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

**چكيده**

تاکنون مطالعات مختلفي در راستاي بررسي اثر نقش انرژي هسته‌اي بر كاهش هزينه‌هاي زيست محيطي و تغييرات آب و هوايي با در نظر گرفتن مدل‌هاي مختلف اقتصادي و سناريوهاي انرژي در کشورهاي مختلف ارائه شده است. با اين حال،به‌طور تخصصي اين موضوع در كشور ايران تاکنون مورد بررسي دقيق قرار نگرفته است. در اين تحقيق با ارائه مدلي مبتني برنامه‌ريزي پويا، اين موضوع در مقايسه با ساير نيروگاه‌ها نظير نيروگاه‌هاي فسيلي، تجديدپذير، گازي، بخاري و سيكل تركيبي تحليل گرديد. در اين مدل،تاثير هزينه‌هاي خارجي در برنامه‌ريزي آتي انرژي الكتريكي به‌دقت مورد ارزيابي قرار گرفت. درنهايت با در نظر گرفتن دو سناريوي پايه و هسته‌اي، مطالعات در چارچوب اهداف و تحليل تأثيرهزينه‌هاي خارجي انجام شد. به‌منظور راستي‌آزمايي مدل پيشنهادي، نتايج اين تحقيق با نتايج مدل MESSAGE مقايسه و دقت و صحت مدل پيشنهادي اثبات گرديد. بر اساس نتايج اين تحقيق، گزينه برق هسته‌اي راهكار مؤثري در كاهش آلايندگي زيست‌محيطي در آينده خواهد بود.

**کلمات کليدي: برق هسته‌اي، نيروگاه‌هاي برق، اثرات زيست‌محيطي، هزينه‌هاي خارجي**

**1- مقدمه**

انرژي يكي از عوامل ايجاد امنيت ملي در بسياري از كشورهاي جهان است و روند توليد و مصرف فعلي و آتي حامل‌هاي انرژي داراي اهميت بسزايي مي باشد. لذا برنامه‌ريزي دقيق در خصوص سامانه انرژي جز لاينفك چشم انداز پيشرفت صنعتي، زيست‌محيطي و بيولوژيكي هر كشور است. سهم صنعت برق درتوليد گازهاي گلخانه‌اي[[1]](#footnote-1) (GHG) 27% بوده و تاکنون بيش‌ترين و سريع‌ترين رشد در انتشار این گازها را داشته است [1]. همچنين علي‌رغم مطالعات صورت گرفته در خصوص نقش انرژي هسته‌اي در كاهش آلاينده‌هاي زيست محيطي و تغيير اقليم، هنوز اهميت تأثيرگذاري اين انرژي پاك در مباحث زيست محيطي به‌خوبي شناخته نشده است. البته بررسي و مطالعه نقش برق هسته‌اي در كاهش آلودگي‌هاي زيست محيطي در کشورهاي مختلفي نظير كره جنوبي، تركيه [2]، انگلستان و آمريكا [3] بررسي شده است. در حال حاضر، مجموع نگراني‌ها در خصوص آلاينده‌هاي زيست محيطي و تغير اقليم در بسياري از محافل سبب شده چشم‌انداز انرژي هسته‌اي به‌جاي ساير منابع فسيلي و منابع ديگر انرژي بهبود چشمگيري بنمايد.

در مورد انرژي هسته‌اي چالش‌هاي زيادي وجود دارد كه قابل‌توجه‌ترين آن‌ها، توليد پسماندهاي پرتوزا، خطر انتشار مواد پرتوزا و مقاومت‌هاي عمومي مي‌باشند. اين هشدارها انرژي هسته‌اي را متمايز از ساير فن‌آوري‌هاي انرژي مي‌نمايد و شايد اين گمان ايجاد شود كه اين انرژي پاك شايد جايگاهي در آينده تأمين انرژي در دنيا نداشته باشد. اما اين نكته حائز اهميت است كه بدون انرژي هسته‌اي، كاهش تغيير اقليم در برخي از موارد با روش‌هاي بسيار پرهزينه امکان‌پذير است و مطالعات آژانس بين‌المللي انرژي (IEA) و ساير محافل علمي معتبر اين مورد را تصديق مي‌كنند [5-4]. در تحقيقي با عنوان چشم انداز نیروگاه‌های هسته‌ای برای توسعه پایدار انرژی در جمهوری اسلامی ایران با هدف بررسي سهم نيروگاههاي فسيلي از كل سهم توليد برق در ايران، سهم مؤثر عملی تولید برق از هر يك از منابع انرژی با ديدگاهي مبنی بر امکانات اقتصادی بررسی شده است [6].

در اين تحقيق، در ابتدا برخي از مهم‌ترين مدل‌هاي عرضه انرژي معرفي مي‌گردند. سپس با توجه به مشخصه‌هاي مدل عرضه انرژي‌، مدلي بر اساس نيازهاي كشورايران پيشنهاد مي‌شود. يكي از مهم‌ترين ويژگي‌هاي مدل پيشنهادي، تطابق مطلوب با اطلاعات ورودي به مدل است. از طرف ديگر به‌منظور بررسي تأثيرات آلاينده‌هاي زيست محيطي و بيان نقش انرژي هسته‌اي در بهبود وضعيت انتشار گازهاي گلخانه‌اي، پارامتر هزينه‌هاي خارجي با قابليت وزن دهي به‌صورت مجزا و بر اساس ضرايب مختلفي نظير انتشار در مدل پيشنهادي جاسازي مي‌گردد. پس از اين مرحله و طي دو سناريوي پايه و هسته‌اي، نتايج حاصل از مدل پيشنهادي در يك افق سي ساله براي كشور ايران تخمين زده و به‌منظور راستي آزمايي مدل پيشنهادي، نتايج اين مطالعه با نتايج حاصل از مدل MESSAGE[[2]](#footnote-2) وزارت نيرو مقايسه خواهد گرديد.

**2- بررسي مدل‌هاي برنامه‌ريزي انرژي**

در سامانه‌هاي انرژي، روابط و تعامل بين روش‌هاي مختلف توليد انرژي و فن‌آوري‌هاي مصرف بايستي به‌گونه‌اي توصيف گردند که روند تجزيه و تحليل موارد مختلف به خوبي ايجاد و نتايج مختلفي از اين بررسي‌ها بيان شود. تلاش‌هاي قابل‌توجهي در دهه‌هاي گذشته به‌منظور توسعه رويکردهاي مختلف نسبت به مدل‌هاي انرژي و استفاده از روابط رياضي در آن‌ها صورت پذيرفته است. نوع برنامه‌ريزي و چگونگي بكارگيري پارارمترهاي مختلف مي‌تواند در توليد انرژي الكتريكي با كمترين آلودگي زيست محيطي تاثير گذار باشد. از طرف ديگر ايجاد انرژي پايدار در برنامه‌ريزي انرژي هر كشور، لزوم نگرش به‌سامانه انرژي به‌صورت اجزايي مرتبط با يکديگر و در افق‌هاي زماني مختلف کوتاه‌مدت، ‌ميان‌مدت و بلندمدت با ديدگاه تأمين نيازهاي انرژي آيندگان را بيش‌ازپيش باعث شده است. در اكثر سامانه‌هاي انرژي، اهداف كلي يا همان اهداف آتي سامانه عبارت‌اند از: پيش‌بيني، پس‌بيني و تحليل سناريوهاي مختلف. اهداف اختصاصي در اين فرآيند، موضوعاتي نظير بررسي تقاضا و عرضه‌ي انرژي و تحليل تأثير و ارزيابي آن مي‌باشند [7]. تا كنون مدل‌هاي مختلفي با توجه به خصوصيات بيان شده در اين حوزه پيشنهاد شده است كه برخي از آن‌ها عبارت‌اند از [9-8]: *مدل تخصيص بازار* (MARKAL[[3]](#footnote-3))، *مدل بهينه‌سازي جريان انرژي* (EFOM[[4]](#footnote-4))، *مدل يكپارچه‌سازي دو مدل انرژي بهينه‌سازي جريان انرژي و تخصيص بازار* (TIMES[[5]](#footnote-5))، *مدل سامانه برنامه‌ريزي خودكار وين* (WASP[[6]](#footnote-6))، *مدل انتخاب استراتژي تأمين انرژي و تأثير عمومي زيست‌محيطي آن* (MESSAGE)، *مدل نمايش فن‌آوري‌هاي انرژي تجديد پذير* (RETScreen[[7]](#footnote-7))، *مدل برنامه‌ريزي بلندمدت جايگزين‌هاي انرژي* (LEAP[[8]](#footnote-8))، *مدل ارزيابي توان و انرژي* (ENPEP[[9]](#footnote-9)) و *مدل پاسخ جهاني به تغييرات در محيط‌زيست انساني* (GRACE[[10]](#footnote-10)).

همانطور كه مشخص است در زمان‌هاي مختلف، مدل‌هاي عرضه انرژي متفاوتي با توجه به نياز هر كشور ارائه شده است و مهمترين دليل اين موضوع، نوع اطلاعات ورودي و نيازهاي مختلف هر كشور به هريك از اين مدل‌ها مي‌باشد. برخي از اين مدل‌ها نظير مدل MESSAGE نيز در ايران اجرا شده‌اند.

**3- مدل پيشنهادي براي بررسي اثرات زيست‌محيطي و تأمين آتي برق**

در اين بخش، مدلي بر مبناي شرايط كشور ايران پيشنهاد مي‌گردد. ساختار مدل شامل اهداف كلي و اختصاصي است و بر اساس ويژگي‌هاي زير پيشنهاد شده است:

الف) ايجاد ساختاري كه پارامترهاي مدل پيشنهادي درون معادلات آن جاسازي شده و در حقيقت درجه درون‌سازي رعايت شده باشد.

ب) ايجاد توصيف نهايي مناسب از انرژي به‌منظور تحليل پتانسيل بالقوه فن‌آوري در بهبود عملكرد انرژي الكتريكي

ج) ارائه تحليلي تفصيلي و دقيق از فن‌آوري‌هاي جديد در مدل براي بررسي پتانسيل بالقوه فن‌آوري به‌منظور جايگزيني سوخت و فن‌آوري‌هاي جديد

د) استفاده از فرضيات بيروني نظير رشد اقتصادي، عرضه و تقاضای انرژي در سال‌هاي آتي

ه) ايجاد ساختار مناسب براي بررسي آثار زيست‌محيطي هريك از فن‌آوري‌هاي موجود و فن‌آوري‌هاي جديد

به‌اين‌ترتيب اين مدل قادر است بر اساس اطلاعات مختلف در كشور ايران، برنامه‌ريزي دقيقي از به‌کارگيري انرژي هسته‌اي انجام دهد.

**3-1- تابع هدف و قيود مدل پيشنهادي**

در مدل پيشنهادي، هدف حداقل نمودن هزينه‌هاي تمام نيروگاه‌ها در افق زماني برنامه‌ريزي است. بر این اساس، تابع هدف مسئله به‌صورت رابطه زير در نظر گرفته‌شد:

(1) 

پارامترها و متغير‌هاي معادله به ترتيب در جدول‌هاي (1) و (2) نشان داده‌شده‌اند. همچنين*LF* ضريب زماني است که مقدار آن به نرخ بهره و نرخ تورم وابسته بوده و به‌صورت زير تعريف مي‌شود:

(2) 

1. پارامترهاي تابع پيشنهادي

|  |  |
| --- | --- |
| نام پارامتر | توضيحات |
| *T* | افق زماني برنامه‌ريزي |
| *K* | تعداد انواع نيروگاه ها |
| *d* | نرخ تورم[[11]](#footnote-11) (%) |
| *i* | نرخ بهره[[12]](#footnote-12) (%) |
|  | نرخ شارژ ثابت[[13]](#footnote-13) براي نيروگاه نوع *k* ام (%) |
|  | هزينه كلي[[14]](#footnote-14) نيروگاه نوع *k* ام ($/kW) |
|  | ضريب ظرفيت[[15]](#footnote-15) نيروگاه نوع *k* (%) |
|  | هزينه تعمير و نگهداري ثابت[[16]](#footnote-16) نيروگاه نوع *k*ام ($/kW) |
|  | هزينه تعمير و نگهداري متغير[[17]](#footnote-17) نيروگاه نوع *k*ام ($/kWh) |
|  | هزينه سوخت[[18]](#footnote-18)($/MWh) |
|  | قيمت برق وارداتي در سال پايه($/kWh) |
|  | هزينه‌هاي خارجي[[19]](#footnote-19) براي فن‌آوري *k*ام ($/MWh) |
|  | ظرفيت استاندارد نيروگاه نوع *k* (kW) |
|  | ضريب بازده نيروگاه نوع *k* (%) |
|  | تقاضا(ديماند) در سال *t*(kW h) |
|  | تقاضا(ديماند) در سال پايه(kW h) |
|  | نرخ سالانه رشد بار(%) |

1. متغيرهاي تابع پيشنهادي

|  |  |
| --- | --- |
| نام متغير | توضيحات |
|  | ظرفيت نيروگاه نوع *k* در سال *t* ام (kW) |
|  | توليد نيروگاه نوع *k* در سال *t* ام (kWh) |
|  | برق وارداتي در سال *t* ام (kW h) |
|  | عدد صحيح براي تعيين ظرفيت نيروگاه‌هاي استاندارد |

معادله (1) شامل شش جمله بوده و به ترتيب عبارت‌اند از:

* جمله اول(هزينه‌هاي شارژ سالانه): شامل هزينه‌هاي شارژ ثابت بوده و براي نيروگاه‌هاي مختلف در بازه‌هاي زماني متفاوت ممکن است متغير باشد. کيفيت نيروگاه در اينجا حائز اهميت است.
* جمله دوم(هزينه تعمير و نگهداري ثابت): شامل هزينه‌هاي تعمير و نگهداري ثابت ساليانه براي تمام نيروگاه‌ها بوده و وابسته به ظرفيت نامي نيروگاه‌ها است.
* جمله سوم(هزينه سوخت) : شامل هزينه سوخت نيروگاه‌ها است.
* جمله چهارم(هزينه تعمير و نگهداري متغير): شامل هزينه‌هاي تعمير و نگهداري متغير ساليانه براي تمام نيروگاه‌ها بوده و وابسته به انرژي توليدي نيروگاه‌ها است.
* جمله پنجم(هزينه واردات انرژي): شامل هزينه‌هاي مربوط به واردات برق از کشورهاي همسايه است.
* جمله ششم(هزينه‌هاي خارجي): شامل تمام هزينه‌هاي خارجي مربوط به محيط‌زيست است.

همچنين قيود مسئله عبارت‌اند از:

1- قيد توان: توان سالانه توليد هر نيروگاه بايستي از حد مشخصي کمتر باشد (معادله (3)). اين حد مشخص وابسته به ظرفيت، بازده و ضريب ظرفيت هر نيروگاه است.

(3) 

2- قيد افزايش ظرفيت: با توجه به افزايش تدريجي بار، ظرفيت نيروگاه‌ها در طول سال‌هاي برنامه‌ريزي افزايش مي‌يابد. اين افزايش ظرفيت بايد مضربي از ظرفيت پايه(استاندارد) براي هر نيروگاه باشد. ظرفيت هرسال نيروگاه، مجموع ظرفيت سال قبل به‌اضافه افزايش ظرفيت آن است (معادله (4)). بر اين اساس لازم است ظرفيت هر نيروگاه در سال پايه مشخص باشد.

(4) 

3- قيد تعادل بار: لازم است توليد و واردات انرژي در هرسال، بيشتر يا مساوي تقاضاي آن سال باشد (معادله (5)).

(5) 

در رابطه بالا، تقاضا تابعي از زمان است و با نرخ ثابتي به‌صورت سالانه افزايش مي‌يابد:

(6) 

4- قيد مقدار مجاز انرژي وارداتي و توليدي: براي ميزان انرژي الکتريکي توليدي هر نوع نيروگاه و انرژي الکتريکي وارداتي در هر سال حدودي را در نظر گرفته مي‌شود. در اينجا حد بالايي براي انرژي الکتريکي توليدي و وارداتي در نظر گرفته نشده و تنها فرض شده که اين مقادير مثبت باشند:

(7)  ،

5- قيد محدوديت آب: در اين قيد با توجه به بحراني شدن وضعيت بارش‌ها و ايجاد خشک‌سالي‌هاي اخير در كشور، ظرفيت نهايي براي نيروگاه‌هاي آبي در حدود 20 هزار مگاوات در نظر گرفته شده است.

6- قيد باد: با توجه به مطالعات صورت گرفته در سطح كشور و وضعيت وزش باد، در اين قيد ظرفيت نيروگاه‌هاي بادي در حدود 50 هزار مگاوات در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به رابطه قيد دوم، متغيرهاي *C* و *Y،* متغيرهاي وابسته هستند. بنابراين هدف مسئله يافتن مقادير *P(t,k)*، *Y(t,k)* و *IM(t)* است؛ به نحوي که تابع هزينه *f* حداقل شود.

**3-2- مشخصات فني و اقتصادي**

براي مدل‌سازي و حل مسئله به مشخصات فني و اقتصادي نياز است. اين مشخصات با توجه به اطلاعات و آمار كشور ايران [12-10] استخراج و محاسبه شده است:

نرخ تورم: عبارت است از افزايش غيرمتناسب سطح عمومي قيمت. در اين تحقيق نرخ تورم، معادل نرخ تورم در سال 1393 (6/15%) در نظر گرفته‌شده است.

نرخ بهره: عبارت است از نرخي که بابت جلوگيري از کاهش ارزش پول پرداختي در امروز و دريافتي در آينده (به دليل ارزش زماني پول و نرخ تورم) از وام‌گيرنده دريافت مي‌شود. در اين تحقيق نرخ بهره 20% در نظر گرفته‌شده است.

نرخ شارژ ثابت: بيانگر مقدار متوسط شارژ سالانه شامل هزينه‌هاي استهلاک، بهره، بيمه و ماليات مي‌باشد. در برخي منابع نظير [13] پيشنهاد شده است که نرخ شارژ ثابت براي سرمايه‌گذاري خصوصي حدود 15-20 درصد، و براي سرمايه‌گذاري دولتي حدود 5 درصد در نظر گرفته شود. برخي منابع ديگر نظير [14]، نرخ شارژ ثابت را براي نيروگاه‌هاي با طول عمر20، 25، 30 و 35 سال به ترتيب 5/13، 6/12، 12 و 6/11 درصد در نظر گرفته است. در اينجا با توجه با آمار 10 ساله صنعت برق ايران، نرخ شارژ ثابت 5/13% در نظر گرفته‌شده است.

هزينه کلي (سرمايه‌گذاري)نيروگاه‌ها: شامل کليه هزينه‌هاي مربوط به سرمايه‌گذاري براي ظرفيت مشخصي از نيروگاه‌ها است. مقادير متفاوت هزينه سرمايه‌گذاري انواع نيروگاه‌ها در جدول (3) نشان داده شده است [15].

1. هزينه سرمايه‌گذاري انواع نيروگاه‌ها [15]

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | هزينه سرمايه‌گذاري ($/kW) |
| نيروگاه بخاري | 1070 |
| نيروگاه گازي | 505 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 720 |
| نيروگاه ديزلي | 505 |
| نيروگاه برق‌آبي | برق‌آبي بزرگ: 700-2000 ، برق‌آبي کوچک: 1000-2500 |
| نيروگاه بادي | 1800 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 4000-5000 |
| نيروگاه هسته‌اي | PWR 5100 ، LWR 4100 ، ALWR 5800 |

ضريب ظرفيت: نسبت خروجي واقعي يک نيروگاه در يک بازه‌ي زماني به خروجي بالقوه‌ي در حالتي است که به‌طور مداوم در همان بازه‌ي زماني، با ظرفيت اسمي کاملش فعاليت کند. براي محاسبه‌ي ضريب ظرفيت، مي‌بايست کل ميزان انرژي توليدي نيروگاه در يک بازه‌ي زماني مشخص را بر ميزان انرژي که بر اساس ظرفيت کامل اسمي نيروگاه بايد توليد شود، تقسيم نمود. ضريب ظرفيت يک نيروگاه، به‌شدت وابسته به نوع سوخت مصرفي و طراحي سامانه آن نيروگاه است. ضريب ظرفيت انواع نيروگاه‌هادر مدل پيشنهادي، در جدول (4) آورده شده است [15].

بازده: به‌صورت نسبت توان خروجي به توان ورودي نيروگاه تعريف شده و مقايسه خروجي‌هاي به‌دست‌آمده با ورودي‌هاي مصرف‌شده، ميزان کارايي را مشخص مي‌کند. مقادير بازده براي فن‌آوري‌هاي مختلف مطابق جدول (5) بيان شده است [15].

هزينه تعمير و نگهداري ثابت و متغير: شامل کليه هزينه‌هاي تعمير و نگهداري ثابت سالانه يک نيروگاه است که وابسته به ظرفيت نيروگاه بوده و برحسب $/kW بيان مي‌شود. همچنين هزينه تعمير و نگهداري متغير شامل کليه هزينه‌هاي تعمير و نگهداري متغير سالانه يک نيروگاه است که وابسته به ميزان توليد نيروگاه بوده و برحسب $/kWh بيان مي‌شود. براي مدل پيشنهادي اين دو پارامتر در جدول (6) نشان داده شده‌اند [15].

1. ضريب ظرفيت انواع نيروگاه‌ها [15]

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | ضريب ظرفيت (%) |
| نيروگاه بخاري | 78 |
| نيروگاه گازي | 84 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 82 |
| نيروگاه ديزلي | 70 |
| نيروگاه برق‌آبي | برق‌آبي بزرگ 10-40 ، برق‌آبي کوچک 50-70 |
| نيروگاه بادي | 30-35 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 20-30 |
| نيروگاه هسته‌اي | PWR 80 ، LWR 80 ، ALWR 85 |

1. بازده انواع نيروگاه‌ها [15]

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | بازده (%) |
| نيروگاه بخاري | 6/36 |
| نيروگاه گازي | 5/29 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 7/44 |
| نيروگاه ديزلي | 7/33 |
| نيروگاه برق‌آبي | 100 |
| نيروگاه بادي | 30-35 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 8-43 |
| نيروگاه هسته‌اي | PWR 31 ، LWR 31 ، ALWR 33 |

1. هزينه تعمير و نگهداري ثابت انواع نيروگاه‌ها [15]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| فن‌آوري | ثابت ($/kW) | متغير ($/kWh) |
| نيروگاه بخاري | 4/9 | 48/0 |
| نيروگاه گازي | 4/4 | 64/0 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 34/4 | 41/0 |
| نيروگاه ديزلي | 68/3 | 74/0 |
| نيروگاه برق‌آبي | بزرگ: 8/10 ، کوچک: 14 | 0 |
| نيروگاه بادي | 48 | 0 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 40-300 | 0 |
| نيروگاه هسته‌اي | PWR 92، LWR 92، ALWR 69 | All 5/0 |

ظرفيت استاندارد نيروگاه‌ها: با توجه به افزايش ساليانه تقاضا، لازم است ظرفيت نيروگاه‌ها به‌صورت ساليانه افزايش يابد. درنتيجه لازم است افزايش ظرفيت مضرب صحيحي از ظرفيت استاندارد براي نيروگاه‌ها باشد. در اينجا فرض شده ظرفيت استاندارد براي نيروگاه‌هاي حرارتي، هسته‌اي و برق‌آبي10 مگاوات و براي نوع تجديد پذير1 کيلووات باشد.

ظرفيت نيروگاه‌ها در سال پايه: براي مدل‌سازي دقيق لازم است ظرفيت سال پايه در مدل‌سازي‌ها لحاظ شود. ظرفيت نيروگاه‌هاي موجود در کشور در سال 1393 (به‌عنوان سال پايه) در جدول (7) نشان داده‌شده است [12].

1. ظرفيت نيروگاه‌ها در سال 1393 [12]

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | ظرفيت نيروگاه (MW) |
| نيروگاه بخاري | 15830 |
| نيروگاه گازي | 26386 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 18494 |
| نيروگاه ديزلي | 439 |
| نيروگاه برق‌آبي | 10785 |
| نيروگاه بادي | 151 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 44 |
| نيروگاه هسته‌اي | 1020 |

تقاضا در سال پايه: با توجه ترازنامه انرژي [11]، تقاضاي مصرفي در سال 1393 برابر با 178/267 تراوات ساعت بوده است.

درصد رشد بار: در سال 1393 نسبت به سال 1392، تقاضاي مصرفي به ميزان 5/5 % افزايش يافته است. در شبيه‌سازي‌هاي انجام شده فرض شده است که رشد بار ساليانه در سه سال آينده معادل 5/4 درصد باشد و در هفت سال پس از آن، ساليانه به ميزان 5/5 درصد افزايش يابد. در دهه دوم و سوم برنامه‌ريزي نيز رشد بار به ترتيب 6 و 7 درصد فرض شده است. به اين ترتيب مسائل تحريم در سال‌هاي اخير و رشد صنعتي در سال‌هاي آتي در كشور در نظر گرفته شده است.

قيمت برق وارداتي در سال پايه: هزينه برق وارداتي در مدل‌سازي‌ها، $/MWh300 فرض شده است.

هزينه سوخت: هزينه سوخت واحدهاي نيروگاهي بسته به نوع نيروگاه متفاوت است. هزينه سوخت يا به‌صورت مستقيم برحسب $/kwh بيان شده و يا به‌صورت $/kcal(يا $/Btu) در نظر گرفته مي‌شود. در حالت دوم، لازم است هزينه سوخت در نرخ گرمايشي[[20]](#footnote-20) (بر حسب kcal/kWh) ضرب شود تا هزينه سوخت بر حسب $/kwh به دست آيد. در اين تحقيق براي نيروگاه هسته‌اي، هزينه سوخت $/MWh55/7 در نظر گرفته‌شده است. براي نيروگاه‌هاي حرارتي شرايط متفاوت است. هزينه سوخت اين نيروگاه‌ها با در نظر گرفتن ترکيب سوخت‌هاي مختلف به‌صورت زير محاسبه مي‌گردد:

|  |  |
| --- | --- |
| هزينه سوخت= | ميزان سوخت مصرفي در سال× قيمت واحد سوخت مصرفي |
| توليد (نا ويژه) نيروگاه در سال |

براي محاسبه هزينه سوخت هر نيروگاه، از اطلاعات جدول (8) در مورد نيروگاه‌هاي حرارتي ايران استفاده شده است. قيمت سوخت‌هاي مصرفي شامل گازوئیل، نفت کوره و گاز به ترتیب برابر $/lit 012/1، $/lit 983/0 و $/m3 386/0 برآورد شده است [15]. در نهايت هزينه سوخت انواع نيروگاه‌ها در جدول (9) ارايه شده است.

1. ميزان سوخت مصرفي و توليد نيروگاه‌هاي حرارتي [15]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| فن‌آوري | سوخت مصرفي | | | توليد نا ويژه نيروگاه  (مگاوات ساعت) |
| گازوئيل (ميليون ليتر) | نفت کوره (ميليون ليتر) | گاز (ميليون مترمکعب) |
| نيروگاه بخاري | 124 | 10281 | 12331 | 86558000 |
| نيروگاه گازي | 4838 | 0 | 18982 | 73298000 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 4113 | 0 | 17537 | 96867000 |
| نيروگاه ديزلي | 20 | 0 | 0 | 67000 |

1. هزينه سوخت انواع نيروگاه‌ها

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | هزينه سوخت ($/MWh) |
| نيروگاه بخاري | 19/173 |
| نيروگاه گازي | 76/166 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 85/112 |
| نيروگاه ديزلي | 1/302 |
| نيروگاه برق‌آبي | 0 |
| نيروگاه بادي | 0 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 0 |
| نيروگاه هسته‌اي | 55/7 |

**3-3- بررسي شرايط زيست‌محيطي و هزينه‌هاي خارجي نيروگاه در مدل پيشنهادي**

مفهوم هزينه‌هاي خارجي يا هزينه‌هاي بيروني عبارت است از هزينه‌هايي كه در اثر فعاليت‌هاي اقتصادي يك يا چند گروه بر گروه‌هايي ديگر كه نقشي در آن فعاليت ندارند، تحميل شده و آثار منفي بر جاي مي‌گذارد. اين هزينه‌ها معمولاً در قيمت‌هاي معمول بازار منعكس نشده و در درازمدت مي‌تواند بسيار مهم باشند. تغيير اقليم، تخريب و آلودگي‌هاي زيست‌محيطي در اثر توليد برق از آثار خارجي و منفي توليد انرژي الكتريكي توسط نيروگاه‌هاي برق بخصوص نيروگاه‌هاي فسيلي است. براي تعيين هزينه‌هاي خارجي ناشي از انتشار گازهاي CO2 ، SO2 ، NOx و آلاينده‌هاي ديگر اين نيروگاه‌ها، لازم است مقاديري که از هر واحد نيروگاهي منتشر مي‌شود، محاسبه گردد [14].

با اين توضيحات در اين بخش تلاش شده است شاخص‌هاي مناسب و تأثيرگذار در هزينه‌هاي خارجي به‌منظور نشان دادن اثرات زيست‌محيطي نيروگاه‌هاي برق ارائه و سپس براي نيروگاه‌هاي فسيلي، تجديدپذير و هسته‌اي محاسبه گردند. هزينه‌هاي خارجي با استفاده از معادله (8) محاسبه مي‌شوند که به‌صورت کلي براي تمام گازهاي گلخانه‌اي قابل‌استفاده است.

(8) 

جدول (10) پارامترهاي مختلف براي تعيين شاخص‌هاي هزينه خارجي را نشان مي‌دهد.

1. پارامترهاي مختلف براي تعيين شاخص‌هاي هزينه خارجي

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C1 | conversion (1 ton/2000 lbs) | ضريب تبديل |
| C2 | conversion (10~6 MMBtu/Btu) | ضريب تبديل |
| DC | damage cost ($/tonpollutant) | هزينه خسارت |
| EF | emission factor (lbponutant/MMBtu) | ضريب انتشار |
| EF' | emission factor (kgpollutant/GW h) | ضريب انتشار |
| HR | heat rate (Btu/kW h) | نرخ حرارت |
| n | percentage of NOx removed by scrubbing | درصد Nox حذف شده |
| p | percentage of PM removed by scrubbing | درصد ذرات معلق[[21]](#footnote-21) حذف شده |
| r | Discount rate (%) | نرخ تنزل |
| s | percentage of SO2 removed by scrubbing | درصد SO2 حذف شده |

**3-3-1- ضرايب انتشار[[22]](#footnote-22)**

ميزان انتشار گازهاي گلخانه‌اي تابعي از ترکيب شيميايي سوخت، چرخه توان و فن‌آوري توليد و تجهيزاتي است که براي کنترل آلودگي استفاده مي‌شود. مقادير ضرايب انتشار که در اين تحقيق استفاده‌ شده، با توجه به پايگاه داده آژانس حفاظت محيط‌زيست آمريکا و بعضي منابع ديگر استخراج‌ شده‌اند. براي اينکه نشان دهيم بعضي از فن‌آوري‌هاي توليد و تجهيزات کنترل مي‌توانند انتشار گازهاي گلخانه‌اي را محدود کنند، از ضرايب *s*، *n* و *p* در معادلات زير استفاده مي‌شود.

(9) 

(10) 

(11) 

به اين ترتيب، هزينه‌هاي خارجي نيروگاه‌هاي موجود در كشور محاسبه و در جدول (11) آورده شده است .

1. هزينه‌هاي خارجي نيروگاه‌ها

|  |  |
| --- | --- |
| فن‌آوري | هزينه‌هاي خارجي ($/MWh) |
| نيروگاه بخاري | 6/128 |
| نيروگاه گازي | 6/94 |
| نيروگاه سيکل ترکيبي | 4/69 |
| نيروگاه ديزلي | 7/120 |
| نيروگاه برق‌آبي | 0-10 |
| نيروگاه بادي | 3/21 |
| نيروگاه خورشيدي(فوتوولتائيک) | 9/9 |
| نيروگاه هسته‌اي | 2-7 |

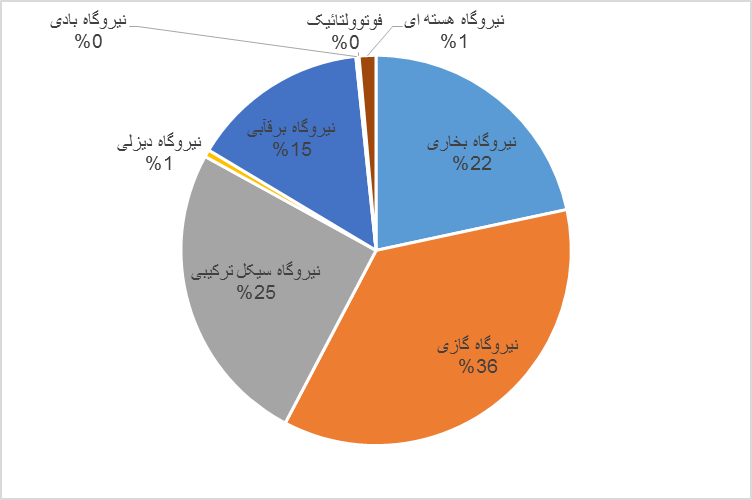
**4- نتايج و بحث**

مطالعات انجام شده در قالب دو سناريو، شامل سناريوي پايه و هسته‌اي انجام گرفته است. همچنين در محيط MATLAB از تابع fmincon براي شبيه‌سازي و حل معادلات استفاده شده است. لازم به ذكر است که در مطالعات صورت گرفته، بُعد زمان ساخت هريك از نيروگاه‌ها در مدل پيشنهادي در نظر گرفته نشده و دوره زماني مورد مطالعه 30 سال در نظر گرفته‌شده است.

**الف) سناريو پايه**

در اين سناريو، روند توليد انرژي الکتريکي به‌صورت معمول و با توجه به رشد تقاضاي بيان شده در ايران است. در اين سناريو هدف نشان دادن وضعيت عادي در كشور در سال‌هاي اخير و آتي بوده و نمايانگر آن است كه در سال‌هاي آتي اگر مبحث زيست‌محيطي داراي وزن نباشد، بايستي ميزان سهم هريك از انواع نيروگاه‌ها چقدر باشد.

به‌منظور بررسي سهم نيروگاه‌هاي مختلف در توليد انرژي الکتريکي، ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف در سال پايه (1393) با ظرفيت آن‌ها در سال 1423 مقايسه گرديد. مقايسه اين مقادير نشان مي‌دهد که در سناريوي پايه، لازم است ظرفيت انرژي‌هاي تجديد پذير افزايش يابد؛ به‌طوري‌که سهم انرژي‌هاي تجديد پذير در مقايسه با نيروگاه‌هاي حرارتي به‌شدت رشد يافته است. براي مثال ظرفيت نيروگاه بخاري، گازي و سيکل ترکيبي به ترتيب از 22، 36 و 25 درصد کل ظرفيت نيروگاه‌هاي کشور در سال 1393 به 12، 11 و 12 درصد ظرفيت کل نيروگاه‌هاي کشور کاهش پيدا کرده است (شكل 1-الف و 1-ب). روند تغييرات ظرفيت نيروگاه‌ها در افق سي ساله در شكل (2) نشان داده شده است.



(ب) (الف)

1. ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف در توليد انرژي الکتريکي-سناريوي پايه الف) در سال 1393 ب) در سال 1423
2. روند تغييرات ظرفيت نيروگاه‌ها در افق سي ساله- سناريوي پايه

مقدار تابع هدف و ارزيابي‌هاي آن در تكرارهاي مختلف به‌ترتيب در شكل‌هاي (3- الف) و (3- ب) نشان داده شده‌اند. مشاهده مي‌شود که نتايج پس از حدود 85 تكرار توانسته‌اند به مقدار مطلوب خود برسند.



(ب) (الف)

1. تغييرات مقادير الف) تابع هدف ب) ارزيابي‌ تابع هدف در تكرار‌هاي مختلف-سناريوي پايه

بر اساس شكل (1-الف)، در حال حاضر عمده تأمين انرژي دركشور ايران مبتني بر سوخت‌هاي فسيلي بوده و انرژي‌هاي هسته‌اي و تجديدپذيرسهم کمي در توليد انرژي دارند. اگر اين روال ادامه يابد، ايران قطعاً در آينده هم از نظر آلاينده‌هاي زيست‌محيطي و هم ازنظر تأمين برق مطمئن دچار مشكل خواهد شد. لذا در سناريوی‌ بعدي (هسته‌اي)،تأثيرگذاري آلاينده‌هاي زيست‌محيطي لحاظ و با توجه تناوبي بودن، غيرمطمئن بودن و ظرفيت ناچيز انرژي‌هاي تجديدپذيردر تأمين انرژي الكتريكي، نيروگاه‌هاي هسته‌اي محور پيشنهاد مي‌گردند.

**ب) سناريوي هسته‌اي**

با توجه به تأثير مثبت انرژي هسته‌اي بر کاهش تغييرات اقليم و دارا بودن هزينه خارجي کم، در اين سناريو فرض مي‌شود انرژي هسته‌اي، انرژي غالب در توليد انرژي الکتريکي در سال‌هاي آتي باشد تا بتوان رشد بار را با هزينه‌هاي معقول در سال‌هاي آتي تأمين نموده و همچنين به‌طور معناداري آلاينده‌هاي زيست‌محيطي را در طبيعت کاهش داد. در اين سناريو فرض شده است تأثير انرژي هسته‌اي با توجه به مراجع مختلف و افزایش آلاينده‌هاي زيست‌محيطي ضريب وزني دارد. شکل (4) سهم ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف در توليد انرژي الکتريکي را در پايان افق برنامه‌ريزي 30 ساله در اين سناريو نشان مي‌دهد. همچنين شكل‌ (5) روند تغييرات سهم نيروگاه‌ها را در اين افق نشان مي‌دهد. بر این اساس سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید برق در سال 1423 حدود %8 تعیین شد. در تحقيق مشابهي توليد برق هسته‌ای در افق 2033 میلادی حدود %6 پيش بيني شده است [6]. البته در اين تحقيق مقايسه نيروگاه‌هاي فسيلي و هسته‌اي مد نظر بوده است.



1. ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف در توليد انرژي الکتريکي در سال 1423- سناريوي هسته‌اي
2. روند تغييرات ظرفيت نيروگاه‌هاي مورد در افق سي ساله - سناريوي هسته‌اي

**4-1- مقايسه با مدل MESSAGE وزارت نيرو**

وزارت نيروبا استفاده از مدل MESSAGE كه بر مبناي استراتژي تأمين انرژي و تأثير عمومي زيست‌محيطي آن استوار است، برنامه‌ريزي انرژي تا سال 1420 را انجام داده است. نكته مهم در خصوص اين مدل، داده‌هاي ورودي به آن است كه بايد از دقت و صحت مناسب برخوردار باشند تا نتايج قابل‌اعتماد باشد. داده‌هاي ورودي اين مدل تقريباً با مدل پيشنهادي ارائه‌شده يكسان است؛ تفاوت موجود تنها در تعداد فن‌آوري‌هاي زيست‌محيطي و اثر هزينه‌هاي خارجي است. مدل پيشنهادي نسبت به مدل MESSAGE از وزن دهي مناسبي در خصوص هزينه‌هاي خارجي برخوردار است. شكل‌هاي (6-الف) و (6-ب) ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف در توليد انرژي الکتريکي در سال‌هاي 1392 و 1420 را بر اساس مدل MESSAGE نشان مي‌دهد [15].

با توجه به نتايج سناريوهاي پايه و هسته‌اي در سال 1393 (شكل 1-الف) و آمار بيان شده در ترازنامه انرژي در 1392 (شکل (6-الف)) مشاهده مي‌شود كه تطابق مطلوبي بين نتايج حالت واقعي و مدل پيشنهادي وجود دارد. به‌عنوان مثال، سهم نيروگاه سيكل تركيبي در توليد برق مطابق با ترازنامه انرژي % 6/24 است و نتايج مدل پيشنهادي نيز سهم %25 را براي اين نوع نيروگاه نشان مي‌دهد. اين تطابق بيانگر صحت مدل پيشنهادي است. اختلاف نتايج مدل MESSAGE در سال 1420 (شکل (6-ب)) با نتايج مدل پيشنهادي در دو سناريوي پايه و هسته‌اي در سال 1423 (شکل‌هاي (1-ب) و (4)) ناشي از بكارگيري اثر مستقيم هزينه‌هاي خارجي در مدل پيشنهادي است.



(ب) (الف)

1. ظرفيت نيروگاه‌هاي مختلف مدل MESSAGE در توليد انرژي الکتريکي الف) در سال 1392 ب)در سال 1420 [15]

**4-2- بررسي تأثيرگذاري سناريوهاي مختلف در آلايندگي زيست‌محيطي**

همانگونه كه در بخش قبل نيز اشاره شد، مهم‌ترين مزيت مدل پيشنهادي بررسي نقش انواع فن‌آوري‌هاي توليد انرژي الكتريكي در كاهش مسائل زيست‌محيطي است. در اين راستا در اين بخش سعي مي‌شود اثرات سناريو‌هاي مختلف شامل سناريو پايه، سناريو هسته‌اي و نتايج حاصل از مدل وزارت نيرو با يکديگر مقايسه شوند. با توجه ميزان آلودگي‌هاي از سال 1383 لغايت 1392 [13] و بر اساس نتايج هريک از مدل‌ها، اثرات سي‌ساله توليد انرژي الكتريكي توسط سناريو‌هاي مختلف بر آلايندگي زيست‌محيطي تحليل و در شكل (7) آورده شده است.



1. تغييرات ميزان آلايندگي زيست‌محيطي با توجه سناريوهاي مختلف

همانگونه كه در شكل (7) به‌وضوح نشان داده‌شده است، درصورتي‌که پارامتر هزينه خارجي در محاسبات در نظر گرفته شود، حتي سناريوی پايه نيز اثرات زيست‌محيطي كمتري نسبت به مدل MESSAGE خواهد داشت. اين موضوع دقيقاً وضعيت بحراني در توليد انرژي الكتريكي با توجه به اثرات زيست‌محيطي را نشان مي‌دهد. نكته جالب در اين شكل نتايج حاصل از سناريوي هسته‌اي است؛ به‌اين‌ترتيب كه اگر از انرژي هسته‌اي به همراه انرژي‌هاي تجديدپذير در تأمين انرژي الكتريكي استفاده شود، نه‌تنها شيب افزايش آلودگي به‌شدت كاهش مي‌يابد، بلكه از سال 1415 مي‌توان ميزان آلودگي را با شيب منفي دنبال نمود. براين اساس مي‌توان با داشتن برق مطمئن و پيوسته هسته‌اي، ميزان رشد آلودگي در كشور را در منظر توليد انرژي الكتريكي كاهش چشمگير داد.

**5- نتيجه‌گيري**

در اين مقاله در ابتدا انواع مدل‌هاي عرضه انرژي بررسي شد، سپس مدلي با در نظر گرفتن دو سناريوي پايه و هسته‌اي پياده‌سازي گرديد. سپس اين مدل با مدل MESSAGE و مطالعات انجام شده در ايران مقايسه شد. به‌اين‌ترتيب مي‌توان نتايج را به‌صورت زير جمع‌بندي نمود:

* براي كشور ايران هيچ گزينه معقولي به‌جز افزايش نقش انرژي هسته‌اي در توليد انرژي الكتريكي وجود ندارد. يكي از دلايل عمده اين است كه انرژي تجديدپذير نظير باد و خورشيد تناوبي هستند و نمي‌توانند قابليت اطمينان مناسب را براي كشور درحال‌توسعه ايران را برآورده كنند.
* روال موجود در بكارگيري انرژي‌هاي فسيلي نظير گاز، نفت كوره و ساير سوخت‌هاي فسيلي مي‌تواند كشور ايران را در دهه‌هاي آينده دچار بحران آلودگي زيست‌محيطي نمايد. اين موضوع سبب مي‌شود ايران نه‌تنها نتواند به تعهدات جهاني خود در كاهش تغيير اقليم و پايين نگاه‌داشتن گرماي كره زمين زير 2 درجه سانتي‌گراد عمل نمايد، بلكه باعث مي‌شود ايران به كشوري آلوده­تر از منظر محيط‌زيست و عواقب انساني آن تبديل شود.
* با توجه به تأثير مثبت انرژي هسته‌اي بر کاهش تغييرات اقليم و دارا بودن هزينه خارجي کم، سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید برق کشور ایران (سناریوی هسته‌ای) در سال 1423 حدود %8 تعیین گردید.

**مراجع**

[1] Lehtveer M., F. Hedenus (2015), "How much can nuclear power reduce climate mitigation cost? Critical parameters and sensitivity" Energy Policy, vol. 6, pp. 12-19.

[2] Karaveli A. B., U. Soytas, B. G. Akinoglu (2015), “Comparison of large scale solar PV (photovoltaic) and nuclear power plant investments in an emerging market”, Energy , pp.1-10.

[3] Kennedy D. (2007), “New nuclear power generation in the UK: Cost benefit analysis”, Energy Policy 35, pp.3701–3716.

[4] Mez L. (2012), “Nuclear energy–Any solution for sustainability and climate protection?” Energy Policy, vol. 48, pp. 56–63.

[5] Hibbs M., (2012), "Nuclear energy 2011: A watershed year", in Bulletin of the Atomic Scientists 68(1), pp. 10–19.

[6] Ghorashi A.H. (2007) "Prospects of nuclear power plants for sustainable energy development in Islamic Republic of Iran", Energy Policy, Vol. 35, no. 3, pp. 1643–1647

[7] وزارت نيرو- معاونت امور انرژي، گروه تقاضا "بررسي مدل‌هاي انرژي" 1379.

[8] كاظمي ع. ، ح. شكوري گنجوي، ش. شكيبا، م. حسين‌زاده (1392)، "انتخاب مدل مناسب براي تخصيص منابع انرژي درايران بااستفاده ازفرايندتحليل سلسله‌مراتبي" ، نشريه انرژي ايران،‌ دوره 16، ش. 2، تابستان صفحات 31-60.

[9] Asbjorn Aaheim H. and Nathan Rive (2005), "A Model for Global Responses to Anthropogenic Changes in the Environment (GRACE)", CICERO Report 2005:05, pp. 1-22.

[10] آمار بانک مرکزي جمهوري اسلامي ايران، "شاخص کل بهاي کالاها و خدمات مصرفي در مناطق شهري ايران"، سال 1393.

[11] وزارت نيرو، معاونت امور انرژي، دفتر برنامه‌ريزي برق و انرژي، "ترازنامه انرژي سال 1392".

‌‍‍‌[12] وزارت نيرو، شرکت مادر تخصصي توانير، "روند ده ساله صنعت برق ايران"، سال 1393.

[13] Shaalan, HE (2003), “Generation of Electric Power: Section 8.” Retrieved February 30, 2014, from <http://energysystems.princeton.edu/EnergyResources/GenerElectPower_Shalaan.pdf>.

[14] Roth, I., Ambs, L. (2004). "Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing". Energy, 29(12-15), pp. 2125–2144.

[15] شفيعي س. ا. ، و. آريان پور، ش. شكيبا، م. حسين زاده (1390)، "طرح‌ريزي ساختار سامانه عرضه انرژي الکتريکي و تنظيم پايگاه اطلاعات موردنياز"، وزارت نيرو، دفتر برنامه‌ريزي کلان برق و انرژي، قرارداد 23-90.

1. Greenhouses gas [↑](#footnote-ref-1)
2. Modelfor Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact [↑](#footnote-ref-2)
3. MARKet ALlocation model [↑](#footnote-ref-3)
4. Energy Flow Optimization Model [↑](#footnote-ref-4)
5. The Integrated MARKAL-EFOM System [↑](#footnote-ref-5)
6. Wien Automatic System Planning Package [↑](#footnote-ref-6)
7. Renewable energy technologies [↑](#footnote-ref-7)
8. Long-Range Energy Alternatives Planning System [↑](#footnote-ref-8)
9. Energy and Power Evaluation Program [↑](#footnote-ref-9)
10. Global Responses to Anthropogenic Changes in the Environment [↑](#footnote-ref-10)
11. Inflation rate [↑](#footnote-ref-11)
12. Interest rate [↑](#footnote-ref-12)
13. Fixed Charge Rate [↑](#footnote-ref-13)
14. Total Plant Cost [↑](#footnote-ref-14)
15. Capacity Factor [↑](#footnote-ref-15)
16. Fixed Operation and Maintenance Cost [↑](#footnote-ref-16)
17. Variable Operation and Maintenance Cost [↑](#footnote-ref-17)
18. Fuel Cost [↑](#footnote-ref-18)
19. External Cost [↑](#footnote-ref-19)
20. Heat Rate [↑](#footnote-ref-20)
21. Particulate Matter (PM) [↑](#footnote-ref-21)
22. Emission Factor(EF) [↑](#footnote-ref-22)