

## توسعه سیستم عرضه برق کشور در شرایط محدودیت سوخت نیروگاهها در ماههای سرد

سید احسان الدین شفیعی، محمدعلی مقدم تبریزی، مجید فرمد  
دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو  
جمهوری اسلامی ایران

واژه‌های کلیدی: سیستم عرضه برق؛ محدودیت سوخت نیروگاهی؛ ظرفیت بهینه؛ بهره‌برداری بهینه

### چکیده

در مقاله حاضر ترکیب بهینه تکنولوژی‌های تولید برق در کشور با در نظر گرفتن محدودیت سوخت‌رسانی به نیروگاه‌های حرارتی تعیین می‌شود. محدودیت سوخت به صورت حداکثر سهم گاز طبیعی قابل تخصیص به نیروگاه‌های حرارتی در کل سال و بطور خاص در ۴ ماه سرد آن در نظر گرفته می‌شود. به منظور ارزیابی و تحلیل اثرات این محدودیت، با بهره‌گیری از مدل MESSAGE، سیستم عرضه انرژی الکتریکی کشور مدل‌سازی می‌شود. در این مدل کل هزینه‌های سیستم عرضه انرژی الکتریکی به منظور تأمین تقاضای نهایی برق حداقل می‌گردد. نتایج اصلی مدل شامل روند بهینه کل ظرفیت مورد نیاز برای نصب، تولید ناویژه هر یک از نیروگاه‌ها و ضریب بهره‌برداری بهینه آنها در یک افق زمانی ۳۰ ساله می‌باشد. مدل طراحی شده و نتایج حاصل از آن می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب جهت تسهیل فرآیند برنامه‌ریزی میان‌مدت و درازمدت در بخش عرضه برق مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

امروزه، اهمیت توجه به برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و یکپارچه که در حقیقت اثرات متقابل بخشهای مختلف سیستم عرضه انرژی را بر یکدیگر مورد بررسی قرار داده و بهترین گزینه و همچنین نحوه بهره‌برداری بهینه از منابع و فناوری‌های مختلف انرژی را نشان می‌دهد، بر کسی پوشیده نیست. سیستم عرضه انرژی که از زیرمجموعه‌های مختلف تشکیل یافته است، به منظور تأمین انرژی مورد نیاز بخشهای اقتصادی و اجتماعی توسعه می‌یابد. در این سیستم، تأمین انرژی مفید از طریق استفاده از انواع حاملهای انرژی اولیه و با بهره‌برداری از فناوری‌های متنوع و متعدد انرژی امکان پذیر است. جریان صورت‌های مختلف انرژی، زیرمجموعه‌های سیستم عرضه انرژی را تشکیل می‌دهند و تغییرات در جریان هر یک از انواع حامل‌های انرژی، کل سیستم عرضه انرژی و جریان سایر حامل‌های انرژی را متأثر می‌سازد. به هم تنیدگی و به هم پیوستگی جریانها و تکنولوژی‌های انرژی، توسعه و به‌کارگیری ابزار تحلیلی مناسب برای بررسی و مطالعه حالات مختلف سیستم را ضروری می‌سازد. این ابزارها تحت عنوان

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

رویکردی نه تنها می‌تواند وضعیت سیستم عرضه برق در ماه‌های سرد را تحت تأثیر قرار دهد، بلکه بر وضعیت عملیاتی نیروگاه‌ها در سایر ماه‌های سال نیز مؤثر است. به منظور ارزیابی و تحلیل این اثرات، در مقاله حاضر با بهره‌گیری از آخرین نسخه مدل MESSAGE<sup>1</sup>، سیستم عرضه انرژی الکتریکی کشور مدل‌سازی شده<sup>2</sup> و نتایج حاصل از ارزیابی محدودیت‌های سوخت رسانی به نیروگاه‌ها در ماه‌های سرد سال با استفاده از این مدل ارائه می‌گردد. بدین منظور در بخش دوم مقاله، مدل MESSAGE به اختصار معرفی شده و پس از آن در بخش سوم، ساختار سیستم انرژی مرجع برای بخش برق کشور و نحوه مدل‌سازی آن در محیط MESSAGE ارائه می‌شود. در بخش چهارم مفروضات اصلی و پایگاه اطلاعات مورد استفاده به عنوان ورودی مدل مشخص شده و در انتها نتایج حاصل از اجرای مدل ارائه و تحلیل می‌گردد.

### ۲- معرفی مدل MESSAGE

یکی از مدل‌های سیستم عرضه انرژی که در اواخر دهه ۷۰ میلادی در مؤسسه بین‌المللی سیستم‌های کاربردی (IIASA<sup>3</sup>) توسعه یافت، مدل MESSAGE است. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA<sup>4</sup>) آخرین نسخه مدل MESSAGE را از IIASA دریافت نموده و با طراحی و افزودن یک واسط کاربری مناسب نحوه استفاده از آنرا تسهیل نموده است.

MESSAGE مدلی جهت تعیین ساختار بهینه سیستم عرضه

<sup>1</sup> - Model for Energy Supply and Strategy and their General Environmental Impact

<sup>2</sup> - مدل MESSAGE-V از طریق آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در اختیار دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو قرار گرفته و در حال حاضر در این دفتر راه‌اندازی شده و به منظور مطالعه ابعاد و جوانب مختلف عرضه برق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

<sup>3</sup> - International Institute for Applied Systems Analysis

<sup>4</sup> - International Atomic Energy Agency

مدل‌های سیستم عرضه انرژی به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته‌اند. با استفاده از این مدل‌ها، تحلیل جامع سیستم عرضه انرژی در سطح کلان امکان پذیر می‌گردد. در چهارچوب این تحلیل، ترکیب بهینه حامل‌های انرژی، تکنولوژی‌های مناسب، روند بهره‌برداری از منابع انرژی و سرمایه‌گذاری در این بخش به منظور تأمین تقاضای انرژی با حداقل هزینه تعیین می‌گردند.

مدل‌های عرضه انرژی با توجه به نوع و تعداد حامل‌های انرژی به دو گروه عمده مدل‌های عرضه چندسوختی و مدل‌های عرضه تک‌سوختی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های عرضه چندسوختی، جریان انرژی برای حامل‌های مختلف انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در چهارچوب آن ترکیب بهینه حامل‌ها و تکنولوژی‌های انرژی در سطوح مختلف تعیین می‌شوند. در مدل‌های عرضه تک‌سوختی، جریان یک حامل انرژی در سطوح مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این مدل‌ها ترکیب بهینه تکنولوژی‌های عرضه کننده یک حامل انرژی خاص را مشخص می‌کند. مدل عرضه برق نمونه‌ای از مدل‌های عرضه تک‌سوختی می‌باشد که در آن ظرفیت‌سازی بهینه برای تکنولوژی‌های نیروگاهی و وضعیت بهینه عملیاتی آنها به منظور تأمین تقاضای نهایی برق مشخص می‌شود. سیستم تولید و انتقال انرژی الکتریکی به عنوان زیربخشی از کل سیستم عرضه انرژی است که سهم و مقدار قابل تخصیص از حامل‌های مختلف انرژی به آن جهت تبدیل به برق از اهمیت زیادی برخوردار بوده و با توجه به وضعیت موجود نیروگاه‌های کشور، این امر می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت توسعه نیروگاه‌ها و تولید برق کشور داشته باشد.

به‌طور معمول محدودیت عرضه گاز طبیعی به مصرف‌کنندگان مختلف در ۴ ماه سرد سال، بخش نیروگاهی کشور را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط به منظور تداوم تولید برق، استفاده از سوخت‌های نیروگاهی جایگزین و یا تکنولوژی‌های دیگر مورد توجه قرار می‌گیرد. چنین

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی)

مجموعه محدودیت‌های فوق، یک مجموعه امکان‌پذیر تولید برای سیستم عرضه انرژی را در مدل ایجاد می‌کنند. اما برای یافتن بهترین وضعیت کارکرد در این مجموعه امکان‌پذیر، باید معیار خاصی در نظر گرفته شود. معمولاً هزینه‌های کل سیستم به عنوان معیار در نظر گرفته شده و با حداقل کردن آن، بهترین وضعیت عملکرد سیستم عرضه به دست می‌آید. هزینه‌های سیستم در مدل MESSAGE در حالت کلی به شش گروه تقسیم می‌شوند:

- هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم
- هزینه‌های تعمیر و نگهداری ثابت سیستم
- هزینه‌های تعمیر و نگهداری متغیر سیستم
- هزینه منابع انرژی
- هزینه واردات انرژی (یا درآمدهای صادراتی)
- هزینه‌های زیست محیطی

هزینه‌های مذکور باید برای تمام سطوح، تکنولوژی‌ها، مناطق و زمان‌های مختلف محاسبه شده و به یک سال پایه تنزیل شوند. در این صورت مجموع ارزش حال کل هزینه‌های سیستم، تابع هدف مدل را شکل خواهد داد. با حداقل کردن تابع هدف مذکور با توجه به محدودیت‌های فوق‌الذکر، وضعیت بهینه سیستم به دست می‌آید. در ادامه، نحوه راه‌اندازی و اجرای مدل MESSAGE برای سیستم عرضه برق کشور تشریح شده و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

### ۳- ساختار سیستم مرجع انرژی برای بخش برق کشور

مطالعه و بررسی سیستم عرضه انرژی اینجا می‌کند که تأثیرات متقابل زیر بخش‌های مختلف آن مد نظر قرار گیرد. بدین منظور از مفهوم «سیستم مرجع انرژی»<sup>۱</sup> به عنوان چهارچوب تحلیل مدل‌های عرضه استفاده می‌شود. سیستم مرجع انرژی، شبکه‌ای از تکنولوژی‌های مختلف با ورودی‌ها

انرژی می‌باشد. در این مدل کل هزینه‌های سیستم عرضه به منظور تأمین تقاضای انرژی مفید حداقل می‌گردد. بدین ترتیب این مدل ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی میان‌مدت و درازمدت بخش عرضه انرژی را فراهم می‌نماید. منطق مدل، بهینه‌سازی دینامیک مبتنی بر مهندسی سیستمها می‌باشد که در آن از ابزار برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده می‌شود [۱].

در این مدل، جریان انواع انرژی و کلیه تکنولوژی‌ها در مراحل مختلف استخراج، فرآورش، تبدیل، انتقال و توزیع مشخص می‌باشد. به طور کلی ورودی‌های مدل عمدتاً شامل: تقاضای انرژی مفید یا نهایی، مشخصات نواحی باری (تعداد آنها، طول دوره‌ها و سهم آنها در کل انرژی مصرفی سال)، شاخص‌های فنی-اقتصادی مربوط به تکنولوژی‌های انرژی، اطلاعات منابع انرژی، اطلاعات مربوط به آلاینده‌های زیست محیطی و سایر منابع اقتصادی (نظیر منابع مالی برای سرمایه‌گذاری) می‌باشد.

خروجی‌های اصلی مدل به طور کلی منعکس‌کننده ساختار بهینه سیستم عرضه انرژی، ترکیب بهینه فناوری‌ها و حامل‌های انرژی در کلیه سطوح سیستم عرضه، روند بهینه استخراج از منابع انرژی، حجم سرمایه‌گذاری لازم در بخش عرضه انرژی، میزان پخش و پراکنش آلاینده‌ها و هزینه نهایی تولید حامل‌های انرژی می‌باشند.

این مدل از ابزار برنامه‌ریزی ریاضی بهره می‌برد. مهمترین قیودی که در این مدل قابل بررسی هستند عبارتند از:

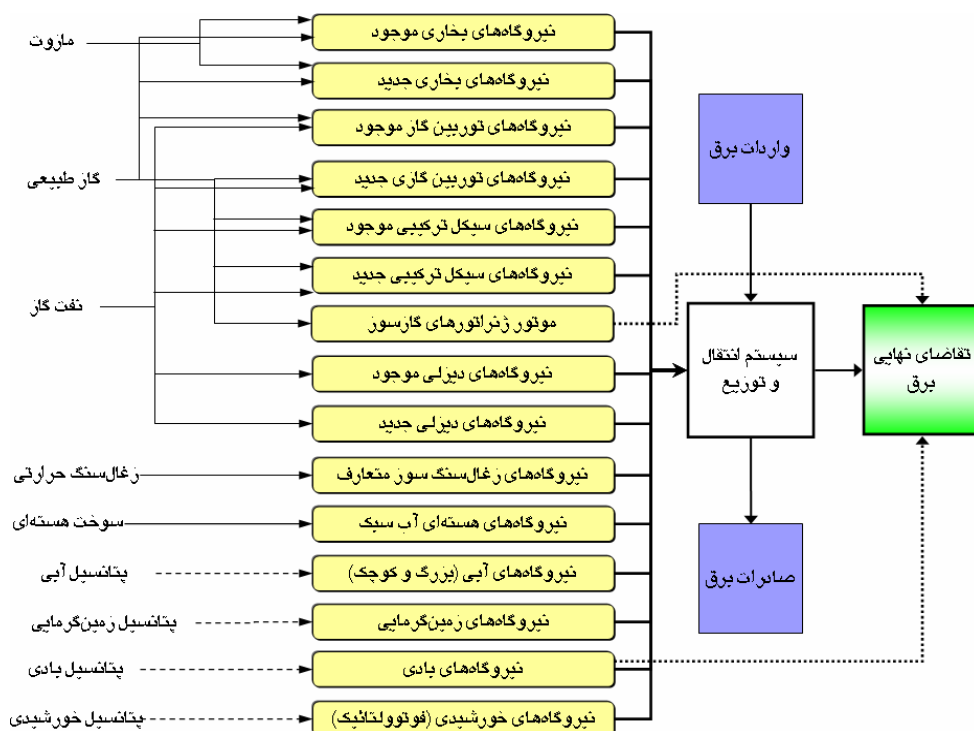
- قیود مربوط به تأمین تقاضای انرژی مفید (یا نهایی)
- قیود مربوط به شبکه توزیع
- قیود مربوط به شبکه انتقال
- قیود مربوط به سطوح فرآورش و تبدیل
- محدودیت منابع انرژی
- محدودیت‌های زیست محیطی
- محدودیت‌های فنی تکنولوژی‌های انرژی
- محدودیت منابع طبیعی (نظیر آب)
- محدودیت منابع اقتصادی (نظیر محدودیت‌های

<sup>۱</sup> Reference Energy System (RES)

### بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

مرجع انرژی طراحی شده برای بخش برق کشور نمایش داده شده است.

و خروجی‌های مشخص است که در آن حامل‌های انرژی مختلف نظیر نفت خام، گاز، زغال‌سنگ، فرآورده‌های نفتی، برق و ... در سطوح مختلف استخراج، انتقال اولیه، فرآورش، تبدیل، انتقال و توزیع جریان می‌یابند. در نمودار (۱) سیستم



نمودار (۱): سیستم مرجع انرژی برای عرضه برق در کشور

۵. نیروگاه سیکل ترکیبی موجود (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و نفت‌گاز)
۶. نیروگاه سیکل ترکیبی جدید (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و نفت‌گاز)
۷. نیروگاه دیزلی موجود
۸. نیروگاه دیزلی جدید
۹. موتور گاز سوز (با فرض حداکثر ظرفیت قابل نصب سالانه ۲۰۰ مگاوات و سقف کل ظرفیت قابل نصب ۲۰۰۰ مگاوات [۲])
۱۰. نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز
۱۱. نیروگاه هسته‌ای آب سبک
۱۲. نیروگاه آبی کوچک

- با توجه به این نمودار، سیستم مرجع انرژی طراحی شده برای بخش عرضه برق کشور در این مطالعه، دربرگیرنده فناوری‌های مختلف تولید برق اعم از فناوری‌های متعارف و جدید و همچنین انتقال و توزیع برق به شرح ذیل می‌باشد:
۱. نیروگاه بخاری موجود (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و مازوت)
  ۲. نیروگاه بخاری جدید (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و مازوت)
  ۳. نیروگاه گازی موجود (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و نفت‌گاز)
  ۴. نیروگاه گازی جدید (با فرض امکان استفاده از ۲ نوع سوخت گاز و نفت‌گاز)

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

تقاضا و اعمال شرایط اولیه و مرزی سیستم می‌باشد. در این مطالعه سال ۲۰۰۵ به عنوان سال پایه محاسبات در نظر گرفته شده است.

افق برنامه‌ریزی عرضه انرژی برابر با کل طول دوره مطالعه بر حسب سال است که به تعدادی دوره‌های زمانی یک یا چند ساله تفکیک می‌شود. در این مطالعه یک افق زمانی ۳۰ ساله شامل ۶ دوره زمانی ۵ ساله از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ میلادی به عنوان افق برنامه‌ریزی مدل سیستم عرضه انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده است. در این مدل، هر یک از دوره‌های زمانی با سال اول هر دوره مشخص می‌شوند.

### ۴-۲- تقاضای نهایی برق

میزان تقاضای برق به صورت برونزا در مدل عرضه انرژی الکتریکی اعمال شده است. پیش بینی روند تقاضای نهایی برق در طول دوره برنامه‌ریزی در جدول (۱) نشان داده شده است. نرخ رشد تقاضای برق در اوایل دوره حدود ۶ درصد در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که این رشد به تدریج تا حدود ۳ درصد در سال ۲۰۴۰ کاهش می‌یابد.

جدول (۱): پیش‌بینی تقاضای نهایی برق در طول دوره برنامه‌ریزی (میلیارد کیلووات ساعت)

دوره زمانی	۲۰۰۵	۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰
تقاضای نهایی برق	۱۳۶	۱۸۵	۲۴۸	۳۱۶	۳۹۴	۴۷۹	۵۶۹	۶۶۰

می‌شود. در این مطالعه، نواحی باری در نظر گرفته شده برای مدل سازی سیستم عرضه برق کشور، شامل ۱۲ ناحیه باری سالانه و ۳ ناحیه باری روزانه می‌باشد. بدین ترتیب هر سال مورد مطالعه به ۳۶ ناحیه باری مختلف تقسیم‌بندی شده است. اطلاعات مربوط به سهم هر یک از نواحی باری در کل تقاضای انرژی، بر اساس مطالعات منحنی‌های بار چندین سال گذشته (مندرج در آمار تفصیلی صنعت برق ایران [۳])، مطابق جدول (۲) در مدل اعمال شده است.

۱۳. نیروگاه آبی بزرگ

۱۴. نیروگاه زمین‌گرمایی

۱۵. توربین‌های بادی (دو حالت متصل به شبکه و خارج شبکه)

۱۶. سیستم‌های فوتولتائیک

۱۷. سیستم انتقال و توزیع برق

از آنجا که هدف این مطالعه عمدتاً ارزیابی فناوری‌های متعارف در سیستم عرضه برق می‌باشد، اثر تغییرات تکنولوژیکی و تجاری‌سازی فناوری‌های جدید نظیر نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی و پیل سوختی در این مطالعه لحاظ نشده است. سیستم فوتولتائیک نیز صرفاً جهت ارزیابی مقدماتی اثرات تولیدات پراکنده در مدل در نظر گرفته شده است.

### ۴- مفروضات و اطلاعات ورودی برای اجرای مدل

#### ۴-۱- سال پایه و افق زمانی مورد مطالعه

برای مدلسازی عرضه انرژی، یک سال پایه و یک افق زمانی برای برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود. سال پایه به عنوان سال مبنای محاسبات اقتصادی و سال آغازین برآورد میزان

### ۴-۳- نواحی باری

تقاضای برق در سیستم عرضه انرژی، در طول هر روز و همچنین در دوره‌های طولانی‌تر نظیر ماه یا سال، دچار تغییر می‌شود. برای در نظر گرفتن این تغییرات در برنامه‌ریزی سیستم، از مفهوم منحنی تداوم بار استفاده می‌شود. مدل MESSAGE برای در نظر گرفتن پراکندگی‌های زمانی بار و در نظر گرفتن مفهوم تداوم بار، از نواحی باری استفاده می‌کند و تقسیم بندی در دو سطح نواحی باری سالانه (جزئی از ۳۶۵ روز) و نواحی باری روزانه (جزئی از ۲۴ ساعت) انجام

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول (۲): سهم انرژی مصرفی در نواحی باری سالانه و روزانه (درصد)

	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین
سهم انرژی مصرفی در سال	۷/۸۵	۷/۶۹	۷/۸۰	۷/۷۱	۷/۸۱	۸/۷۱	۹/۱۰	۹/۶۶	۹/۴۹	۸/۷۵	۷/۹۱	۷/۵۲
سهم ناحیه باری پیک در روز	۲۵	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۵	۲۰	۲۱	۲۰	۲۵	۲۵	۲۵
سهم ناحیه باری میانی در روز	۴۸	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۴۱	۴۷	۴۹	۵۰	۵۰	۴۶	۵۰
سهم ناحیه باری پایه در روز	۲۷	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۴	۳۳	۳۰	۳۰	۲۵	۲۹	۲۵

## ۴-۴- قیمت حامل‌های انرژی

قیمت حامل‌های انرژی در سیستم مرجع انرژی الکتریکی به‌صورت زیر در مدل عرضه برق در نظر گرفته شده است:

- گاز طبیعی: معادل ۶۹۰ ریال بر متر مکعب [۴]
- نفت گاز: معادل حدود ۴۳۵۰ ریال بر لیتر [۴]
- نفت کوره: معادل حدود ۲۵۰۰ ریال بر لیتر [۴]
- زغال‌سنگ: معادل ۳۵۵ ریال بر کیلوگرم<sup>۱</sup> [۵]
- سوخت هسته‌ای: ۰/۵ سنت بر کیلووات-ساعت برق تولیدی [۶]
- برق وارداتی: ۸ سنت بر کیلووات-ساعت
- برق صادراتی: ۸ سنت بر کیلووات-ساعت
- جهت ارائه نتایج در سناریوی مرجع، قیمت‌های مزبور به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

## ۴-۵- ارزش حرارتی سوخت‌های فسیلی

ارزش حرارتی سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در نیروگاه‌های کشور بصورت زیر در مدل عرضه برق در نظر گرفته شده است:

- گاز طبیعی: ۸۶۰۰ کیلوکالری بر متر مکعب
- نفت گاز: ۹۲۳۳ کیلوکالری بر لیتر
- نفت کوره: ۹۷۹۱ کیلوکالری بر لیتر
- زغال‌سنگ: ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم (زغال‌سنگ شسته نشده [۵])

<sup>۱</sup> - این قیمت مربوط به زغال شسته نشده با ارزش حرارتی ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم می باشد.

## ۴-۶- محدودیت منابع

محدودیت منابع که شامل محدودیت مقدار سوخت‌ها یا ورودی‌های فناوری‌های تولید برق در سیستم مرجع انرژی الکتریکی می‌باشد، به‌صورت زیر در مدل عرضه برق اعمال شده است:

- گاز طبیعی: کنترل سهم گاز طبیعی در نیروگاه‌های با سوخت گاز، مازوت، نفت گاز و به‌صورت زیر:
  - حداکثر ۷۵ درصد مصرف سوخت سالانه در اوایل دوره (سال ۲۰۱۰) و افزایش این سهم به‌صورت خطی تا حدود ۸۷ درصد در اواخر دوره (سال ۲۰۴۰)
  - حداکثر ۳۴ درصد سهم سوخت در نواحی باری سرد (۴ ماه آذر، دی، بهمن و اسفند) در اوایل دوره (سال ۲۰۱۰) و افزایش این سهم به‌صورت خطی تا حدود ۴۶ درصد در اواخر دوره (سال ۲۰۴۰)
- نفت گاز: بدون محدودیت
- نفت کوره: بدون محدودیت
- زغال‌سنگ: با توجه به برآوردهای موجود حدود ۲۴۵ میلیون تن کل حجم ذخایر داخلی کشف شده قابل استحصال [۷]
- سوخت هسته‌ای: فرض شده است که نیاز از طریق منابع داخلی و واردات سوخت بدون هیچ محدودیتی قابل تأمین باشد.
- آبی کوچک: حداکثر ۴۲۰۰ مگاوات ظرفیت نصب [۷]
- آبی بزرگ: حداکثر ۱۷۵۰۰ مگاوات ظرفیت نصب [۷]
- زمین گرمایی: حداکثر ۷۴۰۰ مگاوات ظرفیت نصب [۸]

### بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

تولید داخلی (بر حسب انرژی) در اوایل دوره در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که امکان افزایش این مقدار به صورت خطی تا سقف ۵ درصد در اواخر دوره میسر باشد.

#### ۴-۷- مشخصات فنی-اقتصادی نیروگاه‌ها

مشخصات عمومی فنی و اقتصادی تکنولوژی‌های مورد نظر شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های ثابت و متغیر تعمیر و نگهداری، بازده، ضریب ظرفیت، طول عمر، مدت زمان ساخت و مصرف داخلی در جدول (۳) آورده شده است. برای ارزیابی ارزش حال کل هزینه‌های سیستم عرضه انرژی از نرخ تنزیل ۱۰ درصد و نرخ تعدیل ارز ۹۲۰۰ ریال به ازای هر دلار و هر یورو تقریباً معادل ۱/۴ دلار در مدل استفاده شده است.

- بادی: حداکثر ۷۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب به اضافه حداکثر ۱۰ درصد پتانسیل تولید پراکنده [۸]
- خورشیدی: بدون محدودیت
- واردات برق: با توجه به اینکه در سال ۲۰۰۵ نسبت واردات به کل تولید ناویژه داخلی حدود ۱/۲ درصد بوده است، برای واردات برق، قیدی به صورت حداکثر ۲ درصد تولید داخلی (بر حسب انرژی) در اوایل دوره در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که امکان افزایش این مقدار به صورت خطی تا سقف ۵ درصد در اواخر دوره میسر باشد.
- صادرات برق: با توجه به اینکه در سال ۲۰۰۵ نسبت صادرات به کل تولید ناویژه داخلی حدود ۱/۶ درصد بوده است، برای واردات برق، قیدی به صورت حداکثر ۲ درصد

(۳): اطلاعات فنی و اقتصادی تکنولوژی‌های سیستم عرضه برق کشور [۳، ۱۰، ۱۱]

تکنولوژی	هزینه سرمایه‌گذاری (\$/KW)	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت سالیانه (\$/KW)	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر (\$/KWh)	بازده (درصد)	ضریب ظرفیت <sup>۱</sup> (درصد)	طول عمر (سال)	مدت زمان ساخت (سال)	مصرف داخلی (درصد)
نیروگاه بخاری موجود	-	۵/۷	۰/۰۰۰۳	۳۶/۵	۷۵/۷	۳۰	-	۸
نیروگاه بخاری جدید	۷۵۳	۵/۷	۰/۰۰۰۳	۴۲	۷۵/۷	۳۰	۵	۸
نیروگاه گازی موجود	-	۱/۶	۰/۰۰۰۵	۲۷/۸	۶۸/۵۴	۱۵	-	۰/۵
نیروگاه گازی جدید	۳۵۰	۱/۶	۰/۰۰۰۵	۳۴/۳	۶۸/۵۴	۱۵	۲	۰/۵
نیروگاه سیکل ترکیبی موجود	-	۲/۶	۰/۰۰۰۳	۴۶	۷۲/۴	۳۰	-	۲
نیروگاه سیکل ترکیبی جدید	۶۱۴	۲/۶	۰/۰۰۰۳	۵۰	۷۲/۴	۳۰	۵	۲
نیروگاه دیزلی موجود	-	۳/۵	۰/۰۰۰۷	۳۱	۷۰	۱۰	-	۷
نیروگاه دیزلی جدید	۳۵۰	۳/۵	۰/۰۰۰۷	۳۳	۷۰	۱۰	۱	۷
موتور گازسوز	۶۷۶	۶/۷۶	۰/۰۰۰۸	۴۰	۸۰	۱۲	۱	۷
نیروگاه زغال‌سنگ سوز متعارف	۸۶۶/۵	۱۳/۶	۰/۰۰۰۴	۴۰	۷۵/۷	۳۰	۵	۸
نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک	۱۸۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۷	۳۳	۷۰	۴۰	۸	۸
نیروگاه آبی کوچک	-	۲۵	۰	-	۶۰	۴۰	-	۰/۳
نیروگاه‌های آبی بزرگ	-	۴/۴	۰/۰۰۰۳	-	۳۰	۵۰	-	۰/۳
نیروگاه‌های زمین‌گرمایی	۲۰۰۰	۴۰	۰	۳۵	۷۰	۳۰	۶	-
توربین‌های بادی	۱۱۰۰	۵/۵	۰/۰۰۴۵	-	۳۵	۲۰	۱	-
سیستم‌های فوتوولتائیک	۵۰۰۰	۹	۰/۰۰۴	-	۳۰	۱۵	۱	-
سیستم انتقال و توزیع برق	-	۰	۲/۰۱۳	۸۰	-	۳۰	۳	-

۱ - نسبت حداکثر انرژی قابل تولید از واحد به کل ظرفیت اسمی نصب شده

۲ - شامل کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری می‌باشد.

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

## ۵- نتایج حاصل از اجرای مدل

در این قسمت، ابتدا نتایج اصلی مدل شامل ترکیب بهینه نیروگاه‌ها در سیستم عرضه برق در قالب کل ظرفیت مورد نیاز برای نصب، تولید ناویژه نیروگاه‌ها، مقادیر بهینه واردات و صادرات و سطح بهینه ضریب بهره‌برداری از نیروگاه‌های مختلف در افق زمانی ۳۰ ساله ارائه می‌شود.

در جدول (۴) روند بهینه کل ظرفیت نصب شده، کل تولید ناویژه برق و متوسط ضریب بهره‌برداری از کل ظرفیت‌های نصب شده منعکس شده است. با توجه به این جدول، ضریب بهره‌برداری بهینه کل نیروگاه‌های تولید برق که دربرگیرنده ضریب قابلیت دسترسی، ضریب افت قدرت نیروگاه‌ها و سطح تولید آنها می‌باشد، دارای روندی صعودی بوده و از مقدار ۴۷ درصد در سال ۲۰۱۰ تا حدود ۶۳ درصد در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد. در حقیقت برنامه توسعه ظرفیت‌های جدید به نحوی صورت می‌گیرد که ضریب بهره‌برداری بالاتری حاصل شود.

نمودار (۲) ترکیب بهینه فناوری‌های مختلف نیروگاهی را بصورت کل ظرفیت نصب شده در یک دوره ۳۰ ساله نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار، نیروگاه‌های بخاری موجود، گازی موجود و سیکل ترکیبی موجود به مرور از رده خارج شده و فناوری‌های جدید توربین گازی، بخاری، سیکل ترکیبی، زغال‌سنگ‌سوز و آبی جایگزین آنها می‌شوند. لازم به توضیح است که انتخاب توربین گاز توسط مدل، عمدتاً جهت پوشش دادن نواحی باری پیک و میانی صورت می‌گیرد. نتیجه قابل توجهی که از این نمودار به دست می‌آید، افزایش قابل توجه سهم نیروگاه‌های بخاری در ترکیب بهینه نیروگاهی کشور است. علت اصلی این مسئله اعمال قیود محدودیت استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت نیروگاهی در ۴ ماه سرد سال می‌باشد. در حقیقت با اعمال این قیود، از سهم

نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و توربین گاز کاسته شده و نیروگاه بخاری جایگزین آنها می‌شود. علت این مسأله، امکان استفاده نیروگاه‌های بخاری از سوخت مازوت است که ارزش اقتصادی آن از نفت گاز کمتر می‌باشد. علاوه بر این، قیود مذکور سبب می‌شوند که نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز نیز توجیه اقتصادی پیدا کرده و وارد ترکیب عرضه برق شوند. نیروگاه‌های بادی نیز، در حالت تولید پراکنده توجیه اقتصادی یافته و ظرفیت‌سازی برای آنها تا مقدار سقف اعمال شده برای حداکثر ظرفیت قابل نصب آنها (۷۰۰ مگاوات) در مدل پیشنهاد می‌شود.

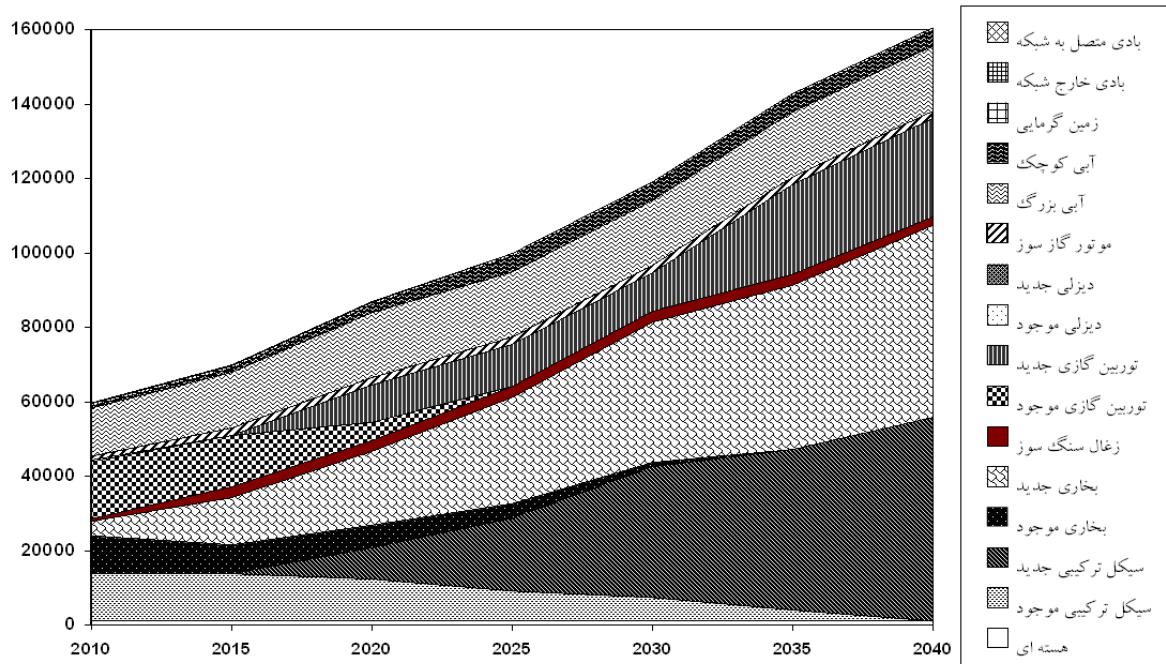
جدول (۵) روند بهینه تولید ناویژه نیروگاه‌های کشور را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد. در این جدول، سطح بهینه مبادلات برق با کشورهای همسایه نیز ارائه شده است. متناظر با این جدول، در جدول (۶) ضریب بهره‌برداری بهینه نیروگاه‌های مختلف به تفکیک وضعیت‌های عملیاتی مختلف (نوع سوخت مصرفی) مشخص شده است. در حالتی که کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها صفر باشد، از علامت خط تیره برای نشان دادن ضریب بهره‌برداری در جداول استفاده شده است. با توجه به این جداول، محدودیت گازرسانی به نیروگاه‌ها در ماه‌های سرد سال منجر به عدم ظرفیت‌سازی برای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جدید در اوایل دوره و بالا بودن ضریب بهره‌برداری نیروگاه‌های بخاری در حالت استفاده از سوخت مازوت (و کاهش آن به مرور زمان) گردیده است. لازم است تأکید شود که مقادیر بهینه به دست آمده با فرض قیمت‌های در نظر گرفته شده برای سوخت و مبادلات برق و همچنین قیود اعمال شده بر ترکیب سوخت‌ها حاصل شده است. در صورت تغییر این قیمت‌ها (بخصوص برای گاز طبیعی)، ترکیب متفاوتی برای نیروگاه‌ها بدست خواهد آمد.

جدول (۴): وضعیت عملیاتی بهینه کل سیستم عرضه برق کشور

	واحد	۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰
کل ظرفیت نصب شده	مگاوات	۵۹۷۰۶	۶۹۸۹۴	۸۶۹۰۸	۹۹۸۶۸	۱۱۹۱۵۱	۱۴۲۹۲۳	۱۶۰۶۱۸
تولید ناویژه کل	میلیارد کیلووات ساعت	۲۴۱	۳۲۳	۴۱۸	۵۲۵	۶۳۷	۷۵۶	۸۸۴
ضریب بهره‌برداری کل	درصد	۴۶	۵۳	۵۵	۶۰	۶۱	۶۰	۶۳



بیست و سومین کنفرانس بین المللی برق



نمودار (۲): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاههای تولید برق در یک افق ۳۰ ساله (مگاوات)

جدول (۵): روند بهینه تولید ناویژه نیروگاههای تولید برق و سطح مبادلات در یک افق ۳۰ ساله (میلیارد کیلووات ساعت)

		۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰
سیکل ترکیبی موجود	با سوخت گاز	۷۴/۲۶	۷۹/۵۴	۷۱/۵۴	۴۹/۷۲	۲۷/۱۲	۰/۰۰	۰/۰۰
	با سوخت نفت گاز	۱/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
سیکل ترکیبی جدید	با سوخت گاز	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۳/۲۰	۱۲۴/۳۱	۲۲۲/۵۸	۲۷۲/۴۰	۳۴۵/۰۷
	با سوخت نفت گاز	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰
بخاری موجود	با سوخت مازوت	۲۲/۱۰	۱۶/۸۴	۱۳/۱۸	۸/۳۷	۱/۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰
	با سوخت گاز	۴۲/۰۶	۳۲/۴۷	۲۴/۷۴	۱۵/۱۳	۴/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بخاری جدید	با سوخت مازوت	۲۲/۱۵	۳۹/۸۴	۴۹/۱۳	۶۳/۷۸	۸۱/۵۱	۹۳/۸۵	۱۰۹/۲۸
	با سوخت گاز	۳/۷۱	۴۴/۲۱	۸۲/۳۴	۱۲۵/۶۲	۱۶۸/۴۴	۱۹۷/۵۴	۲۳۰/۹۵
زغال سنگ سوز		۴/۳۱	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰	۱۸/۲۰	۱۳/۸۰
هسته ای		۶/۱۳	۶/۱۳	۶/۱۳	۶/۱۳	۶/۱۳	۶/۱۳	۶/۱۳
توربین گازی موجود	با سوخت گاز	۱۷/۹۸	۲۲/۷۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
	با سوخت نفت گاز	۱/۰۶	۰/۷۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
توربین گازی جدید	با سوخت گاز	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۳/۲۶	۲۵/۹۹	۲۰/۵۸	۸۳/۴۵	۹۴/۶۵
	با سوخت نفت گاز	۰/۰۰	۰/۰۰	۴/۱۰	۴/۳۰	۲/۳۷	۲/۱۲	۱/۷۶
دیزلی موجود		۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
دیزلی جدید		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
موتور گاز سوز		۶/۱۶	۱۳/۱۶	۱۱/۵۱	۱۱/۴۴	۱۱/۵۵	۱۲/۱۴	۱۱/۹۱
آبی بزرگ		۳۴/۱۶	۳۹/۴۲	۴۵/۹۹	۴۵/۹۹	۴۵/۹۹	۴۵/۹۹	۴۵/۹۹
آبی کوچک		۲/۱۰	۵/۲۶	۱۰/۵۱	۲۲/۰۸	۲۲/۰۸	۲۲/۰۸	۲۲/۰۸
زمین گرمایی		۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۰۰
بادی خارج شبکه		۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵
بادی متصل به شبکه		۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
واردات برق		۳/۷۶	۶/۹۹	۶/۹۱	۸/۸۳	۱۷/۷۶	۲۴/۵۷	۲۸/۰۷
صادرات برق		۴/۵۳	۷/۵۰	۱۱/۷۹	۱۷/۴۱	۲۴/۵۱	۳۳/۰۹	۴۳/۰۷

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول (۶): سطح بهینه ضریب بهره‌برداری از نیروگاه‌های تولید برق در یک افق ۳۰ ساله (درصد)

		۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰
سیکل ترکیبی موجود	با سوخت گاز	۶۶/۵	۷۱/۲	۷۲/۰	۷۰/۰	۴۸/۸	۰/۰	-
	با سوخت نفت گاز	۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۴	۰/۰	۰/۰	-
سیکل ترکیبی جدید	با سوخت گاز	-	-	۷۲/۳	۷۲/۴	۷۲/۲	۷۲/۰	۷۱/۹
	با سوخت نفت گاز	-	-	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
بخاری موجود	با سوخت مازوت	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷	۱۸/۵	-	-
	با سوخت گاز	۴۷/۰	۴۷/۶	۴۶/۳	۴۴/۶	۴۴/۶	-	-
بخاری جدید	با سوخت مازوت	۶۴/۸	۳۵/۹	۲۸/۳	۲۵/۵	۲۴/۷	۲۴/۲	۲۴/۱
	با سوخت گاز	۱۰/۹	۳۹/۸	۴۷/۴	۵۰/۱	۵۱/۰	۵۱/۰	۵۱/۰
زغال سنگ سوز		۷۵/۷	۷۵/۷	۷۵/۷	۷۵/۷	۷۵/۷	۷۱/۰	۶۹/۳
هسته ای		۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰
توربین گازی موجود	با سوخت گاز	۱۳/۴	۱۸/۸	۰/۰	-	-	-	-
	با سوخت نفت گاز	۰/۸	۰/۶	۰/۰	-	-	-	-
توربین گازی جدید	با سوخت گاز	-	-	۲۶/۵	۲۶/۲	۲۲/۷	۳۹/۴	۴۰/۸
	با سوخت نفت گاز	-	-	۴/۷	۴/۳	۲/۶	۱/۰	۰/۸
دیزلی موجود		۱۰/۷	-	-	-	-	-	-
دیزلی جدید		-	-	-	-	-	-	-
موتور گاز سوز		۷۰/۳	۷۵/۱	۶۵/۷	۶۵/۳	۶۵/۹	۶۹/۳	۶۸/۰
آبی بزرگ		۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰
آبی کوچک		۶۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰
زمین گرمایی		۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰	۷۰/۰
بادی خارج شبکه		۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰
بادی متصل به شبکه		۳۵/۰	۳۵/۰	۳۵/۰	-	-	-	-

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر فرآیند طراحی و توسعه مدل عرضه انرژی الکتریکی برای کشور با استفاده از نرم‌افزار MESSAGE تشریح گردید و نتایج حاصل از اجرای مدل، تحت شرایطی که نیروگاه‌های حرارتی متعارف کشور با محدودیت استفاده از سوخت گاز طبیعی در طول سال و به‌طور خاص در ۴ ماه سرد مواجه باشند، ارائه شد.

سهم نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری، توربین گازی و زغال‌سنگ‌سوز از کل ظرفیت‌های موجود و نصب شده در اوایل دوره (سال ۲۰۱۵) به ترتیب ۱۸، ۲۹، ۲۰ و ۴ درصد برآورد می‌گردد. تحت شرایط محدودیت سوخت‌رسانی به نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز در رقابت با سایر نیروگاه‌ها توجیه اقتصادی پیدا کرده و ضمن پیشنهاد ظرفیت‌سازی برای آنها، با حداکثر ضریب بهره‌برداری ممکن (با توجه به ضریب ظرفیت آنها و همچنین محدودیت ذخایر

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

### مراجع و مأخذ

- [1]. Messner S., Strubegger M., "User's Manual of MESSAGE III". WP-95-69. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Austria, 1995.
- [۲]. دفتر خصوصی سازی صنعت برق وزارت نیرو، برآورد کارشناسی.
- [۳]. شرکت مادر تخصصی توانیر، آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ۱۳۸۴.
- [۴]. لایحه بودجه سال ۱۳۸۶.
- [۵]. سازمان توسعه برق ایران، مطالعات گروه طرح‌های نیروگاه‌های بخاری، ۱۳۸۶.
- [۶]. World Nuclear Association, The Economics of Nuclear Power, 2008, <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>
- [۷]. کمیسیون تخصصی شورای عالی انرژی کشور، چشم‌انداز ۲۰ ساله انرژی کشور، شهریور ۱۳۸۶.
- [۸]. برآوردهای کارشناسی سازمان انرژی‌های نو (سانا).
- [۹]. معاونت برنامه‌ریزی شرکت توانیر، اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های کشور، ۱۳۸۴.
- [۱۰]. دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، گروه برنامه‌ریزی جامع برق و انرژی، گزارش مربوط به تعیین عرضه بهینه حامل‌های انرژی با استفاده از مدل EFOM، ۱۳۸۴.
- [۱۱]. بررسی‌های اقتصادی کارشناسان سازمان انرژی‌های نو (سانا).

قابل استحصال داخلی زغال‌سنگ حرارتی) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سهم نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری، توربین گازی و زغال‌سنگ‌سوز از کل ظرفیت‌های نصب شده در اواخر دوره (سال ۲۰۴۰) به ترتیب ۳۴، ۳۲، ۱۷ و ۱/۴ درصد از کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها می‌باشد. در این حالت به علت اتمام ذخایر داخلی زغال‌سنگ و همچنین فرض کاهش محدودیت گاز رسانی، سهم نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز از ترکیب عرضه بسیار کاهش می‌یابد. یکی از نتایج مهم در این حالت، اختصاص سهم قابل توجهی از ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور به نیروگاه‌های بخاری است.

به منظور ارزیابی اثرات محدودیت‌های گاز رسانی به نیروگاه‌ها، مدل در سناریوی دیگری و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های مزبور اجرا گردید که نتیجه آن حذف نیروگاه‌های بخاری و زغال‌سنگ‌سوز از ترکیب بهینه سیستم عرضه برق و افزایش قابل ملاحظه سهم نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و توربین گازی جدید بود. به‌طور خلاصه نتایج به‌دست آمده در خصوص توسعه بهینه سیستم عرضه برق و ترکیب بهینه نیروگاهی نشان می‌دهد که با توجه به وضعیت موجود نیروگاه‌های کشور، محدودیت گازرسانی به نیروگاه‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای بر برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت توسعه نیروگاه‌ها و تولید برق کشور خواهد داشت. در این شرایط به منظور تداوم تولید برق، استفاده از سوخت‌های نیروگاهی جایگزین و یا تکنولوژی‌های دیگر مورد توجه قرار می‌گیرد. چنین رویکردی نه تنها وضعیت سیستم عرضه برق در ماه‌های سرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه به علت تغییر الگوی بهینه توسعه نیروگاه‌ها بر وضعیت عملیاتی نیروگاه‌ها در سایر ماههای سال نیز مؤثر است.