بررسی روند انتشار و رقابت انرژی خورشیدی گرمایشی و فتوولتایی و اثر مشوق‌ها بر توسعه آن‌ها در امریکا

حامد شکوری گنجوی*[۱]

هادی دولت‌آبادی[۲]

چکیده

رشـــد دو فناوری مهم در انرژی خورشـــیدی، یعنی انرژی فتوولتایی و انرژی خورشیدی گرمایشی در تمـــام جهان و از جمله در آمریکای شـــمالی در گرو حمایت دولت‌ها و اعطای مشـــوق‌های مالی برای سرمایه‌گذاری در آن‌ها بوده است. در این مقاله مجموعه بزرگی از دو سری مدل رگرسیونی برای تحلیل روند رشد این دو فناوری در کشور آمریکا مورد آزمایش قرار گرفته است. پس از انتخاب بهترین مدل‌ها با استفاده از یک روش سیستماتیک، اثر مشوق‌ها با توجه به فقدان داده‌های دقیق، به روش شبیه‌سازی مونت کارلو تخمین زده شـــده است. مشاهده داده‌های موجود و نتایج به دست آمده از مدل، حاکی از احتمال وجود رفتار متوهّمانه (گله‌ای) در رشد این دو فناوری چه در ابتدا و چه در حال حاضر است. رشد فناوری خوشیدی گرمایشی پیش از این در اثر کاهش قیمت‌های انرژی‌های جایگزین و جایگزینی فناوری فتوولتایی، کاهش داشته و اثر مشوق‌ها نیز بر آن پس از سال ۲۰۰۸ تقریباً از بین رفته است. نتایج شبیه‌ســـازی با حذف اثر مشـــوق‌ها نشان می‌دهد که سرعت رشد فناوری فتوولتایی نیز با حذف مشـــوق‌ها کاهش قابل توجهی خواهد داشـــت. این مطالعه می‌تواند تجربه‌ای مفید برای ایران در زمان حاضر باشد که مشوق‌های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را با اطمینان کامل حفظ کند.

کلیدواژه‌ها:

فناوری خورشیدی گرمایشـــی، فناوری فتوولتایی، مدل‌های خودرگرسیونی، شبیه‌سازی مونت کارلو، مشوق‌های انرژی تجدیدپذیر.

---

۱ . عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات، آدرس پست الکترونیک: hshakouri@ut.ac.ir

۲ . عضو هیأت علمی، موسسه منابع، محیط زیست و توسعه پایدار، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، کانادا

۱. مقدمه

رشد روزافزون نیاز به انرژی و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی از سوی دیگر، محرکی شده است که محققان و سرمایه‌گذاران در بخش انرژی، به سمت مهار و تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر جذب شوند (شمس و همکاران،۱۳۹۲). یکی از منابع انرژی پایان‌ناپذیر خورشید است. با بحران انرژی سال ۱۹۷۳ توجه به کاربرد انرژی خورشیدی بالا گرفت و سرمایه‌گذاری‌های زیادی در غالب کشورهای جهان به خصوص کشورهای صنعتی برای پژوهش و دستیابی به طرح‌های بهینه کاربردهای مختلف انرژی خورشیدی انجام پذیرفت. در دهه ۱۹۸۰ با از بین رفتن بحران انرژی، توجه به انرژی خورشیدی تقلیل یافت و در حال حاضر مهمترین موضوعی که در کشورهای صنعتی به آن توجه قابل توجهی می‌شود سلول‌های خورشیدی می‌باشد. علاوه بر این، روش‌های گرمایش طبیعی خورشیدی در بسیاری از کشورهای جهان به خصوص آمریکا در دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است (سازمان انرژی‌های نو ایران).

برای تبدیل پرتوهای خورشیدی به الکتریسیته دو گزینه اصلی وجود دارد: استفاده از سامانه‌های فتولتایی و استفاده از سامانه‌های جذب گرمایش خورشیدی. در روش فتوولتائیک، پرتوهای خورشیدی به طور مستقیم توسط نیم‌رساناها به الکتریسیته تبدیل می‌شود. در روش گرمایشی، توان الکتریکی از طریق فرآیندهای ترمودینامیکی و با کمک تجهیزات مبدل گرما به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود (شمس و همکاران،۱۳۹۲). این دو فناوری با فاصله زمانی نه چندان زیاد از هم، رشد وسیعی را آغاز کرده‌اند. در این ارتباط، چند سؤال مهم را می‌توان مدنظر قرار داد:

- آیا انتشار این فناوری‌ها از تغییر در قیمت‌های انرژی فسیلی متأثر بوده است؟
- آیا دو فناوری خورشیدی گرمایشی و فتوولتایی با یکدیگر در رقابت بوده‌اند؟
- مشوق‌های مالی چه نقشی در رشد این دو فناوری داشته اند؟

در مقاله حاضر در پاسخ به سوالات مطرح شده در بالا، پس از بررسی پیشینه تحقیق و معرفی مدل‌های انتشار فناوری، روند رشد دو فناوری خورشیدی گرمایشی[1] (ST) و فتوولتایی[2] (PV) و سپس اثر مشوق‌ها بر توسعه این دو فناوری مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است در این بررسی، با توجه به تفاوت رفتار بخش‌های خانگی و تجاری که کاربران کوچک فناوری‌های انرژی

1 . Solar Thermal
2 . Photovoltaic

خورشیدی هستند؛ با کاربردهای صنعتی و متمرکز این فناوری‌ها، تمرکز بر توان‌های ۲ تا ۱۵ کیلووات از سیستم‌های خورشیدی بوده است. نهایتاً نتایج تحقیق ارائه شده است.

نتایج این تحقیق در راســتای بررســی تجارب کشورهای پیشتاز در اســتفاده از این نوع فناوری و برای توسعه انتشار فناوری‌های خورشیدی در کشور ایران مفید خواهد بود. کشور ایران دارای پتانسیل بالا برای استفاده از این انرژی پاک است و بررسی روش‌های مناسب برای انتشار این فناوری در کشور دارای اهیمت بالایی است.

۲. پیشینه تحقیق

بررســی تحقیقات پیشین نشــان می‌دهد تحقیقات مختلفی در زمینه توسعه اســتفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی خورشیدی انجام شده است. به عنوان مثال، جاکوبز و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی مشوق‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر در امریکای لاتین و کشورهای منطقه کارائیب پرداختند. آنها تعرفه تشویقی[1] انرژی‌های تجدیدپذیر را بهعنوان عاملی که موجب حذف ریسک برای سرمایه‌گذار انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود، مورد بررسی قرار دادند. اکثر تحقیقاتی که در خصوص انرژی خورشیدی انجام شــده اســت به بررسی تأثیر مشوق‌ها بر توسعه استفاده از انرژی خورشیدی پرداخته است؛ پابلو رومرو و همکاران (۲۰۱۳)، مشوق‌های توسعه استفاده از انرژی خورسیدی گرمایشی در اسپانیا را مورد بررسی قرار دادند. این مشوق‌ها شامل مشوق‌های مالیاتی، کمک‌های مالی مستقیم و تأمین مالی برای پروژه‌های مختلف ســرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی گرمایشی در ایالت‌ها و یارانه و مزایای مالیاتی در بخش‌های محلی است. سارزینسکی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از روش سری‌های زمانی مقطعی، تأثیر مشوق‌های مالی ایالتی برای توسعه فناوری فتوولتائیک خورشیدی طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۹ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشــان داد که در این دوره زمانی، مشــوق‌های نقدی مثل تخفیف و کمک مالی موجب توسعه سریع‌تر فناوری فتوولتایی متصل به شبکه شده است. گو و گو (۲۰۱۵)، با اســتفاده از روش پویایی‌های سیســتم و با توجه به عوامل فنی و اقتصادی به بررسی تأثیر مشوق‌ها بر توسعه استفاده از فناوری فتوولتائیک در کشور چین پرداختند. نوربرتو و همکاران (۲۰۱۶)، به مطالعه عوامل موثر بر توســعه فتوولتائیک خورشیدی در ۱۵ کشــور پرداختند. نتایج آنان نیز نشان داد یکی از سیاست‌های موفق برای توسعه فتوولتائیک تعرفه تشویقی بوده است و همچنین الزامات ساختمان

1 . Feed in Tariff

پایدار نیز به این توسعه کمک زیادی کرده است. سیلینگریدیس و ایکونوموپولوس (۲۰۱۳)، تأثیر قوانین ملی بر توسعه سیستم فتوولتایی در یونان را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد قوانین دولتی اخیر که ارتباط به شبکه را تسهیل کرده و سرمایه‌گذاران را برای فروش برق به قیمتی بالاتر از میزان هزینه ایجاد شده برای مشتری، مورد حمایت قرار میدهد؛ موجب رشد سریع ظرفیت نصب شده فتوولتایی شده است. ساونی و همکاران (۲۰۱۴)، اثر مشوق‌های اعمال شده برای توسعه استفاده از انرژی خورشیدی در تنسی را مورد بررسی قرار دادند. آنان این نتیجه منطقی را دریافتند که قیمت بالای برق و هزینه نصب کم منجر به توسعه بیشتر انرژی خورشیدی می‌شود و به علاوه اثر کمک هزینه‌های نقدی بیش از اثر سایر مشوق‌ها مثل مشوق‌های مالیاتی است. متیسوف و جانسون (۲۰۱۷)، با استفاده از ارزش فعلی خالص استاندارد به بررسی تأثیر انواع مشوق‌ها بر میزان نصب سیستم‌های فتوولتائیک در بیش از ۴۰۰ ایالت در امریکا پرداختند. نتایج نشان داد تقریباً ۶۷ درصد از مشوق‌های دولتی و اقتصادی، تا سقف ۱/۹ میلیارد دلار در بیش از ۱۱ سال، برای ایجاد مشوق‌هایی که باعث افزایش نصب تاسیسات خورشیدی نمی‌شود، صرف شده است. بلومستین و همکاران (۲۰۱۸)، روشی را برای کمک به تصمیم‌گیری در مورد نحوه توزیع بودجه کمک‌های مالی برای سیستم‌های برق خورشیدی مسکونی در شهر پورتلند در آمریکا به منظور حداکثر کردن تقاضا معرفی کردند.

با توجه به دوره جدیدی که در چندسال اخیر برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران آغاز شده است، نگرانی از حذف ناگهانی یا تدریجی مشوق‌های مربوط، به دلایلی مانند کمبود بودجه، بررسی اثر حذف آن‌ها در یک مدل مبتنی بر داده‌های تاریخی را مدنظر محققان این مقاله قرار داده است. نبود داده‌های تاریخی در کشور، آنان را به استفاده از داده‌های موجود مربوط به توسعه دو نوع فناوری انرژی خورشیدی در آمریکا سوق داده است. در این تحقیق ابتدا رابطه بین قیمت و تقاضا برای این فناوری‌ها بررسی شده و سپس داده‌های تاریخی برای کشف و تعیین چگونگی ارتباط بین عوامل بازار، عوامل مالی (از جمله مشوق‌ها) و اجتماعی با میزان توسعه این دو نوع فناوری به کارگرفته شده است. پس از آزمون هزاران مدل موازی، در نهایت مدلی ترکیبی برای پیش بینی روند توسعه درآینده به دست آمده است. از آنجا که مشوق‌های موجود در آمریکا برای توسعه انرژی‌های نو بسیار متنوع بوده و آماری از میزان هریک از آن‌ها در دست نبوده است، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و روش بیزین، ساختار انگیزشی در جهت حداقل کردن خطای مدل در پیش‌بینی داده‌های تقاضا مشخص شده و به مدل افزوده شده است تا بتوان اثر حذف آن‌ها از نتایج را بررسی کرد.

۳. روش تحقیق

در ایــن تحقیق از داده‌های آماری و کتابخانه‌ای (بخش زیــادی از داده‌ها از اداره انرژی آمریکا و بانک جهانی استخراج شده است) استفاده شده و هدف از تحقیق، شناخت پدیده توسعه انرژی‌های خورشیدی و رقابت میان آنها با توجه به عوامل مهم اســت. در این راســتا از مدل‌های انتشار فناوری استفاده شده اســت. در این بخش در خصوص این مدل‌ها و انواع مدل‌های رگرســیونی انتشــار و رقابت فناوری‌ها، رگرسیون‌های به ظاهر غیرمرتبط و مدل خودرگرسیونی برداری توضیح داده شده است.

۳. ۱. مدل‌های انتشار فناوری

دوره انتشار یک فناوری جدید از زمانی آغاز می‌شود که پس از نتیجه بخشی یک طرح پژوهش و توسعه و تبدیل آن به نوآوری و طی شدن مراحل تجاری‌سازی، اولین محصولات آن فناوری به بازار عرضه شده و مشتریان پیشتاز[1] آن را تهیه می‌کنند. سپس فناوری، با جلب نظر مشتریان از یک سو و درآمدزایی خود از سوی دیگر، به سرعت رشد می‌کند تا هزینه‌های گذشته خود را جبران کرده و به تدریج همه مشتریان بالقوه خود را پوشش دهد.

در ادبیات موضوع انتشــار فناوری، اغلب به دوره بروز و ظهور فناوری‌های نو پرداخته می‌شــود و دوره‌های افول و مرگ کمتر در معرض توجه قرار دارند. ابتدا می‌توان به یک مدل خطی مرتبه اول با پاسخ ساده آن اشاره کرد (جروسکی،۲۰۰۰):

$$\frac{dy}{dt} = \alpha(N - y) \qquad (۱)$$

$$y(t) = N(۱ - e^{-\alpha t}) \qquad (۲)$$

در این مدل N تعداد کاربران بالقوه فناوری، و y(t) تعداد کاربران در زمان t و پارامتر $\alpha>۰$ بیانگر ســرعت انتشار اســت. اما این مدل، با این فرض که عامل انتشار فناوری تنها یک منبع متمرکز اطلاع رســانی[2] اســت، بسیار ساده‌انگارانه‌تر از آن است که در اینجا به نقد آن پرداخته شود. از این رو، تقریباً بنای عموم مدل‌های ریاضی رشــد و تسلط فناوری‌ها بر یک معادله دیفرانسیل به صورت زیر گذاشته شده است:

$$\frac{dy}{dt} = \mu . y . g(y, N)$$

1 . Pioneer
2 . Central Source of Information

که در آن متغیر y سطح انتشار فناوری با واحدی مانند تعداد دستگاه‌ها یا استفاده‌کنندگان (مشتریان) از فناوری، و g(.) تابعی است غیرخطی از آن که میزان رشد انتشار آن را بیان می‌کند. دو مقدار ثابت μ و N به ترتیب سرعت رشد و ظرفیت بلوغ[1] فناوری یا همان کاربران بالقوه را تعیین می‌کنند. بسته به رفتار تابع g(.) پاسخ این معادله دیفرانسیل متفاوت خواهد بود. سه پاسخ تحلیلی مهم برای این معادله به نام مدل‌های لجستیک[2]، ریچارد[3] و گمپرتز[4] شناخته می‌شوند، که کاربرد مدل‌های لجستیک شایع‌تر از دو مدل دیگر است.

چنانچه تابع g(.) با تابعی خطی به صورت g(y,N)=۱-y/N جایگزین شود، به این مفهوم که سرعت رشد در ابتدای بروز فناوری جدید زیاد بوده و با نزدیک شدن به حد اشباع که همان ظرفیت سیستم است، به تدریج کاهش می‌یابد، پاسخ معادله مزبور با فرض وجود شرایط اولیه برابر با y(۰)=y۰، چنین خواهد بود:

$$y(t) = \frac{N}{۱ + \beta e^{-\alpha t}} \qquad (۴)$$

در تابع لجستیک بالا، دو پارامتر α=μN و β=(N-y۰)/y۰ تعیین‌کننده دینامیک و سرعت رشد فناوری هستند.

نکته مهمی که در حل مدل (۲) وجود دارد آن است که بدون مقدار اولیه، هیچ مشتری بالقوه‌ای به کاربر فناوری تبدیل نخواهد شد، چرا که در این مدل جریان اطلاعات تنها از طریق خود کاربران برقرار می‌شود. بنابراین گرچه مدل (۱) به تنهایی ناقص است، اما به تکمیل مدل دوم کمک می‌کند. به این ترتیب، معادله دیفرانسیل مربوط و روند انتشار با فرض وجود هر دو جریان اطلاعات (در ساده‌ترین شکل خود) چنین خواهد بود:

$$\frac{dy}{dt} = (\alpha + \mu . y)(N - y) \qquad (۵)$$

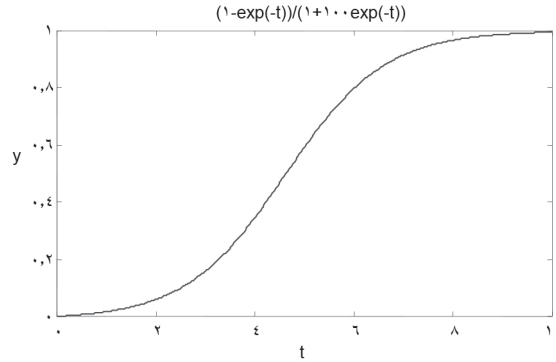
$$y(t) = N \frac{۱ - e^{-\theta t}}{۱ + \beta e^{-\gamma t}} \qquad (۶)$$

1 . Maturity
2 . Logistic
3 . Richard
4 . Gompertz

در این مدل ترکیبی پارامترها عبارتند از:

$$\theta = \alpha + \mu N, \;\; \gamma = \mu(\alpha + \mu N)/\alpha \qquad (۷)$$

چنین تابعی بسته به مقدار β می‌تواند از نقطه‌ای نزدیک صفر (یا صفر) شروع شود و البته باز هم S شکل خواهد بود. شکل ۱ نمونه‌ای از این تابع را نشان می‌دهد.



شکل ۱: رفتار مدل ترکیبی (۵) بازای $\theta=\gamma=1$ و β=۱۰۰

برای تعیین پارامترهای مدل‌های مزبور می‌توان از داده‌های تاریخی استفاده کرد. به علاوه، می‌توان از روابط رگرسیونی (اقتصادسنجی) که با استفاده از داده‌های آماری تخمین زده می‌شوند، بهره برد. به عنوان مثال، تعداد کل کاربران در وضعیت بلوغ یک فناوری و یا سرعت رشد آن می‌تواند به متغیرهایی مانند جمعیت (Pop)، سطح درآمد (GDP) و شاخص‌های توسعه انسانی (HDI) بستگی داشته باشد:

$$N(t)=N(GDP,Pop,HDI;t) \qquad (۸)$$

بـا ایـن وجود، می‌توان از داده‌هـای تاریخی هر چند اندک که از y(t) در اختیار اسـت، به همراه داده‌هایـی از متغیرهای برون‌زا مانند درآمد ملی و قیمت‌ها، از یک مدل رگرسـیونی با شـکل تابعی مناسب (مانند Log-Linear) برای برآورد روند انتشار یک فناوری بهره گرفت:

$$y(t)=f(GDP,Pop,HDI,p,p_s;t) \qquad (۹)$$

در اینجا p و p_s به ترتیب قیمت فناوری (محصول) و قیمت فناوری(های) جایگزین را نمایندگی می‌کنند.

علاوه بر ظرفیت بلوغ که معادل با ظرفیت تحمل[1] در مدل‌های رشد جمعیت، میزان نهایی سطح سیستم را تعیین می‌کند، عواملی مانند تبلیغات دهان به دهان[2] (که به نوبه خود تابع کیفیت، کارایی و دیگر مشـــخصات جذابیت[3] فناوری اســـت)، میزان تقاضای کل و ضریب تأثیر تبلیغات نیز در تعیین پارامتر μ دخیل هستند. میزان افزایش کاربران از طریق فروش، s ، طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$s(t)=(\alpha+\mu.y)(N-y) \qquad (۱۰)$$

برای بررســـی رقابت بین دو فناوری با کارکردهای مشابه، این سازوکار به طور مشابه برای فناوری دوم نیز قابل تکرار اســـت که در اتصال با مدل فناوری اول به یک مدل رقابت منجر خواهد شـــد. این اتصال بر اساس ساختاری به نام Polya صورت می‌گیرد که برای بررسی ویژگی وابستگی به مسیر در سیستم‌های ناپایدار طراحی شده است.

در این مدل که در این‌جا با اندک تغییراتی نســـبت به مدل ارائه شـــده توسط جروسکی (۲۰۰۰)، آورده شـــده اســـت، جذابیت فناوری‌ها تعیین کننده ســـهم بازار آن‌ها از کل تقاضاست. سهم بازار هر فناوری، m_i ، در ساده‌ترین شکل خود می‌تواند به صورت زیر تعیین شود:

$$m_i = \frac{a_i}{\sum_i a_i} \qquad (۱۱)$$

جذابیت هر یک از فناوری‌ها، a_i ، تابعی از عواملی مانند قیمت پایین، کیفیت بالا و اطلاعات مثبت دیگری است که در باره آن فناوری به گوش کاربران بالقوه[4] می‌رسد.

$$a_i = f(p_i, \dots); \ \frac{\partial f}{\partial p_i} < ۰ \qquad (۱۲)$$

با افزایش تعداد کاربران یک فناوری امکان کاهش قیمت و افزایش کیفیت و کارایی بیشتر می‌شود.

1 . Carrying Capacity
2 . Word of mouth
3 . Attractiveness
4 . Potential Adopters

۳. ۲. مدل‌های رگرسیونی انتشار و رقابت فناوری‌ها

رگرسیون یک روش عمومی برای برازش توابع ریاضی بر داده های تاریخی است. برای انتشار فناوری‌ها نیز رابطه‌ای مانند (۹) که در آن متغیرهای بسیاری را می‌توان به عنوان متغیر مستقل (برون‌زا) وارد کرد، قابل استفاده است. به‌علاوه جمله خطا در رگرسیون‌ها که شامل اثر عوامل ناشناخته است، خواص آماری ویژه‌ای را باید دارا باشد. چون برای بررسی رقابت دو فناوری باید دو رگرسیون همزمان برآورد شوند، جملات خطای دو رگرسیون می‌توانند در واقع به هم مرتبط باشند. در جایی که دو رگرسیون ناظر به برآورد دو متغیر مرتبط به هم هستند، می‌توان از یکی از دو نوع رگرسیون زیر بهره گرفت:

۳. ۲. ۱. رگرسیون‌های به ظاهر غیرمرتبط[1]

دو رگرسیون به ظاهر غیر مرتبط به هم را که در شکل ماتریسی زیر هم آورده شده باشند، درنظر بگیریم:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots ; t) \\ f_2(x_1, x_2, \dots ; t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

در برآورد رگرسیون‌های به ظاهر غیرمرتبط، بر اساس جملات خطای به دست آمده از برآورد تک به تک رگرسیون‌ها، ماتریس کواریانس جملات خطا مبنای برآورد نهایی پارامترهای رگرسیون‌ها به طور همزمان قرار می‌گیرد. با وجود این فرض که جملات خطای هر رگرسیون همبستگی سریالی زمانی ندارند، به دلیل امکان ارتباط بین جملات خطا در دو (یا چند) رگرسیون به یکدیگر، ماتریس کواریانس صفر نخواهد بود و معکوس آن وجود خواهد داشت. چنانچه نمونه‌های متغیرهای وابسته و مستقل در طول زمان زیر هم (به صورت برداری) نوشته شوند و توابع دلخواه $f_i(.)$ با رگرسیون‌های خطی جایگزین شوند، رابطه (۱۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_1 \\ \underline{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\beta}_1 \\ \underline{\beta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\varepsilon}_1 \\ \underline{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} = X\underline{\beta} + \underline{\varepsilon} \qquad (۱۴)$$

که در آن X_i ها ماتریس‌هایی خواهند بود که هر ستون آن نمونه‌های متغیرهای $x_j(t)$ در طول زمان هستند. با لگاریتم‌گیری از توابع ضربی- نمایی به صورت $f(.) = \prod x_j^{\beta_j}$ ، می‌توان به مدلی

1 . Seemingly Unrelated Regression Equations (SURE)

از نوع Log-Linear دست یافت. با این اوصاف و با فرض استقلال سریالی جملات خطا و ثابت ماندن انحراف معیار آن‌ها:

$$E\{\varepsilon_{it}.\varepsilon_{js}|X\} = ۰;\ E\{\varepsilon_{it}.\varepsilon_{jt}|X\} = \sigma_{ij};\ \ \Sigma = [\sigma_{ij}] \qquad (۱۵)$$

پارامترهای رگرسیون‌های خطی به ظاهر غیرمرتبط چنین تخمین زده می‌شوند:

$$\underline{\hat{\beta}} = (X^T W X)^{-۱}(X^T W \underline{y}) \qquad (۱۶)$$

که در آن، با اعمال ماتریس وزنی $W = \hat{\Sigma}^{-۱} \otimes I_n$ در حل حداقل مربعات رگرسیون معمولی، در واقع به یک حل حداقل مربعات وزنی دست می‌یابیم (زلنر،۱۹۶۲). در تعریف این ماتریس وزنی، I_n یک ماتریس واحد با ابعادی مساوی تعداد متغیرهای مستقل و $\otimes$ نماد ضرب کرونکر[1] است.

۲.۲.۳. مدل خودرگرسیونی برداری[2]

با تعمیم مدل رگرسیونی (۹) به دو فناوری، همچنان‌که در (۱۳) مشاهده شد، می‌توان مدل‌سازی رقابت بین فناوری‌ها را

پی‌ریزی کرد. چنانچه یک یا چند متغیر سمت راست این رابطه برداری با نمونه‌های قبلی متغیرهای سمت چپ جایگزین شوند، یک مدل خودرگرسیونی برداری (VAR) خواهیم داشت. با وجود متغیرهای مستقل، یک مدل VARX خطی مرتبه اول از معادلاتی به صورت زیر برخوردار است:

(۱۷)

$$\begin{bmatrix} y_۱(t) \\ y_۲(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{۱۱} & a_{۱۲} \\ a_{۲۱} & a_{۲۲} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_۱(t-۱) \\ y_۲(t-۱) \end{bmatrix} + \sum_{i=۱}^{n} \begin{bmatrix} b_{۱i} \\ b_{۲i} \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} v_۱(t) \\ v_۲(t) \end{bmatrix}$$

که در آن بردار $\underline{v}(t)$ جمله خطاست. اما در اینجا نیز به دلیل ارتباط بین متغیرهای وابسته، نمی‌توان از ارتباط بین جمله‌های خطا چشم‌پوشی کرد. به علاوه بردار جملات خطا خود می‌تواند به

1 . Kronecker Product
2 . Vector Auto-Regressive (VAR) models

صورت یک مدل میانگین متحرک (MA) با مرتبه مناسب از نویز سفید جایگزین شود. در این حال، نمایش برداری یک مدل خطی VARMAX با خودرگرسیونی مرتبه اول و میانگین متحرک مرتبه اول عبارتست از:

$$\underline{y}(t) = A\,\underline{y}(t-۱) + \sum_{i=۱}^{n} \underline{b}_i x_i(t) + C\,\underline{w}(t-۱) + \underline{w}(t) \qquad (۱۸)$$

در این‌جا نیز با توجه به تأثیر عطفی[1] متغیرهای مستقل در شکل‌گیری انتشار فناوری‌ها، توصیه می‌شود که از لگاریتم متغیرها در یک مدل Log-Linear استفاده شود. این مدل کلی می‌تواند برای هر تعداد متغیر وابسته در بردار $\underline{y}$ به کار گرفته شود. در صورتی که مدل‌سازی برای تنها دو متغیر وابسته (دو فناوری در حال رقابت) مدنظر باشد، در این رابطه برداری، C و A ماتریس‌های ۲ × ۲ و $\underline{b}_i$ ها بردارهای ۱ × ۲ خواهند بود. برای برآورد پارامترهای این مدل خطی باید از روش‌های حل تکراری در بهینه‌سازی حداقل مربعات استفاده کرد که برای اختصار از پرداختن به آن چشم‌پوشی شده است.

۳،۳. توسعه فناوری‌های انرژی خورشیدی

دو فناوری انرژی خورشیدی در سه دهه اخیر و در واقع پس از بحران انرژی دهه ۱۹۷۰ به تدریج در ایالات متحده رو به گسترش نهادند؛ فناوری خورشیدی گرمایشی که فناوری ساده‌تری است، زودتر و فناوری فتوولتایی چند سال پس از آن گسترش یافت. شکل ۲ سفارش‌های به انجام رسیده در فروش جمع‌کننده‌های خورشیدی و صفحات فتوولتایی را طی سال‌های گذشته تا سال ۲۰۱۰ در کشور آمریکا نشان می‌دهد[2] (اداره اطلاعات انرژی امریکا،۲۰۱۳). توزیع جمع‌کننده‌های گرمایی از نیمه دوم دهه ۷۰ و انتشار صفحات فتوولتایی از نیمه اول دهه ۸۰ آغاز شده است. این آمار شامل قطعات وارداتی نیز بوده است. تولید و توزیع فناوری خورشیدی گرمایشی با نوساناتی همراه بوده و به نظر می‌رسد در نیمه دوم دهه اول از قرن جدید با افت چشمگیری همراه شده است. اما فناوری فتوولتایی که فناوری جدیدتر و پیشرفته‌تری است به سرعت به رشد و توسعه خود ادامه داده و به نظر می‌رسد فناوری خورشیدی گرمایشی را کاملا کنار زده باشد. با توجه به بزرگی ارقام سفارش‌های فتوولتایی در چند سال اخیر، محورلگاریتمی انتخاب شده‌است.

1 . Conjunctive

۲ . داده های ارسال بر اساس سفارش (shipment) خالص (فروش داخل آمریکا: Shipment – Import + Export)

شکل ۴ روند تغییرات قیمت صفحات جذب انرژی خورشیدی را برای دو فناوری ST و PV نشان می‌دهد. همانگونه مشـــاهده می‌شود قیمت ســـلول‌های خورشیدی از یک روند کاهشی تقریبا مستمر برخوردار بوده اســـت، حال آنکه قیمت صفحات جذب فناوری ST نوســـانات بیشتری داشته است. به نظر می‌رســـد که روند کاهش قیمت با فضای توهمی و شـــاید نگرانی از گرانی‌های بیشتر انرژی که به افزایش تقاضای بیش از حد در انتهای دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ منجر شده بود، در انتهای دهه ۱۹۸۰ شکسته شده و افزایش ناگهانی قیمت را در آخر دهه ۸۰ و ابتدای دهه ۹۰ باعث شده است. در مقابل، عکس‌العمل طبیعی این افزایش قیمت، کاهش تقاضا بوده که مجدداً روند کاهش قیمت‌ها را تکرار کرده؛ روندی که تا نیمه دهه اول از قرن جدید نیز ادامه داشته است.

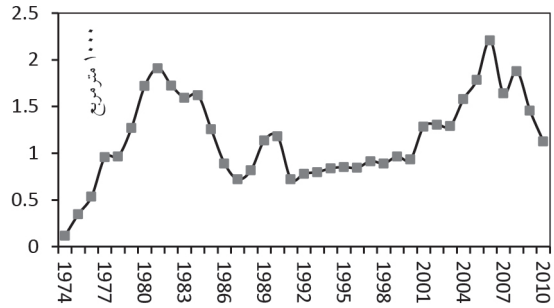
نوســـانات مورد اشـــاره، یک ســـازوکار موســـوم به رفتار هیجانی[1] را که به عنوان مثال در گسترش فناوری تجارت الکترونیک نمود پیدا کرد، تداعی می‌کند (وریارد،۲۰۰۵). طبق این نظریه که تا حدود زیادی به رفتار گلّه‌ای[2] در مباحث دینامیک اقتصاد شـــباهت دارد، ظهور هر فناوری جدید به ســـرعت افـــرادی را جذب می‌کند که بدون درک صحیـــح از کارایی آن به آن روی می‌آورند، اما پس از افزایش اطلاعات مردم و رفع توهم اولیه، تنها آنان که با شناخت کافی آن را انتخاب می‌کنند، به کاربران واقعی می‌پیوندند. با این فرض که فناوری نوظهور در طول عمر خود دچار تحولاتی در جهت بهبود می‌شود، ســـازوکار رفتار هیجانی ممکن اســـت باز تکرار شـــود و از این رو به نام چرخه رفتار هیجانی گارتنر[3] شناخته شده است.

با آنکه نیمه دوم دهه ۹۰ و نیمه اول دهه ۲۰۰۰ شاهد صعود مجدد در فناوری ST بوده، نیمه دوم این دهه شاهد صعود قیمت‌های آن بوده که علاوه بر تأثیر چرخه مزبور، بیش از همه از وابستگی این فناوری به فلزاتی چون مس و آلومینیم نشأت می‌گرفته است که در سال‌های اخیر افزایش قیمت قابل توجهی را تجربه کرده‌اند. این افزایش قیمت، همچنانکه انتظار می‌رود، کاهش تقاضا را طی ســـال‌های مذکور به دنبال داشته است.

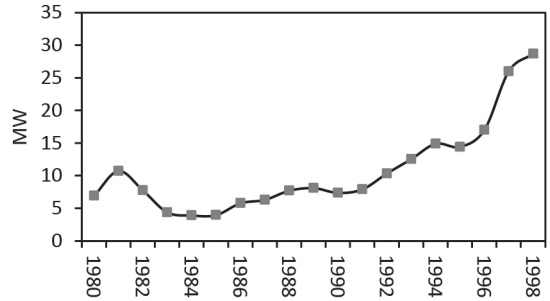
گرچه صفحات جذب جزء شـــاخص این دو فناوری به شـــمار می‌روند، نکته حائز اهمیت آن است که این داده‌ها تنها اجزای هزینه‌های این دو فناوری نیستند. این صفحات تنها در حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ هزینه‌های یک سیستم کامل را تشکیل می‌دهند. تفاوت در سهم هر یک از اجزا از هزینه‌های هر سیستم

1 . Hype
2 . Herd behavior
3 . Gartner’s Hype Cycle

همان‌طور که به شـرکت‌های سـازنده و طراحی سیستم وابسته است، به ظرفیت سیستم هم بستگی کامـل دارد. به عنوان مثال، هزینه مبدل[1] بارهای مسـتقیم بـه بارهای متناوب و هزینه نصب، تنظیم و راه‌اندازی سیسـتم فتوولتایی با افزایش ظرفیت سیسـتم، سهم کمتری از کل هزینههای آن خواهد داشت. یادآور می‌شود که این پژوهش ظرفیت‌های کوچک را هدف قرار داده است. جداول ۱ و ۲ سهم هزینه‌های فناوری انرژی خورشیدی گرمایی و فتوولتایی به تفکیک اجزا را نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، هزینه‌های نصب و تنظیم سیستم ST بسیار کمتر از هزینه نصب و اتصال به شبکه سیستم PV است. طبق گزارش‌های دپارتمان انرژی آمریکا[2]، بیش از نیمی از هزینه‌های یک سیستم PV را شرکت‌های نصاب بابت بالانس کردن سیستم دریافت می‌کنند (دپارتمان انرژی امریکا، ۲۰۱۲).

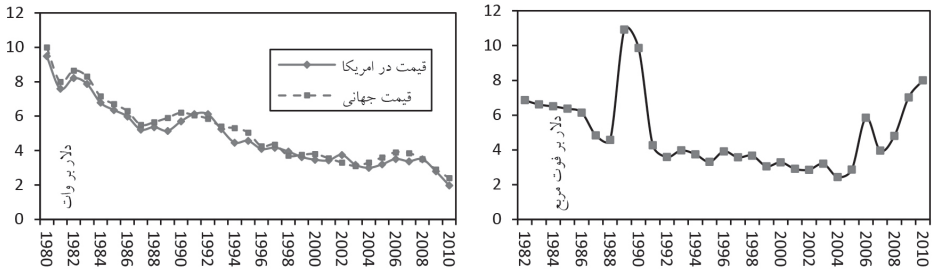


شکل ۲: داده های انتشار فناوری ST (مساحت جمع‌کننده‌های به فروش رفته در آمریکا)،
(منبع: EIA، ۲۰۱۳)



شکل ۳: داده های انتشار فناوری PV در محور لگاریتمی (حداکثر توان ماژول‌های به فروش رفته در آمریکا)
(منبع: EIA، ۲۰۱۳)

1 . Inverter
2 . Energy Information Administration (EIA)



شکل ۴: قیمت صفحات جذب‌کننده انرژی خورشیدی برای هر یک از دو فناوری ST (راست) و PV (چپ)
(منبع: EIA، ۲۰۱۳)

جدول ۱: سهم هزینه‌های فناوری انرژی خورشیدی گرمایی به تفکیک اجزا

نصب	پمپ	کنترل‌کننده	دیگ بخار	جمع‌کننده
۲۰٪ - ۱۵٪	۱۰٪ - ۵٪	۱۵٪ - ۵٪	۳۵٪ - ۲۰٪	۵۰٪ - ۳۰٪

(منبع: EIA، ۲۰۱۳)

جدول ۲: سهم هزینه های فناوری انرژی خورشیدی فتوولتایی به تفکیک اجزا

نصب	مبدل	ماژول
۶۵٪ - ۵۰٪	۱۵٪ - ۱۰٪	۴۰٪ - ۳۰٪

(منبع: EIA، ۲۰۱۳)

به نظر می‌رسد فناوری PV به دلیل جذابیت‌های متعدد خود، گوی سبقت را از رقیب خود ربوده است. علاوه بر روند مداوم کاهش قیمت صفحات سلول نوری، تبدیل مستقیم انرژی خورشید به انرژی پاک الکتریکی که کاربردهای وسیع‌تری نسبت به انرژی گرمایی دارد، امکان فروش الکتریسیته اضافی تولید شده و کم‌تر بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن، مزایای این فناوری نسبت به ST به شمار می‌آیند.

در قبال مزایای مذکور، ناگفته نماند که اخیراً پدیده جدیدی ناشی از محدودیت‌های انتقال، سرعت گسترش این فناوری را محدود کرده است. توضیح آن‌که چون خطوط توزیع و انتقال تنها برای مصرف انرژی توسط بخش‌های خانگی و تجاری طراحی شده است، گاهی در ساعات پرآفتاب میزان تولید انرژی در این بخش‌ها چندان زیاد می‌شود که این خطوط به دلیل تراکم[1]، ظرفیت انتقال انرژی

1 . Congestion

تولیدی به شبکه را ندارند. از این رو، شرکت‌های برق محلی و منطقه‌ای با احتیاط بیش از پیش اجازه اتصال سیستم‌های فتوولتایی به شبکه را صادر می‌کنند و صاحبان سیستم‌ها ناچار باید از باتری برای ذخیره‌سازی انرژی اضافی تولید شده استفاده کنند. واضح است که در این صورت هزینه‌های سیستم بالا رفته و جذابیت این فناوری کاهش می‌یابد (چدیاک،۲۰۱۳). همین موضوع می‌تواند فناوری ST را بار دیگر به صحنه باز گرداند.

منابع اطلاعاتی چون IRENA پیش‌بینی می‌کنند که فناوری‌های ST و PV تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۱۳۷ و ۱۵۵ پتاژول در آمریکا توسعه یابد (آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، ۲۰۱۵).

۳. ۴. عوامل عمومی مؤثر در انتشار فناوری‌ها

علاوه بر قیمت فناوری‌های خورشیدی (PVP، STP)، به نظر می‌رسد عوامل زیر نیز در توسعه فناوری‌های خورشیدی مؤثر باشند:

- درآمد با شاخصی مانند GDP یا GDPPPP که شاخص قدرت خرید خانوار است.
- جمعیت (Pop) و یا تعداد خانوارها (HH)، مصرف برق خانگی (RELC) یا کل مصرف انرژی (EU) که شاخص‌های حجم تقاضای انرژی هستند.
- افزایش قیمت گاز برای بخش‌های خانگی یا تجاری (NGPR، NGPC)، به عنوان کالای جایگزین و یا شاخص قیمت انرژی به طور کلی (EPI)، یا برای بخش خانگی (EPR)، و یا قیمت دیگر حامل‌های انرژی مانند قیمت برق برای بخش خانگی (ELPR).

در یک مدل رگرسیونی می‌توان همه این موارد را تحت آزمون قرار داد و با استفاده از معیارهای مناسبی اعتبار مدل (های) به دست آمده را سنجید. مجموعه متغیرهایی که می‌توان برای مدل‌های رگرسیونی رشد فناوری‌های PV و ST در نظر گرفت در جدول ۳ گردآوری شده‌اند. در این جدول متغیرهایی که یک مفهوم را نمایندگی می‌کنند، به این معنی که حضور همزمان آن‌ها در مدل منطقی و سازگار نیست و با هم همبستگی داشته و نمی‌توانند تأثیرات مستقلی بر متغیر وابسته داشته باشند، در یک سطر و تحت عنوان گزینه‌های مختلف آورده شده‌اند. همچنین دو شاخص قیمت مصرف‌کننده (CPI) و عمده‌فروشی (WPI) هم برای تورم‌زدایی[1] از متغیرهای قیمتی افزوده شده‌اند. به منظور سازگاری مدل‌ها، شاخص‌های قیمت یاد شده، در صورت حضور در یک مدل، برای همه متغیرهای

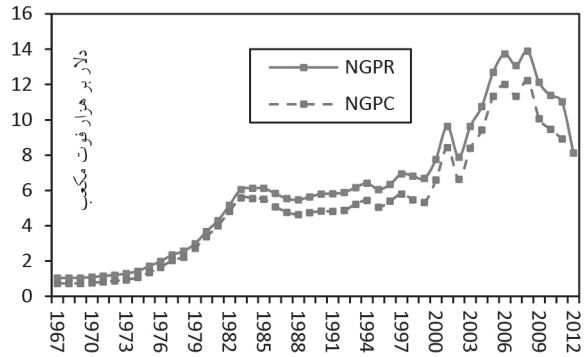
1 . Deflation

قیمتی یکسان به کار برده شده‌اند.

جدول ۳: متغیرهای برون‌زا (مستقل) برای مدل‌های رشد فناوری‌های ST و PV

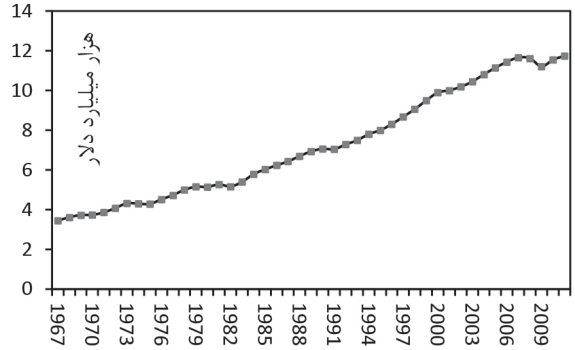
متغیرها	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴	گزینه ۵
حجم تقاضا	Pop	HH	RELC	EU	-
درآمد	GDP	GDPPPP	-	-	-
قیمت کالا	PVP یا STP	-	-	-	-
قیمت کالای جایگزین	NGPR	NGPC	EPI	EPR	ELPR
فروش کالای جایگزین	PVSHPیاSTSHP	-	-	-	-
شاخص قیمت ها	CPI	WPI	-	-	-

در ادامهٔ این بخش برخی از داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی مرور و به تصویر کشیده شده‌اند (شـــکل‌های ۵ تا ۸) تا در مقایســـهٔ تصویری این متغیرهای برون‌زا با متغیرهای درون‌زای مدل ارتباط بین آن‌ها مشهود شود. با توجه به محوریّت فناوری PV در این پژوهش، از داده‌های سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۰ برای مدل‌سازی استفاده خواهد شد، اما در شکل‌ها سری زمانی اغلب متغیرها از سال ۱۹۶۷ آورده شده است. یادآوری می‌شود که با توجه به تأثیر عطفی متغیرها، لگاریتم متغیرها در مدل‌ها وارد می‌شوند و مدل‌ها Log-Linear خواهند بود.



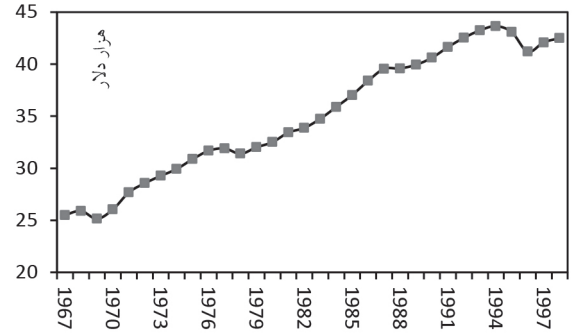
شکل ۵: قیمت گاز طبیعی تحویلی به بخش خانگی (NGPR) و بخش تجاری (NGPC)

منبع: بانک جهانی، ۲۰۱۳



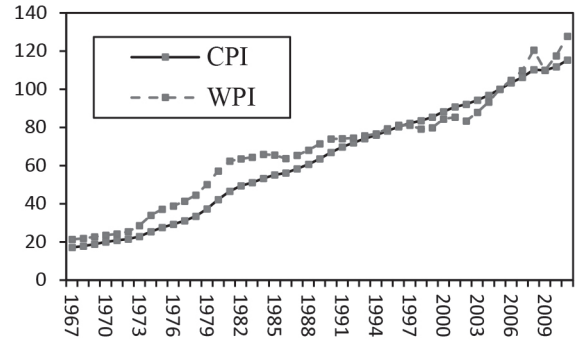
شکل ۶: درآمد ناخالص داخلی (GDP)

منبع: بانک جهانی، ۲۰۱۳



شکل ۷: شاخص قدرت خرید سرانه (GDPPPP)، ۲۰۰۵ = ۱۰۰

منبع: بانک جهانی، ۲۰۱۳



شکل ۸: شاخص قیمت مصرف کننده (CPI) و شاخص قیمت عمده فروشی (WPI)، ۲۰۰۵ = ۱۰۰

منبع: بانک جهانی، ۲۰۱۳

۱،۴،۳. عوامل ویژه: مشوق‌های توسعه فناوری‌ها خورشیدی

علاوه بر آنچه به طور معمول و بر اســاس نظریه‌های اقتصادی روشن در انتشار هر فناوری مؤثر است، دولت آمریکا (مشابه با بسیاری دولت‌های دیگر در جهان، از جمله ایران) برای گسترش هرچه سریع‌تر روش‌های بهره‌برداری از انرژی فراوان خورشــید در این کشــور، مشوّق‌های مالی را در برنامه‌های خود قرار داده است. با توجه به تنوع آن‌ها، این مشوّق‌ها را می‌توان در ۱۱ گروه دسته‌بندی کرد (مشوق‌های ایالتی برای انرژی نو).

۱. مشوق‌های مالیاتی شرکت‌ها[1]

مشوق‌های مالیاتی شرکت‌ها شامل اعتبارهای مالیاتی[2]، کسر مالیات و معافیت می‌شود. این مشوق‌ها در برخی ایالت‌ها در اختیار سازمان‌هایی قرار می‌گیرد که تجهیزات انرژی خورشیدی را تهیه و نصب می‌نمایند یا ساختمان‌های سبز را می‌سازند. در پاره‌ای از موارد، مشوق‌ها بر مبنای مقدار انرژی تولید شــده به وســیله یک سیستم واجد شرایط تعیین می‌شــود. بعضی از ایالت‌ها اعتبار مالیاتی را فقط به سازمانی اختصاص می‌دهند که در یک پروژه واجد شرایط سرمایه‌گذاری کرده است.

۲. برنامه‌های کمک هزینه[3]

ایالت‌ها برنامه‌های کمک هزینه مختلفی را پیشــنهاد می‌کنند تا افراد به اســتفاده و توســعهٔ انرژی‌ای تجدیدپذیر تشویق شوند. بیشتر برنامه‌های کمک هزینه برای کاهش هزینه‌های سیستم‌ها و تجهیزات مورد نیاز برای انرژی‌های تجدیدپذیر طراحی شده اند. بقیه منابع که کمترند بر روی برنامه‌های پژوهشی، توســعه، یا پروژه‌های تجاری در خصوص یک فناوری خاص مثل فناوری فتوولتایی تمرکز می‌کنند. در سال‌های اخیر دولت فدرال برنامه‌های کمک هزینه‌ای را برای کاربران نهایی که در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری می‌کنند، فراهم کرده است. کمک هزینه‌ها به همهٔ بخش‌های تجاری، صنعتی، کاربردی، آموزشی و یا دولتی تخصیص می‌یابد اما دریافت کمک هزینه معمولاً رقابتی است.

۳. مشوق‌های ساختمان سبز[4]

مشــوق‌های ســاختمان ســبز طراحی و به اجرا در می‌آیند تا فرایندها، مواد و تجهیزاتی که به حداقل

1 . Corporate Tax Incentives
2 . Tax credits
3 . Grant Programs
4 . Green Building Incentives

کردن تاثیر ساختمان بر محیط و سلامت بشریت کمک می کنند، توسعه یابند.

۴. مشوق استخدام صنعتی[1]

برای بهبود توسعهٔ اقتصادی و ایجاد شغل، بعضی ایالت‌ها مشوق‌هایی را برای به کارگیری و ترویج سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و تجهیزات آن پیشنهاد می‌کنند.

۵. برنامه‌های وام[2]

تامین مالی برای تهیه و خرید تجهیزات و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر بر عهده این برنامه‌هاست. اعمال نرخ بهره پایین یا حتی صفر برای پروژه‌های بهره‌وری انرژی یک امتیاز رایج در بانک‌هاست.

۶. مشوق تامین مالی ارزیابی دارایی انرژی پاک[3]

در برنامه ارزیابی دارایی انرژی پاک[4] منابع مالی به دارندگان سیستم‌ها تخصیص می‌یابد تا آنان بتوانند برای پرداخت هزینههای به‌کارگیری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پول قرض کنند و در یک دوره چند ساله بازپرداخت کنند.

۷. مشوق بر مبنای عملکرد[5]

مشوق‌های مبتنی بر عملکرد، یا به عبارت دیگر مشوق‌های تولید، منابع مالی پرداخت‌های نقدی براساس کیلووات‌ساعت تولیدشده یا انرژی حرارتی جذب شده بر حسب بی تی یو در یک سیستم انرژی تجدیدپذیر را تأمین می‌کنند. پرداخت تعرفه تشویقی برای خرید برق تولیدی مازاد مثالی از مشوق‌های مبتنی بر عملکرد است. این نوع از مشوّق‌ها تأثیر خوبی در سرمایهگذاری مردم و بخش خصوصی روی انرژی‌های تجدیدپذیر دارد.

۸. مشوق‌های مالیاتی شخصی[6]

مشوق‌های مالیاتی شخصی شامل اعتبارهای مالیات‌های درآمدی و کسورات می‌شود. تعداد زیادی از ایالت‌ها این مشوق‌ها را پیشنهاد می‌کنند تا هزینه‌های مربوط به استفاده از سیستم‌های انرژی

1 . Industry Recruitment/Support
2 . Loan Programs
3 . ACE Financing
4 . Property-Assessed Clean Energy (PACE)
5 . Performance-Based Incentives
6 . Personal Tax Incentives

تجدیدپذیر در بخش خانگی را کاهش دهند.

۹. مشوق‌های مالیات بر دارایی[1]

مشوق‌های مالیات دارایی شـــامل معافیت‌ها، تخفیف‌ها و اعتبارات مالیاتی می‌شود. بیشتر مشوق‌های مالیات بر دارایی‌ها ارزش افزوده سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را از ارزیابی دارایی برای مالیات حذف می‌کنند.

۱۰. برنامه‌های تخفیف[2]

ایالت‌ها و تعداد کمی از دولت‌های محلی برنامه‌های بازپرداخت هزینه‌ها را پیشنهاد می‌کنند تا برخی از هزینه‌ها در اجرای پروژه‌های انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی جبران شوند.

۱۱. مشوق‌های مالیات بر فروش[3]

مشـــوق مالیات بـــر فروش معمولاً شـــامل یک معافیت یـــا بازپرداخت[4] مالیات بر فـــروش برای خرید سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر می‌شود.

با توجه به تنوع مشـــوق‌های مالی و مالیاتی که از ســـوی دولت مرکـــزی و دولت‌های محلّی برای ســـرمایه‌گذاری خانوارها در انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی در نظر گرفته شده و اعمال گشته است، تعریف و اندازه‌گیری یک شاخص کمّی برای آن بسیار مشکل به نظر می‌رسد. از این رو، ترجیح بر آن بوده است که ابتدا مدل‌های رگرسیونی فناوری‌ها را بدون مشوق‌ها برآورد کنیم؛ سپس تلاش شـــده است از یک روش ســـعی و خطا مبتنی بر شبیه‌ســـازی مونت کارلو، برای برآورد بهترین سیگنال که تأثیرات مشوق‌ها را نمایندگی کند، استفاده شود.

۴. نتایج برآورد و اجرای مدل‌ها

در این مقاله، با توجه به حجم بالای مطالب، تنها نتایج برآورد مدل‌های رگرســـیون‌های مستقل برای هر یک از فناوری‌ها آورده شـــده اســـت. برای لگاریتم داده‌های شکل ۲ و شکل ۳ به عنوان متغیرهای وابســـته، مدل‌های خودرگرسیونی ARMAX(۱,۱) با متغیرهای مستقل نام برده شده در جدول ۳ ،

1 . Property Tax Incentives
2 . Rebate Programs
3 . Sales Tax Incentives
4 . Refund

برآورد شـــده‌اند. از ترکیبات مختلفی که متغیرهای مندرج در آن جدول در کنار هم می‌سازند، هزاران مدل رگرسیونی را می‌توان ایجاد کرد که هر یک می‌توانند تا حدی بیانگر رشد فناوری‌های ST و PV باشند. برای انتخاب مناسب‌ترین متغیرهای توضیحی و بهترین مدل، معیارهای متنوعی را می‌توان در نظر گرفت. مناســب‌ترین متغیرهای توضیحی، طبق معمول، بر اســاس آماره t-student قابل انتخاب اســت؛ اما برای ارزیابی جامع مدل‌های رگرســیون در این پژوهش از روش ارائه شــده توسط شکوری و منهاج اســتفاده شــده اســت. در این ارزیابی، معیارهای مد نظر شــامل خطای خروجی، مشخصات مانده‌ها، معناداری پارامترها و قدرت پیشگویی و شبیه‌سازی مدل‌ها می‌شود. بنابراین، علاوه بر انتخاب بهترین مدل‌ها بر اساس امتیاز کلی طبق روش مرجع مزبور، مدل‌های معنادارتر نیز که پارامترهایشان بزرگترین مقدار میانگین آماره t-student را دارند و مدل‌هایی که بیشــترین تطبیق را در متغیرهای توضیحی با متغیرهای منتخب دارند، مورد توجه قرار گرفته‌اند.

۱,۴. مدل رگرسیون ST

مشــخصات مدل‌های دارای بیشــترین امتیاز کلی (از ۱۰۰) در جدول ۴ آورده شده‌اند. در ستون آخر این جدول معیار T کلی که به عنوان شــاخصی برای معناداری کلی مدل تعریف می‌شــود (شــکوری و منهاج،۲۰۰۸)، محاســبه شده اســت که صورت آن اندازه بردار پارامترها و مخرج آن اندازه ماتریس کواریانس است.

بر اساس دفعات حضور متغیرهای مستقل در ۵۰ مدل از برترین مدل‌ها، همراه با امتیازات حاصل از وزن‌دهی به میز ۱ان معناداری آن‌ها، متغیرهای منتخب در جدول ۵ فهرست شده‌اند. با ملاحظه نتایج مندرج در این جدول و جدول قبل می‌توان دریافت که:

- ضریب مثبت برای متغیرهای مربوط به میانگین قیمت جذب‌کننده‌های خورشــیدی با اندازه بیش از ۰/۲ رفتار غیرعادی مشتریان این فناوری و حرکت گله‌وار و ناشی از جوگیری بازار را (دست کم در دوره‌هایی از زمان، یعنی نیمه دوم دهه ۸۰ و اواسط دهه ۲۰۰۰) تأیید می‌کند.
- قیمت گاز طبیعی به طور مشخص عامل تعیین‌کننده‌ای در رشد این فناوری به شمار می‌رود.
- با توجه به حضور متغیر PVSHP در مدل‌های منتخب، وجود رقابت بین این فناوری با فناوری خورشیدی دیگر، PV ، و یا حتی تأثیر مثبت توسعه آن‌ها بر یکدیگر، محتمل است.

جدول ۴: مشخصات اصلی و متغیرهای برون‌زا (مستقل) برای مدل‌های منتخب رشد فناوری ST همراه با پارامترهای متناظر براساس امتیاز کلّی

$\frac{\lVert\beta\rVert}{\lVert P_\beta\rVert}$	Min(t-std)	متغیرهای برون‌زا (مستقل)* پارامترهای متناظر					امتیاز کلی R^2
۱۸/۲۳۶۳۸	۰/۶۷۰۴۴۶			-SPVSHP ۰/۰۵۶۱۵۶	LNGPRW ۱/۲۷۵۵۹۸	LSTAPW ۰/۱۹۶۶۵۱	۸۷/۶۴۸۵ ۰/۸۲۱۲۴۵
۱۳/۸۷۹۶۲	۰/۹۴۷۵۵۶			-SPVSHP ۰/۰۲۵۳۴۱	LNGPC ۰/۶۵۷۳۶۷	LSTAP ۰/۱۶۸۱۰۹	۸۷/۳۷۳۲ ۰/۸۰۶۵۰۲
۳/۷۲۷۹۰۶	۰/۸۲۸۵۰۵	LEU ۳/۸۹۱۷۷۶	LPVCPW ۱/۳۳۵۴۱۱	LPVSHP ۰/۱۸۴۲۵۴	LNGPCW ۰/۹۴۳۵۵۴	LSTAPW ۰/۲۴۲۵۴۲	۸۷/۲۴۱۸ ۰/۸۵۲۵۶۱
۱/۶۴۸۴۱۱	۱/۱۵۹۵۲		LPVCPW ۰/۸۹۳۹۶۵	LGDPPPP ۲/۷۴۷۱۹۹	LNGPCW ۰/۹۹۱۱۸۷	LSTAPW ۰/۲۳۶۶۶۹	۸۶/۶۸۸۷ ۰/۸۳۸۹۱۱
۱۲/۵۳۲۷۸	۱/۱۵۰۳۲۳			LEU ۱/۳۷۴۲۶	LNGPRW ۱/۴۱۴۷۱۹	LSTAPW ۰/۱۶۰۷۶۶	۸۶/۵۴۴۳ ۰/۸۰۶۸۳۱
۲/۲۶۱۳۰۶	۰/۶۹۶۳۷۲				LNGPRW ۱/۱۰۹۷۳۶	LSTAPW ۰/۲۰۷۶۸۴	۸۶/۴۷۹۳ ۰/۸۳۲۶۹۴

*حروف W و C در انتهای متغیرهای قیمت نشـــانه تورم‌زدایی (deflation) با شـــاخص‌های قیمت WPI و CPI اســـت. همچنین حرف L در اول متغیرها به معنی لگاریتم مقادیر و حرف S در ابتدای متغیر PVSHP نشـــانه شیفت این سیگنال به اندازه یک نمونه (SPVSHP(t)=LPVSHP(t-۱ و علامت منفی در پشت آن، نشانه تأثیرکاهشی رشد PV بر انتشار ST است.

در جمع‌بندی، مدل منتخب که در مجموع بهترین نتایج را داشـــته، مدلی با متغیرهای مســـتقل: PVCP، GDPPPP، NGP، STAP و متغیر WPI به عنوان عامل تورم‌زدایی از شاخص‌های قیمتی بوده است. همچنین مدلی که از جایگزینی متغیر GDPPPP با متغیر درآمد سرانه با تورم‌زدایی توسط شاخص WPI به صورت:

$$GDPPC = GDP/POP/WPI \qquad (۱۹)$$

تعریف شـــده باشـــد، با کســـب امتیاز کل ۰/۸۸۶۷ رتبه اول را در رقابت با مدل‌های جدول ۴ به

دســت آورد، گرچــه از نظر آماره‌های t- student و نیز تــوان پیش‌گویی از امتیاز پایین‌تری برخوردار است. پارامترهای این دو مدل در جدول ۶ و نتایج شبیه‌سازی و پیشگویی آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شــده‌اند. یادآور می‌شــود که این مدل‌ها برای برآورد اثر مشــوق‌ها انتخاب شده‌اند و در مرحله بررسی رقابــت دو فنــاوری، درج متغیر PVSHP در مــدل منتخب، همان‌طور کــه در مدل‌های جدول ۴ و متغیرهای رتبه بندی شده در جدول ۵ نیز دیده می‌شود، ضروری خواهد بود.

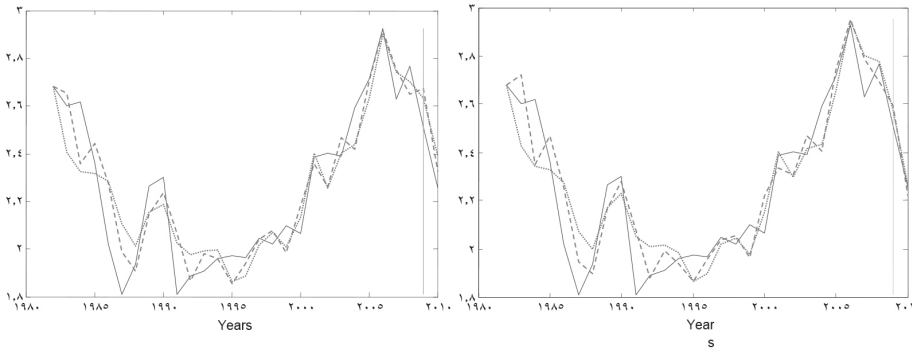
جدول ۵: رتبه بندی متغیرهای برون‌زا (مستقل) براساس درصد حضور در میان مدل‌های برتر (دارای ضرایب معنادارتر) رشد فناوری ST همراه با امتیاز آن‌ها

قیمت متوسط جذبکننده‌ها +STAP	قیمت گازطبیعی NGP	فروش صفحات فتوولتایی -PVSHP	مصرف انرژی EU	قیمت صفحات فتوولتایی PVCP	شاخص درآمد GDPPPP
٪۸۳ با امتیاز ۳۰/۲	٪۱۰۰ با امتیاز ۲۰	٪۴۰ با امتیاز ۱۹/۸	٪۳۸ با امتیاز ۳۸/۸	٪۳۶ با امتیاز ۲۴/۷	٪۸ با امتیاز ۸/۳

جدول ۶: پارامترهای مدل (های) منتخب برای انتشار فناوری ST به همراه آماره‌های (t-std)

MA	WPI	PVCP	GDPPPP	NGPR	STAP	AR
۰/۴۷۷۴	۱/۵۱۵۷	۱/۶۳۴۴	۶/۰۱۴۱	۰/۹۳۰۳	۰/۳۳۲۵	۰/۲۳۰۶
(۲/۵۴۳۳)	(۱/۴۷۵۴)	(۴/۰۳۱۴)	(۳/۸۲۹۵)	(۳/۱۶۱۹)	(۴/۷۰۸۶)	(۳/۴۳۷۹)
MA	–	PVCPW	GDPPCW	NGPRW	STAPW	AR
۰/۲۳۹۹	–	۰/۵۳۸۷	۰/۷۰۰۲	۱/۲۹۸۶	۰/۲۱۰۱	۰/۲۱۲۸
(۱/۰۶۶۱)	–	(۲/۲۳۱۳)	(۱/۱۲۰۰)	(۴/۴۷۶۶)	(۲/۲۷۳۲)	(۱/۶۵۷۱)

لگاریتم تعداد جمع‌کننده‌های انرژی خورشیدی گرمایشی به فروش رفته در امریکا



شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی (خطوط ممتد کمرنگ) و پیشگویی (خطوط نقطه‌چین) مدل‌های رگرسیونی منتخب برای انتشار فناوری ST در مقایسه با داده‌ها (خطوط ممتد پررنگ) بدون اثر مشوق‌ها. متغیرهای مستقل: PVCP، GDP، NGPR، STAP، (سمت راست طبق مدل اول و سمت چپ طبق مدل دوم در جدول ۴). نمونه‌هایی که در سمت راست خطوط عمودی قرار دارند در برآورد مدل‌ها شرکت داده نشده‌اند (out of sample).

۲،۴. مدل رگرسیون PV

در میان هزاران مدل آزموده شده برای توصیف رشد فناوری PV در ایالات متحده، شش مدل مندرج در جدول ۷ بالاترین رتبه‌ها را به دست آوردند.

نتایج حاصل از برآورد مدل‌های رگرسیون حاکی از آن است که:

- کاهش مستمر قیمت فناوری PV در رشد سریع آن، به ویژه در سال‌های اخیر، بسیار مؤثر بوده است. کشش قیمتی در همه مدل‌های منتخب بالاتر از ۱ است.
- قیمت حامل‌های انرژی، گاز طبیعی، برق یا شاخص قیمت انرژی (به‌ویژه در بخش خانگی) بی‌تردید عامل مؤثر در رشد فناوری انرژی‌های خورشیدی است. جالب توجه است که اگر در فناوری ST تنها قیمت گاز طبیعی حضور معنادار دارد، در این‌جا قیمت برق برای بخش خانگی نیز مؤثر دیده می‌شود.
- نه تنها نتایج نشان می‌دهد توسعه دو فناوری با هم مرتبط بوده است، بلکه توسعه فناوری ST

به توسعه فناوری PV کمک کرده است؛ حال آن‌که در اغلب مدل‌های منتخب برای انتشار ST مشاهده شد که رشد فناوری PV در هر دوره توسعه فناوری ST در دوره بعد را یک گام به عقب رانده است.

چنانچه تنها معنادار بودن ضرایب و اندازه آماره t-std معیار رتبه‌بندی مدل‌های رگرسیونی قرار گیرد، باز هم نتایج مشابهی در خصوص رقابت دو فناوری به دست خواهد آمد. جدول ۸ درصد دفعاتی که مدل‌های منتخب بر اساس معناداری ضرایب هر یک از گروه متغیرها مرتب شده‌اند، همراه با امتیاز حاصل از آماره‌های t-std را نشان می‌دهد. گرچه در اغلب مدل‌های منتخب نتایج با نتایج جدول ۷ تطابق دارد، مواردی را نیز می‌توان یافت که با نظریه‌های پایه اقتصادی در رقابت بین دو فناوری مطابقت دارند: مشاهده می‌شود که در ۲۵ درصد مدل‌های منتخب نیز فروش صفحات جذب ST با علامت منفی مؤثر بوده‌اند.

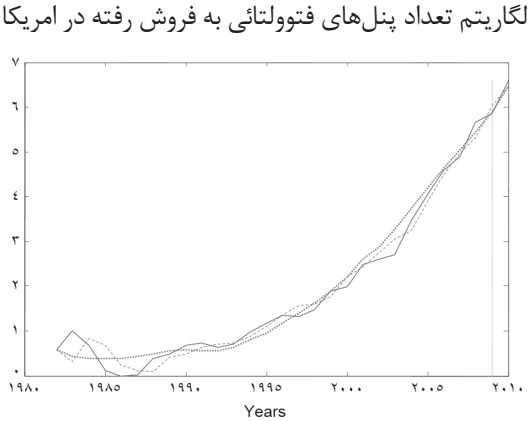
جدول ۷: مشخصات اصلی و متغیرهای برون‌زا (مستقل) برای مدل‌های منتخب رشد فناوری PV همراه با پارامترهای متناظر براساس امتیاز کلّی

$\frac{\lVert\boldsymbol{\beta}\rVert}{\lVert\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{\beta}}\rVert}$	Min(t-std)	متغیرهای برون‌زا (مستقل)* پارامترهای متناظر			امتیاز کلّی R^2
۶/۲۱۲۸	۱/۱۸۶۸	LSTSHP ۰/۱۷۰۲	LNGPC ۰/۲۷۷۷	-LPVCP ۱/۲۱۶۸	۸۸/۶۲ ۰/۹۷۷۶
۶/۳۴۰۱	۱/۰۷۸۱	LSTSHP ۰/۱۶۹۷	LNGPR ۰/۳۱۱۶	-LPVCP ۱/۲۲۰۹	۸۸/۱۲ ۰/۹۷۷۶
۶/۶۸۱۶	۱/۴۹۵۸		LNGPC ۰/۴۰۳۹	-LPVCP ۱/۰۶۵۶	۸۸/۱۰ ۰/۹۷۷۸
۶/۰۴۷۳	۱/۴۷۴۶	LSTSHP ۰/۲۸۵۹	LELPR ۰/۳۸۷۳	-LPVCP ۱/۴۳۵۴	۸۸/۰۷ ۰/۸۳۸۹۱۱
۶/۴۲۹۱	۱/۳۴۱۴	LSTSHP ۰/۲۳۳۱	LEPR ۰/۲۹۱۰	-LPVCP ۱/۳۵۳۲	۸۶/۵۴۴۳ ۰/۸۰۶۸۳۱
۷/۱۵۶۵	۱/۴۴۰۷		LNGPR ۰/۴۳۶۱	-LPVCP ۱/۰۳۳۵	۸۶/۴۷۹۳ ۰/۸۳۲۶۹۶

جدول ۸: رتبه بندی متغیرهای برون‌زا (مستقل) بر اساس درصد حضور در مدل‌های برتر (دارای ضرایب معنادارتر) رشد فناوری PV همراه با امتیاز آن‌ها

قیمت متوسط صفحات فتوولتایی PVCP	قیمت انرژی EP, ELP, NGP	فروش صفحات جذب + STSHP	فروش صفحات جذب - STSHP	قیمت صفحات جذب STP	شاخص درآمد GDPPPP
٪۹۳ با امتیاز ۳۵/۴	٪۷۹ با امتیاز ۱۱	٪۳۲ با امتیاز ۱۰	٪۲۵ با امتیاز ۱۳	٪۷ با امتیاز ۷	٪۷ با امتیاز ۷

نتایج شبیه‌ســازی و پیشــگویی با مدل منتخب از ردیف اول جدول ۷ برای فناوری PV در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. اختلاف بین مقادیر واقعی و خروجی‌های مدل نشان می‌دهد که در اوایل توسعه این فناوری رفتاری ناهمگون با دوره‌های بعد وجود داشــته که البته بی‌شــباهت به همان رفتار گله‌ای (با دامنه‌ای محدود) نبوده اســت. از این‌رو، احتمال دارد پارامترهای تخمینی نتوانند برای دوره مزبور معتبر باشند.



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی (خطوط ممتد کمرنگ) و پیشگویی (خطوط نقطه‌چین) مدل منتخب برای توسعه فناوری PV در مقایسه با داده‌ها (خطوط ممتد پررنگ) بدون اثر مشوق‌ها، متغیرهای مستقل: PVCP- ، NGPC، STSHP

۳،۴. برآورد پارامترهای متغیر با زمان به روش بازگشتی

در ادامه، به منظور بررســی ثبات در رفتار مشــتریان این دو فناوری و نحوه گسترش استفاده از آن‌ها،

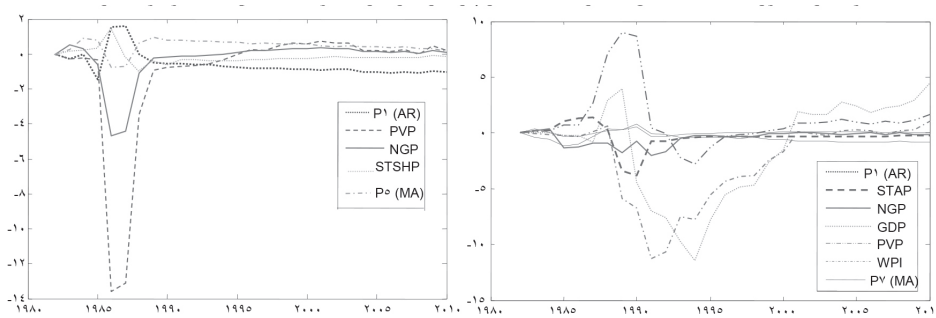
پارامترهای دو مدل منتخب برای هر یک از فناوری‌ها به روش بازگشتی (Recursive) برآورد شده‌اند (جونگ،۱۹۹۷). به دلیل برخورداری از بیشترین مقدار در شاخص(Min(t-std ، مدل سطر چهارم از جدول ۴ برای ST و با توجه به نزدیکی این معیار در چهار مدل از جدول ۵، آخرین سطر از این جدول به دلیل برخورداری از بزرگترین مقدار در شاخص $\frac{\|\boldsymbol{\beta}\|}{\|\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{\beta}}\|}$ ، همراه با مدل اول آن جدول برای توصیف رشـــد فناوری PV انتخاب شـــده‌اند. در مدل مربوط به ST متغیر شاخص قیمت‌های عمده‌فروشی به منظور مشاهده میزان تأثیر آن در دوره‌های مختلف، به طور مستقل در مدل دیده شده است.

نتایج تغییرات پارامترها، شـــامل ضرایب متغیرهای برون‌زا، به علاوه پارامترهای مربوط به جملات AR (پارامتر اول) MA (پارامتر آخر) در شـــکل ۱۱ دیده می‌شـــوند. تغییرات شدید پارامترهای هر دو مـــدل در محدوده ســـال‌های نیمه دوم دهه ۱۹۸۰ حاکی از تفـــاوت رفتار و تاییدکننده نتایج قبلی در این خصوص اســـت. در مدل ST تقریباً تمام ضرایب متغیرهای بـــرون‌زا تغییرات قابل توجه دارند. به ویژه، تغییرات ضرایب شاخص درآمد و شاخص قیمت‌های عمده‌فروشی تغییرات ماندگار در طول دوره تخمین دارند. این تغییرات نشـــانگر عدم تاثیر یکنواخت این متغیرها در توســـعه این فناوری است که می‌تواند حاکی از تداوم رفتار متوهمانه باشـــد، وجود کشـــش‌های قیمتی و درآمدی تقریباً ثابت نشان از ثبـــات و رفتـــار عاقلانه در بازار هر کالایی اســـت. ضرورت پرهیز از اثرات نامطلوب این نوســـانات در نتیجه‌گیری از مدل، حذف این دو متغیر را پیشنهاد می‌کند.

در مقابل، تغییرات پارامتر در مدل منتخب برای PV (ســـطر اول از جدول ۵) فقط به دوره‌ای که احتمال رفتار گله‌ای (متوهّمانه) در آن وجود دارد، محدود شده و پس از آن تقریباً ثابت مانده‌اند.

همچنین در استفاده از روش جداسازی[1] (اندرسون،۱۹۸۵)، برای برآورد همزمان تغییرات پارامترها و بررسی احتمال تغییر ساختار در مدل‌ها، تغییر در ساختار مدل ضروری تشخیص داده نشد. در این روش از تعدادی مدل موازی با پارامترهای متفاوت که احتمال صحت آن‌ها طبق یک تابع توزیع اولیه ابتدا مساوی است، اما با محاسبه اندازه احتمال ثانویه[2] تغییر ناگهانی در پارامترها بررسی و در صورت افزایش احتمال صحت یکی از مدل‌ها نسبت به بقیه جایگزینی بین مدل‌ها صورت می‌گیرد. با توجه به عدم تغییر معنادار در میزان احتمال صحت مدل‌های موازی، نیازی به اعمال ساختار معادلات متفاوت برای دوره‌ای که به دلیل تغییرات شدید در پارامترها رفتار متفاوت محتمل است، وجود ندارد.

1 . segmentation
2 . Posterior probability



شکل ۱۱: پارامترهای متغیر با زمان که برای دو مدل منتخب توسعه فناوری‌های ST و PV به روش بازگشتی برآورد شده‌اند.

۴،۴. برآورد اثر مشوق‌ها و مدل‌های اصلاحی

از مطالعه تاریخچه اقدامات و مقررات دولت مرکزی و دولت‌های ایالتی در آمریکا می‌توان دریافت که مؤثرترین مشوق‌ها در توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به اولین دهه از قرن ۲۱ تعلق دارد. چنانچه در بخش ۳ از این مقاله گذشت، انواع مشوق‌ها بسیار زیاد است و تلاش برای کمّی‌سازی آن وقت و داده‌های زیادی را می‌طلبد. در این پژوهش برای برآورد اثر مشوق‌ها از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. فرایند طراحی شده شامل مراحل زیر است:

۱. انتخاب یک مدل برتر با بالاترین ویژگی‌ها

- مدل ARMAX(۱،۱) برای فناوری ST با ورودی‌های STAPW، NGPRW، PVCPW و همین ساختار با ورودی‌های NGPR، PVCP و STSHP برای مدل PV در نظر گرفته شده‌اند.

۲. تولید مجموعه‌ای از سری‌های زمانی به صورت تصادفی که اثر مشوّق‌ها را نمایندگی کنند.

- تعداد ۱۰ هزار سری زمانی تصادفی با توزیع‌های از پیش تعیین شده که ده رفتار متفاوت را در دهه ۲۰۰۰ پوشش دهند، تولید شده است. برای هر سری زمانی تعداد ۱۲ عدد تصادفی طبق توزیع‌های مشخص تولید می‌شود.

۳. برآورد مدل با افزودن ورودی‌های مشوّق‌ها که طبق مرحله ۲ تولید شده‌اند،

- به دو مدل ST و PV که با سه ورودی طبق مرحله ۱ انتخاب شده‌اند، هر یک از ده هزار سری زمانی تولید شده افزوده و برآورد پارامترهای مدل‌ها تکرار می‌شود.

۴. حذف ورودی‌هایی که منجر به بهبود مشخصات مدل نشده‌اند،

- چنانچه سری زمانی افزوده شده به عنوان اثر مشوق‌ها مشخصات مدل را بهبود نداده باشد، آن سری زمانی حذف می‌شود.

۵. رتبه‌بندی مدل‌ها با ورودی‌های منتخب و تعیین احتمال صحّت مدل (عامل نماینده مشوق‌ها)،

- آن دسته از سری‌های زمانی که مشخصات مدل‌ها را بهبود بخشیده باشند، متناسب با میزان بهبود امتیاز گرفته و رتبه‌بندی می‌شوند. احتمال صحت مدل بر اساس وزنی که با امتیاز به هر مدل داده شده، برآورد می‌شود.

۶. تخمین تابع توزیع احتمالی برای اثر مشوق‌ها،

- توابع توزیع احتمال برای میزان اثر مشـــوق‌ها در هر نقطه از زمان (سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۰) بر هر یک از دو فناوری PV و ST با روش کرنل تخمین زده می‌شود (بومن و ازلینی،۱۹۹۷).

۷. تعیین ورودی مشوّق با بیشترین احتمال صحّت،

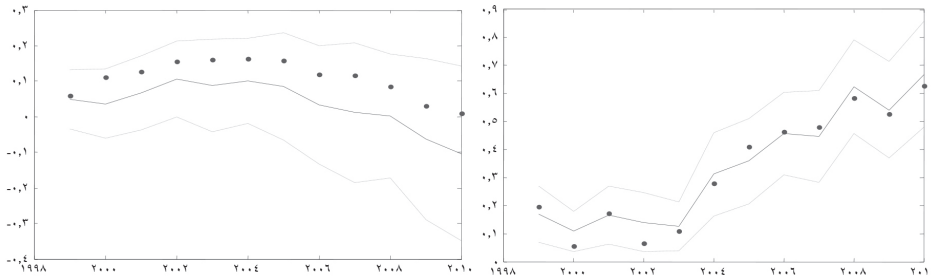
- با داشتن توابع احتمال تخمینی، از روی نقطه ماکزیمم آن، سیگنال ورودی مشوّق‌ها که بر هر یک از دو فناوری اثر گذاشته است، برآورد می‌شود.

شکل ۱۲ نتیجه اجرای این مراحل را نشان می‌دهد. پیداست که اثر مشوق‌ها بر فناوری PV بسیار بیشـــتر و ماندگارتر از فناوری ST اســـت. گرچه این تأثیر بر هر دو فناوری در سال‌های اولیه قرن ۲۱ تقریباً مشابه و در یک حد پایین بوده است، از سال ۲۰۰۴ به بعد مشوّق‌ها بر فناوری PV بسیار مؤثر بوده و روند افزایشـــی داشـــته، حال آنکه می‌توان گفت تا سال ۲۰۱۰ اثر آن‌ها بر فناوری ST کاملاً از بین رفته است.

از این دو ســـری زمانی که با روش شبیه‌ســـازی مونت کارلو تولید شده‌اند، برای برآورد مجدد تمام مدل‌های ممکن که متغیرهای توضیحی معرفی شده در جدول ۳ می‌توانند همراه با این اثرات برآوردی در آن مدل‌ها حضور یابند، اســـتفاده شـــده اســـت. برای این منظور، مقادیری از دو سیگنال تخمینی که بیشـــترین احتمال صحت را داشـــته‌اند (نقاط توپر در شـــکل)، برای مراحل بعد مورد استفاده قرار

گرفته‌اند. نتیجه جســتجو برای مناســب‌ترین متغیرهای توضیحی در مدل‌هایی که بتوانند در مراحل بعدی نیز با کمترین تغییرات، انتشار این دو فناوری را نمایندگی کنند، در جدول ۹ آورده شده است. نتایج شبیه‌ســازی و پیشگویی مدل‌های رگرســیونی منتخب برای انتشار فناوری‌های PV و ST در شکل ۱۳ آمده است.

لگاریتم تعداد پنل‌های فتوولتایی لگاریتم تعداد جمع‌کننده‌های انرژی خورشیدی گرمایشی



شکل ۱۲: اثر مشوق‌ها بر فناوری‌های PV و ST که با شبیه‌سازی مونت کارلو برآورد شده است. خطوط ممتد پررنگ مقادیر میانگین، خطوط ممتد کمرنگ حدود بالا و پایین (μ±σ) و نقاط قرمز مقادیر دارای بیشترین احتمال را نشان می‌دهند.

نتایج مندرج در جدول مزبور حاکی از دقت کافی در مدل‌های رقابت این دو فناوری اســت. نکات زیر در خصوص این دو مدل جالب توجه هستند:

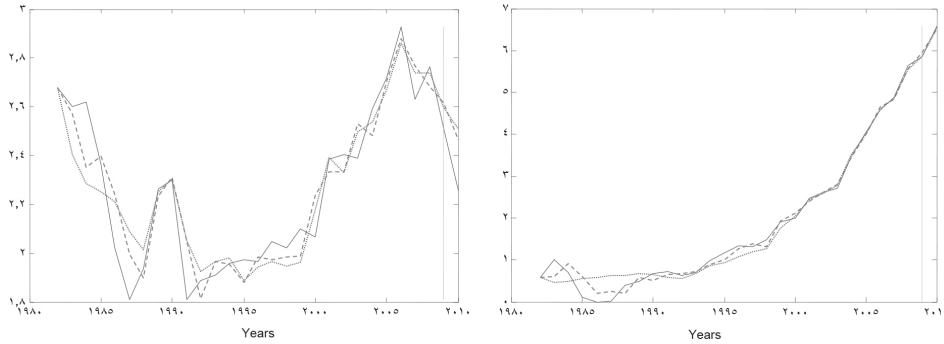
- در هر دو مدل قیمت انرژی رقیب، یعنی گاز طبیعی اثر طبیعی و مشابهی را دارد.
- با حضور مشوق‌ها در مدل فناوری ST، قیمت گاز طبیعی در بخش تجاری قدری مؤثرتر بوده است. در مدل PV هم تقریباً چنین است، تنها آماره JB و Min(t-std) مدل منتخب از مدل مبتنی بر LNGPR قدری بهتر است.
- در مــدل اول علامت مثبت برای ضریب قیمت متوســط، LSTAP، مجددا رفتار متوهمانه را تایید می‌کند.
- علامت متغیرهای ارتباطی بین مدل‌ها حاکی از آن اســت که رشد فناوری حرارتی موجب رشد فناوری فتوولتایی می‌شود، اما در مقابل فناوری فتوولتایی رقیبی جدی برای رشد فناوری حرارتی به حساب می‌آید. علت آن کاهش سریع قیمت‌های فتوولتایی و مزیت تولید و فروش برق آن است

جدول ۹: متغیرهای ورودی در مدل‌های منتخب برای رشد فناوری‌های ST و PV با وجود اثر مشوق‌ها

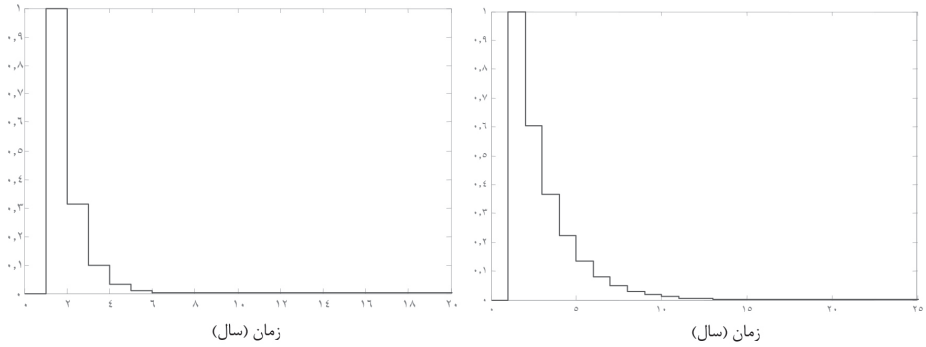
Model	Input Variables	R^2	AR	Incentive parameter (t-std)
ST	LSTAP, LNGPC, -SPVSHP, INCEST	۰/۸۴۲۸	۰/۳۱۴۸	۱/۶۸۵۱ (۲/۵۱۷۰)
PV	-LPVCP, LNGPC, STSHP, INCEPV	۰/۹۸۸۳	۰/۵۴۰۹	۲/۵۰۴۹ (۴/۸۴۰۸)

لگاریتم تعداد پنل‌های فتوولتایی

لگاریتم تعداد جمع‌کننده‌های انرژی خورشیدی گرمایشی

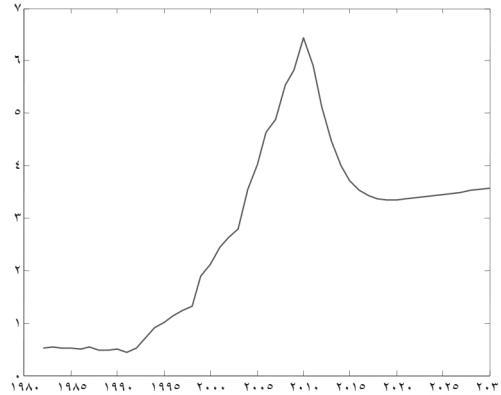


شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی (خطوط ممتد کمرنگ) و پیشگویی (خطوط نقطه‌چین) مدل‌های رگرسیونی منتخب برای انتشار فناوری‌های PV و ST در مقایسه با داده‌ها (خطوط ممتد پررنگ) با اثر مشوق‌ها. نمونه‌هایی که در سمت راست خطوط عمودی قرار دارند در برآورد مدل‌ها شرکت داده نشده‌اند (out of sample).



شکل ۱۴: پاسخ ضربه مدل‌های رگرسیونی منتخب برای انتشار فناوری‌های PV و ST پس از در نظر گرفتن اثر مشوق‌ها

در انتها شبیه‌سازی مدل PV برای وقتی که مشوق‌ها به سرعت حذف شوند (کاهش سالانه ۵۰٪) و قیمت‌های آن نیز سالانه ۲٪ کاهش یابند، آورده شده است (شکل ۱۵). برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ قیمت‌های واقعی لحاظ شده و فرض بر آن بوده است که پس از آن تغییری در قیمت گاز و یا میزان بهره‌برداری از فناوری ST اتفاق نیفتد. گرچه شبیه‌سازی این مدل خودرگرسیونی با وجود توانایی شبیه‌سازی بسیار بالا در دوره شبیه‌سازی (۹۸٪ دقت برای دو سال اول) در سال‌های دور چندان قابل اعتماد نیست، با این وجود به وضوح رفتاری مشابه رفتار متوهمانه (گله‌ای) در آن دیده می‌شود. در واقع باید پذیرفت که بدون مشوق‌ها، سرعت رشد این فناوری بسیار کمتر از آن خواهد بود که هم اکنون در ایالات متحده (و احیاناً دیگر کشورها) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵: شبیه‌سازی مدل رگرسیونی منتخب برای انتشار فناوری PV با فرض حذف سریع مشوق‌ها و کاهش کند قیمت‌ها بدون تغییر در سایر متغیرها

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله دو مدل خود رگرسیونی برای بررسی رفتار مشتریان فناوری‌های انرژی خورشیدی، با خروجی‌های انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی ارائه شد. حضور معنادار متغیرهای توسعه دو فناوری مزبور در مدل‌های رقیب و نیز متغیرهای قیمتی مستقیم و کالاهای جایگزین نتایج جالب توجهی را عاید کرد. از جمله این که فناوری ST که ظهور زودتری داشته، اگر چه از رشد بالایی برخوردار نبوده است، اما در رشد فناوری PV اثر مثبت داشته است؛ حال آنکه رشد سریع فناوری PV، به دلایل روشنی (مزایای قابل توجه)، رشد فناوری ST را به عقب رانده است. همچنین، کاهش قیمت انرژی

فسیلی جایگزین در کاهش رشد هر دو فناوری مؤثر بوده است. متغیر مهمی که در رشد فناوری PV تأثیر غیر قابل انکار داشته است، وجود مشوق‌های متعدد بوده است. از آنجا که به دلیل تنوع، داده‌های دقیقی برای میزان مشوق‌ها وجود نداشت، مقدار آن به روش مونت کارلو تخمین زده شد. نتایج نشان از تأثیر مشوق‌ها در رشد فناوری PV داشته است. شبیه‌سازی برای سال‌های آتی نشان داد که بدون مشوق‌ها و با این فرض که قیمت این فناوری، به دلیل کاهش زیاد در سال‌های اخیر، کاهش چشم‌گیر دیگری نخواهد داشت، توسعه این فناوری به میزان زیادی کاهش خواهد یافت. رفتار متوهمانه که ردّ پـای آن در داده‌هـای تاریخی هر دو فناوری کم و بیش پیداسـت، در آینده فناوری PV نیز به فرض حذف سریع مشوّق‌ها قابل تشخیص است.

علاوه بر اعمال مشوق‌های متعددی که در ایالات مختلف آمریکا برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد، حذف سـقف کمک‌ها و جبران ۳۰ درصدی هزینه‌ها به هر میزان تاثیر به‌سـزایی در رشد آن‌ها داشـته است. توصیه سیاسـتی مهمی که می‌تواند حاصل این پژوهش باشد این است که بدون تخفیف‌های مالیاتی و کمک‌های مستقیم به سرمایه‌گذاران بخش‌های خانگی و تجاری در این مقوله، از جمله تداوم در تضمین قیمت مناسب برای خرید برق[1]، نمی‌توان انتظار زیادی برای رشد این فناوری‌ها در این کشـور داشـت. هرچند در سال‌های اخیر شاهد رشـد چشمگیری نسبت به گذشته در توسعه انرژی‌های نو در کشور هستیم، هنوز نگرانی از توقف یا کندی این رشد، به ویژه به دلیل نیازهای مالی به سرمایه‌گذاری خارجی در این زمینه، باقی و بلکه رو به فزونی است. آنچه اتفاق افتاده هم در مقایسه با آنچه در اطراف ما واقع می‌شود، چندان قابل توجه نیست.

محدودیت منابع فسـیلیِ رو به اتمام و حرکت سـریع جهان به سمت فناوری‌های جدید در حوزه انرژی (ازجمله آنچه در همین منطقه انرژی خیز خاورمیانده مشـاهده می‌شـود) جای هیچ شـک و شبهه‌ای را نمی‌گذارد که مسؤولان ذی‌ربط باید اقدامات عملی سریع و جدی را برنامه‌ریزی کرده و در دست اجرا داشته باشند تا محدودیت‌هایی چون تحریم‌ها و کمبود بودجه برای تأمین و تداوم مشوق‌ها، مانع رشد لازم و کافی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، ازجمله انرژی خورشیدی نشوند.

1 . Feed-in Tariff

منابع

- دفتر آگاه‌سازی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا). از انرژی‌های نو چه می‌دانید؟ انرژی خورشیدی ۲. http://www.satba.gov.ir/pt/publishing/books
- شمس، محمدحسین؛ خاوری، فرشاد؛ محمدی، مسعود؛ نوری، جلال. (۱۳۹۲)، مروری بر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی و مقایسه آماری بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی جهان، *دوفصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی*، شماره ۲۱، ۱-۲۲.
- Anderson, P. (1985), Adaptive forgetting in recursive identification through multiple models, *International Journal of Control* 42, 1175– 1193.
- Blommestein, K.V., Daim, T.U, Cho, Y., Sklar, P. (2018), Structuring financial incentives for residential solar electric systems, *Renewable Energy* 115, 28-40.
- Bowman, A.W., Azzalini, A. (1997), *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*. New York: Oxford University Press.
- Chediak, M., Martin C., Wells, K. (2013), Utilities Feeling Rooftop Solar Heat Start Fighting Back, *Renewable Energy World*, 31.
- Database of State Incentives for Renewable Energy (DSIRE), Available at: www.dsireusa.org
- Energy Information Administration (2012 EIA), Annual Energy Review 2013. Available at:
- https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.php?t=ptb1007
- Geroski, P.A. (2000), Models of technology diffusion, *Research Policy* 29(4), 603-625.
- Guo, X., Guo, X. (2015), China's photovoltaic power development under policy incentives: A system dynamics analysis, *Energy* 93, 589-598.
- International Renewable Energy Agency (2015), Renewable Energy Prospects, United States of America.
- Jacobs, D., Marzolf, N., Paredes, J.R., Rickerson, W., Flynn, H., Becker-Birck, C., Solano-Peralta, M. (2013), Analysis of renewable energy incentives in the Latin America and Caribbean region: The feed-in tariff case, *Energy Policy* 60, 601–610.
- Ljung, L. (1997), *System Identification: Theory for the user*, Prentice Hall.
- Matisoff, D.C., Johnson, E.P. (2017), The comparative effectiveness of residential solar incentives, *Energy Policy* 108, 44–54.

- Norberto, C., Gonzalez-Brambila, C.N., Matsumoto, Y. (2016), Systematic analysis of factors affecting solar PV deployment, *Journal of Energy Storage* 6, 163–172.
- Pablo-Romero, M.P., Sanchez-Braza, A., Perez, M. (2013), Incentives to promote solar thermal energy in Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 198–208.
- Sarzynski, A., Larrieu, J., Shrimali, G. (2012), The impact of state financial incentives on market deployment of solar technology, *Energy Policy* 46, 550–55.
- Sawhney, R., Thakur, K., Venkatesan, B., Ji, S., Upreti, G., Sanseverino, J. (2014), Empirical analysis of the solar incentive policy for Tennessee solar value chain, *Applied Energy* 131, 368–376.
- Shakouri G., H., Menhaj, M.B. (2008), A Systematic Fuzzy Decision-Making Process to Choose the Best Model Among a Set of Competing Models, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 38(5), 1118–1128.
- Tsilingiridis, G., Ikonomopoulos, A. (2013), First results of incentives policy on grid interconnected photovoltaic systems development in Greece, *Energy Policy* 58, 303–311.
- US Department of Energy (2012 DOE), Photovoltaic (PV) Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections.
- Veryard, R. (2005), *Systems thinking for demanding change*, Available at:
- http://demandingchange.blogspot.ca/2005/09/technology-hype-curve.html
- World Bank (2013). Available at:
- https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=US
- Zellner, A. (1962). An efficient method of estimating seemingly unrelated regression equations and tests for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, 57, 348–368.