فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شماره چهار، زمستان ۱۴۰۰

مدلسازی ظرفیت سیستم تولید برق نیروگاهی ایران با بکارگیری نرم افزار wasp بمنظور ارزیابی و توسعه بهینه نیروگاه های هسته ای کشور

امیرحسین کشاورز[۱]، علی پذیرنده[۲*]*، غلامرضا جهانفرنیا[۳]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۰**

چکیده

توسعه بهینه شبکه برق جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی کشورها دارد. نرم‌افزار **wasp** به سفارش آژانس بین المللی انرژی اتمی و جهت مدلسازی ، طراحی و مقایسه ظرفیت تولید انواع نیروگاه های حرارتی و آبی توسعه یافته و با بهره گیری از مدل‌سازی احتمالاتی بلند مدت، با عمق و دقت بیشتری نسبت به سایر مدلها در یک دوره مشخص ظرفیت مورد نیاز انواع نیروگاه ها را در سالهای مختلف ارائه می‌نماید. هدف این مقاله مقایسه اقتصادی نیروگاه های حرارتی و اتمی است. بدین منظور قیمت تمام شده هر کیلووات برق تولیدی انواع نیروگاهها مدلسازی و مقایسه می شوند. آنالیزحساسیت روی پارمترهای عمده نشان می دهد که انتخاب ظرفیت هسته ای حساسیت بالایی به قیمت گاز طبیعی، نرخ تنزیل و هزینه احداث دارد .حساسیت به هزینه‌های تعمیر و نگهداری متوسط و نسبت به قیمت سوخت اتمی کم می‌باشد. نتایج مطالعه نشان می دهد که از نقطه نظر اقتصاد ملی تصمیم‌گیری جهت احداث حدود ۱۴۰۰۰مگا وات برق هسته ای در پایان دوره ۳۰ ساله توسعه نیروگاه های اتمی با توجه به شرایط سیاسی و تعاملات بین المللی توجیه پذیری اقتصادی دارد. بهترین گزینه جهت احداث نیروگاه اتمی ، هزینه احداث ۱۱۰۰ دلار بر کیلووات، نرخ سوخت ٤/٥ دلار بر مگاوات ساعت و هزینه تعمیر و نگهداری معادل ۳۵ دلار بر کیلووات ساعت–سال است. در بدترین حالت (دوره ساخت طولانی و نرخ تنزیل بالا) در صورتی که قیمت گاز ۲۰ سنت یا بیشتر شود ساخت نیروگاه هسته ای دارای بیشترین توجیه اقتصادی است.

واژگان کلیدی: اقتصاد انرژی ،برنامه جامع انرژی، سیستم تولید برق ، نیروگاه های هسته ای، نرم افزار wasp

[۱] ۱دانشجوی دکتری مهندسی انرژی هسته ای ،گروه مهندسی هسته ای، واحد علوم تحقیقات،دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ،ایران ah.keshavarz@srbiau.ac.ir

[۲*] استاد تمام گروه مهندسی هسته ای،واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، نویسنده مسئول، paziran@ut.ac.ir

[۳] دانشیارگروه مهندسی هسته ای،واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ،ایرانjahanfarnia@srbiau.ac.ir

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

۱. کلیات:

انرژی هسته ای یکی از منابع تولید برق است و در آینده نزدیک نیز همچنان این جایگاه را حفظ خواهد کرد. تعداد راکتورهای هسته ای در سراسر جهان افزایش خواهد یافت. تا فوریه ۲۰۱٤، ٤۳٤ راکتور با ظرفیت تولید ۳۸۰ هزار مگاوات برق در سراسر جهان به ثبت رسیده اند. ۷۰ راکتور دیگر با ظرفیت تولید ۷۵ هزار مگاوات برق در دست ساخت اند و ۱۷۳ راکتور دیگر نیز در آستانه آغاز عملیات احداث قرار دارند. گزارش انجمن هسته ای جهانی در ژانویه ۲۰۱٤ حاکی از آن است که بیش از ٤۵ کشور در جهان به طور فعالانه ای از برنامه های انرژی هسته ای استفاده می کنند. تعیین نیازهای عملی ایران به در نظر گرفتن سهم منابع انرژی بهینه و نقش تامین انرژی در رشد اقتصادی پایدار نیاز دارد. ایران نیز مصمم است انرژی هسته ای سهمی بهینه در برنامه های تولید انرژی ایفا کند. پژوهش های گذشته نیز اهمیت نقش انرژی هسته ای را مورد تاکید قرار می دهند. برای نمونه، مطالعات سال ۱۹۷۳ از سوی موسسه تحقیقاتی استنفورد نشان داد که ایران تا سال ۱۹۹٤، به تاسیسات انرژی هسته ای با ظرفیت تولید ۲۰ هزار مگاوات برق در سال نیاز خواهد داشت. همچنین مطالعه دیگری هم که سازمان انرژی اتمی ایران انجام داده، نشان می دهد که در سال ۲۰۲۱ ایران باید مجموعا ۱۰ هزار مگاوات معادل ۱۲,۵درصد از نیاز برق خود را از انرژی هسته ای تأمین کند. سازمان «توانیر» هم میزان بهینه سهم برق هسته ای در سبد تولید برق سال ۲۰۳۱ ایران را ۸ هزار از مجموع ۱۲۰ هزار مگاوات پیش بینی کرده است.

برخی بر این باورند که سرمایه گذاری های زیرساختی و هزینه های هنگفت انجام شده برای راکتور بوشهر با اضافه شدن تنها ۱۰۰۰ مگاوات برق به منابع تولید انرژی ایران همخوانی ندارد. این یک نظریه معتبر است. مطالعات سازمان انرژی اتمی ایران نشان می دهد که ایران باید بین ۲ تا ٤ واحد دیگر در بوشهر بسازد تا آن را از نظر اقتصادی مقرون به صرف کند.

به همین دلیل است که در پروژه های تاسیسات انرژی هسته ای، معمولا ٤ تا ٦ واحد ساخته می شود تا ضمن کاهش هزینه های عملیاتی، سرمایه گذاری های زیرساختی اولیه نیز اقتصادی باشد. به عنوان نمونه هم ترکیه و هم امارات متحده عربی کار خود را با ٤ واحد آغاز کرده اند. برمبنای این ملاحظات است که ایران تصمیم گرفته ٤ نیروگاه دیگر را نیز با مشارکت روسیه احداث کند.

یکی دیگر از نظریه ها علیه برنامه های هسته ای ایران این است که ایران یک کشور غنی از نفت است و به انرژی هسته ای به عنوان منبعی برای تولید انرژی نیاز ندارد. زمانی که به عقب نگاه کنیم در می یابیم که ایران از سال ۱۹۷۵ به عرصه هسته ای وارد شده و در این زمینه تشویق آمریکا نیز همراهی اش کرده است، به خصوص طرح اتم برای صلح پرزیدنت دوایت آیزنهاور. در سال های ۱۹۷۰؛ محمدرضا پهلوی طرح های هدفمندی برای توصعه برنامه هسته ای داشت و می خواست تا سال ۱۹۹٤، با پشتیبانی آمریکا ۲۳ نیروگاه هسته ای بسازد. این در حالی است که در آن زمان جمعیت ایران یک سوم جمعیت کنونی بود.به هر ترتیب این استدلال این موضوع که مصرف نفت ایران با توجه به افزایش جمعیت و تعداد خودروها سیر صعودی دارد را نادیده می گیرد. نیاز داخلی ایران به نفت از یک میلیون و ۳۰۰ هزار بشکه در سال ۲۰۰۱ ، به یک میلیون و ۹۰۰ هزار بشکه در سال ۲۰۱۰ رسیده است. این نشان دهنده افزایش نزدیک به ۵۰ درصدی مصرف نفت در یک دهه است. با نگاهی به تجربه اندونزی، کشوری که از یک صادر کننده نفت به یک وارد کننده نفت تبدیل شد، می توان دریافت که امکان تکرار سناریویی مشابه برای ایران وجود دارد.

سوال اصلی در مقاله اینست که آیا ساخت نیروگاه های هسته ای اقتصادی است یا خیر! از اینرو با مقایسه نیروگاه های حرارتی و اتمی از منظر اقتصادی به این پرسش پاسخ داده می شود. بدین منظور قیمت تمام شده هر کیلووات برق تولیدی انواع نیروگاهها مدلسازی و مقایسه می شوند.

برای اعتباربخشی نتایج حاصله از مدلسازی ، بر روی پارامترهای اثرگذار ناشی از شرایط سیاسی و تعاملات بین المللی مانند قیمت گاز طبیعی، نرخ تنزیل ، هزینه احداث، نرخ سوخت، دوره ساخت و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنالیزحساسیت انجام می دهیم تا از درصد خطا بکاهیم.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

۲.ضرورت پژوهش:

انرژی از عواملی است که در اکثر فعالیت های اقتصادی مورد استفاده قرار می گیرد. امنیت ملی بسیاری از کشورهای جهان نیز در گرو دسترسی مطمئن به انرژی است . تحقیقات اخیر مجمع جهانی اقتصاد حاکی از آن است که ایران در بین ۱۲٤ کشور در جایگاه ۱۰۲، به لحاظ امنیت انرژی قرار دارد. البته این به این معنی نیست که تمامی مشکلات مربوط به بخش انرژی ایران نتیجه فقدان انرژی هسته ای است. باید کارهای زیادی در بخش انرژی انجام شود که تنها محدود به توسعه انرژی هسته ای نیست.انگیزه عربستان سعودی برای ساخت نیروگاه هسته ای ، یک نمونه برای نقض استدالی است که می گوید کشورهای غنی از نفت و گاز به انرژی هسته ای نیازی ندارند. امارات متحده عربی نیز که یک کشور غنی از نفت به شمار می رود نیز در همین راه گام گذاشته است.در حالی که چارچوب برنامه اقدام مشترک به سوی توافق نهایی حرکت می کند، گفت و گوها بین ایران و گروه ۱+۵، روی مساله نیاز واقعی ایران به انرژی هسته ای متمرکز خواهد شد. استدلال های ایران باید بر محور بهینه سازی اقتصادی هزینه تولید انرژی باشد.

این نکته برای تعیین مشترک، سطح و گستره برنامه غنی سازی اورانیوم ایران ضروری است. به همین منظور، ضروری است است مطالعه ای به روز در این خصوص انجام شده و به گروه ۵+۱ و یا آژانس بین المللی انرژی هسته ای ارایه گردد. مطالعه ای که در آن سهم بهینه انرژی هسته ای مورد نیاز برای ایران در تولید انرژی در سال های آینده تا افق ۲۰۵۰ و با هدف رشد اقتصادی پایدار، به طور روشن تشریح شده باشد

۳.مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

مدل های انرژی ، ابزاری استاندارد برای برنامه ریزی های نیاز آینده به انرژی هستند. در سال های اخیر تلاش های زیادی برای فرموله کردن و اجرای استراتژی های آینده انرژی انجام شده است و مدل های انرژی مختلفی در جهان ارائه شده اند. مهمترین این مدلها عبارتند از: مدل های MARKAL، TIMES، EFOM، JASP، MESSAGE ، RETScreen ENERGY2020، NEMS ،MESAP، ENPEP، LEAP، وWASP . از میان مدل های موجود برای توجیه پذیری ایجاد یک نیروگاه از منظر اقتصادی، مدل NEMS ومدل MESSAGE با استقبال بیشتری در جامعه محققین مواجه بوده اند. (آژانس بین المللی انرژی اتمی[2]،۲۰۰۱)

همچنین پژوهشگران انرژی ایران توافق خود را با بومی سازی مدلNewWorld برای ایران اعلام داشته اند. جوادپور در سال ۱۳۸۸، به مطالعه مدل های مختلف عرضه انرژی که در ایران بیشتر به آنها مراجعه شده و همجنین مدل NewWorld پرداخته است .کاظمی در سال ۱۳۸۹، مدل ریاضی تخصیص بهینه نفت و گاز به بخش های مختلف مصرف را توسعه داده است . مدل پیشنهادی یک مدل برنامه ریزی خطی چندهدفه فازی است . اهداف با رویکردهای امنیت سیاسی و امنیت انرژی ، زیست محیطی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته اند. محدودیت های مدل شامل محدودیت های تعادل ، تقاضا وحدود بالا و پایین متغیرها است . جناب در سال ۱۳۸۹، به توسعه مدل سیستم های عرضه انرژی الکتریکی پرداخته است . در این تحقیق با هدف کاهش فشار بر ظرفیت های تولید مراکز تولید و بهره برداری مطلوب از ظرفیت های انتقال و بهینه سازی ظرفیت ، مدل تحلیلی بر اساس مفروضات اصولی طراحی شده است که نتایج حل آن تعداد بهینه مراکز تولید انرژی برق ، ظرفیت تولید و ساختار اتصال شبکه با رعایت محدودیت های اقتصادی ، تکنولوژیکی و قابلیت اطمینان است.در سال۱۳۷۳، سازمان برنامه و بودجه با همکاری دانشگاه صنعتی شریف طرح بیست ساله انرژی ایران را پیشنهاد داده اند. دفتر برنامه ریزی و مطالعات استراتژیک برق و انرژی وزارت نیرو و مرکز تحقیقات انرژی وزارت نفت نیز علاوه برانتشار ترازنامه های دوره ای انرژی و هیدروکربوری کشور و جداول آماری ۳۱ ساله انرژی از سال ٤۷ تا ۹۷ در سال۱۳۹۳یک برنامه مدیریتی عرضه انواع انرژی تا افق۱٤۲۰را پیشنهاد داده است.

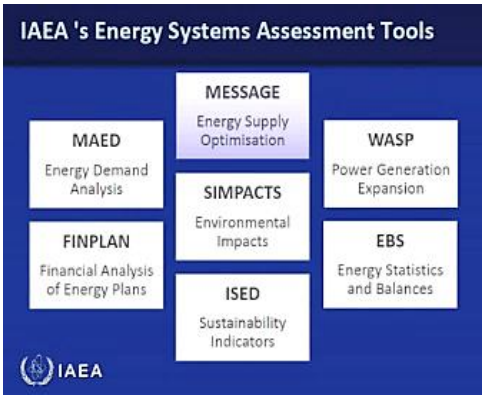
مطالعات سال ۱۹۷۳ موسسه تحقیقاتی استنفورد برنامه بلندمدت انرژی ایران را با نگرش حاکم در آن دوره زمانی به لحاظ سیاسی ، منابع و نرخ رشد تخمینی جمعیت آن دهه پیشنهاد نموده و سعی داشته است ضمن برآورد تقاضای انرژی ، پروژه های

[2] IAEA

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

مربوط به سیستم های برق رسانی ، نفت و گاز طبیعی ، ترکیب سوختها و تکنولوژی های عرضه انرژی نیز ارزیابی شوند.بررسی تحقیقات انجام گرفته درکشورهای پیشرفته دنیا و ایران و توجه به توصیه های آژانس بین المللی انرژی اتمی در برنامه ریزی بلند مدت انرژی هسته ای و تعهدات هر کشور در کاهش گازهای گلخانه و گرمایش زمین براساس معاهده های پاریس و کیوتو ، اهمیت و ضرورت مدلسازی هر یک از منابع و ترازمندی و سرمایه گزاری و تعیین نقش هر یک از آنها ، بخصوص انرژی هسته ای(همجوشی – شکافت) و منابع تجدید پذیر را نمایان می کند.

ضرورت این گونه تحقیقات در هر کشوری بخصوص کشور ایران بحدی است که حتی آژانس بین المللی انرژی اتمی[3] به کشورهای عضو در انجام اینگونه مطالعات و برنامه ریزی یاری می رساند و کدها و مدلهایی را با مد نظر قراردادن الزامات زیست محیطی (پیمان کیوتو و معاهده پاریس) با هدف ارزیابی مدلهای جایگزین استراتژی توسعه بخش انرژی و الکتریسیته بمنظور پیش بینی تقاضای آینده انرژی و برآورد نقش انرژی هسته ای در مواجهه با این تقاضا ها طراحی نموده است.. شکل زیرمجموعه ی برنامه های مدلسازی انرژی هسته ای را نشان می دهد(آژانس بین المللی انرژی اتمی[4]،۲۰۰۱)



شکل۱–مجموعه برنامه های مدلسازی انرژی هسته ای آژانس بین المللی انرژی اتمی(IAEA)

نرم‌افزار[5] **WASP** برای مدل‌سازی سیستم‌های تولید و مصرف برق ومقایسه اینکه آیا یک نیروگاه ها اقتصادی است یاخیر، استفاده می شود. امروزه به‌کارگیری این نرم افزارجهت انجام مطالعات توسعه بهینه سیستم تولید برق توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی، بانک جهانی و ... برای کشورهای در حال توسعه توصیه می گردد.(آژانس بین المللی انرژی اتمی[6]،۲۰۰۱)

٤.معرفی نرم افزار و ابزار مدلسازی توسعه بهینه شبکه برق (WASP)

طراحی و توسعه بهینه شبکه تولید انرژی الکتریکی و قدرت[7] جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی کشورها دارد. تأمین بی‌وقفه انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کنندگان با نازل‌ترین قیمت، هدف اساسی طراحان شبکه قدرت می باشد. این طراحی در بخش‌های گوناگون تولید، انتقال و توزیع صورت می گیرد.

بدیهی است که این بخش ها در ارتباط تنگاتنگ با یکدیگر بوده و طراحی یک بخش بدون توجه به سایر بخشها صحیح نخواهد بود. از سوی دیگر برنامه ریزی بهینه توسعه تولید از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد، زیرا هزینه احداث و بهره برداری از نیروگاه ها بزرگترین مولفه هزینه را برای صنعت برق دربردارد. از این جهت به کارگیری یک روش معین جهت بهینه سازی توسعه سیستم تولید ضروری می باشد. گسترش شبکه های برق و مطرح شدن تکنولوژی های جدید و گوناگون موجب گردیده است که عوامل متعددی هزینه های تولید در بخش های احداث و بهره برداری را تحت تأثیر قرار دهند. به همین دلیل برنامه ریزی بلندمدت توسعه تولید (به عنوان مثال ۳۰–۱۵ ساله) مستلزم مقایسه سناریوهای مختلف می باشد.امروزه کامپیوتر با قابلیت سرعت بالای انجام محاسبات به کمک طراحان آمده است و نرم افزارهای گوناگونی در این راستا نوشته شده و مورد استفاده قرار گرفته اند.

هدف اصلی برنامه های مذکور ارزیابی هزینه های تولید برق و همچنین تعیین زمان و نوع واحدهای جدیدی که در پریود مطالعه باید وارد شبکه قدرت گردند می باشد. نرم افزار WASP IV روش شبیه سازی احتمالاتی راجهت شبیه سازی سیستم به کار می‌برد و همچنین جهت تعیین پاسخ بهینه از روش

[3] IAEA Tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments

[4] IAEA

[5] Wien Automatic System Planning

[6] IAEA

[7] Power System Expansion Planing

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

برنامه ریزی پویا استفاده می نماید. به این ترتیب نرم‌افزار ضمن انجام شبیه سازی سیستم تولید و مصرف که براساس آن انرژی تولیدی توسط هر یک از نیروگاهها و به تبع آن هزینه های نیروگاهی محاسبه می‌گردند، طرح توسعه بهینه سیستم تولید را که بیانگر ظرفیت، نوع و سال ورود به مدار نیروگاههای آینده می باشد، مشخص می نماید.

طرح بهینه براساس Least Cost Planning تهیه می‌گردد که ارزش حال تمامی هزینه‌های سیستم تولید را در یک دوره زمانی حداقل نموده است.

نرم افزار WASP از ۹ مدول تشکیل گردیده است که در cdv به صورت مختصر معرفی گردیده اند.(راهنمای کاربری-WASP آژانس بین المللی انرژی اتمی[۸]،۲۰۰۱)

۱ – Common Case Data :

به عنوان یک مدول فرعی مطرح می گردد که به منظور تعیین اطلاعات اولیه ورودی به کار می رود. این اطلاعات شامل دوره مطالعه (سال ابتدا و انتهای مطالعه)، تعداد پریودها در سال (برنامه قابلیت گرفتن ۱۲ پریود و بازه زمانی در سال را دارد) و تعداد شرایط آب و هوایی (جهت شبیه سازی عملکرد واحدهای آبی حداکثر تا ۵ شرایط آب و هوایی مختلف می توان معرفی نمود) می باشد.

۲ – مدول LOADSY :

اطلاعات مربوط به پیک بار شبکه (پیک نیاز مصرف) در دوره مطالعه، پیک های فصلی، معادله منحنی تداوم بار ..در این مدول وارد می‌گردد.

۳ – مدول FIXSYS :

اطلاعات مربوط به واحدهای حرارتی وآبی موجود در شبکه همچنین واحدهای دردست احداث که به صورت مشخص در سالهای بعدی وارد مدار می گردند در این مدول وارد برنامه می شوند.

٤ – مدول VARSYS :

اطلاعات مربوط به واحدهای حرارتی و آبی که به عنوان کاندیدا مطرح می باشند در این مدول معرفی می گردند.

۵ – مدول CONGEN :

آرایش های گوناگونی از کاندیداهای معرفی شده که در سالهای مختلف دوره مطالعه قابلیت تأمین بار شبکه را دارا می باشند در این مدول ساخته می‌شوند. برنامه با توجه به حداکثر تعدادی که از هر نوع کاندیدا در هر سال توسط برنامه‌ریز معین می گردد و با توجه به میزان ذخیره تولید مورد نیاز سیستم به ساخت آرایش‌های مختلف می پردازد.

٦ – مدول MERSIM :

سیستم تولید به ازاء هر یک از آرایش های ساخته شده توسط مدول قبلی در این مدول شبیه سازی می گردد. نرم افزار همانگونه که قبلاً مطرح گردید از روش شبیه سازی احتمالاتی استفاده نموده و با اعمال احتمال خروج واحدها در منحنی تداوم بار وضعیت عملکرد هر یک از واحدها را شبیه سازی کرده و براساس آن هزینه های بهره برداری از سیستم را تعیین می نماید.

۷ – مدول DYNPRO :

این مدول با استفاده از روش برنامه ریزی پویا به حداقل نمودن تابع هدف (Objective Function) می پردازد. تابع هدف در این نرم افزار عبارتست از ارزش حال مجموع هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری و خاموشی که برنامه مقدار آن را در کل دوره مطالعه حداقل نموده و آرایش های هر سال را که به ازاء آنها تابع هدف می نیمم گردیده است معرفی می نماید.

۸ – مدول REMERSIM :

یکی از مدولهای فرعی است که در حقیقت اجرای مجدد MERSIM پس از کامل شدن DYNPRO می باشد. پس از تعیین آرایش های بهینه در هر یک از سالهای مطالعه، اجرای مجدد MERSIM اطلاعات مربوط به هر یک از واحدها را که در نتیجه شبیه سازی سیستم حاصل گردیده است به صورت مناسب در فایل های خروجی در اختیار برنامه ریز قرار می دهد.

۹ – مدول REPROBAT :

این مدول به منظور گزارش گیری و تهیه یک گزارش کامل از وضعیت سیستم اجرا می‌گردد.

بااجرای آن اطلاعات کامل سیستم شامل اطلاعات واردشده به برنامه ونتایج حاصل ازاجرای برنامه به‌صورت مناسب دراختیار برنامه‌ریز قرار می گیرد.

[۸] IAEA

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

۵.مبانی نظری و اطلاعات ضروری در مدلسازی نیروگاه های حرارتی

مهمترین اطلاعات نیروگاههای حرارتی مورد نیاز نرم افزار عبارتند از:

- قدرت عملی واحد نیروگاهی (MW)
- حداقل تولید واحد (MW)
- راندمان و نرخ حرارتی (Kcal/Kwh , %)
- نرخ سوخت (Cent/ 10^6 Kcal)
- خروج اضطراری و تعمیرات (days/ year , %)
- هزینه های تعمیر و نگهداری (ثابت $/Kw – month و متغیر $/Mwh)

(حداقل هزینه برنامه ریزی هزینه های تولید برق-آژانس بین المللی انرژی[۹]-۲۰۱۸)

٦.اطلاعات ضروری نیروگاههای آبی و تلمبه ذخیره ای

مهمترین اطلاعات نیروگاه های آبی مورد نیاز جهت وارد نمودن به نرم افزار عبارتند از:

- ظرفیت مفید مخزن (Gwh)
- پتانسیل آبی قابل استحصال بین هد می‌نیمم و ماکزیمم مخزن برحسب واحد انرژی الکتریکی.
- انرژی ورودی (Gwh)

شامل انرژی آب ورودی به مخزن به تفکیک پریود می باشد که در این مجموعه فصل درنظر گرفته شده است. با فرض حفظ ذخیره مخزن مقدار فوق بیانگر مقدار انرژی برقابی قابل استحصال در هر فصل می باشد.

- انرژی مینیمم (Gwh)

حداقل انرژی عبوری از توربین که براساس نیازهای آبیاری پایین دست سد بایستی به صورت دائمی عبور نماید.

- توان در دسترس (MW)

مقدار ظرفیت قابل دسترس نیروگاه براساس شرایط هِد و سایر عوامل که نیروگاه امکان تولید آن را خواهد داشت.

- ظرفیت نصب شده (MW)

- هزینه‌ی تعمیرو نگهداری سالیانه ($/Kw–month)

در نیروگاه های آبی نرم افزار هزینه های نگهداری را به صورت ثابت منظور می‌نماید.ازسوی دیگر اطلاعات اختصاصی نیروگاه های تلمبه ذخیره ای علاوه بر اطلاعات معمول نیروگاههای برقابی به شرح زیر می باشند:

- راندمان سیکل (٪)
- ظرفیت مورد نیاز پمپاژ (MW)
- حداکثر انرژی قابل استحصال (Gwh)

(حداقل هزینه برنامه ریزی هزینه های تولید برق-آژانس بین المللی انرژی-۲۰۱۸)

۷.روش شناسی و ورود اطلاعات به نرم‌افزار WASP

۱-۷- اطلاعات عمومی و توصیف داده ها:

دوره مطالعه سال های ۱٤۳۰-۱۳۹۱درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با توجه به شروع انجام مطالعات در سال ۲۰۱۳ و به منظور ملاحظه نتایج شبیه سازی سیستم تولید، این سال بعنوان سال شروع مطالعه در نظر گرفته شده است.

همچنین سال شروع مطالعه به معنی امکان ورود به مدار انواع نیروگاهها در این سال نبوده و اولین سال ورود به مدار هر یک از انواع نیروگاه ها با توجه به طول دوره احداث آنها و زمان ممکن برای شروع احداث تعیین می گردد. تعداد ٤ پریود در هر سال در نظر گرفته شده است یا به عبارت دیگر این مطالعه به صورت فصلی انجام شده است.همچنین شرایط آب و هوایی نرمال مدنظر قرار گرفته است و با توجه به عدم متمرکز شدن این مطالعه بر نیروگاه های آبی موضوع رژیم های آب و هوایی خشکسالی و یا پرآبی مورد توجه قرار نگرفته است. (راهنمای کاربری-WASP آژانس بین المللی انرژی اتمی،۲۰۰۱)

۲-۷- اطلاعات بار

اطلاعات بار مورد نیاز برای اجرای مدول LOADSY به شرح زیر می باشند:

الف – اطلاعات پیک بار:

سناریوهای مختلف برای تعیین روند افزایش پیک بار معرفی گردیدند(گزارش «برآورد بار شبکه تا سال ۱۴۰۵» ، پژوهشکده

[۹] IEA

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

انرژی و محیط زیست، خرداد1396).سه سناریو مربوط به نرخ های مختلف رشد GDP و سه سناریو مربوط به ضرایب کشش مختلف مصرف برق به GDP معرفی گردیدند که سناریوهای نه گانه ای را تشکیل دادند.

از سوی دیگر سناریوی دیگری نیز معرفی شد که در آن با توجه به نرخ رشد و روند گذشته، مقادیر پیک بار طی سالهای آینده پیش بینی گردید.

شایان ذکر است که مقادیر تعیین شده در روش اخیر نسبت به سایر سناریوها کوچکتر می باشند بگونه ای که در این سناریو پیک مصرف سال ۱۴۰۵ بالغ بر ۱۲۳۰۰۰ مگاوات تعیین شد در حالیکه در تمامی سناریوهای دیگر این مقدار بیشتر بوده و در بالاترین گزینه از حیث رشد GDP و ضریب کشش به مقداری بیش از ۳۲۰۰۰۰ مگاوات رسیده است.

در انجام این مطالعه حداکثر پیک بار۱۲۳۵۰۰ مگاوات برای سال ۱۴۰۵ مد نظر قرار گرفت. چنانکه خواهیم دید، ظرفیت نیروگاههای اتمی به مقدار بسیار زیادی در همین گزینه توسط نرم افزار انتخاب شده است لذا اجرای سایر گزینه ها با مقادیر بالاتر پیک بار منجر به انتخاب ظرفیت های بالاتر نیروگاه اتمی خواهد شد که در صورت ضرورت در مطالعات تکمیلی دیگری قابل بررسی خواهد بود . جدول (۱) مقادیر پیک بار را طی سالهای مطالعه برای گزینه روند گذشته نشان می دهد.

جدول۱- پیش بینی پیک بار سالهای مطالعه با فرض تداوم روند (گزارش «برآورد بار شبکه تا سال ۱۴۰۵» ، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، خرداد1396)

سال	بار پیک (مگاوات)	سال	بار پیک (مگاوات)	سال	بار پیک (مگاوات)
۱۳۸۵	۳۳۶۹۹	۱۳۹۲	۵۲۸۰۲	۱۳۹۹	۸۳۱۳۷
۱۳۸۶	۳۵۹۲۵	۱۳۹۳	۵۶۳۱۸	۱۴۰۰	۸۸۷۶۰
۱۳۸۷	۳۸۳۰۱	۱۳۹۴	۶۰۰۷۶	۱۴۰۱	۹۴۷۸۲
۱۳۸۸	۴۰۸۳۷	۱۳۹۵	۶۴۰۸۷	۱۴۰۲	۱۰۱۲۳۵
۱۳۸۹	۴۳۵۴۶	۱۳۹۶	۶۸۳۷۷	۱۴۰۳	۱۰۸۱۵۱
۱۳۹۰	۴۶۴۳۱	۱۳۹۷	۷۲۹۶۷	۱۴۰۴	۱۱۵۵۶۴
۱۳۹۱	۴۹۵۱۲	۱۳۹۸	۷۷۸۷۹	۱۴۰۵	۱۲۳۵۱۳

ب- اطلاعات نسبت پیک های فصلی :

با توجه به معرفی ٤ پریود در سال، شبیه سازی سیستم تولید و مصرف برق بصورت فصلی انجام می گیرد. بدین لحاظ لازم است نسبت پیکهای فصلی به پیک بار کل سال (که در تابستان رخ می دهد) تعیین و وارد نرم افزار گردد. نسبت پیک های فصلی براساس سوابق سیستم و با بررسی فایل های دریافتی از دیسپاچینگ ملی برای فصول چهارگانه به ترتیب ۰/۹٤۸۳۸ ، ۱/۰، ۰/۸۹۰۱۸ و ۰/۸۵۲۷۰ تعیین شده و طی سالهای مطالعه ثابت فرض شده است. (گزارش «برآورد بار شبکه تا سال ۱٤۰۵» ، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، خرداد1396)

ج- اطلاعات منحنی تداوم بار:

منحنی های تداوم بار فصلی بصورت نرمالیزه به نرم افزار معرفی می گردند. اطلاعات مربوط به هر منحنی بصورت یک معادله درجه پنجم و یا بصورت نقطه ای می باشد. هرگاه فقط پیک بار سیستم افزایش یافته و سایر مشخصات بار ثابت بماند، تنها یک سری چهارتایی منحنی های نرمالیزه مربوط به چهار فصل به نرم افزار معرفی می گردند. اما اگر سایر مشخصات مانند حداقل بار و یا ضریب بار تغییر نماید، منحنی های نرمالیزه به تناسب به نرم افزار معرفی می گردند. در این مطالعات موضوع روند تغییرات ضریب بار مورد توجه قرار گرفته و بدین لحاظ معادلات درجه پنجم منحنی های نرمالیزه تداوم بار برای تمامی سالهای مطالعه به تفکیک فصل تعیین و وارد نرم افزار شده است. (گزارش «برآورد بار شبکه تا سال ۱٤۰۵» ، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، خرداد1396)

۸. نیروگاههای کاندید

در این پژوهش نیروگاه های مفروض به دو دسته اتمی و غیر اتمی(حرارتی) تقسیم می شوند :

۸-۱- کاندیداهای غیر اتمی*[۱۰]

نیروگاههای معرفی شده در این بخش عبارتند از :(ترازنامه های انرژی و اطلاعات دفتر برنامه‌ریزی تولید توانیر ،خرداد 1396)

- نیروگاه سیکل ترکیبی بزرگ با ظرفیت خالص (پس از کسر مصرف داخلی) هر بلوک ۷۷۰ مگاوات که با فرض استفاده از

[۱۰]* براساس ظرفیت تجاری ساخت نیروگاهها

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

واحدهای گازی بزرگ با ظرفیت اسمی ۲٦۰ مگاوات احداث می گردند و رقیب اصلی نیروگاه اتمی در تأمین بار پایه می باشند.

- نیروگاه سیکل ترکیبی متوسط با ظرفیت خالص هر بلوک ٤٦٤ مگاوات که با استفاده از واحدهای گازی با ظرفیت اسمی ۱۵۹ مگاوات احداث می گردند.
- نیروگاه بخاری گازسوز با ظرفیت خالص هر واحد ۳۰۲ مگاوات
- نیروگاه بخاری زغال سنگ سوز با ظرفیت خالص هر واحد ۳۰۲ مگاوات
- نیروگاه گازی بزرگ با ظرفیت خالص هر واحد گازی ۲٦۰ مگاوات
- نیروگاه گازی متوسط با ظرفیت خالص هر واحد گازی ۱۵٦ مگاوات

۲-۸- کاندیداهای اتمی:

در مورد کاندیداهای اتمی چهار کاندیدا در ابتدا مد نظر قرار داشت که شامل انواع نیروگاههایEPR، VVER، CANDU و نیروگاه دوم بوشهر بودند.اگرچه اطلاعاتی برای هر یک از کاندیداهای فوق تهیه گردید اما از آنجایی که بجز کاندیدای CANDU بقیه کاندیداها نمونه های مختلفی از تکنولوژی PWR (نیروگاه اتمی با راکتور هسته ای آب سبک) بودند یک کاندیدا بجای سه کاندیدا مد نظر قرار گرفت که چنانکه مطابق جدول (۲) خواهید دید در رقابت با نوع CANDU موجه تر بوده و توسط نرم افزار انتخاب شده است. (نقش انرژی هسته ای در فنلاند –۲۰۱۷) و(پایگاه فناوری مرجع – آژانس بین المللی انرژی اتمی – ۲۰۱۹) و(سازمان انرژی اتمی ایران– پروژه تابناک)

جدول ۲- اطلاعات نهایی کاندیدای اتمی نوع PWR

پارامتر	واحد	مقدار	ملاحظات
ظرفیت خالص نیروگاه	مگاوات	۹۳۰	
قیمت سوخت اتمی	دلار برمگاوات ساعت	۵/۵	با احتساب راندمان ۳۴ درصد
هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری	دلار بر کیلو وات سال	۵۰	شامل هزینه‌های ثابت و متغیر
زمان ساخت	سال	۷	
طول عمر	سال	۴۰	
ضریب دسترسی	درصد	۸۵	
هزینه سرمایه‌گذاری	دلار بر کیلووات	۱۳۰۰	

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

جدول ۳-اطلاعات مختلف نیروگاه های کاندیدا

(پایگاه فناوری مرجع - آژانس بین المللی انرژی اتمی- ۲۰۱۹)و (نقش انرژی هسته ای در فنلاند -۲۰۱۷)

(سازمان انرژی اتمی ایران- پروژه تابناک) (عوامل انتشار آلاینده های هوا ، جلد اول ، چاپ پنجم ، جولای ۱۹۹۹- آژانس حفاظت از محیط زیست)

	Capacity (MW) ظرفیت (مگاوات)	Availability % قابلیت دسترسی	Net η %	سرمایه گذاری investment Us$/kw	Cons. Period YEAR دوره ساخت	Life time عمر	O&M هزینه تعمیر و نگهداری			SOF %	FOR %	Pollution ($/MWH) آلودگی محیط زیست			
	NET						کل TOTAL	ثابت FIXED ($/KW-YEAR)	متغیر VAR. ($/Mwh)			So_x	no_x	Co_2	Co
هسته ای با تکنولوژیEPR	۱۶۰۰	۹۰	۳۶	۱۸۹۵	۷	۶۰	۵۴,۳	۴۸	۰,۸۰	۷,۷	۲,۳	---	---	---	---
هسته ای با تکنولوژیVVER	۱۰۰۰	۸۰	۳۰,۵	۱۰۸۹	۷	۳۰	۶۲,۲	۶۲,۲	۰	۲۰	۰	---	---	---	---
هسته ای با تکنولوژیCANDU	۶۰۰	۹۴	۳۰,۵	۱۸۰۵	۷	۳۰	۸۱,۹	۸۱,۹	۰	---	۶	---	---	---	---
واحد دوم نیروگاه بوشهر	۹۳۰	۸۵	۳۴	۱۳۷۵	۹	۳۰	۳۵,۱	۳۱,۶	۰,۴۷	۱۱	۴	---	---	---	---
بخاری ذغالسوز	۳۰۲	۸۵	۳۸	۱۰۰۰	۵	۳۰	۲۵	۷,۵	۲,۳۵	۱۱	۴	---	---	۲۴	---
بخاری گازسوز	۳۰۲	۸۵	۴۰	۵۴۰	۴	۳۰	۱۲,۵	۶,۳	۰,۸۳	۱۱	۴	۰,۰۱	۶,۲	۱۰,۸	---
سیکل ترکیبی متوسط	۴۶۴	۹۰	۵۰	۴۳۰	۳	۲۵	۱۲,۵	۸,۸	۰,۴۸	۷.۵	۲.۵	---	۲,۲	۹,۸	---
سیکل ترکیبی بزرگ	۷۷۰	۸۸	۵۸	۳۷۰	۳	۲۵	۱۵,۵	۱۰,۹	۰,۶۰	۸.۵	۳.۵	---	۱,۹	۸,۴	---
گازی متوسط	۱۵۶.۵	۹۲	۳۳	۳۳۰	۲	۲۰	۱۶	۱۱,۲	۰,۶۰	۶.۵	۱.۵	---	۳,۴	۱۴,۸	---
گازی بزرگ	۲۵۹.۵	۹۰	۳۸	۲۹۵	۲	۲۰	۲۰	۱۴,۰	۰,۷۶	۷.۵	۲.۵	---	۲,۹	۱۲,۷	---

*نرخ سوخت اتمی نوع اول و دوم 4.5 $/MWh ، نوع سوم 3.5 $/MWh و نوع چهارم 4.7 $/MWH منظور شده است.

در مورد اطلاعات ارائه شده در جدول (۳) ذکر نکات و موارد زیر ضروری می نماید .بخش عمده مقادیر این جدول بر اساس اطلاعات مراجع خصوصا" اطلاعات موجود برای کشورهای مختلف که در : Projected Costs of Generating International Energy Agency Electricity–2005 عنوان شده است مبنای مفروضات معرفی شده به نرم افزار بوده است.دوره احداث نیروگاههای غیر اتمی با توجه به شرایط کشور یکسال اضافه شده است. همچنین دوره احداث نیروگاه

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

اتمی۷ سال پیش بینی شده است. هزینه‌های سرمایه گذاری اعلام شده در جدول پس از اعمال ضرایبی به شرح زیر وارد نرم افزار شده اند:

الف –ضریب مربوط به بهره دوران ساخت[11] که با توجه به نرخ تنزیل و دوره احداث نیروگاه تعیین می گردد.

ب –ضریب مربوط به کاهش خروجی توربین های گازی بواسطه نصب در شرایط غیر ISO (سطح دریا، دمای ۱۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ٦۰٪) که برای شرایط متوسط کشور تعیین و در قیمت نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی اعمال می گردد.

ج – ضریب مربوط به مصرف داخلی که به منظور لحاظ نمودن تفاوت بین نیروگاههای با مصرف داخلی متفاوت اعمال می گردد.

در مورد هزینه های O&M واحدهای گازی متوسط گیری برای تعیین مجموع هزینه‌های سالیانه انجام شده و با فرض منظور نمودن لوازم یدکی در هزینه های ثابت، ۷۰ درصد هزینه در بخش ثابت و ۳۰ درصد بعنوان متغیر منظور شده است. هزینه O&M واحدهای خیلی بزرگ گازی نسبت به واحدهای متوسط ۲۵٪ بیشتردر نظر گرفته شده است. (پایگاه فناوری مرجع – آژانس بین المللی انرژی اتمی – ۲۰۱۹)

۹.اطلاعات ضریب قابلیت دسترسی[12]

اطلاعات مرتبط با ضریب قابلیت دسترسی ومؤلفه‌های آن یعنی تعمیراتSOF[13] و خروج های‌اضطراری آن یعنیFOR[14] بر اساس اطلاعات موجود در مراجع و همچنین اطلاعات استخراج شده برای انواع نیروگاهها و واحدهای حرارتی از جداول ارائه شده توسطNERC[15] تعیین شده است.

۱۰. هزینه های آلاینده ها:

میزان آلاینده های تولید شده از انواع نیروگاههای گازی، بخاری و سیکل ترکیبی در این مطالعه مد نظر قرار گرفته و با توجه به هزینه هایی که براساس توافقات بین المللی [۱۰] برای تولید هر یک از آلاینده های NO_x، So_x و $CO2$ و .... منظور میگردد، هزینه های مربوطه بر حسب $/Mwh$ محاسبه و به هزینه های متغیر نگهداری کاندیداهای فوق اضافه شده است. جداول مربوط به میزان انتشار آلاینده‌ها از توربینهای گازی و بویلرهای حرارتی در محاسبات لحاظ شده است . (عوامل انتشار آلاینده های هوا ، جلد اول ، چاپ پنجم ، جولای ۱۹۹۹– آژانس حفاظت از محیط زیست[16])

۱۱.مشخصات سیستم تولید

آن دسته از مشخصاتی است که نحوه بهینه سازی را تعیین می نماید. مهمترین موضوعات قابل طرح در این بخش به شرح زیر می باشند:

الف – ذخیره تولید

در این مطالعه ذخیره تولید حداقل ۱۵٪ و حداکثر ٤۰٪ برای سالهایی که نرم افزار طرح توسعه سیستم را تعیین می نماید درنظر گرفته شده است.

ب – بارگیری نیروگاه ها

در این مطالعه قیمت تمام شده برق تولیدی در شرایط بار کامل نیروگاهها در مدول های FIXSYS و VARSYS محاسبه گردیده (فقط مؤلفه هزینه بهره برداری) و نیروگاهها به ترتیب صعودی (از کمترین قیمت تا بیشترین) زیر منحنی تداوم بار چیده می شوند. به این ترتیب نیروگاهها با اقتصادی‌ترین حالت ممکن بارگیری می گردند.

ج – احتمال عدم تأمین بار

مقدارLOLP پیشنهادی توسط ارگانهای بین‌المللی مانند آژانس بین المللی انرژی اتمی و یا بانک جهانی برای کشورهای در حال توسعه مانند ایران معادل یک روز در سال تعیین شده است.

۱۲. پارامترهای اقتصاد کلان کشور

مهمترین پارامترهای قابل ذکر به شرح زیر می باشند:(دفتر برنامه‌ریزی تولید توانیر ،خرداد 1396)

الف – نرخ سوخت گاز طبیعی

بر اساس مطالعات صورت گرفته دامنه بهای سوخت گاز طبیعی حسب روش تعیین هزینه و نیز روند افزایش قیمت سوختهای فسیلی مد نظر قرار گرفته و برای تعیین هزینه فرصت، رابطه بین

[11] Interest During Construction

[12] Availability

[13] Scheduled Outage Factor

[14] Forced Outage Rate

[15] North American Electric Reliability Council

[16] Environmental Protection Agency (EPA)

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

قیمت نفت خام و گاز طبیعی بصورت معادله ای برای گزینه های GTL و LNG تعریف گردیده است که نهایتا" قیمت ۲۰ سنت دلار امریکا بعنوان نرخ گاز طبیعی در این مطالعه برای حالت پایه در نظر گرفته شده است. چنانکه خواهیم دید آنالیز حساسیت روی نرخ گاز نیز انجام شده است. (پایگاه آژانس بین المللی انرژی – ۲۰۱۸)

ب- نرخ تنزیل[۱۷]

با توجه به عدم اعمال نرخ تورم و انجام مطالعه به روش قیمتهای ثابت[۱۸] نرخ تنزیل در بخش داخلی و خارجی برابر ۱۰٪ درنظرگرفته شده است.

ج- نرخ تعدیل[۱۹]

به منظور انجام مطالعات در شرایط قیمتهای ثابت، نرخ تعدیل در هر دو بخش داخلی و خارجی صفرمنظور شده است.

د – نرخ تبدیل ارز

نرخ تبدیل ارز در این مطالعه معادل ۲۰۰۰۰۰ ریال به ازاء هر دلار امریکا منظور شده است.

ه – قیمت خاموشی

اگر چه در حال حاضر صنعت برق هزینه ای را به عنوان خسارت ناشی از قطع برق نمی‌پردازد، اما از دیدگاه اقتصاد ملی خاموشی خساراتی را در بخش های مختلف صنعتی، تجاری و ... به بار می آورد. براساس مطالعات انجام شده و با لحاظ نمودن شرایط ایران به عنوان یکی از کشورهای درحال توسعه، قیمت خاموشی برابر ۱/۱ دلار بر کیلووات ساعت درنظر گرفته شده و وارد نرم افزار شده است. (حداقل هزینه برنامه ریزی هزینه های تولید برق-آژانس بین المللی انرژی-۲۰۱۸)

۱۳. تحلیل نتایج اجرای نرم‌افزار WASP

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از اجرای نرم افزار در گزینه مبنا۲۰ ارائه شده و پس از آن پارامترهای مختلف آنالیز حساسیت شده‌اند. بعبارت بهتر تغییرات نتایج خروجی با تغییر پارامترهای مهمی که احتمال تغییر آنها وجود دارد آنالیز شده است.

۱-۱۳-گزینه مبنا

بخش عمده و اصلی طرح توسعه بهینه و ارزش حال هزینه های سیستم شامل موارد زیر می‌باشند :

– هزینه های احداث[۲۱] :

– ارزش اسقاطی[۲۲]:

– هزینه‌های بهره برداری[۲۳]: شامل هزینه های سوخت و هزینه های O&M می‌باشد.

– هزینه‌های خاموشی[۲۴] : با توجه به سوابق و مطالعات کارشناسی تعیین و معادل $/kwh ۱/۱ است .

– مجموع هزینه‌ها[۲۵] : Total Cost = Construction Cost – Salvage Value + Operating Cost + ENS Cost

– مجموع انباشته هزینه‌ها[۲۶] : بیانگر مجموع ارزش حال هزینه‌های سیستم تولید طی دوره ۳۰ ساله و بالغ بر ۱۳۱/۵ میلیارد دلار می‌باشد .

– احتمال عدم تأمین بار[۲۷] : معادل یک روز در سال منظور گردیده است

– ظرفیت های کاندیداها : لازم به ذکر است که کاندیداهای اتمی با تکنولوژی PWR[۲۸] نهایتاً یکی شده و بصورت یک کاندیدا معرفی شدند که انتخاب های ملاحظه شده مربوط به این کاندیدا می‌باشد. همچنین نوع CANDU نیز با ظرفیت ۶۰۰ MW کاندیدای دیگر اتمی بوده است که در رقابت ، انتخاب نگردیده است . سایر کاندیداهای بخاری، سیکل‌ترکیبی ، گازی نیز در بخشهای قبلی معرفی گردیده اند.

۱-۱-۱۳ توسعه بهینه تولید درگزینه مبنا:

الف – نیروگاه های سیکل‌ترکیبی در رقابت با نیروگاه های اتمی از مزیت کمتر بودن دوره احداث برخوردار بوده‌اند به همین دلیل طی

[۱۷] Discount Rate
[۱۸] Constant Currency
[۱۹] Escalation rate
[۲۰] Base case
[۲۱] Construction Costs
[۲۲] Salvage Value
[۲۳] Operating Costs
[۲۴] ENS Cost
[۲۵] Total Cost
[۲۶] Cumulative Costs
[۲۷] LOLP
[۲۸] Pressurized water reactor

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

سالهای ۲۰۱۳-۲۰۰۹ این نوع نیروگاه ها وارد مدار شده‌اند و پس از آن ورود به مدار واحدهای اتمی با سرعت بسیار بالایی آغاز شده است.

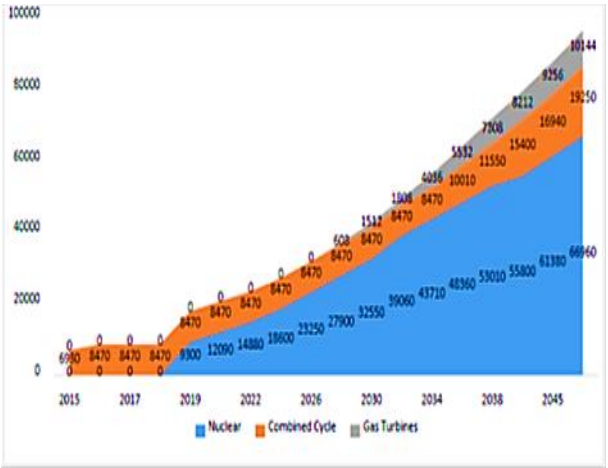
ب – واحدهای گازی بدلیل قیمت بالای گاز طبیعی جذابیت زیادی نداشته و تنها حدود ۱۰۰۰۰ مگاوات از این نوع برای تأمین بار پیک وارد مدار شده است .

ج – در رقابت انواع گازی و سیکل‌ترکیبی، سیکل ترکیبی‌های بزرگ بدلیل راندمان بالاتر بر سیکل ترکیبی‌های کوچک ارجحیت یافته‌اند . اما در مورد گازی ها نرم افزارWasp ترکیبی از هر دو نوع را استفاده نموده است .

د – نیروگاه های بخاری گازسوز و زغال‌سنگ سوز در هیچ یک از سالهای دوره مطالعه انتخاب نگردیده و غیراقتصادی تشخیص داده شده‌اند .

و – مجموعاً نرم‌افزار طی دوره فوق بالغ بر۹۶۳۰۰ مگاوات ظرفیت‌سازی نموده است که حدود ۷۰٪ آن از نوع اتمی و مابقی از نوع سیکل‌ترکیبی و گازی بوده است .

شکل (۲) نمودار ظرفیت سازی های یاد شده را نشان می‌دهد. همانگونه که اشاره شد شروع ظرفیت‌سازی به دلیل دوره احداث کوتاهتر نیروگاههای سیکل‌ترکیبی با این نوع بوده است اما از سال ۲۰۱۸ به بعد ظرفیت سازی از نوع نیروگاه های اتمی با سرعت بسیار بالایی توسط نرم‌افزار دنبال شده است.



شکل ۲- نمودار ظرفیت سازی متناظر با توسعه بهینه تولید در گزینه مبنا

موضوع دیگر قابل طرح جهت بررسی گزینه مبنا آن است که عدم احداث نیروگاه اتمی و استفاده از سایر انواع نیروگاه های حرارتی چه اثراتی در سیستم تولید خواهد داشت . آثار هزینه‌های این موضوع با اجرای گزینه مبنا بدون استفاده از نیروگاه اتمی بررسی شده است . همانگونه که ملاحظه می‌شود نرم‌افزار نیروگاه سیکل‌ترکیبی را جایگزین نیروگاه اتمی کرده و اقدام به انتخاب نزدیک به ۸۵۰۰۰ مگاوات نیروگاه سیکل‌ترکیبی نموده است. با ملاحظه و مقایسه تابع هدف در دو گزینه می‌توان نتیجه گرفت که ارزش حال هزینه‌های سیستم تولید بیش از ٤ میلیارد دلار افزایش یافته است .به این ترتیب ملاحظه می گردد که عدم احداث نیروگاه های اتمی طی دوره مطالعه معادل ٤ میلیارد دلار ارزش حال هزینه اضافی به سیستم تولید برق تحمیل می‌نماید.

۱٤. آنالیز حساسیت تغییرنتایج نسبت به پارامترها

به منظور بررسی تغییر نتایج خروجی نسبت به تغییر برخی پارامترها و تعیین میزان حساسیت نتایج مطالعات آنالیز حساسیت انجام گرفته است. آنالیز حساسیت نسبت به پنج پارامتر انجام شده است که می‌توان در دو گروه آنها را دسته‌بندی نمود . گروه اول پارامترهایی هستند که مربوط به نیروگاه اتمی می‌باشند و گروه دوم پارامترهای مرتبط با سایر کاندیداها و پارامترهای مرتبط با شرایط اقتصاد ملی می‌باشد.

۱-۱٤- آنالیزحساسیت‌روی‌پارامترهای‌نیروگاه اتمی

سه پارامتر هزینه احداث، هزینه‌های بهره برداری و تعمیرات(O&M)و قیمت سوخت اتمی جهت انجام آنالیز حساسیت مد نظر قرار گرفته‌اند . با توجه به بررسی های انجام شده برای هزینه احداث محدودهٔ ۱۵۰۰–۱۱۰۰ دلار بر کیلووات انتخاب شده است (در گزینه مبنا ۱۳۰۰ $/kW) هزینه‌های O&M در محدودهٔ ٦٥–۳۵ دلار بر کیلووات سال (در گزینه مبنا ۵۰ $/kw-year) و تغییرات قیمت سوخت با لحاظ کردن راندمان در محدودهٔ ٦/٥ – ٤/٥ دلار بر مگاوات ساعت (در گزینه مبنا ۵/۵ $/MWh) آنالیز شده است .به منظور انجام آنالیز کامل حالتهای ترکیبی نیز برای پارامترهای فوق بررسی شده است. بعبارت بهتر آنالیز حساسیت روی هر یک از پارامترها به تنهایی و با ثابت نگهداشتن بقیه نبوده است بلکه ۲۷ گزینه که دربرگیرنده تمامی حالات می‌باشد اجرا شده است که در خروجی های مدول DYNPRO مربوط به این گزینه‌ها ارائه شده است .

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

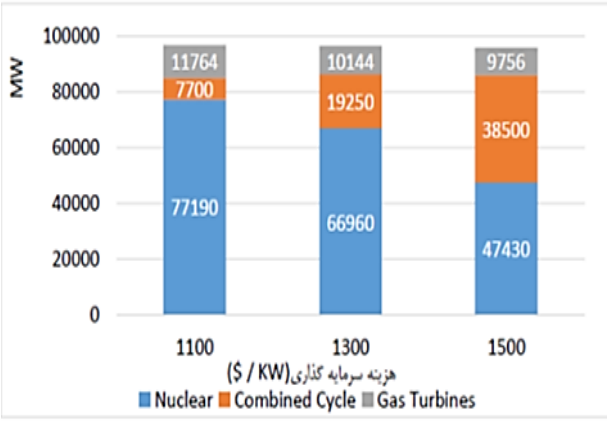
شکل های (۲) تا (۷) نتایج حاصل را بصورت نموداری نشان می‌دهد .با ملاحظه این نمودارها نتایج زیر طرح می‌شوند:

الف – در بدترین گزینه‌از جهت توجیه‌پذیری نیروگاه اتمی که در آن هزینه احداث ۱۵۰۰ $/kw، نرخ سوخت ٦/٥ $/Mwh و هزینه‌های O&M معادل ٦٥ دلار بر کیلووات – سال منظور شده است، نرم‌افزار تمایلی به انتخاب نیروگاه اتمی نداشته و طرح توسعه بهینه سیستم تولید بصورت ترکیبی از نیروگاه های گازی و سیکل‌ترکیبی تعیین شده است .در این گزینه طرح احداث حدود ۲۰ هزار مگاوات نیروگاه اتمی نیز بررسی شده و افزایش تابع هزینه (ارزش حال تفاوت تابع هزینه طی دوره مطالعه) بواسطه احداث این مقدار نیروگاه اتمی تعیین شده است که نزدیک به ۱۵۰ میلیون دلار خواهد بود.

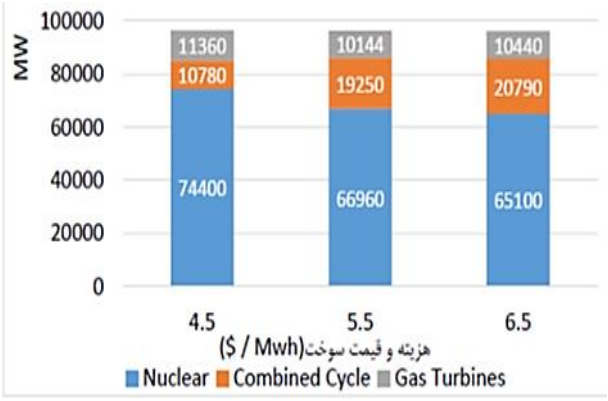
ب- مناسب‌ترین گزینه از حیث توجیه‌پذیری احداث نیروگاه اتمی در شرایط هزینه احداث۱۱۰۰ دلار بر کیلووات ، نرخ سوخت ٤/٥ $/Mwh و هزینه های O&M معادل ۳۵ دلار بر کیلووات – سال می‌باشد .در این حالت بیش از ۷۸۰۰۰ مگاوات از نیروگاه اتمی ظرفیت‌سازی شده است و ظرفیتی که از نوع سیکل‌ترکیبی توسط نرم‌افزار انتخاب شده تنها بدلیل امکان ورود به مدار سریعتر این نوع نیروگاه نسبت به نیروگاه اتمی بوده است . همچنین تابع هزینه سیستم در شرایطی که نیروگاه های سیکل‌ترکیبی جایگزین نیروگاه های اتمی در این گزینه گردند به میزان بیش از ۹/۷ میلیارد دلار افزایش می‌یابد .

ج – میزان حساسیت ترکیب ظرفیت‌سازی سیستم تولید نسبت به سه پارامتر یاد شده در شکلهای (۳) تا (۵) نشان داده شده است .

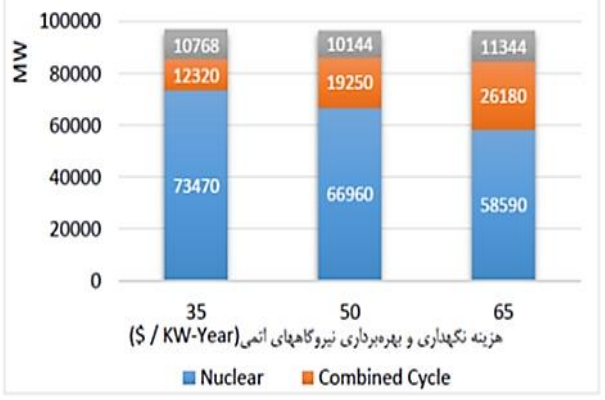
با ملاحظه شکل های فوق می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت نتایج نسبت به هزینه‌های احداث زیاد بوده اما نسبت به هزینه‌های O&M و هزینه‌های سوخت اتمی کم می‌باشد . در گزینه تغییر قیمت سوخت اتمی (افزایش قیمت از ٤/٥ به ٦/٥ دلار بر مگاوات ساعت) میزان ظرفیت سازی نیروگاه های اتمی از ۷٤٤۰۰ مگاوات به ٦٥۱۰۰ مگاوات کاهش یافته است . لازم به ذکر است که در شکل های فوق سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند .



شکل ۳- نمودار نتایج آنالیز حساسیت تغییر هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاههای اتمی



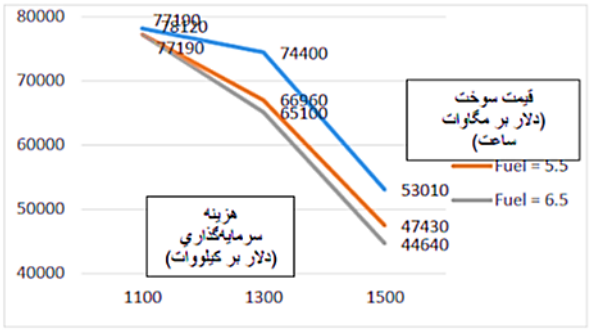
شکل ٤- نمودار نتایج آنالیز حساسیت تغییر قیمت سوخت نیروگاههای اتمی



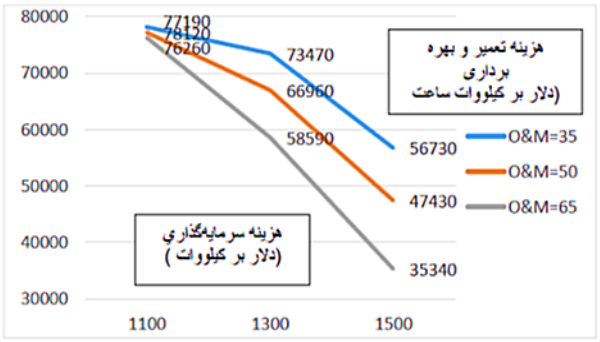
شکل ٥- نمودار نتایج آنالیز حساسیت تغییر هزینه نگهداری و بهره‌برداری نیروگاههای اتمی

د – شکل های (٦) و(۷) گزینه‌های ترکیبی هستند که در آن دسته منحنی‌های مربوط به تغییرات ترکیبی از دو پارامتر را نشان می‌دهد . این شکلها نیز بخوبی بیانگر آن است که میزان حساسیت نسبت به هزینه احداث زیاد ، نسبت به هزینه‌های O&M متوسط و نسبت به قیمت سوخت اتمی کم می‌باشد.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]



شکل ٦- سهم نیروگاه های اتمی در طرح توسعه بهینه به ازای تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری و قیمت سوخت نیروگاههای اتمی



شکل ۷- سهم نیروگاه های اتمی در طرح توسعه بهینه تولید به ازای تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری و بهره برداری نیروگاههای اتمی

۲-۱٤- تحلیل و آنالیز حساسیت روی سایر پارامترها

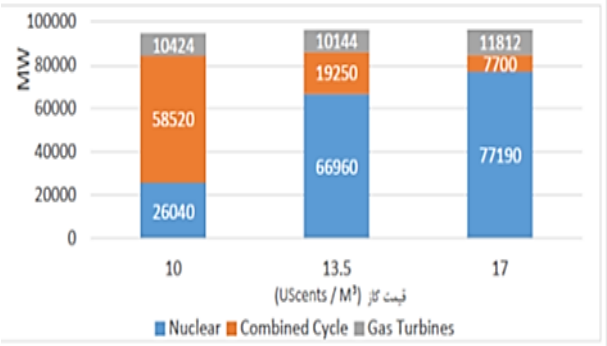
دو پارامتر عمده که نتایج حاصل نسبت به آنها حساسیت دارند قیمت گاز طبیعی و نرخ تنزیل می‌باشد . نتایج حاصل به ازاء قیمت گاز معادل ۱۰ و ۱۷ سنت بر مترمکعب و همچنین نرخ تنزیل ۸ و ۱۲ درصد بررسی شده است.

جدول ٤- نتایج آنالیز حساسیت روی قیمت گاز طبیعی و نرخ تنزیل

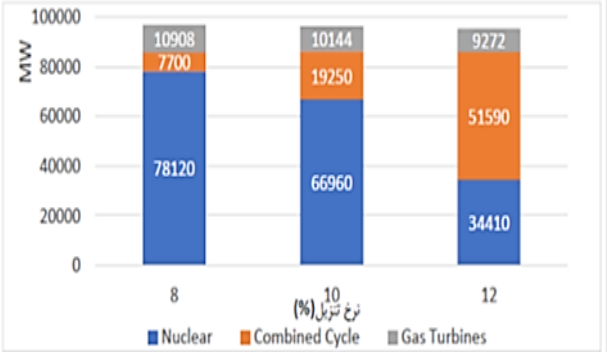
Final Result for different Scenarios of NG Prices & Discount Rat

Case Description قیمت گاز و نرخ تنزیل	Generation system expansion plan (MW) طرح توسعه سیستم تولید طرح توسعه سیستم تولید			NPV of total costs (MUSD) کل هزینه ها		Difference (MUSD)
	Nuclear هسته ای	Combined Cycle سیکل ترکیبی	Gas Turbine توربین گازی	with Nuclear بدون نیروگاه هسته ای	without Nuclear بدون نیروگاه هسته ای	
Natural Gas = 10 Uscents / m^3	26040	58520	10424	114818.4	114844.9	26.5
Natural Gas = 17 Uscents / m^3	77190	7700	11812	147573.6	156750.6	9177.1
Discount Rate = 8%	78120	7700	10908	150345.7	160541.9	10196.1

کاهش قیمت گاز از۱۷ سنت بر متر مکعب(گزینه مبنا) به۱۰سنت، میزان ظرفیت سازی نیروگاه اتمی را از حدود ٦۷۰۰۰ مگاوات به۲٦۰۰۰ مگاوات کاهش داده است. همچنین افزایش قیمت به ۱۷ سنت بر مترمکعب و بالاتر، ظرفیت سازی نیروگاه های اتمی را به ۷۸۰۰۰ مگاوات افزایش می‌دهد. البته مقدار فوق حد ا شباع بوده و در صورت افزایش بی شتر قیمت سوخت مقدار ظرفیت سازی نیروگاه های اتمی افزایش نخواهد یافت. نکته دیگر اینست که کاهش نرخ تنزیل به ۸٪ و افزایش آن به ۱۲٪ نیز تحلیل شده و کاهش ظرفیت‌سازی نیروگاه اتمی تا حدود ۳٤۰۰۰ مگاوات به ازاء نرخ تنزیل ۱۲٪ حاصل شده است .همچنین گزینه‌های بدون نیروگاه اتمی در هر یک از حالات فوق اجرا شده و اختلاف توابع هزینه مشابه قسمت قبل تعیین شده است . در این آنالیزها نیز اختلاف تابع هزینه با نیروگاه اتمی و بدون نیروگاه اتمی در گزینه قیمت گاز ۱۷ سنت بر مترمکعب و بالاتر، حدود ۹/۲ میلیارد دلار و در گزینه نرخ تنزیل ۸٪ به حدود ۱۰/۲ میلیارد دلار رسیده است. شکلهای(۸) و(۹) آنالیز حساسیت ونحوه تغییرات و اختلاف توابع هزینه را در گزینه‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸- آنالیز حساسیت ظرفیت سازی نیروگاه های هسته‌ای نسبت به تغییر قیمت گاز



شکل ۹- آنالیز حساسیت ظرفیت سازی نیروگاه های هسته‌ای نسبت به نرخ تنزیل

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

شایان توجه است که حد تقریبی هزینه سرمایه گذاری برای انتخاب نیروگاه اتمی ۱۸۰۰ دلار بر کیلووات بدست می آید. بر اساس آخرین اطلاعات بدست آمده مربوط به پیشنهاد روسیه برای احداث نیروگاه جدید هسته ای در بوشهر، هزینه سرمایه گذاری ۱۶۰۰ دلار بر کیلو وات و هزینه های نگهداری و بهره برداری و سوخت به ترتیب ۳۵ دلار بر کیلو وات سال و ٤/٥ دلار بر مگاوات ساعت اعلام شده است . در رابطه (۲) که نحوه ارتباط ظرفیت نیروگاه های هسته ای(Y) با میزان هزینه سرمایه گذاری اولیه(X) را نشان می دهد .

$$Y = -0.093\,X^2 + 200X - 29000 \qquad (۲)$$

با منظور نمودن هزینه سرمایه گذاری ۱۶۰۰ دلار برکیلو وات ، ظرفیت نیروگاه های هسته ای ۵۲۹۲۰ مگاوات بدست می آید . حال به منظور محاسبه ظرفیت نیروگاه های هسته ای در شرایطی که قیمت گاز طبیعی نسبت به حالت مبنا کاهش یافته و به مقادیر ۱۰، ۱۰/۵ و ۱۱ سنت بر متر مکعب برسد از منحنی رابطه ریاضی ظرفیت نیروگاه های هسته ای با قیمت گاز طبیعی استفاده می کنیم .

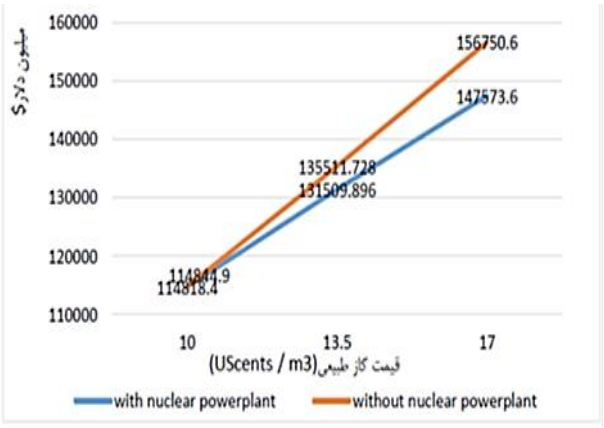
$$Y = 82.78X^3 - 77.4602X^2 + 7.85303X - 449487 \qquad (۳)$$

در رابطه(۳) Y ظرفیت نیروگاه های هسته ای و x ، قیمت گاز طبیعی (سنت بر متر مکعب) است .بنابر این رابطه کاهش ظرفیت سازی نیروگاه های هسته ای در صورت کاهش قیمت گاز طبیعی از مشتق رابطه (۳) در نقطه کار (قیمت متناظر با گزینه مبنا یعنی ۱۷/۵ سنت بر متر مکعب) به دست می آید.لذا در شرایطی که قیمت گاز طبیعی به ترتیب ۱۰ ، ۱۰/۵ و ۱۱ سنت بر متر مکعب باشد، dx در رابطه فوق به ترتیب ۳/۵- ، ۳- و ۲/۵- بوده و کاهش ظرفیت سازی نیروگاههای هسته ای در این حالات ۲۲۰۱۱ ،۱۸۸٦۷ و ۱۵۷۲۲ مگاوات نسبت به حالت متناظر با هزینه سرمایه گذاری اعلام شده توسط روسیه برای احداث نیروگاه های هسته ای جدید در بوشهر خواهد بود . بنابر این:

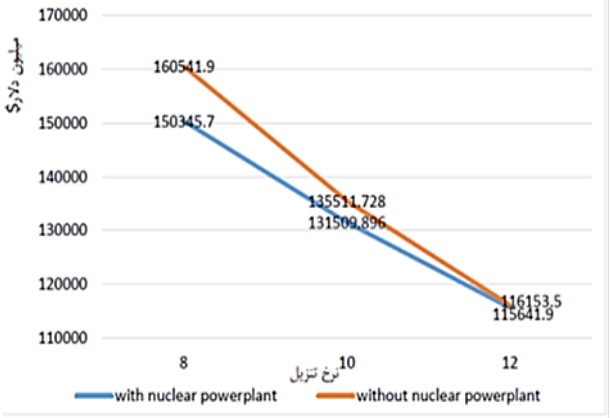
- ظرفیت سازی نیروگاه های هسته ای در شرایط هزینه سرمایه گذاری ۱۶۰۰ دلار برکیلو وات و نرخ گاز طبیعی ۱۰ سنت برمتر مکعب ۳۰۹۰۹ مگاوات است.
- ظرفیت سازی نیروگاه های هسته ای در شرایط هزینه سرمایه گذاری ۱۶۰۰ دلار برکیلو وات و نرخ گاز طبیعی ۱۵ سنت بر متر مکعب ۳٤۰۵۳ مگاوات است.
- ظرفیت سازی نیروگاه های هسته ای در شرایط هزینه سرمایه گذاری ۱۶۰۰ دلار برکیلو وات و نرخ گاز طبیعی ۲۰ سنت بر متر مکعب ۳۷۱۹۸ مگا وات است.

شایان ذکر است که هزینه سرمایه گذاری نیروگاه های هسته ای در حالت مبنا، با لحاظ نمودن اثر بهره دوره ساخت از ۱۳۰۰ به ۱۶۵۰ دلار برکیلو وات تبدیل می شود و زمان موثر ساخت برای اثر دادن بهره ساخت، ۲/۵ سال در نظر گرفته شده است. $((1300)(1/1)^{2/5} = 1650)$

ارزش حال هزینه سرمایه گذاری احداث ۱۵۰۰۰ مگاوات نیروگاه هسته ای در حالت مبنا ۵/۹۷ میلیارد دلار و در حالت کاهش هزینه سرمایه گذاری به دلیل ساخت داخل نمودن نیروگاه ها ، ۵/۱۵ میلیارد دلار خواهد بود .



شکل ۱۰- تغییر هزینه توسعه بهینه تولید (ارزش حال) در صورت تغییر قیمت گاز طبیعی



شکل ۱۱- تغییر هزینه توسعه بهینه تولید (ارزش حال) در صورت تغییر نرخ تنزیل

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

۱۵. جمع‌بندی و نتیجه گیری

الف–این پژوهش از دیدگاه اقتصاد ملی موضوع توجیه پذیری انواع مختلف نیروگاههای تولید برق برای توسعه سیستم نیروگاهی کشور طی یک دوره ۳۷ ساله را بررسی می نماید و هنگام اعمال نتایج آن در اقتصاد بنگاه باید تبعات این امر دیده شده و پیش بینی های لازم معمول گردد.

ب–در برنامه Wasp تا سال۲۰۵۰ ترکیب های مختلف نیروگاهی با در نظر گرفتن وضعیت موجود سیستم برای پوشش منحنی تداوم بار با لحاظ کردن هزینه خاموشی (از دیدگاه اقتصاد ملی و برابر۱/۱ دلار بر کیلو وات ساعت) در نظر گرفته شده و با توجه به ارزش حال کل هزینه ها ، ترکیب بهینه ظرفیت نیروگاه های مختلف حاصل می گرددکه میتوان با تغییر پارامترهای مختلف ورودی ، حساسیت برنامه را از نظر تغییر ترکیب ظرفیتی انواع نیروگاه ها نسبت به تغییرات فوق، مورد تحلیل قرارداد. نتایج بررسی ها نشان میدهد که :

۱–بر اساس مقادیر اولیه بکار رفته، در بهترین حالت (نرخ تنزیل پایین ۸٪ وسرمایه‌گذاری پایین نیروگاه اتمی حد توجیه پذیری نیروگاه اتمی از نقطه نظر قیمت سوخت، بر اساس سوخت گاز طبیعی معادل ٦ سنت بر متر مکعب توجیه پذیراست .

۲–تکنولوژی های مختلف نیروگاه اتمی قابل احداث را میتوان در دو دسته بندی کلی نیروگاه آب سبک و نیروگاه CANDU دسته بندی نمود.

۳–در بدترین حالت (دوره ساخت بالا و معادل۱۱ سال) و نرخ تنزیل بالا(٪۱۲))نیروگاه اتمی در صورتیکه نرخ گاز طبیعی ۲۰ سنت بر متر مکعب و یا بیشتر از آن گردد دارای توجیه اقتصادی می باشد.

٤–حساسیت انتخاب ظرفیت نیروگاه های اتمی نسبت به نرخ سوخت گاز طبیعی ونرخ تنزیل بسیار بالا است . بر این مبنا طی دو بررسی جداگانه با توجه به وضعیت موجود کشور از نظر ریسک های اقتصادی وروند فعلی قیمت سوخت در دنیا، مقادیر پایه برای نرخ تنزیل ۱۰٪ وبرای قیمت گاز طبیعی معادل ۱۸/۵ سنت بر متر مکعب بدست آمد.

۵–در محدوده نرخ تنزیل ۱۰٪ و نرخ گاز طبیعی ۱۸/۵ سنت بر متر مکعب، نیروگاه های اتمی آب سبک در ضریب بارهای بالاتر از ۸۰٪ دارای توجیه اقتصادی هستند. باید در نظر داشت که در این صورت کل بار پایه و بخشی از بار میانی توسط این نوع نیروگاه ها پوشش داده خواهد شد که حدود نیمی از ظرفیت مورد نیاز سیستم میباشد.

٦– گزینه مبنای برنامه مدلسازی Wasp ، با انتخاب دو گزینه برای نیروگاه های اتمی وتعیین نرخ تنزیل ۱۰٪ ونرخ گاز طبیعی ۱۸/۵سنت بر متر مکعب و بر اساس اطلاعات مراجع بین المللی و داخلی و نیز تجربیات موجود، ساخته شد.

۷–در بررسی های انجام شده توسط برنامه Wasp در حالت پایه (نرخ تنزیل۱۰٪ ، قیمت گاز طبیعی ۱۸/۵ سنت بر مترمکعب و قیمت نیروگاه ۱۳۰۰ دلار برکیلو وات)، با در نظر گرفتن مفروضات پروژه توسعه صنعت هسته ای(تابناک) ظرفیت انتخابی برای نیروگاه اتمی۶۷۰۰۰ مگاوات و پیک بار نهایی در حالت مرجع برابر ۱۲۳۰۰۰مگاوات می باشد.

۸–بررسی توسط این برنامه نشان می دهد که در حالت نرخ گاز طبیعی ۱۰ سنت بر متر مکعب کماکان ۲٦۰۰۰ مگاوات نیروگاه اتمی طی دوره بررسی تا ۲۰۵۰ منطقی بوده و انتخاب می شود. با تغییر نرخ تنزیل به مقدار ۱۲٪ کماکان ۳٤۰۰۰ مگاوات نیروگاه اتمی توسط برنامه منطقی بوده و انتخاب می شود. در محدوده نقطه مرجع مدلسازی برنامه جامع انرژی حداقل ظرفیت حدود ۱٤۰۰۰ مگاوات نیروگاه اتمی طی دوره ۳۷ ساله بررسی دارای توجیه اقتصادی می باشد.با توجه به وضعیت عرضه تکنولوژی نیروگاه اتمی از یکسو و امکان تاثیر پذیری قیمت سوخت اتمی از وضعیت افزایش قیمت های سوخت فسیلی، تاثیر نوسانات احتمالی قیمت نیروگاه و قیمت سوخت و نیز هزینه O&M (منهای سوخت) بررسی شده است.

۹–در بدترین گزینه (قیمت بالای سوخت اتمی، قیمت بالای O&M، قیمت بالای احداث نیروگاه) برنامه در حالت مرزی قرار داشته و تمایلی به انتخاب نیروگاه اتمی ندارد. شایان ذکر است که در این حالت الزام برنامه به انتخاب۲۰۰۰۰ نیروگاه اتمی که پیشنهاد دانشگاه استنفورد در پیش از انقلاب، فقط با افزایش ۱۵۰ میلیون دلار به هزینه احداث سیستم منطقی میباشد. با توجه به مقدار افزایش ناچیز هزینه در مقایسه با کل تابع هدف در دوره بیست ساله توسعه صنعت هسته ای کشورتا برنامه ریزی هدف پروژه تابناک تا افق سال ۱٤۰٤ (حدود یک درصد) و با

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]

درنظرگرفتن سایر صرفه های ملی مانند بومی کردن این نوع تکنولوژی و عدم وابستگی در دراز مدت و..... میتوان نتیجه گرفت که این حالت حدی نیز نمیتواند به طور جدی حداقل ظرفیت حدود ۱٤۰۰۰ مگاوات نیروگاه اتمی طی دوره سی شش ساله بررسی تا۲۰۵۰ را مورد سوال قراردهد.

۱۰-برای بررسی تاثیر عدم بکارگیری نیروگاه اتمی در توسعه سیستم تولید نیروگاهی، در حالت مبنا و حالت خوشبینانه (که مقادیر ٦۷۰۰۰ مگاوات ۷۸۰۰۰ مگاوات ظرفیت نیروگاه اتمی توسط برنامه انتخاب می شود)، توسعه سیستم بدون کاندیدای اتمی بررسی شد که ارزش حال عدم اجازه بر برنامه برای انتخاب نیروگاه اتمی طی دوره بیست ساله برنامه توسعه هسته ای(تابناک) به ترتیب برابر ٤ میلیارد دلار و ۹/۸ میلیارد دلار می باشد.

۱۱-مطالعات انجام شده مبین آن است که از نقطه نظر اقتصاد ملی تصمیم‌گیری جهت احداث حدود ۱٤۰۰۰ مگاوات نیروگاه اتمی در دوره ۳۷ ساله توسعه سیستم تولید نیروگاهی بسته به شرایط سیاسی و تعاملات بین المللی در محدوده توجیه پذیری میتواند قرار گیرد.

۱٦. پیشنهادات برای پژوهش های آینده

سیاست گذاری مناسب برای توسعه بخش انرژی هسته ای کشور مستلزم تحلیل جامع تری از نتایج مدل در سناریوهای مختلف می باشد و نتایج ارائه شده در این گزارش به علت محدودیت قلمرو مطالعه صرفا به چندین سناریوی منتخب محدود شده است. با تکمیل پایگاه اطلاعاتی در بخش فناوری های نوین انرژی و اجرا و تحلیل نتایج مدل در سناریوهای جدید، امکان ارائه تصویر روشن تر و دقیق تر از توسعه بخش انرژی کشور میسر خواهد بود.یکی از محدودیت های اصلی و قابل توجه در این مطالعه، نبود پایگاه اطلاعات انرژی درکشور براساس نظام طبقه بندی بین المللی ISIC است. مبنای آمار انرژی کشور (ترازنامه های انرژی و هیدروکربونی و آمار تفصیلی صنعت برق) با وجود داشتن اطلاعات زیاد و مفید، با نظام طبقه بندی ISIC هم خوانی نداشت. طبقه بندی فعالیت های اقتصادی در کشور براساس نظام ISIC است و مطالعات مربوط به مدل سازی انرژی نیز عمدتاً بر اساس همین نظام آماری صورت می گیرد. اما فقدان پایگاه اطلاعات انرژی براساس نظام ISIC ، یک محدودیت و مشکل اساسی برای هر گونه مطالعه در زمینه برنامه ریزی انرژی است. مساله دیگر، نبود برنامه های مصوب توسعه بخشی بلندمدت برای بخش های مختلف تولیدی کشور می باشد. از آنجا که انرژی یکی از نهاده های اساسی تولید است، لذا هر گونه برنامه توسعه بخشی بر تقاضای انرژی آن بخش در آینده تاثیر خواهد داشت. بنابراین، درچنین مطالعه ای که یکی از اهداف آن پیش بینی روند آینده تقاضای انرژی در بخش های مختلف است، روند توسعه بخش های مختلف حتما باید مد نظر قرار گیرد.در صورت وجود چنین برنامه هایی، می توان در قالب سناریوهای مختلف، تاثیر توسعه اقتصادی در بخش های مختلف را بر تقاضای انرژی در آینده بررسی و در برنامه ریزی بلندمدت توسعه بخش انرژی مدنظر قرار داد. اما فقدان برنامه های مصوب توسعه بخشی، یکی از مشکلات پیش رو در این مطالعه بود همچنین ضعف اطلاعات در قیود ساختاری در بخش فناوری ها با دسترسی (یا تخمین) به اطلاعات جدید و نیز تحلیل اثرات توسعه فناوری های جدید بر توسعه سیستم انرژی کشور و صنعت هسته ای از دیگر موارد پیشنهادی است.

۱۷.مراجع

۱-وزارت نیرو شرکت مادر تخصصی توانیر آمار تفصیلی صنعت برق ایران سال۱۳۹٦

۲-اطلاعات اخذ شده از پژوهشکده تولید پژوهشگاه نیرو سازمان انرژی اتمی ایران– پروژه تابناک-۱۳۸٤

۳-گزارش «برآورد بار شبکه تا سال ۱٤۰۵» ، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، خرداد۱۳۹٦.

٤-اطلاعات ارائه شده توسط دفتر برنامه‌ریزی تولید توانیر – خرداد ۱۳۹٦.

5-Least Cost Planning Projected Costs of enerating Electricity-International Energy Agency – 2018.

6-The Costs of Generating Electricity–The Royal Academy of Engineering – March 2019.

7-The Role of Nuclear Energy in Finland-2017.

8-Reference Technology Database–International Atomic Energy Agency – 2019.

9-WASP User Manual-International Atomic Energy Agency–2001

10-Compilation of Air Pollutant Emission factors,Vol I,Fifth edition, July 1999,Environmental Protection Agency (EPA).

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-06-13]