بررسی نقش دولت در توسعه انرژی بادی در ایران با بهره‌گیری از مدل نفوذ فناوری

مسعود رضوانیان*، **محمدجواد پورسلیمی جاغرق، حبیب رجبی مشهدی**

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجو — پست الکترونیکی: msd.rezvanian@mail.um.ac.ir
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجو — پست الکترونیکی: poursalimi@mail.um.ac.ir
دانشگاه فردوسی مشهد، استاد — پست الکترونیکی: h_mashhadi@um.ac.ir

چکیده — نیاز مبرم انرژی های تجدیدپذیر به حمایت دولت، اهمیت طراحی سیاست حمایتی را به شدت افزایش داده است. هدف از این سیاست حمایتی، کاهش هزینه این تجهیزات و رسیدن به نقطه رقابتی با سایر تکنولوژی های تولید انرژی الکتریکی می باشد. یادگیری ناشی از کاربرد و تاثیر افزایش تولید اقتصادی، عوامل موثر بر این کاهش هزینه می باشند که اثر آنها به صورت نرخ یادگیری فناوری نمایش داده می شود. از اینرو این سیاست حمایتی، همیشگی نبوده و با توجه به فشار مالی آن بر جامعه، لازم است که از بهره وری معقولی برخوردار باشد. برای اولین بار به منظور بررسی بهره وری سیاست حمایتی، در این مقاله، منحنی هزینه- منبع انرژی بادی در ایران محاسبه و نمایش داده شده است. علاوه بر این، مدل یادگیری فناوری، مدل صدور مجوز و مدل تصمیم گیری سرمایه گذاران، سایر اجزای مدل نفوذ ارائه شده می باشد. مدل تصمیم گیری سرمایه گذاران، مبتنی بر مدل راجرز ارائه و دسته بندی شده است. با استفاده از این مدل، تاثیر نرخ تضمینی قراردادهای بلند مدت و بوروکراسی اداری مراحل صدور مجوز بر رفتار سرمایه گذاران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که سرمایه گذاران نسبت به ضریب تعدیل سالانه نرخ قرارداد تضمینی خرید واکنشی نشان نمی دهند. اما بوروکراسی اداری، تاثیری منفی بر مشارکت سرمایه گذاران داشته است.

واژه‌های کلیدی — نفوذ فناوری؛ منحنی هزینه-منبع؛ یادگیری فناوری؛

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر رو به فزونی نهاده است. بر اساس [۱] سهم منابع تجدیدپذیر در تامین انرژی الکتریکی در سال ۲۰۱٦ حدود ٪ ۲٤/۵ بوده که ٪ ۱٦/٦ آن مربوط به انرژی آبی می‌باشد. سهم انرژی بادی ٪ ٤ درصد و مجموع سایر انرژی‌های تجدیدپذیر نیز ٪ ۳/۹ از تولید انرژی الکتریکی می‌باشد. لذا بدون در نظر گرفتن انرژی‌های آبی، مشاهده می‌شود که انرژی بادی مهمترین منبع تجدیدپذیر الکتریکی می‌باشد.

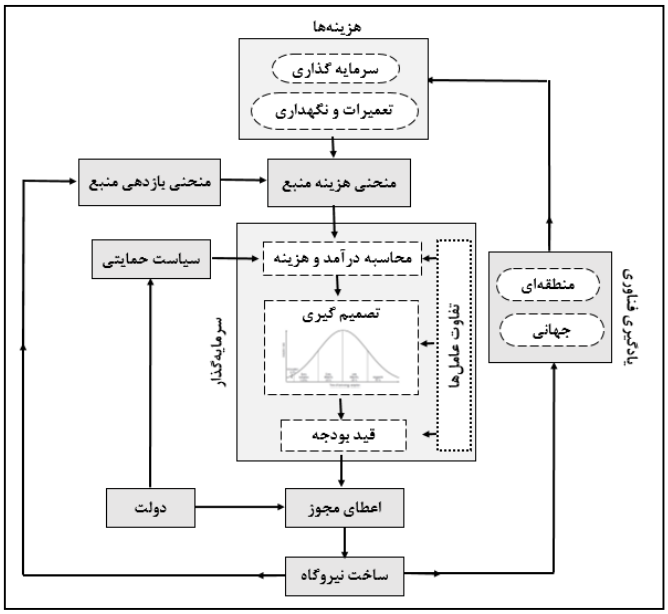
برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، نباید تنها به مسائل فنی این حوزه معطوف شود. بلکه لازم است در چارچوب کلی به ابعاد اقتصادی و اجتماعی آن توجه شود. باید توجه شود که تصمیم گیری در حوزه انرژی توسط نهادها، سازمان‌ها، سرمایه گذاران و به طور کلی عوامل انسانی صورت می‌گیرد. بنابراین برای جلوگیری از تصمیمات اشتباه در این حوزه باید رفتار این عوامل را شناخت. معمولا در حوزه انرژی تصمیمات عمده توسط سیاست‌گذار گرفته می‌شود. در واقع سیاست‌گذار با ایجاد قوانین و دستورالعمل‌هایی، می‌تواند جهت سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی را تحت تاثیر قرار دهد.

هدف اصلی این مقاله مدل‌سازی نفوذ نیروگاههای بادی در ایران و بررسی تاثیر نقش دولت بر آن می‌باشد. تا کنون مدل‌های مختلفی برای مطالعه نفوذ فناوری ارائه شده‌است[۳-۲]. مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران در این مقاله بر اساس مدل نفوذ راجرز طرح ریزی شده است. در بخش ۲ ساختار کلی مدل شبیه‌سازی بیان شده است و سپس هر یک از اجزای مدل توصیف و روابط

به کار رفته در هر بخش بیان شده است. در بخش سوم مقاله، نحوه برآورد منحنی هزینه–منبع انرژی بادی با استفاده از داده‌های موجود در ایران تشریح شده است و در بخش انتهایی نیز نتایج شبیه‌سازی بیان شده است.

۲. توصیف مدل

در این بخش فرآیند شبیه‌سازی وعوامل موثر بر نفوذ منابع انرژی بادی بیان شده و سپس اجزای مدل به تفکیک توصیف شده‌اند. در مدل، پس از برآورد هزینه و درآمد نیروگاههای بادی، فرآیند تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری بر اساس مدل نفوذ راجرز شبیه‌سازی شده و ظرفیت نصب در هر سال تعیین می‌شود. بر مبنای مدل یادگیری فناوری، هزینه نیروگاه‌های بادی به روز شده و روند شبیه‌سازی تکرار می‌شود. فرآیند کلی شبیه‌سازی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



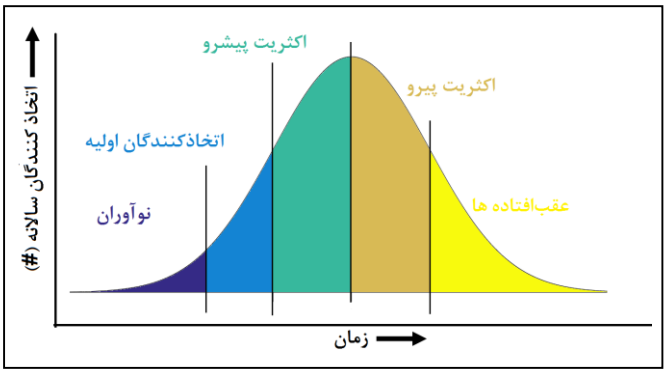
شکل ۱: مدل شبیه‌سازی نفوذ انرژی بادی در ایران

در فرآیند شبیه‌سازی شکل ۱، ابتدا بر مبنای بازدهی منابع و هزینه نیروگاه‌های بادی، منحنی هزینه–منبع انرژی بادی برآورد می‌شود. سپس درآمد نیروگاه‌های بادی بر اساس سیاست حمایتی (نرخ تعرفه تغذیه) و میزان انرژی تولیدی تعیین می‌شود. بر مبنای منحنی هزینه–منبع و میزان درآمد، عامل‌های سرمایه‌گذار برای احداث نیروگاه تصمیم‌گیری می‌کنند. ویژگی‌های عامل‌های سرمایه‌گذار بر اساس مدل نفوذ راجرز تعیین می‌شود. پس از اعمال محدودیت‌های ناشی از قوانین و دستورالعمل‌های موجود، ظرفیت مشخصی برای نصب، پروانه احداث دریافت می‌کنند. سپس روند اخذ مجوز و ساخت نیروگاه طی شده و بر مبنای ظرفیت نصب‌شده و نرخ یادگیری فناوری، هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی به‌روز می‌شود. پس از حذف ظرفیت نصب‌شده از منحنی بازدهی منبع و بر اساس هزینه‌های به روز شده، منحنی هزینه–منبع جدید بدست آمده و فرآیند شبیه‌سازی تکرار می‌شود.

۲،۱. *مدل راجرز*

نظریه نفوذ که روند انتشار یک ایده جدید را در سطح جامعه بیان می‌کند، ابتدا بر اساس رویکرد جامعه‌شناسانه توسط راجرز مطرح شد[۳]. مدل‌های نفوذ را می‌توان در سه دسته مدل‌های ریاضی، پویایی سیستم و عامل–محور دسته‌بندی کرد. در این مقاله، مدل اصلی نفوذ نیروگاه‌های بادی مشابه مدل پویایی سیستم در نظر گرفته شده که در آن برای شبیه‌سازی تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، از روش‌های عامل–محور استفاده شده است.

هسته اصلی مدل ارائه شده در مقاله، بر اساس مدل نفوذ راجرز پی‌ریزی شده است. در مدل راجرز، افراد جامعه از نظر میزان اقبال به فناوری جدید(نرخ پذیرش فناوری)، با یکدیگر متفاوت هستند. بر این اساس، راجرز افراد جامعه را از نظر نرخ پذیرش نوآوری به پنج دسته تقسیم می‌کند. در این مدل فرض می‌شود نرخ پذیرش دارای یک توزیع نرمال می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: نرخ پذیرش نوآوری بر اساس مدل راجرز [۳]

بر اساس آمار[٤]، نرخ بهره اقتصادی برای کشور ایران حدود ۲۰٪ در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای مدل نفوذ راجرز، هر دسته از افراد جامعه، درک متفاوتی از شرایط اقتصادی داشته و نرخ بهره را متفاوت از واقعیت درک می‌کنند. جدول ۱ میزان نرخ بهره درک شده توسط هر دسته از افراد جمعیت راجرز را نشان می‌دهد. نرخ‌های بهره‌ای که در جدول ۱ درج شده است، مبنای محاسبات هزینه و درآمد نیروگاه‌های بادی می‌باشد.

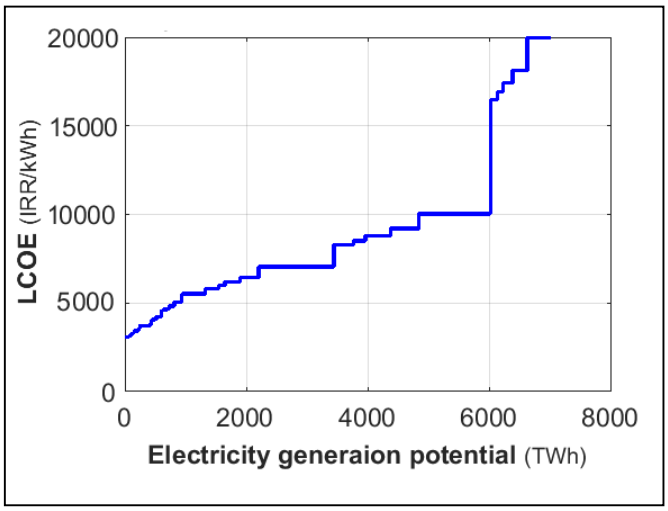
جدول ۱: توزیع جمعیت و نرخ بهره درک‌شده در فرآیند شبیه‌سازی

نوع عامل	نرخ بهره درک‌شده	سهم جمعیت (٪)
Innovator	٪ ۲۳	۲/۵
Early adopter	٪ ۲۶	۱۳/۵
Early majority	٪ ۲۹	۳۴
Late majority	٪ ۳۲	۳۴
Laggards	٪ ۳۵	۱۶

۲,۲.منحنی هزینه-منبع

در این بخش از مدل شبیه‌سازی، هزینه هر واحد از انرژی تولیدی واحدهای بادی (شاخص هزینه انرژی) محاسبه می‌شود. منحنی هزینه-منبع، یک مدل برای توصیف هزینه انرژی تولیدی با استفاده از یک فناوری و منبع اولیه خاص می‌باشد. برای محاسبه هزینه انرژی (LCOE)، انرژی تولیدی سالانه واحدهای بادی و قیمت تجهیزات توربین بادی برآورد می‌شود.

برای بدست آوردن منحنی هزینه-منبع انرژی بادی، اولین قدم محاسبه بازدهی تولید انرژی(ضریب ظرفیت) یک واحد بادی در پهنه جغرافیایی مورد نظر می‌باشد. به منظور نمایش ضریب ظرفیت واحد بادی در یک منطقه، از منحنی بازدهی منبع استفاده می‌شود. شکل ۳ منحنی هزینه-منبع انرژی بادی ایران را نشان می‌دهد که نحوه برآورد این منحنی در بخش سوم مقاله تشریح شده است.



شکل ۳: منحنی هزینه-منبع انرژی بادی ایران

۲,۳.محاسبات اقتصادی

به منظور شبیه‌سازی تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، محاسبات اقتصادی برای پروژه‌های انرژی بادی بر اساس دیاگرام جریان نقدی انجام شده است. اولین گام برای محاسبه درآمد، برآورد میزان انرژی تولیدی می‌باشد که نحوه محاسبه آن در رابطه (۱) بیان شده‌است.

$$E_m = 24 \times D \times CF \times Cap \qquad (۱)$$

که در آن E_m انرژی تولیدی ماهانه بر حسب کیلووات ساعت، D تعداد روزهای ماه (۳۰ روز)، CF ضریب ظرفیت و Cap توان نامی پروژه بر حسب کیلووات می‌باشد.

پس از تعیین میزان انرژی تولیدی، میزان ارزش فعلی درآمد واحد بادی بر اساس رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$NPV_{\mathrm{Rev}} = \sum_{n=1}^{n=120} E_m \times FiT \times \left[\frac{(1+i_m)^n - 1}{i_m (1+i_m)^n}\right] + \sum_{n=121}^{n=240} E_m \times Coef_1 \times FiT \times (1+i_m)^n \times \left[\frac{(1+i_m)^n - 1}{i_m (1+i_m)^n}\right] \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق NPV_{Rev} ارزش فعلی درآمد پروژه نیروگاه بادی، i_m نرخ بهره ماهیانه عامل سرمایه‌گذار و FiT نرخ تعرفه تغذیه می‌باشد که بر اساس قانون فعلی برای نیروگاه‌های بادی برابر ۳۴۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. ضریب $Coef_1$ در بخش دوم رابطه (۲) با توجه به قانون جدید خرید تضمینی در ایران بر اساس بازدهی مزرعه بادی اعمال می‌شود. بر اساس تبصره ۲ قانون مصوب، نرخ خرید تضمینی نیروگاه بادی که در دوره ده ساله اول دارای ضریب تولید ٪ ۴۰ و بیشتر باشند، از ابتدای دوره ده ساله دوم تا پایان قرارداد در عدد ۰/۴ و برای نیروگاه‌های با ضریب تولید کمتر از ٪ ۲۰ در عدد یک و برای نیروگاه‌های با ضریب تولید بین ٪ ۲۰ تا ٪ ۴۰ در عددی متناسب ضرب می‌شود[۵]. توضیح بیشتر آنکه جمله اول رابطه (۲) مربوط به ۱۰ ساله اول دوره خرید تضمینی و جمله دوم مربوط به ۱۰ ساله دوم دوره خرید تضمینی می‌باشد.

هزینه مزارع بادی از مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیر و نگهداری تشکیل شده‌است. بنابراین ارزش فعلی هزینه پروژه‌های بادی بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$NPV_{Cost} = Cost_{inv} + \sum_{n=1}^{n=20} Cost_{O\&M} \times \left[\frac{(1+i_a)^n - 1}{i_a (1+i_a)^n}\right] \qquad (۳)$$

که در این رابطه، NPV_{Cost} هزینه فعلی کل واحد بادی، $Cost_{inv}$ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، $Cost_{O\&M}$ هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری و i_a نرخ بهره سالانه عامل سرمایه‌گذار می‌باشد.

براساس مقدار هزینه فعلی و انرژی تولیدی کل پروژه، شاخص میزان هزینه انرژی (LCOE) با استفاده از رابطه ٤ محاسبه می‌شود.

$$LCOE = \frac{NPV_{Cost}}{\sum_{n=1}^{n=240} E_m} \qquad (٤)$$

که در رابطه فوق LCOE شاخص هزینه انرژی بر حسب IRR/kWh می‌باشد. به طور مشابه، شاخص درآمد واحد انرژی (LROE) نیز بر اساس ارزش فعلی درآمد پروژه و از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود[٦].

$$LROE = \frac{NPV_{\mathrm{Rev}}}{\sum_{n=1}^{n=240} E_m} \qquad (۵)$$

برای مقایسه هزینه و درآمد، مقادیر LCOE و LROE به صورت مجموعه پرداخت‌های مساوی طی n دوره تبدیل شده‌اند(روابط ٦ و ٧).

$$c_i = LCOE \times \left[\frac{i_m (i_m+1)^n}{(i_m+1)^n - 1}\right] \qquad (٦)$$

$$r_i = LROE \times \left[\frac{i_m (i_m+1)^n}{(i_m+1)^n - 1}\right] \qquad (٧)$$

که در روابط فوق r_i و c_i به ترتیب درآمد و هزینه ماهیانه پروژه به ازای یک کیلووات ساعت انرژی در نرخ بهره i_m می‌باشند.

۲،۱.یادگیری فناوری

هزینه سرمایه‌گذاری بالا در انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از موانع اصلی نفوذ فناوری تلقی می‌شوند. بر اساس تجربیاتی که در صنعت وجود دارد، در نتیجه گسترش استفاده از یک فناوری در طی زمان، کاهش هزینه در آن بر اساس منحنی یادگیری اتفاق می‌افتد. توابع بسیاری برای منحنی یادگیری فناوری پیشنهاد شده که از بین آنها تابع نمایی بیشترین کاربرد را دارد[٧]. چندین مطالعه در خصوص برآورد نرخ یادگیری در فناوری‌های تجدیدپذیر انجام شده‌است. آقای هنتلر و همکاران در [٨] تاثیر یادگیری منطقه‌ای و بین‌المللی را بر هزینه فناوری‌های تجدیدپذیر در کشورهای در حل توسعه را بررسی کرده‌اند. آنها در مقاله خود بیان کرده‌اند که بخشی از هزینه فناوری‌های تجدیدپذیر، به صورت جهانی و مستقل از ظرفیت نصب شده در یک کشور کاهش می‌یابد. بخش دیگری از هزینه فناوری مستقل از ظرفیت جهانی و ناشی از یادگیری بر مبنای ظرفیت نصب شده هر کشور کاهش می‌یابد.

بنابراین هزینه انرژی بادی به صورت تابعی از ظرفیت نصب‌شده جهانی و منطقه‌ای به صورت (٨) مدل‌سازی می‌شود.

$$Cost_n = \alpha_{local} \times Cost_{n-1} \times \left(\frac{Q_{n-1}}{Q_{n-2}}\right)^{\frac{\ln(1-LR_{local})}{\ln 2}} + \alpha_{global} \times Cost_{n-1} \times \left(\frac{Y_{n-1}}{Y_{n-2}}\right)^{\frac{\ln(1-LR_{global})}{\ln 2}} \qquad (٨)$$

که در آن $Cost_n$ هزینه در سال n، Q_n ظرفیت نصب‌شده منطقه‌ای در سال n، Y_n ظرفیت نصب‌شده جهانی در سال n، LR_{local} و LR_{global} به ترتیب نرخ یادگیری منطقه‌ای و بین‌المللی و α_{local} و α_{global} نیز کسری از هزینه کل هستند که به ترتیب بر اساس یادگیری منطقه‌ای و بین‌المللی کاهش می‌یابند. جدول ٢ مقادیر مفروض برای پارامترهای هزینه نیروگاه بادی و یادگیری فناوری را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

جدول ٢- مقادیر مفروض برای پارامترهای یادگیری و هزینه نیروگاه‌های بادی

نماد	مقدار	واحد	توضیح
$Cost_{inv}$	۵۰	$million\ IRR/kW$	هزینه سرمایه‌گذاری
$Cost_{O\&M}$	۱/۵	$million\ IRR/kW$	هزینه تعمیرات و نگهداری
LR_{local}	۱۱/۳	٪	نرخ یادگیری منطقه‌ای
LR_{global}	۴/۳	٪	نرخ یادگیری جهانی
α_{local}	۳۶	٪	درصد هزینه منطقه‌ای
α_{global}	۶۴	٪	درصد هزینه جهانی

برای مدل‌سازی یادگیری جهانی، نیاز به پیش‌بینی ظرفیت نیروگاههای بادی جهانی در افق زمانی شبیه‌سازی (٢٠ سال) می‌باشد. بر این اساس پیش‌بینی انجام شده در [٩] به عنوان مبنای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳. منحنی هزینه–منبع انرژی بادی ایران

برای محاسبه ضریب ظرفیت توربین بادی در یک سایت مشخص، ابتدا انرژی تولیدی سالانه از (٩) برآورد می‌شود[١٠].

$$AEP = 8760 * \sum_{j=1}^{j=N} \left[F(V_j) - F(V_{j-1})\right]\left(\frac{P_{j-1} - P_j}{2}\right) \qquad (٩)$$

که در آن $F(V)$ تابع توزیع تجمعی احتمال سرعت باد، V_j سرعت باد در دسته jام بر حسب متر بر ثانیه و P_j توان تولیدی توربین بادی در سرعت V_j می‌باشد. اندیس j در این محاسبات مربوط به دسته‌بندی منحنی توان توربین بادی به بخش‌های مساوی می‌باشد. برای محاسبه AEP در رابطه (٩) باید تابع توزیع سرعت باد و منحنی توان تولیدی اصلاح شده توربین تعیین شوند که در بخش بعد نحوه برآورد توزیع سرعت باد بیان شده است.

۳،۱.مشخصات آماری سرعت باد

تابع توزیع تجمعی وایبول که برای محاسبه انرژی تولیدی از آن استفاده شده است، در رابطه (١٠) آمده است.

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^b} \qquad (۱۰)$$

که در آن V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، a پارامتر مقیاس تابع وایبول و b پارامتر شکل تابع وایبول می‌باشد. در صورتی که در یک سایت مقادیر پارامترهای تابع وایبول مشخص باشد، تابع توزیع تجمعی به راحتی محاسبه خواهد شد. اگر پارامتر مقیاس برای سایت معلوم نباشد، مقدار آن با استفاده از میانگین سرعت باد و بر اساس رابطه (۱۱) بدست می‌آید[۱۱].

$$a = \frac{b^{2.6674} * \bar{V}_{hub}}{0.184 + 0.816 * b^{2.73856}} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه $\bar{V}_{hub}$ میانگین سرعت باد در ارتفاع هاب توربین بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. در صورت مشخص نبودن پارامتر شکل، توزیع آماری سرعت باد به صورت تابع رایلی فرض می‌شود و لذا مقدار پارامتر شکل برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود[۱۰]. در این مقاله، پارامتر مقیاس توزیع وایبول بر اساس اطلس میانگین سرعت باد [۵] ارتفاع ۸۰ متری شکل ٤–الف بدست آمده است.

۳،۲.منحنی توان اصلاح‌شده توربین بادی

بر اساس استاندارد منحنی توان تولیدی اصلاح شده با توجه به چگالی هوای سایت از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود[۱۰].

$$P_i^{\text{modified}} = P_i * \left(\frac{\rho_{site}}{\rho_0}\right) \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه P_i توان تولیدی توربین بر اساس منحنی توان داده شده توسط سازنده توربین، ρ_{site} چگالی هوای سایت محل نصب توربین و ρ_0 چگالی هوای مرجع می‌باشند. ($\rho_0 = 1.225\ {}^{kg}/_{m^3}$)

در صورتی که چگالی هوای سایت معلوم نباشد، مقدار آن با استفاده از رابطه (۱۳) تعیین می‌شود.

$$\rho_{site} = \frac{B}{R_0 * T} \qquad (۱۳)$$

که در آن B فشار هوا بر حسب پاسکال، T دمای هوا بر حسب کلوین و R_0 ثابت عمومی گازها برای هوای خشک می‌باشد. ($R_0 = 28705\ {}^{J}/_{kg°K}$)

در رابطه (۱۳) در صورتی که فشار هوای سایت اندازه‌گیری نشده باشد، می توان مقدار آن با استفاده از رابطه (١٤) تعیین کرد[۱۰].

$$B = 101325 * \left(1 - 2.25577 * 10^{-5} * H\right) \qquad (١٤)$$

که در این رابطه، H ارتفاع سایت از سطح دریا بر حسب متر می‌باشد. به منظور محاسبه چگالی هوا در گستره جغرافیایی کشور، از نقشه ارتفاع اراضی کشور از سطح دریا [۱۲] استفاده شده که در شکل ٤–ب آمده است.

بر اساس نقشه شکل ۵، چگالی هوا در ۵ ارتفاع متفاوت محاسبه شده و در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳: چگالی هوای سایت محاسبه شده در ارتفاع‌های متفاوت

ارتفاع (متر)	۱۰۰	۳۲۵	٦۰۰	۹۷۵	۱۷۰۰
ρ $({}^{kg}/_{m^3})$	۱/۱۷	۱/۱٤	۱/۱۰۳	۱/۰۵۵	۰/۹٦۷

۳،۳.محاسبه منحنی ضریب ظرفیت

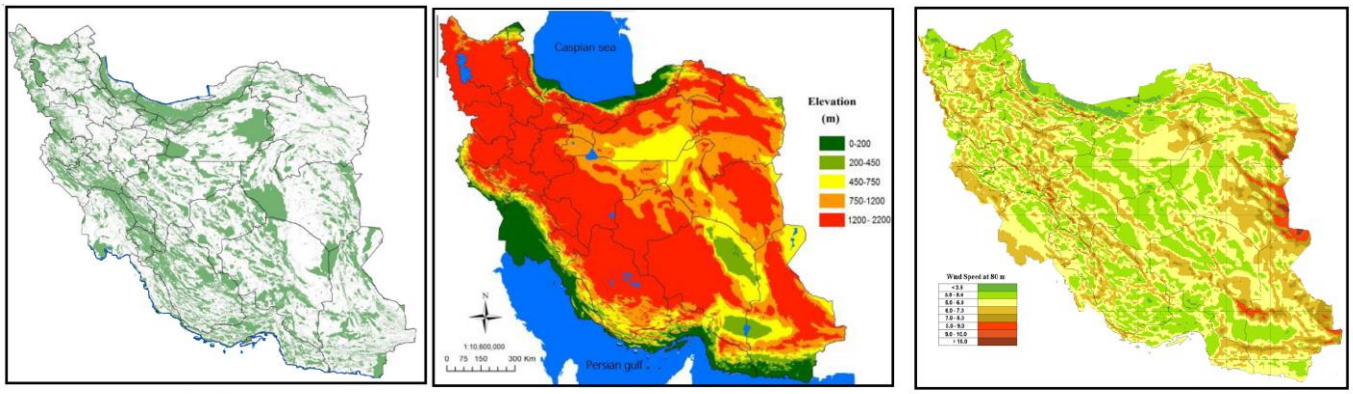
به منظور محاسبه ضریب ظرفیت یک سایت بادی، ابتدا منحنی توان یک توربین مشخص به عنوان مبنای محاسبه در نظر گرفته شده و بر اساس رابطه (۱۵)، محاسبه انجام خواهد شد.

$$CF = \frac{AEP}{P_{rated} * 8760} \qquad (۱۵)$$

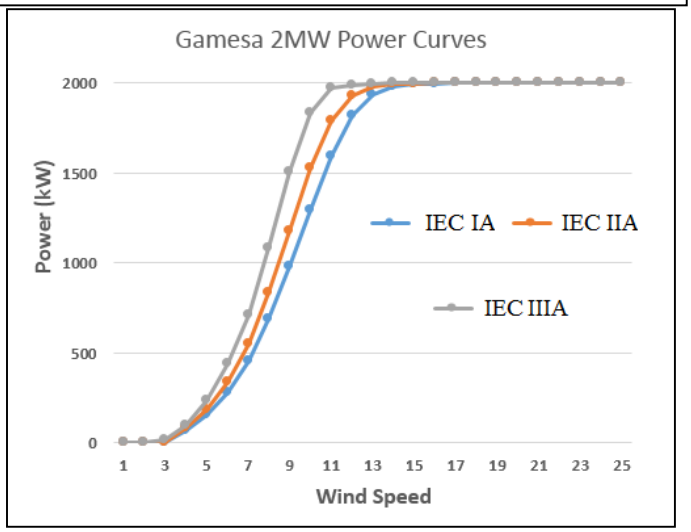
که در آن، P_{rated} توان نامی توربین بادی می‌باشد. در این مقاله به منظور محاسبه ضریب ظرفیت، سه توربین بادی نمونه با سه کلاس بادی متفاوت در نظر گرفته شده است. ظرفیت نامی هر سه توربن ۲ مگاوات و ارتفاع هاب آنها ۸۰ متر می‌باشد. هر سه توربین از یک برند انتخاب شده‌اند و مدل و طول پره آن‌ها در جدول ٤ درج شده است. منحنی توان سه توربین جدول ٤ در شکل ۵ رسم شده است[۱۳]. اختلاف منحنی توان سه توربین در محدوده کمتر از سرعت نامی توربین می‌باشد که این موضوع باعث اختلاف عملکرد توربین‌ها در سایت‌های با کلاس بادی متفاوت می‌شود.

جدول ۴: توربین‌های **مگاواتی در نظر گرفته شده برای محاسبه ضریب ظرفیت**

مدل توربین	کلاس توربین	طول پره
G80-2.0 MW Gamesa	IEC IA	۳۹ متر
G87-2.0 MW Gamesa	IEC IIA	٤۲/۵ متر
G97-2.0 MW Gamesa	IEC IIIA	٤٤ متر



شکل ٤: الف: اطلس سرعت باد ارتفاع ۸۰ متری [۵] ب: ارتفاع اراضی کشور ایران از سطح دریا [۱۲] ج: اراضی نامناسب ایران جهت احداث نیروگاه بادی [۱۲]

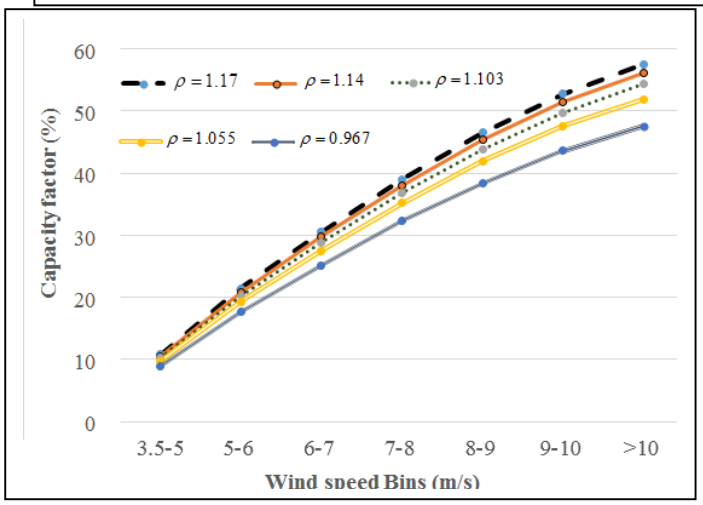


شکل ۵: منحنی توان سه توربین بادی ۲ مگاوات در سه کلاس بادی متفاوت [۱۳]

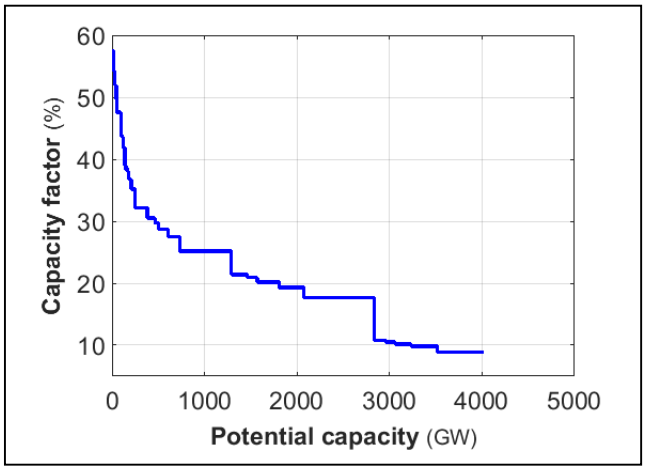
با در نظر گرفتن تغییرات چگالی هوا با ارتفاع سایت بادی، منحنی توان هر توربین اصلاح شده و محاسبات انرژی تولیدی و ضریب ظرفیت توربین برای آن انجام شده است. میانگین ضریب ظرفیت سه توربین به عنوان ضریب ظرفیت نهایی یک منطقه با ارتفاع و میانگین سرعت باد مشخص در نظر گرفته شده که در شکل ٦ رسم شده است.

به منظور برآورد زمین در دسترس برای نصب نیروگاه‌های بادی در کشور، مساحت اراضی غیر قابل نصب از اطلس بادی کشور حذف شده است. این اراضی شامل مناطق با شیب زیاد، مناطق حفاظت‌شده و مناطق دور از جاده‌های دسترسی و ... می‌باشند که شکل ٤-ج، نقشه این اراضی را نشان می‌دهد.

بر اساس زمین قابل نصب در هر دسته از ضریب ظرفیت مشخص شده در شکل ٦ و با در نظر گرفتن میانگین فضای ٤ کیلومتر مربع به ازای هر مگاوات ظرفیت بادی [١٤]، منحنی بازدهی منبع مطابق شکل ۷ برآورد شده است. منحنی هزینه–منبع شکل ۳ بر اساس این منحنی برآورد شده است.



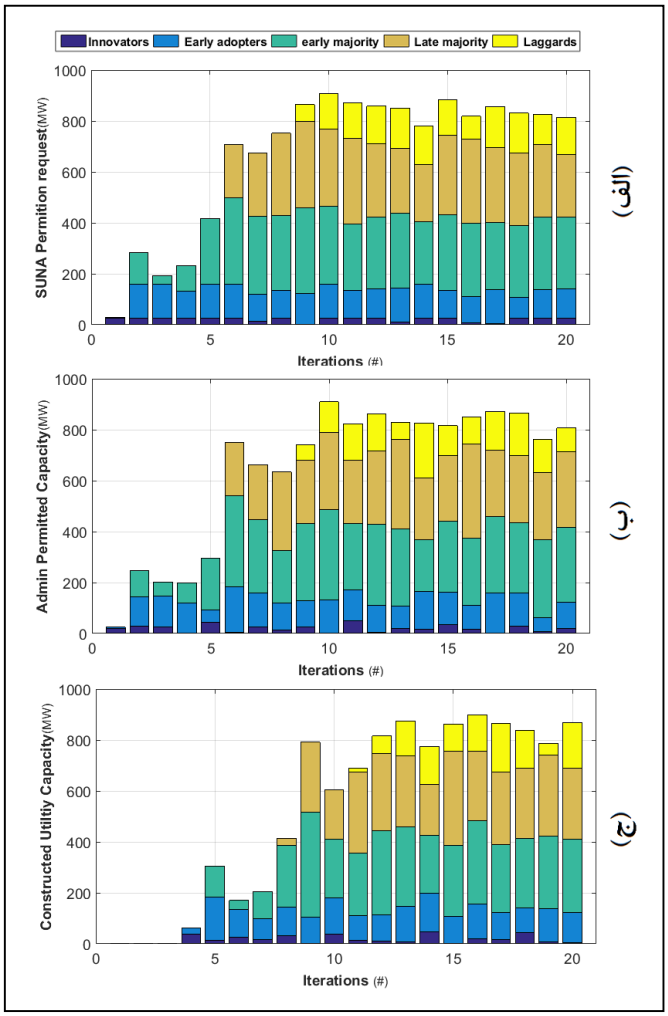
شکل ۶: ضریب ظرفیت مناطق با چگالی هوا و سرعت باد متفاوت



شکل ۷: منحنی بازدهی منبع انرژی بادی ایران

٤. نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ نمایش داده شده است.



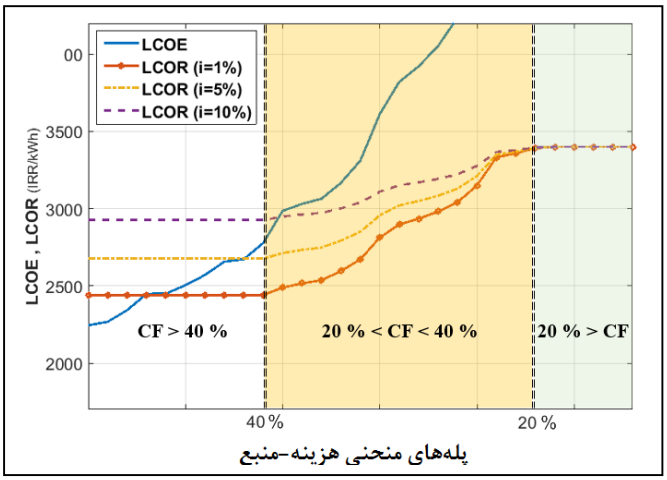
شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی نفوذ انرژی بادی در ایران الف: ظرفیت درخواستی پروانه احداث نیروگاه ب: ظرفیت نیروگاه بادی اخذ مجوز شده ج: ظرفیت نهایی ساخته شده نیروگاه‌های بادی

همانطور که مشاهده می‌شود در ابتدا با توجه به هزینه بالای سرمایه‌گذاری، بخش کمی از سرمایه‌گذاران اقدام به نصب نیروگاه بادی کرده‌اند. فرآیند سرمایه‌گذاری توسط دسته‌های نوآور جمعیت راجرز آغاز می‌شود و دسته‌های بعدی جمعیت راجرز که به علت ریسک‌پذیری کمتر، نرخ بهره بالاتری را درک می‌کنند، در ابتدای شبیه‌سازی اقدام به سرمایه‌گذاری نمی‌کنند. سپس بر اثر افزایش ظرفیت نصب‌شده و فرآیند یادگیری فناوری، هزینه‌های پروژه کاهش می‌یابد. کاهش هزینه باعث می‌شود دسته‌های بعدی جمعیت راجرز نیز به مرور پروژه‌های نیروگاه بادی را سودده ارزیابی کرده و اقدام به سرمایه‌گذاری کنند.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، منحنی کسب مجوز نسبت به منحنی درخواست پروانه احداث، با اندکی جابه‌جایی زمانی و کاهش مواجه است. بخشی از ظرفیتی که عامل‌های سرمایه‌گذار پروانه احداث نیروگاه داده‌اند (الف)، موفق به دریافت مجوز نشده‌اند. همچنین ظرفیت ساخته شده نیز نسبت به ظرفیت مجاز با تاخیر و کاهش مواجه شده است.

٤،١. تحلیل تاثیر ضریب تعدیل سالانه

همانطور که در بخش محاسبات اقتصادی اشاره شد، نرخ تعرفه تغذیه در ۱۰ ساله دوم قرارداد، با ضریب سالانه $Coef_1$ تعدیل می‌شود که این ضریب تعدیل به بازدهی نیروگاه بادی بستگی دارد. بر این اساس حاشیه سود سرمایه‌گذاران در سایت‌های پربازده انرژی بادی کنترل می‌شود. شکل ۹ نحوه تغییر ضریب تعدیل سالانه را در پله‌های مختلف منحنی هزینه–منبع انرژی بادی در ایران نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص درآمد انرژی (LCOR) در نیروگاه‌های با ضریب ظرفیت متوسط (بین ۲۰ تا ٤٠ درصد) بر اساس منحنی هزینه منبع افزایش می‌یابد. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ بهره درک شده، اختلاف بین سایت‌های بادی از نظر حاشیه سود سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که ضریب تعدیل سالانه بیشتر بر دسته‌های نوآور راجرز تاثیر می‌گذارد.



شکل ۹: تاثیر ضریب تعدیل سالانه در حاشیه سود سرمایه‌گذاران نیروگاه بادی

همانطور که در منحنی شکل ۹ مشاهده می‌شود، تاثیر ضریب تعدیل سالانه عمدتا در قسمت‌هایی از منحنی هزینه منبع رخ می‌دهد که در سال‌های ابتدایی شبیه‌سازی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیستند. بنابراین اعمال این ضریب در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران برای انتخاب سایت مناسب تاثیر چندانی نداشته است. برای افزایش تاثیرگذاری این ضریب، می‌توان مرز اعمال آن را بیشتر از بازدهی ٪ ٤٠ تعیین کرد. همچنین می‌توان مقدار ضریب ده ساله دوم را کمتر از ٠/٤ تعیین کرد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله نفوذ نیروگاه‌های بادی در سطح کشور ایران مدل‌سازی شده است. در شبیه‌سازی پدیده نفوذ، سعی شده که مهمترین عوامل تاثیرگذار مطابق با شرایط بومی ایران مدل‌سازی شده و نقش آنها در نظر گرفته شود. در ابتدا ظرفیت نیروگاههای بادی در سطح ایران بر اساس یک کار آماری و با توجه به نتایج خروجی سایر مقالات و اطلس بادی سانا برآورد شده است. بر مبنای ظرفیت برآورد شده و تفاوت بازدهی مناطق مختلف، منحنی هزینه–منبع نیروگاههای بادی برای اولین بار برای ایران بدست آمده است. بر مبنای مدل جمعیت راجرز، سرمایه‌گذاران تقسیم‌بندی شده و برای نصب ظرفیت بادی تصمیم‌گیری کرده‌اند. مدل یادگیری فناوری برای شبیه‌سازی دینامیک زمانی هزینه‌های پروژه در نظر گرفته شده‌است. نتایج شبیه‌سازی در افق زمانی ۲۰ ساله بدست آمده و تحلیل شده‌است.

در فرآیند شبیه‌سازی تاثیر عوامل تاخیرزا که شامل نهادهای صادرکننده مجوز احداث و سازندگان نیروگاه می‌باشند، در فرآیند نفوذ مدل‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در این بخش، بیانگر توانایی دولت در افزایش نرخ نفوذ با کاهش بوروکراسی اداری در روند اخذ مجوز می‌باشد. همچنین دولت‌ها با افزایش زیرساخت‌های صنعتی کشور توانایی کاهش زمان ساخت نیروگاه‌های بادی را دارند که این موضوع هم می‌تواند به افزایش نرخ نفوذ انرژی بادی کمک کند.

در بخش انتهایی مقاله، تاثیر ضریب تعدیل سالانه نرخ تعرفه تضمینی بررسی شده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد این سیاست دولت در شرایط فعلی که بخش عمده ظرفیت انرژی بادی کشور بلااستفاده مانده‌است، تاثیری بر تصمیم سرمایه‌گذاران ندارد. برای افزایش تاثیرگذاری ضریب تعدیل سالانه، می‌توان مقادیر عددی ضریب مذکور و آستانه اعمال آن را تغییر داد.

برای واقعی‌تر کردن مدل نفوذ نیروگاه‌های بادی در ایران، می‌توان بر اساس داده‌های واقعی، مدل دقیق‌تری از روندهای موجود در نظام اداری بدست آورد. بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده می‌توان پیشنهاداتی جهت اصلاح برخی روندها در نظام اداری ارائه داد. همچنین در راستای افزایش کارایی ضرایب تعدیل موجود در سیاست حمایتی فعلی می‌توان از مدل نفوذ توسعه یافته در این مقاله استفاده کرد.

منابع

[1] R. Ren21, "RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT," ed, 2
[2] Geroski, Paul A. "Models of technology diffusion." Research policy 29.4 (2000): 603-625.
[3] Rogers, Everett M. *Diffusion of innovations*. Simon and Schuster,2010
[4] http://www.tradingeconomics.com/iran/interest-rate
[۵] تارنمای سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق در https://www.satba.gov.ir.
[6] Darling, Seth B., et al. "Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics." *Energy & Environmental Science* 4.9 (2011): 3133-3139.
[7] Darling, Yelle, Louis E. "The learning curve: Historical review and comprehensive survey." *Decision Sciences* 10.2 (1979): 302-328.
[8] Huenteler, Joern, Christian Niebuhr, and Tobias S. Schmidt. "The effect of local and global learning on the cost of renewable energy in developing countries." *Journal of Cleaner Production* (2014).
[9] Council, Global Wind Energy. "Global wind report 2015–Annual market update." Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium.[Online]. Available httpllwwwgwec. netlwpcontent/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-20 (2016).
[10] IEC, Wind turbine generator systems – Part 1: Design requirements, International Standard 61400-1, Fist Edition, International Electrotechnical Commission, (2005).
[11] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind energy explained: theory, design and application. Amherst, USA: John Wiley & Sons; 2002.
[12] E. Noorollahi, D. Fadai, M. Akbarpour Shirazi, and S. H. Ghodsipour, "Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)—A Case Study of Iran," *Energies*, vol. ۹, no. ۸, p. ٦٤٣, ۲۰۱٦.
[13] www.gamesacorp.com /en/products-and-services/wind-turbines/
[14] Hoogwijk, Monique, Bert de Vries, and Wim Turkenburg. "Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy." Energy Economics 26.5 (2004): 889-919.