-- Iranian Energy Economics------
Summer ۲۰۲۲, ٤۳(۱۱), ۱۳۹-۱٦۷
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/۱۰,۲۲۰٥٤/jiee.۲۰۲۲.٦٨۳٥٦.۱۹۳٦

ATU PRESS

Original Research
Received: ۲٥/June/۲۰۲۲
Accepted: ۲۱/Aug/۲۰۲۲
ISSN: ۲٤۲۳-٥۹٥۲
eISSN: ۲٤۷٦-۹٤۳۷

# Water, Energy, and Environment NEXUS Assessment in Combined Thermal-Solar Power Plant (Case Study: Zarand Power Plant)

**Sepideh Abedi** * — Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Matin Kazemi Namin** — Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Ali Akbar Yaghoubi** — Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Shaghayegh Asadi Shizari** — Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Maedeh Morsalpour** — Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## Abstract

The increasing population and rising demand for water and energy supply, along with the exacerbation of environmental pollution effects on natural and human resources, demonstrate the vital need for a cohesive movement toward the water, energy, and environment Nexus (WEEN). Since the electricity generation industry has a significant share in water and fuel consumption and $CO_۲$ emissions in Iran, in this study, the application of a combined renewable system in the Zarand Steam Power Plant was evaluated based on the Nexus approach. Solar system designing and carbon balance evaluation during plant lifetime was conducted via PVSyst software in ۲۰۲۱. Also, an environmental model of ReCipe was applied to evaluate the effect of carbon reduction on the ecosystem. The results have shown that replacement of at least ۱٪ of the nominal capacity of the fossil power plant with renewable sources, will significantly prevent ۱۲٤۹/٤٦ t $CO_۲$ emission annually in this power plant which is equivalent to ۳٦۲/۱٦۰ $m^۳$ fossil resources storage and ۳۷۳/۷۳ $TOE.year^{-۱}$ energy savings. Also, the results showed that in addition to protecting valuable natural resources, the combined cycle will lead to a significant reduction in water demand equivalent to ۳٦٦۰ $m^۳$ having the capacity of supplying underground water resources. Considering the benefits of saving water and energy resources and reducing carbon emissions, from the NEXUS approach, in addition to managing energy supply through replacing resources and using water and heat recovery technologies, applying energy demand management policies based on energy efficiency and its environmental effects is suggested.

* Corresponding Author: s_abedi@sbu.ac.ir
How to Cite: Abedi, S., Kazemi Namin, M., Yaghoubi, A A., Asadi Shizari, Sh., Morsalpour, M. (۲۰۲۲). Water, Energy and Environment NEXUS Assessment in Combined Thermal-Solar Power Plant (Case Study: Zarand Power Plant). Iranian Energy Economics, ٤۳ (۱۱), ۱۳۹-۱٦۷.

**Keywords:** Water, Energy and Environment Nexus (WEEN), Renewable Energy, Thermal-Solar Power Plant.

**JEL Classification:** O۱۳ , P۱۸ , P۲۸ , Q۲ , Q۴ , Q۲۵

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

ISSN: ۲۴۲۳-۵۹۵۴

eISSN: ۲۴۷۶-۶۴۳۷

-- پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران ---------

دوره ۱۱، شماره ۴۳، تابستان ۱۴۰۱، ۱۳۹-۱۶۷

Jiee.atu.ac.ir

DOI: http://dx.doi.org/۱۰,۲۲۰۵٤/jiee.۲۰۲۲.٦٨۳٥٦.۱۹۳٦

# تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست در نیروگاه ترکیبی حرارتی و خورشیدی (مطالعه موردی: نیروگاه زرند کرمان)

| | |
|---|---|
| **سپیده عابدی** * | استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران |
| **متین کاظمی نمین** | دانشجو، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران |
| **علی‌اکبر یعقوبی** | دانشجو، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران |
| **شقایق اسدی شیزری** | دانشجو، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران |
| **مائده مرسلپور** | دانشجو، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران |

## چکیده

افزایش جمعیت و تقاضا برای آب و انرژی، توأم با افزایش پیامدهای ناشی از آلودگی محیط زیست بر منابع طبیعی و انسانی، نیاز حیاتی به حرکتی منسجم به سوی همبست آب، انرژی و محیط زیست را محرز می‌کند. از آنجا که صنعت تولید برق سهم قابل توجهی در مصرف آب و سوخت و انتشار دی‌اکسیدکربن در کشور دارد، در این مطالعه کاربرد سیستم ترکیبی تجدیدپذیر در نیروگاه بخاری زرند کرمان بر اساس رویکرد تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفت. طراحی سامانه خورشیدی و ارزیابی تعادل کربن در طول عمر نیروگاه در نرم‌افزار PVsyst در سال ۱۴۰۰ انجام شد. همچنین به منظور ارزیابی اثر کاهش انتشار کربن بر زیست بوم، از مدل محیط‌زیستی ReCipe استفاده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نشان داد جایگزینی حداقل ۱ درصد از ظرفیت اسمی نیروگاه فسیلی با منابع تجدیدپذیر، از انتشار ۱۲۴۹/۴۶ تن دی‌اکسیدکربن در سال جلوگیری خواهد کرد. این میزان معادل ۳۶۲/۱۶ مترمکعب ذخیره در مصرف سوخت فسیلی و ۳۷۳/۷۳ تن معادل نفت خام صرفه‌جویی در منابع انرژی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد علاوه بر حفاظت از ذخایر طبیعی، طراحی سیکل ترکیبی، منجر به کاهش قابل توجه در تقاضای آب معادل ۳۶۶۰ مترمکعب با ظرفیت تأمین منابع آب زیرزمینی خواهد شد. با توجه به منافع ناشی از ذخیره منابع آب و انرژی و کاهش انتشار کربن در صنعت نیروگاهی، در نگرش همبست علاوه بر مدیریت عرضه انرژی از طریق جایگزینی منابع و کاربست فناوری‌های بازیابی آب و حرارت، اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضای انرژی براساس بهره‌وری انرژی و آثار محیط‌زیستی پیشنهاد می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** پیوند آب، انرژی و محیط زیست، انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه برق حرارتی ـ خورشیدی

**طبقه‌بندی JEL:** Q۲۵, Q۴, Q۲, P۲۸, P۱۸, O۱۳

* نویسنده مسئول: s_abedi@sbu.ac.ir

## ۱. مقدمه

محدودیت ذخایر فسیلی از یک‌سو و انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی از سوی دیگر جوامع را برای حفظ تعادل و امنیت پایدار بین آب، غذا، انرژی و محیط زیست و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر سوق داده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد عواملی همچون رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، پیشرفت فناوری، گسترش شه
رنشینی باعث تشدید تغییرات اقلیم، تخریب منابع و کمبود آب، افزایش روزافزون نیاز به انرژی، آب و غذا خواهد شد.[۱] (کارنیب، ۲۰۱۷). گرچه تولید توان به‌عنوان شاخصی برای پیشرفت صنعتی و اقتصادی و رفاه عمومی کشورها تلقی می‌شود، اما تولید آن از طریق نیروگاه‌های حرارتی با سوخت‌های فسیلی، از عوامل اصلی انتشار آلاینده‌های محیط زیستی و در رقابت با مصرف منابع آبی می‌باشد. آمار انتشار گازهای گلخانه‌ای در دنیا نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد انتشار دی‌اکسیدکربن در جهان، ناشی از فعالیت‌های مرتبط با تولید برق حرارتی است (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۷). علاوه بر انتشار مواد آلاینده و انواع اکسیدهای کربنی، نیتروژنی و گوگردی، اثر گلخانه‌ای و بارش باران‌های اسیدی، از دیگر آثار مخرب محیط زیستی صنعت تولید برق حرارتی است. از سوی دیگر آمارها نشان می‌دهد ضمن آنکه برای تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه‌های حرارتی، حجم قابل توجهی آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌ها مصرف می‌شود، این نیروگاه‌ها نقش عمده‌ای در آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز دارند. برج‌های خنک‌کننده نیروگاه با سوخت زغال سنگ، دارای بیشترین ظرفیت آب مصرفی معادل ۹۴۲ گالن برای هر کیلووات ساعت است (مکنیک و همکاران[۲]، ۲۰۱۳). در حالی که این مصرف در بخش کشاورزی با نیاز ۷۰ درصدی منابع آب شیرین جهان در رقابت است (فلامینی و همکاران[۳]، ۲۰۱۴). همچنین در یک نیروگاه حرارتی بخاری یا سیکل ترکیبی، پساب‌های ناشی از آب خروجی خنک‌کننده‌ها و واحدهای اسید/قلیاشویی، گوگردزدایی و سایر سیستم‌های هیدرولیکی در نیروگاه، ضمن ورود به جریان‌های سطحی و یا زیرزمین، اثر مخرب بر آب و حاصلخیزی خاک منطقه خواهند گذاشت (سعیدی، ۱۳۸۴). بنابراین استفاده از منابع

---

۱. Karnib
۲. Macknick et al.
۳. Flammini et al.

سوخت‌های فسیلی برای تولید برق، علاوه بر آسیب محیط‌زیستی، با تأثیر بر کشاورزی منطقه، امنیت پایدار آب و غذا را نیز تهدید می‌کند. به ویژه آنکه ۳۰ درصد از این منابع انرژی در زنجیره تأمین مواد غذایی مصرف می‌شود (فلامینی و همکاران، ۲۰۱۴) و همین امر حاکی از وابستگی شدید امنیت غذایی به انرژی و آب است. بنابراین دنیا در حال گذر از تولید نیروگاهی برق و حرکت به سمت میکروگریدها بر پایه منابع تجدیدپذیر است. این در حالی است که در ایران، به‌سبب سیاست‌های داخلی و بین‌المللی و نوسان شرایط سیاسی و اقتصادی، قیمت جهانی حامل‌های انرژی با قیمت یارانه‌ای داخل کشور تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته و خود عامل چالش‌هایی نظیر واقعی نبودن قیمت حامل‌های برق، آب و گاز و مصرف بالا در سمت تقاضا، ضعف در امکان رقابت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و توسعه فناوری‌های کارآمد بازیابی آب و انرژی به دلیل کاهش نرخ بازگشت سرمایه شده است. ازاین‌رو درحال‌حاضر منابع انرژی تجدیدپذیر سهم اندکی در تولید برق در ایران داشته و بخش اعظم نیروگاه‌های تولید برق، از نوع حرارتی است. طبق گزارش سالانه صنعت آب و برق وزارت نیرو (۱۳۹۷)، میانگین برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر در کشور، نزدیک به ۳ گیگاوات ساعت در سال ۱۳۹۷ بوده و با رشد تقریباً ۲ برابری نسبت به سال گذشته توانسته است از انتشار ۲ هزار تن گاز گلخانه‌ای، مصرف بیش از ۶۴۰ میلیون لیتر آب و ۸۳۰ میلیون مترمکعب معادل گاز طبیعی از سوخت‌های فسیلی در سال ۱۳۹۷ جلوگیری نماید.

ازین‌رو اهمیت بررسی جامع و ارائه راه‌کارهای بنیادی به منظور برون‌رفت از چالش‌های مطرح در حوزه تأمین انرژی پایدار توام با حفظ امنیت منابع آب و شاخص‌های محیط زیستی در کشور امری ضروری است. تفکر همبست آب، انرژی و محیط زیست، چارچوبی است که امنیت پایدار این منابع را در حین پایش پایداری محیط‌زیست امکان‌پذیر می‌کند.

از سوی دیگر قرارگیری کشور در کمربند تابش خورشیدی، موقعیت مناسبی را جهت تنوع‌بخشی به سبد انرژی کشور ضمن جایگزینی با نیروگاه‌های فسیلی، فراهم ساخته است (منشی‌پور و خلفی، ۱۳۸۸). طراحی سیکل‌های انرژی خورشیدی می‌تواند یکی از راه‌های پاسخگویی به تقاضای انرژی با رعایت اصول همبست باشد که ضمن کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی، با تأمین انرژی مورد تقاضا، در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن اثرگذار

بوده و با ذخیره منابع آبی به حفظ تعادل چرخه‌های غذایی کمک می‌کند. ازین‌رو هدف از انجام این مطالعه، ارزیابی جایگزینی کسری از منابع فسیلی نیروگاه حرارتی با نیروگاه خورشیدی و تحلیل نگرش همبست آب، انرژی و محیط زیست در طراحی این سیکل ترکیبی است. برای این منظور، نیروگاه بخاری زرند استان کرمان، به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب و ارزیابی همبست براساس ظرفیت توان تولیدی، میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، میزان ذخیره در مصارف آب و سوخت فسیلی انجام گرفته است.

در این راستا ابتدا پیشینه پژوهش و روش انجام مطالعه تشریح شده است. در روش تحقیق ضمن معرفی منطقه مطالعاتی و مشخصات نیروگاه، به ارائه پارامترهای طراحی سامانه فتوولتائیک در نرم‌افزار مدلساز انرژی، نحوه محاسبه صرفه‌جویی در منابع آب و انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن از محل جایگزینی پرداخته شده است. در پایان نتایج ارزیابی بر پایه نگرش پیوند آب، انرژی و محیط زیست تحلیل و راهکارهای همبست در تولید برق نیروگاهی ارائه شده است.

## ۲. پیشینه پژوهش

کلمه همبست، اولین‌بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی در سازمان ملل متحد به کار برده شد. این تفکر در سال ۲۰۱۱ برای ترویج پیوند جدایی‌ناپذیر میان استفاده از منابع برای تأمین حقوق بنیادی و جهانی امنیت آب، غذا و انرژی و حمایت از انتقال به یک اقتصاد سبز توسعه یافت و در سال ۲۰۱۵ به‌عنوان مناسب‌ترین رویکرد جهت ارزیابی چالش‌ها و فرصت‌های توسعه پایدار شناخته شد. امروزه، نگرش همبست یکی از علوم مدیریت کلان و جامع منابع و همچنین پردازش‌کننده و ارائه‌دهنده راهکارهای راهبردی برای چالش‌های توسعه پایدار جوامع بشری محسوب می‌شود. به منظور تحلیل همبست آب، غذا، انرژی و محیط زیست روش‌های مبتنی بر تحلیل آماری و اقتصادی و مدل‌های متعددی نظیر مدل‌های پویا، تعادل عمومی، عامل بنیان، مبتنی بر شاخص و چرخه حیات به کار گرفته شده است (یوسفی و حصاری، ۱۳۹۹). همچنین در سطوح کلان ملی برای تحلیل همبست از مدل‌های ترکیبی که جنبه‌های اقتصادی را با حوزه انرژی (نظیر مدل‌های مارکال[۱] و تایمز[۱])، آب و غذا (نظیر مدل ایمپکت[۲]) مرتبط می‌سازد، استفاده شده است (مکارل و همکاران[۳]، ۲۰۱۷).

---

۱. Markal

از آنجایی که در نگرش همبست، هر چهار پارامتر آب، محیط‌زیست، غذا و انرژی مورد توجه قرار می‌گیرند (بیزیکووا و همکاران[۴]، ۲۰۱۴)، در نیروگاه‌های تولید برق کشور، شدت مصرف آب و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان هم‌ارزهای محیط‌زیستی این چالش در مدیریت چرخه تولید به شمار می‌آیند. در این راستا تحقیقات متعددی انجام گرفته است که به امنیت پایدار بین انرژی، محیط زیست و آب پرداخته‌اند. در سطح بین‌المللی توسعه صنعت تولید برق و افزایش انتشار آلاینده‌ها، موجب جلب توجه کشورهای جهان از سال ۱۹۹۷ تاکنون به مسائل محیط زیستی در قالب پیمان بین‌المللی کیوتو و پیمان پاریس با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است (کنتمیچ و همکاران[۵]، ۱۹۹۱). طیف وسیعی از سیاست‌ها، برای تشویق توسعه و استقرار فناوری‌های تولید انرژی کم‌کربن در کشورهای مختلف جهان نظیر کشورهای سوئد، کاستاریکا، آلمان و دانمارک شکل گرفته است. سوئد با بالاترین سهم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در اتحادیه اروپا با عرضه بیش از ۴۵ درصد از منابع انرژی تجدیدپذیر، کاستاریکا با واردات تجهیزات تولید انرژی تجدیدپذیر بدون پرداخت عوارض گمرکی و معافیت از پرداخت مالیات عملیاتی با تأمین بیش از ۹۰ درصد از برق خود از طریق منابع برق آبی، زمین گرمایی و بادی، آلمان با وضع سیاست‌های حمایتی برای احداث نیروگاه‌های تولید هم‌زمان و تدوین تعرفه تشویقی برای انرژی‌های بادی، خورشیدی، آبی، زمین گرمایی و زیست‌توده و دانمارک با ارائه تعرفه‌های تشویقی به انرژی بادی، زیست‌توده، زمین گرمایی، برق آبی و خورشیدی و منع فروش سوخت‌های سرب‌دار در بخش حمل‌ونقل، موجب افزایش قابل توجه سهم مصرف خالص برق از محل انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان شده‌اند (سروش‌نیا، ۱۳۹۵).

گرچه صنعت تولید برق نیروگاهی ایران با راه‌اندازی نیروگاه‌های متعدد از دهه‌های گذشته تاکنون توسعه یافته و امروزه ایران در رتبه نخست خاورمیانه در صنعت برق قرار دارد (دادلی[۶]، ۲۰۱۸)، اما این افزایش در ظرفیت نیروگاه‌های کشور، همراه با تشدید

---

۱. Time
۲. Impact
۳ .McCarl et al.
٤. Bizikova et al.
٥. Kentemich et al.
٦. Dudley

بسیاری از مشکل‌های محیط‌زیستی بوده است. به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۶، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از محل نیروگاه‌های حرارتی در ایران، به بیش از ۱۸۲ میلیون تن رسید (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۷).

وضعیت انتشار گازهای آلاینده از انواع نیروگاه‌های حرارتی کشور نشان داده است که گازهای آلاینده کربنی، با انتشار متوسط سالانه ۸۵۳/۶۷ گرم در کیلووات ساعت در مجموع بیشترین سهم را بین گازهای آلاینده منتشر شده از انواع نیروگاه‌های حرارتی دارند (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۹). در بررسی تأثیر محیط زیستی راه‌اندازی سیستم‌های تولید برق از سلول‌های خورشیدی (امان و همکاران[۱]، ۲۰۱۵) و همچنین مقایسه آلودگی‌های محیطی نیروگاه‌های حرارتی با خورشیدی (منشی‌پور و خلفی، ۱۳۸۸)، علی‌رغم آنکه این سامانه‌ها در زمان بهره‌برداری تقریباً عاری از هر نوع انتشار به اتمسفر یا مواد زائد در آب و خاک هستند اما در فرآیند ساخت تجهیزات نیروگاه خورشیدی و همچنین امحاء آن‌ها، کربن قابل ملاحظه‌ای منتشر می‌شود.

ازین‌رو ممیزی انرژی در نیروگاه‌ها وارائه الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر با هدف صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش انتشار کربنی در ایران مورد توجه بوده است (بیاتی و همکاران، ۱۳۹۱ و صادقی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین مطالعه‌های متعددی به منظور تحلیل ظرفیت بهینه نیروگاهی در کشور (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴)، ارزیابی پارامترهای لازم برای ارتقاء بهره‌وری انرژی الکتریکی و کاهش هزینه‌های مربوطه در صنعت (آذرشب، ۱۳۹۶)، بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی، اگزرژی[۲] و آلایندگی نیروگاه‌ها (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۷) انجام گرفته است.

در راستای جایگزینی منابع تجدیدپذیر در صنعت نیروگاهی ایران، تحلیل ترمودینامیکی ترکیب مزرعه خورشیدی با نیروگاه شهید منتظری نشان داده است که با ایجاد ترکیبی بهینه بین نیروگاه‌های حرارتی و فتوولتائیک می‌توان به کاهش سوخت مصرفی بویلر به میزان ۶۶۹۸ متر مکعب در ساعت و کاهش تولید دی‌اکسیدکربن به مقدار ۹۰/۴۳ تن در سال دست یافت (احمدی، ۱۳۹۵). همچنین طبق ارزیابی انجام گرفته کاربرد

---

۱. Aman et al.
۲. Exergy

انرژی خورشیدی در اهواز، می‌تواند از انتشار دی‌اکسیدکربن ۲۹/۵ تن جلوگیری کند (ساکی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

از سوی دیگر علاوه بر جایگزینی منابع انرژی در این نیروگاه‌ها می‌توان با بهبود تکنولوژی مصرف سوخت‌های فسیلی می‌توان به بازیافت حدود ۱۸ مگاوات انرژی و جلوگیری از انتشار حدود ۶۵۷۵۶ تن گاز آلاینده دی‌اکسیدکربن دست پیدا کرد (احمدی و حق‌جو، ۱۳۹۷). به‌علاوه افزایش بازده نیروگاه بر جنبه‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی نیز تأثیرگذار است. نتایج بررسی هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها و اثر آن‌ها بر سلامت انسان و محیط زیست نشان داده است افزایش بازدهی در نیروگاه‌های بخاری باعث کاهش قابل ملاحظه آلاینده‌های تولیدی و هزینه‌های اجتماعی در این نیروگاه‌ها می‌شود (صادقی و همکاران، ۱۳۸۶). در مطالعه‌های دیگر نیز تأثیر کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی و انتشار دی‌اکسیدکربن رابطه علیّ کوتاه‌مدت دوطرفه را ثابت کرده است (غفاری، ۱۳۹۵). همچنین بررسی ردپای کربن در تولید برق هیدروالکتریکی در مقایسه با برق فسیلی، حاکی از کاهش قابل توجه انتشار کربن دارد (بلو و همکاران[۱]، ۲۰۱۸).

به‌طورکلی راه‌کارهای متعددی جهت کاهش اثر مخرب صنایع تولید برق بر محیط زیست ارائه شده است (هونگ و همکاران[۲]، ۲۰۰۹). که می‌تواند در چند گروه کلی شامل روش‌های بهبود راندمان بهره‌برداری از نیروگاه‌های سوخت فسیلی، تغییر استفاده از سوخت‌های مورد استفاده در تولید برق به جایگزین‌های کم‌کربن، جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن و جلوگیری از انتشار آن در جو زمین، تصفیه پساب و استفاده مجدد آب در چرخه نیروگاهی و بازیافت پسماندها و جلوگیری از انتشار سموم و مواد آلاینده و روغنی به منابع آب و خاک اشاره کرد.

با وجود آنکه ارزیابی‌های صورت‌گرفته ناشی از جایگزینی منابع و بهبود بازدهی سیستم‌ها نه‌تنها در بخش نیروگاهی بلکه در بخش غیرنیروگاهی نیز مؤید صرفه‌جویی در مصرف سوخت و درنهایت کاهش انتشار آلاینده‌ها است، اما جایگاه نگرش همبست برای

---

۱. Bello et al.
۲. Hong et al.

دستیابی به راهکارهای کارآمد و مقرون به‌صرفه به منظور حصول امنیت انرژی و محیط زیست توأم با حفاظت از منابع آب و غذا همچنان خالی است.

## ۳. روش

در مطالعه حاضر اثر جایگزینی یک درصد از ظرفیت نیروگاه حرارتی با نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی بر میزان کاهش مصرف سوخت، آب و انتشار کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین‌منظور ابتدا نیروگاه خورشیدی متناسب با شرایط آب و هوایی در منطقه طراحی و سپس پیوند آب و انتشار کربن و منافع حاصل از آن در منطقه مورد مطالعه مورد بحث قرار گرفته است.

### ۳-۱. طراحی نیروگاه فتوولتائیک

به منظور طراحی نیروگاه فتوولتائیک، شبیه‌سازی برداشت انرژی و محاسبه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در سال پایه ۱۴۰۰، از نرم‌افزار PVsyst به‌عنوان ابزار مدلسازی انرژی استفاده شده است. ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک، ۱ درصد ظرفیت اسمی نیروگاه بخاری زرند معادل ۶۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است. برای طراحی مجموعه پنل و اینورترهای نیروگاه فتوولتائیک، متناسب با موقعیت جغرافیایی محل و براساس تابش سالانه خورشید در منطقه مورد مطالعه، زاویه سمت صفر درجه (رئوفی‌راد، ۱۳۸۶)، زاویه شیب ۲۹ درجه و توان نامی هر ماژول ۳۰۵ وات پنل در نظر گرفته شد.

### ۳-۲. تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست

به منظور تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست، میزان صرفه‌جویی در مصرف منابع انرژی، آب و میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در جایگزینی نیروگاه ترکیبی محاسبه شد.

- **صرفه‌جویی در منابع انرژی**

برای محاسبه میزان صرفه‌جویی در منابع انرژی، نرخ سوخت مصرفی به ازای تولید ناویژه در یک سال توسط نیروگاه بخاری زرند، معادل ۳۱۷/۱ لیتر به ازاء هر مگاوات ساعت در نظر گرفته شد و براساس رابطه (۱)، میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت فسیلی در طول

عمر مفید ۲۰ ساله نیروگاه فتوولتائیک، محاسبه گردید. همچنین برای تبدیل این میزان از مصرف سوخت به انرژی، ارزش حرارتی نفت کوره معادل با ۱/۰۳۲ تن معادل نفت خام به ازاء هر متر مکعب و گازوئیل معادل با ۰/۹۰۳ تن معادل نفت خام به ازاء هر متر مکعب (ترازنامه هیدروکربوری، ۱۳۹۶) لحاظ و بالانس انرژی در قالب موازنه انرژی صرفه‌جویی‌شده به ترتیب براساس رابطه (۱) محاسبه شد.

$$EB= E\times Y\times F\times H \quad (1)$$

که در آن EB، E، Y، F و H به ترتیب بالانس انرژی، انرژی تزریق‌شده به شبکه توسط سیستم فتوولتائیک (مگاوات ساعت)، عمر مفید سیستم فتوولتائیک (سال)، سوخت مصرفی (لیتر به ازاء هر مگاوات ساعت) و ارزش حرارتی سوخت (تن معادل نفت خام به ازاء هر لیتر) است.

### • کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن

ارزیابی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از جایگزینی، با استفاده از نرم‌افزار PVsyst محاسبه شد. متوسط دی‌اکسیدکربن منتشر شده در یک سال توسط نیروگاه بخاری زرند، معادل ۱۰۹۵/۳ گرم در کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین آلودگی فرآیند استخراج سیلیکون برای ساخت پنل‌های فتوولتائیک نیز در محاسبات معادل انتشار دی‌اکسیدکربن ۲۹/۶ تن لحاظ شد.

به‌علاوه به‌منظور ارزیابی اثر کاهش انتشار کربن بر زیست‌بوم و سلامت انسان‌ها، از روش ارزیابی محیط‌زیستی با مدل رسیپ[۱]، استفاده شده است. در این روش، اثر انتشار کربن و ماندگاری گرمایش جهانی گازهای گلخانه‌ای منتشر شده بر روی سه شاخص نهایی زیست‌بوم، سلامت انسان و منابع، تحت سه سناریوی زمانی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بررسی و نتایج آن در محدوده منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

### • صرفه‌جویی در منابع آب

با لحاظ متوسط آب مصرفی سالیانه توسط نیروگاه بخاری زرند و نیروگاه فتوولتائیک به ترتیب معادل ۳۲۷۸/۰۷ لیتر به ازاء هر مگاوات ساعت و ۰/۰۷۵ لیتر به ازاء هر کیلووات

---

۱. ReCipe

ساعت (موسوی و یوسفی، ۱۳۹۹)، میزان کاهش مصرف آب در طول عمر مفید نیروگاه ترکیبی، محاسبه شد.

## • منطقه مطالعاتی

در این تحقیق براساس مطالعه توجیه‌پذیری و اولویت‌بندی فنی و محیط زیستی انجام گرفته در کشور جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی فتوولتائیک (آریانفر و همکاران[۱]، ۲۰۲۰)، استان کرمان با طول و عرض جغرافیایی معادل ۵۶/۹۵ درجه شرقی و ۳۰/۲۷ درجه شمالی، به‌عنوان منطقه با ظرفیت بالای تولید توان خورشیدی انتخاب شد. این استان دارای ۱۸۳۱۹۳ کیلومتر مربع مساحت و در قسمت جنوب شرقی کشور ایران و در ارتفاع ۱۷۴ متر قرار گرفته است. برای ارزیابی همبست انرژی، آب و محیط زیست در نیروگاه ترکیبی حرارتی و خورشیدی در کرمان، نیروگاه حرارتی زرند به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد. سوخت مصرفی این نیروگاه، نفت کوره و گازوئیل است. این نیروگاه دارای سیستم خنک‌کننده از نوع برج خنک‌کننده‌تر می‌باشد (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۵).

مشخصات فنی و موقعیت مکانی این نیروگاه به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۱) نمایش داده شده است.

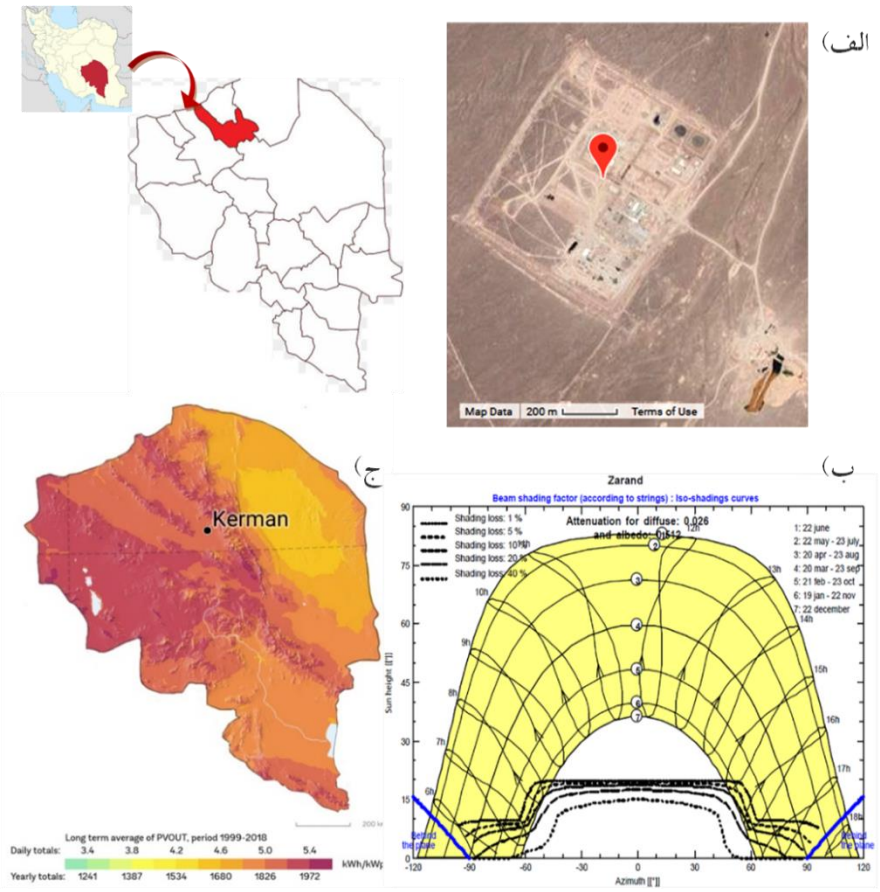
**جدول ۱. مشخصات نیروگاه بخاری زرند کرمان**

| فاکتور | میزان | واحد |
|---|---|---|
| مساحت نیروگاه | ۱۹/۵ | هکتار |
| ظرفیت اسمی | ٦۰ | مگاوات |
| مصرف داخلی | ۲۱۳۸٦ | مگاوات ساعت |
| تولید ناویژه | ۲۷۰۷۱۱ | مگاوات ساعت |
| بازدهی | ۲۷/۳ | درصد |
| میزان سوخت مصرفی | نفت‌کوره: ۹۱٤۹٥۰۰۰ و گازوئیل: ۱۲۰۰۰ | لیتر در سال |
| متوسط دی‌اکسیدکربن تولیدی | ۱۰۹٥/۳ | گرم در کیلووات ساعت |
| آب مصرفی در سال | ۹٤٦۰۰۰ | متر مکعب در سال |

منبع: ترازنامه انرژی، ۱۳۹۹، نوری و همکاران، ۱۳۹۷، بنده‌ای و همکاران، ۱۳۹۳

۱. Ariyanfar et al.

**شکل ۱. الف: موقعیت نیروگاه در استان کرمان، ب: ظرفیت توان فتوولتاییک در این استان، ج: نمودار خورشیدی و سایه‌اندازی**




منبع: الف) Google map,۲۰۲۲ ب) Solargis,۲۰۲۲ ج) یافته‌های تحقیق

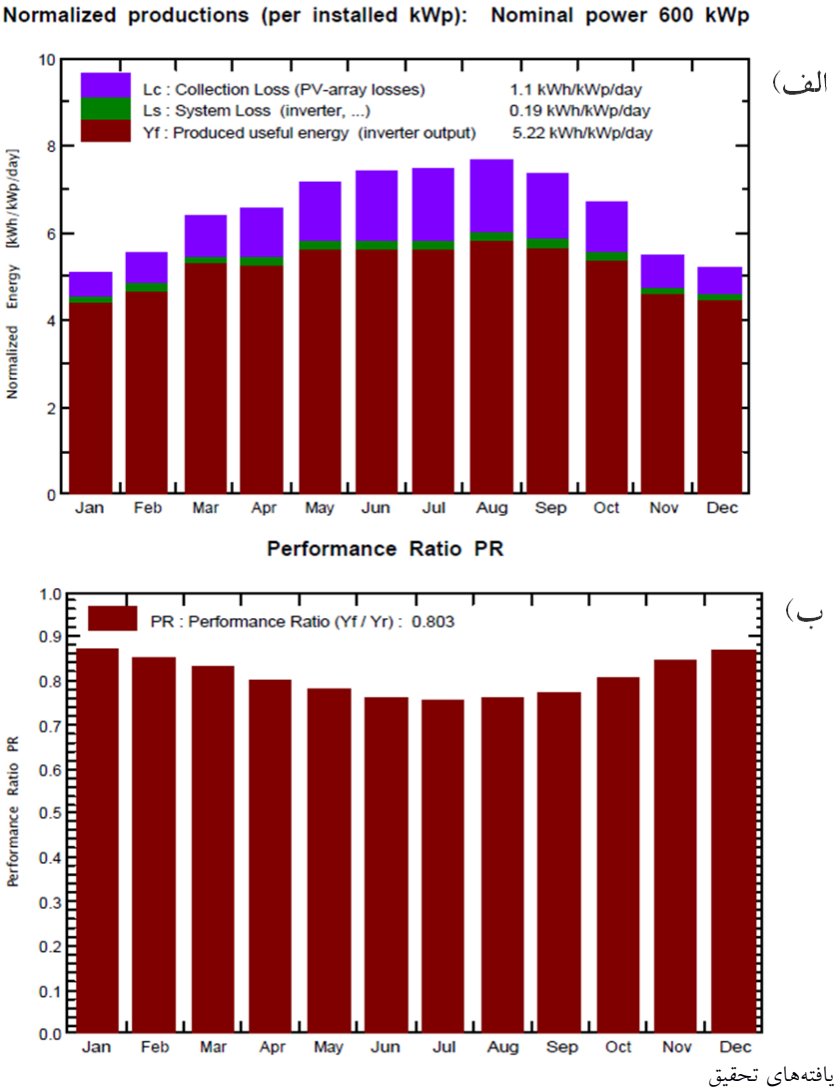
## ٤. یافته‌ها

### ٤-١. طراحی نیروگاه فتوولتاییک خورشیدی

براساس موقعیت جغرافیایی و مشخصات تابشی و آب و هوایی زرند کرمان و همچنین منطبق بر نیاز مصرفی تعیین‌شده، نیروگاه خورشیدی با متوسط ضریب عملکرد نیروگاهی برابر ۰/۸۰۳ طراحی شد. در شکل (۲. الف) کل انرژی تولیدی نیروگاه شامل تلفات بخش DC، AC و خروجی اینورتر به شبکه در فصول مختلف به صورت نرمال‌شده در توان نامی ۶۰۰ کیلووات پنل نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در فصول گرم به

علت افزایش میزان تابش جهانی بر سطح پنل‌ها (نیجاوان و همکاران[۱]، ۲۰۲۰)، انرژی مفید خروجی از اینورتر به بیشترین حد خود می‌رسد ولی به‌خاطر افزایش دمای محیط، تلفات نیز افزایش یافته است. همچنین به علت افزایش دمای محیط در فصول گرم سال، نسبت تولید واقعی به تولید ایده‌آل در این نیروگاه به حداقل مقدار خود می‌رسد شکل (۲. ب).

**شکل ۲. الف: نمودار انرژی تولیدی نرمال‌شده در سال، ب: ضریب عملکرد سالیانه**

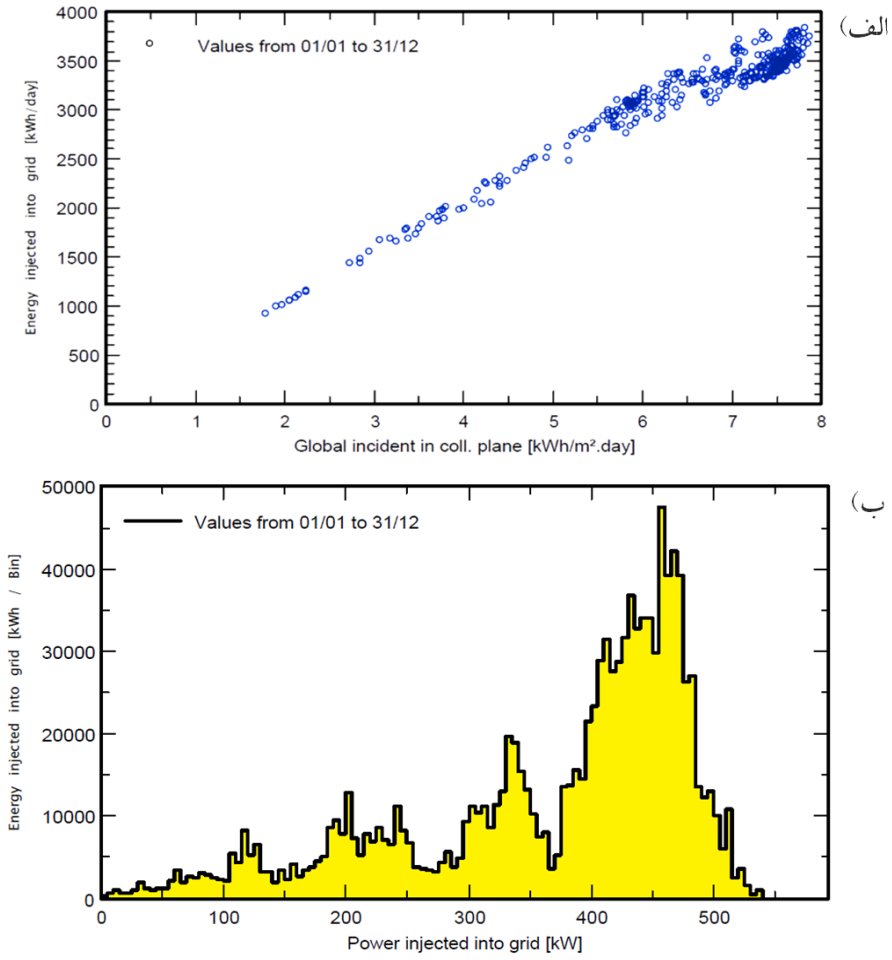



منبع: یافته‌های تحقیق

۱. Nijhawan et al.

شکل (۲. الف) نمودار انرژی تولیدی نرمال شده از نیروگاه خورشیدی در طول سال را نمایش می‌هد. در این نمودار میزان اتلاف در پنل‌های فتوولتاییک و سیستم تبدیل و انتقال به ترتیب با رنگ بنفش و سبز نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، علی‌رغم آنکه در ماههای گرم سال میزان انرژی مفید تولیدی بیشتری به سبب شرایط تابشی در این بازه زمانی حاصل می‌شود، اما به دلیل افزایش دما، سیستم با افزایش اتلاف در جمع‌آوری انرژی خورشیدی و افت ضریب عملکرد پنل‌های فتوولتاییک مواجه است (شکل ۲. ب).

**شکل ۳. الف) میزان انرژی تزریقی به شبکه به ازاء تابش جهانی، ب) برحسب توان تزریقی به شبکه**




منبع: یافته‌های تحقیق

شکل (۳. الف) نمودار ورودی خروجی سیستم را در قالب انرژی فتوولتاییک تزریق شده به شبکه به ازاء تابش جهانی دریافت شده توسط پنل‌ها در هر مترمربع در روز را نمایش می‌دهد. در این نمودار نتایج داده‌های شبیه‌سازی شده در طول ۱۲ ماه نشان می‌دهد حداقل مربعات خطای نقاط کم و سیستم فتوولتاییک طراحی شده، به خوبی فاکتور تابش را به‌عنوان یک عامل مؤثر در بهبود توان و بازدهی دنبال کرده است.

همچنین نمودار توزیع انرژی نسبت به توان تزریقی به شبکه (شکل ۳. ب)، نشان می‌دهد عمده انرژی تزریقی به شبکه در بازه توان ۵۰۰-۴۰۰ کیلووات است. این امر بیانگر اثر عدم قطعیت‌های موقعیت‌های جغرافیایی و تأثیر آن بر تابش است که سبب نوساناتی در توان خروجی و به تبع آن میزان انرژی تولیدی در یک بازه مشخص می‌شود. بنابراین در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی فسیلی که در طول سال همواره توان نسبتاً ثابتی را به شبکه تزریق می‌کنند، احداث نیروگاه خورشیدی با قابلیت پاسخگویی مطمئن به شبکه، نیازمند طراحی دقیق جهت مدیریت عدم قطعیت‌های فنی و تطابق بیشتر با الگوی مصرف در شبکه است.

در ادامه روند تغییر ورودی‌ها (شامل تابش و دما) و خروجی‌های نیروگاه فتوولتائیک (شامل انرژی تولیدی و ضریب عملکرد) در ماه‌های مختلف سال در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد از مجموع ۲۱۲۸/۳ کیلو وات ساعت در هر متر مربع تابش افقی جهانی با میانگین ضریب عملکرد ۰/۸، جمعاً ۱۱۴۲/۱ مگاوات ساعت انرژی در طول سال به شبکه تزریق خواهد شد. بالاترین و پایین‌ترین دما در منطقه مورد مطالعه به ترتیب معادل ۴/۶۹ درجه سلسیوس در دی ماه و ۲۹/۱۷ درجه سلسیوس در تیر ماه بوده است که با ضریب عملکرد در این ماه‌ها رابطه مستقیم داشته است. همچنین کم‌ترین و بیشترین انرژی مؤثر خروجی از آرایه‌ها به ترتیب در مرداد ماه معادل ۱۱۲ مگاوات ساعت و بهمن‌ماه معادل ۸۱/۶ مگاوات ساعت بوده است.

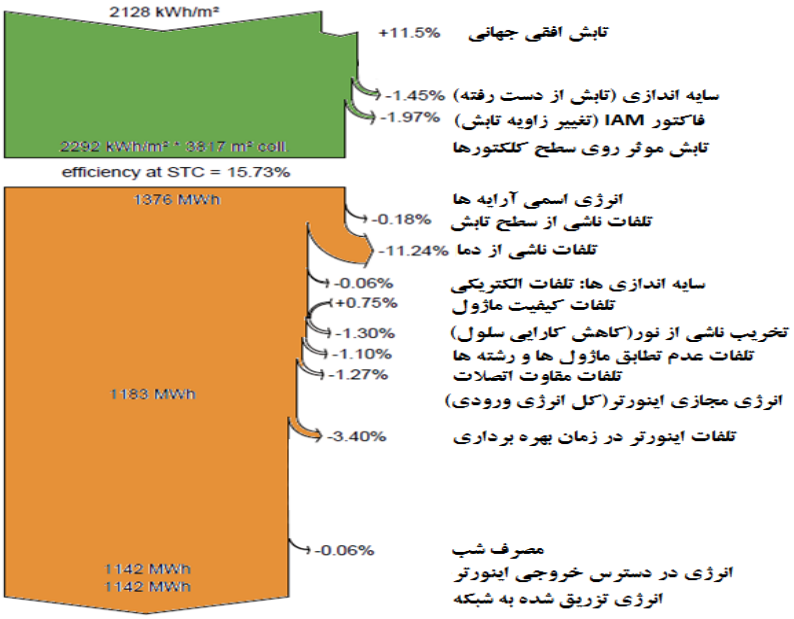
**جدول۲. روند تغییر خروجی‌ها در ماه‌های مختلف سال توسط نیروگاه فتوولتائیک (یافته‌های تحقیق)**

| ماه‌های سال | تابش افقی جهانی(کیلووات ساعت در مترمبع) | تابش پراکنده افقی (کیلووات ساعت در مترمربع) | دمای محیط (درجه سلسیوس) | انرژی مؤثر در خروجی آرایه (مگاوات ساعت) | انرژی تزریقی به شبکه (مگاوات ساعت) | نسبت عملکرد |
|---|---|---|---|---|---|---|
| دی | ۱۰۸/۷ | ٤۰/۰۱ | ٤/٦۹ | ۸۵/۰ | ۸۱/۹ | ۰/۸۷۲ |
| بهمن | ۱۱۹/۱ | ٤۷/۱۱ | ۸/۱۹ | ۸۱/٦ | ۸۷/۸ | ۰/۸۵۰ |
| اسفند | ۱۷۱/۱ | ٦۵/۰٤ | ۱۲/۵۵ | ۱۰۲/۲ | ۹۸/٦ | ۰/۸۳۰ |
| فروردین | ۱۹۰/٦ | ۷٤/۸۹ | ۱۸/۰۲ | ۹۸/۳ | ۹٤/۷ | ۰/۸۰۱ |
| اردیبهشت | ۲۳۳/۰ | ۷۸/٦۱ | ۲۳/۲۹ | ۱۰۸/۳ | ۱۰٤/٤ | ۰/۷۸۳ |
| خرداد | ۲٤۳/٤ | ۷۵/٤۲ | ۲۷/۹٦ | ۱۰۵/۳ | ۱۰۱/۵ | ۰/۷٦۰ |
| تیر | ۲٤۷/۸ | ۷۵/۱۹ | ۲۹/۱۷ | ۱۰۸/٦ | ۱۰٤/۷ | ۰/۷۵۵ |
| مرداد | ۲۳٤/۹ | ۷۱/٤۵ | ۲٦/٦۵ | ۱۱۲/۰ | ۱۰۸/۲ | ۰/۷٦۱ |
| شهریور | ۱۹٦/۰ | ۵۸/۹۸ | ۲۳/۹٦ | ۱۰۵/۷ | ۱۰۲/۳ | ۰/۷۷۱ |
| مهر | ۱٦۲/٤ | ۵۱/۲۰ | ۱۸/۱٤ | ۱۰۳/٦ | ۱۰۰/۲ | ۰/۸۰۵ |
| آبان | ۱۱٦/۰ | ٤۰/۲۵ | ۱۰/٤٤ | ۸٦/۳ | ۸۳/٤ | ۰/۸٤٦ |
| آذر | ۱۰۵/۲ | ۳۵/۷۰ | ۵/۷۰ | ۸٦/۳ | ۸۳/۵ | ۰/۸٦۸ |
| کل سال | ۲۱۲۸/۳ | ۷۱۳/۸۷ | ۱۷/٤٤ | ۱۱۸۳/۱ | ۱۱٤۲/۱ | ۰/۸۰۳ |

منبع: یافته‌های تحقیق

تلفات نیروگاه فتوولتائیک نیز طی یک سال برآورد شده است (شکل ۴). بر این اساس، تابش جهانی افقی به عنوان کل انرژی ورودی با لحاظ انواع مختلف تلفات (ناشی از تابش، دما، سایه‌اندازی، کیفیت ماژول‌ها، اتصالات و مقاومت‌های الکتریکی)، ضمن تبدیل به انرژی مفید خروجی از اینورتر، به شبکه تزریق می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) نمایش داده شده است، بیشترین میزان اتلاف در سیستم طراحی شده مربوط به تلفات ناشی از دما و عملکرد اینورتر در زمان بهره‌برداری به ترتیب به مقدار ۱۱/۲۴ درصد و ۳/۴۰ درصد است. همچنین تلفات ناشی از تغییر زاویه تابش (۱/۹۷ درصد)، سایه‌اندازی (۱/۴۵ درصد)، کاهش کارایی سلول (۱/۳ درصد) و تلفات مقاومت اتصالات (۱/۲۷ درصد)، در مرتبه بعدی قرار گرفته است.

شکل ٤: نمودار تلفات انرژی در نیروگاه فتوولتائیک




منبع: یافته‌های تحقیق

## • ارزیابی بر پایه نگرش تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست

در این بخش میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت فسیلی، آب و همچنین انتشار دی‌اکسیدکربن این نیروگاه در مقایسه با ظرفیت مشابه در نیروگاه فسیلی زرند تحلیل و مقایسه شده است. با توجه به اینکه احتراق ناقص سوخت و راندمان حرارتی پایین نیروگاه‌های حرارتی به‌عنوان دو عامل اساسی در انتشار آلاینده‌ها محسوب می‌شوند، تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست، به دنبال ارائه راه‌کاری در کاهش آلودگی کربنی نیروگاه‌های حرارتی، کاهش مصرف سوخت، ضمن تقویت راندمان نیروگاه‌ها و کاهش مصرف آب است.

## • ارزیابی صرفه‌جویی منابع انرژی

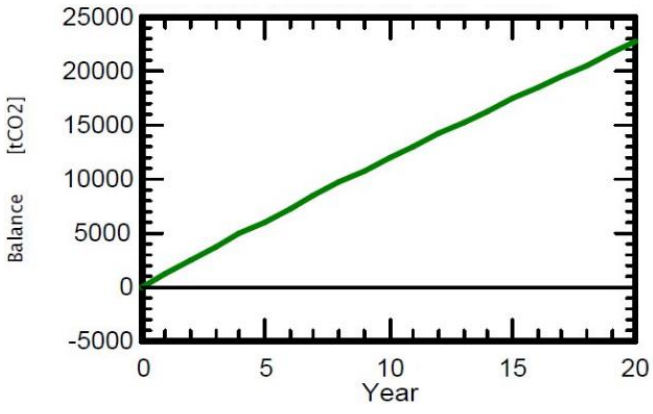
با طراحی نیروگاه فتوولتائیک در طول عمر مفید ۲۰ ساله و با لحاظ نرخ سوخت مصرفی به ازای تولید ناویژه، سالانه در مصرف معادل ۳۱۷/۱ لیتر به ازاء مگاوات ساعت سوخت فسیلی در نیروگاه بخاری زرند، صرفه‌جویی خواهد شد. نتایج حاصل از محاسبات نشان

داد، در صورت جایگزینی تنها ۱ درصد از مصارف فسیلی با نیروگاه خورشیدی، جمعاً به میزان ۷/۲۴ میلیون لیتر در مصرف سوخت نفت کوره و گازوئیل صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین با توجه به ارزش حرارتی نفت کوره و گازوئیل، میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی در طول عمر مفید نیروگاه فتوولتائیک معادل ۷۴۷۴/۶۱ تن معاول نفت خام می‌باشد. بنابراین تنها در طول یک سال، نیروگاه فتوولتائیک قادر خواهد بود به طور متوسط از مصرف ۳۶۲/۱۶ متر مکعب سوخت فسیلی معادل با ۳۷۳/۷۳ تن معادل نفت خام انرژی در نیروگاه بخاری، جلوگیری کند که این میزان سهمی معادل با ۰/۴ درصد از کل سوخت مصرفی سالانه نیروگاه را شامل خواهد شد.

## • ارزیابی میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن

یکی از مهم‌ترین عوامل عملکرد ضعیف در بخش پایداری محیط زیستی صنعت تولید برق از منابع فسیلی، میزان بالای انتشار گازهای آلاینده در کشور است. نتایج ارزیابی میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن نشان داد به ازای تولید سالیانه ۱۱۴۲/۱ مگاوات ساعت برق، میزان انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن از نیروگاه بخاری زرند و نیروگاه فتوولتائیک به ترتیب برابر ۱۰۹۵/۳ و ۱/۳ گرم در کیلووات ساعت (معادل دی‌اکسیدکربن ۲۹/۶ تن در طول ۲۰ سال بهره‌برداری) خواهد بود. شکل ۵، میزان صرفه‌جویی سالانه در انتشار دی‌اکسیدکربن در طول دوره بهره‌برداری از نیروگاه را نشان می‌دهد.

**شکل ۵. صرفه‌جویی سالانه در انتشار دی‌اکسیدکربن در طول سال‌های بهره‌برداری از نیروگاه**




منبع: یافته‌های تحقیق

براساس نتایج به دست آمده، در یک سال بهره‌برداری از سیکل ترکیبی حرارتی ـ خورشیدی، نیروگاه فتوولتائیک توانسته است به طور متوسط از انتشار دی‌اکسیدکربن ۱۲۴۹/۴۶ تن، جلوگیری کند. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی اثر کاهش انتشار کربن بر زیست‌بوم، سلامت انسان و منابع در مدل رسیپ، نشان داده است که تحت هر سه سناریو ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله، اثر محیط زیستی این جایگزینی بر زیست‌بوم و سلامت انسان بیشتر از حفاظت منابع خواهد بود. ازاین‌رو حتی در کوتاه‌مدت در صورت جایگزینی کسری از ظرفیت نیروگاه با منابع تجدیدپذیر، می‌توان با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای طی دوره عمر نیروگاه در کوتاه‌مدت به طور قابل توجهی به حفظ زیست‌بوم منطقه کمک کرد.

میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده از نیروگاه فتوولتائیک، برابر ۰/۱۵ درصد متوسط انتشار سالانه کربن توسط نیروگاه‌های حرارتی در کشور است. برای مقایسه، در صورت جایگزینی نیروگاه بادی با طول عمر سرویس‌دهی مشابه نیروگاه فتوولتائیک معادل ۲۰سال، گرچه در طول مدت کارکرد نیروگاه، انتشار دی‌اکسیدکربن ناچیز خواهد بود، اما در چرخه عمر نیروگاه مراحلی نظیر ساخت، دورهٔ کارکرد و بازیافت قطعات بازنشست شده را دربر می‌گیرد که موجب انتشار مواد کربنی می‌شود. بنابراین عمده حجم انتشار دی‌اکسیدکربن در نیروگاه‌های بادی مرتبط با بخش ساخت تجهیزات و بازیافت، معادل ۳/۹ گرم در کیلووات ساعت است (زی و همکاران[۱]، ۲۰۲۰) که به مراتب بیشتر از نیروگاه فتوولتاییک است.

## • ارزیابی میزان صرفه‌جویی در منابع آبی

فناوری‌هایی که در زنجیره تولید توان به کار می‌روند، نیاز به مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده، مبادله‌کننده‌های حرارتی و واکنش‌گرهای شیمیایی دارند. فرآیندهای تولید برق حرارتی ناگزیر مقدار قابل توجهی گرما تولید می‌کنند که از آب به عنوان یک مایع خنک‌کننده برای جلوگیری از ورود این گرما به محیط زیست در نیروگاه استفاده می‌شود. میانگین مقدار آب مصرف‌شده در فرآیند تولید برق در نیروگاه‌های بخاری، گازی، ترکیبی و فتوولتائیک به ترتیب معادل ۱/۱۷، ۰/۰۲۵، ۱/۰۱۲ و ۰/۰۷۵ لیتر در کیلووات

۱. Xie et al.

ساعت می‌باشد (موسوی و یوسفی، ۱۳۹۹). با توجه به اینکه متوسط آب مصرفی سالیانه نیروگاه بخاری زرند و نیروگاه فتوولتائیک طراحی شده به ترتیب برابر ۳۲۷۸/۰۷ لیتر در مگاوات ساعت و ۰/۰۷۵ لیتر در کیلووات ساعت می‌باشد، نتایج محاسبه میزان صرفه‌جویی در مصرف آب نیروگاه زرند، نشان داد با جایگزینی حداقل سوخت مصرفی نیروگاه با نیروگاه فتوولتائیک در کل طول عمر مفید نیروگاه، به میزان ۷۳۱۶۰ متر مکعب در مصرف آب کل نیروگاه صرفه‌جویی خواهد شد. بنابراین در یک سال، نیروگاه فتوولتائیک توانسته به طور متوسط از مصرف آب به میزان ۳۶۵۸ متر مکعب توسط نیروگاه بخاری جلوگیری کند که این میزان صرفه‌جویی در استفاده از ذخایر آبی کشور، به‌خصوص در اقلیم خشکی مانند کرمان دارای اهمیت به سزایی است. برای مقایسه این میزان صرفه‌جویی، میانگین مقدار آب مصرف‌شده در فرآیند تولید برق یک نیروگاه بادی، ناچیز محاسبه شده‌است (موسوی و یوسفی، ۱۳۹۹) ولی از سوی دیگر نسبت مساحت به تولید ناویژه سالانه نیروگاه بادی نیز حدود $۵/۶\times۱۰^{-۴}$ به دست آمده است (دنهولوم و همکاران[۱]، ۲۰۰۹). بدین ترتیب گرچه نیروگاه بادی ظرفیت قابل توجهی در صرفه‌جویی منابع آبی خواهد داشت اما به لحاظ مساحت بالای زمین مورد نیاز، محدودیت تخصیص اراضی در پهنه‌های با ظرفیت بالای تولید را به همراه خواهد داشت.

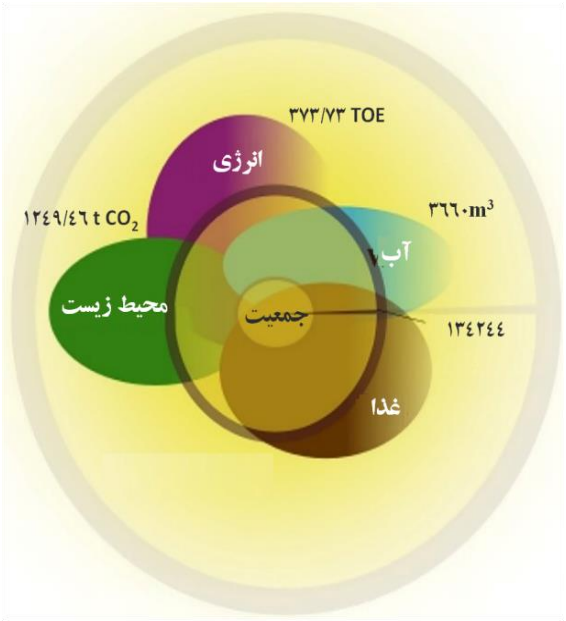
## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

لزوم کاهش میزان انتشار گازهای آلاینده توسط نیروگاه‌های حرارتی کشور و حفظ منابع آبی و مواد غذایی مسئله‌ای است که اهمیت ارائه راهکار بر مبنای نگرش همبست را محرز می‌کند. در این مطالعه اثر جایگزینی ۱ درصد از ظرفیت نیروگاه بخاری زرند کرمان با نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی به کمک نگرش تحلیل پیوند انرژی، آب و محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی نشان داده است با طراحی این نیروگاه ترکیبی حرارتی و فتوولتائیک، به صورت سالانه از انتشار ۱۲۴۹/۴۶ تن گاز دی‌اکسیدکربن جلوگیری خواهد شد. این میزان معادل ذخیره ۳۶۲۱۶۰ لیتر در منابع فسیلی (نفت کوره و گازوئیل) و معادل صرفه‌جویی ۳۷۳/۷۳ تن معادل نفت خام انرژی بوده است که علاوه بر حفاظت از ذخایر ارزشمند طبیعی، ضمن تأمین تقاضا از

۱. Denholm et al.

طریق منابع تجدیدپذیر، منجر به کاهش نیاز آبی در بخش نیروگاهی به میزان ۳/۶۶×۱۰^۶ لیتر خواهد شد. صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند در تأمین سرانه روستاهای دور از دسترس و یا بخش کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار گیرد و در تکمیل زنجیره همبست انرژی، آب و محیط زیست نقش ایفا کند. نتایج همبست در حلقه مشترک انرژی و انتشار کربنی که در نهایت بر جمعیت مؤثر و امنیت پایدار غذایی آن‌ها نیز تأثیرگذار خواهد بود، در شکل (۶)، نمایش داده شده است.

**شکل ٦. رابطه امنیت انرژی، آب و محیط زیست در نگرش همبست (یافته‌های تحقیق)**




همان‌طورکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود، میزان صرفه‌جویی سالانه در مصرف انرژی برابر با ۳۷۳/۷۳ تن معادل نفت خام محاسبه شد. با توجه به سرانه مصرف سالانه انرژی در کشور معادل با ۲/۰۳ تن معادل نفت خام به ازای هر نفر، این میزان صرفه‌جویی قادر است در سطح تقاضای انرژی تقریباً ۱۸۴ نفر در سال را پوشش دهد. از طرفی براساس میزان صرفه‌جویی سالانه در مصرف آب نیروگاه برابر با ۳/۶۶×۱۰^۶ لیتر، با توجه به سرانه مصرف سالانه آب در کشور معادل با ۵۴۷۵۰ لیتر به ازای هر نفر و با لحاظ آنکه ٪۴۱ از جمعیت استان کرمان در روستاها زندگی می‌کنند، این میزان صرفه‌جویی قادر است سالیانه تقاضای

آب ۲ روستای دور از دسترس را پوشش دهد. همچنین این میزان صرفه‌جویی‌شده در مصرف آب، می‌تواند در کشت مواد غذایی نیز مؤثر بوده و ارزش وجه چهارم یعنی امنیت غذایی را نیز در زنجیره همبست به نمایش گذارد. از لحاظ اقتصادی نیز با توجه به آنکه میانگین هزینه ترازشده انرژی فتوولتاییک خورشیدی در جهان در مقیاس صنعتی کاهش یافته است، این روند کاهش در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، چشم‌انداز روشنی را در سناریوهای جایگزینی منابع تجدیدپذیر ایجاد خواهد کرد.

از سوی دیگر شهر زرند با داشتن، پالایشگاه، نیروگاه، کارخانه‌ها، شهرک‌های صنعتی متعدد و وسیع‌ترین معادن زغال‌سنگ، به یک شهر صنعتی تبدیل شده است که روزانه حجم قابل توجهی از جمعیت متأثر خود را در معرض انتشار منابع آلاینده کربنی و گوگردی قرار می‌دهد. نتایج به دست آمده از سناریوهای کوتاه‌مدت و میان‌مدت ناشی از جایگزینی حداقلی منابع تجدیدپذیر با فسیلی در منطقه مورد مطالعه، گواه از تأثیر قابل ملاحظه در منافع زیست بوم و سلامت جامعه تحت تأثیر بوده است. همچنین این مهم می‌تواند منجر به افزایش منافع اقتصادی ناشی از کاهش انتشار کربن و جذب درآمدهای ارزی از محل مکانیسم‌های بین‌المللی حمایت از تکنولوژی‌های توسعه پاک شود.

نتایج حاصل از مقایسه این جایگزینی با سایر منابع نشان می‌دهد، کمترین میزان انتشار کربن را نیروگاه فتوولتائیک، کمترین میزان مصرف آب را نیروگاه بادی و کمترین نسبت مساحت به تولید ناویژه سالانه را نیروگاه بخاری زرند به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین طراحی هیبریدی از نیروگاه فتوولتائیک و بادی، می‌تواند نقطه بهینه‌ای را در مصرف آب و انتشار دی‌اکسیدکربن در نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی ایجاد نماید. بر این اساس با مطالعه اقدام‌های صورت گرفته در داخل و خارج از کشور و همچنین بررسی اسناد بالادستی، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های ممکن جهت پیوند آب، انرژی و محیط زیست در نیروگاه ارائه شده است (شکل ۷).

**شکل ۷. راهکارهای پیوند آب، انرژی و محیط زیست در تولید برق نیروگاهی**

منبع: یافته‌های تحقیق

با دیدگاه حجمی همبست، راه‌کارها از زاویه تولید و مصرف انرژی، آب، غذا، آثار محیط زیستی، اقتصاد، کاربری زمین و معیشت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که این امر باعث می‌شود تمام موانع و مشکل‌ها در اجرایی شدن راه‌کارها و ایجاد تغییر مثبت در وضعیت کشور، شناسایی شوند. بدیهی است که بر سر راه مسائل همبست، محدودیت‌های فنی و اقتصادی نیز وجود دارد. نسبت مساحت به تولید ناویژه سالانهٔ بالا در نیروگاه‌های فتوولتائیک، بازدهی و عدم قطعیت‌های تکنیکی و آب و هوایی از چالش‌های برداشت اقتصادی از این منابع است.

## ٦. تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

**ORCID**

Sepideh Abedi https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۷۱۰۵-۱٦٤٤

Matin Kazemi Namin https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۹٤۹۳-٤۸٦۱

Ali Akbar Yaghoubi https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۱-۸۳۳۳-۱۰٤۸

Shaghayegh Asadi Shizari https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۷۳۷۲-۰۱۲۷

Maede Morsalpour https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۹۸٤٦-۹۳۲X

## ۷. منابع

احمدی، غلامرضا و حق‌جو، حسین. (۱۳۹۷). تحلیل انرژی، اگزرژی و زیست‌محیطی توربین انبساطی ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی نیروگاه شهید منتظری. کنفرانس سراسری دانش و فناوری مهندسی مکانیک و برق ایران، (۴). ایران.

احمدی، غلامرضا. (۱۳۹۵). تحلیل ترمودینامیکی ادغام مزرعه خورشیدی با نیروگاه شهید منتظری. کنفرانس بین‌المللی برق، (۳۱). ایران.

بنده‌ای، محمد؛ نجف‌زاده، کیان و بیانی، غلامرضا. (۱۳۹۳). بررسی و تحلیل مصرف سالانه سوخت مازوت و اثرات آن بر پارامترهای نیروگاه‌های بخاری کشور (انتشار آلاینده‌ها، راندمان، ضریب بهره‌برداری و ظرفیت تولید برق). کنفرانس نیروگاه‌های برق،، بندرعباس، (۷)، ایران.

بیاتی، غلامرضا؛ نجف‌زاده، امین حسنی‌کاخکی، کیان و شیبانی‌فر، حامد. (۱۳۹۱). ممیزی انرژی نیروگاه بخار نمونه، مدلسازی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی. کنفرانس نیروگاه‌های برق، (۵)، ایران.

وزارت نیرو. (۱۳۹۹). *ترازنامه انرژی* ۱۳۹۷. نشر دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی، ایران.

وزارت نیرو. (۱۳۹۸). *آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی*. نشر شرکت مادر تخصصی توانیر، ایران.

وزارت نفت. (۱۳۹۶). *ترازنامه هیدروکربوری کشور*. مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، نشر گروه ترازنامه هیدروکربوری معاونت برنامه‌ریزی، ایران.

رئوفی‌راد، مجید. (۱۳۸۶). *طراحی سیستم‌های خورشیدی ساختمان در ایران*، انتشارات فدک ایساتیس، چاپ اول.

غفاری، هادی، مولایی محمد و علیمحمد، سوسن. (۱۳۹۵). تأثیر مصرف انرژی بادی بر رشد اقتصادی و انتشار دی‌اکسیدکربن. *پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی*، (۳)۲، صفحات ۲۵۳-۲۲۹.

سعیدی، محسن؛ کرباسی، عبدالرضا؛ سهراب، تیکا و صمدی، رضا. (۱۳۸۴). *مدیریت زیست‌محیطی نیروگاه‌ها*. نشر سازمان بهره‌وری انرژی ایران، وزارت نیرو، چاپ اول.

سروش‌نیا، شیوا. (۱۳۹۵). به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر لازمه گسترش اقتصاد سبز: مطالعه موردی وضعیت کنونی انرژی بادی ایران با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی. کنفرانس بین‌المللی اقتصاد سبز، (۳)، ایران.

شعبانی اقطاء، رسول؛ رجبی‌زاده، احمد؛ جعفری منصوریان، حسین؛ رجبی‌زاده، بهار و احمدی نمچ، آرش. (۱۳۹۵). ساماندهی فاضلاب نیروگاه حرارتی زرند: ارزیابی روش‌های تصفیه فاضلاب، برآورد اقتصادی و پیشنهاد گزینه برتر، *بهداشت و توسعه*، (۴)۵، ۳۱۲-۲۹۷.

صادقی، حسین، آذر، عادل و خاکسار آستانه، سمانه. (۱۳۹۴). بهینه‌یابی تأمین منابع انرژی با هدف تولید برق، چشم‌انداز ایران در افق ۱۴۰۴. *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی رشد و توسعه پایدار*، (۳)۱۵، صفحات ۱۱۸-۹۱.

منشی‌پور، سمیرا و خلفی، فرید. (۱۳۸۸). مقایسه آلودگی‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌های حرارتی سوخت فسیلی در کشور با سیستم‌های برق خورشیدی (فتولتائیک) P.V، همایش ملی انرژی (پایداری انرژی، امنیت عرضه، مدیریت تقاضا و اصلاح الگوی مصرف)، (۷)، ایران.

محمدی، تیمور؛ تکلیف، عاطفه و بختیار، محسن. (۱۳۹۴). تحلیل ظرفیت بهینه نیروگاهی در ایران و بررسی اثرات صرفه‌جویی مصرف انرژی برآن. *پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، (۱)۱، صفحات ۱۵-۱.

آذرشب، امیرنظام. (۱۳۹۶). پارامترهای لازم جهت بالا بردن بهره‌وری انرژی الکتریکی و کاهش هزینه‌های مربوطه در صنعت. کنفرانس کیفیت و بهره‌وری، (۱۲)، ایران.

موسوی رینه، س. مهسا و یوسفی، حسین. (۱۳۹۹). بررسی رد پای آب در تولید برق با تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر، *مجله اکوهیدرولوژی*. (۴)۷، صفحات ۱۰۱۹-۱۰۰۷.

قاسمی اصل، رامین؛ جوادی، محمدامین و خلجی، مهدی. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی، اگزرژی و آلایندگی یک نیروگاه سیکل ترکیبی. *انرژی ایران*، (۱)۲۲، صفحات ۱۲۱-۹۹.

سالنامه آماری آب کشور. (۱۳۹۴). دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، وزارت نیرو، ایران.

صادقی، مهدی؛ گل‌آور، لیلا و عابدی، زهرا. (۱۳۸۶). بررسی پیامدهای اقتصادی ـ زیست‌محیطی افزایش بازده نیروگاه‌های برق فسیلی. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، (۴)۹، صفحات ۳۰-۱۵.

ساکی‌پور، مریم؛ کعبی‌نژادیان، عبدالرزاق؛ سخاوتجو، محمدصادق و جعفری موسوی، سیدعلی. (۱۳۹۰). امکان استفاده از انرژی خورشیدی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اهواز. *فصلنامه علمی ـ پژوهشی علوم بهداشتی*، (۴)۳، صفحات ۱۰-۱.

نوری، فرید حسین؛ غرویان، احمد؛ اشتیاقی، محسن؛ نمازی، اسماعیل؛ نیکبخت، محسن؛ مقیمی، غلامحسین؛ صفوی، سید شنتیا. (۱۳۹۷). نیروگاه زرند، *نشریه صنعت برق حرارتی* (صبح)، (۸)۱، صفحات ۲۸-۲۲.

یوسفی، پریسا و حصاری، بهزاد. (۱۳۹۹). مروری بر رویکرد همبست آب ـ غذا ـ انرژی: روش‌ها و چالش‌ها. کنفرانس ملی مدیریت منابع آب، (۸)، ایران.

## References

Ahmadi, Gholamreza and Haqjo, Hossein. (۲۰۱۷). Energy, exergy and environmental analysis of expansion turbine of natural gas pressure reduction station of Shahid Montazeri power plant. *The ٤th National conference of knowledge and technology of Iran mechanical and electrical engineering*, Iran. [In Persian]

Ahmadi, Gholamreza. (۲۰۱٥). Thermodynamic analysis of solar farm integration with Shahid Montazeri power plant. *The ٣١th International Electricity Conference*, Iran. [In Persian]

Aman, M.M, Solangi, K.H., Hossain, M.S, Badarudin, A. Jasmon, G.B. Mokhlis H., Bakar A.H.A. and Kazi, S.N. (۲۰۱٤). A review of safety,Health and environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.٤١, pp.١١٩٠-١٢٠٤.

Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., Shahroozi., S., Zandi, M. and Khosravi, A. (۲۰۲۰). Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol.٤٢, ١٠٠٨٧٧.

Azarshab, Amir Nizam. (۲۰۱٦). Necessary parameters to increase the electrical energy efficiency and reduce related costs in the industry. *The ١٣th Quality and Productivity Conference*, Iran. [In Persian]

Bandahei, Mohammad, Najafzadeh, Kian and Bayani, Gholamreza. (۲۰۱۳). Investigating and analyzing the annual consumption of fuel oil and its effects on the parameters of the country's heating power plants (emission of pollutants, efficiency, utilization factor and power generation capacity). *The ١th Power plants conference*, Bandar Abbas, Iran. [In Persian]

Bayati, Gholam-Reza, Najaf-Zadeh, Amin Hosni-Kakhki, Kian and Shibani Far, Hamed. (۲۰۱۱). Energy audit of steam power plant, modeling and energy consumption optimization solutions. *The ٥th Power plants conference*, Iran. [In Persian]

Bello, M.O., Solarin, S.A. and Yen, Y.Y. (۲۰۱۸). The impact of electricity consumption on $CO_2$ esmission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint;The role of hydropower in an emerging economy. *Journal of Environmental Management*, Vol.۲۱۹, pp. ۲۱۸-۲۳۰.

Bizikova, L., Roy, D., Venema, H.D., McCandless, M., Swanson, D., Khachtryan, A., Borden, C. and Zubrycki, K. (۲۰۱٤). Water-Energy-Food Nexus and Agricultural Investment: A Sustainable Development Guidebook, *Published by International Institute for Sustainable Development (IISD)*, Canada.

Denholm, P.M.H., Jackson, M. and Ong, S. (۲۰۰۹). Technical Report: Land Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States. *Published by National Renewable Energy Laboratory*, United States.

Dudley, B. (۲۰۱۸). Statistical review of world energy. *BP Statistical Review*, London, UK, Vol.٦, ۰۰۱۱٦.

Flammini, A., Puri, M., Pluschke, L. and Dubois, O. (۲۰۱٤). Walking the Nexus Talk. Assessing the Water-Energy-Food Nexus, Environment and Natural Resources, P*ublished by FAO*, Working Paper No. ٥٨.

Ghafari, Hadi, Moulay, Mohammad and Ali Mohammad, Sosan.(۲۰۱٥). The impact of wind energy consumption on economic growth and $CO^2$ emissions. *Policy research and energy planning*, course۲, No.۳, pp.۲۲۹-۲٥۳. [In Persian]

Ghasemi Assal, Ramin, Javadi, Mohammad Amin and Khalji, Mehdi. (۲۰۱۷). Economic optimization and analysis, exergy and emissions of a combined cycle power plant. *The journal of Iran Energy*, Course۱, No.۲۲, pp. ۹۹-۱۲۱. [In Persian]

Hong, S., Cosbey, A. and Savage, M. (۲۰۰۹). China's Electrical Power Sector, Environmental Protection and Sustainable Trade. *Published by International Institute for Sustainable Development*, Canada.

IRENA (۲۰۲۱), Report of Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۰, *Published by International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.

Karnib, A. (۲۰۱۷). Water-energy-food nexus: A coupled simulation and optimization framework. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Course٥, No. ٤.

Kentemich, T.G. (۱۹۹۱). Haverkamp, and H. Bothe, The expression of a third nitrogenase in the cyanobacterium Anabaena variabilis. *Zeitschrift für Naturforschung C*, ٤٦(۳-٤), pp.۲۱۷-۲۲۲.

Macknick, J., Newmark,Robin, Heath, G. and Hallett., KC. (۲۰۱۱). *Review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies.* Published by National Renewable Energy Lab. (NREL), United States.

Manshipour, Samira and Khalafi, Farid. (۲۰۱۰). Comparison of environmental pollution of fossil fuel thermal power plants in Iran with

PV solar power systems, *The ٤th National Conference of Energy (Energy Sustainability, Supply Security, Demand Management and Consumption Pattern Modification)*, Iran. [In Persian]

McCarl, B. A., Yang, Y., Schwabe, K., Engel, B. A., Mondal, A. H., Ringler, C., and Pistikopoulos, E. N. (٢٠١٧). Model Use in WEF Nexus Analysis: A Review of Issues. *Sustainable Renewable Energy Rep*, No.٤, pp. ١٤٤-١٥٢.

Ministry of Petroleum (٢٠١٦). The country Hydrocarbon balance Report, Institute of International Energy Studies, *Publication of the Hydrocarbon Balance Report Group of the Planning Vice-Chancellor*, Iran. [In Persian]

Ministry of Power. (٢٠١٨). Detailed statistics of Iran's electricity industry, especially for strategic management. *Published by Tavanir specialist Company*, Iran. [In Persian]

Ministry of Power. (٢٠١٩). Energy Balance Report of ٢٠١٧. *Publication of Electricity and Energy Planning and Macroeconomics Office*, Iran. [In Persian]

Mohammadi, Taimur, Takalif, Atefe and Bakhtiyar, Mohsen. (٢٠١٤). Analyzing the optimal capacity of a power plant in Iran and investigating the effects of energy consumption saving on it. *The journal of Energy Planning and Policy Studies*, Course١, No. ١, pp. ١-١٥. [In Persian]

Mousavi Reine, S. Mehsa and Yousefi, Hossein. (٢٠١٩). Investigating the water footprint in electricity production with an emphasis on renewable energies, *Ecohydrology Journal*. Course٤, No.٧, pp. ١٠٠٧-١٠١٩. [In Persian]

Nijhawan, P., Singla, M. K. and Gupta, J. (٢٠٢٠). Site Selection of Solar PV Power Plant at Bathinda. *Int. J. Recent Technol. Eng*, ٨, ٥٠٣٢-٥٠٣٨.

Nouri, Farid Hossein, Ghoruyan, Ahmed, Ishtiaghi, Mohsen, Namazi, Ismail, Nikbakht, Mohsen, Moghimi, Gholamhossein, Safavi, Seyed Shantia. (٢٠١٧). Zarand Power Plant, *Thermal Power Industry Journal (Sobh)*, Course٨, No.١, pp. ٢٢-٢٨. [In Persian]

Reofirad, Majid. (٢٠٠٨). Design of building solar systems in Iran, *Fadak Isatis Publications*, First edition. [In Persian]

Sadeghi, Hossein, Azar, Adel and Khaksar Astana, Samaneh. (٢٠١٤). Optimizing the energy resources supply with the aim of electricity production, Iran's perspective in the horizon of ١٤٠٤. *Quarterly Journal of Economic Researches on Growth and Sustainable Development*, course٣, No.١٥. pp. ٩١-١١٨. [In Persian]

Sadeghi, Mehdi, Gol Avar, Leila and Abedi, Zahra. (٢٠٠٨). Investigating the economic-environmental consequences of increasing the efficiency of fossil power plants. *Environmental Science and Technology Journal*, Course٤, No.٩, pp. ١٥-٣٠. [In Persian]

Saidi, Mohsen, Karbasi, Abdolreza, Sohrab, Tika and Samadi, Reza. (۲۰۰٦). Environmental management of power plants. *Publication of Iran Energy Efficiency Organization, Ministry of Energy*, First edition. [In Persian]

Sakipour, Maryam, Kaabinejadian, Abdul Razzaq, Sakhawatjo, Mohammad Sadeq and Jafari Mousavi, Seyed Ali. (۱۳۹۰). The possibility of using solar energy and reducing greenhouse gas emissions in Ahvaz. *Quarterly Journal of Health Sciences*, Course٤, No.۳, pp. ۱-۱۰. [In Persian]

Shabani, Aqta, Rasool, Rajabizadeh, Ahmed, Jafari Mansourian, Hossein, Rajabizadeh, Bahar and Ahmadi Namach, Arash. (۲۰۱٥). Wastewater management of Zarand thermal power plant: evaluation of wastewater treatment methods, economic estimation and propose the best option, *Health and Development Journal*, Course٤, No.٥, pp. ۲۹۷-۳۱۲. [In Persian]

Solargis (۲۰۲۲), Photovoltaic power potential of Islamic Republic of Iran, Global Solar Atlas, World Bank group (https://globalsolaratlas.info/download/iran.)

Sorush Nia, Shiva. (۲۰۱٥). The use of renewable energy for the green economy development: a case study of the current status of wind energy in Iran using GIS. *The ۳rd International Conference of Green Economy*, Iran. [In Persian]

The country's annual water statistical report. (۲۰۱٤). Water Resources Planning Office, *Ministry of Energy*, Iran. [In Persian]

Xie, J.b., Fua, J.x., Liu, S.Y., and Hwang, W.S. (۲۰۲۰). Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms. *J. Clean. Prod*, ۲٥٤, ۱۲۰۱٥۹.

Yousefi, Parisa and Hessari, Behzad. (۲۰۱۹). A review of the water-food-energy nexus approach: methods and challenges. *The ۸th National Conference on Water Resources Management*, Iran. [In Persian]

**استناد به این مقاله:** عابدی، سپیده؛ کاظمی نمین، متین؛ یعقوبی، علی‌اکبر؛ اسدی شیزری، شقایق؛ مرسلپور، مائده. (۱۴۰۱). تحلیل پیوند آب، انرژی و محیط زیست در نیروگاه ترکیبی حرارتی و خورشیدی (مطالعه موردی: نیروگاه زرند کرمان)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۴۳ (۱۱)، ۱۳۹-۱۶۷.

Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴,۰ International License.