

مدل سازی اولویت بندی سیاست های توسعه صنعت تولید برق

ایران با استفاده از LEAP^۱

مهدی بریمانی^۲

کارشناس مدیریت دانش شرکت برق منطقه ای مازندران، دکتری اقتصاد انرژی،
m.barimani12@gmail.com

آشوت سالنزیان

استاد دانشکده اقتصاد دانشگاه دولتی ایروان، ارمنستان، sabmas1@rambler.ru

عبدالرزاق کعبی نژادیان

استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،
kaabi@Iranenergy.org.ir

حسین صادقی

استاد گروه اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس، sadeghih@modares.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۰۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۹

چکیده

هدف این مقاله بررسی اثرات سیاست های توسعه هر یک از منابع انرژی تولید برق (فسیلی، هسته ای و تجدیدپذیر) بر توسعه نیروگاهی کشور و اولویت بندی این سیاست ها، با استفاده از قابلیت هزینه- فایده ابزار مدل سازی LEAP می باشد. الگوی پیشنهادی این تحقیق، تحت سناریوهای چندگانه سیاست های توسعه منابع انرژی تولید برق میزان تولید برق و سهم هر یک از این منابع در تولید برق ایران را در بازه زمانی ۲۵ ساله (۱۳۹۵-۱۴۲۰) تعیین می کند. نتایج مطالعه نشان می دهد سیاست توسعه بهینه نیروگاه ها به عنوان سیاست ارجح و سیاست توسعه نیروگاه های تجدیدپذیر (با هدف گذاری ۲۰ درصد از سهم تولید) با فاصله اندکی در رتبه دوم سیاست های توسعه صنعت برق ایران قرار می دارد.

طبقه بندی JEL: E23, D284, O21, Q28

کلید واژه ها: برنامه ریزی بلندمدت، تولید برق، سیاست های انرژی، سناریونگاری، مدل ساز

LEAP

۱. این مقاله برگرفته از پایان نامه دکتری اقتصاد انرژی مهدی بریمانی به راهنمایی Professor.Ashot Salnasaryan، دکتر عبدالرزاق کعبی نژادیان و دکتر حسین صادقی در دانشکده اقتصاد آکادمی ملی علوم

ارمنستان می باشد.

۲. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

جهان در آینده‌ای نه چندان دور با دو بحران بزرگ آلودگی زیست‌محیطی در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی و شتاب فزاینده در جهت اتمام این منابع مواجه خواهد شد، با توجه به این موضوع اگر دولت‌ها به‌دنبال توسعه مطلوب و پایدار، بدون لطمه زدن به توانایی نسل‌های آینده باشند. لازم است از دو سیاست مشخص یعنی اعمال مدیریت مصرف انرژی و ایجاد و تنوع در سیستم عرضه انرژی پیروی کنند. اعمال مدیریت مصرف انرژی با ارتقاء بازده و کارایی انرژی، ضمن صیانت و بهره‌برداری مطلوب و اقتصادی از آن، به کاهش آلودگی ناشی از انرژی منتهی خواهد شد. همچنین ایجاد تنوع در سیستم عرضه انرژی و به‌کارگیری منابع انرژی جایگزین (هسته‌ای، تجدیدپذیر) نیز ضمن کاهش وابستگی به یک حامل انرژی، دو مزیت صرفه‌جویی انرژی و کاهش آلودگی ناشی از انرژی را نیز به همراه دارد.

سیاست‌های انرژی به آن دسته از طرح‌های راهبردی اطلاق می‌شود که یک دولت در بخش‌های صنعتی و غیرصنعتی مصرف انرژی، به‌منظور رسیدن به توسعه پایدار اتخاذ می‌کند. در یک سیاست انرژی، اصولاً دولت مباحث مربوط به انرژی (شامل تولید، توزیع و مصرف) را مطرح و ارائه طریق می‌نماید. سیاست انرژی می‌تواند شامل قانون‌گذاری، مشوق‌های سرمایه‌گذاری، دستورالعمل برای صرفه‌جویی انرژی، مالیات، معاهدات بین‌المللی و سیاست‌های کلی باشد. صنعت تولید برق نیز متأثر از سیاست‌های انرژی در توسعه هر یک از منابع تولید برق می‌باشد.

زمان‌بر بودن پروژه‌های برق و وابسته بودن آن‌ها به اقتصاد، برنامه‌ریزی برای آینده شبکه برق را به‌منظور برآورده نمودن به موقع و اقتصادی تقاضای برق ضروری نموده است. برنامه‌ریزان معمولاً با مشاهده روندهای گذشته تقاضا و ارتباط آن‌ها با روندهای اقتصادی، به پیش‌بینی تقاضا می‌پردازند. با توجه به قطعی نبودن عملکرد اقتصادی عدم قطعیت وارد برنامه‌ریزی می‌شود. سناریونگاری در انرژی، می‌تواند راهی مفید برای طراحی برنامه‌های زیرساختی بلندمدت، به‌منظور تأمین تقاضای نامشخص انرژی در آینده باشد، چرا که به کمک این روش، ایجاد مجموعه‌ای از حالات ممکن که وابسته به مسیرهای سیاسی و فنی گوناگونی می‌باشند، میسر و از این طریق عدم قطعیت‌های

موجود در مسائل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی^۱ به‌طور مؤثری لحاظ گردند. هدف این مطالعه تحلیل اثرات سیاست‌های توسعه هر یک از منابع انرژی تولید برق (فسیلی، هسته‌ای و تجدیدپذیر) بر توسعه نیروگاهی کشور و اولویت‌بندی این سیاست‌ها در بازه زمانی ۲۵ ساله (۱۳۹۵-۱۴۲۰) می‌باشد.

عموماً تصمیم‌گیران بخش انرژی به‌منظور دستیابی به رهیافتی که بتوان بوسیله آن، بازخوردهای متفاوت سیاست‌های مورد نظر را تحلیل نمود، به توسعه مدل‌های مختلف ریاضی روی آورده‌اند. بسترهای مجازی ایجاد شده به مثابه مدلی کامپیوتری از سیستم انرژی بوده و ابزاری جهت تحلیل یکپارچه انرژی، اقتصاد و محیط زیست را فراهم می‌آورند. یکی از ابزارهایی که در این زمینه از آن استفاده می‌شود، سیستم برنامه‌ریزی بلندمدت جایگزینی‌های انرژی، LEAP^۲ است. در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی اولویت‌بندی سیاست‌های انرژی در توسعه نیروگاه‌های کشور جهت تأمین تقاضای برق در بلندمدت، همچنین تعیین و تحلیل میزان تولید برق و سهم هر یک از این منابع در تولید برق ایران، سناریوهای چندگانه سیاست‌های توسعه منابع انرژی تولید برق با استفاده از نرم‌افزار LEAP طراحی و تحلیل شده است.

در پژوهش‌ها و تحلیل‌های بررسی چشم‌انداز سیستم برق و کنش و واکنش حاصل از تقاضا و عرضه برق، برای پوشش مسئله عدم قطعیت‌ها، سناریوهای مختلفی باید تعریف شود. نقطه آغازین و لازمه هرگونه مطالعات برنامه‌ریزی انرژی، تعریف سناریوی مرجع^۳ است. که بیانگر تداوم تاریخچه و وضع موجود در آینده می‌باشد. این سناریو اهمیت بالایی داشته و کلیه قیاس‌ها و بهبودها و آثار برنامه‌ها و سیاستگذاری‌ها نسبت به آن سنجیده می‌شوند. از آنجایی که منابع انرژی قابل استفاده برای تولید برق در ایران به سه دسته کلی منابع فسیلی، هسته‌ای و تجدیدپذیر تقسیم می‌شوند، در این مقاله برای آینده صنعت برق علاوه بر سناریوی مرجع، سناریوی بهینه مرجع^۴ و سناریوهایی مبتنی بر توسعه انرژی هسته‌ای^۵ و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ (جمعاً در قالب ۴ سناریو) طراحی و تحلیل شده است.

-
1. Economical - Environment – Energy: 3E
 2. Long-range Energy Alternative Planning
 3. Reference Scenario
 4. Optimization
 5. Nuclear Development

چشم‌انداز توسعه بهینه نیروگاه‌ها در سطح ملی، مطابق با سیاست‌های انرژی کشور در قالب ۴ سناریو به شرح زیر ارائه شده که در این مقاله به تحلیل، مقایسه و ارزیابی آن‌ها خواهیم پرداخت.

سناریوی ۱. سناریوی مرجع: اگر سیاست تولید برق کشور، تداوم روند فعلی باشد، چه برنامه‌ای برای ساخت نیروگاه‌های جدید در آینده باید داشت؟
سناریوی ۲. سناریوی مرجع بهینه: اگر سیاست تولید برق کشور، بهینه‌سازی روند فعلی باشد، چه برنامه‌ای برای ساخت نیروگاه‌های جدید در آینده باید داشت؟
سناریوی ۳. اگر سیاست تولید برق کشور، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر مدنظر باشد، چه برنامه‌ای برای ساخت نیروگاه‌های جدید در آینده باید داشت؟
سناریوی ۴. اگر سیاست تولید برق کشور، توسعه انرژی هسته‌ای باشد، چه برنامه‌ای برای ساخت نیروگاه‌های جدید در آینده باید داشت؟

سناریوها در بازه زمانی ۲۵ ساله (۱۳۹۵-۱۴۲۰) و بر اساس فرضیات منطقی مختلفی با توسعه تقاضای نهایی و عرضه برق در کل کشور، قیمت برق، نرخ‌های بهره و تورم، توسعه و رسوخ فناوری، برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف برق، ترویج الگوها و فناوری‌های نوین برق و تجدیدپذیرها، کنترل آلاینده‌گی و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیروگاه‌ها در ارتباط خواهد بود.

در ادامه ضمن ارائه پیشینه تحقیق و بررسی وضعیت موجود عرضه انرژی الکتریکی و روش‌شناسی تحقیق، به تحلیل، ارزیابی، مقایسه و اولویت‌بندی سیاست‌های توسعه نیروگاهی ایران پرداخته شده است. مکانیزم (ارزیابی، مقایسه و اولویت‌بندی سناریوها) ارائه شده در این تحقیق، از نقاط قوت این تحقیق است که در آن از تحلیل‌های هزینه فایده^۲ نرم‌افزار LEAP استفاده شده است. در نهایت جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهاد حاصل از اجرای تحقیق ارائه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

برنامه ریزی مبتنی بر سناریو، در حوزه انرژی در نقاط مختلف دنیا مورد توجه می‌باشد. در ایران، شفیع‌ی و همکاران (۱۳۹۳)، در "گزارش برنامه بلندمدت توسعه بخش انرژی کشور" که در دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو ارائه شد، با

1. Renewable Development

2. Cost- Benefit

استفاده از دو ابزار مدل ساز و برنامه ریزی بلندمدت انرژی MESSAGE و MAED در افق زمانی ۲۷ ساله از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۲۰ به عنوان افق برنامه ریزی سیستم انرژی، برنامه توسعه بخش انرژی برای تأمین تقاضای انرژی مورد نیاز بخش های مختلف را در ۳ سناریوی مرجع، سناریوی رشد تدریجی قیمت های صادراتی و وارداتی انرژی و سناریوی صرفه جویی انرژی ارائه دادند.

اشراقی و همکاران (۱۳۹۲)، در مطالعه ای با عنوان "شبه سازی تقاضا و عرضه حامل های انرژی تا سال ۲۰۳۵ در ایران با استفاده از مدل ساز LEAP"، ساختار بخش های مختلف تقاضا را مشخص و با توجه به سیستم مرجع انرژی، پیکربندی تکنولوژی های سمت عرضه را شبه سازی نمودند. در این مطالعه چشم انداز عرضه و تقاضای حامل های انرژی در افق ۲۰۳۵ با تأکید بر ادامه سیاست های پیشین (سناریوی مرجع) و سناریوی بهره گیری از نیروگاه های حرارتی خورشیدی ارائه گردیده است.

کجویی و عمیدپور (۱۳۹۵) در مطالعه ای با عنوان "تحلیل سناریو درباره پتانسیل کاهش گازهای گلخانه ای در بخش تولید برق ایران با استفاده از نرم افزار LEAP"، انتشار گازهای گلخانه ای و پتانسیل کاهش آن ها را در بخش تولید برق ایران در چهار سناریو مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مدل سازی در مطالعه دیگری که توسط مرادی و همکاران (۱۳۹۲) با عنوان توسعه مدل تقاضای انرژی در سطح ملی با استفاده از نرم افزار LEAP انجام شد، حاکی از رشد فزاینده تقاضای انرژی در بخش های مختلف در رشد اقتصادی مورد نظر می باشد. این نتیجه بیانگر آن است که جهت نیل به چشم انداز کشور، شدت انرژی و همچنین مصرف انرژی به طرز شگفت انگیزی افزایش می یابد و این موضوع نیازمند حرکت به سمت بهره گیری بهینه از منابع می باشد.

رازینی و همکاران (۱۳۸۹)، در مطالعه ای به بررسی "سناریو نگاری با هدف آینده پژوهی در صنعت تولید برق ایران" پرداخته اند. در این مطالعه که با هدف بررسی اثرات سیاست های انرژی کشور در حوزه تولید برق بر روی سهم انواع نیروگاه ها در آینده انجام شد، با توجه به منابع تولید برق در ایران (انرژی هسته ای، تجدیدپذیر و فسیلی)، سه سناریو برای ۲۰ سال آینده صنعت برق ایران طراحی و با استفاده از مدل ساز LEAP به تحلیل سناریوها و برآورد سهم هر یک از منابع تولید برق در تأمین تقاضای برق در

چشم انداز ۲۰ ساله پرداخته شد. در این مطالعه صرفاً به تدوین و تحلیل سناریوهای محتمل برای تأمین تقاضای انرژی الکتریکی در آینده پرداخته شد و مسئله مقایسه و اولویت‌بندی سناریوها را به مطالعه‌ای دیگر پیشنهاد داد.

۳- بررسی وضعیت موجود عرضه انرژی الکتریکی

براساس ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۳ ایران، مصرف نهایی انرژی با رشد ۷/۵ درصدی نسبت به سال گذشته، به میزان ۱۳۲۰/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام می‌باشد. سرانه مصرف نهایی گاز طبیعی ۵/۶ و نفت خام و فرآورده‌های نفتی ایران ۱/۶ برابر متوسط مصرف سرانه جهانی است. همچنین بهره‌وری مصرف انرژی به میزان ۲/۱ درصد نسبت به سال گذشته کاهش داشته است. با توجه به اینکه عمر ذخایر هیدروکربوری مایع کشور در سال ۱۳۹۳، حدود ۱۲۵ سال برآورد شده، ادامه روند رشد مصرف انرژی به‌منزله زنگ خطری برای کشور می‌باشد (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳).

در سال ۱۳۹۳ ظرفیت اسمی و عملی نیروگاه‌های برق کشور به ترتیب به میزان ۴/۲ درصد و ۳/۴ درصد رشد داشت. در این سال سهم تولید برق در نیروگاه‌های بخار ۳۱/۲ درصد، سیکل ترکیبی ۳۵/۳ درصد، گازی ۲۶/۷ درصد، دیزلی ۰/۰۳ درصد، آبی ۵ درصد، تجدیدپذیرها و اتمی ۱/۸ درصد از کل تولید برق ایران بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳). در این شرایط که بیش از ۹۳ درصد از تولید برق کشور توسط نیروگاه‌های حرارتی تأمین می‌شود، برآورد شده که نزدیک به ۲۵ درصد از مصرف منابع فسیلی و حدود ۲۸ درصد از آلودگی‌های ناشی از احتراق انرژی مربوط به این نیروگاه‌هاست. میزان صرفه‌جویی ناشی از عدم انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای بخش‌های مصرف‌کننده انرژی برابر ۱۱۶۶۶۷ میلیارد ریال است (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳). این در حالی است که وابستگی اقتصاد ایران به درآمدهای حاصل از فروش نفت و گاز کشور، توجه به برنامه‌ریزی بلندمدت انرژی و رویکردهای متنوع مدیریتی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند؛ بنابراین ضروری است که تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران حوزه انرژی کشور، تدبیری جهت مدیریت مصرف منابع فسیلی و توسعه منابع جایگزین در پی بگیرند.

۴- روش‌شناسی

نرم‌افزار LEAP یکی از ابزارهای پرکاربرد برای تحلیل سیاست‌های انرژی و مدل‌سازی عرضه و تقاضای انرژی می‌باشد که توسط مؤسسه محیط‌زیست استکهلم^۱ طراحی شده است. نرم‌افزار LEAP ابزاری مناسب جهت ارزیابی یکپارچه سیاست‌های انرژی، تدوین و سیاست‌گذاری بخش انرژی و ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. این نرم‌افزار بر اساس رویکرد سناریویی، به ارزیابی اثرات توسعه بخش انرژی بر انتشارات گازهای گلخانه‌ای می‌پردازد و اطلاعات جامعی را در خصوص تحلیل هزینه‌های کاهش انتشار در اختیار کاربران قرار می‌دهد. علاوه بر محاسبات زیست‌محیطی، تحلیل‌های هزینه-فایده^۲ توسط این مدل‌ساز ارائه می‌گردد. نرم‌افزار LEAP در نوع داده‌های موردنیاز بسیار انعطاف‌پذیر است، به طوری که می‌توان با حداقل داده‌ها مدل را اجرا کرد و زمانی که داده‌های بسیاری در دسترس است می‌توان مدلی با جزئیات کامل برای سیستم انرژی طراحی کرد.

ابزار LEAP این امکان را فراهم می‌نماید تا گستره وسیعی از طرح‌ها، برنامه‌ها، فناوری‌ها و ابتکارات را ارزیابی کرده و به راهبردی رسید که به بهترین نحو، راه حل گسترش سیستم انرژی باشد. در داخل کشور، LEAP ابزار نسبتاً شناخته شده‌ای در زمینه برنامه‌ریزی انرژی است. از جمله مهم‌ترین مطالعاتی که با استفاده از LEAP انجام گرفته‌اند، می‌توان به گزارش اول تغییر اقلیم کشور به دبیرخانه کنوانسیون تغییر اقلیم (کارفرما: دفتر تغییرات آب و هوا، سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۱)، برآورد تقاضای نهایی حامل‌های انرژی تا سال ۱۴۲۰ (کارفرما: مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۹۰) و برنامه‌ریزی تولید و مصرف فرآورده‌های نفتی (کارفرما: شرکت ملی پالایش و پخش، ۱۳۸۸) اشاره نمود. مدل‌سازی LEAP به‌طور گسترده در بیش از ۱۷۰ کشور استفاده می‌شود. نتایج استفاده از این مدل‌ساز در تعداد زیادی از مطالعات و مقالات، در مجلات معتبر بین‌المللی انرژی دنیا نیز منتشر شده است. هر کدام از این تحلیل‌ها از ابزار LEAP به‌عنوان ابزار مدیریت سناریو و برای محاسبات اصلی از روش‌های متفاوت استفاده می‌کنند.

1. The Stockholm Environment Institute
2. Cost- Benefit

برآورد تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف

LEAP در کلی‌ترین حالت، تقاضای نهایی انرژی در هر بخش را بر اساس رابطه (۱)

به دست می‌آورد:

$$E = AL \times EI_{b,s,t} \quad (1)$$

که در این رابطه AL معرف سطح فعالیت رسته‌ای است که تقاضای آن مورد نظر است و EI شدت انرژی^۱ زیر بخش است. رابطه فوق امکان تغییر دو پارامتر مذکور در دوره برنامه‌ریزی را میسر می‌سازد که هر دو به صورت برون‌زا به مدل وارد می‌شوند. در ارتباط با برآورد آینده AL عموماً سیاست‌های توسعه‌ای هر زیر بخش (به‌عنوان مثال یک زیر بخش صنعتی خاص و با ارزش افزوده یک مد خاص از حمل و نقل نظیر حمل و نقل هوایی) مدنظر می‌باشند. درحالی‌که برآورد تغییرات EI به‌سادگی میسر نیست و بایستی از خروجی‌های مدل‌های توسعه و انتقال فناوری استفاده شود. برای برآورد تقاضا در LEAP روش‌های دیگری هم وجود دارد.

شبیه‌سازی و مدل‌سازی بخش‌های سمت عرضه

بخش عرضه از شاخه‌های ویژه موسوم به ماژول‌ها^۲ جهت مدل کردن عرضه انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. هر ماژول محتوی یک یا چند فرآیند می‌باشد که یک فرآیند منفرد نظیر نوع ویژه‌ای از نیروگاه برق نظیر نیروگاه بخار، نیروگاه گازی، نیروگاه بادی، خورشیدی و ... و انرژی تولید شده توسط آن ماژول را نمایش می‌دهند. پیکربندی سیستم عرضه نیز بر اساس نیازی که بر روی هر ماژول است، تعیین می‌گردد. این نیاز از بخش‌های مختلف سمت تقاضا و نیز ماژول‌های پایین دستی هر ماژول خاص نشأت می‌گیرد و با مقادیر صادرات و واردات نیز به تعادل می‌رسد. این محاسبات با تکرارهای متوالی^۳ صورت می‌گیرد و تا جایی که اختلاف هر دو تکرار متوالی کمتر از یک عدد کوچک که توسط کاربر وارد می‌شود، ادامه دارد (اشراقی و همکاران، ۱۳۹۲).

1. Energy Intensity
2. Modules
3. Iteration

قابلیت دیگر LEAP در زمینه تخمین میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و نیز گازهای گلخانه‌ای از بخش انرژی است. این امکان با گردآوری ضرایب انتشار^۱ مربوط به سوخت‌های مختلف مورد استفاده، از روش‌شناسی Tier1 هیئت بین‌الدولی تغییرات آب و هوا^۲ (IPCC) انجام می‌شود^۳ (Heap, 2011).

در این مقاله، از ابزار LEAP به منظور مدل‌سازی در سناریوی مرجع و دیگر سناریوهای محتمل، تحلیل، مقایسه و ارزیابی و نهایتاً انتخاب سناریوی برتر استفاده شده است. برای استفاده از این نرم‌افزار به مجموعه‌ای از داده‌ها در مورد وضعیت کنونی صنعت برق و فرضیاتی برای روندهای پیش روی این صنعت در آینده نیاز داریم. مرجع داده‌های این تحقیق، ترازنامه انرژی وزارت نیرو سال ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳، سری زمانی ترازنامه انرژی ۱۳۹۳-۱۳۴۶، آمار تفصیلی صنعت برق ایران ۱۳۹۴ شرکت توانیر و دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو و گزارش ۴۷ سال صنعت برق ایران در آیینیه آمار (۱۳۹۲-۱۳۴۶) می‌باشد.

به‌منظور مدل‌سازی نیروگاه‌های تولید برق، علاوه بر تحلیل سیستم برق و اطلاعات شرایط اقتصادی کشور (قیمت سوخت، اجرای قانون هدفمندکردن یارانه‌ها، نرخ بهره وام، نرخ تورم، نرخ ارز، نرخ استهلاک و ...)، باید به داده‌های هزینه‌ای و عملکردی آن‌ها نیز دسترسی داشت. از جمله این داده‌ها می‌توان به راندمان فناوری‌های موجود، فناوری‌های نوین و پیشرفته، قابلیت دسترسی، ضریب ظرفیت، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه عملیات و نگهداشت ثابت و متغیر، هزینه سوخت، میزان مصارف داخلی و... اشاره نمود. این داده‌ها هنگام مدل‌سازی اهمیت کلیدی دارند و برخی از این داده‌ها از منابع داخلی و مابقی نیز از مراجع سایر کشورها استخراج شده است.

1. Emission Factors

2. Intergovernmental Panel on Climate Change

۳. دستورالعمل‌های IPCC، مشتمل بر دو ویرایش ۱۹۹۶ و ۲۰۰۶ می‌باشد و محاسبات و روش‌شناسی‌های مربوط به موجودی انتشار گازهای گلخانه‌ای را بر حسب پیچیدگی و دسترسی به اطلاعات در سه سطح (Tier) انجام می‌دهد.

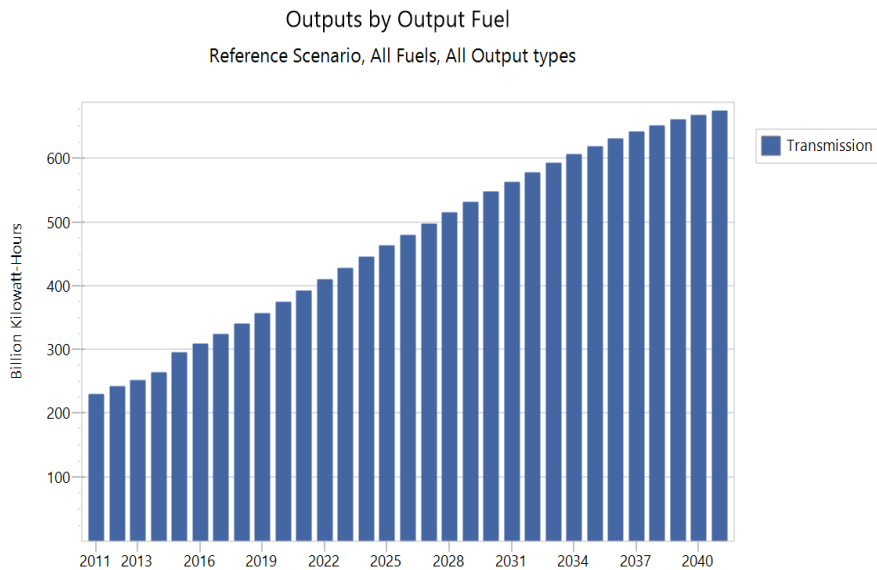
مبانی اصلی و ملاحظات در مدل‌سازی انرژی

- مبانی اصلی مدل‌سازی شامل تنظیمات بومی‌سازی و ویژه‌سازی مدل‌سازی می‌باشد که عمده‌ترین آن‌ها عبارتند از:
- الگو به صورت یکپارچه با پوشش دو سمت عرضه و تقاضای سیستم برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای در قالب واحدی طراحی شده است.
 - سال‌های پایه مدل ۴ سال بوده و از سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱) شروع و تا ۱۳۹۳ (۲۰۱۴) ادامه یافته است و سال ۱۳۹۴ (۲۰۱۵)، سال ابتدای شبیه‌سازی می‌باشد.
 - افق مدل‌سازی ۱۴۲۰ (۲۰۴۱) در نظر گرفته شده است.
 - در مدل‌سازی علاوه بر پوشش کلیه پارامترها و ابعاد زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، قابلیت پوشش هزینه‌ها و شاخص‌ها و کلیه ابعاد انرژی - محیط‌زیست سیستم برق وجود دارد.
 - رشد تقاضای برق در سه دامنه پایین، میانی و بالا به ترتیب: ۱، ۳ و ۵ درصد پیش‌بینی می‌شود.
 - نرخ تنزیل در مدل‌سازی‌ها ۵ درصد در نظر گرفته شده است. این نرخ منطبق بر شاخص‌های بین‌المللی می‌باشد.
 - در همه سناریوها فرض شده قیمت سوخت‌های فسیلی سالانه ۳ درصد رشد داشته باشند (منطبق بر سناریوی مرجع اداره انرژی ایالات متحده برای نفت خام)
 - مطابق هدف‌گذاری وزارت نیرو، راندمان انواع نیروگاه‌های حرارتی افزایش سالانه ۱ درصد دارد (در حالت بهینه)
 - کاهش تلفات سالانه خطوط انتقال به میزان ۱/۵ درصد با بهینه‌سازی و نوسازی شبکه جهت تأمین بخشی از کمبود نیروی برق (در حالت بهینه).
 - صادرات برق به تدریج افزایش یافته و در ۲۰ سال آینده معادل ۵ درصد تقاضای داخل، برق به کشورهای دیگر صادر گردد (در حالت بهینه)
 - واردات برق در ۲۰ سال آینده به ۱/۵ درصد تقاضای داخل برسد (در حالت بهینه)

- مشخصات فنی و اقتصادی نیروگاه‌ها شامل سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های ثابت و متغیر تعمیر و نگهداری، بازده، ضریب ظرفیت، طول عمر و مدت زمان ساخت، مصرف سالیانه و ... (آمار تفصیلی صنعت برق ایران ۱۳۹۳)

۵- تحلیل، ارزیابی و مقایسه سناریوهای توسعه نیروگاهی ایران

ماژول تولید برق، مهم‌ترین جزء سیستم عرضه برق است، در این مطالعه مدل سازی بخش انتقال و توزیع ساده و بر اساس داده‌های برون‌زا می‌باشد.^۱ مدل سازی بخش انتقال و توزیع در سناریو مرجع - حالت رشد میانی تقاضای برق در نمودار ۱ و تراز انرژی انتقال و توزیع برق در سناریوی مرجع - حالت رشد تقاضای میانی (۳٪) در نمودار ۲ ارائه شده است.



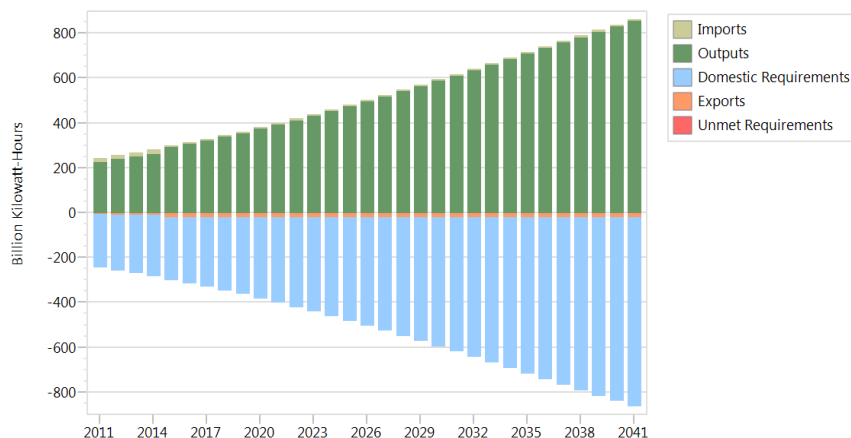
نمودار ۱. روند افزایش ظرفیت انتقال و توزیع برق در سناریوی مرجع - رشد تقاضای میانی

منبع: یافته‌های تحقیق بر اساس داده‌های برون‌زا

۱. نویسنده در تحقیق دیگری به آن پرداخته است.

Module Energy Balance

Reference Scenario, All Fuels



نمودار ۲. تراز انرژی انتقال و توزیع برق در سناریوی مرجع - رشد تقاضای میانی

منبع: یافته‌های تحقیق بر اساس داده‌های برون‌زا

همزمان با رشد تقاضای برق، باید سیستم انتقال و توزیع برق نیز توسعه داده شود. کل ظرفیت انتقال برق در سال ۲۰۱۱ بالغ بر ۲۲۸۶۰۰ میلیون کیلووات ساعت بوده که انتظار می‌رود این میزان در سناریوی مرجع نیز افزایش یافته و به بیش از ۷۳۲۸۳۸ میلیون کیلووات ساعت در افق چشم‌انداز مدل (۲۰۴۱) برسد.

ماژول تولید برق از فناوری‌های مختلفی تشکیل شده که وظیفه تولید و عرضه برق را در ایران بر عهده دارند. عمده فناوری‌های تولید برق مدنظر در این مدل عبارتند از: ۱. نیروگاه سیکل ترکیبی متعارف موجود، ۲. نیروگاه سیکل ترکیبی پیشرفته ۳. نیروگاه گازی متعارف موجود، ۴. نیروگاه گازی پیشرفته، ۵. نیروگاه بخاری متعارف موجود، ۶. نیروگاه بخاری پیشرفته، ۷. نیروگاه دیزلی موجود، ۸. نیروگاه هسته‌ای ۹. نیروگاه برق آبی، ۱۰. نیروگاه خورشیدی فتولتائیک، ۱۱. نیروگاه خورشیدی حرارتی ۱۲. نیروگاه توربین بادی، ۱۳. نیروگاه زباله شهری (فاضلاب شهری)، ۱۴. نیروگاه بیوگازی (بیوماس).

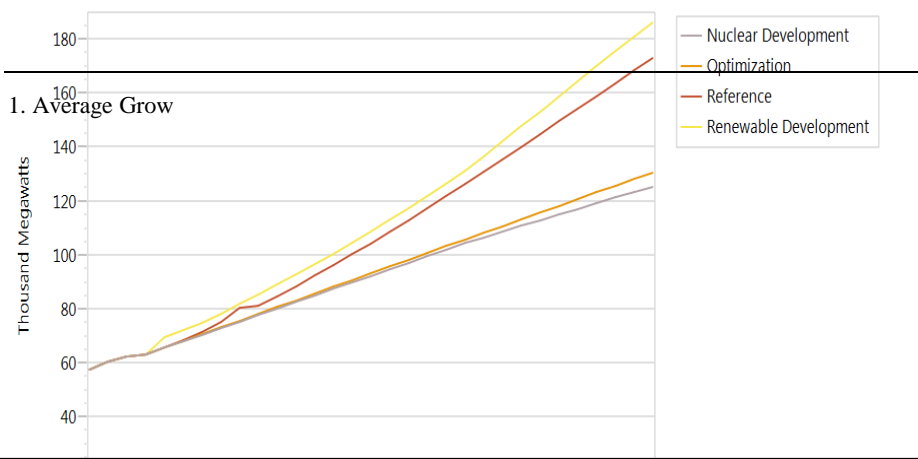
هر یک از چهار سناریوی محتمل، بیانگر بعدی از توسعه و چشم‌انداز سیستم نیروگاه‌های برق کشور می‌باشد؛ که در این قسمت شاخص‌های مختلف این سناریوها با

یکدیگر مقایسه خواهند شد. شایان ذکر است که در تمام سناریوها، رشد سالانه تقاضای برق در حالت رشد میانی (همگرا شدن به ۳ درصد در سال ۲۰۴۱) مدنظر می‌باشد. در همه سناریوها فرض شده قیمت سوخت‌های فسیلی سالانه ۳ درصد رشد (منطبق بر سناریوی مرجع اداره انرژی ایالات متحده برای نفت خام) داشته باشند. در این بخش به منظور تحلیل، ارزیابی و مقایسه سناریوهای توسعه نیروگاه‌ها، مکانیسم به‌کار رفته بر مبنای شاخص‌های ذیل توصیف و اجرا خواهد شد:

۱. ظرفیت تولید عملی نیروگاه‌ها، ۲. مقدار تولید برق در سناریوهای مختلف، ۳. مقدار مصرف سوخت‌های فسیلی در سناریوها، ۴. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، ۵. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، ۶. هزینه‌های اجتماعی و ۷. هزینه تمام شده تولید برق.

نخستین شاخص مقایسه بین سناریوها، شاخص ظرفیت نیروگاهی کشور است. همان‌طور که در جدول (۱) و نمودار (۳) نمایش داده شده، انتظار می‌رود در چشم‌انداز ۲۰۴۱، ظرفیت کل نیروگاه‌های کشور در سناریوی مرجع ۱۷۲/۹ هزار مگاوات، سناریوی مرجع بهینه ۱۳۰/۴ هزار مگاوات، سناریوی توسعه تجدیدپذیرها ۱۸۶/۲ هزار مگاوات و در نهایت توسعه انرژی هسته‌ای نیز به ۱۲۵/۳ هزار مگاوات برسد. میانگین رشد^۱ سالانه ظرفیت‌سازی تولید برق نسبت به سال ۲۰۱۵ به ترتیب سناریوی مرجع ۳/۸۱ درصد، مرجع بهینه ۲/۷۸ درصد، تجدیدپذیر ۳/۸۷ درصد و در نهایت توسعه هسته‌ای ۲/۵۳ درصد در سال خواهد بود. علت بالا بودن ظرفیت نیروگاه‌ها در سناریوی مرجع، تداوم روند فعلی، افزایش صادرات برق، عدم چینش بهینه و عدم بهره‌برداری (دیسپاچینگ) بهینه می‌باشد. همچنین دلیل بالا بودن ظرفیت نیروگاهی در سناریوی توسعه تجدیدپذیر قابلیت دسترسی و ضریب ظرفیت پایین این نوع از نیروگاه‌هاست که برای تولید برق مشخصی باید ظرفیت بیشتری توسعه داده شود.

بنابراین در مقایسه میان سناریوها مشخص می‌شود که سناریوی مرجع بهینه و هسته‌ای دارای حداقل ظرفیت‌سازی بوده و سناریوی تجدیدپذیرها نیز دارای بالاترین ظرفیت نیروگاهی خواهد بود. لازم به ذکر است که نیروگاه‌های انرژی هسته‌ای به‌طور معمول ضریب ظرفیت بالاتری دارند و از طرف دیگر به دلیل محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای بخشی از نیاز کشور به برق در سناریوی توسعه انرژی هسته‌ای وارد می‌شود.



نمودار ۳. مقایسه پیش‌بینی ظرفیت‌سازی تولید برق در سناریوهای مختلف

منبع: یافته‌های تحقیق

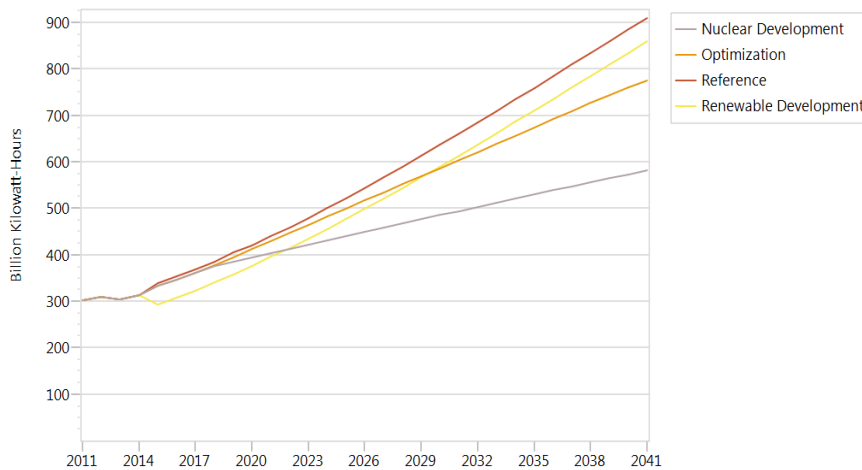
جدول ۱. مقایسه پیش‌بینی ظرفیت‌سازی تولید برق در سناریوهای مختلف (هزار مگاوات)

سناریو / سال	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۲۱	۲۰۲۶	۲۰۳۱	۲۰۳۶	۲۰۴۱	a.g (%)
مرجع	۵۷/۳	۶۸/۲	۷۱/۳	۸۴/۵	۱۰۴/۲	۱۲۶/۱	۱۴۹/۵	۱۷۲/۹	۳/۸۱
بهینه مرجع	۵۷/۳	۶۸/۰	۷۰/۵	۸۰/۵	۹۳/۱۰	۱۰۵/۶	۱۱۸/۱	۱۳۰/۴	۲/۷۸
توسعه منابع تجدیدپذیر	۵۷/۳	۷۲/۱	۷۴/۸	۸۸/۸	۱۰۸/۵	۱۳۱/۲	۱۵۸/۷	۱۸۶/۲	۳/۸۷
توسعه انرژی هسته‌ای	۵۷/۳	۶۷/۹	۷۰/۳	۸۰/۰	۹۲/۱۰	۱۰۴/۲	۱۱۴/۹	۱۲۵/۳	۲/۵۳

منبع: یافته‌های تحقیق

شاخصی دومی که در ادامه بررسی خواهد شد، میزان تولید سالانه برق در هر یک از سناریوها می‌باشد. تولید برق با اولویت مصرف داخلی در نظر گرفته شده و در صورتی که کمبود منطقی نیز در داخل کشور وجود داشته باشد، مدل از طریق سیستم انتقال شروع به واردات برق به کشور می‌نماید. روند تولید برق در هر یک از ۴ سناریوی فوق در جدول (۲) و نمودار (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که از داده‌های جدول پیداست بیشترین رشد تولید برق مربوط به سناریوی مرجع بوده که متوسط رشد

سالانه آن نسبت به سال ۲۰۱۶ برابر ۳/۸۷ درصد می باشد که طی آن تولید برق به ۹۰۹/۷ میلیارد کیلووات ساعت در سال ۲۰۴۱ خواهد رسید، کمترین میزان تولید نیز به سناریوی توسعه انرژی هسته برمی گردد که طی آن تولید برق کشور به ۵۸۱/۴ میلیارد کیلووات ساعت خواهد رسید، در این سناریو مدل پیش بینی نموده که بخشی از نیاز کشور، از طریق واردات تأمین گردد.



نمودار ۴. پیش بینی روند تولید برق از نیروگاه‌ها به تفکیک سناریوها

منبع: یافته‌های تحقیق

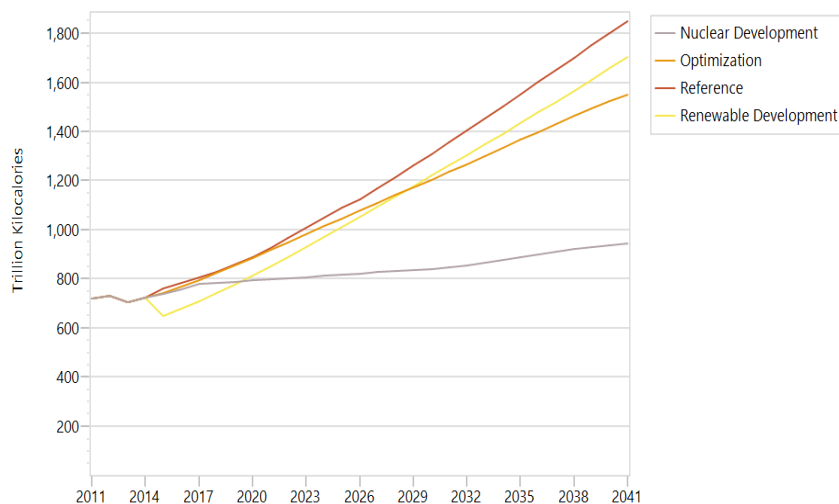
جدول ۲. پیش بینی روند تولید برق از نیروگاه‌ها به تفکیک سناریوها (میلیارد کیلووات ساعت)

سناریو / سال	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۲۱	۲۰۲۶	۲۰۳۱	۲۰۳۶	۲۰۴۱	a.g (%)
مرجع	۳۰۲/۰	۳۵۳/۴	۳۶۸/۰	۴۳۹/۱	۵۴۳/۹	۶۶۰/۳	۷۸۴/۴	۹۰۹/۷	۳/۸۷
بهینه مرجع	۳۰۲/۰	۳۴۶/۶	۳۶۱/۳	۴۲۹/۰	۵۱۷/۳	۶۰۳/۴	۶۹۱/۶	۷۷۵/۸	۳/۱۳
توسعه منابع تجدیدپذیر	۳۰۲/۰	۳۰۷/۹	۳۲۲/۸	۳۹۵/۳	۴۹۸/۴	۶۱۳/۲	۷۳۵/۴	۸۵۹/۱	۴/۲۲
توسعه انرژی هسته‌ای	۳۰۲/۰	۳۴۶/۶	۳۶۱/۲	۴۰۳/۵	۴۴۸/۹	۴۹۴/۳	۵۳۸/۶	۵۸۱/۴	۲/۱۷

منبع: یافته‌های تحقیق

شاخص بعدی که بررسی خواهد شد، نیاز به انرژی مصرفی نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف می باشد. بررسی نتایج مدل و قیاس بین سناریوها نشان می دهد که بیشترین میزان مصرف انرژی در سناریوی مرجع با مقدار ۱۸۴۹/۶ تریلیون کیلوکالری رخ

می‌دهد و کمترین آن نیز مربوط به سناریوی توسعه هسته‌ای می‌باشد. پیش‌بینی میزان سوخت مصرفی هرکدام از سناریوها در نمودار (۵) و جدول (۳) نمایش داده شده است. کلیه حامل‌های انرژی در این محاسبات مدنظر بوده است و تنها حامل‌های انرژی فسیلی در نظر گرفته نشده است.



نمودار ۵. مقایسه پیش‌بینی روند تقاضای انرژی (سوخت) نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف
منبع: یافته‌های تحقیق

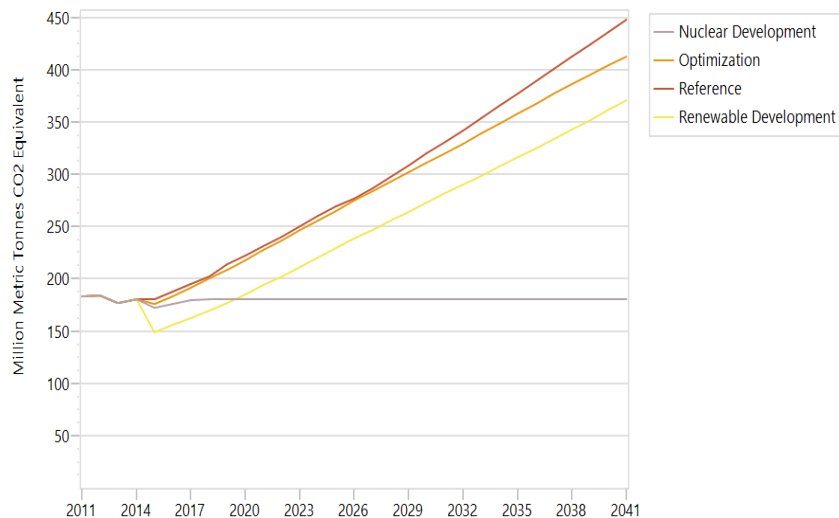
جدول ۳. مقایسه پیش‌بینی روند تقاضای انرژی (سوخت) نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف
(تریلیون کیلوکالری)

a.g (%)	۲۰۴۱	۲۰۳۶	۲۰۳۱	۲۰۲۶	۲۰۲۱	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۱	
۳/۴۸	۱۸۴۹/۶۲	۱۶۰۰/۷۷	۱۳۵۴/۲۷	۱۱۲۳/۸۷	۹۲۶/۳۱	۸۰۳/۴۱	۷۸۱/۱۲	۷۱۹/۸۲	مرجع
۲/۸۷	۱۵۵۰/۸۵	۱۳۹۷/۲۴	۱۲۳۴/۹۳	۱۰۷۸/۲۲	۹۱۵/۸۱	۷۹۲/۸۴	۷۶۷/۴۳	۷۱۹/۸۲	بهینه مرجع
۳/۷۹	۱۷۰۲/۴۱	۱۴۷۷/۵۱	۱۲۶۱/۶۷	۱۰۵۱/۴۹	۸۴۸/۸۳	۷۰۶/۲۵	۶۷۶/۶۰	۷۱۹/۸۲	توسعه منابع تجدیدپذیر
۰/۹۹	۹۴۳/۴۴	۸۹۸/۵۱	۸۴۴/۶۷	۸۲۰/۷۳	۷۹۶/۷۸	۷۷۸/۶۴	۷۵۷/۹۶	۷۱۹/۸۲	توسعه انرژی هسته‌ای

منبع: یافته‌های تحقیق

شاخص بعدی که باید در محاسبات بررسی شود، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، عمده گازهای گلخانه‌ای بخش انرژی (نیروگاه) دی اکسید کربن، متان و نیتروس اکسید نیتروژن می‌باشد. در ادامه چشم‌انداز انتشار این گازهای مضر در هر یک از سناریوها بررسی خواهند شد. همان‌طور که نمودار (۶) نشان می‌دهد بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای در حالت سناریوی مرجع رخ می‌دهد، به طوری که میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای از نیروگاه‌های تولید برق کشور از حدود ۱۸۸ میلیون تن در سال ۲۰۱۶ به بیش از ۴۴۸ میلیون تن در سال ۲۰۴۱ می‌رسد که میانگین رشد سالانه آن بیش از ۳/۰۳ درصد در سال می‌باشد. در رتبه بعدی سناریوی بهینه قرار دارد که مطابق این سناریوی، کل انتشار گازهای گلخانه‌ای به بیش از ۴۱۲ میلیون تن در سال ۲۰۴۱ می‌رسد این در صورتی است که اغلب کشور در جهت کاهش شدت انتشار و کل انتشار گازهای گلخانه‌ای حرکت می‌کنند و لازم است با استفاده از روش‌های مختلفی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد.

با توسعه سهم منابع انرژی تجدیدپذیر از کل تولید برق به ۲۰ درصد در سال ۲۰۴۱، انتظار می‌رود انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سناریوی مرجع حدود ۷۷ میلیون تن کاهش یافته و میزان کل انتشار در این سناریو در افق مدل سازی به بیش از ۳۷۱ میلیون تن افزایش یابد. میانگین رشد سالانه انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو نیز حدود ۲/۳۹ درصد در سال خواهد بود. در آخر اینکه با محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای نیروگاه‌های کشور در سطح ۱۸۰ میلیون تن مدل به سمت توسعه انرژی هسته و واردات برق می‌رود که متوسط رشد نسبت به سال پایه ۲۰۱۱ در این سناریو ۰/۵- درصد در سال خواهد بود. جزئیات روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقایسه سناریوها در نمودار (۶) و جدول (۴) نمایش داده شده است.



نمودار ۶. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق در سناریوهای مختلف
منبع: یافته‌های تحقیق

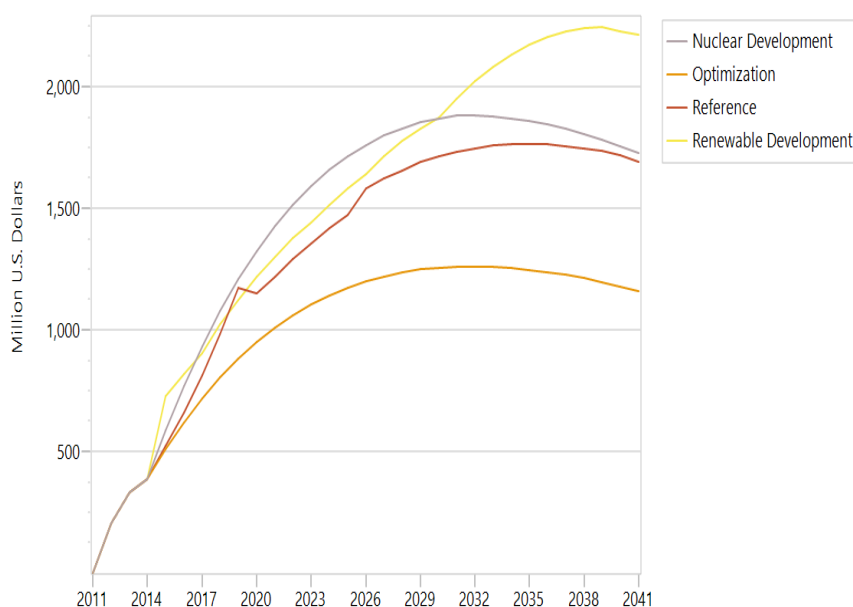
جدول ۴. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق در سناریوهای مختلف
(میلیون تن در سال)

a.g (%)	۲۰۴۱	۲۰۳۶	۲۰۳۱	۲۰۲۶	۲۰۲۱	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۱	
۳/۰۳	۴۴۸/۰۴	۳۸۹/۱۴	۳۳۰/۸۴	۲۷۶/۴۳	۲۳۱/۳۵	۱۹۴/۵۸	۱۸۷/۷۹	۱۸۲/۸۰	مرجع
۲/۵۷	۴۱۲/۵۲	۳۶۷/۳۶	۳۲۰/۱۷	۲۷۴/۳۸	۲۲۷/۱۶	۱۹۱/۱۴	۱۸۳/۴۷	۱۸۲/۸۰	بهینه مرجع
۲/۳۹	۳۷۱/۰۴	۳۲۴/۸۱	۲۸۱/۶۳	۲۳۸/۱۸	۱۹۳/۶۸	۱۶۲/۲۵	۱۵۵/۶۳	۱۸۲/۸۰	توسعه منابع تجدیدپذیر
-۰/۰۵	۱۸۰/۳۳	۱۸۰/۳۵	۱۸۰/۳۹	۱۸۰/۳۶	۱۸۰/۳۳	۱۷۹/۷۳	۱۷۵/۸۷	۱۸۲/۸۰	توسعه انرژی هسته‌ای

منبع: یافته‌های تحقیق

شاخص پنجم جهت مقایسه بین سناریوهای مختلف، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به صورت تنزیل یافته در سناریوهای مختلف جهت تولید برق می‌باشد. بررسی نتایج مدل نشان می‌دهد که بیشترین میزان سرمایه‌گذاری اولیه تنزیل یافته جهت سمت

عرضه متعلق به سناریوی توسعه تجدیدپذیرهاست که همانند نمودار (۵) تغییر می‌نماید. اوج سرمایه‌گذاری در این سناریو مربوط به سال ۲۰۳۹ به میزان ۲۲۴۶/۴ میلیون دلار در سال می‌باشد. مقادیر، تنزیل یافته مقادیر واقعی به سال پایه ۲۰۱۱ با نرخ تنزیل ۵ درصد (این نرخ منطبق بر شاخص‌های بین‌المللی می‌باشد) می‌باشند. از نظر شاخص سرمایه‌گذاری اولیه، بعد از سناریوی انرژی‌های تجدیدپذیر، سناریوی توسعه انرژی هسته و سناریوی مرجع قرار می‌گیرند. سناریوی مرجع بهینه به حداقل سرمایه‌گذاری اولیه نیاز دارد. این مسئله طبیعی است زیرا هر چقدر در سناریوی بهینه تحمیل و محدودیت شرایط اعمال شود هزینه‌ها بالاتر خواهند رفت. جزئیات بیشتر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه تنزیل یافته در نمودار (۷) و جدول (۵) نمایش داده شده‌اند.



نمودار ۷. مقایسه روند سرمایه‌گذاری تنزیل یافته مورد نیاز جهت توسعه نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف

منبع: یافته‌های تحقیق

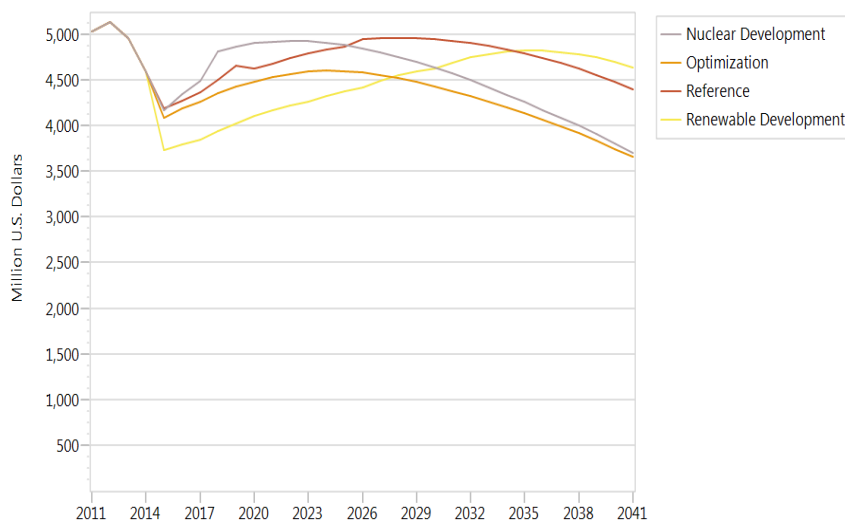
جدول ۵. مقایسه روند سرمایه‌گذاری تنزیل یافته مورد نیاز جهت توسعه نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف (میلیون دلار سال ۲۰۱۱)

سناریو / سال	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۲۱	۲۰۲۶	۲۰۳۱	۲۰۳۶	۲۰۴۱
مرجع	۲۰۳/۴۰	۶۶۰/۹۸	۸۱۳/۱۵	۱۲۱۹/۹۶	۱۵۸۰/۸۸	۱۷۳۱/۹۰	۱۷۶۴/۸۲	۱۶۸۹/۹۶
بهینه مرجع	۲۰۳/۴۰	۶۱۸/۱۵	۷۱۶/۳۵	۱۰۰۸/۷۳	۱۱۹۹/۹۵	۱۲۶۰/۰۹	۱۲۳۷/۱۷	۱۱۵۷/۳۳
توسعه منابع تجدیدپذیر	۲۰۳/۴۰	۸۱۹/۹۸	۹۰۵/۷۸	۱۳۰۱/۳۰	۱۶۳۸/۹۹	۱۹۵۱/۷۴	۲۲۰۴/۳۷	۲۲۱۵/۱۴
توسعه انرژی هسته‌ای	۲۰۳/۴۰	۷۷۰/۲۴	۹۳۳/۶۲	۱۴۲۵/۸۱	۱۷۶۰/۱۶	۱۸۸۱/۹۳	۱۸۴۳/۶۳	۱۷۲۵/۹۳

منبع: یافته‌های تحقیق

شاخص ششم شاخص هزینه‌های اجتماعی می‌باشد که روند این هزینه‌ها در سناریوهای مختلف متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در نمودار (۸) مشاهده می‌شود، از نظر شاخص هزینه اجتماعی نیز سناریوی بهینه کمتر از بقیه بوده و سناریوی توسعه تجدیدپذیر به تدریج از بقیه بیشتر می‌شود، البته در سال‌های ابتدایی و مقادیر پایین‌تر، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل تولید برق کمتر بوده و به تدریج افزایش می‌یابد. مقدار هزینه‌های اجتماعی در سال ۲۰۱۱ بالغ بر ۵۰۳۰ میلیون دلار بوده که مقدار تنزیل یافته این میزان نسبت به سال ۲۰۱۱ در سال‌های آتی همانند نمودار (۸) تغییر می‌نماید، به طوری که مقدار آن برای سناریوی توسعه هسته‌ای با رشد میانگین سالانه ۰/۴۵- درصد در سال ۲۰۴۱ نزدیک به ۳۶۹۸/۴۷ میلیون دلار می‌رسد. همان‌طور که گفته شد روند واقعی صعودی است به طوری که مقدار هزینه اجتماعی واقعی در سال ۲۰۴۱ در این سناریوی به حدود ۱۹/۶۴ میلیارد دلار خواهد رسید که میانگین رشد سالانه آن حدود ۵/۲۲ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه جهت مقایسه ارقام، تمام موارد به سال پایه تنزیل یافته‌اند در ادامه نیز این شاخص تنزیل یافته بررسی خواهد شد. همان‌طور که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود مقدار هزینه اجتماعی در سناریوی مرجع بهینه در سال ۲۰۴۱، با میانگین رشد سالانه ۱/۰۶- درصد، حدود ۳۶۵۴ میلیون دلار، سناریوی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر با رشد متوسط ۰/۲۷- درصد، ۴۶۳۹/۱۶ میلیون دلار و سناریوی مرجع نیز با میانگین رشد ۰/۴۶- درصد، معادل ۴۳۹۳/۹۱ میلیون دلار خواهد بود. جزئیات بیشتر در جدول (۶) نمایش داده شده است. دلیل بالا بودن هزینه اجتماعی در سناریوی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش بیش از حد

سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل تولید انرژی می‌باشد که به طرز چشم‌گیری با وجود کاهش هزینه اکسترنالیتی^۱، هزینه سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد.



نمودار ۸. مقایسه روند هزینه‌های اجتماعی تولید برق در سناریوهای مختلف

منبع: یافته‌های تحقیق

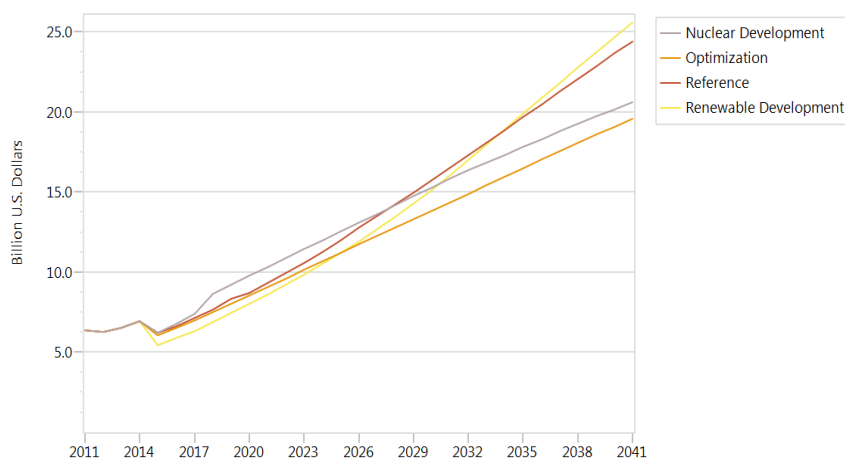
جدول ۶. مقایسه روند هزینه‌های اجتماعی تولید برق در سناریوهای مختلف (میلیون دلار)

a.g (%)	۲۰۴۱	۲۰۳۶	۲۰۳۱	۲۰۲۶	۲۰۲۱	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۱	سناریو/ سال
-۰/۴۶	۴۳۹۳/۹۱	۴۷۳۹/۸۵	۴۹۲۷/۵۱	۴۹۴۱/۴۹	۴۶۷۸/۵۵	۴۳۶۹/۲۸	۴۲۶۹/۰۲	۵۰۳۰/۱۰	مرجع
-۱/۰۶	۳۶۵۳/۷۳	۴۰۶۱/۰۷	۴۳۷۸/۲۰	۴۵۷۹/۴۸	۴۵۳۰/۰۱	۴۲۶۴/۸۷	۴۱۸۲/۹۹	۵۰۳۰/۱۰	بهینه مرجع
-۰/۲۷	۴۶۳۹/۱۶	۴۸۱۶/۶۱	۴۶۹۱/۲۲	۴۴۱۶/۴۹	۴۱۶۴/۸۳	۳۸۴۶/۷۵	۳۷۹۱/۵۰	۵۰۳۰/۱۰	توسعه منابع تجدیدپذیر
-۰/۴۵	۳۶۹۸/۴۷	۴۱۷۰/۴۳	۴۵۷۱/۰۱	۴۸۴۴/۸۴	۴۹۱۹/۳۳	۴۴۹۰/۸۷	۴۳۴۱/۱۸	۵۰۳۰/۱۰	توسعه انرژی هسته‌ای

منبع: یافته‌های تحقیق

1. Environment externalities cost

آخرین شاخص مقایسه بین سناریوهای مختلف، مقایسه بین کل هزینه تولید می‌باشد. برخلاف هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه اجتماعی جهت روشن شدن مقادیر، هزینه کل تولید برق در سناریوی به صورت واقعی نمایش داده خواهد شد. همان‌طور که از نمودار (۹) پیداست، مقدار هزینه تولید (به استثنای هزینه اکسترنا لیتی) در سال‌های ابتدایی در سناریوی تجدیدپذیرها از موارد دیگر کمتر بوده و سپس با افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق، به تدریج زیاد شده و از سال ۲۰۳۳ به تدریج بیشتر شده و بالاتر از تمامی سناریوها قرار می‌گیرند.



نمودار ۹. مقایسه بین هزینه‌های تولید برق در سناریوهای مختلف

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۷. مقایسه روند هزینه واقعی تولید برق در سناریوهای مختلف (میلیارد دلار)

سناریو / سال	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۲۱	۲۰۲۶	۲۰۳۱	۲۰۳۶	۲۰۴۱	a.g (%)
مرجع	۶/۳۶	۶/۷۹	۷/۳۹	۱۰/۳۲	۱۳/۰۸	۱۵/۸۴	۱۹/۵۸	۴/۵۸
بهینه مرجع	۶/۳۶	۶/۵۳	۶/۹۹	۹/۰۶	۱۱/۷۳	۱۴/۳۴	۱۷/۰۰	۳/۸۲
توسعه منابع تجدیدپذیر	۶/۳۶	۶/۶۵	۷/۱۲	۹/۳۰	۱۲/۷۸	۱۶/۵۰	۲۰/۴۵	۴/۷۵
توسعه انرژی هسته‌ای	۶/۳۶	۶/۸۸	۶/۳۳	۸/۶۰	۱۱/۸۸	۱۶/۰۲	۲۰/۸۳	۳/۹۹

منبع: یافته‌های تحقیق

در سال ۲۰۳۰، از نظر شاخص هزینه تولید برق بعد از سناریوی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، سناریوی مرجع و سپس سناریوهای توسعه انرژی هسته و در پایین‌ترین سطح، سناریوی مرجع بهینه قرار گرفته است. در صورتی که هزینه اکسترنا لیتی نیز به هزینه تولید افزوده شود، در آن صورت بالاترین هزینه تولید مربوط به سناریوی مرجع بوده، سناریو توسعه تجدیدپذیرها در رتبه دوم، سناریوی مرجع بهینه در رتبه سوم و در نهایت توسعه انرژی‌های هسته‌ای (به دلیل محدود شدن انتشار گازهای گلخانه‌ای) در رتبه کف قرار می‌گیرد. به هر صورت در این قسمت شاخص هزینه تولید، بدون احتساب هزینه‌های اکسترنا لیتی خواهد بود. بررسی نتایج کمی مدل (جدول ۷ حاکی از آن است که میزان هزینه تولید برق در سال ۲۰۱۱ حدود ۶/۳۶ میلیارد دلار (با احتساب قیمت‌های فعلی سوخت خوراک) می‌باشد که انتظار می‌رود مقدار آن در سال ۲۰۳۰، در سناریوی مرجع با میانگین رشد سالانه ۴/۵۸ درصد به ۲۰/۵۸ میلیارد دلار، در سناریوی مرجع بهینه با میانگین رشد سالانه ۳/۸۲ درصد به ۱۹/۵۵ میلیارد دلار، در سناریوی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر با میانگین رشد سالانه ۴,۷۵ درصد به ۲۴/۳۷ میلیارد دلار و در سناریوی توسعه انرژی هسته‌ای نیز با میانگین رشد سالانه ۳/۹۹ درصد به ۲۵/۵۷ میلیارد دلار برسد.

۶- اولویت‌بندی سناریوها

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، فرایند برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو شامل سه فعالیت اصلی می‌باشد: نوشتن سناریوها، تحلیل سناریوها و تصمیم‌گیری می‌باشد و فرآیند سناریونگاری زمانی مفید واقع می‌شود که به تصمیم‌گیری در خصوص آینده منتهی گردد. بنابراین با توجه به طراحی، تحلیل و مقایسه سناریوهای مطروحه، انتخاب یک سناریو به عنوان سناریوی برتر بیانگر مفید واقع شدن سناریونگاری و آینده پژوهی در این مقاله خواهد بود.

جدول ۸. تحلیل نهایی هزینه فایده برای انتخاب سناریوی برتر با هدف گذاری ۲۰ درصدی تجدیدپذیرها

توسعه انرژی هسته‌ای	توسعه منابع تجدیدپذیر	بهینه مرجع	
-	-	-	سمت تقاضا ^۱
-	-	-	تقاضای برق
+۸/۱۵۱	+۵/۱۹۷	-۱۰/۲۲۴	سمت عرضه ^۲
+۸/۱۵۱	+۵/۱۹۷	-۱۰/۲۲۴	عرضه برق
+۴/۷۸۲	+۲/۱۳۴	+۵/۵۶۵	منابع انرژی
-۱۸/۵۵۵	-۴/۸۱۱	-۳/۹۳۳	تولید انرژی
-۲۳/۳۳۷	-۵/۲۳۲	+۹/۴۹۸	واردات
-	+۱۲/۱۷۷	-	صادرات
-	+	-	نیاز تأمین نشده
-۱۳/۶۰۲	-۱۲/۴۷۷	-۱/۱۱۴	هزینه‌های زیست‌محیطی ^۳
-	-	-	هزینه‌های غیر انرژی
-۰/۶۷۰	-۵/۱۴۷	-۵/۷۷۳	خالص ارزش کنونی ^۴
+۳۳۶۸/۴۲۸	+۱۳۱۲/۶۴۹	+۳۱۶/۱۱۴	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (Mill Tonnes CO ₂ e)
-۰/۱۹۹	-۳/۹۲۱	+۱۸/۲۶۲	هزینه کاهش گازهای گلخانه‌ای هر سناریو (U.S. Dollar/Tone CO ₂ e)

منبع: یافته‌های تحقیق

منافع و هزینه‌های همفزون (تجمیعی) تنزیل یافته بین ۲۰۱۱-۲۰۴۱ نسبت به سناریوی مرجع

واحد: میلیارد دلار آمریکا

علامت (-) بیانگر منافع بوده و علامت (+) نیز بیانگر هزینه می‌باشد.

1. Demand Side
2. Supply Side
3. Externality Costs
4. Net Present Value

جدول ۹. تحلیل نهایی هزینه فایده برای انتخاب سناریوی برتر با هدف گذاری ۱۰ درصدی تجدیدپذیرها

توسعه انرژی هسته‌ای	توسعه منابع تجدیدپذیر	بهینه مرجع	
-	-	-	سمت تقاضا
-	-	-	تقاضای برق
+۸/۱۵۱	-۱۱/۵۴۸	-۱۰/۲۲۴	سمت عرضه
+۸/۱۵۱	-۱۱/۵۴۸	-۱۰/۲۲۴	عرضه برق
+۴/۷۸۲	+۸/۵۶۹	+۵/۶۵۶	منابع انرژی
-۱۸/۵۵۵	-۰/۰۳۵	-۳/۹۳۳	تولید انرژی
+۲۳/۳۳۷	-۳/۵۷۴	+۹/۴۹۸	واردات
-	+۱۲/۱۷۷	-	صادرات
-	-	-	نیاز تأمین نشده
-۱۳/۶۰۲	-۱۰/۴۶۸	-۱/۱۱۴	هزینه‌های زیست‌محیطی
-	-	-	هزینه‌های غیر انرژی
-۰/۶۷۰	-۱۳/۴۴۷	-۵/۷۷۳	خالص ارزش کنونی
+۳۳۶۸/۴۲۸	+۷۲۸/۶۰۱	+۳۱۶/۱۱۴	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (Mill Tonnes CO ₂ e)
-۰/۱۹۹	-۱۸/۴۵۶	-۱۵/۲۶۲	هزینه کاهش گازهای گلخانه‌ای هر سناریو (U.S. Dollar/Tone CO ₂ e)

منبع: محاسبات محقق

منافع و هزینه‌های هم‌فزون (تجمیعی) تنزیل یافته بین ۲۰۴۱-۲۰۱۱ نسبت به سناریوی مرجع واحد: میلیارد دلار آمریکا
 علامت (-) بیانگر منافع بوده و علامت (+) نیز بیانگر هزینه می‌باشد.

در این مقاله، انتخاب سناریوی برتر با استفاده از قابلیت‌های هزینه-فایده نرم‌افزار LEAP انجام می‌گیرد، به این صورت که مدل تمام هزینه‌ها و منافع اجزای مختلف سیستم برق نسبت به سناریوی مرجع را به سال پایه با نرخ تنزیل مشخصی (در اینجا ۵ درصد) تنزیل نموده و بر اساس شاخص خالص ارزش کنونی، امکان تصمیم‌گیری در مورد سناریوها را فراهم می‌نماید. در این پروژه، ارزش خالص فعلی

سناریوی مرجع بهینه، ۵/۷۷۳ میلیارد دلار، سناریوی توسعه انرژی های تجدیدپذیر ۵/۱۴۷ میلیارد دلار و توسعه برق هسته ای نیز حدود ۰/۶۷۰ میلیارد دلار می باشد، بنابراین همان طور که از جزئیات جدول (۸) مشخص است سناریو مرجع بهینه به عنوان سناریوی برتر انتخاب شده و سناریوی توسعه برق تجدیدپذیر (با هدف گذاری ۲۰ درصد از سهم تولید) با فاصله اندکی در رتبه دوم قرار می گیرد.

همان طور که در جدول (۹) ملاحظه می شود، در تحلیل هزینه - فایده برای انتخاب سناریوی برتر، سناریوی تجدیدپذیرها با هدف گذاری ۱۰ درصدی در رتبه نخست قرار گرفته و سناریوی مرجع بهینه با فاصله در رتبه دوم و توسعه انرژی هسته ای کماکان در رتبه آخر قرار خواهد گرفت، چرا که در صورت هدف گذاری ۱۰ درصد از تولید کل تولید برق به برق تجدیدپذیر میزان شاخص NPV نسبت به هدف گذاری ۲۰ درصد بیش از ۲ برابر می شود و دلیل اصلی این تغییر میزان حجم سرمایه بر بودن تکنولوژی برق تجدیدپذیر است.

نکته حائز اهمیت اینکه در مطالعه رازینی و همکاران (۱۳۸۹) با عنوان "سناریونگاری با هدف آینده پژوهی در صنعت تولید برق ایران" که مبنای انجام این مطالعه می باشد، صرفاً به تدوین و تحلیل سناریوهای محتمل برای تأمین تقاضای انرژی الکتریکی در آینده پرداخته شده و به قضاوت در مورد سناریوها پرداخته نشده و بررسی این مسئله به تحقیقی دیگر موكول شده است. در تحقیق جاری با تاسی از این مطالعه ارزنده، ضمن بررسی و تحلیل اثرات سیاست های انرژی کشور در حوزه تولید برق بر روی سهم انواع نیروگاه ها در آینده، با به کارگیری قابلیت هزینه- فایده ابزار مدل سازی LEAP به اولویت بندی سیاست های انرژی در توسعه نیروگاه های کشور جهت تأمین تقاضای برق در بلندمدت پرداخته شده و این امر موجب تمایز تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات مشابه شده است.

۶- جمع بندی و پیشنهاد

با اجرای سیاست توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر (با هدف گذاری ۲۰ درصد در سال ۱۴۲۰) و پیش بینی روند افزایش سهم نیروگاه های تجدیدپذیر و کاهش سهم نیروگاه های فسیلی در افق این سناریو، میزان صرفه جویی مصرف انرژی، حاصل از

اجرای این سیاست/ سناریو نسبت به سناریوی مرجع (تداوم روند فعلی)، مطابق نمودار ۵ و جدول ۳، قابل برآورد است. میزان پتانسیل صرفه‌جویی مصرف سوخت نیروگاه‌ها در سناریوی توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر از تفاضل مصرف سوخت در نیروگاه‌های دو سناریوی توسعه منابع تجدیدپذیر و سناریوی مرجع از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۴۱ به دست می‌آید، که جمعاً بالغ بر ۲۶۹۳/۷ تریلیون کیلوکالری، برآورد شده است. این میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت، جمعاً معادل ۲۸۱۳۸/۷۸ میلیون دلار صرفه‌جویی هزینه به همراه دارد (بر مبنای ترازنامه انرژی ایران ۱۳۹۳ - ۱۳۹۰). همچنین با عنایت به روند کاهش سهم منابع فسیلی و افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید برق تا ۲۰۴۱ و به تبع آن کاهش مصرف سوخت در این سناریو نسبت به سناریوی مرجع، انتظار می‌رود میزان کل انتشار گازهای آلاینده در این سناریو نسبت به سناریوی مرجع نیز کاهش می‌یابد، خروجی مدل‌سازی این امر را تأیید می‌نماید. مطابق خروجی مدل‌سازی سناریو توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر برآورد می‌شود: روند انتشار گازهای گلخانه‌ای از میزان ۱۸۲/۸۰ میلیون تن در سال ۲۰۱۱ با میانگین رشد سالانه حدود ۲/۳۹ درصد در سال، به بیش از ۳۷۱ میلیون تن افزایش یابد. این میزان در سناریوی مرجع با رشد ۳/۰۳ درصد به میزان ۴۴۸/۰۴ میلیون تن افزایش می‌یابد؛ بنابراین با اجرای سناریو توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، میزان پتانسیل عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو نسبت به سناریوی مرجع در بازه سال ۲۰۱۵ تا ۱۴۲۱ (مطابق نمودار ۶ و جدول ۴)، از تفاضل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو سناریو محاسبه و جمعاً برابر ۱۳۱۲/۵۸ میلیون تن معادل CO₂ برآورد می‌شود و این میزان جمعاً معادل ۳۰۸۳۰/۵۲ میلیون دلار نسبت به سناریوی مرجع صرفه‌جویی هزینه^۱ به همراه خواهد داشت (مطابق ترازنامه انرژی ایران ۱۳۹۳ - ۱۳۹۰).

با وجود اذعان به اینکه بهینه‌سازی سیستم برق هم از نظر ترکیب ظرفیت، هم بهره‌برداری و دیسپاچینگ می‌تواند منافع کوتاه‌مدت و بلندمدت قابل توجهی در سطح ملی داشته باشد. با توجه به نزدیکی خالص ارزش کنونی سناریوی مرجع بهینه و سناریوی توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، نتیجه مدل‌سازی سناریوی مبتنی بر توسعه برق تجدیدپذیر (با هدف‌گذاری توسعه ۲۰ درصدی) را به‌عنوان سناریو یا سیاست ارجح

1. Externalities Cost

معرفی می‌کند. محققین، با عنایت به ضرورت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر (امنیت انرژی، آلودگی زیست‌محیطی، اشتغال و ...)، همچنین وجود پتانسیل مناسب این منابع در ایران، هدف گذاری توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر تا نقطه ۲۰ درصد از سهم تولید را به واقعیت نزدیک‌تر می‌دانند، با توجه به مزیت‌های به‌کارگیری این منابع و همچنین جهت‌گیری نظام جمهوری اسلامی ایران در حرکت به سمت اقتصاد بدون نفت، مؤلفین مقاله اجرای سیاست توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید برق ایران را به دست اندرکاران و تصمیم‌گیران انرژی کشور پیشنهاد می‌دهند.

در پایان با توجه به این امر که دستیابی به توسعه مطلوب و پایدار انرژی، با اجرای توأمان دو سیاست بهینه‌سازی سیستم انرژی و ایجاد تنوع در سیستم عرضه انرژی (به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر) میسر است، با توجه به احراز رتبه نخست سناریوی مرجع بهینه، در اولویت‌بندی سناریوها بر مبنای شاخص NPV در این تحقیق، همچنین آگاهی از مزایای حاصل از اجرای این سناریو و سناریوی توسعه به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، مؤلفین مقاله، با توجه به قابلیت مدل‌سازی LEAP در طراحی و تحلیل سناریوهای تلفیقی، در تحقیقی دیگر با طراحی سناریوی تلفیقی (سناریوی توسعه به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و سناریوی مرجع بهینه) به بررسی و تحلیل شرایط اجرای این سناریوی تلفیقی در کنار ۴ سناریوی طراحی شده خواهند پرداخت.

منابع

آمار تفصیلی صنعت برق ایران ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴، شرکت توانیر

استادزاده، علی حسین (۱۳۹۲). "پیش‌بینی بلندمدت سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر از کل انرژی در قالب یک الگو رشد پایدار: مورد ایران ۱۳۸۷-۱۴۲۰"، مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، سال یکم، بهار ۱۳۹۲، شماره ۱،

صفحات ۲۸-۵

اشراقی، های، ملکی، عباس، وکیلی، علی (۱۳۹۲). "شبهه‌سازی تقاضا و عرضه حامل‌های انرژی تا سال ۲۰۳۵ در ایران با استفاده از مدل‌ساز LEAP"، پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، سال اول، شماره ۳، صفحات ۱۳۶-۱۱۳

انجمن جهانی سیاست‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر (۲۰۱۲). آینده انرژی‌های تجدیدپذیر، ترجمه ناهید فرازمنند (۱۳۹۳). تهران، انتشارات آریانا قلم

ترازنامه انرژی وزارت نیرو-۱۳۹۰ (۱۳۹۱). دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی، وزارت نیرو

ترازنامه انرژی وزارت نیرو-۱۳۹۳ (۱۳۹۵). دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی، وزارت نیرو

ترازنامه هیدروکربوری، مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی و معاونت برنامه‌ریزی. نظارت راهبردی وزارت نفت، وزارت نفت، ۱۳۹۳

سری زمانی ترازنامه انرژی ۱۳۹۳-۱۳۴۶، وزارت نیرو، ۱۳۹۴

شفیعی، احسان، آریان پور، وحید، گودرزی راد، رضا، داراب، سمیه (۱۳۹۳). "گزارش برنامه بلندمدت توسعه بخش انرژی کشور"، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، وزارت نیرو

رازینی، صالح، مقدس تفرشی، سیدمسعود، بطحایی، سیدمحدثقی (۱۳۸۹). "سناریونگاری با هدف آینده پژوهی در صنعت برق ایران"، نشریه انرژی، دوره ۱۳، شماره ۳، صفحات ۱-۱۴

کچویی، محمد صادق، عمیدپور، مجید (۱۳۹۵). "تحلیل سناریو درباره پتانسیل کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش تولید برق ایران با استفاده از مدل‌ساز LEAP"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۹، شماره ۳، صفحات ۱۱۶-۱۰۱

گزارش ۴۷ سال صنعت برق ایران در آینه آمار ۱۳۹۲-۱۳۴۶ (۱۳۹۳). شرکت توانیر

مرادی، محمدعلی، احمدی، سمیه، عمیدپور، مجید (۱۳۹۲). "توسعه مدل تقاضای انرژی در سطح ملی با استفاده از مدل ساز LEAP"، پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، سال اول، شماره ۳، صفحات ۵۱-۸۲

Heap, C., (2011), LEAP User Guide, Stockholm Environment Institute.

Parka, Nyun-Bae, Sun-Jin Yunb and Eui-Chan Jeona (2013), "An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector", Energy Policy, vol. 52.

REN21. 2015. Renewable 2015: Global status report (Paris: REN21 Secretariat)

IEA, (2013), Updated Capital Cost Estimates for utility Scale Electricity Generation Plants, Energy Information Administration (EIA), 2013

IEA, (2012), World Energy Outlook 2011, International Energy Agency, Paris