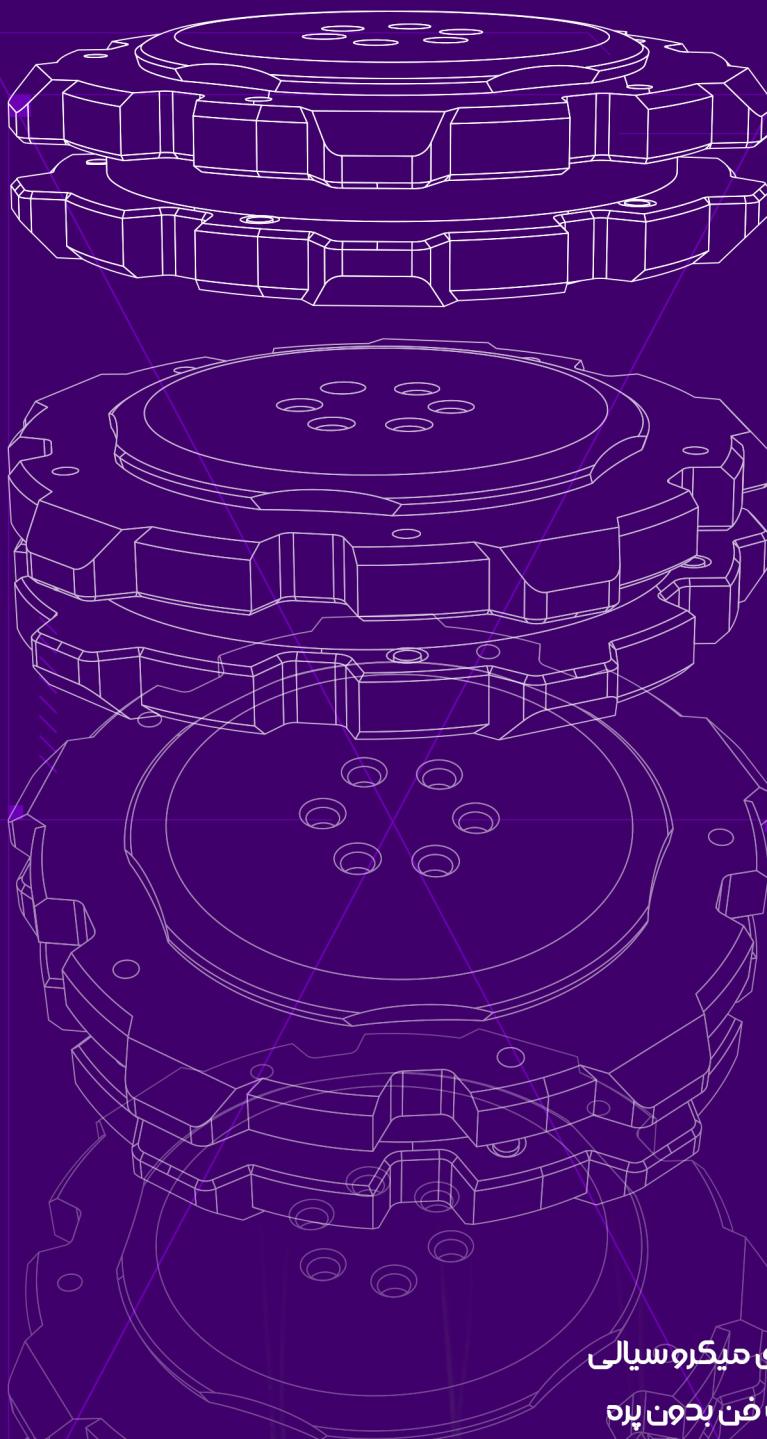




وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
سازمان فزائیک و اتمی



M
O
M
E
N
T
U
M
6



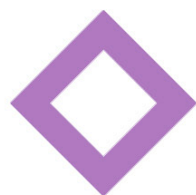
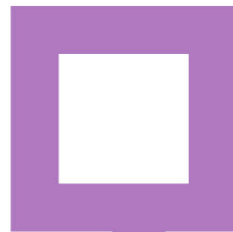
فناوری میکروسیالی

ساخت فن بدون پره

فک کاری پتل خورشیدی

مومنتوم

نشریه علمی تخصصی اتحادیه انجمن های علمی دانشجویان مهندسی مکانیک ایران



شناسنامه:

صاحب امتیاز: اتحادیه انجمن‌های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران
شماره مجوز: ۸/۸۱/۱۹۸۷۰۵

استاد مشاور: جناب آقای دکتر سیدفرامرز رنجبر
S.ranjbar@tabrizu.ac.ir
مدیر مسئول: مهندس زهرا قبادپور
Zahraghobadpour@webmail.guilan.ac.ir
سر دبیر: مهندس حسین رشیدی قلعه
Hosseinrashidighaleh@gmail.com
مدیر داخلی: مهندس آرش نوربخش سعداباد
A_nourbakhsh@tabrizu.ac.ir
ویراستار و ناظر کیفی: مهندس سیدامیررضا عبداللہی
S.a.abdollahi@yahoo.com
طراح و صفحه آرا: مهندس سینا جداری خوشباف، مهندس سینا شفاعت پناهی

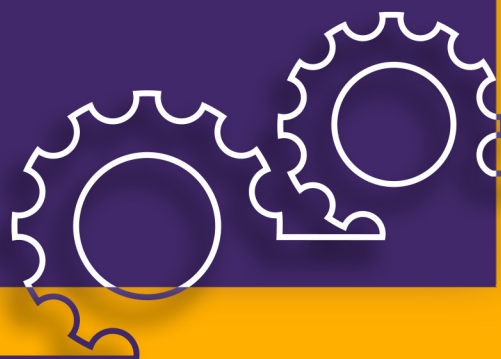
هیئت تحریریه:

دکتر سید فرامرز رنجبر، دکتر محمدحسین شفیعی میم، دکتر علی جمالی،
دکتر نادر نریمان زاده، زهرا قبادپور، آرش نوربخش سعداباد، الیاس مرندي،
منیره خیردیده، مهدی نامی خلیله ده، سالار رادمان، سعید میرزایی، زهرا
پرهیزکار، سپیده سادات خاتمی، اویس غلامی، امیررضا رزمی، سید امیررضا
عبداللہی، سیامک سیفی، محمد آفتابی طالمی.

راه‌های ارتباطی:

۱- ایمیل نشریه و اتحادیه انجمن‌های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران
sume16.official@gmail.com
۲- دبیرخانه نشریه: دانشگاه تبریز، مرکز رشد و فناوری دانشگاه، ساختمان
رشد فناوری، طبقه ۲، واحد اس ۵

۲۱	<	مروری بر کتاب گذار انرژی	۵	>	سخن مدیر مسئول
۲۳	>	خنک کاری پنل خورشیدی	۶	<	سخن سردبیر
۲۵	<	طراحی و پیاده سازی سیستم انرژی خورشیدی بر روی موتور پراید	۷	>	دیگر رسالت های اتحادیه های انجمن های علمی دانشجویی
۲۷	>	ساخت فن بدون پره	۹	<	مصاحبه: کارهای عملی در مهندسی مکانیک
۳۰	<	مدل سازی و بهینه سازی سیستم های انرژی هیبریدی	۱۰	>	اختراع چیست؟
۴۲	>	فناوری میکروسیالی و آزمایشگاه روی تراشه	۱۱	<	تازه های فناوری
۴۴	<	روشی نوین جهت استخراج معادله ی حالت از باند گرافیک سیستم دینامیکی	۱۲	>	تحلیل ترمو اکونومیک و بهینه سازی چند هدفه



سخن مدیر مسئول

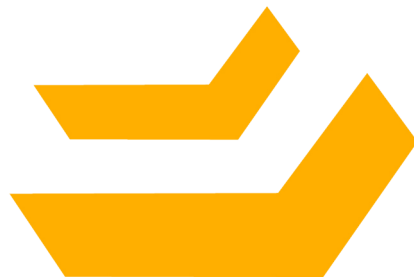
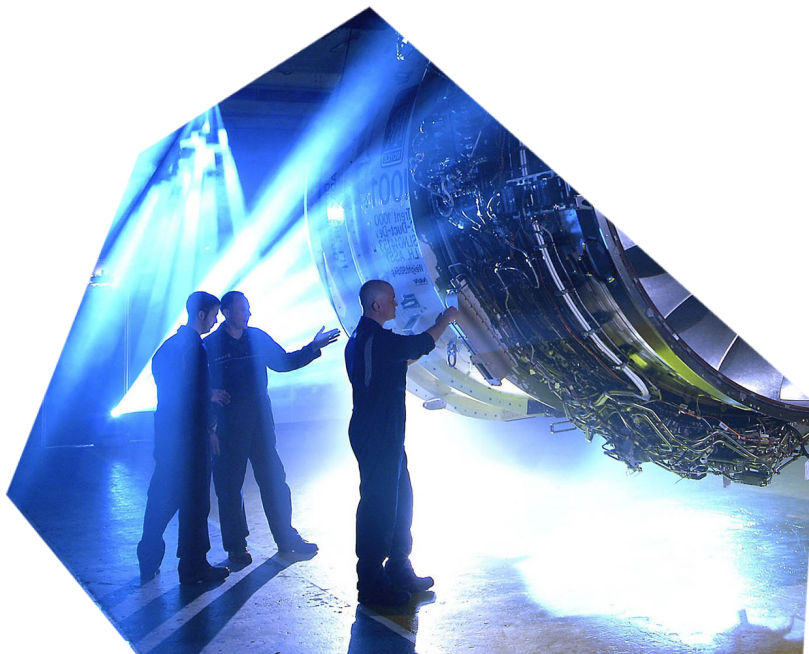
هو الخلاق العليم

عرض سلام و درود بر اهالی نشریه ی دانشجویی مومنتوم
شکرايذ که بار ديگر سعادت يافتيم تا در اين مسير دشوار اما شيرين، در خدمت جامعه ی دانشجويان مهندسی مکانیک ايران
عزيزمان باشيم و با انتشار اين نشریه نمايانگر گوشه ای از زحمات بسيار و بی وقفه ی شما دانشجويان پرتلاش در مسير اهداف
پژوهشی و توسعه علوم روز دنيا باشيم.
اميد است که مطالعه مطالب اين نشریه نیز فراهم کننده دليلی بر پيشرفت و تحول در مهندسی مکانیک باشد و با شوق و آگاهی فزون
تر، نقشی سازنده تر برای مرزبوم خود ایفا کنید.
اين نشریه ی دانشجو محور خود را بی نیاز از افراد باتجربه و اساتید صاحب نظر نمی داند و تیم تحریریه در کمال افتخار پذيرای
پيشنهادهای و نظرهای مشفقانه ی مخاطبان بزرگوار خواهد بود.

ارزش انسان ز علم و معرفت پیدا شود بی هنر گر دعوی بیجا کند رسوا شود
قيمت گوهر نشود پیدا بر گوهر شناس قدر ما در پای میزان عمل پیدا شود

زهر قباد پور

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان



دفتر را به نام اومی گشایم که هر امر مهمی بی یاد اوبی حاصل است.

سلام گرم ما و آرزوی سلامتی و موفقیت را نثار مشتاقان عرصه علم و دانش، همراهان سابق همیشگی ما در نشریه مومنتوم و خوانندگان گرامی و پژوهشگران و دانشجویان سراسر کشور بخصوص عزیزانمان در رشته مهندسی مکانیک. اکنون که بار دیگر خداوند متعال توفیق داد تا بتوانیم شماره ای دیگر از نشریه علمی تخصصی مومنتوم (شماره سه) در خدمت شما باشیم لازم است به این نکته اشاره کنم که در فرآیند بررسی و ارزیابی مقالات ارسالی، هم تنوع موضوعات بحمدالله بالا بوده و هم پراکندگی و مشارکت از اقصا نقاط کشور و از دانشجویان دانشگاه های سراسر کشور همراهی و مشارکت بالایی دیده می شود؛ علاوه بر آن ما سعی کرده ایم در داوری مقالات از خدمات و همکاری داوران عزیز از اکثر دانشگاه های کشور بهره ببریم؛ مشارکت جدی و مستمر این عزیزان، ارتقادهنده سطح کیفی مقالات، برطرف کننده کاستی های آن ها و دلگرم کننده و انرژی بخش ما به عنوان سردبیر و سایر اعضای شورا (هیئت تحریریه نشریه) است.

برای بنده به عنوان سردبیری نشریه افتخار بزرگی است که شاهد مشارکت ستودنی داوران متخصص و باتجربه، دانشجویان مستعد، پرتلاش و علاقمند و انجمن های علمی فعال و دغدغه مند که با اتحادیه و نشریه همکاری موثر دارند از تمام دانشگاه های ایران عزیز باشیم.

به صورت ویژه از همه ایشان تشکر و قدردانی کرده و چشم انتظار همراهی بیشتر همه عزیزان و نخبگان کشور هستیم. در این شماره طبق سیر نشریات قبل ابتدا تازه های فناوری را بررسی کرده و سپس در مورد اختراع و پتنت تفاوت ها و روند ثبت و ویژگی های آنها مطالبی ارائه شده است؛ در این شماره علاوه بر مصاحبه و خلاصه کتاب که همواره در کنار مقالات و پژوهش ها قرار دارد به عنوان یک نشریه زیر نظر وزارت علوم به بخش فرهنگی به مناسبت سالروز پیروزی انقلاب اسلامی پرداخته ایم و مرور سریعی بر بیانیه گام دوم انقلاب را نیز برای شما تدارک دیده ایم.

موضوعات مقالات و پژوهش های این نشریه نیز مانند گذشته تنوع بالا و دربرگیرنده زمینه ها و گرایشات مختلف مهندسی مکانیک است؛ مثل خنک کاری پنل های خورشیدی، ساخت فن بدون پره، استخراج معادلات باندگراف یک سیستم دینامیکی، فناوری میکروسیالی، طراحی و پیاده سازی سیستم انژکتور هوا تغذیه بر روی موتور پراید، مدلسازی و بهینه سازی سیستم های انرژی هیبریدی و.... می باشد.

در پایان امیدوارم نتیجه تلاش همکاران بنده برای شما عزیزان مفید واقع شود و در آینده باعث همکاری و همراهی شود.

و من الله التوفیق

حسین رشیدی قلعه

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی قم



زهرآبادپور

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

دیگر رسالت های اتحادیه های انجمن های علمی دانشجویی

یکی از رسالت های اتحادیه های انجمن های علمی دانشجویی زمینه سازی جهت رشد و توسعه انجمن های علمی دانشجویی و نیز ایجاد ارتباط گسترده و موثر میان دانشجویان و تشکلهای دانشجویی، با تشکلهای علمی-تخصصی، موسسات پژوهشی و صنعتی است. در همین راستا اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران با برگزاری دوره های آموزشی رایگان و با هزینه دانشجویی به توسعه ی فرهنگ عدالت آموزشی و ترویج علم پرداخته است. دوره های آموزشی نرم افزار آباکوس در دانشگاه های صنعتی قم و گیلان، نرم افزار متلب در دانشگاه های تبریز و شیراز، نرم افزار سالیدورک در دانشگاه های محقق اردبیلی و جهرم، نرم افزارهای اتوکد و کتیا در دانشگاه علم و صنعت تهران، نرم افزار انسیس فلونت در دانشگاه های زنجان و جیرفت، نمونه هایی از دوره های آموزش نرم افزار در دانشگاه های سراسر کشور در همکاری با اتحادیه مهندسی مکانیک بوده اند.

همچنین از دوره های کوتاه مدت، وبینارها و کارگاه های برگزار شده در همکاری با این دوره از اتحادیه می توان به موارد زیر اشاره کرد: سازه های نوین مهندسی، ده راز موفقیت شغلی، درآمد و مهارت مهندسی با رویکرد ورود به صنعت و درآمدزایی، ترفندهای chatGPT، پشت پرده مصاحبه شغلی، مهارت های مورد نیاز صنعت نفت و گاز، آشنایی با انرژی پلاس، آشنایی با اکوسیستم نوآوری ایران، خودروهای هوشمند و اینترنت اشیا، آموزش نرم افزار مندلی، آموزش تجهیزات صنعتی، آشنایی با مهندسی رباتیک، آشنایی با نقشه خوانی، آشنایی با دستگاه cnc، کاربرد ابزارهای هوش مصنوعی در پژوهش و فناوری، طراحی و ساخت گلايدر و...

از سایر رسالت های اتحادیه ارتباط گیری با نهاد ها و شرکت در رویدادها به منظور معرفی و ترویج اتحادیه های دانشجویی در سازمان ها و صنایع مرتبط است. در همین خصوص به شرح برخی رویدادهایی که اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران در آن ها حضور به هم رسانده است می پردازیم:

نخستین کنگره بین المللی شهید طهرانی مقدم

نخستین کنگره بین المللی دانشمندان برجسته شهید حاج حسن طهرانی مقدم و گرامی داشت ۷۰ شهید دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دوشنبه، ۲۲ آبان ۱۴۰۲ همزمان با دوازدهمین سالگرد شهادت آن شهید والامقام، در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران برگزار شد.

در حاشیه این کنگره، نمایشگاه دستاورد های انجمن های علمی دانشجویی، اتحادیه های انجمن های علمی کشور و برخی دیگر از تشکلهای دانشجویی در سالن شهید فخری زاده تشکیل شد. شرکت کنندگان در این کنگره از این نمایشگاه بازدید کردند که از جمله بازدید کنندگان می توان به دکتر حسینی معاون پارلمانی ریاست جمهوری، دکتر صحرایی وزیر آموزش و پرورش، دکتر زلفی گل وزیر علوم، تحقیقات و فناوری، خانواده شهید طهرانی مقدم، سفرای کشورهای خارجی و سایر مقامات کشوری و لشگری اشاره کرد.

اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک از نمایندگان حاضر در غرفه اتحادیه های کشور در این رویداد بود.



شانزدهمین جشنواره بین المللی حرکت

جشنواره بین المللی حرکت ویژه آثار و دستاوردهای انجمن ها و اتحادیه های علمی دانشجویی کشور است که شانزدهمین در دانشگاه شهید بهشتی با شعار زندگی یعنی امید و حرکت دردی ماه ۱۴۰۲ برگزار شد. نمایندگان اتحادیه های انجمن های علمی دانشجویی نیز به برپایی غرفه ای به منظور معرفی و ارائه گزارش عملکرد اتحادیه ها و افزایش تعامل دانشجویان با ایشان پرداختند.

حضور اعضای محترم شورای مرکزی جهت هم افزایی و بهبود عملکرد اتحادیه



حضور وزیر محترم علوم و هیئت همراه در غرفه اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی ایران

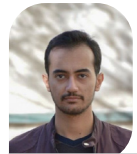


جناب آقای دکتر زلفی گل، وزیر محترم وزارت عتف طی این جشنواره ضمن بازدید از غرفه های اتحادیه ها و دانشگاه های سراسر کشور دانشجویان فعال در انجمن های علمی را آینده سازان کشور توصیف کرد و تصریح کرد: دانشجویانی که علاوه بر درس، فعالیت های علمی، جمعی، گروهی و هم افزایی دارند، کسانی هستند که مدیریت آینده جامعه را در دست می گیرند. ایشان با بیان اینکه انجمن های علمی دانشجویی حلقه وصل آموزش و پرورش با دانشگاه ها باشند، گفت: بسترهای فعالیت های جمعی و علمی باید از پایه یعنی آموزش و پرورش آغاز شود. بر این اساس از انجمن های علمی درخواست دارم با برقرار ارتباط با دبیرستان های از دانش آموزش برای در انجمن های علمی دانشگاه ها دعوت کنند تا علاوه بر تقویت این انجمن ها زمینه نشاط علمی در بین آنها نیز فراهم شود. در این دوره از جشنواره بین المللی حرکت نیز اتحادیه مهندسی مکانیک ایران با افتخار، یکی از شش اتحادیه منتخب در بین اتحادیه های انجمن های علمی دانشجویی کشور بوده است.

نخستین رویداد هم اندیشی فناورانه دانشجویی روشنا

در این رویداد فشرده سه روزه، دبیران اتحادیه ها و انجمن های علمی دانشجویی ضمن آشنایی با زیست بوم فناوری کشور با حضور معاونین وزیر علوم، تحقیقات و فناوری، رئیس شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان و رؤسای پارک ها، از شرکت فولاد مبارکه، منتخبی از شرکت های برتر و نمایشگاه دائمی راهیان پیشرفت در شهرک بازدید کردند. این رویداد فرصتی برای ارتباط و انتقال تجربیات موفق با هدف هم افزایی و همکاری ایجاد و کارگاه های تخصصی توسعه فردی و نشست های تخصصی با حضور واحدهای فناوری و شرکت های دانش بنیان بود تا علاوه ایجاد فرصت گفت و گو و بیشتر برای خلق ایده های جدید برای حل مسائل، انگیزه لازم برای ورود به زیست بوم فناوری و نوآوری افزایش یابد. در این رویداد، دبیر محترم اتحادیه مهندسی مکانیک جناب آقای مهندس نوربخش، به ارائه تجربیات فناورانه خود پرداختند. ایشان همچنین به عنوان دبیر جلسه کارگروه مهندسی و نیز نماینده ایشان برای ارائه رویکردها و راهکارها در حضور معاونین محترم فرهنگی، اجتماعی و نیز نوآوری و فناوری در اختتامیه این مراسم به ایراد سخن پرداختند.





الیاس مرندي

کارهای عملی در مهندسی مکانیک، در بایومکانیک چگونه کار عملی انجام می‌گیرد؟

آرش نوربخش سعدآباد، دانشجوی دکتری مکانیک

- الیاس جان خودتو برای ما یه کم معرفی بکن و در چه دانشگاه‌هایی درس خوندی و توی حوزه مکانیک چه تخصص‌هایی داری را برامون بگو.
- الیاس مرندي، کارشناسی ارشد تبدیل انرژی گرفتم. قبلش توی دانشگاه بناب بودم. منتها کارشناسی بدون گرایش بود و کارشناسی ارشد گرایش تبدیل انرژی از تبریز هستم. تخصص من توی دوره کارشناسی ارشد بیشتر روی بایومکانیک بود و علی‌الخصوص روی حرکت میکروارگانیسم‌ها و سیالاتی که ابعادشون در اسکیل میکرو بود. علاوه بر اینکه مثلاً بایو کارکرده باشم روی موضوعاتی مثل انتقال حرارت و از این قبیل که با سیالات در ارتباط هست کار کردم. بیشتر تخصصم در این زمینه هست.

- در این حوزه تجربه‌ی کار عملی داشتی؟

- حالا حوزه‌ای که در واقع کار کردم بیشتر مخصوصاً توی ایران، تجهیزات کار کردن به صورت عملی زیاد در دسترس نیست به خاطر همین مخصوصاً بایو مکانیک کارها اکثراً عددی کار می‌کنن. منم بخاطر همین در این دوره بیشتر عددی کار کردم ولی خب کارهای کوچک عملی هم کردم.

- از کدوم نرم‌افزارها استفاده کردی؟

- خب این روند استفاده از نرم‌افزار طولانی بود. به نظر من، فکر می‌کنم هر دانشجویی مکانیکی که مثلاً بخواد عددی کار کنه قبلش باید کدنویسی یاد بگیره. یعنی می‌تونه استفاده کنه ولی اگه مثلاً دید کدنویسی و در واقع معادلات توی ذهنش باشه که چطوری مثلاً معادلات حل میشن این خیلی کمک می‌کنه حتی تو استفاده از نرم‌افزارهای تجاری. قبل دوره کارشناسی ارشد من بیشتر کدنویسی می‌کردم بیشتر با متلب بود. در کنارش نرم‌افزار کامسول را شروع کردم به یادگیری تو دوره کارشناسی ارشد، به خاطر این که زمینه کاریم بایو مکانیک بود. در واقع بایو مکانیک و سیالات میکرو، حرکت میکروارگانیسم داخلی سیال بود. موضوع جوئی بود که می‌شد در واقع یک مساله‌ی تقابل سیال با جامد در نظر گرفت و نرم‌افزار کامسول یکی از بهترین نرم‌افزارها برای شبیه‌سازی مسایل اف اس ای یا fluid solid interaction هست. به خاطر همین من تصمیم گرفتم به صورت تخصصی‌تر با نرم‌افزار کامسول پیش ببرم. مسیر یادگیری یکم طولانی بود و برای من به صورت حالت آزمون و خطا بود. چون منابع آموزشی برای این موضوع تخصصی زیاد نیست. اون منابعی که هست بیشتر اون مسایل رایج و معمولی هستن.

روند یادگیری به این صورت بود که مثلاً مسایل مشابه اف اس ای و مسایل مختلف، مثل حرکت یک توپ توی سیال یا مثلاً حرکت غشاهای انعطاف‌پذیری داخل سیال و خوندن مقالات مختلف مخصوصاً اون مقالات مختلف در مورد اف اس ای، خیلی کمک کرد. در نهایت میتونم بگم حالا به اون تسلط کافی رسیدم. علاوه بر شاخه مدنظر خیلی از شبیه‌سازی‌ها و آموزش‌ها در زمینه بیومکانیک و حوزه انتقال حرارت هم یاد گرفتم. نرم‌افزارهای کنسول یه ویژگی خوبی که داره، فیزیک‌های مختلف خیلی راحت با همدیگه کوپل میشن و با ایده و خلاقیت خودت میتونی مسایل مختلفی ایجاد کنی و نتایج خیلی جالبی به دست بیاری.

- ویژگی‌های کامسول چی بود که تو را ترغیب کرد مثلاً به جای استفاده از فلوئنت از کامسول استفاده کنی؟

- به نظر من بهترین و برترین ویژگی مثبت نرم‌افزار کامسول سادگی و اون فضای کاربری و گرافیک نرم‌افزاری هست که خیلی کار را برای کاربر آسون میکنه. مثلاً تقریباً همیشه با مقایسه دید که خود نرم‌افزار انسیس هم توی چینش فضای کاربری نرم‌افزار سعی کرده در ورژن‌های جدیدش شبیه کامسول باشه. در کل کوپلینگ بین فیزیکی‌ها و شبیه‌سازی مولتی فیزیک در نرم‌افزار کامسول خیلی راحت‌تر و بهتر از نرم‌افزارهایی مثل انسیس هست. به خاطر همین من به سمت کامسول جذب شدم.

- در مورد کوپلینگ صحبت کردی. هندسه مستلثو در کدام نرم‌افزار رسم میکردی؟ یا از خود کامسول استفاده میکردی؟

- خب هندسه توی کامسول، در واقع اون نرم‌افزار که کامسول برای تولید هندسه زیاد خوب نیست ولی همیشه حالا تا حدودی با توجه به اون هندسه‌ای که لازم داریم شبیه‌سازی کنیم. اگه تو خود کامسول شبیه‌سازی کنیم بهتره، چون ارور کمتری میده. ولی برای مسائل پیچیده و بایو مکانیک، که هندسه‌ی خیلی پیچیده‌ای داره، مثلاً فرض کنی شبیه‌سازی یک رگ یا یک دریچه‌ی قلب همیشه از تصاویر ام آر آی و سی تی اسکن استفاده کرد. ین کاربران ایرانی میمیکس هست و از اون برای استخراج هندسه استفاده میشه. یا حتی خود نرم‌افزار سالیدورک، همه‌ی این هندسه‌ها را همیشه داخل کامسول وارد کرد. منتها اون تنظیمات ایمپورت را باید دقت کرد که مثلاً جزییاتش را ایمپورت پایین نیاره. چون اگه هندسه تون از کیفیت خوبی برخوردار نباشه توی مش زنی و و در ادامه روند حل مساله ممکنه خطاهای زیادی به ما نشون بده.

- خودت تا حالا با مشکل لینک کردن روبه‌رو بودی؟

- در حالت کلی میگم بیشتر من اون یادگیری از همین روش آزمون و خطا به دست آوردم. مثلاً برای ایمپورت هندسه، یه هندسه را ایمپورت می‌کردم توی مش بندی مشکلی نبود ولی حین ران کردن، بعد یه مدتی خطا دیده میشد. تنظیماتو دوباره تغییر می‌دادم که به اون نتیجه‌ی مطلوب برسم میدیدم کیفیت در ایمپورت کاهش پیدا کرده. در کوپلینگ همین هست مثلاً فرض می‌کنیم ما خواهیم ما فیزیک سیالات با فیزیک انتقال حرارت کوپل کنیم یه سری تنظیمات لازمه که مثلاً برای فشار و دما از کدام فیزیک به دست بیاد مهمه. سرعتمون از کدوم فیزیک دست بیاد. این تنظیمات بیشتر به صورت آزمون خطا هست

- صحت سنجیت چطور اتفاق می افتاد؟

- برای عددی کار کردن ولیدیشن اصل اساسی هست. قبل از اینکه اون هندسه پیچیده را شبیه‌سازی کنیم باید یه هندسه‌ی ساده‌ای که مثلاً توی کتاب‌ها یا به صورت تجربی و آزمایشگاهی انجام شده و نتایج در دسترس هست اون و باید انجام بدیم. و اگر اون نتایجی که از کوپلینگ بدست آوردیم خطای قابل قبولی داشت می‌تونیم ادعا کنیم که برای شبیه‌سازی خودمونم درسته.

- تشکر و سپاس
- ممنون از شما.

یک اختراع به طور کلی به عنوان یک راه حل جدید و مبتکرانه برای یک مشکل فنی شناخته می‌شود. این راه حل ممکن است شامل ایجاد یک دستگاه، محصول، روش، یا فرآیند کاملاً جدید باشد، یا ممکن است تنها یک بهبود جزئی در یک محصول یا فرآیند شناخته شده باشد. اختراع حاصل تفکر یک یا چند نفر است که اولین کسانی هستند که یک فرآیند یا محصول خاص را معرفی کرده و مشکلی را در یک حرفه، هنر، تکنولوژی، صنعت و غیره حل می‌کنند.

اگر پروژه الزامات تعیین شده توسط قانون ثبت اختراعات را برآورده کند، توسط آن کشور حمایت شده و مخترع یک حق اختراع دریافت می‌کند. طبق قانون، دارنده اختراع از حقوق ویژه برخوردار است. پس از ثبت اختراع، اسناد و مشخصات ثبت اختراع در دسترس عموم قرار می‌گیرد و پتنت‌های ثبت شده از طریق وب سایت و منابع مختلف قابل دسترسی هستند.

اختراع چیست؟

منیره خیردیده

موسسه آموزش عالی ابرار



اختراع یا پتنت

تفاوت بین اختراع و پتنت در ماهیت و حمایت قانونی آنها است. در حقیقت می‌توان گفت معنی دیگر واژه پتنت، حق ثبت اختراع است. اختراع یک محصول یا فرآیند جدید است، در حالی که پتنت نوعی حمایت قانونی برای یک اختراع است. هنگامی که یک پتنت به یک اختراع اعطا می‌شود، مخترع برای مدت محدودی مالک آن حق اختراع می‌شود که طی آن می‌توان مالکیت را منتقل کرد. در مقابل، مخترع مالک فکری اختراع است و مالکیت آنها مادام‌العمر و غیرقابل انتقال است. پتنت حقوق انحصاری را برای مخترع برای مدت محدود، معمولاً ۲۰ سال از تاریخ ثبت، فراهم می‌کند تا از ساخت، استفاده یا فروش اختراع توسط دیگران بدون اجازه جلوگیری شود.

چه مواردی را می‌توان ثبت اختراع کرد؟

یک اختراع بایستی الزامات متعددی را رعایت نماید تا حائز شرایط لازم برای حمایت باشد.

برخی از این الزامات عبارت‌اند از:

- * جدید بودن در سطح دنیا: طرح مورد نظر باید جدید باشد و قبلاً افشا نشده باشد.
- * قابلیت ساخت و اجرا: قابلیت ساخت و اجرا در شرایط حقیقی را داشته باشد.
- * در تقاضانامه اختراع به طور شفاف و کامل بیان شده باشد.

چه مواردی را نمی‌توان ثبت اختراع کرد؟

باید توجه شود که برخی از چیزهایی که به ظاهر نوآورانه هستند، قابلیت ثبت اختراع ندارند مانند:

- کشفیات
- روش‌ها و استراتژی‌های انجام فعالیت‌های فکری
- کشف موادی که به طور عادی در طبیعت یافت می‌شوند
- مواردی که برخلاف اخلاق عمومی هستند

چرا باید ثبت اختراع داشته باشیم؟

- * حفاظت قانونی از ایده به منظور جلوگیری از کپی یا سرقت آن
- * امکان دریافت بورسیه مالی
- * برتری در بازار فروش
- * در کشورهای مختلف، مزایای مختلفی را به مخترعین اختصاص می‌دهند
- * افزایش شهرت بین‌المللی
- * ایجاد رزومه بسیار قوی به منظور مهاجرت، اپلای، جذب شغل و...
- * اغلب یک اختراع از یک مقاله ISI نیز با ارزش تر است.



تازه‌های فناوری

آرش نوربخش سعداباد، مهدی نامی خلیله‌ده
دانشجوی دکتری تخصصی مکانیک، دانشگاه تبریز

مشخصات و خلاصه فناوری:

شرکت MBDA که یک شرکت اروپایی تولیدکننده ی موشک می‌باشد [۱]، که یک سیستم محافظت از خود را برای تجهیز کشتی‌های سطحی بدون سیستم جنگی ساخته است که در نمایشگاه ناودکس در سال ۲۰۱۹ در ابوظبی امارات متحده عربی رونمایی خواهد شد [۲]. این سیستم SPIMM یا ماژول یکپارچه محافظت از خود نام دارد [۳]. ماژول SPIMM شامل یک برجک اتوماتیک SIMBAD-RC مجهز به دو موشک آماده میسترال و سیستم پانورامای مادون قرمز برای شناسایی و ردیابی تهدیدات هوا و سطحی است [۴]. این سیستم به طور کامل توسط دو اپراتور مستقر در قسمت محافظ درون ماژول کنترل می‌شود که هم-چنین از این فضا برای انبار چهار موشک اضافی نیز استفاده می‌گردد [۵]. این ماژول دارای طول ۳ متر و وزن حدود ۷ تن بوده که می‌تواند با استفاده از یک جرثقیل به راحتی بر روی عرشه کشتی قرار گیرد و برای کارکرد، فقط به یک اتصال برق نیاز خواهد داشت [۶].

زیر فناوری‌ها:

۱) موشک‌های استفاده شده در این ماژول از نوع میسترال می‌باشند که یک موشک قابل حمل توسط انسان (وزن ۱۹۷ کیلوگرم، طول ۱۸/۸۶ متر و قطر ۹۰ میلی‌متر)، کاملاً دیجیتال و دارای سیستم رهگیری هدف گرمایشی است که برای استفاده در تمام شاخه‌های نیروهای مسلح طراحی شده است [۷]. حسگرهای حرارتی نصب شده بر قسمت کلاهک این موشک‌ها، می‌توانند تفاوت انرژی گرمایی ساطع شده بین هدف و محیط را حس کنند (بر اساس تفاوت موج مادون قرمز IR) ساطع شده و بنابراین توانایی رهگیری گرمایشی را به این نوع از موشک می‌دهد [۸-۹]. حسگرهای حرارتی استفاده شده در این نوع از موشک، برخلاف تکنولوژی سنتی استفاده شده در حسگرهای حرارتی مادون قرمز، مجهز به قابلیت پردازش تصویر نیز می‌باشند، که باعث می‌شود اهداف مورد تعقیب نتوانند با استفاده از شعله‌های فریب‌دهنده از برخورد این موشک‌ها در امان باشند [۱۰].

۲) این ماژول از برجک اتوماتیک SIMBAD-RC استفاده می‌نماید که دارای وزن ۵۰۰ کیلوگرم و قابلیت دفاعی بسیار موثر در برابر انواع تهدیدات شامل موشک‌های ضدکشتی، هواپیماهای جنگی، هواپیماهای بدون سرنشین و هلیکوپترها می‌باشد [۱۱]. این برجک از راه دور کنترل می‌شود، به این معنی که اپراتورها می‌توانند موشک را بدون قرار گرفتن در معرض خطر شلیک نماید [۱۲].

۳) یک سیستم دوربین ۳۶۰ درجه پانورامیک مادون قرمز هدف‌ها را تشخیص داده و موشک‌ها را شلیک می‌کند. هر موشک میسترال، که دارای حداکثر برد ۶ کیلومتر است، پس از شلیک شدن با استفاده از سنسور حسگر حرارتی، هدف را ردیابی می‌کند [۱۰]. مزیت استفاده از این نوع از دوربین در آن است که کارکرد بر مبنای تکنولوژی مادون قرمز، برخلاف دوربین‌های سنتی، قابلیت تشخیص هدف در شرایط نور ضعیف را به ماژول می‌دهد [۱۳].

کاربردها:

۱) این ماژول باعث می‌شود، کشتی‌های غیرنظامی باری یا مسافربری که قرار است به ناحیه‌ای پرخطر فرستاده شوند را بتوان با سرعت مجهز به یک سیستم دفاعی نموده تا برون بی‌نیاز گردد [۱۴].

۲) توانایی خنثی‌سازی تهدیدات نامتقارن مانند کشتی‌های سریع حمله ساحلی (FIAC) در شرایط روز و شب دارا می‌باشد [۱۵]. چراکه قابلیت حسگرهای حرارتی مادون قرمز مجهز به امکان پردازش تصویر، امکان ردیابی

منابع:

- [۱]: <https://www.mbd-systems.com/about-us/>
- [۲]: <https://www.naval-technology.com/news/mbda-ship-self-protection-module/>
- [۳]: http://www.defenseworld.net/news/۲۴۳۱/MBDA_Unveils_Self_Protection_Module_For_Surface-Ships#.XHlImYgzZEY
- [۴]: <https://www.mbd-systems.com/press-releases/mbda-unveils-the-spimm-the-self-protection-module-for-surface-ships/>
- [۵]: <https://ukdefencejournal.org.uk/meet-spimm-a-self-protection-module-for-ships/>
- [۶]: <https://militaryleak.com/۲۰۰۲/۲۰۱۹/mbda-unveils-the-spimm-self-protection-integrated-mistral-module/>
- [۷]: <https://www.mbd-systems.com/product/mistral-anpads/>
- [۸]: Ab-Rahman, M.S. and M.R. Hassan. Lock-on range of infrared heat seeker missile. in ۲۰۰۹ International Conference on Electrical Engineering and Informatics. ۲۰۰۹. IEEE.
- [۹]: Glasgow, B. and W. Bell. The future of anti-aircraft imaging infrared seeker missile threats. in ۱۹۹۹ IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. ۹۹TH۱۹۹۹. ۸۴-۳. IEEE.
- [۱۰]: <http://www.thedrive.com/the-war-zone/۲۶۵۹۹/this-containerized-missile-launcher-could-give-almost-any-ship-short-range-air-defenses>
- [۱۱]: <https://www.mbd-systems.com/wp-content/uploads/۰۷/۲۰۱۵/SIMBAD-RC.pdf>
- [۱۲]: <https://www.defensenews.com/global/europe/۰۹/۰۱/۲۰۱۹/mbda-says-its-mistral-missile-can-also-blow-up-small-boats/>
- [۱۳]: Wong, W.K., et al., Omnidirectional surveillance system using thermal camera. ۲۳۳. ۲۰۱۰. p. ۵۱-۴۲.
- [۱۴]: <https://navaltoday.com/۱۸/۰۲/۲۰۱۹/navdex-mbda-unveils-mistral-missile-launcher-module-spimm/>
- [۱۵]: <https://www.shephardmedia.com/news/imps-news/mbda-unveils-spimm/>
- [۱۶]: <http://www.dmitryshulgin.com/tag/simbard-rc/>
- [۱۷]: <http://www.asdnews.com/news/defense/۱۸/۰۲/۲۰۱۹/mbda-packs-fully-integrated-air-defence-capability-light-armoured-vehicles>

تحلیل ترمو اکونومیک و بهینه سازی چند هدفه یک سیستم راندمان بالا بر مبنای چرخه های توربین گاز و رانکین مجهز به ژنراتور ترمو الکتریک

آرش نوربخش سعدآباد | دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 سالار رادمان | دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
 فرامرز نجبر | استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 مهدی نامی خلیله ده | دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران



چکیده

افزایش روزافزون مصرف انرژی، باعث به کارگیری منابع انرژی تجدید پذیر به منظور کاهش آلودگی های زیست محیطی و جلوگیری از گرمایش زمین شده است. کار حاضر باهدف ارائه و بررسی یک چرخه ترکیبی جدید بر اساس توربین گازی با سوخت بیوگاز انجام شده و با توجه به دمای بالای خروجی از توربین گاز، یک چرخه رانکین بخار مجهز به آبگرمکن تغذیه باز و ژنراتور ترمو الکتریک به عنوان چرخه زیرین با آن ترکیب شده است. سیستم موردنظر بر اساس متغیرهای نسبت تراکم کمپرسور هوا و بازده دمای پیش گرمکن مورد بررسی قرار گرفته و از دیدگاه ترمودینامیکی و ترمو اکونومیک تحلیل شده است. همچنین سیستم موردنظر با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در نرم افزار EES، بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه شده است. نتایج نشان داد، راندمان های حرارتی و انرژی در حالت پایه به ترتیب برابر ۴۴/۵۸ و ۴۲/۳۸ درصد و در حالت بهینه ترمو اکونومیک به ترتیب ۴۹/۴۵ و ۴۷/۰۱ درصد هستند. علاوه بر این هزینه تراز شده الکتریسیته در حالت بهینه چند هدفه ۱۷/۵۰ دلار بر گیگاوات ساعت محاسبه شد که نسبت به حالت پایه ۵/۱۰ درصد کاهش می یابد.

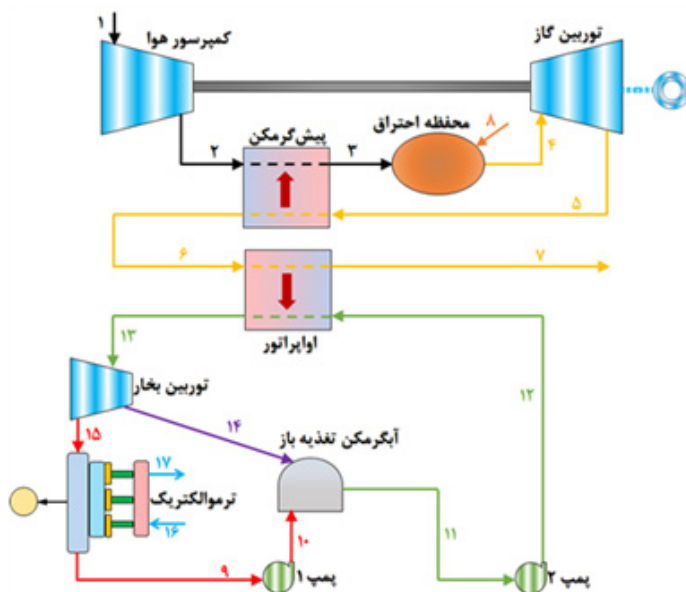
واژه های کلیدی: توربین گاز، بیوگاز، تحلیل ترمو اکونومیک، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، تقاضای انرژی و حفاظت از محیط زیست بسیار اهمیت یافته به طوری که رشد جمعیت منجر به افزایش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش آلودگی محیط زیست شده است؛ بنابراین، بهره برداری مؤثر از منابع تجدید پذیر و استفاده از این منابع بجای سوخت های فسیلی نیز مورد علاقه پژوهشگران قرار گرفته است. اخیراً، بسیاری از پژوهشگران سوخت رسانی به سیستم های تولید برق مانند توربین گازی، سلول سوختی و موتورهای احتراق با بیوگاز را به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر مورد مطالعه قرار داده اند. علاوه بر این، در نظر گرفتن مزایای بیوگاز مانند کاهش آلودگی آب و خاک و جلوگیری از بروز مشکلات سلامتی، این سوخت را سودمندتر می کند. بدیهی است، ضرورت پیشگیری از آلودگی های مضر بیوگاز (مانند هیدروژن سولفید، سیلوکسان د-۴ و سیلوکسان د-۵) قبل از تزریق سوخت به سیستم های قدرت، غیر قابل انکار است [۱]. بیوگاز تولید شده در فاضلاب و محل های دفن زباله عمدتاً از متان تشکیل یافته و یکی از ویژگی های این سوخت که باعث سازگاری آن با محیط زیست می شود، جذب بخشی از دی اکسید کربن در فرآیند تولید بیوگاز توسط محصولات زراعی است [۲]. یکی دیگر از مزایای بیوگاز، قابلیت ذخیره سازی بوده که توانایی استفاده آن را در شرایط مختلف فراهم می کند [۳]. سایر اجزای بیوگاز شامل دی اکسید کربن، نیتروژن و سولفید هیدروژن هست.

۲- تشریح سیستم

شکل ۱ نمایش دهنده سیستم تولید توان مبتنی بر توربین گاز تغذیه شده با بیوگاز است که با چرخه رانکین بخار ترکیب شده است. هوا حاوی ترکیبات نیتروژن، اکسیژن، بخار آب و دی اکسید کربن در شرایط محیطی (حالت ۱) وارد کمپرسور هوا شده و طی مرحله تراکم، فشار و دمای آن افزایش پیدا می کند (حالت ۲). هوای متراکم از یک پیش گرمکن هوا عبور کرده و با افزایش دما وارد محفظه احتراق (حالت ۳) و اکندش داده و از آن خارج می شوند. سپس محصولات احتراق در دمای بالا وارد توربین گاز شده و طی انبساط فشار آن کاهش می یابد و وارد پیش گرمکن هوا می شود تا مقداری از حرارت خود را انتقال دهد. باید توجه داشت که هنوز دمای گازهای خروجی بالا هست؛ بنابراین به منظور جلوگیری از تخلیه مستقیم این گازها به محیط، از چرخه رانکین بخار به عنوان سیستم زیرین استفاده شده است. چرخه های مذکور به واسطه اواپراتور باهم ترکیب شده اند. بخار آب فوق بحرانی خروجی از اواپراتور نسبت به گازهای خروجی توربین گاز (حالت ۶) به اندازه ۳۰ کلون اختلاف دما دارد. این بخار وارد توربین بخار شده و ابتدا در فشار ۱۲ بار مقداری از آن زیرکش شده (حالت ۱۴) و وارد آبگرمکن تغذیه باز می شود، همچنین جرم باقیمانده در فشار ژنراتور ترموالکتریک از توربین بخار خارج می شود (حالت ۱۵). از ژنراتور ترموالکتریک به منظور تولید توان استفاده شده است. جریان جرمی عبوری از ژنراتور ترموالکتریک در حالت مایع اشباع وارد پمپ ۱ شده و سپس با جریان زیرکش در فشار یکسان در آبگرمکن تغذیه باز اختلاط پیدا می کند و در حالت مایع اشباع از آن خارج و با عبور از پمپ ۲ وارد اواپراتور می شود.



شکل ۱- طرحواره از سیستم ترکیبی توربین گاز/رانکین بخار

فرضیات در نظر گرفته شده برای طراحی عملکرد سیستم مطابق زیر است [۱۶-۱۹]:

- (۱) تحلیل عملکرد سیستم در شرایط پایا انجام شده است.
 - (۲) توربین ها، پمپ ها و کمپرسور با استفاده از بازده آیزنتروپیک طراحی شده است (جدول ۲).
 - (۳) افت فشار در محفظه احتراق ۴ درصد است.
 - (۴) هدررفت حرارتی در محفظه احتراق ۲ درصد است.
 - (۵) بیوگاز حاوی ۶۰ درصد متان و ۴۰ درصد دی اکسید کربن است.
 - (۶) افت فشار پیش گرمکن به مقدار ۵ درصد است.
 - (۷) ترکیبات هوا شامل ۷۷/۴۸ درصد نیتروژن، ۲۰/۵۹ درصد اکسیژن، ۰/۳ درصد دی اکسید کربن و ۱/۹ درصد بخار آب است.
- داده های ورودی مورد نیاز برای طراحی سیستم پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است.

در زمینه ی توربین های گازی تغذیه شده با بیوگاز، بسیاری از پژوهشگران تمرکز خود را بر روی سیستم های تولید هم زمان توان و گرمایش یا توان و سرمایش گذاشتند. به همین منظور دبائر و ماتیوس [۴] در یک کارخانه تصفیه فاضلاب شهری در اسپانیا با الگوهای مختلفی میکرو توربین گاز را با چیلر جذبی ترکیب کرده و مورد تحلیل قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند که بهترین الگو، ساختاری هست که به منظور تولید سه گانه به کار رود و تمام بیوگازهای قابل دسترس مصرف شود. در حالت تولید هم زمان توان و گرمایش، جانگ و همکاران [۵] به بررسی تأثیر بیوگاز بر روی عملکرد توربین گاز همراه با بازیاب پرداختند، نتایج آن ها نشان داد که با افزایش مقدار متان موجود در بیوگاز، توانایی سیستم در بازیابی حرارت نیز می تواند افزایش یابد. کانگ و همکاران [۶] ارزیابی اقتصادی یک سیستم تولید هم زمان توان و گرمایش مبتنی بر سوخت بیوگاز را با ظرفیت ۵ مگاوات به منظور مقایسه با چرخه ترکیبی انجام دادند. نتایج آن ها نشان دهنده مقرون به صرفه بودن سیستم تولید هم زمان توان و گرمایش نسبت به چرخه ترکیبی برای دوره بهره برداری ۲۰ سال بود. یکی دیگر از سیستم های تولید هم زمان توان و گرمایش مبتنی بر توربین گاز با استفاده از ترکیب سوخت بیوگاز و گاز طبیعی توسط زارع و همکاران [۷] پیشنهاد شده است. آن ها به منظور بررسی عملکرد سیستم با استفاده از سوخت ترکیبی، تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی انجام دادند. یک سیستم تولید هم زمان توان / سرمایش بر مبنای توربین گاز با سوخت بیوگاز توسط جباری و همکاران [۸] ارزیابی شد تا حداقل هزینه کل سیستم پیشنهادی محاسبه شود و همچنین نشان دادند که این سیستم توانایی تأمین برق مورد نیاز چیلر و ساختمان را دارد. بال افکنده و همکاران [۹] سیستم ترکیبی شامل توربین گاز و چرخه S-CO₂ با سوخت بیوگاز به منظور تولید سرمایش، گرمایش و توان پیشنهاد کرده و نشان دادند که بیشترین راندمان آگزری ۸/۴۷ درصد است. بر اساس مقالات چاپ شده، چرخه توربین گاز به عنوان سیستم تولید توان خیلی مورد توجه است که توانایی اجرا با سوخت بیوگاز را نیز دارد. صومعه سرائی و همکاران [۱۰] یک مدل ترمودینامیکی برای میکرو توربین گاز با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات ارائه داده اند. آن ها نشان دادند که سیستم برق تغذیه شده با بیوگاز قابل دوام بوده و با کاهش درصد متان بیوگاز، راندمان الکتریکی کاهش می یابد. تأثیر ترکیب بیوگاز بر روی عملکرد توربین گاز توسط بارزگاراوال و همکاران [۱۱] بررسی شده است، آن ها نشان دادند که غلظت متان موجود در بیوگاز تأثیر جزئی در هزینه تمام شده مبتنی بر آگزری سیستم مورد نظر دارد. قلیزاده و همکاران [۱۲] سیستم ترکیبی توربین گاز/رانکین را با استفاده از سوخت بیوگاز مورد بررسی قرار دادند و از دو نوع چرخه رانکین استفاده کردند، نتایج آن ها نشان داد که راندمان آگزری سیستم ترکیب شده با رانکین مجهز به بازیاب ۳۸/۹۱ درصد است. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مخلوط گاز طبیعی و بیوگاز بر عملکرد میکرو توربین گاز ۱۰۰ کیلووات، توسط نیک پی و همکاران [۱۳] انجام شد. در شرایط کار با بار کامل، آن ها دریافتند که مخلوط سوخت می تواند حدود ۲۰ درصد از انتشار CO₂ را کاهش دهد. همچنین ترکیب چرخه توربین گاز با چرخه رانکین پایه و اصلاح شده در کارهای متفاوتی بررسی شده است [۱۴ و ۱۵].

مطالعه و بررسی مقالات چاپ شده مبتنی بر توربین گاز تغذیه شده با بیوگاز، حاکی از تمرکز پژوهشگران بر روی چرخه های زیرین ترکیبی با این سیستم است. اکثراً پژوهشگران برای بهبود عملکرد سیستم از انواع مختلف چرخه رانکین استفاده کرده اند. باید توجه داشت که در کارهای قبلی دماهای ورودی به محفظه احتراق و توربین گاز به عنوان ورودی مشخص بوده و همین امر سبب پایین تر بودن راندمان چرخه توربین گاز شده است. در این مقاله چرخه توربین گاز با ظرفیت تولید توان ۱۰۰۰ کیلووات از دیدگاه دیگری مورد بررسی قرار گرفته و همچنین از گازهای خروجی از توربین گاز برای تولید توان در چرخه رانکین بخار مجهز به آبگرمکن تغذیه باز و ژنراتور ترموالکتریک استفاده شده است. نوآوری های موجود در کار حاضر شامل موارد زیر است:

- (۱) به کارگیری پیش گرمکن هوا به منظور افزایش دمای هوای ورودی به محفظه احتراق و طراحی آن با استفاده از بازده دمای پیش گرمکن
- (۲) طراحی بهینه محفظه احتراق برای بیشترین بازده با استفاده از نسبت هوا به سوخت معلوم
- (۳) استفاده از ژنراتور ترموالکتریک به منظور تولید توان
- (۴) تحلیل ترمو اکونومیک سیستم پیشنهادی به منظور بررسی هزینه واحد تولید توان
- (۵) استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی های تک هدفه و چند هدفه سیستم پیشنهادی

انتقال حرارت موجود در محفظه احتراق برابر است:

$$\dot{Q}_{c,v} = -0.02 \dot{n}_f \overline{LHV} \quad (4)$$

آنتالپی بیوگاز با توجه به درصد متان و دی اکسید کربن موجود به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{h}_{biogas} = 0.4 \bar{h}_{CO_2} + 0.6 \bar{h}_{CH_4} \quad (5)$$

ارزش حرارتی پایین بیوگاز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} LHV_{biogas} &= H_p - H_{react} = \\ \sum N_p \bar{h}_{f,p}^\circ - \sum N_{react} \bar{h}_{f,react}^\circ &= \\ (N_p \bar{h}_f)_{CO_2} + (N_p \bar{h}_f)_{H_2O} - (N \bar{h}_f)_{CH_4} - (N_{react} \bar{h}_f)_{CO_2} \end{aligned} \quad (6)$$

۳-۲ مدل سازی ژنراتور ترموالکتریک

ژنراتور ترموالکتریک دستگاهی برای تبدیل مستقیم حرارت به توان است. قاعده اصلی TEG بر اساس اثر سیبک بوده و به دلیل اختلاف دمای موجود در دو طرف TEG، توان الکتریکی تولید می شود [۲۴]. عملکرد TEG، معمولاً بر اساس مدل واحد تولید الکتریسیته داخل ترموالکتریک و با استفاده از معادلات زیر ارزیابی می شود [۱۸ و ۲۵]:

$$\begin{aligned} \eta_{TEG} &= \eta_{Carnot} \frac{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}{\sqrt{1 + ZT_M} + \frac{T_L}{T_H}} \\ \eta_{Carnot} &= 1 - \frac{T_L}{T_H} \end{aligned} \quad (7)$$

۳-۳ تحلیل انرژی و آگرژی

برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی معادله تعادل جرم و همچنین قانون اول برای هر جزء به صورت زیر تعریف می شود [۲۶]:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (8)$$

$$\sum (\dot{m}h)_{in} - \sum (\dot{m}h)_{out} + \sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} - \dot{W} = 0 \quad (9)$$

آگرژی به صورت بیشترین توان مفید گرفته شده از سیستم تعریف می شود. نرخ آگرژی هر جریان مجموع نرخ آگرژی فیزیکی و شیمیایی است [۲۷]:

$$\dot{E} = \dot{E}_{Ph} + \dot{E}_{Ch} \quad (10)$$

آگرژی فیزیکی نیز برابر است [۲۸]:

$$\dot{E}_{Ph} = \sum_i \dot{m}_i (h_i - h_0 - T_0 (s_i - s_0)) \quad (11)$$

که h و s به ترتیب نشان دهنده آنتالپی و آنتروپی مخصوص است، h_0 و s_0 متغیرها در حالت محیطی مرجع (P_0, T_0) هستند. همچنین آگرژی شیمیایی هر جزء با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\dot{E}_{Ch} = \dot{n}_i \left(\sum_i y_i \bar{c}_i^{ch,0} + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \right) \quad (12)$$

۳-۴ ارزیابی عملکرد

با توجه به داده های ورودی در جدول ۱، راندمان حرارتی و آگرژی کل سیستم پیشنهادی با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (13)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{in}} \quad (14)$$

که $\dot{W}_{net}$ نشان دهنده توان تولیدی است و به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{ST} - \dot{W}_{pu,1} - \dot{W}_{pu,2} + \dot{W}_{TEG} \quad (15)$$

۳-۵ ارزیابی اقتصادی

مدل اقتصادی برای ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی با استفاده از پارامترهای مورد نظر صورت گرفته است. هدف در این بخش محاسبه هزینه تراز شده الکتریسیته (LCOE) به عنوان یک شاخص خوب برای تجزیه و تحلیل امکان سنجی و مقایسه سیستم های تبدیل انرژی از دیدگاه اقتصادی است. برای یک سیستم تولید برق LCOE

جدول ۱- متغیرهای ورودی برای مدل سازی سیستم [۲۰ و ۲۲]

متغیر	علامت اختصاری و یگا	مقدار
دمای محیط	TO (K)	۲۹۸
فشار محیط	PO (bar)	۱/۰۱۳
نسبت تراکم کمپرسور هوا	PR (-)	۱۰
بازده دمای پیش گرمکن	ε (-)	۰/۸
بازده آیزنتروپیک توربین گاز	is,GT (-) η	۰/۸۶
بازده آیزنتروپیک توربین بخار	is,ST (-) η	۰/۸۵
بازده آیزنتروپیک پمپ ها	is,pu (-) η	۰/۹۰
بازده آیزنتروپیک کمپرسور	is,AC (-) η	۰/۸۶
فشار اواپراتور	P13 (bar)	۱۷۰
فشار زیرکشی توربین	P14 (bar)	۱۲
فشار ژنراتور ترموالکتریک	P9 (bar)	۰/۵
دمای آب خنک کننده	T16 (K)	۲۹۸
کندانسور		
اختلاف دمای موجود در اواپراتور	ΔTPP (K)	۳۰
توان تولیدی کل چرخه توربین گاز	$\dot{W}_{net,GT}$ (kW)	۱۰۰۰
نرخ بهره	ir (%)	۱۰
طول عمر سیستم	n	۲۰
ضریب نگهداری	ϕ	۱/۰۶
ساعت اجرایی سالانه	τ	۷۴۴۶

۳-۳ مدل سازی سیستم

برای ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی ارائه مدل ترمودینامیکی برای سیستم بسیار مهم است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، سیستم تولید توان، پیشنهادی از چندین جزء تشکیل شده که می توان آن ها را به عنوان حجم کنترل، به صورت جداگانه در نظر گرفت. معادلات تعادل جرم و انرژی برای هر حجم کنترل اعمال می شود. محفظه احتراق یک جزء اصلی سیستم پیشنهادی است، بنابراین پیش بینی، عملکرد آن باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه مدل سازی محفظه احتراق بیان خواهد شد.

۳-۱ مدل سازی محفظه احتراق

نسبت مولی سوخت به هوا شامل نرخ مولی سوخت ($\dot{n}_f$)، نرخ مولی محصولات احتراق ($\dot{n}_p$) و نرخ مولی هوا ($\dot{n}_{air}$) است که مطابق معادلات زیر به هم وابسته هستند [۲۳]:

$$\bar{\lambda} = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_{air}} \quad \text{یا} \quad \frac{\dot{n}_p}{\dot{n}_{air}} = 1 + \bar{\lambda} \quad (1)$$

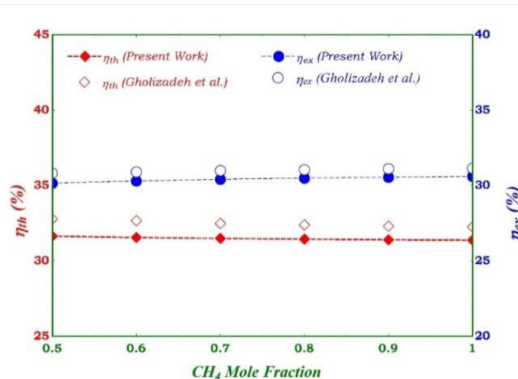
معادله شیمیایی واکنش احتراق بر مبنای نرخ سوخت به هوا به صورت زیر تعریف می شود [۲۳]:

$$\begin{aligned} &\bar{\lambda} [0.6CH_4 + 0.4CO_2] + \\ &[0.7748N_2 + 0.2059O_2 + 0.0003CO_2 + 0.019H_2O] \\ &\rightarrow [1 + \bar{\lambda}] [Y_{N_2}N_2 + Y_{O_2}O_2 + Y_{CO_2}CO_2 + Y_{H_2O}H_2O] \end{aligned} \quad (2)$$

کسر مولی خروجی های احتراق با استفاده از معادلات تعادل کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} Y_{N_2} &= \frac{0.7748}{1 + \bar{\lambda}}; Y_{O_2} = \frac{0.2059 - 1.2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \\ Y_{CO_2} &= \frac{0.0003 + \bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}}; Y_{H_2O} = \frac{0.019 + 1.2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \end{aligned} \quad (3)$$

بنابراین برای درستی طراحی انجام شده ابتدا اعتبارسنجی صورت گیرد با توجه به شکل ۲، برای چرخه توربین گاز در شرایط عملکردی یکسان، راندمان‌های حرارتی و آگزروی سیستم با نتایج کار قلیزاده و همکاران [۱۲] مقایسه شده که اعتبارسنجی دقت بالایی دارد.



شکل ۲- مقایسه نتایج راندمان‌های حرارتی و آگزروی برای سیستم توربین گاز با مقاله قلیزاده و همکاران [۱۲]

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مطالعه پارامتریک

در این بخش، نتایج مدل‌سازی سیستم پیشنهادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. قبل از مطالعه پارامتریک، نرخ هزینه هر جزء سیستم به ترتیب در جدول ۳ آورده شده است. نرخ هزینه‌های هر جزء سیستم پیشنهادی در حالت پایه با توجه به داده‌های موجود در جدول ۱ به دست آمده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ هزینه کمپرسور نسبت به بقیه اجزای سیستم بیشتر است. همچنین جدول ۴ نشان‌دهنده خروجی‌های سیستم در حالت پایه است.

جدول ۳- نرخ هزینه هر جزء سیستم

اجزا	نرخ هزینه (\$/h)
کمپرسور هوا	۲/۸۸۴
محفظه احتراق	۰/۱۰۳۱
پیش گرمکن هوا	۰/۰۸۳۹۸
توربین گاز	۱/۱۹۳
اواپراتور	۰/۰۹۸۸۳
توربین بخار	۱/۳۷۸
ژنراتور	۰/۲۱۷
ترموالکتریک	۰/۰۰۲۹
پمپ ۱	۰/۰۰۶۱
پمپ ۲	۰/۰۰۶۱

به صورت تعریف شده است [۲۹]:

$$LCOE = \frac{CRF \cdot Z_{investment} + Z_{O\&M} + Z_{fuel}}{\tau \times \dot{W}_{net}} \quad (16)$$

$Z_{investment}$ هزینه کل سرمایه‌گذاری شده است و $Z_{O\&M}$ هزینه اجرایی و نگهداری سالانه است. Z_{fuel} به معنی هزینه سوخت سالانه است که در این مقاله هزینه بیوگاز بوده و برابر ۷/۳۶ دلار بر گیگاژول است [۱۲]. CRF ضریب بازایی سرمایه را نشان می‌دهد [۲۹]:

$$CRF = \frac{i_r \cdot (1 + i_r)^n}{(1 + i_r)^n - 1} \quad (17)$$

که n و i_r نرخ بهره و طول عمر نیروگاه هستند.

در برآورد کردن $Z_{investment}$ برای سیستم پیشنهادی، هزینه هر جز باید جداگانه تخمین زده شود. برای این منظور از توابع هزینه مناسب استفاده می‌شود. فرمول‌های عمومی برای برآورد هزینه اجزای سیستم در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- توابع هزینه [۱۲ و ۱۷ و ۲۱]

اجزا	تابع هزینه (\$)
کمپرسور هوا	$Z_{AC} = 71.1 \cdot \dot{m}_1 \cdot \left(\frac{1}{0.9 - \eta_{AC, is}} \right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
محفظه احتراق	$Z_{CC} = \left(48.64 \cdot \frac{\dot{m}_1}{0.995 - \frac{P_4}{P_3}} \right) \cdot (1 + \exp(0.018 \cdot T_4 - 26.4))$
پیش گرمکن هوا	$Z_{AP} = 130 \cdot (A_{AP} / 0.093)^{0.78}$
توربین گاز	$Z_{GT} = 479.34 \cdot \dot{m}_1 \cdot \left(\frac{1}{0.92 - \eta_{GT, is}} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) \times (1 + \exp(0.036 \cdot T_4 - 54.4))$
اواپراتور	$Z_e = 130 \cdot (A_e / 0.093)^{0.78}$
توربین بخار	$Z_{ST} = 866.64 (\dot{W}_{ST}^{0.82})$
آبگرمکن تغذیه باز ژنراتور	$Z_{OFWH} = 0$
ترموالکتریک	$Z_{TEG} = 1000 (\dot{W}_{TEG})$
پمپ	$Z_{pu} = 900 (\dot{W}_{pu} / 300)^{0.25}$

برای مبدل‌های حرارتی، سطح انتقال حرارت با استفاده از متد LMTD به صورت زیر

است [۲۹]:

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{LMTD} \quad (18)$$

LMTD برابر است با:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln(\Delta T_A / \Delta T_B)} \quad (19)$$

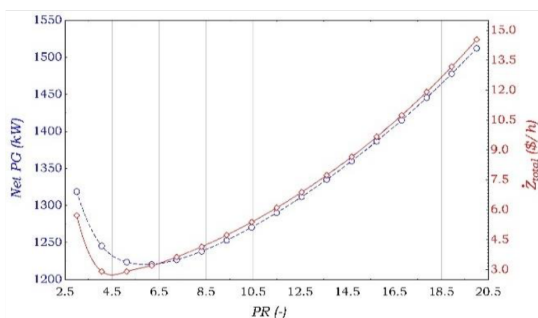
که ΔT_A و ΔT_B اختلاف دمای موجود بین دو جریان در خروجی آخر مبدل‌های حرارتی را نشان می‌دهد.

۴- اعتبارسنجی

سیستم پیشنهادی شامل ترکیب دو چرخه توربین گاز و رانکین بخار است؛

جدول ۴- خروجی های سیستم در حالت پایه

حالت	سیال عامل	دما (K)	فشار (bar)	آنتالپی (kJ/kmol)	آنتروپی (kJ/kmol.K)	اگرژی (kW)	دبی (kg/s)
۱	هوا	۲۹۸	۱/۰۱۳	-۴۷۱۷	۱۹۴/۲	۱۰/۷۴	۴/۲۱۴
۲	هوا	۶۱۰/۵	۱۰/۱۳	۴۶۲۲	۱۹۶/۴	۱۲۸۷	۴/۲۱۴
۳	هوا	۸۰۷/۹	۹/۶۲۴	۱۰۸۲۶	۲۰۵/۷	۱۷۹۵	۴/۲۱۴
۴	گازهای خروجی	۱۳۰۴	۹/۲۳۹	۲۲۶۴	۲۲۳/۲	۳۸۱۷	۴/۳۷۵
۵	گازهای خروجی	۸۵۷/۳	۱/۱۱۱	-۱۳۲۵۲	۲۲۶/۳	۱۳۰۳	۴/۳۷۵
۶	گازهای خروجی	۶۷۵/۲	۱/۰۵۵	-۱۹۲۱۷	۲۱۸/۹	۷۲۷/۱	۴/۳۷۵
۷	گازهای خروجی	۵۱۳/۹	۱/۰۱۳	-۲۴۲۹۸	۲۱۰/۷	۳۲۶/۱	۴/۳۷۵
۸	بیوگاز	۲۹۸	۱۲	-۲۰۲۱۵۷	۱۷۶/۶	۲۹۷۴	۰/۱۶۰۲
۹	آب/بخار آب	۳۵۴/۵	۰/۵	۶۱۳۵	۱۹/۶۶	۶/۱۹۵	۰/۳۱۱۶
۱۰	آب/بخار آب	۳۵۴/۶	۱۲	۶۱۵۹	۱۹/۶۶	۶/۵۷	۰/۳۱۱۶
۱۱	آب/بخار آب	۴۶۱/۱	۱۲	۱۴۳۸۸	۳۹/۹۳	۵۷/۲۸	۰/۴۰۱۶
۱۲	آب/بخار آب	۴۶۳/۹	۱۷۰	۱۴۷۴۷	۴۰/۰۱	۶۴/۷۶	۰/۴۰۱۶
۱۳	آب/بخار آب	۶۴۵/۲	۱۷۰	۴۹۶۱۲	۹۹/۱۵	۴۴۹/۱	۰/۴۰۱۶
۱۴	آب/بخار آب	۴۶۱/۱	۱۲	۴۲۸۸۵	۱۰۱/۷	۶۳/۲	۰/۰۹
۱۵	آب/بخار آب	۳۵۴/۵	۰/۵	۳۶۶۱۰	۱۰۵/۶	۹۰/۲	۰/۳۱۱۶
۱۶	آب	۲۹۸	۱/۰۱۳	۱۸۷۷	۶/۵۷۲	۰	۱۲/۶
۱۷	آب	۳۰۸	۱/۰۱۳	۲۶۳۱	۹/۰۶	۸/۶۵۲	۱۲/۶

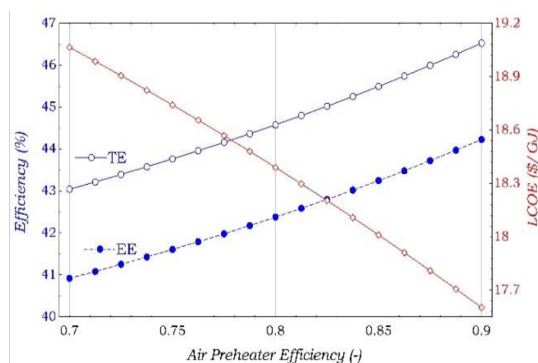


شکل ۳- تأثیر نسبت تراکم کمپرسور هوا بر روی توان تولیدی کل و نرخ هزینه کل اجزاء

شکل ۴، تأثیر نسبت تراکم کمپرسور هوا را بر روی متغیرهای عملکردی خروجی سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد. باید توجه داشت که توان تولیدی چرخه توربین گاز ثابت بوده و دبی جرمی سوخت نیز در PR تقریباً ۶/۲، کمترین مقدار خود دارد که در نتیجه حرارت ورودی به محفظه احتراق کمینه خواهد بود؛ بنابراین، راندمان حرارتی سیستم در PR تقریباً ۶/۲، بیشینه خواهد بود که مقدار آن برابر ۴۶/۱۵ درصد است. همچنین اگرژی ورودی به محفظه احتراق نیز رفتاری مشابه دبی جرمی سوخت دارد، بدین صورت که با افزایش PR ، ابتدا روندی نزولی داشته و بعد از PR تقریباً ۶/۲ شروع به افزایش می‌کند؛ بنابراین بیشینه مقدار راندمان اگرژی برابر با ۴۳/۸۷ درصد خواهد بود. هزینه تراز شده الکتریسیته نیز رفتاری مشابه با توان تولیدی و هزینه کل اجزاء دارد و با افزایش PR ، ابتدا روندی نزولی و بعد از نسبت تراکم ۵/۱۲، روندی صعودی طی می‌کند؛ بنابراین کمترین $LCOE$ برای سیستم به مقدار ۱۷/۴ دلار بر گیگاوات خواهد بود.

مطالعه پارامتریک بر روی سیستم تولید توان پیشنهادی موردنظر با استفاده از تغییرات متغیرها انجام شده است. متغیرهای عملکردی عبارت‌اند از: نسبت تراکم کمپرسور هوا (PR) و بازده دمای پیش گرمکن. وقتی یک متغیر مطالعه می‌شود، مابقی متغیرها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، عملکرد سیستم با استفاده از پارامترهای خروجی؛ توان تولیدی کل ($Net\ PG$)، نرخ هزینه کل سیستم ($\dot{Z}_{total}$)، راندمان حرارتی (TE)، راندمان اگرژی (EE) و هزینه تراز شده الکتریسیته ($LCOE$) بیان خواهد شد.

شکل ۳، نشان‌دهنده تأثیر نسبت تراکم کمپرسور هوا در بازه ۳-۲۰ بر روی توان تولیدی کل و نرخ هزینه کل اجزاء است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که توان تولیدی کل با افزایش PR ، ابتدا روندی نزولی داشته و بعد از مقدار تقریباً ۶/۲، دچار افزایش می‌شود. علت این رفتار، کمینه بودن دبی‌های جرمی عبوری از اجزای سیستم است. باید توجه داشت به دلیل ثابت بودن توان تولیدی در سیستم توربین گاز، بنابراین توان تولیدی در زیرسیستم رانکین بخار، در PR نسبتاً ۶/۲ کمینه خواهد بود. همچنین نرخ هزینه کل سیستم نیز رفتاری مشابه با توان تولیدی کل دارد. نرخ هزینه هر جزء نیز با توجه به توابع هزینه مربوطه در PR تقریباً ۵/۱ کمینه خواهد بود؛ بنابراین کمترین توان تولیدی و نرخ هزینه کل به ترتیب برابر ۱۲۲۱ کیلووات و ۲/۹۰ دلار بر ساعت است. بیشترین توان تولیدی و نرخ هزینه کل در نسبت تراکم کمپرسور هوا ۲۰ بوده و به ترتیب برابر ۱۵۱۲ کیلووات و ۱۴/۵۴ دلار بر ساعت است و این مقادیر به ترتیب از مقادیر کمینه توان تولیدی و نرخ هزینه کل ۲۳/۸۳ درصد و ۴۰۱ درصد، افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تأثیر بازده دمای پیش گرمکن بر روی متغیرهای خروجی سیستم

۵-۲- بهینه سازی

به منظور پیدا کردن بهترین عملکرد سیستم تولید توان پیشنهادی و شرایط عملیاتی بهینه از الگوریتم ژنتیک موجود در نرم افزار EES برای بهینه سازی های تک هدفه و چندهدفه استفاده شد. در جدول ۵، بازدهای متغیرهای تصمیم گیری برای بهینه سازی سیستم پیشنهادی آورده شده است.

جدول ۵- متغیرهای تصمیم گیری

متغیر	بازه پایین	بازه بالا
نسبت تراکم کمپرسور هوا (-)	۳	۲۰
بازده دمای پیش گرمکن (-)	۰/۷	۰/۹
فشار ژنراتور ترموالکتریک (bar)	۰/۱	۱

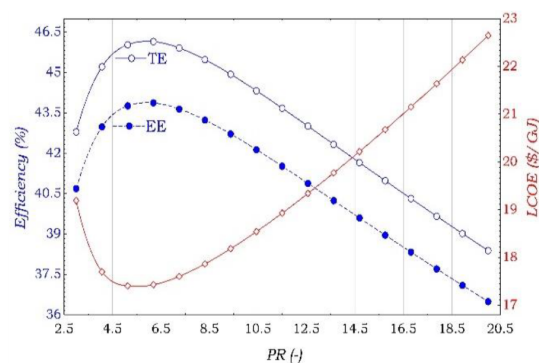
بهینه سازی چندهدفه سیستم با در نظر گرفتن راندمان حرارتی و هزینه تراز شده الکتریسیته به عنوان توابع هدف انجام شده است. در ادامه با اعمال ضرایب وزنی به توابع هدف در نرم افزار EES نتایج به دست آمدند. تابع چندهدفه به صورت زیر بیان می شود:

$$\text{Maximize (MCF)} = w_1 \times \eta_{th} + w_2 \times (1 - \text{LCOE}) \quad (20)$$

$$0 \leq w_1, w_2 \leq 1 \quad (21)$$

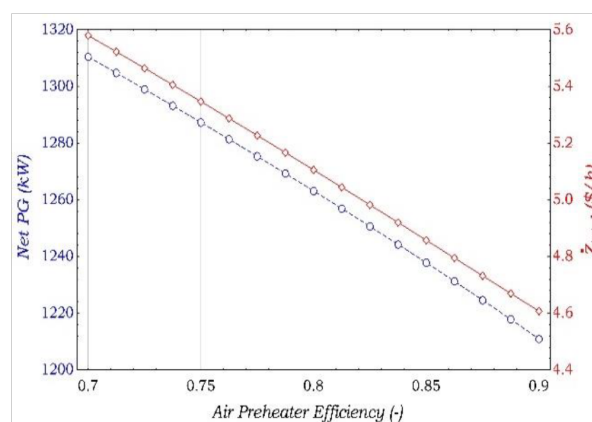
شکل ۷ نتایج بهینه سازی و همچنین نتایج سیستم پیشنهادی در حالت پایه (شرایط عملکردی موجود در جدول ۱) را برای مقایسه نشان می دهد. با توجه به نمودار مشاهده می شود که راندمانهای حرارتی و اگزرژی در حالت بهینه ترمواکونومیک به ترتیب ۴۹/۴۵ و ۴۷/۰۱ درصد هستند و هزینه تراز شده الکتریسیته برابر ۱۶/۲۵ دلار بر گیگاژول است. همچنین در این حالت، شرایط بهینه عملکردی برای سه متغیر تصمیم گیری نسبت تراکم کمپرسور هوا، بازده دمای پیش گرمکن و فشار ژنراتور ترموالکتریک به ترتیب برابر ۵/۴۴۷، ۰/۹ و ۰/۱ بار است. علاوه بر این، در این حالت حرارت موجود در محفظه احتراق و اگزرژی سوخت به ترتیب ۱۹/۹۴ و ۱۹/۹۶ درصد کاهش یافته اند که همین امر سبب افزایش راندمانهای حرارتی و اگزرژی سیستم پیشنهادی شده است. در شرایط بهینه ترمواکونومیک، نرخ هزینه کل سیستم ۵۴/۹۱ درصد کاهش یافته که می تواند به نظر اقتصادی بسیار بااهمیت باشد. استفاده از بهینه سازی چندهدفه با در نظر گرفتن توابع هدف راندمان حرارتی و ترمواکونومیک نشان داد که نرخ هزینه کل سیستم ۲/۹۸ دلار در ساعت است.

در ارزیابی ترمودینامیکی عملکرد سیستم، نرخ تخریب اگزرژی یک مؤلفه بسیار مهم است. شکل ۸، نرخ تخریب اگزرژی اجزای تشکیل دهنده سیستم پیشنهادی را در حالت بهینه ترمواکونومیک نشان می دهد. با توجه به شکل، نرخ تخریب اگزرژی در محفظه احتراق ۶۵۱ کیلووات است که می تواند به دلیل دماهای کاری بالا در آن باشد. همچنین پمپهای استفاده شده در سیستم، کمترین میزان نرخ تخریب اگزرژی را دارند که به دلیل نزدیک بودن دمای کاری آنها به دمای محیط است.



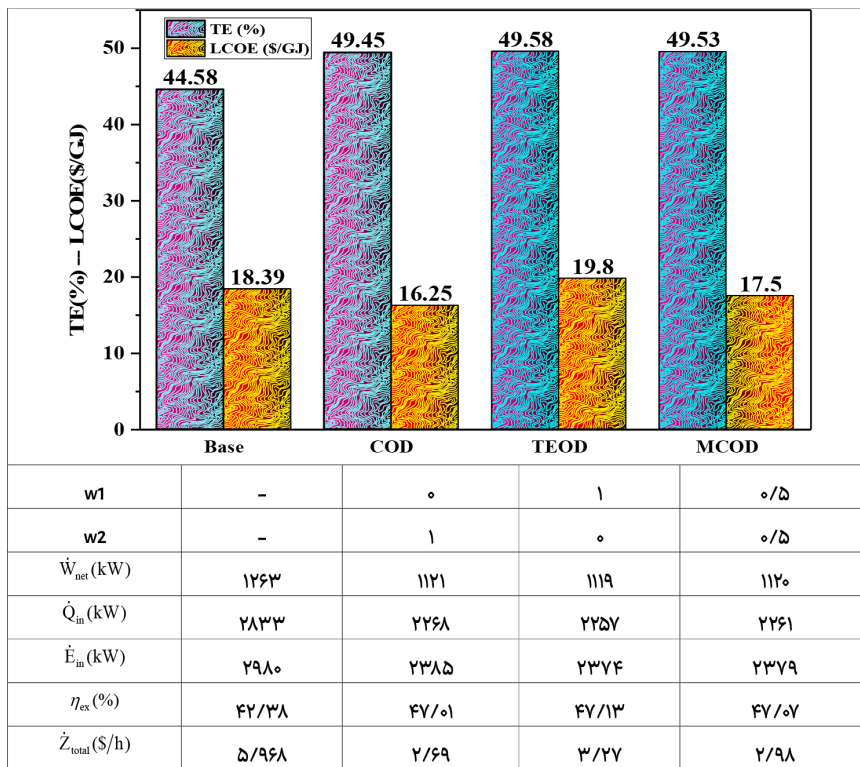
شکل ۴- تأثیر نسبت تراکم کمپرسور هوا بر روی متغیرهای خروجی سیستم

شکل ۵، نشان دهنده تأثیر بازده دمای پیش گرمکن بر روی توان تولیدی کل و نرخ هزینه کل اجزاء بوده که بازه تغییرات بازده دمای پیش گرمکن ۰/۷-۰/۹ است. با افزایش بازده دمای پیش گرمکن، دمای خروجی از آن افزایش یافته و وارد محفظه احتراق خواهد شد که سبب کاهش حرارت ورودی به محفظه احتراق می شود. همچنین با افزایش بازده دمای پیش گرمکن، دبیهای جرمی عبوری از اجزای سیستم کاهش یافته که باعث کاهش توان تولیدی کل نیز می شود. کمترین و بیشترین توان تولیدی به ترتیب در بازده دمای پیش گرمکن ۰/۹ و ۰/۷ و برابر ۱۳۱۰ و ۱۳۱۰ کیلووات خواهد بود که نشان دهنده کاهش ۷/۵۵ درصدی توان تولیدی با افزایش بازده دمای پیش گرمکن هست. با توجه به روند نزولی توان تولیدی و دبیهای جرمی عبوری از سیستم با افزایش بازده دمای پیش گرمکن، نرخ هزینه کل اجزاء نیز کاهش پیدا خواهد کرد؛ بنابراین، کمترین نرخ هزینه کل در بازده دمای پیش گرمکن ۰/۹ و به مقدار ۴/۶۰۷ دلار بر ساعت است.

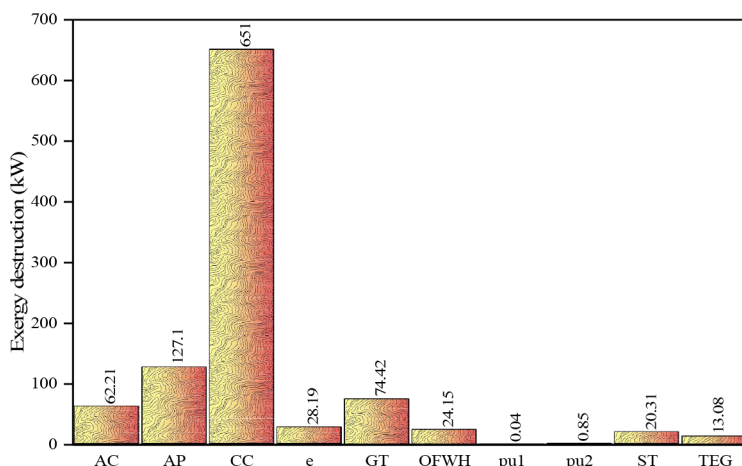


شکل ۵- تأثیر بازده دمای پیش گرمکن بر روی توان تولیدی کل و نرخ هزینه کل اجزاء

تأثیر بازده دمای پیش گرمکن بر روی متغیرهای خروجی سیستم یعنی راندمان حرارتی، راندمان اگزرژی و هزینه تراز شده الکتریسیته در شکل ۶ نشان داده شده است. باید توجه داشت که حرارت ورودی به محفظه احتراق با افزایش بازده دمای پیش گرمکن به دلیل افزایش دمای ورودی به آن روندی نزولی دارد، ولی کاهش حرارت ورودی نسبت به توان تولیدی کل، زیاد بوده که این امر سبب افزایش راندمان حرارتی سیستم با افزایش بازده دمای پیش گرمکن می شود. هزینه تراز شده الکتریسیته نیز رفتاری مشابه با توان تولیدی و هزینه کل اجزاء دارد. به عبارت دیگر، افزایش راندمانهای حرارتی و اگزرژی سیستم نشان دهنده کاهش هزینه تراز شده الکتریسیته است؛ بنابراین، بیشترین راندمانهای حرارتی و اگزرژی در بازده دمای پیش گرمکن ۰/۹ و به ترتیب برابر ۴۶/۵۳ و ۴۴/۲۳ درصد هستند. همچنین کمترین LCOE در بازده دمای پیش گرمکن ۰/۹ و به مقدار ۱۷/۶ دلار بر گیگاژول است.



شکل ۷- نتایج بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه و چندهدفه



شکل ۸- نرخ تخریب انرژی اجزای سیستم پیشنهادی در حالت بهینه ترمواکونومیک

۳-۵- مقایسه با سیستم تولید توان مشابه

جدول ۶ نشان می‌دهد که راندمان حرارتی سیستم پیشنهادی نسبت به دو سیستم قبلی به ترتیب ۱۱/۶۵ و ۶/۷۴ درصد بیشتر بوده و همچنین راندمان انرژی نیز به ترتیب به مقدار ۱۴/۱۶ و ۹/۱۵ درصد به دو سیستم قبلی بهبود نشان می‌دهد. علاوه بر این، سیستم پیشنهادی دارای نرخ هزینه کل ۵/۹۶۸ دلار بر ساعت بوده که کم‌تر از دو سیستم قبلی است.

استفاده از چرخه‌های باراندمان بالا و ارائه روش‌های مختلف طراحی می‌تواند بر روی عملکرد سیستم‌های تولید توان تأثیر مثبت داشته باشند. در این بخش عملکرد سیستم پیشنهادی با دو سیستم مورد مطالعه کار قلیزاده و همکاران [۱۲] مبتنی بر توربین گاز در شرایط عملکردی یکسان مقایسه شده و نتایج راندمان‌های حرارتی و انرژی بحث شده است. نتایج مقایسه در

TCR (\$/h)	EE (%)	TE (%)	NET PG (kW)	GT PG (kW)	PR (-)	GTC PG (kW)	T0 (K)	
۷/۷۸۷	۳۷/۲	۳۹/۹۹	۱۳۰۸	۲۴۴۴	۱۰	۱۰۰۰	۲۹۳/۲	سیستم توربین گاز/رانکین پایه توسط قلیزاده و همکاران [۱۲]
۸/۷۷۷	۳۸/۹۱	۴۱/۸۳	۱۳۶۸	۲۴۴۴	۱۰	۱۰۰۰	۲۹۳/۲	سیستم توربین گاز/رانکین اصلاح شده توسط قلیزاده و همکاران [۱۲]
۵/۹۶۸	۴۲/۴۷	۴۴/۶۵	۱۲۴۷	۲۳۳۲	۱۰	۱۰۰۰	۲۹۳/۲	سیستم پیشنهادی

جدول ۶- مقایسه عملکرد با سیستم تولید توان مشابه مبتنی بر توربین گاز

۶- نتیجه گیری

سیستم پیشنهادی تولید توان مبتنی بر سوخت بیوگاز، شامل دو زیرسیستم چرخه توربین گاز و رانکین بخار است. این سیستم با در نظر گرفتن دو متغیر عملکردی از دیدگاه های انرژی، آگزژی و ترموآکونومیک مورد مطالعه قرار گرفت و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی ترموآکونومیک شد. یافته های اصلی از بررسی سیستم پیشنهادی شامل موارد زیر است:

(۱) نسبت تراکم کمپرسور هوا، تأثیر زیادی بر روی عملکرد ترمودینامیکی و هزینه های اجزای مختلف سیستم دارد. بیشترین راندمان های حرارتی و آگزژی در نسبت تراکم تقریباً ۶/۲ بوده و به ترتیب برابر ۴۶/۱۵ و ۴۳/۸۷ درصد است. همچنین در این نسبت تراکم کمپرسور هوا، سیستم کمترین LCOE و نرخ هزینه کل را دارد. به عبارت دیگر، سیستم در این نقطه رفتاری بهینه از خود نشان می دهد.

(۲) افزایش بازده دمای پیش گرمکن، باعث افزایش راندمان های حرارتی و آگزژی سیستم می شود که به دلیل بالا رفتن دمای ورودی به محفظه احتراق است. این افزایش دما، سبب کاهش دبی های جرمی، حرارت ورودی و آگزژی ورودی می شود. همچنین، سیستم در بازده دمای پیش گرمکن ۰/۹ کمترین LCOE را به مقدار ۱۷/۶ دلار بر گیگاژول دارد.

(۳) در بهینه سازی ترموآکونومیک، راندمان های حرارتی و آگزژی به ترتیب برابر ۴۹/۴۵ و ۴۷/۰۱ درصد به دست آمدند که تقریباً از حالت پایه ۵ درصد بیشتر بودند. همچنین LCOE در این حالت برابر ۱۶/۲۵ دلار بر گیگاژول و بیشترین تخریب آگزژی در محفظه احتراق برابر ۶۵۱ کیلووات بود.

۷- نمادها

علائم انگلیسی

AC	کمپرسور هوا
AP	پیش گرمکن هوا
Base	پایه
EE	راندمان آگزژی (%)
COD	طراحی بهینه اقتصادی
$\dot{E}$	نرخ آگزژی (kW)
GT	توربین گاز
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)
LCOE	هزینه تراز شده الکتریسیته (\$/GJ)
LHV	ارزش حرارتی پایین
$\dot{m}$	نرخ دبی جرمی (kg/s)
MCOD	طراحی بهینه چندهدفه
$\dot{n}$	نرخ مولی (kmol/s)
NET	خالص
P	فشار (bar)
PR	نسبت تراکم کمپرسور هوا
$\dot{Q}$	نرخ حرارت (kW)
R	ثابت جهانی گاز (J/kg.K)
s	آنتروپی مخصوص (kJ/kg.K)
T	دما (K)
TE	راندمان حرارتی (%)
TEG	ژنراتور ترموالکتریک
TEOD	طراحی بهینه راندمان حرارتی

TCR نرخ هزینه کل (\$/h)

 $\dot{W}$ توان (kW)

علائم یونانی

 ρ چگالی (kg/m³) η بازده ε بازده دمای پیش گرمکن

زیرنویس

O حالت محیطی

AC کمپرسور هوا

c.v حجم کنترل

ch شیمیایی

D تخریب

ex آگزژی

f سوخت

GT توربین گاز

i جزء

in ورودی

is آیزنتروپیک

L اتلافی

net خالص

out خروجی

p محصول

ph فیزیکی

pu پمپ

react واکنش دهنده

SRC چرخه رانکین بخار

ST توربین بخار

th حرارت

۸- مراجع

- [1] M. MosayebNezhad, A. Mehr, M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, Techno-economic assessment of biogas-fed CHP hybrid systems in a real wastewater treatment plant, Applied Thermal Engineering; 129 (2018) 1263-1280.
- [2] M. Esen, T. Yuksel, Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse, Energy Buildings; 65 (2013) 340-351.
- [3] E. Lindkvist, M. Karlsson, Biogas production plants; existing classifications and proposed categories, Journal of Cleaner Production; 174 (2018) 1588-1597.
- [4] L. De Baere, B. Mattheeuws, Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe-Status, experience and prospects, Istanbul 3W Congress; (2013) 38.
- [5] H.W. Jung, H. Kang, W.J. Yoon, Y. Kim, Performance comparison between a single-stage and a cascade multi-functional heat pump for both air heating and hot water supply, International Journal of Refrigeration; 36(5) (2013) 1431-1441.

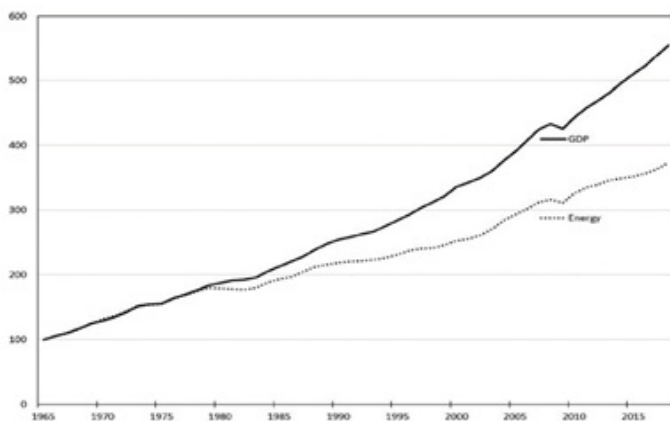
- [18] H.R. Takleh, V. Zare, Employing thermoelectric generator and booster compressor for performance improvement of a geothermal driven combined power and ejector-refrigeration cycle, *Energy conversion and management*; 186 (2019) 120–130.
- [19] F. Mohammadkhani, M. Yari, F. Ranjbar, A zero-dimensional model for simulation of a Diesel engine and exergoeconomic analysis of waste heat recovery from its exhaust and coolant employing a high-temperature Kalina cycle, *Energy Conversion and Management*; 198 (2019) 111782.
- [20] R.B. Sarkis, V. Zare, Proposal and analysis of two novel integrated configurations for hybrid solar-biomass power generation systems: Thermodynamic and economic evaluation, *Energy conversion and management*; 160 (2018) 411–425.
- [21] V. Zare, A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants, *Energy conversion and management*; 105 (2015) 127–138.
- [22] T. Parikhani, J. Jannatkah, A. Shokri, H. Ghaebi, Thermodynamic analysis and optimization of a novel power generation system based on modified Kalina and GT-MHR cycles, *Energy conversion and management*; 196 (2019) 418–429.
- [23] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M.J. Moran, Thermal design and optimization, John Wiley & Sons, 1995.
- [24] A.R.M. Siddique, S. Mahmud, B. Van Heyst, A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges, *Renewable Sustainable Energy Reviews*; 73 (2017) 730–744.
- [25] E. Chávez-Urbiola, Y.V. Vorobiev, L.P. Bulat, Solar hybrid systems with thermoelectric generators, *Solar energy*; 86(1) (2012) 369–378.
- [26] V. Zare, H.R. Takleh, Novel geothermal driven CCHP systems integrating ejector transcritical CO₂ and Rankine cycles: Thermodynamic modeling and parametric study, *Energy conversion and management*; 205 (2020) 112396.
- [27] E. Shayan, V. Zare, I. Mirzaee, Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents, *Energy conversion and management*; 159 (2018) 30–41.
- [28] V. Zare, Exergoeconomic analysis with reliability and availability considerations of a nuclear energy-based combined cycle power plant, *Energy*; 96 (2016) 187–196.
- [29] F. Mohammadkhani, F. Ranjbar, M. Yari, A comparative study on the ammonia-water based bottoming power cycles: The exergoeconomic viewpoint, *Energy*; 87 (2015) 425–434.
- [6] J.Y. Kang, T.S. Kim, K.B. Hur, Comparative economic analysis of gas turbine-based power generation and combined heat and power systems using biogas fuel, *Energy*; 67 (2014) 309–318.
- [7] A.D. Zareh, R.K. Saray, S. Mirmasoumi, K. Bahlouli, Extensive thermodynamic and economic analysis of the cogeneration of heat and power system fueled by the blend of natural gas and biogas, *Energy conversion and management*; 164 (2018) 329–343.
- [8] F. Jabari, B. Mohammadi-ivatloo, M.-B. Bannae-Sharifian, H. Ghaebi, Design and performance investigation of a biogas fueled combined cooling and power generation system, *Energy conversion and management*; 169 (2018) 371–382.
- [9] S. Balafkandeh, V. Zare, E. Gholamian, Management, Multi-objective optimization of a tri-generation system based on biomass gasification/digestion combined with S-CO₂ cycle and absorption chiller, *Energy conversion and management*; 200 (2019) 112057.
- [10] H.N. Somehsaraei, M.M. Majoumerd, P. Breuhaus, M. Assadi, Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model, *Applied Thermal Engineering*; 66(1–2) (2014) 181–190.
- [11] H. Barzegaravval, S.E. Hosseini, M.A. Wahid, A. Saat, Effects of fuel composition on the economic performance of biogas-based power generation systems, *Applied Thermal Engineering*; 128 (2018) 1543–1554.
- [12] T. Gholizadeh, M. Vajdi, F. Mohammadkhani, management, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power generation systems fueled by biogas, *Energy conversion and management*; 181 (2019) 463–475.
- [13] H. Nikpey, M. Assadi, P. Breuhaus, P. Mørkved, Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas, *Applied Energy*; 117 (2014) 30–41.
- [14] T. Li, N. Meng, J. Liu, J. Zhu, X. Kong, Thermodynamic and economic evaluation of the organic Rankine cycle (ORC) and two-stage series organic Rankine cycle (TSORC) for flue gas heat recovery, *Energy conversion and management*; 183 (2019) 816–829.
- [15] Ö. Köse, Y. Koç, H. Yağlı, Performance improvement of the bottoming steam Rankine cycle (SRC) and organic Rankine cycle (ORC) systems for a triple combined system using gas turbine (GT) as topping cycle, *Energy conversion and management*; 211 (2020) 112745.
- [16] T. Gholizadeh, M. Vajdi, H. Rostamzadeh, A new biogas-fueled bi-evaporator electricity/cooling cogeneration system: exergoeconomic optimization, *Energy conversion and management*; 196 (2019) 1193–1207.
- [17] T. Parikhani, H. Azariyan, R. Behrad, H. Ghaebi, J. Jannatkah, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel ammonia-water mixture combined cooling, heating, and power (CCHP) cycle, *Renewable Energy*; 145 (2020) 1158–1175.



مروری بر کتاب گذار انرژی

سعید میرزایی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شریف

فعالیت‌های ما تأثیر می‌گذارد. در ادامه مبحث اهمیت انرژی بیان می‌شود. فعالیت اقتصادی، یعنی تمام اقداماتی که جمعیت انسانی باید انجام دهند تا نیازهای خود را به لطف تولید کالاها و خدمات برآورده سازند، نیازمند انرژی است. به گفته تیم مورگان، اقتصاد موضوع پول نیست بلکه تابعی از انرژی اضافی است، به عبارت دیگر انرژی در دسترس ما. به گفته اقتصاددان، مارتن ون موریک، متخصص در تحلیل بازار نفت، و اسکار اسلینگرلند، مدیر صنعت نفت، «مشکلات تامین انرژی به ناچار رشد جهانی تولید ناخالص داخلی را محدود خواهد کرد». رشد اقتصادی و ثروت واقعی با کاری که متکی بر ماشین‌آلات و انرژی است بدست می‌آید و نه با جابجایی پول.



برتراند کاسورت^۱ فارغ التحصیل دکترای مهندسی برق است. موضوعات مورد مطالعاتی او در سالیان اخیر در مورد وابستگی جوامع به انرژی، ارتباط بین انرژی و اقتصاد، گذار انرژی، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدید پذیر بوده است. وی چندین مقاله و کتاب در این زمینه‌ها برای عموم مردم منتشر کرده است. این کتاب، اهمیت گذار انرژی و مشکلات مربوط به آن را ارائه می‌دهد و توضیحی در مورد مفاهیم فیزیکی انرژی و نیرو ارائه می‌دهد و همچنین مصرف انرژی جهانی و وابستگی ما به انرژی را مرور می‌کند.

این کتاب در مورد پیوندهای اقتصاد و انرژی بحث می‌کند. اشکالات و خطرات منابع مختلف انرژی را توضیح داده و سعی در مقایسه آنها دارد. با مرور منابع انرژی آینده، چندین سناریوی انتقالی را ارزیابی می‌کند. نشان می‌دهد که قوانین فیزیک از ظهور راه حل‌های ساده جلوگیری می‌کند، اما راه حل‌های بالقوه‌ای را پیشنهاد می‌کند و خوانندگان را ترغیب می‌کند تا فرایندهای بهتری از منابع مختلف انرژی از تولید تا مصرف را توسعه دهند. در مورد مسائل فعلی گذار انرژی بحث می‌کند و چندین سناریوی انتقال انرژی و مشکلات مرتبط با آنها را ارائه می‌دهد و همچنین پیوندهای بین اقتصاد و انرژی را تشریح و اهمیت بحث جهانی در مورد انرژی را برجسته می‌کند.

کاسورت در این کتاب سؤال انرژی چیست را بیان می‌کند و این گونه جواب می‌دهد: مفهوم انرژی آنقدر ساده نیست که بتوان به آن نزدیک شد. انرژی همیشه قابل مشاهده یا قابل لمس نیست. تعیین کمیت آن دشوار است. انرژی لزوماً مادی نیست و وجود آن حتی ممکن است نادیده گرفته شود. با این حال، انرژی برای زندگی ضروری است. انرژی به طور قابل توجهی بر

در ادامه کتاب به گرمایش جهانی یکی از ضرورت‌های مهم گذار انرژی پرداخته می‌شود.

۸۰٪ انرژی مصرف شده در سراسر جهان از یک منشأ فسیلی است، یعنی از یک منبعی گرفته شده است که نمی‌تواند تجدید شود در حالی که نیاز به افزایش تدریجی دارد. انرژی بیشتری باید سال به سال در دسترس قرار گیرد، که به این معنی است که نفت یا گاز بیشتری باید نسبت به سال قبل استخراج شود. واضح است که این هجوم ناگهانی باید یک روز متوقف شود. ما ممکن است به خوبی فکر کنیم که این کمبود برای مدت طولانی رخ نخواهد داد، اما واضح است که این اتفاق خواهد افتاد. در فصل ۷ این کتاب به سناریوهای گذار انرژی اشاره می‌شود و برای انواع انرژی: انرژی خورشیدی، انرژی بادی،

در مقالات به طور منظم در مورد تکنولوژی های معجزه آسایی که انرژی را به طور فراوان تولید می کنند و یا به مصرف نرسانند، منتشر می شود. هیدروژن اغلب به عنوان یک انرژی پاک ارائه می شود. خودروهای هیدروژنی وجود دارند و چیزی غیر از آب را آزاد نمی کنند: این درست است اما در طبیعت هیدروژن به ندرت وجود دارد. این انرژی در حال حاضر از طریق تبدیل متان تولید می شود که یک انرژی فسیلی است. هم چنین با الکترولیز آبی می توان آن را به لطف الکتریسیته تولید کرد در نتیجه یک روش ذخیره سازی انرژی فراهم می کند. به دلیل تلفات اجتناب ناپذیر، مقدار انرژی جمع آوری شده لزوماً کم تر از مقدار قبلی است: برای جمع آوری ۱ کیلووات ساعت برق، شما باید ۳ کیلووات ساعت تولید کرده باشید و چشم انداز بهبود کم است. فن آوری سلول سوختی، که هیدروژن را به الکتریسیته تبدیل می کند، جدید نیست. ناسا از آن برای رفتن به ماه استفاده کرد.

عنوان فصل ۱۱ «ما چه کاری بکنیم؟» است که به طور خلاصه به مطالب زیر اشاره دارد:

- افزایش بازده و کارایی انرژی
 - گذار انرژی از نفت و گاز به الکتریسیته
 - تولید برق با روش های قابل کنترل و آلودگی کمتر
 - توسعه سیستم های انرژی تجدیدپذیر
- در فصل آخر کتاب نویسنده به نتیجه گیری می پردازد و چشم اندازهای گذار انرژی را ارائه می دهد و به طور خلاصه به صورت زیر است:
- «امنیت انرژی برای توسعه انرژی های نو بسیار پیچیده تر است زیرا به سبک زندگی و تغییرات در روش سازماندهی جامعه مرتبط است. مصرف انرژی امکان جایگزینی انسان با ماشین و ایجاد اقتصاد را فراهم کرده است. به زودی، کمبود منابع انرژی فسیلی لزوماً رخ خواهد داد و انرژی های تجدیدپذیر یا هسته ای جایگزینی آن ها را جبران خواهند کرد. اگر فقط مصرف ما ثابت باشد، با افزایش سالانه جمعیت جهان، مصرف انرژی افزایش پیدا خواهد کرد. مصرف انرژی جهان باید تا ۴۰٪ افزایش یابد. توسعه انرژی هسته ای بدیهی است ولی انرژی هسته ای می تواند خطرناک باشد اما نسبت سود به ریسک تا حد زیادی به نفع آن است و ما با استفاده از آن با مشکلات زیادی مواجه نخواهیم شد. انرژی هسته ای یک راه حل معجزه آسایی نیست همانند منابع انرژی تجدیدپذیر، برخی جبران کمبود انرژی و راهی برای وابستگی کمتر به منابع فسیلی خواهد بود. بهره برداری بیشتر از منابع انرژی فسیلی در نتیجه افزایش آلودگی و گرمایش جهانی با پیامدهایی چون بیماری های تنفسی، سیل، طوفان و منابع انرژی تجدیدپذیر مدت ها قبل از منابع فسیلی مورد بهره برداری قرار می گرفتند. با تحلیل تمام شدن منابع فسیلی، منابع انرژی تجدیدپذیر و هسته ای به زودی برای جایگزینی مناسب آن ها آماده خواهند شد، و با توجه به محدودیت بهره وری انرژی، مشکلات ما به وضوح بدتر خواهد شد.»

انرژی زیستی، انرژی هسته ای و همچنین افزایش دما سناریوهایی تا سال ۲۰۵۰ تدوین شده است و تولید هریک از انواع انرژی پیش بینی شده است. در فصل ۸ این کتاب به روش های بهره وری انرژی اشاره می شود. برای کاهش نیاز به انرژی، اهرم «بهره وری» به اتفاق آرا حمایت را کسب می کند زیرا این به معنای مصرف کمتر برای خدمات برابر به لطف تکنولوژی است. قوانین فیزیک دالت بر حفاظت از انرژی دارند. فراموش نکنیم که انرژی تنها می تواند تبدیل شود اما ایجاد نمی شود. هیچ پیشرفت تکنولوژیکی نتایج این محاسبات را تغییر نخواهد داد. در واقع، مقدار انرژی مورد نیاز به طور قابل توجهی به دلیل تلفات اجتناب ناپذیر بیشتر است، که بهره وری انرژی تلاش می کند آن را به حداقل برساند. بهره وری انرژی همچنین می تواند شامل تلاش برای استفاده مجدد از انرژی ذخیره شده باشد. برای حفظ جرم در سرعت ثابت در خلا، تامین انرژی ضروری نیست. اما در مورد وسیله نقلیه ای که روی زمین حرکت می کند، هوا، لاستیک و اصطکاک مکانیکی اجتناب ناپذیر است. در این حالت، بهره وری انرژی شامل به حداقل رساندن اصطکاک هوا به لطف طراحی ایرودینامیک بهینه است. اما «بهینه» هرگز به معنای «کامل» نخواهد بود. پیشرفت های قابل توجهی در بهره وری انرژی پس از بحران های نفتی ۱۹۷۴ و ۱۹۷۹ حاصل شده است. در نتیجه، به دلیل موتورهای کارآمدتر، مصرف متوسط وسایل نقلیه در ۴۰ سال گذشته به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. به طور کلی، فن آوری های دیجیتال می توانند با کنترلهای هوشمند الکتریکی، دستگاه های اندازه گیری و کنترلرهای سرعت الکترونیکی، به ما کمک کنند تا مصرف خود را بهینه کنیم. اما، در نتیجه، جامعه ما روز به روز بیشتر و بیشتر به الکترونیک و مراکز انرژی بر وابسته می شود، و روز به روز پیچیده تر و شاید آسیب پذیرتر می شود. گاهی اوقات ممکن است کسی بخواهد با این باور که هوش می تواند جایگزین انرژی شود، مردم را به رویا فرو ببرد. سیستم های هوشمند فقط می توانند به مدیریت بهتر انرژی کمک کنند. در فصل ۹ به مباحث بسیاری که در مورد رابطه انرژی و پول وجود دارد: مالیات های کربن، مالیات بر محصولات نفتی، سهم خدمات عمومی برق نرخ بشکه نفت، قیمت کیلووات ساعت، هزینه های تنظیم، از بین بردن زباله های هسته ای و مدیریت هزینه ها، بارانه های تولید انرژی تجدیدپذیر، گرم شدن جهانی و هزینه های مرتبط با آلودگی می پردازد. انرژی فسیلی در مقایسه با خدمات عظیمی که ارائه می دهد، اصلاً گران نیست. دیر یا زود، ما باید کم تر از آن مصرف کنیم و جایگزین کردن آن لزوماً بسیار گران خواهد بود. با توجه به مصرف برق، مهم است به یاد داشته باشید که منابع بادی و فتوولتائیک لزوماً در صورت نیاز انرژی تولید نمی کنند. بنابراین، آن ها باید در اصل به عنوان منابع اضافی دیده شوند اما نه به عنوان راه حل هایی برای جایگزین کردن دیگر روش های تولید.

توسعه اینترنت احتمالاً در گسترش تئوری های توطئه و باورهای بی اساس متعدد نقش داشته است. حوزه انرژی نیز از این قاعده مستثنی نیست.



خنک کاری پنل خورشیدی

زهرا پرهیزگار

سپیده سادات خاتمی،

کارشناسی مهندسی مکانیک دانشگاه جهرم

خنک کردن سطح عملیاتی یک عامل کلیدی عملیاتی است که باید برای دستیابی به راندمان بالاتر هنگام بهره برداری از سیستم های فتوولتائیک خورشیدی در نظر گرفته شود. خنک کننده مناسب می تواند بازده الکتریکی را بهبود بخشد و سرعت تخریب سلول را با گذشت زمان کاهش دهد و در نتیجه طول عمر ماژول های فتوولتائیک را به حداکثر برساند. گرمای بیش از حد خارج شده توسط سیستم خنک کننده را می توان در کاربردهای خانگی، تجاری یا صنعتی استفاده کرد.

این مقاله مروری بر روش های مختلفی را ارائه می کند که می توانند برای به حداقل رساندن اثرات منفی افزایش دما و درعین حال تلاش برای افزایش کارایی پنل های فتوولتائیک خورشیدی که فراتر از دمای توصیه شده شرایط تست استاندارد (STC) عمل می کنند، استفاده شود. فناوری های خنک کننده مختلف، یعنی سیستم خنک کننده متمرکز ردیابی شناور (FTCC) بررسی می شوند؛ سیستم فتوولتائیک حرارتی خورشیدی هیبریدی که با پاشش آب خنک می شود؛ سیستم فتوولتائیک / ترموالکتریک خورشیدی هیبریدی (PV/TE) که توسط هیت سینک خنک می شود؛ سیستم فتوولتائیک / حرارتی خورشیدی هیبریدی (PV/T) که توسط گردش آب اجباری خنک می شود؛ بهبود عملکرد پنل های خورشیدی از طریق استفاده از مواد تغییر دهنده فاز؛ پنل خورشیدی با تکنیک خنک کننده غوطه ور در آب؛ پنل PV خورشیدی با پوشش شفاف (خنک کننده کریستال فوتونیک) خنک می شود. سیستم فتوولتائیک حرارتی خورشیدی هیبریدی که توسط گردش هوای اجباری و پنل خورشیدی با خنک کننده ترموالکتریک خنک می شود.

چندین مقاله تحقیقاتی بر اساس تمرکز، سهم و نوع فناوری مورد استفاده برای دستیابی به خنک سازی پنل های فتوولتائیک بررسی و طبقه بندی می شوند. بحث نتایج بر اساس مزایا، معایب، حوزه کاربرد و همچنین ویژگی های فنی - اقتصادی هر فناوری بررسی شده انجام شده است.

هدف از این بررسی ارائه درک برای هریک از فناوری های ذکر شده در بالا برای کاهش دمای سطح ماژول PV است. این مطالعه بر روی آرایه کاهش دمای سطح محدود شده توسط هریک از فن آوری های خنک کننده متمرکز خواهد شد. عملکرد هر فناوری خنک کننده نیز برجسته خواهد شد. علاوه بر این مطالعه، این بررسی شامل بحثی در مورد مقایسه عملکرد هر فناوری خنک کننده خواهد بود. نتایج این مطالعه در بخش نتیجه گیری به تفصیل آمده است. این مقاله نشان می دهد که هر فناوری مناسبی که برای خنک کردن پانل های فتوولتائیک انتخاب می شود باید برای پایین نگه داشتن دمای سطح عملیاتی پایین و پایدار، ساده و قابل اعتماد بودن و در صورت امکان استفاده از گرمای حرارتی استخراج شده برای افزایش بازده تبدیل کلی استفاده شود. بررسی دقیق ارائه شده می تواند توسط مهندسانی که بر روی تئوری، طراحی و یا کاربرد سیستم های فتوولتائیک کار می کنند استفاده شود.

یکی از مهم ترین شکل انرژی های تجدیدپذیر، انرژی فتوولتائیک خورشیدی است. در گذشته اخیر تحقیق و توسعه زیادی انجام شده است و هنوز هم در حال توسعه است. یک سلول خورشیدی یک دستگاه است که به طور مستقیم انرژی را در نور خورشید به انرژی الکتریکی از طریق فرایند فتوولتائیک تبدیل می کند. اولین سلول خورشیدی در سال ۱۸۸۳ توسط چارلز فریتز ساخته شد که از اتصالات تشکیل شده توسط پوشش سلیوم (نیمه هادی) با یک لایه بسیار نازک از طلا ساخته شده است. عوامل مختلفی وجود دارد که بر کارایی یک سلول خورشیدی تأثیر می گذارد. دمای سلول و بازده تبدیل انرژی برخی از آنها هستند. دلیل راندمان کم سلول های خورشیدی، بازده تبدیل انرژی کم آن است. یک سلول خورشیدی بخشی از نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند بقیه به عنوان گرما هدر می رود. در صورتی که پنل فتوولتائیک به طور مداوم و در شرایط شدیداً گرمایی کار کند، ممکن است دمای پنل به حدی بالا برود که باعث کاهش

کارایی و عمر مفید پنل شود. برای جلوگیری از این مشکل، سیستم خنک‌کاری برای پنل فتوولتائیک طراحی شده است. سیستم خنک‌کاری معمولاً شامل یک سیستم خنک‌کننده، یک مبدل حرارتی و یک پمپ است. در این سیستم، پمپ آب را از طریق لوله‌هایی که در زیر پنل قرار دارند، عبور می‌دهد تا حرارت را از پنل جمع‌آوری کرده و به مبدل حرارتی منتقل کند. در مبدل حرارتی، حرارت جمع‌آوری شده توسط آب، به هوا منتقل می‌شود. سپس آب خنک شده به پمپ بازگردانده می‌شود و مجدداً با جریان دادن به پنل، حرارت جمع‌آوری شده را به مبدل حرارتی منتقل می‌کند. با استفاده از سیستم خنک‌کاری، دمای پنل کاهش می‌یابد و در نتیجه عمر مفید پنل بیشتر می‌شود و کارایی پنل نیز افزایش می‌یابد. همچنین، استفاده از سیستم خنک‌کاری، می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پنل کمک کند. سیستم خنک‌کاری برای همه انواع پنل فتوولتائیک مناسب است. چرا که در همه انواع پنل فتوولتائیک، در صورتی که دمای پنل به حدی بالا برود که باعث کاهش کارایی و عمر مفید پنل شود، بهبود عملکرد پنل و افزایش عمر مفید آن با استفاده از سیستم خنک‌کاری ممکن است. به همین دلیل، در بسیاری از نصب‌های پنل فتوولتائیک در مناطق گرمسیری و با دمای بالا، سیستم خنک‌کاری برای پنل‌ها نصب می‌شود.

بهبود کارایی در سیستم‌های تبدیل انرژی خورشیدی باید انجام شود تا این فناوری انرژی تجدیدپذیر راه حل مناسبی باشد. برای تبدیل آن به یک راه حل قابل دوام، نیاز به یافتن ابزارهای مختلفی برای حل این مشکل دما وجود دارد که باید منجر به افزایش راندمان تبدیل کلی شود.

تعداد بسیار کمی از نویسندگان سعی کرده‌اند با هم جمع‌آوری و بررسی گسترده‌ای از فن آوری‌های مختلف را که می‌تواند برای خنک‌کردن سطح عملکرد پنل‌های خورشیدی با هدف افزایش کارایی کلی سیستم تبدیل خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد، انجام دهد.

نویسندگان مقاله ذکر شده در مرجع [۸] به طور مختصر در مورد فن آوری‌های مختلف خنک‌کننده پنل PV خورشیدی بحث کرده‌اند. با این حال، تنها چند فناوری معرفی شدند در حالی که تمرکز اصلی مقاله بر روی آزمایش و عملکرد سیستم خنک‌کننده صفحه مرکزی متصل به زمین (GC-CPCS) بود.

در مرجع [۹]، نویسندگان مروری بر روش‌های مختلفی ارائه کردند که می‌توانند برای خنک‌کردن سلول‌های فتوولتائیک استفاده شوند. با این حال، با نگاه دقیق، میتوان دریافت که تمرکز مقاله تنها بر بررسی روش‌های خنک‌سازی غیرفعال، هوای اجباری و همرفتی اجباری مایع اعمال شده در سیستم‌های مختلف متمرکزکننده خورشیدی بوده است.

برخلاف مطالعات مروری ذکر شده در بالا، این مقاله مروری جامع از چگونگی استفاده از فناوری‌های مختلف برای به حداقل رساندن اثرات منفی افزایش دما ارائه می‌کند، در حالی که تلاش می‌کند عملکرد یک پنل PV را که فراتر از دمای توصیه شده در شرایط تست استاندارد (STC) است، بهبود بخشد. برای این منظور تعداد زیادی مقاله پژوهشی از نویسندگان مختلف برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر استفاده شده است. ابزارهای مختلفی (نمودارهای شماتیک، تصاویر، جداول و شکل‌ها) برای ارتقای محتوا و ارائه یک ارائه مؤثر و ساده استفاده می‌شود [۱۰].

در این مقاله فناوری‌های زیر مورد بحث و تحلیل قرار گرفته‌اند:

- سیستم خنک‌کننده متمرکز دایایی شناور (FTCC).
- سیستم فتوولتائیک / حرارتی خورشیدی هیبریدی که با پاشش آب خنک می‌شود.
- سیستم فتوولتائیک / ترموالکتریک خورشیدی هیبریدی (PV/TE) که توسط هیت سینک خنک می‌شود.
- سیستم فتوولتائیک / حرارتی خورشیدی هیبریدی (PV/T) که با گردش آب اجباری خنک می‌شود.
- بهبود عملکرد پنل‌های خورشیدی از طریق استفاده از مواد تغییر فاز.
- پنل خورشیدی با تکنیک خنک‌کننده غوطه‌ور در آب.
- پنل PV خورشیدی با پوشش شفاف (خنک‌کننده کریستال فوتونیک) خنک می‌شود.
- سیستم فتوولتائیک / حرارتی خورشیدی هیبریدی که با گردش هوای اجباری خنک می‌شود.
- پنل خورشیدی با خنک‌کننده ترموالکتریک.

بهر حال برای انتخاب مناسب‌ترین سیستم خنک‌کاری برای پنل فتوولتائیک، نیاز است تا با مشخصات فنی پنل و شرایط محیطی موجود در محل نصب آن آشنا شوید. در بعضی موارد، ممکن است نیاز به سیستم خنک‌کاری برای پنل فتوولتائیک نباشد، به دلیل شرایط محیطی کمتر گرم و یا هوای خنک‌تر در طول روز؛ لذا، برای انتخاب سیستم خنک‌کاری مناسب برای پنل فتوولتائیک، مشاوره با متخصصان مجرب و تجربه‌دار در این زمینه، مفید واقع خواهد شد. در زیر به چند نمونه از سیستم‌های خنک‌کاری برای پنل فتوولتائیک اشاره می‌کنم:

۱. سیستم خنک‌کاری با آب: در این سیستم، آب از طریق لوله‌هایی که در زیر پنل قرار می‌گیرند، جریان داده می‌شود تا حرارت را از پنل جمع‌آوری کند و به مبدل حرارتی منتقل شود. در مبدل حرارتی، حرارت جمع‌آوری شده توسط آب، به هوا منتقل می‌شود و سپس آب خنک شده به پمپ بازگردانده می‌شود و مجدداً با جریان دادن به پنل، حرارت جمع‌آوری شده را به مبدل حرارتی منتقل می‌کند.

۲. سیستم خنک‌کاری با هوا: در این سیستم، هوای خنک از محیط به وسیله فن وارد پنل می‌شود و حرارت جمع‌آوری شده توسط پنل را به هوا منتقل می‌کند و سپس هوای گرم به بیرون منتقل می‌شود.

۳. سیستم خنک‌کاری با گاز: در این سیستم، یک گاز خنک‌کننده از طریق لوله‌هایی که در زیر پنل قرار دارند، جریان داده می‌شود تا حرارت را از پنل جمع‌آوری کند و به مبدل حرارتی منتقل شود. در مبدل حرارتی، حرارت جمع‌آوری شده توسط گاز، به هوا منتقل می‌شود و سپس گاز خنک شده به پمپ بازگردانده می‌شود و مجدداً با جریان دادن به پنل، حرارت جمع‌آوری شده را به مبدل حرارتی منتقل می‌کند.

برای انتخاب مناسب‌ترین سیستم خنک‌کاری برای پنل فتوولتائیک، نیاز است به مشخصات فنی پنل و شرایط محیطی توجه شود.

یکی از گسترده‌ترین فناوری‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک (PV) است که نور خورشید را به انرژی الکتریکی قابل استفاده تبدیل می‌کند [۱]، [۲]. این نوع از فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر که در حین کار بدون آلاینده است، مسائل گرمایش جهانی را کاهش می‌دهد، هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهد و حداقل تعمیر و نگهداری و بالاترین چگالی توان را در مقایسه با سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد، مزایای انرژی فتوولتائیک خورشیدی (PV) را برجسته می‌کند [۳]، [۴]. جدا از چندین مزیت نمایش داده شده توسط فناوری PV، این سیستم تبدیل دارای برخی مشکلات کلی مانند تگرگ، گرد و غبار و دمای عملیاتی سطحی است که می‌تواند بر



طراحی و پیاده سازی سیستم انژکتور هوا تغذیه بر روی موتور پراید

چکیده

به دلیل اینکه بیشتر سوخت ها در حالت مایع به راحتی محترق نمی شوند؛ از عملیات اتمیزه کردن استفاده می شود. به عنوان مثال اگر یک کبریت روشن را درون محفظه ی حاوی نفت فرو کنیم، شعله ی آن به سرعت خاموش می شود. لذا برای محترق کردن این قبیل سوخت ها، نیاز است تا آنها را از حالت مایع به ذرات کوچک (اتمیزه) تبدیل کنیم. یکی از راه های موثر برای رسیدن به این هدف، استفاده از انژکتور هوا تغذیه است. در این پژوهش، با طراحی و ساخت یک انژکتور هوا تغذیه برای سوخت بنزین، سعی در بهبود عملیات اتمیزاسیون شده است. همچنین، به دلیل وفور خودروی پراید در سطح جاده های کشور، به پیاده سازی این انژکتور بر روی موتور پراید اقدام شد؛ و به وضوح، بهبود میزان اتمیزه شدن سوخت مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: موتور پراید، اتمیزاسیون بنزین، انژکتور هوا تغذیه

مقدمه

اتمیزه کردن سوخت، سطح تماس آن را با اکسیژن هوا بیشتر کرده و احتراق آن را آسان تر می کند. به عنوان مثال، می توان توسط یک نازل، دبی ۱ گالن بر ساعت سوخت نفتی در فشار عملکردی ۷ بار را به بیش از ۵۰ میلیارد قطره ی سوخت در ساعت تبدیل کرد. سایز این قطره ها از ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۱ اینچ متغیر است [۱]. به وسیله ی این فرایند سطح تماس سیال در حدود ۳۸۰۰ برابر افزایش می یابد. اگر اتمیزه شدن ناقص صورت گیرد، اندازه قطرات بزرگ خواهد بود و این ذرات به صورت ناقص محترق شده و به صورت نیم سوز از شعله خارج می شوند. این مسئله به صورت پرتاب شدن ذرات آتش در شعله دیده می شود و تنها باعث احتراق ناقص و پایین بودن راندمان نشده و باعث تشکیل رسوب در محفظه ی احتراق نیز می شود [۲]. روش های مختلفی جهت برآورده کردن نیازهای سیستم در بوجود آمدن سوختی کاملاً اتمیزه شده جهت تشکیل مخلوط مناسبی از سوخت-هوا وجود دارد تا از معایبی مانند تغلیظ سوخت در داخل سیلندر ها جلوگیری به عمل آید. یکی از روش هایی که می توان به این مطلوب دست یافت استفاده از انژکتورهای هوا تغذیه است [۳]. در این روش هوای محترق با سرعتی بالا از مانیفولد ورودی واقع در بالای دریچه ی گاز حرکت می کند، سپس از دریچه ای کالیبره شده که مستقیماً در دیسک دریچه پاشش قرار دارد عبور می کند. فعل و انفعالات موجود مابین مولکول های سوخت و هوا باعث اتمیزه شدن سوخت می شود [۴]. برای مکش هوا در هنگام باز شدن دریچه، یک خلأ نسبی مرتبط با فشار

اویس غلامی^۱
محمد حسین شفیعی میم^۲

۱- دانشجوی دکتری دینامیک کنترل ارتعاشات دانشگاه گیلان،
۲- استادیار، دانشگاه بزرگمهر قاپات

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فشار هوای مورد نیاز برای این سیستم توسط یک مخزن (پمپ) باد تامین می گردد. در ادامه، تقسیم کننده ی اصلی وظیفه ی تقسیم هوا بین انژکتورها را بر عهده دارد. اهمیت وجود این قطعه از آن جهت است که تا جریانی یکسانی از هوا را برای هر انژکتور مجزا تامین کند. تقسیم کننده جریان ساخته شده در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- تقسیم کننده اصلی

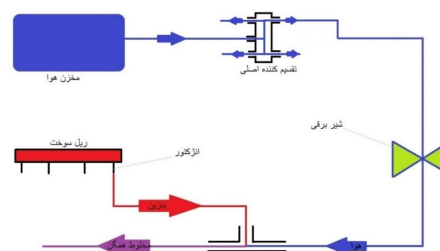
سپس، هر انشعاب از تقسیم کننده ی اصلی به یک شیر برقی متصل شد. شیر برقی از سه قسمت (ورودی، خروجی و کنترل) تشکیل شده است. هوا از قسمت ورودی وارد شده و پس از دریافت فرمان از ECU و باز شدن شیر کنترل، اجازه عبور هوا داده می شود. پس از آن، هوا از مسیر خروجی در نظر گرفته شده خارج می شود. شیر برقی، در محل اتصال برق و دریافت فرمان، به انژکتور سوخت به طور موزای متصل شد.

اتمیسفریک در مانیفولد ورودی مورد نیاز است. این نوع طراحی در شرایط عملکرد نیم بار (باز بودن قسمتی از دریچه گاز)، موثر خواهد بود [۵]. سوخت تزریقی از طریق انژکتورها به درون مجرای یاد شده به صورت مایع است، برای احتراق بهتر سوخت، باید آن را به فاز همگن با هوای ورودی تبدیل کرد، برای رسیدن به این حالت کافی است سرعت برخورد هوا با جریان سوخت مایع را به نحوی تنظیم کرد که مایع به ذرات بسیار کوچکی تبدیل شود و شرایط برای هرچه همگن تر شدن مخلوط سوخت و هوا محیا گردد. پژوهشگرانی که پیش از این به طور مشخص انژکتورهای هوا تغذیه را مورد مطالعه قرار داده اند عبارتند از: هارادا و همکاران [۶]، کیم و همکاران [۷]، لی و همکاران [۸]، اسپیتزی و همکاران [۹].

در این پژوهش با تمرکز بر موتور پراید، مکانیزمی مشابه با انژکتور هوا تغذیه ساخته شد؛ و ویژگی های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم یاد شده از نازل سوخت موتور پراید بهره گرفته و هیچ هزینه اضافی ای را در بر ندارد.

طراحی و ساخت

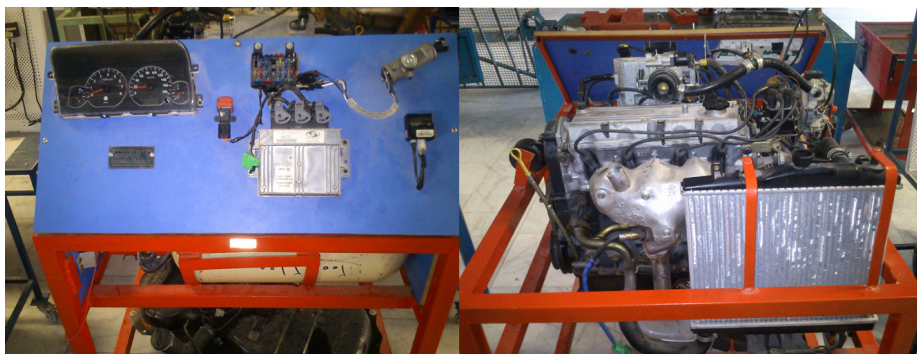
شمای کلی طرح بصورت زیر است:



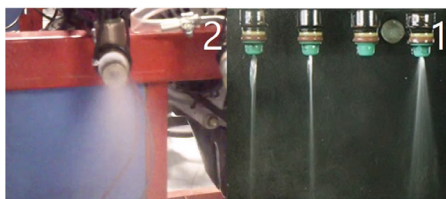
شکل ۱- شمای کلی طرح

بررسی نتایج به دست آمده

شکل زیر نمایی از موتور پراید استفاده شده در مراحل سنجش کارایی سیستم طراحی شده را نشان می دهد.



شکل ۷- نمایی از موتور پراید استفاده شده



شکل ۹- مقایسه پاشش در حالت معمولی و تغییر یافته (۱-)

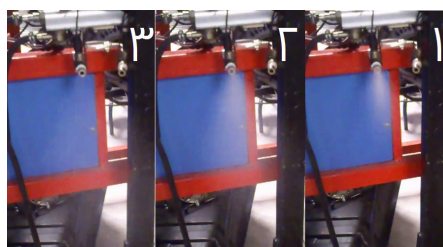
نتیجه گیری

در این پژوهش با تمرکز بر موتور پراید، مکانیزمی مشابه با انژکتور هوا تغذیه ساخته شد؛ ویژگی های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم یاد شده از نازل سوخت موتور پراید بهره گرفته و هیچ هزینه اضافی ای را در بر ندارد. سیستم طراحی شده با استفاده از شیرهای برقی استفاده شده در سیستم کنیستر موتور پراید به کنترل جریان هوای وارد شده به مجموعه انژکتور هوا تغذیه را بر عهده دارد. با استفاده از سیستم طراحی شده، به وضوح بهبود وضعیت پاشش سوخت مشاهده شد. تشکیل مه همگن از بنزین در ترکیب با هوا در مقایسه با پاشش سوخت به روش معمول که در آن بنزین به تنهایی پاشش گردیده است در عمل منجر به احتراقی همگانی و آبی در تمام محفظه ی احتراق گردیده و کارکرد نرم تر موتور را سبب می شود.

منابع و مراجع

- [1] B. Abramzon and W. Sirignano, «Droplet vaporization model for spray combustion calculations,» International journal of heat and mass transfer, vol. ۳۲, no. ۹, pp. ۱۸۸۹, ۱۱۱۸-۱۱۵۰.
- [2] J. Broda, S. Seo, R. Santoro, G. Shirhattikar, and V. Yang, «An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector,» in Symposium (International) on Combustion, ۱۹۹۸, vol. ۲۷, no. ۲, pp. ۱۸۵۲-۱۸۴۹: Elsevier.
- [3] F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo, and M.-C. Lai, «The Spray Structure of Air-Shrouded Dual-Stream Port Fuel Injectors With Different Air-Mixing Mechanisms,» Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. ۱۲۰, no. ۱, pp. ۱۹۹۸, ۲۲۴-۲۱۷.
- [4] M. Kashiwaya, T. Kosuge, K. Nakagawa, and Y. Okamoto, «The effect of atomization of fuel injectors on engine performance,» SAE Technical Paper ۱۹۹۰, ۷۱۹۱-۱۴۸.
- [5] F. X. Tanner, K. Feigl, O. Kaario, and E. J. Windhab, «Modeling and simulation of air-assist atomizers with applications to food sprays,» Applied Mathematical Modelling, vol. ۴, no. ۱۱, pp. ۷۱۲, ۷۱۳۳-۷۱۳۱.
- [6] K. Harada, R. Shimizu, K. Kurita, M. Muramatsu, T. Makimura, and M. Ohashi, «Development of air-assisted injector system,» SAE Technical Paper ۱۹۹۲, ۷۱۹۱-۱۴۸.
- [7] B. Kim, K. Lee, and C. Lee, «Analysis of an atomization mechanism for an air-shrouded injector,» Measurement Science and Technology, vol. ۱۳, no. ۱, p. ۲۰۱, ۱۵.
- [8] Y. C. Lee, D. C. Kim, K. Y. Ji, M. H. Song, J. S. Hong, and B. K. Park, «Optimum Parameter Design for Air Shrouded Injector using Two Phase Flow Analysis,» SAE Technical Paper ۱۹۹۹, ۷۱۹۱-۱۴۸.
- [9] A. Spiteri et al., «Comparative analysis on the performance of pressure and air-assisted urea injection for selective catalytic reduction of NOx,» Fuel, vol. ۱۱۱, pp. ۲۱۵, ۲۷۷-۲۶۹.

پس از راه اندازی موتور با تغییرات انجام شده دیده شد که موتور تنها در دور آرام کار می کند و اندکی تغییر در وضعیت دریچه گاز باعث می شود که ورودی هوا از سوخت پیشی گرفته و موتور خاموش شود. برای رفع این نقص باید برنامه ریزی ECU را تغییر داد تا متناسب با سیستم پیاده شده عمل کند. برنامه ریزی ECU از آن جهت مهم است که کنترل میزان باز و بسته بودن دریچه انژکتور را بر عهده دارد؛ و چون سیستم برق انژکتور با شیر برقی ورود هوا موازی است، پس کنترل هوای ورودی نیز بر عهده آن است. کنترل میزان هوای ورودی را با تغییر فشار پمپ می توان در دست گرفت. با به تعادل رساندن این دو مورد یعنی میزان هوای ورودی (با کنترل فشار مخزن هوا) و میزان سوخت (با زمان باز بودن دریچه انژکتور) می توان به ترکیبی دست یافت که تمام مدت در دورهای مختلف کاری موتور، بهینه باشد. کارکرد موتور در دور آرام و پس از تغییر به وضوح با کاهش صدای موتور و کارکرد نرم آن نسبت به قبل از تغییر همراه بود. به دلیل نبود امکانات سنجش عملکرد موتور، به تصویربرداری از خروجی سوخت و هوا بسنده شد. با مشاهده تصاویر حاصل از پاشش سوخت انجام شده، تشکیل مه بنزین در حالتی همگن به وضوح دیده می شود.



شکل ۸- مراحل پاشش سوخت و هوا

با مشاهده و تصویربرداری از نحوه پاشش سوخت در دو حالت قبل و بعد از اعمال تغییرات، به وضوح بهبود وضعیت پاشش سوخت مشاهده شد. تشکیل مه همگن از بنزین در ترکیب با هوا در مقایسه با پاشش سوخت به روش معمول که در آن بنزین به تنهایی پاشش گردیده است در عمل منجر به احتراقی همگانی و آبی در تمام محفظه ی احتراق گردیده و کارکرد نرم تر موتور را سبب می شود. علاوه بر آن، چنانچه بتوان این ترکیب را در حین تمام مراحل کاری موتور حفظ کرد، می توان به کاهش مصرف سوخت نیز چشم داشت، زیرا با حذف ضربات ناشی از احتراق ناهمگون و غیر آبی در تمام محفظه احتراق، می توان تلفات انرژی را کاهش داد و از سوخت مصرف شده بازده بیشتری دریافت کرد.

برای این منظور، سیم های ورودی برق انژکتور به سیم های ورودی برق شیر برقی متصل گردید؛ تا در زمانی که پاشش سوخت انجام می شود، تزریق هوا نیز صورت گیرد. این عمل از آن جهت دارای اهمیت است که از ورود هوای ناخواسته و افزون بر نیاز موتور جلوگیری شود. این هوای ورودی، تنها برای تغییر



شکل ۳- شیر برقی کنیستر

شکل سوخت از حالت مایع به ذرات کوچک معلق در هوا استفاده می شود؛ و هوای مورد استفاده برای عمل احتراق از طریق منیفولد ورودی و راه طبیعی در نظر گرفته شده تامین می گردد. شیر برقی استفاده شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.

پس از آن، شیر برقی به سه راهی اختلاط متصل شد. در قسمت ورودی سوخت این قطعه، انژکتور معمولی موتور پراید قرار داده شد. قطعه استفاده شده برای این منظور در شکل ۴ مشخص است.



شکل ۴- سه راهی اختلاط

و در نهایت، خروجی سه راهی اختلاط به محل تعبیه شده برای جایگیری انژکتور در سرسیلندر (بدون اعمال هیچ تغییری) متصل شد. نمای کلی سیستم پیشنهادی ساخته شده در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- نمای کلی سیستم پیشنهادی

نحوه اتصال سه راهی اختلاط و مجموعه انژکتور در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نحوه اتصال انژکتور به سه راهی اختلاط

ساخت فن بدون پره

۱- امیررضا رزمی، دانشجوی دکتری در کانادا
۲- بهزاد مهدوی، دانش آموخته مکانیک، دانشگاه تبریز



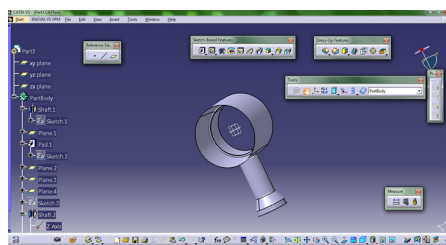
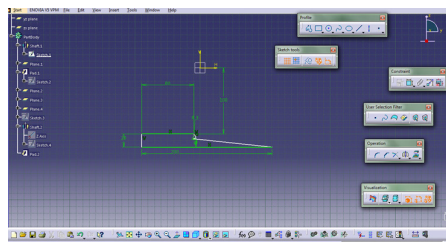
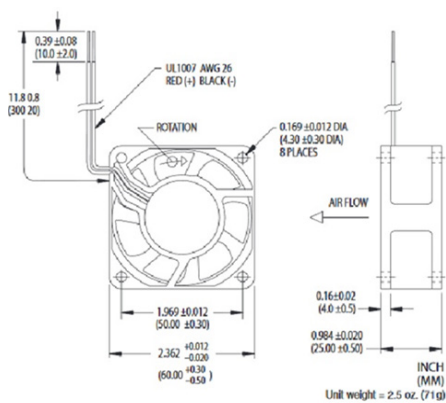
فن‌های بدون پره چگونه کار می‌کنند؟

اولین باری که این وسیله را می‌بینید اصلاً تصور نمی‌کنید که بتواند شما را خنک کند چون هیچ بخش متحرکی در آن دیده نمی‌شود. ولی وقتی که پنکه را روشن می‌کنید، از حلقه آن باد خارج می‌شود. حال سؤال اینست که این پنکه بدون پره چگونه کار می‌کند؟

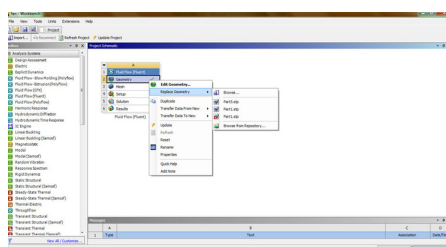
- مکانیزم دستگاه و اصول سیالاتی

طراحی این گونه از فن‌ها تلفیقی از فن‌های محوری و شعاعی است و خصوصیات هر دو دسته فن‌ها را دارا هستند. مکانیزم عملکرد اینگونه فن‌ها، بدین شکل است که چرخش‌های پره‌های شعاعی، سبب مکش هوا به داخل فن می‌شود. سپس هوای ورودی با عبور از قسمت دایره‌ای دارای مقطعی ایرفویل شکل، شتاب می‌گیرد. این فن به خاطر هندسه خاصی که دارد، مانند اجکتور عمل کرده، هوای خارج شده از فن سبب مکش هوای پشت فن و هوای اطراف فن می‌شود. حرکت مجموع جریان هوای ورودی، هوای پشت فن و هوای اطراف فن به سمت جلوی فن سبب می‌شود دبی هوای خروجی چند برابر دبی هوای ورودی فن باشد. این افزایش دبی به واسطه مکش هوای پشت فن از ویژگی‌های متمایز این فن نسبت به فن‌های دیگر است.

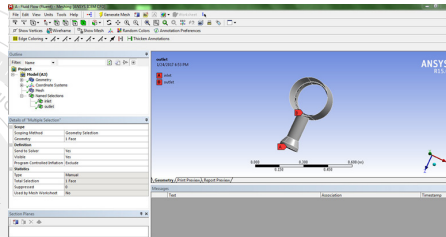
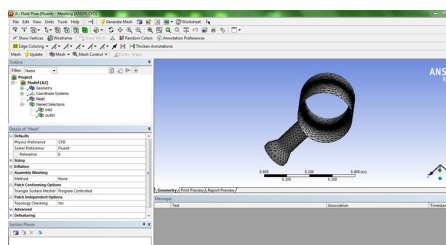




پس از رسم هندسه آن را در نرم افزار Fluent محیط geometry فراخوانی می‌کنیم:

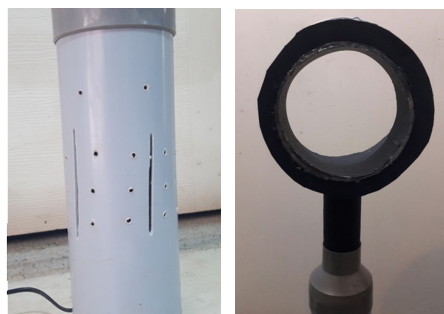


سپس وارد محیط mesh شده و در آنجا مش بندی و نام گذاری سطح ورودی و خروجی را انجام می‌دهیم:



برای ساخت پایه فن از لوله پلیکا استفاده کرده‌ایم و فن پره‌ای که هوا را به داخل حلقه انتقال می‌دهد داخل لوله پلیکای ۴ اینچی قرار داده‌ایم و در قسمت پایین این لوله سوراخ‌هایی ایجاد کرده‌ایم تا هوا وارد لوله شده و توسط فن پره‌ای به داخل حلقه منتقل شود.

عکس‌هایی از قسمت‌های مختلف فن:



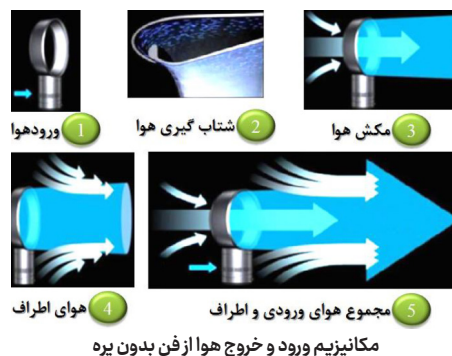
مشخصات فن پره‌ای



مشخصات فنی	
پارت نامبر	TA225DC
مدل	TA225DC B35441-94
شرکت سازنده	Nidec
ابعاد	۶cm * 6cm * 3.8cm
وزن	100 gr
ولتاژ	12V
جریان	1.5A
توان	3.8W
سرعت	RPM 4300
تعداد پین	سه سیمه
نوع موتور	Brushless
سیستم	Ball Bearing

حال به بررسی فن ساخته شده خودمان می‌پردازیم: قطر خارجی حلقه ۲۴ سانتی متر و قطر داخلی ۲۲ سانتی متر و اندازه سوراخ فن که هوا وارد شده به حلقه از آن خارج می‌شود ۲ سانتی متر است، عرض فن ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن حدود ۶۰ سانتی‌متر است.

در شکل زیر مکانیزم ورود و خروج هوا از این فن به صورت شماتیک و به ترتیب نمایش داده شده است:



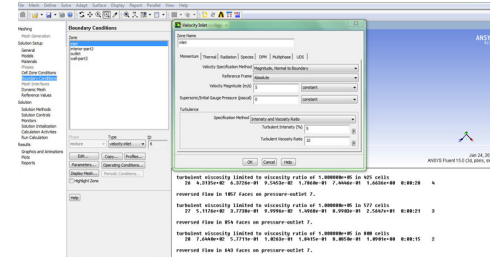
Air Multiplier دقیقاً یک پنکه بدون پره نیست. این پنکه دارای پره می‌باشد ولی درون استوانه پایه آن قرار گرفته است. یک موتور الکتریکی پره‌های دورنی این وسیله را می‌چرخاند تا هوا را به درون دستگاه بکشد. وقتی هوای مکش شده به درون حلقه بالایی می‌رسد، حلقه همانند یک سطح شیب‌دار عمل کرده و جریان هوا را به سمت سوراخ‌های خروجی هدایت می‌کند. برای اینکه فرآیند مکش و فوت کردن باد قابل توجهی ایجاد کند، باید موتور بسیار قدرتمند باشد که مصرف برق زیادی می‌طلبد و صدای زیادی هم ایجاد می‌کند. به همین دلیل باید مکانیزمی برای افزایش هوای خروجی در نظر گرفته شود. این مشکل به لطف قوانین فیزیکی inducement and entrainment برطرف می‌شود. وقتی موتور هوا را به داخل می‌کشد، در پشت پنکه خلاء ایجاد شده که موجب هجوم هوا به درون پنکه می‌شود. در هنگام خروج هم مولکول‌های هوا حرکت یکدیگر را هم‌افزایی می‌کنند. بدین طریق حجم هوای خروجی ۱۵ برابر توان مکش موتور است. این مسأله موجب می‌شود که هوای خروجی پنکه بدون پره یکنواخت و مطبوع‌تر از هوای چرخشی پنکه‌های سنتی باشد.



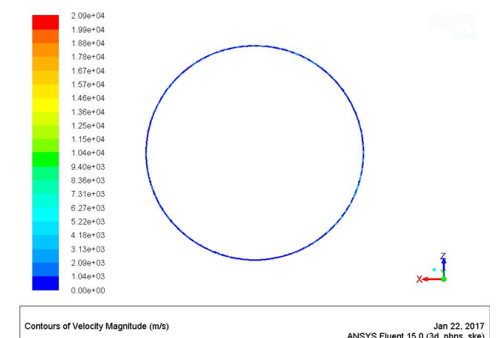
حال به بررسی فن ساخته شده خودمان می‌پردازیم: قطر خارجی حلقه ۲۴ سانتی متر و قطر داخلی ۲۲ سانتی متر و اندازه سوراخ فن که هوا وارد شده به حلقه از آن خارج می‌شود ۲ سانتی متر است، عرض فن ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن حدود ۶۰ سانتی‌متر است.



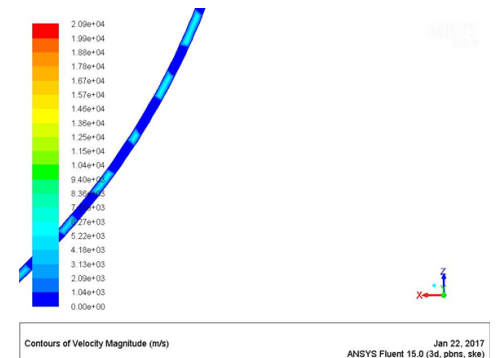
همانطور که از شکل مشخص است یک سطح ورودی با نام inlet و یک سطح خروجی با نام outlet داریم که در محیط setup برای به دست آوردن خروجی به آنها نیاز داریم، حال وارد محیط setup شده و پس از فعال کردن گزینه سرعت (چون برای ما سرعت در این حالت مهم است) به boundary conditions به سرعت ورودی inlet را 5 m/s در نظر می‌گیریم:



بعد از طی مراحل حال نتایج را از results به دست می‌آوریم که به صورت زیر می‌باشد، البته کل شکل مد نظر ما نیست و فقط سرعت قسمت خروجی مد نظر می‌باشد، که به صورت یک دایره می‌باشد.



البته این شکل کاملاً گویا نیست، با زوم کردن بهتر نتیجه را درک می‌کنیم.



همانطور که از شکل پیداست سرعت خروجی به چیزی حدود 40 m/s می‌رسد که ۸ برابر سرعت ورودی می‌باشد که نتیجه قابل قبولی می‌باشد.

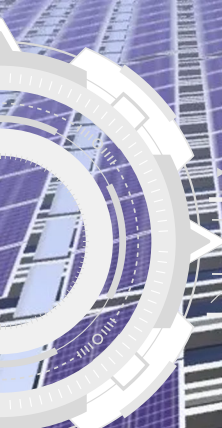
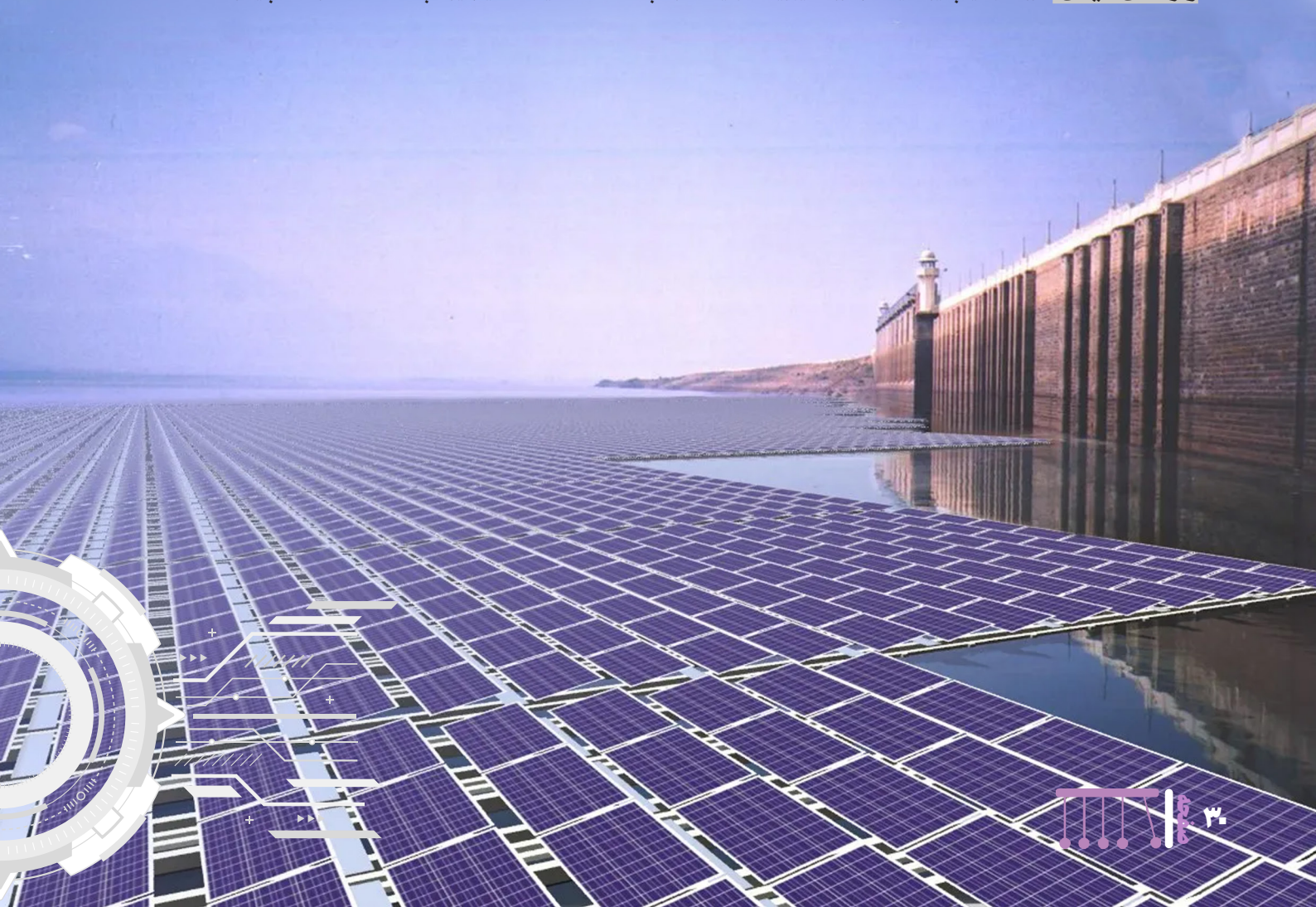
مدل سازی و بهینه سازی سیستم های انرژی هیبریدی با استفاده از شاخص های فنی-اقتصادی و زیست محیطی

سید امیر رضا عبد اللهی، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

توسعه فناوری های انرژی دارای بازدهی بالا، مطمئن و فاقد آلاینده های زیست محیطی از اهمیت زیادی در راستای توسعه پایدار برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش، بهینه سازی چندهدفه فنی-اقتصادی و زیست محیطی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی برای تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی یک مجموعه مصرف کننده بزرگ انرژی است. توابع هدف در نظر گرفته شده، احتمال عدم تأمین برق (شاخص فنی)، هزینه خالص فعلی (شاخص اقتصادی) و انتشار چرخه عمر (شاخص زیست محیطی) هستند و واحدهای سیستم انرژی هیبریدی شامل فتوولتائیک، توربین بادی، برق شبکه، پیل سوختی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن، باتری و اینورتر بوده که ظرفیت آن ها متغیرهای تصمیم گیری پروژه است. برای انجام پژوهش، پیکربندی های مختلف سیستم انرژی هیبریدی در نرم افزار HOMER مدل سازی و شبیه سازی شده و با توسعه برنامه ای در نرم افزار MATLAB، طراحی های نامغلوب از میان پیکربندی های شبیه سازی شده پیدا می شود. سپس طراحی نهایی از میان مجموعه گزینه های بهینه چندهدفه با کمک روش تصمیم گیری چندمعیاره TOPSIS ترکیب شده با روش وزنی انتروپی پیدا می شود. در مجموع، تعداد ۷۰۰ سیستم بهینه چندهدفه شامل ۵۹۲ سیستم متصل به شبکه و ۱۰۸ سیستم مستقل از شبکه در ۴۵ پیکربندی مختلف پیدا شد. مجموعه طراحی های پارتو دربرگیرنده طیف وسیعی از شاخص های فنی-اقتصادی و زیست محیطی بودند؛ به طوری که محدوده (متوسط) هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخه عمر آن ها به ترتیب $2/8-17/43$ ($27/5$) میلیون دلار، $0-100$ ($4/4$) درصد و $6/6-196/358$ ($272/2$) کیلو تن بود. مشاهده شد که سیستم انرژی هیبریدی منتخب با دارا بودن بازدهی فنی در حد سامانه تأمین انرژی مرسوم برق و گاز شبکه، $13/8\%$ انتشار چرخه عمر کمتر به ازای افزایش هزینه خالص فعلی $22/3\%$ دارد.

واژه های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، سیستم انرژی هیبریدی، بهینه سازی چندهدفه، تحلیل تصمیم گیری چندشاخصه، توسعه پایدار



۱. مقدمه:

۱-۱. پیشگفتار:

مصرف انرژی در جهان به طور قابل ملاحظه ای در حال افزایش است. برای نمونه، مصرف نهایی برق در جهان با متوسط رشد سالیانه ۴ درصدی، از مقدار ۱۴۱۵۸/۶ تراوات ساعت در ابتدای قرن حاضر به ۲۵۰۲۷/۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۱۹ رسیده است. این موضوع منجر به افزایش روزافزون تولید انرژی شده است. آمار آژانس بین المللی انرژی^۱ نشان می دهد که اگرچه کماکان منبع اصلی تولید انرژی در جهان، انواع سوخت های فسیلی نظیر زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت است، ولی روند کلی استفاده از این منابع در تأمین انرژی جهانی کاهش یافته است. این در حالی است که سهم منابع تجدیدپذیر و کم کربن در تولید انرژی جهانی افزایش قابل توجهی داشته است؛ برای نمونه، سهم فناوری های تجدیدپذیر در تولید برق از ۱۷/۱٪ در سال ۲۰۱۰ به ۲۳/۲٪ در سال ۲۰۱۹ رسیده است. این موضوع نشان از توجه ویژه بسیاری از کشورها به توسعه پایدار دارد. هرچند برای کشور ایران در سال ۲۰۱۹، سهم فناوری های تجدیدپذیر در تولید برق کشور فقط حدود ۵٪ بوده است [۱]. پیامدهای مخرب زیست محیطی (آلودگی هوا و گرمایش جهانی) ناشی از مصرف بی رویه سوخت های فسیلی بر هیچ کس پوشیده نیست [۲؛ ۳]. با توجه به این موضوع و محدود بودن منابع سوخت های فسیلی، در سالیان اخیر به کارگیری انرژی های پاک نظیر خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و برق آبی برای تأمین انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴-۶]. کشور ایران، علاوه بر دارا بودن ذخایر وسیع نفت و گاز، از منابع فراوان انرژی تجدیدپذیر نیز بهره مند است. برای نمونه، ظرفیت نامی انرژی بادی در ایران چیزی حدود ۶۰ هزار مگاوات تخمین زده می شود که پتانسیل تولید ۱۸ هزار مگاوات برق را دارد [۷]. همچنین با توجه به قرارگیری ایران بر روی کمربند خورشیدی، اغلب شهرهای کشور دارای حداقل ۳۰۰ روز آفتابی در سال هستند، به گونه ای که متوسط تابش خورشیدی روزانه کشور، مقدار قابل توجه ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع است [۸]. بر این اساس، گزارش می شود که در فقط ۱٪ از مساحت کشور، می توان بالغ بر ۹ میلیون مگاوات ساعت برق در یک روز به کمک سیستم های خورشیدی (دارای بازدهی ۱۰ درصدی) تولید کرد؛ این در حالی است که متوسط کل انرژی روزانه مورد نیاز کشور ۸/۷ میلیون مگاوات ساعت است [۹].

منابع انرژی تجدیدپذیر که در نواحی مختلف جغرافیایی در دسترس هستند، می توانند جایگزین مناسب سوخت های فسیلی برای تأمین نیازهای بشر در نظر گرفته شوند. اما مشکل اصلی فناوری های تجدیدپذیر، وابستگی بیش از حد آن ها به شرایط محیطی است. یک رویکرد مناسب برای فائق آمدن بر این مسئله، ترکیب این منابع با سوخت های مرسوم فسیلی است. به این طریق می توان با بهره گیری از مزیت های یکی از این منابع انرژی برای متعادل نمودن ضعف های دیگری استفاده نمود. ویژگی اصلی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی، استفاده از چندین منبع انرژی (فناوری) مختلف برای تأمین نیازهای انرژی است؛ به طوری که حداقل یکی از این منابع، از نوع تجدیدپذیر باشد. هدف از به کارگیری چنین سیستمی، به حداقل رساندن مصرف سوخت های فسیلی است؛ به این طریق که فقط در زمان هایی که فناوری های تجدیدپذیر قادر به تأمین انرژی مورد نیاز نیستند، از سوخت های فسیلی استفاده شود. قابل ذکر است که باتوجه به افزایش بازدهی و روند کاهشی قیمت فناوری های تجدیدپذیر به دلیل پیشرفت های اخیر و حمایت های دولتی، به کارگیری سیستم های هیبریدی در شرایطی خاص می تواند برای سرمایه گذاران از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد [۱۰].

۱-۲. مروری بر ادبیات پژوهش:

با توجه به وابستگی فناوری های تجدیدپذیر به شرایط محیطی، پتانسیل سیستم های هیبریدی متشکل از آرایه های فتوولتائیک و توربین بادی در اقلیم های مختلف برای تأمین انواع الکدهای مصرف انرژی در مقیاس های کوچک و بزرگ در مقالات پیشین به وفور بررسی شده است [۱۱-۱۳]. اگرچه این سیستم های هیبریدی ساده بسیار زیست دوست هستند، برای برقرار کردن عملکرد فنی مورد انتظار می بایست اندازه های بسیار بزرگی داشته باشند که این امر می تواند منجر به اتلاف قابل توجه انرژی در شرایط کم باری شود. برای حل این مشکل، می توان از باتری ها برای ذخیره انرژی اضافی استفاده کرد که از طرفی خود منجر به افزایش هزینه های اولیه شده و در عمل، اغلب فاقد جذابیت اقتصادی برای سرمایه گذاران هستند [۱۴]. راهکار دیگر، اتصال سیستم های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی به شبکه برق سراسری یا افزودن یک منبع انرژی وابسته به سوخت های فسیلی به ریزشبکه است. واضح است که این نوع طراحی، اگرچه جذابیت فنی-اقتصادی دارد ولی از طرفی منجر به کاهش سهم انرژی های تجدیدپذیر در تأمین انرژی می شود [۱۵].

تحقیقات زیادی برای تحلیل سیستم های هیبریدی انجام شده که نتایج کلی حاکی از آن است که کاربرد این فناوری منجر به بهبود بازدهی کلی سیستم شده و تا حد زیادی مشکلات سیستم های انرژی مرسوم را برطرف می کند. برای نمونه، لائو^۲ و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید انرژی هیبریدی فتوولتائیک-دیزل را در کشور مالزی ارزیابی کردند. ایشان گزارش کردند که این سیستم، هزینه تولید انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای را در مقایسه با یک ژنراتور دیزلی مستقل کاهش می دهد. فاضل پور و همکاران [۱۷] با استفاده از نرم افزار HOMER به مقایسه سیستم های هیبریدی متشکل از فناوری های تجدیدپذیر توربین بادی و پنل های فتوولتائیک، منبع انرژی غیرتجدیدپذیر دیزلی و همچنین باتری برای یک هتل واقع در کیش با انرژی مورد نیاز سالیانه بالغ بر ۲/۵ گیگاوات ساعت پرداختند. آن ها بیان کردند که برای مورد مطالعه، یک سیستم هیبریدی باد-دیزل-باتری انتخاب بهتری نسبت به سیستم های فتوولتائیک-دیزل-باتری و فتوولتائیک-باد-دیزل-باتری است. به طور خاص، سیستم بهینه در این تحقیق شامل یک ژنراتور دیزلی ۶۰۰ کیلوواتی، پنج توربین بادی ۲۰ کیلوواتی و ۳۵ باتری می شد که به موجب آن هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی ۰/۳۱۸ دلار تخمین زده شد.

رودریگز^۳ و همکاران [۱۸] به بررسی فنی تأمین نیازهای برق، آب گرم مصرفی، گرمایش و سرمایش یک ساختمان مسکونی در اسپانیا با استفاده از یک سیستم هیبریدی مولد همزمان حرارت و برق^۴ (CHP) متشکل از کلکتور حرارت گیر خورشیدی، پنل های فتوولتائیک و موتور احتراق داخلی پرداختند. ایشان گزارش کردند که برای افزایش جذابیت اقتصادی سیستم های انرژی هیبریدی برای سرمایه گذاران، لازم است علاوه بر طراحی بهینه این سیستم ها، مشوق های مناسب تری نیز از طرف دولت در نظر گرفته شود.

در مطالعه دیگری، استفاده از یک سیستم هیبریدی متشکل از زیست توده-فتوولتائیک-دیزل برای تأمین نیازهای انرژی یکی از روستاهای متصل به شبکه نواحی شرقی ایران بررسی شد [۱۹]. با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی کشور در سال های اخیر، گزارش شد که سیستم بهینه هیبریدی متشکل از ۱۰ کیلووات ژنراتور بیوگاز، ۶۳ کیلووات فتوولتائیک و ۱۵ کیلووات ژنراتور دیزلی است. همچنین در یک تحلیل حساسیت نشان داده شد، هزینه تولید انرژی در سیستم بهینه می تواند از ۰/۸۵٪ تا ۰/۲۳۸٪ دلار بر کیلووات ساعت با توجه به پارامترهای اقتصادی تغییر کند. در تحقیق مشابه جدیدتری، از سیستم هیبریدی زیست توده-باد-فتوولتائیک به همراه یک ژنراتور دیزلی و باتری سرب اسیدی^۵ برای امکان سنجی فنی تأمین انرژی یک روستای غیرمتصل به شبکه در هند استفاده شد [۲۰]. در این تحقیق، هزینه تولید انرژی و هزینه خالص فعلی^۶ سیستم هیبریدی به ترتیب ۰/۱۱۴ دلار بر کیلووات و ۸/۶ میلیون دلار برآورد شد. در مقالات اخیر، بیشترین توجه بر روی موضوعاتی نظیر بررسی ترکیب فناوری های تجدیدپذیر با سایر واحدهای مرسوم تولید انرژی، بهینه سازی چندهدفه اندازه اجزای سیستم با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف و نیز مدیریت بهینه انرژی بین اجزای سیستم هیبریدی بوده است [۲۱].

استفاده از بویلر برای تأمین نیازهای گرمایشی در ریزشبکه ها علاوه بر اثرات مخرب زیست محیطی، هزینه خالص فعلی پروژه را نیز به میزان قابل توجهی افزایش می دهد؛ به طوری که در مواردی هزینه خرید سوخت از هزینه های ساخت و نگهداری ریزشبکه نیز بیشتر می شود. سیستم های انرژی هیبریدی دارای قابلیت تولید ترکیبی برق و حرارت (CHP) راهکاری بهینه برای حل این معضل شمرده می شوند. ژنراتور دیزلی، میکروتوربین گازی و پیل سوختی از انواع رایج محرک های اصلی^۷ در سیستم های CHP هستند که در ظرفیت های مختلف تجاری سازی شده اند [۲۲]. محرک های اصلی از نظر فنی-اقتصادی و زیست محیطی متفاوت هستند [۲۳]. به

¹ International energy agency

² Lau

³ Rodríguez

⁴ Combined heat and power (CHP)

⁵ Lead acid

⁶ Net present cost (NPC)

⁷ Prime mover

دلیل این خصوصیات متفاوت، در مقالاتی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن سائز بهینه فناوری‌های تجدیدپذیر در ترکیب با محرک‌های اصلی استفاده شده است.

نسامالار^۱ و همکاران [۲۴] به بهینه‌سازی فنی-اقتصادی سیستم فتوولتائیک، ژنراتور دیزلی، باتری و اینورتر برای پیکربندی‌های مستقل از شبکه و متصل به شبکه در کشور هند پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم متصل به شبکه نسبت به سیستم مستقل از شبکه ارجحیت دارد. مایر^۲ و همکاران [۲۵] به بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی یک ریزشبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. متغیرهای تصمیم‌گیری توان نامی فتوولتائیک، کلکتور خورشیدی، توربین بادی و اینورتر، ظرفیت باتری و ضخامت عایق دیوارهای ساختمان بود. نتایج نشان داد که از میان فناوری‌های تجدیدپذیر، نصب آرایه‌های فتوولتائیک مقرون به‌صرفه‌ترین شیوه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در مرجع [۲۶] به بهینه‌سازی اندازه یک سیستم تأمین انرژی پیچیده شامل فتوولتائیک/حرارت خورشیدی/پمپ حرارتی/چیلر جذبی/بویلر/موتور احتراق داخلی/میکروتوربین گازی برای کاربرد در ساختمانی متصل به شبکه بر اساس بازدهی انرژی و هزینه کل سالیانه پرداخته شد. یافته‌ها نشان دادند که سیستم بهینه می‌تواند منجر به کاهش ۳۶ درصدی انرژی اولیه ورودی با افزایش سهم منابع کم انرژی (مانند حرارت بازیافتی و حرارت خورشیدی) در تأمین بار حرارتی شود. همچنین، طراحی بهینه چندهدفه دارای ۲۱٪ هزینه کمتر نسبت به سیستم مرسوم متکی بر برق شبکه و بویلر گازی بود.

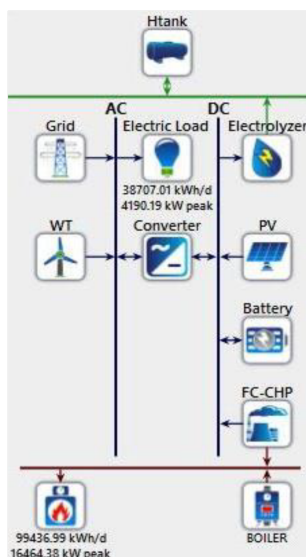
۳-۱. اهداف و نوآوری پژوهش:

مسئله اصلی در سیستم‌های انرژی هیبریدی، یافتن ظرفیت و پیکربندی بهینه تجهیزات و فناوری‌های بکار گرفته شده است؛ به گونه‌ای که ریزشبکه بتواند انرژی الکتریکی مورد نیاز مجموعه را به‌طور مداوم، با کمترین هزینه و در راستای توسعه پایدار تأمین نماید. هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی چندهدفه فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم هیبریدی متشکل از فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی (به همراه الکتروالیزر^۳ و منبع هیدروژن)، باتری، اینورتر و برق شبکه است.

در پژوهش‌های پیشین، بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی هیبریدی اغلب تک‌هدفه بوده (بهینه‌سازی اقتصادی) و در مواردی که تحلیل چندهدفه انجام شده، پیکربندی‌های مختلف و پیچیده سیستم هیبریدی در نظر گرفته نشده است، یا اینکه توابع هدف به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پژوهش فقط بهینه‌سازی‌های فنی-اقتصادی یا اقتصادی-زیست‌محیطی را دربر گرفته است. همچنین، در سیستم‌های هیبریدی متصل به شبکه مطالعه شده در مقالات پیشین، برق به‌طور نامحدود از شبکه خریداری می‌شود؛ ولی در این پژوهش، مقادیر مختلفی برای توان قابل خریداری از شبکه برق در نظر گرفته می‌شود. در واقع، میزان پیشینه توان قابل خریداری از شبکه به‌عنوان متغیر طراحی مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. نوآوری مهم دیگر این تحقیق، انجام تحلیل چرخه عمر^۴ برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی نصب سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی است؛ در حالی که پژوهش‌های پیشین، عمدتاً انتشار مستقیم کربن دی‌اکسید را به‌عنوان شاخص زیست‌محیطی در بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته‌اند. علاوه بر این‌ها، در مقالات پیشین کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای یافتن طراحی نهایی سیستم انرژی هیبریدی از میان پاسخ‌های نامغلوب، به‌ندرت بررسی شده است. لذا علت انتخاب این پژوهش، عدم وجود دانش کافی در مقالات پیشین، اهمیت موضوع برای کاهش فشار بر روی شبکه سراسری برق و بهبود شرایط زیست‌محیطی کشور در راستای توسعه پایدار است.

۳-۲. مواد و روش:

روش انجام پژوهش به این ترتیب است که ابتدا مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی هیبریدی در نرم‌افزار HOMER انجام شده و سپس نتایج شبیه‌سازی یعنی هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخه عمر پیکربندی‌های مختلف وارد نرم‌افزار MATLAB شده و در آنجا طراحی‌های نامغلوب مسئله به کمک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به دست آورده می‌شوند. دلیل این امر این است که بهینه‌سازی در نرم‌افزار HOMER، فقط بر حسب پارامتر اقتصادی هزینه خالص فعلی برای یک محدودیت فنی مشخص انجام می‌شود که برای این پژوهش موضوعیت ندارد. در پایان، طراحی نهایی از میان مجموعه گزینه‌های بهینه چندهدفه با کمک تکنیک اولویت‌بندی بر اساس مشابهت به پاسخ ایده‌آل^۵ (TOPSIS) ترکیب شده با روش وزنی انتروپی^۶ پیدا می‌شود. در شکل ۱ شماتیکی از سیستم مدل شده در نرم‌افزار HOMER نشان داده شده است. اجزای سیستم شامل فتوولتائیک، توربین بادی، شبکه برق، پیل سوختی، الکتروالیزر، مخزن هیدروژن، باتری، اینورتر و بویلر هستند. کل انرژی الکتریکی مورد نیاز سالیانه مجموعه برابر ۱۴/۱ گیگاوات ساعت است. برق مورد نیاز روزانه در محدوده ۲۴/۳ تا ۵۴/۵ مگاوات با متوسط ۳۸/۷ مگاوات ساعت است. پیشینه بار الکتریکی برابر ۴/۲ مگاوات در اوایل تابستان است. مقدار متوسط و پیشینه بار حرارتی به ترتیب برابر ۴/۱ و ۱۶/۵ مگاوات است.



شکل ۱. شماتیکی از سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی مدل شده در نرم‌افزار HOMER

^۱ Nesamalar

^۲ Mayer

^۳ Electrolyzer

^۴ Life cycle assessment

^۵ Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

^۶ Entropy weight method (EWM)

۳. تحلیل فنی-اقتصادی و زیست محیطی سیستم انرژی هیبریدی:

۳-۱. تحلیل فنی:

در تحلیل فنی سیستم هیبریدی، معمولاً سطح تأمین انرژی آن سنجیده می‌شود. برای این منظور، می‌توان از پارامتر احتمال عدم تأمین برق^۱ (LPSP) استفاده کرد. این شاخص که در رابطه زیر تعریف شده است، معیاری برای تعیین قابلیت اعتماد سیستم انرژی هیبریدی است [۱۵]:

$$LPSP = \frac{E_{cs}}{E_{demand}} = \frac{\sum_{t=1}^{t_f} P_{cs}(t) \times \Delta t}{\sum_{t=1}^{t_f} P_{demand}(t) \times \Delta t} \quad (1)$$

که E_{cs} و E_{demand} به ترتیب انرژی الکتریکی تأمین نشده و کل انرژی الکتریکی مورد نیاز در طول یک سال هستند. به طور مشابه، $P_{cs}(t)$ اختلاف بین بار الکتریکی (P_{demand}) و کل ظرفیت توان در دسترس واحدهای سیستم هیبریدی در زمان t است. همچنین Δt گام زمانی و t_f زمان نهایی در محاسبه LPSP است که در شبیه‌سازی‌های سالانه معمولاً به ترتیب برابر ۱ و ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته می‌شوند.

سهم فناوری‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی، پارامتر مهم دیگر یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$f_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren} + H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}} \quad (2)$$

در این رابطه، E_{nonren} و H_{nonren} به ترتیب انرژی الکتریکی و حرارتی تولید شده از منابع غیرتجدیدپذیر و E_{served} و H_{served} به ترتیب کل بارهای الکتریکی و حرارتی تأمین شده هستند.

همان‌گونه که بیان شد، اتلاف انرژی در سیستم‌های هیبریدی متشکل از منابع تجدیدپذیر می‌تواند قابل توجه باشد. نرم افزار HOMER نسبت برق اضافی را طبق رابطه زیر محاسبه می‌کند [۲۷]:

$$f_{excess} = \frac{E_{excess}}{E_{prod}} \quad (3)$$

که E_{excess} و E_{prod} به ترتیب کل توان اضافی و تولیدی سیستم هیبریدی در طول یک سال عملکرد آن هستند.

مشاهده شد که شاخص‌های فنی فقط برای بار الکتریکی محاسبه شدند. دلیل این موضوع این است که نرم افزار HOMER برای تأمین بار حرارتی، بویلری با اندازه بی‌نهایت در نظر می‌گیرد که انرژی حرارتی تأمین نشده به وسیله واحدهای حرارتی سیستم (بازیافت حرارت در CHP یا بویلر برقی) را به طور کامل فراهم می‌کند؛ لذا پارامترهای فنی مذکور برای بارهای حرارتی قابل تعمیم نبوده و در نتایج نیز گزارش نمی‌شوند.

برای یافتن اندازه بهینه اجزای سیستم هیبریدی، لازم است که عملکرد پیکربندی‌های مختلف سیستم شبیه‌سازی و تحلیل شود. مدل‌سازی ریاضی عملکرد فنی واحدهای سیستم انرژی هیبریدی در مقالات پیشین و همچنین کتابچه راهنمای HOMER به طور جامع توضیح داده شده است [۲۷]. بنابراین، در این بخش، فقط به بیان خصوصیات فنی اجزای مورد مطالعه پرداخته می‌شود (جدول ۱). در این تحقیق، فرض شده است که هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی در سایت به وسیله الکترولایزر با بازدهی ۸۵٪ تولید شده و در مخازن هیدروژن ذخیره می‌شود. همچنین، بازدهی بویلر گازی و اینورتر به ترتیب ۸۰ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است [۲۸؛ ۲۹].

جدول ۱. مشخصات فنی واحدهای سیستم انرژی هیبریدی مورد استفاده در شبیه‌سازی

فناوری	پارامتر	مقدار	فناوری	پارامتر	مقدار
ماژول فتوولتائیک [۳۰]	توان نامی در شرایط استاندارد	327 W $\pm$ 5%	توربین بادی [۳۱]	قطر روتور	54 m
SPR-E30-327	بازدهی ماژول	21.4%		ارتفاع هاب	50 m
	ولتاژ توان بیشینه	54.7 V		سرعت باد نامی	7.5 m/s
	جریان توان بیشینه	5.98 V		سرعت باد راه‌انداز	2.5 m/s
	ولتاژ مدار باز	64.9 V		سرعت باد قطع‌کننده	25 m/s
	جریان اتصال کوتاه	6.46 A		کلاس باد IEC	IIIA
دمای سلول در شرایط عملکرد اسمی	45 °C		باتری [۳۲]	ظرفیت نامی	100 kWh
	ضریب دمایی توان	-0.35%/°C		ولتاژ نامی	600 V
پیل سوختی (CHP) [۳۳]	بازده الکتریکی	45%		بیشینه جریان شارژ	167 A
	بازده حرارتی	37%		بیشینه جریان تخلیه	500 A
	بازده الکترولایزر	85%		بازدهی شارژ و تخلیه	95%
	نسبت بار کمینه	10%			
	سوخت	هیدروژن			

¹ Loss of power supply probability (LPSP)

در پایان این بخش، باید ذکر شود که هر سیستم انرژی هیبریدی دارای یک سیستم مدیریت انرژی برای کنترل جریان انرژی واحدهای مختلف ریزشبه است که به آن استراتژی توزیع می‌گویند. دو استراتژی کنترلی منطبق بر بار^۲ و شارژ سیکل^۳ در نرم افزار HOMER برای یافتن سبب بهینه اجزای سیستم تعبیه شده که در این پژوهش از استراتژی اول به دلیل مزایای فنی-اقتصادی و زیست محیطی بهتر آن در سیستم های هیبریدی دارای منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود. در هر دو استراتژی، انرژی تولیدی فناوری های تجدیدپذیر برای تأمین بار اولویت داشته و انرژی تولیدی اضافی ابتدا صرف شارژ باتری و سپس الکتروایزر می‌شود. تفاوت این دو روش برای موقعی است که منابع تجدیدپذیر و انرژی ذخیره شده در باتری قادر به تأمین کامل بار نباشند؛ در راهبرد کنترلی منطبق بر بار، ژنراتور تنها بار خالص باقیمانده را تأمین کرده ولی در استراتژی شارژ سیکل، ژنراتور با تمام ظرفیت نامی خود عمل می‌کند [۳۴].

۳-۲. تحلیل اقتصادی:

هزینه خالص فعلی یک سیستم هیبریدی، مجموع ارزش فعلی هزینه های نصب و نگهداری تمام مؤلفه های سیستم منهای ارزش فعلی درآمدهای سیستم در طول مدت عملکرد آن است. به طور کلی، هزینه ها شامل هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه نگهداری و تعویض مؤلفه های سیستم، هزینه سوخت و جرمه های ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و هزینه خرید برق از شبکه شده و درآمدها شامل فروش برق به شبکه و ارزش قطعات قابل بازیافت در زمان پایان عملکرد سیستم است. هزینه خالص فعلی (NPC) کل سیستم در مدت طول عملکرد آن به طریق زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$NPC = I_0 + \frac{\sum_{n=1}^N C_n - R_n}{(1+i)^n} \quad (4)$$

که I_0 هزینه سرمایه گذاری اولیه، R_n و C_n به ترتیب هزینه و درآمد در سال n و i نرخ سود واقعی است.

پارامتر مهم اقتصادی دیگر، متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق تولیدی سیستم است که طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - C_{boiler} H_{served}}{E_{served}} \quad (5)$$

در این رابطه، $C_{ann,tot}$ هزینه سالیانه کل، C_{boiler} هزینه عملکرد بویلر و H_{served} و E_{served} به ترتیب کل بارهای حرارتی و الکتریکی تأمین شده هستند. هزینه سالیانه کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$C_{ann,tot} = CRF(i, N) \times NPC \quad (6)$$

که CRF فاکتور بازگشت سرمایه بوده که بر حسب نرخ بهره واقعی سالیانه (i) و مدت بهره برداری از پروژه (N) طبق رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۷]:

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

هزینه عملکرد بویلر (C_{boiler}) نیز از ضرب هزینه سوخت در دبی سوخت ورودی بویلر محاسبه می‌شود. بدین طریق، نرم افزار HOMER هزینه تأمین بارهای حرارتی را از متوسط هزینه تأمین انرژی سیستم حذف کرده تا پارامتر COE فقط بیانگر متوسط هزینه برق تأمین شده باشد.

در جدول ۲ مقدار پارامترهای مورد نیاز (هزینه های اولیه، جایگزینی، تعمیر و نگهداری به همراه مدت عملکرد اجزا) برای محاسبات اقتصادی سیستم انرژی هیبریدی پروژه آورده شده است. دیگر پارامترهای اقتصادی پروژه شامل متوسط نرخ خرید گاز طبیعی، برق شبکه و سود فروش برق شبکه به ترتیب ۰/۱۵ دلار بر مترمکعب، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ دلار بر کیلووات ساعت منظور شدند [۳۵؛ ۳۶]. همچنین، نرخ سود واقعی سالیانه و مدت کارکرد سیستم انرژی هیبریدی به ترتیب ۵٪ و ۲۰ سال در نظر گرفته شدند [۱۴].

جدول ۲. پارامترهای اقتصادی مربوط به واحدهای مختلف سیستم هیبریدی مدل شده

مؤلفه سیستم	هزینه اولیه	هزینه جایگزینی	هزینه تعمیر و نگهداری	مدت عملکرد	منبع
آرایه فتوولتائیک	1300 \$/kW	1300 \$/kW	10 \$/kW/yr	25 yrs	[۳۰]
توربین بادی	2000 \$/kW	2000 \$/kW	75 \$/kW/yr	20 yrs	[۳۱]
پیل سوختی	3000 \$/kW	2500 \$/kW	0.03 \$/kW/hr	40000 hrs	[۳۷]
الکتروایزر	1500 \$/kW	1000 \$/kW	20 \$/kW/yr	15 yrs	[۳۷]
منبع هیدروژن	1400 \$/kg	867 \$/kg	20 \$/kg/yr	25 yrs	[۳۷]
ژنراتور دیزلی	2500 \$/kW	1900 \$/kW	0.01 \$/kW/hr	40000 hrs	[۳۳]
باتری	200 \$/kWh	180 \$/kWh	5 \$/kWh/yr	15 yrs	[۳۲]
اینورتر	500 \$/kW	450 \$/kW	5 \$/kW/yr	15 yrs	[۳۸]

۳-۳. تحلیل زیست محیطی:

همان گونه که بیان شد، یکی از دلایل مهم به کارگیری سیستم های هیبریدی بهبود شرایط زیست محیطی است. لذا در این تحقیق، هدف سوم مسئله بهینه سازی، به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی در کل چرخه حیات اجزای سیستم انرژی هیبریدی است. این بدان معناست که نه تنها انتشار مستقیم گازهای گلخانه ای مستقیم ناشی از بهره برداری و نگهداری سیستم، بلکه تولید و حمل و نقل قطعات و حامل های انرژی نیز در محاسبات انتشار چرخه عمر^۴ مورد توجه قرار گرفته است. انتشار چرخه عمر (LCE) اجزای سیستم هیبریدی مورد بررسی در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. انتشار معادل کربن دی اکسید در چرخه عمر اجزای سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی مورد مطالعه

فناوری	انتشار چرخه عمر	منبع
(kg CO ₂ -eq/kWh)		
فتوولتائیک	0.045	[۳۹]
توربین بادی	0.011	[۳۹]
پیل سوختی	0.031	[۳۹]
باتری	0.028	[۳۹]
برق شبکه	0.639	[۴۰]
بویلر	0.188	[۴۰]

Dispatch strategy
² Load following
³ Cycle charging
⁴ Life cycle emission (LCE)

۴. بهینه‌سازی چندهدفه:

۴-۱. مبانی نظری بهینه‌سازی چندهدفه:

در مسائل مهندسی که اثر چند تابع هدف متضاد بر یافتن مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری مورد توجه باشد، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با m متغیر تصمیم‌گیری و n تابع هدف را می‌توان به کمک رابطه زیر تعریف کرد [۴۱]:

$$\text{Minimize } y = f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \quad (۸)$$

در رابطه فوق:

$$x = (x_1, \dots, x_m) \in X \quad (۹)$$

$$y = (y_1, \dots, y_n) \in Y \quad (۱۰)$$

که x بردار شامل متغیرهای تصمیم‌گیری، X فضای طراحی، y بردار هدف و Y فضای هدف است. شرط لازم و کافی برای اینکه یک متغیر تصمیم‌گیری $a \in X$ متغیر دیگر $b \in X$ را مغلوب کند (نسبت به آن برتر باشد)، رابطه زیر است [۴۱]:

$$a < b \leftrightarrow \begin{cases} f_i(a) \leq f_i(b) & \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ f_j(a) < f_j(b) & \exists j \in \{1, \dots, n\} \end{cases} \quad (۱۱)$$

اگر این رابطه برقرار باشد، طراحی b از مجموعه پاسخ‌های بهینه حذف شده و اگر نه $a < b$ و نه $b < a$ باشد، آنگاه این دو متغیر تصمیم‌گیری نسبت به هم نامغلوب هستند. به بیانی دیگر، یک جواب نامغلوب برداری متشکل از توابع هدف مسئله بوده که هیچ کدام از مؤلفه‌های آن را نمی‌توان بدون تعدیل حداقل یکی دیگر از مؤلفه‌ها بهبود بخشید. براین اساس، مجموعه جواب‌های نامغلوب که مجموعه پارتو نیز نامیده می‌شود، به دست می‌آید.

۴-۲. بیان مسئله بهینه‌سازی پژوهش:

توابع هدف برای بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های انرژی هیبریدی مستقل از شبکه و متصل به شبکه در زیر آورده شده است:

$$\text{Minimize } y = f(x) = (LPSP(x), NPC(x), LCE(x)) \quad (۱۲)$$

شاخص فنی $LPSP$ بیانگر احتمال عدم تأمین برق، شاخص اقتصادی NPC بیانگر هزینه خالص فعلی و شاخص زیست‌محیطی LCE بیانگر انتشار معادل کربن دی‌اکسید اجزای سیستم انرژی هیبریدی در طول چرخه عمر آن‌ها است. در این رابطه، بردار x شامل متغیرهای طراحی مسئله است که برای ریزشبه مورد بررسی در رابطه زیر آورده شده است:

$$x_{gc} = [C_{PV}, C_{WT}, C_{Grid}, C_{FC}, C_{ELEC}, C_{Htank}, C_{BATT}, C_{INV}] \quad (۱۳)$$

در این روابط، پارامتر C بیانگر ظرفیت واحدهای سیستم انرژی هیبریدی شامل فتوولتائیک (PV)، توربین بادی (WT)، پیل سوختی هیدروژنی (FC)، الکتروایزر ($ELEC$)، مخزن هیدروژن ($Htank$)، باتری ($BATT$)، اینورتر (INV) و برق شبکه ($Grid$) است.

بیشینه (گام) ظرفیت پیل سوختی و الکتروایزر برابر 2500 کیلووات (250 کیلووات)، منبع هیدروژن برابر 2500 کیلوگرم (250 کیلوگرم)، توربین بادی 20 عدد (۱ عدد)، باتری 500 عدد (۱ عدد) و برق شبکه 100% (20%) بیشینه بار الکتریکی مورد نیاز در نظر گرفته شد. ظرفیت‌های فتوولتائیک و اینورتر به‌طور پیوسته با بیشینه مقادیر به ترتیب 15000 و 13000 کیلووات در نظر گرفته شدند. کمینه اندازه همه فناوری‌های مذکور برابر صفر بوده که منجر به شبیه‌سازی پیکربندی‌های مختلف سیستم انرژی هیبریدی می‌شود.

قابل ذکر است که با انجام مطالعاتی پیش از شبیه‌سازی‌های اصلی، مقادیر کمینه و بیشینه ظرفیت واحدها به‌گونه‌ای پیدا شدند که پاسخ‌های بهینه چندهدفه نهایی را پوشش دهند. همچنین ذکر این نکته ضروری است که نرم‌افزار HOMER فقط امکان شبیه‌سازی فتوولتائیک و اینورتر را با ظرفیت پیوسته دارا است و برای سایر واحدهای انرژی می‌بایست یک گام مشخص برای ظرفیت در یک فضای گسسته در نظر گرفت. همچنین، این نرم‌افزار امکان بهینه‌سازی ظرفیت نامی بویلر را ندارد؛ در واقع، HOMER ظرفیت بویلر را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیرد که بتواند انرژی حرارتی مورد نیاز را که توسط CHP تأمین نشده است، به‌طور کامل فراهم کند.

۵. تصمیم‌گیری چندمعیاره:

همان‌گونه که بیان شد، خروجی بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب است. واضح است که برای یک مسئله کاربردی واقعی، می‌بایست در انتها یک طراحی منحصر به فرد انتخاب شود. ساده‌ترین راهکار، رسم مجموعه گزینه‌های بهینه در کنار یکدیگر و انتخاب یکی از آن‌ها توسط تصمیم‌گیرنده است. این روش برای حالاتی که تعداد توابع هدف و یا تعداد اعضای مجموعه پارتو زیاد باشد، بسیار سخت است. به همین منظور، بعضی مقالات روش‌هایی برای انتخاب تعداد محدودی از جواب‌های بهینه چندهدفه و نمایش آن‌ها به تصمیم‌گیرنده ارائه کرده‌اند [۴۲]. هرچند، توجه به این نکته ضروری است که حتی با کاهش تعداد انتخاب‌ها، نمی‌توان از انتخاب بهترین گزینه نامغلوب توسط تصمیم‌گیرنده، به دلیل امکان اعمال نظرات شخصی و همچنین وجود خطاهای انسانی مطمئن بود. برای حل این چالش، می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از شاخه‌های تحقیق در عملیات، استفاده نمود. چنین روش‌هایی با ارزیابی جواب‌های ممکن که اغلب وابسته هستند، آن‌ها را رتبه‌بندی کرده و فرایند انتخاب یک جواب دارای سازش بهینه بین معیارهای مسئله را تسهیل می‌کنند.

۵-۱. تکنیک اولویت‌بندی بر اساس مشابَهت به پاسخ ایده‌آل:

از میان روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، روش TOPSIS در مسائل طراحی مهندسی که چندین معیار با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت وجود دارند، به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۴۳-۴۵]. در این روش، گزینه نهایی (طراحی منتخب) بر اساس میزان مجاورت نسبی به پاسخ‌های فرضی ایده‌آل به دست می‌آید. ۵ مرحله انجام این روش در زیر توضیح داده شده است.

- نرمال‌سازی معیارها برای اهداف بی‌بعدسازی و امکان مقایسه شاخص‌های مختلف

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, j \in [1, \dots, m] \quad (۱۴)$$

که x_{ij} درایه ماتریس تصمیم، n تعداد پاسخ‌های موجود و m تعداد معیارها است.

- اعمال وزن برای هر شاخص

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (۱۵)$$

w_j بیانگر وزن هر تابع هدف است.

¹ Pareto set

- یافتن پاسخ‌های ایده‌آل فرضی

$$v_j^+ = \{best(v_{ij})\}_{i=1}^n \quad (16)$$

$$v_j^- = \{worst(v_{ij})\}_{i=1}^n \quad (17)$$

که v_j^+ و v_j^- به ترتیب پاسخ‌های ایده‌آل مثبت و منفی هستند. عبارت $best$ بیانگر عملکرد کمینه برای شاخص‌های غیرمنفعت نظیر هزینه و عملکرد بیشینه برای شاخص‌های منفعتی است. این استدلال برای $worst$ برعکس است.

- محاسبه فاصله اقلیدسی بین هر گزینه و پاسخ‌های ایده‌آل

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (18)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (19)$$

مشخص است که d_i^+ و d_i^- در این رابطه، به ترتیب فاصله اقلیدسی طراحی i نسبت به پاسخ‌های ایده‌آل مثبت و منفی هستند.

- اندازه‌گیری میزان مجاورت نسبی هر گزینه به پاسخ ایده‌آل

$$C_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (20)$$

به این پارامتر که مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر است، نمره ترکیبی نیز گفته می‌شود. در پایان، پاسخ‌های نامغلوب بر اساس بیشینه بودن نمره رتبه‌بندی می‌شوند. مشخص است که طراحی دارای نمره بالاتر نسبت به طراحی با نمره پایین‌تر ترجیحیت دارد.

۲-۵. روش تعیین وزن انتروپی:

وزن شاخص‌ها پارامتر ورودی در روش‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره است. روش‌های مختلفی برای محاسبه وزن هر شاخص وجود دارد. ساده‌ترین روش، انتخاب وزن‌ها توسط تصمیم‌گیرنده است، به‌طوری‌که مجموع ضرایب برابر ۱ شود. این تکنیک که به روش ذهنی^۱ معروف است، در مقابل روش عینی^۲ که در آن از مدل‌های ریاضی برای وزن‌دهی معیارها استفاده می‌شود، قرار دارد. از جمله روش‌های عینی، می‌توان به روش انتروپی اشاره کرد. علاوه بر این، روش‌های میانه دیگری نیز نظیر تحلیل سلسله مراتبی^۳ (AHP) وجود دارد که اساس وزن‌دهی در آن‌ها، ترکیب گرایش تصمیم‌گیرنده و ریاضیات است. هر دو روش اشاره شده در ترکیب با روش TOPSIS در مقالات تصمیم‌گیری چندشاخصه به وفور استفاده شده‌اند [۴۶؛ ۴۷]. در این پژوهش، از روش عینی انتروپی که در آن وزن‌ها به‌طور کامل از ماتریس تصمیم به‌دست‌آمده و نظرات تصمیم‌گیرنده در آن دخیل نیست، استفاده می‌شود.

نخستین بار، شانون^۴ [۴۸] در سال ۱۹۴۸ ایده روش وزن‌دهی انتروپی را مطرح کرد که پس از او، زلی^۵ آن را بهبود بخشید [۴۹]. در این روش، هیچ عامل بیرونی در انتخاب طرح نهایی دخالتی نداشته و فرایند انتخاب درونی است. از پارامتر انتروپی برای کمی کردن محتوای اطلاعات یک پیام (در اینجا ماتریس تصمیم) استفاده می‌شود. انتروپی زیاد احتمال وقوع کم یک پدیده را می‌رساند. بر اساس روش وزن انتروپی، هرچه میزان انتروپی کمتر، پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر است؛ لذا آن تابع هدف اهمیت بیشتری داشته و در نتیجه وزن بیشتری می‌گیرد. برای نمونه، مشخص است که اگر همه مقادیر یک شاخص در طراحی‌های مختلف مشابه باشند، می‌توان آن شاخص را از تصمیم‌گیری حذف کرد؛ به عبارتی دیگر، وزن انتروپی صفر داشته و اطلاعاتی مفیدی به تصمیم‌گیرنده نمی‌دهد. از آنجایی‌که شاخص‌ها دارای واحد یکسان نیستند، پیش از پردازش آن‌ها می‌بایست طبق رابطه زیر استاندارد شوند:

$$x'_{ij} = \frac{|x_{ij} - \{best(x_{ij})\}_{i=1}^n|}{\{max(x_{ij})\}_{i=1}^n - \{min(x_{ij})\}_{i=1}^n}, \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (21)$$

حال، تمام درایه‌های ماتریس تصمیم در بازه ۰ تا ۱ قرار دارند. سپس، تأثیر مؤلفه‌های گزینه i بر شاخص j از تقسیم هر درایه به مجموع ستون آن درایه طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}, \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (22)$$

در ادامه، مقدار انتروپی بیانگر محتوای اطلاعات هر شاخص طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}), \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (23)$$

قابل ذکر است که برای $p_{ij} = 0$ ، می‌بایست لگاریتم طبیعی آن برابر صفر قرار داده شود.

مرحله سوم یافتن درجه پراکندگی هر شاخص طبق رابطه زیر است:

$$div_j = 1 - e_j, \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (24)$$

در انتها، وزن هر معیار طبق فرمول زیر به دست آورده می‌شود:

$$w_j = \frac{div_j}{\sum_{j=1}^m div_j}, \text{ for } j = 1, \dots, m \quad (25)$$

۶. نتایج و بحث:

همان‌گونه که بیان شد، در سیستم هیبریدی مورد بررسی امکان خرید برق از شبکه به‌طور محدود یا نامحدود بررسی شده است. برای این منظور، ۶ سناریوی مختلف که در آن‌ها بیشینه توان قابل خریداری از شبکه بین ۰ تا ۱۰۰٪ اوج بار الکتریکی تغییر می‌کند، شبیه‌سازی شده است. قابل ذکر است که در همه حالت‌ها، ریزشکته می‌تواند برق تولیدی منابع تجدیدپذیر را به‌طور نامحدود به شبکه برق سراسری به فروش برساند. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه در بخش‌های ۱-۶ و ۲-۶، انتخاب سیستم نهایی بر اساس تحلیل تصمیم‌گیری چندشاخصه در بخش ۳-۶ و ارزیابی فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم منتخب در بخش ۴-۶ آورده شده است.

¹ Subjective
² Objective
³ Analytic hierarchy process
⁴ Shannon
⁵ Zeleny

۶-۴. فضای طراحی برای طراحی‌های بهینه چندهدفه:

در مجموع، ۷۰۰ طراحی بهینه چندهدفه شامل ۵۹۲ (۸۴/۶٪) سیستم متصل به شبکه و ۱۰۸ (۱۵/۴٪) سیستم مستقل از شبکه پیدا شد. سیستم‌های متصل به شبکه شامل ۴۰ و مستقل از شبکه دارای ۵ پیکربندی مختلف بودند. در جدول ۴، تعداد ۱۰ پیکربندی که بیشترین عضو را در مجموعه جواب بهینه چندهدفه داشته‌اند، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پیکربندی پرتکرار متصل به شبکه و مستقل از شبکه شامل همه اجزا به جز توربین بادی بوده است.

جدول ۴. پیکربندی‌های بهینه چندهدفه و تعداد پاسخ‌های نامغلوب در هر کدام برای سیستم متصل به شبکه

Number	Grid					INV	BATT	Htank	ELEC	FC	WT	PV
	100%	80%	60%	40%	20%							
118					•	•	•	•	•	•		• 1
54					•	•	•	•	•	•	•	• 2
49				•		•	•					• 3
45						•	•	•	•	•		• 4
44				•		•	•	•	•	•	•	• 5
42			•			•		•	•	•		• 6
38					•	•	•					• 7
35				•		•						• 8
30						•	•	•	•	•	•	• 9
23				•		•		•	•	•	•	• 10

در جدول ۵ درصد تکرار هر واحد انرژی در مجموعه طراحی‌های نامغلوب آورده شده است. طبق این جدول، اگرچه همه طراحی‌های بهینه مستقل از شبکه شامل باتری بوده ولی بیش از یک سوم سیستم‌های متصل به شبکه فاقد باتری هستند. این موضوع نشان دهنده کاهش لزوم استفاده از باتری در یک سیستم متصل به شبکه به دلیل سود اقتصادی فروش برق اضافی تجدیدپذیر به شبکه سراسری است. شبکه‌های برق ۲۰ و ۸۰ درصد به ترتیب با ۳۴/۳ و ۴/۴٪ بیشترین و کمترین سهم را در میان پاسخ‌های نامغلوب کلی دارند.

جدول ۵. سهم واحدهای سیستم هیبریدی در مجموعه پاسخ‌های بهینه سیستم‌های مستقل از شبکه، متصل به شبکه و مجموعه آن‌ها

Grid					INV	BATT	Htank	ELEC	FC	WT	PV	
100%	80%	60%	40%	20%								
-	-	-	-	-	100	100	69.4	72.2	72.2	39.8	100	Off-grid
9.5	5.2	11.5	33.3	40.5	99.3	63.9	60.0	65.7	65.7	27.0	99.2	On-grid
8.0	4.4	9.7	28.1	34.3	99.4	69.4	61.4	66.7	66.7	29.0	99.3	Off-grid + On-grid

توصیف آماری ظرفیت مؤلفه‌های مختلف در مجموعه پارتو در جدول ۶ آورده شده است. مشخص است که از میان منابع تولیدکننده انرژی، متوسط ظرفیت فتوولتائیک به ترتیب بیشتر از برق شبکه، پیل سوختی و توربین بادی است. بطور خاص، میانگین ظرفیت فتوولتائیک در مجموعه پارتو حدود ۱/۵ برابر اوج بار الکتریکی است، درحالی‌که متوسط اندازه پیل سوختی و توربین بادی کمتر از ۵ درصد اوج بار است. این موضوع بیانگر این است که اگرچه پیل سوختی و توربین بادی باعث کاهش آلاینده‌های زیست محیطی می‌شوند، ولی به دلیل بازدهی پایین و هزینه‌های اقتصادی زیاد، در یک تحلیل چندهدفه، بهینه نیستند.

جدول ۶. پارامترهای آماری مربوط به ظرفیت واحدهای انرژی در مجموعه پارتو

مؤلفه سیستم هیبریدی	واحد	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
فتوولتائیک	kW	5961.2	3399.2	0	13333.3
توربین بادی	kW	209.3	429.5	0	2500
بیشینه برق قابل خریداری	kW (%)	1486.9 (35.5)	1157.0 (27.6)	0 (0)	4190.2 (100)
پیل سوختی	kW	285	291.8	0	1500
الکترولایزر	kW	424.3	514.4	0	2500
منبع هیدروژن	kg	259.6	281.8	0	1750
باتری	kWh	11171.9	11787.3	0	48400
اینورتر	kW	1786.8	961.4	0	6286

۶-۲. فضای هدف برای طراحی‌های بهینه چندهدفه:

پارامترهای آماری شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست محیطی سیستم‌های بهینه چندهدفه در جدول ۷ آورده شده است. اختلاف بین کمینه و بیشینه هزینه خالص فعلی در پاسخ‌های پارتو، مقدار قابل توجه ۲۶/۵ میلیون دلار است که این موضوع می‌تواند در انتخاب سیستم نهایی (برای نصب در محل) از میان جواب‌های نامغلوب بسیار مهم باشد. انحراف معیار مربوط به پارامتر احتمال عدم تأمین برق نسبت به میانگین به‌طور قابل توجهی بیش از توابع هدف دیگر است.

جدول ۷. پارامترهای آماری مربوط به توابع هدف در مجموعه پاسخ‌های بهینه چندهدفه

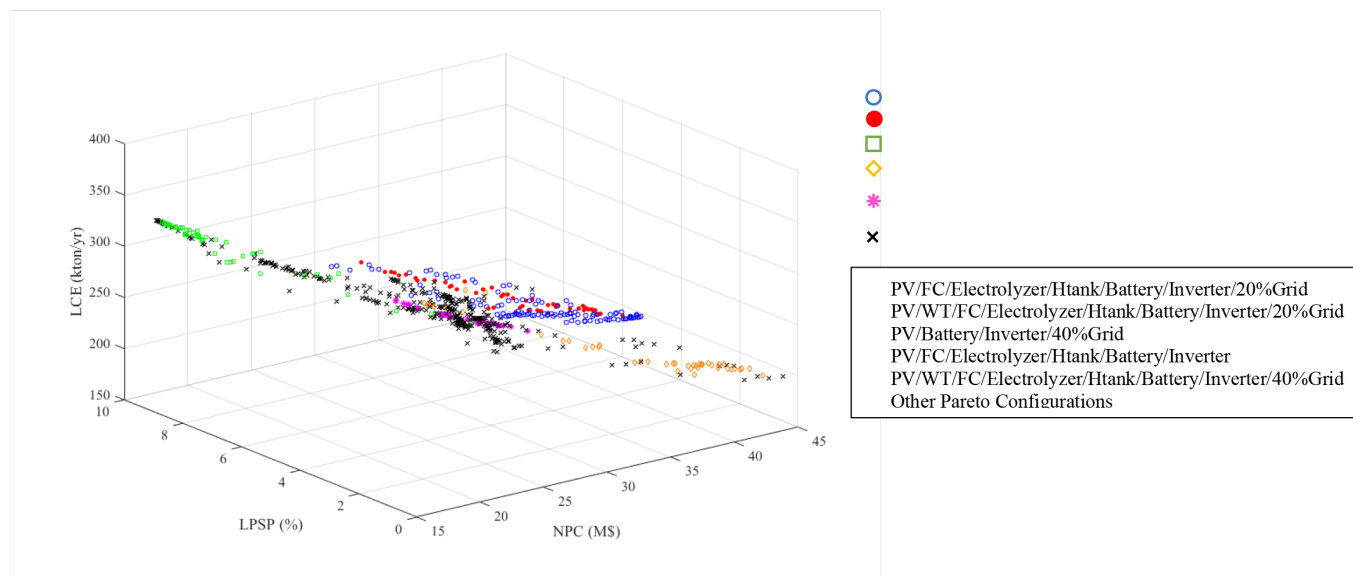
تابع هدف	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	دامنه
هزینه خالص فعلی (میلیون دلار)	27.5	7.5	17.2	43.8	26.5
احتمال عدم تأمین برق (%)	4.4	3.2	0	10.0	10.0
انتشار معادل کربن دی‌اکسید در چرخه عمر (کیلو تن)	272.2	43.7	196.6	358.6	162.0

در جدول ۸، مشخصات پاسخ‌های بهینه تک‌هدفه اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی آورده شده است. مشاهده می‌شود که سیستم‌های بهینه اقتصادی و فنی-اقتصادی فقط شامل شبکه برق، فنی-زیست‌محیطی شامل فتوولتائیک، باتری و اینورتر و زیست‌محیطی دارای فتوولتائیک، توربین بادی، باتری و اینورتر است. جدول ۸. مشخصات طراحی‌های بهینه تک‌هدفه از نظر معیارهای مختلف

معیار	NPC (M\$)	LPSP (%)	LPSP (kton)	PV (kW)	WT (kW)	Grid (%)	FC (kW)	ELEC (kW)	Htank (kg)	BATT (kWh)	INV (kW)
اقتصادی	17.2	1.8	355.3	0	0	60	0	0	0	0	0
اقتصادی فنی*	17.4	0.0	358.6	0	0	100	0	0	0	0	0
زیست‌محیطی	43.8	0.0	203.4	13333.3	0	0	0	0	0	48400	4190.7
زیست‌محیطی	33.4	10.0	196.6	9402.5	250	0	0	0	0	27900	2662.2

* تعداد ۵۷ سیستم دارای LPSP صفر بوده که طراحی‌های دارای کمترین هزینه اقتصادی و انتشار کربن (زیست‌محیطی) در جدول گزارش شده‌اند.

سطح پارتو شامل طراحی‌های بهینه چندهدفه در شکل ۲ آورده شده است. تعداد ۵ پیکربندی با بیشینه اعضا، مشخص شده در جدول ۴ که حدود نیمی از اعضای پارتو را تشکیل می‌دهند، به‌طور خاص در این شکل مشخص شده است. از این نمودار مشخص است که با کاهش هزینه خالص فعلی طراحی، جواب‌های بهینه به سمت افزایش احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخه عمر بیشتر میل می‌کنند. هزینه کمتر و انتشار آلاینده بیشتر طراحی متصل به شبکه نسبت به پیکربندی‌های مستقل از شبکه برای یک بازدهی فنی مشخص در این شکل واضح است. سیستم‌های هیبریدی مستقل از شبکه موجود در سطح پارتو بازدهی فنی مناسبی ندارند؛ به‌طوری‌که متوسط پارامتر LPSP برای آن‌ها ۵/۳٪ است. همچنین از تحلیل دقیق‌تر این شکل مشخص می‌شود که دستیابی به بازدهی فنی بالاتر برای یک سیستم بهینه چندهدفه وابستگی شدیدی با افزایش انتشار آلاینده زیست‌محیطی داشته و چندان تحت تأثیر افزایش هزینه‌های اقتصادی نیست. برای نمونه، متوسط انتشار کربن دی‌اکسید طراحی‌های پارتو دارای پتانسیل تأمین کامل انرژی (LPSP = 0%) ۲۱٪/۶ بیشتر از میزان متوسط مجموعه پارتو است؛ درحالی‌که هزینه خالص فعلی آن‌ها حدود ۲۵ درصد کمتر از میزان متوسط در سطح پارتو است.



شکل ۲. سطح پارتو نشان‌دهنده مصالحه بین توابع هدف مسئله برای مجموعه پارتو

۳-۶. انتخاب طراحی نهایی:

در این قسمت، طراحی نهایی از میان مجموعه گزینه‌های بهینه چندهدفه به کمک روش TOPSIS انتخاب می‌شود. وزن شاخص‌ها با استفاده از روش انتروپی محاسبه و در جدول ۹ گزارش شده است. طبق روش انتروپی، بر اساس ماتریس تصمیم، پارامترهای فنی و اقتصادی بیش از شاخص زیست‌محیطی در انتخاب طراحی نهایی مؤثر هستند.

جدول ۹. وزن‌های کلی شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی محاسبه شده از روش انتروپی

پارامتر	وزن
هزینه خالص فعلی	0.364
احتمال عدم تأمین برق	0.377
انتشار چرخه عمر	0.259

در جدول ۱۰، مشخصات ۵ طراحی با بیشترین نمره در تحلیل تصمیم‌گیری با استفاده از روش TOPSIS در ترکیب با روش وزنی انتروپی رتبه‌بندی شده است. مشاهده می‌شود که بهترین طراحی‌ها از نوع متصل به شبکه هستند. سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی متشکل از ۶/۷ مگاوات فتوولتائیک، ۴/۲ مگاوات اینورتر با پتانسیل خریداری ۸۰٪ بیشینه بار برق از شبکه، طراحی منتخب است. این ریزش‌بکه ۲۳/۵٪ هزینه خالص فعلی بیشتر و ۴۸/۸٪ انتشار معادل کربن-دی‌اکسید بیشتر به ترتیب نسبت به طراحی‌های تک‌هدفه اقتصادی و زیست‌محیطی دارد.

جدول ۱۰. مشخصات ۵ طراحی دارای بیشترین نمره به دست آمده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS

رتبه	سایز واحدهای سیستم انرژی هیبریدی نهایی										عملکرد فنی-اقتصادی-زیست محیطی	
	PV	WT	Grid	FC	ELEC	Htank	BATT	INV	NPC	LPSP	LCE	
	(kW)	(kW)	(%)	(kW)	(kW)	(kg)	(kWh)	(kW)	(M\$)	(%)	(kton)	
1	6666.7		80					4190.7	21.3	0	292.5	
2	6666.7		100					4190.7	21.3	0	304.3	
3	3333.3		100	250	250			2095.3	21.2	0	304.4	
4	3333.3		100	250	250	250		1885.8	21.3	0	305.0	
5	3751.7		100	250	250	250		1838.8	21.5		302.9	

۴-۶. ارزیابی سیستم منتخب:

در این قسمت، به ارزیابی و تحلیل دقیق فنی-اقتصادی و زیست محیطی طراحی منتخب پرداخته می‌شود. در جدول ۱۱ تولید انرژی الکتریسیته (E)، حرارتی (H) و سایر خصوصیات فنی سیستم انرژی هیبریدی منتخب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پیل‌های فتوولتائیک بیشترین سهم را در تأمین انرژی داشته

9

جدول ۱۱. مشخصات فنی سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی منتخب نهایی

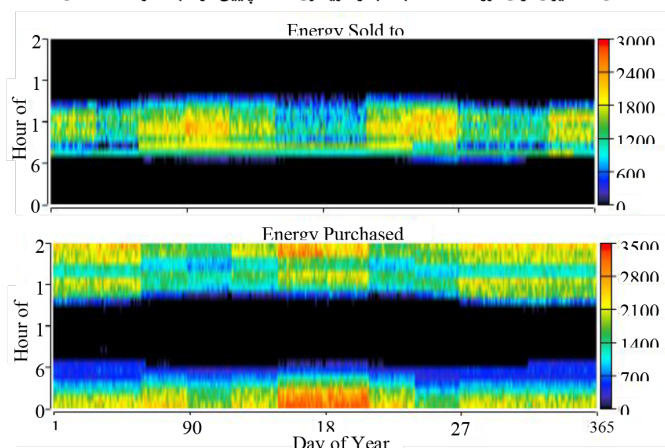
Excess electricity (MWh/yr)	f_{ren} (%)	H_{Boiler} (MWh/yr)	Grid sell (MWh/yr)	Grid purchase (MWh/yr)	E_{pv} (MWh/yr)
23.0		36294.5	4050.4	8169.0	11125.3
(0.1%)*	18.3	(100%)*	(22.3%)*	(42.3)*	(57.7)*

* نسبت به کل انرژی تولید شده

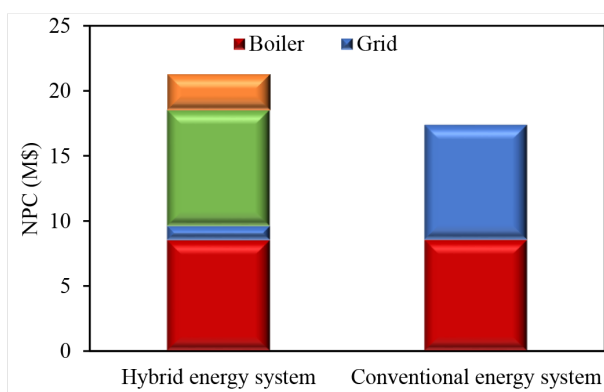
** نسبت به کل بار تأمین شده

اگرچه سیستم فاقد باتری بوده، به دلیل فروش برق به شبکه، انرژی اضافی بسیار ناچیز است؛ مشخص است که این اتلاف انرژی به دلیل محدودیت ظرفیت اینورتر است. در شکل ۳، میزان انرژی خریداری شده و فروخته شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در روز (بین ساعات ۶-۱۵) برق فتوولتائیک فروخته شده به شبکه بیشینه بوده و در بقیه ساعات انرژی از شبکه سراسری خریداری می‌شود.

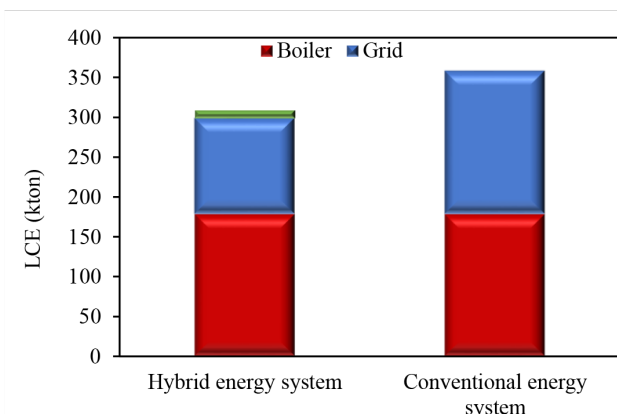
شکل ۳. میزان توان فروخته شده (بالا) به و خریداری شده (پایین) از شبکه در ساعات سال



هزینه خالص فعلی اجزای سیستم هیبریدی بهینه منتخب و سیستم تأمین انرژی مرسوم بر پایه برق شبکه و بویلر گازی در شکل ۴ خلاصه شده است. قابل ذکر است که هزینه اجزا شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، جایگزینی، عملکرد و نگهداری و سوخت منهای ارزش اسقاط است. برای سیستم منتخب متصل به شبکه، فتوولتائیک با ۴۱/۶٪ بیشترین سهم را در هزینه خالص فعلی پروژه داشته و پس از آن بویلر (۴۰/۴٪)، اینورتر (۱۳/۱٪) و برق شبکه (۴/۹٪) قرار دارند. از مقایسه با سیستم انرژی مرسوم، مشاهده می‌شود که اتصال سیستم به شبکه می‌تواند هزینه خالص شبکه برق را به دلیل سود ناشی از فروش برق اضافی فتوولتائیک به طور قابل توجهی نسبت به سیستمی که فقط برق از شبکه خریداری می‌کند، کاهش دهد.



شکل ۴. سهم واحدهای مختلف در هزینه خالص فعلی سیستم انرژی مرسوم (سمت راست) و سیستم



شکل ۵. سهم واحدهای انرژی در انتشار چرخه عمر برای سیستم‌های انرژی هیبریدی بهینه و مرسوم

در شکل ۵، سیستم‌های هیبریدی بهینه منتخب و مرسوم از نظر زیست‌محیطی مقایسه شده‌اند. بر این اساس، به‌کارگیری سیستم انرژی هیبریدی بهینه برای تأمین انرژی مجتمع مورد بررسی منجر به کاهش انتشار ۴۹/۵ کیلو تن معادل کربن دی‌اکسید (۱۳/۸٪) آلاینده زیست‌محیطی در طول ۲۰ سال عملکرد سیستم انرژی می‌شود. قابل ذکر است که سهم بویلر، برق و فتوولتائیک در انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم انرژی هیبریدی منتخب به ترتیب ۵۷/۶، ۳۹/۱ و ۳/۲ درصد است.

۷. نتیجه‌گیری:

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم انرژی هیبریدی پیچیده شامل مجموعه‌ای از فناوری‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر برای تأمین نیازهای انرژی الکتریکی و حرارتی یک مجموعه مصرف‌کننده بزرگ انرژی در دو حالت مستقل از شبکه و متصل به شبکه بود. بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از سه تابع هدف احتمال عدم تأمین برق، هزینه خالص فعلی و انتشار معادل کربن دی‌اکسید در چرخه عمر انجام شد که به ترتیب بیانگر شاخص‌های مهم فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم انرژی هیبریدی هستند. واحدهای انرژی سیستم هیبریدی شامل فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی، الکتروایزر، منبع هیدروژن، باتری، اینورتر، بویلر و برق شبکه بود. برای تحقق اهداف پژوهش، پیکربندی‌های مختلف اجزای مذکور در نرم‌افزار HOMER مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده و با توسعه برنامه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در نرم‌افزار MATLAB، مجموعه پاسخ‌های بهینه چندهدفه از میان سیستم‌های انرژی شبیه‌سازی شده مشخص شد. پس از یافتن سطح پارتو، طراحی نهایی از میان جواب‌های نامغلوب به کمک یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (TOPSIS) انتخاب شد. در نهایت، شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی طراحی نهایی ارزیابی و با سیستم انرژی مرسوم مقایسه شد. در ادامه خلاصه نتایج مهم پژوهش گزارش شده است. همچنین، با توجه به اهمیت بررسی بیشتر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی، در پایان موضوعاتی برای مطالعه بیشتر این سیستم‌ها پیشنهاد شده است.

۷-۱. یافته‌ها:

- جمع‌بندی نتایج پژوهش انجام شده به شرح زیر است:
- حدود ۸۵ درصد طراحی‌های بهینه چندهدفه متصل به شبکه بودند.
- پیکربندی غالب در سطح پارتو فتوولتائیک/پیل سوختی/الکتروایزر/مخزن هیدروژن/باتری/اینورتر/۲۰٪ (بیشینه بار) برق قابل خریداری از شبکه و بویلر بود (شامل ۱۶/۹٪ اعضای مجموعه پارتو).
- به ترتیب بیشینه تکرار، اینورتر در ۹۹/۴، فتوولتائیک ۹۹/۳، باتری ۶۹/۴، پیل سوختی و الکتروایزر ۶۶/۷، مخزن هیدروژن ۶۱/۴، ۲۰٪ برق ۳۴/۳، توربین بادی ۲۹/۰، ۴۰٪ برق ۲۸/۱، ۶۰٪ برق ۹/۷، ۱۰۰٪ برق ۸/۰ و ۸۰٪ برق ۴/۴ درصد پیکربندی‌های مجموعه پارتو وجود داشتند.
- میانگین ظرفیت فتوولتائیک، توربین بادی، بیشینه برق قابل خریداری، پیل سوختی، الکتروایزر، مخزن هیدروژن، باتری و اینورتر در سطح پارتو به ترتیب ۵۹۶۱/۲ کیلووات، ۲۰۹/۳ کیلووات، ۱۴۸۶/۹ کیلووات (۳۵/۵٪)، ۲۸۵/۰ کیلووات، ۴۲۴/۳ کیلووات، ۲۵۹/۶ کیلوگرم، ۱۱۱۷۱/۹ کیلووات ساعت و ۱۷۸۶/۸ کیلووات بود.
- محدوده (متوسط) هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخه عمر پاسخ‌های بهینه چندهدفه در طراحی‌های بهینه چندهدفه به ترتیب ۲/۸-۱۷/۴۳ (۲۷/۵) میلیون دلار، ۱۰-۴/۴ درصد و ۳۵۸/۶-۱۹۶/۶ (۲۷۲/۲) کیلو تن بود.
- وزن‌های کلی شاخص‌های هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار کربن دی‌اکسید برای ماتریس تصمیم شامل پاسخ‌های نامغلوب به ترتیب ۳۶۴/۰، ۳۷۷/۰ و ۲۵۹/۰ با استفاده از روش انترپوی محاسبه شد.
- طراحی نهایی منتخب شامل ۶۶۶۶/۷ کیلووات فتوولتائیک، ۸۰٪ برق شبکه و ۴۱۹۰/۷ کیلووات اینورتر بوده و هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و چرخه عمر آن به ترتیب ۲۱/۳ میلیون دلار، ۰ درصد و ۲۹۲/۵ کیلو تن بود.
- در طراحی منتخب، فتوولتائیک و برق شبکه به ترتیب ۵۷/۷ و ۴۲/۳٪ انرژی الکتریکی مورد نیاز مجتمع را تأمین کرده و کل بار حرارتی به‌وسیله بویلر گازی تأمین می‌شود. همچنین، در این طراحی به میزان ۲۲/۳٪ کل بار تأمین شده، برق به شبکه فروخته شده و نسبت تجدیدپذیر و توان اضافی به ترتیب ۱۸/۳ و ۱/۰ درصد بود.
- در طراحی منتخب، سهم خالص فتوولتائیک، بویلر، اینورتر و برق شبکه در هزینه خالص فعلی سیستم انرژی هیبریدی به ترتیب ۴۱/۶، ۴۰/۴، ۱۳/۱ و ۴/۹ درصد بود.
- طراحی منتخب ۱۳/۸٪ انتشار چرخه عمر کمتری نسبت به سیستم انرژی مرسوم دارد.

۷-۲. پیشنهادها:

اگرچه این مقاله بر اساس اهداف تعیین شده به خوبی نشان داد که انتخاب ظرفیت اجزای سیستم‌های انرژی هیبریدی بر اساس بهینه‌سازی چندهدفه، می‌تواند مزایای فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد، محدودیت‌هایی نیز در انجام آن وجود داشت. برای نمونه، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انجام نشده و با توجه به امکانات محدود نرم‌افزار، بهینه‌سازی ظرفیت بویلر میسر نشد. به علاوه این موارد، موضوع‌های زیر برای تحقیق بیشتر بر روی سیستم‌های انرژی هیبریدی پیشنهاد می‌شود:

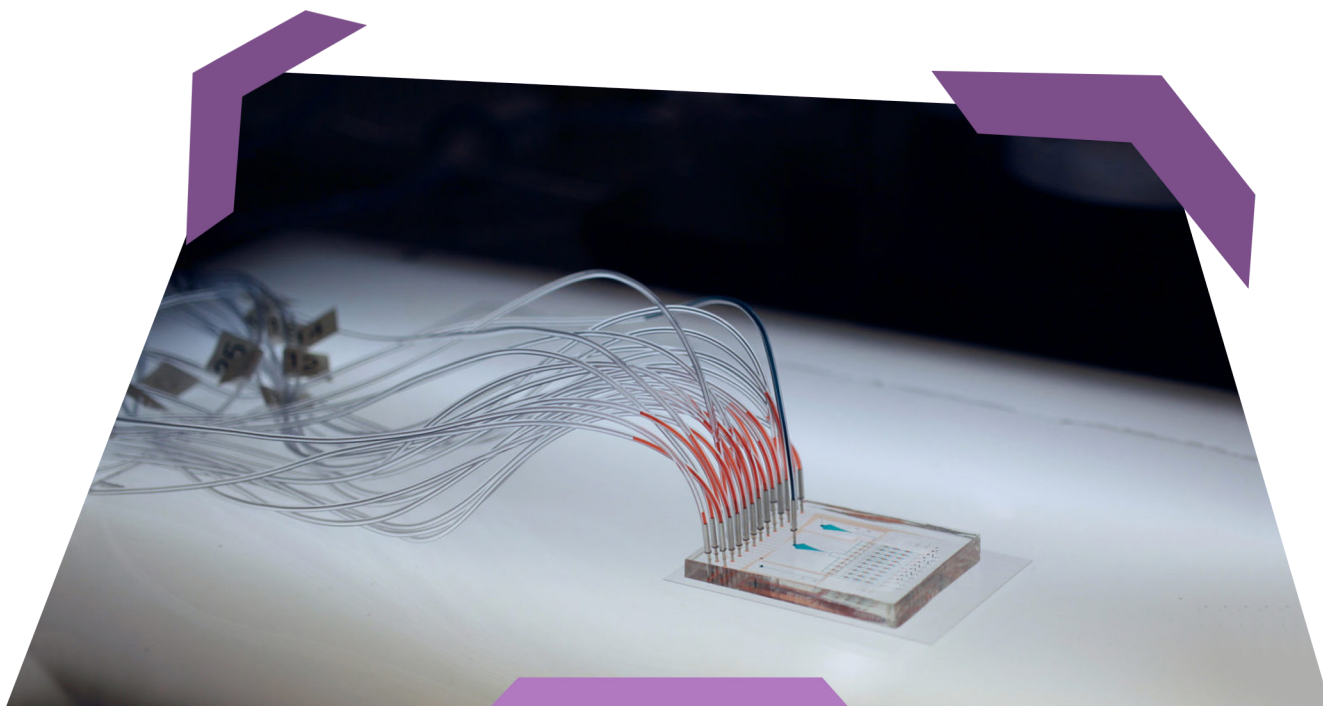
- بررسی اثر سایر واحدهای انرژی حرارتی نظیر پمپ حرارتی و منبع ذخیره حرارت در بهینه‌سازی چندهدفه سیستم انرژی هیبریدی
- ارزیابی اثر تحلیل حساسیت بر سطح پارتو و طراحی منتخب منتج شده از تصمیم‌گیری چندمعیاره
- معرفی توابع هدف جدید نظیر آگزرزی و مصرف انرژی‌های اولیه در بهینه‌سازی چندهدفه و مقایسه نتایج
- بررسی کاربرد سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و وزن‌دهی در انتخاب طراحی نهایی
- بهینه‌سازی چندهدفه برای سایر الگوهای مصرف برای تولید آب گرم، حرارت، سرمایش و برق
- تحقیق در مورد سیستم‌های مدیریت انرژی مدرن و اثر آن‌ها بر نتایج بهینه‌سازی چندهدفه

منابع:

- [۱] International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- [۲] Faisal, F., Khan, M. N., Pervaiz, R., Muhamad, P. M., & Rashdan, M. O. J. (۲۰۲۱). Exploring the role of fossil fuels, hydroelectricity consumption, and financial sector in ensuring sustainable economic development in the emerging economy. Environmental Science and Pollution Research, ۵۹۱۵-۵۹۳۲.
- [۳] Johnsson, F., Kjærstad, J., & Rootzén, J. (۲۰۱۹). The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels. Climate Policy, ۲۷۴-۲۵۸, (۲)۱۹.
- [۴] Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (۲۰۱۹). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. Journal of cleaner production, ۲۱۱, ۲۳۴۱-۲۳۵۰.
- [۵] Gyanwali, K., Komiya, R., & Fujii, Y. (۲۰۲۰). Representing hydropower in the dynamic power sector model and assessing clean energy deployment in the power generation mix of Nepal. Energy, ۱۱۷۷۹۵, ۲۰۲.
- [۶] Nowotny, J., Dodson, J., Fiechter, S., Gü, T. M., Kennedy, B., Macyk, W., Bak, T., Sigmund, W., Yamawaki, M., & Rahman, K. A. (۲۰۱۸). Towards global sustainability: Education on environmentally clean energy technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۵۵۱-۲۵۵۱, ۸۱.
- [۷] Energy, B. P. S. R. o. W. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [۸] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA). <http://www.satba.gov.ir>
- [۹] Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Yusaf, T., & Azmi, W. (۲۰۱۵). Solar energy in Iran: Current state and outlook. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۴۹, ۹۳۱-۹۴۲.

- [۱۰] Rinaldi, F., Moghaddampoor, F., Najafi, B., & Marchesi, R. (۲۰۲۱). Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru. *Clean technologies and environmental policy*, ۲۴(۱), ۲۳.
- [۱۱] Bakić V., Pezo, M., Stevanović Z., Živković M., & Grubor, B. (۲۰۱۲). Dynamical simulation of PV/Wind hybrid energy conversion system. *Energy*, ۳۲۸-۳۲۹, (۱)۴۰.
- [۱۲] Sawle, Y., Gupta, S., & Kumar Bohre, A. (۲۰۱۶). PV-wind hybrid system: A review with case study. *Cogent Engineering*, ۱۱(۱), ۱۱۸۹۳۰۵.
- [۱۳] Vick, B. D., & Neal, B. A. (۲۰۱۲). Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. *Solar Energy*, ۱۲۰۷-۱۱۹۷, (۵)۸۶.
- [۱۴] Baneshi, M., & Hadianfard, F. (۲۰۱۶). Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*, ۲۴۴-۲۳۳, ۱۲۷.
- [۱۵] Barakat, S., Ibrahim, H., & Elbaset, A. A. (۲۰۲۰). Multi-objective optimization of grid-connected PV-wind hybrid system considering reliability, cost, and environmental aspects. *Sustainable Cities and Society*, ۱۰۲۱۷۸, ۱۰.
- [۱۶] Lau, K. Y., Yousof, M., Arshad, S., Anwari, M., & Yatim, A. (۲۰۱۰). Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. *Energy*, ۳۵۵-۳۴۵, (۸)۳۰.
- [۱۷] Fazelpour, F., Soltani, N., & Rosen, M. A. (۲۰۱۴). Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems for a medium-size hotel on Kish Island, Iran. *Energy*, ۸۱۵-۸۵۶, ۲۳.
- [۱۸] Rodríguez, L. R., Lissén, J. M. S., Ramos, J. S., Jara, E. Á. R., & Domínguez, S. Á. (۲۰۱۶). Analysis of the economic feasibility and reduction of a building's energy consumption and emissions when integrating hybrid solar thermal/PV/micro-CHP systems. *Applied Energy*, ۸۳۸-۸۲۸, ۱۶۵.
- [۱۹] Kasaeian, A., Rahdan, P., Rad, M. A. V., & Yan, W.-M. (۲۰۱۹). Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study. *Energy Conversion and Management*, ۱۱۱۸۱۰, ۱۹۸.
- [۲۰] Misra, A., & Sharma, M. (۲۰۲۱). Development of Hybrid Energy System for a Rural Area. *Proceedings of Second International Conference on Smart Energy and Communication: ICSEC ۲۰۲۰*.
- [۲۱] Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (۲۰۱۹). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, ۱۱۲۰۲۷, ۱۹۹.
- [۲۲] Basrawi, F., Yamada, T., & Obara, S. y. (۲۰۱۴). Economic and environmental based operation strategies of a hybrid photovoltaic-microgas turbine trigeneration system. *Applied Energy*, ۱۸۳-۱۷۴, ۱۲۱.
- [۲۳] Mehr, A., Lanzini, A., Santarelli, M., & Rosen, M. A. (۲۰۲۱). Polygeneration systems based on high temperature fuel cell (MCFC and SOFC) technology: System design, fuel types, modeling and analysis approaches. *Applied Energy*, ۱۲۰۱۱۳, ۲۳۸.
- [۲۴] Nesamalar, J. J. D., Suruthi, S., Raja, S. C., & Tamilarasu, K. (۲۰۲۱). Techno-economic analysis of both on-grid and off-grid hybrid energy system with sensitivity analysis for an educational institution. *Energy Conversion and Management*, ۱۱۴۱۸۸, ۲۳۹.
- [۲۵] Mayer, M. J., Szilágyi, A., & Gróf, G. (۲۰۲۰). Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*, ۱۱۵۰۵۸, ۲۶۹.
- [۲۶] Di Somma, M., Yan, B., Bianco, N., Graditi, G., Luh, P., Mongibello, L., & Naso, V. (۲۰۱۷). Multi-objective design optimization of distributed energy systems through cost and exergy assessments. *Applied Energy*, ۱۹۱۶-۱۹۱۹, ۲۰۴.
- [۲۷] HOMER Pro User Manual. <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>
- [۲۸] Pahlavan, S., Jahangiri, M., Alidadi Shamsabadi, A., & Rahimi Ariae, A. (۲۰۱۹). Assessment of PV-based CHP system: The effect of heat recovery factor and fuel type. *Journal of Energy Management and Technology*, ۴۷-۴۰, (۱)۳.
- [۲۹] Ansari Nezhad, E., & Najafi, M. (۲۰۲۰). Optimal and Intelligent Designing of Stand-alone Hybrid Photovoltaic/Wind/Fuel Cell System Considering Cost and Deficit Load Demand Probability, Case Study for Iran (Bushehr City). *Signal Processing and Renewable Energy*, ۱۰۶-۸۷, (۲)۴.
- [۳۰] Das, B. K., Hassan, R., Tushar, M. S. H., Zaman, F., Hasan, M., & Das, P. (۲۰۲۱). Techno-economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system using multi-objective genetic algorithm: A case study for remote Island in Bangladesh. *Energy Conversion and Management*, ۱۱۳۲۳, ۲۳۰.
- [۳۱] Charabi, Y., & Abdul-Wahab, S. (۲۰۲۰). Wind turbine performance analysis for energy cost minimization. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, ۱۱-۱, (۱)۷.
- [۳۲] Abid, H., Thakur, J., Khatawada, D., & Bauner, D. (۲۰۲۱). Energy storage integration with solar PV for increased electricity access: A case study of Burkina Faso. *Energy*, ۱۲۰۶۱۰, ۲۳۰.
- [۳۳] Jing, R., Wang, M., Brandon, N., & Zhao, Y. (۲۰۱۷). Multi-criteria evaluation of solid oxide fuel cell based combined cooling heating and power (SOFC-CCHP) applications for public buildings in China. *Energy*, ۲۸۹-۲۷۳, ۱۴۱.
- [۳۴] Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A., & Mekhilef, S. (۲۰۱۹). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability*, ۱۸۳, (۳)۱۱.
- [۳۵] Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. S., Hosseini Dehshiri, S. J., Mostafaeipour, A., Issakhov, A., & Techato, K. (۲۰۲۱). Use of a Hybrid Wind-Solar-Diesel-Battery Energy System to Power Buildings in Remote Areas: A Case Study. *Sustainability*, ۸۷۶۴, (۱۶)۱۲.
- [۳۶] Taghavifar, H., & Zomorodian, Z. S. (۲۰۲۱). Techno-economic viability of on grid micro-hybrid PV/wind/Gen system for an educational building in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۱۰۸۷۷, ۱۴۲.
- [۳۷] Mubaarak, S., Zhang, D., Chen, Y., Liu, J., Wang, L., Yuan, R., Wu, J., Zhang, Y., & Li, M. (۲۰۲۰). Techno-economic analysis of grid-connected pv and fuel cell hybrid system using different pv tracking techniques. *Applied Sciences*, ۸۵۱۵, (۲۳)۱۰.
- [۳۸] Rezk, H., Alghassab, M., & Ziedan, H. A. (۲۰۲۰). An optimal sizing of stand-alone hybrid PV-fuel cell-battery to desalinate seawater at Saudi NEOM city. *Processes*, (۴)۸۸۳۸۲.
- [۳۹] Katsigiannis, Y. A., Georgilakis, P., & Karapidakis, E. (۲۰۱۰). Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables. *IET Renewable Power Generation*, ۴۱۹-۴۰۴, (۵)۴.
- [۴۰] Stats & Information Network. Ministry of Energy of Iran. <https://isn.moe.gov.ir/?lang=en-us>
- [۴۱] Neto, J. X. V., Junior, E. J. G., Moreno, S. R., Ayala, H. V. H., Mariani, V. C., & dos Santos Coelho, L. (۲۰۱۸). Wind turbine blade geometry design based on multi-objective optimization using metaheuristics. *Energy*, ۱۵۸-۱۴۵, ۱۶۲.
- [۴۲] Ishibuchi, H., Masuda, H., & Nojima, Y. (۲۰۱۴). Selecting a small number of non-dominated solutions to be presented to the decision maker. ۲۰۱۴ IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC).
- [۴۳] Xu, C., Ke, Y., Li, Y., Chu, H., & Wu, Y. (۲۰۲۰). Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. *Energy Conversion and Management*, ۱۱۲۸۹۲, ۲۱۵.
- [۴۴] Elkadeem, M., Younes, A., Sharshir, S. W., Campana, P. E., & Wang, S. (۲۰۲۱). Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, ۱۱۷۰۷۱, ۲۹۵.
- [۴۵] Wang, Y., Wang, X., Yu, H., Huang, Y., Dong, H., Qi, C., & Baptiste, N. (۲۰۱۹). Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions. *Journal of cleaner production*, ۵۷۸-۵۶۳, ۲۲۵.
- [۴۶] Kumar, C., Rana, K. B., & Tripathi, B. (۲۰۲۰). Performance evaluation of diesel-additives ternary fuel blends: An experimental investigation, numerical simulation using hybrid Entropy-TOPSIS method and economic analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, ۱۰۰۶۷۵, ۲۰.
- [۴۷] Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (۲۰۱۷). A combined goal programming-AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۴۲۳-۱۴۱۰, ۷۸.
- [۴۸] Shannon, C. E. (۱۹۴۸). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, ۴۲۳-۳۷۹, (۳)۲۷.
- [۴۹] Zeleny, M. (۲۰۱۲). Multiple criteria decision making Kyoto ۱۹۷۵ (Vol. ۱۲۳). Springer Science & Business Media.





فناوری میکروسیالی و آزمایشگاه روی تراشه

سیامک سیفی

دانشجوی دکتری، دانشگاه یورک کانادا

در سال‌های اخیر پیشرفت دانش بشر باعث ایجاد انقلاب‌های بزرگ در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی گردیده است. فناوری میکروسیالی با ساخت میکرو ابزارها با کانال‌هایی در ابعاد میکرو و نانو و همچنین کنترل رفتار جریان سیال درون آن‌ها سروکار دارد (شکل ۱). فناوری میکروسیالی به معنای مینیاتورسازی (کوچک‌سازی) می‌باشد که انجام آنالیزهای پیچیده بیولوژیکی و شیمیایی در مدت‌زمان کوتاه و یک فضای کوچک را فراهم می‌سازد. این تکنولوژی زیرمجموعه‌ای از تکنولوژی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) یا همان میکروسیستم‌های تحلیل کلی (micro-TAS) می‌باشد. فناوری میکروسیالی نام گسترده‌تری برای دستگاه‌های مکانیکی همچون میکرومیکسرها، سوپاپ‌ها، پمپ‌ها، سنسورها، جریان‌سنج‌ها و غیره می‌باشد.

کاربردها

در سال‌های اخیر فناوری میکروسیالی و آزمایشگاه روی تراشه (LOC) رشد چشمگیری در کارهای صنعتی و دانشگاهی داشته‌اند. سیستم‌های میکروسیالی گسترده وسیعی از کاربردها در حوزه‌های زیست‌شناسی و پزشکی را دارا هستند. آزمایش‌های تشخیصی و تحقیقاتی زیادی وجود دارند که در آنها نمونه‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها بخش وسیعی از کاربردهای سیستم‌های میکروسیالی را در این حوزه‌ها دربر می‌گیرند. این سیستم‌ها در زمینه‌های مختلف پزشکی و بیولوژیکی از جمله آنالیز DNA و آنالیز عمومی سلول‌ها، دستگاه‌های مبتنی بر اساس پروتئین و دستگاه‌های جداسازی و تشخیص مولکولی موردتوجه قرار گرفته‌اند.

ساختمان تشکیل دهنده

اولین مواد استفاده شده در ساخت این تراشه‌ها از جنس شیشه، سیلیکون یا الاستومر (نوعی پلیمر که قابلیت ویسکوالاستیسیته (گرانروی و کشسانی باهم) دارد) بودند. درون این تراشه‌ها ساختمان‌هایی با ابعاد میکرو و نانو تعبیه شده‌اند که سیالات با حجم‌های میکرونی (در حد میکرولیتر، نانومتر و پیکولیتر) درون آن‌ها جریان دارند. وجود ساختمان‌هایی همچون لوله‌ها، دریچه‌ها، کانال‌ها و غیره امکان ورود چندین سیال را به داخل تراشه می‌دهد. این سیالات با استفاده از میکروپمپ‌ها امکان ورود به داخل تراشه را پیدا می‌کنند که باتوجه به هدف طرح با هم ترکیب شده و یا واکنش شیمیایی خاصی را دنبال می‌کنند. نهایتاً، محصولات اصلی از طریق خروجی‌ها به بیرون دستگاه منتقل می‌شوند. ساخت تراشه‌ها از جنس سیلیکون و شیشه دارای مزایایی همچون پایداری شیمیایی بود؛ اما عواملی از جمله غیرشفاف بودن و گران بودن باعث استفاده از مواد جدیدی در ساخت این تراشه‌ها شد. امروزه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان‌ها و دیگر پلیمرهای بر پایه سیلوکسان کاربرد وسیعی در تولید تراشه‌ها را دارند. این پلیمر مزایای فراوانی را در آزمایش‌های بیولوژیکی فراهم می‌آورد. شفافیت این ماده به بررسی به‌وسیله میکروسکوپ نوری و فرابنفش کمک می‌کند. همچنین این ماده قابلیت استریل کردن و استفاده مجدد را دارد.

مزایا

سیستم‌های میکروسیالی به دلیل مزیت‌هایی که دارند از موضوعات جذاب دنیای فناوری بشمار می‌روند، به‌طوری که شرکت‌های زیادی در دنیا به دنبال توسعه این فناوری هستند. این فناوری آینده امیدبخشی را از خود نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که ساخت کیت‌های آزمایشگاهی در سال‌های آینده آزمایشگاه روی تراشه را جایگزین تست‌های تشخیص طبی رایج خواهد کرد. استفاده از فناوری میکروسیالی مزایای بسیاری را در حوزه‌های مختلف علمی فراهم آورده است. این مزایا سبب شده است که این فناوری به یک فناوری به‌سرعت در حال توسعه و جذاب تبدیل شود. در زیر به مهم‌ترین این مزایا اشاره شده است.

- * مقرون به صرفه بودن و کم‌هزینه بودن انجام آزمایش‌ها
- * تحلیل سریع‌تر و زمان پاسخگویی کمتر در انجام آزمایش
- * اتلاف کمتر ماده و انرژی
- * کاهش دخالت نیروی انسانی در نتیجه کاهش خطای انسانی و جلوگیری از ایجاد بسیاری از آلودگی‌ها
- * امکان تولید تراشه‌های ایمن برای مطالعات بیولوژیکی، شیمیایی و رادیواکتیو
- * انجام فرایند تشخیص و جداسازی با حساسیت و قدرت تفکیک بالا

معایب

پیچیدگی بیشتر فرایندها در آزمایشگاه روی تراشه نسبت به آزمایش‌های مرسوم به دلیل غالب بودن اثرات فیزیکی و شیمیایی در مقیاس‌های کوچک مانند زبری سطح و نیروهای موینگی.

دستگاه تحلیلی میکروسیالی کاغذی

کاغذ به دلیل قابل چاپ بودن، هزینه کم، وزن سبک و یکبار مصرف بودن به یک ماده بسیار مهم و انعطاف‌پذیر در تکنولوژی میکروسیالی تبدیل شده است. استفاده از مواد رایج سنتی در ساخت تراشه‌ها بسیار هزینه بالایی داشته و نیاز به نیروی آموزش دیده دارد. اما امروزه دستگاه‌های تشخیص بیماری ارزان قیمت و در دسترس مورد نیاز بوده و تهیه فناوری‌های تشخیصی حتی برای کشورهای توسعه یافته اقتصادی نیز بدلیل گران قیمت بودن این ابزارها می‌تواند مشکل‌آفرین باشد. دستگاه‌های تحلیلی میکروسیالی کاغذی ابزارهایی سازگار با محیط زیست و به صرفه می‌باشند که امکان انجام آزمایش‌ها در شرایط اضطراری و در مناطق دور افتاده را نیز فراهم می‌آورند. در این فناوری از یک کاغذ الگودار که بر روی آن حجم کمی از ماده بتواند طبق الگو به حرکت درآید، استفاده می‌کنند. دستگاه‌های تحلیلی میکروسیالی کاغذی دستگاه‌هایی از جنس مواد آب دوست (قطبی) سلولز یا نیتروسلولز هستند که هدایت مایع را با روش انشعاب از یک ورودی به یک خروجی دلخواه هدایت می‌کند. مهم‌ترین مزیت آن این است که این دستگاه بر خلاف دستگاه‌های پیچیده‌تر میکروسیالی تا حد زیادی به صورت غیرفعال کنترل می‌شود. توسعه دستگاه‌های میکروسیالی برپایه کاغذ از اوایل قرن بیست و یکم برای تأمین نیاز به سیستم‌های تشخیصی پزشکی ارزان قیمت و قابل حمل آغاز شد.

دستگاه‌های تحلیلی میکروسیالی کاغذی علاوه بر آنالیزهای بیوشیمیایی برای تشخیص‌های پزشکی و پزشکی قانونی نیز کاربرد دارند. از کاغذها با انواع مختلف برای ساخت این نوع دستگاه‌ها براساس نوع کاربردشان استفاده می‌شود که شامل مواد مختلفی از جمله سلولز تا شیشه یا پلیمر می‌شود. به کمک صفحات کاغذی می‌توان آزمایش‌های گوناگون شناسایی مولکولی، بیوشیمیایی و ایمونولوژیک را بصورت هم‌زمان انجام داد. اولین ابزار تشخیصی بر پایه کاغذ برای آزمایش ادرار ساخته شده است که برای اندازه‌گیری پروتئین و غلظت گلوکز ادرار از آزمون‌های رنگ‌سنجی استفاده می‌کرد. از کاربردهای دیگر این دستگاه‌ها می‌توان به تشخیص سموم و عوامل بیماری‌زا اشاره کرد.

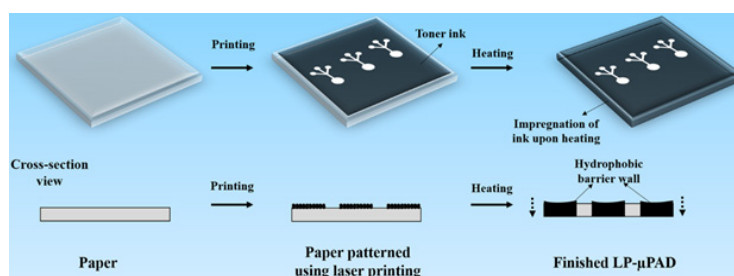
دستگاه‌های میکروسیالی بر پایه کاغذ از موارد زیر ساخته می‌شوند:

- * ورودی: بستر (سلولزی) محلی که سیالات به صورت دستی پخش می‌شوند.
- * کانال‌ها: شبکه‌های میلی‌متری آب‌دوست که سیال را از میان یک دستگاه منتقل می‌کنند.
- * تقویت‌کننده‌های جریان: محل‌هایی با شکل‌های مختلف که سرعت جریان در آن به منظور پایداری جریان اصلاح می‌شود.
- * مقاومت‌های در برابر جریان: یک عنصر مویری می‌باشد که به منظور کنترل زمانی یک جریان با سرعت کاهش یافته از آن استفاده می‌شود.
- * موانع: محل‌های آگریز که از خروج سیال به بیرون کانال خودداری می‌کنند.
- * خروجی‌ها: محلی که آزمایش بیولوژیکی در آن انجام می‌شود.

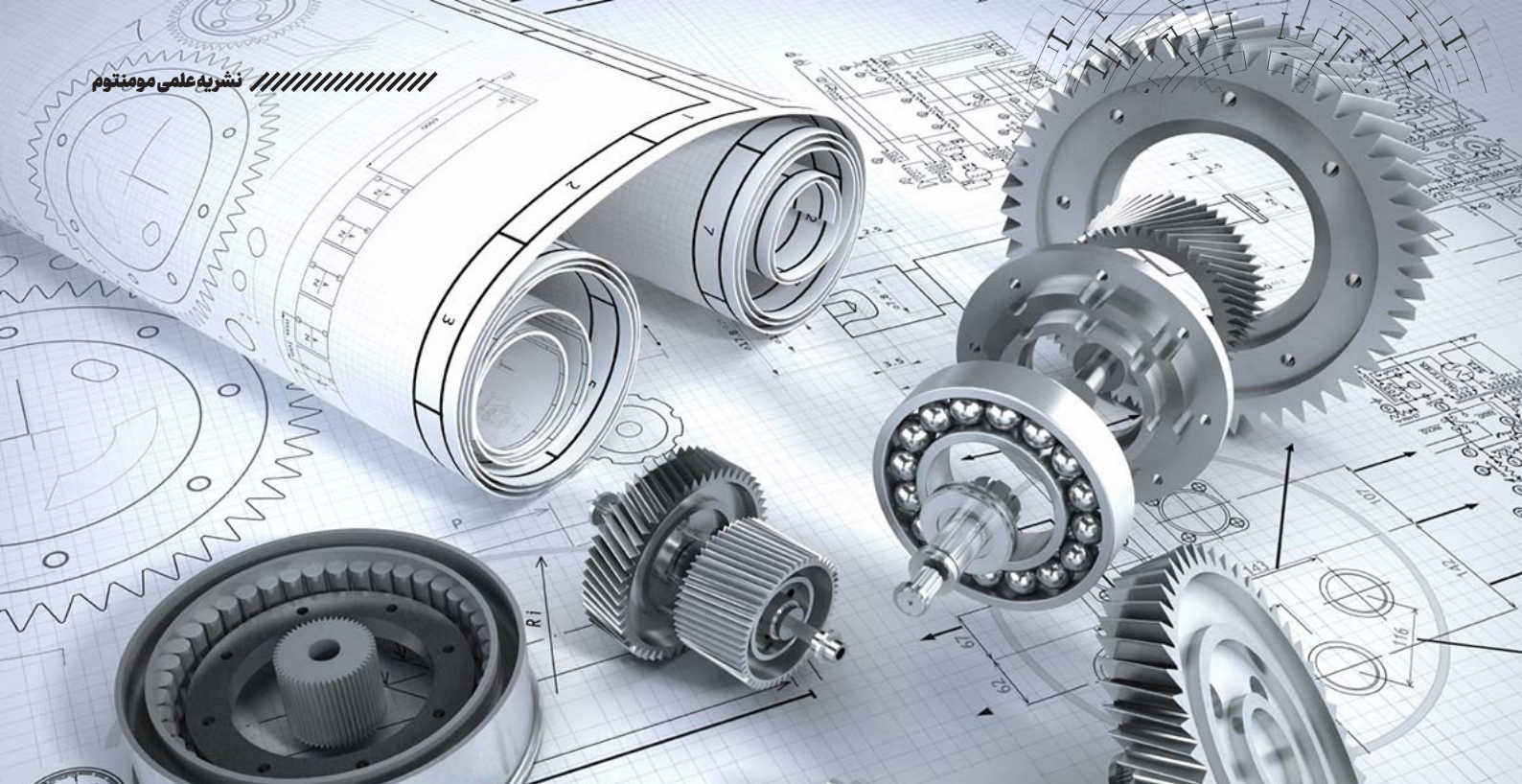
کاغذ یک محیط متخلخل می‌باشد که سیال در آن در مرحله اول به روش تبخیر و فیتیل‌گذاری جابجا می‌شود. حرکت سیال از یک محیط متخلخل به کمک اثرات تبخیر، هندسه و نفوذپذیری مدیریت می‌شود. این عوامل باعث نفوذ مویری محدود شده که می‌تواند به کمک تبخیر و با کنترل هندسه و میزان تخلخل تنظیم شود.

به دلیل مواد مورد استفاده و مراحل ساخت، فرایند ساخت دستگاه‌های میکروسیالی بر پایه کاغذ ساده و مقرون به صرفه می‌باشد. این دستگاه‌ها از ریز مجراهای آب‌گریز/آب‌دوست ساخته می‌شوند که مایعات درون آن‌ها به کمک نیروی کشش سطحی در هر دو بعد عرضی و طولی حرکت می‌کنند. روش‌های متعددی برای ساخت این دستگاه‌ها وجود دارد که با توجه محل مورد استفاده از آن‌ها متفاوت هستند. اولین مرحله از ساخت مربوط به تبدیل برخی از نواحی آب‌دوست کاغذ به آب‌گریز به وسیله چاپ خطوط آب‌گریز موازی است. این خطوط آب‌گریز مسیر ریز مجراها را مشخص می‌کنند. عمق ریز مجراها نیز به وسیله ضخامت کاغذ مورد استفاده مشخص می‌گردد. جریان مایعات درون ریز مجراها بر پایه جریان موینگی می‌باشد. به دلیل وجود موانع آب‌گریز، نمونه‌های آب‌دوست به اطراف پخش نشده و درون کانال‌های تعبیه شده حرکت می‌کنند.

دستگاه‌های میکروسیالی بر پایه کاغذ را می‌توان با استفاده از انواع متفاوت چاپ جوهرافشان، چاپ موم، لیتوگرافی نوری، چاپ فلکسوگرافی، قلم‌زنی، درمان با پلاسما، درمان با لیزر، پردازش نور دیجیتال، پریپتر سه بعدی و موم غربالگری تولید کرد. هر یک از این روش‌ها موانع فیزیکی آب‌گریزی را بر روی کاغذ آب‌دوست ایجاد می‌کنند که منفعلاً مایعات را منتقل می‌کنند (شکل ۲).



شکل ۲: تصویری شماتیک از نحوه تولید دستگاه میکروسیالی بر پایه کاغذ



روشی نوین جهت استخراج معادله‌ی حالت از باند گراف یک سیستم دینامیکی

محمد آفتابی طالعی^۱، علی جمالی^۲، نادر نریمان زاده^۳

۱- کارشناسی ارشد طراحی کاربردی دانشگاه گیلان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

چکیده

روش باند گراف برای مدل سازی و استخراج معادلات دینامیک سیستم های خطی و غیرخطی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، ابتدا مدل باند گراف بر اساس توزیع انرژی سیستم و سپس معادلات حالت سیستم استخراج می شوند. یکی از مشکلات اصلی، استخراج معادلات فضای حالت است که معمولاً به سادگی انجام نمی شود. در این مقاله روشی نوین برای استخراج معادله حالت بر اساس جدول باند-المان، تابع المان ها، بردار حالت و تابع حالت ارائه می شود. روش ارائه شده به سادگی می تواند برای تمامی سیستم های خطی و غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. در ابتدا با توجه به مدل باند گراف سیستم، جدول باند-المان استخراج می گردد. سپس با استفاده از آن در تابع المان ها و تابع حالت، معادله حالت سیستم به دست می آید. از روش ارائه شده برای مدل سازی و به دست آوردن معادلات حاکم یک سروموتور استفاده می شود.

کلمات کلیدی: باند گراف، فضای حالت، شبیه سازی، مدل سازی، باند-المان

۱- مقدمه

در کاربردهای مهندسی، مدل سازی سیستم ها بخش جدایی ناپذیر تحلیل است. به منظور مدل سازی سیستم ها، روش های گوناگونی نظیر یافتن معادلات نیوتن-اولر، رسم دیاگرام بلوکی، ایجاد گراف سیگنال-جریان، تشکیل باند گراف یک سیستم یا روش های دیگری گسترش یافته اند. از میان این روش های مدل سازی، مدل سازی سیستم های دینامیکی با استفاده از مدل باند گراف یک سیستم، یکی از روش های نوکاربرد از میان روش های تصویری می باشد. در سال ۱۹۵۹، هنری پاینتر اولین بار روش باند گراف را به منظور مدل سازی تصویری سیستم ها معرفی نمود [۱]. پس از پاینتر، شاگرد وی به نام کارنوپ، روش باند گراف را در حوزه سیستم های گوناگون انرژی توسعه داد [۲]. مدل سازی به روش باند گراف بر پایه تقسیم انرژی میان اجزای مختلف سیستم می باشد که این ویژگی، باند گراف را برای مدل سازی سیستم های پیچیده چند فیزیکی مناسب می کند. برای استفاده از باند گراف در شبیه سازی سیستم های دینامیکی، می توان از آن معادلات دیفرانسیل درجه اول، که بیان کننده رفتار فیزیکی سیستم می باشند، را استخراج کرد. مجموعه ای این معادلات دیفرانسیل درجه اول، معادله حالت سیستم را تشکیل می دهند. رزنبرگ در سال ۱۹۷۱، جهت یافتن معادله فضای حالت، یک سیستم چند درگاه ارائه نمود [۳]. جهت ایجاد خودکار معادلات غیر خطی فضای حالت، گرابوویکی در سال ۱۹۷۹ از نرم افزار GEM استفاده کرد [۴]. در سال ۱۹۸۸ روشی جهت ایجاد فضای حالت به صورت سمبولیک توسط زید استفاده شد [۵]. در سال ۱۹۹۹ بروزکی برای استخراج معادلات فضای حالت از باند گراف، با افزودن اطلاعات پاره ای به باند گراف، روشی جدید ارائه نمود [۶].

روش ارائه شده در این کار، پوشش دهنده باند گراف شامل المان های تشکیل دهنده سرو موتور ساده و برپایه عملیات ساده جبری و استفاده از جدول باند-المان، تابع المان ها و تابع حالت می باشد. علاوه بر این، روش معرفی شده قابل استفاده برای استخراج معادله حالت سیستم های خطی و غیر خطی، بدون نیاز به شاخص علیت است، زیرا طی آن شاخص علیت به صورت خودکار از حل معادلات به دست می آید.

۲- مروری بر اجزای باندگراف

روش باندگراف برپایه‌ی انتقال انرژی بنا شده است. در این روش، نیم پیکان‌ها با عنوان باند شناخته شده و حامل متغیرهای انرژی می‌باشند. متغیرهای "جریان" و "سعی" به عنوان متغیرهای انرژی شناخته می‌شوند. مقدار انرژی انتقال یافته در هر باند برابر حاصل ضرب متغیرهای جریان و سعی می‌باشد. جهت انتقال انرژی، همسو با جهت باند و جهت انتقال متغیرهای انرژی با شاخص علیت مشخص می‌گردد. در مدلسازی فیزیکی، استفاده از جابجایی عمومی و مومنتوم عمومی مرسوم است. اگر جابجایی عمومی و مومنتوم عمومی به ترتیب با q و p نشان داده شوند، در اینصورت ارتباط آن‌ها با متغیر جریان (f) و متغیر سعی (e) به صورت $q = \int f dt$ و $p = \int e dt$ خواهد بود. جدول ۱ دربردارنده‌ی اطلاعات متغیرهای انرژی، جابجایی عمومی و مومنتوم عمومی در حوزه‌های متفاوت فیزیکی می‌باشد [7].

جدول ۱: متغیرهای انرژی، جابجایی عمومی و مومنتوم عمومی در حوزه‌های مختلف فیزیکی [8]

حوزه‌ی فیزیکی	جریان "f"	سعی "e"	جابجایی عمومی $q = \int f dt$	مومنتوم عمومی $p = \int e dt$
الکترومغناطیسی	"i" جریان الکتریکی	"u" ولتاژ	$q = \int i dt$ بار	$\lambda = \int u dt$ شار مغناطیسی
مکانیکی خطی	"v" سرعت	"F" نیرو	$x = \int v dt$ جابجایی	$p = \int F dt$ مومنتوم
مکانیکی دوار	" ω " سرعت زاویه‌ای	"T" گشتاور	$\theta = \int \omega dt$ جابجایی زاویه‌ای	$b = \int T dt$ مومنتوم زاویه‌ای
هیدرولیک-نیوماتیک	" φ " دبی جمی	"p" فشار	$V = \int \varphi dt$ حجم	$\Gamma = \int p dt$ نرخ مومنتوم جریان
حرارتی	"T" دما	" f_S " جریان انتروپی	$S = \int f_S dt$ انتروپی	
شیمیایی	" μ " پتانسیل شیمیایی	" f_N " جریان مولی	$N = \int f_N dt$ مول	

در روش باندگراف، نه المان اصلی ساده وجود دارند که می‌توان آن‌ها را در چهار گروه ۱- منابع، ۲- المان‌های یک راهه، ۳- المان‌های دو راهه و ۴- اتصالات تقسیم کرد. روابط موجود متغیرهای انرژی، جابجایی عمومی و مومنتوم عمومی برای هر المان در جدول ۲ آمده است.

- ۱- منابع: منابع موجود در باند گراف به دو دسته‌ی منابع سعی (S_e) و منابع جریان (S_f) تقسیم می‌شوند.
- ۲- المان‌های یک راهه: این المان‌ها به سه دسته‌ی الف- المان‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی جنبشی با عنوان المان اینرسی "I"، ب- المان ذخیره‌کننده‌ی انرژی پتانسیل با عنوان المان ظرفیتی "C" و ج- المان مصرف‌کننده‌ی انرژی "R" تقسیم می‌شوند.
- ۳- المان‌های دو راهه: این المان‌ها بدون مصرف یا ذخیره‌ی انرژی، با تغییر دادن متغیرهای انرژی متناسب با یکدیگر، آن‌ها را به متغیرهای انرژی قابل استفاده در حوزه‌های دیگر انرژی می‌گردانند. این المان‌ها به دو گروه ترانسفورمر "TF" و ژیراتور "GY" تقسیم می‌شوند.
- ۴- اتصالات: دو نوع اتصال موجود در باند گراف شامل الف- اتصالات "o" که با مقدار متغیر سعی برابر، جریان را میان سایر المان‌های متصل به خود تقسیم می‌کنند و ب- اتصالات "1" که سعی را با جریان یکسان میان المان‌های متصل به خود تقسیم می‌کنند، تقسیم می‌شوند.

تعداد چهار باند در باندگراف سیستم مشاهده می شود، پس در این سیستم هشت رابطه میان متغیرهای انرژی وجود دارد. پس از تعریف بردار متغیرهای انرژی به صورت $\vec{u} = [e_1 \ f_1 \ e_2 \ f_2 \ e_3 \ f_3 \ e_4 \ f_4]^T$ ، برای یافتن پاسخ سیستم، از باندگراف سیستم، هشت رابطه میان این متغیرها استخراج می شود. برای هر المان، تابعی وجود دارد که وابسته ی نوع المان، مقدار آن و باندهایی که به آن متصل هستند می باشد. به مجموعه ی تمامی این توابع، تابع المان ها گفته می شود. ارتباط میان متغیرهای انرژی درون سیستم، با معادله ی جبری $[D]\vec{u} = \vec{G}$ نمایش داده می شود. خروجی تابع المان ها، شامل اجزای تشکیل دهنده ی معادله ی جبری $[D]\vec{u} = \vec{G}$ ، یعنی ماتریس $[D]$ و بردار $\vec{G}$ خواهد بود. پاسخ سیستم برای متغیرهای انرژی، از حل این معادله به صورت $\vec{u} = [D^{-1}]\vec{G} = \vec{H}$ به دست خواهد آمد. جدول ۳ نشان دهنده ی نحوه ی استفاده از تابع المان ها، که طی استفاده از آن ماتریس $[D]$ و بردار $\vec{G}$ به دست خواهند آمد، است. در ابتدای فرایند، ماتریس $[D]$ ماتریس صفر با ابعاد (8×8) ، ابعاد بردار $\vec{G}$ برابر (8×1) و تمامی آرایه های آن برابر صفر و مقدار عددی n نیز برابر یک است.

جدول ۳: استفاده از تابع المان ها برای یافتن ماتریس $[D]$ و بردار $\vec{G}$

المان	تابع المان ها	ماتریس $[D]$ و بردار $\vec{G}$
E_1 : منبع سعی	$S_e(n, D, G, (S_e: F), [B_i])$ $n = 1$ $B_i = B_1$	$D(n, 2i - 1) = D(1, 1) = 1$ $G(n) = G(1) = V$ $n = n + 1 = 2$
E_2 : اتصال 1	$one\left(n, D, G, \begin{bmatrix} B_i \\ B_j \\ B_l \end{bmatrix}\right)$ $n = 2$ $B_i = B_1$ $B_j = B_2$ $B_l = B_3$	$D(n, 2i - 1) = D(2, 1) = 1$ $D(n, 2j - 1) = D(2, 3) = -1$ $D(n, 2l - 1) = D(2, 5) = -1$ $D(n + 1, 2i) = D(3, 2) = 1$ $D(n + 2, 2i) = D(4, 2) = 1$ $D(n + 1, 2j) = D(3, 4) = -1$ $D(n + 2, 2l) = D(4, 6) = -1$ $G(n \dots n + 2) = G((2 \dots 4)) = 0$ $n = n + 3 = 5$
E_3 : المان اینرسی	$I(n, D, G, (I: L_1), [B_i])$ $n = 5$ $B_i = B_2$	$D(n, 2i) = D(5, 4) = 1$ $G(n) = G(5) = \left(\frac{1}{L_1}\right)p_3$ $n = n + 1 = 6$
E_4 : ژیراتور	$GY\left(n, D, G, (GY: k), \begin{bmatrix} B_i \\ B_j \end{bmatrix}\right)$ $n = 6$ $B_i = B_3$ $B_j = B_4$	$D(n, 2i - 1) = D(6, 5) = 1$ $D(n, 2j) = D(6, 8) = -k$ $D(n + 1, 2i) = D(7, 6) = k$ $D(n + 1, 2j - 1) = D(7, 7) = -1$ $G(n \dots n + 1) = G(6 \dots 7) = 0$
E_5 : المان اینرسی	$I(n, D, G, (I: J_1), [B_{i=4}])$ $n = 8$ $B_i = B_4$	$D(n, 2i) = D(8, 8) = 1$ $G(n) = \left(\frac{1}{J_1}\right)p_5$ $n = n + 1 = 9$

در نتیجه ماتریس $[D]$ و بردار $\vec{G}$ و بردار $\vec{H} = [D^{-1}]\vec{G}$ به صورت نشان داده شده در معادلات (۱) - (۳) به دست خواهند آمد:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{G} = \left[V \ 0 \ 0 \ 0 \ \left(\frac{1}{L_1}\right)p_3 \ 0 \ 0 \ \left(\frac{1}{J_1}\right)p_5 \right]^T \quad (2)$$

$$\vec{H} = \left[V \ \left(\frac{1}{L_1}\right)p_3 \ \left(V - \left(\frac{k}{J_1}\right)p_5\right) \ \left(\frac{1}{L_1}\right)p_3 \ \left(\frac{k}{J_1}\right)p_5 \ \left(\frac{1}{L_1}\right)p_3 \ \left(\frac{k}{L_1}\right)p_3 \ \left(\frac{1}{J_1}\right)p_5 \right]^T \quad (3)$$

بردار حالت المان ها $(\vec{X})$ ، برداری است که به ازای هر المان اینرسی یا ظرفیتی موجود در باند گراف سیستم، یک آرایه دارد، در این صورت برای هر آرایه از این بردار یک معادله دیفرانسیل خطی موجود است که برای تشکیل معادله حالت سیستم از آن ها استفاده می شود. اگر معادله حالت سیستم به صورت $\dot{\vec{X}} = \vec{R}(\vec{X}, \vec{U})$ نشان داده شود، برای یافتن بردار $\vec{R}(\vec{X}, \vec{U})$ می توان از تابع حالت $W(B_j, \vec{H})$ استفاده نمود که در آن از باند متصل به متغیر مورد نظر (B_j) و حل متغیرهای انرژی $(\vec{H})$ استفاده می شود $(\vec{R}(\vec{X}, \vec{U}) = W(B_j, \vec{H}))$ در جدول ۴ استفاده از تابع حالت جهت یافتن بردار $\vec{R}(\vec{X}, \vec{U})$ نشان داده شده است.

جدول ۴: استفاده از تابع حالت جهت تشکیل بردار $\vec{R}$

ورودی تابع حالت	نوع المان حالت	تابع حالت	خروجی تابع حالت
$W(element's type, X_i, B_j, \vec{H})$	$I: L_1$	$W(I, X_1, B_2, \vec{H})$	$\vec{R}(i) = \vec{H}(2j - 1)$ $\vec{R}(1) = \vec{H}(3)$
	$I: J_1$	$W(I, X_2, B_4, \vec{H})$	$\vec{R}(i) = \vec{H}(2j - 1)$ $\vec{R}(2) = \vec{H}(7)$

معادله حالت غیر خطی به دست آمده در رابطه ی (۴) نشان داده شده است. به منظور خطی سازی معادله حالت حول نقطه ی تعادل سیستم می توان با استفاده از مشتقات جزئی و ایجاد ژاکوبین، معادله حالت غیر خطی $\dot{\vec{X}} = \vec{R}(\vec{X}, \vec{U})$ را به معادله خطی $\dot{\vec{X}} = [A]\vec{X} + [B]\vec{U}$ که در آن $[A] = \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{X}_k}$ و $[B] = \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{U}}$ تبدیل کرد. پس از خطی سازی معادله غیر خطی حول نقطه ی تعادل $X_{equilibrium} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\frac{J_1}{k})V \end{bmatrix}$ ، معادله حالت خطی سیستم به دست می آید. معادله خطی سیستم سرو در رابطه ی (۵) نشان داده شده است.

$$\vec{X}_{nL} = \vec{R}(\vec{X}, \vec{U}) = \begin{bmatrix} V - \left(\frac{k}{J_1}\right)p_5 \\ \left(\frac{k}{L_1}\right)p_3 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\vec{X}_L = \begin{bmatrix} 0 & -\left(\frac{k}{J_1}\right)p_5 \\ \left(\frac{k}{L_1}\right)p_3 & 0 \end{bmatrix} \vec{X} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V \quad (۵)$$

۴- نتیجه و جمع بندی

روش ارائه شده، با استفاده از جدول باند-المان، تابع المان ها و تابع حالت، موفق به استخراج معادله حالت از باندگراف سیستم می شود. جدول باند-المان، درگاه ارتباطی میان مدل باندگراف و روش ارائه شده است. این جدول ارتباط میان المان ها و باندها را به خوبی نشان می دهد. همچنین می توان از جدول باند-المان یک سیستم، در راستای معکوس جهت بازآرایی باندگراف آن سیستم استفاده نمود. در این روش، با تغییر ساختار سیستم ها، تنها جدول باند-المان تغییر می کند و تابع المان ها و تابع حالت، توابع ثابتی هستند. برای یافتن حل متغیرهای انرژی، از تابع المان ها و جدول باند-المان به طور همزمان استفاده می شود. در روش آرایه شده هر المان ظرفیتی یا اینرسی عضوی در بردار حالت دارد. با استفاده از بردار حالت و جدول باند-المان در تابع حالت، معادله حالت غیر خطی سیستم مورد نظر به دست می آیند و معادله حالت خطی سیستم پس از خطی سازی حول نقطه ی تعادل به دست خواهد آمد. علاوه بر مزایای سادگی، یافتن سریع معادله حالت، یافتن متغیرهای انرژی در طول زمان شبیه سازی و در نتیجه رسیدن به تقسیم انرژی در طول زمان، از این روش می توان در بهینه سازی سیستم های چندفیزیکی با استفاده از الگوریتم های تکاملی ساده، نظیر ژنتیک الگوریتم، بهره برد.

۵- مراجع

- [1] H. M. Paynter; *Analysis and Design of Engineering Systems*, M.I.T. Press, 1961.
- [2] D. C. Karnopp, D. Margolis, & R. Rosenberg; *Systems dynamics: A unified approach*, (2nd ed.) New York: Wiley, 1990.
- [3] R. C. Rosenberg; *State-Space Formulation for Bond Graph Models of Multiport Systems*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1971.
- [4] K. A. Grabowiecki, A. Rybicki and W. Stephaniewski; *Bond-Graph Based Automatic Generation Technique of Nonlinear Systems State Equation*, Vol. 12, IFAC Proceeding Volumes, pages 273–278, 1979.
- [5] Ashraf A. Zeid; *Mathematical Modeling of Planar Mechanisms with Compliant Joints*, Vol. 11, Mathematical and Computer Modelling, pages 1144–1150, 1988.
- [6] W. Borutzky; *Supporting the generation of state space model by adding tearing information to the bond graph*, Vol. 7, Simulation Practice and Theory, pages 419–438, 1999.
- [7] Javier A. Kypuros; *System Dynamics and Control with Bond Graph Modeling*, Boca Raton, 2013.
- [8] Wolfgang Borutzky; *Bong Graph Modelling of Engineering Systems (Theory, Applications and Software Support)*, New York, Springer, 2011.

