

تحلیل ترمودینامیکی سیکل ترکیبی تولید هیدروژن هسته‌ای و محاسبه بازده سیکل

احسان خانه‌آباد، گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

حسین رضا دارابی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

آبتین عطایی، گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

چکیده

در این مقاله سیکل ترکیبی تولید هیدروژن هسته‌ای با کولپینگ و ترکیب دو سیکل متفاوت راکتور اتمی با خنک‌کننده گازی HTGR و سیکل ترموشیمیایی کور - مس معرفی و بررسی شده است. سپس، تحلیل ترمودینامیکی سیکل با کدنویسی اختصاصی در نرم‌افزار اییز^۱ انجام شده است. نتایج حل تحلیلی و همزمان معادلات پایستگی جرم و انرژی بسیار امیدوارکننده بوده، به طوری که برای دمای متعارف مورد استفاده در راکتورهای دمابالا با خنک‌کننده گازی، یعنی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد راندمان مطلوب ۳۶/۵ درصد محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: هیدروژن، راکتور اتمی دمابالا، خنک‌کننده گازی، HTGR، EES، سیکل ترموشیمیایی

مقدمه

کنترل قرار دارند تا با سیاست‌گذاری‌های لازم از مصرف غیرضرور آنها جلوگیری شود. با عنایت به اشراف جهان بر آینده منابع انرژی فسیلی و علم بر این موضوع که این منابع روبه اتمام‌اند و در آینده نزدیک توان تأمین انرژی مورد نیاز بشر را نخواهند داشت و همچنین تولید آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، مدتی است که دانشمندان و محققان سرتاسر جهان بر یافتن حامل انرژی غیروابسته منابع فسیلی متمرکز شده‌اند. نتایج این تحقیقات چندساله خلاصه شده است در هیدروژن؛ حاملی که به‌وفور در طبیعت یافت

امروزه جهان با استفاده گسترده از منابع انرژی فسیلی روبروست، منابعی که بهره‌برداری از آنها به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای، سبب وقوع پدیده‌ای به نام گرمایش جهانی و بروز آثار مخرب زیست محیطی شده است و، علاوه بر آن، در آینده‌ای نه‌چندان دور پایان می‌یابند و بشر را، با تمام وابستگی که به خود دارد، تنها خواهند گذاشت [۱ - ۳]. امروزه دیگر حامل‌های انرژی فسیلی به‌وفور و ارزان در دسترس نیستند و از طرفی به دلیل تولید دی‌اکسید کربنی - که به‌هنگام مصرف تولید می‌کند - به شدت تحت



می‌شود و از ارزش حرارتی بالایی برخوردار است و استفاده از آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌همراه ندارد. به‌همین دلیل است که در این چند دهه مفهومی جدید به‌نام عصر اقتصاد هیدروژنی مورد توجه محققان و دانشمندان قرار گرفته است [۴]. در حال حاضر هیدروژن عمدتاً به‌عنوان یک ماده شیمیایی مهم در فرایندهای پتروشیمیایی مطرح است [۵]. این ماده به‌کمک روش‌هایی چون SMR^۲ و یا گازشازس از زغال سنگ^۳ تولید می‌شود [۵ - ۷] که کاملاً وابسته به منابع انرژی فسیلی است و در هنگام تولید، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌همراه دارد. کاملاً مشخص است که با اتکا به این روش‌ها، در آینده نه‌چندان دور قسمت عمده‌ای از توان تولید هیدروژن مورد نیاز خود را نیز از دست خواهیم داد. بدین سبب، امروزه روش‌های جدیدی برای تولید هیدروژن ارائه شده است که براساس تجزیه آب به اکسیژن و هیدروژن عمل نموده و لذا به منابع فسیلی نیاز ندارند. در این میان، الکترولیز دمابالا و سیکل‌های ترموشیمیایی دارای توان مناسبی برای تولید تجاری هیدروژن می‌باشند. البته سیکل‌های ترموشیمیایی از جذابیت بیشتری برخوردارند [۸ - ۱۰] و امیدوارکننده‌ترین روش برای تولید هیدروژن غیروابسته به منابع انرژی فسیلی، دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه محسوب می‌شوند [۱۱]. لازم به‌ذکر است آنچه روش‌های ترموشیمیایی تولید هیدروژن ارائه نموده‌اند، قطع وابستگی به منابع فسیلی، به‌عنوان ماده‌ای که تجزیه شده و هیدروژن را در اختیار قرار می‌دهد، بوده است و این سیکل‌ها همچنان به حرارت ناشی از سوزاندن حامل‌های انرژی فسیلی نیازمند می‌باشند. به بیان دیگر، هرچند از میزان وابستگی به منابع فسیلی کاسته شده است، اما همچنان وابستگی اساسی به این منابع وجود دارد. به‌منظور رفع این نقیصه، دانشمندان و محققان سعی در جایگزینی منابع حرارتی مورد نیاز با انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و یا انرژی هسته‌ای نموده‌اند. پریگر و همکارانش انرژی خورشیدی را به‌عنوان منبع حرارتی جایگزین برای منابع انرژی فسیلی

پیشنهاد نموده و تحقیقاتی درباره این منبع تجدیدپذیر انجام داده‌اند [۱۰]. همچنین فلتر تحلیل ترمودینامیکی سیکل ترموشیمیایی تولید هیدروژن را برای استفاده از انرژی خورشیدی انجام داده است [۱۲] و جاشای و همکارانش بازده اگزرتیک آن را محاسبه نموده‌اند. برخی از محققان نیز استفاده از حرارت ژئوترمال را گزینه مناسبی دانسته‌اند و بر این اساس سیکل‌های ترموشیمیایی مناسب جهت کوپل‌شدن با انرژی حرارتی ژئوترمال را شناسایی کرده‌اند [۱۱، ۱۳ و ۱۴]. با این وجود، به‌دلیل محدودیت‌های حاکم بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیاری از دانشمندان بر روی استفاده از انرژی هسته‌ای به‌منظور تأمین حرارت مورد نیاز سیکل‌های ترموشیمیایی متمرکز شده‌اند [۱۵ - ۱۶] و به‌دلیل مزایای گسترده این منبع حرارتی، چشم‌انداز بلندمدت تولید هیدروژن جهان را هیدروژن هسته‌ای دانسته‌اند [۱۷]. از میان سیکل‌های ترموشیمیایی، یکی از امیدوارکننده‌ترین آنها؛ یعنی سیکل ترموشیمیایی کلر - مس به‌عنوان یک سیکل دمابالین مورد توجه ویژه قرار گرفته است. اوهان مراحل گوناگون این سیکل را جهت کوپل‌شدن با حرارت هسته‌ای به‌تفصیل شرح داده است [۱۸ - ۲۲]. همچنین ناتر و همکارانش نیز حرارت مورد نیاز برای فرایندهای متنوع سیکل کلر - مس را به‌دست آورده‌اند [۲۳] و لوپس و همکارانش عملکرد این سیکل را از نظر هزینه‌های تولید بررسی کرده‌اند [۲۴ - ۲۵]. در این مقاله ضمن ارائه و تشریح سیکلی جدید برای تولید هیدروژن هسته‌ای (کلر - مس و راکتور HTGR) تحلیل ترمودینامیکی سیکل نیز توسط نرم‌افزار ایپز، که امکان حل تحلیلی (بدون استفاده از روش‌های عددی) و همزمان معادلات متنوع مهندسی را برای محققان فراهم نموده است، به انجام رسیده است.

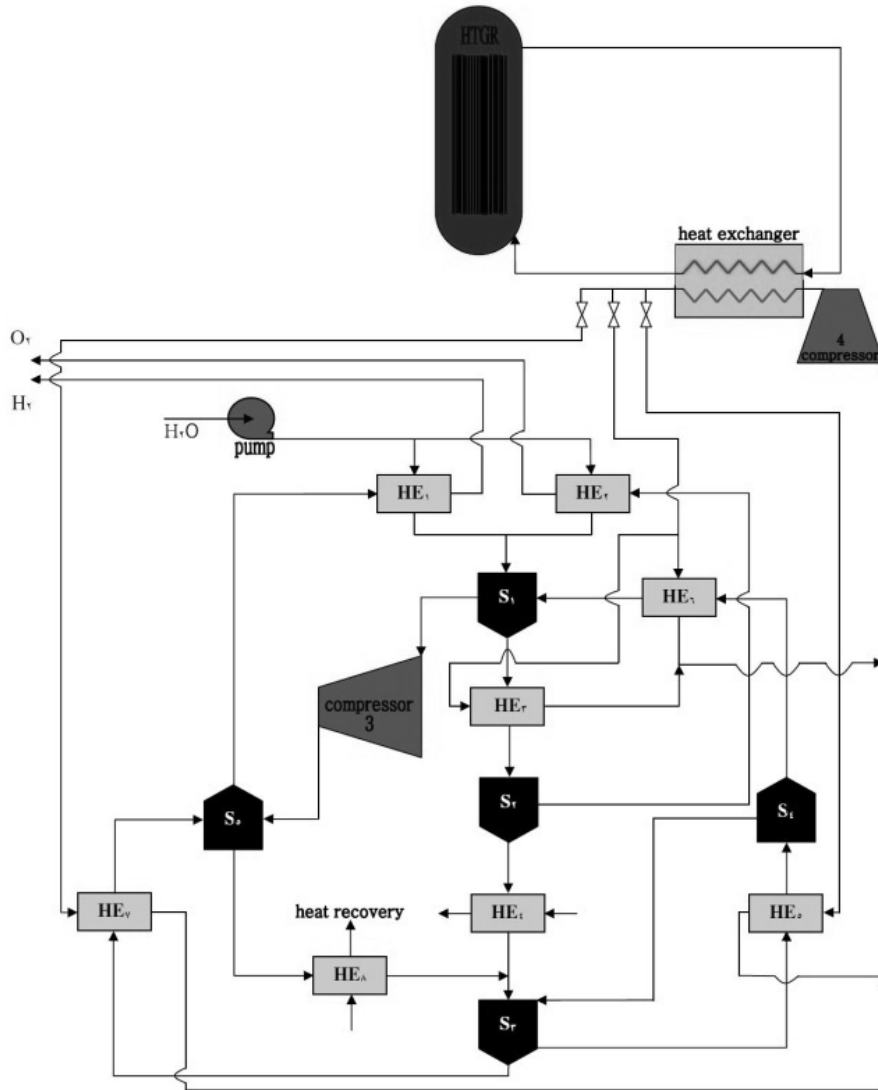
معرفی سیکل

سیکل ترکیبی هیدروژن هسته‌ای حاصل از ترکیب دو سیکل ترموشیمیایی کلر - مس و راکتور اتمی HTGR



می‌باشد. نمایی شماتیک از این سیکل در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این سیکل از یک قسمت تولید حرارت، که راکتور اتمی در

آن واقع است، و مجموعه‌ای از مبدل‌ها، کمپرسورها و راکتورهای شیمیایی مربوط به سیکل ترموشیمیایی کلر - مس تشکیل شده است.



شکل ۱. سیکل هیدروژن هسته‌ای کلر - مس - HTGR

سیکل ترموشیمیایی کلر - مس

سیکل ترموشیمیایی کلر - مس سیکلی است متشکل از پنج فرایند شیمیایی گوناگون که با تأمین حرارت و الکتریسیته مورد نیاز فرایندهای آن می‌توان هیدروژن موجود در آب را از آن جدا کرد. ماکزیمم دمای مورد نیاز در این سیکل ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [۲۶]. مراحل گوناگون این سیکل در جدول ۱ تشریح شده است.

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، معادله ۵ معادله اصلی سیکل کلر - مس است که طی آن هیدروژن در دمای میانگین ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد از واکنش میان مس و اسید کلریدریک تولید می‌شود. با دقت در این واکنش مشاهده می‌شود که هیچ اثری از آب در بین مواد اولیه مشاهده نمی‌شود. با کمی دقت مشاهده می‌شود که آب در واکنش شماره ۱ حاضر است و در تماس با

$\text{CuCl}_2(\text{s})$ اسید کلریدریک و $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s})$ را تولید می‌نماید. واکنش شماره ۳ دیگر ماده اولیه مورد نیاز برای واکنش شماره ۱؛ یعنی مس، را تولید می‌نماید و واکنش‌های ۲ و ۴ شرایطی را ایجاد می‌کنند که یک سیکل ترموشیمیایی پدید آید و تنها آب، حرارت و مقداری الکتروسیته ورودی‌های سیکل ترموشیمیایی تولید هیدروژن باشند.

راکتور اتمی با خنک‌کننده گازی دمابالا

در این نوع راکتور از خنک‌کننده‌های گازی استفاده می‌شود. از میان مواد موجود هلیوم (چون گازی بی اثر است و خصوصیات انتقال حرارت خوبی دارد) به صورت گسترده به کار گرفته شده است. چون ساختار این راکتورها اجازه دسترسی به دماهای بالا را فراهم نموده است، به آنها راکتورهای با خنک‌کننده گازی دمابالا^۴ گفته می‌شود. راکتورهای اولیه ساخته شده از این نوع می‌توانستند دمای هلیوم خروجی را تا ۷۸۵ درجه سانتی‌گراد برسانند. پس از آن ژاپن با ارتقاء HTGRها توانست دمای هلیوم خروجی را تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش دهد. امروزه راکتورهای با خنک‌کننده گازی دمابالا، به صورت متعارف دمایی بین ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد را تامین می‌کنند [۲۷].

نحوه عملکرد جرم و انرژی در سیکل ترکیبی هیدروژن هسته‌ای

همان‌گونه که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، هلیوم با اخذ گرمای تولیدشده توسط فرایند شکافت در داخل راکتور HTGR از آن خارج شده و وارد یک مبدل حرارتی می‌شود. در این مبدل، حرارت مورد نیاز سیکل ترموشیمیایی کلر - مس را تحویل گاز هلیوم عامل انتقال حرارت در سیکل ترموشیمیایی می‌دهد و مجدداً به منظور دریافت حرارت وارد راکتور اتمی می‌شود. در سوی دیگر، جریان مواد شیمیایی در سیکل کلر - مس بدین صورت می‌باشد: آب به‌عنوان

ماده اولیه وارد سیکل می‌شود و فشار آن توسط یک پمپ تا فشار طراحی افزایش پیدا می‌کند. پس از آن از دو مبدل حرارتی ۱ و ۲ عبور و محتوی گرمای هیدروژن و اکسیژن تولیدشده طی مراحل ۲ و ۵ را بازیابی می‌کند و به بخار آب با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تبدیل می‌شود و پس از آن وارد راکتور شیمیایی مرحله یک شده و در واکنش با $\text{CuCl}_2(\text{s})$ دو ماده شیمیایی $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s})$ و $\text{HCl}(\text{g})$ را تولید می‌نماید.

گاز $\text{HCl}(\text{g})$ تولیدشده پس از عبور از یک کمپرسور و افزایش فشار و دمای لازم، وارد راکتور شیمیایی ۵ می‌شود و در آنجا طی واکنش با $\text{Cu}(\text{s})$ هیدروژن را تولید می‌نماید و $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s})$ تولیدشده در مرحله ۱ با عبور از مبدل حرارتی ۳ و افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد راکتور شیمیایی ۲ می‌شود و در آنجا با از دست دادن اکسیژن خود به $\text{CuCl}(\text{l})$ تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه $\text{CuCl}(\text{l})$ دمای بالایی دارد، از مبدل حرارتی ۴ عبور نموده تا دمایش کاهش پیدا کند (با کاهش دما CuCl از فاز مایع به فاز جامد تغییر وضعیت می‌دهد) و به دمای طراحی الکترولایزر مرحله ۳ برسد. در این مرحله $\text{CuCl}(\text{s})$ در تماس با آب، $\text{Cu}(\text{s})$ مورد نیاز مرحله ۵ و CuCl_2 مورد نیاز مرحله ۱ را تولید می‌نماید. با توجه به اینکه CuCl_2 مورد نیاز مرحله یک در فاز جامد است، لذا $\text{CuCl}_2(\text{aq})$ از مبدل حرارتی ۵ عبور نموده تا با افزایش دما به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آب موجود در CuCl_2 بخار شده و پس از آن با عبور از فلش درایر مرحله ۴، CuCl_2 جامد از بخار آب جدا گردد. بخار آب جدا شده در این مرحله برای شرکت در فرایند تولید $\text{CuCl}_2(\text{aq})$ مجدداً به مرحله ۳ باز می‌گردد و CuCl_2 جامد پس از عبور از مبدل حرارتی ۶ و افزایش دما به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای مورد نیاز واکنش مرحله ۱) راهی راکتور شیمیایی مرحله ۱ می‌شود.

در طرف دیگر $\text{Cu}(\text{s})$ تولیدشده در مرحله ۳ جهت حضور در واکنش تولید هیدروژن (شماره ۵) نیاز به افزایش دما تا حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد را دارد و به همین منظور از مبدل

ذخیره‌سازی و یا مصرف ارسال می‌گردد و $\text{CuCl}_{(l)}$ با عبور از مبدل حرارتی شماره ۸ از حرارت خود را از دست داده و وارد فاز جامد می‌شود تا در واکنش شماره ۳ به‌عنوان ماده اولیه حضور داشته باشد.

حرارتی شماره ۷ عبور داده می‌شود و پس از آن وارد راکتور شیمیایی واکنش شماره ۵ شده و در تماس با $\text{HCl}_{(g)}$ ، هیدروژن و $\text{CuCl}_{(l)}$ را تولید می‌کند. هیدروژن تولیدشده پس از پس دادن محتوی حرارت خود به واحدهای

جدول ۱. مراحل گوناگون چرخه ترموشیمیایی کلر-مس

مرحله	واکنش شیمیایی اولیه	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱	$2\text{CuCl}_{2(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{CuO} \cdot \text{CuCl}_{2(s)} + 2\text{HCl}_{(g)}$	۴۰۰
۲	$\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_{2(s)} \rightarrow 2\text{CuCl}_{(l)} + 1/2\text{O}_{2(g)}$	۵۰۰
۳	$4\text{CuCl}_{(s)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CuCl}_{2(aq)} + 2\text{Cu}_{(s)}$	۲۵ تا ۸۰
۴	$\text{CuCl}_{2(aq)} \rightarrow \text{CuCl}_{2(s)}$	کمتر از ۱۰۰
۵	$2\text{Cu}_{(s)} + 2\text{HCl}_{(g)} \rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{CuCl}_{(l)}$	۴۳۰ تا ۴۷۵

۴. دبی جرمی و فشار هلیوم خنک‌کننده در خروج از راکتور به‌ترتیب ۱۵۰ کیلوگرم در ثانیه و ۱/۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

۵. کلیه واکنش‌ها در فشار ۱۰۱ کیلوپاسکال انجام می‌شوند.

در تحلیل انجام‌شده توسط ایزز اکثر آنتالپی‌های مورد نیاز از بانک موجود در نرم‌افزار استخراج شده است و در مواردی که در بانک اطلاعاتی یافت نشود، از معادله شومات [۱۹] برای یافتن آنتالپی‌ها استفاده شده است:

$$\bar{h} - \bar{h}_0 = (A \times T) + \left(B \times \frac{T^2}{2} \right) + \left(C \times \frac{T^3}{3} \right) + \left(D \times \frac{T^4}{4} \right) - \left(E \times \frac{1}{T} \right) + F - H$$

در جدول ۳ حرارت‌های مورد نیاز برای مبدل‌های حرارتی و واکنش‌های شماره ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

نتایج

نتایج حاصل از نرم‌افزار ایزز نشان می‌دهد که بازده انرژی سیکل ترکیبی هیدروژن هسته‌ای در دمای متعارف

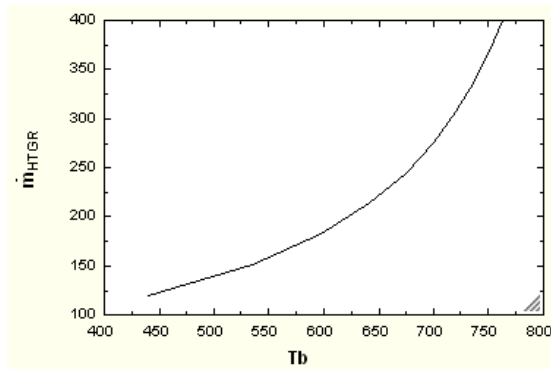
تحلیل ترمودینامیکی سیکل ترکیبی هیدروژن هسته‌ای

در این بخش، تحلیل ترمودینامیکی سیکل توسط نرم‌افزار ایزز انجام شده است. معادلات بالانس جرم و انرژی برای واحدهای تولیدکننده و نیازمند کار و انرژی براساس شکل شماره ۲ در این نرم‌افزار به‌کارگیری شده‌اند تا ضمن بررسی وضعیت ترمودینامیکی سیکل بازده انرژی سیکل نیز محاسبه شود. مبدل‌های حرارتی شماره ۱، ۲، ۴ و ۸ و راکتورهای شیمیایی مراحل ۳، ۴ و ۵ یا نیاز به دریافت حرارت ندارند و یا توسط بازیابی داخلی حرارت نیاز به انرژی گرمایی آنان تامین شده است؛ لذا در این شکل مشاهده نمی‌شوند. به‌علاوه، در تحلیل به‌عمل آمده موارد ذیل به‌عنوان پیش‌فرض در نظر گرفته شده‌اند:

- سیکل در شرایط استاندارد محیطی (فشار اتمسفر و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) عمل می‌کند.
- کلیه فرایندها حالت پایدار - جریان پایدار^۵ می‌باشند.
- دمای متوسط هلیوم خروجی از HTGR، ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

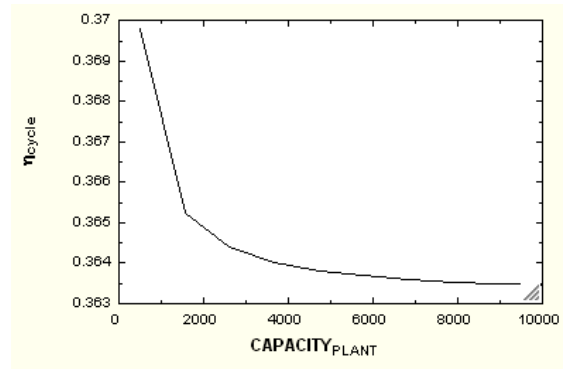
راکتورهای HTGR در حدود ۳۶/۵ درصد می‌باشد که بازدهای مطلوب در عرصه تولید هیدروژن محسوب می‌گردد. خصوصاً اگر عواید ناشی از عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین عدم وابستگی به گازهای گلخانه‌ای را در نظر بگیریم، اهمیت راندمان به‌دست آمده دو چندان می‌گردد. شکل ۳ تغییر راندمان سیکل را با اعمال تغییر در ظرفیت تولید هیدروژن (بر حسب تن بر ساعت) نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در ظرفیت ثابت تولید هیدروژن هرچه

دبی جرمی هلیوم در HTGR افزایش یابد تأثیری بر بازده انرژی نداشت و صرفاً دمای ورودی به راکتور T_b دچار تغییر می‌گردد این امر در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در دبی جرمی ثابت هلیوم در گذر از راکتور اتمی، در صورتی که دمای هلیوم در خروج از راکتور با تغییر همراه باشد بازده سیکل مطابق با شکل ۵ دچار تغییر خواهد شد.

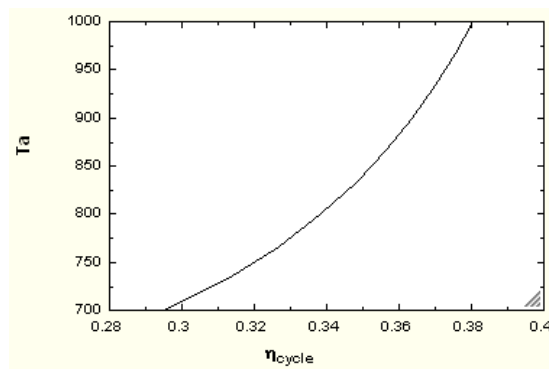


شکل ۴. تغییرات دمای هلیوم قبل از ورود به راکتور

با تغییر در دبی جرمی هلیوم



شکل ۳. تغییرات بازده سیکل با تغییر در ظرفیت تولید هیدروژن



شکل ۵. تغییر در بازده سیکل

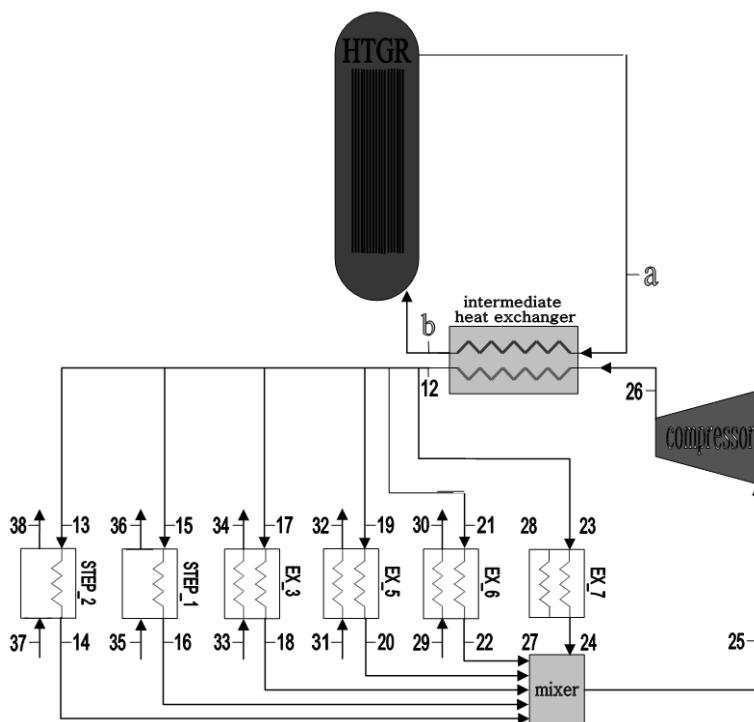
با تغییر در دمای هلیوم خروجی از راکتور

نتیجه‌گیری

تولید هیدروژن با استفاده از گرمای حاصل از واکنش‌های شکافت به انجام رسیده در یک راکتور اتمی می‌تواند تولید هیدروژن را به‌صورت تجاری و با بازدهی بالاتر از روش‌های غیروابسته به منابع انرژی فسیلی فعلی، که

عمدتاً قابلیت رقابت در عرصه تجاری را نیز ندارند، به‌همراه داشته باشد. این امر بسیار امیدبخش خواهد بود و می‌تواند یکی از مهم‌ترین راه‌های قطع وابستگی به منابع انرژی فسیلی به‌شمار آید. به هرجهت اگر می‌خواهیم به منابع

انرژی فسیلی وابسته نیاشیم چاره‌ای به جز حرکت به‌سوی
 روش‌های جایگزین، که یکی از مهم‌ترین آنها تولید
 هیدروژن هسته‌ای است، نداریم.



شکل ۲. نمودار جریان تحلیل شده در نرم‌افزار ایزز

جدول ۲. آنتالپی تشکیل و ثابت‌های معادله شومات برای برخی اجزاء شیمیایی

Chemical	A	B	C	D	E	F	G	H	\bar{h}_f (kJ/kmol)
CuCl(S)	75.2710	-26.8321	25.6916	-7.3580	-1.8478	-	174.6644	-	-138.072
Cu(S)	17.7289	28.0987	-31.2529	13.9724	0.0686	-6.0566	47.8959	0.0000	0
CuCl ₂ (S)	70.2188	23.3613	-14.8687	4.0539	-0.3662	-	184.6378	-	-205.850
CuO(S)	48.56494	7.498607	-0.055980	0.013851	-0.760082	-	94.85128	-	-156.060
CuCl(l)	66.9440	-3.70E-10	2.17E-10	-3.90E-11	-9.18E-12	-	174.7653	-	-131.180

جدول ۳. حرارت مورد نیاز تجهیزات در قسمت ترموشیمیایی سیکل

Component	ΔH (kJ/mol H ₂)	ΔT (°C)
Step 1	120.2	400
Step 1	125.5	500
HE3	20.8	400-500
HE5	57.6	20-150
HE6	61.3	150-400
HE7	32.5	20-450

- Journal of Hydrogen Energy
2001;26(3):185-90
- [10] Pregger T, Graf D, Krewitt W, Sattler C, Roeb M, Moller S. prospects of solar thermal hydrogen production processes. International Journal of Hydrogen Energy 2009;34:4256-67
- [11] Balta MT, Dincer I, Hepbasli A. Thermodynamic assessment of geothermal energy use in hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 2009;34(7):2925-39
- [12] Fletcher EA. Solar thermal processing: a review. Journal of Solar Energy Engineering 2001;123:63-74
- [13] Balta MT, Dincer I, Hepbasli A. Potential methods for geothermal-based hydrogen production. In: proceedings of the international conference on hydrogen production (ICH2P-09). May 03-06, 2009. Oshawa, Canada: University of Ontario Institute of Technology. P. 225-42
- [14] Balta MT, Dincer I, Hepbasli A. Geothermal-based hydrogen production using thermochemical and hybrid cycles: a review and analysis. International Journal of Hydrogen Energy.
- [15] Bertel E, Nuclear energy- the hydrogen economy. Nucl Energy Agency News 2004;22:10-3
- [16] Duffey R, Green atoms. Power Energy 2005;2(2):8-12
- [17] Marchetti C. Long term global vision of nuclear-produced hydrogen. Int J Nucl Hydrogen Prod Appl 2006;1(1):13-9.
- [18] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. The oxygen production step of a cooper-chlorine thermochemical water decomposition cycle for hydrogen production: energy and exergy analysis.
- [1] Veziroglu TN, Sahin S. 21st century's energy: hydrogenenergy system. Energy Conversion and Management 2008;49(7): 1820-31.
- [2] Dincer I. Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems. International Journal of Energy research 2007;31:29-55
- [3] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. Exergoeconomic analysis of a thermochemical copper-chlorine cycle for hydrogen production using specific exergy cost method. Thermochemica Acta;2008; doi:10.1016/j.tca.2009.08.008.
- [4] Bose T, Malbrunot P. Hydrogen: facing the energy challenges of the 21st century. Paris: John Libbey Eurotext;2007.
- [5] Rosen MA. Advances in hydrogen production by thermochemical water decomposition: A review. International Journal of Energy 2010;35:1068-76
- [6] Kothari R, Buddhi D, Sawhney RL. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. Renewable and sustainable Energy Reviews 2008;12:553-63
- [7] Evan BCR, Allen RWK. A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy 2005;30:809-19
- [8] Beghi GE. A decade of research on thermochemical hydrogen at the joint research center, ISPRA. International Journal of Hydrogen Energy 1986;11(12):761-71
- [9] Funk JE. Thermochemical hydrogen production: past and present. International

International Journal of Hydrogen Energy
2009;34(9):4136-45

- [26] Balta MT, Dincer I, Hepbasli A. Energy and exergy analysis of new four-step copper-chlorine cycle for geothermal-based hydrogen production. International Journal of Energy 2010;35:3263-72
- [27] MARSHALL AC, An assessment of Reactor types for thermochemical hydrogen production. Sandia National Laboratories.2002
- [28] Orhan MF. Conceptual design, analysis and optimization of nuclear-based hydrogen production via copper-chlorine thermochemical cycle: A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Engineering and Applied Science, Mechanical Engineering Program, University of Ontario Institute of Technology 2011

پی نوشت

1. Engineering Equation Solver (EES)
2. steam-methane reforming
3. coal gasification
4. HTGR
5. steady state-steady flow

Chemical Engineering Science
2009;64:860-9

- [19] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. Energy and exergy analysis of the fluidized bed of a copper-chlorine cycle for nuclear-based hydrogen production via thermochemical water decomposition. Chemical Engineering Research and Design 2009;87:684-94
- [20] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic analysis of the copper production step in a copper-chlorine cycle for hydrogen production. Thermochemical Acta 2008;480:22-9
- [21] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. Energy and exergy assessments of the hydrogen production step of a copper-chlorine thermochemical water splitting cycle driven by nuclear-based heat. International Journal of Hydrogen Energy 2008;33:6456-66
- [22] Orhan MF, Dincer I, Rosen MA. Energy and exergy analysis of the drying step of a copper-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. International Journal of Exergy 2009;6(6):793-808
- [23] Naterer GF, Gabriel K, Wang ZL, Daggupati VI, Gravelins R. Thermochemical hydrogen production with a copper-chlorine cycle. I. Oxygen release from copper oxychloride decomposition. International Journal of Hydrogen Energy 2008;33:5439
- [24] Lewis MA, Masin JG, O'Hare PA. Evaluation of alternative thermochemical cycles – part I. The methodology. International Journal of Hydrogen Energy 2009;34(9):4115-24
- [25] Lewis MA, Ferrandon Ms, Tatterson DF, Mathias P. Evaluation of alternative thermochemical cycle – part III further development of the Cu-Cl cycle.

