



مطالعه‌ی نقش مؤثر برق هسته‌ای در کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و تغییر آب و هوا در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها در ایران

نوید ایوبیان*، رسول موسی رضایی

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

چکیده: تاکنون مطالعه‌های مختلفی در راستای بررسی اثر نقش انرژی هسته‌ای در کاهش هزینه‌های زیست محیطی و تغییرات آب و هوایی با استفاده از مدل‌های مختلف اقتصادی و سناریوهای انرژی در کشورهای مختلف انجام شده است. با این حال، این موضوع در کشور ایران تاکنون مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است. در این پژوهش با ارایه‌ی مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا، این موضوع در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها نظیر نیروگاه‌های فسیلی، تجدیدپذیر، گازی، بخار و سیکل ترکیبی تحلیل شده است. در این مدل، تأثیر هزینه‌های خارجی بر برنامه‌ریزی آتی انرژی الکتریکی به دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن دو سناریوی پایه و هسته‌ای، مطالعه‌ها در چارچوب هدف‌ها و تحلیل تأثیر هزینه‌های خارجی انجام شد. به منظور راستی‌آزمایی مدل پیشنهادی، نتایج این پژوهش با نتایج مدل MESSAGE مقایسه و دقت و صحت مدل پیشنهادی اثبات شد. بر اساس نتایج این پژوهش، گزینه‌ی برق هسته‌ای راهکار مؤثری در کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی در آینده خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: برق هسته‌ای، اثرهای زیست محیطی، هزینه‌های خارجی

The Role of Nuclear Power in the Reduction of Environmental Pollutants and Climate Changes Compared to other Power Plants in Iran

N. Ayoobian*, R. Mousarezaei

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences and Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan- Iran

Abstract: Up to now, many studies have been conducted to investigate the role of nuclear energy in reducing environmental costs and climate changes considering the different economic models and energy scenarios in different countries. However, to best of our knowledge, there is no report on this subject in Iran. This study presents a model based on dynamic programming which compares the environmental costs of nuclear power plants with other power plants such as fossil, renewable, gas, steam and combined cycle plants. This model evaluates the impact of external costs in the future planning of electrical energy and by considering baseline and nuclear scenarios, impact studies of external costs are performed. In order to verify the proposed model, the results were compared with the available data and MESSAGE results, and the accuracy of this model was proved. According to this research, nuclear power is an effective strategy for reducing environmental pollution in the future.

Keywords: Nuclear Power, Environmental Impact, External Costs



۱. مقدمه

ورودی به مدل است. از طرف دیگر به منظور بررسی تأثیرهای آلاینده‌های زیست‌محیطی و بیان نقش انرژی هسته‌ای در بهبود وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای، پارامتر هزینه‌های خارجی با قابلیت وزندهی به صورت مجزا و براساس ضریب‌های مختلفی نظیر انتشار در مدل پیشنهادی جاسازی می‌شود. پس از این مرحله و طی دو سناریوی پایه و هسته‌ای، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در یک افق سی ساله برای کشور ایران تخمین زده و به منظور راستی آزمایی مدل پیشنهادی، نتایج این مطالعه با نتایج حاصل از مدل MESSAGE^(۱) وزارت نیرو مقایسه خواهد شد.

۲. بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی

در سامانه‌های انرژی، رابطه‌ها و تعامل بین روش‌های مختلف تولید انرژی و فن‌آوری‌های مصرف باید به گونه‌ای توصیف شوند که روند تجزیه و تحلیل موردهای مختلف به خوبی ایجاد و نتیجه‌های مختلفی از این بررسی‌ها به دست آید. تلاش‌های قابل توجهی در دهه‌های گذشته به منظور توسعه‌ی رویکردهای مختلف نسبت به مدل‌های انرژی و استفاده از رابطه‌های ریاضی در آنها صورت پذیرفته است. نوع برنامه‌ریزی و چگونگی به کارگیری پارامترهای مختلف می‌تواند در تولید انرژی الکتریکی با کم‌ترین آلودگی زیست‌محیطی تأثیرگذار باشد. از طرف دیگر «ایجاد» انرژی پایدار در برنامه‌ریزی انرژی هر کشور، لزوم نگرش به سامانه‌ی انرژی به صورت اجزایی مرتبط با یکدیگر و در افق‌های زمانی مختلف کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت با دیدگاه تأمین نیازهای انرژی آیندگان را بیش از پیش باعث شده است. در اکثر سامانه‌های انرژی، هدف‌های کلی یا همان هدف‌های آتی سامانه عبارت‌اند از: پیش‌بینی، پس‌بینی و تحلیل سناریوهای مختلف. هدف‌های اختصاصی در این فرایند، موضوع‌هایی نظیر بررسی تقاضا و عرضه‌ی انرژی و تحلیل تأثیر و ارزیابی آند [۷]. تاکنون مدل‌های مختلفی با توجه به خصوصیت‌های بیان شده، در این حوزه پیشنهاد شده است که برخی از آنها عبارت‌اند از [۸، ۹]: مدل تخصیص بازار (MARKAL)^(۲)، مدل بهینه‌سازی جریان انرژی (EFOM)^(۳)، مدل یکپارچه‌ی بهینه‌سازی جریان انرژی تخصیص بازار (TIMES)^(۴)، سامانه‌ی برنامه‌ریزی خودکار وین (WASP)^(۵)، مدل انتخاب استراتژی تأمین انرژی و تأثیر عمومی زیست‌محیطی آن (MESSAGE)، مدل نمایش فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر (RETScreen)^(۶)، مدل برنامه‌ریزی بلندمدت جای‌گزین‌های انرژی (LEAP)^(۷)، مدل

انرژی یکی از عامل‌های ایجاد امنیت ملی در بسیاری از کشورهای جهان است و روند تولید و مصرف فعلی و آتی حامل‌های انرژی دارای اهمیت به سزایی است. بنابراین، برنامه‌ریزی دقیق در خصوص سامانه‌ی انرژی جزء جدایی‌ناپذیر چشم‌انداز پیشرفت صنعتی، زیست‌محیطی و زیست‌شناختی هر کشور است. سهم صنعت برق در تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG) ۲۷٪ بوده و تاکنون بیش‌ترین و سریع‌ترین رشد در انتشار این گازها را داشته است [۱]. هم‌چنین به‌رغم مطالعه‌های انجام شده در خصوص نقش انرژی هسته‌ای در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و تغییر اقلیم، هنوز اهمیت تأثیرگذاری این انرژی پاک در مبحث‌های زیست‌محیطی به خوبی شناخته نشده است. البته بررسی و مطالعه‌ی نقش برق هسته‌ای در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای مختلفی نظیر کره‌ی جنوبی، ترکیه [۲]، انگلستان و آمریکا [۳] بررسی شده است. در حال حاضر، مجموع نگرانی‌ها در خصوص آلاینده‌های زیست‌محیطی و تغییر اقلیم در بسیاری از محافل سبب شده چشم‌انداز انرژی هسته‌ای به‌جای سایر منابع‌های فسیلی و منبع‌های دیگر انرژی بهبود چشم‌گیری بنماید.

در مورد انرژی هسته‌ای چالش‌های زیادی وجود دارد که قابل توجه‌ترین آنها، تولید پسماندهای پرتوزا، خطر انتشار مواد پرتوزا و مقاومت‌های عمومی هستند. این هشدارها انرژی هسته‌ای را متمایز از سایر فن‌آوری‌های انرژی می‌نماید و شاید این گمان ایجاد شود که این انرژی پاک شاید جایگاهی در آینده‌ی تأمین انرژی در دنیا نداشته باشد. اما این نکته حایز اهمیت است که بدون انرژی هسته‌ای، کاهش تغییر اقلیم در برخی از موارد با روش‌های بسیار پرهزینه امکان‌پذیر است و مطالعه‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و سایر محافل علمی معتبر این مورد را تصدیق می‌کنند [۴، ۵]. در پژوهشی با عنوان چشم‌انداز نیروگاه‌های هسته‌ای برای توسعه‌ی پایدار انرژی در جمهوری اسلامی ایران با هدف بررسی سهم نیروگاه‌های فسیلی از کل سهم تولید برق در ایران، سهم مؤثر عملی تولید برق از هر یک از منابع انرژی با دیدگاهی مبنی بر امکانات اقتصادی بررسی شده است [۶].

در این پژوهش، در ابتدا برخی از مهم‌ترین مدل‌های عرضه‌ی انرژی معرفی می‌شوند. سپس با توجه به مشخصه‌های مدل عرضه‌ی انرژی، مدلی براساس نیازهای کشور ایران پیشنهاد می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل پیشنهادی، تطابق مطلوب با اطلاعات



$$f = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left(\frac{FCR_{(k)} PC_{(k)}}{CF_{(k)}} C_{(t,k)} LF_{(t)} \right) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (FOM_{(k)} C_{(t,k)} LF_{(t)}) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (FC_{(k)} P_{(t,k)} LF_{(t)}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left(\frac{VOM_{(k)}}{CF_{(k)}} P_{(t,k)} LF_{(t)} \right) \\ + \sum_{t=1}^T (PR IM_{(t)} LF_{(t)}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (XC_{(k)} P_{(t,k)} LF_{(t)}) \quad (1)$$

پارامترها و متغیرهای معادله به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ درج شده‌اند. هم‌چنین LF ضریب زمانی است که مقدار آن به نرخ بهره و نرخ تورم وابسته بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LF_{(t)} = \left(\frac{1+d}{1+i} \right)^t \quad (2)$$

جدول ۱. پارامترهای تابع پیشنهادی

پارامتر	توضیحات
T	افق زمانی برنامه‌ریزی
K	تعداد انواع نیروگاه‌ها
d	نرخ تورم ^(۱۰) (%)
i	نرخ بهره ^(۱۱) (%)
$FCR_{(k)}$	نرخ شارژ ثابت ^(۱۲) برای نیروگاه نوع k ام (%)
$PC_{(k)}$	هزینه‌ی کلی ^(۱۳) نیروگاه نوع k ام (\$/kW)
$CF_{(k)}$	ضریب ظرفیت ^(۱۴) نیروگاه نوع k (%)
$FOM_{(k)}$	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ثابت ^(۱۵) نیروگاه نوع k ام (\$/kW)
$VOM_{(k)}$	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری متغیر ^(۱۶) نیروگاه نوع k ام (\$/kWh)
$FC_{(k)}$	هزینه‌ی سوخت ^(۱۷) (\$/MWh)
PR	قیمت برق وارداتی در سال پایه (\$/kWh)
$XC_{(k)}$	هزینه‌های خارجی ^(۱۸) برای فن آوری نوع k ام (\$/MWh)
$C'_{(k)}$	ظرفیت استاندارد نیروگاه نوع k (kW)
$EF_{(k)}$	ضریب بازده نیروگاه نوع k (%)
$D_{(t)}$	تقاضا در سال t (kW h)
D_{base}	تقاضا در سال پایه (kW h)
e_D	نرخ سالانه‌ی رشد بار (%)

جدول ۲. متغیرهای تابع پیشنهادی

متغیر	توضیحات
$C(t, k)$	ظرفیت نیروگاه نوع k در سال t ام (kW)
$P(t, k)$	تولید نیروگاه نوع k در سال t ام (kWh)
$IM(t)$	برق وارداتی در سال t ام (kW h)
$Y(t, k)$	عدد صحیح برای تعیین ظرفیت نیروگاه‌های استاندارد

ارزیابی توان و انرژی^(۸) (ENPEP) و مدل پاسخ جهانی به تغییرات در محیط‌زیست انسانی^(۹) (GRACE).

همان‌طور که مشخص است در زمان‌های مختلف، مدل‌های عرضه‌ی انرژی متفاوتی با توجه به نیاز هر کشور ارایه شده است و مهم‌ترین دلیل این موضوع، نوع اطلاعات ورودی و نیازهای مختلف هر کشور به هر یک از این مدل‌ها است. برخی از این مدل‌ها نظیر مدل MESSAGE نیز در ایران پیاده شده‌اند.

۳. مدل پیشنهادی برای بررسی اثرهای زیست‌محیطی و تأمین آتی برق

در این بخش، مدلی بر مبنای شرایط کشور ایران پیشنهاد می‌شود. ساختار مدل شامل هدف‌های کلی و اختصاصی است و براساس ویژگی‌های زیر پیشنهاد شده است:

الف) ایجاد ساختاری که پارامترهای مدل پیشنهادی درون معادله‌های آن جاسازی شده و در حقیقت درجه‌ی درون‌سازی رعایت شده باشد.

ب) توصیف نهایی مناسب انرژی به‌منظور تحلیل قابلیت فن آوری در بهبود عملکرد انرژی الکتریکی؛

ج) ارایه‌ی تحلیلی تفصیلی و دقیق از فن آوری‌های جدید در مدل برای بررسی قابلیت فن آوری به‌منظور جای‌گزینی سوخت و فن آوری‌های جدید؛

د) استفاده از فرضیات بیرونی نظیر رشد اقتصادی، عرضه و تقاضای انرژی در سال‌های آتی؛

ه) ایجاد ساختار مناسب برای بررسی اثرهای زیست‌محیطی هر یک از فن آوری‌های موجود و فن آوری‌های جدید؛

به‌این ترتیب این مدل قادر است براساس اطلاعات مختلف در کشور ایران، برنامه‌ریزی دقیقی از به‌کارگیری انرژی هسته‌ای انجام دهد.

۱.۳. تابع هدف و قید و بندهای مدل پیشنهادی

در مدل پیشنهادی، هدف کمینه نمودن هزینه‌های تمام نیروگاه‌ها در افق زمانی برنامه‌ریزی است. بر این اساس، تابع هدف مسأله به‌صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته شد:



در رابطه‌ی بالا، تقاضا تابعی از زمان است و با نرخ ثابتی به صورت سالانه افزایش می‌یابد

$$D_{(t)} = D_{base} \cdot (1 + e_D)^t \quad (6)$$

۴. قید مقدار مجاز انرژی وارداتی و تولیدی: برای مقدار انرژی الکتریکی تولیدی هر نوع نیروگاه و انرژی الکتریکی وارداتی در هر سال حدودی در نظر گرفته می‌شود. در این جا حد بالایی برای انرژی الکتریکی تولیدی و وارداتی در نظر گرفته نشده و تنها فرض شده که این مقادارها مثبت‌اند:

$$IM_{(t)} \geq 0, P_{(t,k)} \geq 0 \quad (7)$$

۵. قید محدودیت آب: در این قید با توجه به بحرانی شدن وضعیت بارش‌ها و ایجاد خشک‌سالی‌های اخیر در کشور، ظرفیت نهایی برای نیروگاه‌های آبی در حدود ۲۰ هزار مگاوات در نظر گرفته شده است.

۶. قید باد: با توجه به مطالعه‌های انجام شده در سطح کشور و وضعیت وزش باد، در این قید ظرفیت نیروگاه‌های بادی در حدود ۵۰ هزار مگاوات در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به رابطه‌ی قید دوم، متغیرهای C و Y ، متغیرهای وابسته هستند. بنابراین هدف مسأله یافتن مقادارهای $P_{(t,k)}$ ، $Y_{(t,k)}$ و $IM_{(t)}$ است؛ به نحوی که تابع هزینه، f ، کمینه شود.

۲.۳. مشخصه‌های فنی و اقتصادی

برای مدل‌سازی و حل مسأله به مشخصه‌های فنی و اقتصادی نیاز است. این مشخصه‌ها با توجه به اطلاعات و آمار کشور ایران [۱۰-۱۲] استخراج و محاسبه شده است.

نرخ تورم: عبارت است از افزایش غیرمتناسب سطح عمومی قیمت. در این پژوهش نرخ تورم، معادل نرخ تورم سال ۱۳۹۳ (۱۵/۶٪) در نظر گرفته شده است.

نرخ بهره: عبارت است از نرخ‌ی که بابت جلوگیری از کاهش ارزش پول پرداختی در امروز و دریافتی در آینده (به دلیل ارزش زمانی پول و نرخ تورم) از وام‌گیرنده دریافت می‌شود. در این پژوهش نرخ بهره ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.

معادله‌ی ۱ شامل شش جمله به شرح زیر است:

- جمله‌ی اول (هزینه‌های شارژ سالانه): شامل هزینه‌های شارژ ثابت بوده و برای نیروگاه‌های مختلف در بازه‌های زمانی متفاوت ممکن است متغیر باشد. کیفیت نیروگاه در این جا حایز اهمیت است.
 - جمله‌ی دوم (هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ثابت): شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری ثابت سالیانه برای تمام نیروگاه‌ها بوده و وابسته به ظرفیت نامی نیروگاه‌ها است.
 - جمله‌ی سوم (هزینه‌ی سوخت): شامل هزینه‌ی سوخت نیروگاه‌ها است.
 - جمله‌ی چهارم (هزینه‌ی تعمیر و نگهداری متغیر): شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری متغیر سالیانه برای تمام نیروگاه‌ها بوده و وابسته به انرژی تولیدی نیروگاه‌ها است.
 - جمله‌ی پنجم (هزینه‌ی واردات انرژی): شامل هزینه‌های مربوط به واردات برق از کشورهای همسایه است.
 - جمله‌ی ششم (هزینه‌های خارجی): شامل تمام هزینه‌های خارجی مربوط به محیط زیست است.
- هم‌چنین قید و بندهای مسأله عبارت‌اند از:
۱. قید توان: توان تولید سالانه‌ی هر نیروگاه باید از حد مشخصی کم‌تر باشد (معادله‌ی ۳). این حد مشخص وابسته به ظرفیت، بازده و ضریب ظرفیت هر نیروگاه است.

$$P_{(t,k)} \leq 1760 \cdot C_{(t,k)} \cdot EF_{(k)} \cdot CF_{(k)} \quad (3)$$

۲. قید افزایش ظرفیت: با توجه به افزایش تدریجی بار، ظرفیت نیروگاه‌ها در طول سال‌های برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. این افزایش ظرفیت باید مضربی از ظرفیت پایه (استاندارد) برای هر نیروگاه باشد. ظرفیت هر سال نیروگاه، مجموع ظرفیت سال قبل به اضافه‌ی افزایش ظرفیت آن است (معادله‌ی ۴). بر این اساس لازم است ظرفیت هر نیروگاه در سال پایه مشخص باشد.

$$C_{(t,k)} = C_{(t-1,k)} + Y_{(t,k)} \cdot C'_{(t,k)} \quad (4)$$

۳. قید تعادل بار: لازم است تولید و واردات انرژی در هر سال، بیش‌تر یا مساوی تقاضای آن سال باشد.

$$\sum_{k=1}^K P_{(t,k)} + IM_{(t)} \geq D_{(t)} \quad (5)$$

**جدول ۳. هزینه سرمایه‌گذاری انواع نیروگاه‌ها [۱۵]**

هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (\$/kW)	فن‌آوری
۱۰۷۰	نیروگاه بخار
۵۰۵	نیروگاه گازی
۷۲۰	نیروگاه سیکل ترکیبی
۵۰۵	نیروگاه دیزلی
برق - آبی بزرگ: ۷۰۰-۲۰۰۰	نیروگاه برق-آبی
برق - آبی کوچک: ۱۰۰۰-۲۵۰۰	
۱۸۰۰	نیروگاه بادی
۵۰۰-۴۰۰۰	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
ALWR: ۵۸۰۰, LWR: ۴۱۰۰, PWR: ۵۱۰۰	نیروگاه هسته‌ای

جدول ۴. ضریب ظرفیت انواع نیروگاه‌ها [۱۵]

ضریب ظرفیت (%)	فن‌آوری
۷۸	نیروگاه بخار
۸۴	نیروگاه گازی
۸۲	نیروگاه سیکل ترکیبی
۷۰	نیروگاه دیزلی
برق - آبی بزرگ: ۱۰-۴۰	نیروگاه برق-آبی
برق - آبی کوچک: ۵۰-۷۰	
۳۵-۳۰	نیروگاه بادی
۳۰-۲۰	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
ALWR: ۸۵, LWR: ۸۰, PWR: ۸۰	نیروگاه هسته‌ای

جدول ۵. بازده انواع نیروگاه‌ها [۱۵]

بازده (%)	فن‌آوری
۳۶.۶	نیروگاه بخار
۲۹.۵	نیروگاه گازی
۴۴.۷	نیروگاه سیکل ترکیبی
۳۳.۷	نیروگاه دیزلی
۱۰۰	نیروگاه برق-آبی
۳۵-۳۰	نیروگاه بادی
۴۳-۸	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
ALWR: ۳۳, LWR: ۳۱, PWR: ۳۱	نیروگاه هسته‌ای

جدول ۶. هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ثابت و متغیر انواع نیروگاه‌ها [۱۵]

متغیر (\$/kW)	ثابت (\$/kW)	فن‌آوری
۰.۴۸	۹.۴	نیروگاه بخار
۰.۶۴	۴.۴	نیروگاه گازی
۰.۴۱	۴.۳۴	نیروگاه سیکل ترکیبی
۰.۷۴	۳.۶۸	نیروگاه دیزلی
۰	برق-آبی بزرگ، ۱۰.۸	نیروگاه برق-آبی
۰	برق-آبی کوچک، ۱۴	
۰	۴۸	نیروگاه بادی
۰	۳۰-۴۰	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
۰.۵	ALWR: ۶۹, LWR: ۹۲, PWR: ۹۲	نیروگاه هسته‌ای

نرخ شارژ ثابت: بیان‌گر مقدار متوسط شارژ سالانه شامل

هزینه‌های استهلاک، بهره، بیمه و مالیات است. در برخی منابع نظیر [۱۳] پیشنهاد شده است که نرخ شارژ ثابت برای سرمایه‌گذاری خصوصی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد، و برای سرمایه‌گذاری دولتی حدود ۵ درصد در نظر گرفته شود. در برخی منابع دیگر نظیر [۱۴]، نرخ شارژ ثابت برای نیروگاه‌های با طول عمر ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سال به ترتیب ۱۳.۵، ۱۲.۶، ۱۲ و ۱۱.۶ درصد در نظر گرفته است. در این‌جا با توجه به آمار ۱۰ ساله‌ی صنعت برق ایران، نرخ شارژ ثابت ۱۳.۵٪ در نظر گرفته شده است.

هزینه‌ی کلی (سرمایه‌گذاری) نیروگاه‌ها: شامل کلیه‌ی

هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری برای ظرفیت مشخصی از نیروگاه‌ها است. مقدارهای متفاوت هزینه‌ی سرمایه‌گذاری انواع نیروگاه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۵].

ضریب ظرفیت: نسبت خروجی واقعی یک نیروگاه در یک

بازه‌ی زمانی به خروجی بالقوه در حالتی است که به‌طور مداوم در همان بازه‌ی زمانی، با ظرفیت اسمی کاملش فعالیت کند. برای محاسبه‌ی ضریب ظرفیت، می‌باید کل مقدار انرژی تولیدی نیروگاه در یک بازه‌ی زمانی مشخص را بر مقدار انرژی که براساس ظرفیت کامل اسمی نیروگاه باید تولید شود، تقسیم نمود. ضریب ظرفیت یک نیروگاه، به‌شدت وابسته به نوع سوخت مصرفی و طراحی مجموعه‌ی آن نیروگاه است. ضریب ظرفیت انواع نیروگاه‌ها در مدل پیشنهادی، در جدول ۴ داده شده است [۱۵].

بازده: به‌صورت نسبت توان خروجی به توان ورودی نیروگاه

تعریف می‌شود و مقایسه‌ی خروجی‌های به دست آمده با ورودی‌های مصرف شده، میزان کارایی را مشخص می‌کند. مقدارهای بازده برای فن‌آوری‌های مختلف مطابق جدول ۵ مشخص شده است [۱۵].

هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ثابت و متغیر: شامل کلیه‌ی هزینه‌های

تعمیر و نگهداری ثابت سالانه‌ی یک نیروگاه است که وابسته به ظرفیت نیروگاه بوده و برحسب \$/kW بیان می‌شود. هم‌چنین هزینه‌ی تعمیر و نگهداری متغیر شامل کلیه‌ی هزینه‌های تعمیر و نگهداری متغیر سالانه‌ی یک نیروگاه است که وابسته به میزان تولید نیروگاه بوده و برحسب \$/kWh بیان می‌شود. برای مدل پیشنهادی این دو پارامتر در جدول ۶ داده شده‌اند [۱۵].

**جدول ۷. ظرفیت نیروگاه‌ها در سال ۱۳۹۳ [۱۲]**

ظرفیت نیروگاه (MW)	فن آوری
۱۵۸۳۰	نیروگاه بخار
۲۶۳۸۶	نیروگاه گازی
۱۸۴۹۴	نیروگاه سیکل ترکیبی
۴۳۹	نیروگاه دیزلی
۱۰۷۸۵	نیروگاه برق-آبی
۱۵۱	نیروگاه بادی
۴۴	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
۱۰۲۰	نیروگاه هسته‌ای

برای محاسبه‌ی هزینه‌ی سوخت هر نیروگاه، از اطلاعات جدول ۸ در مورد نیروگاه‌های حرارتی ایران استفاده شده است. قیمت سوخت‌های مصرفی شامل گازوئیل، نفت کوره و گاز به ترتیب، برابر $1,012 \$/lit$ ، $0,983 \$/lit$ و $0,386 \$/m^3$ برآورد شده است [۱۵]. در نهایت هزینه‌ی سوخت انواع نیروگاه‌ها در جدول ۹ درج شده است.

۳.۳. بررسی شرایط زیست‌محیطی و هزینه‌های خارجی نیروگاه در مدل پیشنهادی

مفهوم هزینه‌های خارجی یا هزینه‌های بیرونی عبارت است از هزینه‌هایی که در اثر فعالیت‌های اقتصادی یک یا چند گروه بر گروه‌هایی دیگر که نقشی در آن فعالیت ندارند، تحمیل شده و اثرهای منفی به جا می‌گذارد. این هزینه‌ها معمولاً در قیمت‌های معمول بازار منعکس نشده و در دراز مدت می‌تواند بسیار مهم باشند. تغییر اقلیم، تخریب و آلودگی‌های زیست‌محیطی در اثر تولید برق از آثار خارجی و منفی تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های برق به خصوص نیروگاه‌های فسیلی است. برای تعیین هزینه‌های خارجی ناشی از انتشار گازهای CO_2 ، SO_2 ، NO_x و آلاینده‌های دیگر این نیروگاه‌ها، لازم است مقدارهایی که از هر واحد نیروگاهی منتشر می‌شود، محاسبه شود [۱۴].

با این توضیحات در این بخش تلاش شده است شاخص‌های مناسب و تأثیرگذار در هزینه‌های خارجی به‌منظور نشان دادن اثرهای زیست‌محیطی نیروگاه‌های برق ارایه و سپس برای نیروگاه‌های فسیلی، تجدیدپذیر و هسته‌ای محاسبه شوند. هزینه‌های خارجی با استفاده از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شوند که به‌صورت کلی برای تمام گازهای گلخانه‌ای قابل استفاده است.

$$XC = DC \times EF \times C_1 \times HR \times C_p \quad (8)$$

جدول ۱۰ پارامترهای مختلف برای تعیین شاخص‌های هزینه‌ی خارجی را نشان می‌دهد.

ظرفیت استاندارد نیروگاه‌ها: با توجه به افزایش سالیانه‌ی

تقاضا، لازم است ظرفیت نیروگاه‌ها به‌صورت سالیانه افزایش یابد. در نتیجه لازم است افزایش ظرفیت مضرب درستی از ظرفیت استاندارد برای نیروگاه‌ها باشد. در این جا فرض شده ظرفیت استاندارد برای نیروگاه‌های حرارتی، هسته‌ای و برق-آبی ۱۰ مگاوات و برای نوع تجدیدپذیر ۱ کیلووات باشد.

ظرفیت نیروگاه‌ها در سال پایه: برای مدل‌سازی دقیق لازم

است ظرفیت سال پایه در مدل‌سازی‌ها لحاظ شود. ظرفیت نیروگاه‌های موجود در کشور در سال ۱۳۹۳ (به‌عنوان سال پایه) در جدول ۷ درج شده است [۱۲].

تقاضا در سال پایه: با توجه به ترازنامه‌ی انرژی [۱۱]، تقاضای

مصرفی در سال ۱۳۹۳ برابر با $267,178 \text{ TWh}$ بوده است.

درصد رشد بار: در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۹۲، تقاضای

مصرفی به میزان ۵/۵٪ افزایش یافته است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده فرض شده است که رشد بار سالیانه در سه سال آینده معادل ۴/۵ درصد باشد و در هفت سال پس از آن، سالیانه به میزان ۵/۵ درصد افزایش یابد. در دهه‌ی دوم و سوم برنامه‌ریزی نیز رشد بار به ترتیب ۶ و ۷ درصد فرض شده است. به این ترتیب مسائل تحریم در سال‌های اخیر و رشد صنعتی در سال‌های آتی در کشور در نظر گرفته شده است.

قیمت برق وارداتی در سال پایه: هزینه‌ی برق وارداتی در

مدل‌سازی‌ها، $300 \$/MWh$ فرض شده است.

هزینه‌ی سوخت: هزینه‌ی سوخت واحدهای نیروگاهی بسته به

نوع نیروگاه متفاوت است. هزینه‌ی سوخت یا به‌صورت مستقیم برحسب $\$/kwh$ بیان شده و یا به‌صورت $\$/kcal$ (یا $\$/Btu$) در نظر گرفته می‌شود. در حالت دوم، لازم است هزینه‌ی سوخت در آهنگ گرمایشی^(۱۹) (برحسب $kcal/kWh$) ضرب شود تا هزینه‌ی سوخت برحسب $\$/kwh$ به دست آید. در این پژوهش برای نیروگاه هسته‌ای، هزینه‌ی سوخت $7,55 \$/MWh$ در نظر گرفته شده است. برای نیروگاه‌های حرارتی شرایط متفاوت است. هزینه‌ی سوخت این نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن ترکیب سوخت‌های مختلف به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{مقدار سوخت مصرفی در سال} \times \text{قیمت یکای سوخت مصرفی} = \text{هزینه‌ی سوخت}$$

$$\text{تولید (نا و ویژه‌ی) نیروگاه در سال}$$



جدول ۸. مقدار سوخت مصرفی و تولید نیروگاه‌های حرارتی [۱۵]

تولید ناویژه‌ی نیروگاه (مگاوات ساعت)	سوخت مصرفی			فن آوری
	گاز (میلیون مترمکعب)	نفت کوره (میلیون لیتر)	گازوئیل (میلیون لیتر)	
۸۶۵۵۸۰۰۰	۱۲۳۳۱	۱۰۲۸۱	۱۲۴	نیروگاه بخار
۷۳۲۹۸۰۰۰	۱۸۹۸۲	۰	۴۸۳۸	نیروگاه گازی
۹۶۸۶۷۰۰۰	۱۷۵۳۷	۰	۴۱۱۳	نیروگاه سیکل ترکیبی
۶۷۰۰۰	۰	۰	۲۰	نیروگاه دیزلی

جدول ۹. هزینه‌ی سوخت انواع نیروگاه‌های

هزینه سوخت (\$/MWh)	فن آوری
۱۷۳,۱۹	نیروگاه بخار
۱۶۶,۷۶	نیروگاه گازی
۱۱۲,۸۵	نیروگاه سیکل ترکیبی
۳۰,۲۱	نیروگاه دیزلی
۰	نیروگاه برق-آبی
۰	نیروگاه بادی
۰	نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)
۷,۵۵	نیروگاه هسته‌ای

جدول ۱۰. پارامترهای مختلف برای تعیین شاخص‌های هزینه‌ی خارجی

نماد	توضیح	واحد
C_1	conversion (۱ ton/۲۰۰۰ lbs)	ضریب تبدیل
C_2	conversion (۱۰~۶ MMBtu/Btu)	ضریب تبدیل
DC	damage cost (\$/tonpollutant)	هزینه‌ی خسارت
EF	emission factor (lb _{pollutant} /MMBtu)	ضریب انتشار
EF'	emission factor (kgpollutant/GW h)	ضریب انتشار
HR	heat rate (Btu/kW h)	نرخ حرارت
n	percentage of NO _x removed by scrubbing	درصد NO _x حذف شده
p	percentage of PM removed by scrubbing	درصد ذرات معلق ^(۲۰) حذف شده
r	Discount rate (%)	نرخ تنزل
s	percentage of SO ₂ removed by scrubbing	درصد SO ₂ حذف شده

۱.۳.۳. ضریب‌های انتشار

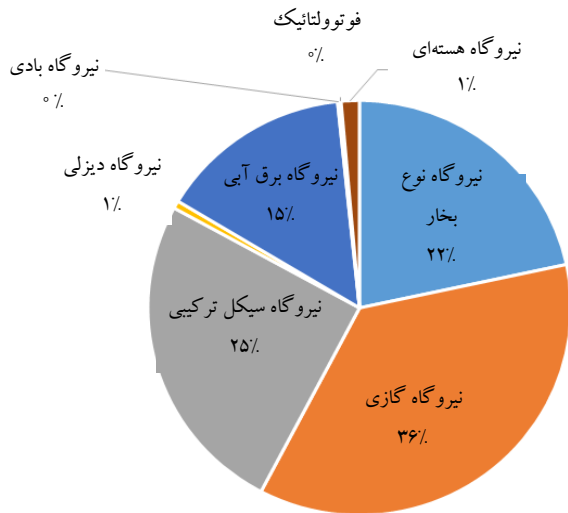
$$XC_{SO_2} = [DC \times EF(1-s)]_{SO_2} \times C_1 \times HR \times C_2 \quad (9)$$

$$XC_{NO_x} = [DC \times EF(1-n)]_{NO_x} \times C_1 \times HR \times C_2 \quad (10)$$

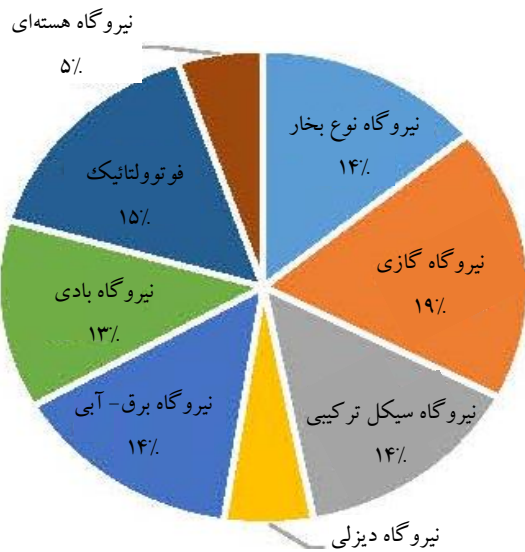
$$XC_{PM} = [DC \times EF(1-p)]_{PM} \times C_1 \times HR \times C_2 \quad (11)$$

به این ترتیب، هزینه‌های خارجی نیروگاه‌های موجود در کشور محاسبه و در جدول ۱۱ درج شده است.

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تابعی از ترکیب شیمیایی سوخت، چرخه‌ی توان و فن آوری تولید و تجهیزهایی است که برای کنترل آلودگی استفاده می‌شود. مقدارهای ضریب‌های انتشار که در این پژوهش استفاده شده، با توجه به پایگاه داده‌های آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا و بعضی منابع دیگر استخراج شده‌اند. برای این که نشان دهیم بعضی از فن آوری‌های تولید و تجهیزهای کنترل می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود کنند، از ضرایب s، n و p در معادله‌های زیر استفاده شده است.

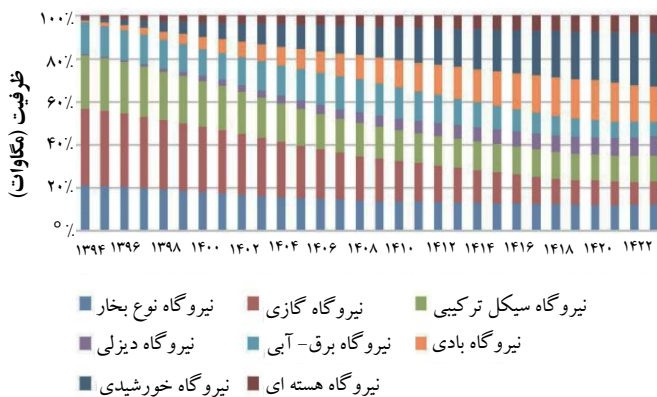


(الف)



(ب)

شکل ۱. سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی - سناریوی پایه؛ (الف) در سال ۱۳۹۳ (ب) در سال ۱۴۲۳.



شکل ۲. روند تغییرات ظرفیت نیروگاه‌ها در افق سی ساله - سناریوی پایه.

جدول ۱.۱. هزینه‌های خارجی نیروگاه‌ها

فناوری	هزینه‌های خارجی (\$/MWh)
نیروگاه نوع بخار	۱۲۸٫۶
نیروگاه گازی	۹۴٫۶
نیروگاه سیکل ترکیبی	۶۹٫۴
نیروگاه دیزلی	۱۲۰٫۷
نیروگاه برق - آبی	۱۰-۰
نیروگاه بادی	۲۱٫۳
نیروگاه خورشیدی (فوتولتائیک)	۹٫۹
نیروگاه هسته‌ای	۷-۲

۴. یافته‌ها و بحث

مطالعه‌های انجام شده در قالب دو سناریو- سناریوی پایه و هسته‌ای صورت گرفته است. هم‌چنین در محیط نرم افزار MATLAB از تابع fmincon برای شبیه‌سازی و حل معادله‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه‌های انجام شده، بُعد زمان ساخت هر یک از نیروگاه‌ها در مدل پیشنهادی در نظر گرفته نشده و دوره‌ی زمانی مورد مطالعه ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

سناریوی پایه

در این سناریو، روند تولید انرژی الکتریکی به صورت معمول و با توجه به رشد تقاضا در ایران است. در این سناریو هدف نشان دادن وضعیت عادی در کشور در سال‌های اخیر و آتی بوده و نمایان‌گر آن است که در سال‌های آتی اگر مبحث زیست‌محیطی دارای وزن نباشد، میزان سهم هر یک از انواع نیروگاه‌ها چه قدر باید باشد؟ به منظور بررسی سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی، ظرفیت نیروگاه‌های مختلف در سال پایه (۱۳۹۳) با ظرفیت آن‌ها در سال ۱۴۲۳ مقایسه شد. مقایسه‌ی این مقادارها نشان داد که در سناریوی پایه، لازم است ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یابد؛ به طوری که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی به شدت رشد یافته است. برای مثال ظرفیت نیروگاه نوع بخار، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب از ۲۲، ۳۶ و ۲۵ درصد کل ظرفیت نیروگاه‌های کشور در سال ۱۳۹۳ به ۱۲، ۱۱ و ۱۲ درصد ظرفیت کل نیروگاه‌های کشور کاهش پیدا کرده است (شکل ۱ الف و ۱ ب). روند تغییرات ظرفیت نیروگاه‌ها در افق سی ساله در شکل ۲ نشان داده شده است.

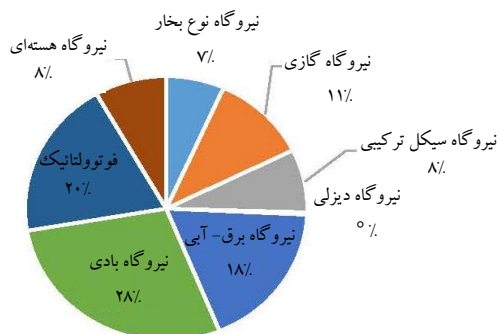


سناریوی هسته‌ای

با توجه به تأثیر مثبت انرژی هسته‌ای بر کاهش تغییرات اقلیمی و دارا بودن هزینه‌ی خارجی کم، در این سناریو فرض می‌شود انرژی هسته‌ای، انرژی غالب در تولید انرژی الکتریکی در سال‌های آتی باشد تا بتوان رشد بار را با هزینه‌های معقول در سال‌های آتی تأمین نموده و هم‌چنین به‌طور معنی‌داری آلاینده‌های زیست‌محیطی را در طبیعت کاهش داد. در این سناریو فرض شده است تأثیر انرژی هسته‌ای با توجه به مرجع‌های مختلف و افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی ضریب وزنی دارد. شکل ۴ سهم ظرفیت نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی را در پایان افق برنامه‌ریزی ۳۰ ساله در این سناریو نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل ۵ روند تغییرات سهم نیروگاه‌ها را در این افق نشان می‌دهد. بر این اساس سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید برق در سال ۱۴۲۳ حدود ۸٪ تعیین شد. در پژوهش مشابهی تولید برق هسته‌ای در افق ۲۰۳۳ میلادی حدود ۶٪ پیش‌بینی شده است [۶]. البته در این پژوهش مقایسه‌ی نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای مد نظر بوده است.

۱.۴. مقایسه با مدل MESSAGE وزارت نیرو

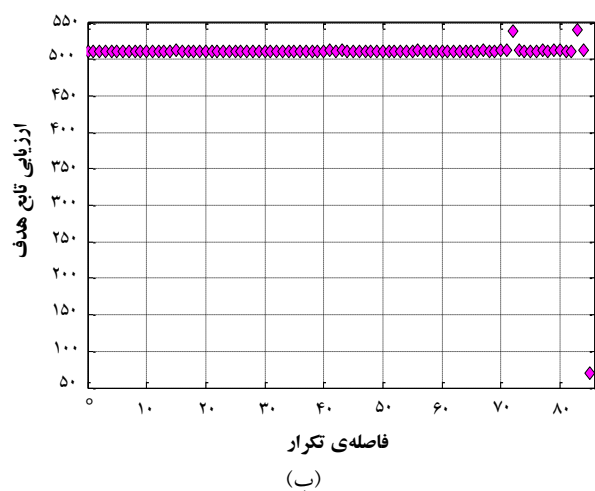
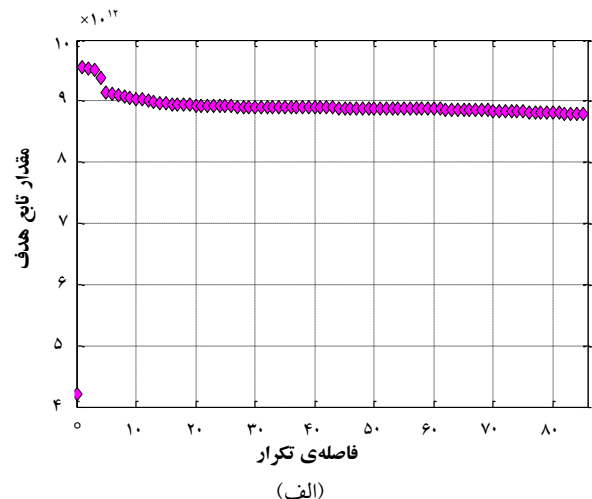
وزارت نیرو با استفاده از مدل MESSAGE که بر مبنای راه‌برد تأمین انرژی و تأثیر عمومی زیست‌محیطی آن استوار است، برنامه‌ریزی انرژی تا سال ۱۴۲۰ را انجام داده است. نکته‌ی مهم در خصوص این مدل، داده‌های ورودی آن است که باید از دقت و صحت مناسب برخوردار باشند تا نتایج قابل‌اعتماد باشد. داده‌های ورودی این مدل تقریباً با مدل پیشنهادی ارائه شده یکسان است؛ تفاوت موجود تنها در تعداد فن‌آوری‌های زیست‌محیطی و اثر هزینه‌های خارجی است. مدل پیشنهادی نسبت به مدل MESSAGE از وزن‌دهی مناسبی در خصوص هزینه‌های خارجی برخوردار است. شکل‌های ۶ الف و ۶ ب سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۴۲۰ را براساس مدل MESSAGE نشان می‌دهد [۱۵].



شکل ۴. سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی در سال ۱۴۲۳ - سناریوی هسته‌ای.

مقدار تابع هدف و ارزیابی‌های آن در تکرارهای مختلف به ترتیب در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج پس از حدود ۸۵ تکرار توانسته‌اند به مقدار مطلوب خود برسند.

براساس شکل ۱ الف، در حال حاضر عمده تأمین انرژی در کشور ایران مبتنی بر سوخت‌های فسیلی بوده و انرژی‌های هسته‌ای و تجدیدپذیر سهم کمی در تولید انرژی دارند. اگر این روال ادامه یابد، ایران قطعاً در آینده هم از نظر آلاینده‌های زیست‌محیطی و هم از نظر تأمین برق مطمئن دچار مشکل خواهد شد. بنابراین، در سناریوی بعدی (هسته‌ای)، تأثیرگذاری آلاینده‌های زیست‌محیطی لحاظ و با توجه به تناوبی و غیرمطمئن بودن و ظرفیت ناچیز انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی الکتریکی، نیروگاه‌های هسته‌ای محور پیشنهاد می‌شوند.



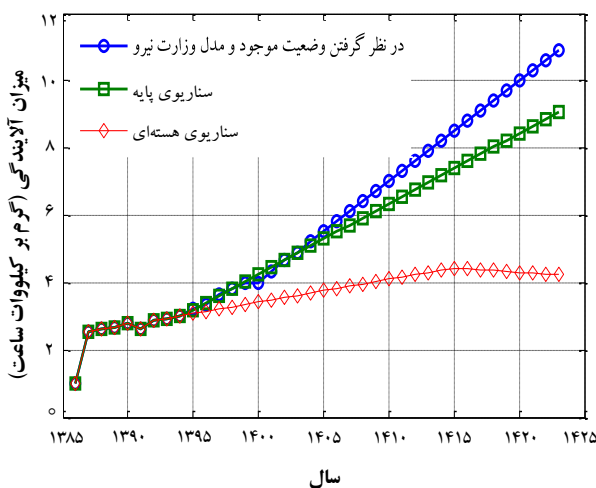
شکل ۳. تغییرات مقدارهای الف) تابع هدف، ب) ارزیابی تابع هدف در تکرارهای مختلف - سناریوی پایه.



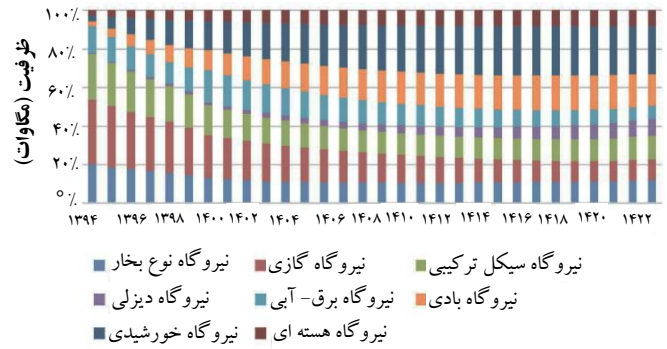
با توجه به نتایج سناریوهای پایه و هسته‌ای در سال ۱۳۹۳ (شکل ۱ الف) و آمار بیان شده در ترازنامه‌ی انرژی در ۱۳۹۲ (شکل ۱ ب) مشاهده می‌شود که تطابق مطلوبی بین نتایج حالت واقعی و مدل پیشنهادی وجود دارد. به‌عنوان مثال، سهم نیروگاه سیکل ترکیبی در تولید برق مطابق با ترازنامه‌ی انرژی ۲۴/۶٪ است و نتایج مدل پیشنهادی نیز سهم ۲۵٪ را برای این نوع نیروگاه نشان می‌دهد. این تطابق بیان‌گر صحت مدل پیشنهادی است. اختلاف نتایج مدل MESSAGE در سال ۱۴۲۰ (شکل ۱ ب) با نتایج مدل پیشنهادی در دو سناریوی پایه و هسته‌ای در سال ۱۴۲۳ (شکل‌های ۱ ب و ۴) ناشی از به‌کارگیری اثر مستقیم هزینه‌های خارجی در مدل پیشنهادی است.

۲.۴. بررسی آلاینده‌ی زیست‌محیطی سناریوهای مختلف

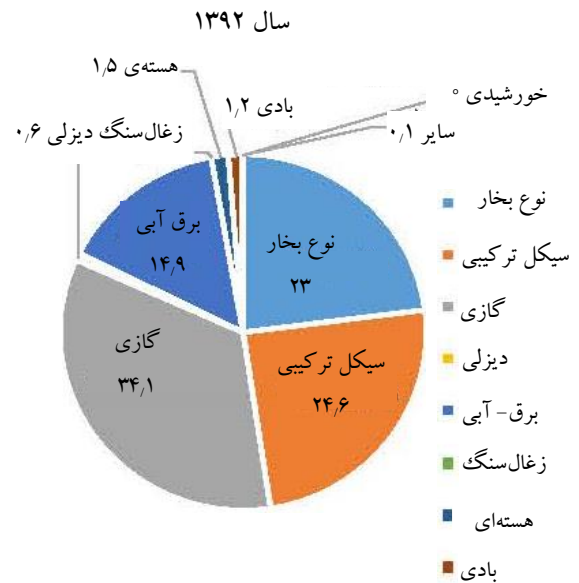
همان‌گونه که در بخش پیشین نیز اشاره شد، مهم‌ترین مزیت مدل پیشنهادی بررسی نقش انواع فن‌آوری‌های تولید انرژی الکتریکی در کاهش مسایل زیست‌محیطی است. در این راستا در این بخش سعی می‌شود اثرهای سناریوهای مختلف شامل سناریو پایه، سناریو هسته‌ای و نتایج حاصل از مدل وزارت نیرو با یکدیگر مقایسه شوند. با توجه به میزان آلودگی از سال ۱۳۸۳ لغایت ۱۳۹۲ [۱۳] و براساس نتایج هر یک از مدل‌ها، اثرهای سی‌ساله‌ی تولید انرژی الکتریکی توسط سناریوهای مختلف بر آلاینده‌ی زیست‌محیطی تحلیل و در شکل ۷ آورده شده است.



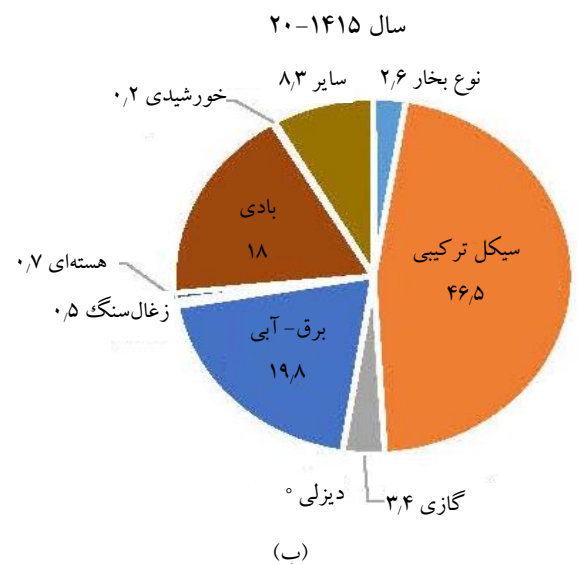
شکل ۷. میزان آلاینده‌ی زیست‌محیطی سناریوهای مختلف.



شکل ۵. روند تغییرات ظرفیت نیروگاه‌ها در افق سی‌ساله - سناریوی هسته‌ای.



(الف)



(ب)

شکل ۶. سهم نیروگاه‌های مختلف در تولید انرژی الکتریکی بر مبنای مدل MESSAGE (الف) در سال ۱۳۹۲ (ب) در سال ۱۴۲۰ [۱۵].



پی‌نوشت‌ها

1. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE)
2. MARKet ALlocation model (MARKAL)
3. Energy Flow Optimization Model (EFOM)
4. The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES)
5. Wien Automatic System Planning Package (WASP)
6. Renewable energy technologies (RETScreen)
7. Long-Range Energy Alternatives Planning System (LEAP)
8. Energy and Power Evaluation Program (ENPEP)
9. Global Responses to Anthropogenic Changes in the Environment (GRACE)
10. Inflation rate
11. Interest rate
12. Fixed Charge Rate
13. Total Plant Cost
14. Capacity Factor
15. Fixed Operation and Maintenance Cost
16. Variable Operation and Maintenance Cost
17. Fuel Cost
18. External Cost
19. Heat Rate
20. Particulate Matter (PM)

همان‌گونه که در شکل ۷ به‌وضوح دیده می‌شود، در صورتی که پارامتر هزینه‌ی خارجی در محاسبات در نظر گرفته شود، حتی سناریوی پایه نیز اثرهای زیست‌محیطی کم‌تری نسبت به مدل MESSAGE خواهد داشت. این موضوع دقیقاً وضعیت بحرانی در تولید انرژی الکتریکی با توجه به اثرهای زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. نکته‌ی جالب در این شکل یافته‌های حاصل از سناریوی هسته‌ای است؛ به‌این ترتیب که اگر از انرژی هسته‌ای به همراه انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی الکتریکی استفاده شود، نه تنها شیب افزایش آلودگی به شدت کاهش می‌یابد، بلکه از سال ۱۴۱۵ می‌توان میزان آلودگی را با شیب منفی دنبال نمود. بر این اساس می‌توان با داشتن برق مطمئن و پیوسته‌ی هسته‌ای، میزان رشد آلودگی در کشور را در منظر تولید انرژی الکتریکی کاهش چشمگیر داد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا انواع مدل‌های عرضه‌ی انرژی بررسی و سپس مدلی با در نظر گرفتن دو سناریوی پایه و هسته‌ای پیاده‌سازی شد. سپس این مدل با مدل MESSAGE و مطالعه‌های انجام شده در ایران مقایسه شد. به‌این ترتیب می‌توان نتیجه‌ها را به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- برای کشور ایران هیچ گزینه‌ی معقولی به‌جز افزایش نقش انرژی هسته‌ای در تولید انرژی الکتریکی وجود ندارد. یکی از دلایل عمده این است که انرژی تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید تناوبی هستند و نمی‌توانند به تنهایی نیاز انرژی کشور در حال توسعه‌ی ایران را برآورده کنند.
- روال موجود در به‌کارگیری انرژی‌های فسیلی نظیر گاز، نفت کوره و سایر سوخت‌های فسیلی می‌تواند کشور ایران را در دهه‌های آینده دچار بحران آلودگی زیست‌محیطی نماید. این موضوع سبب می‌شود ایران نه تنها نتواند به تعهدهای جهانی خود در کاهش تغییر اقلیم و پایین نگاه‌داشتن گرمای کره‌ی زمین زیر ۲ درجه سانتی‌گراد عمل نماید، بلکه باعث می‌شود ایران به کشوری آلوده‌تر از منظر محیط‌زیست و عواقب انسانی آن تبدیل شود.
- با توجه به تأثیر مثبت انرژی هسته‌ای بر کاهش تغییرات اقلیمی و دارا بودن هزینه‌ی خارجی کم، سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید برق کشور ایران (سناریوی هسته‌ای) در سال ۱۴۲۳ حدود ۸٪ تعیین شد.



- [1] M. Lehtveer, F. Hedenus, How much can nuclear power reduce climate mitigation cost? Critical parameters and sensitivity, *Energy Policy*, **6** (2015) 12-19.
- [2] A.B. Karaveli, U. Soytaş, B.G. Akinoglu, Comparison of large scale solar PV (photovoltaic) and nuclear power plant investments in an emerging market, *Energy*, (2015) 1-10.
- [3] D. Kennedy, New nuclear power generation in the UK: Cost benefit analysis, *Energy Policy*, **35** (2007) 3701–3716.
- [4] L. Mez, Nuclear energy—Any solution for sustainability and climate protection?, *Energy Policy*, **48** (2012) 56–63.
- [5] M. Hibbs, Nuclear energy 2011: A watershed year, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, **68(1)** (2012) 10–19.
- [6] A.H. Ghorashi, Prospects of nuclear power plants for sustainable energy development in Islamic Republic of Iran, *Energy Policy*, **35(3)** (2007) 1643–1647.
- [7] Ministry of Energy, Deputy Director of Energy Affairs, Demand Group, Review of Energy Models, (2000).
- [8] A. Kazemi, H. Shakouri Ganjavi, S. Shakiba, M. Hosseinzade, Selection of the Appropriate Model for Energy Resources Allocation in Iran using the Hierarchical Analysis Process, *Iran Energy Journal*, **16(2)** (2013) 31-60.
- [9] H. Asbjorn Aaheim, Nathan Rive, A Model for Global Responses to Anthropogenic Changes in the Environment (GRACE), CICERO Report 2005, 05 (2005) 1-22.
- [10] Statistics of Central Bank of the Islamic Republic of Iran, Total Index of Prices for Goods and Services in Urban Areas of Iran, (2014).
- [11] Ministry of Energy, Deputy Director of Energy Affairs, Power and Energy Planning Office, Energy Balance Sheet, (2013).
- [12] Ministry of Energy, Tavanir Specialist Company, Ten Years Trend of Iranian Power Industry, (2014).
- [13] H.E. Shaalan, (2003) Generation of Electric Power: Section 8, Retrieved February, 30, 2014, from http://energysystems.princeton.edu/EnergyResources/GenerElectPower_Shalaan.pdf.
- [14] I. Roth, L. Ambs, Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing, *Energy*, **29(12-15)** (2004) 2125–2144.
- [15] S.A. Shafiei, V. Arianpour, S. Shakiba, M. Hosseinzade, Planning the structure of the electrical energy supply system and setting the required information database, Ministry of Energy, Office of Planning for Electricity and Energy, (2011) 23-90.