

تحلیل بلندمدت نقش گاز طبیعی در توسعه ظرفیت تولید انرژی الکتریکی با استفاده از دینامیک سیستمها

مسعود رشیدی نژاد، امیر عبدالمهی

دانشکده برق

دانشگاه شهید باهنر کرمان

کرمان، ایران

علی موحدنسب

شرکت مدیریت تولید برق یزد

یزد، ایران

movahednasabali@gmail.com

۱- مقدمه

در سیستمهای تجدید ساختار یافته سود تنها محرک سرمایه گذاری و توسعه ظرفیت تولید است، بر خلاف سیستمهای سنتی که در آن انگیزه های سیاسی و اجتماعی تأثیرگذار می باشد. تحلیل شرایط بازار و سود تولید کنندگان در شرایط مختلف می تواند به سرمایه گذاران و سیاست گذاران در اتخاذ تصمیم درست کمک کند.

در گزارشهای منتشر شده توسط نهادهای معتبر پیش بینی شده است که ۵۰٪ انرژی الکتریکی در آینده با استفاده از گاز طبیعی تولید خواهد شد [۱]. از سویی دیگر افزایش دسترسی مصرف کنندگان به گاز طبیعی امکان انتخاب بین گاز طبیعی یا برق را به عنوان منبع انرژی برای آنها فراهم می نماید. این شرایط عدم قطعیت قیمت گاز طبیعی در سطح بالادستی و نیز الگوی مصرف این سوخت در پایین دستی بر اساس ضرایب فصلی را به یکی از عوامل تأثیرگذار در سیستمهای قدرت تبدیل نموده است.

دینامیک سیستمها مفهومی است که با استفاده از اصول علم کنترل رفتار بلندمدت سیستمهای پیچیده مختلف را تحلیل می نماید؛ به این منظور اجزای مختلف یک سیستم نظیر ورودیها، خروجیها، تأخیرها و فیدبکها و ارتباط متقابل میان آنها شناسایی شده و رفتار بلندمدت یک سیستم در حوزه زمان تحلیل می گردد. این شبیه سازیها می تواند به جای استفاده از تجربه دنیای واقعی، در تصمیم گیری و اتخاذ استراتژیهای مختلف راهگشا باشد.

چکیده — گاز طبیعی یکی از منابع انرژی است که نقش آن در تولید انرژی الکتریکی در حال افزایش است. این مقاله تأثیر این منبع انرژی در توسعه ظرفیت تولید انرژی الکتریکی را به کمک دینامیک سیستمها تحلیل می کند؛ دینامیک سیستمها عوامل تأثیرگذار در یک فرآیند و ارتباط متقابل آنها را شناسایی و مدلسازی کرده و نتیجه بلندمدت سیاستهای مختلف در آن فرایند را تحلیل می نماید. این موضوع در سه سناریوی مختلف شامل حالت پایه با توسعه مفهوم پایداری، عدم قطعیت در قیمت گاز طبیعی و دسترسی مصرف کننده به گاز طبیعی و برق مطالعه می شود. ساختار بازار، پرداخت قیمت پیشنهادی است که در آن تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی، گازی و بادی به عنوان بنگاههای مستقل و براساس اطلاعات منتشر شده توسط آژانس اطلاعات انرژی آمریکا حضور دارند. نتایج این بررسی بیانگر جبران هزینه های تولید و سرمایه گذاری بنگاهها و تأمین قابلیت اطمینان در حالت پایه می باشد. افزایش قیمت گاز طبیعی، سود برخی بنگاهها را در بازار افزایش و سهم تکنولوژیهای بر پایه گاز را در بازار کم می کند در حالی که کاهش قیمت این سهم را افزایش می دهد. انتخاب منبع انرژی توسط متقاضی موجب توسعه بیش از حد ظرفیت و زیان برخی از بنگاهها شده و در قابلیت اطمینان سیستم را نوسانی می کند.

واژه های کلیدی — دینامیک سیستمها؛ گاز طبیعی؛ بازار انرژی؛ توسعه ظرفیت؛ پایداری بازار؛ قیمت بالادستی؛ قیمت مصرف کننده؛

حرارتی در بازار از دیگر نکات جانبی در این مقاله می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی این مدل چهار تکنولوژی بخار، سیکل ترکیبی، گازی و بادی در بازار انرژی الکتریکی با ساختار قیمت پیشنهادی رقابت می‌کنند. مدل‌سازی‌ها با استفاده از اطلاعات منتشر شده توسط آژانس اطلاعات آمریکا در مورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری، سوخت، بهره‌برداری و محیط زیست تکنولوژیهای مختلف و نیز اطلاعات مربوط به قیمت بالادستی گاز طبیعی و قیمت مصرف کننده انجام شده‌است [۱۷]، [۲۰] و [۲۱].

نتایج این مطالعات بیانگر جریان هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری بنگاهها در حالت پایدار و تأمین رزرو مورد نیاز سیستم می‌باشد. افزایش قیمت گاز طبیعی سوددهی برخی تکنولوژیها را زیاد کرده و سهم تکنولوژیهای مصرف کننده این سوخت را در بازار کاهش می‌دهد؛ از سویی دیگر، کاهش قیمت موجب زیان برخی بنگاهها شده و سهم تکنولوژیهای بر پایه گاز طبیعی را افزایش می‌دهد. دسترسی مستقیم به گاز طبیعی توسط مصرف کننده موجب ایجاد ظرفیت اضافی و کاهش سود بنگاهها می‌گردد.

ساختار سایر بخشهای این مقاله به‌صورت زیر می‌باشد. در بخش ۲ مدل کلی معرفی شده و جزئیات قسمتهای مختلف آن توضیح داده می‌شود. در بخش ۳ مدل ارائه شده در ۳ سناریوی شبیه سازی و نتایج تحلیل می‌گردد. در بخش ۴ نتایج این تحقیق جمع‌بندی و ارائه شده و اطلاعات به‌کار رفته در شبیه‌سازی هم در ضمیمه ۱ این مقاله بیان شده‌است.

۲- معرفی مدل

شکل ۱ شمای کلی مدل استخراج شده برای تحلیل بلندمدت رفتار بازار برق را نمایش می‌دهد. در این ساختار بنگاهها پیشنهادت خود را با در نظر گرفتن هزینه حاشیه‌ای و قیمت پیش‌بینی شده برق، تنظیم و به بازار اعلام می‌کنند. از سویی دیگر میزان تقاضا با در نظر گرفتن الاستیسیته بار و میزان مصرف گاز طبیعی تعیین و به بازار اعلام می‌شود. با تسویه بازار، قیمت برق و میزان تولید هر بنگاه مشخص می‌شود که قیمت به‌عنوان یک فیدبک به بازار برمی‌گردد.

با مشخص شدن میزان تولید، سود هر بنگاه با در نظر گرفتن هزینه تولید و سرمایه‌گذاری محاسبه شده و بعد از نرمالیزه شدن به‌عنوان ضریبی برای سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت به‌کار می‌رود. توسعه ظرفیت علاوه بر ضرایب سوددهی به نرخ رشد بار و نرخ بازنشتگی بنگاهها وابسته بوده و میزان ظرفیت هر تکنولوژی با توجه به مدت زمان ساخت و طول عمر آن تعیین می‌گردد. ظرفیت ایجاد شده به بازار اعلام و حلقه فیدبک دیگری را در این فرایند تشکیل می‌دهد. علاوه براین، این ظرفیت در محاسبه قابلیت اطمینان

محققان زیادی رفتار سیستمهای مختلف را با کمک دینامیک سیستمها تحلیل نموده‌اند. مرجع [۲] عوامل مؤثر در توسعه ظرفیت تولید نظیر تبلیغات، بازار، حمل و نقل و انبارداری را با کمک دینامیک سیستمها تحلیل نموده‌است که برخی از آنها در بازار انرژی الکتریکی کاربردی ندارند. براساس استراتژی توسعه در این مرجع دو استراتژی استاتیک برای کوتاه مدت و دینامیک برای بلند مدت تعریف شده‌است.

دینامیک سیستمها برای بررسی پدیده‌های مختلف در صنعت برق هم به‌کار رفته‌است که در مرجع [۳] دسته‌بندی شده‌است. Olsina و همکارانش در مرجع [۴] یک بازار برق تجدید ساختار یافته را به‌منظور تحلیل رفتار بلند مدت آن مدل‌سازی نموده‌اند.

پرداخت برای ظرفیت یکی دیگر از موضوعاتی است که توسط پژوهشگران مختلفی با استفاده از دینامیک سیستمها تحلیل شده‌است. در [۵] پرداخت ظرفیت در کنار پیشنهاد تابع توزیع احتمال برای تقاضا مدل‌سازی شده‌است. مراجع [۶]، [۷] و [۸] مکانیزمهای پرداخت ظرفیت در کشورهای ایران، کره و سوئیس را تحلیل نموده‌اند.

بازار مجوزهای زیست محیطی و ارتباط متقابل آن با بازار برق از دیگر زمینه‌هایی است که توسط پژوهشگران در مراجع [۹]، [۱۰] و [۱۱] مورد توجه قرار گرفته‌است. در این مقالات عوامل مختلف هر بازار شناسایی شده و بهترین تصمیمات برای دستیابی به هدف بازیگران بازار معرفی شده‌است.

Ford در مراجع [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] الگوهای مختلف ساخت نیروگاه و تأثیر آن در دستیابی به اهداف سرمایه‌گذاری را با کمک دینامیک سیستمها تحلیل نموده‌است. نتیجه این پژوهشها نشان می‌دهد که ساخت نیروگاه در مدت زمان برنامه ریزی شده می‌تواند اهداف سرمایه‌گذاری را محقق کرده و تأخیر در ساخت می‌تواند موجب روز افزایش و کاهش قیمت در بازار گردد. تأثیر بلند مدت قوانین محدود کننده CO₂ بر بازار برق استرالیا از دیگر نکاتی است که در [۱۵] تحلیل شده‌است. نویسندگان در [۱۶] بازار انرژی الکتریکی بریتانیا را به‌صورت یک حلقه کنترلی مدل‌سازی نموده و در آن سیاستهای مختلف قابلیت اطمینان را تحلیل نموده‌اند.

در این مقاله دینامیک سیستمها به‌عنوان ابزاری برای تحلیل بلند مدت نقش گاز طبیعی در توسعه ظرفیت تولید برق به‌کار گرفته می‌شود. در این راستا سه سناریو شامل: ۱- حالت پایدار به‌عنوان سناریوی پایه، ۲- عدم قطعیت در قیمت گاز طبیعی با در نظر گرفتن قیمت‌های پایین، متوسط و بالا و ۳- دسترسی مستقیم به گاز طبیعی توسط مصرف‌کننده در نظر گرفته شده‌است. توسعه مفهوم پایداری در بازار و حضور منابع تجدیدپذیر در کنار تکنولوژیهای

$$IC_j (\$/KWh) = \frac{IC_j (\$/KW)}{LT_j \times 8760} (1+rr)^y \quad (2)$$

تنظیم قیمت پیشنهادی توسط بنگاهها با توجه به هزینه حاشیه‌ای و قیمت پیش‌بینی شده برق با کمک الگوریتم B.R.H. انجام می‌شود. این الگوریتم بر اساس تطبیق میزان پیش‌بینی شده بوده و با رابطه (۳) قابل توصیف است. در این روش مقدار پیش‌بینی شده، ξ^e ، در لحظه T با توجه به اختلاف مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده قبلی و با ضریب تنظیم، κ ، تعیین می‌شود. از این روش در دینامیک سیستمها برای پیش‌بینی متغیرها استفاده شده‌است که به‌عنوان تابع TREND نام‌گذاری شده‌است [۱۹]. ضمیمه ۲ بلوک دیاگرام تابع TREND را نمایش می‌دهد.

$$\xi^e(t, T) = \xi^e(t, T-1) + \kappa [\xi^e(T-1) - \xi^e(t, T-1)] \quad (3)$$

۲-۲- تقاضای انرژی الکتریکی

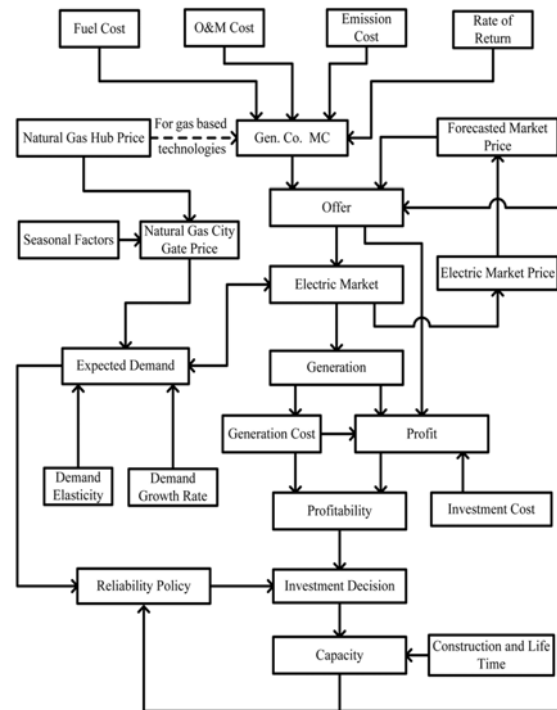
میزان تقاضای انرژی الکتریکی یکی دیگر از عوامل تعیین‌کننده در بازار است که با استفاده از منحنی پهنای بار مدلسازی می‌گردد؛ در این منحنی هریک از بخشهای پایه، میانی و پیک مدلسازی شده که به‌ترتیب با تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی و گازی تغذیه می‌شوند. میزان تقاضا در هر قسمت با نرخ رشد ثابتی به‌صورت سالانه رشد کرده و مقدار متوسط آن که با رابطه (۴) بیان می‌شود، به‌منظور تسویه به بازار پیشنهاد می‌گردد. همچنین میزان تقاضا به‌واسطه الاستیسیته بار، λ ، از قیمت انرژی الکتریکی، ρ ، تأثیر می‌پذیرد.

$$D(t) = \sum_{i=1}^k \delta_i L_i e^{g \cdot y} - \lambda \rho \quad (4)$$

۲-۳- بازار انرژی الکتریکی

در این مقاله بازار انرژی الکتریکی با ساختار پرداخت قیمت پیشنهادی استفاده شده‌است که در آن پیشنهادات قیمت به‌صورت افزایشی مرتب شده و کمترین پیشنهادات با به‌دست آوردن فرصت تولید، پیشنهاد خود را از بازار دریافت می‌کنند. در این ساختار قیمت انرژی الکتریکی در بازار برابر متوسط پیشنهادات ارائه‌شده می‌باشد و ویژگی اصلی آن حذف ضربه‌های قیمت می‌باشد.

در بازار انرژی الکتریکی با ساختار قیمت پیشنهادی، برخلاف ساختار قیمت واحد، هر یک از بنگاهها وظیفه جبران هزینه‌های خود در بازار را برعهده دارند که این هدف با تنظیم قیمت‌های پیشنهادی قابل دسترسی است.



شکل ۱- شمای کلی فرایند توسعه ظرفیت تولید برق

سیستم به‌کار رفته و با تنظیم مقیاس توسعه در سرمایه‌گذاری، فیدبک دیگری را ایجاد می‌کند.

۲-۱- هزینه‌ها

هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی شامل هزینه‌های حاشیه‌ای تولید و سرمایه‌گذاری می‌باشد. هزینه‌های حاشیه‌ای تولید به عواملی نظیر هزینه سوخت، بهره‌برداری و تعمیرات و زیست محیطی بستگی دارد که با نرخ رشد ثابتی سالانه در حال افزایش است [۱] و [۱۷]. معادله (۱) بیانگر هزینه‌های حاشیه‌ای تولید است که در آن HR_j نرخ حرارتی هر تکنولوژی می‌باشد که سالانه کاهش می‌یابد.

$$MC_j = (F_j \cdot HR_j + O \& M_j + CO_{2j}) (1+rr)^y \quad (1)$$

نوع دیگری از هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی هزینه سرمایه‌گذاری است که در مراجع مختلف برحسب $\$/KW$ بیان می‌شود [۱] و [۱۷]. به‌منظور یکسان سازی بعد هزینه‌ها، می‌توان با در نظر گرفتن طول عمر هر تکنولوژی هزینه سرمایه‌گذاری را با رابطه (۲) به $\$/KWh$ تبدیل نمود [۱۸]. پیشنهاد بنگاهها براساس هزینه حاشیه‌ای تولید تنظیم و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در طول بهره‌برداری و با توجه به قوانین و شرایط بازار جبران می‌گردد.

مختلف متفاوت است و ویژگی همه این منحنی‌ها این است که به‌ازای مقدار واحد اندیس سوددهی، $m_j = 1$ می‌باشد. مقدار این ضریب تحت تأثیر اندیس سوددهی و سیاستهای قابلیت اطمینان می‌باشد.

$$m_j = \frac{m_{j \max}}{1 + e^{-(\alpha_j PI_j - \beta_j)}} \quad (۸)$$

نرخ سرمایه‌گذاری در هر تکنولوژی علاوه بر ضریب m_j تحت تأثیر نرخ رشد بار \dot{L}_i و نرخ بازنشتی تکنولوژیهای مختلف RE_j مطابق رابطه (۹) می‌باشد.

$$IR_j = m_j.(\dot{L}_i + RE_j) \quad (۹)$$

سیاستهای قابلیت اطمینان به‌عنوان معیاس توسعه به‌کار می‌رود که با تنظیم ضرایب m_j یک حلقه داخلی را در فرایند سرمایه‌گذاری تشکیل داده و سطح رزرو را در رابطه (۱۰) در یک مقدار برنامه‌ریزی شده نگه می‌دارد.

$$Res \cdot Rat = \frac{TCP - D(t)}{D(t)} \quad (۱۰)$$

سرمایه‌گذاریهای انجام شده ظرفیت در حال ساخت، UC_j ، هر تکنولوژی را با توجه به زمان ساخت، CT_j ، مطابق رابطه (۱۱) تشکیل می‌دهد. ظرفیت در حال ساخت به ظرفیت قابل بهره‌برداری، CP_j ، در رابطه (۱۲) تبدیل شده و بعد از طی شدن طول عمر هر تکنولوژی، LT_j ، از چرخه تولید خارج می‌شود.

$$UC_j = \int_0^t IR_j - IR_j(t - CT_j) dt \quad (۱۱)$$

$$CP_j = \int_0^t CN_j - CN_j(t - LT_j) dt \quad (۱۲)$$

۲-۶- تکنولوژی بادی

تکنولوژی بادی در این مقاله در کنار سایر تکنولوژیهای حرارتی در بازار رقابت می‌کند، برخلاف سایر پژوهشهای انجام شده که ظرفیت منابع تجدیدپذیر را از میزان تقاضا کم می‌کنند [۶]. برای تحلیل بلندمدت رفتار نیروگاههای بادی، پارامترهای مختلف این تکنولوژی نظیر هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری، مدت ساخت و طول عمر با استفاده از گزارشهای منابع معتبر به‌کار گرفته شده‌است [۱۷].

مهمترین ویژگی تولید منابع تجدیدپذیر عدم قطعیت در تولید آنها به‌واسطه عدم قطعیت در سرعت وزش باد می‌باشد که این عدم قطعیت با تابع توزیع احتمال Weibull مدل‌سازی می‌گردد. میزان توان تولید شده توسط تکنولوژی بادی تحت تأثیر نوسانات سرعت باد و محدودیتهای توربینها در

بنگاهها پیشنهادت خود را بالاتر از هزینه حاشیه‌ای و پایین تر از قیمت پیش‌بینی شده برق تنظیم می‌کنند تا تعادلی بین برنده‌شدن در بازار و جبران هزینه‌ها برقرار گردد.

۲-۴- سوددهی

با تسویه بازار میزان تولید هر بنگاه مشخص شده و امکان محاسبه سود با توجه قیمت پیشنهادی فراهم می‌گردد. کل هزینه پرداخت شده توسط بنگاهها، Φ_j ، تا زمان t برای تولید انرژی الکتریکی با رابطه (۵) توصیف می‌گردد که در آن G_j میزان تولید هر بنگاه و MC_j هزینه حاشیه‌ای تولید آن می‌باشد.

$$\Phi_j = \int_0^t G_j.MC_j dt \quad (۵)$$

سود به‌دست آمده (Π_j) با کم کردن هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری بنگاهها تا زمان t با رابطه (۶) قابل محاسبه است که در آن χ_j قیمت پیشنهادی، CP_j ظرفیت هر بنگاه و IC_j هزینه سرمایه‌گذاری هر بنگاه می‌باشد. کلیه هزینه‌ها در این رابطه برحسب \$/MWh می‌باشد.

$$\Pi_j = \int_0^t G_j.\chi_j - G_j.MC_j - CP_j.IC_j dt \quad (۶)$$

به منظور نرمالیزه کردن سود کسب‌شده توسط هر بنگاه، اندیس سوددهی، PI_j ، با رابطه (۷) تعریف می‌شود که در آن سود کسب شده توسط هر بنگاه، Π_j ، نسبت به هزینه‌های تولید، Φ_j ، نرمالیزه می‌شود [۱۹]. این کمیت به بنگاهها در تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری براساس سوددهی کمک می‌کند.

$$PI_j = \frac{\Pi_j}{\Phi_j} \quad (۷)$$

با کمک اندیس سوددهی می‌توان مفهوم پایداری در بازار را توسعه داد که به معنی جبران هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری در بازار می‌باشد [۱۸]. این حالت را می‌توان با $PI_j = 0$ تعریف نمود که در آن هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری مؤثر می‌باشد. حالت پایدار با پیشنهاد قیمت پایدار از ترکیب هزینه حاشیه‌ای تولید و قیمت پیش‌بینی شده برق توسط بنگاهها به‌دست می‌آید.

۲-۵- توسعه ظرفیت تولید

اندیس سوددهی هر بنگاه به‌کمک منحنی‌های S-shape در رابطه (۸) به نرخ سرمایه‌گذاری تبدیل می‌شود که این منحنی‌ها نرخ سرمایه‌گذاری و مقدار نهایی را محدود می‌کنند. ضرایب α_j و β_j برای تکنولوژیهای

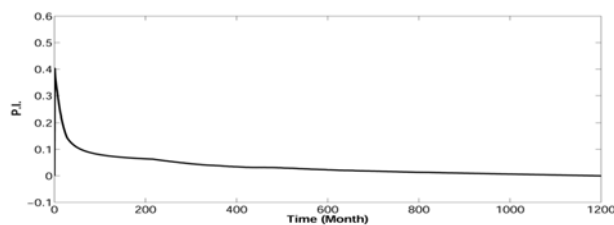
می‌باشد. نتایج برای یک دوره زمانی ۱۲۰۰ ماهه به‌منظور نشان دادن پایداری مدل ارائه شده‌است.

۳-۱- حالت پایه

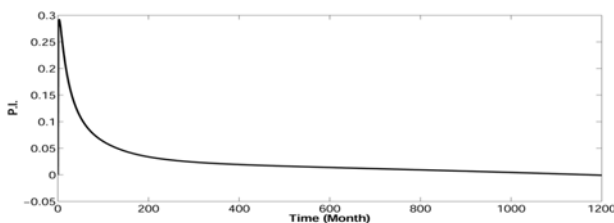
حالت پایدا بازار به‌عنوان حالت پایه در نظر گرفته شده‌است که در آن هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری جبران شده و با $PI_f = 0$ در معادله (۷) شناخته می‌شود. در این سناریو هریک از بنگاهها پیشنهادات خود را با جمع کردن هزینه حاشیه‌ای و ضربی از قیمت پیش‌بینی شده برق تنظیم می‌کنند که این ضرب برای هریک از تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی، گازی و بادی به‌ترتیب برابر است با ۰/۱۳، ۰/۰۸۳، ۰/۰۵۸ و ۰/۴۵.

شکل ۳ اندیس سوددهی بنگاهها را در این سناریو نمایش می‌دهد که در طول دوره مطالعه شده به صفر میل می‌کند. نوسانات این پارامتر حول مقدار صفر در کنار رشد بار و بازنشتی ظرفیتهای قدیمی محرکی است برای توسعه ظرفیت تولید.

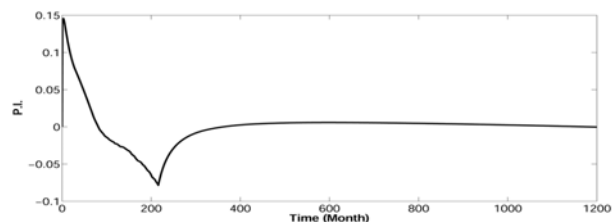
جدول ۱ ارزش فعلی سود کسب شده توسط بنگاههای مختلف در حالت پایه را دسته‌بندی کرده‌است. تکنولوژی بخار در حالت پایه بیشترین سود را با تأمین بار پایه کسب می‌کند و تکنولوژیهای سیکل ترکیبی و گازی در مکانهای



الف) بخار



ب) سیکل ترکیبی



ج) گازی

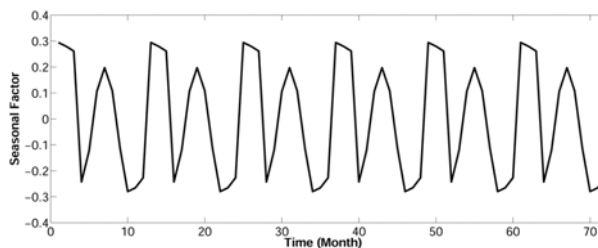
پایین‌تر و بالاتر از سرعتهای حدی با رابطه (۱۳) قابل توصیف است.

$$G_{\omega}(V_{\omega}) = \begin{cases} 0 & V_{\omega} < V_{ci} \\ \left(\frac{V_{\omega}}{V_r}\right)^3 CP_{r\omega} & V_{ci} \leq V_{\omega} < V_r \\ CP_{r\omega} & V_r \leq V_{\omega} < V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq V_{\omega} \end{cases} \quad (13)$$

۲-۷- نقش گاز طبیعی

گاز طبیعی در سیستمهای قدرت در دو بخش تولید انرژی الکتریکی و تقاضا تأثیرگذار است. این سوخت با راندمان ۹۰٪ به‌طور مستقیم و با راندمان ۳۵٪ از طریق برق در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌گیرد. تولیدکنندگان برق، گاز طبیعی را از منابع بالادستی تأمین می‌کنند که این قیمت بالادستی یکی از منابع عدم قطعیت در بازارهای انرژی الکتریکی می‌باشد.

قیمت مصرف‌کننده گاز طبیعی تحت تأثیر قیمت بالادستی و ضرایب فصلی بوده و هزینه مصرف‌کننده با توجه به راندمان آن مشخص می‌شود. تحلیل اطلاعات منتشر شده توسط آژانس اطلاعات انرژی آمریکا در مورد قیمت مصرف‌کننده گاز طبیعی به کمک سریهای فصلی $X-12-ARIMA$ مقدار این ضرایب فصلی را در اختیار قرار می‌دهد که در شکل ۲ نمایش داده شده‌است [۲۰]. این ضرایب منطبق بر توابع فصلی به صورت جمعی می‌باشند.



شکل ۲- ضرایب فصلی قیمت پایین دستی گاز طبیعی

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

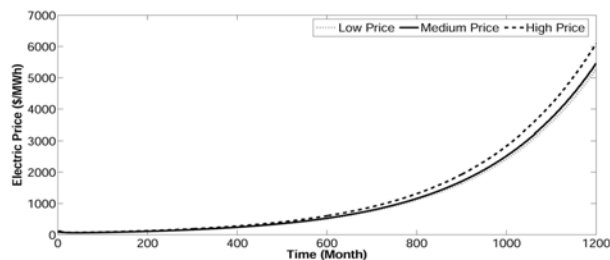
مدل ارائه‌شده در بخش قبل برای ۳ سناریوی مختلف شامل (۱) حالت پایه، (۲) تغییرات قیمت گاز طبیعی و (۳) دسترسی مصرف‌کننده به گاز طبیعی شبیه‌سازی شده و بعضی از پارامترها نظیر اندیس سوددهی، نسبت رزرو و الگوی توسعه ظرفیت در این سناریوها تحلیل و مقایسه می‌گردد. شبیه‌سازی براساس اطلاعات منتشر شده توسط آژانس اطلاعات انرژی آمریکا درمورد تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی، گازی و بادی و قیمتهای گاز طبیعی

که در تغذیه بارهای پایه، میانی و پیک به کار گرفته می‌شوند. ظرفیت تکنولوژی بادی در پایان دوره مطالعه شده در حالت پایه برابر 1400 MW می‌باشد.

۲-۳- تغییرات قیمت گاز طبیعی

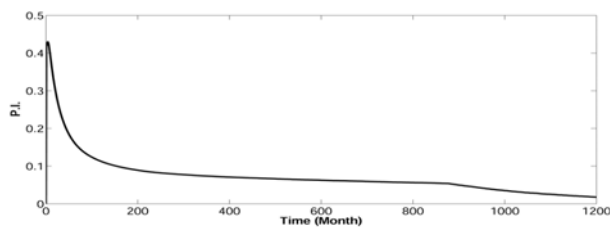
در سناریوی دوم تأثیر تغییرات قیمت گاز طبیعی بر رفتار بلندمدت سرمایه‌گذاری در تولید برق تحلیل می‌گردد. به این منظور ۳ نوع قیمت پایین، متوسط و بالا برای این منبع انرژی در نظر گرفته شده و وضعیت بنگاهها در هر یک از این حالتها ارائه می‌شود. قیمت متوسط همان قیمت گاز طبیعی در حالت پایه می‌باشد [۲۱] و [۲۲].

شکل ۶ قیمت برق در بازار انرژی الکتریکی را در ۳ حالت قیمت گاز طبیعی نمایش می‌دهد که در آن قیمت برق با افزایش قیمت گاز زیاد شده و با کاهش قیمت آن در مقایسه با حالت پایه کم می‌شود.

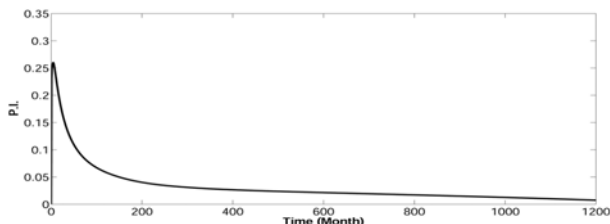


شکل ۶- قیمت برق در ۳ حالت مختلف قیمت گاز طبیعی

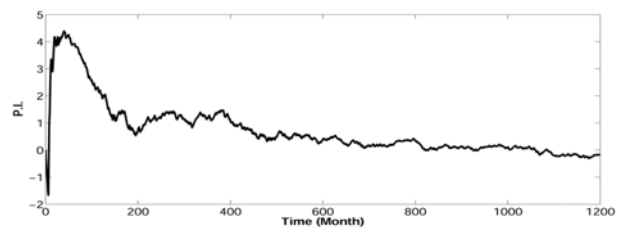
اندیس سوددهی تکنولوژیهای مختلف در قیمت بالای گاز طبیعی در شکل ۷ نمایش داده شده‌است که مقدار آن برای تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی و بادی به 0.04 ، 0.1 و 0.33 افزایش یافته‌است. مقدار PI در تکنولوژی گازی به -0.002 کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش فرصت تولید



الف) بخار



ب) سیکل ترکیبی



د) بادی

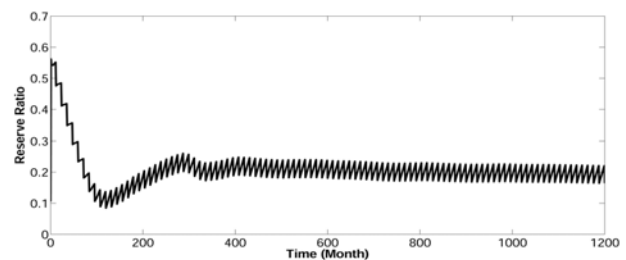
شکل ۳- اندیس سوددهی تکنولوژیهای مختلف در حالت پایه

بعدی قرار می‌گیرند. سود تکنولوژی بادی در این حالت از همه کمتر است.

جدول ۱- ارزش فعلی سود تکنولوژیهای مختلف در حالت پایه

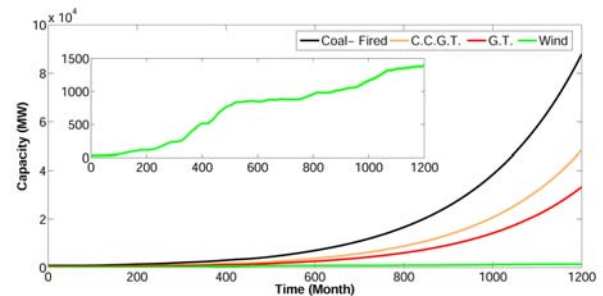
تکنولوژی	سود (\$)
بخار	3×10^6
سیکل ترکیبی	0.94×10^6
گازی	0.33×10^6
بادی	0.085×10^6

حالت پایه نسبت رزرو مورد نیاز سیستم در (۹) را تأمین می‌کند که شکل ۴ بیانگر این نکته می‌باشد؛ این پارامتر حول 0.2 نوسان کرده و مقدار آن بین 0.18 و 0.22 متغیر است.

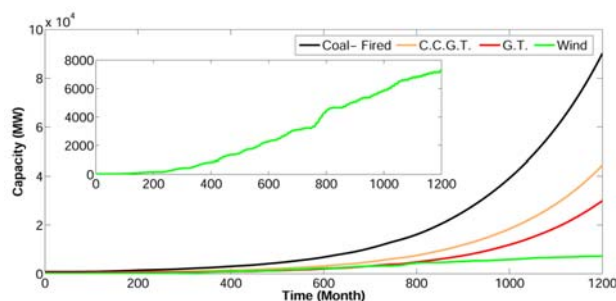


شکل ۴- نسبت رزرو سیستم در حالت پایه

این سطح قابلیت اطمینان با الگوی ظرفیت تولید شکل ۵ به‌دست آمده‌است. در حالت پایدار ظرفیت هریک از تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی و گازی به ترتیب به $8/8 \times 10^4\text{ MW}$ ، $4/8 \times 10^4\text{ MW}$ ، $3/3 \times 10^4\text{ MW}$ می‌رسد



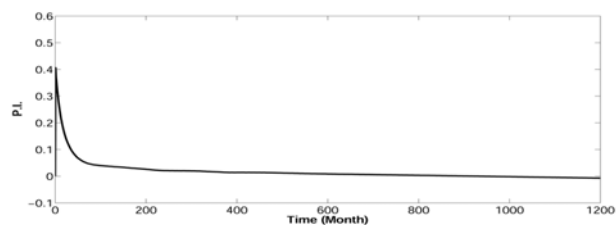
شکل ۵- ظرفیت تکنولوژیهای مختلف در حالت پایه



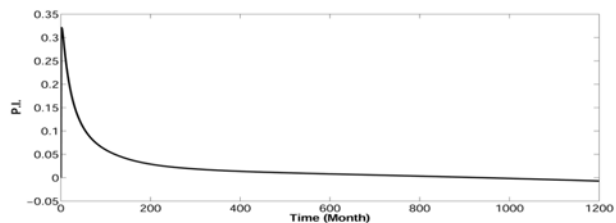
شکل ۸- ظرفیت تکنولوژیهای مختلف در قیمت بالای گاز طبیعی

است. این الگوی ظرفیت بیانگر کاهش سهم تکنولوژیهای بر پایه گاز طبیعی در بازار در قیمتهای بالای این سوخت می‌باشد.

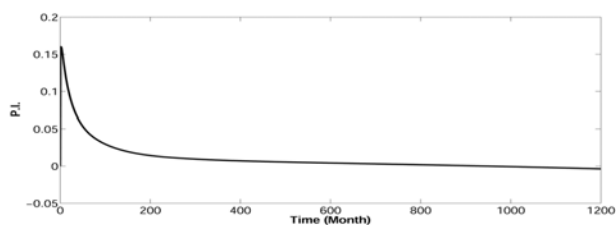
با کاهش قیمت گاز طبیعی نسبت به مقدار متوسط آن، متوسط قیمت در بازار انرژی کاهش یافته و موجب زیان بنگاهها به دلیل جبران نشدن هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌گردد. شکل ۹ اندیس سوددهی بنگاهها را با کاهش قیمت گاز طبیعی از مقدار متوسط آن نمایش می‌دهد. مقدار این پارامتر در این حالت به $-۰/۰۰۷۳$ ، $-۰/۰۰۰۷$ ، $-۰/۰۰۳۵$ و $-۰/۰۰۴۹$ در مقایسه با حالت پایه کاهش یافته‌است.



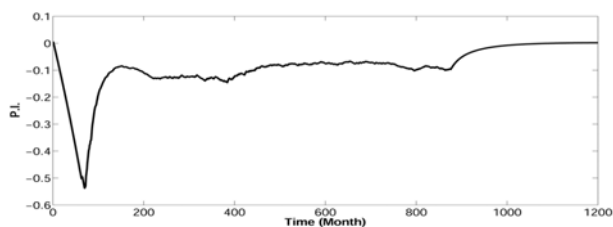
الف) بخار



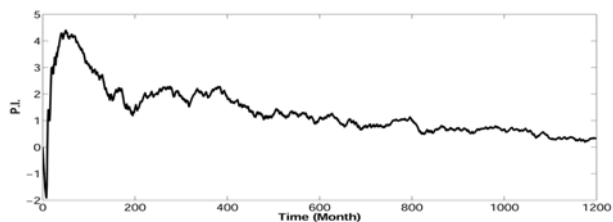
ب) سیکل ترکیبی



ج) گازی



ج) گازی



د) بادی

شکل ۷- اندیس سوددهی تکنولوژیهای مختلف در قیمت بالای گاز طبیعی

توسط این تکنولوژی می‌باشد. با کاهش نرخ حرارتی این تکنولوژی در طول زمان رتبه آن در بازار تغییر کرده و اندیس سوددهی آن در زمان ۹۰۰ به صفر میل می‌کند.

ارزش فعلی سود بنگاهها در قیمت بالای گاز طبیعی در جدول ۲ ارائه شده‌است. افزایش قیمت گاز طبیعی، سود بخار، سیکل ترکیبی و بادی را در مقایسه با حالت پایه افزایش داده است، اما موجب زیان تکنولوژی گازی در بازار شده‌است.

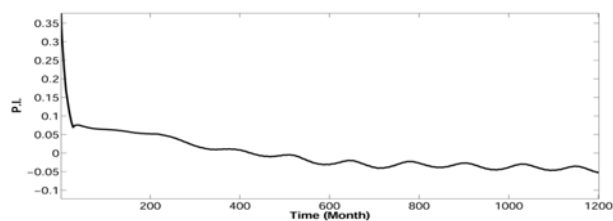
جدول ۲- ارزش فعلی سود بنگاهها در قیمت بالای گاز طبیعی

سود (\$)	تکنولوژی
۲۴×۱۰^۶	بخار
$۴/۳ \times ۱۰^۶$	سیکل ترکیبی
$-۱/۳ \times ۱۰^۶$	گازی
$۳/۴ \times ۱۰^۶$	بادی

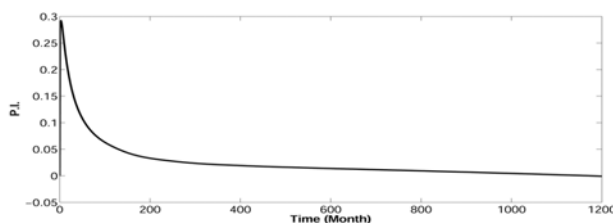
افزایش قیمت گاز طبیعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت اطمینان سیستم نداشته و تنها مقدار متوسط نسبت رزرو را در مقایسه با شکل ۴ به $۰/۲۱$ افزایش می‌دهد.

شکل ۸ ظرفیت تکنولوژیهای مختلف را در قیمت بالای گاز طبیعی نمایش می‌دهد. در مقایسه با شکل ۵، ظرفیت تکنولوژیهای بخار و بادی به ۹×۱۰^۲ MW و ۷۳۰۰ MW افزایش یافته‌است، در حالی که ظرفیت سیکل ترکیبی و گازی به $۴/۴ \times ۱۰^۲$ MW و ۳×۱۰^۲ MW در شکل ۸ کاهش یافته -

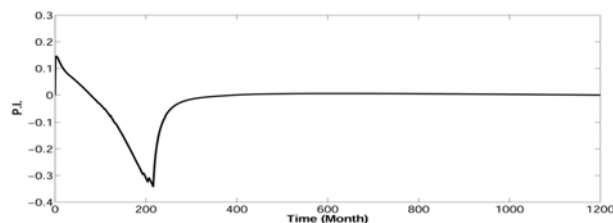
تنها ۱۰٪ از مصرف‌کنندگان برق به گاز طبیعی و انتخاب ارزان‌ترین منبع انرژی می‌باشد. اندیس سوددهی بنگاههای مختلف در این حالت در شکل ۱۱ نشان داده شده است که در آن مقدار PI مربوط به بخار به ۰/۳۳- کاهش یافته و در مورد سایر تکنولوژیها تغییری نکرده‌است.



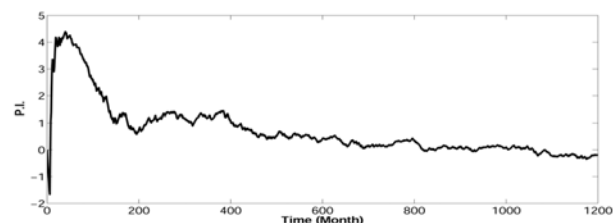
الف) بخار



ب) سیکل ترکیبی



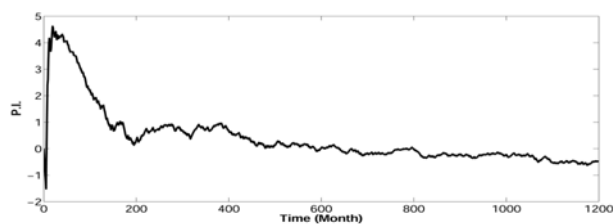
ج) گازی



د) بادی

شکل ۱۱- اندیس سوددهی بنگاههای مختلف در حالت دسترسی مستقیم مصرف‌کننده به گاز طبیعی

جدول ۴ ارزش فعلی سود کسب شده توسط بنگاههای مختلف را در این حالت خلاصه کرده‌است. دسترسی مصرف‌کننده به گاز طبیعی موجب نوسان در بخشهای مختلف منحنی بار شده که تأثیر آن در قسمت پایه بیشتر بوده و موجب زیان شدید تکنولوژی بخار شده‌است. سود کسب شده توسط سایر بنگاهها در این حالت تغییر زیادی در مقایسه با جدول ۱ نداشته‌است.



د) بادی

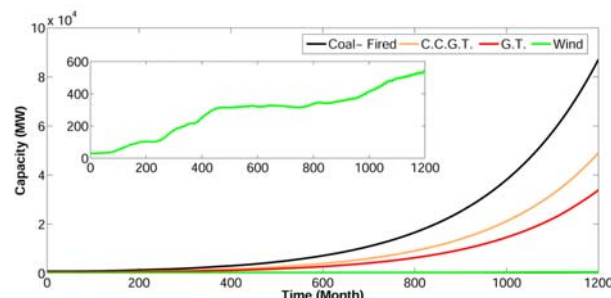
شکل ۹- اندیس سوددهی تکنولوژیهای مختلف در قیمت پایین گاز طبیعی

ارزش فعلی سود تولیدکنندگان در قیمت پایین گاز طبیعی در جدول ۳ خلاصه شده است که مقدار آن در مقایسه با حالت پایه برای تمام بنگاهها منفی می‌باشد. این حالت به علت پایین آمدن متوسط قیمت بازار و جبران نشدن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اتفاق می‌افتد.

جدول ۳- ارزش فعلی سود بنگاهها در قیمت پایین گاز طبیعی

تکنولوژی	سود (\$)
بخار	$-2/8 \times 10^6$
سیکل ترکیبی	$-1/3 \times 10^6$
گازی	$-0/58 \times 10^6$
بادی	$-0/15 \times 10^6$

کاهش قیمت گاز طبیعی تأثیر زیادی بر قابلیت اطمینان سیستم در مقایسه با شکل ۴ نداشته و تنها متوسط نسبت رزرو موجود در سیستم به ۰/۱۹ کاهش می‌یابد. ظرفیت هریک از تکنولوژیهای تولید در این حالت مطابق شکل ۱۰ می‌باشد که در آن ظرفیت بخار و بادی به $8/7 \times 10^4 \text{ MW}$ و 540 MW کاهش یافته و ظرفیت سیکل ترکیبی و گازی به $4/9 \times 10^4 \text{ MW}$ و $3/4 \times 10^4 \text{ MW}$ افزایش یافته است. کاهش قیمت گاز طبیعی سهم تکنولوژیهای بر پایه این سوخت را در بازار افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰- ظرفیت تکنولوژیهای مختلف در قیمت پایین گاز طبیعی

۳-۳- دسترسی مصرف‌کننده به گاز طبیعی

مصرف گاز طبیعی در کنار برق توسط مصرف‌کنندگان، یکی دیگر از نقاط تقاطع سیستم‌های گاز و برق می‌باشد. فرض اصلی در این بخش دسترسی

افزایش راندمان مصرف کنندگان گاز طبیعی می‌تواند مصرف انرژی الکتریکی توسط آنها را کمتر کرده و با افزایش این راندمان به بالاتر از ۵۰٪، این نوع متقاضیان از بازار برق خارج شده و بازار به حالت تعادل باز می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله تحلیل بلندمدت نقش گاز طبیعی در توسعه ظرفیت تولید انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن قیمت بالاسری گاز طبیعی و دسترسی مستقیم مصرف کننده به گاز طبیعی به‌عنوان دو نقطه تلاقی سیستمهای گاز و برق می‌باشد. در این راستا سه سناریو شامل (۱) حالت پایه، (۲) تغییرات قیمت گاز طبیعی و (۳) دسترسی مستقیم مصرف کننده به گاز طبیعی در نظر گرفته شده‌است. تحلیل‌ها با استفاده از اطلاعات منتشر شده توسط آژانس اطلاعات انرژی آمریکا در مورد هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری، قیمت بالاسری گاز طبیعی و قیمت مصرف‌کننده انجام شده‌است.

سناریوی اول براساس توسعه مفهوم پایداری در بازار با جبران هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری می‌باشد. در این حالت با تنظیم پیشنهادات قیمت بنگاهها در بازاری با ساختار پرداخت قیمت پیشنهادی هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری آنها جبران شده که با $PI_f = 0$ قابل توصیف است. حالت پایه برای همه بنگاهها سودآور بوده و قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی‌شده را تأمین می‌کند.

تغییرات قیمت گاز طبیعی در ۳ حالت پایین، میانی و بالا در نظر گرفته شده‌است که حالت میانی در سناریوی پایه به‌کار رفته‌است. قیمت بالای گاز طبیعی موجب افزایش سود تکنولوژیهای بخار سیکل ترکیبی و بادی شده و با زیان تکنولوژی گازی به‌دلیل محدود شدن فرصت تولید همراه است. قیمت بالای گاز طبیعی موجب کاهش سهم تکنولوژیهای بر پایه این سوخت در بازار می‌گردد. قیمت پایین گاز طبیعی متوسط قیمت بازار انرژی را کم کرده و به‌دلیل عدم جبران هزینه‌های سرمایه‌گذاری موجب زیان بنگاهها می‌گردد. سهم تکنولوژیهای بر پایه گاز طبیعی در قیمت پایین بیشتر می‌شود. قیمت بالا یا پایین گاز طبیعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نسبت رزرو سیستم در مقایسه با حالت پایه نداشته‌است.

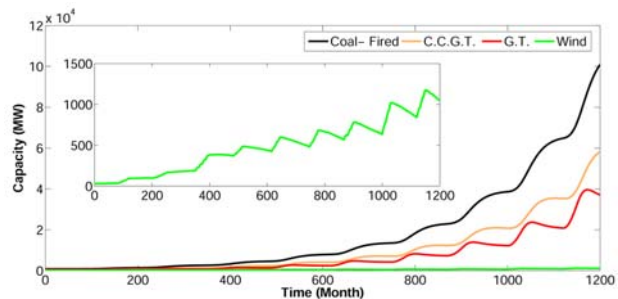
دسترسی مستقیم مصرف کننده به گاز طبیعی و سویچ بین منابع انرژی با توجه به قیمت، موجب ایجاد ظرفیت اضافی در سیستم می‌شود که این حالت موجب زیان تکنولوژی بخار می‌گردد. همچنین نوساناتی در نسبت رزرو سیستم در این حالت ایجاد می‌شود. افزایش راندمان مصرف کنندگان گاز طبیعی می‌تواند آثار این دسترسی را در بازار برق کاهش دهد.

جدول ۴- ارزش فعلی سود بنگاههای مختلف در حالت دسترسی مستقیم

مصرف کننده به گاز طبیعی

تکنولوژی	سود (\$)
بخار	$-23/1 \times 10^6$
سیکل ترکیبی	1×10^6
گازی	0.31×10^6
بادی	0.072×10^6

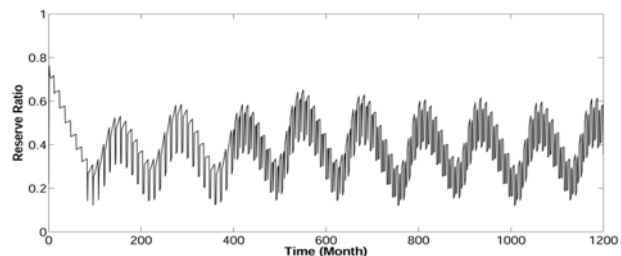
انتخاب منبع انرژی توسط ۱۰٪ مصرف‌کنندگان، بنگاهها را مجبور به توسعه ظرفیت برای تغذیه یک بار گسسته می‌کند که تأثیر آن در ظرفیت تولید در شکل ۱۲ نمایش داده شده‌است. توسعه ظرفیت هریک از تکنولوژیهای تولید با نوسان همراه بوده و مقدار آن برای هریک از تکنولوژیهای بخار، سیکل ترکیبی و گازی به $10 \times 10^4 \text{ MW}$ ، $5/8 \times 10^4 \text{ MW}$ و $3/7 \times 10^4 \text{ MW}$ رسیده‌است. ظرفیت تکنولوژی بادی در مقایسه با حالت پایه به 10.4 MW کاهش یافته‌است.



شکل ۱۲- ظرفیت تکنولوژیهای مختلف در حالت دسترسی مستقیم مصرف

کننده به گاز طبیعی

این نوع توسعه ظرفیت تأثیر منفی بر نسبت رزرو سیستم برای تأمین قابلیت اطمینان داشته و موجب نوسانی شدن این پارامتر در شکل ۱۳ می‌گردد. مقدار متوسط این پارامتر در این حالت حدود ۰/۳۵ بوده و بین ۰/۱۵ تا ۰/۶ نوسان می‌کند. انتخاب منبع انرژی توسط مصرف کننده تأثیر مخربی بر قابلیت اطمینان داشته و موجب نوسان نسبت رزرو سیستم شده‌است.



شکل ۱۳- نسبت رزرو سیستم در حالت دسترسی مستقیم مصرف کننده به گاز

طبیعی

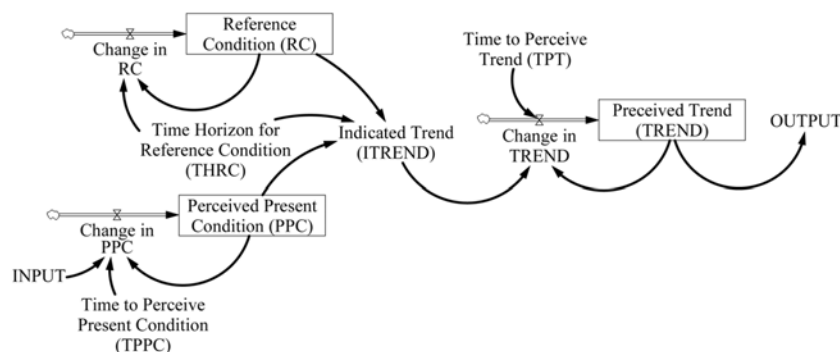
ضمیمه ۱

ضمیمه ۲

پارامترهای به کار رفته در مدل در جدول ۵ ارائه شده‌است که برگرفته از شکل ۱۴ تابع TREND را نمایش می‌دهد که بر اساس الگوریتم B.R.H. برای تحلیل به کمک دینامیک سیستمها آماده‌سازی شده‌است [۱۹]. مراجع [۱۷] و [۲۱] می‌باشد.

جدول ۵- پارامترهای به کار رفته در مدل‌سازی (ضمیمه ۱)

تکنولوژی پارامتر	بخار	سیکل ترکیبی	گازی	بادی
قیمت سوخت	۶۵ (\$/ton) ارزش حرارتی = ۶۰۸۰ (Kcal/Kg)	قیمت پایین گاز طبیعی = ۳/۸ \$/MMBtu قیمت متوسط گاز طبیعی = ۴/۶ \$/MMBtu قیمت بالای گاز طبیعی = ۶ \$/MMBtu		
نرخ حرارتی (Btu/KWh)	۹۲۰۰	۶۷۵۲	۹۲۸۹	
هزینه بهره برداری و تعمیرات (\$/MWh)	۷/۷	۳/۳	۴/۳	۳/۴
هزینه آلودگی (\$/MWh)	۲۴	۱۰/۵	۱۶	
هزینه سرمایه‌گذاری (\$/MWh)	۳/۷	۳/۳	۲/۳	۱۰/۹۷
مدت زمان ساخت (ماه)	۴۸	۳۶	۲۴	۶
طول عمر (ماه)	۷۲۰	۳۶۰	۳۶۰	۲۴۰
نرخ بازگشت (سال/%)	۵٪			
تقاضای حداکثر (MW)	۱۲۰۰			
مدت تقاضای حداکثر	۰/۲			
تقاضای میانی (MW)	۱۰۰۰			
مدت تقاضای میانی	۰/۶			
تقاضای پایه (MW)	۷۰۰			
مدت تقاضای پایه	۰/۲			
نرخ رشد تقاضا (سال/%)	۵٪			
سرعت نامی باد (m/s)	۷			
حداقل سرعت باد (m/s)	۴			
حداکثر سرعت باد (m/s)	۱۳			



شکل ۱۴- بلوک دیاگرام تابع B.R.H. (ضمیمه ۲) [۱۹]

جدول ۶- لغتنامه

واژه انگلیسی	معادل فارسی
Pay-as-Bid	پرداخت قیمت پیشنهادی
Market Stability	پایداری بازار
Hub Price	قیمت بالادستی
City Gate Price	قیمت مصرف‌کننده
Reliability	قابلیت اطمینان
Reserve Ratio	نسبت رزرو
Coal-Fired	تکنولوژی بخار
Combined Cycle Gas Turbine (C.C.G.T.)	تکنولوژی سیکل ترکیبی
Gas Turbine (G.T.)	تکنولوژی گازی
Wind	تکنولوژی بادی
Natural Gas	گاز طبیعی
Energy Information Agency (E.I.A.)	آژانس اطلاعات انرژی
Profitability Index	اندیس سوددهی
Product Cost	هزینه تولید
Investment Cost	هزینه سرمایه‌گذاری
O&M Cost	هزینه بهره‌برداری و تعمیرات
CO ₂ Cost	هزینه محیط زیست
Heat Rate	نرخ حرارتی
Construction Time	مدت زمان ساخت
Life Time	طول عمر

منابع

- [9] Andrew Forda, Klaus Vogstad and Hilary Flynn, "Simulating price patterns for tradable green certificates to promote electricity generation from wind", Energy Policy, n. 35, p.91-111, 2007.
- [10] M. Hasani-Marzooni and S.H. Hosseini, "Trading Strategies for Wind Capacity Investment in a Dynamic Model of Combined Tradable Green Certificate and Electricity Markets", IET Generation, Transmission & Distribution, v. 6, Iss. 4, p.320-330, 2012.
- [11] M. Hasani-Marzooni and S.H. Hosseini, "Dynamic Interactions of TGC and Electricity Markets to Promote Wind Capacity Investment", IEEE SYSTEMS JOURNAL, VOL. 6, NO. 1, p.46-57, MARCH 2012.
- [12] Andrew Ford, "Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California", Energy Policy, n. 29, p. 847869, 2001.
- [13] Andrew Ford, "Boom and Bust in Power Plant Construction: Lessons from the California Electricity Crisis", Journal of Industry, Competition and Trade, 2:1/2, p. 59-74, 2002.
- [14] Andrew Ford, "Cycles in competitive electricity markets: a simulation study of the western United States", Energy Policy, n. 27, p. 637658, 1999.
- [15] Deb Chattopadhyay, "Modeling Greenhouse Gas Reduction From the Australian Electricity Sector", IEEE Transactions on Power Systems, v. 25, n. 2, p.729-740, MAY 2010.
- [16] Dan Eager, Benjamin F. Hobbs and Janusz W. Bialek, "Dynamic Modeling of Thermal Generation Capacity Investment: Application to Markets with High Wind Penetration", IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, n. 4, p. 2127-2137, NOV. 2012.
- [17] Rick Tidball, Joel Bluestein, Nick Rodriguez and Stu Knoke, "Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies", ICF International Fairfax, Virginia, November, 2010.
- [18] Steven Stoft, "Power System Economics Designing Markets for Electricity", IEEE Press & WILEY-INTERSCIENCE, Copyright 2002.
- [19] John D. Sterman, "Business Dynamics: System Thinking and Modeling Complex World", MC Graw-HILL, ISBN 007238915X.
- [20] "US Natural Gas City Gate Price", www.eia.gov/dnav/ng/hist/n3050ms3m.htm, May, 2016.
- [21] Adam Sieminski, "Annual Energy Outlook 2015", U.S. Energy Information Administration, May, 2015.
- [22] Mohammad Shahidehpour, Hatim Yamin, Zuyi Li, "MARKET OPERATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS Forecasting, Scheduling, and Risk Management", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc & A John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-44337-9.
- [1] "Projected Costs of Generating Electricity", INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2010 Edition.
- [2] Anna Shaojie Cui, Meng Zhao, and T. Ravichandran, "Market Uncertainty and Dynamic New Product Launch Strategies: A System Dynamics Model", IEEE Transactions on Engineering Management, v. 58, n. 3, p.530-550, Aug. 2011.
- [3] Andrew Ford, "System Dynamics and the Electric Power Industry", System Dynamics Review, Vol. 13, No. 1, pages 57-85, Spring 1997.
- [4] Fernando Olsina, Francisco Garce, H.J. Haubrich, "Modeling Long-Term Dynamics of Electricity Markets", Energy Policy, n. 34, p.1411-1433, 2006.
- [5] M. Assili, M. Hossein Javidi D.B., Reza Ghazi, "An improved mechanism for capacity payment based on system dynamics modeling for investment planning in competitive electricity environment", Energy Policy, vol. 36, p. 3703-3713, 2008.
- [6] Masoud Hasani-Marzooni, SeyedHamidHosseini, "Dynamic Analysis of Various Investment Incentives and Regional Capacity Assignment in Iranian Electricity Market", Energy Policy, n. 56, p. 271284, 2013.
- [7] Jung-Yeon Park, Nam-Sung Ahn, Yong-Beum Yoon, Kyung-Ho Koh, Derek W. Bunn, "Investment Incentives in the Korean Electricity Market", Energy Policy, n. 35, p. 58195828, 2007.
- [8] Patricia Ochoa, "Policy Changes in the Swiss Electricity Market: Analysis of Likely Market Responses", Socio-Economic Planning Sciences, n. 41, p. 336349, 2007.