

طراحی و تحلیل یک سیکل ترکیبی جدید به منظور افزایش راندمان راکتورهای سریع خنک شونده با سدیم مذاب

فرزاد چوبدار رحیم، ابراهیم عابدی جندانی*

سازمان انرژی اتمی، معاونت توسعه کاربرد پرتوها، راکتور تحقیقاتی تهران

چکیده:

در کنار مشکلات فنی بهره برداری، مسائل مربوط به ایمنی و خطرات امنیتی مربوط به استفاده های نظامی از پلوتونیم، پایین بودن راندمان ترمودینامیکی راکتورهای سریع خنک شونده با سدیم، به خصوص در مقایسه با نیروگاه های سیکل ترکیبی فسیلی با توجه به هزینه های بالای ساخت، یکی از دلایل عدم رقابت پذیری این راکتورها به شمار می رود. در این مقاله، با استفاده از یک سیکل ترکیبی CO_2 -Steam-Air و استفاده از دو توربین گاز با دو نوع سوخت متفاوت که یکی هسته ای و دیگری فسیلی است، یک پیکربندی جدید جهت بالا بردن راندمان راکتورهای سریع طراحی و تحلیل شده است. برای تحلیل سیکل یک برنامه ویژه با استفاده از MatLab نوشته و بکار گرفته شده است.

کلیدواژه: راکتورهای سریع، سدیم مذاب، سیکل ترکیبی، راندمان ترمودینامیکی.

مقدمه:

راکتورهای هسته ای با طیف نوترونی سریع (یا به اختصار راکتورهای سریع) از دهه ۱۹۷۰ میلادی، همزمان با رشد تکنولوژی نیروگاه های هسته ای آب خنک (ترمال) و رشد قیمت اورانیوم مورد توجه کشورهای مختلف دارنده تکنولوژی هسته ای قرار گرفتند. با اینکه طرح های مختلفی از راکتورهای هسته ای سریع وجود داشته است، اما راکتورهای سریع خنک شونده با سدیم مذاب در این زمینه پیشرو بوده اند. کشورهای فرانسه، روسیه (شوروی سابق)، ایالات متحده، ژاپن، انگلیس تا سال ۲۰۱۰ در مجموع ۵۰ میلیارد دلار صرف توسعه راکتورهای هسته ای سریع و به خصوص راکتورهای خنک شونده با سدیم کرده اند. اما در دهه ۱۹۹۰ توجه به این راکتورها کاهش یافت. [۱]

عمده دلایل شکست در تجاری سازی راکتورهای سریع در آن دوره را می توان پایین آمدن قیمت اورانیوم، خطرات بالقوه ایمنی نظیر آتش سوزی و واکنش سدیم با بخار آب مانند نشت سدیم و آتش سوزی در راکتور



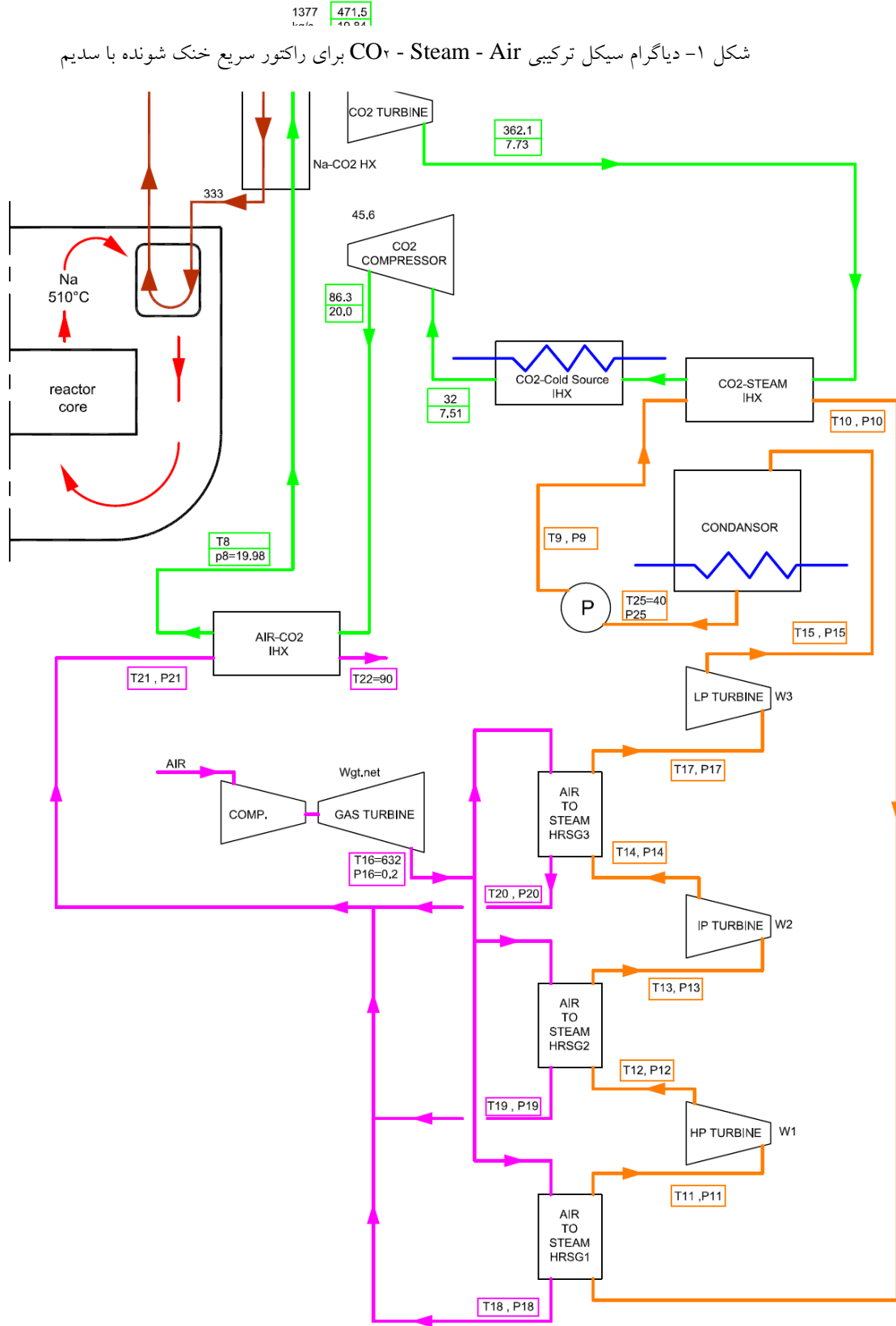
Monju در ژاپن، هزینه بالای ساخت این نیروگاه‌ها و در نهایت نگرانی‌های ناشی از استفاده نظامی از پلوتونیوم و ساخت سلاح‌های هسته‌ای بر شمرده [۱] در سال‌های اخیر و همزمان با رشد تکنولوژی در زمینه مواد هسته‌ای و با کم شدن خطر تولید پلوتونیوم با درجه ساخت سلاح، توجه دوباره به راکتورهای سریع معطوف شده است [۲] و از میان طرح‌های مربوط به نسل چهارم نیروگاه‌های هسته‌ای نیز چند طرح مربوط به همین نوع از راکتورهاست [۳].

با توجه به دانش کسب شده از تجارب قبلی و شناخت موجود از راکتورهای سریع خنک‌شونده با سدیم، توسعه این نوع راکتورها با توجه به مرتفع شدن مشکلات فنی آن‌ها با گذشت زمان، نسبت به سایر طرح‌های نسل چهارم نیروگاه‌های هسته‌ای محتمل‌تر به نظر می‌رسد [۴] برای مثال راکتور PFBR که در هند طراحی و ساخته شده است، از نوع راکتورهای خنک‌شونده با سدیم است [۵] یکی از مشکلات عمده راکتورهای خنک‌شونده با سدیم مربوط به واکنش شدید بین بخار آب موجود در سیکل بخار توربین و سدیم خنک‌کننده قلب راکتور است [۴] یکی از طرح‌های پیشنهاد شده برای رفع این مشکل استفاده از یک سیکل گازی برایتون برای خنک کردن سدیم و استفاده از توربین گاز برای تولید قدرت است [۶] در این طرح از گازهایی مانند هلیوم (He) و دی‌اکسیدکربن (CO_2) می‌توان استفاده نمود که با سدیم به سختی واکنش می‌دهند. با این وجود استفاده از سیکل ترمودینامیکی برایتون برای خنک کردن سدیم و تولید قدرت مشکل راندمان نسبی پایین این نوع راکتورها را حل نکرده و در بهترین طراحی‌ها راندمان آن به حدود ۳۹٪ خواهد رسید که هرچند نسبت به راکتورهای آب‌خنک امروزی راندمان خوبی است اما در مقایسه با راکتورهای سیکل ترکیبی فسیلی از راندمان پایینی برخوردار است [۴].

معرفی سیکل ترکیبی جدید:

در این مقاله با استفاده از یک سیکل ترکیبی و استفاده از یک توربین گازی فسیلی در کنار توربین گازی هسته‌ای با گاز CO_2 افزایش راندمان سیکل ترمودینامیکی بررسی و تجزیه و تحلیل شده است. راکتور خنک‌شونده با سدیم که در اینجا مورد تحلیل قرار گرفته است راکتور Advanced Burner Test Reactor (ABTR) است که در Argonne National Laboratory (ANL) طراحی و تحلیل شده است [۴] برای قسمت توربین گاز فسیلی نیز از توربین GE ۹۰۰۱H که یک توربین گاز طراحی شده مخصوص سیکل‌های ترکیبی است استفاده شده است [۷] جدول شماره ۱ مشخصات این توربین را نشان می‌دهد. برای قسمت بخار سیکل از یک سیکل رانکین سه فشاره استفاده گردیده است. راندمان ایزنتروپیک هر سه توربین بخار برابر ۸۵٪ و راندمان کمپرسوز گاز CO_2 برابر ۸۰٪ در نظر گرفته شده است [۸] شکل شماره ۱ پیکربندی سیکل مورد نظر را نشان می‌دهد. گازهای خروجی از توربین گاز GE ۹۰۰۱H در دمای $6۳۲^{\circ}C$ وارد HRSG در سه فشار متفاوت می‌شوند.

شکل ۱- دیاگرام سیکل ترکیبی CO₂ - Steam - Air برای راکتور سریع خنک شونده با سدیم



جدول ۱- مشخصات توربین گاز GE ۹۰۰۱H

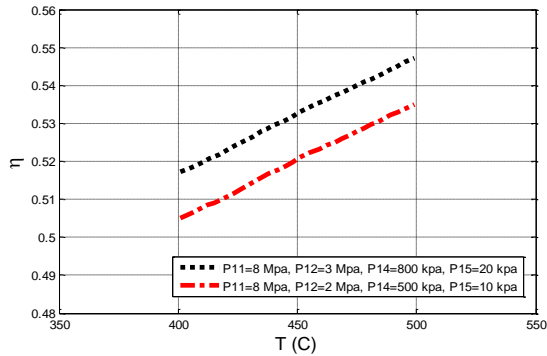
۴۸۰	توان توربین (MW)
۳۳۰	توان مکانیکی خروجی (MW)
۳۹,۵	راندمان حرارتی (%)
۶۸۵	دبی گاز خروجی (kg/s)
۱۷۰۰	دمای گاز ورودی (K)
۹۰۵	دمای گاز خروجی (K)
۲۳,۳	نسبت فشار

گازهای حاصل احتراق توربین گاز فسیلی در خروجی از HRSG وارد یک مبدل حرارتی دیگر شده و با انتقال گرما به گاز CO₂ تا دمای ۹۰ °C خنک شده و سپس وارد اتمسفر می‌شوند. گاز CO₂ با فشار ۲۰,۰MPa از کمپرسور خارج شده، بعد از پیش گرم شدن توسط گاز خروجی توربین گاز فسیلی وارد مبدل حرارتی هسته‌ای شده و پس از گرفتن حرارت از سدیم سیکل ثانویه راکتور هسته‌ای تا دمای ۴۷۱,۵ °C گرم می‌شوند. سپس وارد یک توربین گاز شده تا با تولید انرژی مکانیکی تا دمای ۳۶۲ °C و فشار ۷,۷۳MPa خنک شده و در ادامه وارد یک مبدل حرارتی شده و باقیمانده گرمای خود را به آب پمپ شده در دمای کندانسور (۴۰ °C) می‌دهد. CO₂ در خروج از این مبدل گرمایی در حدود ۵۰ °C خواهد داشت که در یک خنک کننده دیگر تا دمای ۳۲ °C خنک شده و وارد کمپرسور می‌گردد. بنابراین سیکل گازی CO₂ در دو مبدل گرمایی با هریک از دو سیکل هوا و بخار تبادل انرژی دارد.

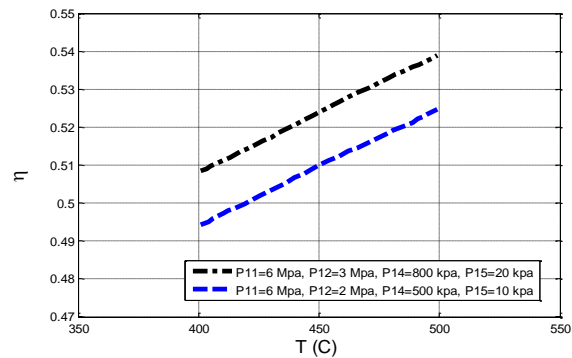
برای تحلیل ترمودینامیکی این سیکل ترکیبی از یک برنامه نوشته شده به زبان MatLab استفاده گردیده است. این برنامه طوری طراحی شده تا بتواند تمام فشارها و دماهای سیکل را تحلیل نماید و بهترین حالت را برای راندمان کلی سیکل به دست آورد.

در اینجا برای بررسی سیکل و همچنین بررسی میزان تأثیر دبی سیال عامل هریک از توربین‌های گاز بر روی راندمان کلی سیکل، پارامترهای مربوط به سیکل نیروگاه‌های هسته‌ای شامل دبی جریان و دمای گاز CO₂ در نقاط مختلف سیکل مشخص و ثابت فرض گردیده است. دما و فشار گاز CO₂ در ورودی و خروجی توربین گاز و در ورودی کمپرسور برابر و یا نزدیک به دما و فشارهای مشابه در طرح پیشنهادی ANL [۲] در نظر گرفته شده است.

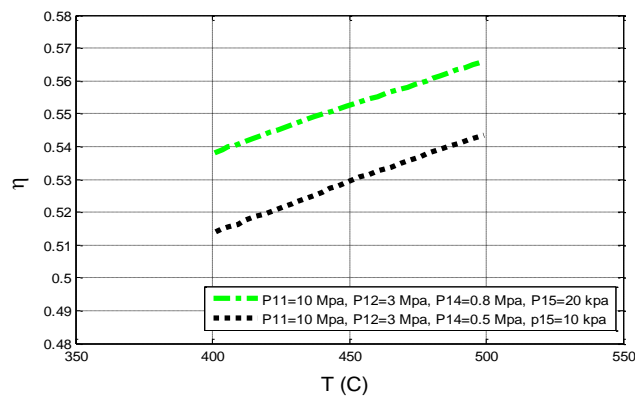
دما و فشار در نقاط مختلف سیکل بخار رانکین به صورت پارامتری قابل تغییر بوده است راندمان کلی سیکل ترکیبی بر حسب دمای بخار خروجی از HRSG و برای فشارهای مختلف در نمودارهای شماره ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همچنین قابل ذکر است در این آنالیز دمای ورودی به هر سه توربین بخار برابر فرض گردیده است.



نمودار ۲- تغییرات راندمان کل برحسب دمای
HRSR در فشار ۸ مگاپاسکال برای توربین



نمودار ۱- تغییرات راندمان کل برحسب دمای
HRSR در فشار ۶ مگاپاسکال برای توربین



نمودار ۳- تغییرات راندمان کل برحسب دمای
HRSR در فشار ۱۰ مگاپاسکال برای توربین

نتیجه‌گیری:

همانگونه که در نمودارهای ۱ تا ۳ دیده می‌شود با بالا رفتن دمای ورودی به توربین های بخار راندمان کلی سیکل بالا می‌رود. اما نکته ای که در اینجا وجود دارد این است که بالا رفتن دمای ورودی به توربین های بخار مستلزم افزایش دبی گاز خروجی از توربین گاز فسیلی است. این موضوع به معنی افزایش سهم منبع گرمایش فسیلی در سیکل است که به دلیل بالا بردن مصرف سوخت فسیلی و همچنین افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای نیروگاه مطلوب نمی‌باشد.

نتایج این محاسبه نشان می‌دهد از جهت فنی بالا بردن راندمان ترمودینامیکی یک نیروگاه هسته‌ای از نوع راکتور سریع خنک‌شونده با سدیم مذاب با استفاده از یک سیکل ترکیبی برایتون-رانکین و کمک گازهای داغ یک توربین گازی فسیلی تا حدود راندمان سیکل های ترکیبی نیروگاههای حرارتی فسیلی امروزی [۹]

امکانپذیر است. مزیت این سیکل نسبت به سیکل های حرارتی فسیلی پایین بودن میزان سوخت فسیلی مورد نیاز و همچنین کاهش میزان گازهای گلخانه ای خروجی از نیروگاه است. از نظر اقتصادی بررسی و تحلیل این سیکل و به دست آوردن نقطه بهینه سهم تأمین میزان گرما توسط هریک از منابع گرم هسته ای و فسیلی در سیکل نیازمند یک بررسی جداگانه است.

مراجع:

- ۱- Thomas B. Cochran, et al. , “Fast breeder reactors program: history & status”, International panel on fissile materials, Research Report ۸, PP ۵-۱۳, February ۲۰۱۰
- ۲- Task Group on Advanced Reactors Experimental Facilities(TAREF) ,“Experimental Facilities for Sodium Fast reactor Safety Studies” , Organization for Economic Co-operation & Development(OECD), Nuclear Energy Agency , PP ۱۳-۱۶ & ۱۹-۲۴ , ۲۰۱۱.
- ۳- Robert J. Goldston ,“Climate change, nuclear power and nuclear proliferation: magnitude matter” , Princeton Plasma Physics Laboratory , PPPL ۴۵۰۲, PP ۱۳-۱۴ , ۲۰۱۰.
- ۴- Y. I. Chang, P. J. Finck , C Grandy , “Advanced Burner Test Reactor Pre-conceptual Design Report” , Argonne National Laboratory, ANL-AFCI-۱۷۳, PP ۲۹ & ۷۹-۸۲ , ۲۰۰۶.
- ۵- S.L. mannan, S.C. Chetal, Baldev Raj, S.B. Bhoje , “Slection of material for prototype fast breeder reactor” , Indira Gandhi centre for Atomic Research, PP -۴ , ۲۰۱۰.
- ۶- J.J. Siencki, et al. , “SStAR lead-cooled, small modular fast reactor with nitride fuel” , Organization for Economic Co-operation & Development(OECD), Nuclear Energy Agency , PP ۹۷-۱۱۰ , ۲۰۰۹.
- ۷- Wolfgang Sanz , “Gas Turbine Technology” , Lecture At the Department of Aerospace Engineering , Middle East Technical University, Ankara, ۲۰۰۸.
- ۸- Eleni T. Bonataki and K.C. Giannakoglou , “preliminary design of optimal combined cycle power plants through evolutionary algorithms” , Optimization and control with application to indusrial and societal problems, Eurogen ۲۰۰۵, PP ۳-۴ , ۲۰۰۵.
- ۹- T. Srinivas , B.V. Reddy , A. V. S. S. K. S. Gupta, “rametric simulation of combined cycle power plant: a case study” , International journal of thermodynamics , vol. ۱۴(No. ۱), pp. ۱۹-۳۶, ۲۰۱۱