فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال شانزدهم/ شماره ۵۶ / تابستان ۱۴۰۰

تحلیلی بر شاخص هزینه تولید انرژی تجدید پذیر در ایران (مورد مطالعه: نیروگاه فتوولتائیک مقیاس خانگی)

شیرین عزیزی
دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی گرایش مدیریت سیستم‌ها، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
رضا رادفر(نویسنده مسؤول)
گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: radfar@gmail.com
هانیه نیکومرام
گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علی رجب زاده قطری
گروه مدیریت صنعتی. دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۳ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۲/۲۸

چکیده

انرژی تجدیدپذیر نقش مهمی در دستیابی به صرفه جویی در انرژی و کاهش انتشارآلاینده¬ها ایفا می¬کند. به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر پایدار و سازگار با محیط زیست ، سامانه¬های انرژی فتوولتائیک برای تحقیق و توسعه مورد توجه سیاستمداران بخش انرژی کشور است. با این حال ، محاسبه هزینه تولید انرژی فتوولتائیک و تعیین قیمت برق تضمینی بر اساس آن عاملی است که مانع تجاری سازی این صنعت نو ظهور می شود. در این مقاله یک مدل ریاضی برای محاسبه هزینه تولید برق پروژه های فتوولتائیک بر اساس تجزیه و تحلیل دوره عمر نیروگاه به کارگرفته شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر LCOE پروژه های PV انجام شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که فاکتور ظرفیت تاثیرگذارترین متغیر در تعیین مقدار LCOE است. این تحقیق از دولت برای تدوین سیاست های تشویقی برای صنعت پشتیبانی می کند.

کلمات کلیدی: انرژی تجدید پذیر، هزینه همتراز شده انرژی (LCOE) ، انرژی خورشیدی فتوولتائیک، آنالیز حساسیت.

۱-مقدمه

منابع محدود و تخریب محیط زیست دو دلیل اصلی تمرکز دولت ها برای تأمین برق از منابع تجدیدپذیر است. در انواع گوناگون ، آنها علاوه بر تقویت امنیت انرژی و حفظ پایداری در تولید ، با تغییرات آب و هوا نیز مبارزه می کنند (Ahmad, Tahar, Muhammad-Sukki, Munir, & Rahim, 2015) . انرژی های تجدید پذیر به عنوان یکی از بهترین گزینه های جایگزین سوخت های فسیلی شناخته می شوند. با این وجود ، هزینه های بالای سرمایه و تغییر در سطح و ترکیب سرمایه گذاری ، آنها را به منابع انرژی گران تبدیل می کند(Tabatabaei, Hadian, Marzban, & Zibaei, 2017) .

تولید برق از سیستم های انرژی تجدید پذیر به طور فزاینده ای به عنوان یک راه حل امیدوار کننده برای پاسخگویی به تقاضای انرژی فعلی و آینده ذکر می شود (Bilgili, Ozbek, Sahin, & Kahraman, 2015). در مقایسه با روش های سنتی تولید برق که معمولاً از سوخت های فسیلی استفاده می‌شود ، فن آوری های انرژی های تجدیدپذیر به دلیل پایداری ، طبیعت تجدید پذیر و سازگاری با محیط زیست دارای اعتبار هستند(Tran & Smith, 2017) . از طرف دیگر ، هنگامی که هزینه های تولید به عنوان بخشی از ارزیابی های اقتصادی در نظر گرفته می شوند ، فناوری های انرژی تجدیدپذیر ، به ویژه فناوری های نوظهور ، هزینه بیشتری دارند (Tran & Smith, 2018). هزینه تراز شده برق اغلب به عنوان معیاری برای رتبه بندی رقابت فناوری های تولید برق استفاده می شود. LCOE به طور گسترده ای به عنوان یک استاندارد برای مقایسه فن آوری های مختلف استفاده شده است (Tran & Smith, 2018). LCOE ها بر اساس نسبت کل هزینه چرخه عمر پروژه به کل انرژی تولید شده در طول عمر تخمین زده می شوند (NREL, 2019). مقادیر LCOE برای روشهای سنتی (تولید برق حرارتی) تولید برق سازگارتر و مشخص تر است و از تنوع کمتری برخوردار است زیرا روشهای سنتی تولید برق در دوره های طولانی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند. برعکس ، مقادیر LCOE برای فناوری های انرژی تجدیدپذیر به طور پیوسته در حال محاسبه هستند ، زیرا فناوری های انرژی تجدید پذیر برای مدت زمان کوتاه تری مورد استفاده قرار گرفته اند. کمی کردن هزینه های تولید انرژی تجدیدپذیر به دلیل ماهیت انرژی های تجدیدپذیر می تواند چالش برانگیز باشد. همچنین منابع انرژی تجدید پذیر ، مانند انرژی باد و خورشید ، بسیار متناوب هستند. بنابراین برآورد LCOE ها تحت عدم اطمینان و تغییر پذیری می تواند برای ارزیابی صحیح فناوری های انرژی تجدیدپذیر مفید باشد. این موضوع در ادبیات فعلی در انواع مختلف تحلیل مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی هزینه تراز شده سیستم برای فن آوری هایی مانند سوخت های زیستی ، حرارتی خورشیدی ، انرژی اقیانوس ها و PV خورشیدی پیوسته در حال انجام است(Lai & McCulloch, 2017) . بر اساس اطلاعات منتشر شده در آژانس بین المللی انرژی تجدید پذیر در سطح یک کشور ، میانگین وزنی LCOE PV خورشیدی در مقیاس مطلوب[i] بین سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ بین ۶۶ تا ۸۵ درصد کاهش یافته است. در این میان هزینه ماژول های PV خورشیدی کریستالی در اروپا بین دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۹ حدود ۹۰ درصد کاهش یافته است. کل هزینه های PV نصب شده در پشت بام مسکونی به دلیل اندازه کوچک بالاتر از مقیاس مطلوب است ، اما بسته به بازار بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ بین ۴۷ تا ۸۰ درصد کاهش یافته است. همچنین کل هزینه های نصب شده سیستم در بازارهای پشت بام‌های تجاری که داده‌های آن در دسترس است بین سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ بین ۶۴ تا ۸۶ درصد کاهش یافته است (IRENA, 2020). تمامی این موارد حاکی از گسترش روز افزون استفاده از انرژی های تجدیدپذیر از جمله فتوولتائیک ، و توسعه روز افزون فناوری‌های مرتبط با آن‌ها و صرفه جویی‌های ناشی از مقیاس در ابعاد وسیع را بیان می‌کند.

با این وجود انرژی های تجدید پذیر سهم کمی از تولید انرژی در ایران دارند. پایین بودن قیمت سوخت فسیلی و یارانه های مصرف انرژی دلیل اصلی این سهم پایین است (Tabatabaei, Hadian, Marzban, & Zibaei, 2017) . بر اساس گزارش های آماری منتشر شده توسط وزارت نیروی ایران ، سهم سوخت های فسیلی در تأمین کل انرژی اولیه ۹۸.۷۷٪ در سال ۲۰۱۶

بوده است و سهم منابع انرژی تجدید پذیر و انرژی هسته ای به ترتیب ۰.۹۴٪ و ۰.۲۹٪ بوده است(وزارت نیرو ، ۱۳۹۵). شاخص های اقتصاد انرژی ایران بیانگر میزان بالای سرانه مصرف انرژی است. مصرف زیاد سوخت های فسیلی یکی از دلایل اصلی آلودگی هوای ایران است که هزینه های زیست محیطی و اقتصادی زیادی را تحمیل می کند. همین موضوع باعث شده تا چهار شهر از ده شهر برتر آلوده به هوا در جهان در ایران واقع شوند. عرضه انرژی برق در ساعات اوج مصرف در بعد از ظهرهای تابستان نیز یک مشکل جدی است. بنابراین ساخت نیروگاه های جدید ، به ویژه سیستم های تجدید پذیر با اولویت ساخت در آب و هوای گرم ، الزام آور می‌باشد (Mousavian, Shakouri, Mashayekhi, & Kazemi, 2020) (Bakhshi & Sadeh, 2018).

در این میان مواردی همچون تعیین قیمت تضمینی انرژی تجدیدپذیر در سیاست تشویقی خرید تضمینی برق تولید شده از منابع تولید تجدید پذیر و نیز ارزیابی تقریبی میزان هزینه های نصب نیروگاه های تولید انرژی تجدیدپذیر و جریان‌های نقدی حاصل از آن به منظور تقویت امنیت اقتصادی سرمایه‌گذاران از چالش‌های پیش رو در این زمینه می‌باشد. همانگونه که پیشتر اشاره شد تعیین هزیته های انرژی تجدیدپذیر از منابع متنوع ان سال‌هاست که در کشورهای پیشرو به جهت تعیین مسیر درست سیاست-گذاری با دقت رصد می‌شود. لذا این پژوهش بر آن است که با توجه به اهمیت تعیین هزینه برق تولیدی در تعیین سیاست‌گذاری حمایت از توسعه تجدیدپذیر در کشور و نقش برجسته سیستم‌های تولید برق فتوولتائیک در این زمینه، به تحلیلی جامع بر ابعاد آن در مقیاس خانگی بپردازد و از طریق آنالیز حساسیت متغیرهای تاثیرگذار بر اجزای تشکیل دهنده آن به رویکردی تقویت کننده برای توسعه این بخش دست یابد. نبودن آمار و اطلاعات مناسب در کشور در بخش انرژی های تجدیدپذیر از محدودیت-های انجام این پژوهش است.

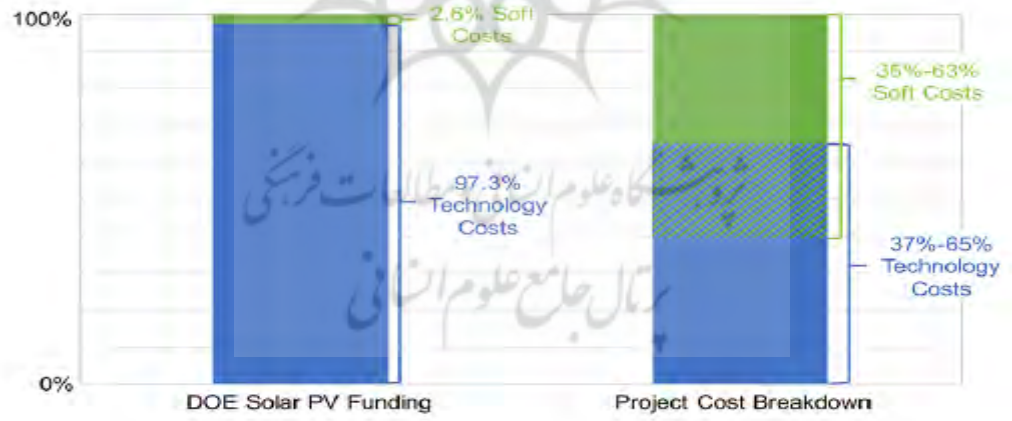
الف) مبانی نظری و پیشینه پژوهش

توسعه پویا اقتصاد ملی به افزایش چشمگیر تقاضا برای انرژی وابسته است. مصرف منابع فسیلی برای تولید گرما و تولید برق برابر است با تقریباً ۷۵٪ ، برای تولید سوخت – حدود ۲۰٪ ، و تنها چند درصد برای تولید مواد شیمیایی و سایر مواد می‌باشد. منابع متعارف انرژی مانند کربن، گاز طبیعی و نفت دیگر برای تأمین تقاضای اقتصاد جهانی کافی نیستند (Rosales-Calderon, 2019). افزایش سریع شدت انرژی در بسیاری از صنایع ممکن است باعث کاهش و اتمام این منابع شود. کارشناسان هشدار می دهند که با مصرف فعلی انرژی ، منابع غیر تجدیدپذیر ممکن است به زودی و تا سال ۲۰۴۰ مصرف شود (Marks-Bielska, Bielski, Pik, & Kurowska, 2020). تولید برق در ایران بیشتر بر اساس احتراق گاز طبیعی ، گازوئیل و مازوت است. بنابراین ، از آنجا که احتمال اتمام و یا فرسایش منابع آنها واقعی به نظر می رسد و همچنین به منظور تحقق تعهدات خود در قبال سازمان‌های جهانی مقابله با تغییرات آب و هوایی و پیمان‌های مرتبط با ان‌ها مانند پیمان کیوتو و توافق نامه پاریس ، دولت ایران باید اقدامات خود را برای ارتقا منابع تجدیدپذیر انرژی (RES) در کشور تشدید کند. یکی دیگر از موضوعات مرتبط ، آلودگی روزافزون محیط زیست و تغییرات آب و هوایی ناشی از منابع متداول انرژی است (Zawalińska, Kinnunen, Gradziuk, & Celińska-Janowicz, 2020). انرژی به عنوان عامل اصلی در تغییر آب و هوا در نظر گرفته می شود ، که در حدود ۶۰٪ از کل انتشار گازهای گلخانه ای جهانی را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب ، تخمین زده می شود که در سال ۲۰۱۲ ، آلودگی هوای داخل ساختمان ناشی از استفاده از سوخت های قابل احتراق برای انرژی خانگی باعث ۴.۳ میلیون مرگ در سراسر جهان شده است (WHO, 2019). در طی فرآیند تولید برق بر اساس منابع متداول(حرارتی) ، بسیاری از مواد خطرناک در آبها و جو آزاد می شوند. علاوه بر این ، محیط زیست توسط گرد و غبار آلوده پیوسته در معرض آلودگی است. بنابراین ، بسیاری از سازمان ها مانند اتحادیه اروپا اقداماتی را برای حفاظت از محیط زیست و ترویج راه حل های جایگزین برای توسعه منابع انرژی از راه‌هایی غیر از مصرف سوخت‌های فسیلی آغاز کرده اند(Zhai, Hu, & Saddler, 2016) . جوامع مدرن بیشتر از مشکلات زیست محیطی در سطح جهانی آگاه هستند. این امر منجر به افزایش علاقه به انرژی از منابع تجدید پذیر یا

به عبارت دیگر استفاده از تابش خورشید ، باد ، زیست توده ، آب و منابع زمین گرمایی برای تولید انرژی شده است (Zhai, Hu, & Saddler, 2016). منابع تجدیدپذیر انرژی به صورت نامحدود تأمین می شوند، آنها گازهای گلخانه ای یا حتی مقدار ناچیزی از آنها را در جو منتشر نمی کنند و قیمت تولید انرژی از آنها با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژیکی و کاهش هزینه استفاده از آن‌ها از منابع حرارتی کمتر است (Marks-Bielska, Bielski, Pik, & Kurowska, 2020) .

انرژی خورشیدی بخش مهمی از سبد انرژی آینده بدون کربن است. در حال حاضر پیش بینی می شود که در ۲۰ سال آینده سهم کل تولید برق خورشیدی با ضریب ۱۰ رشد کند (Energy, 2019). دفتر فن آوری های انرژی خورشیدی بیان می دارد که هدف "کاهش هزینه های گسترده" برای انرژی خورشیدی در اولویت کاری آن‌ها قرار دارد(Energy U. D., 2020) . در این میان LCOE معیار مناسبی برای مقایسه رقابت پذیری هزینه منابع مختلف انرژی است (Information, 2020). دپارتمان انرژی DOE از LCOE برای اندازه گیری میزان انرژی خورشیدی قابل مقایسه با سوخت های فسیلی سنتی استفاده می کند و به همین ترتیب ، توسعه دهندگان صنعت خورشیدی از LCOE برای اندازه گیری دوام اقتصادی پروژه های خود به انجام این محاسبات نیازمندند (Syal & MacDonald, 2020).

لاکن فرآیند توسعه نیروگاه‌های خورشیدی یک سیستم پیچیده و فنی است و کل هزینه های پروژه شامل هم فناوری و هم هزینه های انسانی است که به آن "هزینه های نرم" نیز می گویند. NREL هزینه های نرم را به عنوان جذب مشتری ، کسب مجوز ، اتصالات متقابل ، نیروی کار نصب ، مالیات ، هزینه های غیر مستقیم ، زنجیره تأمین و هزینه های تامین مالی تعریف می کند (Beck & Rai, 2020) در حالی که هزینه های فناوری مربوط به سخت افزار است ، مانند پنل ها و اینورترها. هزینه های نرم بسیار متغیر است ، بسته به اندازه پروژه می تواند ۳۵٪ -۶۳٪ از کل هزینه های پروژه را تشکیل دهد(شکل شماره ۱) (Fu & Margolis, 2018).

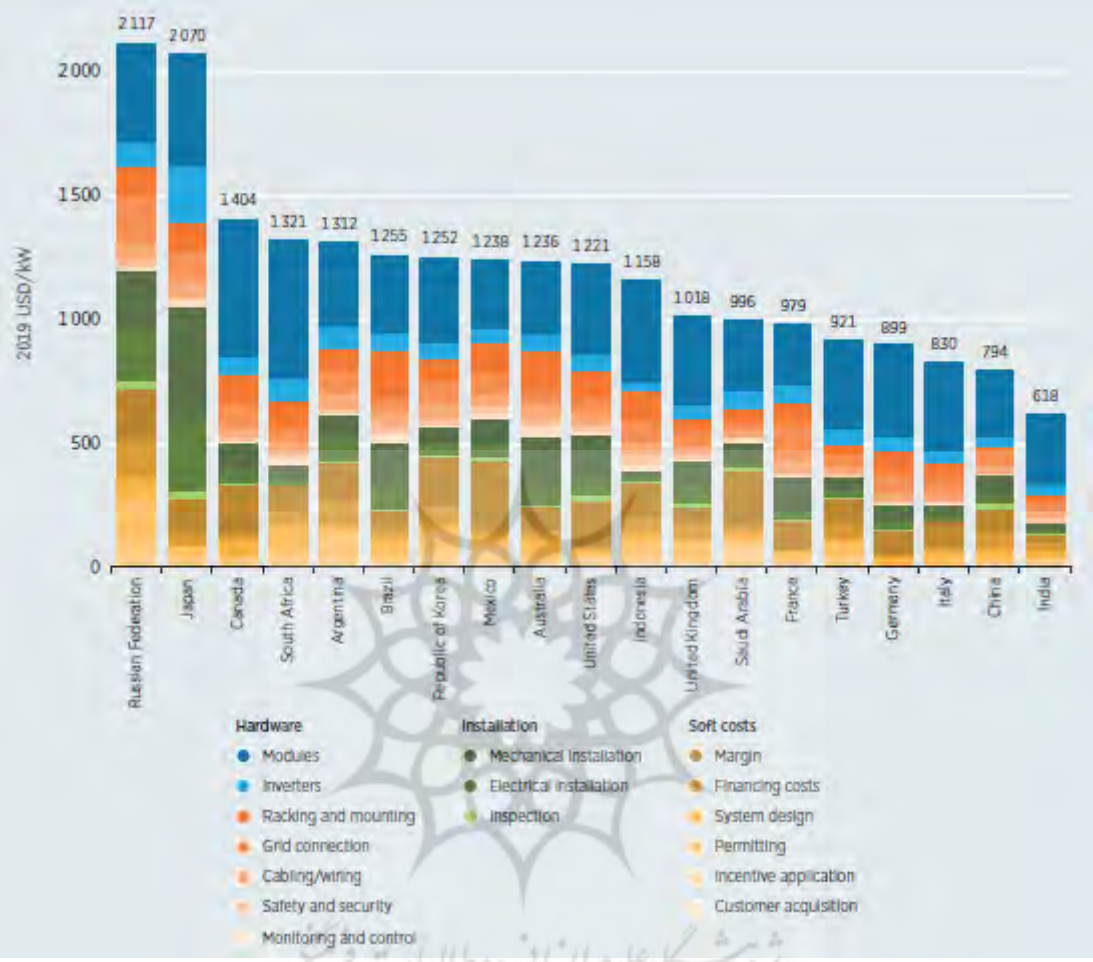


شکل شماره (۱): اختصاص بودجهR&D توسعه خورشیدی DOE در مقایسه با شکست هزینه پروژه PV
(Fu & Margolis, 2018)(Congress, 2020)

همان‌طور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است هزینه سرشکن شده تولید و نصب فناوری در کشورهای مختلف متفاوت است و دامنه هزینه‌ای آن نیز از کشوری به کشور دیگر متمایز است. همان طور که مشخص است هزینه نصب فناوری در کشور هند کمترین و کشور روسیه بیشترین رقم در سال ۲۰۱۹ می‌باشد.

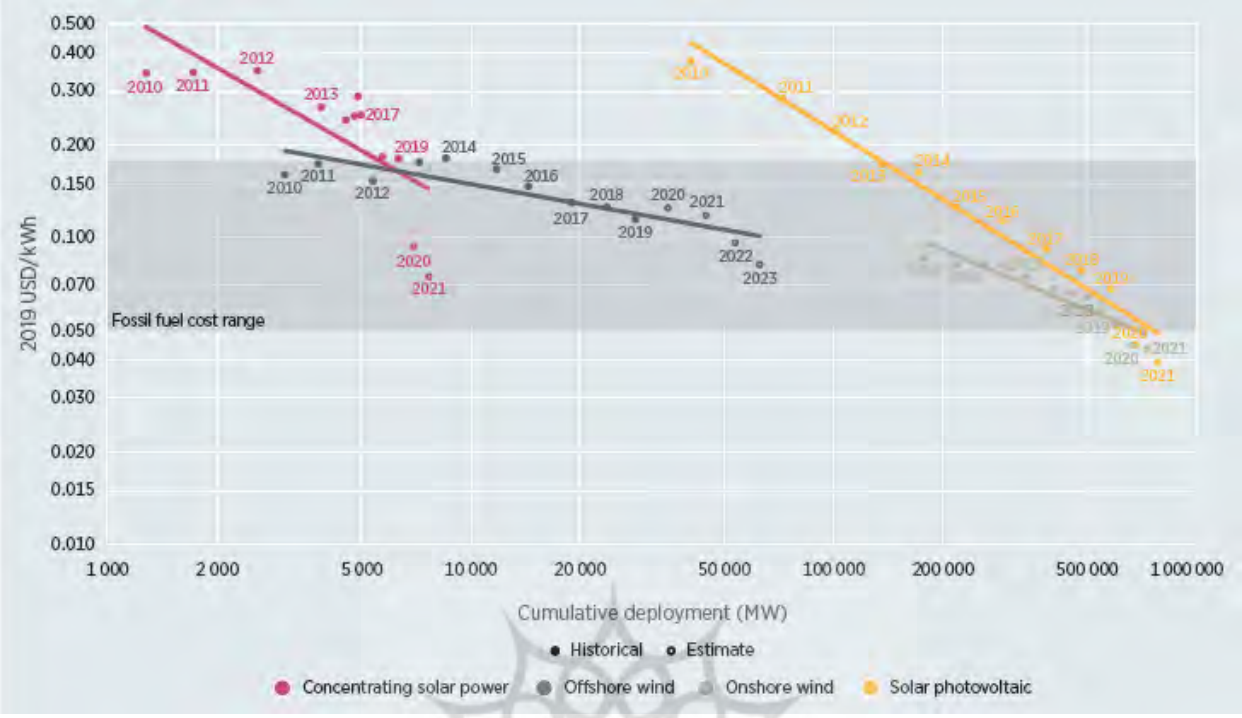
داده‌های منتشر شده از منابع متعدد نشان می‌دهد که هزینه نصب فناوری تجدیدپذیر خورشیدی با میزان نفوذ و بکارگیری انبوه فناوری در سطح کشور در ارتباط است. همچنین دسترسی به بودجه کاملاً رقابتی(هزینه تامین منابع مالی) عمر اقتصادی طولانی

و اثرات یادگیری توسعه فناوری (شکل شماره (۳)) از عوامل موثر تاثیرگذار در قیمت نهایی است که هزینه های نصب را کـاهش می دهد (IRENA, Renewable Cost Database, 2019).



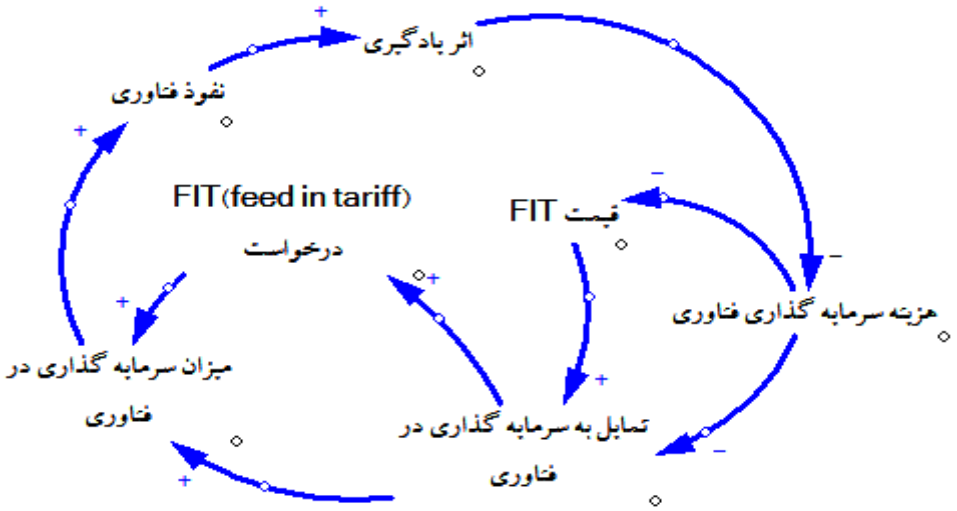
شکل شماره (۲): تفکیک جزئی هزینه های نصب شده PV خورشیدی در مقیاس مطلوب بر اساس کشور (IRENA, Renewable Cost Database, 2019)

در شکل شماره (۳) روند متوسط جهانی LCOE و PPA برای روند خورشیدی PV، CSP ،نیروگاه بادی(خشـکی و سـاحلی) از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ (یا ۲۰۲۳، در مورد باد دریایی) را نشان داده شده که در برابر گسترش استفاده از آن‌ها طراحی شده است. بـا قـرار دادن هر دو این متغیرها در مقیاس لگاریتمی (log-log)، خط موجود در نمودارها میزان یادگیری این فناوری هـا را نشـان مـی دهد. نرخ یادگیری متوسط کاهش هزینه است که برای هر دو برابر ظرفیت نصب شـده تجمعـی تجربـه مـی شـود (IRENA, Renewable Cost Database, 2019). ارتباط متقابل اثرگذاری نرخ یادگیری بر هزینه همتراز شده انرژی مقوله‌ایست کـه در اسناد متعدد به کرات به ان پرداخته شده است. کاهش هزینه های فناوری انرژی نتیجه بسیاری از روندهای نـوآوری در سیسـتم انرژی است (Elia, Kamidelivand, Rogan, & Gallachóir, 2021)که به نوبه خود با هزینه نصب تکنولوژی و میزان نفوذ بکارگیری آن در ارتباط مستقیم و متقابل است.



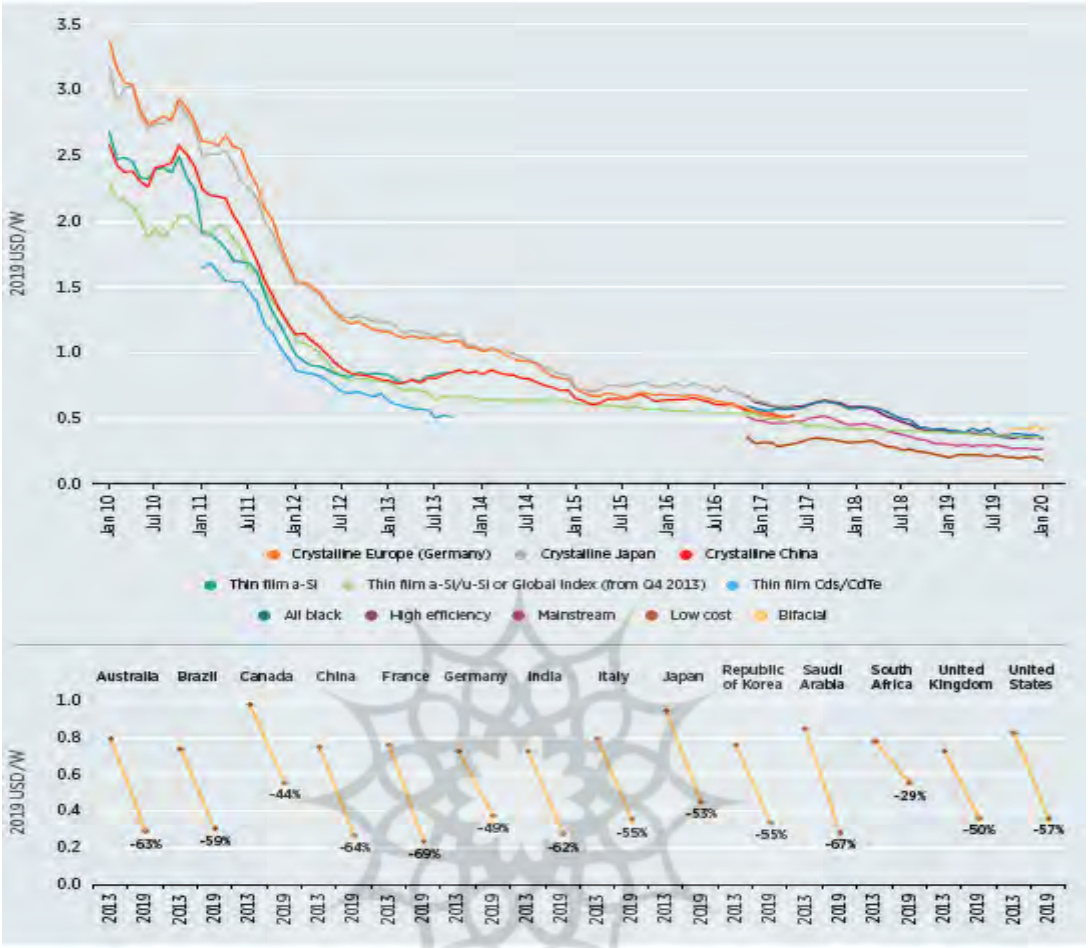
شکل شماره (۳): روند میانگین منحنی یادگیری قیمت LCOE و حراج PPA/ با میانگین وزنی جهانی برای PV خورشیدی ، CSP ، باد خشکی و دریایی ، ۲۰۱۰-۲۰۲۱/۲۰۲۳ (IRENA, Renewable Cost Database, 2019)

براین اساس همان‌طور که مشخص است PV خورشیدی در مقیاس مطلوب دارای بالاترین میزان یادگیری برای هزینه تولید برق در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ ، به میزان ۳۶٪ است که نشان دهنده گسترش روزافزون استفاده از این انرژی و در نتیجه بروز اثرات یادگیری و مقیاس در سطحی قابل توجه است.از طرف دیگر این نرخ رشد یادگیری و نفوذ تکنولوژی تا حد زیادی پیامدی از سیاست‌های کلان توسعه منابع انرژی و برنامه‌ریزی سبد تکنولوژی مطلوب مورد نظر در کشورهای مختلف است که بیش از پیش اهمیت سیاست‌گذاری کلان مناسب را در تنظیم شدت رشد فناوری و صنعت آشکار می‌کند . با استفاده از داده های حراج و PPA و افزایش سری زمانی تا سال ۲۰۲۱ ، میزان یادگیری به ۴۰٪ افزایش می یابد ، دوره ای که ۹۵٪ ظرفیت نصب شده تجمعی برای این فناوری اضافه می شود. این نرخ های یادگیری نرخ کاملا قابل توجه تقلیل قیمت‌ها برای باد و به ویژه فناوری های انرژی خورشیدی را نشان می دهد (IRENA, Renewable Cost Database, 2019). همان طور که اشاره شد ارائه تخمینی منطقی از هزینه تراز شده فناوری می‌تواند در اتخاذ سیاست‌های حمایتی انرژی‌های تجدید پذیر و همچنین ارسال سیگنال‌های مرتبط با امنیت سرمایه‌گذاری و در نتیجه میزان سرمایه‌گذاری نقش برجسته‌ای را ایفا کند این به نوبه خود بر نرخ یادگیری و به دنبال آن بر هزینه‌های نصب فناوری و توسعه سیستم تاثیرگذار خواهد بود و این چرخه همچنان ادامه دارد(شکل شماره).



شکل شماره (۴): چرخه تاثیر هزینه سرمایه گذاری تجدیدپذیر بر گسترش آن(محقق ساخته)

در ادامه بررسی روند توسعه انرژی فتوولتائیک شکل شماره (۵) روند کاهش قیمت ماژول های خورشیدی درکشورهای مختلف و میزان کاهش آن را به ترتیب برای آن‌ها به تصویر کشیده است. همان طور که مشاهده می‌شود روند کاهش قیمت فناوری در کشورهایی که برنامه های مدون به منظور توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر دارند به میزان بیشتری است. سیاست کشورهای پر جمعیتی مانند هند و چین که دسترسی به سوخت فسیلی و همچنین تبعات زیست محیطی گسترده آن اولویت سیاست های کلان آن‌ها را به توسعه هر چه بیشتر این انرژی‌ها سوق داده است، موید این مطلب است. اشکال مختلف انرژی های تجدیدپذیر چالش های مختلفی از جمله راهبردهای سیاسی ، تعهد دولت ، آگاهی عمومی ، هزینه و ادغام با شبکه محلی و سیستم موجود را دارند (Liang, 2017). آل مأماری و همکاران حمایت دولت از قیمت برق و سوخت را مانع اصلی در استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند خورشیدی در سطح فردی در کشورهای شورای همکاری خلیج فارس دانست. او در پژوهش خود صریحا اشاره کرده که این واقعیت به واسطه بررسی تعرفه برق در کشورهای شورای همکاری خلیج فارس به خوبی ثابت شده است(Al-Maamary, Kazem, & Chaichan, 2017) .. ترن و اسمیت در پژوهش خود ترکیب تحلیل‌های عدم قطعیت و حساسیت عملکرد محور برای محاسبه LCOE انرژی‌های تجدیدپذیر نوظهوررا بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که چگونه عدم قطعیت در داده های ورودی می تواند به طور قابل توجهی بر مقادیر LCOE تأثیر بگذارد (Tran & Smith, 2018). در پژوهشی که با عنوان "تجزیه و تحلیل LCOE نیروگاه های خورشیدی متمرکز بر برج با استفاده از نمک های مذاب مختلف برای ذخیره انرژی گرمایی " در چین انجام شد، با استفاده از یک مدل ترازبندی هزینه الکتریسیته (LCOE) برای نیروگاه های برج CSP ۱۰۰مگاواتی در پنج مکان در چین با چهار نمک مذاب مختلف برای ذخیره انرژی گرمایی، یک تحلیل اقتصادی انجام پذیرفت (Zhuang, Xu, Liu, & Xu, 2019).



شکل شماره (۵): میانگین قیمت ماهانه ماژول PV خورشیدی توسط فناوری و کشور سازنده در اروپا ، ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ (بالا) و متوسط قیمت سالانه ماژول بر اساس بازار در سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ (پایین) (IRENA, Renewable Cost Database, 2019)

هرناندزمورو و مارتینزدوارت یک مدل ریاضی از هزینه تراز شده برق (LCOE) برای برآورد هزینه تولید برق نیروگاه های CSP ایجاد کردند. در این مطالعه تکامل آینده (۲۰۱۰–۲۰۵۰) LCOE ها بر اساس نقشه راه آژانس بین المللی انرژی برای ظرفیت نصب شده تجمعی پیش بینی شد. مشخص شد که LCOE های پیش بینی شده ، نه تنها به مقادیر تجمعی ظرفیت نصب شده در سالهای هدف ، به شدت وابسته است ، بلکه منحنی‌های مسیرهای زمانی خاص را دنبال می کند (Hernández Moro & Martínez Duart, 2012) (Hernández-Moro & Martínez-Duart, 2013). پرادو و همکاران از مدل LCOE برای تجزیه و تحلیل اقتصادی برای یک نیروگاه ۵۰ مگاواتی انرژی خورشیدی متمرکز با پنج ماده ذخیره سازی جدید در شمال شیلی بین سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۵۰ استفاده کردند. نتایج نشان داد که نمک های مذاب جدید به ویژه نمک مذاب متشکل از کلسیم $Ca(NO_3)_2$-$NaNO_3$-KNO_3 (۴۵-۷-۴۸درصد وزنی) می توانند هزینه های ذخیره سازی نیروگاه‌های CSP ، را کاهش دهند (Parrado, Marzo, Fuentealba, & Fernández, 2016). در مقاله با عنوان "کمی کردن اهمیت هزینه های نرم خورشیدی: یک روش جدید برای استفاده از تجزیه و تحلیل و آنالیز حساسیت به یک تابع ارزش"، یک مدل هزینه‌ای برای محاسبه LCOE توسعه انرژی خورشیدی در مقیاس مطلوب با استفاده از فناوری و هزینه های نرم ساخته شده و تجزیه و تحلیل حساسیت را برای تعیین میزان تأثیر ورودی ها بر LCOE انجام داده است (Syal & MacDonald, 2020). در مطالعه " بررسی جامع هزینه متغیر انرژی تجدید پذیر متغیر برق" ، مطالعات موجود مقاله های دانشگاهی و گزارش های فنی خلاصه

شده و پیشنهاداتی را برای مطالعات آینده ارائه می دهد و در تلاش است روش مناسبتری برای محاسبه هزینه متغیر LCOE ارائه دهد (Shen, et al., 2020). در مطالعه‌ای که با عنوان "مدلسازی LCOE برای پروژه های متمرکز انرژی خورشیدی: مورد مطالعه : چین" انجام شد، یک مدل ریاضی LCOE برای محاسبه هزینه تولید برق نیروگاه‌های گرمایش خورشیدی بر اساس تجزیه و تحلیل ساختار هزینه در طول دوره عمر ساخته شده است. همچنین آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر LCOE پروژه های CSP انجام شده است. متغیرهای در نظر گرفته شده در این مطالعه هزینه سرمایه گذاری در طول دوره ساخت ، هزینه بهره برداری و نگهداری سالانه ، تولید برق سالانه و نرخ تنزیل است. سرانجام ، تأثیر سیاست های تشویقی مانند وام های امتیازی ، حمایت مالیاتی و هزینه زمین صفر برای نیروگاه ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این تحقیق روش جدیدی را برای محاسبه هزینه تولید برق پروژه های CSP ارائه می دهد و از دولت ها برای تدوین سیاست های تشویقی برای صنعت پشتیبانی می کند (Yu Zhao, Long Chen, & Thomson Douglas, 2017).

در مقاله‌ای که با عنوان "یک رویکرد احتمالی برای محاسبه هزینه تراز شده" یک روش جدید برای محاسبه هزینه تراز شده برق با استفاده از یک مدل احتمالی که پارامترهای ورودی درون زا را محاسبه می کند ، ارائه شده است. این رویکرد به عنوان مثال پروژه انرژی هسته ای و گازی اعمال می شود .نتایج شبیه سازی مونت کارلو نشان می دهد که همبستگی بین پارامترهای ورودی تأثیر مهمی بر نتیجه مدل دارد. با کنترل درون زایی ، اختلاف آماری معنی داری در برآورد میانگین LCOE و تغییر در ترتیب اهرم های ورودی مشاهده می شود. علاوه بر این ، مقاله به طور جزئی در مورد نقش گزینه های تنزیل و هزینه های خارجی بحث می کند(Geissmann & Ponta, 2017) . در مطالعه‌ای که با عنوان "مقایسه اقتصادی فناوری تولید برق از نیروگاههای گرمایش خورشیدی، فتوولتائیک وترکیبی با رویکرد فازی" انجام پذیرفت، هزینه ی ترازشده ی واحد انرژی الکتریکی نیروگاه گرمایش خورشیدی ، نیروگاه فتوولتائیک و ترکیبی با استفاده از مفاهیم فازی در مدل های اقتصادی فازی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیشبینی هزینه های مرتبط با آن برای ایران محاسبه و مقایسه شده است.

۲- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش به منظور تعیین هزینه همتراز شده انرژی برق حاصل شده با تکنولوژی فتوولتائیک، از مدل و معادلات منتشر شده توسط آژانس انرژی تجدیدپذیر ایالات متحده با عنوان مدل CREST استفاده شده است. بدین منظور با هدف تعیین پارامترهای ورودی مدل از مطالعات گسترده کتابخانه‌ای و همچنین مصاحبه با فعالان صنعت تولید انرژی برق فتوولتائیک بهره گرفته شد. در گام اول هزینه همتراز شده برق برای حالت پایه انجام شده است و سپس روی نتایج حاصل از تغییرات هزینه همتراز شده همزمان با تغییرات پارامترهای تاثیرگذار بر آن آنالیز حساسیت بر اساس تحلیل OAT انجام گرفته است و در گام بعد ضریب وزنی تاثیرگذاری هر متغیر محاسبه و رتبه‌بندی شده است.

الف) گردآوری و تحلیل داده‌ها

همان‌طورکه بیان شد در این مطالعه برای تخمین LCOE و آنالیز حساسیت آن از ساختارها و معادلات مدل‌های منتشر شده توسط NREL استفاده شده است. مدل بکارگرفته شده به منظور محاسبه LCOE نیروگاه‌های فتوولتائیک در مقیاس ۱۰۰ کیلو وات استفاده می‌شود. در ادامه روابط در نظر گرفته شده در مدل CREST به شرح زیر ارائه می‌شود.

LCOE توسط رابطه ۱ محاسبه شده است(Short, Packey, & Holt, 1995) :

رابطه شماره ۱

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_{n=1}^{N} \frac{c_n}{(1+d_m)^n}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{Q_n}{(1+d_r)^n}}$$

که dr و dm به ترتیب نرخ تنزیل واقعی و اسمی هستند ، C0 سرمایه گذاری اولیه پروژه است ، Cn هزینه های سالانه پروژه در سال n، Qn برق تولید شده در سال n و N عمر پروژه است. بخشهای زیر هر یک از اجزای LCOE را بیشتر توصیف می کند.

نرخ تنزیل اندازه‌گیری ارزش زمانی پول است و به طور ذهنی توسط سرمایه گذار پروژه تعیین می شود (National Renewable Energy Laboratory, 2020). سرمایه گذاران معمولاً از تجربیات گذشته و مشاوره مشاوران خارجی برای ارزیابی مناسب هزینه سرمایه پروژه و تعیین نرخ تنزیل واقعی استفاده می کنند (Freyman & Tran, 2019). بنابراین ، اطلاعات بسیاراندکی در مورد مقادیر واقعی تخفیف برای پروژه های خورشیدی منتشر شده است. نرخ اسمی تخفیف بر اساس نرخ واقعی تخفیف و تورم محاسبه می شود (Syal & MacDonald, 2020). سرمایه گذاری اولیه نیروگاه براساس معادله ۲ از ابزار NREL (CREST) محاسبه شده است (National Renewable Energy Laboratory, 2020).

معادله شماره ۲
$$C_0 = C_G + C_B + C_I + C_D + C_F$$

که CG هزینه تجهیزات تولید است ، CB هزینه تراز کارخانه است ، CI هزینه اتصالات داخلی است ، CD هزینه توسعه و دستمزدها است و CF هزینه تأمین مالی و ذخایر مالی مورد نیاز است. هزینه تجهیزات تولیدی وتراز هزینه کارخانه به شرح زیر محاسبه می شود:

رابطه شماره ۳
$$C_G = G*(C_P + C_V)$$

رابطه شماره ۴
$$C_B = G*(C_M + C_T + C_W)$$

که CP هزینه هر وات ماژول های PV است ، CV هزینه هر وات اینورتر ، CM هزینه هر وات تجهیزات نصب ، CT هزینه هر وات تجهیزات انتقال و CW هزینه هر وات سیم کشی است تجهیزات. هزینه اتصالات داخلی مستقیماً وارد مدل می شود. هزینه توسعه در مراحل زیر محاسبه می شود. هزینه توسعه اولیهCD1 شامل هزینه مجاز CP ، هزینه تملک صاحب زمین به ازای هر وات Ca و هزینه کار و ساخت و ساز به ازای هر وات می باشدCl:

رابطه شماره ۵
$$C_{D1} = C_P + G*(C_a + C_l)$$

مالک نیروگاه برای تهیه مواد و ساخت و اجرای پروژه یک EPC استخدام می کند .یک درصد سربار OEPC، در هزینه های توسعه اولیه و هزینه تجهیزات اخذ می‌کند (رابطه ۶).

رابطه شماره ۶
$$C_{D2} = C_{D1} + O_{EPC} \times (C_{D1} + C_G + C_B)$$

و همچنین یک درصد سود اضافی ، PEPC ، در مورد تمام هزینه های توسعه و هزینه های تجهیزات (رابطه شماره ۷).

رابطه شماره ۷
$$C_{D3} = C_{D2} + P_{EPC} \times (C_{D2} + C_G + C_B)$$

سپس توسعه دهنده ، برای تمام هزینه های توسعه ای که تا این لحظه انجام شده است ، شرایط احتمالی c را اضافه می کند ، و همچنین یک درصد سربار ODEV تا در نهایت هزینه کل ساخت و اجرا و توسعه محاسبه شود(رابطه شماره ۸).

رابطه شماره ۸
$$C_D = C_{D3}(1 + C + O_{DEV} + C * O_{DEV})$$

هزینه‌های تامین مالی شامل هزینه‌های تشکیل وام توسط وام دهنده(تنظیم) با نرخ l که بر روی کل مبلغ وام سرشکن می‌شود، نسبت وام به کل سرمایه PD، نرخ بهره دوره ساخت ic، و هزینه اندوخته مالی مورد نیاز(حاشیه امن مالی برای تعمیرات و پرداخت اقساط و ...)می‌باشد(رابطه شماره ۹)

رابطه شماره ۹
$$C_F = (l * p_D * (C_G + C_B + C_I + C_D)) + (i_c * C_0) + C_R$$

اندوخته های مورد نیاز به اصل وام ماهانه ، میزان سرمایه ، نرخ بهره ، و متوسط هزینه پروژه ماهانه بستگی دارد. در این پژوهش دوره ۳ ماهه ذخیره احتیاطی منابع مالی لحاظ می‌شود(mr)(رابطه ۱۰).

رابطه شماره ۱۰
$$C_R = m_r * (P_l + i_l + \frac{\overline{C_n}}{12})$$

هزینه سالانه پروژه Cn ، طبق مدل CREST از طریق رابطه شماره ۱۱محاسبه می شود (National Renewable Energy Laboratory, 2020).

$$C_n = F_n + V_n + I_n + P_n + L_n + T_n$$ رابطه شماره ۱۱

که در سال n ، Fn هزینه ثابت عملیات و نگهداری(O&M)، Vn هزینه متغیر O&M، I_n هزینه بیمه، Pn هزینه‌های اداری پروژه ، Ln هزینه اجاره زمین و Tn هزینه مالیات است.

برق تولید شده در سال به میزان کارآیی صفحات خورشیدی و آفتابی بودن محل پروژه بستگی دارد(رابطه شماره ۱۲) (National Renewable Energy Laboratory, 2020).

$$Q_n = \begin{cases} G * NCF * 8760 & n = 1 \\ Q_{n-1} * (1-d) & n > 1 \end{cases}$$ رابطه شماره ۱۲

که NCF فاکتورظرفیت خالص است که در این مطالعه آن را میانگین فاکتور ظرفیت در سال در نظر می‌گیریم و d درجه تخریب پروژه است. مقدار ثابت ۸۷۶۰ معادل تعداد ساعت‌های یک سال است. لازم به ذکر است ابعاد پروژه مورد بررسی ۱۰۰ کیلو واتی(حداکثر مقیاس تولید برق تجدیدپذیرمسکونی در ایران) لحاظ شده است. مقادیر و پارامترهای مدل به شرح جدول شماره ارائه می‌شود.

جدول شماره (۱): پارامترهای ورودی مدل

۱۰۰ کیلو وات	ظرفیت نیروگاه خورشیدی	ظرفیت اسمی نیروگاه
۲۵ سال	تعداد سال‌هایی که پروژه دوام خواهد داشت	طول عمر نیروگاه
٪۳۰/۵	نرخ تورم برابر اعلام صندوق بین المللی پول	نرخ تورم
۱ ماه	تعداد ماه‌های مورد نیاز برای ساخت قبل از نصب پروژه	دوره ساخت
٪۱۸		نرخ بهره دوره ساخت
٪۱۲	نرخی که بر اساس آن ارزش فعلی جریانات نقدی آتی محاسبه می‌شود	نرخ تنزیل
۳ ماه	تعداد ماه‌های مورد نیاز بودجه ذخیره‌ای توسط مالک	ذخایر مورد نیاز
۱۰۰۰۰۰۰ ریال		نرخ بیمه در زمان ساخت
در این مطالعه فرض می‌شود مالک نیروگاه از پرداخت مالیات معاف است	تعیین اینکه آیا مالک مالی پروژه یک نهاد مشمول مالیات است؟	مالک یک نهاد مشمول پرداخت مالیات است؟
٪۱/۲	زمان‌بندی ای در طی آن ارزش دارایی های نیروگاه خورشیدی کاهش می یابد	استهلاک
	تعداد سال‌ها برای جایگزینی اینورتر	جایگزینی
۲۶۰۰۰۰ ریال	مرجع نرخ ارز در این مطالعه قیمت دلار آمریکا در تاریخ انجام پروژه است	نرخ ارز ($)

(World economic outlook, 2020) (Mohammadi, Naderi, & Saghafifar, 2018)(Limmanee, et al., 2017)

پس از محاسبه مقادیر هر یک از پارامترها توسط منابع مطالعاتی و روابط ارائه شده، و همچنین تعیین درصد مشارکت هریک از اجزا در محاسبه هزینه کل، ستون درصد از کل هزینه برای اجرای مدل در حالت پایه و همچنین دامنه تغییرات هزینه‌ها به شرح جدول شماره ارائه می‌شود.

جدول شماره (۲): ورودی های مورد استفاده در مدل پایه و در آنالیز حساسیت ، محدوده های ارزشی در نظر گرفته شده ، طبقه بندی هزینه های فنی و تکنولوژیکی در مقابل هزینه‌های نرم

طبقه‌بندی	دامنه تغییر	درصد از کل هزینه	شرح متغیر	نام متغیر
هزینه تکنولوژی	٪۳۰–٪۴۰	٪۳۸		۱ هزینه تجهیزات عمومی

	پنل	هزینه ماژول های فتوولتائیک مورد نیاز پروژه	٪۲۹		
	اینورتر	هزینه اینورترهای مورد نیاز پروژه	٪۹		
۲	هزینه تراز نیروگاه	هزینه تجهیزات لازم برای نصب ماژول های PV و اینورترها و هزینه تجهیزات انتقال مورد نیاز برای اتصال پروژه به شبکه برق	٪۱۰	٪۱۲-٪۸	هزینه تکنولوژی
۳	هزینه اتصالات	هزینه مطالعه اتصال و ارتقا به شبکه، مورد نیاز برای اتصال پروژه به شبکه برق	٪۱	٪۱/۲-٪۰/۸	هزینه نرم
۴	هزینه‌های توسعه و دستمزدها				هزینه نرم
	هزینه‌های مجوز	هزینه اخذ مجوزهای لازم برای ساخت پروژه	٪۲	٪۲/۴-٪۱/۶	
	هزینه های نصب توسط نیروی کار		٪۱۰	٪۱۲-٪۸	
	هزینه سربار	سربار مورد نیاز EPC برای ساخت پروژه(سربار مورد نیاز توسعه دهنده ، ممکن است شامل خدمات حقوقی و غیره باشد. که شامل حقوق و دستمزد (به استثنای پرداخت به منظور کسب مجوز) ، امکانات ، اداری ، مالی ، حقوقی ، فناوری اطلاعات و سایر عملکردهای شرکتی و همچنین هزینه های دفتر می شود.	٪۲۲	٪۱۷/۶ – ٪۲۶/۴	
۵	سود مورد نظر شرکت		٪۱۰	٪۱۲-٪۸	هزینه نرم
۶	مالیات شرکت توسعه دهنده		٪۵		هزینه نرم
۷	پارامترهای وام و بدهی				هزینه نرم
	درصد وام از کل هزینه پروژه	درصدی از هزینه کل پروژه که توسط مالک نیروگاه وام گرفته می‌شود	٪۰	٪۶۰-٪۴۰-٪۲۰	
	دوره بازپرداخت وام	تعداد سال‌های باز پرداخت وام اخذ شده	۵ سال		
	نرخ بهره بازپرداخت وام	نرخ بهره‌ای که وام بانکی بازپرداخت می‌شود	٪۱۸	٪۱۸-٪۱۵-٪۱۳-٪۱۰-٪۶	
۸	هزینه ثابت عملیات و نگهداری		$/kW-۳(yr)	۳/۶ -۲/۴ $/kW-yr	هزینه تکنولوژی
	نرخ تورم هزینه تعمیرات و نگهداری در ۱۰ سال اول پروژه		٪۲۰		هزینه تکنولوژی
	نرخ تورم هزینه تعمیرات و نگهداری در ۱۰ سال دوم پروژه		٪۱۰		هزینه تکنولوژی
۹	فاکتور ظرفیت	میانگین ظرفیت عملی تکنولوژی‌های موجود	٪۱۸	٪۲۱/۶-٪۱۴/۴	هر دو
۱۰	نرخ استهلاک پروژه	درصدی که پروژه در طی هر سال مستهلک می‌شود و از ارزش پولی و راندمان آن کاسته می‌شود	٪۱/۲	٪۱/۴۴ – ٪۰/۹۶	هزینه تکنولوژی

هزینه نرم	٪۱۰–٪۱۸	٪۱۵	نرخ بازده داخلی	۱۱

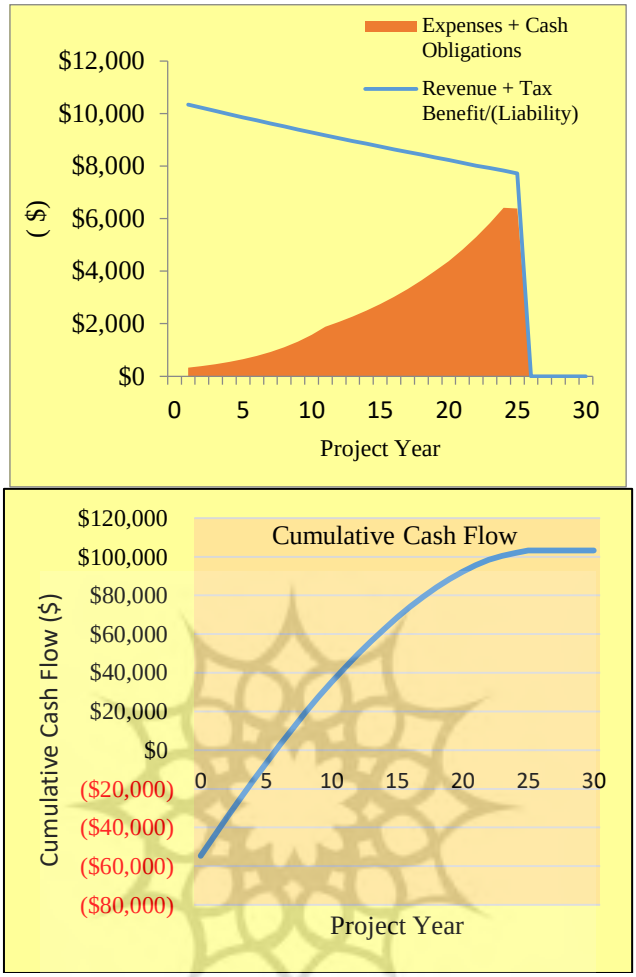
(Fu, R; Feldman, D. J; Margolis, R. M, (Chung, D., Davidson, C., Fu, R., Ardani, K., & Margolis, R, 2015) (EIA, U, 2016) (IRENA, Renewable Cost Database, 2019) (Limmanee, et al., 2017) 2018)

در جدول شماره سطرهای خاکستری بخش اصلی و سطرهای سفید در زیر آن‌ها زیربخش‌ها می‌باشند. حال با توجه به پارامترهای مدل و هزینه کل نصب نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی (۱/۵ میلیارد تومان(۵۷۶۹۳ دلار آمریکا به نرخ روز انجام پروژه)، که با جمع نظرسنجی از شرکت‌های فعال در این زمینه حاصل شده است) مدل را برای حالت پایه در مدلCREST اجرا می‌کنیم. فرض مدل CREST این است که پرداخت‌ها بابت خرید برق مطابق هزینه کل LCOE صورت پذیرد که با تنظیم برنامه برای خرید برق با تنظیمات انجام شده در حالت پایه(جدول شمارهو محاسبات حاصل از ستون (درصد از کل هزینه) در جدول شماره)، نتایج جریانات نقدی طی ۲۵ سال به شرح

جدول شماره و شکل شماره می‌باشد.

جدول شماره (۳): جریانات مالی مدل پایه با فرض تعرفه ۵۵/ ۶ (سنت/کیلو وات)

سال	مقدار تعرفه پرداخت شده به مالک نیروگاه	درآمد	مخارج عملیاتی	هزینه ذخایر مالی برای O&M	درآمد پس از کسر هزینه های عملیاتی و هزینه ذخایر	جریان نقدی تجمعی	IRR
Year	¢/kWh						%
سال پایه					(۵۴,۷۲۶)	(۵۴,۷۲۶)	
۱	۶/۵۵	۱۰,۳۴۲	(۳۰۰)	(۲۶)	۱۰,۰۱۵	(۴۴,۷۱۱)	NA
۲	۶/۵۵	۱۰,۲۱۸	(۳۶۰)	(۲۶)	۹,۸۳۲	(۳۴,۸۷۹)	NA
۳	۶/۵۵	۱۰,۰۹۶	(۴۳۲)	(۲۶)	۹,۶۳۸	(۲۵,۲۴۱)	-۲۵.۶۶٪
۴	۶/۵۵	۹,۹۷۶	(۵۱۸)	(۲۶)	۹,۴۳۱	(۱۵,۸۱۰)	–
۵	۶.۵۵	۹,۸۵۷	(۶۲۲)	(۲۶)	۹,۲۰۸	(۶,۶۰۲)	-۴.۱۹٪
۶	۶/۵۵	۹,۷۳۹	(۷۴۶)	(۲۶)	۸,۹۶۶	۲,۳۶۵	۱/۲۵٪
۷	۶/۵۵	۹,۶۲۳	(۸۹۶)	(۲۶)	۸,۷۰۱	۱۱,۰۶۶	۴/۹۵٪
۸	۶/۵۵	۹,۵۰۸	(۱,۰۷۵)	(۲۶)	۸,۴۰۷	۱۹,۴۷۳	۷/۵۵٪
۹	۶/۵۵	۹,۳۹۵	(۱,۲۹۰)	(۲۶)	۸,۰۷۹	۲۷,۵۵۲	۹/۴۱٪
۱۰	۶/۵۵	۹,۲۸۳	(۱,۵۴۸)	(۲۶)	۷,۷۰۹	۳۵,۲۶۱	۱۰/۷۷٪
۱۱	۶/۵۵	۹,۱۷۲	(۱,۸۵۸)	(۲۶)	۷,۲۸۹	۴۲,۵۴۹	۱۱/۷۸٪
۱۲	۶/۵۵	۹,۰۶۳	(۲,۰۴۳)	(۲۶)	۶,۹۹۳	۴۹,۵۴۳	۱۲/۵۴٪
۱۳	۶/۵۵	۸,۹۵۵	(۲,۲۴۸)	(۲۶)	۶,۶۸۱	۵۶,۲۲۴	۱۳/۱۳٪
۱۴	۶/۵۵	۸,۸۴۸	(۲,۴۷۲)	(۲۶)	۶,۳۵۰	۶۲,۵۷۴	۱۳/۵۸٪
۱۵	۶/۵۵	۸,۷۴۳	(۲,۷۲۰)	(۲۶)	۵,۹۹۷	۶۸,۵۷۱	۱۳/۹۳٪
۱۶	۶/۵۵	۸,۶۳۹	(۲,۹۹۲)	(۲۶)	۵,۶۲۱	۷۴,۱۹۲	۱۴/۲۰٪
۱۷	۶/۵۵	۸,۵۳۶	(۳,۲۹۱)	(۲۶)	۵,۲۱۹	۷۹,۴۱۱	۱۴/۴۱٪
۱۸	۶/۵۵	۸,۴۳۴	(۳,۶۲۰)	(۲۶)	۴,۷۸۸	۸۴,۱۹۹	۱۴/۵۷٪
۱۹	۶/۵۵	۸,۳۳۴	(۳,۹۸۲)	(۲۶)	۴,۳۲۶	۸۸,۵۲۵	۱۴/۶۹٪
۲۰	۶/۵۵	۸,۲۲۹	(۴,۳۸۰)	۰	۳,۸۴۹	۹۲,۳۷۴	۱۴.۷۸٪
۲۱	۶/۵۵	۸,۱۲۱	(۴,۸۱۸)	۰	۳,۳۰۳	۹۵,۶۷۷	۱۴/۸۵٪
۲۲	۶/۵۵	۸,۰۱۹	(۵,۳۰۰)	۰	۲,۷۱۹	۹۸,۳۹۶	۱۴/۹۰٪
۲۳	۶/۵۵	۷,۹۲۲	(۵,۸۳۰)	۰	۲,۰۹۳	۱۰۰,۴۸۹	۱۴/۹۳٪
۲۴	۶/۵۵	۷,۸۲۷	(۶,۴۱۳)	۰	۱,۴۱۵	۱۰۱,۹۰۳	۱۴/۹۵٪
۲۵	۶/۵۵	۷,۷۲۷	(۷,۰۵۴)	۶۶۸	۱,۳۴۱	۱۰۳,۲۴۴	۱۴/۹۶٪



شکل شماره (۶): جریانات نقدی تجمعی (شکل سمت چپ)و جریان درآمدها و هزینه‌های سالانه(سمت راست)

برای تعیین تأثیر گذاری هر ورودی بر LCOE ، تحلیل حساسیت با استفاده از روش "یک بار در یک زمان" (OAT) استفاده شده است (Borgonovo & Plischke, 2016) . روش OAT شامل تعیین مقدار پایه اصلی و تغییر هر ورودی در هر بار تحلیل بر اساس مقدر دامنه تغییر از پیش تعیین شده است. این روش از"اندازه و جهت" تاثیرورودی بر خروجی آگاهی ایجاد می کند (Borgonovo & Plischke, 2016). با استفاده از این روش ، حساسیت حدود بالا و پایین خروجیLCOE به ترتیب با معادلات ۱۳ و ۱۴، بر اساس ورودی x_i و بردار x^0 (مقادیرپایه) محاسبه می شود:

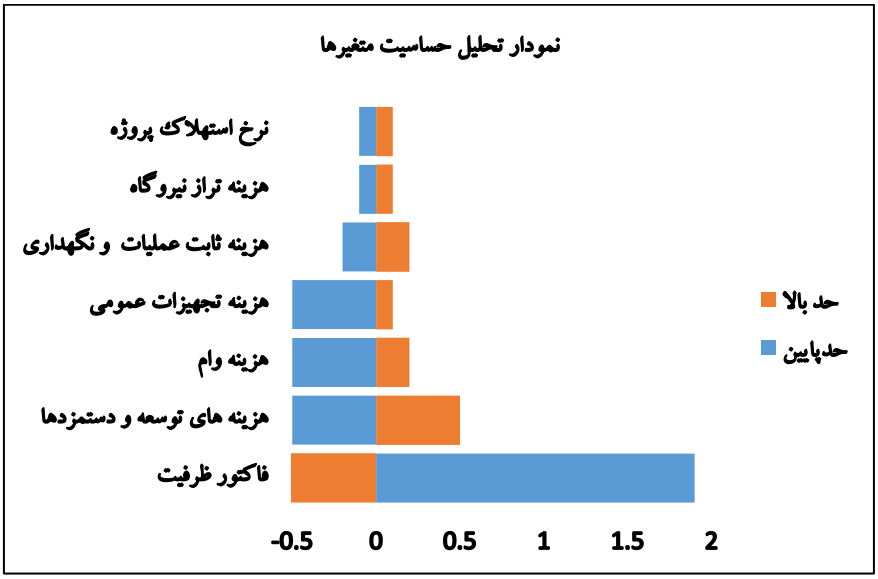
رابطه شماره ۱۳

$$\Delta_i^+ LCOE = f(x_i + \Delta_i^+ x, x^0_{\sim i}) - f(x^0)$$

رابطه شماره ۱۴

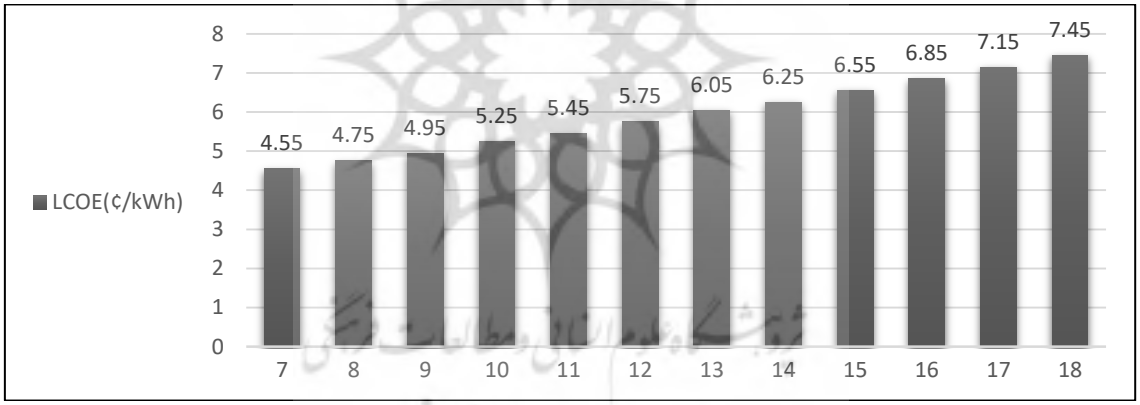
$$\Delta_i^- LCOE = f(x^0) - f(x_i + \Delta_i^- x, x^0_{\sim i})$$

رابطه شماره ۱۳ تحلیل حد بالای LCOE و رابطه ۱۴ حد پایین آن می‌باشد. تحلیل حساسیت برای متغیرهای هزینه تجهیزات تولید ، هزینه تراز نیروگاه ، هزینه وام ، هزینه‌های توسعه و دستمزدها، هزینه O&M ثابت ، فاکتور ظرفیت ، نرخ استهلاک پروژه و نرخ بازده داخلی بر اساس مقادیر ستون دامنه تغییر در جدول شماره انجام می‌شود. نتایج حاصل از آن به صورت نمودار گردباد در شکل شماره (۷) ارائه شده است.



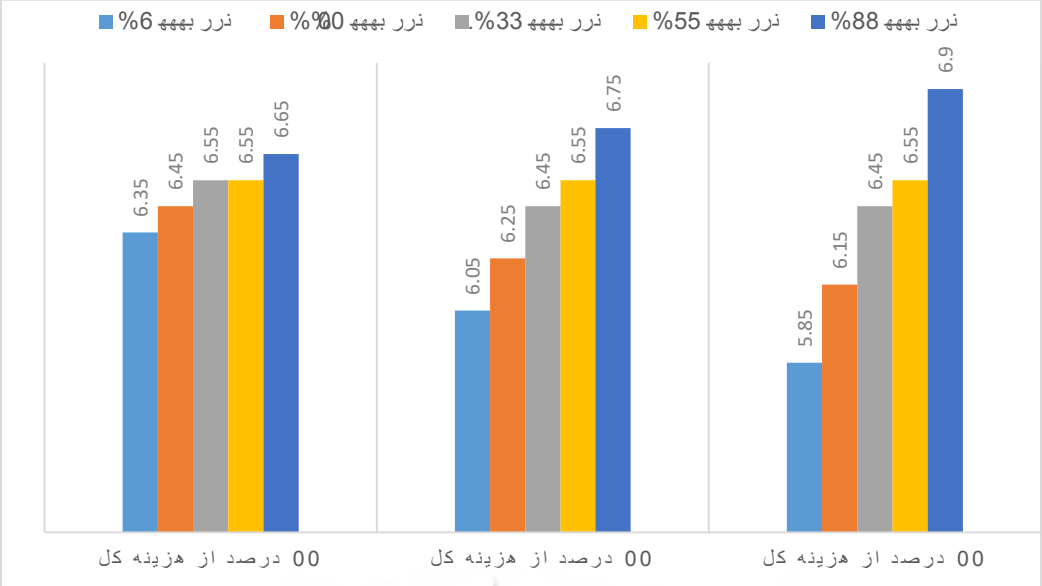
شکل شماره (۷): نمودار گردباد تحلیل حساسیت

در نمودار فوق تغییرات LCOE در دامنه‌های بالا و پایین هر یک متغیرها محاسبه شده و تغییرات LCOE بر اساس نتیجه تغییر هر متغیر و تاثیر آن در مقدار LCOE (بر اساس سنت بر دلار) بیان شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار LCOEدر حالت پایه(۶/۵۵ سنت بر دلار)، بسته به تغییر هر یک متغیرها میتوان در بازه(۰/۵ – سنت تا ۱/۹ سنت بر کیلووات) کم یا زیاد شود. در شکل شماره مقادیر متفاوت LCOE در ازای IRRهای ۷ تا ۱۸ درصد به تصویر کشیده شده است.



شکل شماره (۸): مقادیر متفاوت IRR و تاثیر آن در میزان LCOE

در ادامه بر مبنای وزن تامین مالی از طریق اخذ وام به کل هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه(سه مقدار ۲۰ درصد از کل هزینه، ۴۰ درصد از کل هزینه و ۶۰ درصد از کل هزینه از طریق اخذ وام بانکی لحاظ شده است) و نرخ بهره‌های متفاوت بانکی(از بهره ۶ درصد تا ۱۸ درصد)، مقادیر متفاوت LCOE محاسبه شده است. شکل شماره این محاسبات را ارائه می‌دهد.



شکل شماره(۹): مقادیر LCOE برای وزن های متفاوت هزینه ای و بهره های متفاوت بازپرداخت

برای به دست آوردن وزن تاثیرگذاری هر متغیر در تعیین هزینه تراز شده نهایی، از روابط ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ استفاده می‌کنیم.

رابطه شماره ۱۵

$$\Delta_i LCOE = \Delta_i^{+} LCOE - \Delta_i^{-} LCOE$$

رابطه شماره ۱۶

$$\sum \Delta LCOE = \sum_{i=1}^{I} (\Delta_i^{+} LCOE - \Delta_i^{-} LCOE)$$

رابطه شماره ۱۷

$$wi = \frac{\Delta_i LCOE}{\sum \Delta LCOE}$$

با بکارگیری روابط فوق نتایج زیر حاصل شد:

جدول شماره (۴): رتبه بندی تاثیرگذاری متغیرها و وزن هر متغیر در تشکیل LCOE

رتبه‌بندی تاثیرگذاری	وزن هر متغیر	متغیر
۱	۰/۴۷۴۵۷۶۲۷۱	فاکتور ظرفیت
۲	۰/۱۶۹۴۹۱۵۲۵	هزینه های توسعه و دستمزدها
۳	۰/۱۱۸۶۴۴۰۶۸	هزینه وام
۴	۰/۱۰۱۶۹۴۹۱۵	هزینه تجهیزات عمومی
۵	۰/۰۶۷۷۹۶۶۱	هزینه ثابت عملیات و نگهداری
۶	۰/۰۳۳۸۹۸۳۰۵	هزینه تراز نیروگاه
۷	۰/۰۳۳۸۹۸۳۰۵	نرخ استهلاک پروژه

۳- نتایج و بحث:

در این پژوهش به منظور تعیین LCOE با تکنولوژی فتوولتائیک در مقیاس خانگی ۱۰۰ کیلو واتی، از مدل و معادلات منتشر شده توسط آژانس انرژی تجدیدپذیر ایالات متحده با عنوان مدل CREST استفاده شده است. در گام اول هزینه هم‌تراز شده برق برای حالت پایه انجام شده است و در گام بعد روی نتایج حاصل از تغییرات هزینه هم‌تراز شده همزمان با تغییرات پارامترهای تاثیرگذار آنالیز حساسیت انجام گرفته است و در گام بعد ضریب وزنی تاثیرگذاری هر متغیر محاسبه و رتبه‌بندی شده است.

در زمینه استفاده از LCOE در روند سیاست‌گذاری سیستم برق مطالعات محدودی در ایران انجام شده که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. اسدی و همکاران در مقاله‌ای که با عنوان رقابت‌پذیری برق زمین‌گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق در ایران و با استفاده از محاسبه LCOE انجام دادند نشان دادند که ضریب ظرفیت بالا، عدم نیاز به سوخت‌های فسیلی و هزینه آلایندگی ناچیز، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی را با سایر نیروگاه‌های مرسوم در ایران رقابت‌پذیر می‌سازد، در حالی که مقایسه هزینه تمام شده برق مفروض بر قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست‌محیطی نشان می‌دهد که نیروگاه زمین‌گرمایی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های متداول در اولویت آخرِ اقتصادی قرار دارد. این پژوهش پیشنهاد می‌دهد که آزادسازی قیمت تمام شده انرژی و لحاظ هزینه آثار خارجی، اثر قابل توجهی بر توسعه صنعت برق زمین‌گرمایی در ایران دارد و امکان صادرات بیشتر گاز طبیعی را فراهم می‌آورد (اسدی, حسین کریم, & افشاری, ۱۳۹۵). در مطالعه‌ای که با عنوان تعیین قیمت تمام شده برق بر اساس الگوریتم پیشنهادی LCOE منطبق با تکنولوژی های مختلف و مطالعه موردی آن در کشور ایران توسط محمودی و همکاران انجام شد، الگوریتمی برای محاسبه هزینه همتراز شده (LCOE) برق ارائه شده است. در این میان چهار تکنولوژی متداول در بخش تولید شامل نیروگاه های سیکل ترکیبی، زغال سنگ سوز، هسته‌ای و بادی از لحاظ فنی و اقتصادی مورد بررسی قرارگرفته و نتایج قیمت تمام شده برای آن هانشان داده شده اند. همچنین با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی، سعی شده است تا پارامترهایی که از حساسیت بیشتری در تعیین قیمت تمام شده برق برخوردار هستند، شناسایی و معرفی شوند. آن‌ها نتیجه گرفتند در این میان کمترین هزینه تولید مربوط به تکنولوژی سیکل ترکیبی سپس تکنولوژی زغال سنگ سوز، هسته ای و بادی است. در بخش تحلیل حساسیت بیشترین تأثیر مربوط به پارامترهای هزینه سرمایه گذاری، هزینه سوخت و ضریب بهره برداری بوده است که البته برای تکنولوژی بادی، هزینه سوخت عاملی بی تأثیر می باشد.

در پژوهشی که توسط مروج و بذرافکن با عنوان ارزیابی اقتصادی نیروگاه خورشیدی در خوزستان در مقایسه با نیروگاه حرارتی رامین اهواز انجام شد نتایج بررسی نشان می داد که نیروگاه برق خورشیدی دارای مزیت اقتصادی بیشتری نسبت به نیروگاه حرارتی است اما اقتصادی شدن استفاده از نیروگاه خورشیدی با توجه به بحران ریزگردها در سال های اخیر در این منطقه می تواند به عملی شدن استفاده از این روش و بهره مندی مزایای زیست محیطی آن کمک کند. برای محاسبه ی هزینه ی تمام شده تولید برق از منابع مختلف شامل انرژی خورشید و سوخت های فسیلی از روش همتراز شده به عنوان مقبول ترین روش اقتصادی برای مقایسه بین انواع فناوری های تولید برق استفاده شد و همچنین در تولید و هزینه های نیروگاه خورشیدی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج قیمت تمام شده بر آنها نشان داده شد. همچنین در مقاله‌ای که با عنوان ارزیابی اقتصادی توسعه نیروگاه های خورشیدی با توجه به ملاحظات زیست محیطی انجام شد ابتدا هزینه تمام شده تولید برق به ازای هر کیلو وات ساعت در هر یک از نیروگاه های تولید برق محاسبه شده، سپس با توجه به انتشار آلاینده ها و گازهای گلخانه ای از نیروگاه های غیر خورشیدی و منظور نمودن هزینه های خارجی تحمیل شده، ارزیابی لازم صورت گرفته است. در نهایت جستجوی محققین برای یافتن مطالعه‌ای که با توجه به جزئیات و طبقه‌بندی هزینه‌های فناوری بتواند به طبقه‌بندی و تحلیل حساسیت اجزای تاثیرگذار آن بپردازد نتیجه‌ای در بر نداشت.

و لذا بخش اول خروجی پژوهش نتیجه اجرای مدل CREST بر اساس حالت مبنا را ارائه کرد. بدین منظور از پارامترهای محاسبه شده در جداول شماره ۱ و ۲ که بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و روابط حاکم بر مدل CREST محاسبه شده است، استفاده شده است. همچنین طبقه بندی هزینه‌ها شامل هزینه فناوری ، هزینه نرم یا هر دو نیز برای مرجع ارائه شده است. با توجه به خروجی مدل در جدول شماره ۳ ، هزینه ترازبندی شده تولید برق فتوولتائیک در مقیاس ۱۰۰ کیلووات در زمان انجام مطالعه و بر اساس نرخ ارز زمان انجام پژوهش، ۶/۵۵ سنت بر کیلووات ساعت محاسبه شده است. این عدد نشانگر حداقل قیمت برای تعیین خرید برق تضمینی توسط ساتبا پیشنهاد می‌شود. البته در مدل انجام شده پرداخت‌ها در طی دوره عمر نیروگاه ثابت فرض شده است که وزارت نیرو می‌تواند به منظور تعدیل شرایط ارزی و تورمی و اصلاح قیمت خرید تضمینی برق از روابطی که در برخی مقالات اشاره شده استفاده کند (Bakhshi, R; Sadeh, J, 2018).

لازم به ذکر است، به زعم پژوهشگران این مطالعه خرید برق تضمینی با نرخ مصوب فعلی و با وجود شوک ارزی وارد شده در سال ۱۳۹۹، با نرخ ۹۱۰۰ ریال بر کیلووات ساعت توجیه اقتصادی مکفی برای توسعه نصب و تولید برق تجدیدپذیر خورشیدی را

ایجاد نمی‌کند. برای لحاظ کردن مقادیر متفاوت نرخ بازده داخلی و تاثیر آن در LCOE نمودار شماره ۸ ارائه شده است. همچنین تاثیر میزان و نرخ بهره وام بانکی بر LCOE در شکل شماره ۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است تامین مالی از طریق وام و با نرخ‌های بهره کمتر از ۱۵ درصد، هزینه تولید انرژی را کاهش می‌دهد. این درحالیست که تامین وزن کمتری از هزینه سرمایه‌گذار توسط سرمایه‌گذار میتواند در توسعه صنعت نقش بسزایی را ایفا کند. در نظر گرفتن مطالب فوق می‌تواند در اتخاذ سیاست مناسبتر برای حمایت از توسعه انرژی فتوولتائیک تاثیرات مثبتی را ایجاد کند.

نتایج تحلیل حساسیت در نمودار گردباد در شکل ۷ ارائه شده است. ورودی ها از بزرگترین حساسیت LCOE به حداقل حساسیت LCOE بر اساس تحلیل OAT از بالا به پایین مرتب شده‌اند. طبق تجزیه و تحلیل انجام شده ، LCOE بیشترین حساسیت را نسبت به متغیری دارد که هم به عنوان هزینه فناوری و هم نرم طبقه بندی شده است . به این صورت که فاکتور ظرفیت حساس‌ترین عامل تاثیرگذار بر تعیین LCOE می‌باشد. این نتیجه موکد این مطلب است که در فرآیند طراحی نیروگاه-های خانگی، موارد زیر بیش از پیش حائز اهمیت است:

ساخت و یا واردات تجهیزات تولید برق فتوولتائیک باید با اولویت حداکثر فاکتور ظرفیت نسبت به سایر موارد تاثیرگذار مانند ضریب استهلاک تجهیزات انجام شود. البته شکی نیست که سایر متغیرها نیز در مجموع ارزش کل تولید و هزینه نهایی تولید را تعیین می‌کنند و هر جزء تاثیر بسزایی در عملکرد نهایی ایفا می‌کند و شایان توجه بسیار است لاکن شایان توجه است که عامل ظرفیت با توجه به ضریب اهمیت تاثیرگذاری ۴۷ درصدی بر تغییرات LCOE بر اساس اطلاعات جدول شماره ۴، در اولویت تمرکز ساخت و تولید و کیفیت تجهیزات وارداتی به کشور قرار گیرد.

لزوم توجه بیشتر بر متغیرهای نرم به خصوص مطالعات مکان و زاویه نصب نیروگاه خورشیدی برای جذب حداکثر نور خورشید مورد قابل ملاحضه دیگر است که همان‌طور که نتیجه تحلیل حساسیت مشخص می‌کند، توجه به عوامل تاثیرگذار بر ظرفیت در اواویت توجه قرار دارد. بدین صورت استراتژی برای توسعه پروژه اغلب با یافتن مکانهای آفتابی (عامل ظرفیت خالص بالاتر) با بیشترین دسترسی به زیرساخت های اتصال فعلی (هزینه های اتصال کمتر) آغاز می شود ، زیرا این عوامل برای تعیین هزینه های پروژه و توسعه از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. همچنین کمترین حساسیت را نرخ استهلاک پروژه و هزینه تراز نیروگاه ایجاد می‌کنند.

۴- منابع

1. Ahmad, S., Tahar, R. M., Muhammad-Sukki, F., Munir, A. B., & Rahim, R. A. (2015). Role of feed-in tariff policy in promoting solar photovoltaic investments in Malaysia:a system dynamics approach. Energy, 808-815.
2. Al-Maamary, H., Kazem, H., & Chaichan, M. (2017). enewable energy and GCC States energy challenges in the 21st century: A review. International Journal of Computation and Applied Sciences, 2(1), 11-18.
3. Bakhshi, R., & Sadeh, J. (2018). Economic evaluation of grid connected photovoltaic systems viability under a new dynamic feed–in tariff scheme: A case study in Iran. Renewable Energy, 119, 354-364. doi:10.1016/j.renene.2017.11.093
4. Bakhshi, R., & Sadeh, J. (2018). Economic evaluation of grid–connected photovoltaic systems viability under a new dynamic feed–in tariff scheme: A case study in Iran. Renewable energy, 119, 354-364.
5. Bakhshi, R; Sadeh, J. (2018). Economic evaluation of grid–connected photovoltaic systems viability under a new dynamic feed–in tariff scheme: A case study in Iran. Renewable energy, 119, 354-364. doi:10.1016/j.renene.2017.11.093

6. Beck, A. L., & Rai, V. (2020). Solar Soft Cost Ontology: A Review of Solar Soft Costs. Prog.Energy, 2(1.(
7. Bilgili, M., Ozbek, A., Sahin, B., & Kahraman, A. (2015). An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 323-334. doi:10.1016/j.rser.2015.04.148
8. Borgonovo, E., & Plischke, E. (2016). Sensitivity analysis: a review of recent advances. European Journal of Operational Research, 248(3), 869-887.
9. Chung, D., Davidson, C., Fu, R., Ardani, K., & Margolis, R. (2015). US photovoltaic prices and cost breakdowns. Q1 2015 benchmarks for residential, commercial, and utility-scale systems. National Renewable Energy Lab.(NREL).
10. Congress, U. (2020). Further Consolidated Appropriations Act .
11. EIA, U. (2016). Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Washington, DC, USA: US Department of Energy Information Administration.
12. Elia, A., Kamidelivand, M., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. (2021). Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110488
13. Energy, U. D. (2020). Goals of the Solar Technologies Office .
14. Freyman, T., & Tran, T. (2019). Renewable Energy Discount Rate Survey Results. Grant Thornton UK LLP.
15. Fu, R. F., & Margolis, R. (2018). U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1. National Renewable Energy Laboratory.
16. Fu, R; Feldman, D. J; Margolis, R. M. (2018). US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1. National Renewable Energy Lab.(NREL.(
17. Geissmann, T., & Ponta, O. (2017). A probabilistic approach to the computation of the levelized cost of electricity. Energy, 124, 372-381. doi:10.1016/j.energy.2017.02.078
18. Hernández Moro, J., & Martínez Duart, J. M. (2012). CSP electricity cost evolution and grid parities based on the IEA roadmaps. Energy policy, 41, 184-192.
19. Hernández-Moro, J., & Martínez-Duart, J. (2013). Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution. Renew. Sustain. Energy Rev, 119–132.
20. Information, U. E. (2020). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2020 .
21. IRENA. (2019). Renewable Cost Database .
22. IRENA. (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019.
23. Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2017). Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. Applied energy, 190, 191-203.
24. Liang, X. (2017). Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. 53(2), 855-866.
25. Limmanee, A., Songtrai, S., Udomdachanut, N., Kaewniyompanit, S., Sato, Y., Nakaishi, M., & Sakamoto, Y. (2017). Degradation analysis of photovoltaic modules under tropical climatic conditions and its impacts on LCOE. 102, 199-204. doi:10.1016/j.renene.2016.10.052
26. Marks-Bielska, R., Bielski, S., Pik, K., & Kurowska, K. (2020). energies, 2-23. doi:10.3390/en13184624

27. Mohammadi, K., Naderi, M., & Saghafifar, M. (2018). Economic feasibility of developing grid-connected photovoltaic plants in the southern coast of Iran. 156, 17-31. doi:10.1016/j.energy.2018.05.065
28. Mousavian, H. M., Shakouri, G. H., Mashayekhi, A. N., & Kazemi, A. (2020). Does the short-term boost of renewable energies guarantee their stable long-term growth? Assessment of the dynamics of feed-in tariff policy. Renewable Energy, 159, 1252e1268. doi:10.1016/j.renene.2020.06.068
29. National Renewable Energy Laboratory. (2020). CREST: Cost of Renewable Energy Spreadsheet. Retrieved from https://www.nrel.gov/analysis/crest.html.
30. National Renewable Energy Laboratory. (2020). System Advisor Model. Retrieved from https://sam.nrel.gov/
31. NREL. (2019). Levelized Cost of Energy (LCOE.(
32. Parrado, C., Marzo, A., Fuentealba, E., & Fernández, A. (2016). 2050 LCOE improvement using new molten salts for. Renew. Sustain. Energy Rev, 57, 505–514.
33. Rosales-Calderon, O. &. (2019). A review on commercial-scale high-value products that can be produced alongside cellulosic ethanol. Biotechnology for biofuels, 12(1), 1-58.
34. Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133.
35. Short, W., Packey, D. J., & Holt, T. (1995). A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. National Renewable Energy Laboratory.
36. Syal, S. M., & MacDonald, E. F. (2020). Quantifying the Importance of Solar Soft Costs: A New Method to Apply Sensitivity Analysis to a Value Function. ASME Journal of Mechanical Design, 142(12.(
37. Tabatabaei, S. M., Hadian, E., Marzban, H., & Zibaei, M. (2017). Economic, welfare and environmental impact of feed-in tariff policy: A case study in Iran. Energy Policy, 102, 164-169.
38. Tran, T. T., & Smith, A. D. (2017). Evaluation of renewable energy technologies and their potential for technical integration and cost-effective use within the US energy sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1372-1388. doi:10.1016/j.rser.2017.05.228
39. Tran, T. T., & Smith, A. D. (2018). Incorporating performance-based global sensitivity and uncertainty analysis into LCOE calculations for emerging renewable energy technologies. Applied energy, 216, 157-171.
40. WHO. (2019). Household air pollution and health. World Health Organization. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health
41. World economic outlook. (2020). Inflation rate, average consumer prices. Retrieved from International Monetary Fund: http://www.imf.org/external/
42. Yu Zhao, Z., Long Chen, Y., & Thomson Douglas, J. (2017). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120, 117-127. doi:10.1016/j.energy.2016.12.122

43. Zawalińska, K., Kinnunen, J., Gradziuk, P., & Celińska-Janowicz, D. (2020). To Whom Should We Grant a Power Plant? Economic Effects of Investment in Nuclear Energy in Poland. Energies, 13(11.(
44. Zhai, R., Hu, J., & Saddler, J. (2016). What are the major components in steam pretreated lignocellulosic biomass that. Energy, 3429–3436.
45. Zhuang, X., Xu, X., Liu, W., & Xu, W. (2019). LCOE Analysis of Tower Concentrating Solar Power Plants Using Different Molten-Salts for Thermal Energy Storage in China. 12(7). doi:10.3390/en12071394

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

An Analysis of the Cost Index of Renewable Energy Production in Iran (Case Study: Home Scale Photovoltaic Power Plant)

Shirin Azizi
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Reza Radfar (Corresponding Author)
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: radfar@gmail.com
Hanieh Nikoomaram
Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Ali Rajabzadeh Ghatari
Department of Industrial Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract
Renewable energy plays significant role in achieving energy savings and emissions reduction. As a sustainable and environmental friendly renewable energy source, solar photovoltaic (PV) is of interest for research and development. However, the cost of PV generation and determining FIT based on it is a factor hampering the commercialization of this emerging industry. This paper uses a mathematical model of the levelized cost of energy (LCOE) to calculate the power generation cost of PV projects on the basis of lifetime cost structure analysis. A sensitivity analysis is conducted to examine the impact of different variables on the LCOE of PV projects. The results of sensitivity analysis showed that the capacity factor is the most influential variable in determining the LCOE value. This research provides support for government to formulate incentive policies for the industry.
Keywords: Renewable energy, levelized cost of electricity (LCOE), solar photovoltaic (PV) costs, sensitivity analysis

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی