Original Article

Evaluating the Environmental Costs of Electricity Generation in Tehran through a Combined Thermal-Solar System using the Water-Energy- Environment Nexus Approach

Nima Javidi,[1*] Gholamreza Nabi Bidhendi,[1] Omid Tavakoli,[2] Naser Mehrdadi[1]

[1] Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

[2] School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

نسخه پیش انتشار

Introduction: The environmental consequences of fossil fuel reliance, combined with the rising energy demand in urban centers, have prompted interest in combined thermal-solar power systems as a sustainable approach to electricity generation. Tehran, which depends heavily on thermal power plants, faces significant challenges from high greenhouse gas emissions, substantial water consumption, and increasing environmental costs. This study aims to assess the environmental costs of electricity generation through a combined thermal-solar system and compare it with thermal-only systems. Three major power plants—Tarasht, Montazer Ghaem, and Besat—were selected as case studies. The Water-Energy-Environment Nexus (WEE Nexus) approach was employed to analyze interactions between water and energy resources in these systems.

Material and Methods: The study utilized the Life Cycle Assessment (LCA) method to evaluate environmental impacts, focusing on the reduction of greenhouse gas emissions and water consumption. Data on fuel consumption, emissions, and water use were gathered from official reports and validated databases. For combined system modeling, SimaPro software was used, while SPSS was employed for data analysis. Independent T-tests and ANOVA were performed to assess the statistical significance of differences between the two scenarios (base and combined). The WEE Nexus approach was applied to evaluate the simultaneous reduction of water consumption and emissions.

Results and Discussion: The analysis revealed substantial environmental advantages of integrating solar energy with thermal systems across all three plants. The results indicate that the combined thermal-solar system significantly reduced greenhouse gas emissions, water consumption, and environmental costs in all three power plants. In Montazer Ghaem Power Plant, CO2 emissions decreased by 28.1%, water consumption was reduced by 26.5%, and environmental costs dropped to $195.67 per gigawatt-hour, showing the best performance among the studied plants. The Besat Power Plant also showed significant reductions in emissions and water use, though slightly less than Montazer Ghaem due to lower solar irradiance. Tarasht Power Plant performed weaker than the others because of older equipment and lower efficiency. Statistical analysis using independent T-tests confirmed that the differences between the base and combined scenarios across all plants were statistically significant ($p <$

[*] Corresponding Author Email Address: nima.javidi@ut.ac.ir

0.05). The WEE Nexus approach revealed that reducing water consumption through the incorporation of solar energy in thermal systems not only decreased emissions but also alleviated pressure on water resources, which is crucial for water-scarce areas like Tehran. The findings highlight the potential of solar energy as a complementary source for improving environmental sustainability in electricity generation.

Conclusion: This study demonstrates that using combined thermal-solar systems in Tehran's power plants can significantly reduce greenhouse gas emissions, water consumption, and environmental costs. Among the three plants, Montazer Ghaem performed the best due to favorable geographical conditions, modern equipment, and higher solar irradiance. The findings underline the importance of applying the WEE Nexus approach in energy planning to optimize water and energy management and reduce dependence on fossil fuels. Future recommendations include investing in upgrades for older plants such as Tarasht to enhance efficiency, as well as expanding the solar component of combined systems. These actions could further reduce environmental impacts and provide a scalable model for similar metropolitan regions facing energy and resource challenges.

Keywords: combined thermal-solar system, environmental costs, Tehran power plants, greenhouse gas emissions, water consumption, WEE Nexus, Life Cycle Assessment (LCA)

نسخه پیش انتشار

مقاله پژوهشی

محاسبه هزینه های زیست محیطی تامین برق تهران به صورت ترکیبی (حرارتی-خورشیدی) با رویکرد همبست آب و انرژی و محیط زیست

نیما جاویدی[۱]†، غلامرضا نبی بیدهندی[۱]، امید توکلی[۲]، ناصر مهردادی[۱]

[۱] دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سابقه و هدف: با توجه به رشد مصرف انرژی و افزایش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از سیستم‌های انرژی ترکیبی حرارتی-خورشیدی به عنوان راهکاری پایدار برای تولید برق مورد توجه قرار گرفته است. کلان‌شهر تهران به دلیل وابستگی زیاد به نیروگاه‌های حرارتی، با چالش‌هایی همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف بالای آب، و هزینه‌های زیست‌محیطی مواجه است. هدف این پژوهش ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق از طریق ترکیب سیستم‌های حرارتی-خورشیدی و مقایسه آن با سیستم‌های حرارتی خالص در سه نیروگاه اصلی شامل طرشت، منتظر قائم، و نیروگاه بعثت است. در این مطالعه، رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (WEE Nexus) برای تحلیل تعاملات بین منابع آب و انرژی به‌کار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از روش تحلیل چرخه عمر (LCA) برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب استفاده شد. داده‌های مربوط به مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و مصرف آب در نیروگاه‌های منتخب از گزارش‌های سالانه نیروگاه‌ها و پایگاه داده‌های معتبر استخراج شد. همچنین، برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های ترکیبی، از نرم‌افزار SimaPro و برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید. در این مطالعه، آزمون‌های T مستقل و تحلیل واریانس (ANOVA) به‌منظور بررسی تفاوت‌های معنادار بین دو سناریوی پایه و ترکیبی انجام شد. علاوه بر این، رویکرد WEE Nexus برای تحلیل هم‌زمان کاهش مصرف آب و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی به‌طور معناداری باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و هزینه‌های زیست‌محیطی در هر سه نیروگاه مورد مطالعه شده است. در نیروگاه منتظر قائم، میزان انتشار CO_2 در سناریوی

† Corresponding Author Email Address: nima.javidi@ut.ac.ir

نسخه پیش انتشار

ترکیبی به میزان ۲۸.۱ درصد کاهش یافت و مصرف آب به میزان ۲۶.۵ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین، هزینه‌های زیست‌محیطی در این نیروگاه به ۱۹۵.۶۷ دلار به ازای هر گیگاوات‌ساعت کاهش یافت که بهترین عملکرد را در میان نیروگاه‌های مورد مطالعه نشان داد. در نیروگاه بعثت نیز کاهش قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب مشاهده شد، اما به دلیل شرایط تابش خورشیدی کمتر، میزان کاهش در مقایسه با منتظر قائم اندکی کمتر بود. نیروگاه طرشت به دلیل قدیمی بودن تجهیزات و کارایی پایین‌تر، عملکرد ضعیف‌تری در کاهش انتشار و مصرف منابع نسبت به دو نیروگاه دیگر داشت. تحلیل‌های آماری با استفاده از آزمون T مستقل نشان داد که تفاوت بین سناریوهای پایه و ترکیبی در تمامی نیروگاه‌ها از نظر آماری معنادار بوده است ($p < 0.05$). تحلیل رویکرد WEE Nexus نشان داد که کاهش مصرف آب از طریق جایگزینی بخشی از تولید حرارتی با انرژی خورشیدی، علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، فشار بر منابع آبی را نیز کاهش می‌دهد. این مسئله به‌ویژه در مناطق کم‌آب مانند تهران اهمیت ویژه‌ای دارد و استفاده از سیستم‌های خورشیدی به‌عنوان مکمل سیستم‌های حرارتی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به پایداری زیست‌محیطی کمک کند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی در نیروگاه‌های تهران می‌تواند به کاهش معنادار انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و هزینه‌های زیست‌محیطی منجر شود. در میان سه نیروگاه مورد بررسی، نیروگاه منتظر قائم به دلیل شرایط جغرافیایی مناسب، تجهیزات مدرن و تابش خورشیدی بیشتر، بهترین عملکرد را در کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف منابع داشت. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد WEE Nexus در برنامه‌ریزی انرژی می‌تواند به مدیریت بهینه منابع آب و انرژی کمک کرده و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم ترکیبی حرارتی-خورشیدی، هزینه‌های زیست‌محیطی، نیروگاه‌های تهران، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب، WEE Nexus, تحلیل چرخه عمر (LCA)

مقدمه

در دهه‌های اخیر، چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی در شهرهای بزرگ، به‌ویژه کلان‌شهرهایی همچون تهران، اهمیت بیشتری یافته است. از یک سو، رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی منجر به افزایش تقاضای انرژی شده و از سوی دیگر، پیامدهای زیست‌محیطی مرتبط با تامین این انرژی، مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و کاهش منابع آبی، به مسائلی جدی تبدیل شده‌اند. نیروگاه‌های حرارتی به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید برق در ایران، نقش عمده‌ای در این مشکلات دارند. این نیروگاه‌ها به دلیل وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی نظیر گاز طبیعی و نفت، نه تنها از لحاظ اقتصادی پرهزینه هستند، بلکه از منظر زیست‌محیطی نیز تاثیرات مخربی به همراه دارند (Solaymani, 2021). طبق گزارش‌های، نیروگاه‌های حرارتی در کشور مسئول حدود ۳۸ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن هستند و بخش قابل‌توجهی از مصرف آب صنعتی را به خود اختصاص می‌دهند. در این میان، شهر تهران به عنوان یکی از بزرگترین مراکز مصرف انرژی، با مشکلات دوگانه

نسخه پیش انتشار

آلودگی هوا و کمبود منابع آبی مواجه است. بر اساس گزارشات، این شهر سالانه به بیش از ۲۰۰۰۰ گیگاوات‌ساعت برق نیاز دارد که عمدتاً از طریق نیروگاه‌های حرارتی تامین می‌شود (Panagopoulos, 2021). این میزان تقاضا، فشار زیادی بر زیرساخت‌های انرژی و منابع طبیعی وارد می‌کند، به‌ویژه در سال‌هایی که با بحران‌های آبی روبه‌رو هستیم (Mohammadi *et al*., 2021).

از سوی دیگر، انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر و پاک، پتانسیل بالایی برای تامین بخشی از نیازهای برق تهران دارد. ایران با دارا بودن میانگین ۲۸۰۰ ساعت تابش خورشید در سال، از ظرفیت‌های بالایی در زمینه استفاده از انرژی خورشیدی برخوردار است (Noorollahi et al., 2021). استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی که در آن‌ها انرژی خورشیدی به عنوان مکمل سیستم‌های حرارتی عمل می‌کند، می‌تواند به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف آب در فرآیندهای خنک‌سازی نیروگاه‌های حرارتی کمک کند. به طور خاص، سیستم‌های ترکیبی با بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تلفات انرژی، می‌توانند هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق را به طرز چشمگیری کاهش دهند (Rad et al., 2020).

رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (Water-Energy-Environment Nexus) به عنوان چارچوبی برای تحلیل سیستماتیک این تعاملات پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد با بررسی ارتباط متقابل بین منابع آبی، تولید انرژی و تاثیرات زیست‌محیطی، امکان ارزیابی دقیق‌تر و همه‌جانبه‌تر از پایداری سیستم‌های تولید برق را فراهم می‌کند. بر اساس این چارچوب، نیروگاه‌های حرارتی به دلیل وابستگی به آب برای خنک‌سازی و تولید بخار، تاثیرات زیست‌محیطی مضاعفی دارند. اما در سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و جایگزینی بخشی از تولید انرژی با انرژی خورشیدی، به کاهش مصرف آب و بهبود وضعیت زیست‌محیطی منجر می‌شود (Jafarinejad et al., 2023). در این راستا، یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش، محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی تامین برق تهران به صورت ترکیبی از سیستم‌های حرارتی و خورشیدی است. این پژوهش با استفاده از تحلیل چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA)، به ارزیابی دقیق تاثیرات زیست‌محیطی تولید برق از دو منبع حرارتی و خورشیدی و تعاملات بین این دو منبع با مصرف آب و محیط زیست می‌پردازد. روش LCA به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل پایداری سیستم‌های تولید انرژی شناخته می‌شود که تمامی مراحل تولید، انتقال و مصرف انرژی را از نظر تاثیرات زیست‌محیطی بررسی می‌کند (Nourpour et al., 2021). با استفاده از این روش، هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید برق از هر دو سیستم به تفکیک محاسبه شده و تاثیرات کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش مصرف آب در سیستم‌های ترکیبی بررسی خواهد شد. بررسی‌ها نشان داده است که در کشورهای پیشرفته‌ای نظیر آلمان و اسپانیا، استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی به عنوان یکی از راهکارهای اصلی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری انرژی مطرح شده است. بر اساس گزارشات، نیروگاه‌های خورشیدی-حرارتی در این کشورها توانسته‌اند به طور قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید برق بکاهند (Rad et al., 2020). همچنین، تحلیل‌های

نسخه پیش انتشار

مشابه در اسپانیا نشان داده است که این سیستم‌ها تا ۳۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرده‌اند (Wang *et al*., 2021). این تجربیات بین‌المللی می‌تواند به عنوان الگوی مناسبی برای پیاده‌سازی در ایران و به‌ویژه در شهر تهران مورد استفاده قرار گیرد. مسئله تامین انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی آن در چند دهه اخیر به یکی از موضوعات کلیدی در حوزه مطالعات انرژی و محیط زیست تبدیل شده است. نیروگاه‌های حرارتی که از سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی برای تولید برق استفاده می‌کنند، از نظر زیست‌محیطی به عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا شناخته می‌شوند. مطالعه Monsur و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که نیروگاه‌های حرارتی گاز طبیعی انتشار قابل‌توجهی از گازهای گلخانه‌ای دارند، به‌طوری که هر کیلووات ساعت برق تولید شده در این نیروگاه‌ها حدود ۰.۵۲۹ کیلوگرم CO2 تولید می‌کند. علاوه بر CO2، گازهایی نظیر NOx و SOx نیز در فرآیندهای تولید برق آزاد می‌شوند که تاثیرات مخربی بر کیفیت هوا و سلامت انسان دارند (Monsur *et al*., 2020).

تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که نیروگاه‌های حرارتی فشار زیادی بر منابع آبی نیز وارد می‌کنند. به عنوان مثال، Yang و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان دادند که نیروگاه‌های حرارتی در مقایسه با نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، نیاز بیشتری به آب برای خنک‌سازی و فرآیندهای تولید بخار دارند. این نیروگاه‌ها به دلیل مصرف زیاد آب در مناطق خشک یا با کمبود منابع آبی، اثرات مخربی بر پایداری منابع آب دارند (Yang et al., 2019). همچنین، Wu و Hua (۲۰۲۲) در یک مطالعه موردی روی نیروگاه‌های حرارتی بازسازی‌شده نشان دادند که استفاده از سوخت‌های جایگزین مانند گاز طبیعی در نیروگاه‌های حرارتی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. بر اساس این مطالعه، بازسازی و بهینه‌سازی نیروگاه‌های حرارتی با استفاده از گاز طبیعی باعث کاهش هم‌زمان گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌شود، در حالی که استفاده از سوخت‌های فسیلی سنگین مانند زغال‌سنگ و نفت این اثرات مخرب را افزایش می‌دهد (Wu & Hua, 2022).

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر و پاک، پتانسیل زیادی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که ایران با داشتن بیش از ۲۸۰۰ ساعت تابش خورشید در سال، یکی از کشورهای دارای ظرفیت بالا برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است. Razmjoo و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی میزان اثربخشی سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-بادی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداختند و نشان دادند که این سیستم‌ها می‌توانند تا ۷۲ درصد از انتشار CO2 بکاهند و هزینه‌های انرژی را به صورت اقتصادی بهینه کنند (Razmjoo et al., 2021).

Srivastava (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-بادی پرداخت و نشان داد که استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند نوسانات تولید انرژی را کاهش دهد و پایداری بیشتری به ارمغان آورد. همچنین، استفاده از این سیستم‌ها موجب کاهش قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO2 می‌شود (Srivastava, 2022). طبق گزارش Odoi-Yorke و همکاران (۲۰۲۲)، استفاده از سیستم‌های هیبریدی مانند سیستم‌های خورشیدی-بیوگاز در مناطق روستایی می‌تواند راه‌حلی

نسخه پیش انتشار

موثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دسترسی به انرژی پایدار باشد همچنین، گزارش‌ها نشان می‌دهد که ترکیب انرژی خورشیدی با سایر منابع انرژی مانند انرژی بادی و زیست‌توده می‌تواند به بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند (Odoi-Yorke et al., 2022). پژوهش‌های زیادی به بررسی سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی و نقش آن‌ها در کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی پرداخته‌اند. مطالعه انجام‌شده توسط Rashid و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی به دلیل امکان استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان مکمل انرژی حرارتی، می‌توانند به طور همزمان میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند. این سیستم‌ها به طور خاص در مناطقی که پتانسیل بالای خورشیدی دارند، کارایی بیشتری داشته و از منظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند (Rashid et al., 2019). تحقیقات Wang و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داد که سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های حرارتی سنتی، تا ۱۳.۷ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرده و تا ۸ درصد میزان انتشار گازهای آلاینده را کاهش می‌دهند. این کاهش تلفات انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، سیستم‌های ترکیبی را به یک راه‌حل کارآمدتر تبدیل می‌کند (Wang et al., 2021).

همچنین، Kim و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود به بررسی نیروگاه‌های ترکیبی در کره جنوبی پرداخته و نشان دادند که این نیروگاه‌ها توانسته‌اند تا ۶۱ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید برق را کاهش دهند. این نیروگاه‌ها همچنین به دلیل استفاده از انرژی خورشیدی، نیاز کمتری به مصرف آب برای خنک‌سازی دارند که این امر به طور خاص در مناطقی با کمبود منابع آبی اهمیت دارد (Kim et al., 2019). یکی از رویکردهای نوین در ارزیابی سیستم‌های انرژی، رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست است که به بررسی تعاملات پیچیده بین منابع آب و انرژی و تاثیرات آن‌ها بر محیط زیست می‌پردازد. Panagopoulos (۲۰۲۱) در تحقیق خود با استفاده از این رویکرد نشان داد که مصرف بالای آب در نیروگاه‌های حرارتی به دلیل فرآیندهای خنک‌سازی، فشار زیادی بر منابع آبی وارد می‌کند. از سوی دیگر، سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی به دلیل کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، نیاز به آب کمتری دارند و از این‌رو فشار کمتری بر منابع آبی وارد می‌کنند. این پژوهش همچنین تاکید می‌کند که ارزیابی پایداری سیستم‌های انرژی باید به طور همزمان تاثیرات بر آب، انرژی و محیط زیست را مدنظر قرار دهد تا بتواند راهکارهای بهینه‌ای برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه کند (Panagopoulos, 2021).

پژوهش دیگری توسط García و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده است که استفاده از رویکرد همبست آب و انرژی در سیاست‌گذاری‌های انرژی می‌تواند به کاهش تعارضات بین استفاده از منابع آبی و تولید انرژی منجر شود. به طور خاص، در مناطقی مانند تهران که با بحران آب مواجه هستند، استفاده از این رویکرد برای طراحی سیستم‌های ترکیبی می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آبی و بهبود پایداری زیست‌محیطی کمک کند (García et al., 2021). بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی یکی از موثرترین راهکارها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع آبی در تولید برق هستند. این سیستم‌ها به دلیل استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک

نسخه پیش انتشار

منبع تجدیدپذیر و پاک، می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات منفی نیروگاه‌های حرارتی ایفا کنند. همچنین، استفاده از رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست به عنوان یک چارچوب نوین برای ارزیابی پایداری سیستم‌های انرژی، به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تصمیمات بهینه‌تری در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود مدیریت منابع طبیعی اتخاذ کنند. بنابراین، این پژوهش به بررسی و محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی سیستم ترکیبی حرارتی-خورشیدی در تامین برق تهران پرداخته و با استفاده از چارچوب همبست آب، انرژی و محیط زیست، راهکارهایی برای بهبود پایداری تولید برق در این کلان‌شهر ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق در تهران از طریق سیستم ترکیبی حرارتی-خورشیدی، از روش تحلیل چرخه عمر (LCA) و رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (WEE Nexus) استفاده شده است. برای این پژوهش، نیروگاه‌های طرشت، بعثت و منتظر قائم که به عنوان نیروگاه‌های حرارتی اصلی در تهران شناخته می‌شوند، انتخاب شده‌اند. این نیروگاه‌ها عمدتاً از گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی استفاده کرده و از سیستم‌های خنک‌سازی مبتنی بر آب بهره می‌برند. یکی از اهداف اصلی این مطالعه، اضافه کردن سیستم خورشیدی مکمل برای هر یک از این نیروگاه‌ها است تا ۳۰ درصد از برق تولیدی آنها از انرژی خورشیدی تأمین شود. این مقدار بر اساس داده‌های تابش خورشیدی و بررسی‌های اقتصادی انتخاب شده است (Hosseini et al., 2005؛ Shahnazari & Lari, 2017). سیستم خورشیدی به عنوان مکملی در نظر گرفته شده است تا مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و مصرف منابع طبیعی را بهینه‌سازی کند (Rafat et al., 2021). داده‌های مربوط به مصرف سوخت و تولید برق از گزارشات رسمی شرکت تولید برق تهران (۲۰۲۱) به‌دست آمده است. این داده‌ها شامل اطلاعات دقیقی از میزان گاز طبیعی مصرفی به ازای هر گیگاوات‌ساعت برق تولیدی، میزان تولید برق سالانه، و مصرف آب برای فرآیندهای خنک‌سازی است. همچنین، داده‌های مربوط به تابش خورشیدی و بازدهی سیستم‌های خورشیدی از پایگاه داده بین‌المللی SolarGIS و سازمان هواشناسی ایران (۲۰۲۲) گردآوری شده است. این داده‌ها شامل اطلاعاتی درباره میانگین تابش خورشیدی در مناطق مختلف تهران، ساعات تابش در طول سال، و ظرفیت انرژی خورشیدی به ازای هر مترمربع پنل خورشیدی است. این اطلاعات به‌منظور مدل‌سازی دقیق سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی به کار رفته است. برای محاسبه اثرات زیست‌محیطی، داده‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های ناشی از نیروگاه‌ها از پایگاه داده معتبر Ecoinvent نسخه ۳.۸ استخراج شده است. این داده‌ها شامل انتشار گازهای CO2، CH4، NOx و SOx به ازای هر واحد برق تولیدی در نیروگاه‌های حرارتی هستند.

تحلیل چرخه عمر

نسخه پیش انتشار

در این پژوهش، روش تحلیل چرخه عمر (LCA) مطابق با استاندارد ISO 14040 و ISO 14044 برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های تولید برق حرارتی و ترکیبی حرارتی-خورشیدی به کار گرفته شده است. مراحل اصلی این تحلیل شامل تعریف هدف و محدوده (Goal and Scope Definition)، تحلیل موجودی چرخه عمر (Life Cycle Inventory - LCI)، ارزیابی اثرات چرخه عمر (Life Cycle Impact Assessment - LCIA) و تفسیر نتایج (Interpretation) است. هدف از این تحلیل، مقایسه اثرات زیست‌محیطی تولید برق در دو سناریوی پایه (فقط حرارتی) و ترکیبی (حرارتی-خورشیدی) در سه نیروگاه منتخب تهران است.

هدف از انجام LCA در این پژوهش، ارزیابی و مقایسه اثرات زیست‌محیطی انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و هزینه‌های زیست‌محیطی در دو سیستم تولید برق (حرارتی و ترکیبی) و تعیین میزان کاهش این اثرات در نتیجه استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان مکمل است. محدوده این تحلیل شامل مراحل تولید، انتقال و مصرف سوخت در نیروگاه‌ها و همچنین تولید برق از انرژی خورشیدی است. مرزهای سیستم از "استخراج سوخت‌های فسیلی" تا "تولید برق نهایی" تعریف شده است.

برای جمع‌آوری داده‌های لازم جهت انجام LCA، اطلاعات مربوط به مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب در نیروگاه‌های طرشت، بعثت و منتظر قائم از گزارش‌های سالانه این نیروگاه‌ها و پایگاه داده‌های Ecoinvent نسخه ۳.۸ استخراج شد. داده‌های مربوط به تابش خورشیدی و بازدهی سیستم‌های خورشیدی نیز از پایگاه داده SolarGIS و سازمان هواشناسی ایران گردآوری گردید. این داده‌ها شامل اطلاعاتی درباره میزان گازهای CO_2، CH_4 و N_2O به ازای هر واحد برق تولیدی، و همچنین میزان مصرف آب به ازای هر گیگاوات‌ساعت برق تولیدی است.

برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی از نرم‌افزار SimaPro استفاده شده است که یکی از ابزارهای استاندارد برای تحلیل چرخه عمر (LCA) به‌شمار می‌آید. در این مدل، دو سناریو برای تولید برق در نظر گرفته شده است: سناریوی پایه (نیروگاه‌های حرارتی): در این سناریو، داده‌های مربوط به مصرف سوخت، تولید برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای برای نیروگاه‌های حرارتی طرشت، بعثت و منتظر قائم وارد نرم‌افزار شده است. این مدل نشان‌دهنده وضعیت فعلی تولید برق در این نیروگاه‌ها بدون استفاده از انرژی خورشیدی است. سناریوی ترکیبی حرارتی-خورشیدی: در این سناریو، ۳۰ درصد از برق تولیدی نیروگاه‌ها از طریق سیستم‌های خورشیدی تامین می‌شود. این مدل به‌گونه‌ای طراحی شده که کاهش مصرف گاز طبیعی و به تبع آن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف آب در نظر گرفته شود. در این سناریو، داده‌های تابش خورشیدی و بازدهی پنل‌های خورشیدی بر اساس اطلاعات منطقه‌ای تهران در مدل وارد شده‌اند.

ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی

برای ارزیابی دقیق هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از سیستم‌های ترکیبی، از روش‌های استاندارد هزینه اجتماعی کربن (Social Cost of Carbon) استفاده شده است. بر اساس داده‌های سازمان بین‌المللی انرژی (IEA)، هزینه اجتماعی انتشار CO_2 برای هر

نسخه پیش انتشار

تن برابر با ۵۰ دلار محاسبه شده است. این هزینه‌ها شامل اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است که از طریق تغییرات اقلیمی، کاهش کیفیت هوا، و تخریب اکوسیستم‌ها ایجاد می‌شود. برای محاسبه هزینه‌های مصرف آب، داده‌های مربوط به هزینه تولید هر مترمکعب آب از شرکت آب و فاضلاب تهران (۲۰۲۱) استخراج شده است. مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی به دلیل فرآیندهای خنک‌سازی از عوامل اصلی فشار بر منابع آبی است. همچنین، هزینه‌های مرتبط با آلودگی هوا نیز بر اساس داده‌های سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2020) محاسبه شده که شامل هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا و سایر اثرات بهداشتی است.

رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (WEE Nexus)

یکی از نوآوری‌های این پژوهش، استفاده از رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (WEE Nexus) است. این رویکرد به بررسی تعاملات پیچیده بین منابع آب و انرژی و تاثیرات متقابل آنها بر محیط زیست می‌پردازد. در این پژوهش، تعاملات بین مصرف آب و تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی و خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. در نیروگاه‌های حرارتی، مصرف آب برای فرآیندهای خنک‌سازی ضروری است، در حالی که در سیستم‌های خورشیدی، نیازی به مصرف آب برای تولید انرژی وجود ندارد. این امر می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف آب در نیروگاه‌های ترکیبی شود. در این مرحله از پژوهش، میزان مصرف آب در هر دو سناریو (حرارتی و ترکیبی) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده محاسبه شده و تعاملات بین آب و انرژی در چارچوب رویکرد WEE Nexus مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، از مدل‌های ارائه‌شده توسط سازمان بین‌المللی انرژی برای ارزیابی تعاملات بین آب و انرژی استفاده شده است. این مدل‌ها به بررسی کاهش مصرف آب ناشی از کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در سیستم‌های ترکیبی می‌پردازند و تاثیرات زیست‌محیطی این تعاملات را محاسبه می‌کنند. در این رویکرد، مصرف منابع طبیعی و تاثیرات آن بر پایداری زیست‌محیطی نیروگاه‌های ترکیبی نیز مورد توجه قرار گرفته است. این تحلیل به درک بهتری از چگونگی کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی از طریق سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-حرارتی کمک می‌کند و به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه مدیریت منابع طبیعی منجر می‌شود.

تحلیل داده‌ها

پس از انجام مدل‌سازی و جمع‌آوری داده‌ها، نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای مقایسه آماری دو سناریو (حرارتی و ترکیبی)، از آزمون T مستقل استفاده شد تا تفاوت‌های معنی‌دار بین هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و آلودگی هوا در دو سناریو به‌دست آید. همچنین، برای تحلیل حساسیت مدل، تغییرات در میزان استفاده از انرژی خورشیدی در سناریوی ترکیبی (مانند ۲۰ درصد یا ۴۰ درصد) بررسی شد تا تاثیر این تغییرات بر کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی محاسبه گردد.

نتایج و بحث

نسخه پیش انتشار

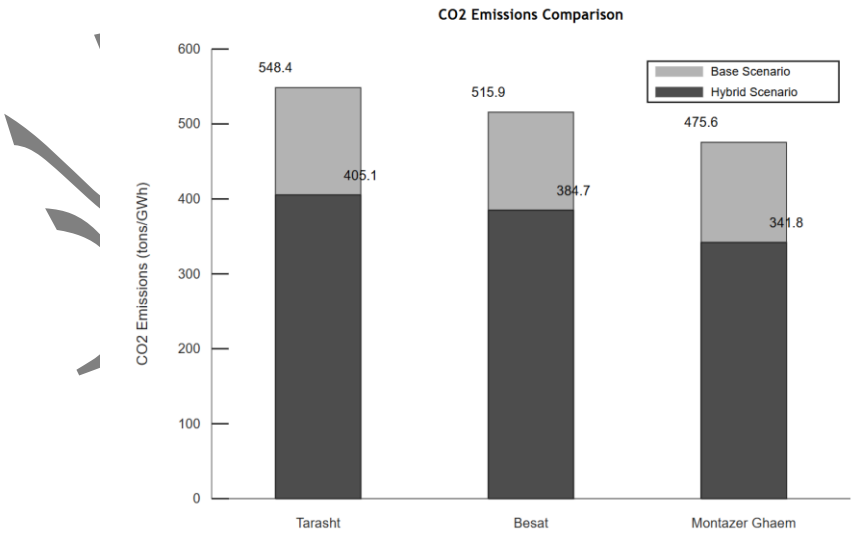
مقایسه انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو سناریو

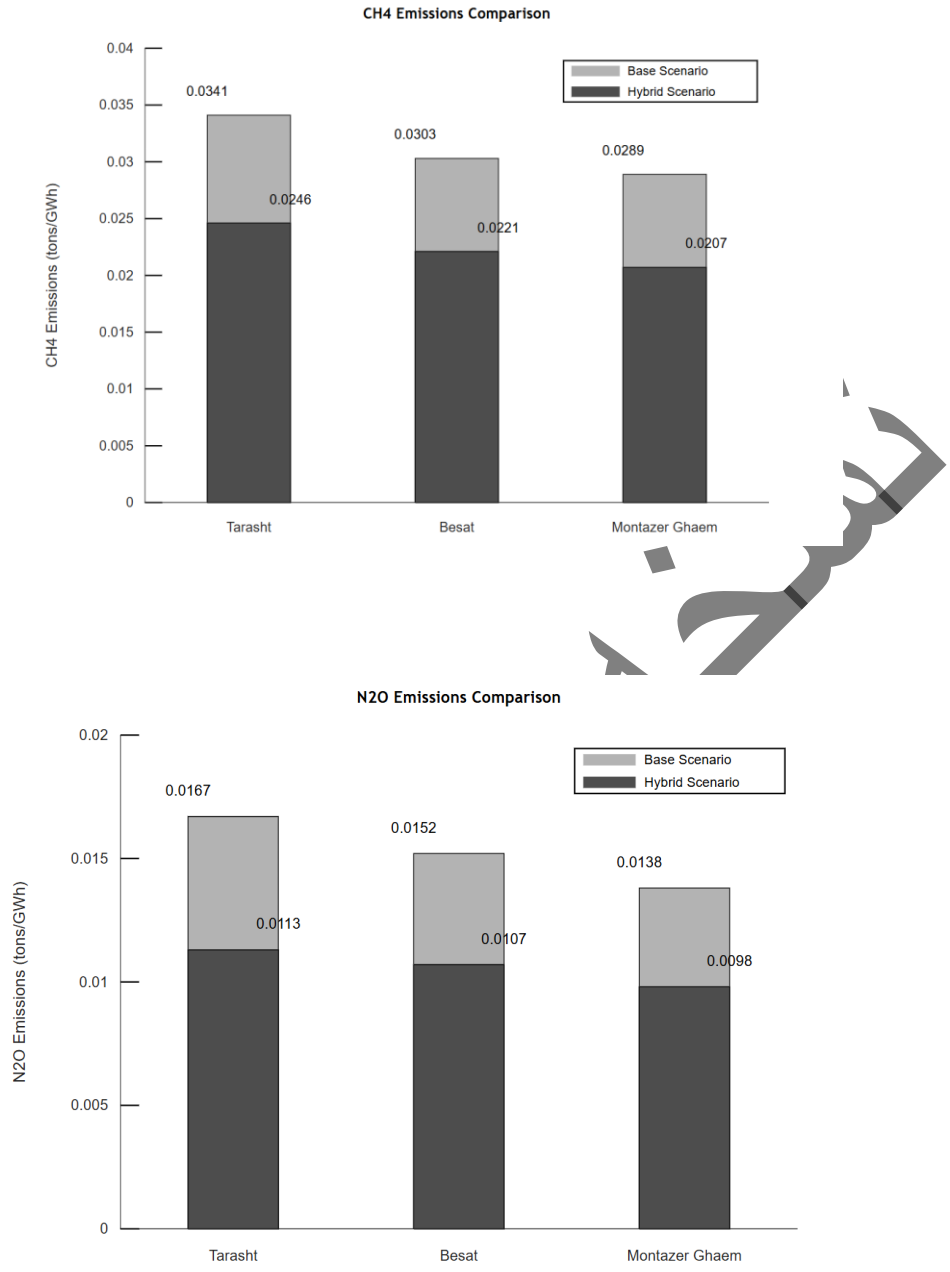
انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های حرارتی عمدتاً تحت تأثیر میزان مصرف گاز طبیعی و کارایی سیستم‌های خنک‌سازی است. نیروگاه طرشت به دلیل قدیمی بودن تجهیزات و فرآیندهای کمتر کارآمد، نسبت به دو نیروگاه دیگر انتشار بیشتری دارد. همچنین، تفاوت در شرایط جغرافیایی و تابش خورشیدی نیز بر عملکرد سیستم‌های خورشیدی تأثیر می‌گذارد.

جدول ۱- مقایسه انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو سناریو (تن/گیگاوات‌ساعت)

Table 1. Comparison of Greenhouse Gas Emissions in Both Scenarios (tons/GWh)

نیروگاه **Power Plant**	درصد کاهش انتشار (٪) **CO2** **CO2 Emission Reduction Percentage (%)**	سناریوی ترکیبی (CO2, CH4, N2O) (تن/گیگاوات‌ساعت) **Hybrid Scenario (CO2, CH4, N2O) (tons/GWh)**	سناریوی پایه (CO2, CH4, N2O) (تن/گیگاوات‌ساعت) **Base Scenario (CO2, CH4, N2O) (tons/GWh)**
طرشت Tarasht	کاهش CO2 26.1%	CO2: 405.1، CH4: 0.0246، N2O: 0.0113	CO2: 548.4، CH4: 0.0341، N2O: 0.0167
بعثت Besat	کاهش CO2 25.4%	CO2: 384.7، CH4: 0.0221، N2O: 0.0107	CO2: 515.9، CH4: 0.0303، N2O: 0.0152
منتظر قائم Montazer Ghaem	کاهش CO2 28.1%	CO2: 341.8، CH4: 0.0207، N2O: 0.0098	CO2: 475.6، CH4: 0.0289، N2O: 0.0138





شکل ۱- مقایسه انتشار گازهای گلخانه ای در دو سناریو

Fig. 1- Comparison of Greenhouse Gas Emissions in Two Scenarios

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی منجر به کاهش معنادار انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر سه نیروگاه شده است، اما میزان این کاهش بر اساس شرایط خاص هر نیروگاه متفاوت است. نیروگاه طرشت با انتشار CO_2 معادل ۵۴۸.۴ تن به ازای هر گیگاوات‌ساعت برق تولیدی، بالاترین سطح انتشار را در سناریوی پایه نشان می‌دهد که به دلیل قدیمی بودن تجهیزات و کارایی پایین سیستم‌های حرارتی است. پس از استفاده از سیستم ترکیبی، انتشار CO_2 در

این نیروگاه به ۴۰۵.۱ تن کاهش یافت که معادل کاهش ۲۶.۱ درصدی است. این کاهش کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده در نیروگاه‌های جدیدتر مانند منتظر قائم است، که در آن کاهش انتشار CO2 معادل ۲۸.۱ درصد است.

نتایج تحلیل واریانس انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب در هر دو سناریو در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. مقدار F و سطح معناداری (p-value) نشان می‌دهند که تفاوت میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب بین نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف از نظر آماری معنادار است. برای بررسی دقیق‌تر تفاوت‌ها بین نیروگاه‌ها، از آزمون پس‌آزمون Tukey استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد که تفاوت میانگین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بین نیروگاه منتظر قائم و طرشت معنادار بوده ($p < 0.01$) و تفاوت میانگین کاهش مصرف آب بین نیروگاه‌های منتظر قائم و طرشت معنادار است ($p < 0.05$).

نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که تفاوت میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای بین نیروگاه‌های مختلف در سناریوی پایه و ترکیبی از نظر آماری معنادار است ($p < 0.05$). به طور خاص، نیروگاه منتظر قائم با میانگین کاهش ۲۸.۱ درصد در انتشار CO_2، به‌طور معناداری نسبت به دو نیروگاه دیگر عملکرد بهتری داشته است ($F = 9.72, p = 0.003$). همچنین، نتایج آزمون پس‌آزمون Tukey حاکی از آن بود که تفاوت میانگین کاهش انتشار بین نیروگاه منتظر قائم و طرشت از نظر آماری معنادار است ($p < 0.01$)، اما تفاوت بین نیروگاه‌های بعثت و طرشت معنادار نبود.

جدول ۲- تحلیل واریانس (ANOVA) انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو سناریو (حرارتی و ترکیبی)

منبع تغییرات	مجموع مربعات(SS)	درجه آزادی(df)	میانگین مربعات(MS)	مقدارF	سطح معناداری(p-value)
بین نیروگاه‌ها	1243.6	2	621.8	9.72	0.003
داخل نیروگاه‌ها	1534.2	15	102.3		
کل	2777.8	17			

جدول ۳- تحلیل واریانس (ANOVA) مصرف آب در دو سناریو (حرارتی و ترکیبی)

منبع تغییرات	مجموع مربعات(SS)	درجه آزادی(df)	میانگین مربعات(MS)	مقدارF	سطح معناداری(p-value)
بین نیروگاه‌ها	872.4	2	436.2	8.43	0.004
داخل نیروگاه‌ها	1124.1	15	74.94		

نسخه پیش انتشار

کل	1996.5	17			

نتایج تحلیل واریانس برای مصرف آب نشان داد که تفاوت معناداری بین نیروگاه‌های مختلف در سناریوی پایه و ترکیبی وجود دارد ($p < 0.05$). نیروگاه منتظر قائم با میانگین کاهش ۲۶.۵ درصد در مصرف آب بهترین عملکرد را داشته است. مقدار F به‌دست‌آمده برای این تحلیل برابر با ۸.۴۳ و سطح معناداری آن برابر با ۰.۰۰۴ بود. آزمون پس‌آزمون نشان داد که تفاوت میانگین کاهش مصرف آب بین نیروگاه‌های منتظر قائم و طرشت معنادار است ($p < 0.05$)، در حالی که تفاوت بین نیروگاه‌های بعثت و طرشت معنادار نبود.

این نتایج نشان‌دهنده تأثیر سن نیروگاه، کارایی تجهیزات، و شرایط جغرافیایی بر کارایی سیستم‌های ترکیبی است. Chitakure و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود اشاره کردند که سیستم‌های ترکیبی در نیروگاه‌های قدیمی‌تر به دلیل محدودیت‌های ساختاری و تجهیزات قدیمی، کارایی کمتری دارند و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آن‌ها به مراتب کمتر است. علاوه بر این، بهبودهایی در نیروگاه‌های جدیدتر منجر به بهره‌وری بالاتر و کاهش بیشتر گازهای آلاینده می‌شود (Chitakure et al., 2020). بر اساس نتایج آزمون T مستقل، همه نیروگاه‌ها در سناریوی ترکیبی نسبت به سناریوی پایه کاهش معناداری در انتشار CO2 داشته‌اند ($p < 0.05$). با این حال، نیروگاه منتظر قائم با مقدار t برابر با ۹.۴۵ بالاترین میزان کاهش را نشان داده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-حرارتی در نیروگاه منتظر قائم کارایی بیشتری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارند.

مقایسه مصرف آب در دو سناریو

نیروگاه‌های حرارتی مصرف آب زیادی برای خنک‌سازی دارند، اما مصرف آب بسته به نوع و کارایی سیستم‌های خنک‌سازی و شرایط اقلیمی متفاوت است. در نیروگاه‌هایی مانند بعثت که از سیستم‌های خنک‌سازی مدرن‌تر استفاده می‌کنند، میزان کاهش مصرف آب پس از اجرای سیستم ترکیبی بیشتر است.

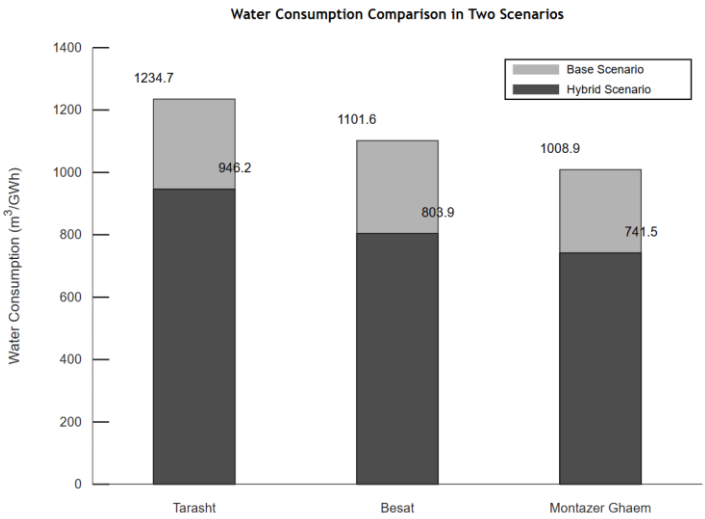
جدول ۴- مقایسه مصرف آب در دو سناریو (مترمکعب/گیگاوات‌ساعت)

Table 4. Comparison of Water Consumption in Both Scenarios (m^3/GWh)

نیروگاه Power Plant	درصد کاهش مصرف آب (٪) Water Consumption Reduction Percentage (%)	سناریوی ترکیبی (مترمکعب/گیگاوات‌ساعت) Hybrid Scenario (m^3/GWh)	سناریوی پایه (مترمکعب/گیگاوات‌ساعت) Base Scenario (m^3/GWh)
طرشت Tarasht	23.4%کاهش	946.2	1234.7

نسخه پیش انتشار

بعثت Besat	کاهش27.1%	803.9	1101.6
منتظر قائم Montazer Ghaem	کاهش26.5%	741.5	1008.9



شکل ۲- مقایسه مصرف آب در دو سناریو

Fig. 2- Comparison of Water Consumption in Both Scenarios

نیروگاه طرشت با مصرف ۱۲۳۴.۷ مترمکعب آب به ازای هر گیگاوات‌ساعت برق تولیدی، بالاترین مصرف آب را در سناریوی پایه دارد. پس از اجرای سیستم‌های ترکیبی، مصرف آب به ۹۴۶.۲ مترمکعب کاهش یافته که معادل ۲۳.۴ درصد کاهش است. با این حال، این میزان کاهش کمتر از نیروگاه بعثت است که کاهش ۲۷.۱ درصدی را تجربه کرده است. دلیل این تفاوت به کارایی بالاتر سیستم‌های خنک‌سازی نیروگاه بعثت و شرایط اقلیمی مناسب‌تر برای استفاده از انرژی خورشیدی برمی‌گردد.

مطالعه توسط Asfand و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است که در نیروگاه‌هایی که از سیستم‌های خنک‌سازی مدرن استفاده می‌کنند، میزان کاهش مصرف آب پس از اجرای سیستم‌های ترکیبی بیشتر است. همچنین، در نیروگاه‌هایی مانند منتظر قائم که در مناطق با تابش خورشیدی مناسب‌تری قرار دارند، کاهش مصرف آب به دلیل کارایی بالاتر سیستم‌های خورشیدی بیشتر است. استفاده از سیستم‌های ترکیبی در این مناطق منجر به کاهش ۵۰ درصدی مصرف آب در مقایسه با سیستم‌های خنک‌سازی مرطوب می‌شود (Asfand et al., 2020). نتایج آزمون T مستقل نشان می‌دهد که نیروگاه منتظر قائم با مقدار t برابر با ۸.۰۱ و سطح معناداری $p = 0.001$ بهترین عملکرد را در کاهش مصرف آب دارد. نیروگاه‌های طرشت و بعثت نیز کاهش معناداری در مصرف آب نشان داده‌اند، اما کاهش مصرف آب در نیروگاه منتظر قائم بیشتر از سایر نیروگاه‌ها است.

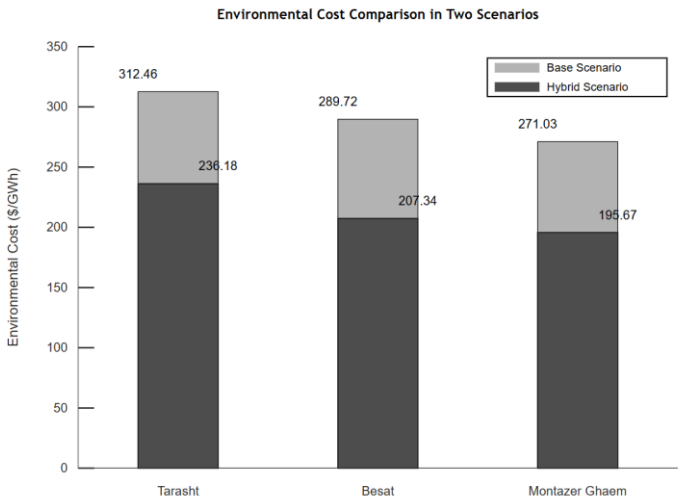
ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی

برای ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب، از روش هزینه اجتماعی کربن و ضرایب مربوط به هزینه‌های مصرف آب استفاده شد. تفاوت در هزینه‌های زیست‌محیطی بر اساس شرایط خاص هر نیروگاه و کارایی سیستم‌های ترکیبی در این نیروگاه‌ها ارزیابی شد.

جدول ۵- ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی در دو سناریو (دلار/گیگاوات‌ساعت)

Table 5. Assessment of Environmental Costs in Both Scenarios (USD/GWh)

نیروگاه **Power Plant**	درصد کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی (٪) **Environmental Cost Reduction Percentage** (٪)	سناریوی ترکیبی (دلار/گیگاوات‌ساعت) **Hybrid Scenario (USD/GWh)**	سناریوی پایه (دلار/گیگاوات‌ساعت) **Base Scenario (USD/GWh)**
طرشت Tarasht	24.4%کاهش	236.18	312.46
بعثت Besat	28.4%کاهش	207.34	289.72
منتظر قائم Montazer Ghaem	27.8%کاهش	195.67	271.03



شکل ۳- مقایسه هزینه های زیست محیطی در دو سناریو

Fig. 3- Comparison of Environmental Costs in Both Scenarios

نسخه پیش از انتشار

نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های زیست‌محیطی در نیروگاه طرشت از ۳۱۲.۴۶ دلار به ازای هر گیگاوات‌ساعت در سناریوی پایه به ۲۳۶.۱۸ دلار در سناریوی ترکیبی کاهش یافته است، که معادل ۲۴.۴ درصد کاهش است. این کاهش کمتر از نیروگاه بعثت است که با کاهش ۲۸.۴ درصدی همراه بوده است. دلیل این امر به کارایی کمتر سیستم‌های خورشیدی در نیروگاه طرشت به دلیل تابش کمتر خورشید و تجهیزات قدیمی برمی‌گردد.

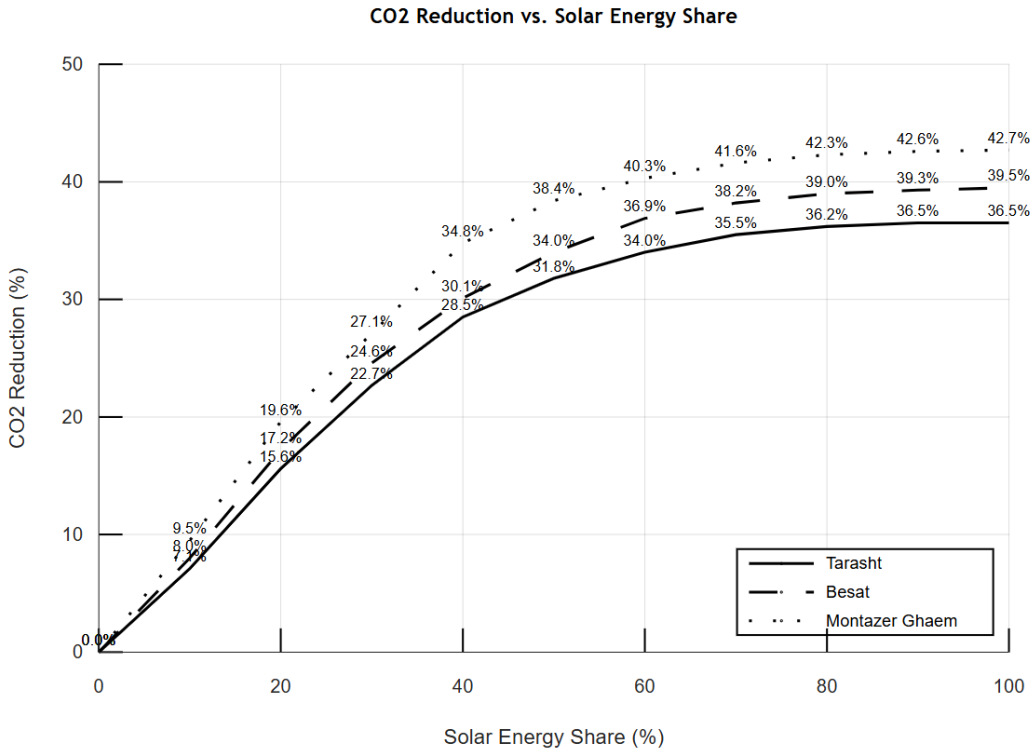
مطالعه توسط Middelhoff و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده است که هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط با سیستم‌های ترکیبی در نیروگاه‌هایی که در مناطق با تابش خورشیدی بالا و تجهیزات مدرن‌تر قرار دارند، به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این سیستم‌ها از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی در مقایسه با سیستم‌های سنتی، به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف کمتر منابع طبیعی، عملکرد بهتری دارند. علاوه بر این، استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان مکمل برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌ها در مناطقی با تابش خورشیدی بالا، راهکاری موثر به شمار می‌رود (Middelhoff et al., 2021). این موضوع در نیروگاه بعثت و منتظر قائم مشاهده می‌شود که کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی بیشتری را تجربه کرده‌اند. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که تفاوت میانگین هزینه‌های زیست‌محیطی بین نیروگاه‌ها از نظر آماری معنادار است ($p < 0.05$). نیروگاه منتظر قائم با میانگین هزینه زیست‌محیطی ۱۹۵.۶۷ دلار به ازای هر گیگاوات‌ساعت بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. این نیروگاه نه‌تنها در کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی، بلکه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب نیز عملکرد برتری داشته است.

نتایج حاصل از تحلیل LCA نشان داد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی به‌طور معناداری باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و هزینه‌های زیست‌محیطی در هر سه نیروگاه مورد مطالعه شده است. این کاهش‌ها بر اساس شرایط جغرافیایی، کارایی تجهیزات و میزان تابش خورشیدی در هر نیروگاه متفاوت بود.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییرات در میزان استفاده از انرژی خورشیدی بر هزینه‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام شد .شکل ۱ نشان‌دهنده تأثیر تغییر سهم انرژی خورشیدی بر انتشار CO_2 در هر سه نیروگاه است.

نسخه پیش انتشار



شکل ۴- تأثیر تغییر سهم انرژی خورشیدی بر انتشار CO2 در هر سه نیروگاه

Fig. 4- Impact of Changes in Solar Energy Share on CO2 Emissions in All Three Power Plants

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش سهم انرژی خورشیدی از ۳۰ به ۴۰ درصد، میزان کاهش انتشارCO2 از ۲۶.۱ درصد به ۳۵.۷ درصد افزایش یافته است. همچنین، با کاهش سهم انرژی خورشیدی به ۲۰ درصد، کاهش انتشار CO2 به ۱۸.۳ درصد محدود می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت بالای عملکرد سیستم‌های ترکیبی به میزان استفاده از انرژی خورشیدی است.

مطالعات Khan و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که افزایش سهم انرژی خورشیدی در سیستم‌های ترکیبی می‌تواند به‌طور معناداری اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد، به‌ویژه در نیروگاه‌هایی که در مناطق با تابش خورشیدی بالا قرار دارند. این مطالعه به بررسی تأثیر تولید برق خورشیدی و بادی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته است و نشان داده است که افزایش سهم این منابع در کوتاه‌مدت و بلندمدت موجب کاهش شدت کربن می‌شود (Khan et al., 2021). به طور مشابه، نتایج این پژوهش نیز نشان داد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی در نیروگاه‌های طرشت، بعثت و منتظر قائم منجر به کاهش معنادار انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب، و هزینه‌های زیست‌محیطی شده است. با این حال، میزان این کاهش‌ها بسته به شرایط خاص هر نیروگاه متفاوت بود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق در تهران از طریق سیستم ترکیبی حرارتی-خورشیدی، به تحلیل دقیق اثرات این سیستم‌ها در سه نیروگاه طرشت، بعثت و منتظر قائم پرداخته است. با استفاده از تحلیل چرخه عمر (LCA)، ابزارهای آماری SPSS، و رویکرد همبست آب، انرژی و محیط زیست (WEE Nexus)، تفاوت‌های معناداری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب، و هزینه‌های زیست‌محیطی بین سناریوهای پایه و ترکیبی مشخص شد. تحلیل چرخه عمر نشان داد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی حرارتی-خورشیدی در نیروگاه‌های تهران می‌تواند به‌طور معناداری اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید برق را کاهش دهد. نیروگاه منتظر قائم به دلیل تجهیزات مدرن‌تر و موقعیت جغرافیایی مناسب بهترین عملکرد را در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب داشته است. پیشنهاد می‌شود که برای بهبود بیشتر عملکرد نیروگاه‌های قدیمی‌تر مانند طرشت، برنامه‌های بازسازی و ارتقای تجهیزات انجام شود.

نتایج نشان داد که نیروگاه منتظر قائم در مقایسه با دو نیروگاه دیگر عملکرد بهتری داشت. در این نیروگاه، انتشار CO_2 به میزان ۲۸.۱ درصد، مصرف آب به میزان ۲۶.۵ درصد، و هزینه‌های زیست‌محیطی به میزان ۲۷.۸ درصد در سناریوی ترکیبی کاهش یافت. این دستاوردها به دلیل شرایط جغرافیایی مناسب، تابش خورشیدی بهینه و بهره‌گیری از تجهیزات مدرن در این نیروگاه بوده است.

نیروگاه طرشت، به‌دلیل قدیمی بودن تجهیزات و کارایی کمتر سیستم‌های خنک‌سازی، در مقایسه با منتظر قائم و بعثت، کاهش کمتری در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب تجربه کرد. همچنین، نتایج تحلیل آماری (با آزمون T مستقل و ANOVA) نشان داد که تفاوت‌های مشاهده‌شده در کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و اثرات زیست‌محیطی در بین نیروگاه‌ها از نظر آماری معنادار بوده است ($p < 0.05$). این پژوهش همچنین بر اهمیت استفاده از رویکرد WEE Nexus تأکید دارد. یافته‌ها نشان دادند که با کاهش مصرف آب از طریق جایگزینی بخشی از تولید حرارتی با انرژی خورشیدی، نه‌تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد، بلکه وابستگی نیروگاه‌ها به منابع آبی نیز کم می‌شود. این مسئله به‌ویژه در مناطق کم‌آب مانند تهران، با توجه به بحران منابع آبی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، از سازمان یا نهاد یا شخصی کمک مالی دریافت نشده است.

منابع

References

نسخه پیش انتشار

Asfand, F., Palenzuela, P., Roca, L., Caron, A., Lemarié, C.-A., Gillard, J., Turner, P., & Patchigolla, K. (2020). Thermodynamic Performance and Water Consumption of Hybrid Cooling System Configurations for Concentrated Solar Power Plants. Sustainability.

Chitakure, M., Ruziwa, W., & Musademba, D. (2020). Optimization of hybridization configurations for concentrating solar power systems and coal-fired power plants: A review. Renewable Energy Focus, 35, 41-55.

García, A. M., Gallagher, J., Chacón, M. C., & Nabola, A. M. (2021). The environmental and economic benefits of a hybrid hydropower energy recovery and solar energy system (PAT-PV), under varying energy demands in the agricultural sector. Journal of Cleaner Production, 303, 127078.

Hirbodi, K., Enjavi-Arsanjani, M., & Yaghoubi, M. (2020). Techno-economic assessment and environmental impact of concentrating solar power plants in Iran. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 120, 109642.

Hosseini, R., Soltani, M., & Valizadeh, G. (2005). Technical and economic assessment of the integrated solar combined cycle power plants in Iran. Renewable Energy, 30(11), 1541-1555.

Jafarinejad, S., Hernandez, R., Bigham, S., & Beckingham, B. (2023). The intertwined renewable energy–water–environment (REWE) nexus challenges and opportunities: A case study of California. Sustainability.

Jahangir, M., & Cheraghi, R. (2020). Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 100895.

Khan, H. R., Awan, U., Zaman, K., Nassani, A., Haffar, M., & Abro, M. M. Q. (2021). Assessing hybrid solar-wind potential for industrial decarbonization strategies: Global shift to green development. Energies.

Kim, M.-H., Kim, D., Heo, J., & Lee, D.-W. (2019). Techno-economic analysis of hybrid renewable energy system with solar district heating for net zero energy community. Energy.

Middelhoff, E., Andrade Furtado, L., Peterseim, J., Madden, B., Ximenes, F., & Florin, N. (2021). Hybrid concentrated solar biomass (HCSB) plant for electricity generation in Australia: Design and evaluation of techno-economic and environmental performance. Energy Conversion and Management, 114244.

Mohammadi, F., Sahebi, H., & Abdali, H. (2021). Biofuel production from sewage sludge network under disruption condition: Studying energy-water nexus. Biomass Conversion and Biorefinery, 13, 2921-2931.

Monsur, A. A., Paddo, A. R., & Mohammedy, F. M. (2020). Life Cycle Assessment of Climate Change and GHG Emission from Natural Gas Thermal Power Plant. 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), 1628-1631.

Noorollahi, Y., Pourarshad, M., & Veisi, A. (2021). The synergy of renewable energies for sustainable energy systems development in oil-rich nations: Case of Iran. Renewable Energy, 173, 561-568.

Nourpour, M., Khoshgoftar Manesh, M. K., Pirozfar, A., & Delpisheh, M. (2021). Exergy, Exergoeconomic, Exergoenvironmental, Emergy-based Assessment and Advanced Exergy-based Analysis of an Integrated Solar Combined Cycle Power Plant. Energy & Environment.

Odoi-Yorke, F., Abaase, S., Zebilila, M., & Atepor, L. (2022). Feasibility analysis of solar PV/biogas hybrid energy system for rural electrification in Ghana. Cogent Engineering.

Panagopoulos, A. (2021). Water-energy nexus: Desalination technologies and renewable energy sources. Environmental Science and Pollution Research, 28, 21009-21022.

Rad, M. A. V., Ghasempour, R., Rahdan, P., Mousavi, S., & Arastounia, M. (2020). Techno-economic analysis of a hybrid power system based on the cost-effective hydrogen production method for rural electrification, a case study in Iran. Energy, 190, 116421.

Rad, M. A. V., Toopshekan, A., Rahdan, P., Kasaeian, A., & Mahian, O. (2020). A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 129, 109923.

Rafat, E., Babaelahi, M., & Arabkoohsar, A. (2021). Design and analysis of a hybrid solar power plant for co-production of electricity and water: A case study in Iran. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-18.

Rashid, K., Safdarnejad, S., Ellingwood, K., & Powell, K. M. (2019). Techno-economic evaluation of different hybridization schemes for a solar thermal/gas power plant. Energy.

Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. A. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. Renewable Energy.

Shahnazari, M., & Lari, H. (2017). Modeling of a solar power plant in Iran. Energy Strategy Reviews, 18, 24-37.

Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. Sustainability.

Srivastava, S. (2022). Generation of Hybrid Energy System (Solar-Wind) Supported with Battery Energy Storage. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.

Wang, J., Qi, X., Ren, F., Zhang, G., & Wang, J. (2021). Optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems considering the uncertainties of load demands and renewable energy sources. Journal of Cleaner Production, 281, 125357.

Wang, J., Zhou, Y., Zhang, X., Ma, Z., Gao, Y., Liu, B., & Qin, Y. (2021). Robust multi-objective optimization with life cycle assessment of hybrid solar combined cooling, heating, and power system. Energy Conversion and Management, 232, 113868.

Wu, Y., & Hua, J. (2022). Investigating a Retrofit Thermal Power Plant from a Sustainable Environment Perspective—A Fuel Lifecycle Assessment Case Study. Sustainability.

Yang, Y., Guo, Y., Zhu, W. S., & Huang, J. (2019). Environmental impact assessment of China's primary aluminum based on life cycle assessment. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.

نسخه پیش انتشار