

طراحی، مدلسازی و ساخت دستکش توانبخشی بادی با استفاده از پرینتر سه بعدی

چکیده: امروزه با پیشرفت علم رباتیک و فضای تعامل انسان و ربات، رویکردی با عنوان ربات نرم ارائه شده است که اصول کلاسیک طراحی و کنترل ربات را با مواد نرم و انعطاف پذیر ترکیب کرده است. در این مقاله یک روش نوین برای طراحی و مدلسازی یک عملگر بادی^۱ برای استفاده در دستکش توانبخشی بر پایه رباتیک نرم پیشنهاد شده و برای تجزیه و تحلیل ساختار آن و پاسخ عملگر در فشارهای مختلف از مدلسازی روش اجزای محدود استفاده شده است. در این تحقیق، تمرکز بر روش چاپ سه بعدی مستقیم برای ساخت یک عملگر نرم از جنس مواد پلی اورتان ترموپلاستیک است. یکی از چالش های مهم در مدلسازی اجزای محدود، انتخاب مدل رفتاری مناسب در مواد الاستومر است که بتواند وضعیت آن را در کرنش های مختلف شبیه سازی نماید. در مواد الاستومر به دلیل غیرخطی بودن رابطه بین تنش و کرنش، به جای قانون هوک از مدل های رفتاری هایپیرالاستیک استفاده می شود. در این مقاله، براساس نتایج آزمایش کشش تک محوره ماده کالیبره شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شبیه سازی با ترکیب پارامترهای مختلف طراحی در ساختار اولیه، عملگر از نظر قابلیت خمشی بهبود یافته و تنش و کرنش در مواد کاهش یافته است. علاوه بر این، در حالت تجربی نشان داده می شود که مسیر حرکت عملگر در طول دامنه حرکت انگشت ها می باشد و دستکش توانبخشی می تواند به انگشتان آسیب دیده کمک کند.

واژه های راهنما: ربات نرم، عضله مصنوعی، دستکش توانبخشی بادی، عملگر، پرینت سه بعدی، مدل اجزای محدود، تست تجربی

نفیسه قربانی

فرامی نژاد

کارشناسی ارشد،
مهندسی مکترونیک،
پردیس البرز دانشگاه تهران،
تهران

محمد رضا ذاکرزاده*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشکده گان فنی دانشگاه تهران،
تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

Nafiseh Ghorbani
Farami Nezhad
MSc.,
Mechatronics
Engineering, Alborz
Campus University of
Tehran, Tehran

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

Design and manufacture of pneumatic rehabilitation gloves based on soft robotics

Abstract: Today, with the advancement of robotics science and the human-robot interaction space, an approach called soft robot has been presented, which combines the principles and controls of classic robot design with soft and flexible materials. In this article, a new method for designing and modeling a pneumatic actuator for use in rehabilitation gloves based on soft robotics is proposed, and finite element modeling (FEM) is used to analyze its structure and the response of the actuator under different pressures and choosing a suitable behavior model for elastomer materials that can simulate its status under different strains. As well as, the focus is on the direct 3D printing method to make a soft actuator from thermoplastic polyurethane materials. In elastomer materials, due to the non-linearity of the relationship between stress and strain, hyper elastic behavior models are used instead of Hooke's law. In this article, based on the uniaxial tensile test results, the material has been calibrated and evaluated. In the simulation by combining different design parameters in the primary structure, the actuator has been improved in terms of bending capability and the stress and strain in the material has been reduced. Further, the range of motion (ROM) of the robotic soft glove, which allows finger flexion with assistance.

Keywords: Soft robot, Artificial muscle, Pneumatic rehabilitation gloves, Actuator, 3D print, FEM, Experimental test

۱- مقدمه

ذاتاً ناهمسانگرد هستند، نوع جدید از عملگر پارچه‌ای با قابلیت خمشی را ارائه کرده‌اند. پوشش عملگر با استفاده از لایه‌سازی ساخته می‌شود که دیگر نیازی به روش‌های پیچیده برش و دوخت یا افزودن اجزایی مانند حفره هوا ندارد. همچنین برای تغییر خصوصیات مکانیکی منسوجات با استفاده از لایه دیگری از کامپوزیت‌های نساجی از جنس فیلم با قابلیت غیر قابل نفوذ هوا، استفاده شده است [۹].

در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی در دانشگاه آریزونا عضله مصنوعی بادی دیگری از جنس پارچه برای پوشیدنی‌های کمکی معرفی و ساخته شده است که دو پارچه اصلی که در آن استفاده شده، شامل پارچه نایلون و روکش پلاستیکی پلی اورتان ترموپلاستیک قابل ارتجاع می‌باشد که پارچه‌ای کشف با کششی دو جهته می‌باشد. خواص مواد پارچه‌های بافته شده به خصوصیات کرنش نخ‌های ساخته شده آنها بستگی دارد. ماهیت روش بافندگی، یک سیستم رشته متصل به هم پیوسته ایجاد می‌کند و در نتیجه پارچه‌ای پایدار، سفت و سخت می‌شود که با اعمال فشار هوا داخل عملگر پارچه‌ای، عملگر تغییر شکل می‌دهد. همچنین نمونه کاربردهای مختلف ربات پوشیدنی با تحریک عملگرهای بادی با پارچه نرم ارائه شده است [۱۰].

در سال ۲۰۲۰ محققان در دو دانشگاه فنلاند و چین دست رباتیک نرمی با کف دست نرم، الهام گرفته از انسان با مهارت چنگ زدن ارائه داده‌اند که عملگرهای خمشی نرم که به عنوان انگشت استفاده می‌شوند جز اصلی دست/ پنجه‌های رباتیک نرم هستند. عملگرهای بادی نرم مورد استفاده در این تحقیق، از نوع شبکه‌های بادی هستند. همچنین در این تحقیق، نوع بدیعی از انگشت ترکیبی خمشی نرم و با تلفیق ساختار شبکه‌هایی از حفره‌های داخلی با الهام از شبکه‌های بادی و استفاده از روش تقویت الیاف، طراحی شده است. شبکه‌های بادی با ۲ لایه پیوند داده می‌شود: لایه بالایی مبتنی بر سیلیکون که شامل حفره‌های بی‌شماری در داخل (مانند شبکه‌ها) و لایه زیرین از مواد غیر قابل انعطاف است. هنگامی که عملگر متورم می‌شود، لایه بالایی گسترش می‌یابد و لایه پایین عملگر به طور ثابت می‌باشد که موجب حرکت خمشی عملگر می‌شود. در واقع عملگر تقویت شده با الیاف شامل یک ساختار شبکه‌هایی منعطف، یک لایه غیر قابل انعطاف و الیاف است که مکانیسم خمش آن مشابه عملگر شبکه‌های بادی است. از تقویت‌کننده الیاف برای جهت دادن به حفره‌ها در محور کششی و جلوگیری از انبساط بی‌فایده در محور شعاعی استفاده شده است. با توجه به روش ساخت چند مرحله‌ای

رباتیک نرم زیرشاخه‌ای از رباتیک است که با الهام از طبیعت و موجودات زنده و با ساختاری بسیار نرم به طراحی، کنترل و ساخت ربات‌های متشکل از مواد انعطاف‌پذیر می‌پردازد. ربات‌های نرم برخلاف ربات‌های سخت که از فلز، سرامیک و پلاستیک سخت ساخته شده‌اند، می‌توانند قابلیت‌های خود را در تماس نزدیک با انسان به دلیل انطباق، امپدانس کم و توانایی دستیابی به حرکات پیچیده، تغییر شکل و با ایجاد درجاتی از آزادی بهبود بخشند [۱]. همچنین بازوی ربات‌ها با بدنه سخت می‌توانند از مؤلفه‌های انتهایی نرم استفاده کنند تا به آرامی اشیاء ظریف یا نامنظم را بگیرند و جابه‌جا کنند [۲]. عملگرهای نرم برای ایجاد واکنش و حرکت به سیستم فعال‌سازی یا تحریک نیاز دارند و انواع روش‌های فعال‌سازی عملگر رباتیک نرم مانند تحریک عملگر کابلی با تاندون [۳]، فعال‌سازی عملگر آلیاژ حافظه‌دار با حرارت، فعال‌سازی الکتریکی در پلیمرهای الکترواکتیو و فعال‌سازی عملگر سیال با استفاده از هیدرولیک یا بادی می‌باشند [۴]، [۵]، [۶]. نمونه ابتدایی عملگرهای تحریک شده با سیال، عملگر نرم بادی از نسل عملگر مک‌کین است که با شکل لوله‌ای و از جنس سیلیکون با فعال‌سازی فشار هوا، حرکات انقباض محوری و انبساط شعاعی ایجاد می‌کند [۷]. تاکنون عملگرهای نرم بسیاری از جنس مواد نرم مختلف و یا پارچه ساخته شده است.

در سال ۲۰۱۴ تحقیقات انجام شده در دانشگاه هاروارد یک دستکش توانبخشی پوشیدنی ارائه شده است که شامل عملگرهای نرم هیدرولیکی از نوع عملگرهای الاستومر سیال و ارزان قیمتی است که از لوله الاستومری از نسل عملگر مک‌کین ساخته شده است. به‌طوری‌که از تقویت‌کننده‌های الیاف برای کنترل انگشتان استفاده می‌کند. عملگرهای نرم هیدرولیکی به سمت پشت دست سوار شده و در نتیجه همانند یک کف دست طراحی شده است. سنسورهای فشار سیال به‌طور یکپارچه فشار داخلی عملگرهای نرم را اندازه‌گیری می‌کنند و امکان کنترل خم شدن/ کشش انگشت را فراهم می‌کنند. تمام اجزای الکترومکانیکی در یک بسته کمربند کمری قابل حمل نصب شده‌اند تا بتوانند توانبخشی را انجام دهند [۸].

در سال ۲۰۱۹ تحقیقاتی در دانشگاه هاروارد صورت گرفته که منسوجات و پارچه را به عنوان مواد امیدوار کننده‌ای برای تحقق نسل بعدی ربات‌های نرم بادی معرفی کرده است. با بهره‌گیری از خواص منسوجات که سبک، سازگار، قابل کشش و

بدست می‌آیند) می‌باشد. با مقایسه پیشینه عملگرهای نرم با مکانیزم‌های متفاوت و مواد مختلف مانند عملگرهای سیلیکونی و روش‌های فعال‌سازی متفاوت و بررسی نتایج عملکرد آنها در مقایسه با عملگر ساخته شده در این تحقیق درمی‌یابیم که این عملگر بادی از جنس TPU و با روش ساخت سریع‌تر و فعال سازی ساده‌تر، قدرت و استحکام بیشتر، سازگار با محیط، ایمن به عنوان عملگر ربات همکار و همچنین با عملکرد دقیق و از درصد صحت بالایی برخوردار است.

۲- مدلسازی

امروزه برای تولید عملگرهای نرم با در نظر گرفتن مواد هایپروالاستیک و الاستومر و امکان استفاده آن در فناوری چاپ سه بعدی آنها را به موادی قابل استفاده در رباتیک نرم تبدیل کرده‌اند. ابتدا برای مدلسازی مواد الاستومری باید رفتار فیزیکی و هندسی غیرخطی آنها را در محاسبات در نظر گرفت. به علت رفتار هندسی پیچیده و غیرخطی، رفتار مواد هایپروالاستیک را تنها به صورت تحلیلی نمی‌توان مورد بررسی قرار داد. امروزه مدل‌های رفتاری هایپروالاستیک در نرم‌افزارهای اجزای محدود متعددی همچون آباکوس به منظور تحلیل الاستومرها توسعه یافته است. انتخاب یک مدل رفتاری مناسب و تخمین پارامترهای آنها که بتواند رفتار الاستومرها را در کرنش‌های مختلف به خوبی محاسبه کند، چالشی در مدلسازی اجزای محدود این مواد محسوب می‌شود. در ادامه مقاله پس از معرفی مدل‌های رفتاری مواد هایپروالاستیک و انتخاب مدل مناسب، رفتار تنش و کرنش ماده با شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ به‌طوریکه مدل رفتاری با بدست آوردن پارامترها (ضرایب) در مدل و با استفاده از برازش نمودار تنش و کرنش بدست آمده از مدل تئوری و نمودارهای آزمایشگاهی به دست می‌آید.

۲-۱- تعیین پارامترهای مدل رفتاری

راه درست برای بدست آوردن پارامترهای مدل‌های رفتاری استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی است. برای انتخاب مدل مناسب به منظور تحلیل الاستومرها و تخمین رفتار آنها، باید مراحل زیر در نظر گرفته شود:

- ۱- بدست آوردن خواص مواد و رفتار آزمایشگاهی
- ۲- برازش منحنی آزمایشگاهی با مدل‌های رفتاری الاستومرها
- ۳- اعتبار سنجی مدل‌های رفتاری با نتایج آزمایشگاهی
- ۴- انتخاب مدل رفتاری مناسب برای الاستومر

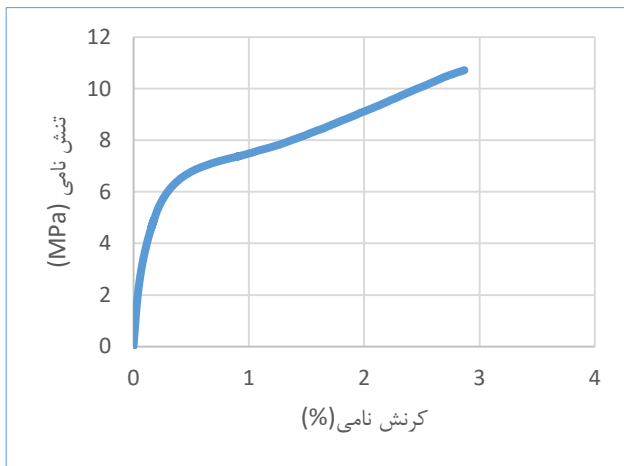
عملگر و مواد مختلف به کار گرفته شده، بهترین زاویه خمش با ۵۰ کیلوپاسکال معادل ۱۵۰ درجه خمیدگی می‌باشد [۱۱]. اخیراً نوعی از عملگرهای نرم از جنس الاستومرها ارائه شده است که با ادغام فناوری‌های ماهیچه‌های مصنوعی روی ساختار شبکه‌های بادی نرم تمرکز دارد. ساختار این عملگرها از محفظه-های متصل ساخته شده است که پس از تحت فشار هوا قرار گرفتن باعث خم شدن کل عملگر می‌شود. غالباً عملگر نرم از جنس مواد هایپروالاستیک می‌باشد که به دلیل مدل رفتاری و خاصیت غیرخطی ماده و کرنش‌های بزرگ، موانعی بوجود می‌آید. در این مقاله طراحی بهینه یک عملگر تحریک شده با هوا (بادی) و ساخته شده از مواد ترموپلاستیک پلی اورتان (TPU) و با استفاده از تکنیک چاپ سه بعدی انجام شده است که در مقایسه با طرح‌های اولیه عملگر بادی، ماده مورد استفاده کرنش کمتری را تجربه می‌کند. بعد از بدست آوردن مدل رفتاری مناسب این ماده، به طراحی عملگر پرداخته می‌شود. طراحی عملگر توسط نرم‌افزار سالیدورکز^۱ انجام شده است و سپس برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس^۲ هر طرح بارگذاری شده و تنظیمات اولیه داده‌های ماده و فشارهای وارده در نقاط مختلف با دقت در نظر گرفته شده است. پس از هر بار طراحی با تغییر پارامترهای ساختار مکانیکی عملگر، میزان جابه‌جایی و زاویه خمش عملگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه، پس از آنالیز، طرح بهینه در مدل اجزای محدود با استفاده از تکنیک چاپ سه بعدی، به عنوان عملگر ماهیچه مصنوعی ربات پوشیدنی تولید می‌شود.

برخلاف ربات‌های معمولی و صلب که سینماتیک و معادلات لینک‌های اتصال آنها شکل تحلیلی دارند، ساختار ربات‌های نرم اغلب پیچیده‌تر از آن است که بتوان رفتار آنها را با معادلات ریاضی به صورت تحلیلی مدلسازی و شبیه‌سازی کرد. بنابراین در این مقاله برای تشخیص مسیر حرکت عملگر با استفاده از مدل اجزای محدود (FEM)، رویکرد متفاوتی ارائه شده است و میزان قابل قبولی از خمش و دامنه حرکت بدست آمده است. نوآوری در این تحقیق و برای اولین بار در ایران، ساخت عملگر بادی از جنس ترموپلاستیک پلی اورتان TPU می‌باشد که با میزان فشار هوای ۵۰ الی ۸۰ کیلو پاسکال، به زاویه چرخش ۱۷۰ الی ۳۲۰ درجه فعال می‌رسد و به‌منظور فعال‌سازی، پس از طراحی صفحه کنترل می‌تواند کارایی لازم برای استفاده در دستکش توانبخشی را ارائه دهد. مزیت ساخت این عملگر، درصد دقت و صحت عملکرد آن و همچنین روش ساخت آن (چاپ با پرینتر سه بعدی) نسبت به عملگرهای سیلیکونی (که با قالب‌سازی

²Abaqus

¹SolidWorks

روی نمونه مستطیل شکل از جنس ماده TPU با ضخامت ۱ میلی-متر در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس)، انجام شده است. مطابق شکل (۱) داده‌های تجربی تبدیل به داده‌های تنش و کرنش مهندسی شده است؛ همانطور که در نمودار غیرخطی تنش و کرنش در شکل (۱) مشاهده می‌شود، فقط در کرنش‌های کوچک رابطه تنش و کرنش خطی می‌باشد که محدود به ۵ الی ۱۰ درصد نمودار می‌باشد.



شکل ۱ تنش-کرنش نامی

۲-۳- فرمولاسیون تابع اگدن

مدل‌های رفتاری نئو هوکین، مونی ریولین و اگدن جزء مدل‌های مشهور و پرکاربرد در زمینه مواد ارتجاعی هستند که در بین آنها مدل اگدن یک مدل فوق ارتجاعی است که برای توصیف رفتار غیرخطی تنش و کرنش مواد هایپراالاستیک مانند سیلیکون، رزین، پلیمرها و بافت بیولوژیکی استفاده می‌شود. این مدل توسط ریگموند اگدن در سال ۱۹۷۲ توسعه یافت که مانند سایر مدل‌های هایپراالاستیک، فرض می‌شود رفتار ماده را می‌توان با استفاده از تابع چگالی انرژی توصیف کرد و روابط بین تنش و کشش را بدست آورد. در مدل اگدن، تابع انرژی کرنشی (رابطه ۱) بر حسب کرنش‌های اصلی λ_1 و λ_2 و λ_3 بیان شده است [۱۶]. برای مواد تراکم ناپذیر (رابطه ۳)، حاصل ضرب این مقادیر مساوی یک است. این مدل قابلیت استفاده در تغییر شکل‌های بزرگ را دارد که اندازه‌گیری مقادیر کشش‌های اصلی یکی از مزیت‌های مدل اگدن محسوب می‌شود:

$$U = \sum_{p=1}^N \frac{2\mu_p}{\alpha_p^2} (\lambda_1^{-\alpha_p} + \lambda_2^{-\alpha_p} + \lambda_3^{-\alpha_p} - 3) + \sum_{p=1}^N \frac{1}{D_p} (J_{e1} - 1)^{2p} \quad (1)$$

یکی از پارامترهای مهم در طراحی عملگر بادی، انتخاب ماده الاستومر سازنده عملگر می‌باشد. شبکه‌های بادی نرم معمولاً از دو ماده ساخته می‌شوند؛ لاستیک سیلیکون و ترموپلاستیک پلی اورتان. این دو ماده مرسوم مورد استفاده برای ساخت عملگر شبکه بادی هستند که سیلیکون نسبت به TPU انعطاف پذیری بیشتری نشان می‌دهد و بیشتر برای ساخت عملگرهای بادی استفاده می‌شود. فرآیند ساخت عملگر سیلیکون به دلیل آنکه فقط با ریخته‌گری و فرآیند قالب‌گیری انجام می‌شود، زمانبر و پیچیده‌تر است. در این تحقیق برای بدست آوردن نتایج قابل قبول، از فرآیند چاپ سه بعدی و ماده TPU استفاده شده است. این ماده در رده الاستومرهای ترموپلاستیک قرار دارد که دارای دو ویژگی ترموپلاستیک و الاستومری هستند [۱۲]. ترکیب این دو ویژگی به آن این توانایی را می‌دهد که تا حد متوسط کشیده شود و از استحکام بالایی برخوردار باشند. همانطور که از برخی داده‌های اصلی مکانیکی که توسط شرکت سازنده ارائه شده در جدول (۱) مشاهده می‌شود، فیلامنت مورد استفاده انعطاف‌پذیری و مقاومت کششی بالایی دارد.

جدول ۱ خواص گرمایی مواد مورد استفاده در ذخیره گرمای محسوس

سختی A	آزمون کشش	استحکام کششی	چگالی
۹۰±۲	%	MPa	g/cm ³
	≥۴۰	≥۱۴	۲/۱±۰/۱

در مواد الاستومری به دلیل غیرخطی بودن رابطه بین تنش و کرنش ارتجاعی، رفتار هایپراالاستیک به جای قانون هوک برقرار است. در مواد الاستومر مانند TPU، در کرنش‌های کوچک با فرض خطی بودن روابط بین تنش و کرنش، می‌توان آنها را مانند سایر مواد الاستیک متعارف طراحی کرد؛ اما در این حالت مدول یانگ فقط می‌تواند مربوط به مقادیر تنش و کرنش نزدیک به صفر باشد و از آنجا که هدف ما دستیابی به تغییر شکل‌های بزرگ است، نمی‌توان این فرض را اعمال کرد. تنها روش مطمئن برای تعیین روابط مورد نیاز بین تنش و کرنش، بدست آوردن آنها در نتیجه آزمایش تجربی کشش است [۱۳]، [۱۴].

۲-۲- رفتار آزمایشگاهی

اغلب برای به دست آوردن نتایج مناسب در یک ماده همسانگرد قابل انعطاف، داده‌های آزمایش تجربی تک محوره کافی است [۱۵]. آزمایش کشش تک محوره در آزمایشگاه بیومکانیک دانشگاه تهران

$$\rightarrow \sigma_1 = \sum_{n=1}^N \mu_n \left(\lambda_1 - \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \right)^{\alpha_n}$$

تناسب کرنش λ از رابطه (۱۰) را در رابطه (۸) جایگذاری می‌کنیم:

$$\sigma_2 \rightarrow p = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{-\frac{1}{2} \alpha_n} \quad (11)$$

سپس فشار هیدرواستاتیک p به دست آمده از رابطه (۹) را در σ_a رابطه (۶) جایگذاری می‌کنیم:

$$\sigma_1 = - \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{-\frac{1}{2} \alpha_n} + \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_1^{\alpha_n}$$

$$\sigma_1 = \mu_1 \left(\lambda_1 - \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \right)^{\alpha_1} + \mu_2 \left(\lambda_1 - \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \right)^{\alpha_2} + \mu_3 \left(\lambda_1 - \lambda_1^{-\frac{1}{2}} \right)^{\alpha_3} \quad (13)$$

و ضرایب را از معادله (۱۴) بدست می‌آوریم.

$$\sigma_1(\lambda_1) = \begin{cases} \mu_1, & \alpha_1 \\ \mu_2, & \alpha_2 \\ \mu_3, & \alpha_3 \end{cases} \quad (14)$$

۲-۴- برآزش منحنی و اعتبار سنجی

برای شبیه‌سازی ماده TPU در نرم‌افزار آباکوس ضرایب ماده را نیاز می‌باشد که متشکل از دو دسته مجهول در سری رابطه (۱۳)، ضرایب μ_p و α_p تا $p=3$ می‌باشد؛ ورودی سری دو دسته داده تجربی کشش و کرنش ماده است که قبلاً تبدیل به کشش و کرنش تک محوری شده است.

در این شرایط جهت حداقل‌سازی خطای بین سیگمای بدست آمده از طریق پیش بینی ضرایب μ و α در فرمول و مقادیر واقعی سیگما توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ در طی ۱۰۰۰ تکرار ضرایب بهینه با نرم افزار متلب بدست آورده شده است.

بدین ترتیب ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای برآزش منحنی، ثابت‌های μ_p و α_p ماده هایپروالاستیک بدست آمده است که در جدول (۲) مشاهده می‌شود. در نتیجه ضرایب آگدن نیز از این الگوریتم تخمین زده شده است که نتایج و صحت آن را در مقایسه با داده‌های تنش و کرنش مهندسی در مراحل بعدی بررسی شده است.

$$\bar{\lambda}_p = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_p \quad (2)$$

همچنین در رابطه (۲) کشیدگی‌های اصلی تابع انرژی برابر با دترمینان ژاکوبین $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ است و J_{e1} نسبت حجم الاستیک می‌باشد. μ_p و α_p رفتار برشی و D_p تراکم‌پذیری مواد را در نظر می‌گیرند:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (3)$$

با فرض اینکه ماده دارای خواص همسانگرد (رابطه ۳) می‌باشد و تنش و کرنشی تک محوری دارد، کرنش‌های اصلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 \quad (4)$$

از روابط (۳) و (۴)، رابطه‌ی (۵) بین کرنش‌ها بدست آمده است:

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

رابطه کلی تنش به صورت رابطه‌ی (۶) می‌باشد:

$$\sigma_2 = -p + \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_2^{\alpha_n} = 0 \quad (6)$$

$$a = 1, 2, 3, \dots$$

رابطه (۷) تنش روی محورهای اصلی می‌باشد:

$$\rightarrow \sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (7)$$

$$\rightarrow \sigma_2 = -p + \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_2^{\alpha_n} = \quad (8)$$

چون فقط کشیدگی تک محوره است، مقادیر غیر قطر اصلی ماتریس (۹) برابر صفر است:

$$\rightarrow p = \sum_{n=1}^N \mu_n \lambda_2^{\alpha_n}$$

$$F = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

از آنجا که ماده تراکم‌ناپذیر است، $J=1$ است و رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$J = dt(F)$$

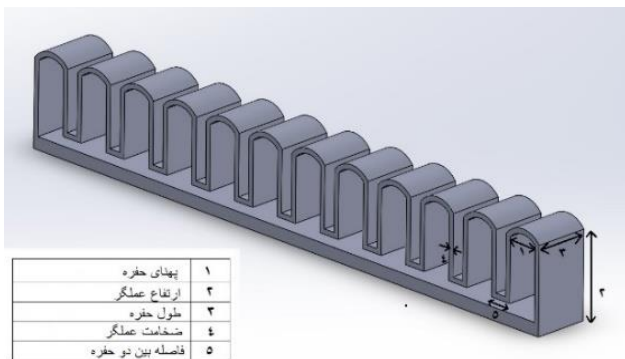
$$\lambda_2 = \lambda_3$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \rightarrow \lambda_1 \lambda_2^2 = 1 \quad (10)$$

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

اولیه عملگر بادی از جنس TPU در نظر گرفته شده است شامل این موارد است: (۱) عملگر باید حداقل فشار ۱ بار را تحمل کند، (۲) حداکثر تنش در عملگر نباید بیشتر از مقاومت تسلیم ماده مورد استفاده، که ۱۰ مگاپاسکال است، باشد، (۳) سطح مقطع عملگر نباید بیش از ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر باشد تا ابعاد آن تقریباً متناسب با ابعاد انگشت انسان باشد [۲۱]، [۲۲].

نتایج مدلسازی طراحی اولیه عملگر در جدول (۳) نشان داده شده است و کل ساختار را می‌توان با مجموع ۷ پارامتر توصیف کرد که مقدار اولیه آنها در جدول ارائه شده است. در طراحی نمونه اولیه عملگر با کاهش ضخامت دیواره، میزان چرخش و خمیدگی عملگر افزایش یافته است و در نمونه دوم با افزایش ضخامت کف، زاویه چرخش بهبود یافته است و با تغییر اندازه حفره‌ها، زاویه چرخش تا ۲۲۷ درجه افزایش یافته است. اما با مقایسه این مقادیر، پارامترهایی چون طول و ارتفاع تاثیر چندانی در زاویه خمیدگی ندارند و در عوض ضخامت لایه‌ها، عرض حفره‌ها و فاصله بین حفره‌ها بیشترین تاثیر را بر روی زاویه خمیدگی می‌گذارند.



شکل ۲ برشی از ساختار نمونه اولیه شامل ۱- عرض حفره، ۲- ارتفاع عملگر، ۳- طول عملگر، ۴- ضخامت، ۵- فاصله بین حفره‌ها

جدول ۳ مقایسه پارامترهای نمونه اولیه عملگر طراحی شده

پارامترها	نمونه اولیه	نمونه دوم	نمونه سوم
عرض عملگر (mm)	۱۷	۱۶	۱۵
فاصله حفره (mm)	۲/۴	۲/۴	۱/۸
عرض حفره (mm)	۴/۸	۵/۶	۵/۶
ضخامت دیواره (mm)	۱/۶	۱/۲	۱/۱
ضخامت کف (mm)	۱/۶	۱/۲	۲/۸
طول عملگر (mm)	۱۲۲	۱۲۲/۵	۱۲۲/۵
زاویه خمش (°)	۱۴۳	۱۷۴	۲۲۷

جدول ۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مطالعه تجربی

ضرایب μ (MPa)	ضرایب α
μ_1	α_1 ۱/۶۱۰۵
μ_2	α_2 ۹/۰۵۵۳
μ_3	α_3 ۳/۴۲

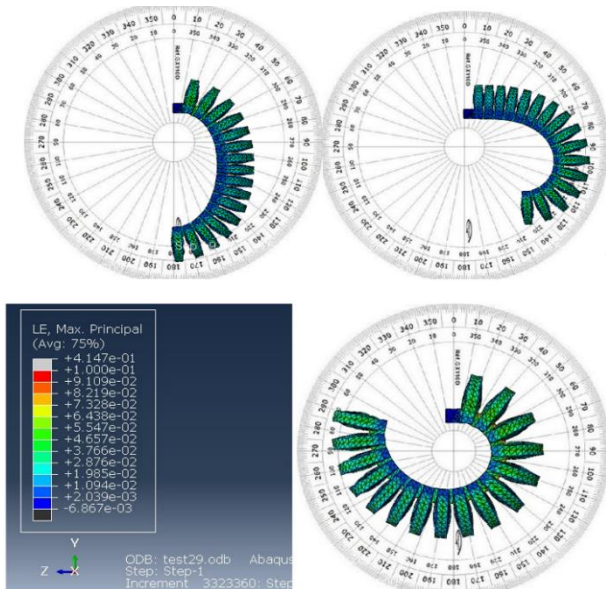
۲-۵- طراحی عملگر نرم بر مبنای پارامترها

دستکش توانبخشی متشکل از عملگرهای نرم با ساختار شبکه‌ای از حفره‌های متوالی است که نوع فعال‌سازی آن به روش عملگرهای بادی می‌باشد [۱۷]. برای مدلسازی و کنترل عملگر بادی از رویکردهای بیولوژیکی الهام گرفته شده است. از همین روش برای شبیه‌سازی ربات‌هایی همانند برخی حیوانات (مانند ماهی مرکب، ستاره دریایی و کرم‌ها)، که هیچ اسکلت داخلی سفت و سختی ندارند، استفاده شده است [۱۸]، [۱۹]. نمونه اولیه عملگر نرم از طبیعت شبیه‌سازی شده است که منبع الهام چندین طرح بیولوژیکی بوده است. درک اصول کار و کنترل موجودات نرم (مانند اختاپوس) منجر به طراحی مدلی برای کنترل ربات‌های نرم شده است. مطالعه این سیستم‌ها برای توسعه و پیاده‌سازی سیستم‌های رباتیک نرم، بر درک ما از مکانیک و کنترل سیستم‌های طبیعی مرتبط، تاثیر گذاشته است. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس داده‌های ورودی را می‌توان به دو صورت داده‌های تنش و کرنش مهندسی و ضرایب آگدن برای تنظیمات اولیه برای هر طراحی در نظر گرفت. طراحی اولیه عملگر در نظر گرفته شده در این تحقیق، شامل شبکه‌ای از حفره‌های متوالی است که به صورت پشت سرهم و با فاصله مشخص از هم قرار گرفته‌اند (شکل ۲). با اعمال فشار هوا عملگر متورم و کانال‌ها منبسط می‌شوند و باعث تغییر شکل عملگر در جهت طولی می‌شوند. رفتار عملگر نرم را می‌توان با تنظیمات پارامترهای طراحی و ویژگی‌های ساختاری^۱ تغییر داد. به عنوان مثال عملگر با دیواره ضخیم‌تر، سخت‌تر از یک عملگر با دیواره نازک از همان ماده است. بنابراین به منظور مدلسازی، به طور کلی اثرات پارامترهای طراحی عملگر مانند: ضخامت دیواره، فاصله بین حفره‌های متوالی، ضخامت لایه زیرین مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود و آزمایش تجربی، پارامترهای بهینه بدست می‌آید [۲۰].

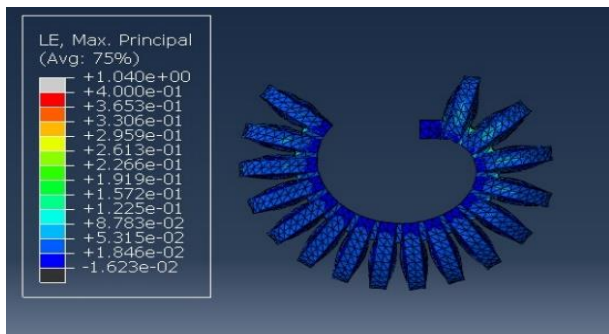
همچنین طبق مطالعات انجام گرفته، به جز تغییرات پارامترهای ساختاری، مهمترین نکاتی که برای طراحی نمونه

¹ Morphology

در طرح سوم برای بهبود نتایج، با تغییر پارامترها ضخامت کل به $1/2$ میلی‌متر، طول عملگر 94 میلی‌متر، رسیده است شکل (۵). همچنین تعداد حفره‌ها و طول عملگر افزایش پیدا کرده است. در نرم‌افزار آباکوس، لبه‌های خارجی و داخلی مدل با بیشترین ضریب گرد شدن که تأثیر در کاهش تنش دارد، تنظیم شده است.



شکل ۵ بررسی حرکت و کرنش طرح سوم



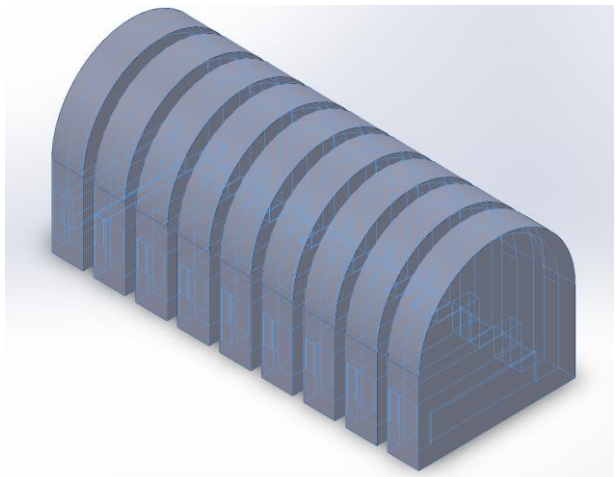
شکل ۶ چرخش و کرنش طرح سوم با استفاده از مدل اجزای محدود با ضرایب اگدن

پس از آنالیز مدل اجزای محدود برای طرح سوم، در حالت تئوری زاویه خمش تا 293 درجه افزایش یافته و همچنین کرنش تا 41% کاهش یافته است شکل (۵) و همانطور که مشاهده می‌شود حرکت و چرخش عملگر در طول مسیر شبیه‌سازی، تقریباً به صورت دایره‌ای می‌باشد. در شکل (۶) نتایج مدل‌سازی مشاهده می‌شود که با استفاده از ضرایب مدل اگدن بدست آمده در طرح سوم مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی زاویه چرخش با ضرایب اگدن در فشار 80 کیلوپاسکال برابر با 305 درجه و مشابه با داده‌های تک محوره می‌باشد.

نکته حائز اهمیت این است که فعال‌سازی عملگر در میزان بالایی از فشار هوا و در حدود 500 کیلوپاسکال امکان‌پذیر است که از معایب طراحی اولیه است.

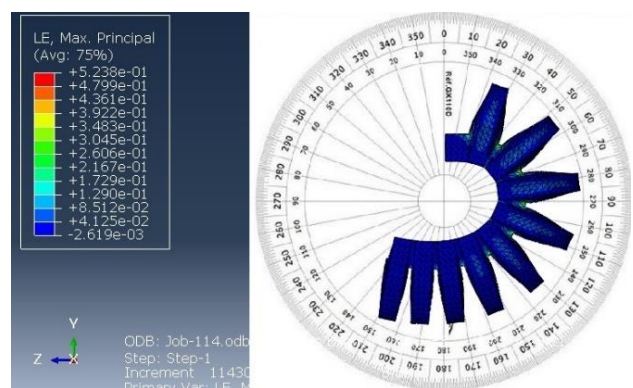
۲-۶- طراحی با رویکرد جدید

با بررسی نتایج پارامترها و در نظر گرفتن رویکردی متفاوت، در ساختار طرح جدید یک حفره را به طور مجزا طراحی کرده و سپس حفره‌ها با یک تونل به هم متصل شده است مطابق شکل (۳)؛ به طوری‌که در طرح اول با طول عملگر 52 میلی‌متر، تغییرات در ابعاد تونل با عرض 12 میلی‌متر، سبب تغییر زاویه خم می‌شود.



شکل ۳ طراحی اولیه ساختار جدید

در طرح دوم، عرض و ارتفاع تونل کاهش یافته است که زاویه خم شدن را افزایش می‌دهد که مطابق شکل (۴) حداکثر تنش را کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از نتایج مدل‌سازی اولیه، کاهش ضخامت دیواره‌ها باعث افزایش خمیدگی و کاهش تنش در ماده شده است.



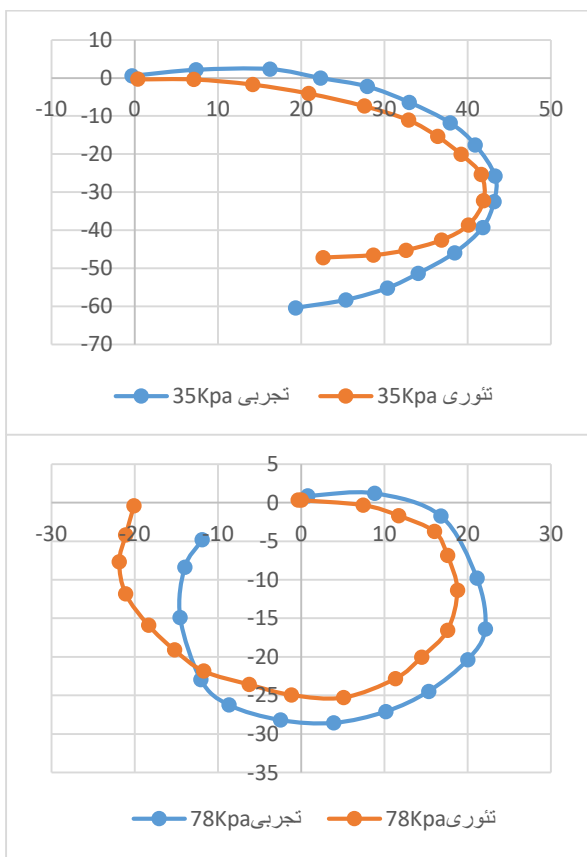
شکل ۴ حرکت و کرنش طرح دوم

۳- بحث و نتایج

۳-۱- مسیریابی سطح زیرین عملگر در فشارهای مختلف

در نمودارهایی که در ادامه ارائه می‌شود انحنای خمشی داده-های FEM (تئوری) و داده‌های تجربی عملگر که به صورت افقی با محور Z تراز شده، مقایسه شده است و انتهای آزاد عملگر در جهت عقربه‌های ساعت از نقطه (۰،۰) خم می‌شود.

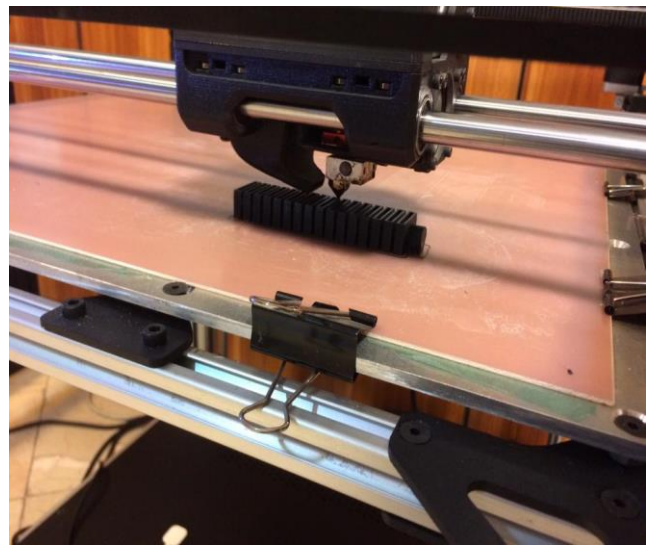
در شکل (۹) میزان جابه‌جایی سطح زیرین عملگر، در راستای محور Z و Y تحت دو فشار مختلف، (۷۸ KPa و فشار ۳۵ KPa) مقایسه شده است.



شکل ۹ مقایسه تئوری و تجربی جابه‌جایی سطح زیر عملگر در فشار ۳۵ KPa (شکل بالا) و در فشار ۷۸ KPa (شکل پایین)

برای کاهش خطا در مدلسازی عملگرها از طرح ساده شده آن (بدون لبه‌های منحنی و مخروطی) استفاده شده است تا به همگرایی نتایج تئوری در شبیه‌سازی و نتایج تجربی کمک کند. میزان تغییرات جابه‌جایی در فشارهای مختلف مشابه و قابل پیش‌بینی بوده است و درصد خطا پایین می‌باشد با این حال در برخی از طرح‌ها (معمولاً آنهایی که بیشترین تغییر شکل را دارند) نتایج همگرا (در فشارهای مختلف) نمی‌شوند، بنابراین فشاری را که می‌توان نتایج را در آن مقایسه کرد محدود می‌کند. برای بهبود درصد خطا و نتایج مقایسه انحنای خمشی عملگر در مدل

پس از نتایج طرح‌های مختلف و بررسی پارامترها، طرح سوم به عنوان طرح بهینه عملگر، برای چاپ سه بعدی و ساخت به رابط پرینتر سه بعدی داده شده است. برای ساخت عملگر از دستگاه پرینتر سه بعدی صنعتی s3030 استفاده شده به طوری که چاپ با دقت و سرعت مناسب و به صورت لایه لایه انجام شده است (شکل ۷).



شکل ۷ عملگر در حین چاپ سه بعدی

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، انتهای عملگر ثابت شده است و یک دوربین با کیفیت بالا و با استفاده از سه پایه، عملگر را از کنار مشاهده می‌کند تا مسیر خمشی نوک آن را بتوان مشاهده کرد. دوربین با استفاده از یک صفحه شطرنجی در پس‌زمینه عملگر ثبت و تراز شده است که دقت اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد.

در شکل (۸) به ترتیب از سمت راست، عملگر با فشار ۱۲ کیلوپاسکال به خمیدگی در حدود ۹۰ درجه می‌رسد و در فشار ۳۴ کیلوپاسکال به خمیدگی ۱۸۶ درجه و در فشار ۴۵ کیلوپاسکال به خمیدگی ۲۶۵ درجه و در نهایت عملگر با فشار ۶۵ کیلوپاسکال به زاویه ۳۲۰ درجه خمیدگی دست یافته است.



شکل ۸ بررسی حرکت طرح سوم به صورت تجربی

این دستکش برای کمک به بیماران و بازیابی قدرت، مهارت، هماهنگی، همچنین بازیابی عملکرد در طول دامنه حرکت انگشت آنها است. دامنه حرکت، اندازه‌گیری مسافت و جهتی است که مفصل می‌تواند تا پتانسیل کامل خود حرکت کند [۲۵]. برای رسیدن به زاویه توانبخشی مناسب انگشت‌ها حداکثر زاویه ۱۶۰ کافی می‌باشد. عملگر به تنهایی برای رسیدن به زاویه ۱۶۰ به فشار ۳۶ کیلوپاسکال نیاز دارد ولی با در نظر گرفتن مقاومت پارچه برای رسیدن به زاویه ۱۶۰ حدوداً به فشار ۱۴۳ کیلو- پاسکال نیاز دارد. برای خم شدن تا زاویه ۱۶۰ درجه، باید بر عملگرهای دستکش پوشیده در دست کاربر فشاری حدود ۲۲۱ کیلوپاسکال وارد شود و با فشار ۲۱۴ برای هر عملگر در دستکش، زاویه ۱۶۶ درجه مشاهده می‌شود. بنابراین برای این نوع دستکش با مشخصات مقاومت پارچه، میزان حداقل ۲۱۴ کیلوپاسکال برای خمیدگی زاویه هدف در هر انگشت لازم است.

۳-۴- مشخصه مسیر حرکت

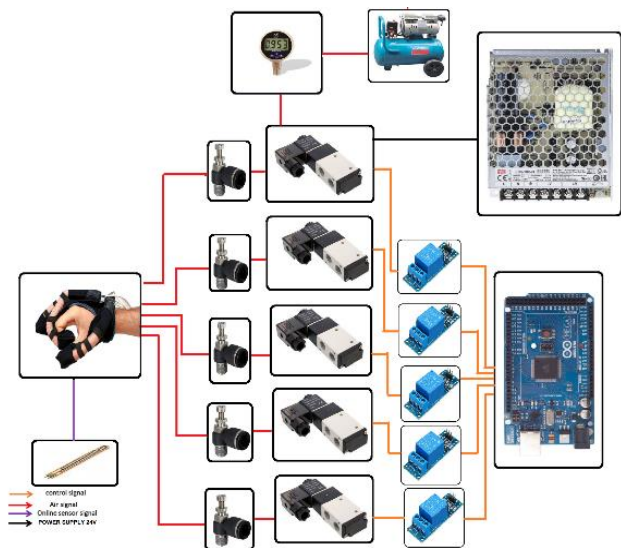
آناتومی دست یکی از پیچیده‌ترین قسمت‌های سینماتیکی بدن انسان است که دارای ۲۰ درجه آزادی برای کل انگشتان است: یک درجه برای دور و نزدیک کردن در هر انگشت (شامل انگشت شست)؛ ۱۲ درجه برای خمیدگی و باز شدن برای انگشتان اشاره، میانی، حلقه و کوچک؛ و سه درجه برای انگشت شست. حرکات خم‌شدن در مفاصل اینترفالانژال (IP) و متاکارپوفالانژال (MCP) و چرخش در مفصل کارپومتاکارپال (CMC) برای ایجاد حرکت مخالفت انگشت شست، براساس دامنه حرکت (ROM) اندازه‌گیری شده است و عملگر در این راستا فعال می‌شود [۲۶]. [۲۷]. مسیر حرکت مفاصل انگشت اشاره مطابق با دامنه حرکت آن متاکارپوفالانژال (MCP) تا دیستال بین فالانژال (DIP) در سمت راست شکل (۹) در زاویه ۱۷۰ درجه قرار دارد. همچنین انگشت شست با مجموع زاویه ۷۰ درجه در سمت چپ شکل (۱۱) و در وضعیت مناسبی از چرخش و خمیدگی قرار دارد.

برای توانبخشی انگشت مسیر حرکت عملگر در حالت تجربی با زاویه ۱۷۰ درجه با فشار هوا ۲۱۴ کیلوپاسکال در دامنه حرکت انگشت‌های اشاره، میانی، حلقه و کوچک کافی می‌باشد که در اینجا با استفاده از سنسور خمیدگی و دوربین نقاط مسیر حرکت در حالت تجربی مشخص شده است و در نمودار سه بعدی ترسیم شده توسط نرم افزار متلب^۱ (شکل ۱۲)، فضای کاری انگشت‌ها در دستکش توانبخشی مشاهده می‌شود.

تئوری اجزای محدود FEM، تکنیک مش‌بندی مجدد نیاز دارد که مش‌بندی به صورت ریزتر اعمال شود. همچنین برای تحلیل خطا و تفاوت در نتایج انحنا مسیر در تست تجربی می‌توان به ناهماهنگی در تنظیم تست و محل قرارگیری پشت عملگر و در تست تئوری به خطای ناشی از مدلسازی عملگر و مش‌بندی ریزتر و ضرایب ماده نسبت داد. علاوه بر این، ناهماهنگی در دستگاه‌های ضبط داده‌ها (نرم افزار دوربین و تحلیلگر ویدئو) نیز بر نتایج تأثیر می‌گذارد.

۳-۲- طراحی مکاترونیک سیستم

صفحه کنترل در نظر گرفته شده برای طراحی مکاترونیک تا حد امکان ماژولار و قابل تنظیم برای کنترل سیستم‌های بادی (با هوا) می‌باشد. سیستم شامل سنسور خمیدگی، شیرهای برقی، رله، گیج فشار و فلوکنترل می‌باشد که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



شکل ۱۰ صفحه برد کنترل

۳-۳- بررسی و عملکرد

اولین قدم در طراحی دستکش توانبخشی توجه به نوع عملگر آن است [۲۳]، [۲۴]. در دسته بندی‌های مرسوم دستکش و پنجه‌ها را برای دو معیار عمده طراحی می‌کنند: دستکش توانبخشی، ربات همکار (رباتی برای گرفتن و از جا بلند کردن اجسام)، دستکش مورد نظر ما در این تحقیق، یک ربات پوشیدنی برای توانبخشی انگشتان منفعل انسان یعنی انگشتان آسیب دیده که دارای سفتی یا بدون تحرک است، می‌باشد.

^۱ Matlab

۳-۵- توانبخشی

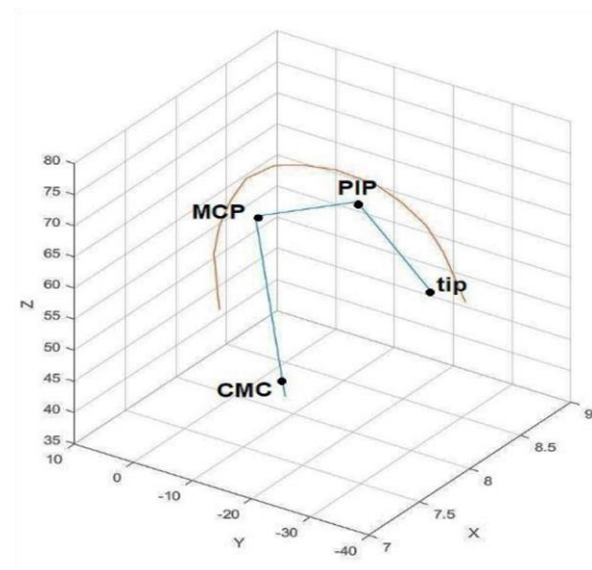
در آزمایش تجربی دستکش توانبخشی، هر عملگر حدود ۲۱ گرم و دستکش حدود ۱۶۱ گرم وزن دارد. همانطور که عملیات تحریک در جهت توانبخشی در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، شامل یکسری تمرین تکراری توانبخشی برای فعال‌سازی موثر دستکش است که توسط فرمان آردوینو^۱ به مدت ۸ ثانیه هر انگشت باز و بسته می‌شود و تکرار آن به مدت ۱۰ بار در دقیقه است. همچنین در مرحله دوم عملیات توانبخشی، بهم رساندن هر انگشت دست به انگشت شست به مدت ۸ ثانیه و تکرار آن ۱۰ بار در دقیقه انجام شده است.



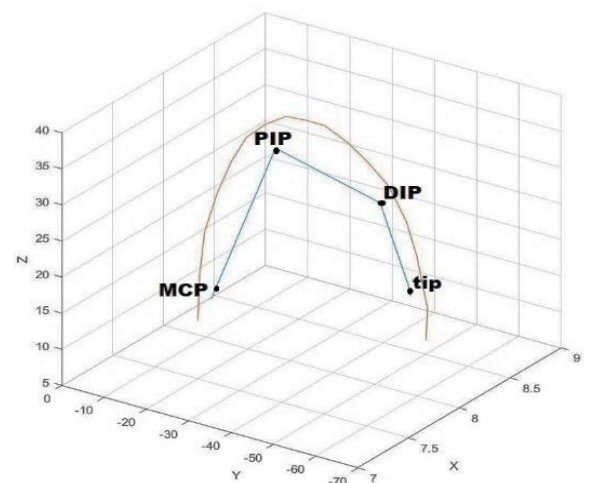
شکل ۱۱ دامنه حرکت انگشت اشاره و شست



شکل ۱۱ عملیات توانبخشی



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ الف- مسیر حرکت انگشت اشاره و ب- مسیر حرکت انگشت شست

^۱ Arduino

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

یکی دیگر از مزیت‌های برجسته این عملگر، روش ساخت آن (چاپ با پرینتر سه بعدی) می‌باشد که نسبت به عملگرهای سیلیکونی (که با قالب‌سازی بدست می‌آیند) روشی ساده‌تر و بسیار دقیق‌تری است.

با مقایسه پیشینه عملگرها و مکانیزم‌های فعال‌سازی متفاوت و مواد مختلف و بررسی نتایج عملکرد آنها، عملگر ساخته شده در این تحقیق از روش ساخت و فعال‌سازی ساده‌تر، قدرت و استحکام بیشتر، سازگار با محیط، ایمن به عنوان عملگر ربات همکار و دارای عملکرد دقیق می‌باشد و از درصد صحت بالایی برخوردار است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

PSO	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
TPU	ترموپلاستیک پلی اورتان
ROM	دامنه حرکت (kJ/kg)
CMC	کارپومتاکارپال
MCP	متاکارپوفالانژال
PIP	اینترفالانژال
DIP	بین فالانژال دیستال

۶- مراجع

- [1] P. Boyraz, G. Runge, and A. Raatz, "An overview of novel actuators for soft robotics," in *Actuators*, 2018, vol. 7, no. 3: MDPI, p. 48, doi: <https://doi.org/10.3390/act7030048>.
- [2] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research," *Applied bionics and biomechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 99-117, 2008, doi: <https://doi.org/10.1080/11762320802557865>.
- [3] Y. Zhang, W. Zhang, J. Yang, and W. Pu, "Bioinspired Soft Robotic Fingers with Sequential Motion Based on Tendon-Driven Mechanisms," *Soft Robotics*, vol. 9, no. 3, pp. 531-541, 2022/06/01 2021, doi: 10.1089/soro.2021.0009.
- [4] M. W. Gifari, H. Naghibi, S. Stramigioli, and M. Abayazid, "A review on recent advances in soft surgical robots for endoscopic applications," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 15, no. 5, p. e2010, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.2010>.
- [5] A. Jemima, C. Raghavendran, and H. Chetan, "Soft robotics: a bio-inspired revolution," in *2020 IEEE*

در این مقاله، طراحی یک عملگر نرم تحریک شده توسط فشار هوا برای استفاده در دستکش توانبخشی با رویکرد ربات نرم به منظور بازتوانی افراد ناتوان و کمک به فعالیت‌های زندگی روزمره ارائه شده است. ابتدا برای طراحی و شبیه‌سازی عملگر بادی در بحث مواد، ضرایب مدل اگدن را با الگوریتم PSO در فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال بدست آمده است که نتایج شبیه‌سازی مدل اجزای محدود در مقایسه با نتایج ورودی داده‌های تست تجربی قابل قبول می‌باشد. در نتایج شبیه‌سازی مدل اجزای محدود، زاویه چرخش با ضرایب مدل اگدن در مقایسه با ورودی داده‌های تست تجربی به صورت تک محوره دارای نتایج قابل قبولی است. همچنین در مقایسه نتایج نمودارهای تئوری و مدل تئوری اجزای محدود FEM، نیاز است مش‌بندی به صورت ریزتر اعمال شود که برای کاهش زمان شبیه‌سازی پیشنهاد می‌شود از رایانه‌هایی با سرعت پردازش بسیار بالاتر ($>3.9GH$) استفاده شود. همچنین برای مدلسازی عملگر بادی که از جنس ترموپلاستیک پلی اورتان TPU می‌باشد، با بررسی مسیر حرکت، این نتیجه حاصل شد که ساختاری شامل محفظه‌های کوچک به حجم و فشار کمتری برای فعال‌سازی نیاز دارند و آنها را سریع و کارآمد می‌کند. عملگر نرم تولید شده با فناوری چاپ سه بعدی، به تنهایی با میزان فشار هوای ۵۰ الی ۸۰ کیلو پاسکال، به زاویه چرخش ۱۷۰ الی ۳۲۰ درجه رسیده است که می‌تواند کارایی لازم برای استفاده در دستکش توانبخشی را داشته باشد. همچنین عملگرهای نرم به عنوان مؤلفه انتهایی بازوی ربات با پنجه نرم می‌توانند طیف گسترده‌ای از اجسام با سختی‌های مختلف را بدون نیاز به بازخورد حسی و سیستم‌های کنترل اداره کنند، زیرا نیروهای تماس به شدت کاهش می‌یابد که از دیگر مزایای این عملگر نرم می‌باشد. برای رسیدن به زاویه توانبخشی مناسب انگشت‌ها، حداکثر زاویه ۱۷۰ کافی می‌باشد. عملگر به تنهایی برای رسیدن به زاویه ۱۶۰ به فشار ۳۶ کیلوپاسکال نیاز دارد ولی در این تحقیق با در نظر گرفتن مقاومت پارچه دستکش استفاده شده، عملگر برای رسیدن به زاویه ۱۶۰ حدوداً به فشار ۱۴۳ کیلو پاسکال نیاز دارد. همچنین با در نظر گرفتن مقاومت انگشت انسان برای رسیدن انگشت به زاویه ۱۷۰ درجه، به فشار هوای ۲۱۴ کیلو پاسکال نیاز است. پیشنهاد می‌شود برای رسیدن به فشار کمتر با انتخاب دستکش با پارچه نازک‌تر و یا مشبک، مقاومت دستکش در برابر خمیدگی کاهش داده شود.

- [15] I. Pearson and M. Pickering, "The determination of a highly elastic adhesive's material properties and their representation in finite element analysis," *Finite elements in analysis and design*, vol. 37, no. 3, pp. 221-232, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00031-7).
- [16] M. S. Xavier, A. J. Fleming, and Y. K. Yong, "Finite element modeling of soft fluidic actuators: Overview and recent developments," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 3, no. 2, p. 2000187, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/aisy.202000187>.
- [17] P. H. Nguyen and W. Zhang, "Design and computational modeling of fabric soft pneumatic actuators for wearable assistive devices," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, p. 9638, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65003-2>.
- [18] C. Christianson *et al.*, "Jellyfish-inspired soft robot driven by fluid electrode dielectric organic robotic actuators," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, p. 126, 2019, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00126>.
- [19] Z. Xie *et al.*, "Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping," *Soft robotics*, vol. 7, no. 5, pp. 639-648, 2020. doi: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0082>.
- [20] B. Mosadegh *et al.*, "Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly," *Advanced functional materials*, vol. 24, no. 15, pp. 2163-2170, 2014, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00126>.
- [21] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 467-475, 2015. doi: <https://doi.org/10.1038/nature14543>.
- [22] W. Hu, R. Mutlu, W. Li, and G. Alici, "A structural optimisation method for a soft pneumatic actuator," *robotics*, vol. 7, no. 2, p. 24, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics7020024>.
- [23] J.-M. Dávila-Vilchis, J. C. Ávila Vilchis, and A. H. Vilchis-González, "Design methodology for soft wearable devices—The MOSAR case," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 22, p. 4727, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/app9224727>.
- [24] H. K. Yap, J. H. Lim, F. Nasrallah, J. C. Goh, and R. C. Yeow, "A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness," in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 2015: IEEE, pp. 4967-4972, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139889>.
- [25] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, "Soft robotic glove for *Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC)*, 2020: IEEE, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/B-HTC50970.2020.9297869>.
- [6] R. J. Wood, S. Avadhanula, R. Sahai, E. Steltz, and R. S. Fearing, "Microrobot design using fiber reinforced composites," 2008, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2885509>.
- [7] C.-P. Chou and B. Hannaford, "Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles," *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. 12, no. 1, pp. 90-102, 1996, <http://dx.doi.org/10.1109/70.481753>.
- [8] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, pp. 135-143, 2015/11/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>.
- [9] F. Connolly, D. A. Wagner, C. J. Walsh, and K. Bertoldi, "Sew-free anisotropic textile composites for rapid design and manufacturing of soft wearable robots," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 27, pp. 52-58, 2019/02/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.01.007>.
- [10] P. H. Nguyen and W. Zhang, "Design and Computational Modeling of Fabric Soft Pneumatic Actuators for Wearable Assistive Devices," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 9638, 2020/06/15 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65003-2>.
- [11] H. Wang, F. J. Abu-Dakka, T. N. Le, V. Kyrki, and H. Xu, "A novel design of soft robotic hand with a human-inspired soft palm for dexterous grasping," *arXiv preprint arXiv:2009.00979*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/MRA.2021.3065870>.
- [12] T. Xu, W. Shen, X. Lin, and Y. M. Xie, "Mechanical properties of additively manufactured thermoplastic polyurethane (TPU) material affected by various processing parameters," *Polymers*, vol. 12, no. 12, p. 3010, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/polym12123010>.
- [13] H. Lee, R.-i. Eom, and Y. Lee, "Evaluation of the mechanical properties of porous thermoplastic polyurethane obtained by 3D printing for protective gear," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, pp. 1-10, 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5838361>.
- [14] B. Sandesh, H. Sriharsha, U. R. Sathish, and G. Nikhil, "Investigation of tensile properties of RTV Silicone based Isotropic Magnetorheological Elastomers," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144: EDP Sciences, p. 02015, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814402015>.

<https://doi.org/10.1115/1.4027031>.

- [27] M. Troncossi, M. Mozaffari-Foumashi, and V. Parenti-Castelli, "An original classification of rehabilitation hand exoskeletons," *J. Robot. Mech. Eng. Res*, vol. 1, no. 4, pp. 17-29, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.24218/jrmer.2016.18>.

combined assistance and at-home rehabilitation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, pp. 135-143, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>.doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>.

- [26] P. Maeder-York *et al.*, "Biologically inspired soft robot for thumb rehabilitation," *Journal of Medical Devices*, vol. 8, no. 2, p. 020933, 2014, doi:

نیروگاه های توربین گاز V94.2 و لزوم تبدیل آنها به سیکل ترکیبی

نعمت ... مزروعی
دانشجوی دکتری

احمدرضا رحمتی*
دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده: غالب توربین های گاز بزرگ نصب شده در نیروگاه های کشور از نوع V94.2 و ساخت داخل است. با توجه به جایگاه این واحدها در صنعت برق و انرژی کشور، در این مطالعه نسبت به تبیین اهمیت تعمیر و نگهداری مدون این توربین ها، تعمیرات افزایش طول عمر و انجام فرآیند ارتقاء آنها اقدام گردیده است و اولویت و لزوم تبدیل این نیروگاه ها به سیکل ترکیبی و هزینه های مالی این فرآیند تشریح شده است. سپس محاسبه گردیده در صورت تبدیل این نیروگاه ها به سیکل ترکیبی، به ازاء هر بلوک در هر سال، حداقل معادل ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی جویی خواهد شد. در صورت ترکیبی نمودن کل واحدهای گازی بزرگ کشور، سالانه حدود ۶ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی با ارزش فعلی نزدیک یک میلیارد دلار قابل صرفه جویی می باشد. همچنین با توجه به ویژگی های خاص دی اکسیدکربن در نقطه بحرانی از جمله مقادیر پایین فشار و دما (۷۳/۸ بار و ۳۱ درجه سانتیگراد) چگالی بالا و ویسکوزیته پایین، مزایای کاربردی کردن سیکل های با این سیال عامل بویژه بعنوان جایگزین سیکل بخار در سیکل های ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون با این سیال عامل نیروگاه هایی تا ۲۵ مگاوات نیز در دنیا ساخته شده ولی هنوز به مرحله تجاری سازی نرسیده اند.

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

واژه های راهنما: توربین گاز V94.2، سیکل ترکیبی، صرفه جویی سوخت، دی اکسید کربن فوق بحرانی، انرژی

Nematollah
Mazrouei
PhD Student

Ahmadreza
Rahmati*
Associate Professor,
Department of
Mechanical Engineering
University of Kashan,
Kashan

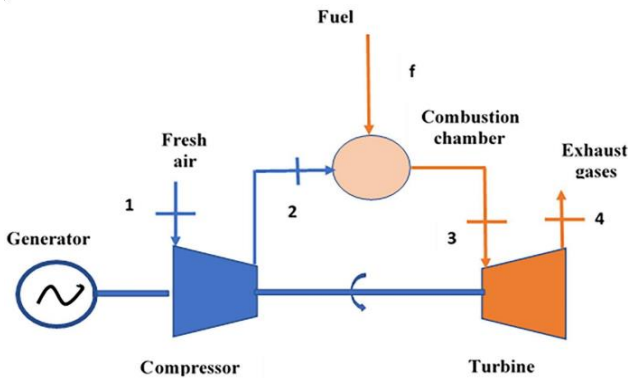
V94.2 gas turbine power plants and the necessity of conversion them to combined cycle

Abstract: Most of the large-scale gas turbines installed in Iranian power plants are V94.2 type and domestically made. Considering the position of these units in the electricity and energy industry of the country, in this research, the importance of regular maintenance and repair of these turbines, repairs to life time extension and their upgrading process have been explained. The priority and necessity of converting these power plants to combined cycle and the financial costs of this process have been described. Then it has been calculated that if these power plants are converted to combined cycle, at least equal to 200 million cubic meters of natural gas, annually will be saved for each block. If all the large gas units of the country are combined, it is possible to save about 6 billion cubic meters of natural gas annually with a current value of nearly one billion dollars. Also, considering the special characteristics of carbon dioxide at the critical point, including low pressure and temperature values, high density and low viscosity, the advantages of using the cycle with this working fluid and using it instead of the steam cycle in combined cycles have been investigated. Until now, power plants up to 25MW have been built with this working fluid in the world, but they have not yet reached the commercialization stage.

Keywords: V94.2 Gas turbine, Combined cycle, Fuel saving, sCO₂, Energy

۱- مقدمه

آنها به حاشیه رفته است. در عمل بدلیل اینکه احداث بخش بخار این نیروگاهها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی علاوه بر زمان بر بودن (حدود ۳ سال) هزینه حدود دو برابری نسبت به بخش گازی با ظرفیت مشابه دارند؛ لذا ترکیبی نمودن بخش قابل توجهی از سیکل های گازی به تعویق افتاده که نتیجه آن هدر رفت مقادیر عظیمی از انرژی های قابل استحصال بوده است.



شکل ۱ شماتیک سیکل توربین گاز و اجزاء اصلی آن

در سه دهه اخیر به علت افزایش تقاضای برق در شبکه برق کشور و همچنین فراهم بودن شرایط جهت صادرات مازاد به کشورهای همسایه، احداث نیروگاه های سیکل ترکیبی در کشور آغاز گردید و واحدهای متعدد گازی V94.2 (کلاس E) با ظرفیت اسمی هریک بین ۱۵۹ تا ۱۸۳ مگاوات و اخیراً نیز واحدهای گازی کلاس F با ظرفیت اسمی متوسط هریک حدود ۳۰۰ مگاوات به بهره برداری رسید، ولی احداث واحدهای بخار آنها و تبدیل واحدهای گازی به سیکل ترکیبی برای عمده این واحدها تاکنون محقق نگردیده است. مقدار و سهم ظرفیت انواع نیروگاه های موجود در کشور در جدول (۱) مشخص می باشد.

جدول ۱ مقدار و سهم ظرفیت انواع نیروگاه های موجود در کشور

ظرفیت نصب شده نیروگاهی	مقدار (MW)	سهم (درصد)
بخاری	۱۵۸۲۹	۱۷/۲
گازی	۲۳۱۴۷	۲۵/۲
چرخه ترکیبی	۳۵۷۱۹	۳۸/۹
برق آبی	۱۲۱۴۴	۱۳/۲
اتمی	۱۰۲۰	۱/۱
تولید پراکنده	۲۴۶۸	۲/۷
انرژی های تجدیدپذیر	۱۱۱۰	۱/۲
دیزلی	۴۰۵	۰/۴
کل ظرفیت نصب شده	۹۱۸۴۵	۱۰۰

در سال ۱۲۶۱ هجری شمسی (۱۸۸۲ میلادی) توماس ادیسون اولین مجموعه برق تجاری خود را برای تامین روشنایی در نیویورک افتتاح نمود. سه سال بعد، در سال ۱۲۶۴ هجری شمسی در زمان ناصرالدین شاه قاجار، اولین مولد برق به قدرت تقریبی ۳ کیلو وات به منظور تامین روشنایی بخشی از کاخ سلطنتی وارد ایران شد و به بهره برداری رسید. اولین مجوز تاسیس کارخانه برق یا همان نیروگاه تولید برق امروزی در کشور به یک بازرگان در سال ۱۲۸۵ شمسی داده شد که اقدام به تاسیس اولین کارخانه برق عمومی در تهران نمود. از آن زمان تاکنون در نتیجه کوشش تلاشگران این صنعت، پیشرفت های قابل توجهی در این زمینه حاصل گردیده و از لحاظ بین المللی کشورمان در جایگاهی در خور قرار گرفته است به طوری که بر اساس آمارهای سازمان ملل متحد، در سال ۱۹۹۵ میلادی (۱۳۷۴ شمسی) ایران از نظر گستردگی صنعت برق، در بین کشورهای غرب آسیا در مقام نخست قرار گرفت و در سطح جهانی نیز به مقام مقایسه بیست و یکم دست یافت.

در حال حاضر نیز از آنجایی که صنعت تولید برق همانند قلب تپنده ای جریان الکتریسیته را برای حرکت چرخه تولید در سایر صنایع و نیازهای شهری و روستایی در شبکه انتقال به جریان در می آورد، یک صنعت مادر و زیربنایی حائز اهمیت محسوب می گردد که در توسعه همه جانبه کشور نقش بی بدیلی اجرا می نماید.

توجه به انجام منظم تعمیرات مدون و همچنین نگهداری و بهره برداری اصولی و منطبق با دستورالعمل ها در نیروگاه های تولید برق موجب بهبود راندمان، افزایش توان خروجی، انتشار کمتر گازهای آلاینده و بهبودهای مختلف در قابلیت اطمینان و کاهش مخاطرات حین کارکرد آنها می گردد.

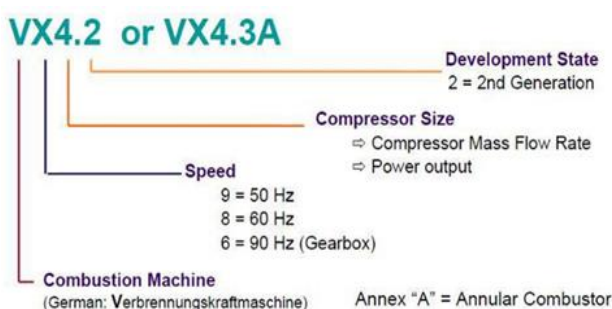
نیروگاه های حرارتی با ظرفیت بالا و رایج در کشور، عمدتاً نیروگاه های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی هستند. نیروگاه های سیکل ترکیبی با راندمان در محدوده ۵۰ درصد دارای بالاترین راندمان، نیروگاه های بخار با راندمان در محدوده ۴۰ درصد و نیروگاه های گازی با راندمان در محدوده ۳۰ درصد دارای کمترین راندمان می باشند. ولی با توجه به اینکه نصب و راه اندازی واحدهای گازی در مدت زمان کم و سریع قابل انجام است و در مدت یکسال می توان آنها را به مرحله تولید رساند؛ لذا دولت های مختلف بیشتر علاقمند به نصب و راه اندازی این واحدها بوده اند و با توجه اینکه این واحدها با شماتیک کلی شکل (۱) در آینده به سیکل ترکیبی تبدیل خواهند شد موضوع پایین بودن راندمان

یادآور می‌گردد با توجه به گستره و تنوع موضوعات مورد توجه در این مطالعه و همچنین مد نظر بودن واحدهای خاص موجود در کشور و کاربردی بودن مباحث، مطالعات تجمیعی مشابهی یافت نگردید ولی در هر موضوع بطور مجزا، مطالعات مرتبط قبلی در بخش مربوطه ارجاع داده شده است.

۲- توربین‌های گاز ساخت داخل

بیش از ۷۰ سال است توربین‌های گازی جهت تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در سه دهه اخیر تولید این نوع توربین‌ها بسیار افزایش یافته است. در سال ۱۹۷۰ تقاضا به منظور نصب توربین‌های گازی با توان بالاتر افزایش یافت. شرکت زیمنس نیز با توجه به این تقاضا و دستیابی به بازار جهانی، توربین‌های سنگین مقیاس را توسعه داد و تولید توربین‌های V-type را در دستور کار قرار داد. مبنای اصلی این توربین موتور جتی است که در جنگ جهانی دوم بر روی هواپیماهای جنگنده مورد استفاده قرار گرفت. اولین توربین ۵۰ هرتز V94.2 زیمنس در سال ۱۹۸۱ در شهر والهیم آلمان نصب و راه اندازی شد [۵]. مدل ۶۰ هرتز همین توربین (V84.2) نیز در سال ۱۹۸۹ در هیدرو آمریکا مورد بهره‌برداری قرار گرفت. نام‌گذاری V94.2 مطابق سیستم شماتیک شکل (۲) می‌باشد.

توربوکمپرسورهای شرکت زیمنس از جمله مرغوب‌ترین تجهیزات دنیا در این زمینه محسوب می‌شود که طی قراردادی، انتقال تکنولوژی ساخت آن از اوایل دهه ۸۰ شمسی به جمهوری اسلامی ایران صورت پذیرفت.



شکل ۲ سیستم نام‌گذاری شماتیک توربین گاز V94.2

در حال حاضر نیروگاه‌های گازی با ظرفیت در مقیاس بالای ۱۰۰ مگاوات در کشور عمدتاً از نوع V94.2 شرکت زیمنس می‌باشند که ساخت آنها در کشور بومی‌سازی شده و روند ارتقاء این

برای احداث واحدهای بخار این نیروگاه‌ها، قرارداد بیع متقابل بین مالک نیروگاه و وزارت نیرو منعقد می‌گردد که بر مبنای آن وزارت نیرو متعهد می‌گردد در بازه زمانی مشخص نسبت به پرداخت هزینه سرمایه‌گذاری بر مبنای درآمد معادل سوخت صرفه جویی شده پس از کارکرد واحد بخار اقدام نماید.

تبدیل سیکل نیروگاه گازی به سیکل ترکیبی از نظر زیست محیطی، به دلیل عدم افزایش آلاینده‌ها در نتیجه افزایش تولید و همچنین پایین آمدن دمای گازهای داغ خروجی از دودکش نیروگاه از محدوده بزرگتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد به محدوده ۱۰۰ درجه سانتیگراد قابل توجه و حائز اهمیت است.

بویلرهای بازیاب حرارت^۱ در سیکل‌های ترکیبی، به دلیل استفاده از انرژی موجود در گازهای داغ حاصل از احتراق و خروجی از توربین‌های گاز، مصرف سوخت قابل توجهی نخواهند داشت که این مطلب علاوه بر کاهش مصرف سوخت برای تولید هر کیلووات ساعت برق، موجب بهره‌وری بهتر سیستم و افزایش راندمان مجموعه موجود از محدوده $\frac{1}{3}$ به محدوده $\frac{1}{2}$ می‌گردد [۱]، [۲].

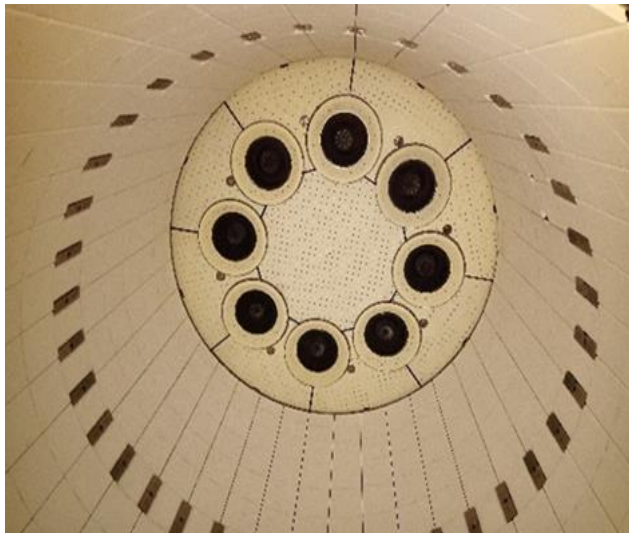
با در نظر گرفتن دو توربین گاز و یک توربین بخار بعنوان یک بلوک سیکل ترکیبی، توان تولید شده در واحد بخار با توان تولید شده در هر یک از واحدهای گازی برابری خواهد نمود.

جهت بازیافت انرژی هدر رفته در توربین‌های گاز از ترکیب آنها با سیکل‌های دیگر از جمله آب شیرین‌کن‌ها [۳]، تولید بخار برای مصارف کارخانجات صنعتی و یا تولید آب گرم مصرفی نیز استفاده می‌گردد.

بهبود راندمان نیروگاه‌های تولید برق، یک پارامتر مهم عرصه انرژی در جهان محسوب می‌گردد و محققین زیادی در دنیا مشغول تحقق این امر می‌باشند. به همین دلیل تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی از اولویت و اهمیت زیادی برخوردار گردیده است [۴] که در این مطالعه علاوه بر تمرکز بر این موضوع از جنبه فنی و اقتصادی، افزایش طول عمر و ارتقاء نیروگاه‌های گازی رایج در کشور و بهره‌برداری بادوام و ایمن از این واحدها از طریق رعایت دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری بررسی گردیده است. مقادیر هزینه‌ای ذکر شده جهت تبدیل واحدهای گازی به سیکل ترکیبی، مبتنی بر مبالغ قراردادهای واقعی در کشور می‌باشد. همچنین استفاده از سیال عامل دی اکسیدکربن در سیکل‌های پایین دستی بعنوان یک مفهوم نوآورانه در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است.

¹Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

قابلیت دسترسی، اطمینان بالا از عملکرد، هزینه کم در مقابل توان تولیدی زیاد و قابلیت استفاده از سوخت‌های رایج کشور یعنی گاز و گازوئیل از مهم‌ترین فاکتورهای اقتصادی این نوع توربین می‌باشد. دمای مناسب سیال در ورودی به قسمت توربین^۱ (حدود ۱۰۶۰ درجه سانتیگراد) سبب افزایش فاصله‌های زمانی تعمیرات و کاهش هزینه‌های سرویس و نگهداری نسبت به توربین‌های گازی قدیمی‌تر شده است.

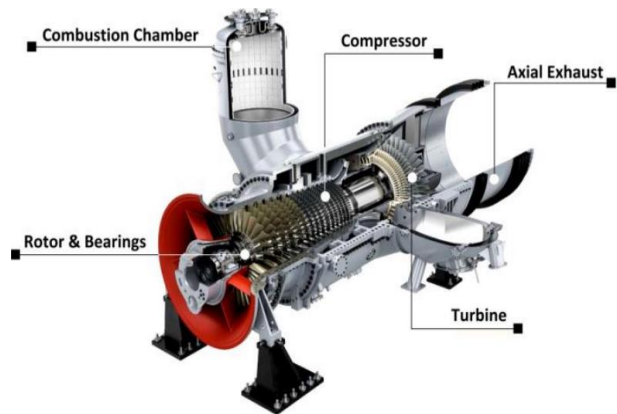


شکل ۵ نمای زیرین داخل محفظه احتراق توربین گاز V94.2 و چیدمان مشعل‌ها و آجرهای نسوز

به دلیل اینکه در توربین‌های گاز، محصولات احتراق مستقیم وارد توربین شده و فرایند تبدیل گرما به کار صورت می‌گیرد، محفظه داخلی توربین بویژه پره‌ها در معرض دمای بالایی قرار دارند که کارکرد آنها در این محدوده‌های دمایی موجب تسهیل استهلاک و فرسودگی زود هنگام می‌گردد. بنابراین طول عمر توربین‌های گاز V94.2 نیز محدود است و عمدتاً به نوع رژیم کاری (در بار پایه، بار متوسط یا بار اوج)، نوع سوخت مصرفی، دمای گازهای داغ در ورودی توربین و شرایط محیطی بستگی دارد. اجزای این توربین گاز، در معرض تنش ناشی از حرارت یا بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مانند خزش، خستگی، فرسایش، اکسیداسیون و خوردگی و همچنین تنش و سایش مکانیکی قرار دارند که باعث پیری این توربین‌ها می‌شود.

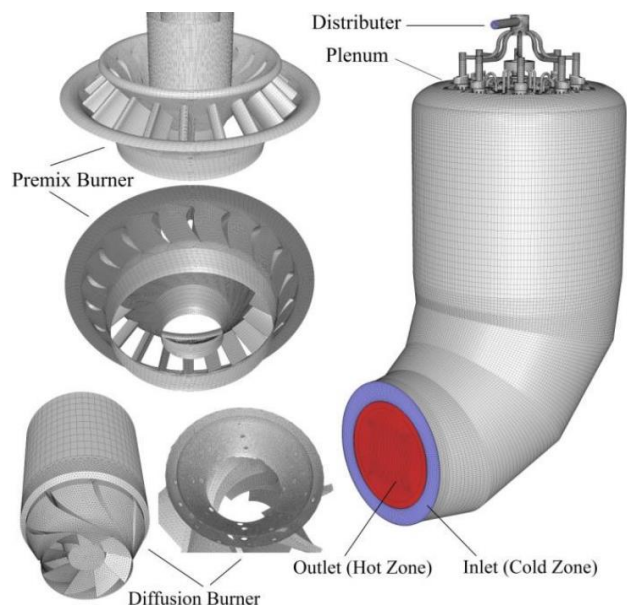
به منظور بهبود قابلیت اطمینان عملکرد واحد، افزایش راندمان، بازیابی تولید و کنترل میزان گازهای آلاینده ناشی از احتراق، انجام تعمیرات دوره‌ای منظم و متعدد از جمله تعمیرات اساسی برای آنها پیش‌بینی گردیده است.

توربین ادامه دارد به گونه‌ای که هم‌اکنون در شرایط ایزو ظرفیت اسمی تولید آنها از ۱۵۹ مگاوات به ۱۸۳ مگاوات ارتقاء یافته است. در حال حاضر نیز انتقال تکنولوژی ساخت توربین‌های گازی کلاس F با ظرفیت اسمی بالای ۳۰۰ مگاوات در جریان است و تاکنون چندین واحد از این نوع در کشور نصب و راه‌اندازی گردیده‌اند. اجزاء اصلی و نمای برش خورده توربین گاز V94.2 در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳ نمای برش خورده و اجزاء اصلی توربین گاز V94.2 [۶]

توربین‌های V94.2 دارای دو محفظه احتراق سیلویی شکل با تعداد ۸ مشعل بر روی هر یک مطابق شکل‌های (۴) و (۵) می‌باشد و پوشش داخلی محفظه احتراق آنها از جنس یک نوع سرامیک می‌باشد که به راحتی قابل تعویض است.



شکل ۴ محفظه احتراق توربین گاز V94.2، قسمت‌های ورود هوای فشرده و خروج محصولات احتراق و نوع مشعل‌های آن [۶]

^۱Turbine Inlet Temperature (TIT)

این بخش‌ها نیز بررسی می‌گردند. در این تعمیرات، اجزاء روتور باید به‌طور کامل جدا شوند، آزمایش‌های غیرمخرب و ارزیابی طول عمر^۲ روی آنها انجام و پس از تحلیل نتایج و اقدامات لازم، اجزاء روتور مجدداً واجد شرایط و کیفیت مطلوب شوند. به‌دلیل جامع‌تر بودن تعمیرات در این مرحله، در صورتی که مراحل و اقدامات آن صحیح و کامل انجام پذیرد می‌توان به ویژگی‌های یک توربین یا واحد در حد نو با قابلیت اطمینان برای عملکرد در یک دوره دیگر (در حالت معمول حداقل تا دو تعمیرات اساسی بعدی) دست یافت و لذا تعمیرات اساسی این مرحله را فرایند تمدید طول عمر یا LTE^3 نامیده‌اند. یکی از بحث‌های کلیدی در این موضوع، تعیین عمر باقیمانده قطعات ۴ با تکنیک‌های متعدد و رایج می‌باشد که امکان افزایش طول عمر را فراهم می‌نماید.

بومی‌سازی تولید توربین‌های گاز V94.2 در کشور، افزایش تعداد واحدهای نصب شده و عبور کارکرد برخی از واحدهای نصب شده از میزان یکصد هزار ساعت، منجر به این گردیده که اقدامات تعمیراتی این واحدها و همچنین فرایندهای ارتقاء و به‌روزرسانی آنها و همچنین تعمیرات LTE از رونق و جایگاه خوبی در کشور برخوردار باشد.

۳- تبدیل نیروگاه‌های گازی V94.2 به سیکل ترکیبی

همانگونه که ذکر شد در دهه‌های گذشته تعداد قابل توجهی توربین گاز در کشور نصب و راه‌اندازی گردیده و با راندمان حدود ۳۰ درصد در حال کار می‌باشد ولی بدلیل اینکه احداث بخش بخار این نیروگاه‌ها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی علاوه بر زمان‌بر بودن (حدود ۳ سال) هزینه بیش از دو برابری نسبت به بخش گازی با ظرفیت مشابه دارند؛ لذا ترکیبی نمودن بخش قابل توجهی از سیکل‌های گازی به تعویق افتاده که نتیجه آن هدر رفت مقادیر عظیمی از انرژی‌های قابل استحصال بوده است که لازم است تدابیر موثری در این زمینه اتخاذ شده و از زیان‌های بیشتر مالی و زیست محیطی جلوگیری نمود. یادآور می‌گردد تاکنون تدابیر گوناگونی جهت عملکرد بهینه این توربین‌ها لحاظ گردیده از جمله تحلیل ترمودینامیکی [۱۰]، استفاده از سیستم‌های خنک‌کن هوای ورودی به توربین در تابستان [۱۱] ولی در نهایت بایستی به سیکل ترکیبی تبدیل گردند. جهت نیل به این هدف و انجام اقدامات مربوطه، مشابه سایر طرح‌های صنعتی و

یکی از گلوگاه‌های واحدهای گازی، قطعات مربوط به محفظه داغ توربین‌هاست که به دلیل شرایط کاری و ترکیب مکانیزم‌های مخرب (خوردگی داغ، خزش و خستگی) دارای عمر محدود هستند و زمانی که عمر کاری آنها منقضی می‌شود باید با قطعات جدید جایگزین شوند؛ لذا در این زمان است که با انتخاب قطعات به روز شده و مناسب‌تر از قطعات قبلی، موضوع امکان ارتقاء کیفی که زمینه ساز ارتقاء کمی (بهبود شرایط کاری و نیز افزایش توان توربین نسبت به قبل از تعمیرات) است مصداق پیدا می‌کند. مقدار افزایش توان، به نوع پکیج انتخابی برای ارتقاء که مشخص کننده قطعاتی است که جایگزین می‌شود بستگی دارد. در توربین گازهای V94.2 نصب شده در کشور در دهه‌های گذشته، این افزایش توان متناسب با ورژن واحد و پکیج انتخابی ارتقاء، بین ۴ تا ۲۴ مگاوات می‌تواند باشد.

توربین‌های گاز معمولاً برای عمر کاری ۱۰۰ هزار تا ۱۶۰ هزار ساعت کارکرد (حدود ۱۲ تا ۲۰ سال) طراحی می‌شوند. در طول عمر کارکرد یک توربین گاز، اثرات خوردگی و پیری و زوال‌های متالورژیکی شناسایی می‌شوند و قطعات برای بهبود کیفی در برابر آسیب، مقاوم سازی و بازطراحی می‌شوند [۷]، [۸]، [۹]. برای قطعات اصلی توربین مانند روتور که آسیب آن گاهی می‌تواند باعث آسیب به کل مجموعه و حتی خطرات جانی شود، ملاحظات ایمنی قابل توجهی لازم است تا اطمینان حاصل شود احتمال رخداد رویدادهای دارای مخاطره بسیار کم می‌باشد. عدم انجام اقدامات پیشگیرانه ممکن است منجر به حادثه برای دستگاه گردد که حتی اگر برای ایمنی نفرات مجاور آن مخاطراتی نداشته باشد ولی گاهی به تعداد زیادی از قطعات مسیر داغ آسیب می‌رساند و باعث خارج از مدار قرار گرفتن طولانی مدت توربین و خسارت‌های مالی قابل توجه می‌گردد. بنابراین رعایت دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری این توربین‌ها حائز اهمیت می‌باشد که علاوه بر بازدیدها، تعمیرات و تعویض قطعات بویژه در مسیر گاز داغ، به ازاء هر ۳۳ هزار ساعت کارکرد معادل^۱، یک تعمیرات اساسی برای این توربین‌ها در نظر گرفته شده است. برخی از قطعات توربین گاز V94.2 مانند بخش‌هایی از روتور، علیرغم اینکه در مسیر گاز داغ قرار دارد ولی معمولاً در تعمیرات اساسی در طول عمر طراحی اولیه، بررسی و جایگزین نمی‌شوند که طبق دستورالعمل پیشنهادی طراح و سازنده اصلی این توربین، در تعمیرات اساسی کارکرد یکصد هزار ساعت، با اقدامات اضافه‌تر و دامنه بازرسی فراتر نسبت به تعمیرات اساسی قبلی،

³ Life Time Extension

⁴ Residual Life Time

¹ Equivalent Operating Hours (EOH)

² Life Assessment

با احتساب سایر هزینه‌های اجرای این طرح از جمله هزینه مهندسی، ساختمانی، نصب و راه اندازی و هزینه‌های غیر EPC، هزینه تقریبی اجرای دو واحد بخار مطابق جدول (۳) می‌باشد. بنابراین برای احداث هر واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و تبدیل هر دو واحد توربین گاز V94.2 موجود به یک بلوک سیکل ترکیبی حدود ۱۳۰ میلیون یورو هزینه اعتبار مالی بایستی در نظر گرفت.

جدول ۲ شکست قیمت تقریبی خرید تجهیزات دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک

ردیف	شرح	درصد	مبلغ (یورو)
۱	توربین و ژنراتور	۱۸/۵	۳۷,۰۰۰,۰۰۰
۲	بویلرها	۳۳	۶۶,۰۰۰,۰۰۰
۳	سیستم خنک‌کن	۱۶/۵	۳۳,۰۰۰,۰۰۰
۴	تجهیزات برق	۱۵/۵	۳۱,۰۰۰,۰۰۰
۵	تجهیزات ابزار دقیق	۹	۱۸,۰۰۰,۰۰۰
۶	B.O.P	۵	۱۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	قطعات یدکی و ابزار مخصوص	۲/۵	۵,۰۰۰,۰۰۰
۸	جمع	۱۰۰	۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰

جدول ۳ هزینه EPC اجرای دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک

ردیف	شرح هزینه‌ها	مبلغ (یورو)
۱	مهندسی	۱۲,۵۰۰,۰۰۰
۲	خرید تجهیزات، ماشین آلات و هزینه گمرک	۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	حمل و نقل و بیمه	۷,۵۰۰,۰۰۰
۴	انجام عملیات ساختمانی و احداث بنا	۱۲,۵۰۰,۰۰۰
۵	نصب و راه اندازی	۱۷,۵۰۰,۰۰۰
۶	هزینه‌های غیر EPC	۱۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	جمع	۲۶۰,۰۰۰,۰۰۰

با توجه به قوانین حمایتی موجود و همچنین عواید حاصل از تولید برق هر واحد بخار، درآمدها نیز می‌بایست به‌روز محاسبه گردیده و با داشتن هزینه و درآمد طرح، با راهکارهای موجود از جمله استفاده از نرم‌افزار کامفار، نتیجه اقتصادی طرح شامل مقادیر IRR^2 (نرخ بازده داخلی سرمایه) و دوران بازگشت

عمرانی، اولین گام مربوط به انجام مطالعات امکان‌سنجی و توجیه فنی و اقتصادی می‌باشد. با توجه به احداث واحدهای گازی این نیروگاه‌ها در سال‌های اخیر، بسیاری از سرفصل‌های مربوط به مطالعات امکان‌سنجی مانند مطالعات راه‌های دسترسی، مطالعات پروژه‌های عمرانی در منطقه، مطالعات زمین‌شناسی و زلزله‌خیزی، مطالعات زیست محیطی، مطالعات نیروی انسانی و غیره قبلاً انجام پذیرفته و تقریباً می‌توان در این مقطع از نتایج آنها استفاده نمود ولی مطالعات اتصال به شبکه و مطالعات اقتصادی می‌بایست متناسب با شرایط موجود، انجام و به‌روزرسانی شود که نتایج مطالعات اقتصادی جهت اجرای طرح، با اهمیت و تعیین‌کننده خواهد بود. خاطر نشان می‌گردد برای اضافه نمودن واحدهای بخار به مجموعه توربین‌های گازی موجود و تبدیل مجموعه به سیکل ترکیبی، آرایش‌های مختلفی را می‌توان متصور بود ولی چیدمان هر بلوک سیکل ترکیبی شامل یک واحد توربین بخار به ازای دو واحد توربین گاز به دلیل سادگی طرح، تسهیل در بهره‌برداری و تعمیرات، راندمان مناسب، قابلیت انعطاف در تغییرات بار تولیدی و نمونه‌های اجرا شده متعدد در کشور، آرایش مناسب و منتخب می‌باشد. بنابراین نوع چیدمان، توان تولید شده در واحد بخار هر بلوک سیکل ترکیبی با توان تولید شده در هر یک از واحدهای گازی برابری خواهد نمود. لذا در تبدیل نیروگاه‌های گازی موجود به سیکل ترکیبی، در نظر گرفتن یک واحد بخار با توان قابل تولید معادل توان تولید هر یک از توربین‌های گاز، آرایش مناسب و پذیرفته شده‌ای می‌باشد.

چنانچه هزینه‌های احداث واحدهای بخار این نیروگاه‌ها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی با واقعیت‌های موجود بررسی گردد می‌توان مطالعات اقتصادی و توجیه‌پذیری آنها را ارائه نمود. به همین منظور یک نیروگاه گازی شامل چهار واحد توربین گاز V94.2 را در نظر گرفته و هزینه‌های اجرای طرح ترکیبی نمودن آنها شامل احداث بخش بخار (شامل دو واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و سیستم‌های وابسته) با توجه به هزینه پروژه‌های مشابه انجام شده در سال‌های اخیر معرفی می‌گردد. این هزینه‌ها شامل دو بخش می‌باشد، بخش اول هزینه تامین تجهیزات و ساخت و اجرا^۱ یا هزینه EPC پروژه و بخش دوم هزینه‌های بلافصل اجرا یا هزینه‌های غیر EPC که این هزینه‌ها شامل هزینه‌های شرکت پروژه، هزینه مشاوران، هزینه‌های تامین آب، اتصال به شبکه، اخذ بیمه‌نامه‌ها، مجوزها، کارمزدها و موارد مشابه می‌باشد. شکست قیمت تقریبی خرید تجهیزات دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک به شرح جدول (۲) می‌باشد.

² Internal Rate of Return

¹ Engineering, Procurement, Construction (EPC)

E_2 : انرژی تولید شده از طریق بلوک سیکل ترکیبی (KWh)
 m_1 : میزان گاز مصرفی بخش گازی برحسب مترمکعب
 m_2 : میزان گاز مصرفی بخش سیکل ترکیبی برحسب مترمکعب
 برای محاسبه مقدار انرژی تولید شده ملاحظاتی منظور می-گردد که با توجه به شرایط عرضه و تقاضای برق در شبکه در ساعات و روزهای مختلف، به دستور دیسپاچینگ در مواقعی بار واحد کاهش داده می‌شود و یا واحد از مدار خارج می‌گردد و همچنین واحد به دلیل تعمیرات و یا رفع اشکالات حادث شده دچار خروج‌هایی از مدار می‌گردد، لذا برای لحاظ کردن این موارد و مشخص شدن کارکرد واقعی هر نیروگاه در هر سال، عبارت "درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه" به شکل زیر تعریف شده است:

$$= 100 \times \frac{\text{انرژی تولیدی ناخالص}}{\text{کل ساعات سال} \times \text{قدرت عملی}} (8760)$$

سیکل‌های ترکیبی متناسب با آمارهای شرکت توانیر، در هر سال دارای بهره‌برداری از ظرفیت عملی مشخصی از نیروگاه بوده است؛ لذا متوسط توان تولیدی متناسب با این درصد عملی و استخراج ظرفیت تولید عملی میانگین نیروگاه بدست می‌آید. با جایگذاری مقادیر یک بلوک سیکل ترکیبی مشخص که در بویلر بازیاب حرارت از مشعل اضافه نیز استفاده می‌کند تا تولید واحد بخار افزایش یابد و فرض ۷۴ درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه، مقدار سوخت صرفه‌جویی شده بدست می‌آید:

$$F = E_1 \times \left(\frac{m_1}{E_1} - \frac{m_2}{E_2} \right) = 260,500 \times 8,760 \times 0.74 \times \left(\frac{86,798}{260,500} - \frac{88,325}{410,500} \right) = 199,320,835 \text{ Nm}^3$$

همانگونه که مشاهده می‌شود ترکیبی شدن هر بلوک از سیکل ترکیبی مورد نظر، منجر به صرفه‌جویی سالیانه حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی یا معادل تقریبی آن، ۱۷۰ میلیون لیتر گازوئیل خواهد شد که مقدار بسیار قابل توجهی است. مقایسه مقادیر سوخت مصرفی نیروگاه‌های گازی V94.2 و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که سالیانه توسط وزارت نیرو پایش می‌گردد با مقادیر محاسبه شده تطبیق خوبی را نشان می‌دهد. با فرض ظرفیت میانگین ۲۵ هزار لیتر برای هر تریلی تانکر در حمل گازوئیل، با ترکیبی شدن هر بلوک، سالیانه از مصرف ۶۸۰۰ تانکر گازوئیل در کشور جلوگیری خواهد شد و در صورت اجرایی-شدن قانون رفع موانع تولید، عواید این صرفه‌جویی نصیب نیروگاه و کشور خواهد شد. خاطر نشان می‌گردد این مقدار صرفه‌جویی ناشی از ترکیبی شدن فقط یک بلوک سیکل ترکیبی نیروگاه‌های

سرمایه مشخص گردیده و با استفاده از آنها تصمیم‌گیری نهایی صورت خواهد پذیرفت.

یادآور می‌گردد با توجه به راندمان بالای سیکل‌های ترکیبی، ترکیبی شدن نیروگاه‌های بخار نیز مورد توجه می‌باشد [۱۲].

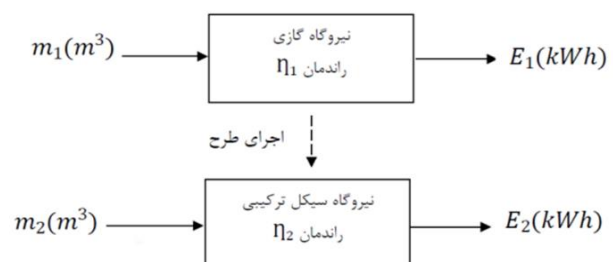
۴- سوخت صرفه‌جویی شده ناشی از تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی

هر ساله راندمان متوسط هر یک از واحدهای نیروگاهی، متناسب با شرایط ساختگاه آن و میزان مصرف سوخت و تولید برقی که داشته‌اند محاسبه و اعلام می‌گردد. مقدار متوسط ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف نیز در آزمایشگاه‌های مرجع مشخص می-گردد. بعنوان نمونه در جدول (۴) مفروضات لازم برای محاسبه سوخت صرفه‌جویی شده ناشی از تبدیل واحدهای گازی V94.2 یک نیروگاه انتخابی به سیکل ترکیبی نشان داده شده است.

جدول ۴ مقادیر در نظر گرفته شده برای محاسبه سوخت صرفه‌جویی

مفروضات محاسبه سوخت صرفه‌جویی شده		
شرح	واحد	مقدار
راندمان واحدهای گازی	درصد	۳۱
راندمان کل سیکل ترکیبی	درصد	۴۸
ارزش حرارتی پایین سوخت	KJ/m^3	۳۴۸۳۶

مقدار سوخت صرفه‌جویی شده در نتیجه ترکیبی شدن نیروگاه مطابق شکل (۶) و رابطه (۱) قابل محاسبه است:



شکل ۶ شماتیک میزان سوخت مصرفی و انرژی تولیدی قبل و بعد از تبدیل یک نیروگاه گازی به سیکل ترکیبی

$$F = E_1 \times \left(\frac{m_1}{E_1} - \frac{m_2}{E_2} \right) \quad (1)$$

این رابطه را وزارت نیرو از طرف سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت اعلام نموده که در این رابطه:

F : مقدار سوخت صرفه‌جویی شده (متر مکعب)

E_1 : انرژی تولیدشده از طریق سیکل توربین‌های گاز (KWh)

شب می‌باشد که وزارت نیرو تمام امکانات تولید را مصرف می‌دارد تا جوابگوی نیاز شبکه در ساعات پیک باشد. بدلیل اینکه تولید برق نیروگاه‌های خورشیدی فقط در ساعات روز محقق می‌شود و برای پیک شب بدون تاثیر است بنابراین سرمایه‌گذاری برای احداث این نیروگاه‌ها، کشور را از سرمایه‌گذاری در بخش بخار سیکل ترکیبی و در درجه بعد سرمایه‌گذاری برای احداث سایر نیروگاه‌های حرارتی و یا آبی برای پاسخگویی به پیک شب بی‌نیاز نخواهد کرد که در این صورت بایستی سرمایه‌گذاری مضاعف بعمل آید.

ب- متوسط تولید انرژی برق سالانه بخش بخار سیکل ترکیبی نسبت به تولید سالانه نیروگاه خورشیدی با همان قدرت نامی، حداقل ۴ برابر می‌باشد و این در حالی است که با نرخ‌های فعلی، هزینه مورد نیاز برای احداث بخش بخار سیکل ترکیبی نسبت به نیروگاه خورشیدی با همان قدرت نامی، حدود ۱/۵ برابر می‌باشد.

ج- از منظر اقتصادی، شاخص‌های مربوط به IRR و مدت زمان بازگشت سرمایه احداث بخش بخار سیکل ترکیبی، شرایط مطلوبتر و جذاب‌تری نسبت به احداث نیروگاه خورشیدی دارد.

د- با توجه به اینکه انرژی مورد نیاز در بخش بخار سیکل ترکیبی، از انرژی هدر رونده در گازهای داغ خروجی از آگروز نیروگاه‌های گازی موجود تامین می‌گردد (در بویلر بازیاب حرارت)، لذا عملکرد بخش بخار سیکل ترکیبی از منظر انرژی، مشابه نیروگاه تجدیدپذیر خواهد بود و نیاز به مصرف سوخت مجزا ندارد مگر اینکه در نظر باشد توان بیشتری از آن واحد بدست آید.

ه- انرژی حاصل از نیروگاه خورشیدی، از حوالی غروب آفتاب تا پس از طلوع آفتاب در روز بعد، قابل دسترس نیست در حالیکه بخش بخار سیکل ترکیبی در تمام ساعات شبانه روز قابل دسترس می‌باشد.

و- میزان توان تولیدی بخش بخار سیکل ترکیبی متناسب با مقدار انرژی برق مورد نیاز، همواره توسط بهره‌بردار قابل تنظیم و کنترل است (در بازه حداقل تا حداکثر توان قابل تولید واحد) در صورتیکه میزان توان تولیدی نیروگاه خورشیدی تابع شرایط تابش خورشید است و از کنترل بهره‌بردار خارج می‌باشد.

بنابر این تا زمانیکه نیروگاه‌های گازی بزرگ (بیش از ۱۰۰ مگاوات) به سیکل ترکیبی تبدیل نشده‌اند، اولویت تبدیل آن‌ها به سیکل ترکیبی بالاتر از اولویت احداث نیروگاه‌های دیگر از جمله نیروگاه خورشیدی می‌باشد و از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

رایج کشور (شامل دو واحد گازی و یک واحد بخار با ظرفیت هر واحد در محدوده ۱۶۰ مگاوات) می‌باشد.

با توجه به ظرفیت بیش از ۲۰ درصدی تولید برق کشور توسط واحدهای گازی و کثرت واحدهای گازی کلاس E و اخیراً نیز احداث واحدهای کلاس F که بیش از نیمی از ظرفیت نیروگاه‌های گازی کشور را تشکیل می‌دهند (در مقطع کنونی بیش از ۵۰ واحد گازی با ظرفیت تولید هر واحد حداقل ۱۶۰ مگاوات در شبکه برق کشور فعال است) بنابراین با ترکیبی نمودن این واحدها، سالانه بیش از ۵ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد که بطور مستقیم یا تبدیل آن به انرژی الکتریکی، قابلیت صادرات خواهد داشت.

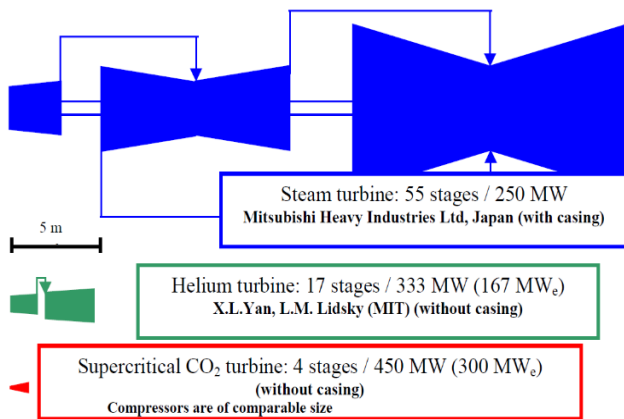
نتایج نشان می‌دهد با نرخ حدود ۱۵ سنت دلار برای هر مترمکعب گاز طبیعی، در صورت اجرای طرح ترکیبی کردن هر دو واحد توربین گاز V94.2، سالانه ۳۰ میلیون دلار از محل صرفه‌جویی سوخت نصیب کشور خواهد شد و چنانچه کل واحدهای گازی با ظرفیت هر یک بیش از ۱۰۰ مگاوات موجود در کشور به سیکل ترکیبی تبدیل گردد نتایج نشان می‌دهد سالانه نزدیک به یک میلیارد دلار از محل صرفه‌جویی سوخت نصیب کشور خواهد شد. بنابراین تبدیل سیکل‌های گازی موجود به سیکل ترکیبی علاوه بر مزایای زیست محیطی، از نظر اقتصادی نیز با اهمیت و از اولویت قابل توجهی در کشور برخوردار می‌باشد.

۵- مقایسه اولویت احداث بخش بخار سیکل ترکیبی و احداث نیروگاه با پنل خورشیدی

امروزه با توجه به افزایش قیمت سوخت در دنیا و همچنین پیشرفت علم و تکنولوژی در استخراج و تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، استفاده از این انرژی‌ها بویژه انرژی خورشید در دنیا رونق گرفته است و احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک و استخراج انرژی الکتریسیته از این منابع گسترش یافته است. بدلیل اینکه در کشور ما نیز این مسیر دنبال شده است مناسب می‌باشد در این مقطع و شرایط، اولویت احداث بخش بخار نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را با احداث نیروگاه خورشیدی نیز مقایسه نماییم. اهم نتایج این مقایسه را می‌توان به شرح زیر عنوان نمود:

الف- حداکثر مصرف برق در کشور غالباً در شب‌ها صورت می‌پذیرد که البته در روزهای گرم سال در ظهرها نیز مصرف به حداکثر می‌رسد لذا شبکه برق دارای یک پیک روز و یک پیک

از جمله انرژی هسته‌ای، انرژی خورشیدی، انرژی احتراق سوخت‌های فسیلی، انرژی زمین گرمایی، انرژی زیست توده و حتی استفاده از گرمای اتلافی سیستم‌ها بعنوان سیکل پایین دستی در چرخه‌های ترکیبی، قابل توجه و دستیابی می‌باشد. در شکل (۷) مقایسه اندازه توربین با سیال عامل بخار، هلیوم و دی اکسیدکربن بطور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۷ مقایسه اندازه توربین با سیال عامل بخار، هلیوم و دی اکسید کربن [۱۸]

چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن، قبلاً به سه دلیل اصلی نتوانست در صنعت تولید برق ایفای نقش کند:

(۱) هموار نبودن دسترسی به مواد مقرون به صرفه که بتواند در برابر دمای بالا و فشار بالا (۳۰۰-۲۲۰ بار) مقاومت کند.
(۲) در دسترس نبودن مبدل‌های حرارتی مناسب، کم هزینه و فشرده که گاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه سرمایه‌گذاری در فناوری چرخه فوق بحرانی دی اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دادند.

(۳) در دسترس نبودن تجربه کافی و قابل اعتماد عملکرد توربوماشین‌های با سیال عامل دی اکسید کربن.

امروزه دو مانع اول از موانع فوق به‌نوعی برطرف شده و دیگر نگران‌کننده نیستند زیرا در طراحی و ساخت برخی نیروگاه‌ها، بخار فوق بحرانی به شرایط عملیاتی در حدود ۶۳۰°C و ۳۰۰ بار رسیده است [۱۹]. همچنین فناوری نسبتاً جدید مبدل حرارتی مدار چایی^۲ امکان‌پذیری انتقال گرما در سطوح فشرده و بسیار موثر را فراهم نموده که این مبدل‌ها دما و فشار بالایی را در مقایسه با مبدل‌های پوسته لوله‌ای معمولی تحمل می‌کنند [۲۰]. تحقیقات جهت بهبود عملکرد این مبدل‌ها نیز در جهان رونق گرفته و در حال انجام می‌باشد [۲۱].

۶- آخرین وضعیت تحول چرخه پائین دستی سیکل‌های ترکیبی

علاوه بر اقدامات معمول جهت بهبود عملکرد بخش بخار سیکل-های ترکیبی موجود [۱۳]، [۱۴] با توجه به اینکه تاکنون سیالات عامل مختلفی مانند هوا، آمونیاک، دی اکسید کربن، هلیوم، نیتروژن و آب برای چرخه‌های تولید توان مورد استفاده قرار گرفته‌اند، برای چرخه پایین دستی سیکل‌های ترکیبی نیز بجای سیکل بخار که از سیال عامل آب استفاده می‌شود، سیکل‌های با سیالات عامل دیگر مانند هوا [۱۵] و دی اکسید کربن نیز در حال مطالعه هستند [۱۶]. سیکل‌های با سیال عامل دی اکسید کربن فوق بحرانی^۱ بدلیل ویژگی‌های مربوط به آن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته و مطالعات گسترده‌ای در مورد آن در حال انجام است [۱۷]، [۱۸]. هرچند نتایج خوبی نیز تاکنون حاصل شده و با این سیال عامل نیروگاه آزمایشی تا ۲۵ مگاوات نیز ساخته شده ولی هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند. ویژگی‌های خاص دی اکسید کربن در نقطه بحرانی، از جمله مقادیر پایین فشار و دما (۷/۳۸ مگاپاسکال و ۳۱ درجه سانتیگراد)، چگالی بالا و ویسکوزیته پایین، محاسن و مزیت‌های قابل توجهی برای کاربردی کردن سیکل‌های با این سیال عامل می‌باشد که از این ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مناسب بودن راندمان حرارتی
- جمع و جور بودن سیکل که منجر به کاهش وزن و حجم و سطح جایگیری تجهیزات می‌گردد.
- پایین بودن هزینه برق تولیدی
- کاهش قابل توجه مصرف آب ناشی از تغییر فرآیند تولید توان نیروگاه
- قابلیت دسترسی و تامین سیال عامل

ویژگی منحصر به فرد و امیدوارکننده چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن، پتانسیل آن برای بهبود عملکرد تمامی سیکل‌های تولید توان است. اگر اهداف تحقیق و توسعه چرخه‌های فوق بحرانی دی اکسید کربن محقق شوند، فناوری فوق بحرانی دی اکسید کربن جایگزین بسیاری از چرخه‌های مرسوم در سیستم-های تولید توان خواهد شد زیرا دارای بازده خالص بالاتر، هزینه-های کمتر، وزن کمتر و سطح جایگیری کوچکتر تجهیزات و دستیابی به طرح‌های عملیاتی سریعتر می‌باشند. این مزایا درحالی قابل دستیابی هستند که عملکرد چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن تقریباً با تمام منابع اصلی انرژی حرارتی اولیه،

²Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE)

¹Supercritical Carbon dioxide (sCO₂)

بویژه بعنوان جایگزین سیکل بخار در سیکل‌های ترکیبی را مورد توجه قرار داده است.

در چرخه برایتون فوق بحرانی، دی اکسید کربن به عنوان سیال عامل، یک مفهوم نوآورانه برای تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی در کاربردهای مربوط به تولید توان با استفاده از اتلافات حرارتی می‌باشد. به طور خاص، کاربرد سیستم‌های تولید برق از طریق سیکل با سیال عامل دی اکسید کربن، کوچک‌تر شدن اندازه تجهیزات، سطح جایگیری کمتر تجهیزات نیروگاه و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری را به دنبال خواهد داشت. بازده بالاتر این سیکل‌ها منجر به کاهش مصرف سوخت و آب و انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. جذابیت ویژگی‌های اقتصادی و ترمودینامیکی چرخه‌های توان فوق بحرانی دی اکسید کربن، به افزایش توجه به چنین فناوری جدیدی کمک می‌کند و ترویج آن را تسریع می‌نماید. تاکنون با این سیال عامل نیروگاه‌های تا ۲۵ مگاوات ساخته شده ولی به مرحله تجاری‌سازی نرسیده و تحقیقات وسیعی در این زمینه در جریان می‌باشد.

۸- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

m	میزان گاز مصرفی (Nm^3)
E	انرژی (KWh)
HRSG	بویلر بازیاب حرارت
TIT	دمای ورودی توربین
EOH	ساعت کارکرد معادل (h)
LTE	افزایش طول عمر
EPC	مهندسی، خرید، اجرا
BOP	سیستم‌های جانبی سیکل
IRR	نرخ بازگشت داخلی سرمایه
KWh	کیلو وات ساعت
Nm^3	نرمال متر مکعب

علائم یونانی

η	بازده
--------	-------

۹- مراجع

- [1] R. M. Hannun and M. M. Salih, "Converting Zubair oil field permanent power generation from single cycle into combined-cycle with plant exergy analysis," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1279, no. 1: IOP Publishing, p. 012058, [10.1088/1742-6596/1279/1/012058](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1279/1/012058).
- [2] S. C. Gülen and R. W. Smith, "Second law efficiency of the Rankine bottoming cycle of a combined cycle power plant," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 132, p. 011801 (10 pages), 2010, <https://doi.org/10.1115/1.3124787>.

بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی ساخت نمونه‌های عملی سیکل با سیال عامل دی اکسید کربن در چندین کشور افزایش یافت و امکان نصب واحدهای آزمایشی چرخه تراکم مجدد فوق بحرانی دی اکسید کربن در کلاس مگاوات مهیا شد که تحقیقات و بهینه‌سازی آنها با جدیت ادامه دارد [۲۲]، [۲۳]. چالش اصلی در عدم قطعیت ایجاد این سیکل‌ها، ارقام هزینه‌ای اجزای اصلی چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن که عمدتاً به دلیل جدید بودن آنها در بازار است می‌باشد. هم‌اکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در مراکز علمی و تحقیقاتی جهان در حال انجام است و انتظار می‌رود نتایج آنها به‌زودی محقق و تجاری گردد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به بومی سازی تولید توربین‌های گاز V94.2 در کشور، طی دو دهه گذشته غالب توربین‌های گاز نصب شده در شبکه برق کشور از این نوع می‌باشند. بکارگیری قطعات با فناوری بروز و توانمندتر بجای قطعات قبلی در موعد تعمیرات اساسی آن‌ها، انجام فرآیند به‌روزرسانی و ارتقاء این واحدها را محقق و منجر به افزایش توان تولید و بهبود ظرفیت شبکه می‌گردد. پس از کارکرد معادل یکصد هزار ساعت، این توربین به پایان چرخه عمر طراحی خود نزدیک می‌شود که با اعمال سومین تعمیرات اساسی که LTE نام‌گذاری شده، فرایند تمدید طول عمر و امکان کارکرد ایمن و مطمئن برای یک دوره مشخص دیگر (در حالت معمول حداقل تا دو تعمیرات اساسی بعدی) فراهم می‌گردد.

در صورت ترکیبی نمودن سیکل نیروگاه‌های گازی رایج کشور، به ازاء هر بلوک در هر سال، حداقل ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی یا معادل آن ۱۷۰ میلیون لیتر گازوئیل، صرفه‌جویی خواهد شد. در صورت تکمیل اجرای فرایند ترکیبی نمودن واحدهای گازی بزرگ در کشور، امکان صرفه‌جویی سالانه حدود ۶ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی فراهم که ارزش فعلی آن نزدیک یک میلیارد دلار می‌باشد. برای احداث هر واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و تبدیل هر دو واحد توربین گاز V94.2 موجود به یک بلوک سیکل ترکیبی، حداقل ۱۳۰ میلیون یورو هزینه اعتبار مالی بایستی در نظر گرفته شود.

اولویت کشور در درجه نخست، تبدیل واحدهای گازی بزرگ موجود به سیکل ترکیبی و پس از آن، احداث سایر نیروگاه‌های با ظرفیت بالا از جمله نیروگاه‌های تجدیدپذیر و بویژه نیروگاه خورشیدی مورد نظر قرار گیرد.

ویژگی‌های خاص دی اکسید کربن در نقطه بحرانی، محاسن و مزیت‌هایی برای کاربردی کردن سیکل‌های با این سیال عامل

- using two types of heavy duty gas turbines," *International Journal of Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 781-793, 2015, [10.5829/idosi.ije.2015.28.05b.17](https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2015.28.05b.17).
- [13] O. R. Altarawneh, A. A. Alsarayreh, M. Ala'a, M. J. Al-Kheetan, and S. S. Alrwashdeh, "Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, p. 101852, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101852>.
- [14] U. G. Azubuike, L. C. Egbuhuzor, H. O. Njoku, and O. V. Ekechukwu, "Exergy analysis of a steam power plant at full and partial load conditions," *International Journal of Exergy*, vol. 40, no. 2, pp. 182-197, 2023, <https://doi.org/10.1504/IJEX.2023.128784>.
- [15] A. V. Mikheev and Y. M. Potanina, "Technical-economic evaluation of medium-power gas turbine plant with air bottoming cycle," in *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 114: EDP Sciences, p. 07005, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911407005>.
- [16] Y. Jiang, L. Zhan, X. Tian, and C. Nie, "Thermodynamic Performance Comparison and Optimization of sCO₂ Brayton Cycle, tCO₂ Brayton Cycle and tCO₂ Rankine Cycle," *Journal of Thermal Science*, vol. 32, no. 2, pp. 611-627, 2023, <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1708-z>.
- [17] J. Du, J. Guo, Z. Zhang, M. Li, F. Ren, and Y. Liu, "A triple cascade gas turbine waste heat recovery system based on supercritical CO₂ Brayton cycle: Thermal analysis and optimization," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 16, p. 100297, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100297>.
- [18] V. Dostal, M. J. Driscoll, and P. Hejzlar, "A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors," Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering, 2004. [Online]. Available: <https://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf>.
- [19] A. Benato, S. Bracco, A. Stoppato, and A. Mirandola, "LTE: A procedure to predict power plants dynamic behaviour and components lifetime reduction during transient operation," *Applied energy*, vol. 162, pp. 880-891, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.162>.
- [20] K. Cheng, J. Zhou, H. Zhang, X. Huai, and J. Guo, "Experimental investigation of thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit heat exchanger used as a pre-cooler for the supercritical CO₂ Brayton cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, p. 115116, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115116>.
- [3] B. Haghghi, A. Saleh, H. Hajabdollahi, and M. S. Dehaj, "A combined cycle power plant integrated with a desalination system: Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis and multi-objective optimization," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 1688-1708, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11814-022-1098-z>.
- [4] E. Miliaras and P. Wilkinson, "Benefits of converting utility gas turbines to combined-cycle plants," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 1986, vol. 79337: Citeseer, p. V001T01A001, <https://doi.org/10.1115/86-JPGC-GT-1>.
- [5] I. Diakunchak, H. J. Kiesow, and G. McQuiggan, "The history of the Siemens gas turbine," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2008, vol. 43123, pp. 923-935, <https://doi.org/10.1115/GT2008-50507>.
- [6] A. Raja, A. A. Shirazpour, and M. Peiman, "Modification for Combustion Chamber of V94. 2 SIEMENS Gas Turbine in Diffusion Mode," in *2019 International Power System Conference (PSC)*, 2019: IEEE, pp. 195-201, [10.1109/PSC49016.2019.9081475](https://doi.org/10.1109/PSC49016.2019.9081475).
- [7] P. Slottner, "Life Extension of SIEMENS Industrial-Sized Gas Turbines," in *Proceedings of the 18th Symposium of the Industrial Application of Gas Turbines Committee, Banff, AB, Canada*, 2009, pp. 19-21, <https://doi.org/10.1115/86-jpgc-gt-1>.
- [8] K. Sabri, M. O. Si-Chaib, and M. Gaceb, "Lifetime extension prediction of the rejuvenated first stage gas turbine blades," *Materials Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 46-54, 2020, <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1681157>.
- [9] T. Sanmugham, I. Ismail, and A. Said, "Life extension program and refurbishment of gas turbine parts after 100,000 EOH," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2035, no. 1: AIP Publishing, <https://doi.org/10.1063/1.5075589>.
- [10] H. O. Egware and A. Obanor, "The investigation of an SGT5-2000E gas turbine power plant performance in Benin City based on energy analysis," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 16, p. 100316, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100316>.
- [11] H. O. Egware, U. P. Onochie, and H. Itoje, "Effect of incorporating fogging inlet air cooling system: a case study of Ihovbor Thermal Power Plant, Benin City," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 2173-2179, 2022, <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1722231>.
- [12] S. Nikbakht Naser Abad, K. Mobini, A. Mehrpanahi, and M. R. Ali Goodarz, "Technical analysis of conversion of a steam power plant to combined cycle,

- Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 9, no. 1, p. 5, 2024, <https://doi.org/10.3390/ijtpp9010005>.
- [23] S. H. F. Alavi, S. Soltani, S. Mahmoudi, and M. A. Rosen, "A novel supercritical carbon dioxide combined cycle fueled by biomass: Thermodynamic assessment," *Renewable Energy*, vol. 222, p. 119874, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119874>.
- [21] M. Searle, S. Ramesh, and D. Straub, "Optimization-Inspired Pin-Fin Array for Supercritical Carbon Dioxide Recuperator," *Applied Thermal Engineering*, vol. 241, p. 122335, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122335>.
- [22] A. S. Abdeldayem, S. I. Salah, O. A. Aqel, M. T. White, and A. I. Sayma, "Design of a 130 MW axial turbine operating with a supercritical carbon dioxide mixture for the SCARABEUS project," *International*

مطالعه تجربی اثر سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار در جوشکاری لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق های پلی آمید

چکیده: در این پژوهش به جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق های پلی آمید که به صورت لب روی هم قرار گرفته بودند، پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی است. با استفاده از طراحی آزمایش عاملی کامل، نمونه ها جوشکاری شده و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. بیشترین استحکام برای پارامترهای با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه برابر با ۲۰۹۸ نیوتن است. همچنین سطح مقطع نمونه های جوشکاری شده برای مطالعه نحوه اثر پارامترهای جوشکاری بر اتصال مورد مطالعه قرار گرفت که نشان می دهد افزایش نسبت سرعت دورانی ابزار به سرعت پیشروی منجر به تولید حرارت مناسب و توزیع دمایی بهتر شده و در نتیجه ورق پایینی بیشتر در فرایند اتصال مشارکت می کند و استحکام بالاتری در اتصال مشاهده می شود. مهمترین دستاورد مطالعه حاضر این است که بدون نیاز به طراحی ابزاری خاص که در مطالعات گذشته در مورد پلیمرها بر آن تاکید شده است، می توان به اتصال مناسبی برای پلی آمید با استفاده جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دست یافت. همچنین با استفاده از نسبت مناسب سرعت دورانی به سرعت پیشروی ابزار می توان کیفیت اتصال را بهبود بخشید.

واژه های راهنما: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پلی آمید، آزمون کشش، سرعت دورانی، سرعت پیشروی ابزار

سروش سلطانی
کارشناسی ارشد

موسی ساجد*
استادیار

محمدعلی
صائمی صدیق

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

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

Soroush Soltani
MSc

Moosa Sajed*
Assistant Professor

Mohammad Ali
Saeimi Sadigh
Associate Professor,
Mechanical Engineering
Department, Azarbaijan
Shahid Madani
University, Tabriz

An experimental investigation on effect of tool rotational speed and feed rate in friction stir overlap welding of polyamide sheets

Abstract: In this research, linear friction stir welding has been done on polyamide sheets in the overlap configuration. The investigated parameters include tool rotational speed and feed rate. Using the full factorial design of experiments, the samples were welded and subjected to tensile test. The maximum strength was obtained for the specimen welded with a tool rotational speed of 1600 rpm and feed rate of 8 mm/min that is equal to 2098 N. Also, the cross section of the welded samples was studied to investigate the effect of the welding parameters on the weld nugget, which shows that the increase in the ratio of the tool rotational speed to the feed rate leads to a suitable heat input and better temperature distribution which results in more contribution of the lower plate in the welding process and stronger joints. The most important achievement of the present study is that without the need to design a special tool that has been emphasized in the past studies about polymers, it is possible to achieve a suitable joint for polyamide using friction stir welding. Also, the quality of connection can be improved by using the appropriate ratio of tool rotational speed to feed rate.

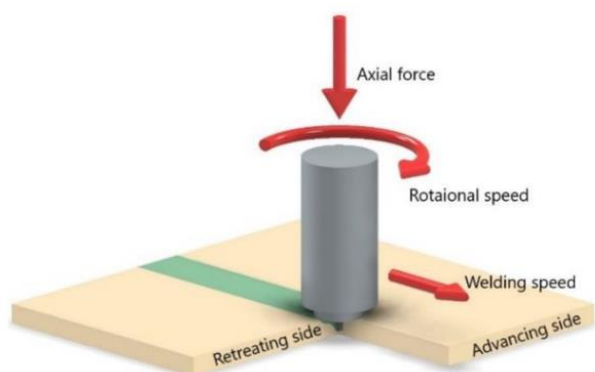
Keywords: Friction stir welding, Polyamide, Tensile test, Tool rotational speed, Feed rate

۱- مقدمه

همچون سایر روش‌های جوشکاری و پردازش مواد، این فرایند نیز از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های مهم در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مانند هر روش جوشکاری دیگر، توجه به تنش‌های پسماند و کنترل آن‌ها است. در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی به دلایل مختلفی همچون گرادیان حرارتی، گیربندی مستحکم، تغییر شکل پلاستیک و نرخ کرنش بالا همواره با مقادیری تنش پسماند در قطعه جوشکاری شده روبرو هستیم [۹]. برخی از محققین تلاش کرده‌اند تا میزان این تنش پسماند را با روش‌های متنوعی کاهش دهند. هاناسکاران و همکاران [۹] از روش شات پینینگ لیزری به این منظور استفاده کرده‌اند. در این روش از یک باریکه لیزر توان بالا امواجی به قطعه اعمال می‌شود که موجب ایجاد تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه می‌شود [۱۰]. اگرچه این نوع جوشکاری برای اولین بار برای آلیاژهای آلومینیوم ابداع شد [۱۱]، اخیراً کاربرد آن در پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری گسترش یافته است [۸]. پلیمرها به دلیل خواص منحصر به فرد خود از جمله وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و نسبت خوب مقاومت به وزن در کاربردهای مختلف بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها مطالعات مختلفی انجام شده است. لامبیاس و همکاران [۱۲] مطالعات انجام شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خطی و نقطه‌ای پلیمرها را خلاصه و دسته‌بندی کرده‌اند. در این مقاله اشاره شده است که روش متداول در اتصال پلیمرها استفاده از چسب، اتصال مکانیکی و جوشکاری است. روش‌های جوشکاری متفاوتی از جمله گرمایش رسانشی، جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری با استفاده از امواج، گرمایش همرفتی و استفاده از مواد پرکننده داغ برای جوشکاری ترموپلاستیک‌ها استفاده شده است. ویداکیس و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ورق‌های پلی آمید ۶ تولید شده به روش اکستروژن افزایشی پرداخته‌اند. روای و همکاران [۱۴] به مطالعه اثر تقویت ورق‌های پلی آمید ۶۶ با استفاده از الیاف شیشه‌ای پرداخته‌اند و تاثیر این تقویت را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این ورق‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار داده‌اند. ابوشان و همکاران [۱۵] به توسعه یک مدل جدید مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش بینی خواص مکانیکی اتصال بین ورق-های پلی کربنات و ای بی اس با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته‌اند. مدل‌های ارائه شده با روش‌های هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های عددی سرعت بسیار بیشتری در پردازش و ارائه نتایج نهایی دارند.

انقلاب اصلی استفاده از پلاستیک‌ها در صنایع خودروسازی در سال ۱۹۵۰ با معرفی اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ای بی اس) و در ادامه پلی‌آمید، پلی اکسی متیلن و پلی کربنات اتفاق افتاد. توسعه مداوم پلیمرهای پیشرفته به صورت قابل توجهی استفاده از آن‌ها را افزایش داد. به طور مشخص خواص مکانیکی مناسب پلاستیک‌ها در کنار ظاهر خوب آن‌ها و به طور خاص خود رنگ‌پذیری این مواد باعث شد تا مورد توجه قرار گیرند. استفاده از پلیمرها در صنایع خودروسازی در دهه‌های اخیر در حال افزایش بوده است. امروزه با استفاده از پلاستیک‌ها خودروهایی سبک‌تر، کم مصرف‌تر تولید می‌شوند و قطعاتی تولید شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند که دارای ویژگی‌هایی همچون مقاومت در برابر خوردگی، تافنس، انعطاف در طراحی و عمر بیشتر هستند [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک روش اتصال نسبتاً جدید است که توسط موسسه جوشکاری در سال ۱۹۹۱ به ثبت رسید [۲]. در این روش، قطعات با کمک گرمای اصطکاکی ایجاد شده توسط ابزاری که به سرعت در حال چرخش است، متصل می‌شوند نحوه قرارگیری در حین جوشکاری در شکل (۱) نشان داده شده است. پیشرفت‌های مختلفی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد شده است. از جمله آن‌ها استفاده از روش‌های هیبریدی جوشکاری است. به طور مشخص استفاده از جریان الکتریکی در حین جوشکاری به منظور تولید و توزیع بهتر حرارت و دستیابی به کیفیت بهتر جوشکاری از آن جمله است [۳]. استفاده از این فرایند در ساخت افزایشی پیشرفت جدید دیگری است که در این حوزه ایجاد شده است [۴، ۵]. پردازش اصطکاکی اغتشاشی نیز با وجود معرفی شدن در حدود دو دهه پیش، همچنان در مرکز توجه قرار دارد و انواع آلیاژها و کامپوزیت‌ها با استفاده از این روش مورد پردازش قرار می‌گیرد [۶، ۷].



شکل ۱ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۸]

حوزه اتصال با کیفیت پلیمرها با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام پذیرد. در همین راستا در مقاله حاضر به جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی امید پرداخته شده است و اثر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت پیشروی نقش مهمی در استحکام کششی نمونه جوشکاری شده دارد. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه شامل سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه است. سایر پارامترها برای همه نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر، ورق‌های پلی امید با ضخامت ۳ میلی‌متر با استفاده از روش جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شدند. پلی امیدها ترکیبات مولکولی بالایی با ساختار خطی با وزن مولکولی تا سی هزار تشکیل می‌دهند. ماکرومولکول‌ها از زنجیره‌های متیلن با گروه‌های امید تشکیل شده‌اند که به طور منظم در امتداد یک زنجیره قرار دارند. ابعاد نمونه‌های جوش ۲۱۵×۴۰ میلی‌متر بود. ابزار مورد استفاده در این مطالعه از جنس فولاد گرم کار H13 ماشین‌کاری شد. پین ابزار مورد استفاده به شکل استوانه ساده با قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۵/۲ میلی‌متر تراشکاری شد. قطر شانه ابزار نیز ۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابزار پس از تراشکاری تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و سختی آن تا ۵۴ راکول سی افزایش داده شد. برای انجام فرایند از فرز یونیورسال تولیدی شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شد. به منظور بستن قطعه روی دستگاه فرز، فیکسچر مخصوصی طراحی و ساخته شد که با توجه به روبندهای فولادی در نظر گرفته شده برای آن از تغییر شکل و بالا آمدن ورق‌ها در حین جوشکاری ممانعت کند. شکل انجام فرآیند را برای یک نمونه به همراه ابزار و فیکسچر مورد استفاده نشان می‌دهد.

اختلاط مناسب مواد و دستیابی به جوش با کیفیت و استحکام قابل قبول تا حدود زیادی به میزان حرارت تولیدی و نحوه توزیع آن در حین فرایند وابسته است. با توجه به اهمیت حرارت تولید شده در حین فرایند در استحکام نهایی نمونه‌ها دو مورد از اصلی‌ترین پارامترهای موثر در میزان حرارت تولید شده به ناحیه جوش یعنی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار مورد مطالعه قرار گرفت.

سرعت دورانی ابزار اصلی‌ترین عامل در تعیین میزان حرارت تولیدی است و با افزایش سرعت دورانی میزان حرارت تولیدی

در حالت کلی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مورد پلیمرها چندان موفقیت آمیز نیست اما برای دسته‌ای از پلیمرها و از جمله پلی امید شرایط متفاوت است که این به دلیل خواص ویژه این پلیمر است. پلی امید یک پلیمر مهندسی نیمه کریستالی با گروه‌های امید و کربونیل و پیوند هیدروژنی بین زنجیره‌های است که منجر به سفتی و استحکام بالا در آن می‌شود. با توجه به آن عملکرد مکانیکی خوب، این پلیمر اغلب در تجهیزات ورزشی و یاتاقان‌ها و کاربردهایی که در آن در معرض شرایط بارگذاری مختلف و از جمله ضربه قرار دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. درصد کریستالی بودن برای پلی امید حدود ۳۰ درصد است. افزایش نرخ کرنش و کاهش دما می‌تواند ماده را در کرنش‌های کوچک تقویت کند که با تئوری هم ارزی دما-زمان پلیمرها مطابقت دارد. با این حال، با افزایش نرخ کرنش، گرم شدن نمونه منجر به نرم شدن حرارتی آشکار در کرنش‌های بزرگ در نرخ کرنش‌های متوسط و بالا می‌شود [۱۶].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای پلیمرها اساساً متفاوت از فلزات است. برخلاف فلزات که در آن‌ها جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد در نظر گرفته می‌شود [۱۷]، با این حال در مورد پلیمرها ترکیبی از اتصال حالت جامد و ذوبی اتفاق می‌افتد. در واقع حرارت حاصل شده در حین این فرایند ناشی از گرمای اصطکاکی و سیلان برشی ویسکوز است. الحورانی و همکاران [۱۸] مدل المان محدود برای تحلیل جوشکاری ورق‌های به ضخامت ۱۴ میلی‌متر از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا ارائه داده‌اند و در مدل خود این دو منشاء حرارت متفاوت را در نظر و گرفته و اثر آن‌ها را ترکیب کرده‌اند که منجر شده است تا نتایج مدل ارائه شده تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی داشته باشد. آقاجانی و همکاران [۱۹] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، مدلی برای شبیه‌سازی پلی کرنات در زیر آب ارائه داده‌اند. این مدل توانایی پیش بینی درصد انقباض و تشکیل گپ هوایی را در ناحیه اغتشاشی دارد. احمد و همکاران [۲۰] با استفاده از روش ترکیبی اوپلری-لاگرانژی به مدل‌سازی جریان مواد در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن چگالی بالا پرداخته‌اند. در این مقاله از ذرات قابل ردگیری و اندازه‌گیری دما به صحت سنجی مدل ارائه شده پرداخته شده است که نتایج نشان دهنده انطباق مناسب نتایج در مدل عددی و تست تجربی است.

اگرچه مطالعاتی در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها صورت گرفته است اما در مقایسه با آلیاژها، تعداد و تنوع این مطالعات کمتر است و لازم است تا مطالعات بیشتری در

به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، برای هر مورد از آزمایش‌ها سه نمونه تست کشش تهیه شد. میانگین حداکثر نیروی تحمل شده توسط هر نمونه قبل از شکست در جدول (۱) آمده است.



شکل ۲ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

۳- نتایج و بحث

در مقاله حاضر، جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی پلی آمید مورد بررسی قرار گرفته است. در جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی پلی آمید به دلیل مقاومت در برابر حرارت کم، نوع پلیمر نیازی به دمای بالا ندارد. برای بهبود کیفیت سطح جوشکاری شده آزمایشات بیشتری مورد نیاز است. در مطالعه حاضر، نمونه‌ها با سرعت چرخش ابزار ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه، و عمق فرورفتگی شانه ابزار ۰/۲ میلی‌متر، جوش داده شدند.

در شکل (۳) نمونه‌ها بعد از انجام آزمون کشش نشان داده شده است. در این شکل، محل جدایش در هر مورد با استفاده از کادر قرمز مشخص شده است. ورق‌های چسبانده شده روی نمونه‌های آزمون کشش به منظور جلوگیری از اعمال نیروهای خارج از محور نیز در تصاویر قابل مشاهده است. برای ارزیابی اتصالات از آزمون کشش استفاده شد. در هر مورد به منظور ارزیابی تکرارپذیری نتایج سه نمونه آزمون تهیه شد.

در شکل (۴) به عنوان نمونه نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نمایش داده شده است. همچنین میانگین حداکثر نیروی تحمل شده توسط هر نمونه قبل از شکست در جدول (۱) خلاصه شده است.

افزایش می‌یابد. از طرفی سرعت پیشروی ابزار تعیین کننده زمان حرارت‌دهی به ناحیه جوش است و با افزایش سرعت پیشروی نرخ حرارت‌دهی به ناحیه جوش کاهش پیدا می‌کند. سطوح در نظر گرفته شده برای سرعت دورانی برابر با ۱۶۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. این مقادیر با توجه به محدوده در دسترس با توجه به دستگاه مورد استفاده و تست‌های اولیه انتخاب شده است. به نحوی که فاصله معنا داری بین سطوح به منظور امکان مطالعه اثر سرعت دورانی در استحکام اتصال ایجاد شود. از طرفی در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های کمتر از ۱۰۰۰ و بیشتر از ۱۶۰۰ دور دقیقه کیفیت ظاهری جوش چندان مناسب نبود. سطوح در نظر گرفته شده برای سرعت پیشروی نیز ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه است. در نتیجه با در نظر گرفتن طراحی آزمایش بر مبنای روش عاملی کامل در مجموع چهار آزمایش طراحی و انجام شد که در جدول (۱) خلاصه شده است. در روش عاملی کامل تمام حالت‌های ممکن و ترکیب‌های موجود از پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

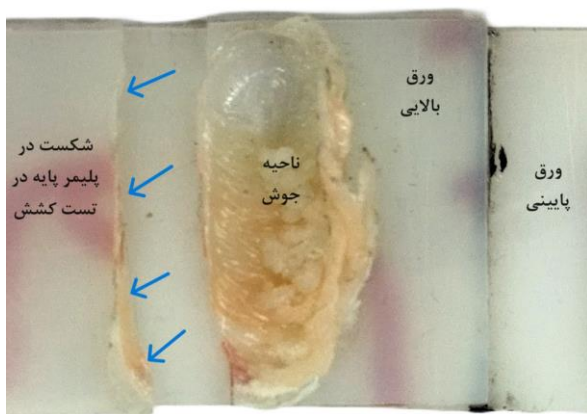
در استفاده از دو سطح، روش محاسبه تعداد آزمایش‌های مورد نیاز با استفاده از 2^n محاسبه می‌شود که در آن n تعداد پارامترهای مورد مطالعه است.

در مقاله حاضر با توجه به اینکه دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است $n=2$ است و بنابر این تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز $2^2=4$ است. عمق فرورفتگی شانه‌ای برای همه نمونه‌ها، ثابت و برابر با ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای جوشکاری نیز برای همه نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

به منظور مطالعه اثر پارامترهای مورد بررسی بر کیفیت و استحکام جوش، مقطع نمونه‌ها توسط بازرسی چشمی مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین از آزمون کشش استفاده شد. در حین آزمون کشش، به منظور جلوگیری از اعمال نیروهای خارج از مرکز، دو تکه ورق با ضخامت برابر با ضخامت ورق‌های اصلی مورد استفاده در حین فرایند جوشکاری در محل قرار گرفتن نمونه در فک دستگاه تست کشش چسبانده شد. نمونه‌ها با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه مورد آزمون کشش قرار گرفتند.

جدول ۱ طراحی آزمایش فاکتوریل کامل و نتایج آزمون کشش

شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	میانگین استحکام کششی (نیوتن)
۱	۱۶۰۰	۲۵	۱۰۴۸
۲	۱۰۰۰	۸	۱۵۹۲
۳	۱۰۰۰	۲۵	۱۳۸۴
۴	۱۶۰۰	۸	۲۰۹۸



(د)

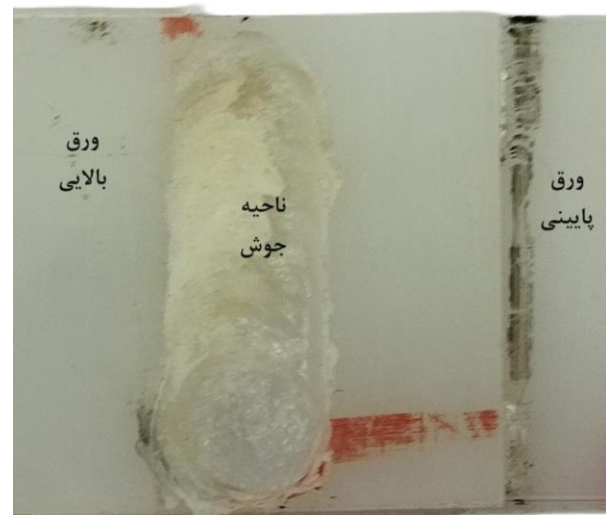
شکل ۳ محل جوش بعد از آزمون کشش؛ محل شکستگی در هر مورد روی شکل مشخص شده است. الف- نمونه شماره ۱، ب- نمونه شماره ۲ (ترک در پشت ورق زیرین اتفاق افتاده است)، ج- نمونه شماره ۳، د) نمونه شماره ۴ (در این نمونه شکست در پلیمر پایه رخ داده است).

بررسی ظاهر نمونه‌ها نشان می‌دهد که با پارامترهای استفاده شده در حالت کلی کیفیت مطلوب جوش مشاهده شده است. پلیمرها به دلیل خواص متفاوتی که از فلزات دارند و این شامل دمای ذوب پایین، ضریب انتقال حرارت پایین و رفتار پلاستیکی متفاوت می‌شود به طور کلی پاسخ مناسبی به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ندارند. به همین دلیل در مقالات توصیه به استفاده از ابزارهای خاص به منظور گرفتن جواب مناسب از جوش اصطکاکی اغت

شاشی ترموپلاستیک‌ها شده است. عمده تفاوت ابزارهای پیشنهادی برای جوشکاری ترموپلاستیک‌ها، استفاده از کفشک ثابت به عنوان شانه است به نحوی که امکان انتقال حرارت به سطح ورق و ناحیه جوش با روشی غیر از ایجاد حرارت اصطکاکی نیز میسر باشد. یک نمونه از این نوع از طراحی ابزار را می‌توان در مقاله بوچمان و همکاران [۲۱] مشاهده نمود. در این مقاله از یک کفشک ثابت که در آن سیال با حرارت بالا در جریان است در حین جوشکاری استفاده شده است. طرح شماتیک فرایند مورد استفاده در شکل (۵) نشان داده شده است. در سایر مقالات نیز کم و بیش روش مشابهی پیشنهاد شده است [۸، ۲۲، ۲۳]. واضح است که استفاده از این سیستم‌های پیچیده برای اتصال پلیمرها هزینه اتصال آن‌ها را با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی افزایش داده و در بیشتر موارد استفاده از این فرایند را برای اتصال ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های پایه پلیمری فاقد توجیه



(الف)



(ب)



(ج)

۲۰۰ باشد و نباید کمتر از این نسبت مورد استفاده قرار گیرد. البته توجه به این نکته لازم است که علاوه بر این نسبت، تک پارامترها هم حائز اهمیت هستند و محدوده مناسب برای هر پارامتر هم باید در نظر گرفته شود. مخصوصاً در مورد سرعت دورانی که اصلی‌ترین پارامتر تعیین‌کننده میزان حرارت ورودی به محدوده جوشکاری است، تعیین مقدار آن حساسیت قابل ملاحظه‌ای دارد. به عنوان مثال در آزمایش‌های انجام شده توسط نویسندگان در جوشکاری ورق‌های پلی آمید با سرعت دورانی بیش از ۱۶۰۰، به دلیل تولید گرمای زیاد، کیفیت سطح خوبی برای نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده نشد. همانطور که در بالا اشاره شد و همچنین با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۴) و جدول (۱)، بیشترین استحکام، که ۲۰۹۸ نیوتن است، توسط نمونه‌ای که با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه بود به دست آمده است. به بیان دیگر در این مقاله بهترین استحکام در نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی ۲۰۰ به دست آمد. این نمونه علاوه بر استحکام نهایی بالاتر، با توجه به مساحت بیشتر زیر نمودار آن در مقایسه با سایر نمونه‌ها، انرژی بیشتری نیز قبل از شکست جذب کرده و در نتیجه تافنس بالاتری را از خود نشان داده است. البته این به معنی وجود رابطه خطی و بهتر شدن استحکام و تافنس شکست با افزایش این نسبت نیست. به عنوان مثال نمونه جوشکاری شده با نسبت ۴۰ (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر در دقیقه) در مقایسه با نمونه جوشکاری شده با نسبت ۶۴ (سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر در دقیقه) رفتار بهتری را از خود نشان داده است.

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد ۲۰۰ باید به عنوان حداقل نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی در جوشکاری ورق‌های پلی آمید در نظر گرفته شود. هرچند لازم است تا با بررسی رفتار اتصال در نمونه‌های با نسبت بالاتر از ۲۰۰ توسط انجام آزمایش‌های بیشتر این فرضیه تایید شود.

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده در مورد استحکام اتصالات ایجاد شده، اعداد به دست آمده در این آزمایش با منابع موجود مورد مقایسه قرار گرفت. هرچند که منابع چندانی در مورد این روش جوشکاری و برای این پلیمر در دسترس نیست.

حسین و همکاران [۱] در مطالعه خود در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن استحکام حداکثر را ۸/۵۱ مگاپاسکال گزارش کرده است. در مطالعه حاضر نیز استحکام حدود ۸ مگاپاسکال به دست آمده است.

اقتصادی می‌کند. در مقاله حاضر به دلیل استفاده از ابزار متداول فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی در اتصال ورق‌های پلی آمید و انجام جوشکاری با کیفیت قابل قبول، می‌توان ادعا نمود که برای گروهی از ترموپلاستیک‌ها با استفاده از پارامترهای مناسب می‌توان به کیفیت مطلوبی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دست یافت که استفاده از این روش را برای جوشکاری این دسته از پلیمرها اقتصادی می‌کند. برای سایر پلیمرها استفاده از روش‌های دیگر و به طور مشخص جوشکاری التراسونیک شاید گزینه مناسب‌تری باشد.

در شکل (۳-الف) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. در این نمونه شکست در لبه کناری محل اتصال اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر شکست در ناحیه اتصال اتفاق افتاده است. در شکل (۳-ب) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است که ترک در پشت ورق زیرین اتفاق افتاده است و به همین دلیل روی شکل محل جدایش مشخص نیست. در این نمونه نیز شکست از محل اتصال اتفاق افتاده است. در این نمونه نیز شکست در ناحیه اتصال و لبه کناری آن اتفاق افتاده است. در شکل (۳-ج) نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. مشابه نمونه‌های قبلی، در این نمونه نیز شکست در محل اتصال و در لبه کناری آن اتفاق افتاده است.

از بررسی این سه نمونه می‌توان چنین نتیجه گرفت اتصال ایجاد شده ضعیف تر از پلیمر پایه هستند و در عین حال لبه کناری اتصال ضعیف‌تر و شکننده‌تر از سایر قسمت‌های جوش است. در شکل (۳-د) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است و برخلاف نمونه‌های قبلی، قطعه کاملاً از پلیمر پایه جدا شده است که این به معنی استحکام بالاتر جوش در مقایسه با پلیمر پایه است. در توضیح ارتباط بین پارامترهای مورد استفاده و نوع شکست مشاهده شده می‌توان همانگونه که در مقالات دیگر نیز پیشنهاد شده است [۲۴] از نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی استفاده نمود. برای نمونه (۳-الف) این نسبت برابر با ۶۴، نمونه (۳-ب) ۱۲۵، نمونه (۳-ج) ۴۰ و برای نمونه (۳-د) این نسبت برابر با ۲۰۰ است. در واقع با افزایش این نسبت به ۲۰۰ به صورت قابل توجهی کیفیت جوش بهتر شده است و این مورد بیانگر این است که در جوشکاری ورق‌های پلی آمید حداقل نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی بایستی



(ب)



(ج)



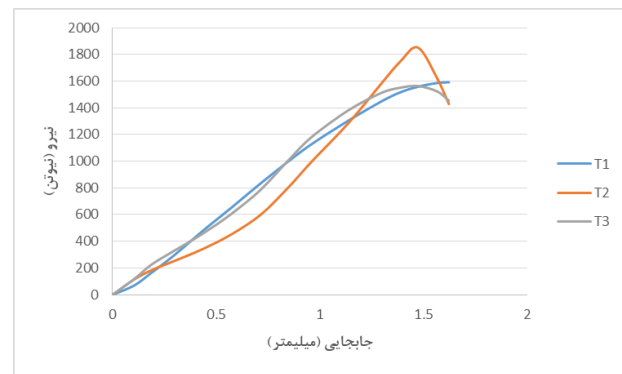
(د)

شکل ۶ بررسی سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی. در هر مورد محل اتصال در مقطع نمونه با مشخص شده است. الف- نمونه شماره ۱، ب- نمونه شماره ۲، ج- نمونه شماره ۳، د- نمونه شماره ۴

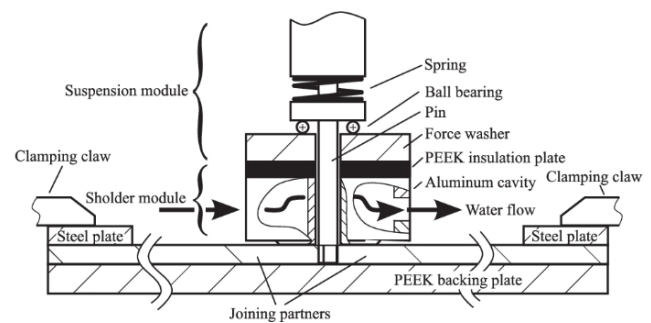
۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های پلی‌آمید با موفقیت انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه سرعت دورانی در سطوح ۱۶۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه است. از تست کشش برای ارزیابی استحکام اتصال استفاده شد.

مهمترین تفاوت مقاله حاضر با تحقیقات قبلی اتصال لب روی هم ورق‌های پلی‌آمید با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که تاکنون گزارش نشده است. در مطالعات قبلی عمدتاً جوشکاری لب به لب ورق‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. این در حالی است که به لحاظ صنعتی اتصال موفق لب روی هم ورق‌ها نیز مهم است و باید به آن توجه شود. از طرفی در مورد پلیمرها به دلیل عدم انتقال حرارت ناشی از اصطکاک ابزار با ورق بالایی به ورق پایینی از طریق رسانش همانند آنچه در آلیاژهای فلزی رخ می‌دهد، انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به ویژه در حالت لب روی هم به لحاظ فنی به مراتب پیچیده‌تر است. این اتصال با موفقیت در مقاله حاضر انجام شده است و همچنین نشان داده شد که امکان اتصال پلی‌آمید با کیفیت قابل قبول



شکل ۴ نمودارهای نیرو جا به جایی آزمون کشش سه نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۵ طرحواره ابزار مورد استفاده توسط بوچمان و همکاران [۲۱] که دارای شانه ثابتی است که با عبور سیال داغ از درون آن امکان کنترل دمایی در سطح پلیمر ایجاد شده است.

به منظور مطالعه بهتر اثر پارامترهای مورد بررسی بر کیفیت اتصال ایجاد شده، سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده نیز به صورت چشمی مورد بازرسی قرار گرفت. با مطالعه سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده می‌شود که دو ورق به خوبی با هم در منطقه همزن ادغام شده اند که این مورد در شکل ۶ قابل مشاهده است. در این شکل ناحیه اختلاط برای هر نمونه با استفاده از کادر قرمز مشخص شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر در دقیقه (شکل ۶ الف)، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، بیشترین نفوذ و اختلاط مواد در ورق پایینی را دارد. این خود دلیل دیگری در تایید انتخاب پارامترهای جوشکاری بهتر برای این نمونه است که منجر به استحکام بالاتر در این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها است.



(الف)

- structures," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 8, p. 100184, 2024/02/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100184>.
- [6] R. Kumar, N. Mehrotra, and K. Pal, "Effect of friction stir processing on mechanical, in vitro degradation, and biocompatibility behaviour of stir casted Mg-Zn-rare earth oxide composites for biodegradable implant applications," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 972, p. 172767, 2024/01/25/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172767>.
- [7] J. Iwaszko and M. Sajed, "Technological Aspects of Producing Surface Composites by Friction Stir Processing—A Review," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 12, p. 323, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs5120323>.
- [8] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, P. N. B. Reis, and A. Loureiro, "Effect of Friction Stir Welding Techniques and Parameters on Polymers Joint Efficiency—A Critical Review," *Polymers*, vol. 13, no. 13, p. 2056, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13132056>.
- [9] M. P. Dhanasekaran, M. Agilan, S. Avinash, K. N. Vidyananda, G. Sudarshan Rao, and D. Roy Mahapatra, "Influence of laser shock peening on Residual stress and microhardness of AA2219 friction stir weld," *Materials Letters*, vol. 356, p. 135586, 2024/02/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135586>.
- [10] C. Zhang, Y. Dong, and C. Ye, "Recent developments and novel applications of laser shock peening: A review," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 7, p. 2001216, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202001216>.
- [11] M. Sajed and H. Bisadi, "Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys," *Welding in the World*, vol. 60, no. 1, pp. 33-40, 2016/01/01 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0268-6>.
- [12] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, "Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers—State of the Art," *Materials*, vol. 13, no. 10, doi: 10.3390/ma13102291.
- [13] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis, and J. D. Kechagias, "Optimization of friction stir welding for various tool pin geometries: the weldability of Polyamide 6 plates made of material extrusion additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 7, pp. 2931-2955, 2023/02/01 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10675-5>.
- [14] N. Ravi, M. Shanmugam, S. Bheemappa, and N. Gowripalan, "Influence of reinforcement on tribological properties of friction stir welded glass fiber reinforced polyamide 66," *Journal of*
- بدون نیاز به طراحی ابزار خاص (که در مقالات پیشین برای سایر پلیمرها پیشنهاد شده است)، وجود دارد.
- بنا بر نتایج به دست آمده از این مقاله، در نسبت‌های سرعت دورانی به نرخ پیشروی کمتر از ۲۰۰، استحکام جوش از پلیمر پایه کمتر است؛ از این رو پیشنهاد می‌شود حداقل نسبت این دو پارامتر در جوشکاری ورق‌های پلی آمید ۲۰۰ در نظر گرفته شود. بالاترین استحکام به دست آمده مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و برابر با ۲۰۹۸ نیوتن و پایین‌ترین استحکام به دست آمده مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و برابر با ۱۰۴۸ نیوتن می‌باشد.
- همچنین نتایج نشان می‌دهد که نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر در دقیقه، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، بیشترین نفوذ و اختلاط مواد در ورق پایینی را دارد که منجر به استحکام بالاتر در این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها است.

۵- مراجع

- [1] I. M. Husain, R. K. Salim, T. Azdast, S. Hasanifard, S. M. Shishavan, and R. Eungkee Lee, "Mechanical properties of friction-stir-welded polyamide sheets," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 18, 2015/08/01 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0047-6.
- [2] S. Sattari, H. Bisadi, and M. Sajed, "Mechanical properties and temperature distributions of thin friction stir welded sheets of AA5083," *International Journal of Mechanics and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, 2012, doi: <https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20120201.01>.
- [3] M. Sajed, J. W. Guerrero, and H. A. Derazkola, "A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, doi: <https://doi.org/10.3390/app13031563>.
- [4] H. Tagimalek and M. Mahmoodi, "Experimental evaluation of T-peel strength on functionally graded Al5083 and HDPE tri-laminated composites fabricated by colding-assisted friction stir additive manufacturing," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 9, p. 100174, 2024/06/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100174>.
- [5] Z. Kallien, L. Rath, A. Roos, and B. Klusemann, "Application of friction surfacing for solid state additive manufacturing of cylindrical shell

- [20] B. Ahmad, F. Almaskari, J. Sheikh-Ahmad, S. Deveci, and K. Khan, "Thermomechanical Modeling of Material Flow and Weld Quality in the Friction Stir Welding of High-Density Polyethylene," *Polymers*, vol. 15, no. 15, doi: 10.3390/polym15153230.
- [21] E. Buchmann, M. Erdmann, M. Köberl, and P. Höfer, "A stationary shoulder with fluid temperature control for friction stir welding of polymers: development and investigation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, no. 9, pp. 5901-5911, 2022/08/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09643-w>.
- [22] M. A. R. Pereira, I. Galvão, J. D. Costa, R. M. Leal, and A. M. Amaro, "Joining of Polyethylene Using a Non-Conventional Friction Stir Welding Tool," *Materials*, vol. 15, no. 21, p. 7639, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15217639>.
- [23] S. H. Iftikhar, A.-H. I. Mourad, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, and S. Vincent, "A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Polymers and Their Composites," *Polymers*, vol. 13, no. 8, p. 1208, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081208>.
- [24] M. Mahmoudiniya, A. H. Kokabi, M. Goodarzi, and L. A. I. Kestens, "Friction stir welding of advanced high strength dual phase steel: Microstructure, mechanical properties and fracture behavior," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 769, p. 138490, 2020/01/02/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138490>.
- Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 1052-1063, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.068>.
- [15] W. S. AbuShanab, M. Abd Elaziz, E. I. Ghandourah, E. B. Moustafa, and A. H. Elsheikh, "A new fine-tuned random vector functional link model using Hunger games search optimizer for modeling friction stir welding process of polymeric materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 1482-1493, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.031>.
- [16] P. Song, A. Trivedi, N. Hawkins, A. Graham, D. Chapman, and C. R. Siviour, "Thermomechanical characterisation of polyamide 6 over a wide range of rates and temperatures," *Polymer*, vol. 300, p. 126907, 2024/04/25/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126907>.
- [17] M. Sajed, "Parametric study of two-stage refilled friction stir spot welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 24, pp. 307-317, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.011>.
- [18] A. Alhourani, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, K. Khan, S. Deveci, and I. Barsoum, "Thermal modeling of friction stir welding of thick high-density polyethylene plates," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 4186-4198, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.044>.
- [19] H. Aghajani Derazkola, E. Garcia, and M. Elyasi, "Underwater friction stir welding of PC: Experimental study and thermo-mechanical modelling," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 65, pp. 161-173, 2021/05/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.034>.

شبیه سازی عددی تأثیر حضور نانوذرات مغناطیسی داخل هوای مرطوب بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تحت میدان آهن ربای دائم

چکیده: در مقاله حاضر برای اولین بار تأثیر تزریق نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در داخل هوای مرطوب محفظه آب شیرین کن و نیز اعمال نیروی کلویین ناشی از میدان مغناطیسی آهن ربای دائم بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل سازی این پدیده، کد عددی به زبان C^{++} شی گرا در نرم افزار OpenFOAM توسعه داده شده است. معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله انتقال کسر جرمی بخار هوای مرطوب حاوی نانوذرات مغناطیسی (اصطلاحاً نانواُتروسل مغناطیسی) به روش حجم محدود گسسته و حل شده اند. تأثیر متغیرهای گوناگون شامل پارامترهای مغناطش، زاویه و محل جایگذاری آهن ربا بر الگوی جریان و همینطور دبی آب تولیدی بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که بکار بردن نانواُتروسل در غیاب میدان مغناطیسی موجب تضعیف عملکرد آب شیرین کن می شود. به گونه ای که میزان تولید آب شیرین با $\phi=8\%$ در حدود 23% کمتر از آب شیرین کن با سیال عامل پایه می باشد. از طرف دیگر، استفاده از آهن ربای دائم، به عنوان یک منبع کم هزینه مغناطیسی، می تواند دبی آب شیرین تولیدی را تا 260% افزایش دهد که این امر توجیه اقتصادی این روش در توسعه آب شیرین کن های خورشیدی را به همراه خواهد داشت.

واژه های راهنما: نانوذرات مغناطیسی، هوای مرطوب، نانواُتروسل مغناطیسی، آب شیرین کن خورشیدی، آهن ربای دائم، نیروی کلویین

امیر بصیری
دانشجوی دکتری

صابر یکانی مطلق*
دانشیار

فرخ مبادرثانی
دانشیار

سجاد

محمدی بازرگانی

دانشجوی دکتری،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

Amir Basiri
PhD Student

Saber Yekani
Motlagh*
Associate Professor

Farrokh
Mobadersani
Associate Professor

Sajjad Mohammadi
Bazargani
PhD Student,
Department of
Mechanical Engineering,
Urmia University of
Technology, Urmia

Numerical simulation of the effect of the presence of magnetic nanoparticles in humid air on the performance of solar still under permanent magnet field

Abstract: In the present study, for the first time, the impact of presence of magnetic iron oxide nanoparticles into the humid air within the desalination chamber, as well as the application of Kelvin force induced by the magnetic field of a permanent magnet, on the performance of a solar desalination system has been numerically investigated. To model this phenomenon, an object-oriented C^{++} numerical code was developed in the OpenFOAM software. The governing equations, including continuity, momentum, energy, and the mass fraction transport equation for humid air containing magnetic nanoparticles (referred to as magnetic nanoaerosol), were discretized and solved using the finite volume method. The effects of various parameters, including magnetization, the angle, and the placement of the magnet, on the flow pattern and freshwater production rate were examined. The results of this study show that the use of nanoaerosols in the absence of a magnetic field weakens the desalination system's performance, such that with $\phi=8\%$, the amount of freshwater produced is approximately 23% lower than that of a desalination system with a base working fluid. On the other hand, the use of a permanent magnet, as a low-cost magnetic source, can increase the freshwater production rate by up to 260%, which justifies the economic feasibility of this method in the development of solar desalination systems.

Keywords: Magnetic nanoparticles, Humid air, Magnetic nanoaerosol, Solar still, Permanent magnet, Kelvin force

۱- مقدمه

بازده انرژی و انرژی و آگزازی آب شیرین کن پله‌ای خورشیدی پرداختند. در این تحقیق بازده آب شیرین کن به طور متوسط ۷٪ افزایش داشت.

بوچانوا و همکاران [۷] از سیال آب شور حاوی انواع مختلف نانو ذرات فلزی برای افزایش بهره‌وری آب شیرین کن‌های سنتی استفاده کردند. افزایش بهره‌وری به ترتیب برای نانوذره‌های طلا، نقره و مس ۲۸/۲٪، ۱۹/۲٪ و ۲۲٪ می‌باشد.

امیری [۸] در تحقیق آزمایشگاهی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار بهبود یافته را مورد بررسی قرار داده‌اند. با بهبود طراحی آب شیرین کن میزان آب تولیدی ۱۲۷٪ افزایش داشته است.

ارزیابی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فازدهنده تحت میدان مغناطیسی توسط ادیبی طوسی و همکاران [۹] انجام گرفته است. در این مطالعه اکسید آهن نانوذره غالب در نانو مواد تغییر فازدهنده ترکیبی می‌باشد. استفاده از این طرح منجر به افزایش ۹۸ درصدی میزان تولید آب شیرین نسبت به آب شیرین کن‌های ساده پلکانی می‌شود.

فروردین و یکانی [۱۰] اثرات ورود جت هوا به داخل آب شیرین کن در سرعت و زاویه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج این تحقیق امکان افزایش میزان تولید آب شیرین تا ۲۶۴٪ برای سرعت ورودی هوای ۹ متر بر ثانیه وجود دارد.

حامید و همکاران [۱۱] به صورت عددی تأثیر شکل جاذب کف محفظه آب شیرین کن بر تولید آب شیرین را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از جاذب‌های مخروطی شکل توانستند به ۳۸/۲ درصد افزایش در تولید آب شیرین دست یابند.

القصر [۱۲] به کمک شبیه‌سازی سه بعدی عددی و بهینه‌سازی تبخیر سطحی توانست به ۲۱۵/۶ درصد در افزایش عملکرد سیستم برسد.

خلیلی و همکاران [۱۳] تأثیر کاربرد فین بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پله‌ای را مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از فین ۱۷۱٪ افزایش در تولید آب ایجاد می‌کند.

عباسپور و همکاران [۱۴] به بررسی عددی و تجربی تأثیر شبکه سیمی بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی عمودی پرداخته‌اند. آنها به ۱۰/۷۲ درصد افزایش در تولید آب شیرین با استفاده از شبکه سیمی دست یافتند.

اقدام‌فادیل و همکاران [۱۵] سعی کردند عملکرد آب شیرین کن خورشیدی هرمی شکل را از طریق ادغام مواد تغییر فازدهنده تقویت‌شده با نانوذرات و تزریق آن به داخل آب

تامین نیازهای اولیه جامعه بشری از جمله: آب، انرژی و مواد غذایی همواره از دغدغه‌های اساسی بوده است. در سال ۲۰۲۰ طبق اعلام سازمان جهانی بهداشت ۲۹٪ از جمعیت جهان دسترسی آزاد به آب شیرین نداشته‌اند. بدین ترتیب استفاده از منابع رایگان انرژی جهت بهره‌وری و تامین منابع آزاد آب آشامیدنی از اولویت‌های اصلی نسل‌های بعدی خواهد بود.

یکی از پیشروترین روش‌ها جهت تولید آب آشامیدنی، استفاده از انرژی خورشیدی توسط آب شیرین کن‌های خورشیدی می‌باشد. با این وجود آب شیرین کن‌های موجود به دلیل بازدهی پایین در تولید دارای توجیه اقتصادی نبوده و به صورت گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. این امر سبب انجام تحقیقات تجربی و عددی فراوان به منظور افزایش کارایی این دستگاه‌ها گردیده است.

کابیل و همکاران [۱] با استفاده از نانوذرات گوناگون در داخل لایه آب شور داخل آب شیرین کن عملکرد آب شیرین کن با چگالنده خارجی را مورد بررسی قرار داده‌اند. طبق نتایج ارائه شده، بازده روزانه تولید آب شیرین ۸۴٪ و ۷۳٪ به ترتیب برای اکسید مس و اکسید آلومینیوم می‌باشد.

افزایش کارایی شیرین کن‌های آبشاری با استفاده از نانوذرات در داخل لایه آب شور در مقاله عددی رشیدی و همکاران [۲] انجام گرفته است که نشان دهنده ۲۲٪ افزایش عملکرد دستگاه با استفاده از نانوذرات می‌باشد.

عصاری و همکاران [۳] به مروری بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی همراه با بازتاب‌دهنده‌ها و تأثیر آن بر بازده آب شیرین کن‌ها پرداخته‌اند.

هدایتی و همکاران [۴] به ارزیابی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی دو محفظه‌ای متصل به سلول خورشیدی گرمکن‌دار و دارای مواد تغییر فاز دهنده پرداخته‌اند. استفاده از مخازن پیش گرمایش، موجب افزایش نسبی دمای آب در طول روز شده و از طرف دیگر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده امکان تولید آب شیرین در شب را فراهم می‌کند.

افزایش نرخ آب تولیدی با استفاده از تأثیر میدان مغناطیسی به صورت آزمایشگاهی توسط کاویتی و همکاران [۵] انجام گرفته است. طبق نتایج ارائه شده افزایش میزان آب شیرین تولیدی تا ۴۲/۲۵٪ برای قویترین آهنربا قابل دسترس می‌باشد.

علیزاده و همکاران [۶] به مطالعه تجربی و ارزیابی اثر ضخامت ماده متخلخل پشم بر تولید آب شیرین، توزیع دما و

همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۱ شبیه‌سازی عددی انجام دادند. در این مطالعه از میدان مغناطیسی ناشی از لنز مغناطیسی برای اعمال نیروی کلون بر مولکول‌های اکسیژن موجود در هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن استفاده شده است. در مقاله مهدی‌زاده اثر قدرت لنز مغناطیسی و مختصات محل قرارگیری لنز مغناطیسی بر روی میزان آب تولیدی و همین‌طور الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. افزودن میدان مغناطیسی به واسطه اعمال نیروی کلون توسط لنز مغناطیسی بر مولکول‌های اکسیژن و تغییر الگوی جریان درون آب شیرین‌کن موجب افزایش عدد ناسلت و میزان آب شیرین‌کن تولیدی تا ۳۷/۷ درصد شده است. همانطور که از نتایج مقاله مهدی‌زاده مشخص می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی بر آب شیرین‌کن خورشیدی مرسوم، مقدار تولید آب شیرین تا حدودی افزایش داشته است. ولی برای تولید این میزان آب شیرین‌کن نیازمند تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار بزرگ است.

خاصیت مغناطیس‌شوندگی هوای مرطوب کم است و برای افزایش بازده آب‌شیرین‌کن نیازمند تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی می‌باشیم که در عمل تولید این میدان‌ها نیازمند صرف هزینه بسیار زیادی است و استفاده از این روش هزینه‌های تولید آب شیرین را افزایش می‌دهد. در مقاله حاضر برای اولین بار از طریق مدل‌سازی عددی تأثیر اضافه کردن ذرات مغناطیسی اکسید آهن با مغناطیس‌شوندگی صدها برابری به هوای مرطوب (نانوآیرسل مغناطیسی) داخل آب شیرین‌کن سنتی و اعمال میدان مغناطیسی آهن‌ربای دائم که منبعی کم هزینه می‌باشد، بررسی شده است و بر این اساس دبی آب شیرین تولیدی افزایش داده شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

در شکل (۱) طرحواره‌ای از آب شیرین‌کن استفاده شده و موقعیت آهن‌ربای دائمی ارائه گردیده است. فیلم نازکی از آب دریا وارد آب شیرین‌کن می‌شود و پس از شروع فرایند تبخیر آب، بخار آب با هوای داخل ترکیب می‌شود. بر اساس فیزیک آب شیرین‌کن‌های مرسوم سنتی، تابش گرمای خورشیدی وقتی به سطح شیشه‌ای بالای آب شیرین‌کن می‌رسد، بخشی از این تابش بازتاب، بخشی جذب و با توجه به ضریب گذردهی بالای شیشه، قسمت اعظم انرژی تابشی از سطح عبور و وارد محفظه آب شیرین‌کن می‌شود. پس از عبور انرژی تابشی از محیط هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن با توجه به خصوصیات کف آب شیرین‌کن که به رنگ تیره می‌باشد

موجود در داخل محفظه بهبود بخشند. نتایج آن‌ها به بهبود ۱۱۲/۳۴ درصدی عملکرد آب شیرین‌کن‌ها رسید.

آقاخانی و همکاران [۱۶] یک مدل عددی جدید برای آب شیرین‌کن خورشیدی ترکیب شده با کلکتور و بازتابنده توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از کلکتورهای از نوع لوله گرم می‌تواند باعث افزایش ۷۶/۹ درصدی در نرخ تولید آب شیرین‌کن شود.

کرمی و همکاران [۱۷] به بررسی عددی و تجربی حضور جاذب متخلخل شناور بر عملکرد آب شیرین‌کن پرداختند. نتایج ایشان منجر به افزایش ۲۶/۶ درصدی در تولید آب شیرین‌کن شد.

جیاراج و همکاران [۱۸] به صورت آزمایشگاهی و عددی به مطالعه تأثیر شکل کانال پیش گرمایش در آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. طبق نتایج آن‌ها استفاده از کانال دوزنقه‌ای شکل سبب افزایش ۳۷/۶۴ درصدی در تولید آب شیرین‌کن خواهد شد.

عبدالله و همکاران [۱۹] با تغییر شکل سطح شیشه و محفظه آب شیرین‌کن به شکل مخروطی توانستند به ۲۲۱/۵ درصد افزایش در تولید آب شیرین دست یابند.

کومار و همکاران [۲۰] با استفاده از منعکس‌کننده سه‌موی و به‌کارگیری نانوسیال توانستند تولید آب شیرین را تا ۲۹/۸۴ درصد افزایش دهند.

در مورد تأثیر نانوسیالات هیبریدی بر کارکرد آب شیرین‌کن‌ها اخیراً کادهیم حسین و همکاران [۲۱] مرور کاملی انجام داده‌اند که جهت اطلاعات بیشتر در این مورد به این مقاله ارجاع داده می‌شود.

در مورد کاربرد نانوآئروسول‌ها جهت بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌ها ال کوز و همکاران [۲۲] تأثیر استفاده از نانو-آیرسل‌ها بر روی مشخصات حرارتی در ورودی لوله‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. سیال مورد بررسی در این مطالعه نانوذرات اکسید آلومینیوم-هوا می‌باشد.

خادانگا و همکاران [۲۳] بررسی بر روی ویژگی‌های انتقال گرما همرفتی نانو آیرسل‌ها SiO_2 -هوا در داخل یک لوله را انجام دادند. در مقاله مذکور توزیع دما بر حسب مقیاس زمانی در نانو ذرات SiO_2 ، برهمکنش ذره به ذره از طریق رسانش و نانو ذرات به هوا توسط تابش مورد مطالعه قرار گرفته است.

اکسیژن موجود در هوای محیط دارای خاصیت مغناطیسی می‌باشد و تحقیقاتی در زمینه استفاده از این خاصیت صورت گرفته است. در رابطه با تأثیر نیروی مغناطیسی بر روی اکسیژن موجود در هوای داخل آب شیرین‌کن، مهدی‌زاده و

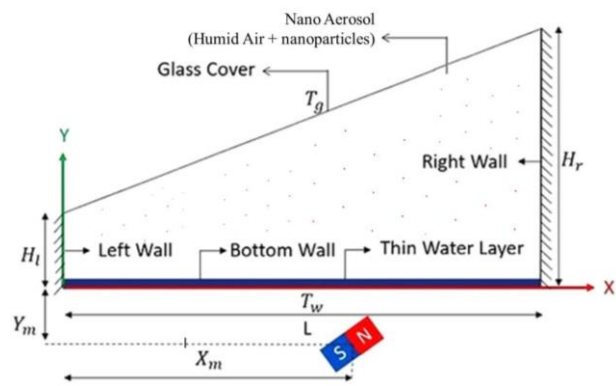
آب و شیشه مکانیزم ادوکشن^۱ جرم به دلیل سرعت ماکروسکوپیک صفر لایه تقریباً وجود ندارد.

در آب شیرین کن مرسوم، به دلیل اختلاف دمای سطح شیشه و سطح مایع آب نیروی بویانسی ایجاد شده و این نیرو سبب حرکت ماکروسکوپیک سیال هوای مرطوب و ایجاد گردابه و در نتیجه سیرکولاسیون هوای مرطوب داخل محفظه می‌شود. هر چه سرعت سیرکولاسیون جریان روی سطح آب بیشتر باشد، نرخ تخلیه بخار آب از لایه بالای لایه چسبیده به سطح آب بیشتر خواهد بود. در نتیجه اختلاف یا گرادیان غلظت بخار آب بین لایه چسبیده به سطح آب و لایه بالاتر از آن افزایش پیدا کرده و بخار آب بیشتری به لایه بالاتر نفوذ و توسط جریان به داخل محفظه و نزدیک سطح شیشه جهت تقطیر و تولید آب شیرین ادوکت^۲ می‌شد. لذا میزان نفوذ بخار آب از لایه چسبیده به سطح آب و لایه بالاتر اولاً، به گرادیان غلظت بخار آب بین دولایه (ناشی از سیرکولاسیون هوای مرطوب بالای سطح آب) و ثانیاً، به میزان نفوذپذیری بخار آب در داخل هوای خشک بستگی خواهد داشت؛ اما اختلاف غلظت بخار آب مابین لایه چسبیده به آب و لایه بالاتر از آن ویژگی ماکروسکوپیک است که همانطور که اشاره شد به سرعت سیرکولاسیون و الگوی جریان هوای مرطوب بالای سطح آب بستگی دارد.

در ادامه به تبیین بیشتر نوآوری کار حاضر پرداخته می‌شود. مشکل اساسی آب شیرین‌کن‌های مرسوم، نرخ پایین تبخیر و به تبع آن نرخ پایین تقطیر و تولید آب شیرین در آن‌ها می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده، یکی از روش‌های افزایش گرادیان غلظت بخار آب (کسر جرمی بخار آب) روی سطح آب و به تبع آن افزایش تبخیر و در نتیجه افزایش تقطیر و تولید آب شیرین، تغییر الگوی جریان هوای مرطوب بالای سطح آب در داخل محفظه آب شیرین کن می‌باشد.

هوای مرطوب ترکیبی از هوای خشک (اکسیژن و نیتروژن) و بخار آب می‌باشد. اکسیژن موجود در این ترکیب دارای خاصیت مغناطیس‌شوندگی بالاتری نسبت به سایر اجزا می‌باشد. با این وجود مغناطیس‌شوندگی اکسیژن بسیار پایین‌تر از موادی مانند اکسید آهن می‌باشد. در تحقیق حاضر به هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن، نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن اضافه شد. با توجه به اینکه مغناطیس‌پذیری اکسید آهن صدها برابر مولکول‌های اکسیژن بود، میدان مورد نیاز برای تأثیرگذاری بر الگوی جریان کاهش قابل توجهی خواهد داشت.

بیشترین جذب در سطح پایینی آب شیرین‌کن اتفاق می‌افتد. لذا این سطح دمای بیشتری نسبت به سطح شیشه خواهد داشت. با توجه به سرعت عبور پایین لایه آب و ضخامت کم آن مقاومت هدایتی و جابجایی در لایه آب قابل صرف‌نظر بوده و دمای کف آب شیرین‌کن با دمای سطح آب تقریباً یکسان خواهد بود.



شکل ۱ طرحواره آب شیرین‌کن در مقاله حاضر

با توجه به اینکه محفظه آب شیرین‌کن تحت فشار نمی‌باشد و با هوای محیط اطراف در ارتباط است، فشاری در حدود فشار اتمسفر خواهد داشت. بدیهی است که در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطوح شیشه و آب، فشار جزء بخار آب کمتر از فشار کل هوای مرطوب که مجموع فشارهای جزء هوای خشک و بخار آب است، خواهد بود. در لایه چسبیده به سطح آب فشار جزء بخار آب با فشار اشباع در دمای سطح آب برابر است که تغییر فاز مایع به بخار یا تبخیر صورت می‌گیرد. در صورت پایابودن جریان داخل محفظه انتظار می‌رود به همان مقدار، بخار هوا در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطح شیشه که در آنجا نیز فشار جزء بخار برابر فشار اشباع در دمای سطح شیشه است، تغییر فاز بخار به مایع یا تقطیر رخ دهد. سطح شیشه شیب کمی جهت جمع‌آوری قطرات آب شیرین تقطیر شده به واسطه نیروی گرانش دارا می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد سرعت جریان هوای مرطوب در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطوح شیشه و آب با سرعت این سطوح یکسان و تقریباً صفر می‌باشد. در این لایه‌ها همانند انتقال حرارت در لایه سیال چسبیده به دیواره ساکن که مکانیزم انتقال حرارت میکروسکوپیک یا هدایت می‌باشد، مکانیزم انتقال جرم (مولکول‌های آب) از سطح آب مایع به داخل لایه هوای مرطوب چسبیده به آن، از نوع نفوذ میکروسکوپیک و در جهت عمود بر سطح می‌باشد. در واقع در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطح

¹ Advection

² Advect

بلتزن، T دما و m_i جرم مولی جزء i می‌باشند. مومنتوم زاویه‌ای کل \vec{L} الکترون اسپین با S_i تعریف شده است. مغناطیس‌شوندگی مولکول‌های موجود در مسئله یعنی اکسیژن، نیتروژن، آب و اکسید آهن (در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۹۳ کلوین) در جدول (۱)، گزارش شده‌اند.

جدول ۱ مغناطیس‌شوندگی مولکول‌های مسئله حاضر [۲۷، ۲۸]

مولکول	$\chi (m^3/kg)$
O_2	$+1.8028 \times 10^{-6}$
N_2	-0.0063×10^{-6}
H_2O	-0.0068×10^{-6}
Fe_3O_4	$+0.5216 \times 10^{-3} \sim +0.5435 \times 10^{-3}$

همان‌طور که از جدول (۱) قابل تشخیص است، در این بین فقط مولکول اکسیژن و نانوذره Fe_3O_4 خاصیت پارامغناطیسی دارند و سایر مواد دیامغناطیس بوده و مقدار قدر مطلق مغناطیس‌شوندگی‌شان نیز بسیار کم و قابل صرف‌نظر است. مقدار مغناطیس‌شوندگی نانو ذره نانوذره Fe_3O_4 نیز به مراتب بیشتر از مولکول اکسیژن می‌باشد. میدان‌های مغناطیسی ناشی از آهن‌ربا دائم زاویه‌دار استفاده شده در تحقیق حاضر به عنوان منبع مغناطیسی با روابط زیر قابل توصیف هستند.

برای یک آهن‌ربای دائم که با محور افقی زاویه θ دارد، مولفه‌های میدان مغناطیسی H_x و H_y از معادلات (۳) تا (۸) بدست می‌آیند [۲۹]:

$$H_x = H_{xx} \times \cos \theta - H_{yy} \times \sin \theta \quad (۳)$$

$$H_y = H_{xx} \times \sin \theta + H_{yy} \times \cos \theta \quad (۴)$$

که در آن H_{yy} و H_{xx} ، به شکل زیر تعریف می‌شوند:

h و w به ترتیب ارتفاع و عرض آهن‌ربا دائم می‌باشند. همچنین a و b به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a = (x - x_m) \times \cos(-\theta) - (y - y_m) \times \sin(-\theta) \quad (۷)$$

$$b = (x - x_m) \times \sin(-\theta) + (y - y_m) \times \cos(-\theta) \quad (۸)$$

در نهایت نیروی مغناطیسی وارده بر نانو آئروسول‌ها از رابطه (۹) به دست می‌آید. ترم مذکور نیروی کلون نامیده می‌شود و

به‌گونه‌ای که میدان مغناطیسی با قدرت قابل دسترس تر و ارزان تر می‌تواند برای افزایش دبی آب شیرین تولیدی استفاده شود. با اعمال میدان مغناطیسی، نیروی فروهیدرودینامیکی کلون ناشی از آهن‌ربای دائم به مولکول‌های اکسیژن و نانوذرات اکسید آهن و به تبع آن به هوای مرطوب وارد می‌شود. نیروی کلون توزیع مکانی غیر یکنواخت دارد و کرل آن غیر صفر یا اصطلاحاً نیرو ناپایستار است. لذا طبق معادله انتقال ورتیستی این نیروی ناپایستار سبب ایجاد چرخش بیشتر و تولید گردابه‌های جدید در جریان می‌شود. در نتیجه الگوی جریان تغییر و سیرکولاسیون هوای مرطوب بالای سطح آب افزایش پیدا کرده و سبب افزایش دبی آب تولیدی در آب شیرین‌کن می‌شود.

۱-۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این بخش ابتدا به توضیح مدل ریاضی نیروی مغناطیسی کلون پرداخته می‌شود و سپس بر اساس فرض‌های مسئله معادلات حاکم بیان می‌شود. در ادامه مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای محاسبه خواص هوای خشک، بخار آب و نانوائروسول مغناطیسی پرداخته می‌شود و در نهایت شرایط مرزی مسئله بیان می‌شود.

۲-۲- نیروی مغناطیسی کلون

یکی از پارامترهای اصلی در این مقاله میزان تأثیر پذیری عناصر موجود در درون آب شیرین‌کن از میدان مغناطیسی می‌باشد. برای سنجش و مقایسه این خاصیت سیال از عدد χ (قابلیت مغناطیس‌پذیری) استفاده می‌شود. مغناطیس‌شوندگی نانو سیال را می‌توان به صورت معادله (۱) و بر حسب شدت میدان مغناطیسی (H_M) نوشت [۲۵]:

$$M_M = \chi H_M \quad (۱)$$

در تحقیق حاضر برای محاسبه χ از رابطه (۲) استفاده شده است [۲۶]:

$$\chi_i = \frac{N_A g_L^2 \mu_B^2 s_i(s_i + 1) \mu_0}{3 K T_{mi}} \quad (۲)$$

که در آن $g_L = 2$ ، $N_A = 0.022 \times 10^{23} [\frac{1}{mol}]$ و $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} [\frac{J}{T}]$ جی فاکتور لند و عدد بوهر مگنتون می‌باشند. $K = 1.38 \times 10^{-23} [\frac{J}{K}]$ ثابت

دمای سطوح شیشه و آب از مقیاس چند ساعت می‌باشد. لذا در بازه چند ساعته که دمای سطوح به دلیل تغییرات کم در زاویه و شدت تابش خورشید ثابت است می‌توان مسئله را به صورت پایا حل کرد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت سرعت پاسخ جریان به تغییر دمای سطوح سریعتر از سرعت تغییر در دمای سطوح می‌باشد. نکته دیگری که باید اشاره شود این است که در بازه‌های زمانی که دمای سطوح طبق نتایج تجربی ثابت هست تست‌های اولیه پژوهشگران این مقاله نشانگر این هست که شدینگ^۱ گردابه‌های داخل محفظه ناشی از ناپایداری جریان در طول زمان قابل صرف‌نظر می‌باشد. لذا استفاده از فرض پایا بودن جریان در بازه‌های زمانی مشخص از روز می‌تواند صحیح باشد.

– دماهای شیشه و سطح آب در مقادیر ثابت T_w و T_g هستند و دیواره‌های جانبی عایق فرض شده‌اند.
در مقاله حاضر با توجه به اینکه تمرکز کار بر پیشنهاد روشی نوین برای افزایش کارایی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی می‌باشد، به منظور کاهش پیچیدگی و ساده‌سازی مدل ریاضی در سایر بخش‌های مسئله از جمله مدل‌سازی ریاضی اثرات تشعشع، شرایط مرزی سطح شیشه و سطح آب بر اساس نتایج تجربی شواقیه و فرید دمای ثابت و یکنواخت فرض شده است. در واقع تأثیر تابش عبوری از شیشه و سایر ویژگی‌های تشعشعی مسئله در دمای سطوح دیده شده است. همانطور که در توضیحات فرض قبل اشاره شد بر اساس نتایج تجربی دمای سطح آب و سطح شیشه در بازه‌های زمانی چند ساعته در روز تقریباً در تمام مکان‌های روی سطوح عدد ثابت و مشخصی بود. در تحقیق حاضر دقیقاً دماهایی که از نتایج آزمایشگاهی شواقیه و فرید در بازه‌های زمانی مختلف بدست آمده است، استفاده شده است. خاطر نشان می‌سازد که ابعاد هندسی و سایر مشخصه‌ها در مطالعه عددی حاضر دقیقاً مطابق با ستاپ آزمایشگاهی شواقیه و فرید بوده است تا امکان مقایسه نتایج فراهم آید. این فرض کمک زیادی در کاهش هزینه محاسباتی و پیچیدگی مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر داشت، چرا که اصولاً برای بدست آوردن دمای سطوح باید معادلات انتقال شدت تشعشع در محفظه آب شیرین‌کن حل می‌شد. مسمماً در صورت تغییر در شرایط هندسی و محیطی اعداد مورد استفاده برای دمای سطوح دیگر معتبر نیست. لذا جهت اجتناب از این مورد در تمام مدل‌سازی‌های این مقاله شرایط مشابه شرایط آزمایشگاهی شواقیه و فرید در نظر گرفته شده است. با فرضیات فوق، معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی،

رابطه مستقیم با شدت میدان مغناطیسی و همچنین گرادینان میدان مغناطیسی دارد.

$$\vec{F}_{Kelvin} = \mu_0 M_M \vec{\nabla} H \quad (9)$$

در مطالعه حاضر آهن‌ربا دارای ارتفاع و عرض به ترتیب $h=0/1$ و $W=0/1$ بر حسب متر و همچنین مختصات مرکز آهن‌ربا $X_m=0/49$ و $Y_m=0/072$ بر حسب متر می‌باشد.

۲-۳- معادلات اساسی حاکم

برای حل معادلات حاکم بر مسئله توضیح داده شده فرض‌های ذیل در نظر گرفته شده‌اند:

- نانو ذرات کاملاً کروی می‌باشند.
- ضخامت فیلم مایع بسیار کم می‌باشد.
- نانو ذرات بصورت همگن در هوای داخل آب شیرین‌کن پراکنده شده‌اند.
- جریان غیر قابل تراکم می‌باشد.
- تلفات ویسکوزیته در نظر گرفته نشده است.
- از اثرات تابش ذره-هوا، ذره-ذره و ذره-دیوار صرف‌نظر شده است.
- جریان دو بعدی و آرام فرض شده است.
- حل عددی جریان آب شیرین‌کن در طول روز شبه پایا فرض می‌شود. یعنی در بازه‌های زمانی مشخص مطابق با نتایج تجربی شواقیه و فرید که در شکل (۳) نتایج مطالعه حاضر با نتایج این مقاله مقایسه شده است، دمای سطح شیشه و سطح آب در طول بازه زمانی مشخص به‌طور مثال از ساعت ۱۲:۳۰ ظهر تا ۱۴:۵۰ تقریباً ثابت بوده است. لذا در طول آن بازه می‌توان مسئله را با فرض شرط مرزی مستقل از زمان و ثابت در طول آن بازه زمانی فرض و حل کرد. علت فیزیکی این امر می‌تواند مرتبط با عدد بی‌بعد استروهمال مسئله باشد. عدد استروهمال در این مسئله مقیاس زمانی تغییر دمای سطوح یا شرایط مرزی به دلیل تغییر در شرایط شدت، زاویه و ... تابش نور خورشید به مقیاس زمانی تغییر الگوی دما و جریان در داخل آب شیرین‌کن می‌باشد. در جابجایی آزاد سرعت مشخصه داخل محفظه از نسبت نفوذ حرارتی به طول مشخصه مسئله بدست می‌آید. مقیاس زمانی نیز از نسبت طول مشخصه به سرعت مشخصه بدست می‌آید. طول مشخصه نیز میانگین ارتفاع سطوح جانبی آب شیرین‌کن است. لذا مقیاس زمانی تغییر توزیع دما الگوی جریان ناشی از تغییر شرایط مرزی در مقیاس دقیقه خواهد بود. در صورتیکه مقیاس زمانی تغییر در

¹ Shedding

$$A = \frac{[0.8876(1 + \sqrt{k_v/k_a})]^2}{3.6} \quad (18)$$

در معادلات فوق M و $x_v = \frac{C_v}{C_v + M^*(1 - C_v)}$ به ترتیب بیانگر وزن مولکولی و کسر مولی و اندیس‌های a ، v و h به ترتیب نشان‌دهنده هوای خشک، بخار آب و هوای مرطوب می‌باشند. M^* نسبت جرم مولی هوای خشک به بخار آب با مقدار 0.629 می‌باشد. مقادیر مربوط به لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی برای هوای خشک و بخار آب از طریق بسط چند جمله‌ای ذیل که توسط لاید و کپهائیان [۳۱] برای دماهای 273 تا 600 کلوین توسعه یافته‌اند، بدست می‌آیند:

$$\mu = A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 \quad (19)$$

$$k = A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 \quad (20)$$

مقادیر مربوط به ضرایب فرمول‌های فوق در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

جدول ۲ ضرایب بسط چند جمله‌ای لزجت دینامیکی [۳۱]

A_4	A_3	A_2	A_1	μ	
-	2.71368×10^{-14}	-5.95238×10^{-11}	7.72488×10^{-8}	18.5×10^{-6}	هوای خشک
-2.69021×10^{-16}	3.90133×10^{-13}	-1.73637×10^{-10}	5.75100×10^{-8}	9.9×10^{-6}	بخار آب

جدول ۳ ضرایب بسط چند جمله‌ای ضریب هدایت حرارتی [۳۱]

A_4	A_3	A_2	A_1	k	
8.882×10^{-14}	-9.310×10^{-11}	-9.960×10^{-9}	0.965×10^{-4}	26.1×10^{-3}	هوای خشک
2.050×10^{-13}	-2.576×10^{-10}	1.511×10^{-7}	0.349×10^{-4}	18.6×10^{-3}	بخار آب

پس از اعمال مقادیر بدست آمده از معادلات فوق در فرمول‌های محاسبه مشخصات نانو سیال‌ها [۳۲] خواص فیزیکی نانو آئروسول‌ها بدست می‌آیند که به شرح ذیل می‌باشند:

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_h + \varphi\rho_p \quad (21)$$

$$(\rho C_p)_{na} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_h + \varphi(\rho C_p)_p \quad (22)$$

مومنوم، انرژی و غلظت می‌باشند که به شکل زیر می‌باشند [۳۰]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (10)$$

$$\rho_{na}(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \nabla \cdot (\mu_{na} \nabla \vec{V}) + (\rho\beta)_{na}(T - T_g)\vec{g} + \vec{F}_{Kelvin} \quad (11)$$

$$(\rho C_p)_{na} \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \nabla \cdot (k_{na} \nabla T) \quad (12)$$

$$\vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_v = \nabla \cdot (D_{v-a} \nabla C_v) \quad (13)$$

در روابط فوق V نشان‌دهنده سرعت، P نمایاگر فشار، T میدان دما، β_t ضرایب انبساطی حجمی گرمایی و $D_{v-a} = \frac{1.8 \times 10^{-10} T^{2.072}}{10^5}$ نشان‌دهنده ضریب نفوذ بخار آب در داخل هوای خشک هستند.

۲-۴- محاسبه خواص نانو آئروسول‌ها

پژوهشگران در مطالعات مربوط به نانو سیالات فرمول‌هایی جهت محاسبه ویژگی‌های ترمو فیزیکی این پدیده توسعه داده‌اند. نانو آئروسول در مسئله حاضر به عنوان نانو سیال گاز پایه ترکیبی از هوای خشک و بخار آب به‌عنوان سیال پایه و نانو ذرات مغناطیسی می‌باشد. جهت محاسبه خواص نانو آئروسول‌ها ابتدا خواص هوای مرطوب (هوای خشک به همراه بخار آب حاصل از تبخیر آب) بدست آمده و سپس از طریق روابط ذیل چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی هوای مرطوب محاسبه می‌شوند [۳۰].

$$\rho_h = \frac{10^5}{RT} \left(\frac{M_a M_v}{C_v M_a + (1 - C_v) M_v} \right) \quad (14)$$

$$\mu_h = \frac{(\sqrt{18}\mu_v x_v + \sqrt{29}\mu_a x_a)}{(\sqrt{18}x_v + \sqrt{29}x_a)} \quad (15)$$

$$C_p = (1 - C_v)C_{p-a} + C_v C_{p-v} \quad (16)$$

$$k_h = \frac{x_v k_v}{x_v + x_a A} + \frac{x_a k_a}{x_a + x_a A} \quad (17)$$

ضریب A از طریق فرمول ذیل محاسبه می‌گردد:

شرط مرزی غلظت یا کسر جرمی بخار آب برای دیواره‌های بالا و پایین، مقدار ثابت بوده و دیواره‌های چپ و راست، دارای شرط مرزی گرادیان غلظت صفر هستند. شرط مرزی فشار نیز برای دیواره‌های بالا، پایین، چپ و راست گرادیان صفر می‌باشد. در نهایت تمامی شرایط مرزی در جدول (۴)، ارائه می‌گردد. کسر جرمی بخار روی کاور شیشه‌ای و سطح آب نیز همان میزان غلظت برای رطوبت نسبی ۱۰۰٪ در دما و فشار جزئی جزء بخار بر روی مرزهای مسئله است. به بیان دیگر با تعریف رطوبت نسبی به شکل رابطه (۲۷):

$$\Phi = \frac{n_v}{n_g} = \frac{P_v}{P_g @ T \text{ of mixture}} \quad (27)$$

که در آن n_v و n_g به ترتیب تعداد مول جزء بخار و هوای مرطوب می‌باشند. با توجه به این که بر روی سطح فیلم آب و دیواره بالا $\Phi = 100\%$ می‌باشد، پس:

$$P_v = P_g @ T \text{ of mixture} \quad (28)$$

که در آن فشار جزء بخار برای دیواره‌های بالا و پایین با معلوم بودن دماهای سطوح قابل محاسبه می‌باشند. ω نسبت رطوبت می‌باشد که از رابطه (۲۹) بدست می‌آید.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \left(\frac{M_v}{M_a}\right) \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{10^5 - P_v} \quad (29)$$

m_a و m_v در این معادله به ترتیب جرم بخار آب و جرم هوای خشک می‌باشند. همچنین M_v ، M_a و P_a به ترتیب نشان‌دهنده جرم مولی بخار آب، جرم مولی هوای خشک و فشار جزئی هوای خشک می‌باشند. در آخر کسر جرمی بخار آب در هوای مرطوب به شکل زیر بر حسب نسبت رطوبت محاسبه می‌شود:

$$C_v = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{\omega m_a}{\omega m_a + m_a} = \frac{\omega}{\omega + 1} \quad (30)$$

مقادیر شرط مرزی دما و کسر جرمی بخار برای حالت (۱) و (۲) یعنی ساعات ۱۲:۳۰ ظهر و ۱۴:۵۰ در جدول (۵) ارائه شده است. یادآور می‌شود مقادیر دمای سطح شیشه و آب از نتایج آزمایشگاهی و کسر جرمی بخار آب بر اساس روابط ارائه شده در این بخش بدست آمده‌اند. در این مقاله از روابط (۳۱) و (۳۲) برای محاسبه عدد ناسلت و میزان دبی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) استفاده شده است.

$$(\rho\beta)_{na} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_h + \varphi(\rho\beta)_p \quad (23)$$

لزجت دینامیکی ترکیب نهایی نانو آئروسول از معادله برینکم [۳۳] بدست می‌آید.

$$\mu_{na} = \frac{\mu_h}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (24)$$

و در نهایت ضریب هدایت حرارتی از معادله همیلتن - کراسر [۳۴] بدست می‌آید.

$$k_{na} = \frac{k_p + (n - 1) \times k_h - (n - 1) \times (k_h - k_p) \times \varphi}{k_p + (n - 1) \times k_h + (k_h - k_p) \times \varphi} \times k_h \quad (25)$$

$$n = \frac{3}{\Psi} \quad (26)$$

در رابطه (۲۵)، Ψ بیانگر ضریب شکل نانوذره و نشان‌دهنده میزان کرووی بودن ذره می‌باشد. در مسئله حاضر با توجه به فرض کرووی بودن نانوذره مقدار Ψ برابر با ۳ می‌باشد.

۲-۵- شرایط مرزی

شرط مرزی دمایی دیواره‌های پایین و بالا دما ثابت می‌باشد و دیواره‌های چپ و راست نیز عایق حرارتی فرض شده‌اند. در پژوهش حاضر دمای کاور شیشه‌ای T_g و دمای دیواره پایین T_w از مقالات تجربی [۳۵] برداشته شده‌اند. شرط مرزی سرعت برای تمام دیواره‌ها عدم لغزش می‌باشد.

جدول ۴ شرایط مرزی اعمالی در مرزهای آب شیرین کن

	Bottom Wall	Glass cover	Left Wall	Right wall
Temperature	$T=T_w$	$T=T_g$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Velocity	$u=v=0$	$u=v=0$	$u=v=0$	$u=v=0$
Concentration	$C_v = C_{v-w}$	$C_v = C_{v-g}$	$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$
Pressure	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

جدول ۵ مقادیر شرط مرزی دما و کسر جرمی بخار برای مورد (۱) و (۲)

	Case1	Case2
Time	12:30 P.M.	14:50 P.M.
T_g	45.26	55.63
T_w	53.1	64.2
C_{v_g}	0.0208	0.1064
C_{v_w}	0.0935	0.1635

- حل معادله پیش‌بینی سرعت بر اساس مقادیر اولیه متغیرها
 - حل معادله پواسون فشار (ترکیب معادلات (۱۰) و (۱۱))
 یعنی پیوستگی و مومنتم) جهت پیش‌بینی فشار بر اساس
 سرعت پیش‌بینی شده از مرحله قبل (در الگوریتم سیمپل این
 مرحله یک بار صورت می‌گیرد).

- تصحیح سرعت و فشار بر اساس سرعت و فشار پیش‌بینی
 شده از دو مرحله قبل با استفاده از معادله مومنتم
 - حل معادله انرژی (معادله (۱۲)) بر اساس سرعت تصحیح
 شده از مرحله قبل

- حل معادله انتقال کسر جرمی بخار آب در داخل هوای
 خشک (معادله (۱۳)) بر اساس سرعت تصحیح شده

- محاسبه خواص هوای مرطوب که بر اساس روابط وابسته به
 خواص هوای خشک و بخار آب حاصل می‌شود و به تبع آن
 بدست آوردن ویژگی‌های نانواثروسل با استفاده از ویژگی‌های
 هوای مرطوب و نانوذرات اکسید آهن بر اساس روابط ۱۴ تا ۲۶.

- تکرار مراحل تا همگرایی حل

در این مطالعه، در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی
 انتقال حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی گسسته‌سازی
 ترم‌های پخش به روش اختلاف مرکزی مرتبه دوم و ترم‌های
 جابجایی با روش بالادست، با دقت مرتبه دوم انجام گرفته است.
 دستگاه معادلات جبری حاصل از گسسته‌سازی معادلات به
 روش گوس-سایدل حل شده‌اند. معیار همگرایی برای تمامی
 معادلات کاهش مقادیر باقیمانده به کمتر از 10^{-6} در نظر گرفته
 شده است. همچنین معیار دیگر در نظر گرفته شده عدم تغییر
 پارامترهای سرعت و دما با افزایش تکرار می‌باشد.

۳-۲- مطالعه شبکه محاسباتی

ابعاد هندسی آب شیرین‌کن مورد بررسی جهت شبیه‌سازی
 عددی دقیقاً مطابق با کار تجربی شوافقه و فرید تنظیم شده
 است به‌طوری‌که ارتفاع دیواره سمت راست، چپ و طول دیواره
 پایین به ترتیب ۰/۴۸، ۰/۱ و ۰/۹۸ متر می‌باشند. نمونه مش
 بندی مورد استفاده در مقاله حاضر در شکل (۲-الف) نمایش
 داده شده است. برای اطمینان از مستقل بودن نتایج عددی از
 تعداد المان‌های شبکه، چهار شبکه‌بندی ساختار یافته متفاوت
 مورد ارزیابی قرار گرفتند.

جدول (۶)، تأثیر تعداد المان‌های شبکه بر میزان آب
 تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت میانگین را در
 بحرانی‌ترین حالت، مورد شماره (۲) در کسر حجمی ۰/۰۵

$$Nu = \frac{-1}{(T_w - T_g)} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} dx \quad (31)$$

$$\dot{m} = \frac{-3600 \times D_{v,a} \times \rho}{L} \int_0^L \frac{\partial C_v}{\partial y} \Big|_{y=0} dx \quad (32)$$

این روابط بر اساس عدد ناسلت سطح آب و دبی آب تبخیر
 شده از سطح آب می‌باشد که در شرایط جریان پایا با عدد
 ناسلت سطح شیشه و دبی آب تقطیر شده روی سطح شیشه
 برابر خواهند بود.

۳-۱- حل عددی، استقلال از شبکه و صحت سنجی نتایج

در این بخش از مقاله به بررسی الگوریتم حل عددی استفاده
 شده برای شبیه‌سازی‌ها، مطالعه شبکه محاسباتی مورد استفاده
 و اعتبارسنجی کد عددی پرداخته می‌شود.

۳-۱- الگوریتم حل عددی

در کار حاضر یک حلگر بر پایه نرم‌افزار متن باز OpenFOAM
 که به زبان C^{++} شی‌گرا می‌باشد، توسعه داده شد. در واقع یکی
 از حلگرهای پایه کد متن باز اوپن فوم تغییر داده شد و کدهای
 محاسبه خواص هوای مرطوب (بخار آب + هوای خشک)، خواص
 نانواثروسل (هوای مرطوب + نانوذرات اکسید آهن)، حل معادله
 انتقال کسر جرمی بخار آب در در داخل هوای خشک و محاسبه
 نیروی کلونین برای اکسیژن هوا و نانوذرات اضافه شد. الگوریتم
 کوپلینگ فشار-سرعت^۱ کد به روش حجم محدود، بر پایه
 الگوریتم سیمپل^۲ می‌باشد. گام‌های الگوریتم عدد کد به صورت
 زیر می‌تواند خلاصه شود:

¹ Pressure velocity coupling

² Simple

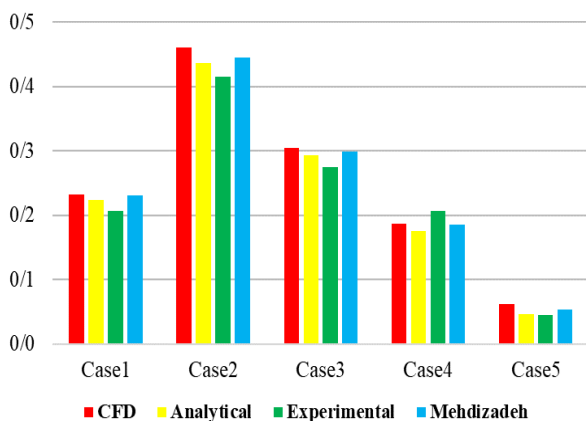
بدین منظور جهت صرفه‌جویی در زمان محاسبات برای استخراج نتایج از شبکه 100×100 استفاده گردیده است. بررسی شبکه نهایی نشانگر این است که نسبت منظری مش-های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر زیر ۱۰، میزان عدم تعامد میانگین مش‌ها زیر ۱۲ و ماکزیمم چولگی مش‌ها زیر ۱ می‌باشند، که همگی در محدوده مش معتبر هستند.

۳-۳- صحت‌سنجی نتایج

برای اطمینان از صحت نتایج عددی، مقایسه‌ای با نتایج تجربی شواقفه و فرید [۳۵]، کار تحلیلی دانکل [۲۶] و مقاله عددی مهدی‌زاده و همکاران [۲۴] انجام گرفت. برای انجام مقایسه، نتایج حاصل در حالت بدون اعمال اثرات نیروی مغناطیسی و نانو آئروسول‌ها، با نتایج مقاله‌های فوق‌الذکر انجام پذیرفت.

در شکل (۳) میزان آب تولیدی در موردهای مختلف بدست آمده و نتایج عددی حاضر با مقادیر تجربی و تحلیلی در ساعات مختلف روز مقایسه شده‌اند. در این شکل:

مورد (۱): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۲:۳۰ ظهر
مورد (۲): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۴:۵۰
مورد (۳): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۶:۴۰
مورد (۴): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۷:۵۰
مورد (۵): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۹:۴۰
به علاوه، در جدول (۷) مقدار تولید آب و عدد ناسلت در حالات بدون اعمال میدان و عدم حضور نانو آئروسول در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر، مورد (۱) و ساعت ۱۴:۵۰ مورد (۲) با مطالعه دانکل و مقاله مهدی‌زاده مقایسه گردیده است.



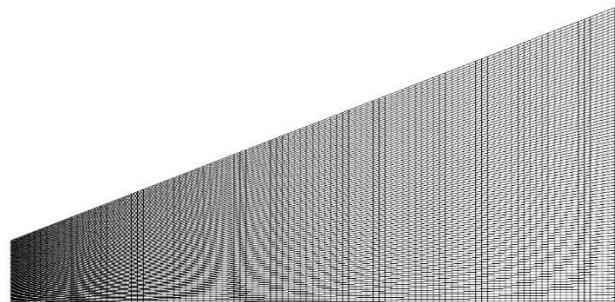
شکل ۳ مقایسه میزان تولید آب شیرین

\dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2 \cdot hr}$) با مطالعه تحلیلی دانکل [۲۶]، تحقیق تجربی شواقفه و فرید [۳۵] و کار مهدی‌زاده و همکاران [۲۴]

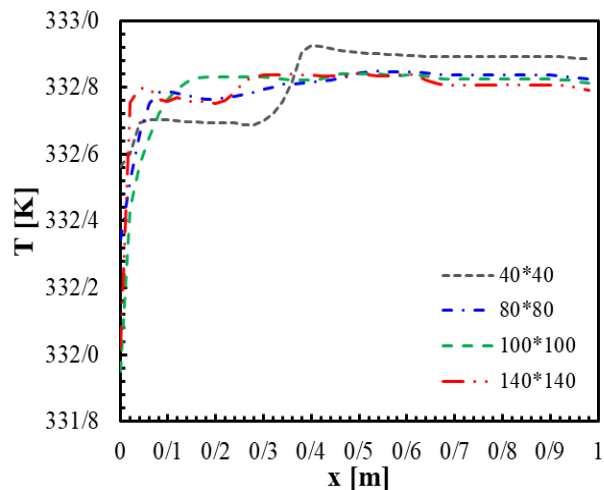
درصد و با نانوذره Fe_3O_4 و برای آب شیرین‌کن تحت میدان آهن‌ریا دائم را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج استقلال از شبکه برای آب شیرین‌کن تحت میدان آهن‌ریای دائم

Mesh Number	Permanent Magnet	
	$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2 \cdot hr})$	Nu
40×40	0.6203	59.13
80×80	0.7718	95.00
100×100	0.8340	108.21
140×140	0.8353	109.60



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف- نمونه مش‌بندی مساله، ب- تغییرات دما (کلوین) برحسب شبکه‌بندی‌های مختلف

در شکل (۲-ب) تغییرات دمای هوای مرطوب روی خط میانی به ازای چهار شبکه متفاوت رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد المان شبکه از 100×100 به 140×140 تغییر محسوسی در نتایج بوجود نمی‌آید و روند تغییرات دما ثابت می‌ماند و مستقل از شبکه رفتار می‌کنند.

شکل (۳) و نتایج جدول (۷) نشان می‌دهند که نتایج بدست آمده برای میزان آب تولیدی به روش عددی به ترتیب برای موردهای (۱)، (۲)، (۳)، (۴) و (۵) دارای ۰/۴۹٪، ۵/۵۷٪، ۴/۹۴٪ و ۹/۳۸٪ خطا در مقایسه با نتایج تحلیلی دانکل و ۲۵/۷٪، ۱۴٪، ۱۲/۴۶٪، ۱۰/۶۲٪ و ۹٪ خطا در مقایسه با نتایج تجربی شفق و مهدی‌فرد در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی هستند. اختلاف بین نتایج عددی، تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی نتیجه ترکیبی از عواملی همچون فرض‌های اولیه (در بخش معادلات اساسی حاکم، به آن اشاره شده است) جهت استخراج مدل‌ها و معادلات حاکم در روش‌های عددی و تحلیلی، خطاهای ناشی از روش‌های عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها و همچنین کیفیت داده‌های تجربی و خطاهای آزمایشگاهی است.

جهت بررسی بخش نیروی مغناطیسی کد توسعه داده شده است. در شکل (۴) مقایسه نتایج کانتور رنگی دما و توزیع سرعت عمودی بر روی دو خط افقی که از کویتی عبور می‌کند با کار عددی سانگ و تاگوا [۳۶] (۲۰۱۸) نشان داده شده‌اند. سانگ و تاگوا به بررسی عددی انتقال گرمای همرفتی در کویتی حاوی مولکول‌های اکسیژن و تحت اثر میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌ربای دائم پرداخته‌اند. نتایج کانتور دما، کار حاضر و نتایج عددی سانگ و تاگوا از نظر کیفی همخوانی نسبتاً خوبی دارند. همچنین روند نمودارهای پروفیل سرعت کار حاضر و نتایج سانگ و تاگوا کاملاً مشابه می‌باشند. از نظر کمی درصد جذر میانگین مربعات خطا برای پروفیل‌های سرعت در حدود ۱۷٪ می‌باشد. از آنجا که روش‌های گسسته-سازی ترم‌های معادلات در کار حاضر و کار عددی مرجع متفاوت می‌باشد؛ این اختلاف می‌تواند ناشی از این تفاوت باشد.

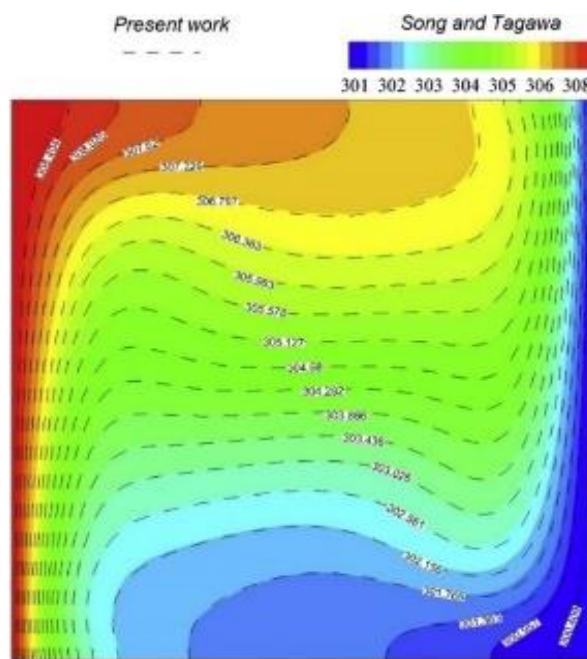
۴- نتایج و بحث

هدف کلی این مقاله بررسی و شناخت اثرات نانو آئروسول‌های مغناطیسی در بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی مرسوم خواهد بود. در تحقیق حاضر، اثرات میدان مغناطیسی که توسط آهن‌ربای دائم ایجاد شده است، در درصد حجمی‌های مختلف نانوآئروسول Fe_3O_4 -هوا بر افزایش میزان تولید آب شیرین، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده در بخش بعدی ارائه می‌گردد.

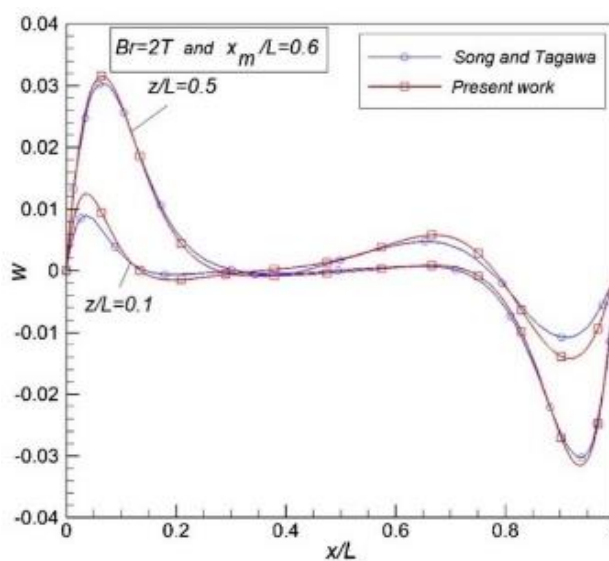
۴-۱- عملکرد سیستم در حضور نانوذرات و غیاب میدان مغناطیسی

جدول ۷ مقایسه میزان دبی تولیدی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2 \cdot hr}$) به همراه تغییرات ناسلت میانگین با مطالعه تحلیلی دانکل [۲۶] و شبیه‌سازی عددی مهدی‌زاده [۲۴]

Time	CFD		Analytical		Mehdizadeh	
	\dot{m}	Nu	\dot{m}	Nu	\dot{m}	Nu
Case1 (12:30 P.M.)	0.23	27.2	0.22	26.1	0.23	25.9
Case2 (14:50 P.M.)	0.46	29.30	0.43	28.98	0.44	28.3



(الف)



(ب)

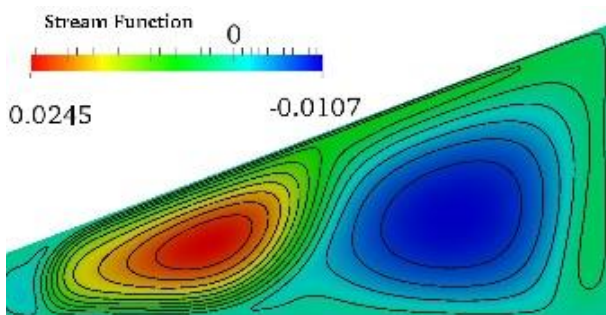
شکل ۴ مقایسه نتایج در کویتی با کار سانگ و تاگوا [۳۶] الف- میدان دما (بر حسب کلونین) ب- توزیع مولفه عمودی بردار سرعت (برحسب متر بر ثانیه)

تولیدی در حالت‌های حضور و عدم حضور نانو آئروسول و بدون اعمال میدان مغناطیسی هستند. طبق این نتایج استفاده از آئروسول‌ها در غیاب میدان مغناطیسی موجب کاهش عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی می‌گردد.

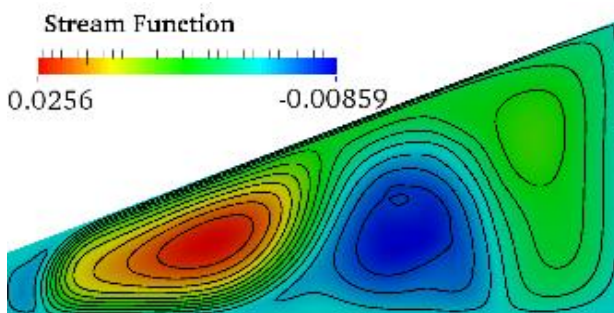
علت فیزیکی این موضوع به این مسئله می‌تواند ارتباط داشته باشد که افزودن نانوذرات در مقیاس میکروسکوپی سبب افزایش ویسکوزیته معادل نانوآئروسول می‌شود و این امر به صورت محلی عدد رایلی را کاهش داده و سبب می‌شود برتری نیروی بویانسی به نیروی ویسکوزیته کاهش یابد. بدین طریق سرعت جریان و سیرکولاسیون کاهش می‌یابد و این امر سبب کاهش عملکرد حرارتی و انتقال جرم در داخل آب شیرین‌کن و به تبع آن سبب کاهش آب شیرین تولیدی می‌شود.

۴-۲- عملکرد سیستم با اعمال میدان مغناطیسی

به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر تولید آب شیرین، تأثیر قدرت، زاویه و مکان قرارگیری آهن‌ربا در کسر حجمی‌های مختلف نانوذره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بررسی اثر قدرت آهن‌ربا، از آهن‌ربا دائم با مغناطش یا قدرت‌های در حدود 10^7 ، 10^6 ، 4×10^5 ، 2×10^5 ، 10^5 و 10^4 و 10^3 M_{st} امپر بر متر که در فاصله $(x=0/7$ و $y=0/2)$ متری قرار داده شده، استفاده شد.

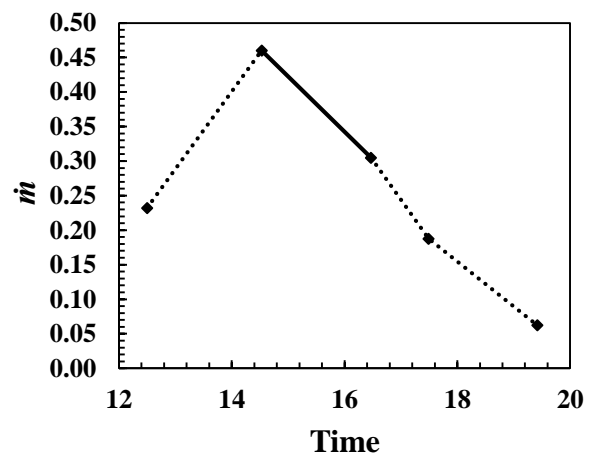


الف: $\phi=0$, $M_{st}=100,000$

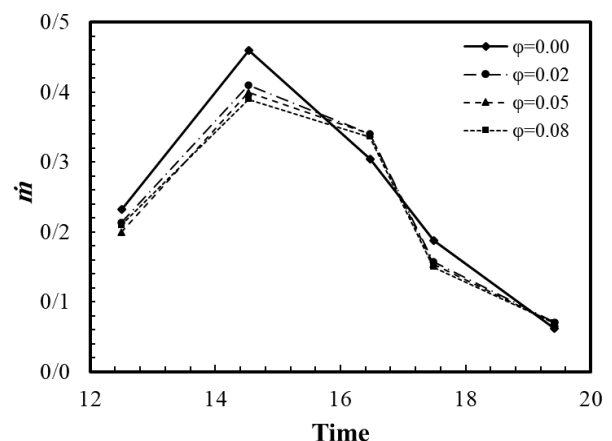


ب: $\phi=0$, $M_{st}=1,000,000$

شکل (۵) نشان‌دهنده تغییرات میزان تولید آب و عدد ناسلت در طی روز در حالت بدون نانوذرات و میدان مغناطیسی می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص می‌شود میزان تولید آب در طی روز با نزدیک شدن به میانه روز افزایش می‌یابد و در مورد (۲) مقدار آب شیرین تولید شده به حداکثر $0/45 \frac{Kg}{m^2.hr}$ می‌رسد. در ادامه با کاهش دما و با نزدیک شدن به انتهای روز میزان تولید آب شیرین شدیداً کاهش می‌یابد. کمترین میزان تولید آب نیز در انتهای روز و حوالی ساعت ۷ عصر در حدود $0/05 \frac{Kg}{m^2.hr}$ است.



شکل ۵ تغییرات میزان تولید آب شیرین \dot{m} (بر حسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) در طی ساعات مختلف روز (بر حسب ساعت)

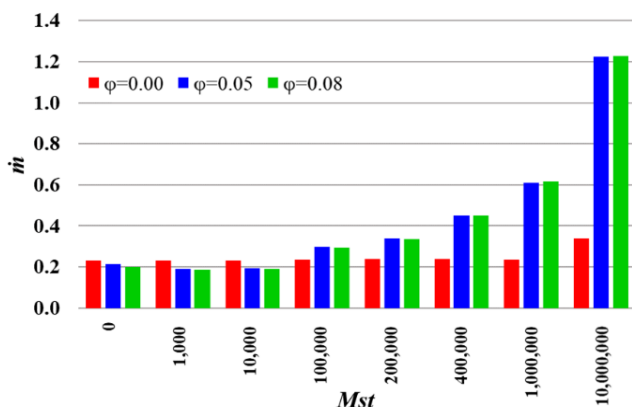


شکل ۶ تغییرات میزان تولید آب شیرین \dot{m} (بر حسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) در حضور نانو آئروسول و در غیاب میدان مغناطیسی در ساعات مختلف روز (بر حسب ساعت)

برای بررسی میزان اثرگذاری نانو آئروسول بر نرخ تولید آب شیرین‌کن، کد برای کسر حجمی‌های متفاوت (۰، ۵ و ۸ درصد) از نانو آئروسول Fe_3O_4 در عدم حضور میدان مغناطیسی اجرا گردید. شکل (۶) نشان‌دهنده مقایسه نرخ آب شیرین

گردیده است. طبق معادله تابع جریان - ورتیسیتی مقدار تابع جریان رابطه مستقیم با قدرت گردابه‌های جریان دارد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با افزودن نانو آئروسول Fe_3O_4 - هوا به سیستم قدرت و سرعت گردابه‌ها به طور محسوسی افزایش می‌یابد که به تبع آن دبی آب شیرین تولیدی \dot{m} مسئله بهبود می‌یابد. در زمان استفاده از آهن‌ربائی با مغناطش 10^6 آمپر بر متر به دلیل نیروی کلون یک گردابه بسیار قوی ایجاد می‌شود که باعث افزایش سرعت جریان هوای روی فیلم نازک آب می‌شود که این عامل میزان آب تولیدی را افزایش می‌دهد.

میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین در مورد (۱) یعنی ساعت ۱۲:۳۰ ظهر در شکل (۸) و جدول (۸) نشان داده شده‌اند.



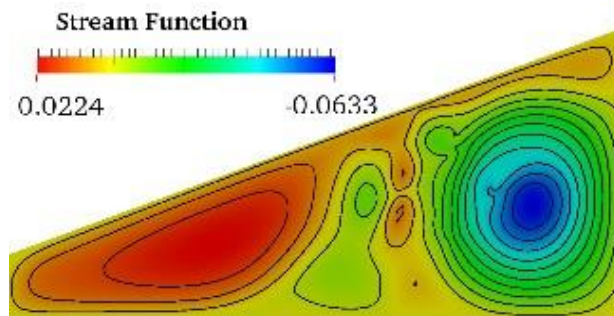
شکل ۸ میزان تولید آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) برای مورد (۱) به ازاء درصدهای حجمی مختلف

جدول ۸ مقایسه دبی جرمی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) آب شیرین و عدد ناسلت مورد (۱)

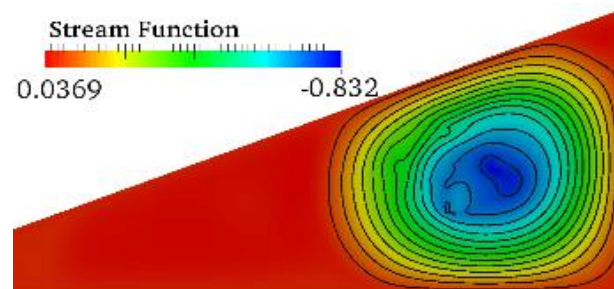
M_{st}	\dot{m}							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.34
$\phi=0.05$	0.21	0.19	0.19	0.30	0.34	0.45	0.61	1.22
$\phi=0.08$	0.20	0.19	0.19	0.29	0.34	0.45	0.62	1.23
M_{st}	Nu							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	27	26	26	26	25	26	26	37
$\phi=0.05$	62	65	67	83	85	101	113	146
$\phi=0.08$	74	76	77	90	91	107	120	146

جدول ۹ مقایسه دبی جرمی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) آب شیرین و عدد ناسلت مورد (۲)

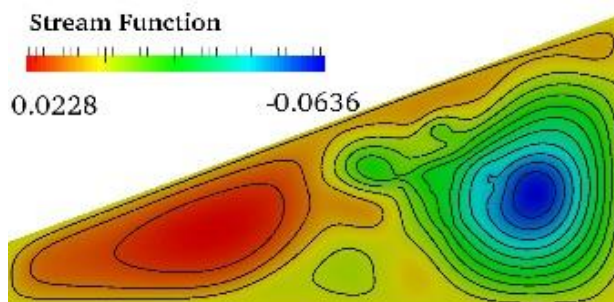
M_{st}	\dot{m}							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	0.41	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.43	0.63
$\phi=0.05$	0.40	0.36	0.36	0.55	0.63	0.83	1.10	2.31
$\phi=0.08$	0.39	0.36	0.36	0.55	0.63	0.84	1.11	2.32
M_{st}	Nu							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	55	28	28	28	28	28	27	40
$\phi=0.05$	71	68	68	89	93	108	118	159
$\phi=0.08$	81	68	68	97	100	115	125	159



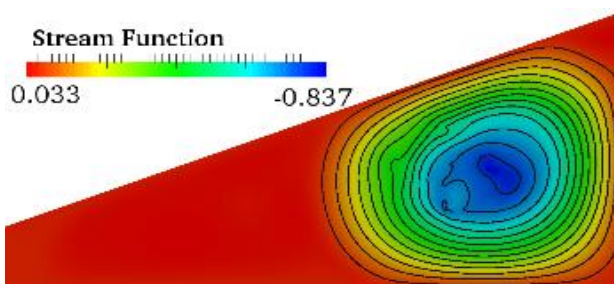
ج: $\phi=0.05, M_{st}=100,000$



د: $\phi=0.05, M_{st}=1,000,000$



ه: $\phi=0.08, M_{st}=100,000$



و: $\phi=0.08, M_{st}=1,000,000$

شکل ۷ کانتورهای تابع جریان (برحسب $1/s$) یا الگوهای جریان مورد (۲) الف - $\phi=0, M_{st}=10^5$ ب - $\phi=0, M_{st}=10^6$ ج - $\phi=0.05, M_{st}=10^5$ د - $\phi=0.05, M_{st}=10^6$ ه - $\phi=0.08, M_{st}=10^5$ و - $\phi=0.08, M_{st}=10^6$

الگوهای جریان به واسطه کانتورهای مربوط به تابع جریان در حالت استفاده از آهن‌ربا با قدرت‌های $100,000$ و $1,000,000$ آمپر بر متر برای مورد (۲) در شکل (۷) ارائه

طبق نتایج بدست آمده بیشترین مقدار \dot{m} در زاویه ۹۰ درجه و در مورد (۲) تولید می‌شود. لازم به ذکر است، نرخ تولید آب شیرین ابتدا با افزایش زاویه آهن‌ربا دائم به طور نامحسوسی کاهش می‌یابد و سپس بیشترین مقدار آب شیرین تولید شده در زمان استفاده از آهن‌ربا دائم با زاویه ۹۰ درجه تولید می‌شود. روند تغییرات عدد ناسلت نیز شبیه تغییرات \dot{m} است.

۴-۴- تاثیر تغییر مکان قرارگیری آهن‌ربا بر میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین

اثر مکان آهن‌ربا، دیگر پارامتر بررسی شده در تحقیق حاضر می‌باشد. در ادامه با جابجایی محل قرارگیری آهن‌ربای دائم تغییرات مشخصه‌های جریان داخل محفظه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی از یک آهن‌ربا با قدرت $M_{st}=10^6$ در مختصات طولی و عرضی مختلف که در جدول (۱۱) آورده شده‌اند، در کسر حجمی ۰/۰۵ از نانوذره Fe_3O_4 استفاده شده است.

بیشترین مقدار تولید آب شیرین در مختصات (۰/۷ و ۰/۳) بدست می‌آید. کانتورهای تابع جریان در مکان‌های مختلف قرارگیری آهن‌ربا در شکل (۹) ترسیم شده‌اند. نتایج نشانگر تشکیل دو گردابه بزرگ و نسبتاً قوی در حالتی است که محل قرارگیری آهن‌ربا در محلی با مختصات (۰/۷ و ۰/۳) می‌باشد.

جدول ۱۱ مقایسه دبی جرمی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت به ازاء موقعیت‌های مختلف آهن‌ربا

موقعیت آهن‌ربا	مورد ۱	مورد ۲
$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2.hr})$		
(0.7, 0.2)	1.1000	0.6083
(0.7, 0.3)	1.6900	0.9164
(0.7, 0.1)	1.1021	0.5950
(0.5, 0.2)	1.5260	0.8330
(0.85, 0.2)	1.1111	0.5991
Nu		
(0.7, 0.2)	118.00	112.66
(0.7, 0.3)	154.18	141.91
(0.7, 0.1)	119.48	110.74
(0.5, 0.2)	140.45	133.73
(0.85, 0.2)	124.30	114.53

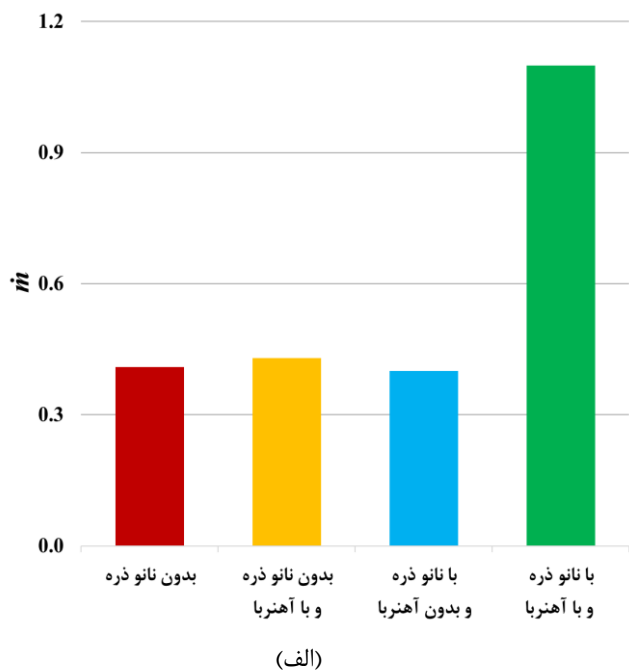
در نمودارهای میله‌ای نشان داده‌شده در شکل (۸) تاثیر آهن‌ربا دائم در افزایش میزان تولید آب شیرین مشخص می‌باشد. با افزایش قدرت آهن‌ربا مقدار آب تولیدی افزایش می‌یابد. در جدول (۸) مقادیر مربوط به مقدار آب قابل شرب بدست آمده به همراه مقادیر عدد ناسلت میانگین آورده شده‌اند. مقدار افزایش تولید آب شیرین با آهن‌ربائی به قدرت ۴۰۰،۰۰۰ آمپر بر متر در حدود ۸۷/۵ درصد و با آهن‌ربای دارای قدرت ۱۰۰،۰۰۰،۰۰۰ آمپر بر متر، ۲۶۰ درصد نسبت به دبی تولیدی آب شیرین‌کن‌های مرسوم بدون نانوذرات و میدان مغناطیسی (یعنی کسر حجمی و میدان مغناطیسی صفر) است. مقادیر عدد ناسلت میانگین نیز با افزایش قدرت آهن‌ربا و افزایش کسر جرمی نانوذره افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش بیشتر انتقال گرمای جابه‌جایی در افزایش عملکرد آب شیرین‌کن می‌باشد.

۴-۳- تاثیر زاویه آهن‌ربا بر میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین

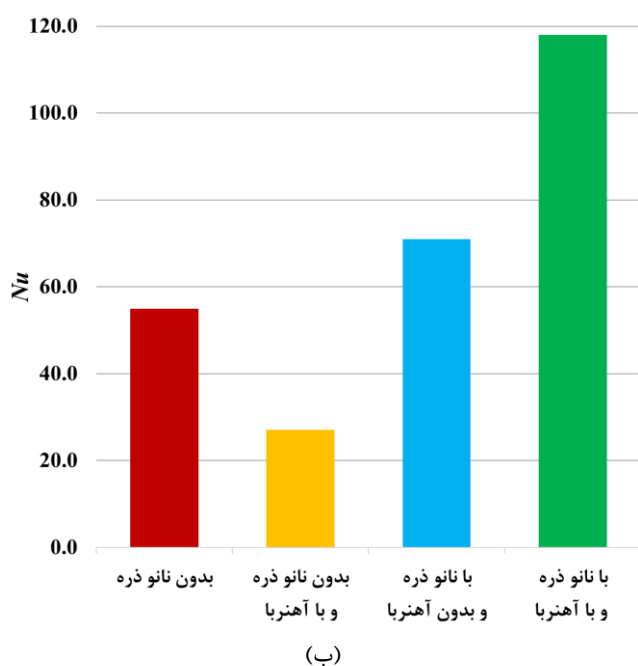
برای بررسی تاثیر زاویه قرارگیری آهن‌ربا بر عملکرد سیستم، زاویه آهن‌ربا با قدرت ۱۰^۶ آمپر بر متر را که در فاصله $y=0/2$ و $x=0/7$ متری نسبت به مبدا مختصات واقع شده است در زاویه‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در کسر حجمی ۰/۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات میزان تولید آب شیرین به همراه تغییرات ناسلت میانگین در زوایای مختلف آهن‌ربا دائم در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰ مقایسه دبی جرمی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت به ازاء زوایای مختلف آهن‌ربا

زاویه	مورد ۱	مورد ۲
$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2.hr})$		
$\theta=0^\circ$	1.1692	0.6405
$\theta=30^\circ$	1.1101	0.6343
$\theta=45^\circ$	1.1000	0.6083
$\theta=60^\circ$	1.0781	0.5912
$\theta=90^\circ$	1.2561	0.6744
Nu		
$\theta=0^\circ$	125.62	117.50
$\theta=30^\circ$	119.08	115.63
$\theta=45^\circ$	118.00	112.66
$\theta=60^\circ$	117.56	111.43
$\theta=90^\circ$	130.95	120.78



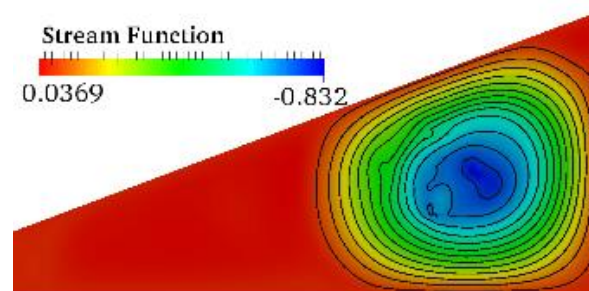
(الف)



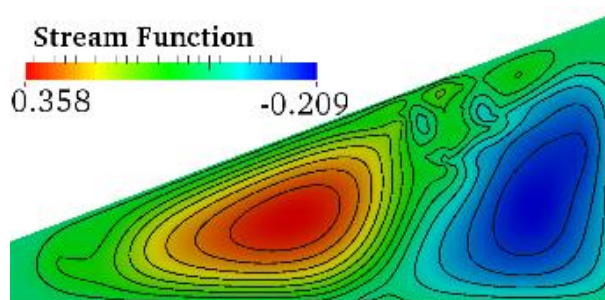
(ب)

شکل ۱۰ الف- نتایج دبی جرمی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) ب- عدد ناسلت برای مورد (۲) در حالت‌های بدون نانو ذره و بدون میدان مغناطیسی، بدون نانوذرات مغناطیسی و با آهنربا، با حضور نانوذرات مغناطیسی و بدون میدان آهنربا و با حضور نانوذرات مغناطیسی و میدان آهنربا

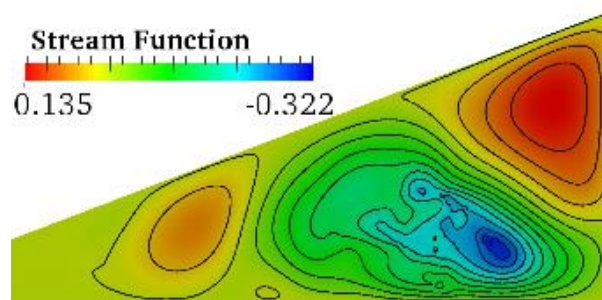
در ادامه به منظور جمع‌بندی و تبیین بهتر تأثیر حضور نانوذرات مغناطیسی به همراه میدان مغناطیسی آهنربا در شکل (۱۰- الف)، نتایج دبی جرمی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و در شکل (۱۰- ب)، نتایج عدد ناسلت برای مورد (۲) در چهار حالت: ۱- بدون نانوذرات مغناطیسی و بدون



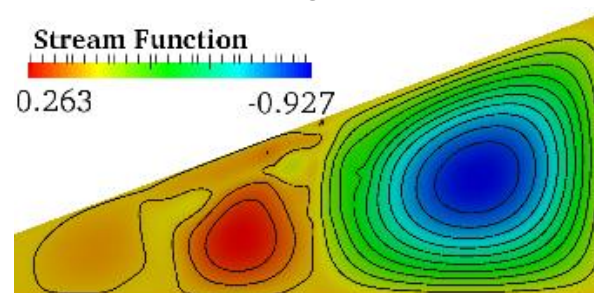
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹ کانتورهای تابع جریان (برحسب $1/s$) یا الگوهای جریان مورد ۲ در مکان‌های مختلف آهنربا دائم الف: (0.7, 0.2)، ب: (0.7, 0.3)، ج: (0.7, 0.1)، د: (0.5, 0.2)

همانطور که نتایج نهایی نشان می‌دهند تأثیر اصلی حضور نانو ذرات بر پارامترهای مولکولی مانند ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. ولی زمانی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود و به تبع آن نیروی کلومین بر سیال حاوی نانوذرات مغناطیسی اعمال می‌شود، الگوی جریان ناشی از این نیروی خارجی تغییر می‌یابد و مکانیزم ادوکشن باعث افزایش میزان آب تولیدی و ناسلت میانگین می‌گردد.

به دلیل پایین بودن مغناطیس‌شوندگی اکسیژن موجود در هوای مرطوب به تنهایی نمی‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش تولید آب شیرین بگذارند و برای تولید آب شیرین بیشتر نیازمند میدان‌هایی با نیروی مغناطیسی بسیار قوی است که بعضاً پرهزینه بوده و یا غیرقابل دسترس می‌باشد.

- با اعمال میدان مغناطیسی، گردابه‌های غیر هم جهت درون محفظه آب شیرین‌کن تولید می‌شود. این گردابه‌ها موجب اختلاط هرچه بیشتر سیال عامل با ناحیه گرم شده و بدین ترتیب میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در قوی‌ترین میدان مغناطیسی بررسی شده، مقدار تولید آب افزایشی در حدود ۲۶۰٪ دارد.

- نتایج نشانگر این بود که تغییر مکان آهن‌ربای دائم می‌تواند سبب تغییراتی در الگوی جریان داخل محفظه داشته باشد و از این رو به عنوان یکی از پارامترهای موثر در تنظیم دبی آب شیرین‌تولیدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

- زاویه قرارگیری آهن‌ربا در افزایش مقدار تولید مؤثر است. از بین زوایای بررسی شده بهترین زاویه قرارگیری آهن‌ربا نسبت به محور افقی ۹۰ درجه می‌باشد.

نتایج این تحقیق روش نوینی جهت بهبود دبی آب تولیدی و مدل ریاضی جهت مدل‌سازی تاثیر حضور نانوذرات در محفظه آب شیرین‌کن خورشیدی در حضور میدان آهن‌ربای دائم ارائه نمود. البته در این مدل‌سازی این مسائل فرض‌ها و در کاربرد نانواثروسل‌ها چالش‌هایی وجود دارد که باید در کارهای آتی مورد بررسی و توجه قرار گیرد.

از جمله این چالش‌ها می‌توان به این موارد اشاره نمود که اگر برخی از نانوذرات وارد قطرات آب حاصل از میعان آب روی سطح شیشه شوند چه تأثیری بر کیفیت آب تولیدی خواهند داشت؛ بویژه وقتی که هدف از تولید آب، تأمین آب شرب باشد، این مورد حائز اهمیت خواهد بود. در این صورت نیاز به استفاده از نانوذرات پوشش داده شده با مواد آب‌گریز و روش‌هایی برای فیلتراسیون آب خروجی از آب شیرین‌کن مانند استفاده از فیلترهای بر پایه نیروی گریز از مرکز خواهد بود.

چالش دیگر مربوط به پایداری نانواثروسل‌ها می‌باشد. در بلند مدت احتمال از بین رفتن پایداری نانوذرات و ته‌نشینی آن‌ها وجود دارد که می‌تواند کسر حجمی موثر نانوذرات را در داخل آب شیرین‌کن کاهش دهد. همچنین به خصوص در شرایطی که نیروی مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی بسیار قوی باشد می‌تواند سبب جذب نانوذرات به سمت میدان مغناطیسی شود و توزیع همگن نانوذرات در سیال را بر هم

میدان مغناطیسی (آب شیرین‌کن مرسوم)، ۲- بدون نانوذرات مغناطیسی و با حضور آهن‌ربا (فقط مولکول‌های اکسیژن تحت تاثیر میدان مغناطیسی)، ۳- با حضور نانوذرات مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی آهن‌ربا و ۴- با حضور نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی آهن‌ربا با هم مقایسه شده است. در حالت‌هایی که نانوذرات حضور دارند کسر حجمی نانوذرات ۸٪ و در حالت‌هایی که آهن‌ربا حضور دارد ضریب مغناطیس‌شوندگی آهن‌ربا ۱۰۷ می‌باشد. بر اساس توضیحات بخش نتایج و شکل (۱۰) بهبود عملکرد حرارتی و انتقال جرم در روش ترکیبی ارائه شده در کار حاضر مشهود می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر یک روش جدید جهت استفاده در آب شیرین‌کن‌های مرسوم توسعه داده شد و برای اولین بار نقش نانو اثروسل‌های مغناطیسی در افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد آب شیرین‌کن به روش عددی بررسی گردید. در ابتدا صحت‌سنجی و اعتبارسنجی بر اساس داده‌های اخذ شده از تحقیقات قبلی انجام شد. سپس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نقش پارامترهای مختلف همانند مغناطش، زاویه، محل قرارگیری آهن‌ربا و کسر حجمی نانوذرات مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل، نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از نانواثروسل‌های مغناطیسی تحت اثر میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌ربای دائم می‌باشد. عمده نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشد:

- افزودن نانوذرات مغناطیسی در قالب نانو اثروسل‌ها در غیاب میدان مغناطیسی تاثیر به‌سزایی در عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی ندارد و به دلیل افزایش بیشتر لزجت سیال معادل حتی ممکن است سبب کاهش مقدار آب شیرین‌تولیدی نیز گردد.

- طی این شرایط حداکثر آب شیرین‌تولیدی در حدود ساعت ۱۵ بدست آمده و دبی آن در حدود $\frac{Kg}{m^2.hr} = 0.45$ می‌باشد.

- افزایش درصد حجمی نانوذرات در غیاب میدان مغناطیسی موجب تضعیف عملکرد آب شیرین‌کن می‌گردد. به‌گونه‌ای که میزان تولید آب شیرین با $\phi = 8\%$ در حدود ۲۳٪ کمتر از آب شیرین‌کن با سیال عامل پایه می‌باشد.

- وجود میدان مغناطیسی و عدم حضور نانوذرات مغناطیسی

فشار جزئی بخار در دمای آب	P_w
فشار جزئی بخار در دمای شیشه	P_g
عدد رایلی	Ra
دمای آب	T_w
دمای شیشه	T_g
اختلاف دما بین آب و شیشه	ΔT

علائم یونانی

ضریب پخش دمایی هوا	α
ضریب انبساط حجمی	β
ضریب انبساط مخصوص	β^*
چگالی	ρ
ویسکوزیته سینماتیکی هوا	ν
قابلیت مغناطیس پذیری	χ
ثابت تراوایی خلاء	μ_0
نسبت رطوبت	ω
رطوبت نسبی	Φ
زاویه شیب	θ
کسر حجمی نانوذرات	φ

زیرنویس‌ها

آب	w
شیشه	g
جابجایی	c
بخار آب	v
هوا	a

بزند. لذا نیاز است به روش‌های دوفازی اویلری لاگرانژی به صورت ناپایا شبیه‌سازی هایی انجام پذیرد و این موارد مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

مساحت سطح آب شیرین‌کن	A_s
گرمای نهان بخار آب	h_{fg}
گرمای ویژه	C_p
میزان غلظت بخار در هوا	C_v
ضریب پخش بخار	$D_{v,a}$
ارتفاع دیواره سمت چپ آب شیرین‌کن	H_1
ارتفاع دیواره سمت راست آب شیرین‌کن	H_r
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب و پوشش شیشه‌ای	h_c
ضریب انتقال حرارت تبخیر	h_{ev}
شدت میدان مغناطیس	H_M
طول آب شیرین‌کن	L
میزان آب تولیدی	\dot{m}
وزن مولکولی	M
مغناطیسی پذیری	M_M
عدد ناسلت	Nu
مولفه x سرعت	u
بردار سرعت	\vec{v}
مولفه y سرعت	v

۷- مراجع

- [5] A. K. Kaviti, A. S. Ram, and A. K. Thakur, "Influence of fully submerged permanent magnets in the evaluation of heat transfer and performance analysis of single slope glass solar still," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 236, no. 1, pp. 109-123, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/0957650921103102>.
- [6] Alizadeh, Mohammad, Asari, T. insight, and advantage, "Experimental study and evaluation of the effect of the thickness of the wool porous material on the production of fresh water, temperature distribution and energy efficiency and exergy of the solar step desalination plant.," (in persian), *Journal of mechanical engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 17-26, 2024, doi: 10.30506/MMEP.2023.2010858.2116.
- [7] M. d. P. Bouçanova, C. V. Vital, D. Rativa, and L. A. Gómez-Malagón, "Single slope solar distiller performance using metallic nanofluids," *Solar Energy*, vol. 245, pp. 1-10, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.065>.
- [8] H. Amiri, "Design, construction and laboratory investigation of the performance of an improved
- [1] A. E. Kabeel, Z. Omara, and F. Essa, "Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 75, pp. 77-86, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>.
- [2] S. Rashidi, M. Bovand, N. Rahbar, and J. A. Esfahani, "Steps optimization and productivity enhancement in a nanofluid cascade solar still," *Renewable Energy*, vol. 118, pp. 536-545, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.048>.
- [3] Asari, Karimi, Safora, breeder, Mohsen, and Sadeghian, "A review of the performance of solar water softener with reflectors," (in persian), *Journal of mechanical engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 15-28, 2020, doi: 10.30506/MMEP.2020.102729.1700.
- [4] E. Hedayati-Mehdiabadi, F. Sarhaddi, and F. Sobhnamayan, "Exergy performance evaluation of a basin-type double-slope solar still equipped with phase-change material and PV/T collector," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2409-2425, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.160>.

- [17] M. R. Karami, S. Saffar-Avval, M. Shokri, H. Aghakhani, Z. Mansoori, and M. Saffar-Avval, "Numerical and experimental investigation of floating wick solar still with a porous-media system," *Solar Energy*, vol. 282, p. 112958, 2024/11/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112958>.
- [18] T. Jeyaraj, P. Kumar, and S. Pathak, "Experimental and computational modeling analysis of double slope solar still with a trapezoidal channel for preheating," *Applied Thermal Engineering*, vol. 253, p. 123757, 2024/09/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123757>.
- [19] S. Abdallah and S. M. Aldarabseh, "Performance of Modified Conical Solar Still Integrated With Continuous Volume Flowrate," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 146, no. 1, 2023, doi: 10.1115/1.4062448.
- [20] M. Kumar, S. K. Patel, V. Mishra, D. Singh, B. S. Giri, and D. Singh, "Performance analysis of modified solar still with parabolic reflector and nanofluids," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, p. 105651, 2024/07/20/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105651>.
- [21] A. K. Hussein *et al.*, "A review of the application of hybrid nanofluids in solar still energy systems and guidelines for future prospects," *Solar Energy*, vol. 272, p. 112485, 2024/04/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112485>.
- [22] W. Al-Kouz, R. Al-Waked, M. e. Sari, W. Owhaib, and A. Atieh, "Numerical study of heat transfer enhancement in the entrance region for low-pressure gaseous laminar pipe flows using Al₂O₃-air nanofluid," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 7, p. 1687814018784410, 2018, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018784410>.
- [23] V. Khadanga, S. Mukherjee, P. C. Mishra, and S. Chakrabarty, "Heat Transfer Performance of Novel SiO₂ Nanoaerosol: The Numerical Investigation," *Microgravity Science and Technology*, vol. 34, no. 3, p. 50, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09969-w>.
- [24] M. Mehdizadeh Youshanlouei, S. Yekani Motlagh, and H. Soltanipour, "The effect of magnetic field on the performance improvement of a conventional solar still: a numerical study," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 24, pp. 31778-31791, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12947-1>.
- [25] A. Jocher, H. Pitsch, T. Gomez, J. Bonnetty, and G. Legros, "Combustion instability mitigation by inclined solar desalination plant," (in persian), *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 52, no. 3, pp. 237-246, 2022, doi: 10.22034/JMEUT.2022.50389.3063.
- [9] S. S. Adibi Tousi, S. Sina, opening, h. worker, t. faith, and rescue, "Experimental assessment of stepped solar still with hybrid NPCM under magnetic field," (in persian), *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 53, no. 1, pp. 13-22, 2023, doi: 10.22034/JMEUT.2022.53281.3163.
- [10] A. Farvardin and S. Y. Motlagh, "Investigating the effects of air inlet jet on the performance of solar still: A comprehensive numerical study," *Desalination*, vol. 569, p. 117048, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117048>.
- [11] H. G. Hameed, H. A. N. Diabil, and M. A. Al-Moussawi, "A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 484-500, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.199>.
- [12] U. F. Alqsair, "Numerical simulation and optimization of surface evaporation in a 3D solar still for improved performance," *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101554, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101554>.
- [13] M. Khalili, M. Taheri, and A. Nourali, "Metal fins efficacy on stepped solar still performance: An experimental study," *Desalination*, vol. 563, p. 116706, 2023/10/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116706>.
- [14] M. Abbaspour, Q. Esmaili, and A. Ramiar, "A numerical and experimental investigation of the impact of wire mesh on vertical solar still," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 105106, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105106>.
- [15] A. F. Abed, M. J. Alshukri, and D. M. Hachim, "Improving solar still performance via the integration of nanoparticle-enhanced phase change materials: A novel pyramid-shaped design with a numerical simulation approach," *Journal of Energy Storage*, vol. 97, p. 112980, 2024/09/10/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112980>.
- [16] H. Aghakhani, S. M. Ayatollahi, and M. R. Hajmohammadi, "A novel numerical model for solar still combined with collector and reflector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 248, p. 123123, 2024/07/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123123>.

- [31] D. R. Lide and H. V. Kehiaian, *CRC handbook of thermophysical and thermochemical data*. CRC press, 2020, <https://doi.org/10.1201/9781003067719>.
- [32] S. Y. Motlagh and H. Soltanipour, "Natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 111, pp. 310-320, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.08.022>.
- [33] H. C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *The Journal of chemical physics*, vol. 20, no. 4, pp. 571-571, 1952, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1700493>.
- [34] R. L. Hamilton and O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems," *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187-191, 1962, doi: <https://doi.org/10.1021/i160003a005>.
- [35] A. T. Shawaqfeh and M. M. Farid, "New development in the theory of heat and mass transfer in solar stills," *Solar energy*, vol. 55, no. 6, pp. 527-535, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00069-4).
- [36] K. W. Song and T. Tagawa, "Thermomagnetic convection of oxygen in a square enclosure under non-uniform magnetic field," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 125, pp. 52-65, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.012>.
- magnetic fields," *Physical Review E*, vol. 95, no. 6, p. 063113, 2017, doi: DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.063113>.
- [26] R. Dunkle, "Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still," in *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961*, 1961, vol. 5, p. 895.
- [27] J. Nakagawa, N. Hirota, K. Kitazawa, and M. Shoda, "Magnetic field enhancement of water vaporization," *Journal of applied physics*, vol. 86, no. 5, pp. 2923-2925, 1999, doi: <https://doi.org/10.1063/1.371144>.
- [28] N. Setyaningsih, S. Yanasin, Z. Supardi, and A. Taufiq, "Phase and magnetic properties of Fe₃O₄/SiO₂ natural materials-based using polyethylene glycol media," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 515, no. 1: IOP Publishing, p. 012017, doi: DOI:10.1088/1757-899X/515/1/012017.
- [29] T. Gehrke, "Design of permanent magnetic solenoids for REGAE," Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), 2013. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/002/45002598.pdf?r=1.
- [30] H. Panchal, K. K. Sadasivuni, M. Israr, and N. Thakar, "Various techniques to enhance distillate output of tubular solar still: a review," *Groundwater for sustainable development*, vol. 9, p. 100268, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100268>.

مواد گرادیدانی تابعی ساخته شده توسط ساخت افزایشی: نگرشی کوتاه بر کاربرد مواد گرادیدانی در توربین

چکیده: مواد گرادیدانی تابعی (FGM)، گروهی از مواد مهندسی شده هستند که به صورت پیوسته و ناپیوسته در دو حالت فیلم نازک و بالک، طراحی و ساخته می شوند. با گسترش و دسترسی آسان تر روش های پیشرفته، دقیق تر و کنترلی ساخت قطعات مانند ساخت افزایشی، پتانسیل استفاده از این مواد نیز افزایش یافته است. در این گزارش، با مروری بر تعاریف اولیه و روش های متداول ساخت مواد گرادیدانی، به بررسی امکان ساخت این مواد با استفاده از ساخت افزایشی پرداخته شده و با بررسی مطالعات انجام گرفته، ویژگی های هر روش ذکر گردیده است. در انتها، با در نظر گرفتن میزان اهمیت استفاده از این دسته از مواد در کاربردهای حساسی مانند صنعت توربین، دو نمونه از مطالعات موردی استفاده از این مواد براساس روش ساخت افزایشی در سیستم دوار (توربین گاز)، ارائه و معرفی شده است. در این مطالعات، هم از حالت فیلم نازک در قالب پوشش گرادیدانی و هم به صورت بالک و یکپارچه جهت ساخت قطعه مورد استفاده در توربین گاز، استفاده گردیده است.

واژه های راهنما: مواد گرادیدانی تابعی، مواد مهندسی شده، ساخت افزایشی، توربین گاز، فیلم نازک، بالک

مریم اکبری*

کارشناس ارشد
واحد متالورژی و مواد

کوروش نعمتی پور

کارشناس ارشد
واحد متالورژی و مواد

علی ربواز

مدیر واحد مدیریت پروژه،
شرکت تأمین کالای
توربین ماشین خاورمیانه،
تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

Maryam Akbari*
Material expert

Kourosh

Nematipour*
Senior Material expert

Ali Rivaz

Project manager,
Turbine Machine m. e.
Part Supplier Co., Tehran

A review on the application of additive manufacturing FGMs in turbines

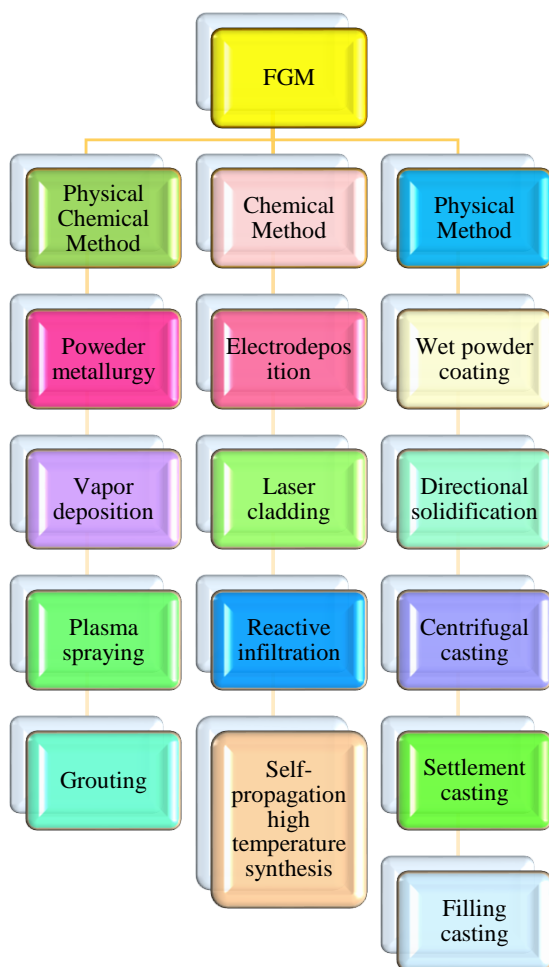
Abstract: Functionally graded materials (FGM) are a group of engineered materials that are designed and manufactured continuously and discontinuously in two forms, thin film and bulk. With the expansion and easier access of advanced, more precise and controlled methods of manufacturing parts such as additive manufacturing, the potential of using these materials has also increased. In this report, with an overview of the basic definitions and common methods of gradient materials manufacturing, the possibility of produce these materials using additive manufacturing has been investigated, and the characteristics of each method have been mentioned by reviewing the studies conducted. In the end, considering the importance of using this category of materials in sensitive applications such as the turbine industry, two examples of case studies of the use of these materials based on the additive manufacturing method in the rotary system (gas turbine) have been introduced. In these studies, both the thin film in the form of gradient coating and the bulk and integrated form have been used to make the part used in the gas turbine.

Keywords: Functionally Graded Materials, Engineered materials, Additive manufacturing, Gas turbine, Thick films, Bulk

۱- مقدمه

اتمی ذرات سازنده ماده گرادیانی است. دسته بندی بر اساس روش‌های ساخت، شامل روش فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی-شیمیایی [۱۶]، که در آن فاکتورهای گرادیانی، کنترل‌کننده فرآیند هستند. در شکل (۱)، روش‌های آماده سازی و ساخت مواد گرادیانی، ارائه گردیده است.

ذکر این نکته ضروری است که یکی از نوین ترین روش‌های ساخت مواد گرادیانی، همانند ساخت قطعات یکنواخت، ساخت افزایشی است [۱۷] که در این گزارش، به مروری بر روش‌های ساخت FGM با استفاده از این روش و علی‌الخصوص جهت ساخت قطعات مورد استفاده در توربین گازی، پرداخته خواهد شد.



شکل ۱ برخی از روش‌های ساخت FGM [۱۶]

FGMها را می‌توان مواد مهندسی شده پیشرفته نامید. در این مواد، دو و یا چند ماده مختلف حضور داشته و فاکتورهای همچون چگالی، ریزساختار و ترکیب شیمیایی، در یک و یا چند جهت هندسی در قطعه، تغییر می‌کند [۱]، [۲].

FGM، بهینه شده ترکیب دو یا چند ماده با هدف بهبود خواص متالورژیکی است که کامپوزیت نامیده می‌شود [۳]. دسته‌بندی این مواد، براساس پارامترهای گوناگون بوده که متداول ترین آن‌ها عبارتند از: حالت ماده حین تولید [۴]، ساختار FGM [۵]، فاکتور گرادیانی [۶] و ابعاد و اندازه [۷].

در بحث مواد گرادیانی، ساختارهای پیوسته و ناپیوسته مطرح است [۸]، [۹]. در زمینه‌های مختلفی، از این مواد استفاده شده است که عبارتند از: ۱- حوزه فضایی: براساس مقاومت، شوک خستگی حرارتی و خوردگی بالا، در سطوحی که نیاز به مقاومت حرارتی است [۱۰]؛ ۲- حوزه انرژی هسته‌ای: قطعه باید دارای استحکام بالا، مقاومت حرارتی و خوردگی خوب باشد [۱۱]؛ ۳- کاربردهای بیولوژیکی: استحکام ویژه بالا، مدول الاستیک ویژه بالا، مقاومت در برابر سایش و زیست سازگاری [۱۲]، ۴- حوزه الکترومغناطیس و نور [۱۳]، [۱۴] و ۵- حوزه انرژی: یکی از کاربردهای این مواد، که مورد بحث در این گزارش است؛ در این حوزه بوده و با تمرکز بر سیستم‌های تولید انرژی مانند توربین، خواصی همچون استحکام و مقاومت حرارتی بالا مورد نیاز است [۱۵].

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به نوین بودن روش تولید و همچنین حساسیت بالا و نیاز به خواص خاص (به‌عنوان مثال، شرایط عمل‌کردی دمای بالا) قطعات مورد استفاده در توربین و همچنین، خاص بودن این نوع از کامپوزیت‌ها (مواد تابعی گرادیانی)، تعداد مقالات و پژوهش‌های صورت گرفته با تمرکز بر قطعات توربینی بسیار محدود بوده که در این گزارش، سعی گردیده است بر اساس هدف نویسندگان مقاله، فاکتور اصلی مورد بررسی جهت تغییر و بهبود با استفاده از این مواد/روش، ارائه گردد.

۲- روش‌های ساخت مواد گرادیانی

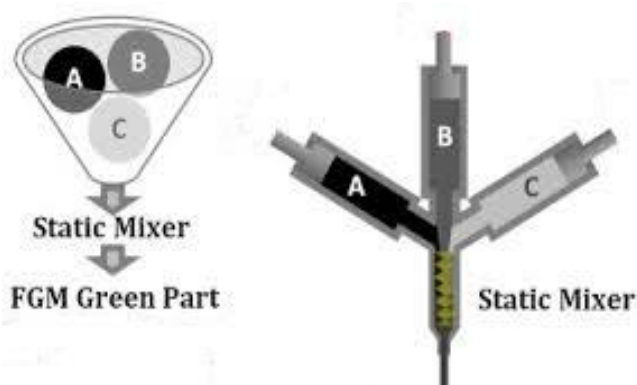
۳- ساخت FGM با استفاده از ساخت افزایشی

علاوه بر روش‌های بیان شده در قسمت قبل، ساخت افزایشی به‌عنوان یکی از نوظهورترین، کنترل‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای ساخت مواد گرادیانی مطرح می‌گردد. براساس گزارشی از کمیته ASTM F42، ساخت افزایشی، فرآیندی جهت ساخت

از جنبه‌های مختلفی به ساخت مواد گرادیانی نگاه شده است که دو مورد متداول آن، براساس حالت فیزیکی مواد تشکیل دهنده و یا بر اساس روش‌های به‌کار رفته است. ماهیت اصلی و نتیجه هر یک از این روش‌ها بر اساس هر دسته بندی، اتصال در مقیاس

سه بعدی اشیاء از یک ورودی مدل سه بعدی و با استفاده از اضافه کردن لایه‌های مواد، تعریف می‌شود و متفاوت با روش‌هایی که با حذف ماده همراه هستند؛ می‌باشد [۱۸]. این تعریف منطبق با استانداردهای ارائه شده در زمینه ساخت افزایشی همچون ISO/ASTM52900-21 است.

به عنوان ابتدایی‌ترین مزیت و جذابیت این روش، می‌توان به لایه لایه‌ای بودن افزودن مواد اشاره نمود [۱۹] که سبب ایجاد توانایی در ساخت قطعات با هندسه بسیار پیچیده با دقت قابل قبول می‌گردد که با استفاده از روش‌های ساخت مرسوم و متداول، بسیار سخت خواهد بود [۲۰]. تلفیقی از ریزساختار گرادینانی غیرهمگن و بهینه‌سازی خواص مکانیکی، در هنگام استفاده از این روش در ساخت مواد گرادینانی، امکان‌پذیر است [۲۱].



شکل ۲ شماتیکی از فرآیند FEF [۲۶]

در یکی از جدیدترین پژوهش‌ها، فرآیند پرینت فیلامنت فلزی، علی‌رغم تصور همگانی که FDM، مناسب پرینت مواد پلیمری است؛ موسی پور و همکاران [۲۸]، نمونه فلزی را با استفاده از فرآیند FDM و به‌طور همزمان با استفاده از دو فیلامنت، پرینت نموده‌اند که نگارنده مقاله، در حال ساخت نمونه فیلامنت فلزی جهت استفاده در پرینترهای FDM است که به روش FFF^۸ شناخته می‌شود و یکی از ارزان‌ترین، نوین‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌های ساخت مواد گرادینانی است.

ب) نفوذ بستر پودر: در این روش، به‌طور ساده یک قیف جهت تأمین پودر و یک غلتک جهت صاف کردن پودر روی سطح وجود دارد. یک لایه پودر ریخته شده؛ با غلتک پهن شده؛ توسط یک پرتو با منشأهایی همچون الکترونی و لیزری، براساس مدل ورودی دو بعدی، پودر اسکن شده و سپس یک لایه پایین آمده و مجدداً پودر روی لایه قبل، تزریق می‌شود [۲۹]. در شکل (۳)، شماتیکی از سیستم نفوذ بستر پودر نشان داده شده است.

فرآیندهایی همچون SLS^۹، جهت ساخت گرادینان ترکیب شیمیایی و تخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهشی، Zhang و همکاران [۳۰]، از SLS به‌عنوان روشی جهت ساخت ترکیب گرادینانی فلز/سرامیک استفاده نموده‌اند. در پژوهشی دیگر [۳۱]، از این روش، جهت ساخت ایمپلنت پایه تیتانیومی برای

هندسه کلی قطعات گرادینانی، به دو دسته اصلی فیلم نازک و بالک تقسیم می‌شود. زمانی که هدف، ساخت فیلم و یا لایه نازک باشد؛ به علت کاهش زمان ساخت، دارای مزایای بیشتری جهت ساخت با این روش نسبت به بالک هستند [۲۲]. روش‌های متداول جهت ایجاد لایه نازک گرادینانی، لایه نشانی با بخار به-روش‌های فیزیکی و شیمیایی و برای ساخت بالک، روش متداول، متالورژی پودر می‌باشد [۲۳]. مواد گرادینانی ممکن است تک جزئی و از یک ترکیب شیمیایی ساخته شده و یا از دو و یا چند ترکیب شیمیایی و جزء تشکیل شده باشند که روش ساخت افزایشی متداول برای تولید این دو گروه، تفاوتی با یکدیگر نداشته و می‌توان به روش‌هایی بر پایه لایه نشانی توسط انرژی جهت‌دار^۱ همچون LENS^۲ و LMD^۳ و روش‌های بر پایه نفوذ پودر مانند SLM^۴ و EBM^۵ اشاره نمود [۲۱]، [۲۴]، [۲۵].

در این تحقیق، چهار روش در دسترس ساخت افزایشی شامل اکستروژن، نفوذ بستر پودری، لایه نشانی توسط انرژی جهت‌دار و لمینیت ورق، جهت ساخت مواد گرادینانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) اکستروژن: در دو روش FEF^۶ و FDM^۷ بر پایه استفاده از فیلامنت جهت ساخت مواد گرادینانی با استفاده از پرینتر سه بعدی، از اکستروژن جهت ساخت ورودی مترالی به پرینتر استفاده می‌شود. در دو پژوهش [۲۶]، [۲۷]، از روش FEF جهت ساخت مواد گرادینانی استفاده شده است. این روش جهت ساخت مواد گرادینانی فلزی و سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از

⁶ Freeze-form extrusion fabrication

⁷ Fused deposition modeling

⁸ Fused filament fabrication

⁹ Selective laser sintering

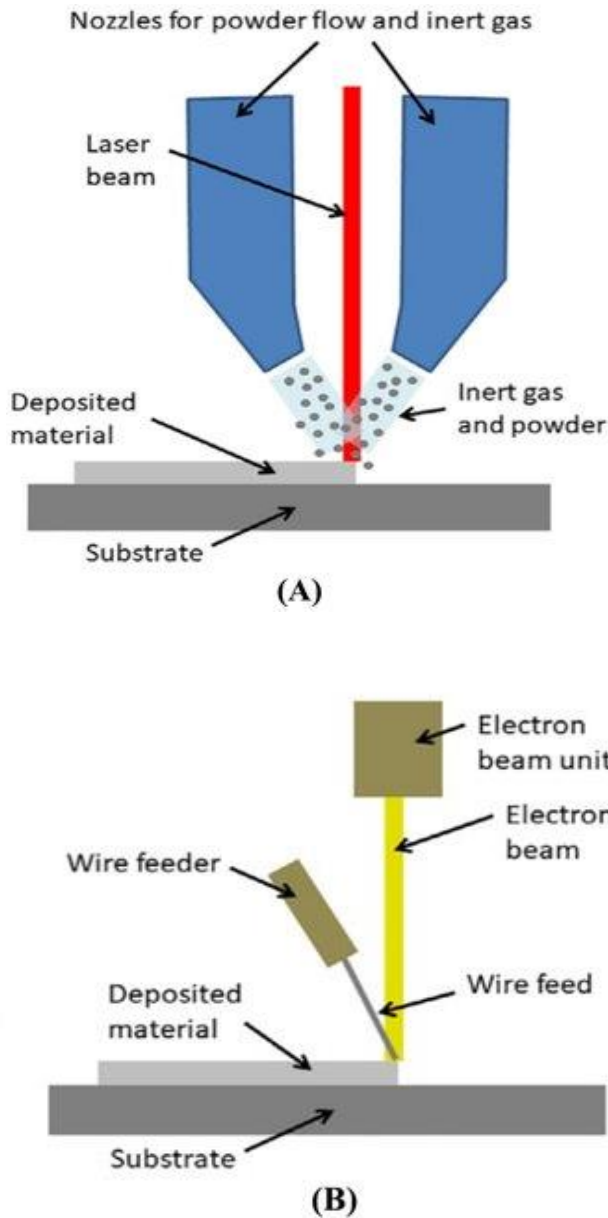
¹ Directed energy deposition

² Laser engineered net shaping

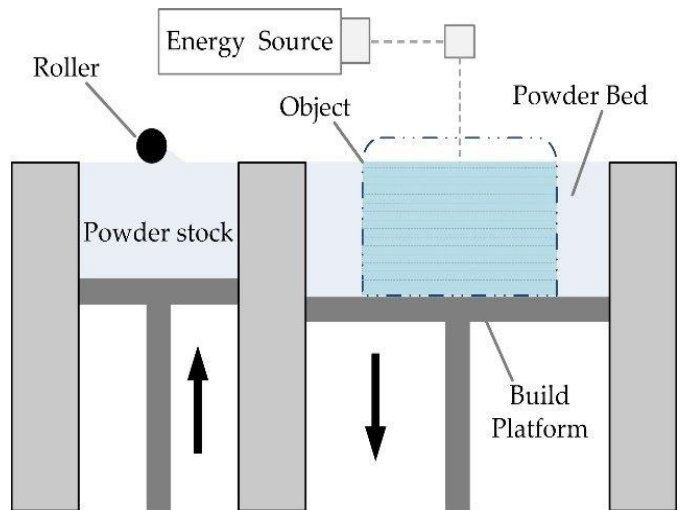
³ Laser metal deposition

⁴ Selective laser melting

⁵ Electron beam melting



ساخت ایمپلنت بهره برده شد. در کنار SLS، فرآیندهایی همچون EBM و SLM نیز با استفاده از این روش، جهت ساخت مواد گرادیانی، مورد استفاده قرار می گیرند [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵].



شکل ۳ شماتیکی از فرآیند نفوذ بستر پودر [۲۹]

پ) لایه نشانی توسط انرژی جهت دار: در این روش، با استفاده از یک منبع انرژی قابل کنترل از لحاظ جهت مانند لیزر، پرتو الکترونی و یا پلاسما، روی زیرلایه و قطعه پایه، حوضچه مذاب تشکیل شده؛ پودر و یا فیلامنت به صورت عمودی به حوضچه مذاب نزدیک شده و سبب ایجاد اتصال و پیوند بین اجزای سازنده زیرلایه و پودر/ فیلامنت می گردد [۳۶]. در شکل (۴)، شماتیکی از این فرآیند، براساس مواد تزریقی به صورت پودری/ فیلامنتی نشان داده شده است.

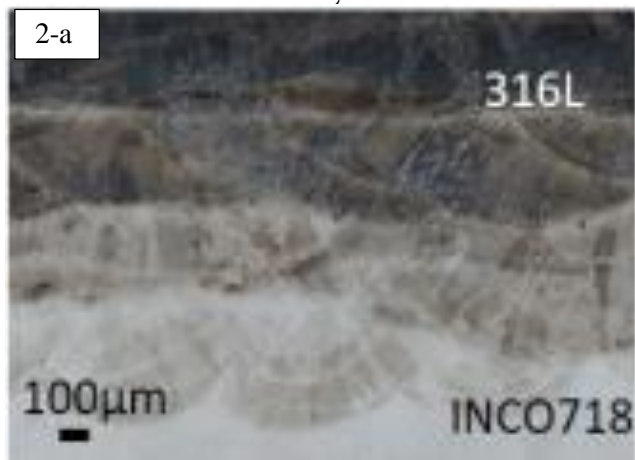
شکل ۴ شماتیکی از فرآیند DED؛ ورودی: A: پودر و B: فیلامنت [۳۹]

یکی از ترکیبات گرادیانی ساخته شده با استفاده از این روش، کامپوزیت AISI 316L/Inconel 718 است [۳۷]، [۳۸]. اینکونل ۷۱۸، دارای خواص عالی در دما و فشار بالا است که یکی از آن‌ها، مقاومت به خوردگی بالای این ماده در دمای بالا است. در این سوپر آلیاژ، نیوبیوم در کنار مولیبدن، به استحکام بخشی در آلیاژ کمک نموده و استحکام بالایی را بدون عملیات حرارتی، در دسترس قرار می دهد. اینکونل ۷۱۸، در ساخت قطعاتی که در شرایط عمل کردی فشار و دمای بالا مانند Heat exchanger ها، توربین های گازی و ولوها، مورد استفاده قرار می گیرند. جوش پذیری این سوپر آلیاژ پایین بوده و یکی از بهترین مواد که دارای خواص خوردگی مناسب و جوش پذیری بهتر از این ترکیب باشد؛ فولاد زنگ نزن 316L است که دلیل انتخاب ماده تقویت کننده و عامل دیگر گرادیان ساز در این تحقیقات جهت استفاده در قطعات با دمای کاری بالا بوده است [۳۷].

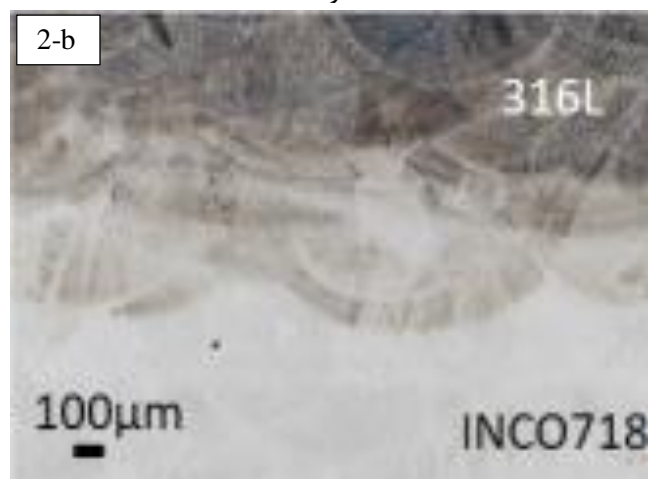
در شکل (۵)، نمونه ای از ریزساختار حاصل از فرآیند، نشان داده شده است. هدف از بررسی ریزساختار، ذکر نمونه ای از مواد گرادیانی تابعی است که دو فصل مشترک مجزا با تغییر موقعیت لایه رسوب نشانی شده، تشکیل می گردد. زمانی که اینکونل ۷۱۸ روی فولاد زنگ نزن 316L لایه نشانی شده است؛ فصل مشترک نسبتاً هموار و یا گاهی تیز تشکیل می شود. در صورتی که فولاد زنگ نزن روی سوپر آلیاژ لایه نشانی شده باشد؛ ریزساختاری به صورت باندهای حوضچه ای ایجاد می شود (بخش C) که نشان دهنده نفوذ عمیق تر فولاد زنگ نزن به داخل ساختار سوپر آلیاژ است (جهت بررسی دقیق تر و جزئی تر میزان نفوذ و تأثیر آن روی ترکیب شیمیایی، به اصل مقاله رجوع گردد).

فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن 316L و اینکونل ۷۱۸

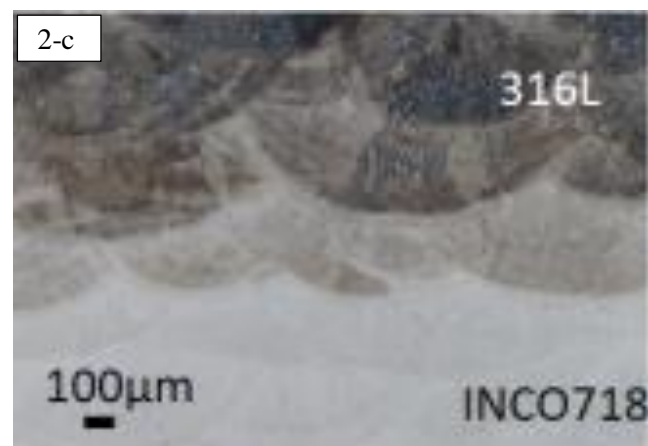
۳۵۰ وات



۴۵۰ وات



۵۰۰ وات

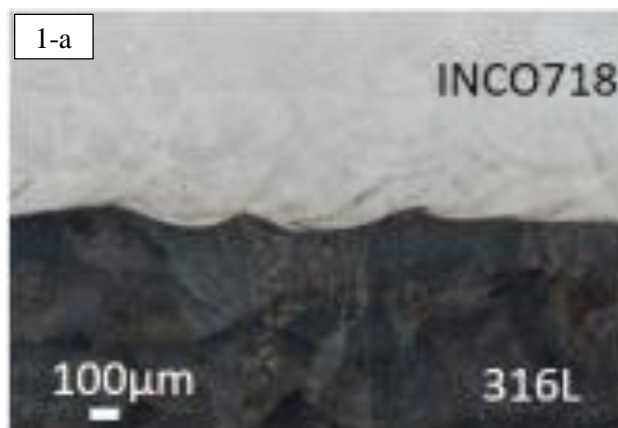


شکل ۵ ریزساختار نفوذ پودر 316L و اینکونل ۷۱۸ روی یکدیگر:
 حالت یک: فصل مشترک اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن 316L -
 حالت دو: فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن 316L و اینکونل ۷۱۸ -
 توان‌های ساخت: ۳۵۰ (تصویر a)، ۴۵۰ (تصویر b) و ۵۰۰ وات
 (تصویر c) [۳۷]

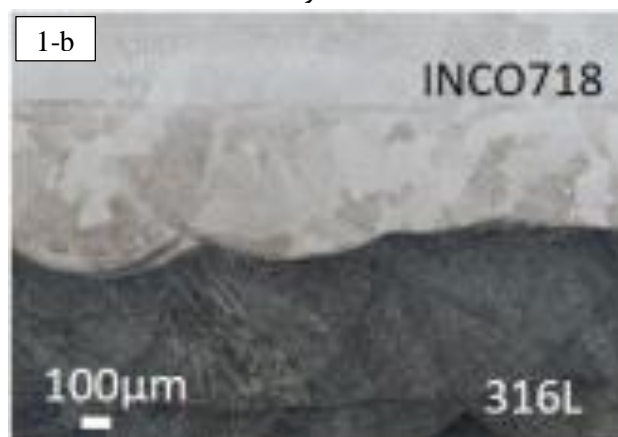
علت ایجاد این ریزساختار، به بالاتر بودن میزان هدایت حرارتی فولاد زنگ‌نزن نسبت به سوپرآلیاژ برمی‌گردد. وقتی 316L مذاب روی اینکونل ۷۱۸ رسوب می‌کند، به دلیل رسانایی حرارتی پایین‌تر برای اینکونل ۷۱۸، جذب انرژی و اتلاف گرما از ناحیه ذوب مجدد برای اینکونل ۷۱۸ کمتر است و به این معنی است که ناحیه ذوب مجدد اینکونل ۷۱۸ هنگام عمل به‌عنوان یک بستر بزرگتر است و بنابراین این نسبت به حالت مقابل، ناحیه تحت تأثیر گرما بزرگتری وجود دارد [۳۷].

فصل مشترک اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن 316L

۳۵۰ وات



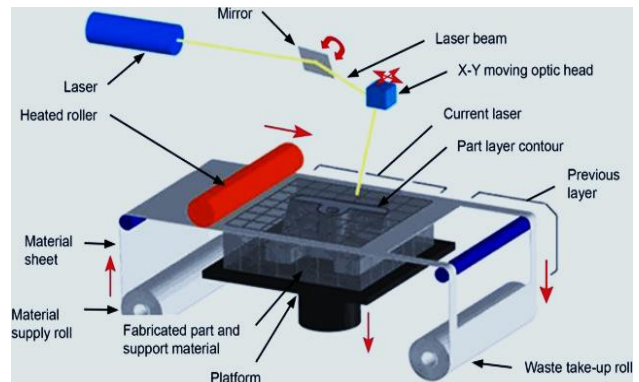
۴۵۰ وات



۵۰۰ وات



ت) لمینیت ورق: این روش، یکی از فرآیندهای حالت جامد ساخت افزایشی است که در آن ورق‌های مختلف و یا تک جنس، در هر مرحله، روی همدیگر قرار داده شده و با استفاده از غلتک حرارتی، چسبندگی اولیه ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از یک منبع انرژی مانند پرتو لیزر، براساس مدل دو بعدی ورودی به پرینتر، اسکن حرارتی انجام شده و مراحل مجدداً تکرار می‌شود و در انتها، نمونه برش می‌خورد [۴۰]. شکل (۶)، شماتیکی از این فرآیند است.

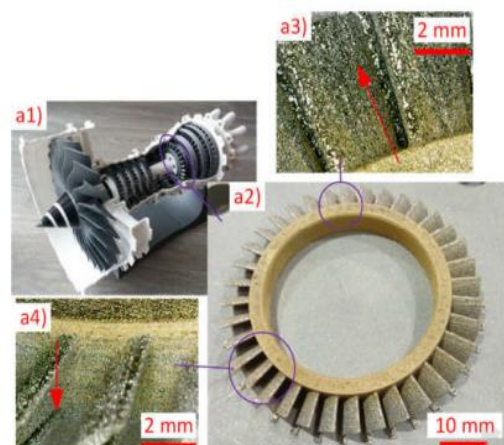


شکل ۶ شماتیکی از فرآیند لمینیت ورق [۴۰]

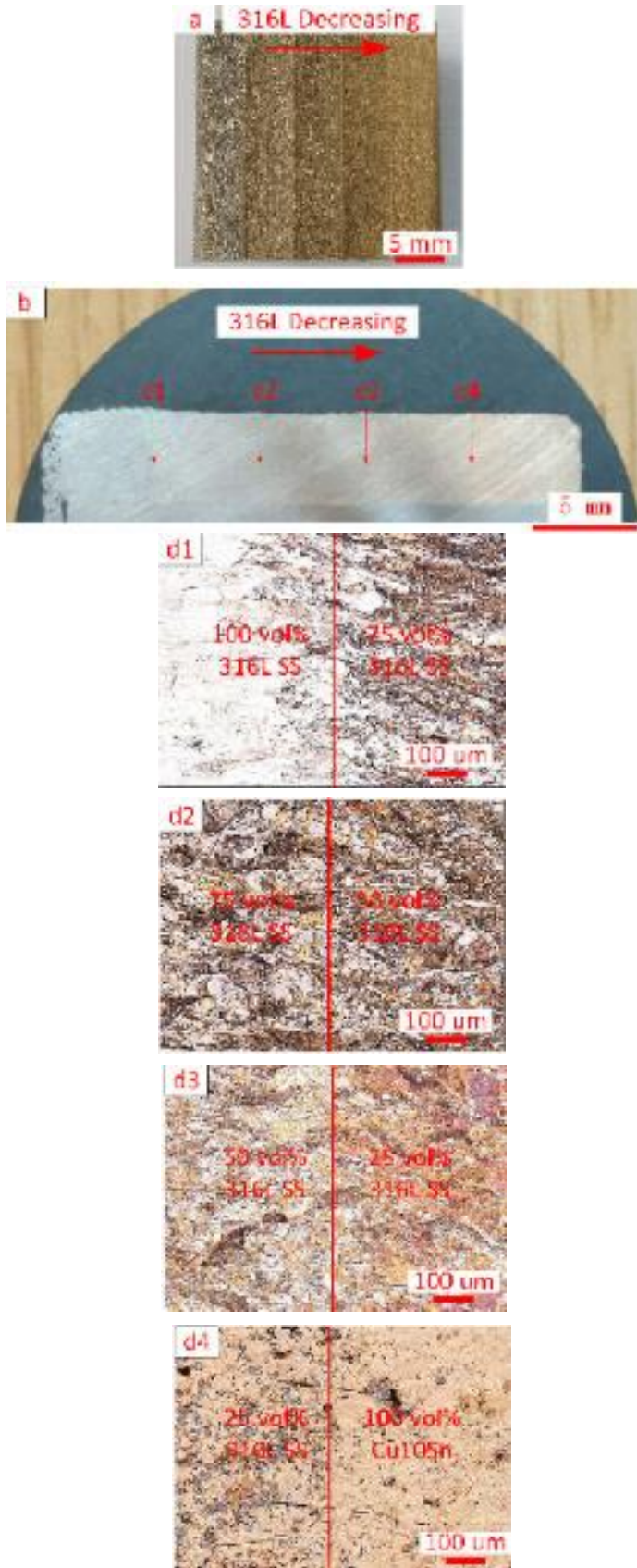
از این روش جهت ساخت کامپوزیت‌هایی همچون تیتانیوم کاربید- نیکل [۴۱] با گرادیان خواص مکانیکی (استحکام) در جهت موازی و عمود بر فرآیند استفاده می‌شود. از مزیت این روش می‌توان به ارزان و در دسترس بودن و از معایب آن می‌توان به عدم توانایی ساخت قطعات با هندسه پیچیده اشاره نمود.

۴- FGM های ساخته شده با استفاده از ساخت افزایشی در توربین

یکی از موارد تحقیقاتی، ساخت دیسک توربین با استفاده از روش SLM و به صورت گرادپانی است [۴۲].



شکل ۷ دیسک توربین ساخته شده با استفاده از 3D FGM [۴۲]



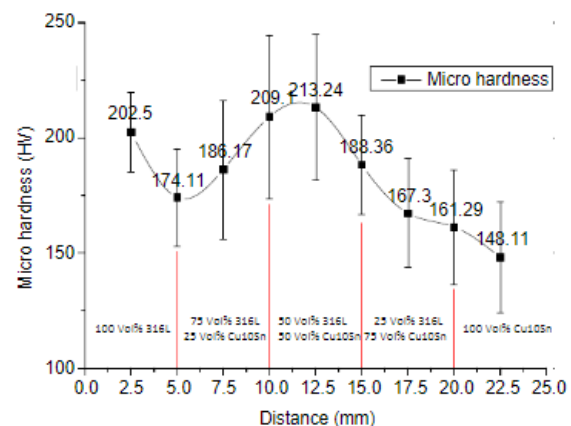
شکل ۸ تغییرات ریزساختار بر اساس توزیع عامل گرادپان ساز؛ a و b - پروفیل ماکرو از بالا و برش عرضی، d1 تا d4 - تصاویر میکروسکوپی در فصل مشترک‌های تعیین شده در تصویر b (متناظر با نقاط C1 تا C4) [۴۲]

روش ساخت افزایشی قابلیت ساخت مواد گرادیانی را دارا بوده که به آن‌ها در این گزارش اشاره گردیده است. با کنار هم قرار گرفتن روش نوین ساخت افزایشی و ساختارهای کنترلی و مهندسی شده گرادیانی، می‌توان بدون انجام عملیات اصلاحی مانند عملیات حرارتی، هزینه و زمان را در ساخت و حتی تعمیر قطعات توربینی کاهش داد. در این گزارش نیز به‌طور خلاصه و به‌عنوان نمونه، به کاربرد این روش اشاره گردیده است. بیان این نکته ضروری است که ساخت افزایشی، همانند سایر روش‌های ساخت، دارای عملیات پایانی^۲ روی قطعه ساخته شده هستند و نمونه پرینت شده، بلافاصله، قابل استفاده نخواهد بود.

۶- مراجع

- [1] R. S. Parihar, S. G. Setti, and R. K. Sahu, "Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 309-336, 2018, <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0395>.
- [2] P. Muller, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, "Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing," *Journal of materials processing technology*, vol. 213, no. 5, pp. 685-692, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.020>.
- [3] S. A. CPM, B. Varghese, and A. Baby, "A review on functionally graded materials," *Int. J. Eng. Sci*, vol. 3, pp. 90-101, 2014.
- [4] T. Rajan and B. Pai, "Development in manufacturing processes of functionally graded materials," *International Journal of Advanced Engineering Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 4-74, 2009.
- [5] C. Zhang *et al.*, "Additive manufacturing of functionally graded materials: A review," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 764, p. 138209, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
- [6] D. Mahmoud and M. A. Elbestawi, "Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 1, no. 2, p. 13, 2017, <https://doi.org/10.3390/jmmp1020013>.
- [7] M. Mohammadi, M. Rajabi, and M. Ghadiri, "Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their

در مطالعه حاضر، مجموعه Blade و Disk، با استفاده از فولاد زنگ‌نزن 316L و Cu_{10}Sn ، ساختار گرادیانی با استفاده از ساخت افزایشی، ساخته شد. هدف از انتخاب این موضوع، پارامتر گرادیان چند بعدی در فرآیند SLM است که به ندرت این فاکتور مورد توجه قرار گرفته و غالب مواد چند جزئی، با فاکتور عمودی گرادیانی ساخته شده‌اند. در این پژوهش، یکی از اهداف بیان شده در کنار ساخت هدفمند یکی از قطعات توربینی که در شکل (۷) نشان داده شده است؛ ایجاد گرادیان سه بعدی با استفاده از روش ساخت SLM بوده است که نمونه ریزساختارهای مورد بررسی، در شکل (۸) ارائه گردیده است. چون یکی از خواص مورد بررسی در مجموعه Blade و Disk، سختی است؛ در این پژوهش، سختی نیز اندازه‌گیری شده و در شکل (۹)، براساس تابعی از میزان عامل دوم گرادیانی، ارائه گردیده است.



۹ شماتیکی از مشاهده گرادیان سختی براساس فواصل در نمونه ساخته شده با استفاده از ساخت افزایشی [۴۲]

همانطور که در قسمت دوم بیان گردید؛ ساخت مواد گرادیانی می‌تواند در قالب فیلم نازک و یا بالک باشد؛ یکی از موارد استفاده از ساختار گرادیانی در توربین، استفاده از پوشش سد حرارتی گرادیانی است. در این پژوهش [۴۳]، پوشش چند لایه گرادیانی، جایگزین پوشش متداول^۱ TBC شده و نتایج بهتری از لحاظ عمل کردی حاصل شده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

ساخت افزایشی را می‌توان روشی دانست که ساخت قطعات در سه بعد بدون محدودیت در پیچیدگی و به‌طور مستقیم از مدل سه بعدی، براساس افزودن لایه به لایه مواد، انجام می‌پذیرد. چند

² Finishing

¹ Thermal barrier coating

- Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 478-497, 2022,
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.029>.
- [18] N. Gupta, C. Weber, and S. Newsome, "Additive manufacturing: status and opportunities," *Science and Technology Policy Institute, Washington*, 2012.
- [19] D.-A. Türk, A. Ebnöther, M. Zogg, and M. Meboldt, "Additive manufacturing of structural cores and washout tooling for autoclave curing of hybrid composite structures," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 140, no. 10, p. 105001, 2018,
<https://doi.org/10.1115/1.4040428>.
- [20] J. Gardan, "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends," *Additive Manufacturing Handbook*, pp. 149-168, 2017.
- [21] B. Zhang, P. Jaiswal, R. Rai, and S. Nelaturi, "Additive manufacturing of functionally graded material objects: a review," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 18, no. 4, p. 041002, 2018,
<https://doi.org/10.1115/1.4039683>.
- [22] M. Ivosevic, R. Knight, S. Kalidindi, G. Palmese, and J. Sutter, "Solid particle erosion resistance of thermally sprayed functionally graded coatings for polymer matrix composites," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 16-17, pp. 5145-5151, 2006,
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.05.038>.
- [23] G. Knoppers, J. Gunnink, J. Van Den Hout, and W. Van Vliet, "The reality of functionally graded material products," in *Intelligent Production Machines and Systems: First I* PROMS Virtual Conference, Elsevier, Amsterdam*, 2005, pp. 467-474.
- [24] D. Shamvedi, O. J. McCarthy, E. O'Donoghue, C. Danilenkoff, P. O'Leary, and R. Raghavendra, "3D Metal printed heat sinks with longitudinally varying lattice structure sizes using direct metal laser sintering," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 13, no. 4, pp. 301-310, 2018.
- [25] Y. Zhai, H. Galarraga, and D. A. Lados, "Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM," *Engineering failure analysis*, vol. 69, pp. 3-14, 2016,
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.036>.
- [26] M. C. Leu, B. K. Deuser, L. Tang, R. G. Landers, G. E. Hilmas, and J. L. Watts, "Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials," *CIRP annals*, vol. 61, no. 1, pp. 223-226, 2012,
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.050>.
- applications," *Processing and Application of Ceramics*, vol. 15, no. 4, pp. 319-343, 2021,
<https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>.
- [8] R. MR, "Evaluation of Mechanical and Tribological Properties of Directionally Solidified Al-Si Based FG Composite," *Silicon*, vol. 12, no. 3, pp. 701-713, 2020,
<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00179-5>.
- [9] M. Shojaeefard, H. Saeidi Googarchin, M. Mahinzare, and M. Ghadiri, "Free vibration and critical angular velocity of a rotating variable thickness two-directional FG circular microplate," *Microsystem Technologies*, vol. 24, pp. 1525-1543, 2018,
<https://doi.org/10.1007/s00542-017-3557-8>.
- [10] W. Zhang, Z. Feng, and D. Cao, "Nonlinear dynamics analysis of aero engine blades," *J Dyn Control*, vol. 10, pp. 213-221, 2012.
- [11] P. Zhao, S. Guo, G. Liu, Y. Chen, and J. Li, "Fast fabrication of W-Cu functionally graded material by high-gravity combustion synthesis and melt-infiltration," *Journal of nuclear materials*, vol. 445, no. 1-3, pp. 26-29, 2014,
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.10.032>.
- [12] W. Li and B. Han, "Research and application of functionally gradient materials," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 394, p. 022065: IOP Publishing,
[10.1088/1757-899X/394/2/022066](https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022066).
- [13] I. M. El-Galy, B. I. Saleh, and M. H. Ahmed, "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view," *SN Applied Sciences*, vol. 1, pp. 1-23, 2019,
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>.
- [14] B. Wu, Y. Qiao, and J. Ren, "Optical properties of Ni²⁺ doped transparent ZnO. Al₂O₃. SiO₂ glass ceramics [J]," *Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 29, pp. 251-253, 2007.
- [15] N. K. Sharma, M. Bhandari, and A. Dean, "Applications of functionally graded materials (FGMs)," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 3, 2014.
- [16] N. Zhang, T. Khan, H. Guo, S. Shi, W. Zhong, and W. Zhang, "Functionally graded materials: an overview of stability, buckling, and free vibration analysis," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, 2019,
<https://doi.org/10.1155/2019/1354150>.
- [17] S. W. Yang, J. Yoon, H. Lee, and D. S. Shim, "Defect of functionally graded material of inconel 718 and STS 316L fabricated by directed energy deposition and its effect on mechanical properties,"

- [36] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, "Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, p. 3316, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
- [37] T. Z. K. Halmesova, K. Martina, "Effect of Laser Power on Thermal Properties of Multimaterial Structure Inconel 718 and Stainless Steel 316L Processed by Directed Energy Deposition," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 927, p. 167082, 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2>.
- [38] H. L. K. Sang Hoon, S. Yeon, "Selective compositional range exclusion via directed energy deposition to produce a defect-free Inconel 718/SS 316L functionally graded material," *Additive Manufacturing*, vol. 47, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167082>.
- [39] C. F. T. S.L. Sing, J.H.K. Tan, S. Huang, Wai Yee Yeong, "3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing," *Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)*, pp. 17-40, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102288>.
- [40] R. A. M. Rivera, "Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications.," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 17-31, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05663-6>.
- [41] Y. Zhang, J. Han, X. Zhang, X. He, Z. Li, and S. Du, "Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 299, no. 1-2, pp. 218-224, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01377-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01377-0).
- [42] C. Wei, Z. Sun, Q. Chen, Z. Liu, and L. Li, "Additive manufacturing of horizontal and 3D functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 081014, 2019, <https://doi.org/10.1115/1.4043983>.
- [43] R. Vassen, H. Kassner, A. Stuke, D. E. Mack, M. O. D. Jarligo, and D. Stöver, "Functionally graded thermal barrier coatings with improved reflectivity and high-temperature capability," in *Materials science forum*, 2010, vol. 631, pp. 73-78: Trans Tech Publ, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.631-632.73>.
- [27] A. Li *et al.*, "Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded material composites using zirconium carbide and tungsten," 2012.
- [28] M. Mousapour, M. Salmi, L. Klemettinen, and J. Partanen, "Feasibility study of producing multi-metal parts by Fused Filament Fabrication (FFF) technique," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 67, pp. 438-446, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.021>.
- [29] L. Bai *et al.*, "Additive manufacturing of customized metallic orthopedic implants: Materials, structures, and surface modifications," *Metals*, vol. 9, no. 9, p. 1004, 2019, <https://doi.org/10.3390/met9091004>.
- [30] X. Zhang, Y.-h. Chueh, C. Wei, Z. Sun, J. Yan, and L. Li, "Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with in situ powder mixing," *Additive Manufacturing*, vol. 33, p. 101113, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101113>.
- [31] T. Traini, C. Mangano, R. Sammons, F. Mangano, A. Macchi, and A. Piattelli, "Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants," *Dental materials*, vol. 24, no. 11, pp. 1525-1533, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.029>.
- [32] W. Yan *et al.*, "Multi-scale modeling of electron beam melting of functionally graded materials," *Acta Materialia*, vol. 115, pp. 403-412, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.022>.
- [33] X. Tan *et al.*, "Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting," *Acta Materialia*, vol. 97, pp. 1-16, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.036>.
- [34] C. Han *et al.*, "Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 80, pp. 119-127, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.013>.
- [35] K. B. Hazlehurst, C. J. Wang, and M. Stanford, "An investigation into the flexural characteristics of functionally graded cobalt chrome femoral stems manufactured using selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 60, pp. 177-183, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.068>.

امکان سنجی استحصال آب از دود بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی

چکیده: امروزه به دلیل کمبود منابع آب بازیافت و استحصال آب مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. از جمله منابع آب، بخار آب موجود در محصولات احتراق است. در این پژوهش به طور نمونه میزان بخار آب موجود در دود خروجی واحد نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان در فصول و شرایط مختلف پیش بینی شد که میزان قابل توجه ۲۲/۶ لیتر بر ثانیه در فصل زمستان است. سپس سیستم های مرسوم جداسازی جریان های گازی، جذب سطحی جامدی و مایعی، خنک کنندگی چگالشی، جداسازی برودتی و فرآیند غشایی جهت امکان سنجی استحصال آب از دود مورد بررسی قرار گرفت و مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار گرفتند. در این حالت پارامترهای کیفیت آب، صرفه جویی مصرف انرژی، هزینه سرمایه گذاری، هزینه بهره برداری و تکامل تکنولوژی به عنوان پارامترهای ارزیابی در نظر گرفته شدند. نتیجه مقایسه نشان دهنده برتری سیستم غشایی از نوع سرامیکی نانو فیلتر متخلخل بود. با فرض میزان ۴۰٪ استحصال آب موجود در جریان دود سیستم غشایی دارای هزینه سرمایه گذاری بسیار پایین تری نسبت به سیستم های دیگر است و بر اساس داده های نیروگاه کاشان استحصال آب ۹/۳۲ لیتر آب بر ثانیه قابل انتظار است.

واژه های راهنما: سیکل ترکیبی، استحصال آب، توربین گاز، دود خروجی نیروگاه، سیستم غشایی

علی اکبر
قبادی فومشی
دانشجوی دکتری

حمیدرضا طباطبایی*
استادیار

یاسر ملایی برزی
استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی،
کاشان

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

Ali Akbar
Ghobadi
PhD Student

Hamidreza
Tabatabaei*
Assistant Professor

Yaser
Mollaei Barzi
Assistant professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Kashan
Branch, Islamic Azad
University, Kashan

Feasibility of extracting water from boiler smoke of combined cycle power plant

Abstract: Nowadays, due to scarcity of water resources, water recycling and extraction have been given more attention. Among sources of water is water vapor in combustion products. In this research, as an example, amount of water vapor in exhaust smoke of Kashan combined cycle power plant unit was predicted in different seasons and conditions, which is a significant amount of 22.6 liters per second in winter season. Then, conventional systems of separation of gas streams, solid and liquid surface absorption, condensation cooling, cryogenic separation and membrane process were investigated for feasibility of extracting water from smoke and were evaluated technically and economically. In this case, water quality parameters, energy saving, investment cost, operation cost and technology evolution were considered as evaluation parameters. Result of comparison showed superiority of ceramic membrane system of porous nano filter. Assuming 40% extraction of water in smoke flow, membrane system has a much lower investment cost than other systems and based on data of Kashan power plant, extraction of 9.32 liters of water per second can be expected.

Keywords: Combined cycle, Water extraction, Gas turbine, Power plant exhaust smoke, Membrane system

۱- مقدمه

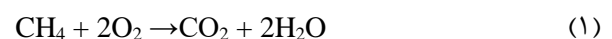
در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این زمینه‌ها برای جریان‌های گازی مختلف برای روش‌های جداسازی متفاوت انجام شده است، که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بلوکو و همکاران در سال ۲۰۱۸ از فرآیند جذب سطحی با کربن فعال برای بازیابی بخار بنزین استفاده کردند. بازدهی فرآیند آنها حدود ۹۹٪ گزارش شد، اما به دلیل محدودیت ظرفیت جذب جاذب، فرآیند نیاز به بازیابی پیوسته جاذب پس از تکمیل ظرفیت جذب آن داشت. طی ۳ هفته کاری، میزان ۴۷۰۰۰ لیتر بنزین از ۵۵۰۰۰ لیتر بنزین تبخیری بازیابی گردید (بازدهی حدود ۸۵٪) [۴]. در سال ۲۰۲۰ در کار تانگ و همکاران از TiO₂ و RGO به عنوان اصلاح کننده فوتوکاتالیست‌های MOF شامل ZIF-8، Uio-66 و Cu-BTC استفاده شد و ظرفیت جذب ترکیب‌های نرمال هگزان، متان، پروپان و متانول بر روی آنها بررسی شد [۵]. در سال ۲۰۱۹ در کار پتروسوا و همکاران از غشای کامپوزیتی پلی آمید بر روی پایه Toray TM710D برای جداسازی بخار نرمال هگزان از نیتروژن با فرآیند اسمز معکوس استفاده شد [۶].

در سال ۲۰۱۸ نیز درستی و همکاران اثر افزودن چارچوب-های آلی فلزی به غشای پباکس مورد آزمایش قرار دادند. آنها غشاهای شبکه آمیخته پباکس/پرکن‌های آهن-بنزن تری کربوکسیلات Fe-BTC را ساخته و آزمایش تراوش پذیری گازهای متان و دی اکسید کربن را بر روی غشاها در فشار ۳bar و دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام دادند [۷]. همچنین فراشی و همکاران غشاهای پلیمری نانوکامپوزیتی را در سال ۲۰۱۹ برای جداسازی گازی ساختند که در آن، درصدهای مختلفی از اکسید آلومینیوم را به پباکس افزوده و تراوش پذیری غشاها را در دمای ۲۵°C و فشارهای مختلف برای گازهای CO₂ و CH₄ اندازه گیری کردند. نتایج به دست آمده عملکرد جداسازی بهتری (تراوش پذیری CO₂ و گزینش گری CO₂/CH₄ را نشان دادند [۸]. در تحقیقی دیگر برناردو و همکاران در سال ۲۰۲۰ غشای کامپوزیتی پباکس/پلی سوربات تهیه کرده و آن را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها توانستند با بارگذاری ۵۰٪ وزنی از پرکن در غشای پلیمری، میزان تراوش پذیری دی اکسید کربن را برای غشای خالص از ۶۶/۵barrer به ۱۴۴barrer برسانند [۹]. دالن و دانگ در سال ۲۰۱۹ آب‌زدایی از گاز با فرآیندهای غشایی (شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند) را به بررسی پرداختند. با معرفی دو واحد ترموپراسیون به صورت سری، در مقایسه با یک طرح با یک واحد ترموپراسیون سرعت جریان TEG ۵۵٪، حجم غشاء ۱۴/۶٪ و تقاضای انرژی ۳۷/۸٪ کاهش یافت. با این

با افزایش سریع جمعیت و صنعتی شدن جوامع بشری، کمبود آب شیرین به یک چالش جهانی تبدیل شده است [۱]. عوامل دیگر از جمله توسعه صنعتی، کشاورزی و اقتصادی و تغییرات سریع آب و هوای جهان نقش مهمی در تشدید چالش کمبود آب در سراسر جهان بازی می‌کنند. لازم به ذکر است که حدود ۹۷ درصد از سطح زمین توسط آب شور به شکل اقیانوس‌ها و دریاها پوشیده شده است [۲]. در آینده نزدیک، حدود ۲-۷ میلیارد نفر در سراسر جهان با چالش کمبود آب شیرین روبرو خواهند شد [۳].

در فرآیندهای صنعتی ضرورت بازیافت و استفاده مجدد از آب به منظور به حداقل رساندن نیاز به آب شیرین بیش از پیش احساس می‌شود. مسائل و مشکلات ناشی از تأمین آب برای کارخانجات صنعتی جدید و فعلی حائز اهمیت هستند، زیرا منابع آب شیرین محدود می‌باشد و طبق آنچه گفته شد با پیش‌بینی بحران کم‌آبی و بیان این موضوع که درصد قابل توجهی از جمعیت جهان در مناطق کم‌آب یا بدون آب زندگی خواهد کرد، قطعاً یکی از چالش‌های بزرگ پیش رو، تهیه آب برای جمعیت رو به رشد و صنعت است [۱]. فعالیت‌های زیادی برای کشف و دستیابی به منابع جدید آب به غیر از موارد موجود در دست انجام است که از جمله می‌توان به فرآیند تولید و آزادسازی بخار آب در محصولات احتراق یک سوخت فسیلی به عنوان قسمتی از بزرگترین منبع آب یعنی بخار آب موجود در اتمسفر اشاره کرد.

با در نظر گرفتن معادله واکنش احتراق یک سوخت فسیلی (برای مثال متان) در یک احتراق ایده ال داریم:



به ازای سوختن یک مول متان دو مول آب تولید می‌گردد و به صورت بخار در اتمسفر رها می‌شود. اگر میزان محصولات احتراق زیاد باشد مانند بویلرهای نیروگاهی یا توربین‌های گازی نیروگاهی میزان آب تولید شده قابل توجه خواهد بود. حال اگر بتوانیم به روشی این آب را از محصولات احتراق استحصال نماییم، منبع آب قابل توجهی جهت مصرف نیروگاه ایجاد خواهد شد. آب استحصال شده می‌تواند جهت مصرف صنعتی و یا با خالص سازی آماده مصرف آشامیدنی گردد. با توجه به تحقیقات گذشته مهمترین روش‌های جداسازی از جریان‌های گازی شامل موارد جداسازی توسط مایعات جاذب، جداسازی با استفاده از جامدات جاذب، استفاده از میعان و سرد کردن گاز، استفاده از غشاها می‌باشد.

استفاده از اتصال دهنده عرضی به منظور جداسازی گاز دی اکسیدکربن و گازهای سبک بررسی کردند. انتخاب پذیری دی اکسیدکربن/متان و دی اکسیدکربن/نیتروژن بعد از اضافه شدن HFBA به عنوان اتصال دهنده عرضی به شبکه پلیمر پلی متیل پنتین (PMP) افزایش یافت ولی انتخاب پذیری دی اکسیدکربن/هیدروژن کاهش پیدا کرد [۱۶].

در سال ۲۰۱۸ عیسی نژاد و همکارانش تهیه غشاهای شبکه آمیخته مبتنی بر پلی اتر بلاک آمید (Pebax) و اثرات بارگذاری پرکن سیلیکا بر روی تراوایی و انتخاب پذیری دی اکسیدکربن/متان را بررسی نمودند. آنها مشاهده کردند که در ۱۵ درصد وزنی پرکن اصلاح شده با آمین تراوایی دی اکسید کربن در غشا با پرکن سیلیکا و همچنین انتخاب پذیری ایده آل به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد افزایش یافت [۱۷]. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی غشاهای بسیار آبریز پایدار برای جذب طولانی مدت CO₂ در تماس دهنده‌های غشایی ساختند. برای ساخت غشاهای نانو ذرات اکسید روی بر سطح خارج الیاف شیشه-ای نشانده شدند. پوشش غشای تولید شده سپس با FAS17 اصلاح شده و سپس پلیمر PVDF-HFP بر روی غشاء پوشش داده شد [۱۸]. پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر غیر حلال‌های مختلف بر ساختار غشاهای PVDF برای جذب CO₂ در تماس دهنده‌های غشایی را بررسی کردند. غیر حلال‌های لیتیوم کلراید و فسفریک اسید و مخلوط آنها با نسبت ۰-۸٪ در محلول پلیمری و اثر آنها بر ساختار غشاها بررسی گردید. با افزایش غلظت غیر حلال در محلول پلیمری ساختاری اسفنجی شکل بدست آمده و غشاهای اندازه حفرات کوچکتری نشان دادند. با افزودن ۸٪ فسفریک اسید به محلول پلیمری بیشترین شار جذب برای غشاهای الیاف توخالی PVDF بدست آمد [۱۹].

رن و همکاران در یک بررسی به تحقیقات تکمیل شده و در حال انجام در مورد جداسازی غشایی آب در گاز دودکش پرداخته‌اند و مزایا و چالش‌های فناوری‌های مبتنی بر غشاء فعلی در بازیابی منابع آب را خلاصه کرده‌اند [۲۰].

آلابید و دینکا جنبه‌های فنی و هزینه‌ای بکارگیری غشاهای پلیمری دو مرحله‌ای در یک نیروگاه زغال سنگ با ظرفیت ۳۳۰ مگاوات را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها فرآیند جذب غشایی CO₂ پس از احتراق را با استفاده از نرم‌افزار CHEMCAD با چندین پارامتر و با یک انبساط دهنده برای کاهش هزینه کل مورد تحقیق قرار گرفت. شبیه‌سازی نتایج امیدوارکننده‌ای را در مورد کاهش مصرف انرژی و هزینه پس از استفاده از یک انبساط دهنده برای نرخ جذب بالا (بیش از ۹۰٪) و غلظت CO₂ بیش از ۹۵٪ نشان داد [۲۱].

حال، افزایش تعداد مراحل احیاء، پیچیدگی را با معرفی هیترهای اضافی افزایش داد [۱۰].

کانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ اصلاح فن آوری‌های موجود گلیکول در آب‌زدایی از گاز برای بهبود خواص و راندمان جذب به بررسی پرداختند. این بررسی به طور خلاصه فرآیندهای مختلف را ارائه کرده و در مورد مکانیسم‌های آنها، نمودار جریان فرآیند، مزایا، اشکال و وضعیت فعلی توضیح داد. آثار مرتبط از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۷ گردآوری شده و شکاف‌های موجود به عنوان توصیه برای کارهای آینده برجسته گردید [۱۱]. شین و همکاران طی پژوهشی یک سری غشاهای زمینه مرکب شامل Pebax-1657 به عنوان زمینه پلیمری، مشتقات پلی اتیلن گلیکول (PEG) با وزن مولکولی پایین به عنوان افزودنی و گرافن اکساید (GO) با درصد‌های مختلف به عنوان نانو پرکننده، برای جداسازی گازهای CO₂/N₂ تهیه کردند. آمیزه پلی (اتیلن گلیکول)-متیل اتیل آکریلات (MEA-PEG) با زمینه Pebax به طور قابل توجهی تراوایی CO₂ را بدون کاهش گزینش پذیری CO₂/N₂ بهبود بخشید. نتایج نشان داد که غشاء آلیاژی Pebax/PEG-MEA شامل ۵۰٪ وزنی PEG-MEA، به دلیل افزایش حجم آزاد افزایش چشمگیری در تراوایی CO₂ از ۸۰ بارر به ۵۷۲ بارر در مقایسه با غشای خالص نشان داد [۱۲].

طی تحقیقی که در سال ۲۰۲۱ توسط کجاباد و همکاران به منظور جداسازی دی اکسیدکربن از نیتروژن با استفاده از غشاهای انتقال تصحیح یافته برای بهبود عملکرد غشاء صورت گرفت؛ به این نتیجه رسیدند که استفاده از آنیلین با نسبت وزنی ۵۰٪ به منظور عامل انتقال دهنده، نفوذپذیری و انتخاب‌گری را به صورت همزمان افزایش داد [۱۳]. در سال ۲۰۱۹، بورخارد و همکارانش که بر روی جداسازی گازهای حاصل از تخمیر کار می‌کردند، فرآیند هیبریدی را مطرح کردند. هدف آنها بررسی اقتصادی و عملکرد واحد بود. در مقایسه، واحد جذب سطحی با تناوب فشار، خلوص بسیار بالایی حاصل کرد در حالی که بازیابی پایینی داشت. فرآیند غشایی هزینه نسبتاً پایین و نیاز به خلوص بالایی داشت (خلوص بسیار بالا را نمی‌تواند تأمین کند) [۱۴].

در سال ۲۰۱۸ مظفری و همکارانش غشاهای دولایه با تراوایی بالای دی اکسیدکربن شامل یک لایه پلی اتر بلاک آمید (Pebax) پوشش داده شده به عنوان یک لایه دوست که با ذرات MOF پر شده‌اند، روی غشای پایه متخلخل از جنس پلی متیل پنتین (PMP)، برای دستیابی به جداسازی موثر دی اکسیدکربن/متان را ساختند [۱۵]. در سال ۲۰۱۸ عابدینی و همکارانش غشاهای شبکه آمیخته را با پلیمر پلی متیل پنتین (PMP)، با افزودن ذرات MOF، CuBTC به شبکه پلیمر با

۲- محاسبه میزان بخار آب دود خروجی دودکش

در این قسمت پارامترهای دود خروجی دودکش نیروگاه با توجه به آنالیز سوخت گاز طبیعی که در این نیروگاه به عنوان سوخت اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد محاسبه شده است. در ادامه میزان بخار آب موجود در دودکش این نیروگاه گازی با سوخت گاز طبیعی مشخص می‌گردد.

با وجود مزایای فراوانی که توربین‌های گازی دارند، تغییرات شرایط محیطی از جمله دما، فشار و رطوبت بر عملکرد آنها تأثیر فراوانی دارند. از آنجایی که آنها ماشین‌های مکنده‌ی هوا هستند کارایی آنها با هر عاملی که روی چگالی هوا یا جریان جرمی آن در ورودی کمپرسور اثر گذار باشد، تغییر می‌کند. پس دبی جرمی هوا با تغییر شرایط محیطی تغییر می‌کند، بنابراین میزان دبی دود تولید شده نیز متغیر خواهد بود.

رطوبت دود از سه منبع می‌آید: رطوبت سوخت، بخار آب حاصل از اکسید شدن هیدروژن سوخت و بخار آب حمل شده به محفظه احتراق از طریق هوای احتراق و هوای اضافی، پس مقدار بخار آب موجود در دود متغیر است.

طبق آنالیز سوخت ارائه شده از طرف آزمایشگاه سوخت، رطوبت موجود در سوخت اعلام نشده است و دلیل آن جزئی بودن مقدار آن است. بر همین اساس رطوبت سوخت در محاسبه میزان بخار آب موجود در دود نقشی ندارد.

بخار آب حاصل از دو منبع دیگر، بستگی به میزان سوخت و هوای مصرفی جهت واکنش احتراق و هوای خنک کاری دارد. لذا با توجه به تغییرات و شرایط آب و هوایی محیطی نسبت به حالت مرجع، دبی کمپرسور و به همان نسبت سوخت مورد نیاز با توجه به نسبت سوخت به هوا تغییر می‌کند که این تغییرات اثر خود را در معادله واکنش شیمیایی حاکم بر فرآیند احتراق سوخت نشان می‌دهد.

در این پروژه شرایط آب و هوایی را به صورت میانگین دماها در هر ماه و میانگین رطوبت نسبی هر ماه برای بازه ۱۰ سال مشخص کرده‌ایم، که این اطلاعات در جدول (۱) و همچنین شکل (۱) آورده شده‌اند.

با توجه به نمودار ارائه شده اختلاف دما در طول یک سال برای ماه‌های مختلف زیاد می‌باشد که جهت نشان دادن تأثیر دما بر میزان بخار آب در دود تولیدی یک توربین گازی دو دمای میانگین فصل سرد و گرم انتخاب شده و بر اساس این اطلاعات و نسبت به شرایط حالت مرجع مقایسه‌ای انجام خواهد شد.

سینق و همکاران بررسی جامعی از پیشرفت و چالش‌های مرتبط با جداسازی غشایی برای جداسازی گاز را انجام دادند. این بررسی به طور دقیق تأثیر پارامترهای جداسازی، از جمله ترکیب خوراک، سرعت جریان، دما و فشار را بر راندمان جداسازی تشریح کرد. این مقاله همچنین به پیشرفت‌ها و پیشرفت‌های اخیر در عملکرد جداسازی O_2 و N_2 مبتنی بر غشاء اشاره دارد و پیشرفت‌ها در این زمینه را نشان داد [۲۲].

کامیو و همکاران پیشرفت‌های اخیر در مواد آلی و معدنی برای غشاهای جداسازی CO_2 با کارایی بالا را از دیدگاه طراحی مولکولی تا دیدگاه مهندسی بررسی کردند. مکانیسم‌های جداسازی CO_2 و اثرات خواص مواد غشایی بر روی نفوذپذیری CO_2 نسبت به سایر گازهای سبک مورد بحث قرار دادند و پیشرفت‌های اخیر در مورد غشاهای پلیمری معدنی و شیشه‌ای با ساختارهای ریز متخلخل ذاتی، غشاهای پلیمری لاستیکی و غشاهای ژلی مبتنی بر مایع یونی را بررسی کردند. در نهایت، چالش‌ها و دیدگاه‌های تحقیقاتی آینده برای تجاری‌سازی فرآیند جذب و جداسازی CO_2 با استفاده از مواد با کارایی بالا را پیشنهاد دادند [۲۳].

کونسیسانو و همکاران بررسی جامعی از مدل‌سازی ماژول‌های جداسازی گاز غشایی و شبیه‌سازهای فرآیند جداسازی گاز غشایی را بررسی کردند. آنها لیستی از مدل‌سازی غشاء-ماژول برای مدل‌سازی و توسعه غشاهای جدید جداسازی گاز پیشنهاد دادند [۲۴].

با توجه به مقالات اگر چه تأکید زیادی بر حذف یا کاهش انتشار CO_2 از کارخانجاتی که سوخت فسیلی مصرف می‌نمایند، صورت گرفته اما توجه کمی به گرفتن بخارات آب در طول احتراق شده است.

هدف اصلی در این مقاله استحصال آب از دود خروجی دودکش نیروگاه کاشان با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی کویری منطقه می‌باشد. در این مطالعه تکنولوژی‌های جداسازی گاز که جهت بازیافت آب مناسب هستند، با توجه به مطالعات و بررسی‌ها شناسایی می‌شوند. سپس روش‌های مناسب جهت بازیافت آب از لحاظ فنی و اقتصادی مورد مطالعه قرار می‌گیرند و با توجه به معیارهای فنی و اقتصادی بهترین روش انتخاب می‌گردد.

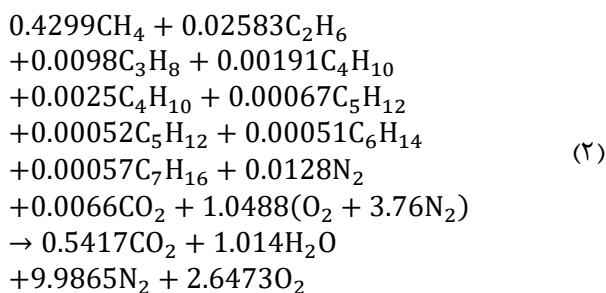
در این مقاله پارامترهای کیفیت آب، صرفه جویی مصرف انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و تکامل تکنولوژی به عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری برای اولویت بندی روش جداسازی بخار آب بکار گرفته شده است.

شرایط محیطی برای این حالت از حالت ایزو در جدول (۲) تعریف می‌گردد. بر اساس مدارک موجود اطلاعات فنی واحد در جدول (۳) آورده شده است [۲۵].

جدول ۳ اطلاعات فنی در شرایط محیطی مختلف

شرایط محیطی	ایزو	تابستان	زمستان
دبی هوای کمپرسور (kg/s)	۵۱۰	۳۷۱/۸۰	۴۱۹/۴۵
دبی سوخت (kg/s)	۹/۲	۷/۱۸	۸/۶۲
دبی هوای نظری (kg/s)	۱۴۴/۶۸	۱۱۲/۹۹	۱۳۵/۶۰
درصد هوای اضافی (%)	۲۵۲/۴۲	۲۲۸/۹۷	۲۰۹/۴۰

حال اگر معادله واکنش شیمیایی حاکم بر فرآیند را با مدنظر قرار دادن سوخت مورد نیاز (شرایط ایزو و در بار بیس) و با فرض عدم تجزیه N₂ بنویسیم نتیجه به صورت جدول (۴) خواهد شد.



جدول ۴ ترکیبات دود خروجی در شرایط ایزو

درصد مولی	درصد جرمی	کیلوگرم	کیلومول	جزء
۳/۸۲	۵/۸۶	۲۳/۸۳	۰/۵۴۲	CO ₂
۷/۱۵	۴/۴۹	۱۸/۲۵	۱/۰۱۴	H ₂ O
۷۰/۳۳	۶۸/۸۰	۲۷۹/۶۲	۹/۹۸۷	N ₂
۱۸/۶۶	۲۰/۸۴	۸۴/۷۱	۲/۶۴۷	O ₂

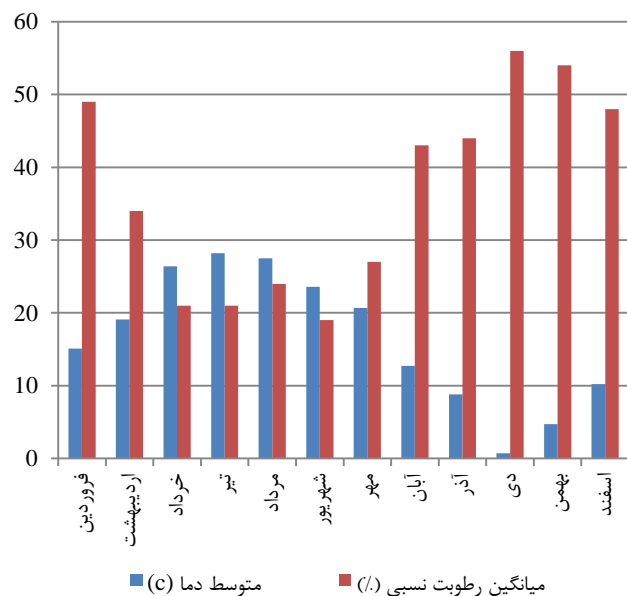
۲-۲- شرایط محیطی فصل تابستان

شرایط محیطی برای این حالت از حالت تابستان در جدول (۲) تعریف می‌گردد. بر اساس تست‌های عملکردی انجام شده اطلاعات و داده‌های عملکردی برای شرایط محیطی در جدول (۳) آورده شده است.

حال اگر معادله واکنش شیمیایی حاکم بر فرآیند را با مدنظر قرار دادن سوخت مورد نیاز (شرایط محیطی تابستان و در بار بیس) و با فرض عدم تجزیه N₂ بنویسیم نتیجه به صورت جدول (۵) خواهد شد.

جدول ۱ شرایط آب و هوایی کاشان

ماه	میانگین دما (°C)	میانگین رطوبت نسبی (%)
فروردین	۱۵/۱	۴۹
اردیبهشت	۱۹/۱	۳۴
خرداد	۲۶/۴	۲۱
تیر	۲۸/۲	۲۱
مرداد	۲۷/۵	۲۴
شهریور	۲۳/۶	۱۹
مهر	۲۰/۷	۲۷
آبان	۱۲/۷	۴۳
آذر	۸/۸	۴۴
دی	۰/۷	۵۶
بهمن	۴/۷	۵۴
اسفند	۱۰/۲	۴۸



شکل ۱ میانگین دما و رطوبت نسبی ماه‌های مختلف سال در شهر کاشان

جدول ۲ شرایط محیطی مختلف

شرایط محیطی	دما (°C)	فشار (mbar)	رطوبت نسبی (%)
ایزو	۱۵	۱۰۱۳/۲۵	۶۰
تابستان	۳۲/۵	۸۲۲/۸۵	۶/۲۶
زمستان	۷/۹۸	۸۲۹/۱۴	۳۳/۱

۱-۲- شرایط ایزو

جدول ۷ درصد وزنی بخار آب در شرایط انتخابی مختلف

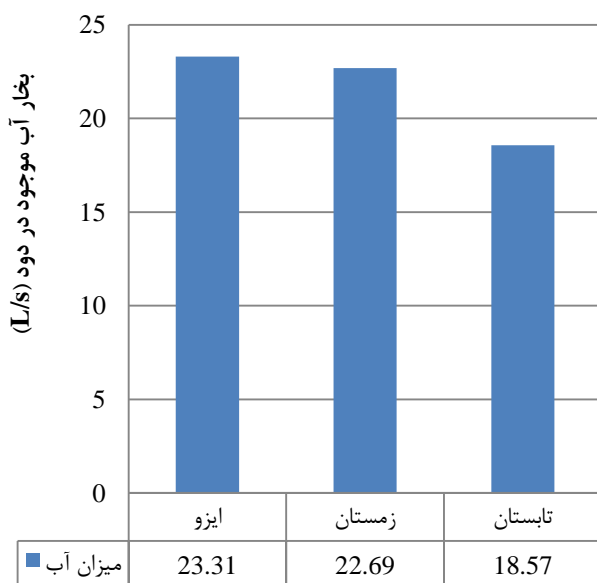
شرایط انتخابی	درصد وزنی
ایزو	۴/۴۹
محیطی تابستان	۴/۹
محیطی زمستان	۵/۳

مقدار دبی دود خروجی از دودکش برابر با مجموع دبی هوای ورودی کمپرسور و دبی سوخت تعریف می‌گردد. با استفاده از درصدهای وزنی جداول فوق و همچنین محاسبه دبی جرمی دود خروجی توربین از رابطه بالا میزان بخار آب موجود در دود در هر یک از سه موقعیت شرایط ایزو، تابستان و زمستان مطابق جدول زیر بدست می‌آید.

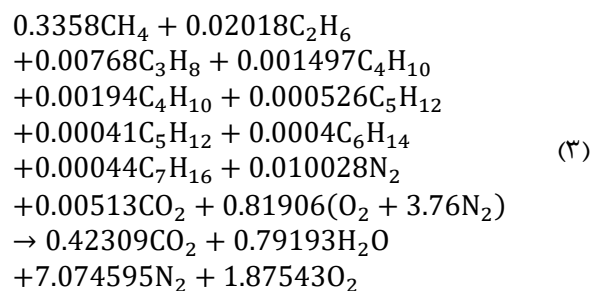
جدول ۸ میزان بخار آب موجود در دود

شرایط محیطی	دبی جرمی اگزاست توربین (kg/s)	میزان بخار آب (kg/s)
شرایط ایزو	۵۱۹/۲	۲۳/۳۱
شرایط محیطی تابستان	۳۷۸/۹۸	۱۸/۵۷
شرایط محیطی زمستان	۴۲۸/۰۷	۲۲/۶۹

با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول فوق نمودار میزان بخار آب موجود در دود مطابق شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲ میزان بخار آب موجود در دود



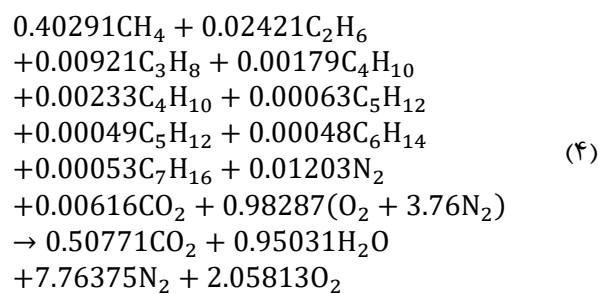
جدول ۵ ترکیبات دود خروجی در شرایط محیطی تابستان

درصد مولی	درصد جرمی	کیلوگرم	کیلومول	جزء
۴/۱۶	۶/۴	۱۸/۶۲	۰/۴۲	CO ₂
۷/۷۹	۴/۹	۱۴/۲۶	۰/۷۹	H ₂ O
۶۹/۶	۶۸/۱	۱۹۸/۰۹	۷/۰۸	N ₂
۱۸/۴۵	۲۰/۶	۶۰/۰۱	۱/۸۸	O ₂

۳-۲- شرایط محیطی فصل زمستان

شرایط محیطی برای این حالت از حالت زمستان در جدول (۲) تعریف می‌گردد. براساس تست‌های عملکردی انجام شده اطلاعات و داده‌های عملکردی برای شرایط محیطی در جدول (۳) آورده شده است.

حال اگر معادله واکنش شیمیایی حاکم بر فرآیند را با مد نظر قرار دادن سوخت مورد نیاز (شرایط محیطی زمستان و در بار بیس) و با فرض عدم تجزیه N₂ بنویسیم نتیجه به صورت جدول (۶) خواهد شد.



جدول ۶ ترکیبات دود خروجی در شرایط محیطی زمستان

درصد مولی	درصد جرمی	کیلوگرم	کیلومول	جزء
۴/۵	۶/۹۲	۲۲/۳۴	۰/۵۰۸	CO ₂
۸/۴۲	۵/۳	۱۷/۱۱	۰/۹۵	H ₂ O
۶۸/۸۳	۶۷/۳۷	۲۱۷/۳۶	۷/۷۶۴	N ₂
۱۸/۲۴	۲۰/۴۱	۶۵/۸۶	۲/۰۵۸	O ₂

موجود در نیروگاه را نیز تأمین نمود که قطعاً در صورت افزایش درصد میزان استحصال نیاز به مصرف آب از سایر منابع به صفر خواهد رسید.

۳- تکنولوژی‌های استحصال آب از دوده

روش‌های مختلفی جهت استحصال آب از گازها معرفی و مورد تحقیق قرار گرفته است که بسته به نوع آنها به چهار دسته اصلی زیر تقسیم بندی می‌شوند:

- ۱- جذب سطحی جامدی و مایعی
- ۲- خنک‌کنندگی چگالشی
- ۳- جداسازی پرودتی
- ۴- فرآیند غشایی

مقایسه تکنولوژی‌های مورد بحث در جدول (۹) داده شده است و نشان دهنده کاربرد احتمالی، احتمال بکارگیری در مقیاس بزرگ، خلوص آب، ایمنی و خطرات زیست محیطی و نتیجه‌گیری نیاز به مطالعات بیشتر می‌باشد. با استفاده از اطلاعات جدول مذکور سه روش جذب سطحی مایعی، خنک‌سازی چگالشی و تکنولوژی غشایی (نوع جداسازی گازی و تراوش تبخیری) در بررسی و مقایسه اولیه مناسب تشخیص داده می‌شوند و به عنوان روش‌های استحصال آب از دود معرفی و در بخش‌های بعدی مورد تحقیق و بررسی بیشتر قرار خواهند گرفت.

۴- تحلیل فنی تکنولوژی‌های استحصال آب از دود

با توجه به اطلاعات جدول (۹) بخش قبل سه تکنولوژی جذب مایع سطحی، خنک‌سازی چگالشی و تکنولوژی غشایی به منظور حذف آب از دود نیروگاه مورد بررسی بیشتر قرار خواهند گرفت. در این مرحله سعی می‌شود موارد مهم و اساسی که در امکان‌سنجی نقش دارند مورد بررسی قرار گیرند، در نتیجه به منظور بررسی و مقایسه فنی بین تکنولوژی‌های بازیافت آب بایستی مراحل زیر را طی کرد:

- رشد و تکامل تکنولوژی
- کارایی و بازده
- موارد مربوط به بهره‌برداری و مسائل ایمنی و زیست‌محیطی
- محاسبه میزان انرژی مصرفی هر یک از سیستم‌های استحصال آب از دود
- موارد متفرقه
- با توجه به اثر شرایط محلی (شرایط آب و هوایی مرطوب یا خشک) تنها رتبه بندی کیفی مطابق جدول (۱۰) می‌تواند انجام شود.

جدول ۹ مقایسه اولیه تکنولوژی‌های مطرح شده جهت بازیافت آب از دود یک نیروگاه سوخت فسیلی

تکنولوژی غشایی	چگالشی	خنک‌سازی	جداسازی پرودتی	جذب سطحی جامد	جذب سطحی مایع
بله	بله	بله	نه	نه	بله
بله	بله	بله	بله	بله	بله
معلوم نیست	مناسب جهت آب جبرانی برج خنک‌کن نه برای تغذیه آب	معلوم نیست	مناسب جهت تغذیه آب بویلر	مناسب جهت تغذیه آب بویلر	خلوص آب
بله	نه	بله	احتمالاً نه، نیاز به بررسی بیشتر	احتمالاً نه، نیاز به بررسی بیشتر	ایمنی و دارا بودن جنبه‌های زیست محیطی
بله	بله	بله	نه	نه	مطالعه بیشتر

بر اساس اطلاعات جدول (۸) و همچنین شکل (۲) در بدترین حالت دمایی نیروگاه کاشان میزان بخار آب موجود در دود یک واحد گازی نیروگاه کاشان حدود $18/5 \text{ L/s}$ است و در مجموع ۲ واحد گازی 37 L/s می‌شود که براساس میزان تقریبی 3 L/s روزانه آب مصرفی واحدهای نیروگاه و با در نظر گرفتن 1 L/s جهت تعمیرات و شارژ مجدد سیستم‌ها انتظار می‌رود با تکنولوژی مذکور و استحصال میزان ۲۰ درصد از این بخارات علاوه بر تأمین آب مصرفی مورد نیاز واحدهای صنعتی نیروگاه، بتوان قسمتی از آب مورد نیاز بخش‌های عمومی و فضای سبز

جدول ۱۰ معیارهای کیفیتی استحصال آب از دود

غشایی	خنک‌کنندگی چگالش	مایع آب‌زدا
۱	۳	۲
۲	۱	۳
۳	۲	۱

است. این تکنولوژی با کمترین درجه رشد در نظر گرفته می‌شود. باید برنامه‌ریزی کاملی در آینده‌ای نزدیک صورت پذیرد.

آب‌زدایی از دود از طریق گازشویی با محلول نمک آبدار غلیظ با فعالیت پایین آب (مانند LiBr، LiCl، LiNO₃، CaCl₂) یا گلیکول (مانند MEG، DEG، TEG) در نیروگاه‌هایی در مقیاس آزمایشی تست و مورد آزمایش قرار گرفته است اما به لحاظ تجاری استفاده نمی‌شود. از این تکنولوژی در مقیاس وسیع برای آب‌گیری از هوا (سیستم‌های تهویه هوا) و بهینه‌سازی گاز طبیعی استفاده می‌شود. از مضرات سیستم‌های مبتنی بر گلیکول می‌توان به اتلافات جوی توسط دود اشاره کرد در حالی که سیستم‌های مبتنی بر محلول نمک به شدت خورنده و فرسایشی هستند. مزیت آنها تولید آب نسبتاً خالص است اما تقاضای انرژی برای مراحل پیش گرم‌کننده و خنک‌کننده بالا است.

خنک‌سازی دود زیر نقطه شبنم آب در تکنولوژی مبدل چگالشی و با هدف بازیافت آب از لحاظ تجاری عملی نیست. همه اقدامات انجام شده در این زمینه بر افزایش بازدهی و کارایی نیروگاه متمرکز هستند. نقطه ضعف عمده و اصلی این تکنولوژی چگالش اسیدها (اسید سولفوریک، اسید نیتریک، اسید هیدروکلریک، اسید هیدروفلوریک) موجود در دود است. از این رو، لازم است مبدل‌های حرارتی مورد استفاده عایق کاری شوند و یا کاملاً از پلاستیک (مانند G-FLON فلوروپلاستیک) و یا از آلیاژهای مقاوم به خوردگی مثل تیتانیوم تولید شده باشند، البته ساخت آنها گران است. آبی که تولید می‌شود آلوده خواهد شد و به تصفیه بیشتری نیاز دارد.

۵- تحلیل اقتصادی و برآورد هزینه تکنولوژی‌های استحصال آب از دود

یکی از روش‌های متداول تحلیل اقتصادی و مقایسه پروژه‌های سرمایه‌گذاری، محاسبه معادل ارزش کنونی هر پروژه است که در مطالعه حاضر با استفاده از این روش تحلیل اقتصادی انجام خواهد شد.

هزینه‌های اولیه به صورت سالیانه:

برای به دست آوردن هزینه‌هایی که هر چند مدت یکبار پرداخت می‌شود، با ارزش فعلی پول از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۶]:

$$C_{\text{acap}} = C_{\text{cap}} \cdot \text{CRF}(i, R_{\text{proj}}) \quad (5)$$

در رابطه بالا C_{acap} ، C_{cap} و R_{proj} به ترتیب برابر با هزینه اولیه سالیانه، هزینه‌های اولیه و تعداد سال‌های عمر سیستم هستند.

کیفیت آب: تصور شده است که در تکنولوژی فرآیند غشایی کیفیت آب به دست آمده در حد قابل قبول و برابر با کیفیت آب تغذیه بویلر و بدون نیاز به تصفیه بیشتر باشد. کیفیت آب یک مایع آب‌زدا همچنین می‌تواند یک کیفیت بسیار خوبی باشد، بستگی به عملکرد قطره‌گیر در ستون جدا کننده دارد.

آب حاصل از روش خنک‌سازی چگالشی دود خصوصاً احتراق زغال سنگ با اسیدهایی از قبیل HCl - HNO₃ - HF - H₂SO₄ آلوده خواهد شد (وابسته به نوع کاربرد آب استحصالی از این روش، تصفیه بیشتر ضروری خواهد بود).

مصرف انرژی: هدف اصلی از فرآیند خنک‌سازی چگالشی بازیافت انرژی از دود است. بسته به نوع و طرح مبدل‌های حرارتی و ویژگی‌های نیروگاه، بازده الکتریکی خالص می‌تواند به میزان ۰/۴ تا ۱/۸ درصد نقطه‌ای با توجه به میزان گزارش شده در پیشینه بهبود یابد. در صورتی که تکنولوژی مایع جذب کننده نیازمند انرژی ورودی است. عمده انرژی مورد نیاز برای فرآیندهای مایع آب‌زدا گرمای ورودی مورد نیاز گرم کن‌ها برای جدا کردن مایع غنی شده است. برای این هدف بایستی از بخار توربین استفاده شود، لذا بخار از توربین بیرون کشیده می‌شود. در مورد تکنولوژی غشایی ورودی عمده انرژی، برق مورد نیاز پمپ‌های خلأ است. بسته به نوع و طرح مبدل حرارتی و خصوصیات نیروگاه بازده الکتریکی خالص می‌تواند به میزان ۰/۱ تا ۱/۱ درصد نقطه‌ای کاهش یابد.

رشد و تکامل تکنولوژی: تکنولوژی مایع آب‌زدا (اسکرابرها) تکنولوژی پیشرفته‌ای است و در تصفیه دود برای گوگردزدایی (جذب دی اکسید گوگرد در یک سیستم تعلیق، آهک یا سنگ آهک) در مقیاس بزرگ استفاده شده است. جذب بخار آب از جریان دود به هر حال یک کاربرد جدید اما امکان پذیر است، هرچند مشکلات نه چندان بزرگی انتظار می‌رود. انتخاب مواد ساخت و ساز برای جلوگیری از مشکلات خوردگی نیاز به توجه ویژه دارد. تکنولوژی غشایی برای بازیافت آب از احتراق زغال سنگ و یا دود مصنوعی و فقط در مقیاس کوچک آزمایش شده

$$S = C_{rep} \cdot \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (11)$$

که در آن R_{rem} برابر با باقیمانده عمر هر کدام از قطعات سیستم در پایان عمر سیستم می باشد که از رابطه (۴۰) محاسبه می شود:

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad (12)$$

$SFF(i, N)$ در رابطه (۸) فاکتور استهلاکی است که مقدار ارزش آینده هر کدام از قطعات سیستم را با توجه به نرخ بهره (i) در مدت N دوره به پرداخت های مساوی توزیع می کند و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$SFF(i, N) = \frac{i}{(1+i)^N - 1} \quad (13)$$

C_{rep} , $SFF(i, R_{comp})$ در رابطه (۸) ارزش آینده هزینه تعویض هر کدام از قطعات سیستم را با توجه به نرخ بهره (i) در مدت زمان عمر هر کدام از آنها (R_{comp}) به پرداخت مساوی توزیع می کند. همچنین $S.SFF(i, R_{proj})$ نیز ارزش آینده بازیافتی (S) هر قطعه از سیستم را با توجه به نرخ بهره (i) در مدت زمان سیستم (R_{proj}) به پرداخت های مساوی توزیع می کند.

هزینه های بهره برداری و نگهداری:

این هزینه ها برابر با هزینه های تعمیر و نگهداری قطعات سیستم می باشند. به عنوان مثال شامل هزینه های تعمیرات، مواد مصرفی، سوخت، برق مصرفی، هزینه های دستمزد و اپراتوری و ... به صورت سالانه هستند.

پس از بدست آوردن هزینه های مذکور، دو پارامتر نهایی روش تحلیل اقتصادی به شرح زیر می باشند:

کل ارزش فعلی خالص دلار:

برای بدست آوردن کل ارزش فعلی خالص یک سیستم در مدت زمان طول عمر آن ابتدا باید مجموع کل هزینه های سالیانه قطعات سیستم را از رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$TAC = TAICC + TARC + TO\&M \quad (14)$$

که در آن TAC، TAICC، TARC و TO&M به ترتیب برابر با مجموع کل هزینه های سالیانه، مجموع کل هزینه های اولیه به صورت سالیانه، مجموع کل هزینه های تعویض سالیانه و مجموع کل هزینه های تعمیرات و نگهداری مربوط به قطعات سیستم در طول یک سال می باشند. پس از بدست آوردن مجموع کل هزینه های سالیانه می توان کل ارزش فعلی خالص سیستم مورد نظر را با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه کرد:

i: نرخ بهره واقعی است که از رابطه زیر بدست می آید.

$$i = \frac{f_f - i'}{f_f + 1} \quad (6)$$

i' و f_f به ترتیب برابر با نرخ بهره اسمی و نرخ تورم هستند. CRF فاکتور بازگشت سرمایه است و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{i(1+i)^{R_{proj}}}{(1+i)^{R_{proj}} - 1} \quad (7)$$

در رابطه بالا R_{proj} تعداد سال های عمر سیستم می باشد.

هزینه های تعویض به صورت سالیانه:

هزینه های تعویض سالیانه برابر با هزینه های تعویض هر کدام از قطعات سیستم در طول مدت عمر سیستم، منهای ارزش هر کدام از آنها در پایان عمر آنها است. با استفاده از رابطه زیر می توان هزینه های تعویض سالیانه هر کدام از قطعات سیستم را بدست آورد.

$$C_{arep} = C_{rep} \cdot f_{rep} \cdot SFF(i, R_{comp}) - S.SFF(i, R_{proj}) \quad (8)$$

در رابطه فوق C_{arep} ، C_{rep} ، R_{proj} و R_{comp} به ترتیب برابر با هزینه های تعویض سالیانه، هزینه های تعویض، تعداد سال های عمر یک سیستم و تعداد سال های عمر هر کدام از قطعات مورد نظر هستند.

از آنجا که امکان دارد تعداد سال های عمر یک سیستم با تعداد سال های عمر هر کدام از قطعات سیستم متفاوت باشد، از ضریب f_{rep} به عنوان نسبت ضریب بازگشت سرمایه در طول عمر سیستم به ضریب بازگشت سرمایه در دوره هزینه های تعویض هر کدام از قطعات سیستم در کل مدت زمان عمر سیستم استفاده می شود و از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_{rep} = \begin{cases} \frac{CRF(i, R_{proj})}{CRF(i, R_{rep})} & \text{if } R_{rep} > 0 \\ 0 & \text{if } R_{rep} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه بالا R_{rep} برابر با دوره هزینه های تعویض می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R_{rep} = R_{comp} \text{INT} \left(\frac{R_{proj}}{R_{comp}} \right) \quad (10)$$

S در رابطه (۳۶) برابر است با ارزش بازیافتی هر قطعه از سیستم در پایان عمر آن که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

با مراجعه به آمار بانک مرکزی ایران مقدار دو آیتیم f_f و i به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} f_f &= 31\% \\ i' &= 24\% \end{aligned} \quad (18)$$

با استفاده از معادلات (۶) و (۷) به ترتیب داریم:

$$i = \frac{(31\% - 24\%)}{(31\% + 1)} = 0.0534 = 5.34\% \quad (19)$$

$$\text{CRF}(5.34\%, 20) = \frac{5.34\%(1 + 5.34\%)^{20}}{(1 + 5.34\%)^{20} - 1} = 0.08257 \quad (20)$$

هزینه اولیه سالیانه طبق رابطه (۵) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} C_{\text{acap}} &= 16600000 \times 0.08257 \\ &= 1370662 \text{ \$/ year} \end{aligned} \quad (21)$$

با الگو گرفتن از هزینه تعمیرات و نگهداری واحدهای نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان هزینه سالیانه تعمیرات و نگهداری سیستم مذکور را ۴٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم فرض می‌کنیم. لذا با پیش فرض مذکور این هزینه محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} C_{\text{O\&M}} &= 16600000\$ \times 4\% \\ &= 664000\$/\text{year} \end{aligned} \quad (22)$$

هزینه برق مصرفی سیستم مذکور معادل ۷۰۱ کیلو وات می‌باشد. بنابراین هزینه برق مصرفی سالیانه به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} C_{\text{ellec}} &= 701\text{kW} \times 24 \times 365 \times \frac{0.01\$}{\text{kWh}} \\ &= 61407.6\$/\text{year} \end{aligned} \quad (23)$$

با مراجعه به گزارش فوکداهل میزان مصرف خشک‌کن $13/6\text{kg/h}$ ذکر شده است، لذا با در نظر گرفتن مقدار هدر رفت خشک‌کن در طول چرخه احیاء، تعمیرات و همچنین پایان عمر، میزان شارژ 30kg خشک‌کن بصورت سالیانه در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{100\text{gr}}{30\text{kg}} \frac{10.31\$}{X} &\Rightarrow \\ X = C_{\text{mat}} &= 3093 \frac{\$}{\text{year}} \end{aligned} \quad (24)$$

حال مجموع کل هزینه‌های سالیانه با بکار بردن معادله (۱۴) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{TAC} &= 1370662 + 664000 + 61407.6 \\ &+ 3093 = 2099162.6\$/\text{year} \end{aligned} \quad (25)$$

$$C_{\text{NPC}} = \frac{\text{TAC}}{\text{CRF}(i, R_{\text{proj}})} \quad (15)$$

که فاکتور $\text{CRF}(i, R_{\text{proj}})$ همانطور که در قبلاً بیان شد فاکتور بازگشت سرمایه است و در اینجا برای بدست آوردن ارزش فعلی استفاده شده است.

۶- بررسی اقتصادی تحقیق حاضر

در این قسمت به تحلیل اقتصادی و مقایسه بین سیستم‌های استحصال می‌پردازیم. ابتدا نیاز به محاسبه درآمدها و هزینه‌های اعمال شده، پس از نصب سیستم است. از این رو در ادامه به محاسبه این درآمدها و هزینه‌ها با توجه به قیمت‌های آب، برق و گاز می‌پردازیم:

بهای برق به ازای هر کیلو وات ساعت $0/01$ دلار در نظر گرفته می‌شود [۳۷]. بهای هر متر مکعب آب تصفیه شده $1/31$ دلار می‌باشد [۲۷]. قیمت 100 گرم کلرید کلسیم $10/31$ دلار منظور شده است [۳۸]. بهای گاز به ازای هر متر مکعب $0/15$ دلار در نظر گرفته شده است [۳۹].

۶-۱- ارزیابی اقتصادی خشک‌کن

هزینه‌های سرمایه‌گذاری: توسط فول کداهل و همکاران در سال 2006 میلادی هزینه اجرا مقدار 5800000 دلار برآورد شده است [۲۸]. جهت به‌روز رسانی نرخ مذکور به سال جاری با استفاده از اطلاعات نرخ بهره و تورم کشور آمریکا [۴۰] و [۴۱] و معادله ارائه شده نتیجه به شرح زیر می‌باشد:

$$F = \frac{(E \times (1 + i)^n)}{(1 + f_f)^n} \quad (16)$$

که در آن F ، E ، i ، f_f و n به ترتیب برابر با ارزش جاری پول، ارزش قبلی پول، نرخ بهره، نرخ تورم و تعداد سال مورد محاسبه می‌باشند.

میانگین: $i = 6\%$

میانگین: $f_f = 2\%$

تعداد سال (از 2007 تا 2024): $n = 18$

$$\begin{aligned} F &= \frac{5800000 \times (1 + 6\%)^{18}}{(1 + 2\%)^8} \\ &= 16555167 \approx 16600000\$ \end{aligned} \quad (17)$$

پس مقدار هزینه اولیه 16600000 دلار در نظر گرفته می‌شود.

هزینه مواد کمکی: هزینه سالیانه مواد کمکی همان هزینه تصفیه آب استحصال شده از مبدل چگالشی با توجه به گزارش لوی می‌باشد [۳۰]. بنابراین هزینه تصفیه و تولید آب خیلی خالص (دمین) به وسیله اسمز معکوس (RO) و یا تکنولوژی تبادل یونی (IX) با تخمین هزینه تولید هر مترمکعب حدود ۲/۴ دلار و گزارش لوی که بازده استحصال آب ۷۰ درصد بیان شده است حاصل می‌شود. حال چنانچه جهت مقایسه قیمت همان میزان پیش فرض ۴۰٪ استحصال آب موجود در جریان دود را اعمال نماییم، طبق اطلاعات بدست آمده در حالت قبل میزان سالیانه آب تولید شده ۱۸۹۲۱۶ مترمکعب در سال می‌باشد، بنابراین هزینه به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{mat} = 189216 \times \frac{2.4\$}{m^3} = 454118.4\$/year \quad (34)$$

حال مجموع کل هزینه‌های سالیانه با بکار بردن معادله (۱۴) به شرح زیر می‌باشد:

$$TAC = 2311960 + 840000 + 454118.4 = 3606078.4\$/year \quad (35)$$

به این ترتیب کل ارزش فعلی خالص سیستم مورد نظر از رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$C_{NPC} = \frac{3606078.4}{0.08257} = 43672985.3\$ \quad (36)$$

۳-۶- ارزیابی اقتصادی تکنولوژی غشایی

طول عمر سیستم ۲۰ سال است ولی طول عمر ماژول غشایی ۷ سال در نظر گرفته می‌شود. طول عمر ماژول غشایی بین ۵ تا ۱۰ سال منطقی است [۳۱]. با توجه به اینکه قیمت ماژول غشایی بر واحد متر مربع مساحت سطح غشاء است، ابتدا باید مساحت سطح پروژه مورد نظر محاسبه گردد. با توجه به ابعاد داکت دود یعنی فضای انتهایی HRSG (فاصله ما بین CPH و دودکش بخار) مساحت سطح مقطع دود $106m^2$ بدست می‌آید. با توجه به اطلاعات فنی ماژول و با استناد به [۳۲] قیمت هر ماژول غشایی $230\$/m^2$ مربوط به سال ۲۰۱۳ و همچنین قیمت ماژول‌ها در یک سیستم غشایی تقریباً ۳۲ درصد قیمت کل سیستم می‌باشد، پس قیمت ماژول‌های پروژه مذکور و همچنین سیستم غشایی با در نظر گرفتن هزینه نصب تخمین زده می‌شود. در نتیجه هزینه اولیه سیستم مذکور به شرح زیر می‌باشد:

$$317187.5\$ \quad (37)$$

پس کل ارزش خالص بر طبق معادله (۱۵) بدست می‌آید:

$$C_{NPC} = \frac{2099162.6}{0.08257} = 25422824.3\$ \quad (26)$$

۲-۶- ارزیابی اقتصادی مبدل چگالشی

تنها سابقه یافت شده مربوط به یک مبدل حرارتی فلوروپلاستیک ۳۰ مگاواتی جایگزین پیش گرم کن هوای بخار می‌باشد. هزینه این پروژه برابر با ۴۷۰۰۰۰۰ یورو (در سال ۲۰۰۴) می‌باشد [۲۹]. جهت به‌روزرسانی هزینه مذکور به سال جاری مانند قبل باید عمل نمود.

$$i = 5.6\% \quad (27)$$

$$f_f = 2.16\% \quad (28)$$

$$n = 20 \quad (29)$$

$$F = \frac{4700000 * (1 + 5.6\%)^{20}}{(1 + 2.16\%)^{20}} = 9115000€ \quad (30)$$

هزینه اصلاح شده به‌صورت مشابه در خصوص یورو و براساس سطح قیمت سال ۲۰۲۴ باید به ۹۱۱۵۰۰۰ یورو تبدیل شود. به هر حال این پروژه خاص است و ابعاد کار مربوط به یک طرح ۳۰ مگاواتی می‌باشد. در نتیجه جهت تبدیل و هم خوان نمودن آن با پروژه مذکور به صورت برآوردی هزینه مذکور را ۲/۵ برابر می‌نماییم و سپس مقدار نهایی را به عنوان هزینه اولیه محاسبات در نظر می‌گیریم. با نرخ تبدیل یورو به دلار داریم:

$$C_{cap} = 9115000 \times 2.5 \times 1.218 = 27755175 \cong 28000000\$ \quad (31)$$

هزینه اولیه سالیانه طبق رابطه (۵) به شرح زیر است:

$$C_{acap} = 28000000 \times 0.08257 = 2311960\$/year \quad (32)$$

هزینه سالیانه تعمیرات و نگهداری با مراجعه به سابقه انجام شده [۲۹]، ۳٪ هزینه سرمایه گذاری اولیه فرض می‌گردد:

$$C_{O\&M} = 28000000\$ \times 3\% = 840000\$/year \quad (33)$$

هزینه‌های انرژی: انرژی مصرف نمی‌شود.

$$CRF(5.34,21) = \frac{5.34\%(1 + 5.34\%)^{21}}{(1 + 5.34\%)^{21} - 1} \quad (50)$$

$$= 0.08035$$

$$f_{rep} = \frac{0.08257}{0.08035} = 1.0276 \quad (51)$$

$$C_{arep} = 230000 \times 1.0276 \times 0.12 - 197142.86 \times 0.02917 \quad (52)$$

$$= 22611.1\$/\text{year}$$

حال مجموع کل هزینه‌های سالیانه با بکار بردن معادله (۱۴) به شرح زیر است:

$$TAC = 37472.7 + 13251.6 + 1752 + 22611.1 = 75087.4\$ \quad (53)$$

پس کل ارزش خالص بر طبق معادله (۴۳) بدست می‌آید:

$$C_{NPC} = \frac{75087.4\$}{0.08257} = 909378.7\$ \quad (54)$$

در گزارش فولکداهل استحصال آب بین ۲۲ تا ۶۲ درصد اشاره شده، در گزارش لوی استحصال آب تا ۷۰ درصد اشاره شده و در گزارش وانگ استحصال آب بین ۴۰ تا ۵۵ درصد اشاره شده حال با پیش فرض میزان ۴۰٪ استحصال آب موجود در جریان دود، نتیجه تحلیل اقتصادی مطابق جدول (۱۱) می‌باشد.

جدول ۱۱ مقایسه مالی بین تکنولوژی‌های استحصال آب

روش‌های استحصال آب	کل ارزش فعلی خالص (دلار)
خشک‌کن	۲۵۴۲۲۸۲۴/۳
مبدل چگالشی	۴۳۶۷۲۹۸۵/۳
تکنولوژی غشایی	۹۰۹۳۷۸/۷

در زمان استفاده از روش‌های مختلف، ارزش فعلی گزینه‌هایی که دارای طول عمر مساوی هستند، اگر همه گزینه‌ها دارای ظرفیت مشابه و خدمات یکسان باشند، بطوری که درآمد سالانه آنها یکسان باشند در آن صورت گزینه‌ای که کمترین ارزش فعلی هزینه را داشته باشد باید انتخاب شود. در محاسبات و تحلیل اقتصادی فاکتور افت در خروجی توربین گاز که باعث افت راندمان واحد گازی و کاهش توان تولیدی واحد می‌گردد، به دلیل داشتن شرایط نسبتاً مساوی بین هر سه گزینه محاسبه نشده است. زیرا در خصوص دو سیستم مبدل چگالشی و غشایی این افت تقریباً یکسان ولی در مورد سیستم خشک‌کن افت ایجاد شده در خروجی توربین گاز با نصب نازل‌های پاشش و به دلیل وجود تماس مستقیم با محلول جاذب کمتر خواهد بود. از سوی

جهت به‌روز رسانی هزینه مذکور به سال جاری مانند قبل باید عمل نمود.

$$i = 5.6\% \quad (38)$$

$$f_f = 2.16\% \quad (39)$$

$$n = 10 \quad (40)$$

$$F = \frac{317187.5 * (1 + 5.6\%)^{10}}{(1 + 2.16\%)^{10}} \quad (41)$$

$$= 441719.3\$$$

هزینه اولیه سالیانه طبق رابطه (۵) به شرح زیر است:

$$C_{acap} = 441719.3 \times 0.08257 \quad (42)$$

$$= 37472.7\$/\text{year}$$

هزینه سالیانه تعمیرات و نگهداری با پیش فرض ۳٪ هزینه سرمایه گذاری اولیه:

$$441719.3\$ \times 3\% = 13251.6\$/\text{year} \quad (43)$$

هزینه برق مصرفی سیستم مذکور فقط در حد نیاز به یک پمپ کوچک جهت گردش آب در غشاها می‌باشد. از آنجایی که خلاء مورد نیاز بسیار جزیی ذکر شده است و دبی عبوری نیز کم می‌باشد، پس جهت نیاز مطرح شده از یک الکتروپمپ ۲۰ کیلووات استفاده شود. بنابراین هزینه برق مصرفی سالیانه سیستم مذکور به شرح زیر است:

$$20\text{kW} \times 24 \times 365 \times 0.01\$/\text{kWh} \quad (44)$$

$$= 1752\$/\text{year}$$

هزینه‌های تعویض به صورت سالیانه جهت مازول غشایی با برآورد عمر ۷ سال:

$$SFF(5.34\%, 7) = \frac{5.34\%}{(1 + 5.34\%)^7 - 1} \quad (45)$$

$$= 0.12$$

$$SFF(5.34, 20) = \frac{5.34\%}{(1 + 5.34\%)^{20} - 1} \quad (46)$$

$$= 0.02917$$

$$R_{rep} = 7 \times INT\left(\frac{20}{7}\right) = 21 \quad (47)$$

$$R_{rem} = 7 - (21 - 20) = 6 \quad (48)$$

$$S = 230000 \times \frac{6}{7} = 197142.86 \quad (49)$$

مطابق اطلاعات ارائه شده در جدول (۱۲) با نگاه اولیه برتری سیستم غشاء سرامیکی متخلخل نانو نسبت به دو سیستم دیگر کاملاً مشخص است. هر چند که با مطالعه جزئیات ارائه شده در بخش‌های قبل وجود این اختلاف و فاصله میان آنها بیشتر مشخص می‌گردد. بنابراین این سیستم انتخاب می‌گردد.

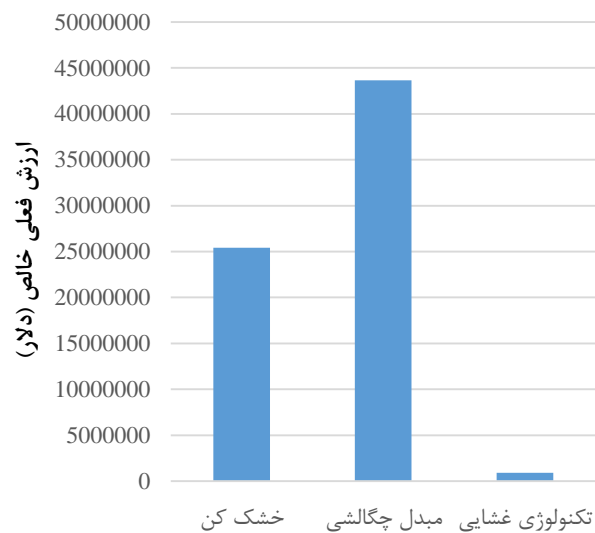
۷-۱- طرح غشاء سرامیکی متخلخل نانو و نحوه پیاده‌سازی آن در سیستم

با توجه به وجود ۷ تا ۸ درصد حجمی بخار آب در جریان دود یک نیروگاه سیکل ترکیبی گاز سوز و از طرف دیگر محدودیت ایجاد افت فشار در خروجی یک توربین گاز، می‌بایست با انتخاب غشا مناسب نسبت به استحصال درصد قابل قبول آب اقدام نمود. به دلیل قرارگیری این نوع غشاء به صورت مستقیم در مسیر جریان دود، محدودیت در ماده غشاء، پیکربندی ماژول و همچنین عملکرد غشاء وجود دارد. در نتیجه داشتن ثبات شیمیایی، حرارتی و مخصوصاً پایداری مکانیکی ضروری می‌باشد. از طرف دیگر چون سیستم غشایی به صورت مستقیم در جریان دود قرار می‌گیرد، نیازمند این است که سیستم غشایی یک سیستم با افت فشار اندک تعریف شود تا به روند انتقال جریان دود در داخل دودکش خللی وارد نشود. همچنین کمترین افت فشار را در خروجی توربین گاز ایجاد نماید.

جهت تحقق اهداف فوق می‌بایست غشاهای سرامیکی متخلخل نانو به فرم مدول درآمده و در داخل یک رک طراحی شده به همین منظور قرار داده شوند. محل نصب این رک در انتهای بویلر و در فضای خالی حدود سه متری بین CPH و دودکش توربین بخار در نظر گرفته شده است. مدول‌های مورد نظر TMCها می‌باشند که می‌توانند جریان‌های حرارتی اتلافی رطوبت و همراه با آن حرارت محسوس و مقدار زیادی از حرارت نهان حاصل از فرایند احتراق گاز طبیعی را بازیافت نمایند که بر همین اساس پایه گذاری شده‌اند (شکل (۴)) [۳۳].

یک مدول TMC از چند صد تا لوله‌های نازک غشای سرامیکی متخلخل نانو ساخته شده است. فاصله بین لوله‌ها اجازه می‌دهد تا دود از میان آنها با یک افت فشار مطلوب جریان یابد. لذا تعداد لوله‌های بکار رفته در یک ماژول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آب تغذیه سرد از میان این لوله‌های نازک جریان می‌یابد و جریان دود مملو از رطوبت به صورت عرضی در سر تا سر لوله وجود دارد (شکل (۵)). حرارت اتلافی و آب خالص در جریان آب سرد بازیافت شده‌اند، در حالی که ترکیبات دیگر گازی موجود در جریان دود آگزوز از عبور از میان غشاء باز داشته شده‌اند.

دیگر به دلیل بازیافت حرارت انجام شده در طول پروسه استحصال آب به روش چگالشی و غشایی TMC راندمان بویلر در حدود ۵ تا ۷ درصد بالا می‌رود و این افزایش راندمان باعث بالا رفتن توان تولیدی سیکل می‌گردد. لذا در این مورد شرایط هر سه گزینه ثابت فرض شده است. براساس اطلاعات جدول (۱۱) نمودار مقایسه مالی بین روش‌های استحصال آب مطابق شکل (۳) می‌باشد. پس چنانچه مشخص است در تحقیق حاضر تکنولوژی غشایی با اختلاف بسیار زیاد نسبت به بقیه روش‌ها انتخاب می‌گردد.



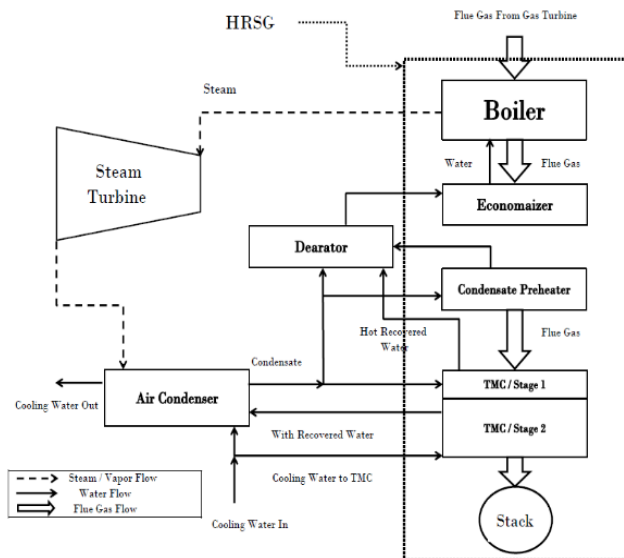
شکل ۳ مقایسه مالی بین روش‌های استحصال آب

۷- اثر استفاده از تکنولوژی انتخاب شده بر روی توربین گاز و بویلر بازباب

با انجام تحلیل اقتصادی بین تکنولوژی‌های مرسوم استحصال آب نتیجه کلی در جدول (۱۲) ارائه شده است.

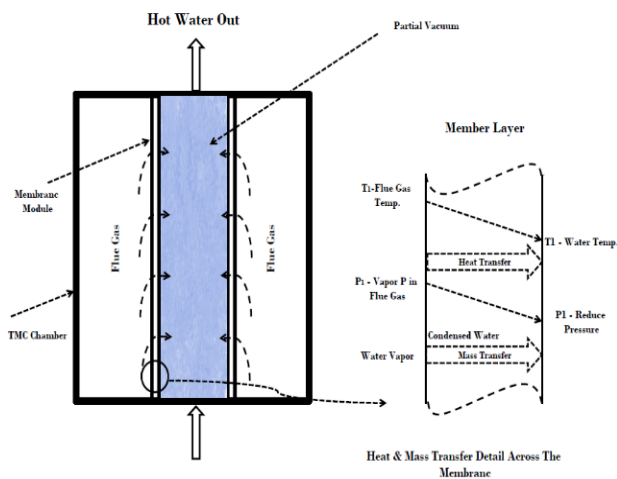
جدول ۱۲ مقایسه فنی اقتصادی بین تکنولوژی‌ها

غشای نانو نوع متخلخل آب‌دوست	خنک‌کنندگی چگالشی	مابع آب‌زدا	مقیاس
۱	۳	۲	کیفیت آب
۲	۱	۳	صرفه‌جویی مصرف انرژی
۱	۳	۲	هزینه سرمایه‌گذاری
۱	۱	۲	هزینه بهره‌برداری
۳	۲	۱	تکامل تکنولوژی



شکل ۶ باز یافت آب و حرارت از دود خروجی نیروگاه با استفاده از TMC دو مرحله‌ای

شماتیکی از مکانیزم تکنولوژی TMC در شکل (۷) آورده شده است.

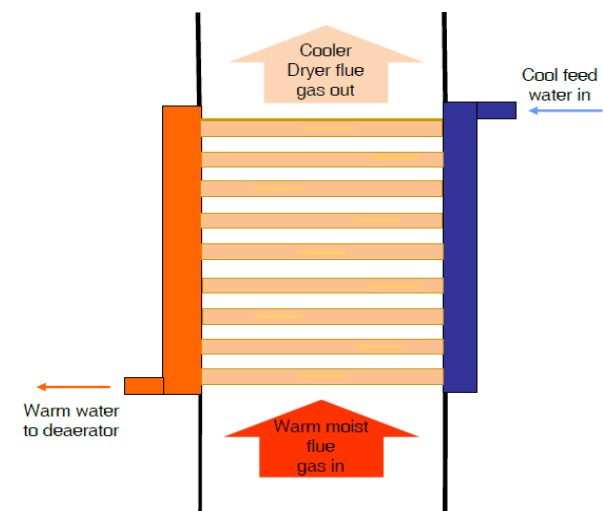


شکل ۷ شماتیکی از مکانیزم کار TMC

انتخاب پیکربندی ماژول و همچنین ترتیب ماژول‌ها بایستی بر ملاحظات اقتصادی و با پارامترهای مهندسی صحیح که برای رسیدن به آن بکار گرفته شده، ارائه شوند که شامل: ایجاد بیشترین ارتباط بین دود و غشاء، امکان استحصال ماکزیمم آب از دود، سهولت تمیز کردن، سهولت تعمیر و نگهداری، سهولت عمل، فشرده‌گی سیستم، مقیاس و امکان جایگزینی می‌باشد. برای بدست آوردن هندسه ماژول، ابعاد لوله‌ها (سطح مقطع و طول) و همچنین تعداد آنها فاکتورهای مورد نظر: افت فشار، میزان استحصال آب، نقطه شبنم، فضای در دسترس و سایز جریان می‌باشد که براساس آنها می‌توان نوع ماژول درخواستی را سفارش داد.

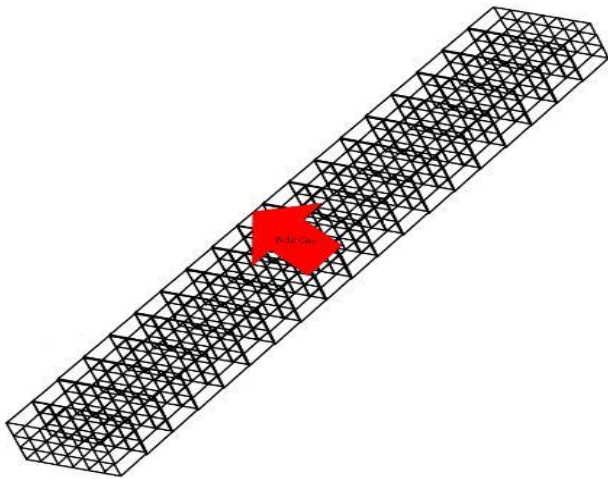


شکل ۴ ماژول TMC از جنس گارولیت [۳۴]



شکل ۵ طراحی ماژول TMC با جریان آب در داخل لوله [۴۲]

سیستم TMC برای یک نیروگاه در دو مرحله طراحی شده است. لذا با الگو گرفتن از [۳۳] شماتیک طرح و نمودار کلی ادغام دستگاه باز یافت آب TMC در دیگ بخار نیروگاه سیکل ترکیبی و چرخه توربین بخار مطابق شکل (۶) ارائه شده است. دو جریان آب موجود در سیستم، یکی میعان بخار توربین و دیگری آب خنک‌کاری کندانسور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر پایین بودن دمای آب خنک‌کننده وجود یک نیروی محرکه برای جریان آب در TMC اهمیت دارد. بر همین اساس آب ورودی مرحله اول TMC از طریق بخارات چگالش شده از سمت کندانسور می‌باشد و آب خروجی همراه با بخار آب باز یافتی و گرمای نهان حاصل از آن برای استفاده به عنوان آب جیرانی دیگ بخار به سمت دی اریتور خواهد رفت. آب ورودی به مرحله دوم TMC قسمتی از جریان آب خنک کننده کندانسور خواهد بود. آب خروجی از این مرحله هم همراه با آب باز یافتی و اضافه شده از جریان دود به جریان آب خنک کننده می‌پیوندد.



شکل ۹ طراحی و چیدمان ماژول‌های TMC در داکت نیروگاه سیکل ترکیبی کاشان

۷-۲- محاسبه میزان آب قابل استحصال از سیستم ماژول غشایی

تشکیل قطره و چگالش بخار آب در بیرون لوله‌های غشایی سیستم استحصال آب باعث افت راندمان و کارایی سیستم می‌گردد. لذا لازم است پیدایش و عدم پیدایش آن با شرایط طرح مورد بررسی قرار گیرد. با استفاده از اطلاعات سازنده توربین گاز در شرایط ایزو:

$$\begin{aligned} P_{4,C} &= 1.0475 \text{ bar} \\ \Delta P_{B,S} &= 26.1 \text{ mbar} \quad (55) \\ P_{P,1} &= (P_{4,C} - \Delta P_{B,S}) \end{aligned}$$

$P_{4,C}$ ، $\Delta P_{B,S}$ ، $P_{P,1}$ به ترتیب فشار خروجی توربین در سیکل ترکیبی، افت فشار HRSG بعد از CPH و قبل از اگزوز بخار و فشار ورودی محصولات احتراق به سیستم استحصال آب می‌باشند.

$$P_{P,1} = 1.0475 - 0.0261 = 1.0214 \text{ bar} \quad (56)$$

با توجه به افت ۴/۴ میلی باری سیستم استحصال آب، $P_{P,2}$ فشار محصولات احتراق بعد از سیستم استحصال به شرح زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} P_{P,2} &= 1.0214 - 0.0044 \\ &= 1.017 \text{ bar} = 101.7 \text{ kPa} \quad (57) \end{aligned}$$

به ازای سوختن هر کیلو مول از سوخت، مطابق ترکیبات دود در شرایط ایزو، ۲۸/۸۵ کیلو مول محصولات احتراق تشکیل می‌گردد.

با توجه به ابعاد داکت یعنی فضای مابین CPH و دودکش با عمق ۳/۲ متر در جهت دود با بررسی و امکان سنجی انجام شده این مکان جهت نصب سیستم مناسب تشخیص داده شده است. پس با استفاده از اطلاعات ماژول غشایی چیدمان غشاها انجام و نسبت به محاسبه میزان افت و تأثیر آن بروی توربین گاز اقدام خواهد شد. نمونه ماژول و ساختار آن مطابق شکل (۸) می‌باشد.



شکل ۸ نمونه ماژول TMC بلند طراحی و ساخته شده جهت کاربرد در بویلرهای نیروگاهی [۳۳]

بر اساس ماژول انتخابی استراکچر و چیدمان پیشنهادی مطابق شکل (۹) می‌باشد.

چنانچه بیان شد جهت استحصال آب و حرارت از جریان دود یک نیروگاه حرارتی دو مرحله TMC در نظر گرفته شده است. مرحله اول می‌تواند ماکزیمم گرما و فقط به اندازه آب جبرانی برای بویلر را بازیافت کند، ولی مرحله دوم می‌تواند ماکزیمم میزان آب را بازیافت کند. بر همین اساس در شماتیک ارائه شده در شکل فوق بر اساس طرح پایلوت از سه ردیف غشاء پشت سر هم در طرح استراکچر پیشنهادی استفاده شده است.

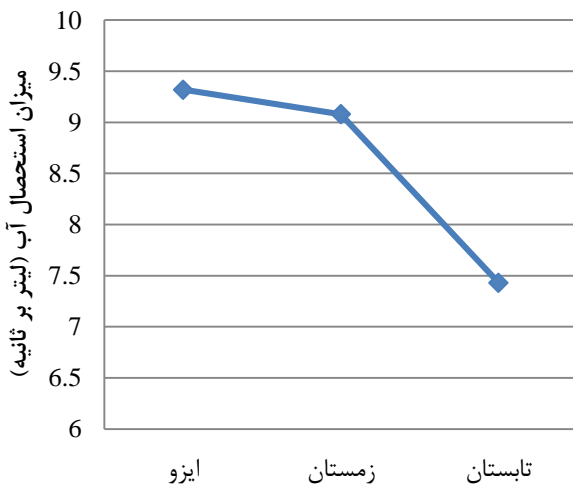
با این توضیح که دود عبوری از مرحله اول که دمای آن افت کرده و میزان رطوبت آن نیز کاهش یافته وارد مرحله دوم می‌شود و تا زمانی که رطوبت نسبی در جریان دود زیاد باشد، مرحله دوم برای بازیافت قسمت زیادی از آب موفق خواهد بود. پس مرحله اول و دوم نسبت به یکدیگر عکس العمل مخالف دارند؛ یعنی هرچه دمای خنک‌کن مرحله اول کمتر شود، میزان انتقال آب در مرحله دوم کمتر و در مرحله اول بیشتر می‌شود. در خصوص دبی نیز همین طور است. در کل عملکرد سیستم TMC با کاهش دمای میانگین ورودی و افزایش دبی بهبود می‌یابد.

۴۰ تا ۵۵ درصد ذکر شده است. با توجه به استفاده از همان غشاء در پروژه مذکور ولی در ابعاد متفاوت، می‌توان انتظار داشت که راندمان استحصال در همان شرایط باقی بماند. توجه به این نکته ضروریست که در طرح پایلوت انجام شده اختلاف بین دمای دود و آب خنک‌کن ورودی بسیار کمتر از شرایط مشابه، بر اساس داده‌های نیروگاه می‌باشد. با استفاده از اطلاعات جدول (۸) و با در نظر گرفتن حداقل راندمان، میزان آب قابل استحصال به شرح جدول زیر می‌باشد.

جدول ۱۳ میزان آب قابل استحصال از دود با شرایط سیستم پیشنهادی

نوع شرایط	میزان بخار آب (kg/s)	آب باز یافتی (kg/s)
شرایط ایزو	۲۳/۳۱	۹/۳۲
شرایط محیطی تابستان	۱۸/۵۷	۷/۴۳
شرایط محیطی زمستان	۲۲/۶۹	۹/۰۸

با استفاده از اطلاعات بدست آمده در جدول فوق که مربوط به یک واحد نیروگاه می‌باشد نمودار مربوط به میزان آب قابل استحصال در شرایط مختلف ذکر شده مطابق شکل (۹) می‌باشد.



شکل ۹ میزان بخار آب قابل استحصال از جریان دود

از آنجایی که طراحی صحیح TMC در میزان انتقال آب تأثیر دارد، از اطلاعات اشاره شده در مقاله آقای وانگ مینی بر انجام طرح پایلوت در نیروگاه زغال سوز ۵۵۰ مگاواتی، طی جستجویی که انجام گردید، مشخص شد که علاوه بر انجام طرح پایلوت با انشعابی از دود خروجی نیروگاه مذکور، طراحی ماژول غشایی با توجه به مشخصات آن نیروگاه در مقیاس اندازه‌های داکت دود و

به واسطه ۲/۰۶ کیلو مول H_2O دمای نقطه شبنم محصولات احتراق در فشار $P_{P,1}$ بالاتر از ۱۰۶/۴ درجه سلسیوس است. حال چنانچه از سیستم استحصال آب با افت ۴/۴ میلی بار استفاده نماییم، لازم است میزان مجاز حداقلی کاهش دمای دود در فشار کاهش یافته بدست آید. با استفاده از معادله زیر این حداکثر دمای دود به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۳۵].

$$\frac{N_v}{N_{prod.}} = \frac{P_v}{P_{prod.}} = \frac{P_v}{P_{P,2}} \quad (58)$$

اگر N_w کیلو مول از H_2O مایع شود، پس $N_w - 2/06$ کیلو مول از بخار آب در محصولات احتراق باقی خواهد ماند. تعداد مول محصولات احتراق در فاز گاز نیز به میزان $28/85 - N_w$ کاهش خواهد یافت. با در نظر گرفتن قانون گاز ایده‌آل جهت گازهای احتراق در حالت مذکور، آنگاه N_w به شرح زیر بدست می‌آید.

$$\frac{(2.06 - N_w)}{(28.85 - N_w)} = \frac{(12.349kPa)}{(101.7kPa)} \quad (59)$$

$$P_v \times N_w - N_w = 28.85 \times P_v - 209 \quad (60)$$

پس از حل حداکثر فشار بخار اشباع حدود ۷/۵ کیلو پاسکال جهت عدم تشکیل قطره به دلیل چگالش می‌باشد که دمای متناظر آن ۴۰/۲۹ درجه سلسیوس است. حال چنانچه دما به زیر دمای مذکور بیاید، یعنی به زیر نقطه شبنم آمده است، پس مخلوط اشباع می‌باشد. به همین دلیل نیز فشار جزئی بخار همان فشار اشباع در دمای مخلوط است.

آب ورودی مجاز که باعث تشکیل قطره و چگالش بخار آب در سیستم استحصال نشود، باید بالاتر از دمای بدست آمده باشد. با توجه به دمای ۴۵ درجه سلسیوس آب ورودی به سیستم استحصال آب که مربوط به آب کندانس خروجی کندانسور می‌باشد، در نتیجه با محاسبات انجام شده تشکیل قطره به دلیل چگالش در سیستم اتفاق نمی‌افتد. با توجه به دمای آب ورودی و با تأمین فلوی مورد نیاز آب خنک‌کن می‌توان کاهش دمای محصولات احتراق را به میزان ۵۰ درجه سلسیوس انتظار داشت که در خصوص نقطه شبنم محصولات نیز مشکلی ایجاد نمی‌شود و به اندازه کافی فاصله دمایی وجود دارد. ذکر این نکته ضروری است که دمای خروجی دودکش ۴۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس اقتصادی می‌باشد [۳۶].

در طرح پایلوت با درصد جرمی بخار آب ۱۰/۹٪ دود، با انجام تست‌های میدانی در مجموع دو مرحله TMC راندمان انتقال آب

سیستم جهت استحصال آب از دود سیستم غشایی نانو نوع متخلخل آب دوست شناخته شد. با مقایسه نتیجه تحلیل اقتصادی هزینه فعلی تکنولوژی‌های خشک‌کن، مبدل چگالشی و تکنولوژی غشایی به ترتیب برابر با $۲۵۴۲۲۸۲۴/۳$ ، $۴۳۴۷۲۹۸۵/۳$ و $۹۰۹۳۷۸/۷$ دلار می‌باشد و هزینه تکنولوژی غشایی پایین‌ترین مقدار می‌باشد.

با امکان‌سنجی انجام شده به لحاظ فنی امکان استفاده از سیستم غشایی معرفی شده وجود دارد و با توجه به حداقل راندمان ۴۰ درصدی، میزان استحصال آب در بدترین شرایط دمایی در کاشان میزان $۷/۴۳$ لیتر آب بر ثانیه می‌باشد که در مجموع ۲ واحد گازی جوابگوی مصرف نیروگاه می‌باشد.

سایر داده برداری‌ها انجام شده است. ماژول‌های مورد استفاده به لحاظ ابعاد (طول: ۱۲۰ سانتیمتر، عرض: ۶۲ سانتیمتر و پهنا: ۴۵ سانتیمتر) بسیار بزرگتر از ماژول طرح پایلوت می‌باشد و این افزایش سایز علاوه بر کاهش میزان اتصالات استراکچر و نگهدارنده‌ها، باعث کاهش افت فشار نیز به دلیل کم شدن قاب و فریم دور غشاء خواهد شد که با توجه به ابعاد و سطح مقطع واقعی بسیار تأثیرگذار خواهد بود. افت ماژول‌های فوق الذکر زیر یک اینچ ستون آب و افزایش دمای آب بعد از عبور از TMC، ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس اعلام شده است که بستگی به میزان دبی و دمای آب ورودی دارد و نشان دهنده اجرایی بودن طرح مذکور است.

۸- نتیجه‌گیری

۹- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

C	هزینه (\$/year)
CRF	فاکتور بازگشت سرمایه (-)
E	ارزش قبلی پول (\$)
f	نرخ تورم (-)
F	ارزش جاری پول (\$)
i	نرخ بهره واقعی (-)
i'	نرخ بهره اسمی (-)
n	تعداد سال (-)
N	تعداد مول (-)
P	فشار (bar)
ΔP	افت فشار (bar)
R	تعداد سال عمر (year)
S	ارزش بازیافتی (\$)
SFF	فاکتور وجوه استهلاکی (-)
TAC	کل هزینه‌های سالیانه (\$)
TAICC	هزینه‌های اولیه سالیانه (\$)
TARC	هزینه‌های تعویض سالیانه (\$)
TO&M	هزینه‌های تعمیرات و نگهداری سالیانه (\$)

زیرنویس‌ها

4, C	خروجی توربین سیکل ترکیبی
acap	سرمایه‌گذاری اولیه سالیانه
arep	تعویض سالیانه
B, S	بعد از CPH و قبل از اگزوز بخار
cap	سرمایه‌گذاری
comp	قطعه
NPC	ارزش فعلی خالص
P, 1	ورودی محصولات احتراق به سیستم استحصال آب
prod	محصولات احتراق
proj	سیستم
rem	باقیمانده
rep	تعویض
v	بخار آب
w	H ₂ O مایع

هدف اصلی در این مقاله استحصال آب از دود خروجی دودکش نیروگاه کاشان با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی کویری منطقه و کمبود آب در مناطق خشک می‌باشد. به عنوان اولین قدم برای امکان‌سنجی به بررسی میزان آب موجود در دود پرداخته شد که مشخص گردید میزان بخار آب موجود در جریان دود حتی در گرم‌ترین فصول سال به اندازه‌ای است که نیروگاه را از سایر منابع آبی موجود بی‌نیاز نماید. با توجه به شرایط جغرافیایی و فصول مختلف کاشان میزان آب موجود در دود خروجی نیروگاه کاشان برای شرایط ایزو، تابستان و زمستان به ترتیب برابر با $۲۳/۳۱$ ، $۱۸/۵۷$ و $۲۲/۶۹$ لیتر بر ثانیه بدست آمد. سپس روش‌های مختلفی جداسازی گازها معرفی و مورد تحقیق قرار گرفتند که از بین آنها سه تکنولوژی جذب سطحی مایعی، خنک‌سازی چگالشی و تکنولوژی غشایی جهت استحصال آب از دود کاربردی تشخیص داده شد. سپس این سه تکنولوژی از لحاظ کیفیت آب، صرفه جویی مصرف انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره برداری و تکامل تکنولوژی مقایسه شدند. با بررسی سابقه تحقیقاتی و نتیجه‌های عملی ثبت شده و مقایسه فنی و اقتصادی آنها با یکدیگر توانایی آنها جهت استحصال آب از دود به ترتیب اولویت بصورت سیستم غشایی نانو نوع متخلخل آب دوست، سیستم مایع آب‌زدا و سیستم خنک‌کنندگی چگالشی حاصل گردید.

برای انتخاب بهترین سیستم استحصال آب علاوه بر قابلیت فنی آن، مقرون به صرفه بودن هم بسیار مهم است. از این رو در این پروژه علاوه بر مقایسه فنی سیستم‌های مذکور به مقایسه آنها با توجه به هزینه‌های اولیه، نصب، تعمیرات و نگهداری نیز پرداخته شد که با استفاده از نتایج تحلیل اقتصادی و فنی بهترین

۱۰- مراجع

- via Polysorbate Nonionic Surfactants Doping, *Polymers*, vol. 12, (2020) 253, ed. <https://doi.org/10.3390/polym12020253>.
- [10] K. Dalane, M. Hillestad, and L. Deng, "Subsea natural gas dehydration with membrane processes: Simulation and process optimization," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 142, pp. 257-267, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.12.027>.
- [11] Z. Y. Kong, A. Mahmoud, S. Liu, and J. Sunarso, "Revamping existing glycol technologies in natural gas dehydration to improve the purity and absorption efficiency: Available methods and recent developments," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 56, pp. 486-503, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.06.008>.
- [12] J. E. Shin, S. K. Lee, Y. H. Cho, and H. B. Park, "Effect of PEG-MEA and graphene oxide additives on the performance of Pebax® 1657 mixed matrix membranes for CO₂ separation," *Journal of Membrane Science*, vol. 572, pp. 300-308, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.025>.
- [13] M. E. Kojabad, A. Babaluo, and A. Tavakoli, "A novel semi-mobile carrier facilitated transport membrane containing aniline/poly (ether-block-amide) for CO₂/N₂ separation: Molecular simulation and experimental study," *Separation and Purification Technology*, vol. 266, p. 118494, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118494>.
- [14] B. Ohs, M. Falkenberg, and M. Wessling, "Optimizing hybrid membrane-pressure swing adsorption processes for biogenic hydrogen recovery," *Chemical Engineering Journal*, vol. 364, pp. 452-461, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.136>.
- [15] M. Mozafari, R. Abedini, and A. Rahimpour, "Zr-MOFs-incorporated thin film nanocomposite Pebax 1657 membranes dip-coated on polymethylpentene layer for efficient separation of CO₂/CH₄," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, no. 26, pp. 12380-12392, 2018, doi: <https://doi.org/10.1039/C8TA04806A>.
- [16] R. Abedini, A. Mosayebi, and M. Mokhtari, "Improved CO₂ separation of azide cross-linked PMP mixed matrix membrane embedded by nano-CuBTC metal organic framework," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 114, pp. 229-239, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.025>.
- [17] M. Isanejad and T. Mohammadi, "Effect of amine modification on morphology and performance of poly
- [1] M. S. Fahmey, A.-H. M. El-Aassar, M. M. Abo-Elfadel, A. S. Orabi, and R. Das, "Comparative performance evaluations of nanomaterials mixed polysulfone: A scale-up approach through vacuum enhanced direct contact membrane distillation for water desalination," *Desalination*, vol. 451, pp. 111-116, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.020>.
- [2] Y. H. Teow and A. W. Mohammad, "New generation nanomaterials for water desalination: A review," *Desalination*, vol. 451, pp. 2-17, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.041>.
- [3] P. S. Parsamehr, M. Zahed, M. A. Tofighy, T. Mohammadi, and M. Rezakazemi, "Preparation of novel cross-linked graphene oxide membrane for desalination applications using (EDC and NHS)-activated graphene oxide and PEI," *Desalination*, vol. 468, p. 114079, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114079>.
- [4] A. Beluco, E. J. Krummenauer, E. G. Rossini, and J. d. Souza, "Estimation of emissions of volatile organic vapors from parameters measured in a fuel loading terminal," *International Journal of Energy and Environment. Najaf. Vol. 9, n. 2 (2018), p. 137-144*, 2018, doi: <http://hdl.handle.net/10183/183245>.
- [5] B. Tang, Y. Dai, Y. Sun, H. Chen, and Z. Wang, "Graphene and MOFs co-modified composites for high adsorption capacity and photocatalytic performance to remove pollutant under both UV-and visible-light irradiation," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 284, p. 121215, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121215>.
- [6] Z. Petrusová *et al.*, "Regeneration of thin-film composite membrane used for permeation of hexane vapors," *Separation and Purification Technology*, vol. 224, pp. 62-69, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.087>.
- [7] F. Dorosti and A. Alizadehdakheel, "Fabrication and investigation of PEBAX/Fe-BTC, a high permeable and CO₂ selective mixed matrix membrane," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 136, pp. 119-128, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.029>.
- [8] Z. Farashi, S. Azizi, M. R.-D. Arzhandi, Z. Noroozi, and N. Azizi, "Improving CO₂/CH₄ separation efficiency of Pebax-1657 membrane by adding Al₂O₃ nanoparticles in its matrix," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 72, p. 103019, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103019>.
- [9] P. Bernardo and G. Clarizia, "Enhancing Gas Permeation Properties of Pebax® 1657 Membranes

- health facilities using HOMER application," *Glob. J. Res. Eng. J. Gen. Eng.*, vol. 21, pp. 61-83, 2021. [Online]. Available: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/2128>.
- [27] H. Cooley, R. Phurisamban, and P. Gleick, "The cost of alternative urban water supply and efficiency options in California," *Environmental Research Communications*, vol. 1, no. 4, p. 042001, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab22ca>.
- [28] B. C. Folkedahl, G. Weber, and M. E. Collings, "Water Extraction from Coal-Fired Power Plant Flue Gas," 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.2172/927112>.
- [29] L. Daal *et al.*, "Evaluation of different water vapor capture technologies and energy modeling results for membrane technology," *Icapwa, DNV-KEMA the Netherlands, Department PGR-PCW, PO Box*, vol. 9035, p. 6800, 2012, doi: <https://blue-expert.com/wp-content/uploads/2020/11/Paper-Alternatives-and-energy-modelling-PowerGen-Europe-V1.0.pdf>.
- [30] E. K. Levy, H. Bilirgen, and K. Jeong, "Recovery of Water from Boiler Flue Gas-Final Technical Report," *Energy Research Center*, 2008, doi: <https://doi.org/10.2172/1084027>.
- [31] M. Cheryan, *Ultrafiltration and microfiltration handbook*. CRC press, 1998. <https://doi.org/10.1201/9781482278743>.
- [32] M. Cheryan, *Ultrafiltration and microfiltration handbook*. CRC press, 1998. [Book Code: 1111026709657](https://doi.org/10.1111/026709657).
- [33] D. Wang, A. Bao, W. Kunc, and W. Liss, "Coal power plant flue gas waste heat and water recovery," *Applied Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 341-348, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.003>.
- [34] D. Wang, "Transport membrane condenser for water and energy recovery from power plant flue gas," Gas Technology Institute, Des Plaines, IL (United States), 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133573>.
- [35] Y. A. Cengel, "Thermodynamics: an engineering approach," ed: McGraw-Hill, 2011. [ISBN-13: 978-0073398174](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133573).
- [36] K. Hwang, C. ho Song, K. Saito, and S. Kawai, "Experimental study on titanium heat exchanger used in a gas fired water heater for latent heat recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 17-18, pp. 2730-2737, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.027>.
- (ether-block-amide)/fumed silica nanocomposite membranes for CO₂/CH₄ separation," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 205, pp. 303-314, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.018>.
- [18] A. Huang, L.-H. Chen, C.-H. Chen, H.-Y. Tsai, and K.-L. Tung, "Carbon dioxide capture using an omniphobic membrane for a gas-liquid contacting process," *Journal of membrane science*, vol. 556, pp. 227-237, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.089>.
- [19] H. Pang, H. Gong, M. Du, Q. Shen, and Z. Chen, "Effect of non-solvent additive concentration on CO₂ absorption performance of polyvinylidene fluoride hollow fiber membrane contactor," *Separation and Purification Technology*, vol. 191, pp. 38-47, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.012>.
- [20] D. Ren, Z. Li, and H. Ding, "Status and progress of membrane separation technology in water capture in flue gas," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 657, no. 1: IOP Publishing, p. 012112, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012112>.
- [21] M. Alabid and C. Dinca, "Membrane CO₂ Separation System Improvement for Coal-Fired Power Plant Integration," *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 464, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17020464>.
- [22] R. Singh, B. Prasad, and Y.-H. Ahn, "Recent developments in gas separation membranes enhancing the performance of oxygen and nitrogen separation: A comprehensive review," *Gas Science and Engineering*, p. 205256, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205256>.
- [23] E. Kamio, T. Yoshioka, and H. Matsuyama, "Recent advances in carbon dioxide separation membranes: A review," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 56, no. 1, p. 2222000, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2222000>.
- [24] M. Da Conceicao, L. Nemetz, J. Rivero, K. Hornbostel, and G. Lipscomb, "Gas separation membrane module modeling: a comprehensive review," *Membranes*, vol. 13, no. 7, p. 639, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2222000>.
- [25] V. Nabilah, R. S. Marpaung, and R. Nainggolan, "ANALISIS PENGARUH PEMELIHARAAN KOMPONEN PLTG TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN GAS PT PLN UPDK BELAWAN," *Prosiding Konferensi Nasional Social & Engineering Polmed (KONSEP)*, vol. 3, no. 1, pp. 1047-1055, 2022, doi: <https://doi.org/10.51510/konsep.v3i1.852>.
- [26] V. A. Ani, "Strategies for modeling and simulation of alternative energy systems for powering

- [40]. www.tradingeconomics.com/united-states/interest-rate.
- [41]. www.usinflationcalculator.com/inflation/historical-inflation-rates.
- [42]. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/w_ebcast_2008-1120_super_boiler.pdf.
- [37]. <https://www.statista.com/statistics/263492/electricity-prices-in-selected-countries>.
- [38]. <https://www.flinnsci.com/calcium-chloride-reagent-powder-100-g/c0196/>.
- [39]. https://www.globalpetrolprices.com/Iran/natural_gas_prices/.