

## تأثیر پیکربندی های مختلف سیکل رانکین آلی بر تولید هیدروژن از سیستم تولید همزمان توان و هیدروژن با استفاده از منبع انرژی خورشیدی

در این پژوهش با بهره گیری از پیکربندی های مختلف سیکل رانکین آلی، چند سیستم تولید همزمان توان و هیدروژن مختلف با استفاده از منبع انرژی خورشیدی در نرم افزار EES تحلیل و بررسی شده و اثر پیکربندی های مختلف در تولید هیدروژن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر پارامترهای دمای کندانسور، نرخ جرمی سیال خورشیدی، فشار ورودی توربین و نیز دمای ورودی سیال خورشیدی بر تولید هیدروژن در هر یک از سیکل ها بررسی شده است. نتایج پژوهش نشان داد که دو فشاره کردن سیکل رانکین در سیکل تولید همزمان، نه تنها افزایش قابل توجهی را در میزان تولید هیدروژن به دنبال ندارد؛ بلکه تا ۸۰ درصد میزان تولید هیدروژن را نسبت به سیکل پایه کاهش می دهد و نسبت به دو چیدمان دیگر در تولید هیدروژن اثر کاهشی بیشتری دارد. افزودن یک گرم کن سیال تغذیه باز نیز میزان تولید هیدروژن را تا ۲۵ درصد نسبت به سیکل پایه کاهش می دهد. کمترین تأثیر کاهشی مربوط به افزودن مبادله کن میانی با کاهش ۲۰ درصدی تولید هیدروژن نسبت به سیکل پایه است.

حمید قاسم خانی<sup>۱</sup>

دانشجوی دکتری

محمد نیکیان<sup>۲</sup>

دانشیار

مهرانگیز قاضی<sup>۳</sup>

استادیار

واژه های راهنما: سیکل رانکین آلی، تولید هیدروژن، منبع انرژی خورشیدی، سیستم الکترولیز غشاء پروتونی

### ۱- مقدمه

امروزه بیش از ۸۵ درصد از انرژی مورد نیاز دنیا از طریق سوخت های فسیلی تأمین می شود. به دلیل تقاضای فزاینده انرژی قیمت ها، به ویژه قیمت نفت، افزایش می یابد [۱]. این سوخت ها به پایان خواهند رسید و محصولات احتراق آن ها عامل اصلی برخی مشکلات جهانی مانند اثر گلخانه ای است [۲]. افزایش کربن دی اکسید و دیگر گازهای گلخانه ای در اتمسفر پیامد مستقیم احتراق سوخت های فسیلی است که باعث گرم شدن جهان

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، hamid\_ghasemkhan@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، mohammad.nikian@iau.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.ghazi@iauctb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

می‌شود [۳]. احتمالاً گاز و نفت جهان در نیمه دوم قرن حاضر تمام می‌شود. از طرفی ذخایر نفتی و گازی به‌طور غیریکنواخت توزیع شده‌اند و این موضوع به ایجاد تنش‌های سیاسی و احتمالاً جنگ بر سر ذخایر باقی‌مانده دامن خواهد زد [۴]. باور بر این است که انرژی‌های تجدیدپذیر قادر به تأمین انرژی مورد نیاز عموم جامعه نیستند [۵]. با این حال پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از حد مورد نیاز برای تأمین انرژی مورد نیاز امروزی جهان است. امکان استفاده از انواع مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر تا جایی که به‌طور کامل جایگزین سوخت‌های فسیلی شود، وجود دارد [۶].

انرژی تجدیدپذیر بسیار گران است. توسعه آینده می‌تواند به کاهش کاستی فناوری برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر کمک کند [۷]. در این سناریو ممکن است هیدروژن نقش مهمی ایفا کند که قادر به تعریف یک سیستم انرژی جدید است که پایدارتر و تمیزتر از سیستم‌های فعلی است [۸]. اگر هیدروژن وارد سیستم انرژی واقعی مبتنی بر بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی شود باعث کاهش موضعی تأثیر زیست‌محیطی شده و تأثیر جهانی آن‌ها را نیز کاهش می‌دهد [۹]. اگر تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر انجام شود معضل کمبود منابع جهان نیز حل خواهد شد [۱۰]. با این حال، هیدروژن مولکولی در طبیعت در دسترس نیست؛ بنابراین باید با استفاده از انرژی آن را تولید کرد. هیدروژن به‌خودی‌خود سمی نیست و احتراق آن هیچ آلودگی یا گازهای گلخانه‌ای ایجاد نمی‌کند [۱۱]. از آنجاکه هیدروژن نباید بسوزد، تبدیل الکتروشیمیایی (سلول‌های سوختی) راه‌حلی بسیار کارآمد برای استفاده از هیدروژن جهت تأمین انرژی مفید است [۱۲]. هیدروژن می‌تواند به‌عنوان سوخت تقریباً در هر موردی که امروزه از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود، استفاده شود [۱۳].

بیشترین مقدار هیدروژن امروزه از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. هیدروژن تولیدشده از سوخت‌های فسیلی مشکلات مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی را حل نمی‌کند [۱۴]. تولید هیدروژن از گازهای طبیعی فقط در دوره انتقال از سوخت‌های فسیلی به هیدروژن به تأمین هیدروژن برای ایجاد زیرساخت و کمک به تجاری‌سازی فناوری‌های بهره‌برداری هیدروژن، مانند سلول‌های سوختی کمک می‌کند [۱۵]. هیدروژن می‌تواند از منابع انرژی تجدیدپذیر از مسیرها و روش‌های مختلف تولید شود، اما امروزه فقط چند مورد آن‌ها تجاری هستند [۱۶]. از جمله این روش‌ها الکترولیز، فتولیز، فوتوشیمیایی، فوتوالکتروشیمیایی یا فرآیندهای فوتوبیولوژی هستند که از بین آن‌ها در حال حاضر تنها الکترولیز قابلیت استفاده تجاری دارد [۱۷].

هیدروژن را می‌توان به‌صورت مایع یا گاز ذخیره و سپس با احتراق به انرژی حرارتی تبدیل کرد به همین دلیل، هیدروژن یک حامل انرژی است. مزایای استفاده از هیدروژن در دستگاه‌های انرژی متعدد است [۱۸].

در ترمودینامیک چرخه کارنو بهترین و پربازده‌ترین چرخه ممکن است که می‌تواند بین دو منبع حرارتی با دماهای مشخص وجود داشته باشد. چرخه کارنو از نظری عملی امکان‌پذیر نیست [۱۹]؛ بنابراین چرخه رانکین به‌عنوان چرخه عملی کارنو با سیال عامل آب مطرح شد. در مورد منابع گرمایی با دمای متوسط و پایین که اکثر منابع حرارتی تجدیدپذیر از این نوع منابع گرمایی هستند، استفاده از چرخه‌های معمول مانند رانکین نمی‌تواند گرما را به‌صورت کارا و مؤثر به توان تبدیل کند [۲۰]؛ بنابراین در سال‌های اخیر چرخه رانکین با سیال عامل آلی برای این هدف پیشنهاد شد که این امکان را فراهم می‌سازد که بیشترین بهره‌برداری را از منابع گرمایی دماپایین و متوسط داشته باشد. از در دسترس‌ترین این منابع نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده هستند [۲۱].

استفاده از سیستم‌های ترکیبی که بتواند هم‌زمان توان و هیدروژن را تولید کند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نامی و اکرمی [۲۲] سیستم تولید هم‌زمان توان و هیدروژن و آب گرم شامل سیستم رانکین آلی و دستگاه الکترولیز پلیمری را بررسی و اثر پارامترهایی همچون نسبت فشار کمپرسور، دمای اواپراتور و درجه مافوق گرم کردن سیال ورودی به توربین بر بازده انرژی و اگزرژی و نرخ تولید هیدروژن را بررسی کردند. نعمتی و همکاران [۲۳] چیدمان‌های مختلف چرخه فلاش ارگانیک (OFC) را از دیدگاه انرژی و اگزرژی اقتصادی تحلیل کردند. پنج سیال به عنوان سیال کاری در نظر گرفته شد. همچنین، یک روش بهینه‌سازی برای یافتن کارآمدترین پیکربندی و دما از دیدگاه انرژی و اگزرژی و اگزژیواکونومیک استفاده شد. اکرمی و همکاران [۲۴] سیستم ترکیبی شامل سیکل آلی رانکین، دستگاه الکترولیز پلیمری همراه با سیستم تبرید جذبی برای تولید هم‌زمان توان، سرمایش و هیدروژن با محرک زمین‌گرمایی را مورد تحلیل قرار دادند. تأثیر تغییرات دمای آب زمین‌گرمایی، دما و فشار ورودی توربین، دمای ژنراتور سیکل تبرید جذبی، دبی جرمی سیال زمین‌گرمایی و چگالی جریانی دستگاه الکترولیز بر روی بازده انرژی و اگزرژی و توان تولیدی سیکل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. کیان‌فرد و همکاران [۲۵] یک سیکل ترکیبی شامل چرخه آلی رانکین، دستگاه الکترولیز پلیمری و سیستم نمک‌زدایی با محرک زمین‌گرمایی را مورد تحلیل قرار دادند. بویاچی و همکاران [۲۶] یک سیکل ترکیبی شامل سیکل رانکین آلی، سیستم تبرید اجکتوری و دستگاه الکترولیز پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. محرک گرمایی سیستم، گازهای خروجی از سوختن یک سوخت زیست‌توده است. غلامیان و همکاران [۲۷] با هدف افزایش عملکرد یک چرخه رانکین آلی زمین‌گرمایی با پیشنهاد دو سیستم جدید که در آن بخشی از گرمای اتلاف با استفاده از ژنراتور ترموالکتریک برای تولید نیرو و/یا هیدروژن (با استفاده از الکترولیز غشای تبادل پروتون) بازیافت می‌شود، مطالعه‌ای انجام دادند. عملکرد سیستم‌ها از دیدگاه انرژی، اگزرژی و اگزژیواکونومیک با چرخه پایه بررسی و مقایسه شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک از طریق یک استراتژی بهینه‌سازی چندهدفه بهینه‌سازی شدند. محمدی و مهرپویا [۲۸] یک تحقیق مروری در مورد ترکیب‌های مختلف سیستم الکترولیز برای تولید هیدروژن با منابع انرژی تجدیدپذیر همانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی گرمایی اقیانوس و ... ارائه دادند. در این پژوهش هزینه تولید هیدروژن در ترکیب‌های مختلف با منابع تجدیدپذیر به دست آمده و با هم مقایسه گردیده است. لین و همکاران [۲۹] سیکل ترکیبی شامل سیکل توربین گازی با سوخت بیوگاز، سیکل رانکین، سیستم الکترولیز و سیکل مایع‌سازی هیدروژن را به عنوان یک سیکل تولید هم‌زمان توان و هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. سلیمانی و همکاران [۳۰] سیکل تولید هم‌زمان توان و هیدروژن بر اساس استفاده از پیل سوختی اکسید جامد از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که بازده انرژی و اگزرژی سیکل پیشنهادی نسبت به سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-توربین گازی افزایش نشان می‌دهد. در حالت بهینه  $0.7453$  کیلوگرم بر ثانیه هیدروژن از این سیکل به دست می‌آید. دونگ [۳۱] مدل دینامیکی و کنترلی سیکل تولید هم‌زمان توان و هیدروژن بر اساس راکتور گاز خنک شونده، سیکل Cu-Cl و الکترولیز دمابالا را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحلیل نشان داد که مقدار توان تولیدی این سیکل تولید هم‌زمان می‌تواند تا  $1523$  کیلووات برسد. اسکوردولپاس و همکاران [۳۲] سیکل ترکیبی تولید توان، گرمایش و تولید هیدروژن را در نرم‌افزار Aspen Plus مورد تحلیل قرار دادند. مقدار الکتریسیته و گرمایش تولیدی، بازده سیکل تولید هم‌زمان و مقدار تولید هیدروژن به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در این تحلیل انتخاب گردید و اثر تغییرات پارامترهای عملکردی سیکل بر متغیرهای تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲-۲- تولید هیدروژن

هیدروژن قابلیت این را دارد که نسبت به سوخت‌های دیگر انرژی بیشتری را به ازای واحد جرمی تولید نماید. هیدروژن چگالی انرژی  $122 \text{ kJg}^{-1}$  را دارد که این مقدار  $2/75$  برابر بیشتر از سوخت هیدروکربنی است. با وجود این مزیت بزرگ به دلیل چگالی کمتر، حجمی ۴ برابر بزرگ‌تر برای ذخیره آن لازم است [۱۰].

هیدروژن را می‌توان هم از منابع تجدیدناپذیر و هم از منابع تجدیدپذیر تولید کرد. تقریباً ۵۰٪ هیدروژن تولیدی ماحصل تغییر شکل بخار متان یا بخار گاز طبیعی است. گرچه استفاده از این روش در حال حاضر به لحاظ اقتصادی بیشتر مورد پسند است، اما با توجه به محدودیت منابع گازی از دید اقتصاد پایدار و بلوغ‌یافته هیدروژن به هیچ وجه روش تولید جذابی نیست [۱۱]. یکی دیگر از مسائلی که در این روش وجود دارد این است که  $\text{CO}_2$  تولیدشده در تغییر شکل بخار گاز طبیعی به‌اندازه سوزاندن آن است. با توجه به این مسائل هدف نهایی در تولید هیدروژن، استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی است و الکترولیز آب اصلی‌ترین روشی است که از این منابع برای تولید هیدروژن استفاده می‌کند. سلول‌های الکترولیز آلکالاین<sup>۱</sup> یا سلول‌های الکترولیز غشای الکترولیت پلیمری<sup>۲</sup> دو نوع اصلی سلول‌های الکترولیز کننده هستند [۱۲].

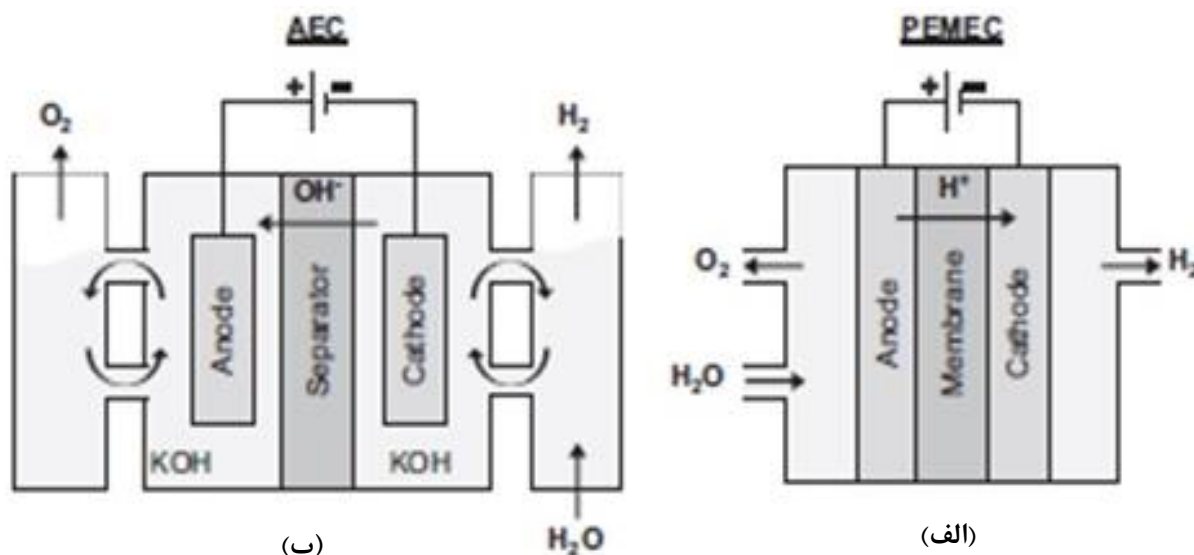
دستگاه‌های PEMEC که مبتنی بر طرح الکترولیت‌های جامد پلیمری هستند، برای اولین بار در دهه ۷۰ میلادی توسط جنرال الکتریک و به دلیل مشکلاتی که دستگاه‌های AEC داشتند، معرفی شدند. راندمان بالای سلول‌ها، تولید هیدروژن خالص و با تراکم بالا و کاربری انعطاف‌پذیر از جمله مزایای این روش هستند. همچنین چگالی جریان در ولتاژ پائین سلول این الکترولیز بالاست، لذا شدت توان آن نیز بالاست. از طرفی به این علت که این سیستم فشار کاری بالایی دارد به کمپرسور خارجی برای تراکم هیدروژن احتیاجی نیست. در مقابل گران‌قیمت بودن برخی اجزا مانند کاتالیست‌های پلاتینیومی، پیچیدگی سیستم به دلیل فشارهای کاری بالاتر، ملاحظات خالص بودن آب و طول عمر پایین‌تر در مقایسه با AEC از جمله معایب PEMEC هستند. شکل ۱ دو مجموعه AEC و PEMEC را در کنار هم نشان می‌دهد. [۱۳].

بخش (ب) شکل (۱) نشان‌دهنده یک سلول الکترولیز غشای الکترولیت پلیمری و واکنش‌های زیر فرایندی است که در آن انجام می‌شود. در این نوع الکترولیز کننده‌ها به‌جای مایع الکترولیتی که در الکترولیز کننده‌های آلکالاین مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک غشای باریک ( $50-250 \mu\text{m}$ ) هدایت پروتون به‌عنوان الکترولیت پلیمری جامد به‌کاربرده می‌شود. مطابق شکل فوق، از سمت آندیک آب خالص به دستگاه تزریق شده و بر اثر جریان برق اعمالی، طبق نیمه واکنش (۲)، یون‌های هیدروژن تولیدشده و از طریق غشای تبادل پروتون به سمت کاتد انتقال یافته و در آن سمت، طبق نیمه واکنش (۱)، هیدروژن تولید می‌گردد [۱۳].



<sup>1</sup> Alkaline Electrolyzer Cell (AEC)

<sup>2</sup> Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell (PEMEC)



شکل ۱- تغییرات دو نوع اصلی سلول‌های الکترولیز کننده [۱۳]

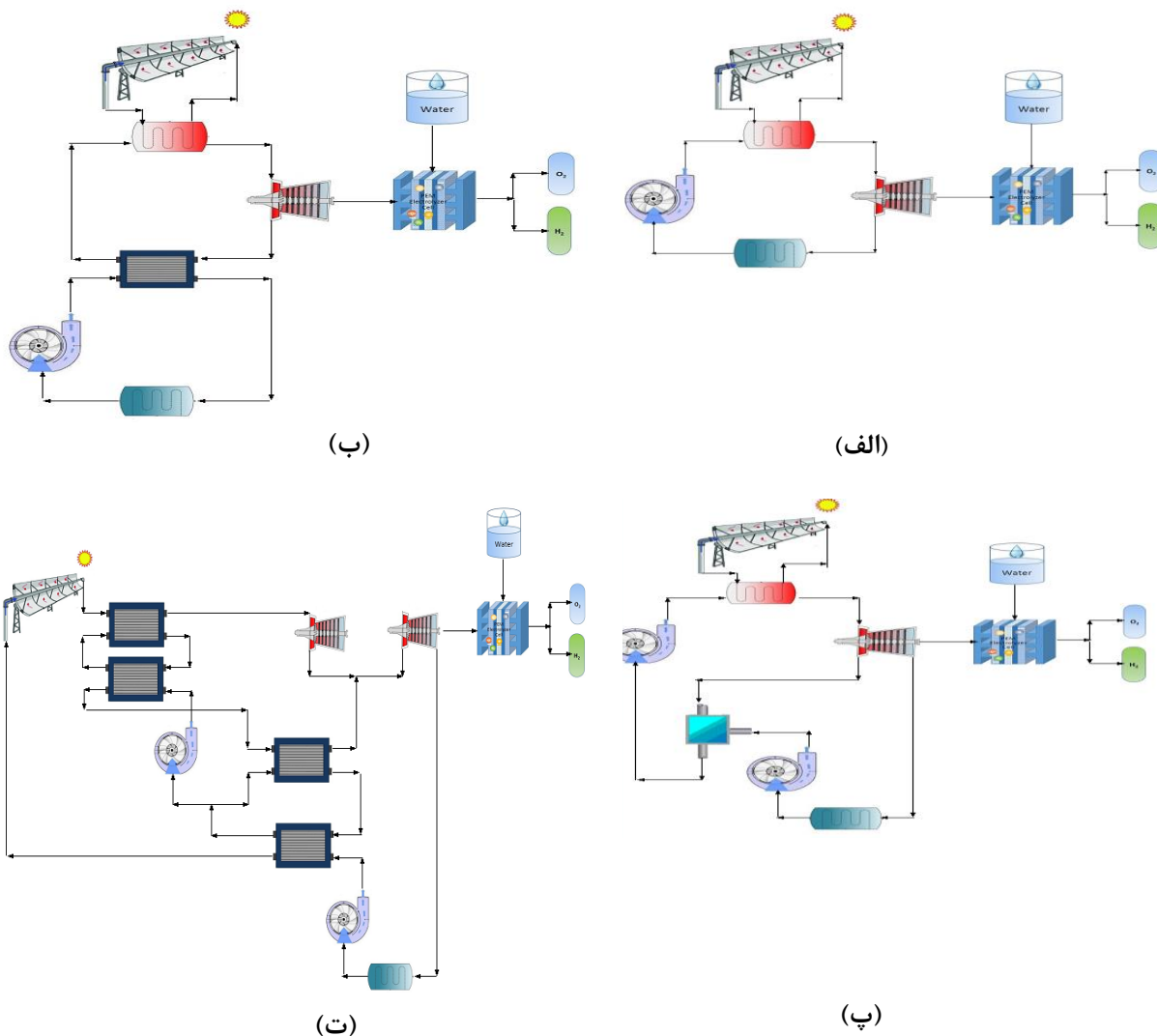
### ۳- شبیه‌سازی ریاضی و ترمودینامیکی سیستم

#### ۳-۱- معرفی

سیکل ارگانیک رانکین ساده شامل سیال عامل آلی ایزوبوتان (Isobutane)، شامل اواپراتور، کندانسور، توربین و پمپ است. با افزودن یک مبادله‌کن گرمایی داخلی یا گرم‌کن سیال تغذیه (باز یا بسته یا هر دو) چیدمان‌های دیگر از سیکل ارگانیک رانکین ایجاد می‌گردد. شکل (۲) چیدمان‌های سیکل ارگانیک رانکین ساده (الف)، ارگانیک رانکین با مبادله‌کن گرمایی داخلی (ب)، ارگانیک رانکین با گرم‌کن سیال تغذیه باز (پ) و ارگانیک رانکین دوفشاره با محرک خورشیدی و سیستم الکترولیز غشای پروتونی را نشان می‌دهد. در این پژوهش تولید هیدروژن و تأثیر عوامل مختلف بر آن در چیدمان‌های یاد شده مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل (۲) در این بخش به‌طور جداگانه به معرفی و بررسی کلکتور خورشیدی، سیکل رانکین آلی و همچنین سیستم الکترولیز غشاء پروتونی خواهیم پرداخت. اساس این بررسی قانون اول ترمودینامیک خواهد بود. لازم به ذکر است با توجه به تفاوت در پیکربندی سیکل‌های آلی رانکین در تحلیل این سیکل معادلات کلیه المان‌های درگیر به‌طور جداگانه ذکر شده که برای معرفی کلی این پیکربندی‌ها یادآوری می‌شود که در سیکل ترمودینامیکی با سیال آلی، افزایش فشار دیگ باعث افزایش راندمان حرارتی چرخه رانکین می‌شود، اما محتوای رطوبت را نیز به سطوح غیر قابل قبولی افزایش می‌دهد. افزایش راندمان در فشارهای بالاتر دیگ بخار بدون مواجهه با مشکل رطوبت بیش از حد مراحل نهایی توربین ممکن است. دو احتمال به ذهن می‌رسد: اول اینکه بخار قبل از ورود به توربین تا دمای بسیار بالا گرم شود. این راه حل مطلوب است چون دمای متوسطی که در آن گرما اضافه می‌شود نیز افزایش می‌یابد، بنابراین راندمان چرخه افزایش می‌یابد. با این حال، این یک راه حل قابل اجرا نیست؛ زیرا نیاز به افزایش دمای بخار تا سطوح نامن از نظر متالورژی وجود دارد.

دوم اینکه بخار در توربین در دو مرحله منبسط شده و بین آن‌ها دوباره گرم شود. به عبارت دیگر، چرخه رانکین ایده آل ساده با باز گرمایش بهبود می‌یابد. باز گرمایش یک راه حل عملی برای مشکل رطوبت بیش از حد در توربین‌ها است و معمولاً در نیروگاه‌های بخار مدرن استفاده می‌شود. بررسی دقیق نمودار T-S چرخه

رانکین نشان می‌دهد که گرما در دمای نسبتاً پایین به سیال کاری منتقل می‌شود. این امر باعث کاهش دمای میانگین گرمادهی و در نتیجه راندمان چرخه می‌شود. راه رفع این نقص، افزایش دمای مایع خروجی از پمپ (به نام آب تغذیه) قبل از ورود به دیگ بخار است، یک فرآیند عملی بازیابی در نیروگاه‌های بخار استخراج بخار از توربین در نقاط مختلف است. این بخار، که می‌توانست با انبساط بیشتر در توربین کار بیشتری تولید کند، برای گرم کردن آب تغذیه استفاده می‌شود. دستگاهی که در آن آب تغذیه با بازیابی، گرم می‌شود بازیاب یا گرم کن آب تغذیه نامیده می‌شود. (شکل ۲-ب) گرم کن آب تغذیه باز (یا تماس مستقیم) اساساً یک محفظه اختلاط است که در آن بخار استخراج شده از توربین با آب تغذیه خروجی از پمپ مخلوط می‌شود. در حالت ایده آل، این مخلوط گرمکن را به صورت مایع اشباع در فشار گرمکن ترک می‌کند. بازده حرارتی چرخه رانکین در نتیجه بازیابی افزایش می‌یابد. دلیل این است که بازیابی، دمای متوسطی که گرما به بخار موجود در دیگ بخار منتقل می‌شود را قبل از ورود به دیگ بخار افزایش می‌دهد. راندمان چرخه با افزایش تعداد گرمکن‌های آب تغذیه بیشتر افزایش می‌یابد.



**شکل ۲-** پیکربندی‌های مختلف چرخه ارگانیک رانکین همراه با محرک خورشیدی و سیستم کنترل‌غشاء پروتونی؛ (الف) سیکل ارگانیک رانکین ساده، (ب) سیکل ارگانیک رانکین با مبادله‌کن داخلی، (پ) سیکل ارگانیک رانکین با گرم‌کن سیال تغذیه باز، (ت) سیکل ارگانیک رانکین دوفشاره

(شکل ۲-پ) نوع دیگری از گرمکن آب تغذیه که اغلب در نیروگاه‌های بخار استفاده می‌شود گرمکن آب تغذیه بسته که در آن گرما از بخار آب استخراج شده بدون هیچ گونه اختلاطی به آب تغذیه منتقل می‌شود. دو جریان اکنون می‌تواند در فشارهای مختلف باشد؛ چرا که مخلوط نمی‌شوند، در یک گرمکن آب تغذیه بسته ایده آل، آب تغذیه تا دمای خروجی بخار استخراج شده گرم می‌شود که به‌طور ایده آل گرمکن را به صورت یک مایع اشباع در فشار استخراج ترک می‌کند. در نیروگاه‌های واقعی، آب تغذیه گرمکن را زیر دمای خروجی بخار استخراج شده ترک می‌کند؛ زیرا اختلاف دما حداقل چند درجه برای انجام هر گونه انتقال حرارت مؤثر مورد نیاز است (شکل ۲-ت).

### ۳-۲- متمرکز کننده سهموی خطی

کلکتورهای انرژی خورشیدی انواع خاصی از مبدل‌های حرارتی هستند که انرژی تابش خورشید را به انرژی داخلی محیط واسط تبدیل می‌کنند و مهم‌ترین المان هر سیستم خورشیدی هستند. با فرض عدم وجود گرادیان دما در طول گیرنده، ضریب اتلاف با در نظر گرفتن جابجایی و تابش از سطح و هدایت گرمایی از رابطه (۱) به دست می‌آید [۳۳]:

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (1)$$

برای ضریب تابش خطی شده می‌توان نوشت [۳۳]:

$$h_r = 4\sigma\epsilon T_r^3 \quad (2)$$

برای ضریب اتلاف باد برای عدد ناسلت رابطه (۳) نوشته می‌شود [۳۳]:

$$0/1 < Re < 1000;$$

$$Nu = 0/4 + 0/54(Re)^{0/52} \quad (3)$$

$$1000 < Re < 50000;$$

$$Nu = 0/3(Re)^{0/6}$$

تخمین تلفات هدایتی مستلزم دانش ساخت کلکتور؛ یعنی روش پوشش گیرنده است. معمولاً برای کاهش تلفات حرارتی، از یک لوله شیشه‌ای هم‌مرکز در اطراف گیرنده استفاده می‌شود. فضای بین گیرنده و شیشه معمولاً تخلیه می‌شود که در این صورت تلفات جابجایی قابل اغماض هستند. در این مورد،  $U_L$  بر اساس سطح گیرنده  $A_r$ ، با رابطه (۴) بیان می‌شود [۳۳]:

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_g} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right] \quad (4)$$

که ضریب تابش خطی شده از کاور به محیط،  $A_g$  مساحت خارجی کاور شیشه‌ای و  $h_{r,r-c}$  ضریب تابش خطی شده از گیرنده به کاور است که از رابطه (۵) به دست می‌آید [۳۳]:

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{A_r}{A_g}\left(\frac{1}{\epsilon_g} - 1\right)} \quad (5)$$

در معادلات قبل، برای تخمین خواص کاور شیشه‌ای، دمای کاور شیشه‌ای،  $T_g$ ، مورد نیاز است. این دما نسبت به دمای گیرنده به دمای محیط نزدیک‌تر است؛ بنابراین، با نادیده گرفتن تابش جذب‌شده توسط کاور،  $T_g$  را می‌توان از تعادل انرژی به دست آورد [۳۳]:

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_g (h_w + h_{r,c-a}) T_a}{A_r h_{r,r-c} + (h_w + h_{r,c-a}) A_g} \quad (6)$$

مقدار  $T_g$  از حدس و خطا و با فرض یک مقدار برای  $T_g$  و مقایسه آن با حاصل معادله (۶) به دست می‌آید. اگر لازم باشد که تشعشع جذب‌شده توسط کاور در نظر گرفته شود، عبارت مناسب باید در سمت راست معادله (۴) اضافه شود. در مرحله بعد باید ضریب انتقال حرارت کلی،  $U_0$  تخمین زده شود. این ضریب باید شامل دیواره لوله باشد چون شار حرارتی در یک کلکتور متمرکز کننده زیاد است. بر اساس قطر بیرونی لوله، این ضریب از رابطه (۷) به دست می‌آید [۳۳]:

$$U_0 = \left[ \frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right]^{-1} \quad (7)$$

که  $D_o$  قطر خارجی گیرنده،  $D_i$  قطر داخلی گیرنده و  $h_{fi}$  ضریب انتقال حرارت در داخل لوله گیرنده است. برای ضریب انتقال حرارت جابجایی ابتدا از روابط کلی زیر استفاده خواهد شد [۳۳].

$$\begin{aligned} Nu &= 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \\ Re &= \rho V D_i / \mu \\ Pr &= c_p \mu / k_f \end{aligned} \quad (8)$$

که  $Re$  عدد رینولدز،  $Pr$  عدد پرانتل،  $\mu$  ویسکوزیته و  $k_f$  ضریب رسانش سیال است. در جریان آرام مقدار  $Nu$  برابر با ۴/۳۶۴ خواهد بود. انرژی مفید دریافتی از یک متمرکز کننده برابر است با [۳۳]:

$$Q_u = G_B \eta_o A_a - A_r U_L (T_r - T_a) \quad (9)$$

انرژی مفید دریافتی در واحد طول کلکتور برحسب دمای موضعی گیرنده،  $T_r$  برابر است با [۳۳]:

$$q'_{u'} = \frac{Q_u}{L} = \frac{G_B \eta_o A_a}{L} - \frac{A_r U_L (T_r - T_a)}{L} \quad (10)$$

با استفاده از دمای موضعی سیال،  $T_f$  می‌توان نوشت [۳۳]:

$$q'_{u'} = \frac{\left(\frac{A_r}{L}\right) (T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}} \quad (11)$$

با حذف  $T_r$  و استفاده از رابطه (۱۳)، رابطه (۱۴) برای گرمای مبادله شده متمرکز کننده به دست می‌آید [۳۳]:

$$q'_{u'} = F' \frac{A_a}{L} \left[ G_B \eta_o - \frac{U_L}{C} (T_f - T_a) \right] \quad (12)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}} = \frac{U_o}{U_L} \quad (13)$$

$$Q_u = F_R [G_B \eta_o A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (14)$$

در نهایت بازده متمرکز کننده از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۳]:

$$\eta = F_R \left[ \eta_o - U_L \left( \frac{T_i - T_a}{G_B C} \right) \right] \quad (15)$$

$$C = A_a / A_r$$

جدول ۱- مقادیر ورودی و فرضیات مدل‌سازی کلکتور [۳۴]

پارامتر	مقدار	واحد اندازه‌گیری
طول کلکتور	۲۰	متر
عرض دهانه کلکتور	۳/۵	متر
قطر خارجی لوله گیرنده	۵۰	میلی‌متر
قطر داخلی لوله گیرنده	۴۰	میلی‌متر
قطر کاور شیشه‌ای	۹۰	میلی‌متر
دمای محیط	۲۵	سانتی‌گراد
سرعت باد	۵	متر بر ثانیه

فرضیات و مقادیر ورودی برای متمرکز کننده مطابق جدول (۱) است.

### ۳-۳- سیکل آلی رانکین

سیال عامل بکاررفته در چرخه رانکین آلی ایزوبوتان (Isobutane) می‌باشد که در مدل‌سازی این سیکل برای ساده‌سازی فرض می‌شود سیکل در حالت پایا کار می‌کند، افت فشار در بویلر، مبدل بازیاب، کندانسور و لوله‌های متصل‌کننده اجزاء ناچیز است. سیال عامل خروجی کندانسور مایع اشباع است، پمپ و توربین ادیاباتیک هستند و بازده ایزونتروپیک مشخص دارند. دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال در نظر گرفته می‌شود.

برای تعادل انرژی در هر یک از اجزاء از قانون اول ترمودینامیک می‌توان نوشت [۲۰]:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} = 0 \quad (16)$$

$\dot{Q}$  و  $\dot{W}$  به ترتیب نرخ حرارت و کار مبادله شده،  $\dot{m}$  دبی جرمی و  $h$  آنتالپی هستند. با توجه به بقای جرم برای هر المان می‌توان نوشت [۲۰]:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (17)$$

فرضیات سیکل آلی رانکین مطابق جدول (۲) است.

### ۳-۴- سیستم الکترولیز غشاء پروتونی

در این بخش، کل انرژی مورد نیاز را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۴].

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (18)$$

جدول ۲- مقادیر ورودی و فرضیات مدل‌سازی سیکل آلی رانکین [۲۶]

پارامتر	مقدار	واحد اندازه‌گیری
فشار اواپراتور	۱۳۰۰	کیلو پاسکال
فشار ورودی توربین	۱۵۰۰	کیلو پاسکال
بازده ایزونتروپیک توربین	۰/۸	%
بازده ایزونتروپیک پمپ	۰/۹	%
دمای ورودی پمپ	۳۰	سانتی‌گراد

نرخ هیدروژن تولیدی را می‌توان از رابطه (۲۷) محاسبه کرد و نرخ جریان اکسیژن تولیدی و آب واکنش نداده را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد که  $J$  چگالی جریان و  $F$  ثابت فارادی است. [۲۴]:

$$\dot{N}_{H_2,out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O,reacted} \quad (19)$$

$$\dot{N}_{O_2,out} = \frac{J}{4F} \quad (20)$$

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F} \quad (21)$$

انرژی الکتریکی مورد نیاز از روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\dot{W}_{TEG} = E_{electric} = JV \quad (22)$$

$$V = V_0 + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohm} \quad (23)$$

که  $V_0$ ،  $V_{act,a}$ ،  $V_{act,c}$  و  $V_{ohm}$  به ترتیب پتانسیل معکوس، پتانسیل فعال‌سازی آند، پتانسیل فعال‌سازی کاتد و پتانسیل اهمی الکترودها هستند. پتانسیل معکوس با رابطه (۳۲) تعریف می‌شود [۲۴]:

$$V_0 = 1/229 - 8/5 \times 10^{-4}(T_{PEM} - T_a) \quad (24)$$

با استفاده از رابطه (۳۳) و فرض  $x$  به‌عنوان عمق غشاء از سطح کاتد و  $\lambda(x)$  به‌عنوان درصد آب در  $x$  (رابطه (۳۴)) می‌توان مقاومت اهمی الکترولیز کننده را طبق رابطه (۳۵) محاسبه کرد [۲۴].

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0/514\lambda(x) - 0/33]e^{\left[127\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (25)$$

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D}x + \lambda_c \quad (26)$$

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda_c]} \quad (27)$$

جدول ۳- مقادیر ورودی و فرضیات مدل‌سازی الکترولیز غشاء پروتونی [۲۴]

پارامتر	مقدار	واحد اندازه‌گیری
فشار سیستم	۱۰۰	کیلو پاسکال
دمای سیستم	۸۰	سانتی‌گراد
انرژی فعال‌سازی کاتد	۱۸	کیلوژول بر مول
انرژی فعال‌سازی آند	۷۶	کیلوژول بر مول
درصد آب در سطح غشای کاتد	۱۰	%
درصد آب در سطح غشای آند	۱۴	%

در رابطه (۳۴)،  $L$  ضخامت غشاء و  $\lambda_a$  و  $\lambda_c$  درصد آب در سطح غشای کاتد و آند هستند. با استفاده از رابطه (۳۵) برای پتانسیل اهمی می‌توان نوشت [۲۴]:

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (28)$$

پتانسیل فعال‌سازی کاتد و آند نیز از رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$V_{act} = \frac{\bar{R}T_{PEM}}{F} \ln \left[ \frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{1 + \left( \frac{J}{2J_{0,i}} \right)^2} \right] \quad (29)$$

که ثابت گازها برابر  $8.314 \text{ J/K.mol}$  و  $J_{0,i}$  چگالی جریان تبادل است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} e^{\left( -\frac{E_{act,i}}{RT_{PEM}} \right)} \quad (30)$$

$E_{act,i}$  در رابطه (۳۸) انرژی فعال‌سازی کاتد یا آند است.

فرضیات و مقادیر ورودی برای سیستم الکترولیز غشاء پروتونی مطابق جدول (۳) است:

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- کلیات

در پژوهش حاضر از ۴ چرخه ارگانیک رانکین مشخص با شرایط کاملاً یکسان با سال آلی ایزوبوتان با یک منبع گرمایی انرژی خورشیدی به همراه تجهیزات تولید هیدروژن یکسان استفاده شده است. هدف پژوهش شناسایی بهترین چرخه کاری برای یک منبع حرارتی و سیال کاری مشترک است. کلیه معادلات اعم از پایستگی جرم و انرژی در اجزای مختلف سیکل ترکیبی به‌وسیله نرم‌افزار EES شبیه‌سازی شده است. در ابتدا مقادیر

متغیرهای نقاط مختلف سیکل رانکین آلی شبیه‌سازی شده در این تحقیق با سیکل رانکین آلی مرجع [۲۴] (مطابق جدول (۴) از مرجع ذکر شده)، به منظور صحت‌سنجی کد در جدول (۴) مقایسه شده است. در ادامه، اثر چند پارامتر تأثیرگذار بر تولید هیدروژن بررسی شده و بین مقادیر هیدروژن تولید شده در سیکل‌ها مقایسه صورت می‌گیرد.

#### ۴-۲- اثر تغییر دمای کندانسور

تغییرات نرخ تولید هیدروژن بر حسب دمای کندانسور در جدول (۵) و شکل (۳) آمده است. مشاهده می‌شود نرخ تولید هیدروژن به ترتیب بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۳) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است. در ضمن تولید هیدروژن در تمام سیکل‌ها با افزایش دمای کندانسور کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات بازده انرژی در شکل (۴) آمده است مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار برای سیکل (۲) و پس از آن برای سیکل‌های (۳) و (۱) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است.

جدول ۴- مقایسه نتایج کد با مرجع [۲۴] جهت صحت‌سنجی نتایج

حالت	فشار (kPa)			دما (°C)			آنتالپی (kJ/kg)		
	حاضر	مرجع ۲۴	خطا (%)	حاضر	مرجع (۲۴)	خطا (%)	حاضر	مرجع (۲۴)	خطا (%)
	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰	۸۵	۸۵/۷۷	۰/۹	۳۵۷/۸	۳۶۰/۷۶	۰/۸
۱	۴۱۰	۴۱۰	۰	۳۰/۴۸	۳۰/۴۸	۰	۲۷۳	۲۷۳/۰۰۸	۰/۰۲
۲	۳۲۸۰	۳۲۸۰	۰	۳۲	۳۲/۷۲	۰/۸۳	۲۷۸/۹	۲۷۸/۹۵	۰/۰۱
۳	۳۲۸۰	۳۲۸۰	۰	۱۸۵	۱۸۵	۰	۸۷۱/۹	۸۷۱/۹۵	۰/۰۵
۴	۴۱۰	۴۱۰	۰	۱۱۹/۶	۱۲۴/۷	۴/۲	۷۸۳	۷۸۳/۹۹	۰/۱۲
۵	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰	۲۰۰	۲۰۰	۰	۸۵۲/۸	۸۵۲/۸۳	۰/۰۵
۶	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰	۸۵	۸۵/۷۷	۰/۹	۳۵۷/۸	۳۶۰/۷۶	۰/۸

جدول ۵- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دمای کندانسور

دمای کندانسور (°C)	سیکل ۱ (kg/s)	سیکل ۲ (kg/s)		سیکل ۳ (kg/s)		سیکل ۴ (kg/s)	
		مقادیر	نسبت به سیکل ۱ درصد تغییر	مقادیر	نسبت به سیکل ۱ درصد تغییر	مقادیر	نسبت به سیکل ۱ درصد تغییر
۳۰	۰/۰۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۱۶۸	-۲۰/۲۸۴۳	۰/۰۰۰۰۱۵۶	-۲۵/۹۲۴	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۲۱۳۲
۳۱	۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۱۶۳	-۲۱/۳۰۸۳	۰/۰۰۰۰۱۵۲۸	-۲۶/۵۰۳	۰/۰۰۰۰۳۴	-۸۲/۱۸۹۰
۳۲	۰/۰۰۰۰۲۰۴	۰/۰۰۰۰۱۵۹	-۲۲/۳۲۵۲	۰/۰۰۰۰۱۴۳	-۲۷/۶۴	۰/۰۰۰۰۳۲	-۸۴/۱۷۶۸
۳۳	۰/۰۰۰۰۲۰۱	۰/۰۰۰۰۱۵۴	-۲۳/۳۷۴۶	۰/۰۰۰۰۱۴۵	-۲۷/۶۴۳	۰/۰۰۰۰۲۹	-۸۵/۱۹۶۰
۳۴	۰/۰۰۰۰۱۹۸	۰/۰۰۰۰۱۴۹	-۲۴/۴۰۷۴	۰/۰۰۰۰۱۴۲	-۲۸/۲۹	۰/۰۰۰۰۲۷	-۸۶/۲۳۸۰
۳۵	۰/۰۰۰۰۱۹۵	۰/۰۰۰۰۱۴۵	-۲۵/۴۳۵۹	۰/۰۰۰۰۱۳۸	-۲۸/۹۲۳	۰/۰۰۰۰۲۴۷	-۸۷/۳۰۷۶
۳۶	۰/۰۰۰۰۱۹۱	۰/۰۰۰۰۱۴۱	-۲۶/۴۸۵۹	۰/۰۰۰۰۱۳۵	-۲۹/۶۱۴	۰/۰۰۰۰۲۲	-۸۸/۴۱۵۰
۳۷	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۰۰۰۱۳۶	-۲۷/۶۲۴۶	۰/۰۰۰۰۱۳۱	-۳۰/۳۲۹	۰/۰۰۰۰۱۹	-۸۹/۵۵۴۶
۳۸	۰/۰۰۰۰۱۸۵	۰/۰۰۰۰۱۳۲	-۲۸/۷۱۰۲	۰/۰۰۰۰۱۲۷	-۳۱/۰۸۵	۰/۰۰۰۰۱۷	-۹۰/۳۸۸۵
۳۹	۰/۰۰۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۰۱۲۷	-۲۹/۸۷۳۷	۰/۰۰۰۰۱۲۴	-۳۱/۹۰۶	۰/۰۰۰۰۰۱	-۹۱/۹۴۳۹

جدول ۶- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دبی جرمی سیال خورشیدی

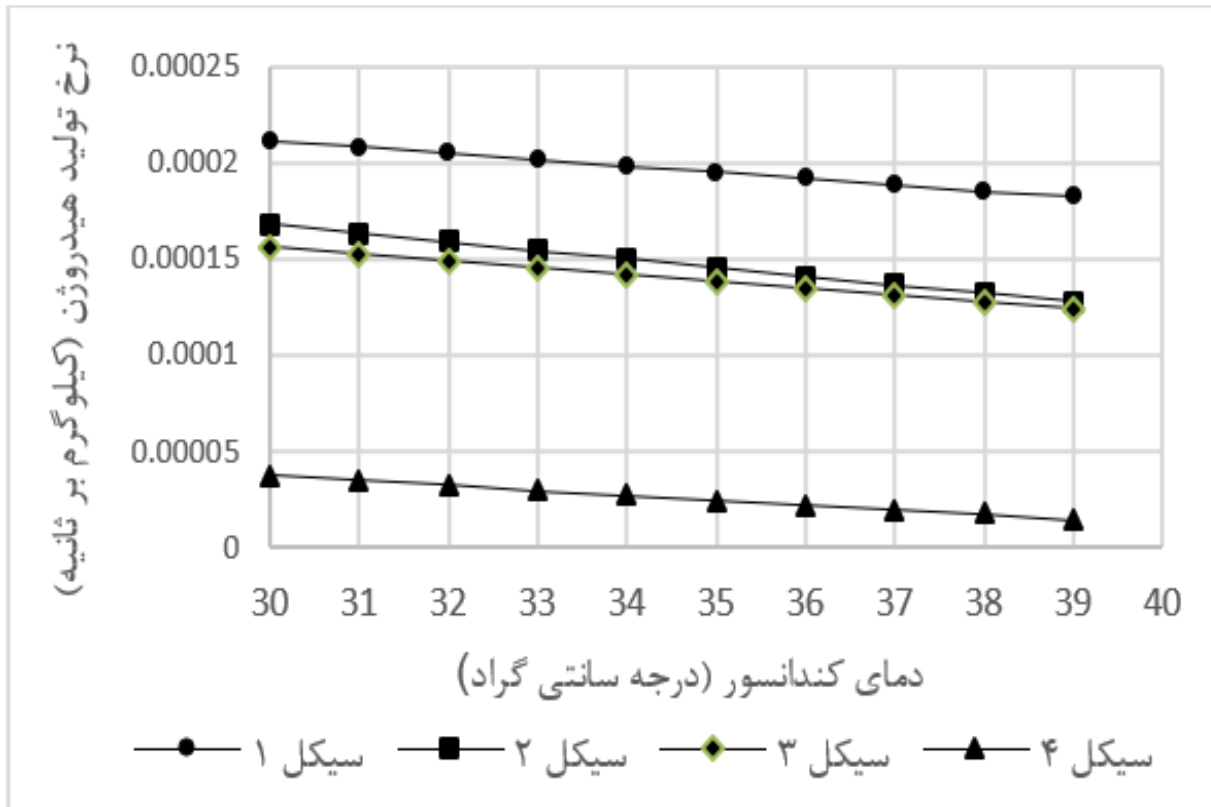
دبی جرمی سیال خورشیدی (°C)	سیکل ۱ (kg/s)	سیکل ۲ (kg/s)		سیکل ۳ (kg/s)		سیکل ۴ (kg/s)	
		مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱
۱	۰/۰۰۰۰۲۰۳	۰/۰۰۰۰۱۶۲	-۲۰/۳۰۴۸	۰/۰۰۰۰۱۵۰	-۲۵/۹۰۹۵	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۵۴۸۶
۱/۱۱۱	۰/۰۰۰۰۲۰۴	۰/۰۰۰۰۱۶۳	-۲۰/۳۰۲۵	۰/۰۰۰۰۱۵۱	-۲۵/۹۱۵	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۶۸۳۷
۱/۲۲۲	۰/۰۰۰۰۲۰۶	۰/۰۰۰۰۱۶۴	-۲۰/۲۸۱۴	۰/۰۰۰۰۱۴۹	-۲۵/۹۰۹۷	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۷۹۰۳
۱/۳۳۳	۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۱۶۵	-۲۰/۳۱۸۵	۰/۰۰۰۰۱۴۵	-۲۵/۹۱۶۹	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۸۸۷
۱/۴۴۴	۰/۰۰۰۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۱۶۵	-۲۰/۳۲۶۷	۰/۰۰۰۰۱۴۲	-۲۵/۹۴۹۰	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۹۶۵۴
۱/۵۵۶	۰/۰۰۰۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۱۶۶	-۲۰/۳۰۶۵	۰/۰۰۰۰۱۳۸	-۲۵/۹۰۹۹	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۰۲۵۸
۱/۶۶۷	۰/۰۰۰۰۲۰۹	۰/۰۰۰۰۱۶۶	-۲۰/۳۳۴۱	۰/۰۰۰۰۱۳۵	-۲۵/۹۱۸۸	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۰۸۵۹
۱/۷۷۸	۰/۰۰۰۰۲۱۰	۰/۰۰۰۰۱۶۷	-۲۰/۳۳۳۶	۰/۰۰۰۰۱۳۱	-۲۵/۹۴	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۱۳۷
۱/۸۸۹	۰/۰۰۰۰۲۱۰	۰/۰۰۰۰۱۶۷	-۲۰/۳۲۲۸	۰/۰۰۰۰۱۲۷	-۲۵/۹۲۵۹	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۱۷۹۴
۲	۰/۰۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۱۶۸	-۲۰/۲۸۴۳	۰/۰۰۰۰۱۲۴	-۲۵/۹۲۴۱	۰/۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۲۱۳۲

جدول ۷- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دمای ورودی سیال خورشیدی

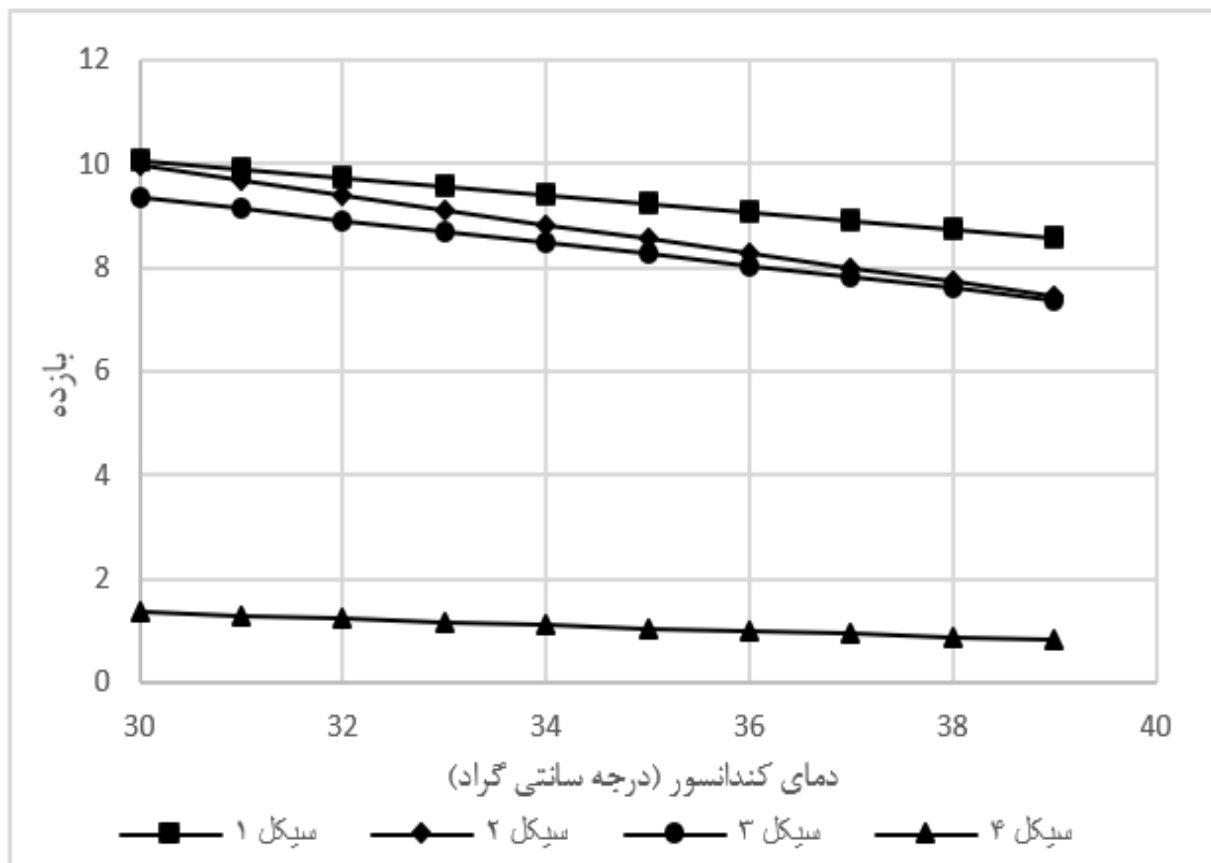
دمای ورودی سیال خورشیدی (°C)	سیکل ۱ (kg/s)	سیکل ۲ (kg/s)		سیکل ۳ (kg/s)		سیکل ۴ (kg/s)	
		مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱
۳۵	۰/۰۰۰۰۲۱۲	۰/۰۰۰۰۱۶۲	-۲۳/۳۰۵	۰/۰۰۰۰۱۵۶	-۲۶/۳۶۵۳	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۳۳۰۵
۳۷/۷۸	۰/۰۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۱۶۵	-۲۱/۶۴۴۶	۰/۰۰۰۰۱۵۶	-۲۶/۰۳۹۶	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۲۶۳۷
۴۰/۵۶	۰/۰۰۰۰۲۱۰	۰/۰۰۰۰۱۶۸	-۱۹/۹۶۲	۰/۰۰۰۰۱۵۶	-۲۵/۹۳۶۴	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۲۰۴۸
۴۳/۳۳	۰/۰۰۰۰۲۱۰	۰/۰۰۰۰۱۷۱	-۱۸/۱۸۸	۰/۰۰۰۰۱۵۵	-۲۵/۹۴	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۱۳۷
۴۶/۱۱	۰/۰۰۰۰۲۰۹	۰/۰۰۰۰۱۷۵	-۱۶/۲۸۴۶	۰/۰۰۰۰۱۵۴	-۲۶/۱۵۰۹	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۰۷۷۳
۴۸/۸۹	۰/۰۰۰۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۱۷۸	-۱۴/۲۸۵۷	۰/۰۰۰۰۱۵۳	-۲۶/۶۰۵۹	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۲/۰۰۰۰۸
۵۱/۶۷	۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۱۸۲	-۱۲/۱۳۷	۰/۰۰۰۰۱۵۱	-۲۷/۱۸۹۶	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۹۳۹۳
۵۴/۴۴	۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۱۸۶	-۹/۸۹۸۵	۰/۰۰۰۰۱۴۹	-۲۸/۰۰۵۷	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۸۷۸۳
۵۷۲/۲۲	۰/۰۰۰۰۲۰۶	۰/۰۰۰۰۱۹۰	-۷/۴۶۴۸	۰/۰۰۰۰۱۴۶	-۲۹/۰۳۵۳	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۸۰۸
۶۰	۰/۰۰۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۰۱۹۵	-۴/۹۱۲۴	۰/۰۰۰۰۱۴۳	-۳۰/۳۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۳۷	-۸۱/۷۴۶۱

جدول ۸- تغییر نرخ تولید هیدروژن با فشار ورودی توربین

فشار ورودی توربین (kPa)	سیکل ۱ (kg/s)	سیکل ۲ (kg/s)		سیکل ۳ (kg/s)		سیکل ۴ (kg/s)	
		مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱	مقادیر	درصد تغییر نسبت به سیکل ۱
۹۰۰	۰/۰۰۰۱۳۹	۰/۰۰۰۱۴	-۰/۰۷۱۵	۰/۰۰۰۱۲۷	-۹/۰۱۹۳	۰/۰۰۰۳۷	-۷۳/۳۲۸۵
۱۰۰۰	۰/۰۰۰۱۵۵	۰/۰۰۰۱۵	-۳/۴۷۴۹	۰/۰۰۰۱۴۲	-۸/۱۷۲۴	۰/۰۰۰۳۷	-۷۵/۹۳۳
۱۱۰۰	۰/۰۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰۱۶	-۵/۷۳۲۸	۰/۰۰۰۱۵۶	-۷/۶۲۴۱	۰/۰۰۰۳۷	-۷۷/۸۱۹۱
۱۲۰۰	۰/۰۰۰۱۸۱	۰/۰۰۰۱۶۸	-۷/۲۷۶۷	۰/۰۰۰۱۶۸	-۷/۲۲۱۶	۰/۰۰۰۳۷	-۷۹/۲۴۴۷
۱۳۰۰	۰/۰۰۰۱۹۲	۰/۰۰۰۱۷۶	-۸/۴۲۴۳	۰/۰۰۰۱۷۹	-۶/۹۱۲۶	۰/۰۰۰۳۷	-۸۰/۳۶۴
۱۴۰۰	۰/۰۰۰۲۰۲	۰/۰۰۰۱۸۳	-۹/۴۴۷۸	۰/۰۰۰۱۸۸	-۶/۶۷۹۸	۰/۰۰۰۳۷	-۸۱/۲۶۶۷
۱۵۰۰	۰/۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۱۹	-۹/۸۱۰۴	۰/۰۰۰۱۹۷	-۶/۵۴۰۲	۰/۰۰۰۳۷	-۸۲/۰۱۴۲
۱۶۰۰	۰/۰۰۰۲۱۹	۰/۰۰۰۱۹۷	-۱۰/۳۱۰۲	۰/۰۰۰۲۰۵	-۶/۴۳۲۴	۰/۰۰۰۳۸	-۸۲/۶۵۰۵
۱۷۰۰	۰/۰۰۰۲۲۶	۰/۰۰۰۲۰۳	-۱۰/۶۷۴۹	۰/۰۰۰۲۱۲	-۶/۳۵۲	۰/۰۰۰۳۸	-۸۳/۱۹۳۶
۱۸۰۰	۰/۰۰۰۲۳۳	۰/۰۰۰۲۰۸	-۱۰/۹۵۸۹	۰/۰۰۰۲۱۹	-۶/۲۵	۰/۰۰۰۳۸	-۸۳/۶۶۴۳



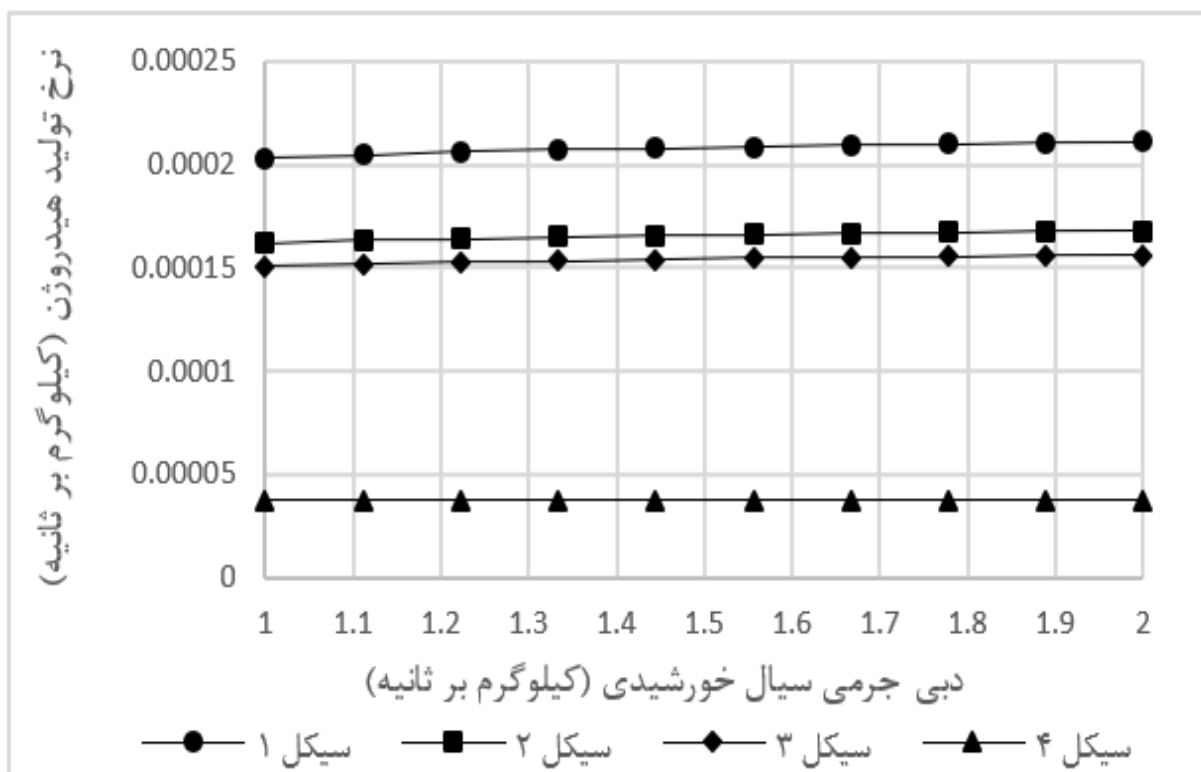
شکل ۳- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دمای کندانسور



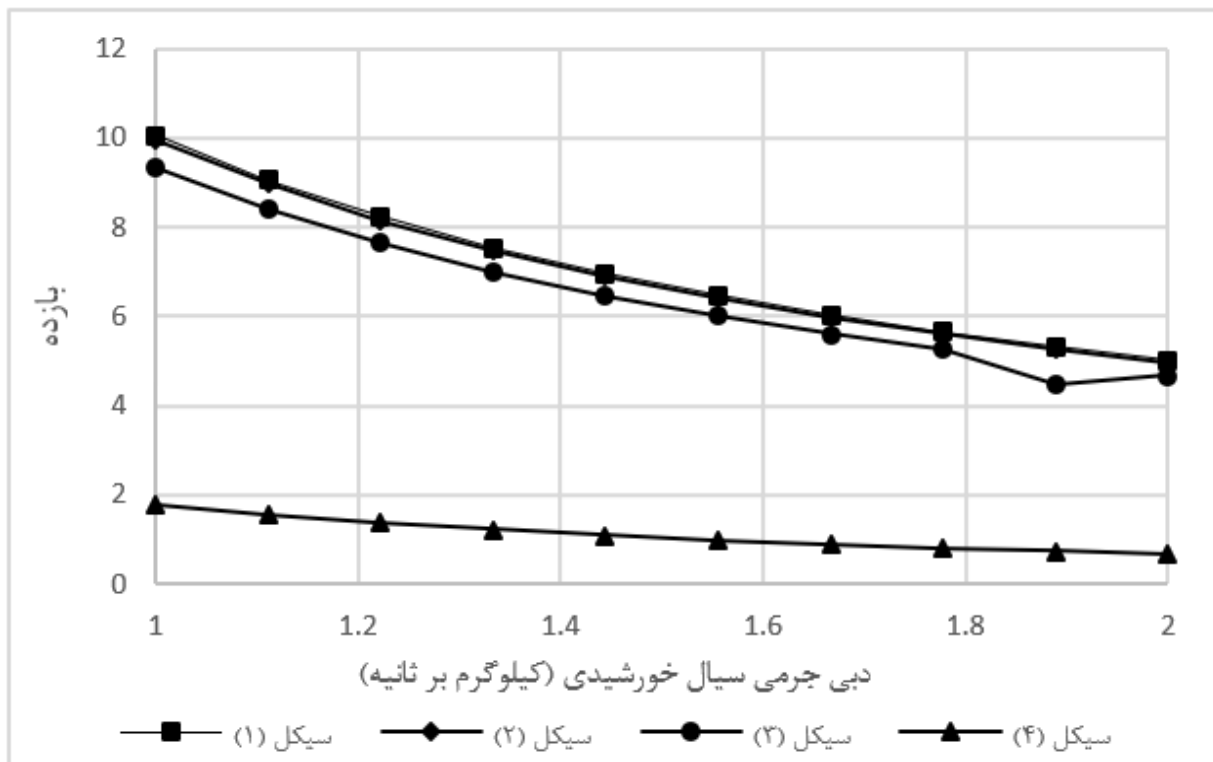
شکل ۴- تغییر بازده انرژی سیکل‌ها با دمای کندانسور

۳-۴- اثر دبی جرمی سیال خورشیدی

تغییرات نرخ تولید هیدروژن بر حسب دبی جرمی سیال خورشیدی در جدول (۶) و شکل (۴) آمده است.



شکل ۵- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دبی جرمی سیال خورشیدی



شکل ۶- تغییر بازده انرژی سیکل‌ها با دبی جرمی سیال خورشیدی

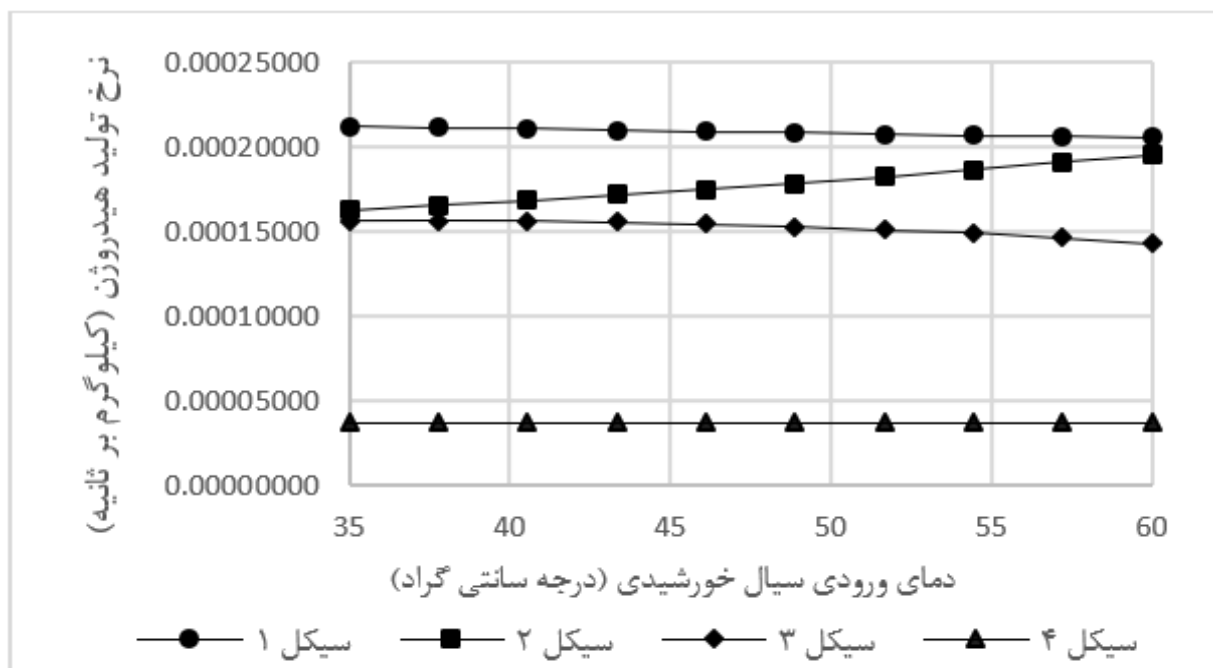
مشاهده می‌شود نرخ تولید هیدروژن به ترتیب بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۳) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است. در ضمن تولید هیدروژن در تمام سیکل‌ها با افزایش دبی جرمی سیال خورشیدی کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات مقادیر بازده انرژی در شکل (۶) آمده است، همچنان که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۳) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است.

#### ۴-۴- اثر دمای ورودی سیال خورشیدی

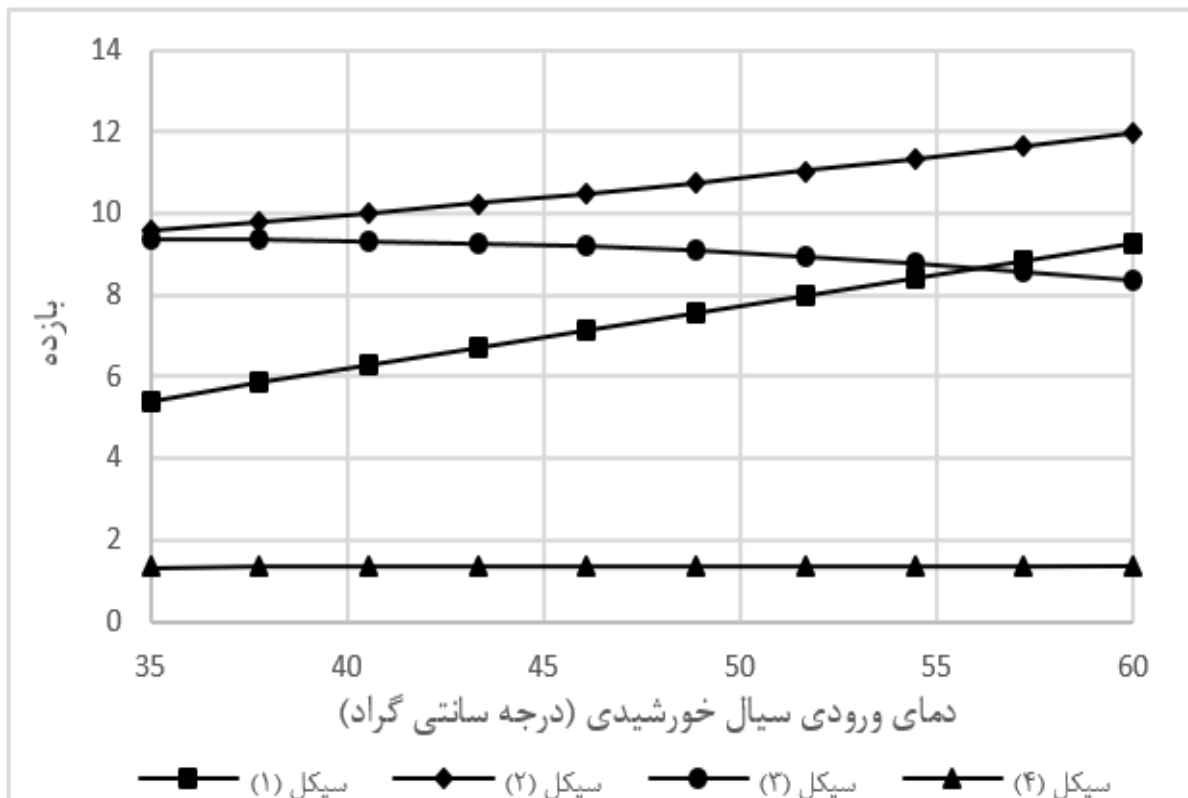
تغییرات نرخ تولید هیدروژن برحسب دمای ورودی سیال خورشیدی در جدول (۷) و شکل (۷) آمده است. مشاهده می‌شود نرخ تولید هیدروژن به ترتیب بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۳) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است. در ضمن تولید هیدروژن در سیکل‌های (۱) و (۳) با افزایش دمای ورودی سیال خورشیدی کاهش یافته، در سیکل (۲) افزایش می‌یابد و در سیکل (۴) ثابت است. همچنین تغییر مقادیر بازده انرژی در شکل (۸) مشاهده می‌شود به ترتیب، بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۳) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است.

#### ۴-۵- اثر فشار ورودی توربین

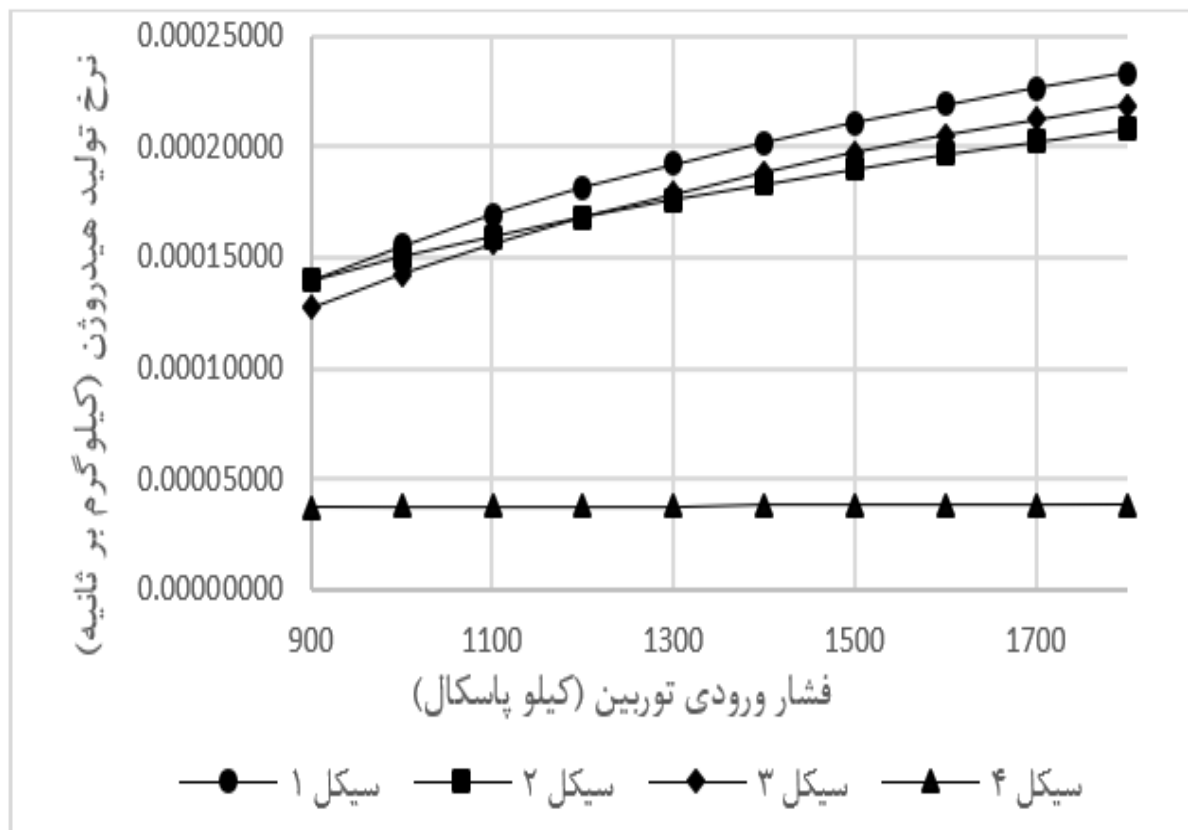
تغییرات نرخ تولید هیدروژن برحسب فشار ورودی توربین در جدول (۸) و شکل (۹) آمده است. مشاهده می‌شود نرخ تولید هیدروژن به ترتیب بیشترین مقدار برای سیکل (۱) و پس از آن سیکل‌های (۳) و سپس (۲) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است. در ضمن تولید هیدروژن در سیکل‌های (۱) تا (۳) با افزایش دمای ورودی سیال خورشیدی کاهش می‌یابد و در سیکل (۴) تقریباً ثابت (دارای افزایش ناچیز) است. همچنین تغییرات مقادیر بازده انرژی چنانچه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود به ترتیب، بیشترین مقدار برای سیکل (۳) و پس از آن سیکل‌های (۲) و (۱) تا کمترین مقدار در سیکل (۴) است.



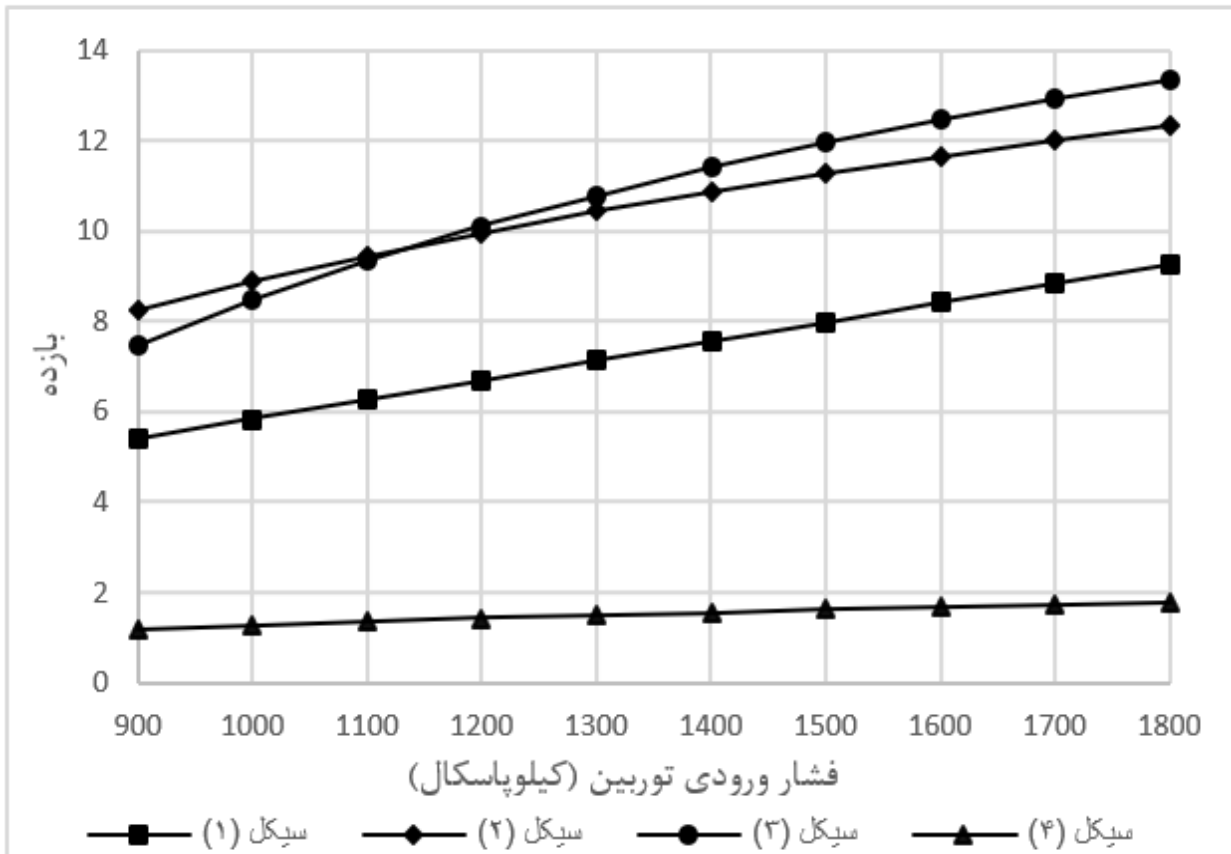
شکل ۷- تغییر نرخ تولید هیدروژن با دمای ورودی سیال خورشیدی



شکل ۸- تغییر بازده انرژی سیکل‌ها با دمای ورودی سیال خورشیدی



شکل ۹- تغییر نرخ تولید هیدروژن با فشار ورودی توربین



شکل ۱۰- تغییر بازده انرژی سیکل‌ها با فشار ورودی توربین

## ۵- نتیجه‌گیری

با مقایسه سیکل‌های تولید هم‌زمان مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که دوفشاره کردن سیکل رانکین در سیکل تولید هم‌زمان با وجود کاهش هزینه تولید توان، افزایش قابل توجهی را در میزان تولید هیدروژن به دنبال ندارد. در مورد سیکل (۲)، افزودن یک مبادله‌کن میانی در بیشتر موارد میزان تولید هیدروژن را افزایش داده و نسبت به دیگر چیدمان‌ها اثرگذاری مناسب‌تری دارد. این مهم در سیکل (۳) با افزودن گرم‌کن سیال تغذیه باز صورت گرفته و تأثیرگذاری آن گرچه مانند سیکل (۲) نیست؛ اما در مواردی بهبود عملکرد را به دنبال داشته است. در مورد سیکل (۱) اگرچه دارای تعداد اجزای کمتر نسبت به سیکل‌های تولید هم‌زمان دیگر مورد بررسی در این تحقیق است؛ ولی تولید هیدروژن آن نسبت به سیکل‌های دیگر بیشتر است. دو فشاره کردن سیکل رانکین در سیکل تولید هم‌زمان، نه تنها افزایش قابل توجهی را در میزان تولید هیدروژن به دنبال ندارد؛ بلکه تا ۸۰ درصد میزان تولید هیدروژن را نسبت به سیکل پایه کاهش می‌دهد؛ چراکه میزان بازده انرژی در این حالت با تغییرات ایجاد شده در دمای کندانسور، دبی جرمی، دمای ورودی سیال خورشیدی و فشار ورودی توربین، کاهش و میزان بازگشت ناپذیری سیستم افزایش و باعث کاهش کار خروجی سیستم می‌شود و میزان این نوسان بازده انرژی و بازگشت ناپذیری نسبت به دو چیدمان دیگر، بیشتر و به همان نسبت، در تولید هیدروژن اثر کاهشی بیشتری دارد. افزودن یک گرم‌کن سیال تغذیه باز نیز میزان تولید هیدروژن را تا ۲۵ درصد نسبت به سیکل پایه کاهش می‌دهد. کمترین تأثیر کاهشی مربوط به افزودن مبادله‌کن میانی با کاهش ۲۰ درصدی تولید هیدروژن نسبت به سیکل پایه است.

## مراجع

- [1] P. O. Nilsson, "Environmental Accounting—EMERGY and Environmental Decision Making," *Forest Science*, Vol. 43, No. 2, pp. 305-306, 1997, doi: 10.1093/forestscience/43.2.305.
- [2] F. Pearce, "Special Report: Climate Change," *NewScientist. Com News Service*, 2006, [Online]. Available: <http://environment.newscientist.com/channel/earth/climate-change/dn9903S>, <https://www.newscientist.com/article/dn9903-introduction-climate-change/>.
- [3] J. J. McCarthy, "*Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*," First Edition, Vol. 2, Cambridge University Press, UK, 2001, ISBN: 0521807689, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII\\_TAR\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report.pdf).
- [4] C. J. Campbell, and J. H. Laherrère, "The End of Cheap Oil," *Scientific American*, Vol. 278, No. 3, pp. 78-83, 1998, doi: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0398-78>.
- [5] P. Roberts, "*The End of Oil: On the Edge of a Perilous New World*," Houghton Mifflin Harcourt, New York, US, 2005, ISBN: 0618239774, <https://archive.org/details/endofoilonedgeof00robe>.
- [6] D. L. Goodstein, "*Out of Gas: The End of the Age of Oil*," In *AGU Fall Meeting Abstracts*, Vol. 2004, pp. U21B-03, American Geophysical Union, Fall Meeting 2004, Abstract id, U21B-03, December 2004, [Online]. Available: <https://archive.org/details/outofgasendofage00good>.
- [7] F. Barbir, "Transition to Renewable Energy Systems with Hydrogen as an Energy Carrier," *Energy*, Vol. 34, No. 3, pp. 308-312, 2009/03/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.007>.
- [8] N. None, "*A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy. To 2030 and Beyond*", EERE Publication and Product Library, Washington, DC (United States), 2002, <https://doi.org/10.2172/1216144>.
- [9] US. DOE, "National Hydrogen Energy Roadmap," Washington, DC, 2022, [Online]. Available: [https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/national\\_h2\\_roadmap.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/national_h2_roadmap.pdf).
- [10] H. P. Plan, "DOE Releases Updated Hydrogen Posture Plan," *Fuel Cells Bulletin*, 2006, [Online], Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/hydrogen-posture-plan-integrated-research-development-and-demonstration>.
- [11] K. European Commission, "Hydrogen Energy and Fuel Cells a Vision of Our Future," France, 2003, [Online]. Available: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:37121708](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:37121708).
- [12] T. Alleau, "European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform Strategic Overview," France, 2005, [Online]. Available: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:37121707](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:37121707).

- [13] T. Jiang, "Development of Alkaline Electrolyzer Electrodes and Their Characterization in Overall Water Splitting, (Développement et Caractérisation D'électrodes Pour L'électrolyse Alcaline de L'eau," Université Bourgogne Franche-comté)," Doctoral Dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020UBFCA006, 2020, [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03270903>.
- [14] F. Barbir, and H. Görgün, "Electrochemical Hydrogen Pump for Recirculation of Hydrogen in a Fuel Cell Stack," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 37, No. 3, pp. 359-365, 2007/03/01 2007, doi: 10.1007/s10800-006-9266-0.
- [15] V. Smil, "*General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*," Vol. 369, Wiley, New York, 1991, <https://doi.org/10.2307/215395>.
- [16] H. T. Odum, and E. C. Odum, "*A Prosperous Way Down: Principles and Policies*", University Press of Colorado, USA, 2008, <https://archive.org/details/prosperouswaydow0000odum/page/n5/mode/2up>.
- [17] M. T. Brown, and S. Ulgiati, "Emergy Evaluations and Environmental Loading of Electricity Production Systems," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 10, No. 4, pp. 321-334, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9).
- [18] M. Raugei, S. Bargigli, and S. Ulgiati, "Life Cycle Assessment and Energy Pay-back Time of Advanced Photovoltaic Modules: CdTe and CIS Compared to Poly-Si," *Energy*, Vol. 32, No. 8, pp. 1310-1318, 2007/08/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.003>.
- [19] T. N. Veziroglu, and F. Barbir, "Solar-hydrogen Energy System: The Choice of the Future," *Environmental Conservation*, Vol. 18, No. 4, pp. 304-312, 1991, doi: 10.1017/S0376892900022554.
- [20] E. Macchi, and M. Astolfi, "*Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*", Woodhead Publishing, Cambridge, Cambridgeshire, UK, 2016.
- [21] B.F. Selvanayagam, S. Krishnamoorthy, S. Gowtham, and N. Balaji, "A Review of Parabolic Collector with Shell and Tube Heat Exchanger," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 66, Part. 3, pp. 1382-1388, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.217>.
- [22] H. Nami and E. Akrami, "Analysis of a Gas Turbine Based Hybrid System by Utilizing Energy, Exergy and Exergoeconomic Methodologies for Steam, Power and Hydrogen Production," *Energy Conversion and Management*, Vol. 143, pp. 326-337, 2017/07/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.020>.
- [23] A. Nemati, H. Nami, and M. Yari, "Assessment of Different Configurations of Solar Energy Driven Organic Flash Cycles (OFCs) via Exergy and Exergoeconomic Methodologies," *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 1231-1248, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.096>.
- [24] E. Akrami, A. Chitsaz, H. Nami, and S. M. S. Mahmoudi, "Energetic and Exergoeconomic Assessment of a Multi-generation Energy System Based on Indirect use of Geothermal Energy," *Energy*, Vol. 124, pp. 625-639, 2017/04/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.006>.

[25] H. Kianfard, S. Khalilarya, and S. Jafarmadar, "Exergy and Exergoeconomic Evaluation of Hydrogen and Distilled Water Production via Combination of PEM Electrolyzer, RO Desalination Unit and Geothermal Driven Dual Fluid ORC," *Energy Conversion and Management*, Vol. 177, pp. 339-349, 2018/12/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.057>.

[26] F. A. Boyaghchi, M. Chavoshi, and V. Sabeti, "Multi-generation System Incorporated with PEM Electrolyzer and Dual ORC Based on Biomass Gasification Waste Heat Recovery: Exergetic, Economic and Environmental Impact Optimizations," *Energy*, Vol. 145, pp. 38-51, 2018/02/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.118>.

[27] E. Gholamian, A. Habibollahzade, and V. Zare, "Development and Multi-objective Optimization of Geothermal-based Organic Rankine Cycle [Integrated with Thermoelectric Generator and Proton Exchange Membrane Electrolyzer for Power and Hydrogen Production]," *Energy Conversion and Management*, Vol. 174, pp. 112-125, 2018/10/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.027>.

[28] A. Mohammadi, and M. Mehrpooya, "A Comprehensive Review on Coupling Different Types of Electrolyzer to Renewable Energy Sources," *Energy*, Vol. 158, pp. 632-655, 2018/09/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.073>.

[29] H. Lin, X. Wu, H. Ayed, A. Mouldi, S. Z. Abbas, and A. Ebrahimi-Moghadam, "A New Biomass Gasification Driven Hybrid System for Power and Liquid Hydrogen Cogeneration: Parametric Study and Multi-objective Evolutionary Optimization," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 62, pp. 26394-26407, 2022/07/22/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.110>.

[30] E. Soleymani, S. Ghavami Gargari, and H. Ghaebi, "Thermodynamic and Thermo-economic Analysis of a Novel Power and Hydrogen Cogeneration Cycle Based on Solid SOFC," *Renewable Energy*, Vol. 177, pp. 495-518, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.103>.

[31] Z. Dong, "Dynamical Modeling and Coordinated Control Design of a Multimodular Nuclear Power-hydrogen Cogeneration Plant," *Energy Conversion and Management*, Vol. 272, pp. 116369, 2022/11/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116369>.

[32] N. Skordoulias, E. I. Koytsoumpa, and S. Karellas, "Techno-economic Evaluation of Medium Scale Power to Hydrogen to Combined Heat and Power Generation Systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 63, pp. 26871-26890, 2022/07/26/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.057>.

[33] S. A. Kalogirou, "Solar Energy Engineering: Processes and Systems," Third Edition, Academic Press, Netherlands, 2023, ISBN: 978-0-323-99350-0, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99350-0-00013-2>.

[34] F. A. Al-Sulaiman, "Exergy Analysis of Parabolic trough Solar Collectors Integrated with Combined Steam and Organic Rankine Cycles," *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 441-449, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.013>.

## The Effect of Different Configurations of Organic Rankine Cycle on Hydrogen Production from Cogeneration System of Power and Hydrogen using Solar Energy Source

**Hamid Ghasem Khani**

PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tak.C., Islamic Azad University, Takestan, Iran  
hamid\_ghasemkhan@yahoo.com

\*Corresponding author: **Mohammad Nikian**

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tak.C., Islamic Azad University,  
Takestan, Iran  
mohammad.nikian@iau.ac.ir

**Mehrangiz Ghazi**

Assistant Professor, Department of Petroleum, Mining and Materials Engineering, Central Tehran  
Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
[m.ghazi@iauctb.ac.ir](mailto:m.ghazi@iauctb.ac.ir)

### Abstract

In this research, by using different configurations of the organic Rankine cycle, power and hydrogen production systems driven by solar energy have been analyzed and investigated in EES software, and the effect of different configurations on hydrogen production has been studied.

Also, the effects of condenser temperature, solar fluid mass flow rate, turbine inlet pressure, and solar fluid inlet temperature on hydrogen production in each of the cycles have been investigated.

The results of the showed that double pressure Rankine not only does not result in a significant increase in the amount of hydrogen production, but also reduces the amount of hydrogen production by 80% compared to the basic cycle and compared to the other two arrangements has a greater reduction effect in hydrogen production. Adding an open fluid heater also reduces hydrogen production by 25% compared to the base cycle. The least reduction effect is related to the addition of an intermediate exchanger with a 20% reduction in hydrogen production compared to the base cycle.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle (ORC), Hydrogen production, Solar energy source, PEM electrolyzer