

استفاده از اتلاف حرارتی توربین گازهای نصب شده در تاسیسات دریایی برای تولید هیدروژن و گرما توسط الکترولیزر آلکالین

حسین نامی* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، h.nami@maragheh.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، هیدروژن نه تنها به عنوان یک سوخت سبز بلکه به عنوان یک حامل انرژی برای ذخیره‌ی انرژی مازاد بر مصرف توجه محققان را به خود جلب کرده است. این درحالیست که استفاده از هیدروژن به عنوان زنجیره‌ی تکمیل کننده در تولید سوخت‌های جایگزین مانند متانول سبز و آمونیاک سبز اهمیت پرداختن به تولید آن را دوچندان کرده است. در این مطالعه، از تلفات حرارتی توربین گازهای نصب شده در تاسیسات دریایی برای تولید هیدروژن و گرما بوسیله‌ی الکترولیزر آلکالین استفاده شده است. اغلب توربین گازهای نصب شده در تاسیسات دریایی برای تامین برق مصرفی تاسیسات استفاده می‌شوند و به ندرت از تلفات حرارتی آن‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله، از گرمای موجود در گازهای خروجی از توربین گاز برای راه‌اندازی واحد تولید توان در دو مرحله (واحد توربین بخار و واحد چرخه‌ی رانکین آلی) استفاده شده و نهایتاً توان تولیدی صرف راه‌اندازی الکترولیزر نصب شده و تولید هیدروژن گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان داد در شرایط پایه به ازای دمای گازهای خروجی توربین گاز ۴۵۰، ۵۲۵ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، نرخ هیدروژن تولیدی به ترتیب ۱۳۰۸، ۱۷۶۹ و ۲۱۹۱ تن بر سال و آهنگ گرمای تولیدی به ترتیب ۳/۲، ۴/۳ و ۵/۴ مگاوات می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توربین گاز، تولید هیدروژن، الکترولیزر آلکالین، بازیاب اتلاف حرارتی، چرخه‌ی رانکین آلی، تولید همزمان.

Waste heat recovery from offshore gas turbines to produce hydrogen and heat via Alkaline Electrolyzers

H. Nami

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Abstract

In the last years, hydrogen production not only as a green fuel but also as an energy career has gained much attention. This is while, hydrogen can be considered as one of the main chains of alternative fuel production like green methanol and green ammonia. In this study, the waste heat of the offshore installed gas turbines is utilized to produce hydrogen and heat via employing Alkaline electrolyzers. In most cases, gas turbines are installed to cover the electricity consumption of the offshore facilities and waste heat recovery from these turbines is not a matter of concern. In this paper, the energy content of the exhaust gasses of the gas turbines is utilized to run steam and organic Rankine cycle and then generated surplus power is fed to electrolyzers to produce hydrogen. Results revealed that under the base condition exhaust temperatures of 450, 525 and 600 °C lead to hydrogen production of 1308, 1769 and 2191 ton per year, and heat generation of 3.2, 4.3 and 5.4 MW respectively.

Keywords: Gas Turbine, Hydrogen Production, Alkaline electrolyzer, Waste Heat Recovery, ORC, cogeneration

همچنان تولید هیدروژن از اهمیت بسزایی برخوردار است. مهمتر از همه هیدروژن به عنوان زنجیره‌ی تکمیل کننده برای تولید سوخت‌های مایع با قابلیت ذخیره‌سازی راحت مانند آمونیاک [5]، [4] و متانول [6]، [7] استفاده می‌شود.

الکترولیزرها را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم کرد: الکترولیزر آلکالین، الکترولیزر غشا تبادل پروتون و الکترولیزر اکسید جامد [8]. هریک از این فناوری‌های یاد شده مزایا و معایب مختص به خود را دارد. اگرچه الکترولیزرهای غشا تبادل پروتون زمان پاسخ کمتری دارند و الکترولیزرهای اکسید جامد دارای راندمان بالایی می‌باشند، الکترولیزرهای آلکالین در مقایسه با دو مورد دیگر فناوری جافتاده‌تری بوده و در ابعاد کاملاً تجاری موجود می‌باشد. الکترولیزرهای اکسید جامد هنوز در مراحل اولیه‌ی توسعه‌ی خود بوده و دارای قیمت‌های اولیه‌ی بسیار بالایی می‌باشند. آینده‌ی این فناوری به نوعی متأثر از حمایت‌های مالی مربوط به مراکز تحقیق و توسعه و نیز قیمت برق تجدیدپذیر می‌باشد. بدیهی است چنانچه در آینده تامین برق تجدیدپذیر با قیمت پایین میسر باشد، استفاده از الکترولیزرهای با قیمت بالا و راندمان بیشتر در اولویت صنایع تولید هیدروژن نخواهد

۱- مقدمه

امروزه منبع اصلی تولید هیدروژن گاز طبیعی می‌باشد که دارای اثرات زیست محیطی بسیاری بوده و به ازای تولید هرکیلوگرم هیدروژن از منابع فسیلی تقریباً ۱۰/۶ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید وارد اتمسفر می‌شود [1]. توجه به اهمیت مسایل زیست محیطی و نیاز روزافزون به تولید هیدروژن سبب افزایش تلاش برای گسترش فناوری الکترولیز آب جهت تولید هیدروژن پاک شده است. البته شایان ذکر است زمانی هیدروژن تولید شده به روش الکترولیز آب، به عنوان هیدروژن پاک طبقه‌بندی می‌شود که از منابع انرژی تجدیدپذیر و نه منابع انرژی فسیلی برای راه‌اندازی الکترولیزر استفاده شده باشد [2]. در این میان، استفاده از برق مازاد بر مصرف برای تولید هیدروژن، استفاده از الکترولیزرها را به عنوان یک روش ذخیره انرژی معرفی کرده است. در کنار استفاده از برق مازاد بر مصرف، بهره گرفتن از انرژی اتلافی از صنایع برای تولید هیدروژن نیز در کانون توجه محققان قرار گرفته است [3].

ناگفته نماند که ذخیره‌سازی هیدروژن مشکلات مربوط به خود را دارد. اما با گسترش استفاده از پیل‌های سوختی در زمان اوج مصرف

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: h.nami@maragheh.ac.ir

بود. در مقابل، الکترولیزر آلکالین دارای قیمت اولیه پایینی بوده و الکترولیزر ۱۶۰ مگاواتی موجود در کشور مصر یکی از نمونه‌های الکترولیزر آلکالین با ابعاد بزرگ می‌باشد [9]. با مراجعه به ادبیات فن برتری الکترولیزر آلکالین نسبت به سایر الکترولیزرها کاملاً مشهود است. در ادامه تعدادی از مطالعات انجام گرفته در حوزه استفاده از الکترولیزرهای آلکالین برای تولید هیدروژن آورده شده است.

Rezaei و همکاران [10] از پتانسیل انرژی باد افغانستان برای تولید هیدروژن پاک توسط الکترولیزر آلکالین استفاده کردند. آن‌ها با فرض چگالی مصرف توان ۵۵/۶ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، نشان دادند راندمان کلی سیستم ۲۲/۴ درصد می‌باشد. Sadeghi و همکاران [11] از انرژی خورشیدی برای تولید هیدروژن توسط الکترولیزر آلکالین استفاده کردند. در این مطالعه هیدروژن تولیدی از گاز طبیعی به عنوان مورد مینا برای مقایسه قرار گرفت. آن‌ها با فرض چگالی مصرف توان ۵۷/۵ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلوگرم هیدروژن و قیمت برق ۶۹/۲ دلار بر مگاوات‌ساعت، نشان دادند قیمت هیدروژن تولیدی ۶/۸۵ دلار به ازای هر کیلوگرم می‌باشد. Yilmaz و همکاران [12] از انرژی زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن با استفاده از الکترولیزر آلکالین استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند راندمان انرژی و انرژی کل سیستم به ترتیب ۸/۵ و ۳۸/۳۷ درصد بوده و برق تولیدی توسط انرژی زمین‌گرمایی نسبتاً قیمت پایینی دارد که منجر به تولید هیدروژن ارزان قیمت می‌شود. همچنین این محققان اثر دمای منبع زمین‌گرمایی را در رفتار سیستم بررسی کردند. Abdin و همکاران [13] از انرژی باد و خورشید به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن بهره بردند. به منظور مشخص کردن بهترین موقعیت مکانی از دیدگاه قیمت هیدروژن، پنج نقطه مختلف را مورد بررسی قرار دادند: یک مورد در کانادا، ۲ مورد در آمریکا و ۲ مورد در استرالیا. نتایج آن‌ها نشان داد اگر قیمت برق تجدیدپذیر بین ۵۲۰ تا ۱۵۲۰ دلار بر مگاوات‌ساعت تغییر کند، قیمت هیدروژن تولیدی در بازه ۱۶/۲ و ۳۶/۴ دلار بر کیلوگرم خواهد بود. Saba و همکاران [14] یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای درباره‌ی قیمت الکترولیزرهای آلکالین و غشا تبادل پروتون در یک بازه‌ی سی ساله انجام دادند. در این مطالعه نشان داده شد که روند نزولی قیمت الکترولیزرها عامل اصلی گسترش این فناوری می‌باشد. در مطالعه‌ی دیگری نتایج تحقیقات نشان داد که قیمت الکترولیزرهای آلکالین از بازه ۸۷۰-۲۳۵۰ دلار برای هر کیلووات توان مصرفی در سال ۱۹۹۰ میلادی به بازه ۷۹۰-۹۱۰ دلار برای هر کیلووات توان مصرفی در سال ۲۰۳۰ میلادی کاهش خواهد یافت [15].

چنانچه مطالعات موجود در ادبیات فن نشان می‌دهد، نه تنها نیاز روزافزون به تولید هیدروژن بلکه کاهش محسوس قیمت اولیه الکترولیزرها سبب گسترش این فناوری شده است. در این مطالعه، از بازیاب اتلاف حرارتی توربین گازهای نصب شده در تاسیسات دریایی برای تولید توان، راه‌اندازی الکترولیزر آلکالین و نهایتاً تولید توان و گرما استفاده شده است. توربین‌های گاز نصب شده در تاسیسات دریایی معمولاً برای تولید برق مصرفی تاسیسات نصب شده و به ندرت از اتلافات حرارتی آن‌ها استفاده می‌شود. مسأله‌ی مهم دیگر این است که در تاسیسات نفتی دریایی تولید حرارت برای مصرف در پالایش محصولات نفتی نیز به اندازه‌ی تولید برق مهم است. الکترولیزرهای

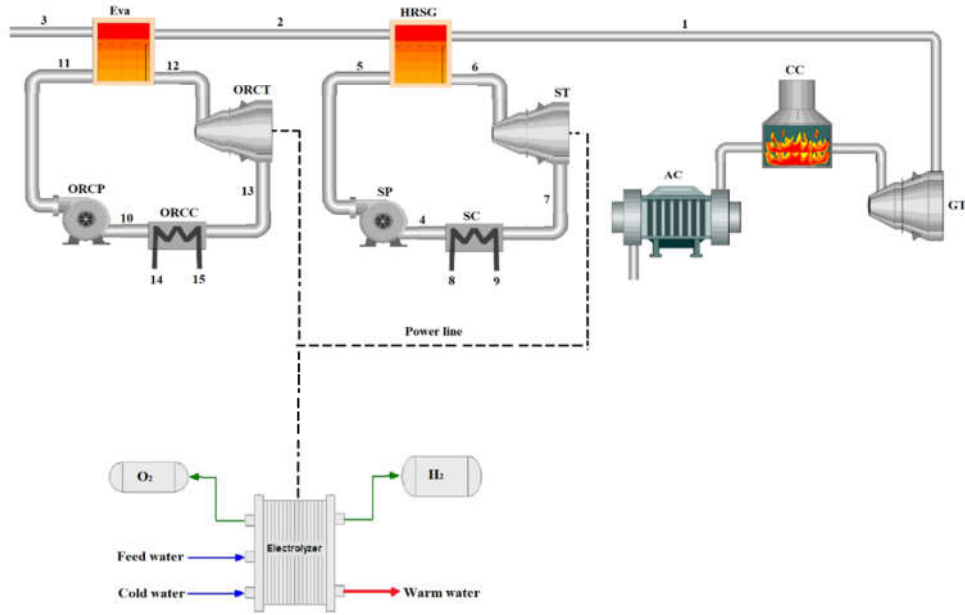
آلکالین به دلیل برگشت‌ناپذیری‌های داخلی بخشی از توان مصرفی را به گرما تبدیل می‌کنند و باتوجه به دما کاری این الکترولیزر، گرمای تولید شده در آن می‌تواند به عنوان گرمای مورد نیاز برای فرآیندهای پالایش در تاسیسات دریایی استفاده شود. به منظور شبیه‌سازی واقعی توربین گاز، محصولات احتراق خروجی از توربین گاز در گستره‌ی دمایی مختلفی در نظر گرفته شد تا نشانگر شرایط کاری توربین در بارهای مختلف باشد. گرمای موجود در محصولات احتراق خروجی از توربین گاز طی دو مرحله جهت تولید توان مورد استفاده قرار گرفت. اول جهت راه‌اندازی یک نیروگاه بخار و سپس برای راه‌اندازی چرخه‌ی رانکین آلی. نهایتاً توان اضافی تولیدی توسط این دو واحد برای راه‌اندازی الکترولیزر آلکالین جهت تولید هیدروژن و گرما (به عنوان محصول جانبی) استفاده شد. همچنین فشار کاری بهینه برای هر دو واحد چرخه‌ی رانکین و رانکین آلی متناظر با دمای محصولات احتراق خروجی از توربین گاز محاسبه شد. بعلاوه، تاثیر تغییر در چگالی جریان الکترولیزر در رفتار ترمودینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

۲- معرفی سیستم مورد مطالعه و فرضیات

شکل ۱ سیستم مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل بوضوح دیده می‌شود، سیستم مورد مطالعه ترکیبی از ۴ واحد اصلی توربین گاز، چرخه بخار، چرخه رانکین آلی و الکترولیزر می‌باشد. واحد توربین گاز و چرخه بخار فناوری کاملاً جا افتاده و گسترش یافته‌ای می‌باشد. در مورد چرخه‌ی رانکین آلی نیز باید اشاره کرد که ساختمان آن بسیار شبیه به ساختمان واحد تولید توان بخار می‌باشد. با این تفاوت که سیال کاری استفاده شده در آن به جای آب، یک ماده‌ی آلی می‌باشد. چرخه‌ی رانکین آلی می‌تواند به عنوان راه حلی مناسب برای بازیاب تلفات حرارتی با دمای نسبتاً پایین (در مقایسه با دمای کاری واحد تولید توان بخار) در نظر گرفته شود.

محصولات احتراق خروجی از توربین گاز ابتدا صرف تولید بخار با فشار و دمای بالا در مولد بخار چرخه رانکین می‌شود. بخار تولید شده وارد توربین بخار شده و طی فرآیند انبساط، آنتالپی بالای بخار به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. بخار با کیفیت بالا توربین را ترک کرده و وارد چگالنده تعبیه شده می‌شود تا طی فرآیند دفع گرما به حالت مایع اشباع برسد. آب در شرایط مایع اشباع وارد پمپ شده، فشار آن افزایش می‌یابد و دوباره جهت تغییر فاز و تکمیل چرخه وارد مولد بخار می‌شود.

محصولات احتراق خروجی از مولد بخار به دلیل دارا بودن محتوای انرژی قابل توجه، دوباره صرف راه‌اندازی چرخه‌ی رانکین آلی استفاده می‌شود. گرمای محصولات احتراق صرف تغییر فاز سیال کاری در اواپراتور شده و سیال کاری را به حالت بخار اشباع می‌رساند. سیال کاری در حالت بخار اشباع وارد توربین چرخه‌ی رانکین آلی شده و تولید توان می‌کند. جریان خروجی از توربین وارد چگالنده شده و با دفع گرما به حالت مایع اشباع می‌رسد و سپس توسط پمپ تا فشار کاری تبخیرکن متراکم شده و وارد تبخیرکن می‌شود تا چرخه رانکین آلی تکمیل گردد.



شکل ۱- سیستم مورد مطالعه

- است؛
- بیشینه دمای بخار ورودی به توربین بخار 500°C می‌باشد؛
- به دلیل مشکلات طراحی ناشی از فشار خلا نسبی در چگالنده چرخه‌ی رانکین آلی، فشار این واحد همواره بیشتر از فشار اتمسفر لحاظ شده است؛
- میرد R123 به عنوان سیال کاری چرخه‌ی رانکین آلی استفاده شده است؛
- آب خنک کن در دمای محیط وارد چگالنده می‌شود.
- چگالی جریان الکترولیزر $0/5$ آمپر بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه

در تحلیل ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه هر جزء به عنوان یک حجم کنترل مستقل در نظر گرفته شده و قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای هر جزء اعمال می‌شود. قانون اول ترمودینامیک یا همان بقای انرژی و قانون دوم ترمودینامیک یا همان موازنه انرژی به قرار زیر است [18]:

$$\sum \dot{m}_i h_i + \dot{Q}_{cv} = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W}_{cv} \quad (1)$$

$$\sum \dot{E}_i = \sum \dot{E}_e + \dot{E}_D \quad (2)$$

در روابط فوق \dot{m} ، h ، \dot{Q} و \dot{W} به ترتیب بیانگر دبی جرمی، آنتالپی مخصوص، گرمای منتقل شده، توان و انرژی جریان می‌باشد. همچنین زیرنویس‌های i و e در \dot{m} به ترتیب بیانگر جریان ورودی به حجم کنترل، حجم کنترل، جریان خروجی از حجم کنترل و انرژی تخریب شده می‌باشد. از آنجاکه امروزه تحلیل انرژی سیستم‌های انرژی امری کاملاً مرسوم است از ورود به جزئیات بیشتر خودداری کرده و منابعی همچون [19]، [20] برای مطالعه‌ی بیشتر معرفی می-

شایان ذکر است که در این مطالعه واحد توربین گاز مدلسازی نشده و فقط از اطلاعات گازهای خروجی از این واحد استفاده شده است. سایر فرضیات به کار گرفته شده در مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه به قرار زیر است:

- سیستم در حالت پایا کار می‌کند؛
- دما و فشار محیط به ترتیب 25°C و یک اتمسفر می‌باشد؛
- دما و فشار کاری الکترولیزر به ترتیب 80°C و یک اتمسفر می‌باشد [8]؛
- دبی جرمی محصولات احتراق خروجی از توربین گاز 85 kg/s و دمای گازهای خروجی 525 ، 450 و 600 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است [16]؛
- راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ به ترتیب 85 و 75 درصد در نظر گرفته شده است؛
- ده درصد گرمای تولید شده در الکترولیزر بدلیل تابش و همرفت جریان طبیعی هوا تلف می‌شود [17]؛
- دمای کاری چگالنده برای هر دو چرخه رانکین و رانکین آلی 35°C در نظر گرفته شده است؛
- ارزش حرارتی هیدروژن 120 MJ/kg می‌باشد؛
- حداقل اختلاف دمایی بین سیال سرد و گرم در مبادله‌کن‌های گرمایی بکار گرفته شده 10°C و در سوپرهیتر چرخه بخار 25°C می‌باشد؛
- تلفات حرارتی در لوله‌های انتقال قابل چشم‌پوشی می‌باشد؛
- فشار بالای چرخه‌ی رانکین آلی محدود به 95% فشار بحرانی سیال استفاده شده می‌باشد. این فرض با در نظر گرفتن مشکلات مربوط به ساخت و طراحی چرخه‌های رانکین آلی با فشار فرا بحرانی لحاظ شده

شود.

جداول ۱ و ۲ به ترتیب روابط بقای انرژی و موازنه انرژی استفاده شده برای اجزای سیستم را نشان می‌دهد. شماره‌های استفاده شده در روابط لیست شده در این جداول منطبق بر شماره‌های استفاده شده در شکل ۱ هستند.

جدول ۱- روابط بقای انرژی استفاده شده برای اجزای سیستم مورد

مطالعه	رابطه‌ی بقای انرژی
HRSG	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_6 h_6$
ST	$\dot{W}_{ST} = \dot{m}_6 (h_6 - h_7)$
SC	$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_9 h_9$
SP	$\dot{W}_{SP} = \dot{m}_4 (h_5 - h_4)$
Eva	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{12} h_{12}$
ORCT	$\dot{W}_{ORCT} = \dot{m}_{12} (h_{12} - h_{13})$
ORCC	$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{15} h_{15}$
ORCP	$\dot{W}_{ORCP} = \dot{m}_{10} (h_{11} - h_{10})$

جدول ۲- روابط موازنه انرژی استفاده شده برای اجزای سیستم مورد

مطالعه	رابطه‌ی بالانس انرژی
HRSG	$\dot{E}_1 + \dot{E}_5 = \dot{E}_2 + \dot{E}_6 + \dot{E}_D$
ST	$\dot{E}_6 = \dot{E}_7 + \dot{W}_{ST} + \dot{E}_D$
SC	$\dot{E}_7 + \dot{E}_8 = \dot{E}_4 + \dot{E}_9 + \dot{E}_D$
SP	$\dot{E}_4 + \dot{W}_{SP} = \dot{E}_5 + \dot{E}_D$
Eva	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{11} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{12} + \dot{E}_D$
ORCT	$\dot{E}_{12} = \dot{E}_{13} + \dot{W}_{ORCT} + \dot{E}_D$
ORCC	$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{14} = \dot{E}_{10} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_D$
ORCP	$\dot{E}_{10} + \dot{W}_{ORCP} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_D$

برای مدل‌سازی الکترولایزر الکالین در این مطالعه از روش توسعه یافته توسط Ulleberg استفاده شده است [21]. این روش بر مبنای روابط تئوری ترمودینامیک و تجربی الکتروشیمیایی اساس شده است. در این روش، ولتاژ سلول‌های الکترولایزر به شکل تابعی از چگالی جریان و نیز دما و فشار کاری بیان قابل تخمین است [22]:

$$U_{cell} = U_{rev} + [(r_1 + d_1) + r_2 T + d_2 P] I \quad (3)$$

$$+ s \log \left[\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right) I + 1 \right] \quad (4)$$

در این روابط $r_1, r_2, d_1, d_2, s, t_1, t_2, t_3$ ثوابتی هستند که در جدول ۳ لیست شده است. همچنین T, P, I, G و F به ترتیب بیانگر دما، فشار، چگالی جریان، انرژی آزاد گیبس و ثابت فارادی می‌باشد.

جدول ۳- ثوابت استفاده شده برای مدل‌سازی الکترولایزر [22]

ثابت	d_2	d_1	r_2	r_1
مقدار	$4/47137 \times 10^{-7}$	$-3/12996 \times 10^{-6}$	$6/88874 \times 10^{-9}$	$4/45153 \times 10^{-5}$
ثابت	t_3	t_2	t_1	s
مقدار	15/24178	2/00181	-0/01539	0/33824

نهایتاً، دبی مولی هیدروژن تولید شده توسط هر سلول الکترولایزر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{I}{2F} \quad (5)$$

در این رابطه η_F راندمان فارادی می‌باشد که در مرجع [17] به طور کامل توضیح داده شده است. در واقع راندمان فارادی نسبت هیدروژن تولیدی در حالت واقعی به حالت نظری می‌باشد. برای محاسبه‌ی گرمای تولید شده توسط هر سلول الکترولایزر از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [17]:

$$\dot{Q}_{cell} = I N_{cell} (U_{cell} - U_m) \quad (6)$$

$$U_m = \frac{\Delta H}{2F} \quad (7)$$

در رابطه‌ی فوق N_{cell} معرف تعداد سلول‌های الکترولایزر می‌باشد. ناگفته نماند که نود درصد گرمای تولیدی در الکترولایزر به عنوان گرمای قابل استفاده در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه منبع انرژی سیستم مورد مطالعه گازهای خروجی از واحد توربین گاز می‌باشد، راندمان انرژی و انرژی کل سیستم با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید. در تعریف راندمان قانون دوم، محتوای انرژی هیدروژن تولید شده و نیز انرژی مربوط به گرمای تولید شده به عنوان انرژی محصول و انرژی فیزیکی گازهای خروجی از واحد توربین گاز به عنوان کل انرژی در دسترس در نظر گرفته می‌شود.

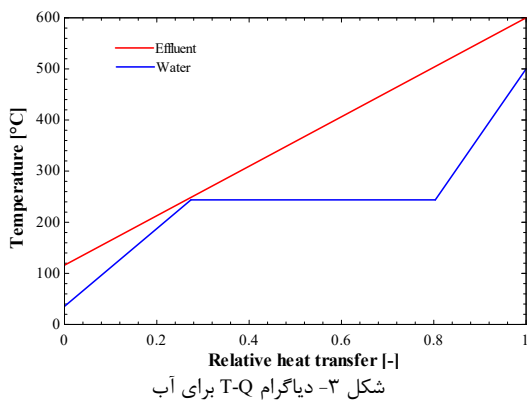
$$\eta_I = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{Q}_{gen}}{\dot{m}_1 h_1} \quad (8)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_{H_2} + \dot{E}_{heat}}{\dot{E}_1} \quad (9)$$

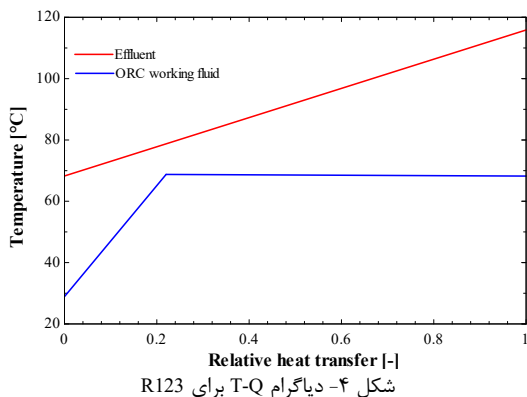
در این روابط، \dot{Q}_{gen} و \dot{E}_{heat} به ترتیب بیانگر مقدار انرژی و انرژی مربوط به گرمای قابل استفاده‌ی تولید شده در الکترولایزر می‌باشد.

۴- نتایج

قبل از پرداختن به نتایج بدست آمده در این مطالعه، نتایج ناشی از مدل‌سازی انجام گرفته برای قسمت الکترولایزر با داده‌های موجود در ادبیات فن مقایسه می‌شود. الکترولایزر استفاده شده در رفرنس [22] از ۱۲ سلول تشکیل شده است که هر سلول دارای مساحت ۱۰۰۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد و به شکل سری به هم وصل شده‌اند. شکل ۲ مقایسه‌ی ولتاژ محاسبه شده برای الکترولایزر با نتایج گزارش شده در رفرنس [22] را نشان می‌دهد. تمامی پارامترهای طراحی یکسان در نظر



شکل ۳- دیاگرام T-Q برای آب

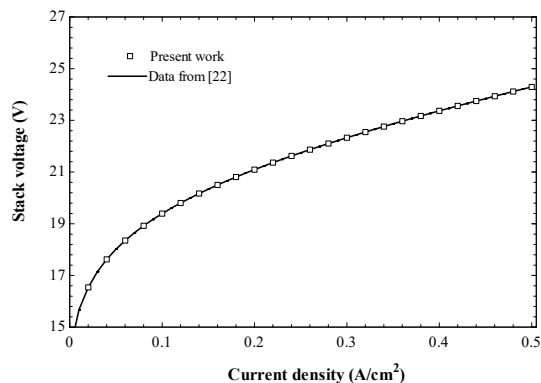


شکل ۴- دیاگرام T-Q برای R123

مطابق جدول ۵، با کاهش دمای منبع انرژی (محصولات احتراق توربین گاز)، توان کل تولیدی و به تبع آن نرخ هیدروژن تولیدی نیز کاهش می‌یابد. از آنجا که توان ورودی به الکترولایزر کاهش می‌یابد، گرمای تولیدی توسط الکترولایزر نیز کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش راندمان قانون اول و دوم با کاهش دمای گازهای خروجی از توربین گاز قابل توجه است. چنانچه نتایج نشان می‌دهد، با افزایش دمای منبع انرژی علیرغم افزایش فشار کاری چرخه بخار، فشار کاری چرخه رانکین آلی کاهش می‌یابد. همین رفتار برای توان تولیدی توسط چرخه بخار و چرخه رانکین آلی مشاهده می‌شود. باید توجه کرد که در دماهای بالای منبع انرژی، مقدار انرژی بیشتری توسط چرخه بخار جذب شده و نهایتاً انرژی کمتری برای راه‌اندازی واحد چرخه رانکین آلی باقی می‌ماند.

با توجه به اینکه شرایط کاری فرض شده برای الکترولایزر همواره ثابت است، بنابراین راندمان انرژی و انرژی این واحد با تغییر در دمای گازهای خروجی از واحد توربین گاز تغییری نکرده است. شایان ذکر است در تعریف راندمان انرژی و انرژی برای الکترولایزر تنها هیدروژن تولیدی به عنوان محصول در نظر گرفته شده است. اثر تغییر در چگالی جریان الکترولایزر در رفتار ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی به ازای دمای منبع انرژی 600°C در شکل ۵ آورده شده است. چنانچه شکل ۵ نشان می‌دهد، با تغییر در چگالی جریان راندمان انرژی کل همواره افزایش می‌یابد و این در حالیست که راندمان انرژی دارای مقدار بیشینه می‌باشد.

گرفته شده است. مطابق شکل ۲، همخوانی خوبی بین نتایج ناشی از مدل‌سازی و نتایج گزارش شده در ادبیات فن وجود دارد.



شکل ۲- نتایج بدست آمده برای الکترولایزر و داده‌های موجود در مرجع [22]

با توجه به اینکه محتوای انرژی و انرژی موجود در گازهای خروجی از واحد توربین گاز به عنوان منبع اصلی برای راه‌اندازی سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است، جدول ۴ میزان انرژی و انرژی موجود در محصولات احتراق را برای دماهای مختلف نشان می‌دهد. برای محاسبه مقادیر گزارش شده در این جدول از خواص ترمودینامیکی مواد موجود در نرم‌افزار Engineering Equation Solver استفاده شده است.

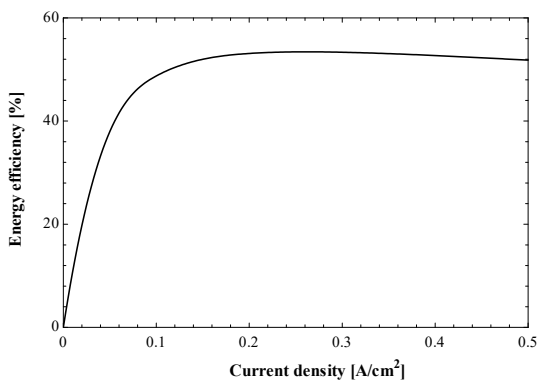
جدول ۴- محتوای انرژی و انرژی محصولات احتراق خروجی از واحد توربین گاز به عنوان منبع انرژی سیستم مورد مطالعه

دمای محصولات احتراق	450°C	525°C	600°C
انرژی محصولات احتراق	40867 kW	48235 kW	55723 kW
انرژی فیزیکی محصولات احتراق	16895 kW	21518 kW	26466 kW

نتایج ناشی از تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان مورد مطالعه در جدول ۵ برای دماهای مختلف گازهای خروجی از واحد توربین گاز گزارش شده است. در این جدول، فشار کاری بهینه برای چرخه رانکین و چرخه رانکین آلی متناسب با دمای گازهای خروجی از واحد توربین گاز محاسبه شده است. برای چرخه رانکین، کمینه مقدار کیفیت جریان خروجی از توربین ۹۰٪ لحاظ شده است. همچنین بیشینه مقدار دمای بخار ورودی به توربین بخار 500°C در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب دیاگرام تغییر فاز آب و R123 را به عنوان سیال کاری چرخه رانکین و رانکین آلی به ازای دمای محصولات احتراق 600°C نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج ناشی از تحلیل ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه

دمای محصولات احتراق	۴۵۰ °C	۵۲۵ °C	۶۰۰ °C
فشار بالای چرخه رانکین (بار)	۲۰	۳۵	۳۵
فشار بالای چرخه رانکین آلی (بار)	۵/۶	۵/۶	۳/۶
توان تولیدی چرخه بخار (مگاوات)	۸/۸	۱۲/۲	۱۵/۷
توان تولیدی چرخه رانکین آلی (مگاوات)	۰/۸۲	۰/۸	۰/۴
دبی هیدروژن تولیدی (تن بر سال)	۱۳۰۸	۱۷۶۹	۲۱۹۱
حرارت تولیدی توسط الکترولیزر (مگاوات)	۳/۲	۴/۳	۵/۴
راندمان انرژی الکترولیزر (%)	۵۱/۸	۵۱/۸	۵۱/۸
راندمان انرژی الکترولیزر (%)	۵۱	۵۱	۵۱
راندمان انرژی کل (%)	۲۰	۲۲/۹	۲۴/۶
راندمان انرژی کل (%)	۳۲/۵	۳۴/۶	۳۴/۹



شکل ۶- اثر تغییر در چگالی جریان الکترولیزر در راندمان الکترولیزر (به ازای دمای منبع انرژی ۶۰۰ °C)

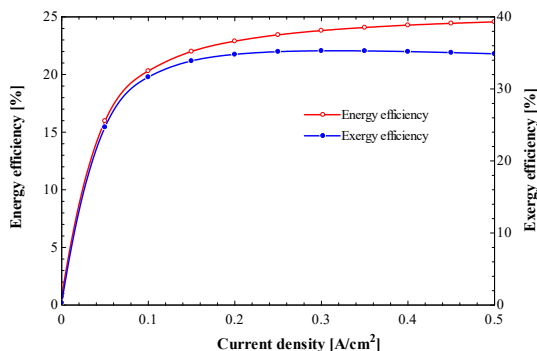
در اینجا موضوعی که بسیار اهمیت دارد این است که در تعیین شرایط کاری الکترولیزرهای آلکالین شرایط بهینه از دیدگاه اقتصادی در مقایسه با شرایط بهینه از دیدگاه ترمودینامیکی و راندمان اولویت بیشتری دارد. اگر بنا بر این باشد که چگالی جریان پایین و متناظر با راندمان بهینه به عنوان شرایط کاری الکترولیزر انتخاب شود باید تعداد سلول‌های الکترولیزر را افزایش داد تا با آن چگالی جریان پایین مقدار مورد نظر هیدروژن تولید شود که به لحاظ اقتصادی اصلا مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از بازیاب اتلاف حرارتی توربین گازهای نصب شده در تاسیسات دریایی برای تولید هیدروژن و گرما توسط الکترولیزر آلکالین استفاده شده است. در واقع الکترولیزرهای آلکالین به دلیل برگشت‌ناپذیری‌های داخلی بخشی از توان مصرفی را به گرما تبدیل می‌کنند و با توجه به دما کاری این الکترولیزر، گرما تولید شده در آن می‌تواند به عنوان گرمای مورد نیاز برای فرآیندهای پالایش در تاسیسات دریایی استفاده شود. به منظور شبیه‌سازی واقعی توربین گاز، محصولات احتراق خروجی از توربین گاز در گستره‌ی دمایی مختلفی در نظر گرفته شد تا نشانگر شرایط کاری توربین در بارهای مختلف باشد. همچنین تاثیر تغییر در چگالی جریان الکترولیزر در رفتار ترمودینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج بدست آمده از مطالعه‌ی حاضر به قرار زیر است:

- به ازای دمای گازهای خروجی ۴۵۰، ۵۲۵ و ۶۰۰ درجه سلسیوس از واحد توربین گاز دبی هیدروژن تولیدی به ترتیب ۱۳۰۸، ۱۷۶۹ و ۲۱۹۱ تن بر سال می‌باشد.
- به ازای دمای گازهای خروجی ۴۵۰، ۵۲۵ و ۶۰۰ درجه سلسیوس از واحد توربین گاز آهنگ گرمای تولیدی به ترتیب ۳/۲، ۴/۳ و ۵/۴ مگاوات می‌باشد.
- بیشینه مقادیر راندمان انرژی و انرژی ۲۴/۵۷ و ۳۵/۳٪ به ترتیب در چگالی جریان‌های 0.31 A/cm^2 و 0.05 A/cm^2 قابل حصول است.
- با افزایش دمای گازهای خروجی از واحد توربین گاز راندمان انرژی و انرژی سیستم افزایش می‌یابد.

در چگالی‌های جریان بالا مقدار گرمای تولید شده در الکترولیزر افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش راندمان قانون اول سیستم می‌شود. این درحالیست که مقدار انرژی متناظر با گرمای تولیدی قابل توجه نبوده و راندمان قانون دوم افزایش محسوس نمی‌دهد. بیشینه مقدار راندمان انرژی ۳۵/۳٪ در چگالی جریان 0.31 A/cm^2 قابل حصول است. طبیعی است که با افزایش چگالی جریان برگشت-ناپذیری‌های داخلی الکترولیزر سبب افزایش تولید حرارت شده و بخش بیشتری از توان ورودی را به گرما تبدیل می‌کند. این مهم سبب افزایش راندمان انرژی کل سیستم با افزایش چگالی جریان می‌شود. این درحالیست که محتوای انرژی گرمای تولید شده توسط الکترولیزر در مقایسه با توان مصرفی الکترولیزر پایین بوده و با افزایش چگالی جریان راندمان انرژی تا حدی افزایش یافته و سپس روند نزولی پیدا می‌کند. این مساله در تاثیر چگالی جریان در راندمان خود الکترولیزر نیز دیده می‌شود که در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵- اثر تغییر در چگالی جریان الکترولیزر در راندمان قانون اول و دوم سیستم پیشنهادی (به ازای دمای منبع انرژی ۶۰۰ °C)

Hydrogen Energy, vol. 44, no. 33, pp. 17443–17459, Jul. 2019.

- [13] Abdin Z. and Mérida W., Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis. *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1068–1079, Sep. 2019.
- [14] Saba S. M., Müller M., Robinius M. and Stolten D., The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *Int. J. Hydrogen Energy* vol. 43, no. 3, pp. 1209–1223, 2018.
- [15] Proost J., State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 9, pp. 4406–4413, Feb. 2019.
- [16] Nami H., Ertesvåg I. S., Agromayor R., Riboldi L. and Nord L. O., Gas turbine exhaust gas heat recovery by organic Rankine cycles (ORC) for offshore combined heat and power applications - Energy and exergy analysis. *Energy*, vol. 165, 2018.
- [17] Sánchez M., Amores E., Abad D., Rodríguez L. and Clemente-Jul C., Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3916–3929, Feb. 2020.
- [18] Nami H., Mahmoudi S. M. S. and Nemati A., Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO₂ and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO₂). *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 1315–1330, Jan. 2017.
- [19] Kotas T. J., *The exergy method of thermal plant analysis*. Elsevier, 2013.
- [20] Bejan A. and Tsatsaronis G., *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, 1996.
- [21] Ulleberg Ø., Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 21–33, Jan. 2003.
- [22] Sánchez M., Amores E., Rodríguez L. and Clemente-Jul C., Semi-empirical model and experimental validation for the performance evaluation of a 15 kW alkaline water electrolyzer. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 45, pp. 20332–20345, Nov. 2018.

۶- نمادها

کمبرسور هوا	AC
محفظه احتراق	CC
توربین گاز	GT
مولد بخار	HRSG
توربین بخار	ST
چگالنده چرخه بخار	SC
پمپ چرخه بخار	SP
تبخیرکن	Eva
توربین چرخه‌ی رانکین آلی	ORCT
چگالنده چرخه‌ی رانکین آلی	ORCC
پمپ چرخه‌ی رانکین آلی	ORCP

۷- مراجع

- [1] Yadav D. and Banerjee R., Economic assessment of hydrogen production from solar driven high-temperature steam electrolysis process. *J. Clean. Prod.*, vol. 183, pp. 1131–1155, May 2018.
- [2] Akrami E., Nemati A., Nami H. and Ranjbar F., Exergy and exergoeconomic assessment of hydrogen and cooling production from concentrated PVT equipped with PEM electrolyzer and LiBr-H₂O absorption chiller. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 2, 2018.
- [3] Nami H., Mohammadkhani F. and Ranjbar F., Utilization of waste heat from GTMHR for hydrogen generation via combination of organic Rankine cycles and PEM electrolysis. *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, 2016.
- [4] Zhang H., Wang L., Van herle J., Maréchal F. and Desideri U., Techno-economic comparison of green ammonia production processes. *Appl. Energy*, vol. 259, p. 114135, Feb. 2020.
- [5] Siddiqui O. and Dincer I., A new solar energy system for ammonia production and utilization in fuel cells. *Energy Convers. Manag.*, vol. 208, p. 112590, Mar. 2020.
- [6] Nami H., Ranjbar F. and Yari M., Methanol synthesis from renewable H₂ and captured CO₂ from S-Graz cycle – Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental (4E) analysis. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 48, pp. 26128–26147, 2019.
- [7] Nami H., Ranjbar F. and Yari M., Thermodynamic assessment of zero-emission power, hydrogen and methanol production using captured CO₂ from S-Graz oxy-fuel cycle and renewable hydrogen. *Energy Convers. Manag.*, vol. 161, pp. 53–65, 2018.
- [8] Schmidt O., Gambhir A., Staffell I., Hawkes A., Nelson J. and Few S., Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 52, pp. 30470–30492, Dec. 2017.
- [9] “Mathiesen B. V., Ridjan I., Connolly D., Nielsen M. P., Vang Hendriksen P., Bjerg Mogensen M., Højgaard Jensen S., and Dalgaard Ebbesen S., *Technology data for high temperature solid oxide electrolyser cells, alkali and PEM electrolyzers*. 2013.
- [10] Rezaei M., Naghdi-Khozani N. and Jafari N., Wind energy utilization for hydrogen production in an underdeveloped country: An economic investigation. *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1044–1057, Mar. 2020.
- [11] Sadeghi S., Ghandehariun S. and Rosen M. A., Comparative economic and life cycle assessment of solar-based hydrogen production for oil and gas industries. *Energy*, vol. 208, p. 118347, Oct. 2020.
- [12] Yilmaz C., Koyuncu I., Alcin M. and Tuna M., Artificial Neural Networks based thermodynamic and economic analysis of a hydrogen production system assisted by geothermal energy on Field Programmable Gate Array. *Int. J.*