

تحلیل اقتصادی - فنی کاهش مصرف آب و انتشار گاز دی اکسید کربن با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته (مطالعه موردی: نیروگاه بخاری بعثت تهران)

سید علی موسوی^۱، روح‌اله آسایش زارچی^۱، مهدی مهرپویا^{۲*}، بهرام قربانی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳. استادیار دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۲/۱۱)

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، معرفی نوعی سیستم هیبریدی تجدیدپذیر جایگزین، با نیروگاه بخاری بعثت تهران است. از آنجا که کمبود آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی است، نیروگاه‌های فسیلی به دلیل میزان مصرف آب و نیز مقدار انتشار دی‌اکسید کربن، اهمیت درخور توجهی دارند. در مطالعه حاضر، ابتدا با معرفی نیروگاه بخاری بعثت تهران، انواع هزینه‌های مربوط به این نیروگاه از جمله هزینه مصرف آب و نیز هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن محاسبه می‌شود. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار تحلیلگر هومر و اطلس‌های انرژی خورشیدی و بادی کشور، سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیری معرفی می‌شوند که بتوانند توانی معادل نیروگاه بعثت تهران را تولید کنند. از میان سیستم‌های پیشنهادشده، سیستم هیبریدی باد/پنل خورشیدی/باتری/برق‌آبی، به عنوان سیستم بهینه انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از این سیستم ترکیبی، میزان مصرف آب و انتشار دی‌اکسید کربن به ترتیب ۴۴۲۹ هزار مترمکعب و ۱/۴۳ میلیون تن در سال کاهش می‌یابد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز اقتصادی، هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن نیز ۳۵۳۷۵۰۴۳ دلار کاهش می‌یابد. همچنین، این سیستم ترکیبی هزینه انرژی ۰/۰۸۱۵ دلار و هزینه خالص فعلی ۵/۶۷۳ میلیارد دلار دارد.

کلیدواژگان: انرژی‌های تجدیدپذیر، بحران آب، تحلیل اقتصادی، رد پای آب، رد پای کربن، نیروگاه بعثت تهران.

مقدمه

با افزایش سریع جمعیت دنیا، میزان تقاضای انرژی بشر افزایش چشمگیری داشته است، چنان که به یکی از دغدغه‌های مهم فعلی جهان تبدیل شده است [۱]. امروزه، اصلی‌ترین منبع تأمین انرژی مورد نیاز بشر منابع فسیلی هستند، که البته مشکلاتی اساسی مانند گرمایش جهانی، باران‌های اسیدی، تخریب لایه ازن و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند [۲]. استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر راه حل مناسبی برای غلبه بر مشکلات یادشده است. انرژی‌های تجدیدپذیر مشکلاتی مانند پایان‌پذیر بودن و آلودگی‌های زیست‌محیطی را ندارند و به طور کلی شامل انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، انرژی بادی، انرژی زیست‌توده، انرژی هیدروژن و انرژی برق‌آبی می‌شوند [۳] و [۴]. از این‌رو، برای تأمین میزان برق مورد نیاز بشر، بهره‌گیری از سیکل‌های ترکیبی تولید توان که از منابع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، مورد توجه پژوهشگران حوزه انرژی قرار گرفته است. هانگ و همکارانش نوعی سیکل تولید توان کالینا^۱ که با انرژی خورشیدی عمل می‌کند را تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی کردند [۵]. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد این سیکل قادر به تولید ۲۳۳/۱ کیلووات با بازدهی ۲۷/۳ درصد است. آنالیز انرژی و بهینه‌سازی برای یک سیکل کالینا واقع در کشور اندونزی انجام شد که از انرژی زمین‌گرمایی بهره می‌گیرد [۶]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، این سیکل توانی به میزان ۱۶۶۰/۳ کیلووات با بازدهی حرارتی ۱۳/۲ درصد را تولید می‌کند. علاوه بر مشکلات یادشده برای نیروگاه‌های فسیلی، میزان زیاد مصرف آب این نیروگاه‌ها نیز یکی از معضله‌های اساسی است. رد پای آب^۲ به عنوان میزان آب برای تولید هر محصول و یا خدماتی تعریف می‌شود که فرد یا جامعه به صورت مستقیم یا غیر مستقیم آن را مصرف می‌کند [۷] و [۸]. رد پای آب به عنوان شاخصی برای تخصیص منابع آب شیرین تعریف شده است که پیش‌بینی ارزشمندی درباره آثار محیط زیستی تولید یک محصول ارائه می‌دهد. این مفهوم که نخستین‌بار توسط هوکسترا معرفی شده است، به بررسی ارتباط بین مصرف انسان و تخصیص منابع آب می‌پردازد. در واقع رد پای آب، حجم آب مصرفی را برای به بار نشستن یک محصول در کلیه مراحل تولید بررسی و محاسبه

می‌کند [۹]. رد پای آب کل، دربرگیرنده تمام رد پای آبی است که در مراحل تولید محصول به صورت مستقیم و غیر مستقیم مصرف شده و به صورت مترمکعب بر تن گزارش می‌شود [۱۰]. طبق داده‌های تحقیقات زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، تولید الکتریسته ۳۹ درصد (۱۳۶ میلیارد گالن در روز) از کل منابع آب شیرین این کشور را در سال ۲۰۰۰ مصرف کرده است. تولید هر کیلووات ساعت الکتریسته نیاز به حدود ۲۵ گالن آب دارد که بیشتر برای اهداف خنک‌کننده استفاده می‌شود. نیروگاه‌ها نیز از آب برای دستگاه‌های سولفوریزاسیون گازوئیل، انتقال خاکستر، تصفیه فاضلاب و شست‌وشو استفاده می‌کنند [۱۱]. در سال ۲۰۵۰ حدود ۸۰ درصد از کل انرژی مورد نیاز بشر، از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود که سبب کاهش میزان مصرف آب تا حدود ۷۰ درصد خواهد شد [۱۲]. در تحقیقی، کاهش میزان مصرف آب با استفاده از سیستم هیبریدی پنل‌های فوتوولتاییک^۳ و توربین بادی^۴ بررسی شد [۱۲]. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد با استفاده از این سیستم هیبریدی تجدیدپذیر میزان مصرف آب ۴۳۱/MWh، حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. ترارینگ و برنستینگ میزان رد پای آب برای عملیات کشاورزی را بررسی کردند [۱۳]. آنها طی پژوهش یادشده دریافتند میزان آب مصرفی برای یک سال حدود ۱۰۰۰-۱۱۰۰ میلیون مترمکعب است. با توجه به مطالعات انجام‌شده، انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر زیادی بر کاهش مصرف آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی - فنی سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است. نرم‌افزار هومر^۵ ابزاری قدرتمند و مناسب برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های انرژی است. این نرم‌افزار با گرفتن اطلاعاتی مانند تغییرات تابش خورشید، سرعت باد و دمای منطقه مطالعه‌شده از سایت ناسا، چندین سیستم هیبریدی انرژی برای تأمین میزان بار مد نظر معرفی می‌کند [۱۴]. مندل و همکارانش روی بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی انرژی برای تأمین میزان انرژی مورد نیاز یک روستا در بنگلادش به میزان ۲۴۲/۵۶ kWh/day مطالعه کردند [۱۵]. نتایج پژوهش آنها نشان داد بهینه‌ترین سیستم هیبریدی انرژی، پنل

3. Photovoltaic Panels
4. Wind Turbine
5. HOMER Software

1. Kalina Cycle
2. Water Foot Print

منطقه خزانة بخارایی واقع در جنوب شرقی تهران احداث شده است. این نیروگاه با نصب سه واحد بخاری هر یک به قدرت اسمی ۸۲/۵ kW بنا شده و از سال ۱۳۴۶ تا کنون توسط شرکت‌های توانیر و برق منطقه‌ای تهران بهره‌برداری شده است. تجهیزات اصلی این نیروگاه شامل بویلر، توربین/ژنراتور، کندانسور و سیستم آب تغذیه، برج‌های خنک‌کن، تصفیه‌خانه، واحد تولید هیدروژن، آزمایشگاه‌های پایش کیفیت، سیستم‌های کمکی اطفای حریق و تأمین هوای فشرده است. سوخت اصلی این نیروگاه گاز طبیعی بوده و سوخت کمکی آن مازوت است. آب مورد نیاز این نیروگاه نیز توسط پنج حلقه چاه عمیق تأمین می‌شود. این نیروگاه در اواخر سال ۱۳۸۶ برای مدتی از شبکه سراسری برق کشور خارج شد و مورد تعمیرات اساسی قرار گرفت. بنا بر گزارش مرکز آمار صنعت برق ایران (شرکت توانیر)، سهم تولید این نیروگاه از کل انرژی الکتریکی تولیدی کل کشور، ۰/۶ درصد است. مشخصات کامل نیروگاه بخاری بعثت تهران در جدول ۱ ارائه شده است.

نرم‌افزار هومر

هومر نرم‌افزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی سیستم‌های هیبریدی انرژی، به صورت متصل به شبکه^۵ و منفصل از شبکه^۶ است. این نرم‌افزار برای معرفی معرفی بهینه‌ترین، کم‌هزینه‌ترین و امکان‌پذیرترین سیستم هیبریدی انرژی، چندین سناریوی انرژی معرفی می‌کند [۲۰]. همچنین، نرم‌افزار هومر قادر به انجام آنالیز حساسیت برای یافتن تأثیر پارامترهای کلیدی بر عملکرد کل سیستم و تخمین طول عمر سناریوهای پیشنهادی است. اطلاعات بیشتر در مورد این نرم‌افزار در پژوهش لی و همکارانش [۱۷] ارائه شده است. نرم‌افزار هومر پس از بررسی امکان‌پذیری تأمین بار مد نظر، اقدام به انجام آنالیزهای اقتصادی می‌کند. هزینه خالص فعلی (NPC) برای هر سیستم، به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۴]:

$$NPC = \frac{C_{tot}}{CRF(i, T_p)} \quad (1)$$

که در رابطه یادشده، CRF ، i ، C_{tot} و T_p به ترتیب کل هزینه سالیانه سیستم، میزان بهره سالیانه، میزان بازگشت

فوتولتائیک/باتری/دیزل ژنراتور است. در تحقیقی دیگر، اسراری و همکارانش برای کاهش هزینه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن مربوط به تأمین انرژی مورد نیاز روستای بینالود مطالعه کردند [۱۶]. براساس نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار هومر، با به کار گرفتن سیستم هیبریدی توربین بادی/دیزل ژنراتور/باتری، میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن و هزینه خالص فعلی^۱ به ترتیب ۳۲ و ۴۴ درصد کاهش می‌یابد. لی و همکارانش در تحقیقی، روی یافتن بهینه‌ترین سیستم هیبریدی برای تأمین انرژی مورد نیاز یک منطقه مسکونی در شهر اورومکی چین مطالعه کردند. آنها دریافتند که بهینه‌ترین پیکربندی، سیستم هیبریدی توربین بادی/پنل فوتولتائیک/باتری، با هزینه خالص فعلی \$ ۵۳۲۹۶ و هزینه انرژی^۲ \$/kWh ۱/۰۴۵ است [۱۸]. جهانگیر و همکارانش در یک تحلیل اقتصادی-فنی، سیستم هیبریدی آلی رنگین^۳ را با هفت سیستم هیبریدی تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز یک شهرک مسکونی در شهر راین استان کرمان، مقایسه کردند [۱۹]. طبق نتایج به‌دست‌آمده، سیستم هیبریدی باد/پنل خورشیدی/باتری/دیزل به عنوان بهینه‌ترین سیستم انرژی است. این سیستم هزینه اولیه^۴ \$ ۱۶۱۶۹۵ و هزینه انرژی \$/kWh ۰/۱۹۷ دارد. در مطالعه حاضر، نیروگاه بعثت تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. میزان مصرف آب و تولید دی‌اکسید کربن به ازای تولید هر کیلووات ساعت توسط این نیروگاه محاسبه می‌شود. در ادامه، توسط نرم‌افزار هومر چند سناریوی سیستم هیبرید تجدیدپذیر برای جایگزینی با این نیروگاه معرفی می‌شود. در ادامه، میزان کاهش مصرف آب و انتشار گاز دی‌اکسید کربن توسط سناریوی بهینه محاسبه می‌شود. در انتهای تحقیق حاضر، تحلیل اقتصادی روی سناریوهای پیشنهادشده صورت می‌گیرد و با نیروگاه بخاری بعثت مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

نیروگاه مطالعه‌شده

در مطالعه حاضر، نیروگاه بخاری بعثت تهران به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. نیروگاه بعثت با ظرفیت ۲۴۷/۵ MW در زمینی به مساحت ۲۰ هکتار در

1. Net present cost (NPC)
2. Cost of energy (COE)
3. Organic Rankine Cycle (ORC)
4. Initial Cost (IC)

5. Grid-connected system
6. Off-grid system

جدول ۱. مشخصات ظرفیت و تجهیزات نیروگاه بخاری بعثت تهران

تعداد واحدهای بخاری	۳ واحد بخاری
ظرفیت نامی نیروگاه	۲۴۷/۵ مگاوات
بازده نامی نیروگاه	۳۴ درصد
سوخت اصلی	گاز طبیعی
مساحت نیروگاه	۲۰ هکتار
متوسط تولید انرژی سالیانه	۱۷۵۱۹۱۵ مگاوات ساعت
متوسط تولید خالص انرژی سالیانه	۱۶۳۸۸۴۱ مگاوات ساعت
توربین	قدرت اسمی: ۸۵/۵ مگاوات، دور موتور: ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، بازده: ۳۲ درصد
بویلر	ظرفیت نامی تولید بخار: ۳۲۵/۹۱ تن در ساعت، تعداد مشعل: ۸ عدد، فشار بخار اصلی: ۸۶/۱۸ بار، دمای بخار اصلی: ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد
ژنراتور	نوع: هیدروژن خنک - دوقطب، ظرفیت تولید توان اکتیو: ۸۲/۵ مگاوات، ولتاژ خروجی: ۱۳/۸ کیلوولت، دور نامی: ۳۰۰۰ دور بر دقیقه
ترانسفورماتور اصلی	نوع: روغنی، نسبت تبدیل ولتاژ: ۶۳، ظرفیت: ۱۰۱ مگاوات آمپر
کندانسور	نوع: سطحی - آب و بخار
سیستم کنترل	نوع: نئوماتیک

شرقی، بیشترین پتانسیل انرژی بادی در کشور را دارند (۸/۵ - ۹/۵ m/s). همچنین، براساس شکل ۲، مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور، بیشترین پتانسیل خورشیدی را دارند (۱۸۳۲ - ۱۹۳۴ kWh/kWp). از این رو، شهرهای بیرجند و یزد برای نصب توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی انتخاب می‌شوند. شهر بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی بوده و در ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. طول و عرض جغرافیایی شهر بیرجند به ترتیب ۵۹/۲۲۶۲ °E و ۳۲/۸۶۴۹ °N است. شهر یزد نیز مرکز استان یزد است. این شهر در ارتفاع ۱۲۳۰ متری از سطح دریا قرار دارد و دارای طول جغرافیایی ۵۴/۳۵۶۹ °E و عرض جغرافیایی ۳۱/۸۹۷۴ °N است. همچنین، رودخانه کرج برای استفاده از توربین‌های آبی انتخاب شده است. رودخانه کرج به عنوان یکی از رودخانه‌های پرآب دامنه جنوبی البرز از سال ۱۳۴۶ در ردیف رودخانه‌های تحت حفاظت سازمان محیط زیست قرار گرفته است. رودخانه کرج در البرز مرکزی و شمال شرقی تهران قرار دارد که از کوه‌های جنوبی البرز سرچشمه می‌گیرد. منشأ این رودخانه کوه کلون بستک در بلندی‌های خرسنگ است. سد کرج سال ۱۳۴۲ روی رودخانه کرج احداث شد و با توجه به شدت جریان آب در رودخانه کرج، گفته می‌شود که امکان تولید برق از این راه نیز وجود دارد. رودخانه کرج با طول تقریبی ۷۵ کیلومتری از رودخانه‌های پرآب دامنه جنوبی البرز است که در حد

سرمایه^۱ و طول عمر پروژه هستند. در پژوهش حاضر، طول عمر پروژه ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. میزان بهره سالیانه (i) و مقدار بازگشت سرمایه (CRF) را نیز می‌توان از روابط ۲ و ۳ محاسبه کرد [۲۱]:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (2)$$

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

که در آن i' معرف میزان بهره اسمی، f مقدار تورم سالیانه و n تعداد سال هستند. در مطالعه حاضر، میزان بهره اسمی و مقدار تورم به ترتیب ۱۸ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است.

هزینه انرژی (COE) برای هر تجهیز و برای کل سیستم از رابطه ۴ به دست می‌آید:

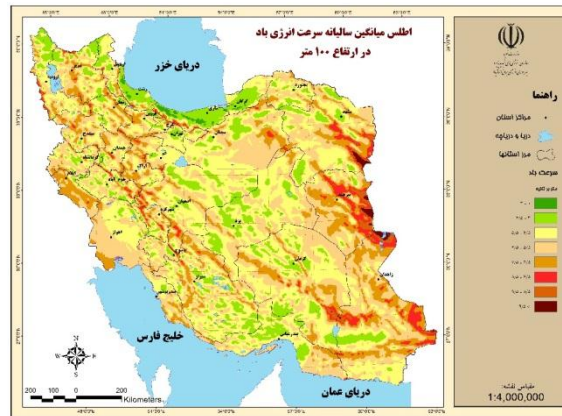
$$COE = \frac{C_{tot}}{E_{tot}} \quad (4)$$

که در آن، E_{tot} کل انرژی مصرفی سالیانه است.

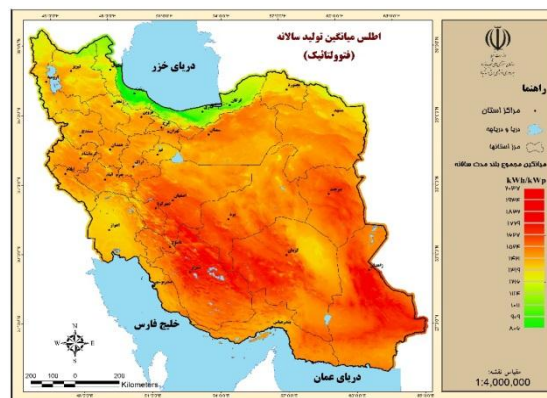
بررسی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر

شکل‌های ۱ و ۲ اطلس میانگین سالیانه سرعت باد و تابش خورشیدی را برای کشور ایران نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، مناطق شرقی و جنوب

1. Capital recovery factor (CRF)



شکل ۱. اطلس میانگین سالانه سرعت انرژی باد کشور ایران
برگرفته از سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)



شکل ۲. اطلس میانگین سالانه تابش انرژی خورشیدی کشور ایران
برگرفته از سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)

خورشیدی از ماه اردیبهشت تا مرداد خواهد بود. شکل ۴ تغییرات ماهیانه سرعت انرژی باد برای شهر بیرجند را نمایش می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، سرعت باد در یک سال ۵/۲ تا ۸/۶۳ متر بر ثانیه است. همچنین، میانگین سالانه سرعت باد حدود ۶/۳۵ متر بر ثانیه است. سرعت انرژی باد از ماه خرداد تا شهریور به بیشترین میزان خود می‌رسد. شکل ۵ تغییرات ماهیانه دمای محیط برای شهر بیرجند را نمایش می‌دهد. دمای محیط اثر مستقیمی بر عملکرد و بازدهی پنل‌های خورشیدی دارد. افزایش بیش از اندازه دما، سبب کاهش کارایی پنل‌ها می‌شود. براساس شکل ۵، بیشترین کمترین دمای محیط مربوط به ماه‌های تیر (۲۷/۹۳ °C) و دی (۳/۲۳ °C) است. میانگین سالانه دمای محیط نیز حدود ۱۵/۸۷ °C است. شکل ۶ تغییرات ماهیانه سرعت آب رودخانه کرج را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده

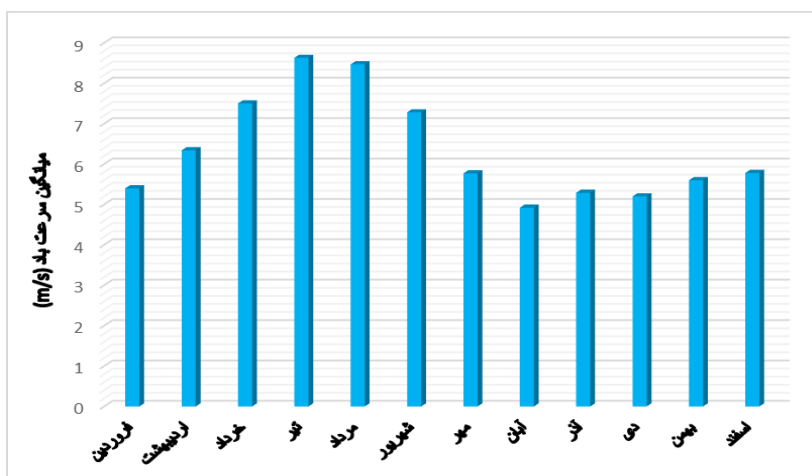
فصل بیلقان تا دیزین در استان البرز قرار دارد. این رودخانه از ارتفاعات خرسنگ‌کوه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از شیب تند دره‌ها و صخره‌ها، به دریاچه نمک در استان قم می‌ریزد. رودخانه کرج از هشت تا ۱۵ متر عرض و یک تا دو متر عمق دارد.

شکل ۳ تغییرات ماهیانه تابش خورشید برای شهر یزد را براساس داده‌های به‌دست‌آمده از سایت ناسا^۱ نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین و کمترین میزان تابش انرژی خورشیدی، به ترتیب متعلق به ماه‌های خرداد (۷/۲۶ kWh/m²/day) و آذر (۳/۲۱ kWh/m²/day) است. میانگین تابش سالانه برای شهر یزد حدود ۵/۴ kWh/m²/day است، که پتانسیل بسیار خوب این شهر برای نصب پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. همچنین، بهترین زمان برای بهره‌گیری از تابش انرژی

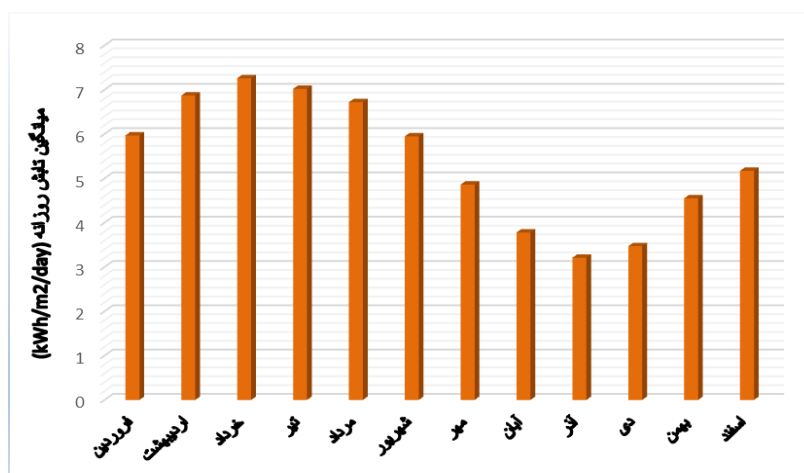
1. National Aeronautics and Space Administrative (NASA)

می‌شود، میزان سرعت جریان آب در ماه‌های دی، بهمن و اسفند (فصل زمستان)، به بیشترین مقدار خود می‌رسد

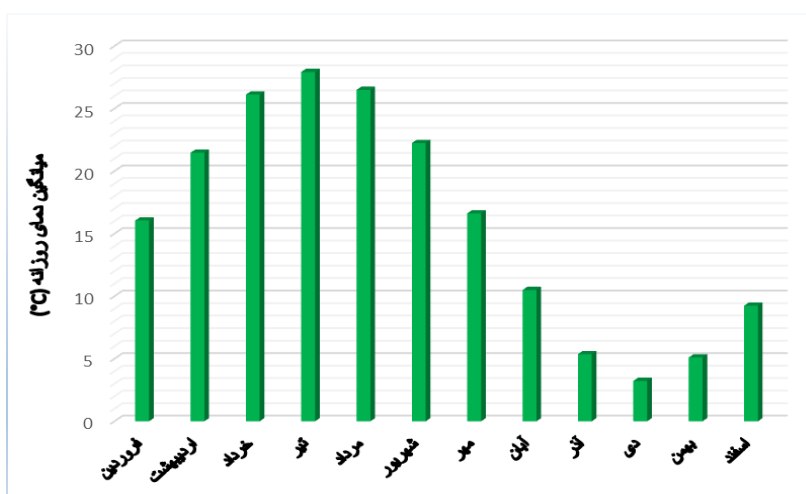
همچنین، میانگین سالیانه سرعت جریان آب حدود $3/25$ m/s است.



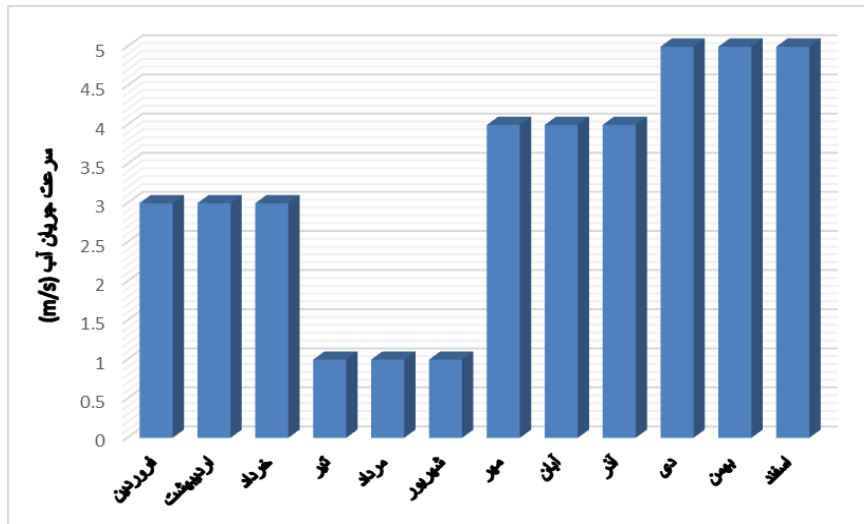
شکل ۳. میانگین ماهانه سرعت انرژی باد برای شهر بیرجند



شکل ۴. میانگین ماهانه تابش خورشیدی برای شهر یزد



شکل ۵. میانگین ماهانه دمای محیط برای شهر یزد



شکل ۶. میانگین ماهانه سرعت جریان آب برای رودخانه کرج

جدول ۲. مشخصات فنی و اقتصادی تجهیزات استفاده شده در سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر [۱۴]

نام تجهیز	مدل تجهیز	ظرفیت مجاز (kW)	هزینه سرمایه‌گذاری (\$) (\$)	هزینه نگهداری و تعمیرات (\$/سال)	هزینه جایگزینی (\$) (\$)	طول عمر (سال)
توربین بادی	Vestas V47 (660 kW)	۶۶۰	۹۰۰۰۰	۵۰۰	۶۰۰۰۰	۲۰
پنل خورشیدی	Sharp ND – 250 QCS	۰/۲۵	۱۳۰۰	۱۰	۱۳۰۰	۲۰
توربین برق‌آبی	Guinard – P154 (20 kW)	۲۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰	۱۸۰۰۰	۲۰
باتری	Generic 100 kWh Li - ion	-	۴۰۰۰۰	۶۰۰	۴۰۰۰۰	۱۰
مبدل	Generic large, free convertor	۱	۶۰۰	۱۰	۶۰۰	۱۰

سال \$/۵۰۰ و \$/۶۰۰ هزار در نظر گرفته شده است. همچنین، طول عمر هر یک از توربین‌های بادی حدود ۲۰ سال است. میزان توان خروجی از هر توربین بادی را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه کرد [۲۲]:

$$P_{WT} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) P_{WT.STP} \quad (5)$$

در رابطه یادشده ρ و ρ_0 به ترتیب بیان‌کننده چگالی واقعی هوا، چگالی هوا در شرایط استاندارد و توان خروجی توربین بادی در شرایط استاندارد، هستند.

پنل خورشیدی

طبق میزان توان تولیدی مورد نیاز و شرایط دمایی و تابشی شهر یزد، پنل‌های خورشیدی نوع Sharp ND که هر یک ظرفیت ۲۵۰ W دارند، در این شبیه‌سازی استفاده

تجهیزات سیستم هیبریدی تجدیدپذیر

با توجه به پتانسیل‌سنجی‌های انجام‌شده در بخش قبلی، سیستم‌های هیبریدی متشکل از توربین بادی، پنل خورشیدی، باتری و توربین برق‌آبی، می‌توانند به عنوان سیستم‌های تجدیدپذیر جایگزین با نیروگاه گازی بعثت، شبیه‌سازی و معرفی شوند. در این بخش، مشخصات لازم برای طراحی هر یک از این تجهیزات شرح داده می‌شود. جدول ۲ مشخصات فنی و اقتصادی تجهیزات استفاده شده در سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر را ارائه می‌دهد.

توربین بادی

براساس شرایط انرژی بادی شهر بیرجند، توربین بادی Vestas V47 برای شبیه‌سازی این مطالعه انتخاب شده است. ظرفیت هر یک از این مدل توربین‌ها ۶۶۰ kW است. هزینه نگهداری و تعمیرات و جایگزینی به ترتیب

نوع باتری‌ها پتانسیل اسمی ۶۰۰ V و ظرفیت اسمی kWh ۱۰۰ دارند. طول عمر هر باتری حدود ۱۰ سال است. همچنین، هزینه نگهداری و تعمیر هر باتری سال/ \$ ۶۰۰ است. میزان بیشترین توان شارژ و دشارژ هر باتری را می‌توان از رابطه ۸ محاسبه کرد [۲۴].

$$P_{max.b} = \frac{N_{batt} \cdot V_{batt} \cdot I_{max}}{1000} \quad (8)$$

در رابطه یادشده، N_{batt} ، V_{batt} و I_{max} به ترتیب معرف تعداد باتری، ولتاژ باتری و بیشترین جریان شارژ باتری هستند.

مبدل

مبدل‌ها به منظور تبدیل برق AC به DC و به عکس استفاده می‌شوند. بازدهی مبدل استفاده‌شده در مطالعه حاضر، ۹۵ درصد فرض می‌شود. هزینه سرمایه‌گذاری، نگهداری و تعمیر به ترتیب \$ ۶۰۰ و سال/ \$ ۱۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، طول عمری که برای هر باتری در نظر گرفته شده است، حدود ۱۰ سال است. برای محاسبه میزان یک مبدل، می‌توان از رابطه ۹ بهره برد [۲۵].

$$P_{inv}(t) = P_{max.L}(t) / \eta_{inv} \quad (9)$$

که در آن، $P_{max.L}(t)$ و η_{inv} به ترتیب بیان‌کننده بار مورد نیاز در زمان پیک مصرف و بازده مبدل هستند.

نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج محاسبات سالیانه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه بخاری بعثت تهران را ارائه می‌دهد. هزینه کلی سالانه این نیروگاه حدود ۳۹۳۰۹۲۱۳/۹ دلار است. با بهره‌گیری از سیستم‌های تجدیدپذیر و پاک، هزینه‌های اجتماعی انتشار کربن دی‌اکسید و مصرف آب را می‌توان تقریباً به صفر رساند. با توجه به میزان بهره سالیانه و طول عمر ۲۰ ساله پروژه، ارزش خالص فعلی این درآمدها از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$CRF(2/61, 20) = 0.06482$$

$$NPC = 39309213/9 / 0.06482 = 606436499/54\$$$

می‌شوند. بازدهی هر یک از پنل‌ها ۱۵/۳ درصد است. طول عمر هر یک از پنل‌های خورشیدی حدود ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. همچنین، هزینه نگهداری و تعمیرات سال/ \$ ۱۰ و هزینه سرمایه‌گذاری \$ ۱۳۰۰ است. دمای عملیاتی پنل‌ها $47/5^{\circ}C$ است، که با توجه به اینکه میانگین سالانه دمای محیط شهر یزد حدود $15/87^{\circ}C$ است، مشکلی از بابت کاهش کارایی پنل‌ها پیش نخواهد آمد. میزان توان خروجی هر پنل خورشیدی را می‌توان به صورت رابطه ۶ به دست آورد [۲۳]:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \frac{I_T}{I_S} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - T_S)] \quad (6)$$

در رابطه ۶، Y_{PV} و f_{PV} به ترتیب معرف ظرفیت مجاز پنل و فاکتور تعویض هستند. I_S و I_T به ترتیب میزان تابش خورشید و تابش خورشید در شرایط استاندارد ($1000 W/m^2$) هستند. همچنین، α ، T_C و T_S به ترتیب بیان‌کننده ضریب دمایی توان، دمای پنل خورشیدی و دمای پنل خورشیدی در شرایط استاندارد ($25^{\circ}C$)، هستند.

توربین برق آبی

در تحقیق حاضر، مدل Guinard – P154 برای توربین برق آبی در نظر گرفته شده است. ظرفیت هر یک از توربین‌ها ۲۰ kW بوده و طول عمر برابر با ۲۰ سال فرض شده است. هزینه نگهداری، تعمیر و جایگزینی برای هر یک از توربین‌ها به ترتیب برابر با سال/ \$ ۲۰۰ و \$ ۱۸ هزار در نظر گرفته شده است. برای محاسبه توان خروجی از هر توربین برق آبی، می‌توان از رابطه ۷ استفاده کرد [۲۴].

$$P = \eta \rho g Q H \quad (7)$$

در فرمول یادشده، η ، ρ ، g و Q و H به ترتیب بیان‌کننده بازده توربین، چگالی آب، شتاب گرانش زمین ($9/81 m/s^2$)، دبی آب ورودی به توربین و هد توربین، هستند.

باتری

به منظور افزایش قابلیت اطمینان برای تأمین الکتریسیته مورد نیاز، از باتری‌های نوع Generic 100 kWh Li – ion برای شبیه‌سازی سیستم‌های ترکیبی استفاده می‌شود. این

جدول ۳. نتایج محاسبات سالیانه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه بخاری بعثت تهران

مقدار (دلار)	نوع هزینه
۳۵۳۷۵۰۴۳	هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن
۴۴۲۹۰۰	هزینه مصرف آب
۲۸۱۵۸۲/۵	هزینه مصرف سوخت
۳۲۰۹۶۸۸/۴	هزینه تعمیر و نگهداری
۳۹۳۰۹۲۱۳/۹	جمع کل

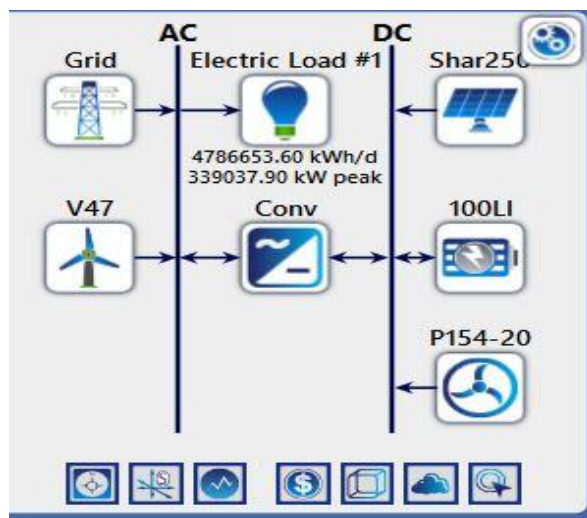
با توجه به میزان مصرف درخور توجه آب و انتشار زیاد دی‌اکسید کربن، توسط نیروگاه مطالعه‌شده، ارائه سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر جایگزین، تحلیل و بررسی شد. به این منظور، با استفاده از نرم‌افزار هومر شش سناریوی سیستم هیبریدی تجدیدپذیر برای تأمین بار مد نظر شبیه‌سازی شد. شکل ۷ نمایشی از پیکربندی سیستم هیبریدی تجدیدپذیر متصل به شبکه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج عملیات بهینه‌سازی صورت‌گرفته توسط نرم‌افزار هومر، براساس کمترین هزینه انرژی، یک سناریو به عنوان سناریوی بهینه برگزیده شد. شکل ۸ اطلاعات فنی - اقتصادی مربوط به سناریوهای شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج مربوط به سناریوی بهینه تجزیه و تحلیل می‌شود (از آنجا که هدف اصلی مطالعه پیش رو، بررسی میزان کاهش هزینه‌های مرتبط با مصرف آب و انتشار دی‌اکسید کربن است، از تشریح سناریوهای دیگر صرف نظر شده است).

برای ساده‌سازی محاسبات اقتصادی، فرضیات و اطلاعات زیر (به استناد از ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۴)، در نظر گرفته می‌شود:

- هزینه هر مترمکعب آب یک هزار تومان در نظر گرفته شده است.
- هر مترمکعب گاز که سوخت اصلی نیروگاه بعثت است، در صورت صادرات ۵۰ سنت است.
- میزان انتشار دی‌اکسید کربن نیروگاه‌های بخاری ایران برابر با ۷۶۲/۲۵۸ گرم بر کیلووات ساعت است.
- هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن برابر با ۲۶/۴۹ دلار بر تن است.

هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن از روش زیر محاسبه شده و داده‌های استفاده‌شده از ترازنامه انرژی ۱۳۹۴ گرفته شده است:

هزینه اجتماعی سالیانه انتشار دی‌اکسید کربن = تولید انرژی نیروگاه × میزان انتشار دی‌اکسید کربن نیروگاه‌های بخاری ایران × هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن



شکل ۷. پیکربندی سیستم هیبریدی تجدیدپذیر شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار هومر

Architecture										Cost			
	Shar250 (kW)	V47	100LI	Grid (kW)	P154-20	Conv (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)		
	887,456	2,071	42,380	999,999	5,000	360,465	CC	\$0.0815	\$5.67B	\$41.7M	\$5.03B		
	1,138,157	1,981	43,088	999,999		364,574	CC	\$0.0954	\$6.10B	\$57.8M	\$5.20B		
		4,719	56,662	999,999	5,000	485,198	CC	\$0.0920	\$7.63B	\$46.9M	\$6.90B		
	2,615,727		45,135	999,999	5,000	413,593	CC	\$0.212	\$7.72B	\$140M	\$5.55B		
	2,894,241		50,951	999,999		536,213	CC	\$0.215	\$8.52B	\$155M	\$6.12B		
		5,951	113,374	999,999		743,817	CC	\$0.163	\$13.5B	\$205M	\$10.3B		

شکل ۸. اطلاعات فنی - اقتصادی سناریوهای پیشنهاد شده توسط نرم افزار هومر

۱۲، تقریباً در تمامی ماه‌های سال، به دلیل اینکه در میزان توان‌های بسیار زیاد (مانند نیروگاه‌ها و شهرک‌ها)، استفاده از توربین‌های بادی به لحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر است و همچنین، پتانسیل انرژی بادی شهر بیرجند مناسب و زیاد است، توربین‌های بادی بیشترین سهم از تأمین بار مورد نیاز را دارند (۵۷/۸ درصد). همچنین، میانگین سهم پنل‌های خورشیدی و توربین‌های برق‌آبی به ترتیب برابر با ۳۰/۲ درصد و ۱۲ درصد محاسبه شد. در ماه‌های July (تیر) و August (مرداد) که پیک بار رخ می‌دهد، تمام توان مورد نیاز از توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی تأمین می‌شود. شکل ۱۳ هزینه‌های هریک از اجزای سیستم هیبریدی تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. براساس شکل ۱۳، تمام هزینه‌های مربوط به تجهیزات، مثبت است. به این معنا که میزان تولید توان سیستم هیبریدی معرفی شده، بیش از حد نیاز است و می‌توان برق اضافه تولید شده را براساس تعرفه خرید تضمینی برق تجدیدپذیر و پاک (به طور میانگین ۳۴۰ تومان به ازای هر کیلووات ساعت) را به شرکت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران (توانیر) فروخت. از آنجا که سیستم هیبریدی بهینه مد نظر، با توجه به پیک بار طی سال طراحی شده است، نرم‌افزار هومر طراحی سیستم را براساس تأمین توان در زمان پیک بار انجام می‌دهد. به همین دلیل، در سایر ساعت‌های مازاد به تولید توان نیاز خواهیم داشت. این میزان مازاد تولید، بیشتر توسط باتری‌ها تولید می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده، مازاد تولیدی شبکه تقریباً مقداری برابر با مقدار بار مورد نیاز است. به بیانی، سیستم هیبریدی بهینه پیشنهاد شده، دو برابر تولید نیروگاه بخاری بعثت تهران در سال برق تولید می‌کند. شایان یادآوری است که قیمت معرفی شده به نرم‌افزار هومر، به ازای دلار ۱۰ هزار تومان است.

شکل ۱۴ نشان‌دهنده هزینه‌های سالیانه پروژه را طی

سیستم هیبریدی باد/پنل خورشیدی/باتری/برق‌آبی، به عنوان سیستم بهینه انتخاب شد. این سیستم شامل ۸۸۷۴۵۶ kW پنل خورشیدی، ۲۰۷۱ عدد توربین بادی، ۴۲۳۸۰ عدد باتری و ۵ هزار توربین برق‌آبی است. هزینه خالص فعلی و انرژی آن به ترتیب ۵/۶۷۳ میلیارد دلار و ۰/۰۸۱۵ دلار است. همچنین، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برابر با ۵ میلیارد دلار است. شکل ۹ میزان توان خروجی توربین‌های بادی طی روز را نشان می‌دهد. میزان کل بار خروجی از توربین‌های بادی ۳۱۲۹۱۵۹۲۹۱ kWh / سال است. برای تولید این مقدار توان، توربین‌های بادی در سال، ۷۴۳۵ ساعت مشغول به تولید الکتریسیته هستند. این در حالی است که میانگین توان خروجی و بیشترین توان خروجی، به ترتیب حدود ۳۵۷۲۱۰ kW و ۱۳۶۶۸۶۰ kW است. میزان هزینه انرژی که این مقدار تولید توان در بر دارد، ۰/۰۳۸۹ \$/kWh است. میزان توان خروجی توسط پنل‌های خورشیدی طی روز در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. پنل‌های خورشیدی در سال، ۴۳۸۸ ساعت فعال است و میزان باری به اندازه سال / kWh ۱۶۳۲۴۴۳۴۱۵ تولید می‌کنند. میزان هزینه انرژی و متوسط توان تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی، به ترتیب \$/kWh ۰/۰۵۱۲ و ۱۸۶۳۵۲ kW محاسبه شد. شکل ۱۱ میزان توان خروجی توربین‌های برق‌آبی طی روز را ارائه می‌دهد. بیشترین و کمترین میزان توان تولیدی توسط توربین‌های برق‌آبی، به ترتیب برابر با ۱۰۰ kW هزار و ۳۵۳۶ kW است. همچنین، این توربین‌ها با تولید باری به اندازه سال / kWh ۰۹۶۹۶۷۰ حدود ۸۷۶۰ ساعت طی سال، فعال‌اند. میزان هزینه انرژی و میانگین تولید توان برای این نوع از توربین‌ها، به ترتیب \$/kWh ۰/۰۱۱۵ و ۷۴۳۱۲ kW به دست آمد. شکل ۱۲ میانگین ماهانه تولید توان توسط توربین بادی، پنل خورشیدی و توربین برق‌آبی را نشان می‌دهد. براساس شکل

- نیروگاه بخاری بعثت تهران برگزیده شد.
۳. توربین‌های بادی حدود ۵۷/۸ درصد از انرژی مورد نیاز سالیانه را تأمین می‌کنند.
 ۴. هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی این سیستم به ترتیب برابر با ۰/۰۸۱۵ دلار و ۵/۶۷۳ میلیارد دلار است.
 ۵. هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری این سیستم تقریباً برابر با ۴۱۷۲۴۲۸ هزار دلار و ۵ میلیارد دلار است.
 ۶. درصد تجدیدپذیر بودن این سیستم هیبریدی ۱۰۰ است. در نتیجه، با به‌کارگیری این سیستم به جای نیروگاه بعثت، سالیانه ۴۴۲۹۰۰ دلار هزینه مصرف آب و ۳۵۳۷۵۰۴۳ دلار هزینه اجتماعی دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.
 ۷. با صرفه‌جویی صورت‌گرفته در این جایگزینی، سالیانه حدود آب یک شهر ۶۴ هزارنفری را می‌توان تأمین کرد.
 ۸. با توجه به اینکه سیستم هیبریدی مد نظر باید پیک بار در سال را نیز تأمین کند، در نتیجه تقریباً به اندازه دو برابر توان تولیدی نیروگاه بعثت توان تولید می‌کند که می‌توان برق مازاد را به شرکت توانیر فروخت.
- در کل، با توجه اینکه هزینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر به‌خصوص در کشورهایی که قیمت سوخت کم است (مانند ایران)، قابل رقابت با نیروگاه‌های فسیلی نیست، اما با توجه به مسائل زیست‌محیطی، سبب کاهش چشمگیر مصرف آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن می‌شود. در نتیجه، با حمایت دولت و وزارت نیرو، به منظور توسعه و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌توان خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های فسیلی را تا حد زیادی کاهش داد.

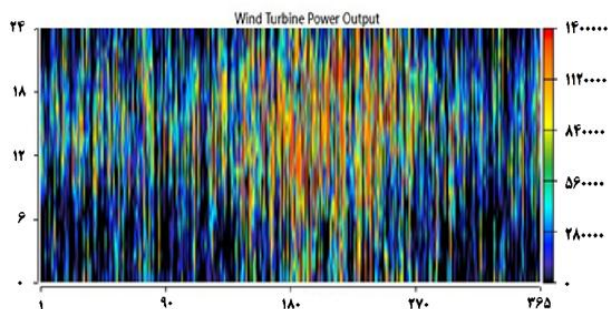
۲۰ سال است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه حدود ۵ میلیارد دلار است. همچنین، هزینه جایگزینی تجهیزاتی که طول عمر ۱۰ ساله دارند، حدود ۲ میلیارد دلار است. در واقع، در سال دهم هزینه جایگزین شدن تجهیزاتی مانند مبدل‌ها، باتری‌ها و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، سبب منفی شدن هزینه سالیانه می‌شود، که با درآمد حاصل از فروش برق مازاد، به صورت مقداری مثبت در همه سال‌ها نمایش داده شده است. به این معنا که مقدار فروش سالیانه از مقدار هزینه نگهداری و تعمیرات بیشتر است.

انتشار دی‌اکسید کربن و مصرف آب سیستم هیبریدی پیشنهادی جدید حدود صفر است. یعنی سالیانه حدود ۴۴۲۹ هزار مترمکعب آب صرفه‌جویی خواهد شد که اگر مصرف آب مورد نیاز هر فرد را در روز ۱۹۰ لیتر در نظر بگیریم، این مقدار معادل آب مورد نیاز سالیانه یک شهر ۶۴ هزار نفری خواهد بود.

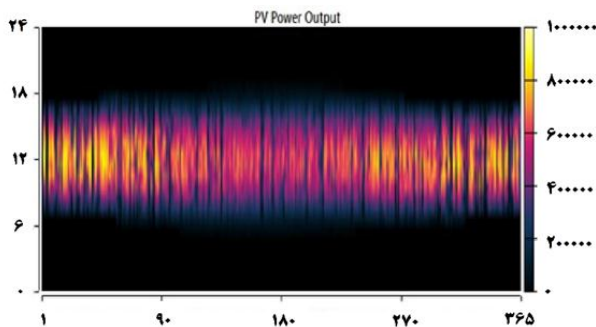
نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، به دلیل زیاد بودن مصرف آب و انتشار گاز دی‌اکسید کربن نیروگاه بخاری بعثت تهران، یک سیستم هیبریدی تجدیدپذیر توسط نرم‌افزار هومر شبیه‌سازی و معرفی شد. در ادامه، کاهش میزان مصرف آب و تولید دی‌اکسید کربن و هزینه‌های مربوط به آن بررسی شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر به شرح زیر است:

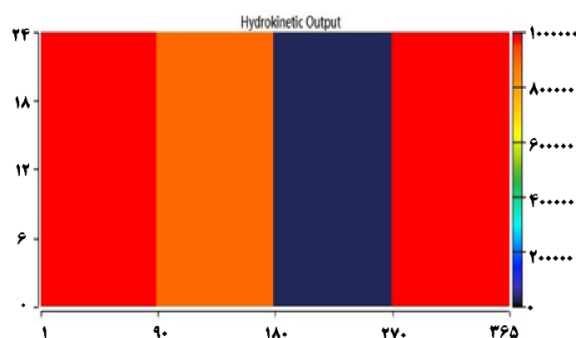
۱. میزان هزینه سالیانه مصرف آب و انتشار گاز دی‌اکسید کربن توسط نیروگاه بخاری بعثت تهران، به ترتیب برابر با ۴۴۲۹۰۰ و ۳۵۳۷۵۰۴۳ دلار است.
۲. سیستم هیبریدی تجدیدپذیر باد/پنل خورشیدی/باتری/برق آبی به عنوان سیستم بهینه جایگزین



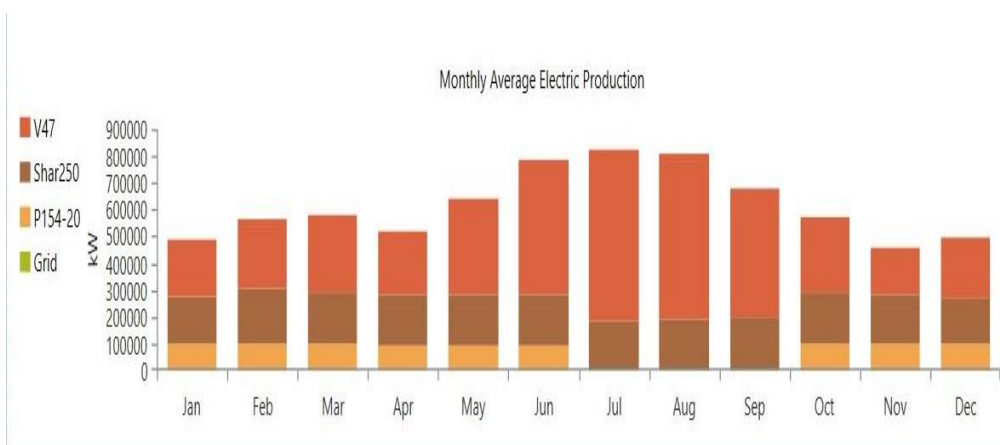
شکل ۹. میزان توان خروجی توسط توربین‌های بادی طی روز



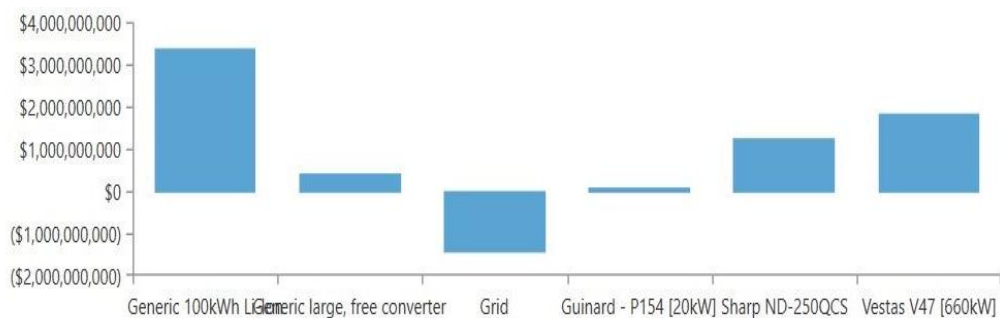
شکل ۱۰. میزان توان خروجی توسط پنل‌های خورشیدی طی روز



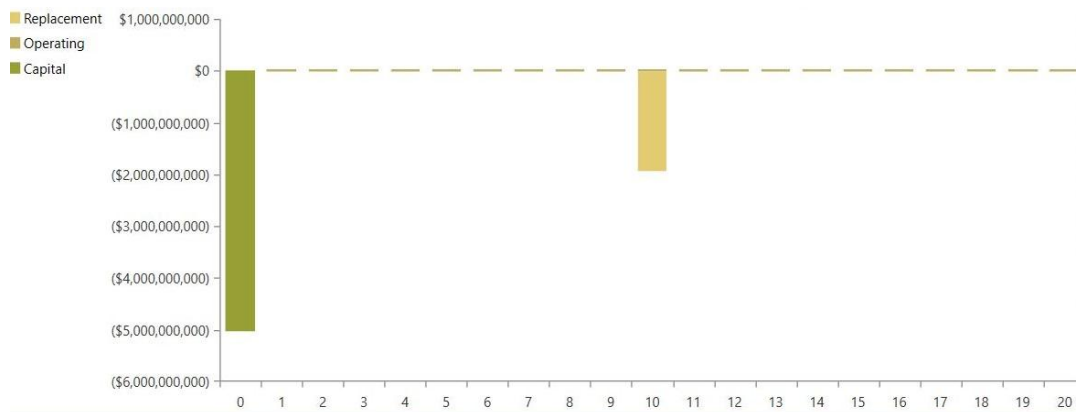
شکل ۱۱. میزان توان خروجی توسط توربین‌های برق‌آبی طی روز



شکل ۱۲. سهم توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و توربین‌های برق‌آبی از تأمین بار مورد نیاز



شکل ۱۳. هزینه‌های مربوط به هر یک از اجزای سیستم هیبریدی تجدیدپذیر



شکل ۱۴. هزینه‌های سالیانه پروژه طی ۲۰ سال

methods. Journal of African Earth Sciences. 2018;138:309-18.

- [9]. Hoekstra AY, Chapagain AKJEE. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. 2007;64(1):143-51.
- [10]. Mekonnen MM, Hoekstra AYJH, Sciences ES. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. 2011;15(5):1577-600.
- [11]. Feeley III TJ, Skone TJ, Stiegel Jr GJ, McNemar A, Nemeth M, Schimmoller B, et al. Water: A critical resource in the thermoelectric power industry. 2008;33(1):1-11.
- [12]. Johst M, Rothstein B. Reduction of cooling water consumption due to photovoltaic and wind electricity feed-in. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;35:311-7.
- [13]. Shtull-Trauring E, Bernstein N. Virtual water flows and water-footprint of agricultural crop production, import and export: A case study for Israel. Science of the Total Environment. 2018;622:1438-47.
- [14]. Fazelpour F, Soltani N, Rosen MA. Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran. international journal of hydrogen energy. 2016;41(19):7732-43.
- [15]. Mandal S, Das BK, Hoque N. Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh. Journal of Cleaner Production. 2018;200:12-27.
- [16]. Asrari A, Ghasemi A, Javidi MH. Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran—A case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16(5):3123-30.

منابع

- [1]. Mehrpooya M, Sharifzadeh MMM, Mousavi SA. Evaluation of an optimal integrated design multi-fuel multi-product electrical power plant by energy and exergy analyses. Energy. 2019;169:61-78.
- [2]. Mehrpooya M, Mousavi SA. Advanced exergoeconomic assessment of a solar-driven Kalina cycle. Energy Conversion and Management. 2018;178:78-91.
- [3]. Mehrpooya M, Ghorbani B, Mousavi SA. Integrated power generation cycle (Kalina cycle) with auxiliary heater and PCM energy storage. Energy Conversion and Management. 2018;:۴۷-۱۷۷:۴۵۳
- [4]. Ghorbani B, Mehrpooya M, Mousavi SA. Hybrid molten carbonate fuel cell power plant and multiple-effect desalination system. Journal of Cleaner Production. 2019.
- [5]. Hong H, Gao J, Qu W, Sun J, Kang Q, Li Q. Thermodynamic analyses of the solar-driven Kalina cycle having a variable concentration ratio. Applied Thermal Engineering. 2017;126:997-1005.
- [6]. Prananto LA, Zaini IN, Mahendranata BI, Juangsa FB, Aziz M, Soelaiman TAF. Use of the Kalina cycle as a bottoming cycle in a geothermal power plant: Case study of the Wayang Windu geothermal power plant. Applied Thermal Engineering. 2018;132:686-96.
- [7]. Davies EG, Kyle P, Edmonds JA. An integrated assessment of global and regional water demands for electricity generation to 2095. Advances in Water Resources. 2013;52:296-313.
- [8]. Yousefi H, Zahedi S, Niksokhan MH. Modifying the analysis made by water quality index using multi-criteria decision making

- [17]. Li C, Ge X, Zheng Y, Xu C, Ren Y, Song C, et al. Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China. *Energy*. 2013;55:263-72.
- [18]. Li C, Zhou D, Zheng Y. Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China. *Energy*. 2018;165:1352-69.
- [19]. Jahangir MH, Mousavi SA, Vaziri Rad MA. A techno-economic comparison of a photovoltaic/thermal organic Rankine cycle with several renewable hybrid systems for a residential area in Rayen, Iran. *Energy Conversion and Management*. 2019;195:244-61.
- [20]. Lau KY, Yousof M, Arshad S, Anwari M, Yatim A. Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. *Energy*. 2010;35(8):3245-55.
- [21]. Fazelpour F, Soltani N, Rosen MA. Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems for a medium-size hotel on Kish Island, Iran. *Energy*. 2014;73:856-65.
- [22]. Baneshi M, Hadianfard F. Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*. 2016;127:233-44.
- [23]. Khalid F, Dincer I, Rosen MA. Thermoeconomic analysis of a solar-biomass integrated multigeneration system for a community. *Applied Thermal Engineering*. 2017;120:645-53.
- [24]. Apichonnabutr W, Tiwary A. Trade-offs between economic and environmental performance of an autonomous hybrid energy system using micro hydro. *Applied energy*. 2018;226:891-904.
- [25]. Ma T, Yang H, Lu L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island. *Applied Energy*. 2014;121:149-58.