Archive of SID

فصل‌نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی/سال ششم / شماره ۲۱/ تابستان ۱۳۸۸/ صفحات ۱۶۰- ۱۳۷

تأثیر یادگیری فنی بر توسعه‌ی فن آوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش برق ایران در شرایط اختلالات قیمت انرژی

علی مراد شریفی

استادیار دانشکده‌ی علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان alimorad@ase.ui.ac.ir

کیومرث آقایی

استادیار دانشکده‌ی علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان k.aghaei@ase.ui.ac.ir

مهدی صادقی شاهدانی

دانشیار دانشکده‌ی اقتصاد دانشگاه امام صادق (ع) sadeghi@isu.ac.ir

رحیم دلالی اصفهانی

استادیار گروه اقتصاد دانشکده‌ی علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان dallali@ase.ui.ac.ir

سعید شوال پور آرانی

دانشجوی دکتری اقتصاد، دانشگاه اصفهان s.shavvalpour@ase.ui.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۳۸۸/۵/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۸/۲۰

چکیده

یکی از عوامل مؤثر در حرکت به سمت توسعه‌ی پایدار، توسعه‌ی سیستم‌های انرژی کم‌هزینه، مطمئن و سازگار با محیط زیست است. نیل به این اهداف، به نوآوری در فن‌آوری‌های بخش انرژی و ظهور فن‌آوری‌های جدید سازگار با محیط زیست نیازمند است. فرآیند یادگیری فنی و مفهوم منحنی یادگیری، می‌تواند مبنای مناسبی برای تحلیل تغییرات فنی در بخش انرژی باشد. هدف این مطالعه، بررسی تأثیر یادگیری فنی بر سهم و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی بادی و خورشیدی در تولید برق کشور در شرایط یارانه‌ای بودن قیمت‌های انرژی و در صورت حذف یارانه‌هاست. در این راستا، بخش برق کشور در قالب یک «سیستم مرجع انرژی» و با استفاده از مدل برنامه‌ریزی انرژی «مارکال»، مدل‌سازی شده است. نتایج اجرای مدل نشان می‌دهد که اگر چه یادگیری فنی تأثیر چشم‌گیر و قابل ملاحظه‌ای بر سهم فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در صنعت برق ایران دارد، اما اختلالات قیمتی ناشی از دخالت دولت در مکانیزم قیمت گذاری سبب می‌شود علی رغم فرض وجود یادگیری، فنی هم‌چنان فن‌آوری‌های تجدیدپذیر، فاقد توان رقابت با سایر فن‌آوری‌های رایج در بازار باشند.

طبقه‌بندی JEL: C61, C88, D83, Q42

کلید واژه: یادگیری فنی، یادگیری از طریق تجربه، مدل‌های پایین به بالا، مدل مارکال، انرژی‌های تجدیدپذیر

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از عوامل مؤثر در حرکت به سمت توسعه‌ی پایدار، توسعه‌ی سیستم‌های انرژی کم هزینه، مطمئن و سازگار با محیط زیست است. بهبود راندمان مصرف انرژی و دیگر مواد اولیه و کاهش انتشارکربن، نقش مهمی در حرکت به سمت توسعه‌ی پایدار ایفا می‌کند. نیل به این اهداف، به نوآوری در فن‌آوری‌های بخش انرژی و ظهور فن‌آوری‌های جدید سازگار با محیط زیست نیازمند است. مفهوم «یادگیری فنی»[1] به عنوان پایه و مبنای تحلیل تغییرات فنی از اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی و به دنبال مطالعه‌ی ارو[2](۱۹۶۲)، جایگاه مهمی در مطالعات اقتصاد انرژی یافته است. در سال‌های اخیر و به کمک توسعه‌ی دانش محاسباتی و مدل‌سازی، ابعاد تازه‌ای از این مفهوم شناسایی شده و کاربرد آن در برنامه‌ریزی بلندمدت بخش انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

افزایش بی‌رویه‌ی تقاضای برق به دلایلی از جمله رشد جمعیت، نامناسب بودن الگوی مصرف و اختلالات قیمتی ناشی از دخالت دولت در نظام قیمت‌گذاری و در نتیجه افزایش روز افزون سهم انرژی‌های فسیلی در تأمین تقاضا، از ویژگی‌های بارز بخش برق ایران است. توجه به‌این واقعیت، توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر را به عنوان راهکاری برای تنوع‌بخشی به منابع تأمین انرژی،کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و جایگزینی سوخت‌های فسیلی، حایز اهمیت می‌کند. یکی از موانع جدی برای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین برق مورد نیازکشور، بالا بودن هزینه‌های احداث و بهره برداری از نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر و در نتیجه عدم امکان رقابت این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های فسیلی رایج است. انتظار می‌رود به موازات کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر به‌واسطه‌ی پدیده‌ی یادگیری فنی، در آینده امکان رقابت میان این فن‌آوری‌ها با فن‌آوری‌های رایج فراهم شود. هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر یادگیری فنی بر سهم و جایگاه فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در ایران، به ویژه فن‌آوری‌های بادی و فتولتائیک در شرایط یارانه‌ای بودن قیمت حامل‌های انرژی و در شرایط حذف یارانه‌هاست.

1- Technological Learning.
2 - Arrow.

www.SID.ir

Archive of SID

در بخش دوم این مقاله، مبانی نظری تغییر فنی و مفهوم منحنی یادگیری تبیین می‌شود. در بخش سوم، مدل «مارکال» به عنوان یکی از مدل‌های شناخته شده‌ی برنامه‌ریزی انرژی، معرفی شده و روش مدل‌سازی یادگیری فنی در این مدل تشریح می‌شود. بخش چهارم، به تعریف سناریوها و نتایج حاصل از اجرای مدل، شامل ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌ها تحت سناریوهای مختلف و تأثیر یادگیری فنی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- مبانی نظری

یادگیری فنی به عنوان عامل بروز تغییر فنی، ابتدا توسط دانشمندانی چون وایت[1] (۱۹۳۶) و هیرش[2] (۱۹۵۲)، مطرح شد. با این حال، مطالعه‌ی ارو (۱۹۶۲) را می‌توان پایه و اساس مفهوم منحنی یادگیری در اقتصاد دانست. به اعتقاد «ارو»، برای نشان دادن میزان یادگیری، به جای متغیر «تولید انباشته»[3]، می‌بایست از سرمایه‌گذاری ناخالص انباشته (تولید انباشته کالاهای سرمایه‌ای) استفاده کرد. به این ترتیب، به اعتقاد وی، تغییرات فنی در هر زمان در کالاهای سرمایه‌ای جدید متجلی می‌شوند.

اگر چه پس از ارو، محققانی مانند گارود[4] (۱۹۹۷)، گرابلر و مسنر[5] (۱۹۹۸) و کمپ[6] (۲۰۰۲)، دلایل دیگری از جمله یادگیری از طریق تحقیق[7]، یادگیری از طریق کاربرد[8] و یادگیری از طریق تعامل[9] را برای بروز پدیده‌ی یادگیری فنی و یا به عبارتی کاهش هزینه‌ی تولید یک محصول و یا فن‌آوری در طول زمان بر شمرده‌اند، مفهوم یادگیری از طریق تجربه[10]، جایگاه مهم‌تری در تحقیقات مربوط به تغییرات فنی پیدا کرده است.

منحنی یادگیری، بیانگر اثر تغییرات تدریجی و پایدار در فن‌آوری است، که مولفه اصلی پیشرفت فنی به شمار می‌آید. تغییر فنی به صورت فرآیندی تکاملی و همراه با تلاش‌های تجربی قابل ملاحظه انجام می‌گیرد و با رشد ذخیره‌ی تجربه و یادگیری،

1- White.
2-Hirsch.
3- Cumulative Production.
4- Garud .
5- Grubler and Messner.
6- Kamp.
7- Learning-by-researching.
8- Learning-by-using.
9- Learning-by-interacting.
10- Learning-by-doing.

www.SID.ir

Archive of SID

توسعه می‌یابد (ساهال[1]، ۱۹۸۰). یک منحنی یادگیری به طور عام، رابطه‌ی میان یک شاخص یادگیری را با یک شاخص تجربه نشان می‌دهد (رابینسون[2]، ۱۹۸۰). در رایج ترین تعریف از منحنی یادگیری، هزینه‌ی واحد تولید یک محصول که می‌تواند خود یک فن‌آوری باشد، به عنوان شاخص عملکرد در نظر گرفته شده و این متغیر به عنوان تابعی از ظرفیت انباشته تعریف می‌شود. به این ترتیب، ظرفیت انباشته به عنوان جایگزینی برای انباشت دانش و یا به عبارتی دانش تجمعی، در نظر گرفته می‌شود.

اگر چه منحنی یادگیری سال‌هاست به مفهومی شناخته شده مبدل شده است، لیکن از ابتدای دهه‌ی ۱۹۷۰، این منحنی‌ها به عنوان ابزار مفید برنامه‌ریزی و مدیریت جایگاه خود را پیدا کرده‌اند. به طور رایج برای نشان دادن منحنی یادگیری از یک تابع نمایی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$SC(C) = a.C^{-b} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق، SC عبارتست از هزینه‌ی واحد تولید یک فن‌آوری، به عنوان مثال، در مورد یک فن‌آوری تولید برق (نیروگاه)، این کمیت به صورت هزینه‌ی ساخت هر کیلووات ظرفیت آن فن‌آوری تعریف می‌شود. در رابطه‌ی فوق، C عبارتست از ظرفیت تجمعی یا انباشته، b شاخص یادگیری[3] و a هزینه تولید اولین واحد ظرفیت است. شاخص یادگیری (b)، میزان اثر بخشی و کارایی فرآیند یادگیری را نشان می‌دهد و یکی از پارامترهای کلیدی در رابطه‌ی فوق می باشد. معمولاً این شاخص برای فن‌آوری‌های مختلف به صورت مستقیم قابل اندازه گیری نیست؛ بلکه برای محاسبه‌ی این شاخص از «نرخ پیشرفت فنی[4]» استفاده می‌شود. نرخ پیشرفت فنی، عبارتست از درصد کاهش در هزینه‌های واحد فن‌آوری به ازای دو برابر شدن ظرفیت تجمعی آن فن‌آوری. رابطه‌ی بین نرخ پیشرفت و شاخص یادگیری را می توان به صورت ذیل بیان کرد:

$$PR = 2^{-b} \qquad (۲)$$

با دانستن نرخ پیشرفت، نرخ یادگیری به صورت زیر تعریف کرد:

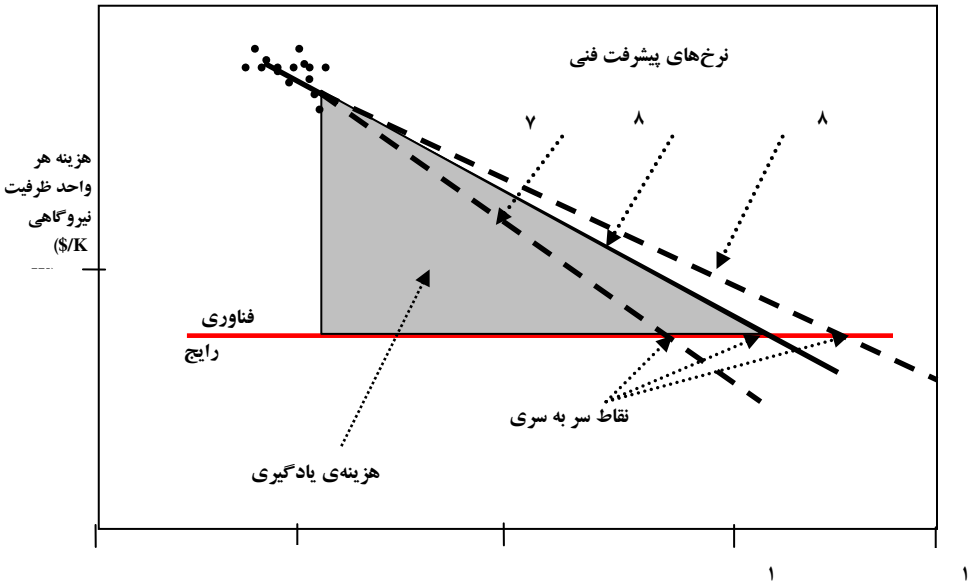
$$LR=1-PR \qquad (۳)$$

1 -Sahal.
2 -Robinson.
3 - Learning index
4 -Technical Progress Ratio

www.SID.ir

Archive of SID

یکی از مفاهیم مهم مرتبط با منحنی یادگیری، «هزینه یادگیری»[1] است. هزینه یادگیری، عبارتست از مجموع سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای رسیدن یک فن‌آوری نوظهور به نقطه‌ی «سر به سری». این هزینه، برآوردی از میزان منابع مورد نیاز برای رسیدن یک فن‌آوری به مرحله‌ی رقابت‌پذیری است (OECD/IEA, 2000). همان طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، هزینه‌ی یادگیری یک فن‌آوری تابعی از نرخ یادگیری (نرخ پیشرفت فنی) آن فن‌آوری می‌باشد، به گونه‌ای که هر چه نرخ یادگیری بیش‌تر باشد، هزینه‌ی یادگیری کم‌تر خواهد بود.



شکل ۱- نقاط سر به سری و هزینه‌ی یادگیری فن‌آوری‌های نوظهور

ماخذ: (OECD/IEA,2000)

۳- پیشینه‌ی مطالعات انجام شده

تحقیقات انجام شده در ایران در ارتباط با تحقیق حاضر را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد؛ گروه اول، تحقیقات مربوط به مدل‌سازی و برنامه‌ریزی بخش برق ایران و به تبع آن تعیین سهم و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور در افق بلندمدت

1- Maturity Cost.

www.SID.ir

Archive of SID

است، از جمله مهم‌ترین این تحقیقات می‌توان به مطالعه‌ی وزارت نیرو (۱۳۸۷) با عنوان مدل سازی سیستم عرضه‌ی برق کشور با استفاده از مدل MESSAGE[1]، اشاره کرد. در این مطالعه، توسعه‌ی فن‌آوری‌های عرضه برق شامل فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر، در قالب یک «سیستم مرجع انرژی»[2] مدل‌سازی شده است. با توجه به این‌که هدف این مطالعه به‌طور عمده تحلیل توسعه‌ی فن‌آوری‌های چرخه‌ی ترکیبی در مقایسه با فن‌آوری‌های گازی و همین‌طور تحلیل جایگاه کلی نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی رایج بوده، موضوع یادگیری فنی و تأثیر آن بر توسعه‌ی آینده‌ی فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر مورد توجه واقع نشده است. در مطالعه مؤسسه‌ی پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی (۱۳۸۵)، تنها به معرفی خانواده‌ی مدل‌های مارکال و از جمله مدل مبتنی بر «تغییرات فنی درون‌زا»[3] اکتفا و قابلیت و کاربردهای این مدل برای تحلیل طرف عرضه بخش برق کشور تبیین شده است. دسته‌ی دوم مطالعات، شامل مطالعات مربوط به معرفی نقش و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران و سیاست‌ها و راهکارهای توسعه‌ی این انرژی‌ها در ایران است. از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به مطالعه‌ی کرباسی و همکاران[4] (۲۰۰۷)، اعتابی[5] (۲۰۰۴)، رازدان (۱۳۸۵) و کرد (۱۳۷۹)، اشاره کرد.

در سطح جهانی، منحنی یادگیری به‌طور گسترده‌ای در توصیف تغییرات فنی در بخش انرژی استفاده شده است. در این میان برخی از محققان مانند گلدمبرگ[6] (۱۹۹۶)، هارمون[7] (۲۰۰۰)، کلاسن و همکاران[8] (۲۰۰۲) و شوچیا[9] (۲۰۰۲)، به برآورد نرخ یادگیری فن‌آوری‌های مختلف بخش انرژی پرداخته‌اند. دسته‌ی دیگری از مطالعات به بررسی تأثیر یادگیری فنی بر توسعه‌ی فن‌آوری‌های جدید در بخش انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌واسطه‌ی توسعه‌ی فن‌آوری‌های پاک مربوط می‌شود، که برخی از آن‌ها در جدول (۱) مورد توجه قرار گرفته‌اند.

1- Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts.
2- Reference Energy System.
3- Endogenous Technological Learning (ETL).
4- Karbassi et al.
5- Atabi.
6- Goldemberg.
7- Harmon.
8- Klaassen et al.
9- Tsuchiya

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- برخی مطالعات جهانی مرتبط با یادگیری فنی در بخش انرژی

مطالعه	مهم‌ترین نتایج
مسنر[1] (۱۹۹۷)	با فرض وجود یادگیری فنی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در احداث ظرفیت‌های نیروگاهی نسبت به حالت عدم وجود یادگیری فنی ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.
گریتوفسکی و ناکیسنویچ[2] (۲۰۰۰)	یادگیری فنی و سرریز دانش، تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه‌های بخش انرژی در طی چند دهه‌ی آینده خواهد داشت.
سیبرگتز و همکاران[3] (۲۰۰۰)	اثر سرریز و یادگیری فنی، هزینه‌های جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا سطح قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.
کاپریوس و بان[4] (۲۰۰۳)	یادگیری و پیشرفت فنی، موجب می‌شود هزینه‌های مربوط به کاهش انتشار CO_2 نسبت به زمانی که یادگیری وجود ندارد، کاهش یابد.
مان و ریچلز[5] (۲۰۰۴)	در شرایط وجود یادگیری فنی، جایگزینی فن‌آوری‌های پاک با فن‌آوری‌های رایج آلوده کننده محیط زیست در آینده، کم هزینه تر خواهد بود.
سانو و همکاران[6] (۲۰۰۶)	تأثیر عمده‌ی یادگیری بیش‌تر در زمانی است که این تکنولوژی‌ها به طور گسترده‌ی وارد بازار می‌شوند، ولی پس از آن‌که سهم آن‌ها در بازار تثبیت شد، تأثیرشان هم کاهش می‌یابد.
رائو و همکاران[7] (۲۰۰۶)	تغییر فنی به تنهایی برای تثبیت میزان آلاینده‌ها کفایت نمی‌کند و سیاست‌های کاهش انتشار به عنوان مکمل این فرآیند به شمار می‌روند.

۴- معرفی مدل

مدل «مارکال»، یکی از شناخته شده ترین مدل‌های «پایین به بالا»[8] در سطح جهانی است، که هر دو بخش عرضه و تقاضای انرژی را در برمی‌گیرد. به دلیل قابلیت‌ها و توانمندی‌های وسیع این مدل، سال‌های زیادی است که در امر برنامه‌ریزی ملی و محلی انرژی و نیز توسعه‌ی استراتژی‌های کاهش آلاینده‌های زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کارگیری وسیع «مجموعه‌ی مدل‌های خانواده‌ی مارکال»[9] در

1- Messner
2- Gritsevskyi and Nakicenovic
3- Seebregts et al.
4- Kypreos and Bann
5- Mann and Richels
6- Sano et, al.
7- Rao et al.
8- Top-Down.
9- MARKAL Family of Models.

www.SID.ir

Archive of SID

قریب به ۴۰ کشور دنیا اعم از توسعه یافته، در حال توسعه و یا در حال گذار، نشانه‌ی مقبولیت وسیع این مدل است (مان[1]، ۱۹۹۲). ساختار این مدل، هم‌چون سایر مدل‌های مدل‌های «پایین به بالا» به صورت یک شبکه است، که می‌توان از طریق آن، بخش انرژی را مشتمل بر همه‌ی حامل‌های انرژی و فرآیندی که از زمان استخراج تا رسیدن به مصرف نهایی می‌پیمایند، مدل‌سازی کرد (لولو و همکاران[2]، ۲۰۰۴).

اجرای کامل مدل نیاز به داده‌های متنوعی دارد، از جمله مهم‌ترین داده‌های ورودی این مدل، جزئیات فنی و اقتصادی فن‌آوری‌های بخش انرژی، شامل فن‌آوری‌های استخراج، انتقال، تبدیل و مصرف انرژی، تقاضای حامل‌های انرژی، قیمت حامل‌های انرژی ورودی به مدل و اطلاعات زیست محیطی است. به این ترتیب، تابع هدف مدل، کمینه کردن مجموع هزینه‌های تنزیل شده شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و... شرایط و محدودیت‌های فیزیکی، مالی، منطقی و ... ، به وسیله‌ی محدودیت‌های مسأله‌ی برنامه‌ریزی خطی و در قالب معادلات و نامعادلات بیان می‌شوند. یک مدل «مارکال» نوعی، ممکن است بسته به سطح جزئیات و تعداد دوره‌های زمانی تعریف شده، صدها محدودیت داشته باشد (کانودیا[3] و لولو، ۱۹۹۸).

فرم تابعی منحنی یادگیری را نمی‌توان به‌طور مستقیم در مدل‌های بهینه‌یابی وارد نمود. زیرا در صورت وارد کردن منحنی یادگیری به این مدل‌ها، مسأله‌ی برنامه‌ریزی به یک مسأله‌ی بهینه سازی غیرمحدب[4] تبدیل می‌شود، که دارای چند جواب بهینه‌ی موضعی[5] است. در این شرایط نمی‌توان تضمین کرد که با استفاده از تکنیک‌های حل رایج، یک جواب بهینه‌ی عمومی حاصل شود (بارتو[6]، ۲۰۰۱). فرآیند درون‌زا کردن منحنی یادگیری در مدل «مارکال»، مبتنی بر مطالعه‌ی بارتو (۲۰۰۱) است. در این رویکرد، با استفاده از روش «برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط»[7]، مسأله‌ی برنامه‌ریزی در شرایط وجود منحنی یادگیری به یک مسأله‌ی خطی و غیر محدب تبدیل می‌شود. در

1- Manne.
2- Loulou et al.
3- Kanudia.
4- Non-convex.
5- Local optimum solution.
6- Bareto.
7 - Mixed Integer Programming.

www.SID.ir

Archive of SID

این روش، برای وارد کردن منحنی یادگیری در مدل بهینه‌یابی، از مفهوم ظرفیت و هزینه‌ی تجمعی استفاده می‌شود.

ظرفیت تجمعی یک فن‌آوری خاص(K) در دوره‌ی t، برابر با مجموع ظرفیت‌های ایجاد شده‌ی آن فن‌آوری تا زمان t، به علاوه ظرفیت آن در زمان صفر است، که آن‌را با ($C_{K,0}$) نشان می‌دهیم. $C_{K,0}$، در حقیقت نقطه‌ی شروع منحنی یادگیری به شمار می‌آید. به این ترتیب می‌توان ظرفیت تجمعی ($C_{k,t}$) را به عنوان متغیر غیر نزولی، به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$C_{k,t} = C_{K,0} + \sum_{\tau=1}^{t} INV_{k,\tau} \qquad (۴)$$
$$k \in \{1,...,K\}, t \in \{1,...,T\}$$

که در آن، $C_{k,o}$، ظرفیت تجمعی اولیه و یک مقدار مشخص بوده و $INV_{k,\tau}$، میزان سرمایه‌گذاری فیزیکی (سرمایه‌گذاری برای ایجاد واحدهای ظرفیت فن‌آوری) انجام شده در این فن‌آوری در هر دوره‌ی زمانی است.

هزینه‌ی تجمعی ($TC_{k,t}$)، عبارتست از انتگرال سطح زیر منحنی هزینه‌ی نهایی، که در شکل (۲) نشان داده شده است. به این ترتیب، فرم ریاضی این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TC_{k,t} = \int_0^C SC_{k,t}(C).dC = \int_0^C aC_{k,t}^{-b}.dC = \frac{a}{1-b}C_{k,t}^{1-b} \qquad (۵)$$

هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ($IC_{k,t}$) در یک فن‌آوری یادگیرنده‌ی معین مانند (K) در دوره‌ی t، به صورت اختلاف دو مقدار متوالی هزینه‌ی تجمعی و به شکل زیر محاسبه می شود:

$$IC_{k,t} = TC_{k,t} - TC_{k,t-1} \qquad (۶)$$

این هزینه‌های سرمایه‌گذاری پس از تنزیل در تابع هدف وارد می شوند.

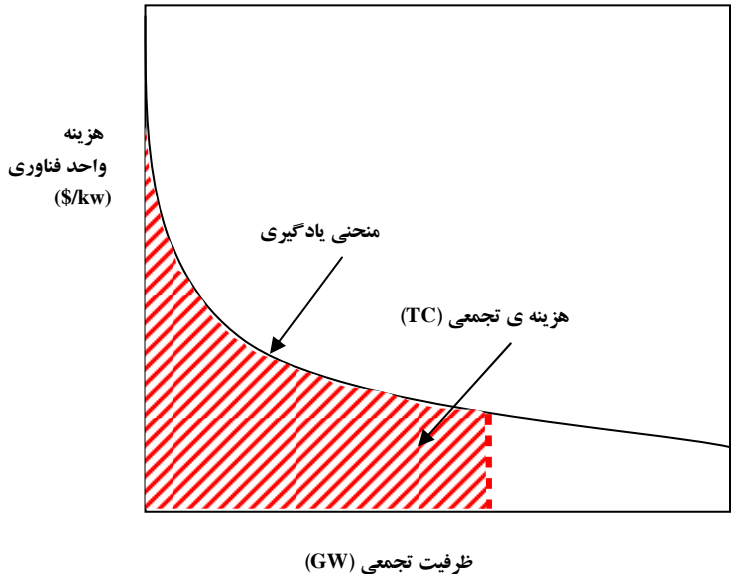
در مسأله‌ی برنامه‌ریزی غیر خطی، معادله‌ی (۵) در معادله‌ی (۶) جایگذاری شده و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در یک فن‌آوری خاص در هر دوره‌ی زمانی محاسبه‌ی شود:

$$IC_{k,t} = \frac{a(C_{k,t}^{1-b} - C_{k,t-1}^{1-b})}{1-b} \qquad (۷)$$

www.SID.ir

Archive of SID

و در نهایت این هزینه‌های سرمایه‌گذاری پس از تنزیل در تابع هدف برنامه‌ریزی وارد می‌شوند. در نتیجه، مسأله به یک مسأله‌ی برنامه‌ریزی با تابع هدف غیرخطی و غیرمحدب، اما با قیود خطی تبدیل می شود.



شکل ۲- منحنی یادگیری و تابع هزینه‌ی تجمعی

ماخذ: Bareto (2001)

از سوی دیگر، فرآیند برنامه‌ریزی عدد مختلط، یک تقریب خطی شکسته از تابع هزینه‌ی تجمعی ایجاد می‌کند. در حقیقت در این روش منحنی هزینه‌ی تجمعی به وسیله ی یک سری خطوط شکسته و به هم پیوسته برآورد می شود.

تابع هدف جدید (Z) متشکل از دو جزء خواهد بود، جزء اول، شامل مجموع هزینه‌های تنزیل شده‌ی فن‌آوری‌هایی که بنا به فرض، یادگیری در مورد آن‌ها متوقف شده، می‌باشد (K') و جزء دوم، شامل هزینه‌های تنزیل شده‌ی فن‌آوری‌هایی که هم‌چنان در معرض یادگیری فنی قرار دارند (K'') می‌شود.

$$Z = \sum_t (1+r)^{t-1} ANC(k', d, p, f)_t + \sum_t (1+r)^{t-1} \cdot IC(k'')_t \qquad (۸)$$

www.SID.ir

Archive of SID

در رابطه‌ی فوق، r نرخ تنزیل بوده و $ANC(k',d,p,f)$ ، هزینه‌ی تنزیل شده‌ی سیستم در زمان t می‌باشد که عبارتست از مجموع هزینه‌های فن‌آوری‌هایی که بنا به فرض، مشمول یادگیری نیستند. این هزینه‌ی تنزیل شده، تمامی هزینه‌های سیستم انرژی اعم از هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، تأمین سوخت و... را شامل می‌شود.

۵- نتایج تجربی

به منظور بررسی تأثیر یادگیری فنی بر سهم و جایگاه فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در ظرفیت نصب شده‌ی برق کشور و همین چنین تأثیر توسعه‌ی این فن‌آوری‌ها بر میزان انتشار آلاینده‌های بخش برق کشور، سناریوهای متعددی تعریف شده است. مشخصات این سناریوها در جدول (۲) ارائه آمده است. این سناریوها بر اساس چهار ویژگی تعریف شده‌اند که عبارتند از: نوع فن‌آوری مشمول یادگیری، نرخ پیشرفت فنی، وضع یا عدم وضع مالیات بر آلاینده‌ها از سوی دولت و حذف و یا عدم حذف یارانه‌های انرژی.

برای تعیین نرخ‌های یادگیری مورد استفاده در تحلیل، پس از استخراج تابع توزیع آماری نرخ‌های یادگیری محاسبه شده در سطح بین الملل، امید ریاضی این نرخ‌ها برای دو فن‌آوری بادی و فتولتائیک به ترتیب برابر با ۱۲/۵ و ۱۸/۵ درصد محاسبه شد. از سوی دیگر، برای این‌که امکان بررسی میزان حساسیت نتایج به تغییر نرخ‌های یادگیری فراهم شود، نرخ یادگیری متناظر با سطح اطمینان ۹۵ درصد به عنوان نرخ‌های یادگیری خوشبینانه استخراج شد، که برای دو فن‌آوری بادی و خورشیدی به ترتیب برابر با ۲۶ و ۳۵ درصد است. به این ترتیب، همان طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، مجموعه سناریوهای تعریف شده را می‌توان به دو دسته تقسیم‌کرد، دسته‌ی اول سناریوهایی هستند که با فرض عدم وجود یادگیری فنی تعریف شده‌اند. در میان این سناریوها، سناریوی B۱ و یا BAU[1]، سناریوی مرجع و یا تداوم وضع موجود است. دسته‌ی دوم سناریوها، شامل سناریوهای W۱ تا P۸ هستند، که با فرض وجود یادگیری فنی در یکی از دو فن‌آوری بادی و فتولتائیک تعریف شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات سناریوهای تعریف شده برای بررسی تأثیر یادگیری فنی

1 - Business-As-Usual.

www.SID.ir

Archive of SID

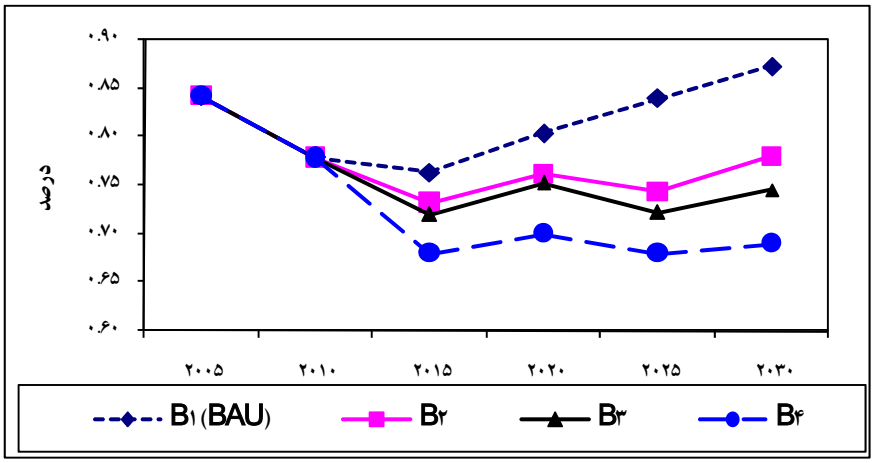
علامت اختصاری سناریو	فن‌آوری مشمول یادگیری	نرخ پیشرفت فنی (درصد)	وضع مالیات بر انتشار CO_2*	حذف یارانه‌ها*
B۱(BAU)	--	--	-	-
B۲	--	--	+	-
B۳	--	--	-	+
B۴	--	--	+	+
W۱	بادی	۱۲/۵	-	+
W۲	بادی	۱۲/۵	+	+
W۳	بادی	۱۲/۵	-	-
W۴	بادی	۱۲/۵	+	-
W۵	بادی	۲۶	-	+
W۶	بادی	۲۶	+	+
W۷	بادی	۲۶	-	-
W۸	بادی	۲۶	+	-
P۱	فتولتائیک	۱۸/۵	-	+
P۲	فتولتائیک	۱۸/۵	+	+
P۳	فتولتائیک	۱۸/۵	-	-
P۴	فتولتائیک	۱۸/۵	+	-
P۵	فتولتائیک	۳۵	-	+
P۶	فتولتائیک	۳۵	+	+
P۷	فتولتائیک	۳۵	-	-
P۸	فتولتائیک	۳۵	+	-
WP۱	بادی(۱۲/۵٪) و فتولتائیک(۱۸/۵٪)		-	+
WP۲	بادی(۱۲/۵٪) و فتولتائیک(۱۸/۵٪)		+	+
WP۳	بادی(۱۲/۵٪) و فتولتائیک(۱۸/۵٪)		-	-
WP۴	بادی(۱۲/۵٪) و فتولتائیک(۱۸/۵٪)		+	-

* علامت‌های + و − به ترتیب نشان دهنده‌ی لحاظ و یا عدم لحاظ یک محدودیت در تعریف سناریوهاست.

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج اجرای سناریوهای پایه نشان می‌دهد که در صورت تداوم وضع موجود، نیروگاه‌های حرارتی شامل توربین‌های گازی، نیروگاه‌های بخاری و چرخه‌ی ترکیبی، هم‌چنان جایگاه اصلی و غالب را در میان فن‌آوری‌های مختلف عرضه‌ی برق خواهند داشت. اگر چه سهم این فن‌آوری‌ها در دوره‌های ابتدایی برنامه‌ریزی با کاهش اندکی است، ولی به دنبال آن تا پایان دوره‌ی برنامه‌ریزی از روند افزایشی برخوردار خواهد بود. انتظار می‌رود حذف یارانه‌های انرژی و یا وضع مالیات بر انتشار آلاینده‌ها، تأثیر قابل ملاحظه ای بر ترکیب ظرفیت نصب شده‌ی برق داشته باشد. همان‌گونه که نمودار (۱) نشان می‌دهد، حذف یارانه‌ها موجب می‌شود سهم نیروگاه‌های حرارتی در مقایسه با سناریوی مرجع کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.



نمودار ۱- سهم نیروگاه‌های حرارتی از کل ظرفیت نصب شده در سناریوهای مختلف

ماخذ: یافته‌های پژوهش

جدول (۳)، ظرفیت بهینه‌ی انواع فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر را تحت سناریوهای پایه نشان می‌دهد. آن‌گونه که ملاحظه می‌شود، دو سیاست حذف یارانه‌های انرژی و وضع مالیات بر انتشار آلاینده‌ها، تنها بر ظرفیت نیروگاه‌های برقابی و زمین گرمایی تأثیر دارند، به‌این ترتیب با فرض عدم وجود یادگیری فنی، علی رغم تأثیر قابل ملاحظه‌ی سیاست‌های فوق بر کاهش سهم نیروگاه‌های حرارتی از کل ظرفیت نصب شده‌ی برق در کشور، این سیاست‌ها بر جایگاه نیروگاه‌های بادی و فتولتائیک در سبد تولید برق کشور تأثیری نخواهند داشت.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- ظرفیت بهینه‌ی انواع فن‌آوری‌های تجدیدپذیر در شرایط عدم وجود امکان یادگیری فنی در سال ۲۰۳۰ میلادی

سناریوها	برقابی بزرگ	برقابی کوچک	بادی	فتولتائیک	حرارتی خورشیدی	زمین گرمایی
B۱	۵/۷۷	۰/۰۰	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
B۲	۱۰/۵۳	۳/۰۵	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
B۳	۱۵/۰۰	۷/۲۵	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۳۰
B۴	۲۰/۰۲	۷/۷۵	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۵۰

ماخذ: یافته‌های پژوهش

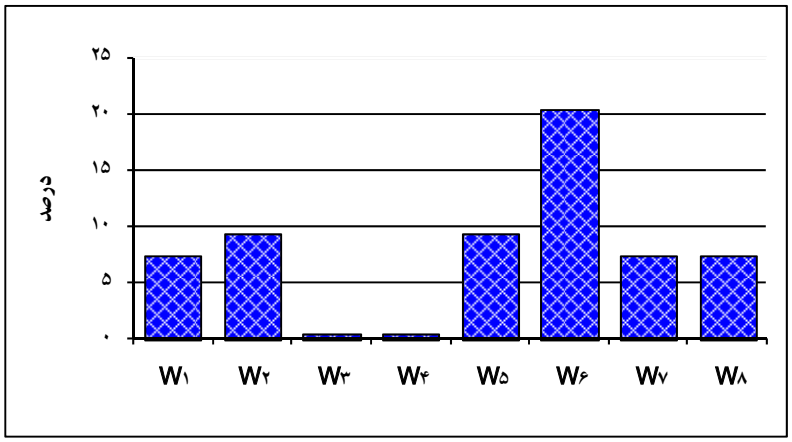
هم‌چنین نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که سیاست دولت برای تشویق مشارکت بخش خصوصی در احداث نیروگاه‌های برقآبی کوچک و افزایش سهم این نیروگاه‌ها در تولید برق زمانی با موفقیت همراه خواهد شد که قیمت‌های انرژی واقعی باشند، در غیر این صورت نمی‌توان انتظار داشت که با وجود جذابیت نیروگاه‌های گازی، تمایلی برای سرمایه‌گذاری در این فن‌آوری‌ها باقی بماند.

نمودار (۲) تأثیر یادگیری فنی درون‌زا بر ظرفیت بهینه‌ی فن‌آوری بادی را با فرض دو نرخ متفاوت یادگیری، نشان می‌دهد. با فرض نرخ یادگیری فنی ۱۲/۵٪، چنان‌چه قیمت‌های انرژی یارانه‌ای باشد، ظرفیت بهینه‌ی فن‌آوری بادی تفاوتی با وضعیت عدم وجود یادگیری فنی نخواهد داشت. به عبارت دیگر، در شرایط وجود قیمت‌های یارانه‌ای، حتی با وجود یادگیری فنی نیز فن‌آوری بادی توان رقابت در بازار را نخواهد داشت. اما چنان‌چه یارانه‌های حامل‌های انرژی حذف شود، با فرض وجود نرخ یادگیری ۱۲/۵٪، سهم فن‌آوری بادی از کل ظرفیت نصب شده‌ی فن‌آوری‌های برق تجدیدپذیر به ۹/۴ درصد در انتهای دوره‌ی برنامه‌ریزی خواهد رسید. هم‌چنین این نمودار نشان می‌دهد که نتایج سناریوهای مربوط به یادگیری فنی، در فن‌آوری بادی تا حد قابل ملاحظه‌ای نسبت به میزان نرخ یادگیری حساس است، به طوری که اگر خوشبینانه فرض شود، نرخ یادگیری برابر با ۲۶ درصد است، در این صورت حتی با وجود قیمت‌های یارانه‌ای، فن‌آوری بادی قابلیت رقابت با سایر فن‌آوری‌های رایج در بازار را پیدا نموده و سهم آن از ظرفیت نصب شده فن‌آوری‌های تجدیدپذیر به حدود ۷/۳ درصد بالغ خواهد شد. در نهایت با فرض وجود نرخ یادگیری فنی ۲۶ درصد و پیاده سازی همزمان دو سیاست

www.SID.ir

Archive of SID

حذف یارانه‌ها و وضع مالیات بر کربن از سوی دولت (سناریوی W۶)، سهم فن‌آوری بادی از کل ظرفیت برق تجدیدپذیر در سال ۲۰۳۰ میلادی به حدود ۲۰ درصد می‌رسد.



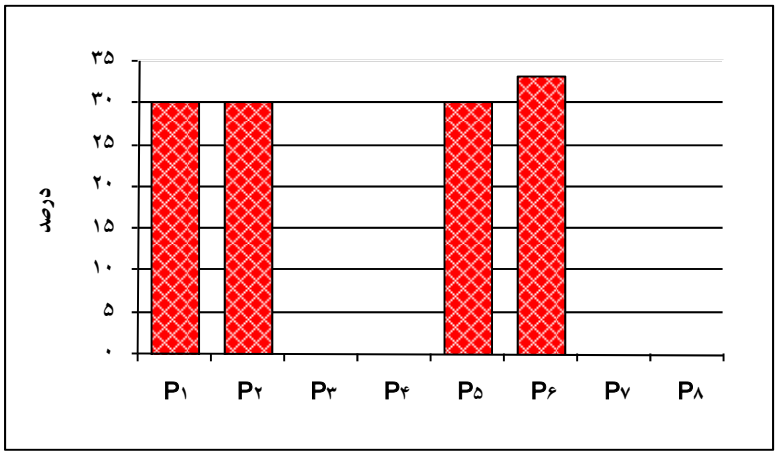
نمودار ۲- سهم فن‌آوری‌های بادی از کل ظرفیت برق تجدیدپذیر در سناریوهای مختلف

ماخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج مربوط به تأثیر یادگیری فنی در فن‌آوری فتولتائیک بر ظرفیت این فن‌آوری مشابه نتایج به‌دست آمده در مورد فن‌آوری فتولتائیک است. نمودار (۳)، نشان می‌دهد که یادگیری فنی تنها در شرایطی موجب اقتصادی شدن فن‌آوری‌های فتولتائیک می‌شود که یارانه‌های انرژی حذف شود. با فرض این‌که نرخ پیشرفت فنی برابر با ۱۸/۵٪ درصد باشد، سهم فن‌آوری فتولتائیک از کل ظرفیت فن‌آوری‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۳۰ میلادی به حدود ۳۰ درصد خواهد رسید. در مورد فن‌آوری فتولتائیک نیز، نتایج اجرای سناریوهای یادگیری فنی نسبت به‌اندازه‌ی نرخ یادگیری حساسیت دارد، به طوری که در صورت حذف یارانه‌های انرژی و برقراری هم‌زمان مالیات بر آلاینده‌ها، چنان‌چه نرخ یادگیری به ۳۵ درصد افزایش یابد، سهم فن‌آوری فتولتائیک از کل ظرفیت برق تجدیدپذیر به۳۳/۳ درصد افزایش خواهد یافت.

www.SID.ir

Archive of SID



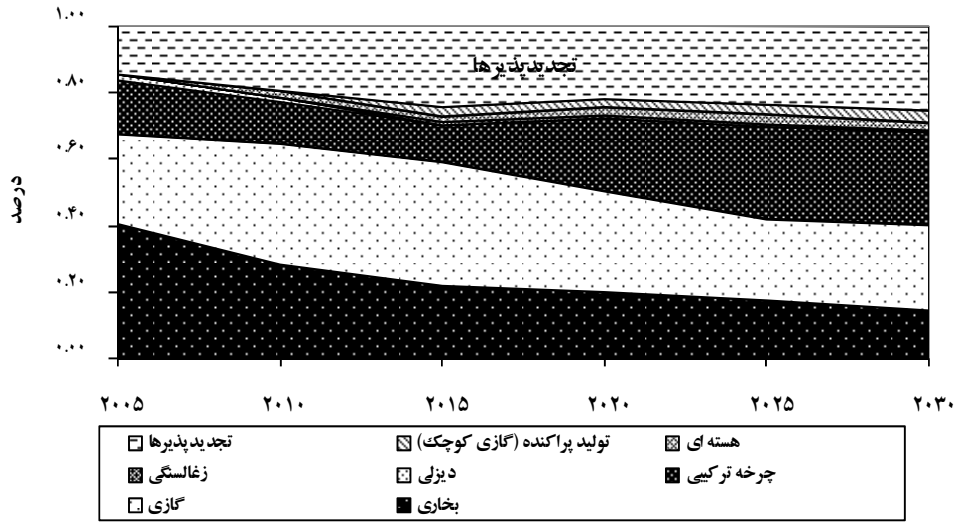
نمودار ۳- تأثیر یادگیری از طریق تجربه بر ظرفیت فن‌آوری فتولتائیک

ماخذ: یافته‌های پژوهش

در سناریوهای WP۱ تا WP۴، فرض شده است که در مورد هر دو فن‌آوری بادی و فتولتائیک امکان یادگیری فنی وجود دارد. نرخ یادگیری این دو فن‌آوری نیز به ترتیب برابر با ۱۲/۵٪ و ۱۸/۵٪ در نظر گرفته شده است. نمودار (۴)، سهم فن‌آوری‌های مختلف تولید برق از کل ظرفیت نصب شده را با فرض وجود یادگیری فنی در مورد فن‌آوری‌های بادی و فتولتائیک نشان می‌دهد. آنگونه که این نمودار نمایش می‌دهد، اگر چه با وجود یادگیری فنی باز هم نیروگاه‌های حرارتی سهم عمده و غالب را در تأمین برق خواهند داشت، ولی فرض یادگیری فنی درون‌زا موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی ظرفیت نصب شده‌ی تجدیدپذیر در مقایسه با سناریوی پایه می‌شود. هم‌چنین نمودار (۴) نشان می‌دهد که با فرض یادگیری فنی درون‌زا، ترکیب نیروگاه‌های حرارتی به سمت افزایش سهم نیروگاه‌های چرخه‌ی ترکیبی خواهد بود. این نیروگاه‌ها از نظر راندمان بالاتر از نیروگاه‌های دیگر هستند، ضمن این‌که آلایندگی کم‌تری هم دارند.

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۴- تأثیر یادگیری فنی بر سهم فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در کشور

ماخذ: یافته‌های پژوهش

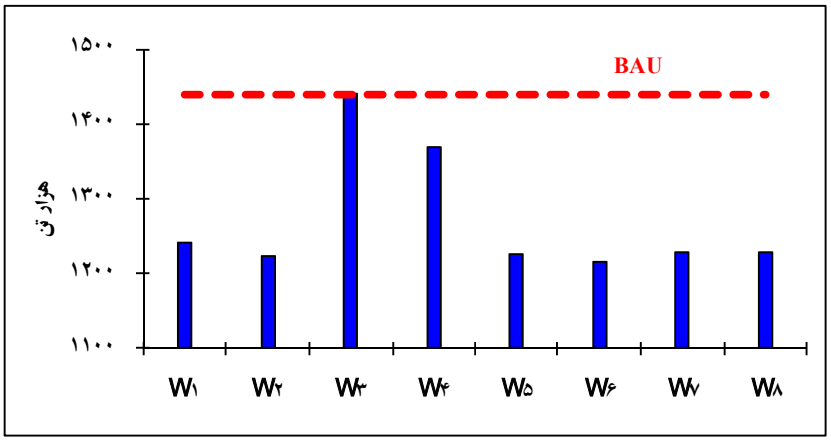
با توجه به این‌که یادگیری فنی تأثیر مستقیمی بر ترکیب نیروگاه‌ها و ظرفیت بهینه‌ی آن‌ها دارد، انتظار می‌رود موجب بروز تغییراتی در روند انتشار آلاینده‌ها در بخش برق شود. به منظور امکان مقایسه‌ی تأثیر یادگیری فنی درون‌زا بر انتشار CO_2، ابتدا نتایج سناریوهای پایه در این زمینه بررسی می‌شود.

نمودارهای (۵) و (۶)، به ترتیب برآورد میزان انتشار گاز CO_2 بخش برق را تحت سناریوهای مختلف مبتنی بر یادگیری درون‌زای فن‌آوری بادی و فتولتائیک نشان می‌دهند. خط منقطع موجود در این نمودارها، نشان دهنده‌ی میزان تجمعی انتشار CO_2 در سناریوی پایه است. این دو نمودار نشان می‌دهند که در شرایط یارانه‌ای بودن قیمت‌های انرژی و عدم توسل دولت به سیاست‌های جلوگیری از انتشار، حتی با وجود یادگیری فنی، میزان انتشار CO_2 بخش برق، تفاوتی با وضعیت پایه نخواهد داشت. نکته جالب توجه در نمودار (۵) آن است که افزایش نرخ یادگیری فن‌آوری بادی می‌تواند تأثیر یارانه‌ای بودن قیمت حامل‌ها بر انتشار گاز CO_2 را تا حد زیادی جبران کند. به عبارت دیگر، هزینه‌های دولت در امر تحقیق و توسعه‌ی فن‌آوری‌های نوین می‌تواند به منزله‌ی یک ابزار سیاستی برای کاهش انتشار عمل کند. با توجه به تأثیر منفی سیاست‌هایی مانند وضع مالیات بر آلاینده‌ها، بر سطح قیمت‌ها، سیاست توسعه‌ی

www.SID.ir

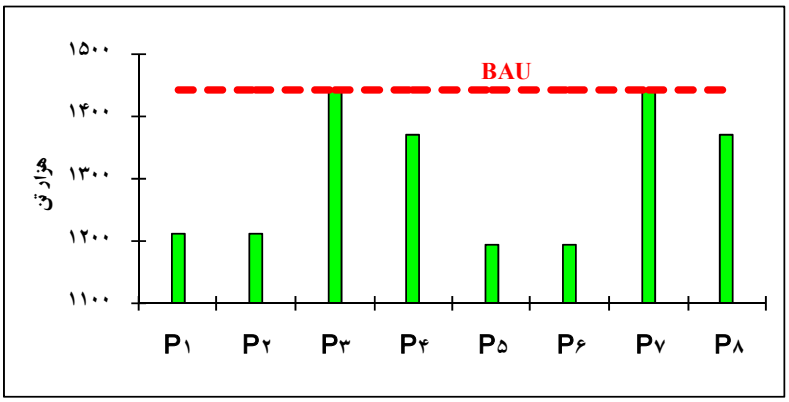
Archive of SID

فن‌آوری‌های پاک می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. البته نباید فراموش کرد که به تأخیر انداختن سیاست‌های کنترل انتشار، می‌تواند موجب شتاب گرفتن روند انتشار و در نتیجه خنثی شدن تأثیر توسعه‌ی فن‌آوری‌های پاک در بخش انرژی شود.



نمودار ۵- میزان تجمعی انتشار CO_2 بخش برق در سناریوهای مبتنی بر یادگیری درون‌زای فن‌آوری بادی

ماخذ: یافته‌های پژوهش



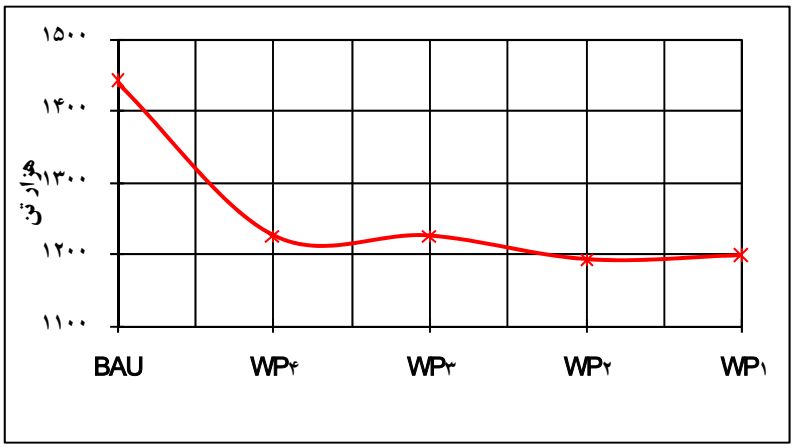
نمودار ۶- میزان تجمعی انتشار CO_2 بخش برق در سناریوهای مبتنی بر یادگیری تجمعی فن‌آوری فتولتائیک

ماخذ: یافته‌های پژوهش

www.SID.ir

Archive of SID

در نهایت نمودار (۷)، تأثیر مشترک یادگیری فنی در فن‌آوری‌های بادی و فتولتائیک را بر انتشار CO_2 نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در این نمودار نیز گویای آن است که اولاً یادگیری فنی مشترک فن‌آوری‌های بادی و فتولتائیک، میزان تجمعی انتشار آلاینده‌ها را در مقایسه با سناریوی مرجع تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. ثانیاً در صورتی که یادگیری فنی با حذف یارانه‌های انرژی و اعمال مالیات بر آلاینده‌ها همراه شود، تأثیر آن بر کاهش انتشار بیش‌تر مشهود خواهد بود.



نمودار ۷- میزان تجمعی انتشار CO_2 در سناریوهای یادگیری فنی همزمان فن‌آوری بادی و فتولتائیک

ماخذ: یافته‌های پژوهش

۶- نتیجه‌گیری

مفهوم یادگیری فنی، کاربردهای مهمی در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری بخش انرژی دارد. پدیده‌ی یادگیری فنی نشان دهنده‌ی این واقعیت است که برای شتاب بخشیدن به روند توسعه‌ی فن‌آوری‌های جدید در بخش انرژی، نیازمند تجربیات مداوم هستیم. منحنی یادگیری، ابزاری قدرتمند برای اتخاذ تصمیمات راهبردی در سیاست گذاری فن‌آوری‌های انرژی به حساب می‌آید و می‌تواند به عنوان یک چراغ راهنما نشان دهد که کدام یک از فن‌آوری نوظهور امید بخش‌ترند و به عبارتی پتانسیل بیش‌تری برای تبدیل شدن به فن‌آوری کم هزینه تر در آینده را دارا هستند، به ویژه آن‌که می‌تواند نشان دهد، میزان سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز برای رقابتی کردن فن‌آوری‌های جدید چه

www.SID.ir

Archive of SID

مقدار است. در نتیجه این ابزار ما را در تعریف ترکیبی از فن‌آوری‌های جایگزین که از اولویت بالاتری برخوردارند، یاری می‌کند تا تلاش‌ها و منابع برای توسعه‌ی این مجموعه از فن‌آوری‌های جدید متمرکز شود.

در ایران، در طی سال‌های گذشته تلاش‌های زیادی برای توسعه‌ی فن‌آوری‌های انرژی تجدید پذیر انجام گرفته است. توجه به پدیده‌ی یادگیری فنی می‌تواند امیدهای تازه‌ای را برای توسعه‌ی این فن‌آوری‌ها در آینده ایجاد کند. در این میان به نظر می‌رسد، وجود اختلالات قیمتی در بازار انرژی به واسطه‌ی پرداخت یارانه از سوی دولت، فن‌آوری‌های رایج تولید برق به ویژه نیروگاه‌های گازی را به عنوان گزینه جذاب‌تری در بخش برق مطرح کرده است و در صورت تداوم وضع موجود، این نیروگاه‌ها در آینده‌ی نه چندان دور سهم اصلی و غالب را در سبد فن‌آوری‌های تولید برق کشور به خود اختصاص خواهند داد.

نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که یادگیری فنی تأثیر چشم‌گیر و قابل ملاحظه‌ای بر سهم فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در صنعت برق ایران دارد، اما اختلالات قیمتی ناشی از دخالت دولت در مکانیزم قیمت‌گذاری سبب می‌شود، که باوجود فرض یادگیری فنی، هم‌چنان فن‌آوری‌های تجدیدپذیر فاقد توان رقابت با سایر فن‌آوری‌های رایج در بازار باشند، لذا هزینه‌های دولت برای پرداخت یارانه‌ی حامل‌های انرژی نوعی اثر «برون رانی» به همراه دارد و موجب می‌شود سرمایه‌گذاری در فن‌آوری‌های جدید که در معرض یادگیری فنی قرار دارند،کاهش یابد.

نتیجه‌ی مهم دیگر این تحقیق آن است که افزایش نرخ یادگیری فن‌آوری بادی می‌تواند تأثیر یارانه‌ای بودن قیمت حامل‌ها بر انتشار گاز CO_2 را تا حد زیادی جبران کند. به عبارت دیگر، هزینه‌های دولت در امر تحقیق و توسعه‌ی فن‌آوری‌های نوین می‌تواند به منزله‌ی یک ابزار سیاستی برای کاهش انتشار عمل کند. با توجه به تأثیر منفی سیاست‌هایی مانند وضع مالیات بر آلاینده‌ها، بر سطح قیمت‌ها، سیاست توسعه‌ی فن‌آوری‌های پاک می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. البته نباید فراموش کرد که به تأخیر انداختن سیاست‌های کنترل انتشار می‌تواند موجب شتاب گرفتن روند انتشار و در نتیجه خنثی شدن تأثیر توسعه‌ی فن‌آوری‌های پاک در بخش انرژی شود.

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست منابع

رازدان، مهسا (۱۳۸۵) سیاست‌های بهره گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر غیربرق ـ آبی در کشورهای منتخب و جایگاه ایران، فصل‌نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۱۰، ص. ۶۸.

کرد، بهمن (۱۳۷۹) نقش انرژی‌های نو در تأمین انرژی روستایی در ایران، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشکده‌ی اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس.

مؤسسه‌ی پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی (۱۳۸۵) معرفی خانواده مدل‌های MARKAL، گروه مدل‌سازی، مؤسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، دانشگاه فنی دانشگاه تهران، تهران.

وزرات نیرو (۱۳۸۷) مدل سازی سیستم عرضه‌ی برق کشور با استفاده از مدل MESSAGE، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت انرژی، وزارت نیرو، تهران.

ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، وزارت نیرو، تهران.

Arrow, K., 1963. The economic implications of learning-by-doing. Review of Economic Studies, Vol. 29, 155-173.

Atabi F. 2004. Renewable energy in Iran: Challenges and opportunities for sustainable development. International Journal of Environmental Sciences and Technology, 1, 69-80.

Barreto, L., 2001. Technological learning in energy optimization models and deployment of emerging technologies. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Garud, R., 1997. On the distinction between know-how, know-why and know-what. Advances in Srategic Mnagement 14, 81–101.

Goldemberg, J., 1996. The evolution of ethanol costs in Brazil. Energy policy 24 (12), 1127–1128.

Gritsevskyi, A., Nakicenovic, N., 2000. Modelling uncertainty of induced technological change. Energy Policy 28, 907–921.

Grubler, A., Messner, S., 1998. Technological change and the timing of mitigation measures. Energy Economics 20, 495–512.

www.SID.ir

Archive of SID

Harmon, C., 2000. Experience curves of photovoltaic technology. Interim Report/IR-00-014. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

Hirsh W. Z., 1952. Manufacturing progress functions. Review of Economics and Statistics, Vol. 34, No. 2.

Kamp, L., 2002. Learning in wind turbine development. A comparison between the Netherlands and Denmark, 244pp.

Kanudia, A., R. Loulou, 1998. Robust Responses to Climate Change via Stochastic MARKAL: the case of Québec, European Journal of Operations Research,106, 15-30.

Karbassi, A.R, Abduli, M.A and Abdollahzadeh, M., 2007. Sustainability of energy production and use in Iran. Energy policy, 35, 5171-5180

Klaassen, G., Miketa, A., Larsen, K., Sundqvist, T., 2005. The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom. Ecological Economics 54, 227–240.

Kypreos, S., Bahn, O., 2003. A MERGE model with endogenous technological progress. Environmental Modelling: An Assessment, Energy Economics, 8, 249–259.

Loulou, R., Goldestain G. and Noble K., 2004. Documentation of the MARKAL family of models., Energy Technology Systems Analysis Programm (ETSAP), available at: http://www.etsap.org/tools.html

Manne, A. Richels, R. 1992. Buying Greenhouse Insurance: Economic Cost of CO2 Emission Limits, MIT Press, Cambridge, MA, USA.

Manne, A., Richels, R., 2004. The impact of learning-by-doing on the timing and cost of CO2 abatement. Energy Economics, 26, 603–619.

Messner, S., 1997. Endogenized technological learning in an energy systems model. Evolutionary Economics, 7, 291–313.

OECD/IEA, 2000. Experience curves for energy technology policy. International energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.

Rao, S., Keppo, I., Riahi, K., 2006. Importance of technological change and spillovers in long term climate policy. The Energy Journal, Endogenous Technological Change, 123–139.

Robinson J. 1980. "Technological Learning, Technological Substitution, and Technological Change". Technological Forecasting and Social Change. Vol. 18, pp 39-49.

www.SID.ir

Archive of SID

Sahal D. 1980. "Technological Progress and Policy". In Sahal D. (Editor). Research, Development, and Technological Innovation. Recent Perspectives in Management. Lexington Books. Lexington, Massachusetts.

Sano, F., Akimoto, K., Homma, T., Tomoda, T., 2006. Analysis of technological portfolios for CO2 stabilizations and effects of technological changes. The Energy Journal, Endogenous Technological Change, 141–161.

Seebregts, A., kram, T., Schaeffer, G.J., Stoffer, A., kypreos, S., Barreto, L., Messner, S., Schrattenholzer, L., 1999. Endogenous technological change in energy system models: synthesis of experience with ERIS, MARKAL and MESSAGE. ECN-C–99-025, PSI, IIASA, Laxenburg, Austria.

Tsuchiya, H., 2002. Fuel Cell Cost Study by Learning Curve. International Energy Workshop, Stanford University, USA,

Wright, T. P., 1936. Factors Affecting the Cost of Airplanes, Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 3, No. 4.

www.SID.ir

Archive of SID

پیوست

مشخصات فن‌آوری‌های تولید برق در سیستم مرجع انرژی طراحی شده برای بخش برق ایران

فن‌آوری	ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۰۵ (سال شروع دوره‌ی برنامه‌ریزی) (گیگاوات)	توضیحات
گازی	۹/۹۵۰	در سال‌های اخیر به دلیل پایین بودن نسبی قیمت این نیروگاه‌ها و برنامه‌های دولت برای توسعه‌ی مشارکت بخش خصوصی، سرمایه‌گذاری در احداث این نیروگاه‌ها شتاب گرفته است.
بخاری	۱۵/۱۵۵	پیش بینی می‌شود ظرفیت این نیروگاه‌ها در سال‌های آینده با نرخ ملایمی افزایش یافته و به حدود ۱۶ گیگاوات در سال ۲۰۱۵ بالغ گردد.
چرخه ترکیبی	۵/۹۹۶	با توجه به راندمان بالاتر و آلایندگی کم‌تر این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های گازی، توسعه‌ی این نیروگاه‌ها جزء برنامه‌های دولت می‌باشد.
دیزلی	۰/۳۴۷	پیش بینی می‌شود این نیروگاه‌ها طی چند سال آینده به طور کلی از چرخه تولید خارج شوند.
تولید پراکنده	۰/۰۰۰	منظور از تولید پاکنده در این تحقیق، میکروتوربین‌های گازی می‌باشد. بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵ حداکثر ظرفیت برنامه‌ریزی شده برای توسعه‌ی این نیروگاه‌ها بالغ بر ۲ گیگاوات می‌باشد.
ذغالسنگی	۰/۰۰۰	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، مهم‌ترین پروژه نیروگاهی در دست احداث کشور، نیروگاه طبس با ظرفیت ۲/۷۲۰ گیگاوات می‌باشد.
آبی بزرگ	۵/۷۷۲	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، کل پتانسیل برق‌آبی کشور (نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ) در سه حوزه مهم آبریز کارون، دز و کرخه حدود ۲۰ گیگاوات است.
آبی کوچک	۰/۰۰۰	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی کشور، در مجموع ۳۸/۵ مگاوات نیروگاه برق‌آبی کوچک تا سال ۲۰۱۵ میلادی در کشور به بهره برداری می‌رسد.
هسته‌ای	۰/۰۰۰	مهم‌ترین پروژه نیروگاه هسته‌ای درکشور، نیروگاه بوشهر به ظرفیت حدود ۱ گیگاوات می‌باشد.
بادی	۰/۰۵۸	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، کل ظرفیت طرح‌های در دست بهره برداری، اجرا و مطالعه در کشور بالغ بر ۱۶۰ مگاوات است. هم‌چنین حداکثر پتانسیل شناسایی شده انرژی بادی در کشور بالغ بر ۶/۵ گیگاوات می‌باشد.
فتولتائیک	۰/۰۰۰	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، مجموع قدرت نصب شده واحدهای فتولتائیک در کشور بالغ بر ۶۷ کیلوات می‌باشد.
حرارتی خورشیدی	۰/۰۰۰	در حال حاضر، پروژه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در کشور در حال انجام است که از جمله می‌توان به نیروگاه حرارتی خورشیدی سهموی خطی شیراز به ظرفیت ۲۵۰ کیلوات اشاره نمود.
زمین گرمایی	۰/۰۰۰	بر اساس اطلاعات ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، مهم‌ترین پروژه زمین گرمایی کشور در مشکین شهر با ظرفیت ۵۵ مگاوات در حال احداث می‌باشد. هم‌چنین مجموع پتانسیل زمین گرمایی کشور ۷/۴ گیگاوات برآورد گردیده است.

www.SID.ir