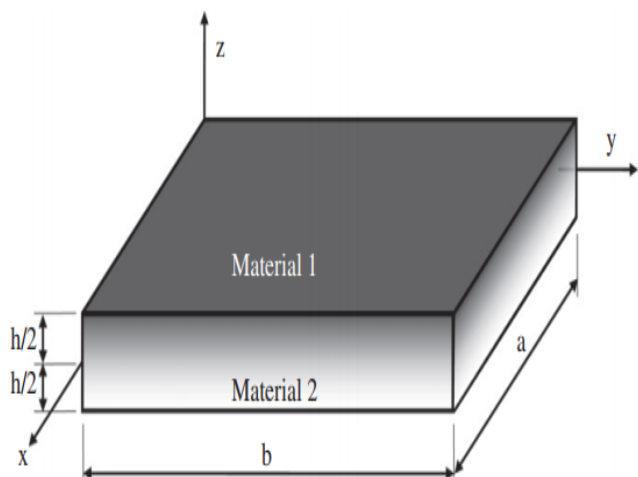
در این پژوهش جهت مدل سازی میکروورق از میکروورق مدرج تابعی دو جهته با تغییرات خواص در راستاهای طولی و ضخامت به صورت هم زمان، استفاده شده است.

شکل (۱) شماتیکی از ورق مدرج تابعی با طول a ، عرض و ضخامت h را نشان می دهد. مواد به کار برده شده در ورق مدرج تابعی دو جهته به گونه ای می باشد که خواص مکانیکی ورق در دو جهت طبق رابطه (۸) تغییر می کنند [۲۰].

$$E(x, z) = \exp\left(\frac{\alpha x}{L}\right) \left((E_T - E_B) \left(\frac{z+c}{h} + \frac{1}{2} \right)^p + E_B \right) \quad (8)$$

رابطه فوق، تغییرات مدول الاستیسیته در دو جهت طولی و ضخامت بر حسب متغیرهای x و z را نشان می دهد. در رابطه (۸)، E_T و E_B به ترتیب مدول الاستیسیته ماده بالایی و پایینی ورق می باشند. همچنین α و p به ترتیب شاخص طولی-ضخامتی و شاخص توانی مدرج تابعی می باشد. α مقادیر مثبت یا منفی به خود می گیرد؛ در حالیکه p فقط مقادیر مثبت به خود می گیرد. پارامتر c در رابطه (۸)، طبق رابطه (۹) تعریف می شود [۲۰].

$$c = \frac{(\eta_E - 1)hp}{2(2 + \beta)(\eta_E + p)}, \eta_E = \frac{E_T}{E_B} \quad (9)$$



شکل ۱ شماتیکی از ورق مدرج تابعی

۴-۲- تعیین معادلات ارتعاشی میکروورق

ابتدا با استفاده از روابط تنش-کرنش الاستیک خطی، رابطه تنش را بر حسب کرنش طبق رابطه (۱۰) بیان می کنیم.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{E(x, z)}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$m_{ij} = \frac{E(x, z)}{1 + \nu} \ell^2 \chi_{ij}$$

در رابطه (۱۰)، σ_x بیانگر تنش، ε_x بیانگر کرنش، ν بیانگر ضریب پواسون و ℓ بیانگر پارامتر طول می باشد که به منظور در نظر گرفتن اثر تنش کوپل مورد استفاده قرار می گیرد. پارامتر ℓ با استفاده از تست پیچش سیلندرهایی باریک یا تست خمش تیرهای نازک تعیین می شود [۱۹].

به منظور تعیین معادلات دینامیکی میکروورق ها از اصل همیلتون استفاده می کنیم، به طوریکه ابتدا انرژی های پتانسیل و جنبشی میکروورق ها را محاسبه می کنیم، سپس در اصل همیلتون جای گذاری می کنیم و پس از ساده سازی های مربوطه، معادلات دینامیکی به دست می آید. اصل همیلتون طبق رابطه (۱۱) تعریف می شود.

$$(\delta U - \delta W - \delta T)dt = 0 \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، δU بیان کننده تغییرات انرژی پتانسیل کرنشی سیستم، δT بیان کننده تغییرات انرژی جنبشی سیستم و δW بیان کننده تغییرات بار خارجی اعمالی به سیستم می باشد. به منظور استفاده از اصل همیلتون، ابتدا انرژی های پتانسیل و جنبشی میکروورق ها را محاسبه می کنیم، سپس تغییرات آنها را با استفاده از روابط ریاضی محاسبه می کنیم؛ به گونه ای که بر حسب مؤلفه های جابه جایی به دست آیند. پس از آن، تغییرات انرژی های جنبشی، پتانسیل و تغییرات بار خارجی اعمالی به سیستم را در اصل همیلتون جای گذاری می کنیم تا معادلات مکانیکی سیستم تعیین شود. حال به محاسبه انرژی پتانسیل کرنشی سیستم می پردازیم.

$$\delta\phi_y: \frac{\partial \bar{M}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{M}_y}{\partial y} - \bar{Q}_y - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{X}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{X}_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{X}_z}{\partial x} + \frac{\partial^2 \bar{Y}_{xz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{Y}_{yz}}{\partial x \partial y} \right) - 3c_1 Y_{xz} - \frac{c_x h}{3} = J_1 \ddot{v} + K_2 \ddot{\phi}_y - c_1 J_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} \quad (13)$$

پارامترهای استفاده شده در رابطه (۱۳) به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\begin{aligned} (M_x, M_y, M_{xy}) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) z dz, (P_x, P_y, P_{xy}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) z^3 dz \\ (A, B, D, E, F, H) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1, z, z^2, z^3, z^4, z^6) \frac{E(x, z)}{1-\nu^2} dz \\ (A_n, B_n, D_n, E_n, F_n, H_n) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1, z, z^2, z^3, z^4, z^6) \frac{\ell^2 E(x, z)}{2(1+\nu)} dz \\ (N_x, N_y, N_{xy}) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) dz \\ (Q_x, Q_y) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}) z dz, (R_x, R_y) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}) z^3 dz \\ I_i &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho z^i dz, \bar{M} = M - c_1 P, \bar{Q} = Q - 3c_1 R \\ \bar{Y} &= Y - c_1 W, \bar{X} = X - 3c_1 Z, \hat{X} = X + 3c_1 Z \\ J_i &= I_i - c_1 I_{i+2}, K_2 = I_2 - 2c_1 I_4 + c_1^2 I_6 \end{aligned}$$

۲-۵- حل معادلات ارتعاشی میکروورق

با توجه به اینکه حل تحلیلی و دقیق معادلات دیفرانسیل به دست آمده مشکل می باشد، جهت حل معادلات به دست آمده از روش عددی نویر استفاده می کنیم. در این روش، فرض می کنیم تمامی تکیه گاه های میکروورق ساده می باشند. طبق روش نویر، متغیرهای مسئله که شامل پارامترهای جابه جایی می باشند را با استفاده از سری فوریه دوگانه و بر حسب ضرایب ثابت V_{rs}, U_{rs} ، ϕ_{rs}^2 و ϕ_{rs}^1, W_{rs} بیان می شود. با جای گذاری روابط موجود در حل نویر در معادلات حرکت، معادلات مکانیکی قابل حل می شوند.

$$\begin{aligned} u(x, y, t) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} U_{rs} \cos(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega t} \\ v(x, y, t) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} V_{rs} \sin(\alpha x) \cos(\beta y) e^{i\omega t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_A \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz}) dA dz \\ &+ \int_A \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (m_x \delta \chi_x + m_y \delta \chi_y + \tau_z \delta \chi_z + 2m_{xy} \delta \chi_{xy} + 2m_{xz} \delta \chi_{xz} + 2m_{yz} \delta \chi_{yz}) dA dz \quad (12) \end{aligned}$$

حال به محاسبه تغییرات انرژی جنبشی میکروورق می پردازیم. با جای گذاری روابط (۴)، (۵) و (۷) در رابطه های (۱۰) و (۱۲)، معادلات دینامیکی میکروورق های مدرج تابعی دوجهته طبق رابطه (۱۳) تعیین می شوند.

$$\begin{aligned} \delta u: \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 X_{xz}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 X_{yz}}{\partial y^2} \right) &= I_0 \ddot{u} + J_1 \ddot{\phi}_x - c_1 I_3 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} \\ \delta v: \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 X_{xz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_{yz}}{\partial x \partial y} \right) &= I_0 \ddot{v} + J_1 \ddot{\phi}_y - c_1 I_3 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} \\ \delta w: \frac{\partial \bar{Q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{Q}_y}{\partial y} + c_1 \left(\frac{\partial^2 P_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 P_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 P_y}{\partial y^2} \right) &+ 3c_1 \left(\frac{\partial Y_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial Y_{yz}}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \hat{X}_{xy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \hat{X}_{xy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (\hat{X}_y - \hat{X}_x)}{\partial y \partial x} \right) \\ &+ \frac{2h}{3} \left(\frac{\partial c_y}{\partial x} - \frac{\partial c_x}{\partial y} \right) \\ &= I_0 \ddot{w} - c_1^2 I_6 \nabla^2 \ddot{w} + c_1 I_3 \left(\frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} \right) \\ &+ c_1 J_4 \left(\frac{\partial \ddot{\phi}_x}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{\phi}_y}{\partial y} \right) \\ \delta \phi_x: \frac{\partial \bar{M}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{M}_{xy}}{\partial y} - \bar{Q}_x &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{X}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{X}_y}{\partial y} - \frac{\partial \bar{X}_z}{\partial y} + \frac{\partial^2 \bar{Y}_{xz}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{Y}_{yz}}{\partial y^2} \right) \\ &+ 3c_1 Y_{yz} + \frac{c_y h}{3} = J_1 \ddot{u} + K_2 \ddot{\phi}_x - c_1 J_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} \end{aligned}$$

مقادیر مشابهی اختصاص داده شده است. همچنین هر دو ورق مورد بررسی، دارای تکیه‌گاه‌های یکسان (تکیه‌گاه از نوع ساده) می‌باشند و هر دو دارای ساختار همگن می‌باشند. در جدولی به شرح زیر، فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق‌های همگن به ازای مقادیر مختلفی از $\frac{L}{h}$ و $\frac{a}{h}$ نشان داده شده است. جهت تطابق نتایج به‌دست آمده، از نتایج منبع [۲۱] استفاده می‌شود. در جدول (۲) به بررسی فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق همگن به ازای مقادیر مختلفی از $\frac{L}{h}$ و $\frac{a}{h}$ پرداخته شده است.

جدول ۲ فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق همگن

$\frac{L}{h}$	$\frac{a}{h} = 5$		$\frac{a}{h} = 20$		$\frac{a}{h} = 100$	
	Present	CPT[22]	Present	CPT[22]	Present	CPT[22]
0	5.2813	5.9734	5.9198	5.9734	5.9711	5.9734
0.2	5.7698	6.4556	6.4027	6.4556	6.4534	6.4556
0.4	7.0330	7.7239	7.6707	7.7239	7.7217	7.7239
0.6	8.7389	9.4673	9.4116	9.4673	9.4650	9.4673
0.8	10.6766	11.4713	11.4107	11.4713	11.4688	11.4713
1	12.7407	13.6213	13.5544	13.6213	13.6186	13.6213

با توجه به داده‌های جدول (۲) مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، تطابق خوبی با نتایج منبع [۲۱] دارد. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت $\frac{L}{h}$ فرکانس‌های میکروورق افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش نسبت $\frac{L}{h}$ در ورق، سفتی ورق افزایش می‌یابد و در نتیجه، این افزایش سفتی منجر به افزایش فرکانس‌های ارتعاشی سیستم می‌گردد. همچنین با توجه به داده‌های جدول فوق می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت طول به ضخامت میکروورق به ازای یک

$$\begin{aligned}
 w(x, y, t) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} W_{rs} \sin(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega t} \\
 \phi_1(x, y, t) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \phi_{rs}^1 \cos(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega t} \\
 \phi_2(x, y, t) &= \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \phi_{rs}^2 \sin(\alpha x) \cos(\beta y) e^{i\omega t}
 \end{aligned} \quad (15)$$

در رابطه فوق، $\alpha = \frac{r\pi}{a}$ و $\beta = \frac{r\pi}{b}$ می‌باشد. با جای‌گذاری معادله (۱۵) در معادله (۱۳)، معادلات ارتعاشی میکروورق به فرم معادله (۱۶) تبدیل می‌شوند.

جدول ۱ خصوصیات مواد [۱]

$E_T (GPa)$	$E_B (GPa)$	ν	$h (\mu m)$	$\rho_T \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\rho_B \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
380	70	0.3	88	3800	2702

$$[M_{ij}] \begin{Bmatrix} \ddot{U}_{rs} \\ \ddot{V}_{rs} \\ \ddot{W}_{rs} \\ \ddot{\phi}_{rs}^1 \\ \ddot{\phi}_{rs}^2 \end{Bmatrix} + [K_{ij}] \begin{Bmatrix} U_{rs} \\ V_{rs} \\ W_{rs} \\ \phi_{rs}^1 \\ \phi_{rs}^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

۳- نتایج

به منظور انجام محاسبات مربوط به تحلیل دینامیکی میکروورق، خواص هندسی و مکانیکی مواد استفاده شده در قالب جدولی به شرح زیر ارائه می‌شود.

در این مقاله، خواص میکروورق در راستای طولی و ضخامت طبق توزیع‌های توانی مختلف (ثابت، خطی و غیرخطی) تغییر می‌کند. در این مقاله همانند اکثر تحقیقات انجام شده به دلیل تغییرات اندک ضریب پواسون، مقدار ثابتی برای آن در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش به‌منظور تحلیل بهتر نتایج از پارامتر فرکانس طبیعی بی‌بعد $\bar{\omega} = \omega \frac{a^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}}$ استفاده می‌کنیم.

در این بخش به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده به مقایسه داده‌های حاصل از پژوهش حاضر با سایر کارهای مشابه پرداخته می‌شود. سیستم مورد مقایسه، ورق مستطیلی می‌باشد که به منظور صحت‌سنجی نتایج، به تمامی پارامترهای مکانیکی،

جدول ۴ فرکانس ارتعاشی بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی دو جهته

$\frac{L}{h}$	$\alpha = 1$		$\alpha = 2$		$\alpha = 3$	
	$p=0$	$p=1$	$p=0$	$p=1$	$p=0$	$p=1$
0	13.15241	10.97631	14.90368	12.43781	16.88803	14.09393
0.2	14.36919	12.09376	16.28244	13.70405	18.45041	15.52872
0.4	17.51494	14.95127	19.84697	16.94198	22.48953	19.19775
0.6	21.76318	18.76699	24.66091	21.26583	27.94456	24.0973
0.8	26.58877	23.06809	30.12912	26.13966	34.14067	29.62012
1	31.7293	27.62622	35.95403	31.30458	40.74127	35.47272

با توجه به داده‌های جدول (۳) می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر مربوط به شاخص توانی (p) به ازای مقادیر طولی ثابت، فرکانس طبیعی میکروورق کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی جدول مذکور می‌توان دریافت که با افزایش مقادیر $\frac{a}{h}$ فرکانس ارتعاشی میکروورق افزایش می‌یابد و به ازای مقادیر بزرگتر $\frac{a}{h}$ فرکانس ارتعاشی میکروورق به مقادیر مشخصی همگرا می‌شوند. همچنین با بررسی جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار اثر اندازه، فرکانس‌های ارتعاشی میکروورق افزایش می‌یابند.

شکل (۲) تأثیر پارامترهای اثر اندازه و شاخص توانی را بر فرکانس‌های ارتعاشی بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی یک جهته با فرض $a = 10h$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر مربوط به شاخص توانی به ازای هر مقداری از پارامتر اثر اندازه، فرکانس بی‌بعد میکروورق کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی شکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ ، به ازای هر مقداری از شاخص توانی، فرکانس

نسبت $\frac{L}{h}$ مشخص فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق تقریباً ثابت می‌ماند. اختلاف مقادیر موجود به ازای $\frac{a}{h} = 5$ به دلیل در نظر نگرفتن اثرات برشی می‌باشد؛ زیرا به ازای $\frac{a}{h} = 5$ ضخامت میکروورق افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و میکروورق، ضخیم می‌شود. به همین دلیل جهت مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار برشی حاکم بر میکروورق ضخیم باید از سایر تئوری‌های تغییرشکل برشی استفاده کرد؛ تئوری‌هایی که مربوط به سازه‌های ضخیم می‌باشند. به همین دلیل به ازای $\frac{a}{h} = 5$ نتایج به‌دست آمده کمی متفاوت با پژوهش انجام شده می‌باشد.

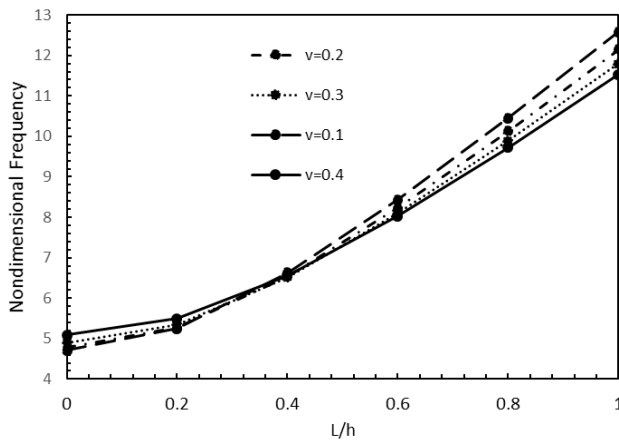
در این بخش به بررسی و تأثیر پارامترهای مختلف بر فرکانس‌های طبیعی میکروورق پرداخته می‌شود.

در جدول (۳) به بررسی اثرات شاخص توانی (مدرج تابعی یک جهته) بر فرکانس طبیعی میکروورق به ازای مقادیر مختلفی از $\frac{L}{h}$ و $\frac{a}{h}$ پرداخته شده است.

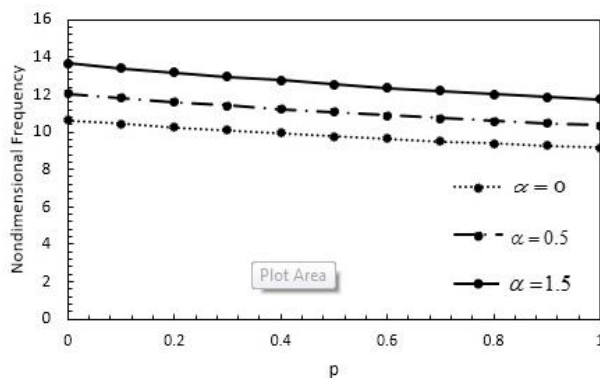
جدول ۳ فرکانس ارتعاشی بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی یک جهته

$\frac{L}{h}$	$\frac{a}{h} = 5$			$\frac{a}{h} = 20$			$\frac{a}{h} = 100$		
	$p=0$	$p=1$	$p=2$	$p=0$	$p=1$	$p=2$	$p=0$	$p=1$	$p=2$
0	5.803478	4.843283	4.353955	6.505108	5.385796	4.846799	6.561481	5.428872	4.886139
0.2	6.340277	5.336347	4.828558	7.035754	5.87963	5.319095	7.091467	5.922706	5.358105
0.4	7.728374	6.597194	6.030066	8.429125	7.159487	6.533899	8.485168	7.204102	6.573898
0.6	9.602941	8.280887	7.618596	10.34215	8.89219	8.166275	10.40083	8.940541	8.209351
0.8	11.73223	10.17875	9.397672	12.53891	10.86313	10.01392	12.60275	10.91697	10.06194
1	14.00041	12.19002	11.27466	14.89456	12.9634	11.97662	14.96511	13.02461	12.03167

فرض $a = 20h$ و $p = 1$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر اثر اندازه به ازای هر مقداری از ضریب پواسون، فرکانس بی‌بعد میکروورق افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب پواسون در مقادیر ابتدایی $\frac{L}{h}$ ، فرکانس ارتعاشی افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش ضریب پواسون و نسبت $\frac{L}{h}$ ، فرکانس ارتعاشی کاهش می‌یابد.



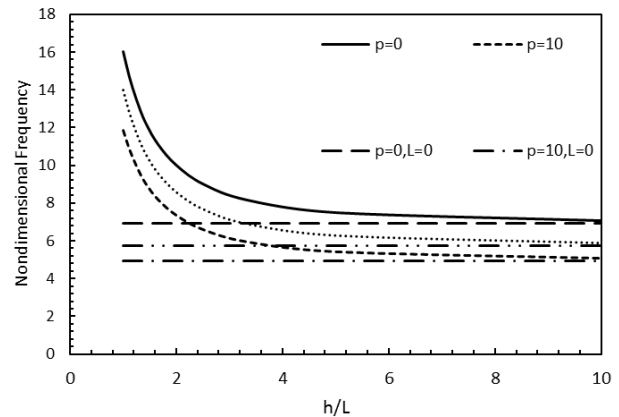
شکل ۴ تأثیر پارامتر اثر اندازه و ضریب پواسون بر فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی با فرض $p = 1$



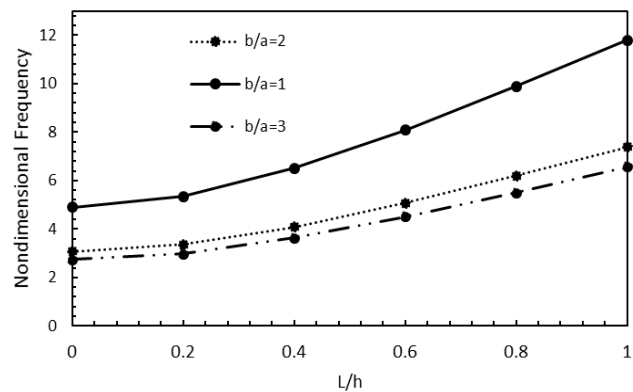
شکل ۵ تأثیر شاخص‌های طولی-ضخامتی و توانی مدرج تابعی بر فرکانس بدون بعد میکروورق

شکل (۵) تأثیر شاخص‌های طولی-ضخامتی و توانی مدرج تابعی را بر فرکانس بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی دوجهته با فرض $L = 0.6h$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر مربوط به شاخص توانی به ازای هر مقداری از شاخص‌های طولی-ضخامتی، فرکانس بی‌بعد میکروورق به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پارامتر شاخص طولی-ضخامتی، فرکانس بی‌بعد میکروورق افزایش می‌یابد.

طبیعی میکروورق کاهش پیدا می‌کند به گونه‌ای که با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ ، مقادیر فرکانس به حالتی که $L = 0$ می‌باشد، میل می‌کند. همچنین با بررسی شکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن پارامتر اثر اندازه، فرکانس طبیعی میکروورق افزایش می‌یابد.



شکل ۲ تأثیر پارامتر اثر اندازه و شاخص توانی بر فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق



شکل ۳ تأثیر پارامتر اثر اندازه و نسبت طولی $\frac{b}{a}$ بر فرکانس‌های بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی با فرض $p = 1$

شکل (۳) تأثیر پارامترهای اثر اندازه و نسبت طولی $\frac{b}{a}$ را بر فرکانس‌های ارتعاشی بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی یک جهته با فرض $a = 20h$ و $p = 1$ نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر اثر اندازه به ازای هر مقداری از نسبت طولی $\frac{b}{a}$ ، فرکانس بی‌بعد میکروورق افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت طولی $\frac{b}{a}$ به ازای هر مقداری از پارامتر اثر اندازه، فرکانس طبیعی میکروورق کاهش پیدا می‌کند. شکل (۴) تأثیر پارامترهای اثر اندازه و ضریب پواسون را بر فرکانس‌های ارتعاشی بی‌بعد میکروورق مدرج تابعی یک جهته با

۴- جمع‌بندی

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
a	عرض میکروورق
b	طول میکروورق
B_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
C_{ijkl}	تانسور تنش مرتبه چهارم
D_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
E_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
E	مدول الاستیسیته
e_0	ثابت الاستیک
F_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
H_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
h	ضخامت میکروورق
J_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
K	نیروی برشی
K_{ij}	ماتریس سفتی
l	پارامتر اثر اندازه
L_{ij}	ماتریس مربوط به خواص مکانیکی میکروورق
m_{ij}	مؤلفه‌های تانسور متقارن تنش کوپل
M	خمش
M_{ij}	ماتریس جرمی
N	منتجه تنش
P	منتجه تنش
Q_{ij}	ماتریس سفتی الاستیک
R	شعاع انحنای نانوپوسته
u	جابه‌جایی در جهت x_1
U_{rs}	ضریب حل نویر
v	جابه‌جایی در جهت x_2
V_{rs}	ضریب حل نویر
w	جابه‌جایی در جهت x_3
W_{rs}	ضریب حل نویر

علائم یونانی

α	پارامتر طولی مدرج تابعی
ε_{ij}	تانسور کرنش
σ_{ij}	تانسور تنش
μ	پارامتر غیرموضعی
ν	ضریب پواسون
φ	تابع کرنش برش
χ_{ij}	مؤلفه‌های تانسور متقارن انحنای میکروورق
θ	بردار چرخش

۶- مراجع

در این پژوهش به تحلیل دینامیکی میکروورق‌های مدرج تابعی دو جهته با استفاده از تئوری‌های ورق ردی و تنش کوپل اصلاح شده پرداخته شده است. در این مقاله، ابتدا بر اساس تئوری ورق ردی، میدان جابه‌جایی میکروورق در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از قانون هوک، روابط تنش-کرنش مربوط به میکروورق تعیین شده است. پس از آن، بر اساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده، ترم‌های مربوط به اثر اندازه لحاظ شده است. با محاسبه انرژی‌های پتانسیل کرنشی و انرژی جنبشی و جایگذاری در اصل همپلتون، معادلات و دینامیکی میکروورق مدرج تابعی دو جهته به دست آمده است. در پایان، معادلات به دست آمده با استفاده از روش‌های عددی حل شده است.

نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

- با افزایش پارامتر مربوط به شاخص توانی (p) به ازای مقادیر طولی ثابت، سفتی سیستم کاهش یافته و در نتیجه فرکانس طبیعی میکروورق کاهش می‌یابد.
- با افزایش مقادیر $\frac{a}{h}$ ، سفتی سیستم افزایش یافته و فرکانس ارتعاشی میکروورق افزایش می‌یابد و به ازای مقادیر بزرگتر $\frac{a}{h}$ ، فرکانس ارتعاشی میکروورق به مقادیر مشخصی همگرا می‌شوند و ثابت می‌مانند.
- با افزایش پارامتر اثر اندازه، فرکانس‌های ارتعاشی میکروورق افزایش می‌یابند.
- با افزایش مقادیر مربوط به شاخص توانی، سفتی ورق کاهش یافته و در نتیجه فرکانس بی‌بعد میکروورق کاهش می‌یابد.
- با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ ، به ازای هر مقداری از شاخص توانی، فرکانس طبیعی میکروورق کاهش پیدا می‌کند به گونه‌ای که با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ ، مقادیر فرکانس به حالتی که $L = 0$ می‌باشد، میل می‌کند.
- با افزایش نسبت طولی $\frac{b}{a}$ ، فرکانس طبیعی میکروورق کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش ضریب پواسون در مقادیر ابتدایی پارامتر اثر اندازه، فرکانس ارتعاشی افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش پارامتر اثر اندازه، سفتی سازه کاهش یافته و فرکانس ارتعاشی کاهش می‌یابد.
- با افزایش پارامتر شاخص طولی-ضخامتی، فرکانس بی‌بعد میکروورق افزایش می‌یابد.
- با افزایش پارامتر شاخص طولی-ضخامتی، جابه‌جایی بی‌بعد میکروورق کاهش می‌یابد.

کلید نتایج به دست آمده با داده‌های موجود در مقاله [۲۱] همخوانی دارد.

- [1] Y. Cao, M. Khorami, S. Baharom, H. Assilzadeh, and M. H. Dindarloo, "The effects of multi-directional functionally graded materials on the natural

- [10] A. Kaveh, H. Babaei, S. Zavari, E. Arshid, and Ö. Civalek, "Vibrational response of a sandwich microplate considering the impact of flexoelectricity and based on a novel porous-FGM formulation," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 52, no. 11, pp. 9122-9143, Nov. 2024, doi: 10.1080/15397734.2024.2346789.
- [11] J. Zamani, B. Soltani, and M. Aghaei, "Analytical Investigation of Elastic Thin-Walled Cylinder and Truncated Cone Shell Intersection Under Internal Pressure," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 136, no. 5, p. 051201, Oct. 2014, doi: 10.1115/1.4027690.
- [12] J. N. Reddy, S. El-Borgi, and J. Romanoff, "Non-linear analysis of functionally graded micro beams using Eringen 's non-local differential model," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 67, pp. 308-318, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2014.09.003.
- [13] H.-T. Thai and S.-E. Kim, "A size-dependent functionally graded Reddy plate model based on a modified couple stress theory," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 1636-1645, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.05.035.
- [14] J. L. Mantari, A. S. Oktem, and C. Guedes Soares, "Bending and free vibration analysis of isotropic and multilayered plates and shells by using a new accurate higher-order shear deformation theory," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 8, pp. 3348-3360, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.01.062.
- [15] J. Lei, Y. He, B. Zhang, Z. Gan, and P. Zeng, "A size-dependent FG micro-plate model incorporating higher-order shear and normal deformation effects based on a modified couple stress theory," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 104, pp. 8-23, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.09.016.
- [16] A. Farzam and B. Hassani, "A new efficient shear deformation theory for FG plates with in-plane and through-thickness stiffness variations using isogeometric approach," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 26, no. 1, pp. 14-14, Jan. 2019, doi: 10.1080/15376494.2018.1472345.
- [17] P. A. Demirhan and V. Taskin, "Levy solution for bending analysis of functionally graded sandwich plates based on four variable plate theory," *Composite Structures*, vol. 177, pp. 80-95, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.048.
- [18] P. Van Vinh and A. M. Zenkour, "Vibration analysis of functionally graded sandwich porous plates with arbitrary boundary conditions: a new general viscoelastic Winkler–Pasternak foundation frequency of the doubly-curved nanoshells," *Composite Structures*, vol. 258, p. 113403, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113403.
- [2] E. Amir, S. Arshid, S. A. Rasti-Alhosseini, and A. Loghman, "Quasi-3D tangential shear deformation theory for size-dependent free vibration analysis of three-layered FG porous micro rectangular plate integrated by nano-composite faces in hygrothermal environment," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 43, no. 2, pp. 133-156, 2020, doi: 10.1080/01495739.2019.1660601.
- [3] C. T. Loy, K. Y. Lam, and J. N. Reddy, "Vibration of functionally graded cylindrical shells," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 41, no. 3, pp. 309-324, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0020-7403(98)00054-X.
- [4] Y. Wang, R. Zeng, and M. Safarpour, "Vibration analysis of FG-GPLRC annular plate in a thermal environment," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 50, no. 1, pp. 352-370, 2022, doi: 10.1080/15397734.2020.1717963.
- [5] Z. Lakhdar et al., "Free vibration and bending analysis of porous bi-directional FGM sandwich shell using a TSDT p-version finite element method," *Acta Mechanica*, vol. 235, no. 6, pp. 3657-3686, Jun. 2024, doi: 10.1007/s00707-024-03925-w.
- [6] M. Nebab et al., "Fundamental frequencies of cracked FGM beams with influence of porosity and Winkler/Pasternak/Kerr foundation support using a new quasi-3D HSDT," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 31, no. 28, pp. 10639-10651, Dec. 2024, doi: 10.1080/15376494.2023.2262951.
- [7] V. N. V. Hoang and P. T. Thanh, "A new trigonometric shear deformation plate theory for free vibration analysis of FGM plates with two-directional variable thickness," *Thin-Walled Structures*, vol. 194, p. 111310, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.tws.2023.111310.
- [8] M. Javani, M. R. Eslami, and Y. Kiani, "Active control of thermally induced vibrations of temperature-dependent FGM circular plate with piezoelectric sensor/actuator layers," *Aerospace Science and Technology*, vol. 146, p. 108997, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ast.2024.108997.
- [9] N. Van Thinh and H. Van Tung, "Free vibration and dynamical analyses of FGM plates with porosity and tangential edge constraints," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 12, no. 3, pp. 5291-5305, Apr. 2024, doi: 10.1007/s42417-023-01147-1.

- [20] J. N. Reddy, "A simple higher-order theory for laminated composite plates," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 51, no. 4, pp. 745-752, Dec. 1984, doi: 10.1115/1.3167719.
- [21] L. Yin, Q. Qian, L. Wang, and W. Xia, "Vibration analysis of microscale plates based on modified couple stress theory," *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 23, no. 5, pp. 386-393, Oct. 2010, doi: 10.1016/S0894-9166(10)60040-8.
- approach," *Engineering with Computers*, pp. 1-29, Jan. 2025, doi: 10.1007/s00366-024-02110-y.
- [19] D. C. C. Lam, F. Yang, A. C. M. Chong, J. Wang, and P. Tong, "Experiments and theory in strain gradient elasticity," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 51, no. 8, pp. 1477-1508, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0022-5096(03)00053-X.