نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی

J. Energy Conversion (JEED)
Volume: 12, Issue:1, 2025: 67-74

دوره ۱۲، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، ص: ۷۴-۶۷

شبیه سازی و تحلیل عملکرد انرژی و اگزرژی سیکل ترکیبی تولید توان با استفاده از نرم افزار ASPEN HYSYS

فرزین حسینی‌فرد[۱]، مصطفی امیدی بیدگلی [۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سیستم انرژی ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، f.h.fard2016@gmail.com

* ۲-استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد بادرود، دانشگاه آزاد اسلامی، بادرود، ایران mostafaomidibidgoli@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۶

چکیده

یکی از نیازهای اولیه بشر تأمین برق آن می‌باشد و نیروگاه‌های برق این نیاز اساسی را تأمین می‌کنند. یکی از انواع این نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشند. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نوعی از نیروگاه هستند که از دو یا چند چرخه حرارتی بهره می‌گیرند و مصرف سوخت کم‌تری نسبت به دیگر نیروگاه‌ها دارند. به‌همین جهت، در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Aspen Hysys v11 شبیه‌سازی یک سیکل ترکیبی با ظرفیت ۶۶ مگاوات که سیال واسط آن Pentane می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از بررسی‌های پایه‌ای در کنار تحلیل انرژی در مباحث ترمودینامیک صورت می‌گیرد، تحلیل اگزرژی می‌باشد. تحلیل اگزرژی به‌طورکلی عملیاتی بودن مسئله را مورد بررسی قرار می‌دهد. با بررسی این تحلیل برای این مطالعه مشخص گردید که میانگین راندمان اگزرژی سیستم حدود ۸۳ درصد می‌باشد که بیانگر شرایط بهینه سیستم از لحاظ اگزرژی می‌باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** mostafaomidibidgoli@gmail.com

کلمات کلیدی: نیروگاه، سیکل ترکیبی، انرژی، اگزرژی، راندمان، اسپن هایسیس

نحوه استناد به این مقاله فرزین حسینی‌فرد, مصطفی امیدی بیدگلی. شبیه سازی و تحلیل عملکرد انرژی و اگزرژی سیکل ترکیبی تولید توان با استفاده از نرم افزارASPEN HYSYS. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴; ۱۲(۱): ۶۷-۷۴.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

۱- مقدمه

مطابق با گزارش‌های بین‌المللی سازمان‌های انرژی، در سال گذشته تقاضای انرژی بین ۵۰ تا ۸۰ درصد افزایش داشته است. پاسخ به این تقاضا باید همراه با کاهش آلایندگی باشد [۱]. در سال‌های اخیر، کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید هدف اصلی صنایع بزرگ بوده است [۲]. افزایش بسیار زیاد انتشار کربن در سال‌های اخیر باعث مشکلات زیادی برای اقلیم کره زمین مانند گرم‌شدن کره زمین، تخریب لایه ازن، آتش‌سوزی مراتع و جنگل‌ها و هم‌چنین باران‌های اسیدی شده است [۳][۴][۵][۶].

در این بین، استفاده از تکنولوژی‌های کاهش انتشار کربن [۱۷][۱۶] و بهینه‌سازی سیستم‌ها بسیار موردتوجه قرار گرفته است [۱۸][۱۹]. در این مسیر، دولت‌ها کارهای بسیاری انجام داده‌اند مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر [۷] یا بهره‌گیری از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی [۸] به‌طوری‌که کشوری مانند سنگاپور ۹۶ درصد از نیروگاه‌ها از نوع سیکل ترکیبی می‌باشد [۹]. ترکیبی‌سازی سیکل یک روش کارآمد در بهبود راندمان و کاهش مصرف انرژی می‌باشد [۱۰][۱۱].

هم‌چنین از دیگر مزایای آن می‌توان به تعمیر و نگهداری آسان‌تر نسبت به دیگر سیکل‌ها اشاره نمود [۱۲]. همان‌طور که اشاره شد، ترکیبی‌سازی یک روش کارآمد می‌باشد، اما باید در کنار تحلیل انرژی، تحلیل اگزرژی هم مورد بحث و بررسی قرار گیرد تا منابع ناکارآمد سیستم شناسایی شود و در جهت رفع این ناکارآمدی و افزایش بهره‌وری پیش رفت [۱۴،۱۳].

از این‌رو، هدف از این مطالعه بررسی ظرفیت انرژی و اگزرژی یک سیکل تولید توان ترکیبی و هم‌چنین شناسایی اجزای سیکل که تخریب اگزرژی زیادی دارند, است تا بتوان راندمان و بهره‌وری سیستم را افزایش داد. تحلیل اگزرژی یکی از تحلیل‌های پایه‌ای در تحلیل‌های ترمودینامیکی حرارتی می‌باشد [۱۶].

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار اسپن‌هایسیس شبیه‌سازی سیکل تولید توان تولید بخار صورت گرفته است که با توجه به ظرفیت بالای این نرم‌افزار در شبیه‌سازی سیالات آلی این انتخاب صورت گرفته است. یکی از تفاوت‌های این مطالعه با دیگر مطالعات, استفاده از سیال آلی پنتان می‌باشد که کم‌تر در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته و تأثیر انتخاب این سیال آلی بر تغییر برگشت‌ناپذیری‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار اسپن‌هایسیس و تحت معادلات پایا، شبیه‌سازی یک سیکل ترکیبی با ظرفیت توان تولیدی ۶۶ مگاوات مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، با بررسی تحلیل اگزرژی برای این سیکل، راندمان و هم‌چنین تخریب اجزا تحقیق شد.

تحلیل اگزرژی یکی از بررسی‌های دقیق در حوزه ترمودینامیک است، به‌طوری‌که با بررسی کیفیت تبدیل انرژی، عوامل برگشت‌ناپذیری شناسایی می‌شود. در بررسی تحلیل انرژی و اگزرژی که مرتبط با قانون اول و دوم ترمودینامیک است، در ابتدا فرضیاتی درنظر گرفته می‌شود که حائز اهمیت است. در جدول (۱)، خلاصه‌ای از این فرضیات برای سیکل مورد بررسی ارائه شده است.

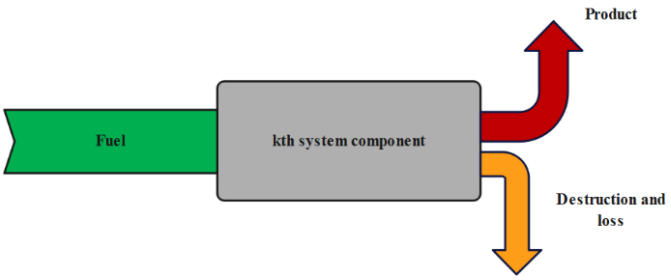
در قسمت بررسی شرایط سیستم از منظر اگزرژی، دیدگاهی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، دیدگاه "سوخت-محصول" می‌باشد. در این دیدگاه، جریان سوخت وارد حجم کنترل شده، و پس از اعمال یا دریافت کار بر روی آن، جریان محصول از سیستم خارج می‌شود (شکل ۱). هم‌چنین، جریان تخریب دیگر جریان خروجی از سیستم می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

جدول ۱: پارامتر های کلیدی سیکل تولید توان

پارامتر	مقدار	واحد
دمای هوا	۲۵	^oC
فشار هوا	۱۰۱	Kpa
دمای سوخت	۲۵	^oC
فشار سوخت	۲۰۰	Kpa
راندمان توربین	۷۵	٪
راندمان پمپ	۷۵	٪
نوع مبدل	پوسته-لوله	-
نوع سوخت	گاز طبیعی	-
نوع بخار	HP-400	^oC



شکل ۱: شماتیک تحلیل اگزرژی بر پایه دیدگاه سوخت-محصول

محاسبه بالانس جرم و انرژی برای تحلیل انرژی و اگزرژی که از روابط زیر استخراج می‌شود، پیش‌نیاز این تحلیل می‌باشد. هم‌چنین شرایط اولیه برای سیستم در فشار ۱ بار و دمای ۲۹۸ درجه کلوین برقرار است.

$$\sum \dot{m}_{in}\, h_{in} = \sum \dot{m}_{out}\, h_{out} \quad [۱۸] \ (۱)$$

$$\sum \dot{m}_{in}\, h_{in} - \sum \dot{m}_{out}\, h_{out} - \dot{W} + \dot{Q} = 0 \quad [۱۸] \ (۲)$$

$$Ex_{system} = Ex_{physical} + Ex_{chemical} \quad [۱۹] \ (۳)$$

$$Ex_{fuel} = Ex_{product} + Ex_{destruction} \quad [۱۹] \ (۴)$$

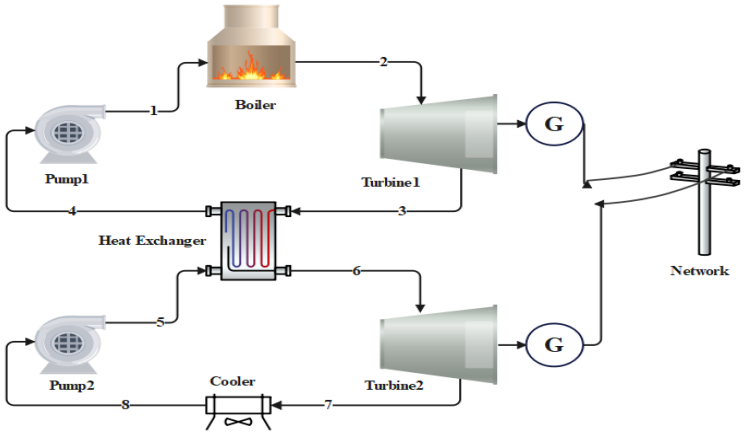
$$E_n = \frac{Ex_{product}}{Ex_{fuel}} \quad [۱۹] \ (۵)$$

در معادلات فوق پارامتر های مختلفی استفاده شده است. $\dot{m}_{in}$ بیانگر دبی ورودی به سیستم و h_{in} نشان‌دهنده آنتالپی جریان ورودی به سیستم است. در معادله‌ی (۳) اگرزژی سیستم از اگزرژی فیزیکی و شیمیایی جریان تشکیل شده است که در معادله (۴)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

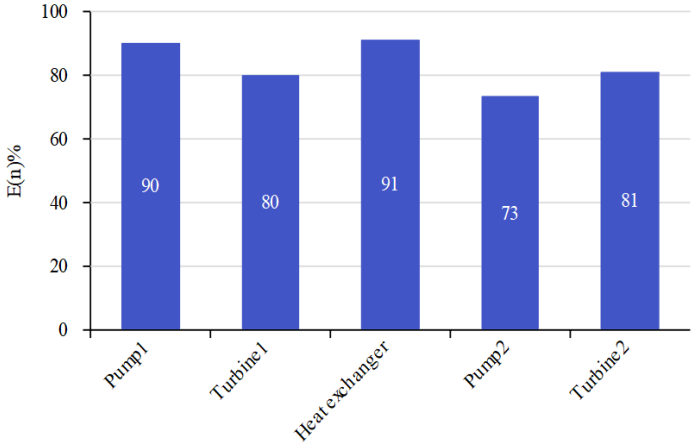
برای محاسبه اگزرژی سوخت از معادله بالانس اگزرژی شامل اگزرژی محصول و تخریب اگزرژی استفاده می‌شود. در معادله (۵) برای محاسبه راندمان اگزرژی استفاده می‌شود به‌طوری‌که با نسبت اگزرژی محصول به سوخت این پارامتر قابل محاسبه است.



شکل۲: جریانات فرآیندی سیکل تولید توان

۳- بحث و نتایج

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، تحلیل اگزرژی یکی از تحلیل‌های پایه‌ای به همراه تحلیل انرژی است. تحلیل انرژی به بررسی حفظ انرژی در سیستم می‌پردازد و از نظر معادلات قانون اول انرژی را بررسی می‌کند، اما تحلیل اگزرژی به میزان کار مفید و راندمان سیستم توجه دارد. حتی اگر سیکل از نظر انرژی پایدار باشد، باید از منظر اگزرژی نیز دارای راندمان بالا و تخریب قابل قبولی باشد. در نمودار زیر، تحلیل اگزرژی برای اجزای سیکل تولید توان موردبررسی قرار گرفته است. راندمان بالای اگزرژی در هر سیکل نشان‌دهنده حداقل بازگشت‌ناپذیری‌های سیستم انرژی است. به این معنا که سیکل تولید توان از تجهیزات مختلفی تشکیل شده و برخی از این تجهیزات به دلیل ماهیت حرارتی خود، دارای تخریب اگزرژی بالایی هستند، مانند مبدل‌های حرارتی. تخریب اگزرژی به معنای از دست رفتن توانایی تبدیل انرژی به کار مفید است و این مسئله به‌طور خاص در تجهیزات حرارتی مشهود است. با این‌حال، سیستم‌های انرژی معمولاً به‌صورت حجم کنترلی بررسی می‌شوند تا به تحلیل دقیق‌تری از کارایی و تخریب اگزرژی دست یابند. در نتیجه، تحلیل اگزرژی به ما این امکان را می‌دهد که بهینه‌سازی‌های لازم را برای کاهش تخریب و افزایش راندمان در سیستم‌های انرژی انجام دهیم. به‌طورکلی، تحلیل اگزرژی به ما کمک می‌کند تا بتوانیم بهره‌وری سیستم‌های تولید توان را بهبود بخشیم و از منابع انرژی به طور بهینه استفاده کنیم.



شکل ۳: نمودار مقایسه راندمان اگزرژی برای تجهیزات سیکل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

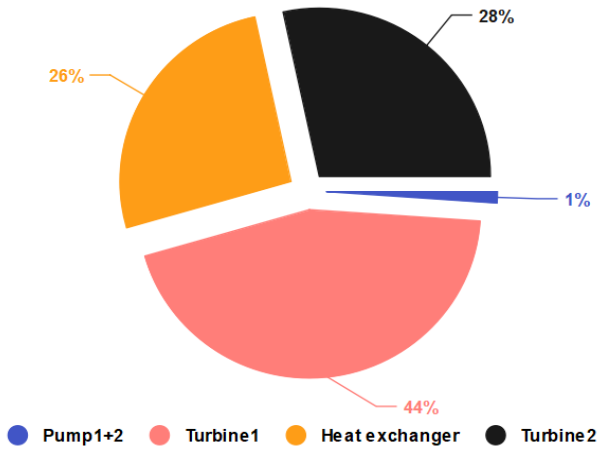
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

همان‌طور که از نمودار بالا مشهود است، مبدل بازیاب حرارتی با راندمان ۹۱ درصد بیش‌ترین بهره‌وری را دارد. این مبدل به دلیل طراحی خاص و بهینه‌سازی‌های انجام شده، قادر است مقدار زیادی از حرارت را بازیابی کند و به‌همین دلیل، راندمان بالایی را به نمایش می‌گذارد. از طرفی، تجهیزاتی مانند توربین‌ها که نقش مهمی در تولید توان دارند، به‌دلیل پیچیدگی‌های فنی و شرایط عملیاتی، دارای راندمان کم‌تری هستند. این کاهش راندمان به‌دلیل ویژگی‌های خاص توربین‌ها و هم‌چنین اتلاف انرژی در فرآیندهای تبدیل انرژی است.

راندمان کلی سیکل برابر با ۸۳ درصد است که نشان‌دهنده بهره‌وری بالا و عملکرد مطلوب سیستم است. این مقدار راندمان به این معنی است که سیستم به‌خوبی طراحی و پیاده‌سازی شده و توانسته است انرژی را به‌طور مؤثر تبدیل کند و در نتیجه، شرایط بهره‌وری سیستم بسیار مطلوب است .

در شکل زیر، میزان تخریب اگزرژی توسط هر جزء از سیستم به تصویر کشیده شده است. تحلیل این تخریب‌ها کمک می‌کند تا نقاط ضعف سیستم شناسایی شده و بهینه‌سازی‌های لازم انجام شود. تخریب اگزرژی نشان‌دهنده میزان انرژی است که به‌دلیل ناکارآمدی در فرآیندهای مختلف از دست می‌رود و نمی‌تواند به کار مفید تبدیل شود. این تخریب‌ها معمولاً در تجهیزاتی مانند مبدل‌های حرارتی و توربین‌ها مشاهده می‌شود، جایی‌که انرژی به‌دلیل تبدیل ناپایدار یا اتلاف‌های حرارتی به صورت غیرقابل برگشتی از بین می‌رود.

با بررسی میزان تخریب اگزرژی، می‌توان نقاط بحرانی سیستم را شناسایی کرده و اقدامات لازم برای کاهش این تخریب‌ها و افزایش راندمان کل سیستم را به کار بست. به این ترتیب، تحلیل اگزرژی ابزار ارزشمندی برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انرژی و کاهش اتلاف‌های انرژی محسوب می‌شود.



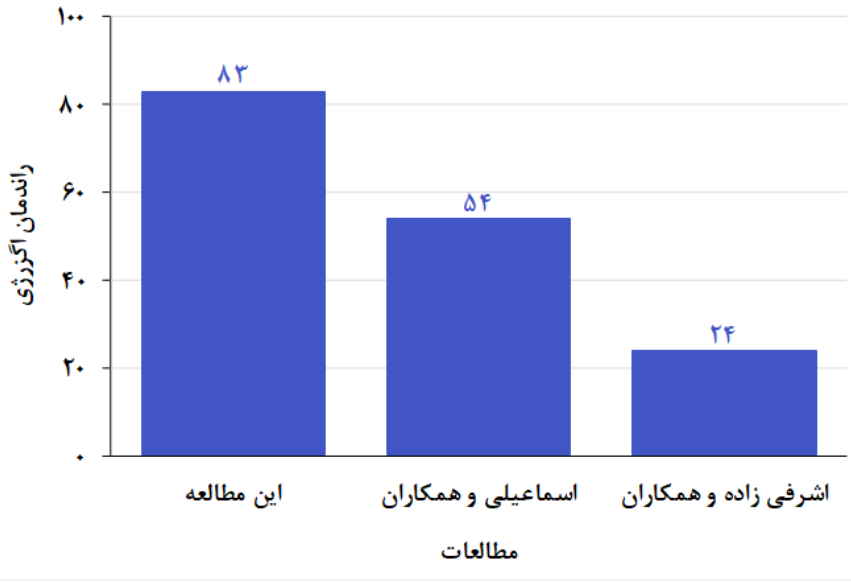
شکل ۴: نمودار تخریب اگزرژی

همان‌طور که از شکل (۴) هم قابل بررسی است، بیش‌ترین تخریب اگزرژی مربوط به توربین ۱ که در سیکل بخار وجود دارد، می‌باشد. به این صورت که این جزء به‌تنهایی ۴۴ درصد کل تخریب سیستم را شامل می‌شود. پس از آن، توربین ۲ با ۲۸ درصد و مبدل بازیاب حرارتی با ۲۶ درصد در رتبه‌های بعد قرار دارند.

در شکل (۵) بررسی مقایسه راندمان اگزرژی سیکل حرارتی در این مطالعه و مقایسه این پارامتر با مطالعات دیگر در این حوزه که شامل مطالعه اسماعیلی و همکاران [۲۰] و هم‌چنین اشرفی زاده و همکاران [۲۱] در حوزه افزایش راندمان در سیکل‌های حرارتی و ترکیبی مقایسه شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]



شکل ۵: مقایسه راندمان اگزرژی محاسبه شده در این مطالعه و مقایسه با مطالعات دیگر

۴- نتیجه‌گیری

تولید انتشار کربن بالا در صنایع نیروگاهی و تولید توان، این صنایع را به سمت سیکل‌های ترکیبی سوق داده است. هم‌چنین یکی از مشکلات در سیکل‌های تولید توان، پایین بودن راندمان اگزرژی می‌باشد. به‌همین منظور، لزوم بررسی این موضوع همیشه در دستور کار بوده است. در این مطالعه، با استفاده از این بررسی مشخص شد که راندمان اجزای سیکل شرایط مطلوبی دارند و هم‌چنین راندمان کلی حدود ۸۲ درصد می‌باشد. از طرفی، شرایط سیکل از نظر تخریب هم موردبررسی قرار گرفت که مشخص شد بیش‌ترین تخریب با ۴۴ درصد مربوط به توربین اول می‌باشد که اگر بخواهیم شرایط سیستم را بهینه کنیم، این توربین یکی از این اجزا محسوب می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل نیز اشاره گردیده شد، در این مطالعه از سیال واسط پنتان استفاده شده است که هدف از بررسی این سیال نو، ارزیابی اضافه شدن برگشت‌ناپذیری‌ها در سیستم بود. با توجه به نتایج موجود و بررسی اگزرژی صورت‌گرفته، کاهش قابل ملاحظه‌ای با استفاده از این سیال در سیستم مشاهده نگردیده است. استفاده از این سیال از منظر اقتصادی هم بسیار قابل ملاحظه است.

فهرست علائم

علایم انگلیسی			
$\dot{E}X$	نرخ اگزرژی (kW)	**in**	ورودی
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)	**out**	خروجی
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی (kg/s)	**علایم یونانی**	
Ex	اگزرژی	η	بازده

مراجع

[1] L. T. Shireef, T. K. Ibrahim, Influence of operating parameters on the performance of combined cycle based on exergy analysis, Case Stud. Therm. Eng., 40(October) (2022), 102506, doi: 10.1016/j.csite.2022.102506.
[2] D. Zhao, C. Han, W. Cho, L. Zhao, and Y. Kim, Directly combining a power cycle and refrigeration

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

cycle: Method and case study, Energy, 259 (2022), doi: 10.1016/j.energy.2022.125017.
[3] P. Grennfelt, A. Engleryd, M. Forsius, Ø. Hov, H. Rodhe, and E. Cowling, Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy, Ambio, 49(4) (2020), doi: 10.1007/s13280-019-01244-4.
[4] S. Sonwani, S. Hussain, and P. Saxena, Air pollution and climate change impact on forest ecosystems in Asian region–a review, Ecosyst. Heal. Sustain., 8(1) (2022), doi: 10.1080/20964129.2022.2090448.
[5] U. University, ACID RAIN, (2022).
[6] D. News, climate change, (2018), [Online] Available: https://www.dallasnews.com/opinion/commentary/2019/01/25/we-humans-restored-the-ozone-layer-and-defeated-acid-rain-we-can-solve-climate-change/
[7] F. Parvareh *et al.*, Integration of solar energy in coal-fired power plants retrofitted with carbon capture: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38 (2014) doi: 10.1016/j.rser.2014.07.032.
[8] A. Corti and L. Lombardi, Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO_2 emissions: Performance analysis and life cycle assessment (LCA), Energy (2004), doi: 10.1016/j.energy.2004.03.015.
[9] Z. Liu and I. A. Karimi, Simulation of a combined cycle gas turbine power plant in Aspen HYSYS, Energy Procedia, (2019), doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.901.
[10] B. Kirtania and V. Shilapuram, Conceptual design, energy, exergy, economic and water footprint analysis of CO_2-ORC integrated dry gasification oxy-combustion power cycle, J. Clean. Prod., (2023), doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137930.
[11] C. Yue and P. Wang, Thermal analysis on vehicle energy supplying system based on waste heat recovery ORC, Energy Procedia, (2019), doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.582.
[12] O. R. C. (ORC) for heat and power Production, Interreg Europe, (2021).
[13] M. Aliyu, A. B. AlQudaihi, S. A. M. Said, and M. A. Habib, Energy, exergy and parametric analysis of a combined cycle power plant, Therm. Sci. Eng. Prog., 15 (2020), doi: 10.1016/j.tsep.2019.100450.
[15] F.Hosseinifard, M.Hosseinpour, M.Salimi, M.Amidpour, Optimizing post combustion carbon capture: A comprehensive 3E analyses of energy, exergy and exergoeconomic aspects with solar integration, Sustain.energy Technol. Assessments, 62 (october 2023) (2024), 103626, doi:10.1016/j.seta.2024.103626

[16] J. Bravo, D. Drapanauskaite, N. Sarunac, C. Romero, T. Jesikiewicz, and J. Baltrusaitis, Optimization of energy requirements for CO_2 post-combustion capture process through advanced thermal integration, Fuel, 283 (2021), doi: 10.1016/j.fuel.2020.118940.

[17] S. M. Cohen, M. E. Webber, and G. T. Rochelle, Utilizing solar thermal energy for post-combustion CO2 capture, ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, ES 2010, 2010,

doi: 10.1115/ES2010-90147.

[18] G. Ferrarra, M. T. Ho, A. Lanzini, P. Leone, and D. E. Wiley, Exergetic and Exergoeconomic Analysis of Three Different Technologies for Post-combustion CO_2 Capture, Energy Procedia, (2017), doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1782.

[19] F. Hosseinifard, M. Hosseinpour, M. Salimi, and M. Amidpour, Toward a greener future: Solar solutions for industrial carbon capture, Sol. Energy, 271 (2024), 112436,

doi: 10.1016/J.SOLENER.2024.112436.

[۲۰] اشرفی زاده، سیدعلی و ایزد پناه، امین،۱۳۹۵، بررسی ترمودینامیکی و تحلیل اگزرژی یک نیروگاه سیکل ترکیبی پیشرفته، ششمین همایش علمی مهندسی فرآیند، پالایش و پتروشیمی،تهران، https://civilica.com/doc/465383

[۲۱] اسماعیلی, علیرضا, شکیب, سید احسان, عمیدپور, مجید, (۱۴۰۱). 'تحلیل انرژی و اگزرژی کوپلینگ نیروگاه سیکل ترکیبی و آب‌شیرین‌کن تبخیری چندمرحله‌ای ,'مهندسی و مدیریت انرژی ۲(۱), ۴۰-۴۴.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]

Simulation and examination of energy and exergy performance of combined power generation cycle by ASPEN HYSYS software

Farzin Hosseinifard[1], Mostafa Omidi bidgoli[2*]

[1] Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi university of technology, Tehran, Iran
[*2] Department of Mechanical Engineering, Badroud Branch, Islamic Azad University, Badroud, Iran

Received: Winter 2025 Accepted: Spring 2025

Abstract

One of the basic needs of mankind is its electricity supply, and power plants provide this basic need. One of these types of power plants are combined cycle power plants. Combined cycle power plants are a type of power plant that consists of two or more cycles. they use heat and have less fuel consumption than other power plants, therefore, in this study, by using Aspen Hysys v11 software, the simulation of a combined cycle with a capacity of 66 megawatts, whose intermediate fluid is pentane, has been investigated. One of the investigations In addition to energy analysis in thermodynamic topics, the basic analysis is exergy analysis. Exergy analysis generally examines the operationality of the problem. By examining this analysis for this study, it was determined that the average exergy efficiency of the system is about 83%. which indicates the optimal conditions of the system in terms of exergy

Key words: Power plant, combined cycle, energy, exergy, efficiency, Aspen hysys
*mostafaomidibidgoli@gmail.com

Cite this article as: Farzin Hosseinifard, Mostafa Omidi bidgoli, Mohammad Nazififard, Simulation and examination of energy and exergy performance of combined power generation cycle by ASPEN HYSYS software. **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(1), 67-74**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.517]