

Technical and Economic Feasibility of Achieving the Various Net-zero Energy Targets in a Bioethanol Production Plant

MOHAMMAD MAHDI AHMADI¹, MORTAZA AGHBASHLO^{1*}, ALIREZA KEYHANI¹, MEISAM TABATABAEI²

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Microbial Biotechnology Department, Agricultural Biotechnology Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(Received: Jan. 9, 2021- Revised: Apr. 19, 2021- Accepted: May 8, 2021)

ABSTRACT

In this study, the feasibility of achieving the net-zero energy (NZE) target has been studied in a bioethanol production complex (Zist Faravarde Sepahan) based on different NZE definitions, including net-zero site energy, net-zero source energy, net-zero energy cost, net-zero energy emission, and net-zero exergy. In the technical investigations, the energy required for each approach has been determined, and then the corresponding photovoltaic power plant has been simulated in photovoltaic systems software (PVsyst) and transient systems simulation program (TRNSYS) by considering the generated and consumed energy. Afterward, the annual cumulative data of generation, consumption, export, and delivery energies of the complex have been extracted in the transient hourly conditions. The load matching, self-consumption, and electricity self-sufficiency indices were determined and compared in different approaches based on the hourly data. In the next step, β factor that is a fraction of the net present value (NPV) definition has been studied for the economic evaluation of the approaches in three pricing strategies: a) Buy all sell all (BASA), b) Net energy measurement (NEM) and c) Net billing (NB). Based on the technical evaluation, the net-zero energy cost approach is the most appropriate option to achieve the NZE target in the complex. Considering economic considerations, the net-zero energy cost in the BASA pricing strategy with a nominal power of 1.2 MW_P and a self-consumption index of 84.2% has the best results in both technical and economic investigations. β factor and NPV indices are 1.97 and \$ 1,579,512 in this approach, respectively. The profitability phase (NPV = 0) will start after 10.1 years operation of the system.

Keywords: Net-zero energy factory, Exergy, Photovoltaic, Bioethanol, Emission, Net present value

* Corresponding Author's Email: maghbashlo@ut.ac.ir

امکان‌سنجی فنی و اقتصادی دستیابی به اهداف مختلف انرژی خالص صفر در کارخانه تولید بیواتانول

محمد مهدی احمدی^۱، مرتضی آغاباشلو^{۱*}، علیرضا کیهانی^۱، میثم طباطبایی^۲

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. بخش بیوتکنولوژی میکروبی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، امکان‌سنجی دستیابی به هدف انرژی خالص صفر (NZE) بر اساس تعاریف مختلف، شامل سایت انرژی خالص صفر، انرژی اولیه خالص صفر، هزینه انرژی خالص صفر، آلاینده‌گی انرژی خالص صفر و اکسرژی خالص صفر در کارخانه تولید بیواتانول زیست فرآورده سپاهان مورد مطالعه قرار گرفت. در بررسی‌های فنی ضمن تعیین مقادیر انرژی مورد نیاز در هر رویکرد، مدل‌سازی تولید برق در نیروگاه فتوولتائیک متناظر بر اساس میزان تولید و مصرف انرژی کارخانه در نرم‌افزار سامانه‌های فتوولتائیک (PVsyst) و برنامه شبیه‌سازی سیستم‌های گذرا (TRNSYS) انجام شد و داده‌های تولید، مصرف، صادرات و تحویل انرژی سالیانه در هر رویکرد در شرایط لحظه‌ای و در مقیاس ساعت استخراج گردید. با استفاده از داده‌های به دست آمده، رویکردهای مختلف بر اساس شاخص‌های مطابقت بار، خودمصرفی و خودکفایی برق مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. سپس به منظور ارزیابی اقتصادی رویکردهای مذکور، شاخص اقتصادی β بر اساس تعریف ارزش خالص فعلی (NPV) در سه استراتژی قیمت‌گذاری الف) فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، ب) اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و ج) صورت‌حساب خالص (NB) تعیین گردید. بر اساس ارزیابی‌های فنی، رویکرد هزینه انرژی خالص صفر، مناسب‌ترین گزینه برای رسیدن به هدف NZE در این کارخانه بود. همچنین با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، رویکرد هزینه انرژی خالص صفر در استراتژی قیمت‌گذاری BASA با توان اسمی ۱/۲ مگاوات و شاخص خودمصرفی ۸۴/۲ درصد بهترین نتایج را در هر دو ارزیابی فنی و اقتصادی داشت. شاخص‌های β و NPV در این رویکرد به ترتیب مقادیر ۱/۹۷ و ۱،۵۷۹،۵۱۲ دلار را داشتند و سرمایه‌گذاری در این سامانه پس از ۱۰/۱ سال از شروع فعالیت وارد مرحله سودآوری ($NPV=0$) شد.

واژه‌های کلیدی: کارخانه انرژی خالص صفر، اکسرژی، فتوولتائیک، بیواتانول، آلاینده‌گی، ارزش خالص فعلی

مقدمه

در دهه‌های گذشته انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی به یک مشکل جهانی تبدیل شده است. بر این اساس، کاهش سطح گازهای گلخانه‌ای در دستور کار بسیاری از کشورها قرار گرفت؛ که از مهم‌ترین ارکان آن کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. در این زمینه استراتژی‌های مختلفی معرفی گردید که یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین استراتژی‌های ارائه شده، مفهوم انرژی خالص صفر^۱ (NZE) است. این مفهوم در ابتدا به منظور سامان‌دهی انرژی در بخش ساختمان که عامل انتشار ۴۰

درصد از گازهای گلخانه‌ای در جهان می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت (Rhodes, 2016). در گام دوم تعاریف و کاربردهای NZE با انتشار شیوه‌نامه‌هایی در سطوح جامعه و منطقه توسعه داده شد (Carlisle et al., 2009). هدف اصلی از تعریف مفهوم انرژی خالص صفر، کاهش نیازهای انرژی با استفاده از سطوح بالای بهره‌وری انرژی و تامین نیازهای انرژی محدود شده با استفاده از سامانه‌های تجدیدپذیر نصب شده در محل می‌باشد. البته در این فرآیند، مقدار انرژی به صورت خالص و در طول زمان معینی که معمولاً یک سال است در نظر گرفته می‌شود و در طول این مدت، مجموعه می‌تواند مازاد انرژی تولید شده‌ی خود را به شبکه سراسری صادر نموده و کمبود نیازهای انرژی خود را از شبکه

* نویسنده مسئول: maghbashlo@ut.ac.ir

همچنین گلخانه‌های انرژی خالص صفر به انجام رسیده است (Dice, 2017; Vourdoubas, 2020). از طرف دیگر بخش صنعت نیز با سهم حدود ۳۶ درصد از کل تولید انرژی جهانی در سال ۲۰۱۷، عامل ۲۴ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن در جهان می‌باشد (Chowdhury et al., 2019). بنابراین این بخش هم از جمله ساختارهایی است که می‌بایست در راستای کاهش آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای به صورت جدی به آن پرداخته شود. در این خصوص اتحادیه اروپا اقداماتی را در چند سال اخیر با هدف سبزتر کردن شرکت‌های کوچک و متوسط اروپایی انجام داده است و از انواع اقدامات مختلف دوست‌دار محیط زیست مانند صرفه‌جویی در مصرف آب، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به حداقل رساندن ضایعات و غیره حمایت می‌نماید (Lombardi et al., 2019). این روند به گونه‌ای است که در سال ۲۰۱۵ در حدود ۱۱ درصد از شرکت‌های متوسط و کوچک اروپایی از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبع انرژی غالب خود استفاده کردند که اغلب آن‌ها با توجه به فضای مناسب به سامانه‌های فتوولتائیک مجهز بودند (Commission, 2015). در پژوهشی تاثیر نصب صفحه‌های خورشیدی در کارخانه‌ها بر کاهش آلاینده‌ها در سطح جهان مورد بررسی قرار گرفت و عنوان گردید که به کارگیری یک مدل بهینه از ترکیب صفحه‌های حرارتی و فتوولتائیک در کارخانه‌های صنعتی می‌تواند میزان آلاینده‌های سالیانه را به میزان ۵۴۷/۹ کیلو تن کربن دی‌اکسید معادل کاهش دهد (Mousa & Taylor, 2020). همچنین با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه NZE، هدف کارخانه انرژی خالص صفر^۴ (NZEF) نیز در مطالعات مختلف مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. در این شرایط، از آنجا که از یک طرف عمده مصارف انرژی صنایع را برق تشکیل می‌دهد و از طرف دیگر در کارخانه‌های صنعتی امکان نصب سامانه فتوولتائیک و تبادل و صادرات برق به شبکه سراسری وجود دارد، لذا در این مطالعات تمرکز اکثر محققان بر تولید برق تجدیدپذیر از سامانه فتوولتائیک می‌باشد. در این راستا یک مطالعه‌ی مروری بر چند کارخانه انرژی خالص صفر و سامانه‌های مستقر شده در آن انجام گرفت. سپس پژوهشگران با استفاده از سامانه فتوولتائیک، روشی را برای بررسی فرآیندهای صنعتی در کارخانه‌های انرژی خالص صفر ارائه نمودند و این کارخانه‌ها را به لحاظ توجیه اقتصادی بررسی کردند (Seryak et al., 2011). همچنین در تحقیقات دیگری با استفاده از مفهوم NZEF میزان انعطاف‌پذیری و هماهنگی تولید انرژی در فرآیندهای تولیدی در یک کارخانه تولید شمش فولاد مورد

تحويل گیرد (Torcellini et al., 2006). مفهوم NZE به صورت کلی در چهار رویکرد سایت انرژی خالص صفر^۱ (NZSIE)، انرژی اولیه‌ی خالص صفر^۲ (NZSOE)، هزینه انرژی خالص صفر^۳ (NZEC) و آلاینده‌های انرژی خالص صفر^۴ (NZEE) در مجموعه ساختمان ارائه شده است. در این شرایط انتخاب رویکرد نهایی در یک پروژه انرژی خالص صفر به امکانات و اهداف پروژه، اهداف سرمایه‌گذار، نگرانی‌ها در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های انرژی وابسته است (Pless & Torcellini, 2010). از آنجا که مفاهیم فوق تنها کمیت انرژی را در نظر می‌گرفتند، لذا در گام بعدی و برای رفع این نقص، مفهوم اکسرژی خالص صفر^۵ (NZEX) که هر دو بخش کمیت و کیفیت انرژی را شامل می‌شود نیز ارائه گردید (Kilkis, 2007).

مفهوم انرژی خالص صفر به سرعت به موضوعی مورد علاقه در سطح جهانی تبدیل شد، به گونه‌ای که در شیوه‌نامه عملکرد انرژی ساختمان در کشورهای عضو اتحادیه‌ی اروپا، برنامه‌ریزی گردید که از ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸، ساختمان‌های جدید متعلق به نهادهای عمومی و از ۳۱ دسامبر ۲۰۲۰ تمام ساختمان‌های جدید می‌بایست به صورت ساختمان انرژی خالص صفر (و یا نزدیک به آن) باشند (European Commission, 2010). قوانین تقریباً مشابهی در خصوص ساختمان‌های انرژی خالص صفر در کشورهای آمریکا، استرالیا، ژاپن و کره جنوبی نیز وضع شد و کشورهای مختلف با شتاب زیادی در حال حرکت به سمت رویکرد NZE در محیط‌های مسکونی هستند (Zhang et al., 2016). در ایران نیز اولین ساختمان انرژی خالص صفر در محل پژوهشگاه مواد و انرژی در شهرستان کرج با دیدگاه کاهش مصارف انرژی اولیه و تامین انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر و پاک طراحی گردید و در سال ۱۳۹۳ با زیربنای ۲۰۰۰ متر مربع در دو طبقه و با کاربری آموزشی-پژوهشی به بهره‌برداری رسید. همچنین در یک پژوهش کاربردی با هدف کاهش نیاز انرژی ساختمان، یک مجتمع اداری در شهر جدید هشتگرد با قابلیت تبدیل شدن به ساختمان انرژی خالص صفر بر اساس روش "بهره‌وری انرژی با معماری انرژی کارا" طراحی گردید (Nasrollahi, 2013). در مطالعه دیگری، دستیابی به هدف انرژی خالص صفر با استفاده از سامانه فتوولتائیک در یک ساختمان تجاری واقع در شهر اهواز به لحاظ فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفت (Musavi Sadat et al., 2018). در سال‌های اخیر، رویکردهای انرژی خالص صفر در بخش کشاورزی نیز مورد توجه قرار گرفته است و در این خصوص مطالعاتی درباره‌ی سامانه‌های دامداری، کشاورزی و

4 Net-zero energy emission

5 Net-zero exergy

6 Net-zero energy factory

1 Net-zero site energy

2 Net-zero source energy

3 Net-zero energy cost

یکی از صنایع پرمصرف انرژی در حوزه بیوسیستم کشور از منظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. روند مطالعه انجام گرفته بدین صورت است که در قسمت دوم مقاله در ابتدا کارخانه تولید بیواتانول معرفی شده و سپس روابط و تعاریف رویکردهای مختلف NZE تبیین می‌گردد. در ادامه این قسمت چگونگی مدل‌سازی کارخانه با هدف دستیابی به NZEF با استفاده از سامانه فتوولتائیک بیان شده و پس از آن روابط و شاخص‌های مورد نیاز در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی ارائه می‌گردد. در قسمت سوم مقاله ضمن ارائه نتایج ارزیابی‌های فنی و اقتصادی در رویکردهای مختلف، امکان به کارگیری آن‌ها برای رسیدن به هدف مذکور در این کارخانه مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نیز یافته‌های اصلی پژوهش جمع‌بندی شده و بهترین رویکرد برای دستیابی به هدف NZEF در مجتمع معرفی می‌شود.

مواد و روش‌ها

کارخانه تولید بیواتانول

در این پژوهش داده‌های انرژی و اکسرژی از کارخانه تولید بیواتانول صنعتی زیست فرآورده سپاهان واقع در شهرستان نجف‌آباد استان اصفهان استخراج گردید. این شهرستان در طول جغرافیایی ۵۱/۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲/۶ درجه شمالی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۶۵۰ متر می‌باشد. همچنین سایر داده‌های آب و هوایی مربوط به شهرستان نجف‌آباد شامل میزان تابش جهانی، تابش انتشاری، میانگین دمای هوا، میانگین سرعت باد و میانگین رطوبت نسبی در هر ماه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- داده‌های آب و هوایی شهرستان نجف‌آباد (مستخرج از نرم‌افزار Meteonorm)

ماه	تابش جهانی (کیلووات ساعت بر متر مربع)	تابش انتشاری (کیلووات ساعت بر متر مربع)	میانگین دما (درجه سلسیوس)	میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه)	میانگین رطوبت نسبی (درصد)
ژانویه	۱۰۸	۳۲	۱/۶	۲/۲	۵۲
فوریه	۱۳۱	۳۰	۵/۶	۳/۰	۳۸
مارس	۱۶۶	۴۹	۱۱/۰	۳/۴	۳۰
آوریل	۱۸۳	۶۵	۱۶/۲	۳/۶	۳۰
مه	۲۲۶	۶۶	۲۱/۷	۳/۶	۲۴
ژوئن	۲۴۱	۵۷	۲۷	۳/۲	۱۹
ژوئیه	۲۴۴	۵۷	۲۹/۸	۲/۹	۲۰
اوت	۲۲۵	۵۲	۲۸/۱	۲/۷	۲۰
سپتامبر	۱۹۷	۴۱	۲۳/۵	۲/۵	۲۱
اکتبر	۱۵۶	۳۷	۱۷/۲	۲/۵	۳۰
نوامبر	۱۰۹	۳۱	۸/۷	۲/۱	۴۶
دسامبر	۹۷	۲۸۸	۳/۶	۲/۰	۵۷
مجموع در سال	۲۰۸۳	۵۴۷	۱۶/۲	۲/۸	۳۲

به صورت طرحواره در شکل (۱) نشان داده شده است. تولید

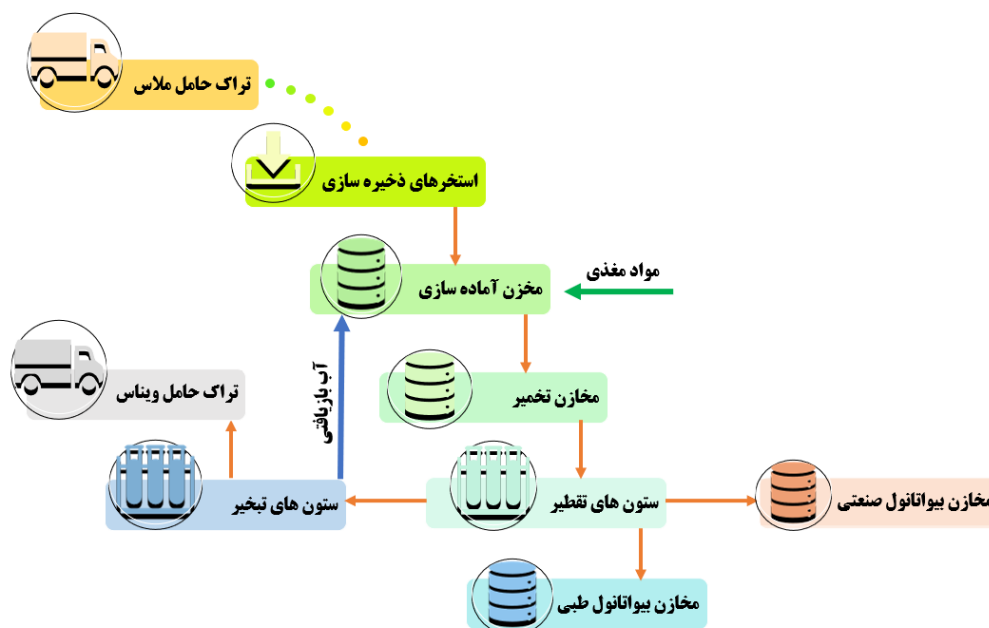
بررسی قرار گرفت. ساختار انرژی این کارخانه بر اساس سامانه فتوولتائیک طراحی گردید و گزینه‌هایی برای انطباق انرژی تولید شده از این سامانه با فرآیندهای تولید مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این کارخانه، سامانه بهینه شده‌ای از یک نیروگاه فتوولتائیک به همراه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و ترانسفورماتورهای هوشمند ارائه شد (Lombardi et al., 2019). در پژوهش دیگری یک مجموعه صنعتی انرژی خالص صفر متصل به شبکه مدل‌سازی گردید که مجهز به سامانه فتوولتائیک بود. مصرف‌کننده‌های این کارخانه شامل سه فرآیند گسسته (تراشکاری، فرزکاری و سنگ‌زنی) و سه فرآیند مداوم (حمل و نقل) می‌شد. در این پژوهش میزان انعطاف‌پذیری و انطباق نیازهای کارخانه با تولید انرژی از سامانه فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت و یک سامانه ذخیره‌سازی انرژی بهینه برای آن طراحی و ارزیابی گردید (Caro-Ruiz et al., 2019). در مطالعه‌ای بر روی یک کارخانه تولید مبلمان در شهر مگدبورگ آلمان، یک استراتژی کنترلی برای کارخانه انرژی خالص صفر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق طراحی انجام شده در این کارخانه، انرژی مورد نیاز برای رسیدن به هدف انرژی خالص صفر با استفاده از یک سامانه فتوولتائیک با توان ۱۲۰ کیلووات تامین شد. پژوهشگران در این مطالعه با استفاده از رویکرد جدید کنترلی توانستند با افزایش شاخص خودمصرفی، انرژی صادر شده را به میزان ۲۹/۷ درصد و انرژی تحویل داده شده به کارخانه را به میزان ۲۰/۳ درصد کاهش دهند (Bartolucci et al., 2019).

بر اساس موارد ذکر شده، در پژوهش حاضر امکان توسعه مفاهیم انرژی خالص صفر در یک کارخانه تولید بیواتانول به عنوان

فرآیند تولید بیواتانول در کارخانه تولید بیواتانول صنعتی

یک از حامل‌های مذکور از طریق داده‌های مصارف انرژی کارخانه شامل قبوض برق و گاز طبیعی و همچنین داده‌های انبارگردانی سوخت‌های بنزین و گازوئیل استخراج گردید. این مقادیر به همراه ضرایب انرژی اولیه^۱ (PEF)، قیمت واحد انرژی و ضریب آلاینده‌گی آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که ضریب انرژی اولیه، انرژی نهایی تحویل داده شده به مجموعه را به میزان انرژی اولیه مورد نیاز در مراحل استخراج، فرآوری، تولید، انتقال و تحویل انرژی مرتبط می‌کند (Hitchin *et al.*, 2010).

بیواتانول در این کارخانه بر اساس مواد اولیه ملاس نیشکر و چغندر قند، شیره قند ذرت و خرما و همچنین مخلوط آن‌ها می‌باشد که در زمان داده‌گیری از کارخانه، ملاس نیشکر به عنوان ماده اولیه برای تولید بیواتانول مورد استفاده قرار گرفته بود. همچنین محصولات جانبی فرآیند این کارخانه تقطیر مستقل، اتانول با درجه صنعتی و ویناس می‌باشند (Amid *et al.*, 2021). به منظور انجام مراحل مختلف تولید و رفع نیازهای انرژی کارخانه، برق و سوخت‌های گاز طبیعی، گازوییل و بنزین در کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. متوسط مقادیر مورد نیاز هر



شکل ۱- طرحواره‌ای از کارخانه تولید بیواتانول مورد مطالعه.

جدول ۲- مقادیر انرژی‌های ورودی به کارخانه تولید بیواتانول.

نوع حامل انرژی	مقدار مصرف سالیانه انرژی (واحد)	ضریب انرژی اولیه (منبع)	قیمت انرژی (دلار بر مگاوات ساعت)	ضریب آلاینده‌گی انرژی (منبع) (کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل بر کیلووات ساعت)
الکتریسته	۵,۰۴۰,۰۰۰ (کیلووات ساعت)	(Nasrollahi, 2013) ۳/۶۰	۵/۲۸	(Noorpoor & Kudahi, 2015) ۰/۵۷
گاز طبیعی	۸,۱۰۰,۰۰۰ (متر معکب)	(Nasrollahi, 2013) ۱/۱۰	۰/۷۸	(Molenbroek <i>et al.</i> , 2011) ۰/۲۰
گازوئیل	۱۲,۰۰۰ (لیتر)	(Hitchin <i>et al.</i> , 2010) ۱/۱۰	۱۶/۵۸	(Molenbroek <i>et al.</i> , 2011) ۰/۲۹
بنزین	۶,۰۰۰ (لیتر)	(Deru & Torcellini, 2007) ۱/۱۹	۳/۱۶	(Deru & Torcellini, 2007) ۰/۲۱

رسیدن به سایت انرژی خالص صفر (NZSIE) از رابطه (۱) استفاده گردید.

$$\Delta En_{Si} = \sum_{i=1} En_{e,i} - \sum_{j=1} En_{d,j} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه ΔEn_{Si} مقدار انرژی سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (مگاژول) می‌باشد. $En_{e,i}$ انرژی سالیانه i امین حامل انرژی تجدیدپذیر صادر شده از کارخانه

تحلیل رویکردهای انرژی خالص صفر

سایت انرژی خالص صفر

در این رویکرد مقدار تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در سایت می‌بایست برابر کل نیازهای انرژی آن مجموعه در طول یک سال باشد. لذا به منظور تعیین مقدار تولید انرژی مورد نیاز برای

در استراتژی قیمت‌گذاری BASA، کل انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شده در محل با تعرفه تشویقی انرژی تجدیدپذیر محاسبه شده و کل انرژی مصرفی کارخانه نیز با تعرفه انرژی شبکه در نظر گرفته می‌شود. لذا در این شرایط موازنه انرژی در روش NZEC با استفاده از رابطه (۴) انجام گرفت.

$$\Delta C_{BASA} = \sum_{i=1} (En_{g,i} \times c_{r,i}) - \sum_{j=1} (En_{c,j} \times c_{n,j}) = 0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه ΔC_{BASA} هزینه انرژی سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (دلار) در رویکرد NZEC مبتنی بر قیمت‌گذاری BASA می‌باشد. $En_{g,i}$ کل انرژی سالیانه تولید شده در i آمین حامل انرژی تجدیدپذیر در مجتمع (مگاژول) و $c_{r,i}$ تعرفه تشویقی انرژی تجدیدپذیر مربوط به آن (دلار بر مگاژول) می‌باشد. همچنین $En_{c,j}$ کل انرژی سالیانه زامین حامل انرژی مصرف شده در کارخانه (مگاژول) و $c_{n,j}$ تعرفه انرژی شبکه مربوط به آن است.

لازم به ذکر است که تعرفه تشویقی انرژی فتوولتائیک برای مزارع خورشیدی کمتر از ۱۰ مگاوات در کشور برابر ۳۵/۳۹ (دلار بر مگاوات) می‌باشد.

در استراتژی قیمت‌گذاری NEM، خالص انرژی مبادله شده از کارخانه در بازه زمانی یک ساله، مورد نظر قرار می‌گیرد. به این معنی که فقط مقدار خالص سالیانه حامل‌های انرژی صادر شده از کارخانه با تعرفه تشویقی انرژی تجدیدپذیر محاسبه می‌شود و انرژی‌های تحویل داده شده به کارخانه نیز بر اساس تعرفه انرژی شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این حالت انرژی مورد نیاز در رویکرد NZEC با استفاده از رابطه (۵) انجام گرفت.

$$\Delta C_{NEM} = \sum_{i=j} (En_{NMe,i=j} \times c_{r,i}) - \sum_{i=j} (En_{NMd,i=j} \times c_{n,j}) - \sum_{i \neq j} (En_{d,j} \times c_{n,j}) = 0$$

$$En_{e,i} > \text{ and } i \approx j \text{ if } En_{NMe,i=j} = En_{e,i} - En_{d,j} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$En_{e,i} < \text{ and } i \approx j \text{ if } En_{NMd,i=j} = En_{d,i} - En_{e,j} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه ΔC_{NEM} هزینه انرژی سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (دلار) در رویکرد NZEC مبتنی بر قیمت‌گذاری NEM می‌باشد. $En_{NMe,i=j}$ و $En_{NMd,i=j}$ نیز به

(مگاژول) و $En_{d,j}$ انرژی سالیانه زامین حامل انرژی تحویل داده شده به کارخانه (مگاژول) می‌باشد. در این رابطه هدف NZSIE زمانی حاصل می‌گردد که $\Delta En_{Si} = 0$ باشد.

انرژی اولیه خالص صفر

در این رویکرد مقدار تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در سایت می‌بایست به میزانی باشد که آن مجموعه در طول یک سال به آن نیاز دارد، البته در شرایطی که مقدار انرژی بر مبنای انرژی اولیه در نظر گرفته شود. در این صورت لازم است که ابتدا همه انرژی‌های مربوط به مجتمع به مقادیر انرژی اولیه تبدیل شوند. برای این منظور از ضرایب انرژی اولیه برای حامل‌های مختلف انرژی استفاده گردید و سپس با استفاده از رابطه (۲) موازنه انرژی در این رویکرد انجام گرفت.

(رابطه ۲)

$$\Delta En_{So} = \sum_{i=1} (En_{e,i} \times \check{p}_{r,i}) - \sum_{j=1} (En_{d,j} \times p_{n,j}) = 0$$

در این رابطه ΔEn_{So} مقدار انرژی اولیه سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (مگاژول) می‌باشد. $\check{p}_{r,i}$ ضریب اعتباری انرژی اولیه زامین حامل انرژی تجدیدپذیر صادر شده از کارخانه و $p_{n,j}$ ضریب انرژی اولیه زامین حامل انرژی تحویل داده شده به کارخانه می‌باشد.

لازم به ذکر است که در عمل ضریب اعتباری انرژی اولیه تخصیص یافته به انرژی‌های تجدیدپذیر، مطابق رابطه (۳) برابر با ضریب انرژی اولیه متناظر با همان حامل انرژی در شبکه در نظر گرفته می‌شود (Bourrelle et al., 2013).

(رابطه ۳)

$$\check{p}_{r,i} = p_{n,j}, \text{ and } i \approx j$$

هزینه انرژی خالص صفر

در این رویکرد مقدار تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر به اندازه‌ای است که درآمد حاصل از فروش (صادرات) انرژی تجدیدپذیر تولید شده در سایت برابر با مبلغ پرداختی سالیانه آن برای خرید خدمات انرژی تحویل شده (مصرف شده) باشد. مقدار انرژی تجدیدپذیر مورد نیاز در این روش به صورت کلی به سیاست‌های دولتی و استراتژی‌های قیمت‌گذاری بستگی دارد. پرکاربردترین استراتژی‌های قیمت‌گذاری در خصوص سایت‌های مجهز به سامانه‌های تولید پراکنده و متصل به شبکه شامل فروش کل تولید و خرید کل مصرف^۱ (BASA)، اندازه‌گیری خالص مصرف^۲ (NEM) و صورت حساب خالص^۳ (NB) می‌باشند (Zinaman et al., 2017).

(رابطه ۱۰)

$$\check{h}_{r,i} = h_{n,j} \text{ and } i \approx j$$

اکسرژی خالص صفر

در رویکرد اکسرژی خالص صفر از مفهوم اکسرژی برای تعادل انرژی کارخانه تولید بیواتانول و شبکه انرژی کشور استفاده گردید. در این تعریف خالص کل اکسرژی مبادله شده در مرز بین سایت و شبکه در طول یک سال برابر صفر می‌باشد (Kilkis, 2007). اکسرژی حداکثر کار تئوری قابل استحصال از یک انرژی (یا ماده) است تا آن انرژی (یا ماده) از طریق فرآیندهای برگشت‌پذیر به تعادل با محیط اطراف برسد. این ویژگی ترمودینامیکی می‌تواند اندازه‌گیری کمی و کیفی از انواع مختلف انرژی و جریان مواد را فراهم کند. به زبان ساده در رویکرد NZEX کارخانه می‌بایست به همان اندازه‌ای که اکسرژی در طول یک سال مصرف می‌کند را از منابع تجدیدپذیر تولید نماید. لذا برای تعیین مقدار تولید انرژی تجدیدپذیر در رویکرد NZEX از رابطه (۱۱) استفاده شد.

(رابطه ۱۱)

$$\Delta Ex = \sum_{i=1} Ex_{e,i} - \sum_{j=1} Ex_{d,j} = 0$$

در این رابطه ΔEx مقدار اکسرژی سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (مگاژول) می‌باشد. $Ex_{e,i}$ اکسرژی سالیانه i آمین حامل انرژی تجدیدپذیر صادر شده از کارخانه (مگاژول) و $Ex_{d,j}$ اکسرژی سالیانه j آمین حامل انرژی تحویل داده شده به کارخانه (مگاژول) است.

لازم به ذکر است که فرضیه‌ها و ساده‌سازی‌هایی به منظور تحلیل اکسرژی حامل‌های انرژی انجام گرفت (Amid et al., 2021). بر این اساس فرآیند تولید بیواتانول به عنوان یک فرآیند پایدار در نظر گرفته شد تا جریان انرژی‌های مختلف و وضعیت‌های آن‌ها در طول کار مداوم، بدون تغییر و یکسان باشد. همچنین فقط اکسرژی‌های فیزیکی و شیمیایی حامل‌های انرژی در محاسبات اکسرژی در نظر گرفته شد و از اکسرژی‌های جنبشی و پتانسیل آن‌ها صرف نظر گردید. زیرا در جریان‌های انرژی مذکور مقادیر اکسرژی جنبشی و پتانسیل در مقابل اکسرژی‌های فیزیکی و شیمیایی ناچیز می‌باشند. لازم به ذکر است که برای محصولات حاصل از احتراق، شرایط گاز ایده‌آل در نظر گرفته شد. دما و فشار مرجع نیز به ترتیب ۲۰ درجه سلسیوس و ۱ بار در نظر گرفته شد.

در تحلیل اکسرژی، انرژی برق برابر با محتوای اکسرژی آن می‌باشد. همچنین اکسرژی شیمیایی سوخت‌های گازوییل و بنزین با فرمول‌های شیمیایی $C_{14.4}H_{24.9}$ و C_8H_{18} با استفاده

ترتیب خالص انرژی سالیانه صادر شده و تحویل داده شده در کارخانه (مگاژول) است.

در استراتژی قیمت‌گذاری NB، انرژی صادر شده از کارخانه به صورت لحظه‌ای، با تعرفه تشویقی انرژی تجدیدپذیر محاسبه شده و قیمت انرژی تحویل داده شده از شبکه نیز در هر لحظه با تعرفه شبکه محاسبه می‌شود. بنابراین انرژی مورد نیاز در رویکرد NZEC مبتنی بر قیمت گذاری NB با استفاده از رابطه (۸) محاسبه گردید.

(رابطه ۸)

$$\Delta C_{NB} = \sum_{i=1} (En_{e,i} \times c_{r,i}) - \sum_{j=1} (En_{d,j} \times c_{n,j}) = 0$$

در این رابطه ΔC_{NB} هزینه انرژی سالیانه مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (دلار) در رویکرد NZEC مبتنی بر قیمت‌گذاری NB می‌باشد.

آلاینده‌ی انرژی خالص صفر

در رویکرد آلاینده‌ی انرژی خالص صفر (NZEE)، کارخانه می‌بایست در طول سال به مقدار کافی انرژی تجدیدپذیر بدون آلاینده‌ی تولید نماید تا در مبادله انرژی با شبکه انرژی کشور، آلاینده‌ی منتشر شده از مصارف انرژی خود را جبران نماید. در این روش از ضریب آلاینده‌ی حامل‌های انرژی در موازنه استفاده می‌شود. این ضریب نمایانگر مقدار کل انتشار دی‌اکسیدکربن معادل آن حامل انرژی در طول فرآیندهای تولید، توزیع و استفاده از آن است (Deru & Torcellini, 2007). به منظور تعیین انرژی مورد نیاز در رویکرد NZEE از رابطه (۹) استفاده گردید.

(رابطه ۹)

$$\Delta M_{CO_{2eq}} = \sum_{i=1} (En_{e,i} \times \check{h}_{r,i}) - \sum_{j=1} (En_{d,j} \times h_{n,j}) = 0$$

در این رابطه $\Delta M_{CO_{2eq}}$ مقدار آلاینده‌ی دی‌اکسیدکربن معادل^۱ مبادله شده بین کارخانه و شبکه انرژی کشور (کیلوگرم) می‌باشد. $\check{h}_{r,i}$ ضریب اعتباری آلاینده‌ی i آمین حامل انرژی تجدیدپذیر صادر شده از کارخانه (کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل بر مگاژول) و $h_{n,j}$ ضریب آلاینده‌ی j آمین حامل انرژی تحویل داده شده به کارخانه (کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل بر مگاژول) است.

در عمل مطابق رابطه (۱۰) ضریب آلاینده‌ی اختصاص یافته به انرژی تجدیدپذیر صادر شده برابر با ضریب آلاینده‌ی انرژی متناظر با آن در شبکه انرژی کشور در نظر گرفته می‌شود (European Commission and European Free Trade Association & Standard, 2008).

در این رابطه FF ضریب پری، V_{OC} ولتاژ مدار باز (ولت) I_{SC} جریان اتصال کوتاه (آمپر) پانل فتوولتائیک و Δt بازه زمانی می‌باشد.

مدل‌سازی سامانه انرژی کارخانه و سامانه فتوولتائیک

برای ارزیابی رویکردهای مختلف انرژی خالص صفر، سامانه انرژی کارخانه به همراه سامانه فتوولتائیک متصل به شبکه در نرم‌افزار PVsyst مدل‌سازی گردید. مشخصات ماژول‌های فتوولتائیک مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول (۳) ارائه شده است، همچنین در مدل‌سازی این سامانه از اینورتر مدل Blueplanet 1000 TL3 ساخت شرکت Kaco new energy آلمان با توان اسمی ۱۰۰۰ کیلووات، بازده ۹۸/۳ درصد، ولتاژ جریان مستقیم ۳۷۰ ولت و ولتاژ کاری ۸۳۰-۵۵۰ ولت استفاده گردید. ماژول‌های خورشیدی با زاویه ثابت ۳۴ درجه به سمت جنوب قرار دارند و مقدار ضریب آلبدو^۲ برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد. همچنین به منظور هماهنگ نمودن داده‌های آب و هوایی در مدل‌سازی با شرایط واقعی در کارخانه، داده‌های آب و هوایی شهرستان نجف‌آباد از نرم‌افزار Meteonorm استخراج گردید.

جدول ۳- مشخصات ماژول‌های خورشیدی مورد استفاده در مدل‌سازی.

واحد	Yingli Solar	کارخانه سازنده
-	YL250P-29b	نام مدل
-	چین	کشور سازنده
-	Poly-silicon (Si-Poly)	نوع ماژول
مترمربع	۱/۴۶	مساحت ماژول
سانتی‌متر	۳/۵×۹۹×۱۶۴	ابعاد ماژول
کیلوگرم	۱۸/۵	وزن ماژول
وات	۲۵۰	توان اسمی
ولت	۳۷/۷۳	ولتاژ مدار باز (V_{OC})
آمپر	۸/۸۴	جریان اتصال کوتاه (I_{OC})
ولت	۳۰/۲۳	ولتاژ نقطه حداکثر توان (V_{mmp})
آمپر	۸/۲۷	جریان نقطه حداکثر توان (I_{mmp})
درصد	۱۵/۴	بازده ماژول
-	۰/۷۵	ضریب پری
درجه سلسیوس	۸۵ تا -۴۰	دمای کاری

همچنین مطابق شکل (۲)، شرایط لحظه‌ای سامانه‌ی انرژی کارخانه به منظور استخراج داده‌های ساعتی تولید، صادرات، مصرف و واردات انرژی در کارخانه، با مدلسازی در نرم‌افزار TRNSYS (نسخه ۱۶) بررسی شد. به علاوه با استفاده از نرم‌افزار مذکور شاخص مطابقت بار^۳ بر اساس رابطه‌ی (۱۶) استخراج گردید (Klein et al., 2004). این شاخص نسبت بهره‌گیری

از رابطه (۱۲) محاسبه گردید. در این رابطه ارزش حرارتی پایین^۱ (LHV) گازوییل و بنزین به ترتیب برابر ۴۵/۲ و ۴۳/۴ مگاژول بر کیلوگرم در نظر گرفته شد (Amid et al., 2021). همچنین در این شرایط میزان اکسرژی فیزیکی گازوییل و بنزین برابر صفر است، زیرا دما و فشار آن‌ها برابر با محیط مرجع می‌باشد. (رابطه ۱۲)

$$Ex^{CH} = m \times \left[1.0401 + 0.1728 \left(\frac{H}{C} \right) + 0.0432 \left(\frac{O}{C} \right) + 0.2169 \left(\frac{S}{C} \right) \left(1 - 2.0268 \left(\frac{H}{C} \right) \right) \right] \times LHV$$

در این رابطه Ex^{CH} اکسرژی شیمیایی گازوییل و بنزین (مگاژول)، C ، H ، O ، S به ترتیب تعداد اتم‌های کربن، هیدروژن، اکسیژن و سولفور سوخت و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت (مگاژول بر کیلوگرم) می‌باشد.

اکسرژی گاز طبیعی از مجموع اکسرژی فیزیکی و شیمیایی آن به دست آمد. از رابطه (۱۳) برای محاسبه مقدار اکسرژی فیزیکی گاز طبیعی استفاده گردید (Balli et al., 2007). لازم به ذکر است که دما و فشار گاز طبیعی ورودی به کارخانه به ترتیب برابر ۲۰ درجه‌ی سلسیوس و ۱/۱ بار در نظر گرفته شد. (رابطه ۱۳)

$$Ex_{NG}^{PH} = m_{NG} \times \left[\left(C_{NG} \left[T_{NG} - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_{NG}}{T_0} \right) \right] \right) + R_{NG} T_0 \left(\frac{P_{NG}}{P_0} \right) \right]$$

در این رابطه Ex_{NG}^{PH} بیانگر اکسرژی فیزیکی گاز طبیعی (مگاژول) ورودی به مجتمع در طول سال می‌باشد. m_{NG} جرم گاز طبیعی (کیلوگرم) وارد شده به کارخانه در طول سال، C_{NG} ظرفیت گرمای ویژه گاز طبیعی (کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلونین)، T_{NG} دمای گاز طبیعی (کلونین)، R_{NG} ثابت گاز (کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلونین) و P_{NG} فشار گاز طبیعی (کیلوپاسکال) می‌باشد.

همچنین اکسرژی شیمیایی گاز طبیعی با استفاده از رابطه (۱۴) به دست آمد (Balli et al., 2007).

(رابطه ۱۴)

$$Ex_{NG}^{CH} = m_{NG} \times \left[1.033 + 0.0169 \frac{H}{C} - \frac{0.0698}{C} \right] \times LHV_{NG}$$

در این رابطه Ex_{NG}^{CH} بیانگر اکسرژی شیمیایی گاز طبیعی (مگاژول) ورودی به مجتمع در طول سال می‌باشد. اکسرژی برق تولید شده توسط سامانه فتوولتائیک نیز از رابطه (۱۵) تعیین گردید (Rahnama et al., 2019).

(رابطه ۱۵)

$$Ex_{PV} = FF \times V_{OC} \times I_{SC} \times \Delta t$$

شاخص خودکفایی برق نیز نسبت بهره‌گیری مجتمع از انرژی تولید شده در سامانه فتوولتائیک به کل نیاز انرژی برق کارخانه می‌باشد. لازم به ذکر است که در روابط (۱۶) تا (۱۹)، صورت کسر نشان دهنده میزان خودمصرفی انرژی می‌باشد.

$$SCI = \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} \min[En_{c,j=i}, En_{g,i}]}{\int_{t=t_1}^{t_2} En_{g,i}} \times 100$$

(رابطه ۱۷)

$$ESSI = \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} \min[En_{c,j=i}, En_{g,i}]}{\int_{t=t_1}^{t_2} En_{c,j=i}} \times 100$$

(رابطه ۱۸)

مجتمع از انرژی تولید شده در سامانه فتوولتائیک را به کل نیاز انرژی آن در طول سال نشان می‌دهد (Voss et al., 2010).

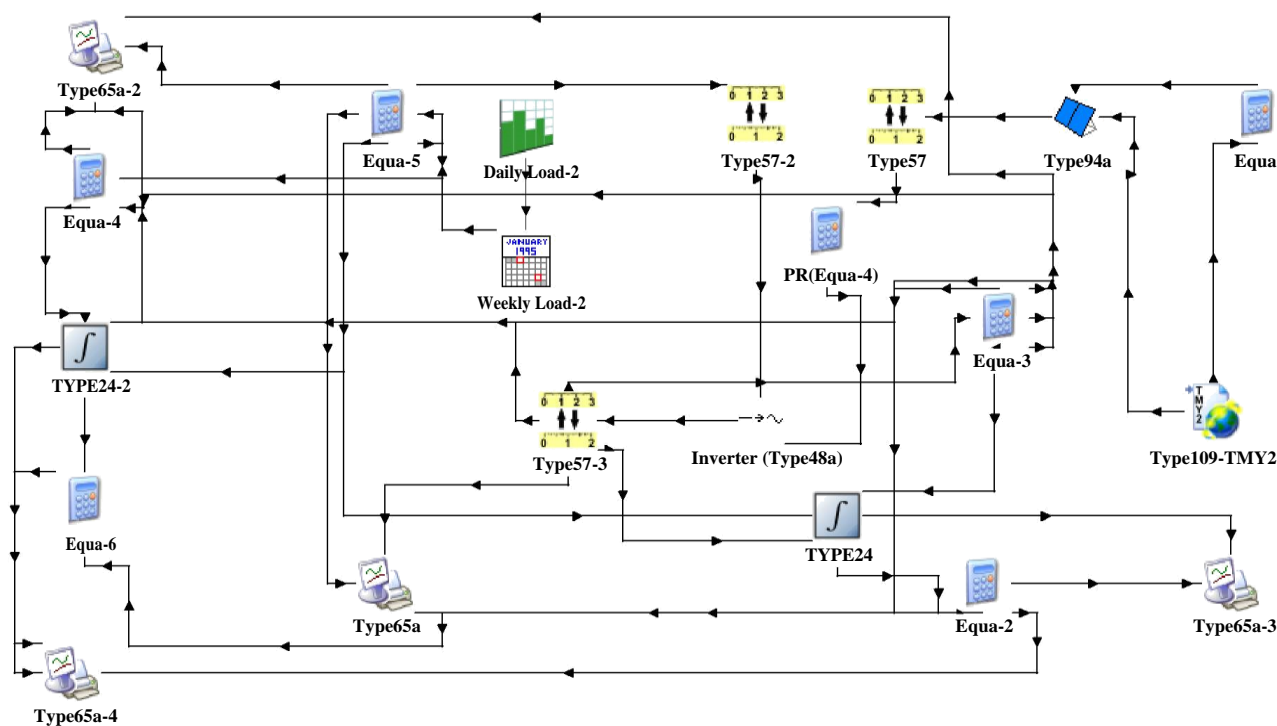
$$LMI_h = \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} \min[En_{c,j=i}, En_{g,i}]}{\int_{t=t_1}^{t_2} En_{c,j}} \times 100$$

رابطه (۱۶)

در این رابطه LMI_h شاخص مطابقت بار سالیانه (درصد)

بر اساس داده‌گیری ساعتی می‌باشد.

همچنین دو شاخص خودمصرفی^۱ (SCI) و شاخص خودکفایی برق^۲ (ESSI) با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) تعیین گردید (Martín-Chivelet & Montero-Gomez, 2017). شاخص خودمصرفی، نسبت بهره‌گیری مجتمع از انرژی تولید شده در سامانه فتوولتائیک به کل برق تولید شده در این سامانه بوده و



شکل ۲- مدل‌سازی سامانه انرژی کارخانه متصل به شبکه در نرم‌افزار TRNSYS شامل پانل فتوولتائیک (Type 94a)، اینورتر (Type 48a)، داده‌های آب و هوایی (Type 109-TMY2)، بار روزانه مجتمع (Daily load-2)، برنامه‌ی کاری هفتگی (Weekly load-2)، ابزار داده‌گیری تجمعی (Type 24)، ابزار تبدیل واحدها (Type 57)، ابزار انجام محاسبات (Equa) و ابزار دریافت خروجی‌های نرم‌افزار (Type 65a).

تجمعی، Type 57 تبدیل واحدها، Equa برای انجام محاسبات و استخراج شاخص‌های مورد نظر و Type 65a برای دریافت خروجی‌های نرم‌افزار استفاده شد (شکل ۲).

ارزیابی اقتصادی

برای مقایسه اقتصادی رویکردهای مختلف انرژی خالص صفر در این کارخانه، ارزش خالص فعلی^۳ (NPV) سامانه فتوولتائیک با

بر اساس مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار TRNSYS، ابزارهای Type 109 برای داده‌های آب و هوایی و تابش خورشید در محل، Type 94a برای سامانه فتوولتائیک، Type 48a به عنوان اینورتر متصل به شبکه، Daily load و Weekly load به ترتیب برای بار روزانه کارخانه و برنامه‌ی کاری هفتگی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از ابزارهای Type 24 به منظور داده‌گیری

استفاده از رابطه (۱۹) تعیین شد (Nikolaidis et al., 2009).

$$NPV = -Z + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+I)^t}$$

رابطه (۱۹)

در این رابطه Z مقدار سرمایه‌گذاری اولیه (دلار)، CF_t جریان خالص نقدینگی (دلار) برای سال t ام (شامل سود سرمایه‌گذاری منهای هزینه‌های جاری) و I مقدار نرخ تنزیل را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که به دلیل تفاوت در تعاریف رویکردهای مختلف انرژی خالص صفر، اندازه سامانه‌ی فتوولتائیک در آن‌ها متفاوت خواهد بود و این امر منجر به سرمایه‌گذاری‌های اولیه‌ی مختلفی در آن‌ها خواهد شد. از آنجا که مقدار NPV وابسته به سرمایه‌گذاری اولیه است، لذا افزایش نرخ سرمایه‌گذاری منجر به افزایش مقدار NPV خواهد شد. بر این اساس، برای معنی‌دارتر کردن و یکسان‌سازی شرایط اقتصادی در زمان مقایسه‌ی رویکردها، از شاخص اقتصادی بدون بعد (β) مطابق رابطه (۲۰)

استفاده شد.

(رابطه ۲۰)

$$\beta = \frac{NPV}{Z}$$

در این پژوهش، شاخص (β) در رویکردهای مختلف و تحت سه استراتژی قیمت‌گذاری، یعنی BASA، NEM و NB محاسبه گردید. همچنین درآمد حاصل از خودمصرفی انرژی در استراتژی‌های قیمت‌گذاری NEM و NB بر اساس تعرفه انرژی شبکه محلی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به منظور ساده‌سازی محاسبات اقتصادی و با توجه به شرایط تورمی حاکم بر کشور، کلیه محاسبات اقتصادی در زمان انجام پژوهش بر مبنای ارزش دلاری و با نرخ تبدیل ۱۸۰،۰۰۰ ریال به ازای هر دلار انجام گرفت، همچنین هزینه نصب سامانه فتوولتائیک بر واحد kWp به صورت ثابت در نظر گرفته شد. سایر مفروضات اقتصادی مورد استفاده در روابط (۱۹) و (۲۰) و هزینه اجرا و نصب سامانه فتوولتائیک در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- داده‌های مورد استفاده در ارزیابی اقتصادی انرژی کارخانه و سامانه فتوولتائیک.

پارامترها	هزینه (دلار بر کیلووات)	نوع تجهیز
طول عمر سامانه فتوولتائیک ۳۰ سال	۲۲۵	ماژول
نرخ تورم تعرفه انرژی ۱۰ درصد	۱۷۵	اینورتر
نرخ تنزیل ۱۰ درصد	۶۰	سازه
فاکتور نگهداری ۱/۱	۵۰	سیم‌کشی
	۴۵	هزینه نصب
	۱۱۲	سایر
	۶۶۷	ملزومات
		هزینه کل

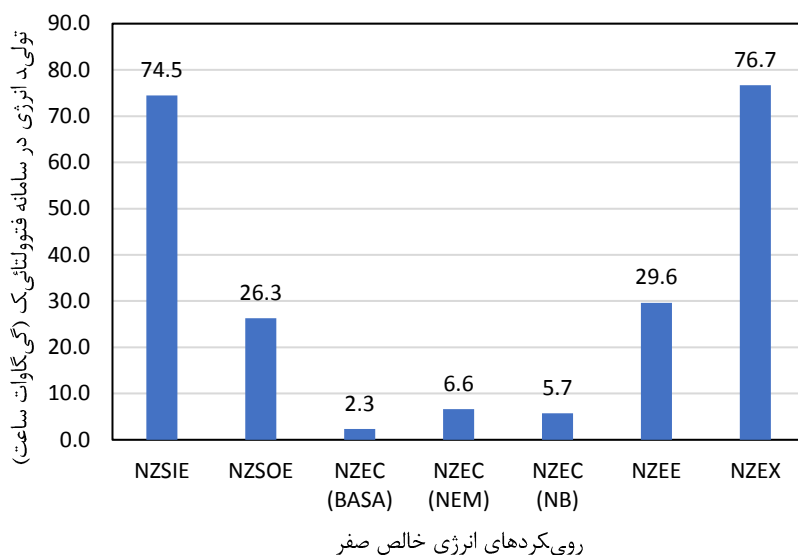
نتایج و بحث

انرژی مورد نیاز در رویکردهای مختلف انرژی خالص صفر

در مرحله اول، میزان تولید انرژی تجدیدپذیر مورد نیاز از سامانه فتوولتائیک برای رویکردهای مختلف انرژی خالص صفر تعیین گردید (شکل ۳). رویکرد NZEX با تولید سالیانه ۷۶/۷ گیگاوات ساعت بزرگترین سامانه فتوولتائیک را پیشنهاد نمود. تولید این مقدار انرژی در رویکرد NZEX بسیار نزدیک به کل تقاضای انرژی سالانه مجتمع به میزان ۷۴/۵ گیگاوات ساعت در رویکرد NZSIE می‌باشد. رویکرد NZEC مبتنی بر استراتژی قیمت‌گذاری BASA کوچکترین نیروگاه فتوولتائیک را با تولید سالیانه ۲/۳ گیگاوات ساعت پیشنهاد می‌کند. همچنین میزان انرژی مورد نیاز در رویکرد NZEC مبتنی بر استراتژی قیمت‌گذاری NB برابر ۵/۷

گیگاوات ساعت و در استراتژی قیمت‌گذاری NEM برابر ۶/۶ گیگاوات ساعت به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر تولید انرژی در رویکردهای NZEC به صورت قابل توجهی کوچک‌تر از سایر تعاریف NZE مورد بررسی می‌باشد. دلیل اصلی این یافته‌ها، اختلاف زیاد بین تعرفه انرژی شبکه و تعرفه تشویقی انرژی تجدیدپذیر است. همچنین انرژی مورد نیاز در دو رویکرد NZSOE و NZEE نیز در سطحی تقریباً مشابه و به ترتیب به میزان ۲۶/۳ و ۲۹/۶ گیگاوات ساعت به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، نیروگاه فتوولتائیک مورد نیاز با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و با هدف پوشش نیازهای انرژی در هر رویکرد با استفاده از نرم‌افزار PVsyst مدل‌سازی شد، جدول (۵)

برخی از نتایج این مدل‌ها شامل توان اسمی نیروگاه، تعداد ماژول، تعداد اینورتر و مساحت مورد نیاز در هر رویکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۳- انرژی سالیانه فتوولتائیک مورد نیاز در رویکردهای سایت انرژی خالص صفر (NZSIE)، انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE)، آلاینده‌های انرژی خالص صفر (NZEE)، اکسرژی خالص صفر (NZEX) و هزینه انرژی خالص صفر (NZEC) در استراتژی‌های قیمت‌گذاری فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و صورت حساب خالص (NB).

جدول ۵- مشخصات نیروگاهی سامانه فتوولتائیک برای تامین انرژی مورد نیاز در رویکردهای سایت انرژی خالص صفر (NZSIE)، انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE)، آلاینده‌های انرژی خالص صفر (NZEE)، اکسرژی خالص صفر (NZEX) و هزینه انرژی خالص صفر (NZEC) در استراتژی‌های قیمت‌گذاری فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و صورت حساب خالص (NB).

رویکرد انرژی خالص صفر	توان اسمی نیروگاه (مگاوات)	مساحت مورد نیاز (مترمربع)	تعداد ماژول	تعداد اینورتر	سرمایه‌گذاری اولیه (میلیون دلار)
NZSIE	۳۸/۶	۲۵۰،۵۷۰	۱۵۴،۳۳۰	۳۱	۲۵/۷
NZSOE	۱۳/۶	۸۸،۳۳۴	۵۴،۴۰۶	۱۱	۹/۱
NZEC (BASA)	۱/۲	۷،۷۸۷	۴،۷۹۶	۱	۰/۸
NZEC (NEM)	۳/۴	۲۲،۲۱۷	۱۳،۶۸۴	۳	۲/۳
NZEC (NB)	۳/۰	۱۹،۲۶۹	۱۱،۸۶۸	۳	۲/۰
NZEE	۱۵/۳	۹۹،۶۵۷	۶۱،۳۸۰	۱۳	۱۰/۲
NZEX	۳۹/۷	۲۵۷،۸۲۱	۱۵۸،۷۹۶	۳۲	۲۶/۵

در این شرایط اگر چه انرژی برق با محتوای اکسرژی بالا از سامانه فتوولتائیک در کارخانه تولید می‌شود و شرط دوم انتخاب این رویکرد تحقق می‌پذیرد، اما باید توجه شود که انرژی‌های تحویلی به کارخانه از طرف شبکه انرژی کشور به صورت برق و سوخت‌های فسیلی است که دارای بالاترین محتوای اکسرژی هستند. بنابراین در این شرایط، جبران اکسرژی تحویل داده شده به کارخانه نیازمند تولید مقادیر زیادی از انرژی تجدیدپذیر خواهد بود.

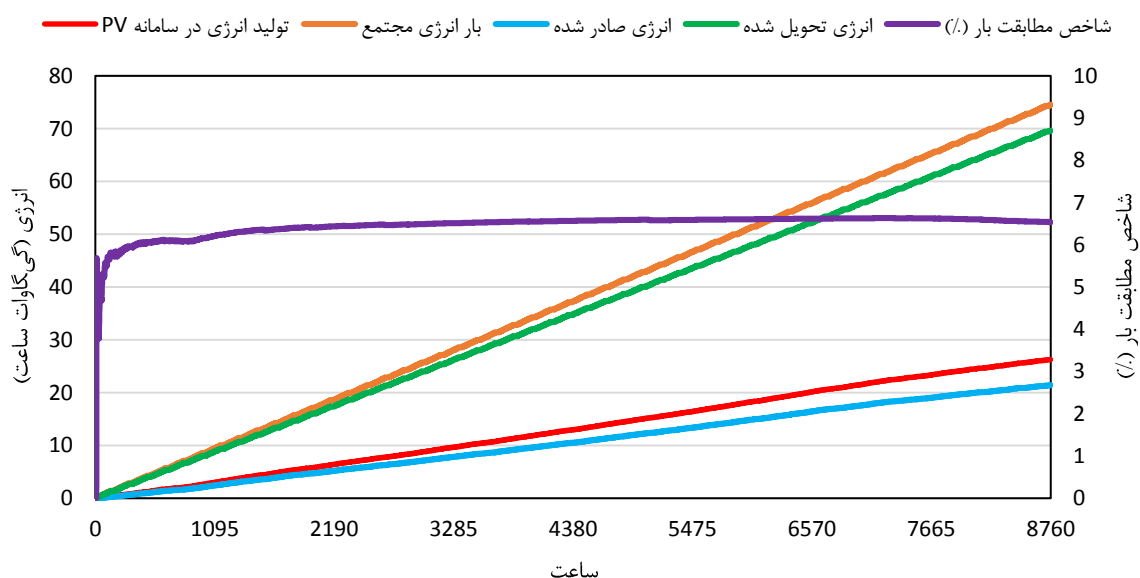
همچنین در رویکرد NZSIE شرایطی تقریباً مشابه اما معکوس رویکرد فوق وجود دارد. به این معنی که توجه‌پذیری NZSIE زمانی است که از یک طرف انرژی‌های تحویل داده شده

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، NZEX و NZSIE با مقادیر نزدیک به یکدیگر، دارای تولید انرژی در سطح بسیار بالاتری از سایر رویکردهای NZE هستند و انتخاب آن‌ها به عنوان هدف انرژی خالص صفر نیازمند سرمایه‌گذاری نسبتاً زیادی در این حوزه خواهد بود. در این شرایط انتخاب رویکرد NZEX زمانی برای این کارخانه توجیه‌پذیر می‌باشد که از یک طرف حامل‌های انرژی تحویل داده شده به کارخانه از سطوح پایین اکسرژی بهره ببرند (مانند شبکه آب گرم منطقه‌ای) و از طرف دیگر انرژی تولید شده در محل، دارای بالاترین سطح اکسرژی باشد تا بتواند به راحتی اکسرژی تحویل داده شده را جبران نماید.

ارزیابی فنی

به منظور تکمیل ارزیابی‌های فنی، با مدل‌سازی انرژی کارخانه و سامانه فتوولتائیک در نرم‌افزار TRNSYS، مقادیر تولید انرژی در سامانه فتوولتائیک به همراه مصرف انرژی، میزان خودمصرفی، انرژی صادر شده، انرژی تحویل داده شده و شاخص مطابقت بار برای هر رویکرد، مشابه شکل (۴) استخراج گردید. شکل (۴) نمونه‌ای از خروجی‌های تجمعی نرم‌افزار مذکور برای داده‌های تولید، مصرف، صادرات و تحویل انرژی و شاخص مطابقت بار در کارخانه برای رویکرد NZSOE می‌باشد. بر اساس داده‌های به دست آمده، شاخص‌های خودمصرفی و خودکفایی برق نیز برای هر رویکرد تعیین گردید.

از شبکه سراسری دارای بالاترین کیفیت و کارایی باشند و از طرف دیگر امکان صادرات گسترده انرژی ارزان قیمت و با کیفیت پایین (مانند آب گرم بازیافتی از سامانه تبرید) برای کارخانه وجود داشته باشد. در صورتی که در این کارخانه تنها شرط اول برقرار است و انرژی‌های با کارایی بالا به آن تحویل داده می‌شود، اما امکان صادرات انرژی بازیافتی با حجم بالا و هزینه کم برای آن وجود ندارد و انرژی صادراتی صرفاً از نوع برق خواهد بود. لذا انتخاب دو رویکرد NZEX و NZSIE به دلیل نوع حامل‌های انرژی تحویل داده شده و صادر شده گزینه‌های مناسبی برای این کارخانه به منظور دستیابی به هدف انرژی خالص صفر نمی‌باشند.



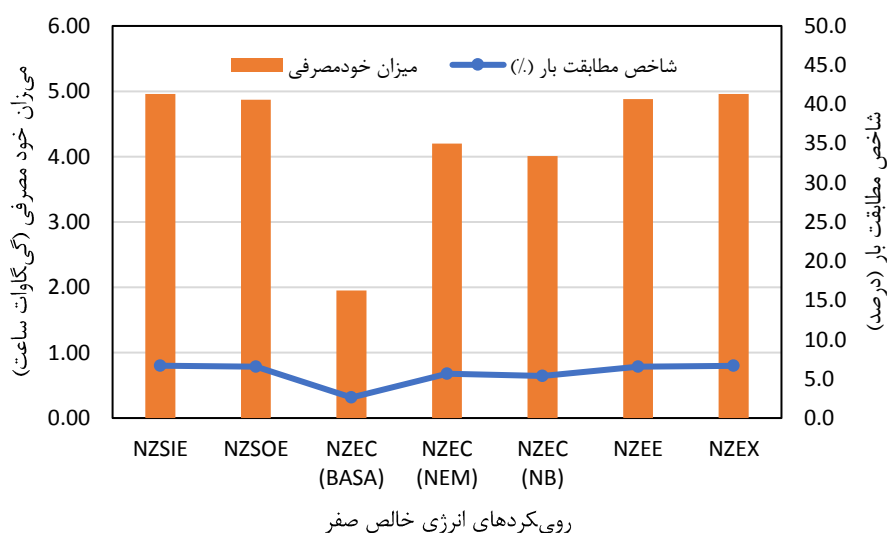
شکل ۴- مقادیر تجمعی سالیانه تولید، مصرف، صادرات و تحویل انرژی و شاخص مطابقت بار تحت رویکرد انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE) در کارخانه تولید بیواتانول بر اساس داده‌گیری ساعتی.

همچنین همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، شاخص خودمصرفی در چهار رویکرد NZEX، NZSIE، NZEE و NZSOE با مقادیر ۶/۷، ۶/۵، ۱۶/۵ و ۱۸/۵ درصد در سطوح بسیار پایین‌تری از رویکردهای سه‌گانه‌ی NZEC به میزان ۸۴/۲، ۶۳/۶ و ۷۰/۰ درصد (به ترتیب در استراتژی‌های قیمت‌گذاری NZEX، BASA، NEM و NB) قرار دارند. لذا انتخاب رویکردهای NZEX و NZSIE، NZEE و NZSOE به عنوان هدف انرژی خالص صفر، عملاً کارخانه را تبدیل به یک نیروگاه خورشیدی خواهد نمود که تنها بخش کوچکی از انرژی تولید شده در سامانه‌ی فتوولتائیک را صرف نیازهای خود می‌نماید. در این شرایط علی‌رغم ایجاد خودکفایی مناسب در بخش برق، قسمت عمده‌ای از انرژی تولید شده در کارخانه می‌بایست به شبکه صادر گردد. چنین عملکردی

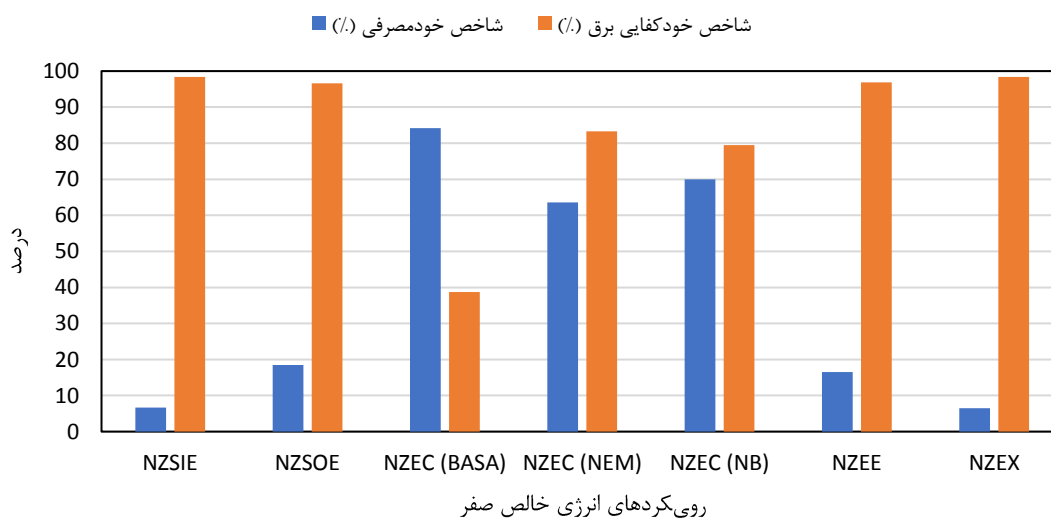
در شکل (۵)، مقدار شاخص مطابقت بار و همچنین میزان خودمصرفی در رویکردهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، میزان خودمصرفی انرژی در چهار رویکرد NZEX، NZSIE، NZEE و NZSOE مقادیر تقریباً برابری را نشان می‌دهند. اما با توجه به شاخص مطابقت بار، میزان خودمصرفی انرژی در تمام رویکردهای NZE، نسبت به کل انرژی مورد نیاز در کارخانه بسیار پایین است. به گونه‌ای که مقادیر شاخص مطابقت بار در چهار رویکرد NZEX و NZSIE، NZEE و NZSOE تنها به میزان ۶/۷، ۶/۷، ۶/۶ و ۶/۵ درصد از کل نیازهای انرژی کارخانه می‌باشد. علت این امر نیز سهم کم برق از نیازهای انرژی کارخانه بوده و کارخانه به صورت عمده مبتنی بر گاز طبیعی اداره می‌گردد.

ماژول‌های فتوولتائیک بوده و از این منظر نیز رویکردهای مذکور فاقد توجیه فنی و اجرایی می‌باشند. در این شرایط رویکرد NZEC با داشتن شاخص خودمصرفی بالا و برقراری تعادل در شاخص خودکفایی برق (شکل ۶)، به لحاظ فنی مناسب‌ترین رویکرد برای رسیدن به هدف انرژی خالص صفر در این کارخانه می‌باشد. همچنین مساحت مورد نیاز برای نصب تجهیزات سامانه فتوولتائیک در این رویکرد نیز به صورت کامل با فضای موجود در کارخانه منطبق است. باید توجه گردد که بر اساس استراتژی قیمت‌گذاری در هر کشور، تنها یکی از رویکردهای سه‌گانه NZEC در آن کشور وجود خواهد داشت.

می‌تواند به چالشی برای شبکه تبدیل شود، زیرا می‌بایست مقدار زیادی از انرژی تجدیدپذیر با نوسانات فراوان در طول شبانه روز و در طول سال با انرژی شبکه تلفیق گردد (Caro-Ruiz et al., 2019). لذا در کنار دو رویکرد NZSIE و NZEX قبلی عنوان شد، رویکردهای NZSOE و NZEE نیز فاقد توجیه فنی برای هدف انرژی خالص صفر در این کارخانه می‌باشند. از طرف دیگر مساحت مورد نیاز برای نصب ماژول‌های فتوولتائیک در رویکردهای مذکور بسیار زیاد بوده و مقادیر آن در NZSOE و NZEE به ترتیب برابر ۸۸،۳۳۴ و ۹۹،۶۵۷ مترمربع است. این مساحت بسیار بیشتر از فضای موجود کارخانه برای نصب



شکل ۵- مقادیر خودمصرفی و شاخص مطابقت بار کارخانه در رویکردهای سایت انرژی خالص صفر (NZSIE)، انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE)، هزینه انرژی خالص صفر (NZEC)، آلاینده‌گی انرژی خالص صفر (NZEE) و اکسرژی خالص صفر (NZEX) در استراتژی‌های قیمت‌گذاری فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و صورت‌حساب خالص (NB).

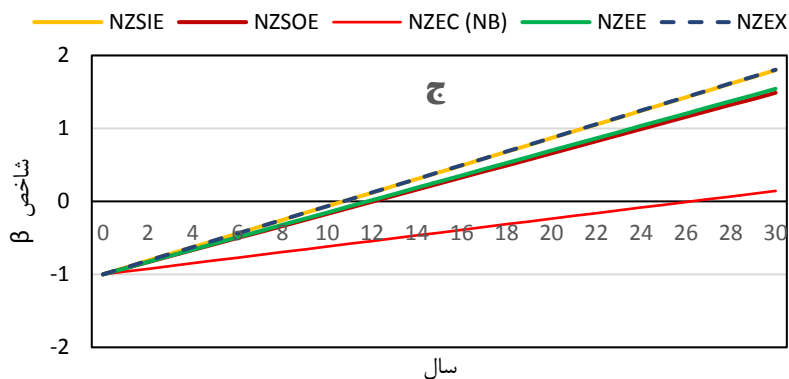
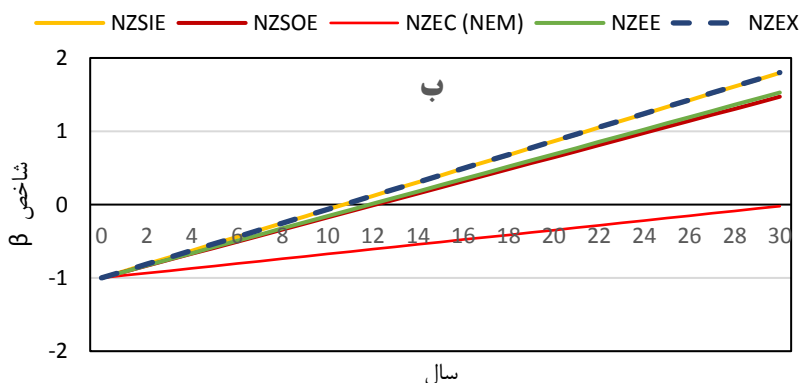
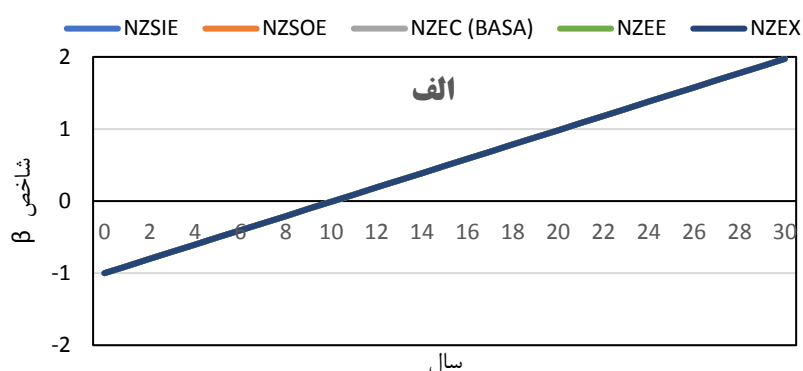


شکل ۶- شاخص خودمصرفی و شاخص خودکفایی برق از سامانه فتوولتائیک در کارخانه و در رویکردهای سایت انرژی خالص صفر (NZSIE)، انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE)، هزینه انرژی خالص صفر (NZEC)، آلاینده‌گی انرژی خالص صفر (NZEE) و اکسرژی خالص صفر (NZEX) در استراتژی‌های قیمت‌گذاری فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و صورت‌حساب خالص (NB).

ارزیابی اقتصادی

روند مشابهی را نشان داد و کلیه‌ی رویکردهای NZE پس از ۱۰/۱ سال وارد فاز سودآوری (NPV=0) شدند. همچنین تحت استراتژی قیمت‌گذاری BASA، شاخص β در رویکردهای مختلف در پایان عمر سامانه به ۱/۹۷ رسید. ویژگی شاخص β حذف اثر سرمایه‌گذاری اولیه و نشان دادن روند سودآوری است. در صورتی که اگر مقدار NPV به جای این شاخص در نظر گرفته می‌شد به دلیل اندازه‌های مختلف سامانه‌ی فتوولتائیک در رویکردهای مختلف، نمودارهای NPV متفاوت شده و مقایسه‌ی روند اقتصادی سرمایه‌گذاری در رویکردهای مختلف دشوار می‌شد.

به منظور مقایسه اقتصادی رویکردهای مختلف، ارزیابی اقتصادی بر مبنای شاخص β در هر سه استراتژی قیمت‌گذاری BASA (شکل ۷ الف)، NEM (شکل ۷ ب) و NB (شکل ۷ ج) انجام گرفت. همانطور که در شکل (۷ الف) نشان داده شده است، بالاترین شاخص β (که نسبت NPV به سرمایه‌گذاری اولیه است) و بهترین سودآوری اقتصادی تحت استراتژی قیمت‌گذاری BASA به دست آمد، زیرا در این حالت کل برق فتوولتائیک تولید شده در کارخانه با تعرفه تشویقی برای سرمایه‌گذار محاسبه می‌گردد. در این استراتژی شاخص β برای تمامی تعاریف NZE



شکل ۷- شاخص β در سامانه فتوولتائیک، برای رویکردهای سایت انرژی خالص صفر (NZSIE)، انرژی اولیه خالص صفر (NZSOE)، هزینه انرژی خالص صفر (NZEC)، آلاینده‌ی انرژی خالص صفر (NZEE) و اکسرژی خالص صفر (NZEX) در استراتژی‌های قیمت‌گذاری الف) فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA)، ب) اندازه‌گیری خالص مصرف (NEM) و ج) صورت حساب خالص (NB).

رویکرد NZEC تنها به عدد ۰/۱۴ رسید که پایین ترین رقم در میان رویکردهای مختلف است. این عدد نشان می‌دهد که رویکرد NZEC در استراتژی قیمت‌گذاری NB در سال‌های انتهایی عمر سامانه (۲۶/۲ سال) و به مقدار بسیار جزئی مقرون به صرفه خواهد شد.

بنابراین در میان رویکردهای NZEC که به لحاظ فنی مورد تایید قرار گرفته بودند، تنها رویکرد NZEC در استراتژی قیمت‌گذاری BASA است که به لحاظ اقتصادی بالاترین توجیه‌پذیری و سودآوری را دارد. از آنجا که استراتژی فعلی قیمت‌گذاری در کشور بر مبنای استراتژی BASA می‌باشد، لذا برای رسیدن به هدف انرژی خالص صفر در میان رویکردهای مورد مطالعه، رویکرد NZEC در هر دو ارزیابی فنی و اقتصادی بهترین شرایط را در کارخانه تولید بیواتانول زیست فرآورده سپاهان دارد. در این شرایط سرمایه‌گذار با اختصاص سرمایه‌گذاری نسبتاً مناسبی می‌تواند هم از مزایای نرخ فروش تشویقی سامانه فتوولتائیک و هم از قیمت پایین عرضه انرژی در شبکه استفاده نموده و با درآمدزایی ایجاد شده تا پایان عمر سامانه از پرداخت هزینه برای انرژی‌های مصرفی خود بی‌نیاز شود. اطلاعات جامع سامانه فتوولتائیک برای رویکرد NZEC در استراتژی قیمت‌گذاری BASA در جدول (۶) خلاصه شده است.

برخلاف استراتژی قیمت‌گذاری BASA، شاخص β در استراتژی قیمت‌گذاری NEM برای رویکردهای مختلف NZE متفاوت شد (شکل ۷). در استراتژی قیمت‌گذاری NEM رابطه مستقیمی بین مقدار تولید برق در سامانه فتوولتائیک و سودآوری (شاخص β) وجود دارد. بر این اساس، شاخص β در رویکردهای NZEX و NZSOE با بیشترین تولید انرژی به عدد ۱/۸۰ در پایان عمر سامانه رسید، همچنین دو رویکرد مذکور پس از ۱۰/۷ سال از شروع فعالیت، وارد فاز سودآوری شدند. شاخص β در پایان عمر رویکردهای NZEE و NZSOE به ترتیب ۱/۵۳ و ۱/۴۷ به دست آمد و آن‌ها نیز پس از ۱۱/۹ و ۱۲/۱ سال وارد فاز سودآوری شدند. بدترین شاخص β در پایان عمر سامانه مربوط به رویکرد NZEC (NEM) برابر با (-۰/۰۲) بود و این شاخص در آخرین سال عمر سامانه تنها به عدد صفر نزدیک شد. بنابراین رویکرد NZEC در استراتژی قیمت‌گذاری NEM توجیه اقتصادی ندارد.

مقادیر شاخص β در پایان عمر سامانه‌ی فتوولتائیک تحت استراتژی قیمت‌گذاری NB برای رویکردهای NZSIE، NZEX و NZEE و NZSOE به ترتیب برابر با ۱/۸۰، ۱/۸۰، ۱/۵۴ و ۱/۴۹ به دست آمد و ورود به فاز سودآوری در آن‌ها نیز به ترتیب در سال‌های ۱۰/۷، ۱۰/۷، ۱۱/۸ و ۱۲/۱ ایجاد شد. شاخص β در استراتژی قیمت‌گذاری NB در پایان عمر سامانه برای

جدول ۶- داده‌های انرژی مربوط به رویکرد هزینه انرژی خالص صفر (NZEC) در استراتژی قیمت‌گذاری فروش کل تولید و خرید کل مصرف (BASA).

پارامتر	مقدار	واحد
توان اسمی	۱/۲	مگاوات
مقدار تولید انرژی	۲/۳	گیگاوات ساعت بر سال
مساحت مورد نیاز	۷،۷۸۷	مترمربع
تعداد ماژول	۵۴،۴۰۶	-
تعداد اینورتر	۱	-
خودمصرفی (SC)	۱/۹۵	گیگاوات ساعت بر سال
صادرات انرژی	۰/۳۵	گیگاوات ساعت بر سال
شاخص مطابقت بار	۲/۶	درصد
شاخص خودکفایی برق	۳۸/۷	درصد
شاخص خودمصرفی	۸۴/۲	درصد
سرمایه‌گذاری اولیه	۸۰۰،۴۰۰	دلار
شاخص اقتصادی (β) در پایان عمر سامانه	۱/۹۷	-
ارزش خالص فعلی (NPV) در پایان عمر سامانه	۱،۵۷۹،۵۱۲	دلار

بهینه‌سازی و افزایش راندمان انرژی

در بخش‌های گذشته، دستیابی به هدف انرژی خالص صفر با استفاده از رویکردهای مختلف NZE بر اساس شرایط فعلی مجتمع و با فرض عدم تغییرات در تاسیسات مختلف آن مورد بررسی قرار گرفت. حال آن که در صورت به کارگیری فرآیندهای

بهره‌وری و مدیریت انرژی، می‌توان نیازهای انرژی مجتمع را کاهش داد و رویکردهای مذکور را با داده‌ها و مقادیر انرژی کمتری در موازنه NZE تعیین نمود. در این خصوص اعمال روش‌های بهینه‌سازی انرژی در واحد تقطیر به عنوان یکی از مهم‌ترین نقاط مصرف انرژی، می‌تواند تاثیر به سزایی در افزایش راندمان حرارتی

آن و در نتیجه کاهش میزان انرژی تحویل شده به مجتمع داشته باشد (Tgarguifa et al., 2018). علاوه بر این، از آنجا که دمای مخلوط در سامانه تخمیر با عبور از یک مبدل حرارتی صفحه خارجی مجهز به گردش آب در محدوده ۳۰-۳۴ درجه سلسیوس نگه داشته می‌شود، می‌توان با انجام فرآیند بازیافت انرژی، از این تلفات حرارتی برای پیش‌گرمایش آب گرم مورد نیاز برای شستشوی واحدهای فرآوری و خطوط انتقال استفاده نمود. یکی دیگر از روش‌های ممکن برای کاهش میزان انرژی تحویل شده به مجتمع، تولید انرژی از ویناس می‌باشد. ویناس به عنوان محصول جانبی مجتمع تولید بیواتانول، پتانسیل بالایی برای تولید بیوگاز دارد. لذا با تغذیه آن در هاضم‌های بی‌هوازی و تولید گاز زیستی می‌توان بخشی از نیازهای انرژی مجتمع را تامین نمود (Morales et al., 2015). در این صورت با توجه به سیاست‌های فنی و اقتصادی مجتمع، به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی ذکر شده می‌تواند امکان رسیدن به هدف NZE را تسهیل نماید.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش امکان‌سنجی فنی و اقتصادی دستیابی به هدف انرژی خالص صفر در کارخانه تولید بیواتانول بر اساس رویکردهای NZSIE، NZSOE، NZEC، NZEE و NZEX مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین بررسی‌های اقتصادی در سه استراتژی قیمت‌گذاری مختلف شامل BASA، NEM و NB انجام شد. بر این اساس مشاهده گردید که انرژی مورد نیاز در رویکردهای مورد مطالعه در سه سطح مختلف قرار گرفتند. بالاترین سطح انرژی مورد نیاز مربوط به رویکردهای NZEX و NZSIE، سطح میانی مربوط به رویکردهای NZEE و NZSOE و پایین‌ترین سطح مربوط به رویکردهای سه‌گانه NZEC بود. با توجه به محتوای بالای اکسرژی در حامل‌های انرژی تحویل داده شده به کارخانه،

REFERENCES

- Amid, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Karimi, K., Nizami, A.-S., Rehan, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Soufiyan, M. M., Peng, W., & Lam, S. S. (2021). Exergetic, exergoeconomic, and exergoenvironmental aspects of an industrial-scale molasses-based ethanol production plant. *Energy Conversion and Management*, 227, 113637.
- Balli, O., Aras, H., & Hepbasli, A. (2007). Exergetic performance evaluation of a combined heat and power (CHP) system in Turkey. *International Journal of Energy Research*, 31(9), 849-866.
- Bartolucci, L., Cordiner, S., Mulone, V., Santarelli, M., Lombardi, P., Arendarski, B., & Komarnicki, P. (2019). MPC-based Electric Energy Storage Sizing for a Net Zero Energy Factory. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 1-6.
- Bourelle, J. S., Andresen, I., & Gustavsen, A. (2013). Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 65, 84-92.
- Carlisle, N., Van Geet, O., & Pless, S. (2009). Definition of a 'Zero Net Energy' Community. *National Renewable Energy Lab. (NREL)*, Golden, CO (United States).
- Caro-Ruiz, C., Lombardi, P., Richter, M., Pelzer, A., Komarnicki, P., Pavas, A., & Mojica-Nava, E. (2019). Coordination of optimal sizing of energy storage systems and production buffer stocks in a

- net zero energy factory. *Applied Energy*, 238, 851–862.
- Chowdhury, H., Chowdhury, T., Thirugnanasambandam, M., Farhan, M., Ahamed, J. U., Saidur, R., & Sait, S. M. (2019). A study on exergetic efficiency vis-à-vis sustainability of industrial sector in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 231, 297–306.
- Commission, E. (2015). *Flash Eurobarometer 426*. SMEs, resource efficiency and green markets.
- Deru, M. P., & Torcellini, P. A. (2007). Source energy and emission factors for energy use in buildings. *National Renewable Energy Laboratory*, Golden, CO.
- Dice, M. (2017). Net Zero Energy Dairy Production: Powering Minnesota Dairy Farms with Renewable Energy.
- European Commission. (2010). Directive 2010/31/Eu of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast). In *Official Journal of the European Union*.
- European Commission and European Free Trade Association, & Standard, C. E. N. (2008). *Energy Performance of Buildings—Overall Energy Use, CO Emissions and Definition of Energy Ratings*. EN, 15203, 15315.
- Hitchin, R., Thomsen, K. E., & Wittchen, K. B. (2010). Primary Energy Factors and Members States Energy Regulations.
- Kilkis, S. (2007). A new metric for net-zero carbon buildings. *ASME 2007 Energy Sustainability Conference*, 219–224.
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., Mitchell, J. C., Braun, J. E., Evans, B. L., & Kummer, J. P. (2004). *TRNSYS 16—A TRaNsient system simulation program, user manual*. Solar Energy Laboratory. Madison: University of Wisconsin-Madison.
- Lombardi, P., Komarnicki, P., Zhu, R., & Liserre, M. (2019). Flexibility options identification within Net Zero Energy Factories. *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6.
- Martín-Chivelet, N., & Montero-Gomez, D. (2017). Optimizing photovoltaic self-consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, 150, 71–80.
- Molenbroek, E., Stricker, E., & Boermans, T. (2011). Primary energy factors for electricity in buildings: Toward a flexible electricity supply. Utrecht: Ecofys.
- Moraes, B. S., Triolo, J. M., Lecona, V. P., Zaiat, M., & Sommer, S. G. (2015). Biogas production within the bioethanol production chain: Use of co-substrates for anaerobic digestion of sugar beet vinasse. *Bioresource Technology*, 190, 227–234.
- Mousa, O. B., & Taylor, R. A. (2020). Global solar technology optimization for factory rooftop emissions mitigation. *Environmental Research Letters*, 15(4), 44013.
- Musavi Sadat, M. A., Mohammadnejad Shourakayi, H., Soleimani, S. (2018). Technical and Economical Assessment of a Net Zero Energy Commercial Building Connected to the Network in Ahvaz, Considering Reliability Constraint. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol 22 (6), 237–250. (In Farsi)
- Nasrollahi, F. (2013). *Green office buildings: low energy demand through architectural energy efficiency*. Young Cities Research Paper Series, 08, 113 S. Universitätsverlag der TU Berlin, <https://doi.org/urn:nbn:de:kobv:83-opus-40476>
- Nikolaidis, Y., Pilavachi, P. A., & Chletsis, A. (2009). Economic evaluation of energy saving measures in a common type of Greek building. *Applied Energy*, 86(12), 2550–2559.
- Noorpoor, A. R., & Kudahi, S. N. (2015). CO₂ emissions from Iran's power sector and analysis of the influencing factors using the stochastic impacts by regression on population, affluence and technology (STIRPAT) model. *Carbon Management*, 6(3–4), 101–116.
- Pless, S., & Torcellini, P. (2010). Net-zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options. *National Renewable Energy Lab. (NREL)*, Golden, CO (United States).
- Rahnama, E., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Khanali, M., & Rosen, M. A. (2019). Spatio-temporal solar exergoeconomic and exergoenvironmental maps for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 195, 701–711.
- Rhodes, C. J. (2016). The 2015 Paris climate change conference: COP21. *Science Progress*, 99(1), 97–104.
- Seryak, J., Mertz, G., & Raffio, G. (2011). The Path to Net-Zero Energy Manufacturing. *Proceedings of the 2011 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*.
- Tgarguifa, A., Abderafi, S., & Bounahmidi, T. (2018). Energy efficiency improvement of a bioethanol distillery, by replacing a rectifying column with a pervaporation unit. *Renewable Energy*, 122, 239–250.
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero energy buildings: a critical look at the definition. *National Renewable Energy Lab. (NREL)*, Golden, CO (United States).
- Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., Geier, S., Gonçalves, H., Hall, M., Heiselberg, P., Widén, J., Candanedo, J. A., & Musall, E. (2010). Load matching and grid interaction of net zero energy buildings. *EUROSUN 2010 International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*.
- Vourdoubas, J. (2020). Creation of Net Zero Carbon Emissions Agricultural Greenhouses Due to Energy Use in Mediterranean Region; Is it Feasible? *Journal of Agriculture and Crops*, 6(7), 89–95.
- Zhang, J., Zhou, N., Hinge, A., Feng, W., & Zhang, S. (2016). Governance strategies to achieve zero-energy buildings in China. *Building Research and*

Information, 44(5-6), 604-618.
Zinaman, O., Aznar, A., Linvill, C., Darghouth, N.,
Dubbeling, T., & Bianco, E. (2017). Grid-

connected distributed generation: compensation
mechanism basics. *National Renewable Energy
Laboratory*: Golden, CO, USA.