

Technical and Economical Comparison of Supplying Energy from Combined Solar-Wind Power Plants in Lieu of Natural Gas Transmission Lines

Zeinolabedin Sadeghi¹

| z_sadeghi@uk.ac.ir

Hamidreza Horry²

| horryhr@uk.ac.ir

Seyedeh Sakineh Sadeghi Nasaj²

Received: 2021/09/17 | Accepted: 2021/07/10

Abstract Transmission of gas from extraction wells is a precondition for transferring this resource to consumers, which in turn requires a comprehensive system in production, transmission, and distribution. The transmission cost varies depending on the transmission distance, route difficulty, number of stations, and decrease or increase in pressure. Hence, concentrating on another energy resource with low investment requirements that could be delivered for consumption at the production area can lead to reduction in costs and time efficiency as well. The present study attempts to compare the combined solar wind power plants with the gas transmission, in terms of cost and revenue in Andica county, located in Khuzestan province, using simulation tools for renewable power plants. The findings suggest that combined power plants have significantly lower cost than gas transmission power lines in terms of investment requirements. The operation cost of gas transmission lines has a significantly higher price in relation to its ensuing revenue, since the operation costs of combined power plants are covered by annual revenue from the electricity supply. In general, it should be said that the high cost of capital for gas transmission, considering the annual income from its sale, refutes its economical profit, while the combined power plant, due to the lower cost of capital than gas transmission, produces more revenue than gas sales, so it is more economically justifiable than gas transmission.

Keywords: Combined Power Plants, Gas Transmission Lines, Costing, Renewable Energy, RETScreen Software.

JEL Classification: Q21, Q31, Q41.

1. Associate Professor, Department of Economic and Management, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran (Correspondence Author).
2. Associate Professor, Department of Economic and Management, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. M.A. Student of Energy Economy, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

مقایسه اقتصادی و فنی تامین انرژی از نیروگاه ترکیبی خورشیدی - بادی به جای احداث خط انتقال گاز طبیعی

z_sadeghi@uk.ac.ir

زین العابدین صادقی

دانشیار دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران (نویسنده مسئول).

horryhr@uk.ac.ir

حمیدرضا حری

دانشیار دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

سیده سکینه نساج

دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

مقاله پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷

چکیده: برای مصرف گاز طبیعی نیاز به انتقال گاز از چاه استخراج به دست مصرف کننده است، که خود نیازمند یک سیستم گسترده در تولید، انتقال، و توزیع است. هزینه انتقال نسبت به مسافت انتقال، صعب العبوری منطقه، و تعداد ایستگاه تقلیل یا افزایش فشار متفاوت است. پس اگر بتوان از انرژی دیگری به جای گاز با هزینه های سرمایه ای پایین تر که در خود محل تولید و مصرف شود استفاده نمود، موجب کاهش هزینه و زمان بهره برداری می شود. برای این منظور در این پژوهش با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی نیروگاه تجدیدپذیر، مقایسه ای بین نیروگاه ترکیبی خورشیدی - بادی به لحاظ درآمدی و هزینه ای با خط انتقال گاز در منطقه اندیکا استان خوزستان انجام شده است. نتایج نشان می دهد به لحاظ هزینه سرمایه ای، نیروگاه ترکیبی هزینه بسیار پایین تری نسبت به خط انتقال گاز دارد. هزینه عملیاتی خط انتقال گاز بسیار بیش تر از درآمد حاصل فروش گاز است و این در حالی است که درآمد سالیانه حاصل از فروش برق، هزینه عملیاتی نیروگاه ترکیبی را پوشش می دهد. یکی از مصارف اصلی گاز در کشور ایران در بحث استفاده از آن برای تامین سوخت نیروگاه های تولید برق است، و این در حالی است که ایران در سال های اخیر با توجه به پیک مصرفی در زمستان با خاموشی هایی مواجه شده که ناشی از افت فشار گاز و در نتیجه کاهش تولید برق بوده است. بنابراین، به جای هزینه برای انتقال گاز به مناطق دورافتاده، که باعث افزایش تقاضای گاز می شود و همچنین با وجود تقاضای برق در این مناطق، می توان از روش تولید پراکنده استفاده نمود. به عبارت دیگر، برق هر منطقه در همان جا و با روش تجدیدپذیر تولید و مصرف شود. به طور کلی، هزینه سرمایه بالای انتقال گاز، با توجه به درآمد سالیانه حاصل از فروش آن، اقتصادی بودن آن را رد می کند و این در حالی است که نیروگاه ترکیبی با توجه به هزینه سرمایه ای پایین تر نسبت به انتقال گاز، و درآمد بیش تر نسبت به فروش گاز، به لحاظ اقتصادی از انتقال گاز توجیح پذیرتر است.

کلیدواژه ها: نیروگاه ترکیبی، خط انتقال گاز، هزینه یابی، استان خوزستان، انرژی تجدیدپذیر،

نرم افزار RETScreen

طبقه بندی JEL: Q21, Q41, Q31

مقدمه

به‌طور کلی، توسعه اقتصادی به عنوان یک رکن اساسی در مجموعه سیاست‌ها و خط‌مشی‌های هر کشور محسوب می‌شود. انرژی در جریان توسعه اقتصادی به عنوان نیروی محرکه رشد و توسعه به‌شمار می‌رود و امروزه می‌توان گفت که هیچ فعالیتی بدون صرف انرژی امکان‌پذیر نیست. بخش انرژی به عنوان یکی از بخش‌های اقتصادی - اجتماعی تاثیر بسزایی بر سایر بخش‌ها دارد (اسماعیل‌نیا و زاهدی سرشت، ۱۳۸۸). یکی از حامل‌های انرژی که امروزه نقش بسزایی در زندگی مردم دارد، گاز طبیعی است. در واقع، گاز طبیعی به عنوان مهم‌ترین حامل انرژی محسوب می‌شود که سهم بسیاری از مصرف انرژی در بخش‌های اقتصادی، به‌ویژه در بخش مصرف خانوار دارد. همچنین، مصرف گاز طبیعی با توجه به محدودیت حامل‌های انرژی تجدیدپذیر از یک طرف، و رشد جمعیت جهان از طرف دیگر ارتباط تنگاتنگی با هم دارد. در حال حاضر، گاز طبیعی در بیش از ۵۰ کشور جهان تولید می‌شود، و به دلیل این‌که نسبت به سایر حامل‌های انرژی اثرات زیست‌محیطی کم‌تری دارد، مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است (عباسی و امینی‌فرد، ۱۳۹۷).

برای مصرف گاز طبیعی به انتقال گاز از چاه استخراج به دست مصرف‌کننده نیاز است و انتقال گاز طبیعی به صورت کارآمد و موثر از منطقه تولید به منطقه مصرف نیازمند یک سیستم گسترده در تولید، انتقال، و توزیع است. این در حالی است که در بسیاری از مناطق ایران هم مسافت زیاد است و هم نقاط صعب‌العبور وجود دارد. پس در کنار زمان‌بر بودن، به لحاظ صرف هزینه و سرمایه نیز باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود (Khaleghian et al., 2012). علاوه بر صرف منابع مالی در خطوط انتقال گاز، نصب یک خط لوله موجب تجاوز به طبیعت و موجب پیامدهای زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری می‌شود. بنابراین، ایده استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک که بتوان در همان منطقه مصرف تولید نمود و به‌جای گاز مصرف شود، توجیه‌پذیر است. یکی از این حامل‌های انرژی برق است. بهره‌وری بالاتر و وابستگی به پیشرفت‌های فنی و سرمایه‌بر بودن وسایل استفاده‌کننده برق موجب می‌شود که با گذر زمان این نوع وسایل جای وسایل استفاده‌کننده از انرژی فسیلی را بگیرند. بر اساس این، بیش‌تر کشورهای جهان در چارچوب قانونی به منظور تشویق مردم و نهادهای اقتصادی به استفاده از منابع تجدیدپذیر در راستای اهداف آژانس بین‌المللی انرژی و پیمان کیوتو^۱ قدم برمی‌دارند. در میان این اهداف، برای پیشبرد عرضه و تقاضای انرژی در کشورهای در حال توسعه، جایگزین کردن منابع

۱. Kyoto Protocol: یک پیمان بین‌المللی است که به دلیل گرم شدن زمین در دهه‌های اخیر، برای کاهش عامل اصلی آن، یعنی صدور گازهای گلخانه‌ای، محدودیت‌هایی اعمال نمودند.

انرژی پاک و افزایش بهره‌وری مصرف انرژی در رأس دستور کار این نهادها و پیمان‌ها قرار دارد (Maji, 2015). همراه با این چالش‌ها، فرصت‌هایی نیز به دست می‌آید و این باعث می‌شود صنعت برق در زمان حاضر جذاب باشد (BP, 2019). یکی از روش‌های تولید انرژی برق استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی است که این امکان را دارد در همان محل مصرف، تولید شود. به عبارت دیگر، نیازی به خط انتقال و جابه‌جایی ندارد و در همان محل، تولید و مصرف می‌شود. سهم این پژوهش در ادبیات این است که به صورت همزمان به ارزیابی و مقایسه اقتصادی دو نوع تامین انرژی تجدیدپذیر و فسیلی با لحاظ کردن هزینه انتقال آن‌ها می‌پردازد. از آن‌جا که محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی در خطوط انتقال گاز به مسافت و مسیر انتقال گاز وابستگی دارد، و همچنین در این پژوهش تمام روستاهای منطقه در نظر گرفته شده‌اند، پس امکان محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی برای همه آن‌ها مقدور نیست. بنابراین، هزینه‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته نشده‌اند. فقط هزینه‌های اجتناب از آلودگی با استفاده از منابع تجدیدپذیر لحاظ شده است. این مطالعه به دنبال پاسخگویی به این پرسش اصلی است: آیا استفاده از نیروگاه خورشیدی - بادی به جای انتقال و استفاده از گاز طبیعی در مناطق سردسیر و دوردست از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر است؟

مبانی نظری پژوهش

بسیاری از صاحب‌نظران، استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی و سایر انرژی‌های نو را راه‌حلی برای جایگزینی گاز طبیعی می‌دانند، زیرا نیروگاه‌های خورشیدی نسبت به سایر مراکز تولید انرژی برق فسیلی در ایران، به‌ویژه استان خوزستان به عنوان زمینه این پژوهش، مزایایی مانند ظرفیت بالقوه انرژی‌های تجدیدپذیر، تولید نشدن گازهای مخرب، و امکان استفاده از فضاهای بدون کاربرد و بایر برای بهره‌برداری را دارا هستند. نکته مهم در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، غیرقابل اعتماد بودن آن‌هاست. عوامل محیطی بسیار نامشخص و وابسته به مکان هستند. از طرفی، انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید نیز به زمان روز، فصل و نوع زمین وابسته هستند، که همه آن‌ها بر تولید انرژی الکتریکی و هزینه انرژی تاثیر می‌گذارند و این امر سبب ایجاد نااطمینانی در تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود (Nerse- sian, 2016). بنابراین، شناخت دقیق و مناسب نوع انرژی تجدیدپذیر، عوامل موثر بر آن، راه‌های محاسبه و اندازه‌گیری خروجی برای محاسبات اقتصادی از اهمیت بسزایی برخوردار است. طبق آمار موجود، تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی حاصل از انرژی تجدیدپذیر می‌تواند از انتشار حدود یک کیلوگرم کربن دی اکسید در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی جلوگیری نماید (Wang et al., 2019).

یکی از مزایای انرژی باد آن است که در زمستان‌ها وزش باد سریع‌تر است و تداوم بیش‌تری دارد. بنابراین، هنگامی که نیاز مصرف‌گاز به دلیل گرمایش بیش‌تر می‌شود، نیروگاه بادی الکتریسیته بیش‌تری تولید می‌کند (Richardson, 2013). این در حالی است که ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی در استان‌های جنوبی کشور با توجه به تعداد روزهای آفتابی بالا و صافی هوا، استفاده از این انرژی را بسیار توجیه‌پذیر می‌نماید. پژوهش‌های بسیاری در مورد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، انجام شده که بیش‌تر به مقایسه اقتصادی این نوع انرژی با نیروگاه انرژی فسیلی پرداخته‌اند.

خسروانی تهرانی (۱۳۹۲)، به ارزیابی اقتصادی نیروگاه فسیلی در مقایسه با نیروگاه خورشیدی می‌پردازد. در این پژوهش با استفاده از روش بررسی هزینه - فایده، استفاده از سه نوع نیروگاه را در ایران مورد مطالعه قرار می‌دهد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، تولید برق در نیروگاه خورشیدی گران‌تر از نیروگاه سیکل ترکیبی است و تنها خرید برق در قیمت‌های بالاتر توجیه اقتصادی دارد. همچنین، در شرایط استفاده از ارز مبادله‌ای و نرخ‌های تنزیل پایین‌تر نیز هیچ‌کدام از نیروگاه‌ها اقتصادی نیست. از طرفی، با وارد کردن عوامل دیگر همچون صرفه‌جویی مصرف سوخت و هزینه‌های جانبی نیروگاه‌های فسیلی برای تولید مواد سمی ناشی از احتراق گاز و گازوییل دو نیروگاه تجدیدپذیر اقتصادی نبودند. **کولاک و همکاران (۲۰۲۰)**، به مقایسه و انتخاب بهینه بین نیروگاه خورشیدی و نیروگاه سیکل ترکیبی می‌پردازند. در این پژوهش ساخت نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک^۱ در ترکیه با استفاده از فناوری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۲ مکان‌یابی شده است. در چارچوب پژوهش، عوامل موثر بسیاری از جمله ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی، جاده‌ها، خطوط انتقال انرژی، مراکز ترانسفورماتور، شیب، موقعیت سدها و رودخانه‌ها، خطوط لوله گاز طبیعی، خطوط گسل، پوشش اراضی و مناطق مسکونی در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از روش فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی، وزن عامل‌ها محاسبه شد. در نتیجه تمام این فرایندها، نقشه‌ای ارائه می‌دهد که مکان‌های بهینه را برای نیروگاه‌های انرژی خورشیدی نشان می‌دهد. **الموهلاوی و همکاران^۳ (۲۰۱۹)**، به مقایسه تحلیل عملکرد حرارتی سیستم متمرکز خورشیدی (CSP)^۴ با نیروگاه سیکل ترکیبی گاز طبیعی

1. Colak *et al.*
2. Photovoltaic
3. Geographic Information System
4. Elmohlawy *et al.*
5. Concentrated Solar Power

(NGCC)^۱ می‌پردازند. از دو مدل شبیه‌سازی ترمودینامیکی برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی چرخه‌ها در هر شرایط عملیاتی استفاده شده است. برای نیروگاه مجتمع چرخه ترکیبی خورشیدی (ISCC)^۲، توان خالص و توان خروجی در تابستان تا ۵۵۵/۳۶ مگاوات و ۵۴۶/۴۳ مگاوات برای ISCC، در مقایسه با نیروگاه NGCC مرجع به ترتیب در حدود ۵۲/۳۱۵ و ۴۳/۳۸ مگاوات بالاتر است. همچنین، کارایی کلی از ۵۸/۷۵ درصد به ۶۵ درصد برای هر دو دوره افزایش یافته است، هرچند این مقادیر در روزهای زمستان به دلیل کم‌تر بودن تابش خورشید کاهش می‌یابد. همچنین، در ISCC سناریو دوم کاهش کربن سالانه معادل ۷۳۵۸۶ (تن در سال) با نسبت صرفه‌جویی سوخت فسیلی (FSR)^۳ سالانه ۱۱/۲۸ درصد است. برای ISCC سناریو اول نیز این مقدار برابر با ۶۲۸۸۵ (تن در سال) انتشار کربن و FSR برابر با ۹/۶ درصد است. با وجود پژوهش‌هایی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و مقایسه آن با مصرف انرژی تجدیدپذیر، اما کم‌تر به موضوع جایگزینی این انرژی‌ها پرداخته شده است.

روش‌شناسی پژوهش

نیروگاه ترکیبی خورشیدی - بادی

با توجه به ماهیت متناوب و قدرت غیرقابل پیش‌بینی از منابع انرژی تجدیدپذیر مستقل مانند انرژی خورشیدی و بادی، تولید برق ترکیبی از لحاظ هزینه عملیاتی و چرخه عمر، الزامات اندازه‌گیری و تعمیر و نگهداری سیستم بیش‌تر قابل اعتماد است (Ahmad et al., 2018). طراحی یک سیستم انرژی ترکیبی عمدتاً وابسته به توزیع تقاضای برق است، پس می‌توان ترکیب ظرفیت‌های متفاوتی از آن، با توجه به شرایط منطقه انتخاب نمود. بنابراین، ابتدا باید میزان خروجی هر نوع سیستم خورشیدی و بادی را محاسبه نمود.

یک سلول فتوولتائیک کوچک‌ترین واحد در یک پنل خورشیدی است که توانایی تولید ۱ تا ۲ وات الکتریسیته دارد و از ترکیب چند سلول خورشیدی یک صفحه خورشیدی به وجود می‌آید که توانایی تولید آن بین ۵۰ تا ۳۰۰ وات است (Nersesian, 2016). به ترکیب چندین صفحه خورشیدی آرایه خورشیدی گفته می‌شود که قدرت تولید آن بستگی به تعداد صفحه و توانایی آن‌ها دارد. خروجی

1. Natural Gas Combined Cycle
2. Integrated Solar Combined Cycle
3. Fossil Fuel Saving Ratio (FSR)

قدرت آرایه خورشیدی فتوولتائیک را به صورت رابطه (۱) می‌توان محاسبه نمود:

$$P_{PV} = P_{PV,STV} f_{PV} f_{temp} \left(\frac{I_T}{I_{T,STC}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه $P_{PV,STV}$ ظرفیت اسمی آرایه فتوولتائیک در شرایط آزمون استاندارد (STC)، f_{PV} عامل تغییرات سلول فتوولتائیک^۲ (%، f_{temp} عامل تغییرات دما^۳ (بدون بُعد)، $I_{T,STC}$ تابش تصادفی در شرایط آزمون استاندارد^۴ (۱ کیلووات بر متر مربع)، و I_T میزان تابش خورشیدی در یک واحد از آرایه فتوولتائیک (کیلووات بر متر مربع) است، که به صورت رابطه (۲) تعریف و محاسبه می‌شود (Ramli et al., 2016):

$$I_T = \left(1 + \frac{I_d}{I_0} \right) I_b R_b + I_d \left(1 - \frac{I_b}{I_d} \right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{I_b}{I} \sin^3 \frac{\beta}{2}} \right) + \rho_g \quad (2)$$

در این جا I تابش افقی جهانی^۵ (کیلووات / متر مربع)، I_0 تابش افقی فرازمینی^۶ (کیلووات بر متر مربع)، I_b تابش پرتو مستقیم بر یک سطح افقی^۷ (کیلووات / متر مربع)، I_d تابش منتشر شده بر یک سطح افقی^۸ (کیلووات / متر مربع)، ρ_g بازتاب زمین یا آلبدو^۹ (%، β زاویه شیب سطح (درجه)، و R_b نسبت پرتو در زاویه سطح به زاویه پرتو تابش در سطح افقی (بدون بُعد) است که به صورت رابطه (۳) شرح می‌شود:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

در این جا θ مشخص کننده زاویه برخورد و θ_z زاویه برخورد در اوج تابش (ظهر) است. بنابراین، یک سیستم ردیابی در پنل‌های خورشیدی باعث افزایش بهره‌وری می‌شود، به طوری که در سیستم‌های ردیابی تک‌محور، بهره‌وری ۲۵-۳۵ درصد و در دو محور ۳۵-۴۵ درصد افزایش پیدا می‌کند (Nersesian, 2016). عامل دیگری که در میزان خروجی سلول خورشیدی تاثیرگذار است، درجه حرارت یا دما است. در طول شب، دمای سلول خورشیدی همانند دمای محیط است، اما در طول

1. Standard Test Conditions
2. PV Derating Factor
3. Temperature Derating Factor
4. Incident Radiation at Standard Test Conditions
5. Global Horizontal Radiation
6. Extraterrestrial Horizontal Radiation
7. Direct Beam Radiation on a Horizontal Surface
8. Diffuse Radiation on a Horizontal Surface
9. Albedo

روز که خورشید کامل است، دمای سلول خورشیدی می‌تواند تا بیش از ۳۰ درجه سانتیگراد از دمای محیط بیش‌تر باشد که بر بهره‌وری سلول خورشیدی اثرگذار است. عامل تغییرات درجه حرارت به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$f_{temp} = \frac{1 + \alpha_p \left[T_a + I_T \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{I_{T,NOCT}} \right) \right] - T_{c,NOCT}}{1 + \alpha_p I_T \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{I_{T,NOCT}} \right) \frac{\eta_{mp,STC}}{0.9}} \quad (4)$$

در این جا T_a درجه حرارت محیط ($^{\circ}C$)، $T_{c,NOCT}$ دمای اسمی عملیاتی سلول خورشیدی (NOCT) $^{\circ}C$ ، $T_{a,NOCT}$ دمای محیطی که در آن دمای عملیاتی سلول تعیین شده است (۲۰ درجه سانتیگراد)، $I_{T,NOCT}$ تابش خورشیدی است که در شرایط NOCT تعریف شده است (۰/۸ کیلووات بر متر مربع)، $\eta_{mp,STC}$ بازده صفحه فتولتائیک در نقطه حداکثر قدرت آن تحت شرایط STC (%) است، و a_p ضریب دمای قدرت^۲ است. مقادیر a_p ، $T_{c,NOCT}$ و $\eta_{mp,STC}$ به‌طور معمول به عنوان بخشی از داده‌های سلول خورشیدی توسط تولیدکنندگان ارائه می‌شود (Ramli et al., 2016).

دمای اسمی عملیاتی سلول خورشیدی، درجه حرارت سطح آرایه فتولتائیک است که در معرض ۰/۸ کیلووات در متر مربع تابش خورشید، با دمای محیط ۲۰ درجه سانتیگراد و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه قرار می‌گیرد، که اصطلاحاً به این شرایط، شرایط آزمون استاندارد (STC) گفته می‌شود. بهترین ماژول در دمای اسمی عملیاتی ۳۳ درجه سانتیگراد، ماژول‌های محیطی خشن در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد، و ماژول‌های معمولی در دمای ۴۸ درجه سانتیگراد هستند. برای محاسبه دمای سلول توسط داده‌ها از رابطه (۵) استفاده می‌شود:

$$T_{Cell} = T_a + \frac{NOCT - 20}{80} S \quad (5)$$

در این رابطه S میزان آفتاب‌گیری در هر مگاوات بر سانتیمتر مربع است. سرعت باد بر دمای سلول اثرگذار است. به عبارتی، دمای ماژول در سرعت باد بالا، پایین‌تر و در سرعت باد پایین، بالاتر است. در صورتی که نخواهیم عامل تغییر دما را در نظر بگیریم، معادله تولید سلول خورشیدی به صورت رابطه (۶) درمی‌آید:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) \quad (6)$$

1. Nominal Operating Cell Temperature
2. Power Temperature Coefficient

Y_{pv} ظرفیت اسمی آرایه خورشیدی، f_{PV} به معنای قدرت خروجی آن در شرایط آزمون استاندارد است (کیلووات)، \bar{G}_T عامل کاهش حد مجاز در سلول خورشیدی^۱ (%)، و $\bar{G}_{T,STC}$ تابش تصادفی خورشیدی در آرایه فتوولتائیکی در بُعد زمانی (کیلووات بر متر مربع) است. تابش افقی جهانی (GHI)^۲ کل تابش خورشیدی در یک سطح افقی است. این مجموع نور مستقیم عادی (DNI)^۳، تابش افقی روشنایی و بازتاب زمین است (Nersesian, 2016). همچنین، می‌توان میزان تولید انرژی توربین بادی را در سرعت‌های مختلف باد طبق رابطه (۷) نیز محاسبه نمود:

$$P_W = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) P_{W,STP} \quad (7)$$

جایی که P_W توان واقعی خروجی توربین بادی (کیلووات)، $P_{W,STP}$ قدرت توربین بادی در شرایط STP (کیلووات)، ρ چگالی واقعی هوا^۴ (کیلوگرم بر متر مکعب)، ρ_0 چگالی هوا در شرایط STP (۱/۲۲۵ کیلوگرم در متر مکعب) است (Ramli et al., 2016). در این رابطه $P_{W,STP}$ خروجی توربین بادی است که در شرایط استاندارد محاسبه شده است، یعنی شرایطی که در آن چگالی باد (۱/۲۲۵ کیلوگرم در متر مکعب) است. بنابراین، آنچه که سبب تفاوت خروجی باد می‌شود، تفاوت در چگالی باد در شرایط واقعی است که با وارد کردن نسبت چگالی واقعی به چگالی استاندارد در این معادله در نظر گرفته شده است. چگالی واقعی هوا را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه نمود:

$$\rho = \frac{1}{2} \rho_0 A \sum_{i=1}^n P(V_i) V_i^3 \quad (8)$$

که در این رابطه $P(V_i) V_i^3$ چگالی توان باد در سرعت‌های مختلف و A واحد سطح است که معمولاً به صورت یک متر مربع در نظر گرفته می‌شود. چگالی توان باد در سرعت‌های باد مختلف میزان متفاوتی دارد که در **جدول (۱)** مقدار چگالی توان باد در سرعت‌های مختلف ارائه شده است.

1. Solar Radiation Incident on the PV Array in the Current Time Step [kW/m²]
2. Global Horizontal Irradiance (GHI)
3. Direct Normal Irradiance (DNI)
4. Actual Air Density

جدول ۱: چگالی توان باد در سرعت‌های مختلف باد

سرعت باد (متر بر ثانیه)	$P(V_i)/i^3$
۲-۳	۳۷۴/۴۱
۳/۵-۵	۱۵۹۰/۴۶
۵/۵-۸	۸۸۹۴/۰۵
۸/۵-۱۰/۵	۱۲۴۳۱/۸۶
۱۱-۱۳/۵	۱۳۹۷۰/۷۷
۱۴-۱۶/۵	۸۹۷۲/۸۲
۱۷-۲۰	۵۸۲۵/۰۹
۲۰/۵-۲۳/۵	۱۵۹۷/۰۲

منبع: داده‌های خام سازمان هواشناسی^۱

محاسبه هزینه

هزینه خط انتقال گاز^۲

هزینه‌های خط لوله انتقال گاز به هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX)^۳ و هزینه‌های عملیاتی (OPEX)^۴ تقسیم می‌شود. بر اساس یولوستد و اورلند^۵ (۲۰۱۲)، هزینه‌های سرمایه‌ای برای خط لوله به‌طور عمده وابسته به هزینه مصالح (فولاد کربن)، هزینه نیروی کار، طول خط لوله، قطر لوله، و تعداد ایستگاه‌های تقویت یا تقلیل فشار گاز است. برای این منظور می‌توان از رابطه (۹) استفاده نمود:

$$C = 42675\mu\delta + (3 \times 10^7)a + 1500c \quad (9)$$

یولوستد و اورلند (۲۰۱۲)، روش متعارف استفاده از فولاد با درجه ۷۰-x را برای برآورد هزینه‌های سرمایه‌ای خط لوله انتقال گاز استفاده می‌کنند. بر طبق تکلیف (۲۰۱۳)، احداث خط لوله با استفاده از این نوع موجب می‌شود که هزینه‌های خطوط انتقال لوله با مسافت‌های طولانی و با ظرفیت سالیانه

1. <https://www.irimo.ir/far/index.php>

۲. همه هزینه‌ها و محاسبه‌های این پژوهش برحسب دلار است.

3. Capital Expenditures
4. Operational Expenditure
5. Ulvestad & Overland

بالا، حدود ۳۰ درصد کاهش پیدا کند. منظور از x-70 نوع فناوری بکاررفته لوله خط انتقال است که یک اصطلاح تخصصی در تولید خطوط انتقال گاز و نفت است^۱ و خارج از حیطه اقتصادی است. بر اساس این، با اعمال فناوری x-70 در معادله (۷) به معادله (۱۰) دست پیدا می‌کنیم:

$$C = 0/8(42675\mu\delta) + (3 \times 10^7)a + 1500c \quad (10)$$

در واقع، هزینه‌های ساخت‌وساز این خط لوله با ضرب هزینه ثابت در قطر (μ) برحسب اینچ و طول خط لوله (δ) برحسب کیلومتر محاسبه می‌شود. a تعداد ایستگاه‌های تقویت فشار است و c ظرفیت کلی از ایستگاه‌های تقویت فشار برحسب اسب بخار است. بر اساس این که هزینه‌های واقعی در هر مایل خط لوله در آمریکا در طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ تغییر ناچیزی داشته است، ما نیز از ارقام تجدیدنظرشده **یولوستد و اورلند (۲۰۱۲)** استفاده خواهیم نمود. ایستگاه‌های فشار بیش‌ترین درصد از هزینه‌های سرمایه‌ای را تشکیل می‌دهند، که معمولاً یک عدد ثابت برای هر تعداد ایستگاه در نظر گرفته می‌شود.

هزینه‌های عملیاتی خط انتقال گاز به دو دسته تقسیم می‌شود: هزینه‌های عملیاتی و درصد ثابتی از هزینه‌های سرمایه‌ای. بر اساس **یولوستد و اورلند (۲۰۱۲)**، هزینه‌های عملیاتی برای یک خط لوله به‌طور معمول هزینه‌های سالانه‌ای شامل سوخت ایستگاه‌های تقویت فشار، تعمیرات خط لوله، مجوزهای زیست‌محیطی، و هزینه‌های اداری است و بر طبق معادله (۱۱) محاسبه می‌گردد:

$$O_p = C\tau + \left(1 - (1 - \kappa)^n\right) NP \quad (11)$$

N : حجم گاز طبیعی برحسب متر مکعب در هر سال، P : قیمت گاز طبیعی برحسب دلار به‌ازای هر متر مکعب، δ : طول خط لوله برحسب کیلومتر، n : فاصله بین ایستگاه‌های تقویت فشار برحسب کیلومتر^۲، $(C\tau)$: هزینه‌های عملیاتی که سهمش از هزینه‌های سرمایه‌ای به‌طور معمول ۳/۵ درصد برای خط لوله است، و K : گاز طبیعی مورد استفاده به عنوان سوخت در ایستگاه‌های تقویت فشار

۱. یکی از پرکاربردترین فولادها در خطوط پرفشار انتقال گاز طبیعی، فولاد API X-70 است. پژوهش روی این فولاد عموماً به منظور بهبود خواص مکانیکی یا بهینه کردن فرایند ترمومکانیکی یا اصلاح ترکیب شیمیایی آن متمرکز شده است.

۲. باعث افزایش هزینه‌های OP می‌شود.

۳. δ با افزایش طول لوله با فرض ثابت بودن فاصله بین تعداد ایستگاه‌ها، در نتیجه تعداد ایستگاه‌ها و سپس هزینه‌ها افزایش می‌یابد.

۰/۴ درصد به‌ازای هر ۱۰۰ مایل است. از آن‌جا که در این پژوهش ایستگاه تقویت فشار گاز استفاده نمی‌شود، پس هزینه عملیاتی فقط شامل ۳/۵ درصد از هزینه سرمایه‌ای برای ساخت ایستگاه تقلیل فشار محاسبه می‌شود (خزاعی، ۱۳۹۴). نیاز به اشاره است که هزینه ایستگاه تقویت فشار یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود و شامل کل هزینه‌هاست.

هزینه نیروگاه تجدیدپذیر ترکیبی

هزینه سرمایه‌ای در انرژی خورشیدی و بادی به عنوان عملکردی توان نامی^۱ ($P_{el,WT}$ و $P_{el,PV}$) محاسبه می‌شوند. برای مثال، هزینه مشخصی برابر با ۱۵۰۰ دلار در هر کیلووات برای انرژی خورشیدی و ۳۵۰۰ دلار در هر کیلووات برای انرژی بادی، هزینه سرمایه‌ای به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$C_{CE,PV} = 1500 \times P_{el,PV} \quad (12)$$

$$C_{CE,WT} = 3500 \times P_{el,WT} \quad (13)$$

جمع هزینه سرمایه‌ای و هزینه نصب و راه‌اندازی را هزینه اولیه^۲ می‌گویند که به صورت رابطه (۱۴) قابل محاسبه است:

$$C_{IC} = C_{CE} + C_{install} \quad (14)$$

علاوه بر این، سیستم انرژی تجدیدپذیر دارای هزینه سرمایه‌ای سیستم ذخیره‌سازی ($C_{CE,LAB}$) است که به صورت تابعی از هزینه برای هر کیلووات ساعت از ظرفیت انرژی سیستم ذخیره‌سازی و هزینه سرمایه‌ای مبدل برق ($C_{CE,inverter}$) به عنوان عملکردی از قدرت اسمی پانل‌های خورشیدی است. مثلاً با فرض هزینه مشخصی برابر با ۱۷۶ و ۱۵۸ دلار در هر کیلووات برای آن‌ها هزینه سرمایه‌ای به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$C_{CE,LAB} = 176 \times Capacity_{LAB} \quad (15)$$

$$C_{CE,Inverter} = 158 \times P_{el,PV} \quad (16)$$

بنابراین، با جمع هزینه‌های فوق، کل هزینه سرمایه‌ای اولیه به‌دست خواهد آمد (Buonomano et al., 2018):

$$C_{tot,CE} = C_{IC} + C_{CE,LAB} + C_{CE,Inverter} \quad (17)$$

برای انجام مقایسه ابتدا با توجه به گزارش‌های مصرف در شهرستان گاز شهرستان اندیکا و با

1. Rated Power
2. Initial Cost

توجه به تعداد روستاهای این شهرستان، متوسط مصرف گاز سالیانه برای هر روستا محاسبه می‌شود و با استفاده از فرمول محاسبه کالری، مقدار گاز مصرفی به برق مورد نیاز تبدیل می‌گردد. در ادامه با توجه به برق مورد نیاز سناریوهای ایجادشده و با استفاده از نرم‌افزار RETScreen اقدام به شبیه‌سازی نیروگاه ترکیبی با توجه به پارامترهای فنی و هواشناسی در این شهرستان می‌شود و میزان هزینه و درآمد محاسبه و مقایسه می‌گردد.

در این پژوهش، مقایسه‌ای بین نیروگاه ترکیبی و خط انتقال گاز در شهرستان اندیکا استان خوزستان انجام می‌شود. این شهرستان از جمله شهرستان‌های در حال گسترش استان خوزستان است که با مساحت ۲۳۹۱ کیلومتر مربع بین ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و بین ۳۱ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی در شمال شرقی استان خوزستان و تقریباً در مرکز رشته‌کوه‌های زاگرس واقع شده است. اندیکا در شمال شرقی استان خوزستان قرار دارد و از شمال غرب به لالی، از شمال به سردشت دزفول، از شمال و شمال شرق به استان چهارمحال و بختیاری، از شرق به ایذه، و از جنوب به مسجد سلیمان محدود می‌شود و دارای ۵۱۲۶ خانوار است. ارتفاع متوسط از سطح دریا به‌طور میانگین حدود ۸۰۰ متر است که با وجود مناطق کوهستانی و صعب‌العبور، گاز طبیعی لوله‌کشی در برخی از روستاهای این شهرستان انجام نشده و سوخت‌های فسیلی جابجایی آن‌ها نبوده است. بنابراین، نصب توربین‌های بادی تجاری و سلول‌های خورشیدی با در نظر گرفتن بیش‌ترین ضریب قدرت توان می‌تواند انرژی الکتریکی را در این روستاها تامین کند و حتی به عنوان حامل انرژی جایگزین گاز طبیعی نیز مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور به بررسی و مقایسه نیروگاه ترکیبی خورشیدی - بادی با خط انتقال انجام می‌گیرد.

تجزیه و تحلیل اطلاعات

محاسبه برق مورد نیاز

در جدول (۲)، آمار تعداد روستاها، تعداد خانوار، میزان گاز مصرفی، و برق مصرفی خانوار روستایی برای شهرستان اندیکا که جزو شهرستان‌های کم‌برخوردار در استان خوزستان است، ارائه می‌شود.

جدول ۲: آمار تفصیلی گاز شهرستان اندیکا (استان خوزستان)

شهرستان	شهرستان اندیکا	آمار
تعداد روستا	۸۶	
تعداد خانوار	۱۰۶۱۳	
متر از لوله گذاری مورد نیاز	۳۹۷۵۶۰	
تعداد انشعاب گاز مورد نیاز	۴۴۹۰	
تعداد ایستگاه تقلیل فشار گاز مورد نیاز	۹	
متوسط گاز مصرفی هر روستا (متر مکعب)	۱۰۳۱۸۷/۳	

منبع: شرکت ملی گاز ایران^۱

برای انجام یک مقایسه بهتر بین استفاده از انرژی تجدیدپذیر و گاز طبیعی، ابتدا باید این مقایسه را در یک مقیاس و مقدار مشابه انجام داد. از آن جا که ما به دنبال استفاده از برق به جای مصرف گاز طبیعی هستیم، ابتدا باید میزان متوسط گاز مصرفی هر روستا را تبدیل به برق مصرفی هر روستا نماییم. به عبارت دیگر، در صورت مصرف حجم مشخصی از گاز چه میزان برق مورد نیاز است؟ همان طور که می دانیم، میزان گاز مصرفی بر حسب متر مکعب اندازه گیری می شود و این در حالی است که میزان برق مصرفی به کیلووات - ساعت قابل اندازه گیری است. بنابراین، برای تبدیل گاز مصرفی به برق به این صورت اقدام کنیم: اولین قدم محاسبه گاز طبیعی مورد نیاز برای تبدیل حجم به یک مقدار کالری است. معمولاً در شبکه گاز، مقدار کالری از ۳۷/۵ تا ۴۳/۰ مگاژول بر هر متر مکعب (MJ/m³) متفاوت است که بستگی به نوع گاز دارد. از آن جا که هر واحد بر حسب وات برابر یک ژول در ثانیه است، بنابراین خواهیم داشت (Byrom, 2019):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/S} \Rightarrow 1 \text{ kWh} = 1 * 1000 * 60 * 60 \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$$

بنابراین، هر کیلووات - ساعت برابر ۳/۶ مگاژول خواهد بود. پس برای محاسبه میزان برق کافی است مقدار گاز مصرفی را بر ۳/۶ تقسیم نماییم تا MJ به kWh به دست آید. نتایج محاسبه برق مصرفی به جای گاز در جدول (۳) برای شهرستان اندیکا محاسبه شده است.

- <https://www.nigc.ir>
- Megajoules Per Cubic Meter

جدول ۳: میزان برق مصرفی مورد نیاز شهرستان اندیکا^۱

شهرستان اندیکا	محاسبات
۱۰۳۱۸۷/۳	متوسط گاز مصرفی هر روستا (متر مکعب)
۲۱۱۵۴/۳۳	متوسط برق به‌جای گاز برای روستا (مگاوات ساعت سالانه)
۳۱۶۲	متوسط برق مصرفی به‌جای گاز روستا (کیلووات روزانه)

ظرفیت بالقوه نیروی باد

به منظور سنجش ظرفیت بالقوه انرژی بادی، ابتدا آمار ده‌ساله مربوط به سرعت باد برای شهرستان اندیکا از سازمان هواشناسی جهانی ناسا استخراج و در **جدول (۴)** ارائه می‌شود.

جدول ۴: ظرفیت بالقوه نیروی باد^۲

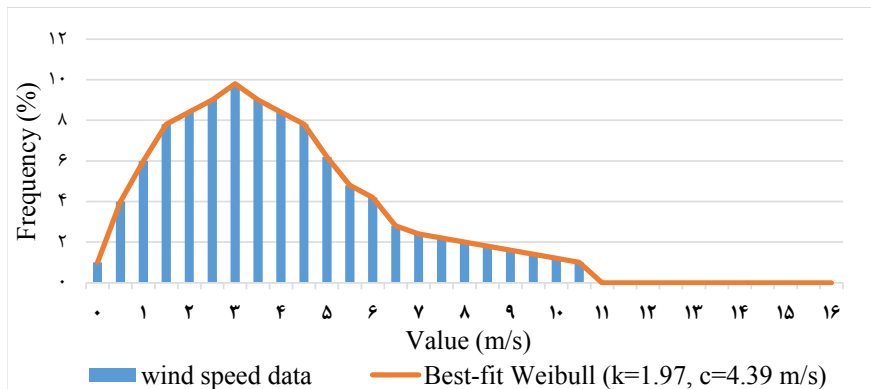
شهرستان اندیکا	شهرستان	آمار
۵/۱۶	میانگین سرعت باد سالیانه	
۴۰	ارتفاع سنجش باد (متر)	
۱۰ ساله	میانگین دوره	

منبع: سازمان هواشناسی ناسا^۴

در **شکل (۱)** نیز توزیع تجمعی سرعت باد ارائه شده است. در این محاسبات ضریب اعوجاج Weibull (اندازه اعوجاج باد در طول سال) $1/97$ و ضریب خودهمبستگی $0/85$ است.

۱. محاسبات در دو بخش صورت گرفته است. ابتدا محاسبات بر اساس منطقه مورد بررسی انجام گرفته که شامل چندین روستا بوده و سپس این محاسبات بر اساس میانگین برای یک روستا در نظر گرفته شده است.
۲. در این محاسبات کارایی نیروگاه لحاظ می‌شود. کارایی نیروگاه برق را در گزارش‌های استاندارد بین‌المللی حدود ۳۳ درصد لحاظ می‌کنند.
۳. در محاسبات از نرم‌افزار RETScreen و اطلاعات آب‌وهوای ناسا که متصل به نرم‌افزار است، استفاده شده است.

4. <https://www.nasa.gov>



شکل ۱: توزیع تجمعی سرعت باد

ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی

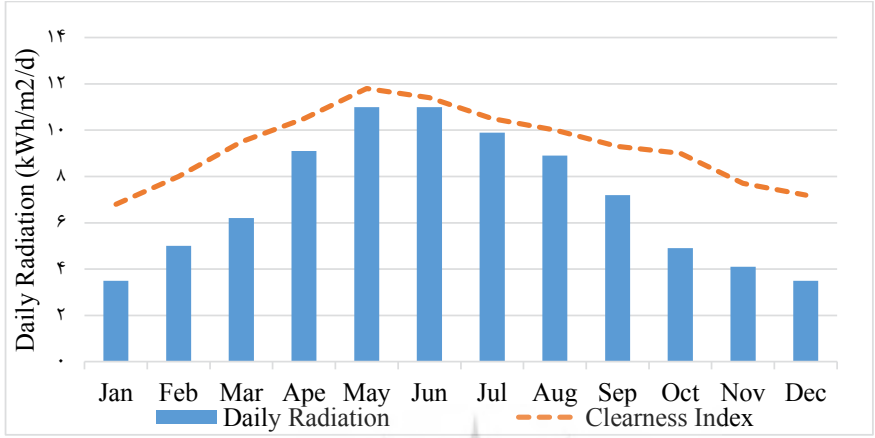
میانگین سالیانه ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی شهرستان اندیکا در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی

شهرستان	شهرستان اندیکا	آمار
میانگین تابش روزانه (سال)	۵/۱۶	(kWh/m ² /day)
ضریب صافی هوا	۰/۵۹	میانگین دوره
	۲۲ ساله	

منبع: سازمان هواشناسی ناسا

همچنین، داده‌های میانگین ماهانه تشعشع خورشید برای منطقه در شکل (۲) نمایش داده شده است. خط قرمزی که در نمودار دیده می‌شود، شاخصی است که تحت عنوان شفافیت معرفی می‌شود. شاخص شفافیت نسبت تابش خورشیدی سطح زمین به تابش خورشیدی جو است که تغییرات آن بین صفر و یک و بیانگر میزان شفافیت جو است.



شکل ۲: تشعشع ماهانه خورشید

تعیین بار مورد نیاز

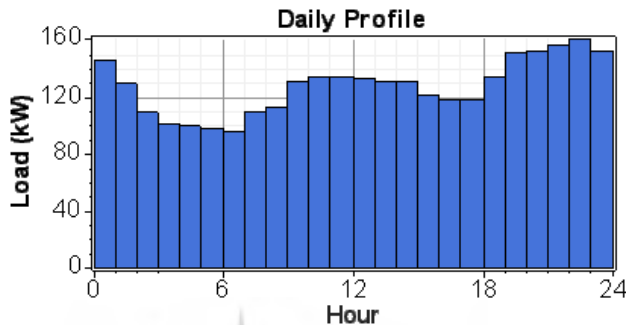
پیش از انجام شبیه‌سازی نیروگاه، ابتدا باید میزان بار الکتریکی مورد نیاز را تعیین نمود. منظور از بار آنی بار مصرفی یک روستای صعب‌العبور کوهستانی و دورافتاده از شهرستان اندیکا در استان خوزستان است که به عنوان بار مستقل از شبکه در نظر گرفته شده است. به‌طور متوسط، مصرف انرژی برق این روستا در حدود ۳/۵Mw/h/d و حداکثر تقاضای بار ۲۱۷ kw برآورد گردیده است. لازم به اشاره است که آمار متوسط گاز مصرفی شرکت گاز تبدیل به برق می‌شود و آمار متوسط برق مصرفی خانوار از آمار شرکت توانیر^۱ است (جدول ۶).

جدول ۶: تعیین بار الکتریکی مورد نیاز روزانه

شهرستان	آمار
شهرستان اندیکا	متوسط مصرف سالانه برق به‌جای گاز (مگاوات ساعت) ۱۱۵۴/۳۳
	متوسط مصرف روزانه برق به‌جای گاز (مگاوات ساعت) ۳/۱۶

1. <https://www.tavanir.org.ir>

برای یک روز خاص پروفایل مصرف بار روزانه روستا در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۳: پروفایل روزانه بار مصرفی^۱

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده می‌شود، حداکثر بار ۱۶۰ کیلووات و حداقل بار ۹۶ کیلووات است که به ترتیب مربوط به ساعات ۲۳ و ۷ است. به عبارت دیگر، بیش‌ترین مصرف هنگام پخت‌وپز برای صبحانه، نهار، و شام در نظر گرفته شده است. شکل (۳) فقط میزان مصرف متوسط یک خانوار را بیان می‌کند که نرم‌افزار نمایش می‌دهد.

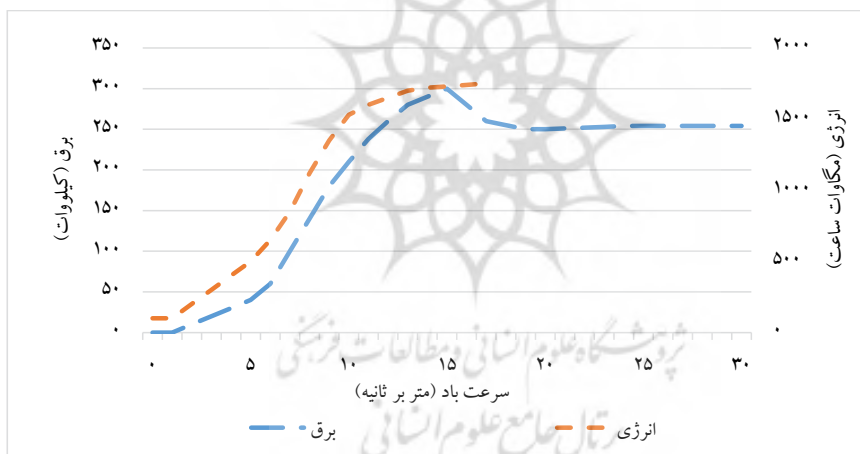
معرفی سیستم ترکیبی

یک سیستم ترکیبی اساساً از منابع انرژی تجدیدپذیری (شامل انرژی خورشیدی و بادی) که به صورت موازی با واحد ذخیره انرژی کار می‌کند، تشکیل می‌گردد. سیستم ترکیبی مورد نظر در این پژوهش از منابع انرژی تجدیدپذیر شامل باد و خورشید تشکیل شده و مولفه‌های آن توربین بادی، آرایه فتوولتائیک، باتری، و مبدل است. در ادامه اجزای یک سیستم ترکیبی معرفی می‌شوند.

۱. محاسبات با نرم‌افزار هومر (Homer) انجام شده است. نرم‌افزار هومر به عنوان شبیه‌ساز سیستم‌های سیکل ترکیبی و انرژی‌های نو مشهور است. این نرم‌افزار می‌تواند حالت‌های امکان‌پذیر بازاریابی سیستم‌های تولید را به‌ازای بارهای تعریف‌شده در سیستم ارائه دهد. در حالت کلی، نرم‌افزار هومر برای تحلیل ریزشکته‌های مستقل قدرت یا همان میکروگریدها کاربرد دارد.

توربین بادی

در این پژوهش از توربین بادی برند زیمنس^۱ و مدل AN BONUS 300 kW استفاده شده است. توان نامی این توربین ۳۰۰ کیلووات و جریان آن متناوب است. منحنی توان توربین بادی در سرعت بادهای متفاوت در **شکل (۴)** ارائه شده است. توربین‌های بادی در سرعت‌های بالاتر از حد مجاز یک حالت غیرعملیاتی به خود می‌گیرند و تولید برق را متوقف می‌کنند. این حالت عملیاتی برای جلوگیری از آسیب به سازه توربین بادی در سرعت‌های باد بالاتر از حد مجاز است. دلیل انتخاب توربین مذکور آن است که توربین‌های کوچک‌تر علاوه بر هزینه پایین‌تر، در سرعت‌های باد پایین‌تر نیز عملیاتی می‌شوند. این در حالی است که توربین‌های بادی بالاتر از ۱ مگاوات اولاً هزینه بالاتری دارند و ثانیاً در سرعت‌های باد پایین معمولاً خروجی ندارند (Nersesian, 2016).



شکل ۴: توان خروجی توربین بادی^۲

1. Siemens

۲. منظور از انرژی، تولید تجمعی نیروگاه است.

پانل خورشیدی

پانل خورشیدی سان پاور^۱ مدل E20 از بین پانل‌های خورشیدی با بهره‌وری و ظرفیت بالا انتخاب شد. آنچه که در انتخاب پانل خورشیدی مهم است، بهره‌وری پنل خورشیدی است. پنل خورشیدی انتخاب‌شده در میان برندها و همچنین مدل‌های مورد بررسی بیش‌ترین کارایی را دارد که اطلاعات فنی این پانل خورشیدی در **جدول (۷)** ارائه شده است.

جدول ۷: اطلاعات فنی پانل خورشیدی

داده‌ها	سان پاور E20
نوع	سلیکون مونوکریستال ^۱
ظرفیت	۴۳۵ وات
ولتاژ نامی	۷۲/۹ ولت
بهره‌وری	۲۰/۷ درصد
دمای نامی سلول	۴۵ درجه سانتیگراد
مساحت هر پانل	۲/۰۷ متر مربع

منبع: www.sunpower.com

باتری

در این پژوهش، به منظور ذخیره انرژی از باتری سورت^۲ مدل 6es25p با مشخصات، 9645 kwh و 1156 ah، و v6 استفاده شده است. لازم به اشاره است که باتری‌ها با توجه به ظرفیت، نوع باتری، و جنس باتری انتخاب می‌شوند. انتخاب نوع، جنس، و ظرفیت باتری با مهندسان برق است. در نتیجه، در این پژوهش انتخاب نوع باتری صرفاً با توجه به ظرفیت و هزینه انجام شده است.

1. Sunpower
1. Monocrystalline Silicon
2. Surrette

مبدل برق

مبدل در واقع تبدیل‌کننده برق از نوع مستقیم (DC)^۱ به برق متناوب (AC)^۲ یا بالعکس است. با توجه به این که مصرف از نوع جریان متناوب است، بنابراین برای برقراری ارتباط لازم بین مصرف AC و تولید DC به مبدل الکترونیک قدرت لازم است. برای این منظور از یک مبدل ۳۰۰ kw استفاده شده است. ظرفیت مبدل با توجه به ظرفیت پانل خورشیدی تعیین شده است، چرا که خروجی توربین بادی برق متناوب است و نیازی به استفاده از مبدل جداگانه ندارد.

ظرفیت سیستم ترکیبی

برای انجام شبیه‌سازی یک سیستم ترکیبی ابتدا باید چند سناریو از اندازه اجزا و سیستم ترکیبی برای نرم‌افزار تعریف کرد تا نرم‌افزار بتواند آرایش‌های مختلف را بررسی نماید. برای این منظور در جدول (۸) سناریوهای مختلف را برای پانل خورشیدی، توربین بادی، باتری، و مبدل توان ارائه شده است.

جدول ۸: فضای ترکیب‌های مختلف برای سیستم ترکیبی^۳

سناریو	پانل خورشیدی (کیلووات)	توربین بادی (تعداد)	باتری (تعداد)	مبدل (کیلووات)	توان سیستم ترکیبی (کیلووات)
۱	۱۲۰۰	۰	۱۷۷۵	۳۰۰	۱۲۰۰
۲	۹۰۰	۱	۱۱۷۵	۲۳۰	۱۲۰۰
۳	۶۰۰	۲	۱۱۷۵	۱۵۵	۱۲۰۰
۴	۳۰۰	۳	۱۱۷۵	۸۰	۱۲۰۰
۵	۰	۴	-	-	۱۲۰۰

لازم به اشاره است که محاسبات در دو بخش صورت گرفته است. ابتدا محاسبات بر اساس منطقه مورد بررسی انجام گرفته که شامل چندین روستا بوده و سپس این محاسبات بر اساس میانگین برای یک روستا در نظر گرفته شده است. در مورد انتخاب مبدل در سناریوهای مختلف، از آنجا که توربین بادی خروجی برق متناوب دارد، پس نیازی به مبدل نخواهد داشت. اما پانل خورشیدی با توجه به تولید برق متناوب نیاز به مبدل دارد که با توجه به تعداد و ظرفیت پانل‌ها تغییر می‌کند. این که نسبت هر مبدل به تعداد پانل چگونه انتخاب می‌شود در حیطه مهندسان برق است و در این پژوهش بر اساس پژوهش‌های پیشین در این زمینه در نظر گرفته شده است. همچنین، در مورد محاسبه تعداد باتری یکی از فرض‌های مهم در بحث استفاده از برق، جریان یکنواخت آن است. بنابراین، به نظر می‌رسد اگر تعداد باتری یکسان داشته باشیم، این امر امکان‌پذیر باشد.

1. Direct Current
2. Alternating Current

۳. طول عمر این تجهیزات ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

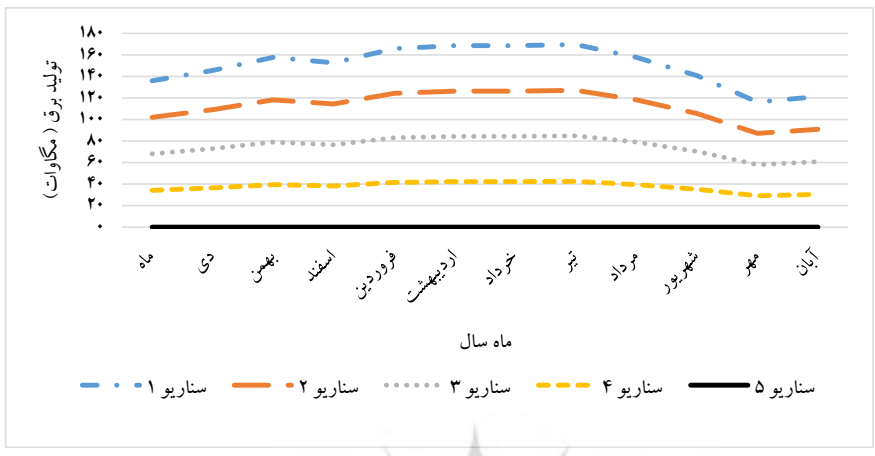
شبیه‌سازی نیروگاه

به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار RETScreen استفاده شده و با توجه به پارامترهای کلیدی فنی توربین بادی و پانل خورشیدی، خروجی هر سناریو محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی برای شهرستان اندیکا در **جدول (۹)** ارائه شده است. در این جدول، میزان تولید انرژی الکتریکی کل سیستم و همچنین سهم هر کدام از انرژی خورشیدی و بادی از کل تولید سیستم ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً مطرح شد، میزان برق مورد نیاز اندیکا سالیانه ۱۱۵۴ مگاوات است. پس خروجی نرم‌افزار نیز بر اساس تولید برق سالیانه در نظر گرفته شده است.

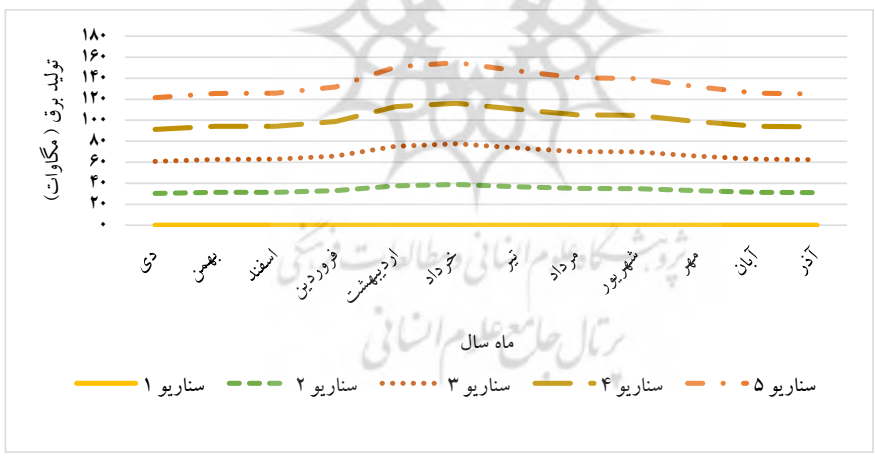
جدول ۹: میزان تولید انرژی الکتریکی سالیانه شهرستان اندیکا

سناریو	نیروگاه خورشیدی (مگاوات)		توربین بادی (مگاوات)		کل تولید برق سیستم (مگاوات)
	میزان تولید	سهم تولید (درصد)	میزان تولید	سهم تولید (درصد)	
۱	۱۹۱۵/۶۵	۱۰۰	-	-	۱۹۱۵/۶۵
۲	۱۴۳۶/۵۶	۷۵	۴۶۶/۵۷	۲۵	۱۹۰۳/۱۳
۳	۹۵۸/۱۷	۵۱	۹۳۳/۱۵	۴۹	۱۸۹۱/۳۲
۴	۴۷۹/۰۸	۲۵	۱۳۹۹/۷۳	۷۵	۱۸۷۸/۸۱
۵	-	-	۱۸۶۶/۳۱	۱۰۰	۱۸۶۶/۳۱

برای شهرستان اندیکا به منظور مقایسه بهتر بین سناریوها، سهم هر کدام از انرژی‌ها در کل تولید سیستم ترکیبی برای هر ماه در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است.



شکل ۵: میزان تولید سناریوهای مختلف در نیروگاه خورشیدی شهرستان اندیکا



شکل ۶: میزان تولید سناریوهای مختلف در توربین بادی شهرستان اندیکا

محاسبه هزینه

هزینه خط انتقال گاز

با توجه به فرمول‌های (۹)، (۱۰)، و (۱۱) می‌توان هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی را محاسبه نمود. در جدول (۱۰) هزینه انتقال گاز به‌طور متوسط برای یک روستا در شهرستان اندیکا ارائه شده است.

جدول ۱۰: هزینه انتقال گاز (میلیون دلار)^۱

شهرستان	شهرستان اندیکا
آمار	
هزینه لوله‌گذاری مورد نیاز	۷۶۰/۰۷۱
هزینه ایستگاه تقلیل فشار گاز مورد نیاز	۲۷۰
جمع هزینه سرمایه‌ای انتقال گاز	۱۰۳۰/۰۷۱
هزینه عملیاتی انتقال گاز	۳۶/۰۵۲
متوسط هزینه سرمایه‌ای برای هر روستا	۸/۸۳۸
متوسط هزینه عملیاتی برای هر روستا	۰/۴۱۹

منبع: شرکت ملی گاز ایران

متوسط هزینه‌ای سرمایه‌ای و عملیاتی برای هر روستا از تقسیم جمع هزینه‌ای سرمایه‌ای و عملیاتی انتقال گاز به تعداد روستای شهرستان اندیکا محاسبه شده است.

هزینه نیروگاه ترکیبی

به منظور محاسبه هزینه سیستم ترکیبی تجدیدپذیر ابتدا لازم است برخی پارامترهای کلیدی مالی مانند هزینه ظرفیت تعیین شود. برای این منظور از داده‌های جدول (۱۱) استفاده شده است (صادقی و بهروزه، ۱۳۹۹).

۱. برای محاسبات هزینه انتقال می‌توان از صادقی و همکاران (۲۰۱۷) استفاده کرد که در این پژوهش نیز از این روش استفاده شده است.

جدول ۱۱: هزینه سیستم ترکیبی تجدیدپذیر (دلار در هر کیلووات ساعت)

نیروگاه خورشیدی		توربین بادی		مبدل برق		باتری	
ظرفیت عملیاتی	ظرفیت	ظرفیت عملیاتی	ظرفیت	ظرفیت عملیاتی	ظرفیت	ظرفیت عملیاتی	ظرفیت
۲۴	۲۳۶۰	۲۰	۴۰۰	۵۰۰	۵۰	۶	۲۰

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی^۱

همان‌طور که در **جدول (۱۱)** مشاهده می‌شود، در نیروگاه خورشیدی هزینه ظرفیت بیش‌تر از نیروگاه بادی است و این در حالی است که هزینه عملیاتی نیروگاه بادی بیش‌تر از نیروگاه خورشیدی است. پس با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در **جدول (۱۱)** و همچنین ظرفیت‌های هر سناریو **جدول (۸)** می‌توان هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی را برای هر سناریو محاسبه نمود که نتایج مربوط به محاسبه هزینه هر سناریو در **جدول (۱۲)** برحسب میلیون دلار ارائه شده است.

جدول ۱۲: هزینه سیستم ترکیبی تجدیدپذیر (میلیون دلار)

شهرستان	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
هزینه سرمایه‌ای نیروگاه بادی	-	۰/۶۰۶	۱/۲۱۲	۱/۸۱۸	۲/۴۲۴
هزینه سرمایه‌ای نیروگاه خورشیدی	۲/۸۳۲	۲/۱۲۴	۱/۴۱۶	۰/۰۷۰	-
هزینه سرمایه‌ای مبدل	۰/۱۲	۰/۰۹۲	۰/۰۶۲	۰/۰۳۲	-
هزینه سرمایه‌ای باتری	۰/۸۸	۰/۰۶۸	۰/۴۵۷	۰/۲۳۵	-
جمع کل هزینه سرمایه‌ای	۳/۸۳۹	۳/۵۰۲	۳/۱۴۷	۲/۷۹۳	۲/۴۲۴
هزینه عملیاتی نیروگاه بادی	-	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۰/۰۶
هزینه عملیاتی نیروگاه خورشیدی	۰/۰۲۸	۰/۰۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	-
هزینه عملیاتی مبدل	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	-
هزینه عملیاتی باتری	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	-
جمع کل هزینه عملیاتی	۰/۰۴۵	۰/۰۴۹	۰/۰۵۲	۰/۰۵۶	۰/۰۶

هزینه سرمایه‌ای = هزینه ظرفیت برای هر کیلووات × ظرفیت تولید پانل خورشیدی به کیلووات

1. <https://www.iea.org>

محاسبه درآمد

درآمد نیروگاه ترکیبی

با توجه به داشتن میزان تولید برق سالیانه ارائه شده در **جدول (۹)** و همچنین قیمت برق (۱۰۰ دلار برای هر مگاوات) می توان درآمد حاصل از فروش برق را محاسبه نمود که نتایج آن برای هر سناریو در **جدول (۱۳)** ارائه شده است.

جدول ۱۳: محاسبه درآمد حاصل از فروش برق (دلار)

سناریو	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
درآمد	۱۹۱۵۶۵	۱۹۰۳۱۳	۱۸۹۱۳۲	۱۸۷۸۸۱	۱۸۶۶۳۱

درآمد فروش گاز

همچنین، با توجه به میزان متوسط مصرف گاز برای یک روستا که در **جدول (۲)** ارائه شده است، و همچنین قیمت گاز (۰/۱۳۷ دلار برای هر متر مکعب) می توان میزان درآمد سالیانه حاصل از فروش گاز را برای هر شهرستان محاسبه نمود که نتایج آن در **جدول (۱۴)** ارائه شده است.

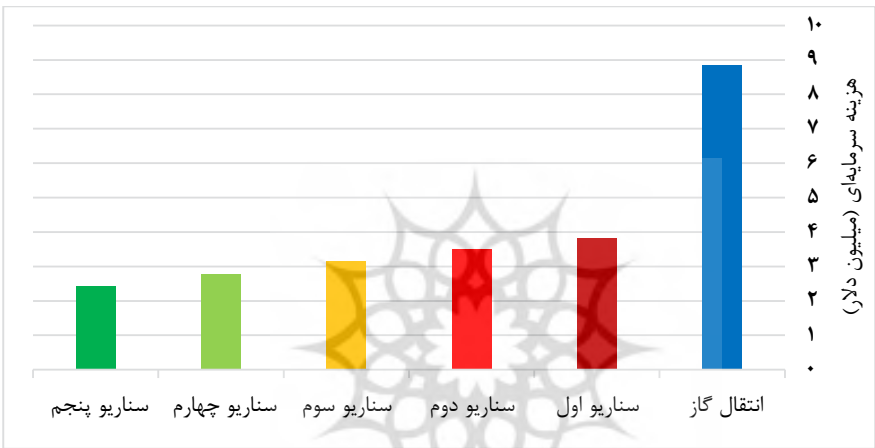
جدول ۱۴: محاسبه درآمد حاصل از فروش گاز (دلار)

سناریو	شهرستان ایذه	شهرستان اندیکا	شهرستان هفتکل
درآمد فروش گاز	۱۶۸۵۹/۲۶	۱۴۱۳۶/۶۶	۱۵۴۵۰/۶۵

مقایسه خط انتقال گاز و نیروگاه ترکیبی

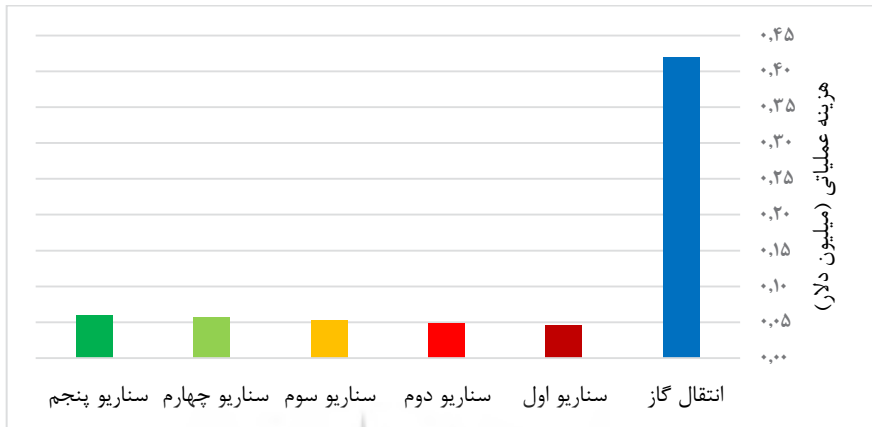
مقایسه هزینه

در شکل (۷)، هزینه سرمایه‌ای انتقال گاز با سناریوهای مختلف نیروگاه ترکیبی ارائه شده است.



شکل ۷: مقایسه هزینه سرمایه‌ای انتقال گاز و نیروگاه ترکیبی شهرستان اندیکا

همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک اختلاف بیش از دوبرابری بین هزینه سرمایه‌ای انتقال گاز و هزینه سرمایه‌ای نیروگاه ترکیبی وجود دارد. در شکل (۸)، نیز مقایسه‌ای بین هزینه عملیاتی انتقال گاز و هزینه عملیاتی نیروگاه ترکیبی ارائه شده است.

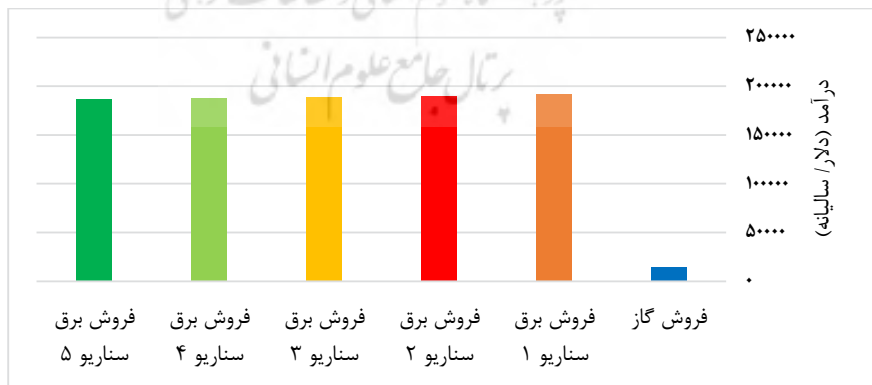


شکل ۸: مقایسه هزینه عملیاتی انتقال گاز و نیروگاه ترکیبی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هزینه عملیاتی یک نیروگاه ترکیبی بسیار پایین‌تر از هزینه خط انتقال گاز است.

مقایسه درآمد

در شکل (۹)، مقایسه‌ای بین درآمد حاصل از فروش برق و همچنین درآمد حاصل از فروش گاز ارائه شده است.

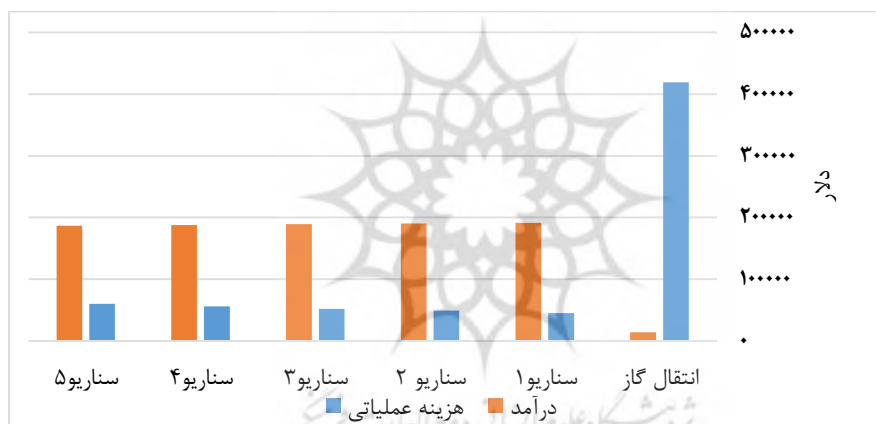


شکل ۹: مقایسه درآمد فروش گاز و فروش برق

همان‌طور که **شکل (۹)** نشان می‌دهد، با توجه به مقدار متوسط گاز مصرفی در نظر گرفته‌شده، درآمد حاصل از فروش این مقدار گاز بسیار کمتر از درآمد فروش برق به همان اندازه است. این امر به دو علت اتفاق می‌افتد: اول اختلاف قیمت بین گاز و برق که پایین بودن قیمت گاز نسبت به برق است، و دوم مقدار بالاتر مصرف برق به‌جای همان مقدار گاز است.

مقایسه درآمد و هزینه

در ادامه، مقایسه‌ای بین درآمد سالیانه حاصل از فروش گاز و برق با هزینه عملیاتی سالیانه ارائه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه درآمد فروش و هزینه عملیاتی در شهرستان اندیکا

مقایسه درآمد حاصل از فروش برق و گاز با هزینه عملیاتی (**شکل ۱۰**) نشان می‌دهد، در این شهرستان درآمد سالیانه حاصل از فروش گاز، هزینه عملیاتی سالیانه آن را پوشش نمی‌دهد. این در حالی است که به‌طور متوسط درآمد سالیانه حاصل از فروش برق بیش از سه‌برابر هزینه عملیاتی سالیانه هر نیروگاه است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، مقایسه اقتصادی و فنی تأمین انرژی از نیروگاه ترکیبی خورشیدی-بادی

به جای احداث خط انتقال گاز طبیعی در شهرستان اندیکا است. در این پژوهش، یک مقایسه هزینه - درآمدی بین خط انتقال گاز و نیروگاه ترکیبی انجام گرفت. ابتدا ظرفیت بالقوه منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج ظرفیت سنجی نشان می دهد، شهرستان اندیکا به لحاظ ظرفیت بالقوه باد، با توجه به میانگین سرعت باد سالیانه، بستر مناسبی دارد. بررسی ساعات سرعت باد نیز نشان می دهد، افزایش و کاهش سرعت باد به لحاظ ساعت روزانه این گونه است که از ساعت ۶ صبح سرعت باد افزایش و حوالی ساعت ۱۲ ظهر به حداکثر می رسد و بعد از آن یک روند نزولی را در پیش می گیرد. این در حالی است که بیشترین مصرف گاز هم مربوط به ساعت استفاده از اجاق گاز برای تهیه غذا و مترادف با همین ساعات اوج سرعت باد است. نتایج ظرفیت سنجی انرژی خورشیدی نیز نشان از بستر مناسب این منطقه دارد، اما آنچه که در خروجی یک آرایه خورشیدی تفاوت ایجاد می نماید، تفاوت آب و هوایی و کیفیت صافی هواست.

همان طور که در **جدول (۸)** ارائه شد، در سناریوسازی دو میحث مورد توجه قرار گرفت. ابتدا این که توان اسمی کل سیستم ترکیبی در هر سناریو به طور مساوی و معادل ۱۲۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده تا مقایسه بهتری انجام گیرد. دوم این که سناریو به نحوی چیده شده است که از حالت تماماً خورشیدی و بادی تا مساوی بین خورشیدی و بادی با هم متفاوت باشند. این امر باعث می شود که بهترین ترکیب برای منطقه راحت تر محاسبه شود. بنابراین، می توان گفت از مزیت های سیستم های ترکیبی این است که می توان با توجه به ظرفیت بالقوه هر منطقه ظرفیت هر کدام از فناوری ها را تغییر داد تا به بهترین حالت دست یافت و بیشترین خروجی را داشت.

نتایج شبیه سازی در **جدول (۹)** نشان می دهد که خروجی توربین بادی و خورشیدی بسیار نزدیک به هم هستند، به طوری که با ۵۰ درصد از هر نوع فناوری سهم آن ها از تولید برق سیستم ترکیبی نزدیک به هم و به ترتیب ۵۱ و ۴۹ درصد برای نیروگاه خورشیدی و توربین بادی است. پس می توان در این منطقه به طور مساوی از هر دو نوع فناوری استفاده نمود، هر چند با افزایش سهم توربین بادی، خروجی کل کاهش پیدا کرده است.

محاسبه هزینه ها نشان می دهد که در هزینه انتقال گاز، علاوه بر مترائز لوله گذاری، عواملی همچون تعداد روستا، تعداد ایستگاه تقلیل فشار، و فاصله بین روستاها نیز تاثیر گذار است. هر چه تعداد روستا بیش تر باشد، تعداد ایستگاه تقلیل فشار نیز بیش تر می شود. پس علاوه بر هزینه سرمایه ای، هزینه عملیاتی نیز افزایش پیدا می کند. این در حالی است که اگر فاصله بین روستاها افزایش پیدا کند، تنها هزینه سرمایه ای افزایش پیدا خواهد کرد.

در سیستم ترکیبی نیز، محاسبه هزینه سیستم ترکیبی در جدول (۱۲) نشان می‌دهد، هزینه سرمایه‌ای با افزایش تعداد توربین بادی کاهش، اما هزینه عملیاتی آن افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که با افزایش ظرفیت آرایه خورشیدی، هزینه سرمایه افزایش و هزینه عملیاتی کاهش پیدا می‌کند. البته این نکته را باید مورد توجه قرار داد که افزایش ظرفیت توربین بادی سبب کاهش تولید انرژی می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میزان تولید انرژی الکتریکی با هزینه سرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی رابطه مستقیم دارد.

با وجود هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی بالا برای انتقال گاز - با توجه به قیمت هر متر مکعب گاز - درآمد حاصل از فروش گاز در برابر درآمد فروش برق بسیار ناچیز است. به‌طور کلی، باید گفت هزینه سرمایه بالای انتقال گاز با توجه به درآمد سالیانه حاصل از فروش آن، اقتصادی بودن آن را رد می‌کند و این در حالی است که نیروگاه ترکیبی با توجه به هزینه سرمایه‌ای پایین‌تر نسبت به انتقال گاز، درآمد بیشتری نسبت به فروش گاز دارد، پس به لحاظ اقتصادی از انتقال گاز توجیح‌پذیرتر است. در حالی که درآمد سالیانه حاصل از فروش گاز، هزینه عملیاتی سالیانه انتقال گاز را پوشش نمی‌دهد، اما درآمد سالیانه حاصل از فروش برق حاصل از نیروگاه ترکیبی، هزینه عملیاتی سالیانه نیروگاه را پوشش می‌دهد. به‌طور کلی، می‌توان گفت که انتقال گاز هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی بسیار بالاتری نسبت به نیروگاه ترکیبی دارد، و این در حالی است که درآمد حاصل از فروش گاز - با توجه به پایین بودن قیمت گاز - بسیار کم‌تر از نیروگاه ترکیبی است که هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی کم‌تر و درآمد حاصل از فروش برق بیشتری دارد.

پیشنهاد می‌شود که یارانه‌های سوخت‌های فسیلی و الکتربسیسته به تدریج کاهش یابند تا به قیمت‌های بازار برسند. همان‌طور که نتایج پژوهش نشان می‌دهد، قیمت پایین گاز سبب می‌شود که درآمد پایین‌تری نسبت به همان مقدار برق حاصل گردد. برای جلوگیری از اثرات اجتماعی منفی قیمت‌های بالای انرژی، پرداخت مستقیمی به خانوارهای کم‌درآمد به عنوان نوعی گرامت انجام گیرد. مدل‌های مشابه پرداخت گرامت در کشورهای دیگر نظیر سوییس اجرا می‌شوند. اولین اثر مهم افزایش قیمت انرژی، بالا رفتن هزینه زندگی برای هر خانوار است. برای جلوگیری از واکنش منفی به کاهش یارانه‌ها، اجرای برنامه‌های موثر آگاه‌سازی عمومی ضروری است. اگر خانوارها و کارگران از سازوکار پرداخت گرامت و هدف کلی این طرح، یعنی بهبود درازمدت نرخ رشد اقتصادی و افزایش درآمدها آگاه باشند، پذیرش این فرایند توسط آن‌ها بهتر انجام می‌پذیرد.

تا زمانی که سوددهی سرمایه‌گذاری در تاسیسات خورشیدی قوام نیافته است، دولت ایران باید

حمایت مالی خود را به سرمایه‌گذارانی که می‌خواهند تاسیسات انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی راه‌اندازی کنند، ادامه دهد. جدا از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، دولت ایران باید در توسعه انرژی خورشیدی از طریق ایجاد یک آژانس تخصصی یا شرکت‌های پیمانکار سرمایه‌گذاری کند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بخش دولت به‌جای سرمایه‌گذاری بسیار بالا در خط‌گاز، می‌تواند با هزینه بسیار کم‌تری از انرژی خورشیدی و بادی استفاده کند. البته این مراکز باید فعالیت خود را بر تاسیسات پرمصرف عمومی متمرکز نمایند، اما می‌توانند به ساختمان‌های مسکونی نیز توجه داشته باشند.

اگر شرایط بازار برای انرژی خورشیدی طبق پیشنهادهای فوق اجرا گردد، انرژی خورشیدی می‌تواند فرصت‌های شغلی در بخش خدمات عمومی به‌وجود آورد. از آن‌جا که شرکت برق، به صورت خرید تضمینی، برق اضافه تولیدی را خریداری می‌نماید، این امر می‌تواند سبب ایجاد درآمد برای هر کدام از خانوارها یا حتی کل یک روستا شود.

بکارگیری انرژی تجدیدپذیر (نیروگاه بادی و خورشیدی) در تامین انرژی مصرفی منازل و مراکز صنعتی، یکی از کاربردی‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدشونده در جهان امروزی است و به همین دلیل بیش‌تر کشورهای پیشرفته و در حال توسعه به دنبال سرمایه‌گذاری کلان در این راستا هستند. تجهیزات ساده و ارزان‌قیمت، عدم نیاز چندان به تعمیر و نگهداری، بهره‌وری بالا و امکان تولید و نصب سریع و آسان، و همچنین امکان بهره‌برداری عموم جوامع از این سیستم دلایل محکمی در بکارگیری این طرح هستند. همچنین، از آن‌جا که برخی از روستاها هنوز از برق متصل به شبکه برخوردار نیستند، می‌توان از نیروگاه ترکیبی برای تامین برق مورد نیاز آن‌ها با توجه به میزان مصرفی هر روستا در طول شبانه‌روز استفاده کرد یا به بررسی امکان استفاده از این نوع نیروگاه به‌جای شبکه انتقال برق پرداخت.

منابع

الف) انگلیسی

Ahmad, J., Imran, M., Khalid, A., Iqbal, W., Ashraf, S. R., Adnan, M.,... Khokhar, K. S. (2018). Techno Economic Analysis of a Wind-Photovoltaic-Biomass Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification: A Case Study of Kallar Kahar. *Energy*, 148(1), 208-234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.133>

BP Statistical Review of World Energy (2019). Available at:

- <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html>
- Buonomano, A., Calise, F., d'Accadia, M. D., & Vicidomini, M. (2018). A Hybrid Renewable System Based on Wind and Solar Energy Coupled With an Electrical Storage: Dynamic Simulation and Economic Assessment. *Energy*, 155, 174-189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.006>
- Byrom, S. (2019). *How to Convert Gas Units to KWH*. Available at: <https://www.theenergyshop.com/guides/how-to-convert-gas-units-to-kwh>
- Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. (2020). Optimal Site Selection for Solar Photovoltaic (PV) Power Plants Using GIS and AHP: A Case Study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149(1), 565-576. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- Elmohlawy, A. E., Ochkov, V. F., & Kazandzhan, B. I. (2019). Thermal Performance Analysis of a Concentrated Solar Power System (CSP) Integrated with Natural Gas Combined Cycle (NGCC) Power Plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14(1), 100458. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100458>
- Khaleghian, M., Danekar, A., Khorasani, N., Jozi, S. A., Feghhi, J., & Navabi, G. S. (2012). Environmental Risk Assessment of Gas Pipeline with Method of Muhlbauer (Case Study: Lorestan Province). *Journal of Natural Environment*, 65(3), 353-365. <https://dx.doi.org/10.22059/jne.2012.29789>
- Maji, I. K. (2015). Does Clean Energy Contribute to Economic Growth? Evidence from Nigeria. *Energy Reports*, 1(1), 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.06.001>
- Nersesian, R. L. (2016). *Energy Economics: Markets, History and Policy*: Routledge.
- Ramli, M. A., Hiendro, A., & Al-Turki, Y. A. (2016). Techno-Economic Energy Analysis of Wind/Solar Hybrid System: Case Study for Western Coastal Area of Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 91(1), 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.071>
- Richardson, D. B. (2013). Electric Vehicles and the Electric Grid: A Review of Modeling Approaches, Impacts, and Renewable Energy Integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19(1), 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>
- Sadeghi, Z., Horry, H. R., & Khazaei, S. (2017). An Economic Evaluation of Iranian Natural Gas Export to Europe through Proposed Pipelines. *Energy Strategy Reviews*, 18(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.09.013>
- Taklif, A. (2013). The Feasibility of Competition or Cooperation amongst GECF Member Countries in Exporting Natural Gas via Pipeline. *Iranian Energy Economics*, 2(5), 49-79. http://jjee.atu.ac.ir/article_773.html
- Ulvestad, M., & Overland, I. (2012). Natural Gas and CO2 Price Variation: Impact on the Relative Cost-Efficiency of LNG and Pipelines. *International Journal of Environmental Studies*, 69(3), 407-426. <https://doi.org/10.1080/00207233.2012.677581>
- Wang, W.-C., Wang, J.-J., & Chong, W. T. (2019). The Effects of Unsteady Wind on the Performances of a Newly Developed Cross-Axis Wind Turbine: A Wind Tunnel Study. *Renewable Energy*, 131(1), 644-659. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.061>

- اسماعیل نیا، علی اصغر، و زاهدی سرشت، مریم (۱۳۸۸). بهینه‌یابی انتقال گاز و برق (هم‌افزایی گاز و برق). نشریه *مطالعات اقتصاد انرژی*، ۴(۱۵)، ۷۵-۵۵.
- خزاعی، صادق (۱۳۹۴). *امکان‌سنجی اقتصادی انتقال گاز طبیعی ایران به اروپا از طریق خطوط لوله پیشنهادی در شرایط ریسکی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- خسروانی تهرانی، مهیار (۱۳۹۲). *ارزیابی اقتصادی نیروگاه فسیلی در مقایسه با نیروگاه خورشیدی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی تهران.
- صادقی، زین‌العابدین، و بهروزه، علی (۱۳۹۹). *ارزیابی فنی اقتصادی نیروگاه تجدیدپذیر و فسیلی با استفاده از نرم‌افزار RETScreen expert*. انتشارات دادکین.
- عباسی، مریم، و امینی‌فرد، عباس (۱۳۹۷). برآورد اثر بازگشتی مستقیم بهبود کارایی مصرف گاز در بخش خانگی ایران. *نشریه اقتصاد کاربردی*، ۸(۲۶)، ۷۲-۶۲. http://jae.srbiau.ac.ir/article_13767.html

