نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال ششم/ شماره ۱۹/ تابستان ۱۳۹۹/ صفحات ۲۲۸ - ۱۸۵

ترکیب بهینه تولید الکتریسیته با لحاظ نااطمینانی: مطالعه موردی نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی

زهرا دلالباشی
دانشجوی دکترا اقتصاد دانشگاه ارومیه
zes95@yahoo.com
کیومرث شهبازی
استاد اقتصاد دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)
k.shahbazi@urmia.ac.ir
زین‌العابدین صادقی
دانشیار گروه اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان
abed.sadeghi@gmail.com

در سال‌های اخیر مصرف بهینه انرژی‌های فسیلی، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر از مهمترین موضوعات در سیاست‌های کشورهای مختلف می‌باشد و همان‌طور که می‌دانید صنعت برق ایران به شدت به مصرف سوخت‌های فسیلی وابسته است، که این امر باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. هدف از این پژوهش به‌دست آوردن ترکیب تولید بهینه الکتریسته در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی با وجود نااطمینانی‌های موجود در مؤلفه‌های مورد نیاز در تصمیم‌گیری می‌باشد، به‌طوری‌که آلودگی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های تولید حداقل گردد. در این تحقیق از روش دومرحله‌ای استوکاستیک و داده‌های فاصله‌ای برای حداقل کردن نااطمینانی در برنامه‌ریزی تولید الکتریسته و مصرف انرژی‌های فسیلی استفاده شده است. از یک طرف روش دو مرحله‌ای استوکاستیک با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و از طرف دیگر داده‌های فاصله ای به جای داده‌های نقطه‌ای، نااطمینانی در این تحقیق را به حداقل می‌رسانند. همچنین در به‌دست آوردن نتایج از داده‌های گزارش صنعت برق استان آذربایجان غربی در سال‌های ۱۳۹۴و ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ استفاده شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مقدار تولید نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و نیروگاه برق‌آبی این استان کمتر از مقدار بهینه می‌باشد و مقدار تولید نیروگاه گازی این استان بیش از مقدار بهینه می‌باشد، همچنین بایستی برای توسعه ظرفیت در نیروگاه چرخه ترکیبی خوی برنامه‌ریزی شود.

واژگان کلیدی: ترکیب بهینه تولید الکتریسیته، انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های تجدیدناپذیر، روش دو مرحله‌ای تصادفی، نااطمینانی

تاریخ دریافت: ۱۸/ ۳ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۹/ ۵/ ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

۱. مقدمه

موضوع آلودگی و حفاظت از محیط‌زیست مسئله‌ای جهانی است که امروزه حتی در امور سیاسی کشورها هم وارد شده است. همه کشورها از کشورهای صنعتی و پیشرفته گرفته تا کشورهای در حال توسعه، همه باید در امر کنترل آلودگی سهیم باشند، زیرا آلودگی یک اثر جانبی سیال است و از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌شود، لذا اثر منفی آن شامل همه می‌شود. در حال حاضر سیستم‌های انرژی الکتریکی هنوز به‌طور وسیعی به سوخت‌های فسیلی وابسته هستند، که مقدار زیادی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا شرکت دارند و مشکلات زیست‌محیطی را به وجود آورده‌است. بنابراین برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی همچنین حداقل کردن هزینه مصرف انرژی‌های فسیلی نیازمند برنامه‌ریزی برای عرضه الکتریسیته می‌باشیم. برنامه‌ریزی عرضه الکتریسیته عبارت است از مشخص کردن سهم انرژی‌های مختلف برای تولید الکتریسته با توجه به سطوح تقاضای مختلف و محدودیت‌های زیست محیطی. برای انجام این امر می‌توان از روش حداقل‌سازی هزینه با بهینه‌سازی الگوهای تخصیص منابع انرژی، برنامه کاهش آلودگی و برنامه‌های توسعه ظرفیت استفاده نمود.

شرایط حاکم بر بازار برق نشاندهنده عدم قطعیت داده‌ها و مؤلفه‌های مؤثر در تصمیم‌گیری مربوط به تولید برق می‌باشد، از جمله عدم قطعیت تقاضا، عدم قطعیت تولید نیروگاه‌های آبی و تجدیدپذیر، عدم قطعیت مقدار عرضه و قیمت منابع انرژی فسیلی و غیره. همچنین توزیع احتمال مؤلفه‌های موثر در تصمیم‌گیری به دلیل کوچک بودن اندازه نمونه در دسترس نیست. حتی اگر چنین توزیعی در دسترس باشد، استفاده از آن در مدل‌های تصادفی بزرگ چالش برانگیز می‌باشد، بنابراین لازم است در برنامه‌ریزی برای تولید برق، از روش‌هایی استفاده شود که در ورودی آن‌ها عدم قطعیت داده‌ها لحاظ شود، از جمله روش‌های برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای[1] و برنامه‌ریزی

1. Interval-parameter linear programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

تصادفی[1]. همان‌طور که می‌دانید در مدلسازی عرضه برق تخمین صحیح مقدار تقاضای برق جهت برنامه‌ریزی برای عرضه برق از اهمیت بسیاری برخوردار است، ولی نمی‌توان مقدار تقاضای برق را با قطعیت برآورد نمود، زیرا مقدار تقاضای برق تحت شرایط مختلف متفاوت می‌شود و در سال‌های گذشته مقادیر مختلفی برای تقاضای برق استان آذربایجان غربی ثبت شده‌است. برای برطرف کردن این مشکل می‌توان تقاضای الکتریسیته را به عنوان یک متغیر تصادفی با سطوح احتمال معین در نظر گرفت. در واقع روش برنامه‌ریزی استوکاستیک[4] با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای تقاضای برق و در نظر گرفتن احتمال وقوع هر کدام از این سطوح تقاضا، نااطمینانی در برآورد عرضه مناسب را به حداقل می‌رساند. این روش با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای تقاضا و در نظر گرفتن احتمال وقوع هر کدام از سناریوها ریسک ناشی از کمبود عرضه در اثر حوادث مختلف را جهت برنامه‌ریزی و برآورد عرضه مناسب به حداقل می‌رساند، همچنین در روش برنامه‌ریزی خطی‌بازه‌ای[3] پارامترهای نامطمئن دیگر را در قالب اعداد فاصله‌ای بیان می‌شود، در واقع با در نظر گرفتن حدود بالا و پایین برای داده‌هایی که مقدار آن‌ها را نمی‌توان به‌طور قطع پیش‌بینی کرد (مانند ذخیره آب پشت سد) جهت برنامه‌ریزی می‌توان نااطمینانی و احتمال خطا در برنامه‌ریزی را به حداقل رساند. در این پژوهش از ترکیب این دو روش جهت به حداقل رساندن نااطمینانی در برآورد تولید مناسب الکتریسته استفاده شده‌است.

برای برنامه‌ریزی در مورد ترکیب و مقدار تولید برق، تصمیم‌گیرنده در ابتدا باید تصمیماتی اتخاذ کند و سهم هرکدام از نیروگاه‌ها را برای تولید برق مشخص کند، ولی از آنجا که در صنعت برق نااطمینانی‌های بسیاری وجود دارد ممکن است یک واقعه تصادفی مانند افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، تولید ناکافی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و... اتفاق افتد. وقوع هرکدام از وقایع تصادفی باعث ایجاد کاهش در تولید برق شده و با توجه به ثابت بودن تقاضا، مشکل کمبود عرضه ایجاد می‌شود. بنابراین نیاز به خرید الکتریسیته وارداتی می‌باشد که هزینه بسیار زیادی ایجاد

1. Stochastic programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

می‌کند. در نتیجه تصمیم‌گیرنده باید تصمیماتی را برای جبران اثرات نامطلوب تصمیمات مرحله اول اتخاذ کند. در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های تصمیمات مرحله اول و هزینه‌های انتظاری تصمیمات مرحله دوم و همچنین محدودیت‌های اعمال شده در حداقل‌سازی هزینه، ترکیب بهینه فناوری‌های تولیدکننده الکتریسیته را به‌دست آوریم. هدف از این پژوهش یافتن پاسخی مناسب برای این سئوال است که چگونه تقاضای الکتریسیته را به فناوری‌های تولید مختلف اختصاص دهیم (مقدار تولید هر فناوری برای برآورده کردن تقاضا) به نحوی که هزینه کل تولید برق و آسیب‌های زیست‌محیطی حداقل گردد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت یکی از مهمترین عوامل نااطمینانی برای برنامه‌ریزی مقدار تولید الکتریسیته، تخمین مقدار صحیح تقاضا می‌باشد، از آنجا که مقدار تقاضای سالانه الکتریسته در استان آذربایجان غربی در سال‌های مختلف متفاوت است، در این تحقیق با استفاده از روش دومرحله‌ای تصادفی سناریوهای مختلفی برای مقدار تقاضا در نظر گرفته شده و احتمال وقوع هرکدام از این سناریوها نیز با توجه به مقادیر تقاضای الکتریسیته سالانه در سال‌های گذشته محاسبه شده است. بنابراین در روش برنامه ریزی تصادفی با توجه به تصادفی بودن مقدار تقاضا برنامه‌ریزی برای تولید سالانه برق انجام می‌شود. همچنین در مورد دیگر پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی تولید الکتریسیته نیز نااطینانی وجود دارد، از جمله ساعات تولید برق، با مروری بر گزارش صنعت برق در سال‌های مختلف متوجه می‌شویم که برای پارامترهای مختلف مدل از جمله ساعات تولید برق در سال‌های مختلف مقادیر مختلفی ثبت شده‌است. بنابراین در این تحقیق برای به‌دست آوردن تخمین دقیق‌تر، پارامترهای مدل به‌صورت اعداد فاصله‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در واقع در این پژوهش سعی شده‌است با ترکیب روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی و روش برنامه‌ریزی خطی فاصله‌ای (در نظر گرفتن اعداد فاصله‌ای برای پارامترهای نامطمئن)، نااطمینانی در برنامه‌ریزی برای تولید الکتریسیته به حداقل برسد. پس از آن مدل‌سازی تحقیق به‌صورت حداقل کردن کل هزینه تولید الکتریسیته با در نظر گرفتن قیودی از جمله قید تعادل منابع، کاهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

آلودگی زیست‌محیطی، تناسب عرضه و تقاضای الکتریسیته انجام شده‌است. در انتها با استفاده از ترکیب دو روش گفته شده، جواب‌های بهینه مدل به‌دست آورده شده‌است.

در بخش‌های آتی این تحقیق بعد از مقدمه مروری بر پیشینه تحقیق خواهیم داشت سپس به روش‌شناسی تحقیق پرداخته و در انتها نتایج تحقیق و پیشنهادات بیان شده‌است.

۲. مروری بر پیشینه تحقیق

در این پژوهش سعی بر آن است با در نظر گرفتن حداکثر نااطمینانی‌های موجود در بخش عرضه الکتریسیته به برنامه‌ریزی برای عرضه الکتریسته بپردازیم، به‌طوری‌که سهم هر کدام از نیروگاه‌ها در تولید الکتریسیته و سهم انرژی‌های مختلف تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید مشخص شود. در ابتدا به بررسی مطالعات مختلفی که در رابطه با عرضه الکتریسیته صورت گرفته‌است می‌پردازیم.

۲-۱. مطالعات داخلی

صفاریان و همکاران (۱۳۸۷) در تحقیقی با عنوان «تدوین سیستم انرژی مرجع و توسعه مدل برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی کشور»، با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی به تهیه مدلی پرداختند که با کسب اطلاعات مورد نیاز از شکل مصرف نهایی، میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز کشور، ترکیب سوخت ورودی به نیروگاه‌ها و موارد دیگر، ترکیب بهینهٔ تولید و چگونگی توسعه شبکه را با حداقل هزینه و با در نظر گرفتن محدودیت‌های انتشار آلاینده‌ها و ارضای تقاضا، محاسبه می‌کند. در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد که توسعه شبکه الکتریکی کشور به منظور تأمین تقاضای حداکثر (پیک بار) شبکه در دوره مطالعه، وابستگی کامل به سیاست‌های اقتصادی و زیست‌محیطی کشور در مقطع زمانی مربوطه دارد. اگر اهمیت بیشتری به نیازهای اقتصادی داده‌شود، ارزان‌ترین گزینه‌ها در نظر گرفته می‌شوند، از سوی دیگر وقتی هدف کاهش انتشار آلاینده‌هاست، تکنولوژی‌های حامی محیط زیست ترجیح داده می‌شوند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

قاسمی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی با عنوان «ارزیابی رانت اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی استان خوزستان : رهیافت برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت»، رانت اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی را با استفاده از مدل تعیین حداقل هزینه برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید برق محاسبه کرده‌اند. در این تحقیق ضمن محاسبه رانت اقتصادی نیروگاه‌ها، ترکیب بهینه نیروگاه‌هایی که باید در آینده احداث شوند و بهره‌برداری بهینه از این نیروگاه‌ها و نیروگاه‌های موجود برای تأمین تقاضای برق در آینده تعیین شده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دورنمای توسعه صنعت برق کشور به سمت نیروگاه‌های گازی و آبی است. در نتیجه بیشتر سوخت مصرفی در نیروگاه‌ها نیز در آینده گاز طبیعی خواهد بود.

صفاری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی با عنوان «برنامه‌ریزی عرضهٔ بهینهٔ انرژی پایدار با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی (مطالعهٔ موردی: شهرستان اصفهان)» با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی به برنامه‌ریزی برای نیروگاه‌های برق در شهرستان اصفهان پرداختند. نتایج نشان داد با لحاظ آرمان اقتصادی و آرمان زیست‌محیطی می‌توان گفت برای جبران کمبود عرضه هرسال میزان ظرفیت نیروگاه خورشیدی و تأمین از شبکه برق بالاتر رفته و میزان استفاده از انرژی بادی تقریبا ثابت است و این نشاندهنده این است که برای تأمین تقاضای مصرفی شهرستان اصفهان نیروگاه گازی و نیروگاه خورشیدی از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی به صرفه‌تر است و باید در اولویت سیاست‌های سرمایه‌گذاری باشد.

نیک‌پیام و همکاران(۱۳۹۸) در تحقیقی با عنوان "برنامه‌ریزی همزمان سیستم‌های برق و گاز طبیعی در قالب بخشی از زنجیره تأمین برق" مدلی برای برنامه‌ریزی همزمان سیستم‌های برق و گاز طبیعی ارایه دادند، که این مدل در دسته برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در بررسی‌های کلان سیستم‌های برق و گاز طبیعی در شرایطی که شبکه‌های بزرگی از هر دو سیستم مورد بحث قرار دارند، می‌توان به جای معادلات پیچیده و عموماً غیرخطی که بیشتر مناسب بررسی‌های جزیی این سیستم‌ها هستند، از معادل‌های خطی‌سازی شده و به لحاظ محاسباتی ساده‌تر آن‌ها برای مدل‌سازی بهره برد. همچنین برای تحقیقات آتی می‌توان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

به بررسی مساله تحت شرایطی که تقاضای سیستم‌های برق و گاز طبیعی غیرقطعی هستند، پرداخت؛ زیرا آن‌چنان که مثال عددی این مقاله نشان داد نوسان در تقاضا می‌تواند هزینه‌های بسیاری را به سیستم اعمال کند.

۲-۲. مطالعات خارجی

لی[1] و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی با عنوان «برنامه‌ریزی سیستم‌های زیست‌محیطی و انرژی تحت نااطمینانی» با استفاده از تلفیق روش‌های چندمرحله‌ای تصادفی[2] و فازی[3] به برنامه‌ریزی برای نیروگاه‌های برق چین پرداختند. در این تحقیق ۳ سناریو برای سطوح تقاضای مختلف و ۳ سناریو برای سه سطح محدودیت برای میزان مجاز انتشار آلودگی در نظر گرفته شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بایستی سهم نیروگاه‌های بادی و آبی و هسته‌ای و گازی در تولید الکتریسیته افزایش و سهم نیروگاه‌های برق‌آبی ثابت و سهم نیروگاه‌های زغال سنگ در تولید کاهش یابد .

مویس[4] و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی با عنوان «برنامه‌ریزی بهینه تولید الکتریسته با هدف کاهش دی‌اکسیدکربن»، در مطالعه خود با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی اعداد صحیح[5]، الگوی بهینه‌ای را برای تولید برق با هدف کاهش دی‌اکسیدکربن ارائه داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد به منظور کاهش ۵۰ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن از سطح فعلی، یک الگوی بهینه از سیکل ترکیبی گاز طبیعی، انرژی هسته‌ای و انرژی زیست‌توده ناشی از دفن زباله انتخاب شده است.

نای[6] و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی با عنوان «مدیریت ریسک سیستم انرژی و تعیین ترکیب بهینهٔ انرژی برای تولید برق با حداقل هزینه‌های مالی و آسیب‌های زیست‌محیطی تحت

1. Li
2. Multi stage stochastic programming
3. Fuzzy
4. Muis
5. Integer linear programming
6. Nie

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

نااطمینانی» با استفاده روش مدیریت ریسک تصادفی‌فاصله‌ای[1] به برنامه‌ریزی برای نیروگاه‌های برق چین پرداختند. در این پژوهش ۷ سناریو برای تقاضای برق و ۷ سناریو برای میزان ریسک‌پذیری سرمایه‌گذار در نظر گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد ساختار مصرف انرژی در نیروگاه‌های چین بایستی به سمت افزایش مصرف گاز طبیعی و کاهش مصرف زغال سنگ، کک و گازوئیل هدایت شود. همچنین افزایش سهم نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر از دیگر یافته‌های این تحقیق می‌باشد.

هانگ[2] و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی با عنوان « برنامه‌ریزی سیستم‌های زیست‌محیطی و الکتریکی در شرق چین با استفاده از تجزیه و تحلیل سیستم قدرت فاصله‌ای اکتشافی ناحیه‌ای » با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی‌فاصله‌ای[3] به برنامه‌ریزی تولید الکتریسیته در شرق پرداختند. در این پژوهش، ۵ ناحیه مجزا در شرق چین در نظر گرفته شده و سود کل سیستم با توجه به یکسری از محدودیت ها از قبیل تعادل عرضه و تقاضا، محدودیت کاهش آلودگی‌های محیط زیست و غیره حداکثر می‌شود. همچنین برای محدودیت آلودگی‌های زیست محیطی سه سناریو در نظر گرفته شده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش محدودیت‌های زیست محیطی جهت کاهش آلودگی، سود سیستم کاهش می‌یابد، همچنین میزان تولید هر ناحیه به‌طور مجزا مشخص شده‌است.

نای و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی با عنوان «بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی الکتریکی با حداقل‌سازی هزینه و کاهش اثرات زیست‌محیطی تحت نااطمینانی» با استفاده از روش چند مرحله‌ای تصادفی[4] به برنامه‌ریزی عرضه الکتریسیته در چین پرداختند، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نسبت الکتریسیته تولید شده به وسیله زغال‌سنگ کاهش خواهد یافت و انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین آن خواهند شد.

1. Interval stochastic risk management
2. Hung
3. Interval-parameter linear programming
4. Multi stage stochastic programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

با مروری اجمالی بر تحقیقات انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی عرضه برق، اهمیت در نظر گرفتن نااطمینانی‌های بخش عرضه همچنین به حداقل رساندن آسیب‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های اقتصادی در برنامه‌ریزی عرضه مشهود است و لازم است برنامه‌ریزی‌های مربوطه انجام شود. علی‌رغم این‌که در داخل و خارج از کشور مطالعاتی برای برنامه‌ریزی تولید برق انجام شده، ولی هر کدام از مطالعات انجام‌شده فقط تابع عرضه را به‌دست آورده‌اند (نه ترکیب بهینه تولید) یا نااطمینانی‌ها را در مدلسازی ترکیب بهینه تولید الکتریسیته در نظر نگرفته‌اند. همچنین در بسیاری از مطالعات انجام شده فقط با توجه به محدودیت‌های خاصی به برنامه‌ریزی برای تولید الکتریسیته پرداخته‌اند. بنابراین خلاء مطالعاتی در زمینه مدلسازی ترکیب بهینه تولید الکتریسیته با در نظر گرفتن نااطمینانی و کلیه محدودیت‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مشهود است.

۳. روش‌شناسی تحقیق

برای برنامه ریزی انرژی از مدل‌های مختلفی استفاده شده‌است. نمونه‌هایی از مدل‌های پرکاربرد در این زمینه عبارت از مدل مارکال[1] و مدل MESSAGE می‌باشند.

در این قسمت می‌خواهیم به تحلیل این مدل‌ها و تفاوت آن‌ها با مدل استفاده شده در این پژوهش بپردازیم. مدل مارکال یک مدل جزء به کل دینامیکی است که آژانس بین‌المللی انرژی آن را تدوین کرده‌است. به بیان صریح‌تر، مارکال مدلی برای ارزیابی سیاستگذاری‌های بخش انرژی است که می‌تواند در سطح ملی، استانی، یا محلی اعمال شود. این مدل از یک روش قطعه قطعه گسترده برای مدلسازی سیستم بهره می‌گیرد، که این قابلیت به مدل امکان می‌دهد، که روابط پیچیده یک سیستم انرژی و حالت رقابتی بین منابع و فناوری‌های انرژی در بخش‌های تبدیل و مصرف را به خوبی در خود بگنجاند و از قابلیت ارزیابی فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی برخوردار است. بخش اصلی مارکال، اطلاعات آن در خصوص فناوری‌های انرژی است

1. Markal

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

که شاخصه‌های سرمایه‌گذاری، بازده، ظرفیت، هزینه‌های ثابت و متغیر نگهداری، سال آغاز بهره‌برداری، طول عمر و ضریب آلایندگی را در بر می‌گیرد، که این پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی بهینه می‌شوند (آقاسی و همکاران، ۱۳۹۳). یکی دیگر از مدل‌های پرکاربرد برای انجام برنامه‌ریزی انرژی مدل MESSAGE است که بر سیستم مرجع انرژی مبتنی است. سیستم مرجع انرژی جریان انواع حامل‌های انرژی اولیه، ثانویه و نهایی برای تأمین تقاضا را منعکس می‌نماید و بدین ترتیب مراحل استخراج، فرآوری، تبدیل و ذخیره، انتقال و توزیع و مصرف در آخرین وسایل و تجهیزات در آن نشان داده می‌شود (منظور و همکاران، ۱۳۹۳). نسخه اول آن در مؤسسه بین‌المللی سیستم‌های کاربردی به طور عمیق‌تر مورد مطالعه و بررسی مجدد قرار گرفت و به دنبال آن نسخه‌های بعدی مدل توسعه پیدا کرد. در این مدل تقاضای انرژی به‌صورت متغیر بیرونی در نظر گرفته می‌شود و اطلاعات اقتصادی (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت و هزینه‌های زیست‌محیطی)، اطلاعات فنی (بازده، طول عمر، زمان احداث، مصرف داخلی، ضریب ظرفیت و پخش مواد آلاینده به وسیله تکنولوژی‌ها) و قیود مختلف به مدل داده می‌شود. مجموعه محدودیت‌های فوق، یک منطقه امکان‌پذیر تولید برای سیستم عرضه انرژی را ایجاد می‌کنند. برای یافتن بهترین نقطه کارکرد در این منطقه امکان‌پذیر باید معیار خاصی در نظر گرفت. معمولاً هزینه‌های کل سیستم را به عنوان معیار در نظر می‌گیرند و با حداقل کردن کل هزینه‌ها، بهترین نقطه کارکرد سیستم عرضه انرژی را به دست می‌آورند. بدین ترتیب تابع هدف مدل عرضه انرژی شامل کل هزینه‌های سیستم خواهد بود. هزینه‌های مذکور باید برای تمام سطوح، تکنولوژی‌ها، مناطق و زمان‌های مختلف محاسبه شده و به یک سال پایه تنزیل داده‌شوند. در این‌صورت مجموع ارزش حال کل هزنیه‌های سیستم، تابع هدف مدل را شکل خواهد داد. با حداقل کردن تابع هدف مذکور، با توجه به محدودیت‌های سیستم عرضه انرژی، وضعیت بهینه به‌دست می‌آید (منظور و همکاران،۱۳۹۵).

همان‌طور که در مورد مدل‌های مارکال و MSSAGE مشاهده شد، در هر دو مدل تابع هزینه هدف نسبت به قیود تعریف شده حداقل می‌شود، ولی تفاوت این مدل‌ها با برنامه‌ریزی تصادفی در این است

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

که در روش برنامه‌ریزی تصادفی برای یکی از پارامترهای مدل که امکان تغییر آن در آینده است، سطوح مختلف و یا در واقع سناریوهای مختلف در نظر می‌گیریم و احتمال وقوع هر کدام از این سناریوها را با توجه به میزان وقوع آن‌ها در سال‌های گذشته مشخص می‌کنیم. وجود احتمالات و سناریوهای مختلف در مدل برنامه‌ریزی تصادفی باعث می‌شود، نااطمینانی در این مدل بیشتر از مدل‌های دیگر در نظر گرفته‌شود و حتی با وقوع حوادث غیرمترقبه مدلسازی باز هم قابل اطمینان باشد.

در این پژوهش جهت به‌دست آوردن ترکیب بهینه تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها از ترکیب روش‌های برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای و همچنین روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای جهت دقت بیشتر برای در نظر گرفتن نااطمینانی‌ها استفاده شده‌است. همچنین قید ریسک مالی هم به‌عنوان یکی از قیود اقتصادی در مدل گنجانده شده‌است، که اثبات ریاضی این قید اقتصادی در ادامه بیان می‌شود.

۳-۱. برنامه ریزی خطی بازه‌ای

برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای (IPLP)، ابزاری مفید برای حل مشکلات بهینه‌سازی غیردقیق می‌باشد. در این روش پارامترهای نامطمئن در قالب بازه‌ای با حدود بالا و پایین بیان می‌شوند. در ادامه یک مدل برنامه‌ریزی بازه‌ای بیان شده است.

$$\text{Min } f^{\pm} = C^{\pm} X^{\pm} \qquad (۱)$$

$$\text{S.t } A^{\pm} X^{\pm} \geq B^{\pm}$$
$$X^{\pm} \geq 0 \qquad (۲)$$
$$A^{\pm} \epsilon \{ R^{\pm} \}^{m*n} , B^{\pm} \epsilon \{ R^{\pm} \}^{m*1}, C^{\pm} \epsilon \{ R^{\pm} \}^{1*n} , X^{\pm} \epsilon \{ R^{\pm} \}^{n*1} , \text{and } \{ R^{\pm} \}$$

در مدل بالا f تابع هدف، X متغیر تصمیم و A ,B ,C پارامترهای مدل می‌باشند. «−» و «+» نشان‌دهنده حدود بالا و پایین اعداد فاصله‌ای می‌باشند. با حل این مدل، جواب‌های بهینه به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند (دونگ[1] و همکاران، ۲۰۱۴).

$$x_{j\,opt} = [x^{-}_{j\,opt} , x^{+}_{j\,opt}] \text{ for } j=1,\ldots,n$$
$$f_{opt} = [f^{-}_{opt} , f^{+}_{opt}]$$

1. Dong

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

۳-۲. مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

یکی از رایج‌ترین و مشهورترین مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای[1] است. مهمترین ویژگی این مدل‌ها، تقسیم تصمیمات به دو گروه یا دو مرحله است که تصمیم‌گیرنده در مرحله اول تصمیمی را اتخاذ می‌کند (تصمیمات مرحله اول) سپس یک واقعه تصادفی اتفاق می‌افتد که بر عملکرد تصمیمات مرحله اول تاثیر می‌گذارد. آنگاه یک تصمیم بازگشتی (تصمیمات مرحله دوم) اتخاذ می‌شود که سعی می‌کند تأثیرات نامطلوب احتمالی تصمیمات مرحله اول را جبران کند.

یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{Min } f= \sum_{j=1}^{n1} c_j x_j + \sum_{j=1}^{n2} \sum_{h=1}^{v} p_h d_j y_{jh} \qquad (۳)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^{n1} a_{rj} x_j \leq b_r \qquad (۴)$$

$r=۱,.....,m_۱$

$$\sum_{k=0}^{n} a_{rj}\, x_j + \sum_{k=0}^{n} a_{rj}'\, y_{jh} \geq w_h \qquad (۵)$$

$t=۱,....,m_۲$

$x_j \leq ۰ \;, j=۱,.....,n_۱$

$y_{jh} \leq ۰ \;, j=۱, ... , n_۲ \; ; h=۱, ... , v$

در معادلات بالا x نشاندهنده متغیر تصمیم مرحله اول می‌باشد، که قبل از وقوع واقعه تصادفی در مورد آن تصمیم‌گیری شده است. همچنین y نشاندهنده تصمیم مرحله دوم می‌باشد، که به اقدامات

1. Tow stage stochastic programming (TSP)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

احتیاطی بعد از وقوع واقعه تصادفی مربوط است. همچنین w_h عبارتست از متغیرهای تصادفی با سطوح احتمال p_h ، $\sum p_h = ۱$.

در اینجا ما می‌خواهیم مجموع هزینه‌های مرحله اول و هزینه‌های انتظاری مرحله دوم را حداقل کنیم (میرحسنی و همکاران،۱۳۹۷).

۳-۳. مدیریت ریسک مالی[1]

مشکلی که در مورد مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای وجود دارد، این است که اگرچه در این روش مجموع هزینه‌های انتظاری حداقل می‌گرددف ولی این روش در مورد کنترل میزان هزینه‌های تصادفی تحت سطوح مختلف تقاضا کاملاً ناتوان است و امکان دارد میزان هزینه‌ها از میزان مورد انتظار سرمایه‌گذاران بسیار بالاتر باشد. در واقع مشکل مدل برنامه‌ریزی تصادفی این است که تغییرپذیری هزینه‌ها در مدل لحاظ نشده‌است. بنابراین می‌توان ریسک مالی را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$Risk_h(x,\Theta) = p[B_h(x) \geq \Theta] \qquad (۶)$$

Θ هزینه هدف و $B_h(x)$ هزینه‌های واقعی می‌باشد.

$$B_h(x) = \sum_{j=1}^{n1} c_j x_j + \sum_{j=1}^{n2} d_j y_{jh} \quad . \forall h \qquad (۷)$$

از آنجا که در مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی نااطمینانی به وسیله سطوح مختلف h بیان شده‌است. بنابراین ریسک مالی را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد.

$$Risk_h(x,\Theta) = \sum_{h=1}^{v} p[B_h(x) \geq \theta] \qquad (۸)$$

حال می‌توان گفت احتمال اینکه هزینه‌ها کمتر از سطح هدف شود، صفر ودر غیراین‌صورت یک می‌باشد. بنابراین ریسک مالی به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

1. Financial risk management

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$$Risk_h(x,\Theta) = \sum_{h=1}^{v} P_h\, Z_h(X.\Theta) \qquad (۹)$$

$$Z_h = 1 \quad \text{if} \quad \sum_{j=1}^{n1} c_j x_j + \sum_{j=1}^{n2} d_j\, y_{jh} \geq \Theta \qquad (۱۰)$$
$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

۳-٤. مدیریت ریسک تصادفی-فاصله‌ای[1]

با توجه به ماهیت تصادفی تقاضای انرژی، سرمایه‌گذاران بازار انرژی با نااطمینانی‌های بسیاری از قبیل قیمت سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های عملیاتی و غیره مواجه می‌باشند. همان‌طور که می‌دانید ممکن است توزیع احتمال بسیاری از مؤلفه‌های نامطمئن به‌دلیل کوچک بودن اندازه نمونه در دسترس نباشد. حتی اگر چنین توزیعی ایجاد شود، استفاده از آن‌ها در مدل‌های تصادفی بزرگ چالش برانگیز می‌باشد. برنامه‌ریزی پارامتر فاصله‌ای[2] یک جایگزین برای حل این مشکل می‌باشد، به این ترتیب که اعداد فاصله‌ای با حدود بالا و پایین برای ورودی‌های نامطمئن استفاده می‌شوند. در نهایت یک رویکرد بالقوه برای محاسبات بهتر با وجود نااطمینانی‌ها و ریسک‌ها ترکیب سه روش برنامه‌ریزی دومرحله‌ای استوکاستیک[3]، روش برنامه‌ریزی پارامتر فاصله‌ای و مدیریت ریسک مالی می‌باشد که به مدل مدیریت ریسک تصادفی-فاصله‌ای منجر می‌شود، این مدل به شرح زیر است(نای و همکاران،۲۰۱۶) :

$$\text{Min } f^{\pm} = \sum_{j=1}^{n1} c_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^{n2} \sum_{h=1}^{v} p_h d_j^{\pm} y_{jh}^{\pm} \qquad (۱۱)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n1} a_{rj}^{\pm} x_j^{\pm} \leq b_r^{\pm} \quad r=۱,.....,m_۱ \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{j=1}^{n1} a_{rj}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^{n2} a'^{\pm}_{rj} y_{jh}^{\pm} \geq w_h^{\pm} \qquad (۱۳)$$

1. Interval-Stochastic risk management
2. Interval parameter programming
3. Two stage stochastic programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$$\sum_{j=1}^{n1} c_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^{n2} d_j^{\pm} y_{jh}^{\pm} \geq \Theta^{\pm} + UB_h(z_h^{\pm} - 1) . \forall h \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j=1}^{n1} c_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^{n2} d_j^{\pm} y_{jh}^{\pm} \leq \Theta^{\pm} + UB_h z_h^{\pm} . \forall h \quad (۱۵)$$

$$\sum_{h=1}^{v} p_h z_h^{\pm} \leq \varepsilon^{\pm} . \forall h \quad (۱۶)$$

$$z_h^{\pm} = 1 \text{ if } \sum_{j=1}^{n1} c_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^{n2} d_j^{\pm} y_{jh}^{\pm} \geq \Theta^{\pm} . \forall h$$
$$= 0 \quad \text{otherwise} \quad (۱۷)$$
$$x_j^{\pm} \geq 0, j=1, 2, \ldots, n_1$$
$$y_{jh}^{\pm} \geq 0, j= 1, 2, \ldots, n_2$$

در مدل بالا ε سطح ریسک مجاز، Θ هزینه هدف و UB_h حدود بالایی هزینه برای هر سناریو می‌باشد ،که برای متعادل کردن هزینه‌های واقعی تحت هر سناریو و هزینه هدف(Θ) استفاده شده‌است. همچنین همان‌طور که در قسمت‌های قبلی گفته شد x نشاندهنده متغیر تصمیم مرحله اول می‌باشد، که قبل از وقوع واقعه تصادفی در مورد آن تصمیم‌گیری شده است و y نشاندهنده تصمیم مرحله دوم می‌باشد، که به اقدامات احتیاطی بعد از وقوع واقعه تصادفی مربوط است. همچنین w_h عبارتست از متغیرهای تصادفی با سطوح احتمال p_h ,$\sum p_h = ۱$.

۳-۵. تعریف سناریوها

یکی از مهمترین نااطمینانی‌های موجود در بازار برق جهت پیش‌بینی عرضه مناسب، نااطمینانی در مورد تقاضای برق می‌باشد. از اینرو در این پژوهش، سناریوهای مختلفی برای تقاضای سالانه برق در نظر گرفته شده‌است و احتمال وقوع هرکدام از این سناریوها با توجه به مقادیر تقاضا در سال‌های گذشته محاسبه شده‌است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

جدول ۱. سناریوهای مختلف تقاضا بر حسب هزار مگاوات ساعت و احتمال وقوع آن

h	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سناریوهای مختلف تقاضا	۳۹۰۰	۴۲۲۵	۴۶۵۰	۵۰۷۵	۵۵۰۰	۵۹۲۵	۶۳۵۰
احتمال وقوع هر سناریو	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۲۲۲	۰/۱۱۱	۰/۲۲۳	۰/۱۶۷	۰/۰۵۵

مأخذ: نتایج تحقیق

۳-۶. پارامترها و متغیرهای مدل در جدول زیر ارائه شده‌است

اندیس‌ها:

i :عبارتست از منابع انرژی فسیلی i=1 برای گاز طبیعی، i=2 برای گازوئیل

n : عبارتست از تکنولوژی تبدیل نیرو، n=1 برای نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه، n=2 برای نیروگاه چرخه ترکیبی خوی، n=3 برای نیروگاه گازی ارومیه، n=4 برای نیروگاه برق‌آبی مهاباد.

h : عبارتست از سطوح مختلف تقاضای الکتریسیته، h=1 برای تقاضای خیلی پایین، h=2 برای تقاضای پایین، h=3 برای تقاضای متوسط پایین، h=4 برای تقاضای متوسط، h=5 برای تقاضای متوسط بالا، h=6 برای تقاضای بالا و h=7 برای تقاضای خیلی بالا.

پارامترهای مدل :

$PSD^{\pm}_{h}$: متغیر تصادفی تقاضای الکتریسیته با سطح h

p_h: احتمال وقوع تقاضای سطح h

$CBN^{\pm}_{i}$: هزینه خرید منبع انرژی i

$OCT^{\pm}_{n}$: هزینه متغیر تولید الکتریسیته بوسیله تکنولوژی تولید n

$FTE^{\pm}_{n}$: هزینه نگهداری ثابت برای تکنولوژی تولید n

$RE^{\pm}_{n}$: ظرفیت باقیمانده تکنولوژی تولید n

$GH^{\pm}_{n}$: ساعات تولید برق

$FCA^{\pm}_{n}$: هزینه ثابت توسعه ظرفیت تکنولوژی n

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$EDI^{\pm}_{n}$: هزینه متغیر توسعه ظرفیت تکنولوژی n

$CE^{\pm}_{e}$: هزینه‌های مربوط به کاهش آلودگی e

$FS^{\pm}$: یارانه‌های مالی (کمک‌های دولتی در جهت کاهش آلودگی)

$CF^{\pm}_{e}$: هزینه عملیاتی کاهش آلودگی e

$AMR^{\pm}_{n,e}$: مقدار انتشار آلودگی e توسط تکنولوژی تولید n

$OTT^{\pm}$: هزینه متغیر انتقال الکتریسیته

$FTT^{\pm}$: هزینه ثابت انتقال الکتریسیته

$FE^{\pm}_{t}$: مقدار آب مورد نیاز برای تولید هر مگاوات ساعت الکتریسیته (مصرف مخصوص آب)

$UPH^{\pm}_{t}$: کران بالای دسترسی به آب

$CZN^{\pm}_{i}$: ضریب تبدیل منبع انرژی i

$SF^{\pm}_{e}$: بازدهی کاهش برای آلودگی e

$ES^{\pm}_{e}$: مقدار انتشار اجازه داده شده برای آلودگی e

INS_{i} : فاکتور انتشار آلاینده‌های مختلف

$FP^{\pm}_{n}$: سرمایه موردنیاز برای توسعه ظرفیت تکنولوژی تولید n

V : پیک تقاضای بار

Sl : نرخ تلفات انرژی در طول انتقال و تولید

$REE^{\pm}_{t}$: حداکثر صادرات مجاز الکتریسیته

$RIE^{\pm}_{t}$: حداکثر واردات مجاز الکتریسیته

$WCC^{\pm}_{t,h}$: هزینه خرید الکتریسیته وارداتی از نواحی دیگر در سطح تقاضای h

$\Theta^{\pm}$: هزینه هدف

$UC_{h}^{\pm}$: حدود بالایی هزینه برای هر سناریو

$\varepsilon^{\pm}$: سطح ریسک مجاز

$WCC^{\pm}_{h}$: هزینه خرید الکتریسیته وارداتی از نواحی دیگر در سطح تقاضای h

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$XC^{\pm}_{n}$: متغیر باینری برای تشخیص صحیص بودن یا نبودن توسعه ظرفیت تکنولوژی n

متغیرهای تصمیم:

$ECR^{\pm}_{n}$: مقدار مورد نظر تولید الکتریسیته توسط تکنولوژی تولید n

$XNL^{\pm}_{i}$:مقدار مصرف منبع انرژی i

$OSE^{\pm}_{h}$: مقدار کمبود الکتریسیته

$OSE^{\pm}_{t,h}$: مقدار کمبود الکتریسیته در تقاضای سطح h

$EDA^{\pm}_{n}$: توسعه ظرفیت تکنولوژی تولید n

در این پژوهش مدل بالا به‌صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\text{Min } f^{\pm} = \text{COST-PUR}^{\pm} + \text{COST-OPR}^{\pm} + \text{COST-PEN}^{\pm} + \text{COST- EXP}^{\pm} + \text{COST-ENV}^{\pm} \quad (۱۸)$$

$f^{\pm}$: عبارتست از هزینه سیستم در طول افق برنامه‌ریزی

$\text{COST-PUR}^{\pm}$**:** عبارتست از هزینه خرید منابع انرژی

$\text{COST-OPR}^{\pm}$: عبارتست از هزینه عملیاتی تولید الکتریسیته

$\text{COST-PEN}^{\pm}$ **:** عبارتست از هزینه واردات الکتریسیته در صورت کمبود الکتریسیته

$\text{COST-EXP}^{\pm}$: عبارتست از هزینه توسعه ظرفیت

$\text{COST-ENV}^{\pm}$: عبارتست از هزینه‌های مربوط به کاهش آلودگی

$\text{COST-PUR}^{\pm}$**:** عبارتست از هزینه خرید منابع انرژی

$$\text{COST} - \text{PUR}^{\pm} = \sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{3} \text{CBN}_{i.t}{}^{\pm} \times \text{XNL}_{i.t}{}^{\pm} \quad (۱۹)$$

$\text{COST-OPR}^{\pm}$: عبارتست از هزینه عملیاتی تولید الکتریسیته

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$$\begin{aligned}\mathrm{COST-OPR}^{\pm} = &\sum_{n=1}^{4}(\mathrm{ECR}_{n.t=1}{}^{\pm} \times \mathrm{OCT}_{n.t=1}{}^{\pm} + \mathrm{FTE}_{n.t=1}{}^{\pm} \times \mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm}) \\ &+ \sum_{n=1}^{4}\sum_{t=2}^{3}[\mathrm{ECR}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{OCT}_{n.t}{}^{\pm} \\ &+ \mathrm{FTE}_{n.t}{}^{\pm} \times (\mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm} + \mathrm{XC}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{EDA}_{n.t}{}^{\pm})]\end{aligned} \quad (۲۰)$$

$\mathrm{COST\text{-}PEN}^{\pm}$: عبارتست از هزینه واردات الکتریسیته در صورت کمبود الکتریسیته

$$\mathrm{COST-PEN}^{\pm} = \sum_{h=1}^{7} p_h \times \mathrm{WCC}_{t.h}{}^{\pm} \times \mathrm{OSE}_{t.h}{}^{\pm} \quad (۲۱)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶)

$\mathrm{COST\text{-}EXP}^{\pm}$: عبارتست از هزینه توسعه ظرفیت

$$\mathrm{COST-EXP}^{\pm} = \sum_{t=2}^{3}\sum_{n=1}^{4} \mathrm{XC}_{n.t}{}^{\pm} \times (\mathrm{FCA}_{n.t}{}^{\pm} + \mathrm{EDA}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{EDI}_{n.t}{}^{\pm}) \quad (۲۲)$$

(لی و همکاران،۲۰۱۰)

$\mathrm{COST\text{-}ENV}^{\pm}$: عبارتست از هزینه‌های مربوط به کاهش آلودگی

$$\begin{aligned}\mathrm{COST-ENV}^{\pm} = &\sum_{n=1}^{4}[\mathrm{ECR}_{n.t=1}{}^{\pm} \times (\mathrm{CE}_{e.t=1}{}^{\pm} - \mathrm{FS}_{t=1}{}^{\pm}) \\ &+ \mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm} \times \mathrm{CF}_{e.t=1}{}^{\pm}] \\ &+ \sum_{n=1}^{4}\sum_{t=2}^{3}[\mathrm{ECR}_{n.t}{}^{\pm} \times (\mathrm{CE}_{e.t}{}^{\pm} - \mathrm{FS}_{t}{}^{\pm}) \\ &+ (\mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm} + \mathrm{XC}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{EDA}_{n.t}{}^{\pm}) \times \mathrm{CF}_{e.t}{}^{\pm}\end{aligned} \quad (۲۳)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$\mathrm{COST\text{-}TRA}^{\pm}$: عبارتست از هزینه‌های مربوط به انتقال الکتریسیته

$$\begin{aligned}\mathrm{COST-TRA}^{\pm} = \sum_{n=1}^{4}(1-SL^{\pm}) \times (\mathrm{ECR}_{n.t=1}{}^{\pm} \times \mathrm{OTT}^{\pm}) \\ + \mathrm{FTT}^{\pm} \times (\mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm} \times \mathrm{GH}_{n.0}{}^{\pm}] \\ + \sum_{n=1}^{4}\sum_{t=2}^{3}(1-SL^{\pm}) \times (\mathrm{ECR}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{OTT}^{\pm}) \\ + \mathrm{FTT}^{\pm} \times (\mathrm{RE}_{n.0}{}^{\pm} \\ + \mathrm{XC}_{n.t}{}^{\pm} \times \mathrm{EDA}_{n.t}{}^{\pm}) \times \mathrm{GH}_{n.t}{}^{\pm}\end{aligned} \qquad (۲۴)$$

(نای و همکاران، ۲۰۱۶).

محدودیت‌های در نظر گفته شده در این پژوهش عبارتند از :

محدودیت دسترسی به منابع تجدیدپذیر : همان‌طور که مشخص است مقدار استفاده از منبع تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته بایستی متناسب با سطح دسترسی به آن منبع باشد. در این تحقیق با توجه به اینکه تنها نیروگاه تجدیدپذیر در استان آذربایجان غربی، نیروگاه برق‌آبی مهاباد می‌باشد، این محدودیت فقط برای نیروگاه برق‌آبی بیان شده‌است.

$$\sum_{t=1}^{3} ECR_4{}^{\pm} \times FE_{4.t}{}^{\pm} \leq \sum_{t=1}^{3} \mathrm{UPH_t}^{\pm} \qquad (۲۵)$$

(لی و همکاران، ۲۰۱۰)

محدودیت تعادل منابع: منظور از این محدودیت این است که در نیروگاه‌های تجدیدناپذیر بایستی تولید الکتریسیته متناسب با مصرف انرژی‌های فسیلی باشد.

$$\sum_{n=1}^{3} \mathrm{ECR}_{n.t}{}^{\pm} \leq \sum_{i=1}^{2} \mathrm{XNL}_{i.t}{}^{\pm} \times \mathrm{CZN}_{i.t}{}^{\pm} \ . \forall i.n.t \qquad (۲۶)$$

(نایو همکاران،۲۰۱۶)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

محدودیت تعادل عرضه و تقاضای الکتریسیته: منظور از این محدودیت این است که عرضه الکتریسیته بایستی بیش از تقاضا باشد. زیرا در صورتیکه تقاضای الکتریسیته بیش از عرضه الکتریسیته شود آنگاه تولید کننده‌ها با خسارت ناشی از واردات مواجه خواهند شد.

$$(\sum_{n=1}^{4} ECR_{n.t}^{\pm} + OSE_{t.h}^{\pm}) \times (1 - sl_{t}^{\pm}) \geq PSD_{t.h}^{\pm} . \forall t. h \qquad (۲۷)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶)

محدودیت ظرفیت تولید الکتریسیته : منظور از این محدودیت این است که تولید الکتریسته هر نیروگاه اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بایستی متناسب با ظرفیت تولید آن نیروگاه باشد.

$$ECR_{n.t}^{\pm} \leq (RE_{n.0}^{\pm} + \sum_{t=2}^{3} EDA_{n.t}^{\pm} \times XC_{n.t}^{\pm}) \times GH_{n.t}^{\pm} . \forall n. h \qquad (۲۸)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶)

محدودیت کنترل آلودگی‌های زیست محیطی : هدف از این محدودیت کنترل میزان مصرف انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌ها در جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌باشد. در این بخش منظور از ES_e کاهش ۶ درصدی آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد شده توسط نیروگاه‌ها نسبت به سال ۹۳ یعنی دوره قبل از شروع برنامه‌ریزی می‌باشد.

$$\sum_{n=1}^{3} ECR_{n.t}^{\pm} \times AMR_{n.e.t}^{\pm} \times (1 - SF_{e.t}^{\pm}) \leq ES_{e.t}^{\pm} . \forall e. t. h \qquad (۲۹)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶)

$$AMR_{e,t} = \sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{3} XNL_{i.t}^{\pm} \times CZN_{i}^{\pm} \times INS_{i.t}^{\pm} \qquad (۳۰)$$

(ماهر و همکاران،۲۰۱۳).

محدودیت توسعه ظرفیت : هدف از این محدودیت کنترل مقدار توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها با توجه به هزینه‌های توسعه ظرفیت می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$$\sum_{n=1}^{4}\sum_{t=2}^{3} XC_{n.t}^{\pm} \times \left(FCA_{n.t}^{\pm} + EDA_{n.t}^{\pm} \times EDI_{n.t}^{\pm}\right) \leq \sum_{t=2}^{3} FP_{n.t}^{\pm} \qquad (۳۱)$$

$$xc_{n,t}^{\pm} = \begin{cases} ۱ & \text{اگر توسعه ظرفیت صورت بگیرد } \forall n, \\ ۰ & \text{در غیر این‌صورت} \end{cases} \qquad (۳۲)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶).

محدودیت پیک تقاضای بار الکتریسیته : این محدودیت به منظور جلوگیری از کمبود عرضه ایجاد شده تا در صورتی که نیاز است توسعه ظرفیت در نیروگاه‌ها جهت جلوگیری از کمبود عرضه صورت بگیرد.

$$\sum_{n=1}^{5}\left(RE_{n.0}^{\pm} + \sum_{t\prime=2}^{t} EDA_{n.t\prime}^{\pm} \times XC_{n.t}^{\pm}\right) \geq V_{t}^{\pm} \;.\forall t \qquad (۳۳)$$

(لی و همکاران، ۲۰۱۰)

محدودیت مصرف الکتریسیته هر مصرف‌کننده : این محدودیت به منظور کنترل تقاضا و متناسب بودن آن با مقدار عرضه می‌باشد.

$$PSD_{t.h}^{\pm} \leq \sum_{n=1}^{4}\left(ECR_{n.t}^{\pm} + XC_{n.t}^{\pm} \times EDA_{n.t}^{\pm} \times GH_{n.t}^{\pm} - sl_{t} \times ECR_{n.t}^{\pm}\right) - REE_{t}^{\pm} + RIE_{t}^{\pm} \;.\forall t \qquad (۳۴)$$

(هوانگ[1] و همکاران، ۲۰۱۷).

محدودیت کنترل ریسک مالی : این محدودیت به منظور کنترل ریسک مالی ناشی از سرمایه‌گذاری می‌باشد، در این پژوهش ریسک مالی متوسط یعنی ε=۰.۵ در نظر گرفته شده‌است.

$$COST\text{-}PUR^{\pm} + COST\text{-}OPR^{\pm} + COST\text{-}EXP^{\pm} + COST\text{-}ENV^{\pm} + \sum_{t=1}^{3} WCC_{t.h}^{\pm} \times OSE_{t.h}^{\pm} \geq \Theta^{\pm} + UC_{h}^{\pm} \times \left(Z_{h}^{\pm} - 1\right) . \forall h \qquad (۳۵)$$

(۳۶)

1. Huang

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

$$\text{COST-PUR}^{\pm} + \text{COST-OPR}^{\pm} + \text{COST-EXP}^{\pm} + \text{COST-ENV}^{\pm} + \sum_{t=1}^{3} \text{WCC}_{t.h}{}^{\pm} \times \text{OSE}_{t.h}{}^{\pm} \leq \Theta^{\pm} + \text{UC}_{h}{}^{\pm} \times \text{Z}_{h}{}^{\pm} . \forall h$$

$$\text{Z}_{h}{}^{\pm} = 0 \text{ or } 1$$

$$\sum_{h=1}^{7} p_h \, z_h{}^{\pm} \leq \varepsilon^{\pm} \quad . \forall h \qquad (۳۷)$$

الزامات غیرمنفی: این محدودیت برای متغیرهایی در نظر گرفته شده‌است که مقادیرشان بایستی مثبت یا صفر باشد.

$$\text{XNL}_{i,t}{}^{\pm}, \text{ECR}_{n,t}{}^{\pm}, \text{OSE}_{t,h}{}^{\pm} \geq 0 \ , \quad \forall n, i, t, h \qquad (۳۸)$$

(نای و همکاران،۲۰۱۶).

٤. یافته‌های تحقیق

در این پژوهش از نرم‌افزار گمز جهت به‌دست آوردن نتایج استفاده شده‌است. برآورد نتایج توسط نرم‌افزار گمز بدین صورت است که کلیه محدودیت‌های ذکر شده در این نرم‌افزار کدنویسی شده و تابع هزینه با توجه به تمام محدودیت‌ها حداقل می‌گردد. بنابراین نتایج با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها به‌دست می‌آید. همچنین اگر توجه کنید بسیاری از متغیرها در چند محدودیت استفاده شده و مقدار هر متغیر به متغیر دیگر وابسته است، بنابراین بایستی کلیه محدودیت‌ها به‌صورت همزمان در بهینه‌سازی استفاده شوند.

٤-۱. توصیف داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های گزارش صنعت برق استان آذربایجان غربی در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد برای پارامترهای نامطمئن مدل مانند ذخیره آب پشت سد یا ساعات تولید برق در نیروگاه‌ها مقادیر فاصله‌ای نزدیک به مقادیر اعلام شده در گزارش صنعت برق در نظر گرفته شده‌است، یعنی کران بالا و پایین حول مقدار اعلام شده در گزارش صنعت برق برای پارامترهای نامطمئن در نظر گرفته شده‌است. همچنین بایستی ذکر شود

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

در یافته‌های تحقیق منظور از t=1 دوره ۱ یا سال ۱۳۹۴، منظور از t=2 دوره ۲ یا سال ۱۳۹۵ و منظور از t=3 دوره ۳ یا سال ۱۳۹۶ می‌باشد.

٤-۲. مصرف انرژی‌های فسیلی

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مصرف گاز در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی کمتر از مقدار بهینه آن است. همچنین مصرف گازوئیل در نیروگاه‌های این استان بسیار بیشتر از مقدار بهینه آن است. همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود حدود بالایی و پایینی مصرف بهینه برنامه‌ریزی شده گاز در طول دوره برنامه ریزی افزایش یافته و حدود بالایی و پایینی مقدار مصرف گاز در طول دوره برنامه‌ریزی بیش از مصرف واقعی آن می‌باشد. نمودار ۲ مصرف واقعی و برنامه‌ریزی شده گازوئیل در طول دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حدود بالایی و پایینی مصرف گازوئیل در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی کمتر از مصرف واقعی گازوئیل در نیروگاه‌های این استان می‌باشد. همچنین حدود بالایی و پایینی مصرف گازوئیل در طول دوره برنامه‌ریزی کاهش یافته‌است. نمودارهای۳و ۴و۵و۶و۷ و۸ نیز سهم انرژی‌های فسیلی مختلف در مصرف نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در واقعیت و طبق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است طبق برنامه‌ریزی مصرف گاز در طول دوره برنامه‌ریزی بایستی افزایش و مصرف گازوئیل در طول برنامه‌ریزی بایستی کاهش یابد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

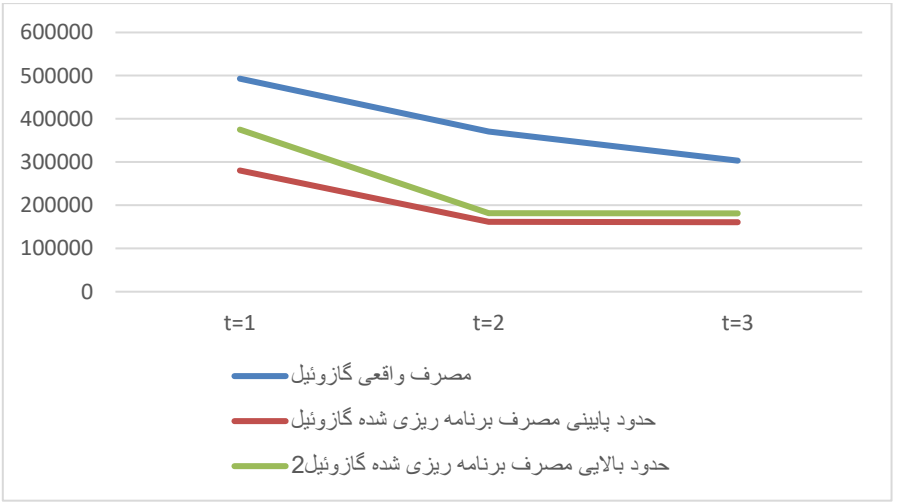
جدول۲. مصرف واقعی و برنامه ریزی شده گاز و گازوئیل در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی

سال / مصرف	۹۴	۹۵	۹۶
مصرف واقعی گاز (مترمکعب)	۱۱۶۱۹۶۱۰۰۰	۱۲۵۰۵۳۷۰۰۰	۱۴۴۱۶۲۶۰۰۰
حدود پایینی مصرف برنامه ریزی شده گاز	۱۱۷۵۴۰۰۰۰۰	۱۶۹۷۳۰۰۰۰۰	۱۶۹۹۵۰۰۰۰۰
حدود بالایی مصرف برنامه ریزی شده گاز	۱۵۰۲۹۰۰۰۰۰	۱۷۵۲۱۰۰۰۰۰	۱۷۵۴۳۰۰۰۰۰
مصرف واقعی گازوئیل (لیتر)	۴۹۳۰۶۸۰۰۰	۳۷۰۹۲۹۰۰۰	۳۰۳۲۸۴۰۰۰
حدود پایینی مصرف برنامه ریزی شده گازوئیل	۲۸۰۴۹۰۰۰۰	۱۶۱۶۵۰۰۰۰	۱۶۰۸۱۰۰۰۰
حدود بالایی مصرف برنامه ریزی شده گازوئیل	۳۷۵۱۴۰۰۰۰	۱۸۲۰۴۰۰۰۰	۱۸۱۲۳۰۰۰۰

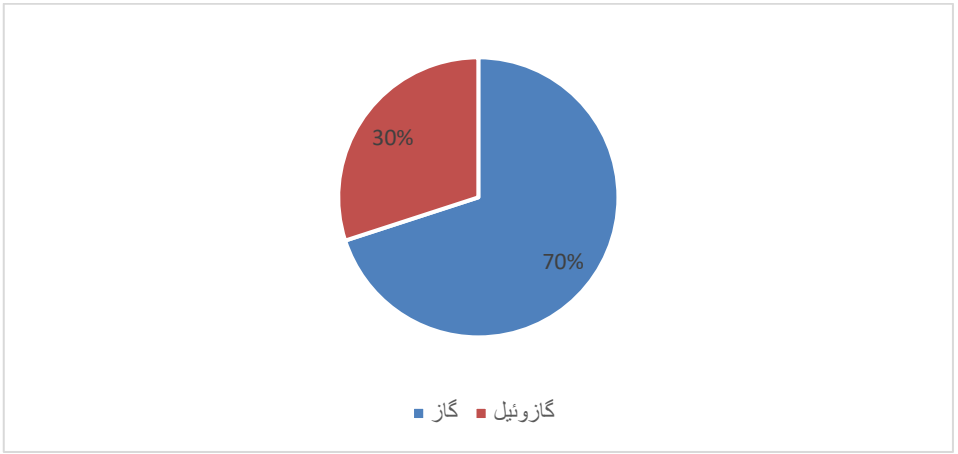
مأخذ: نتایج تحقیق

نمودار ۱. مصرف سالانه برنامه ریزی شده و واقعی گاز طبیعی
در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی بر حسب هزار مترمکعب

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

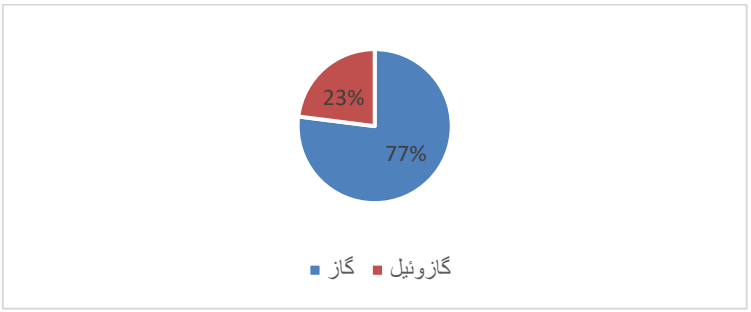


نمودار ۲. مصرف سالانه برنامه ریزی شده و واقعی گازوئیل
در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی بر حسب هزار لیتر

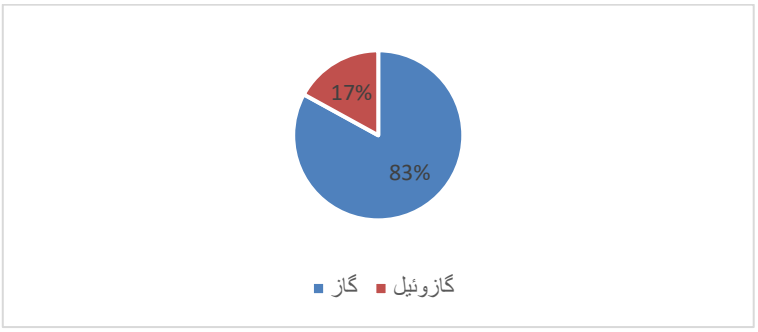


نمودار ۳. سهم انرژی‌های فسیلی مختلف در مصرف انرژی نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۴

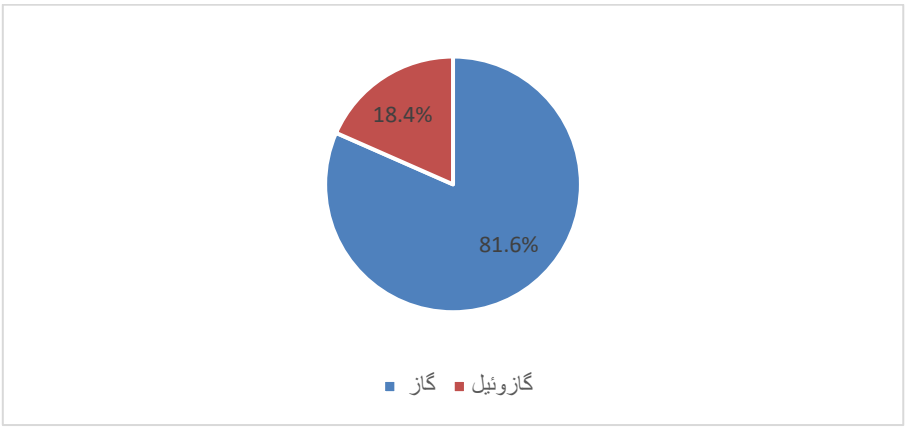
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



نمودار ۴. سهم انرژی‌های فسیلی مختلف در مصرف انرژی نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۵

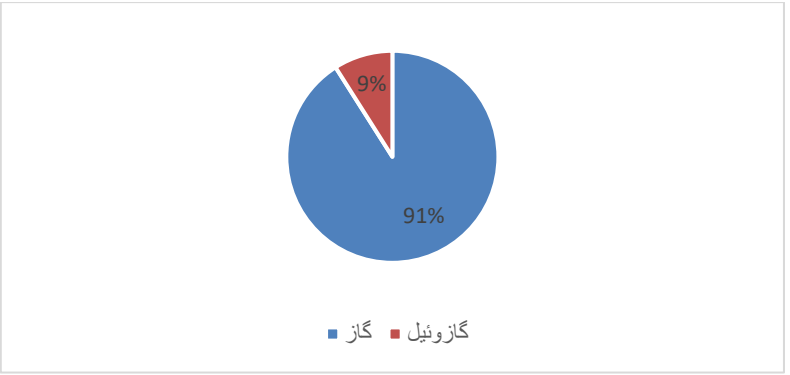


نمودار ۵. سهم انرژی‌های فسیلی مختلف در مصرف انرژی نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۶

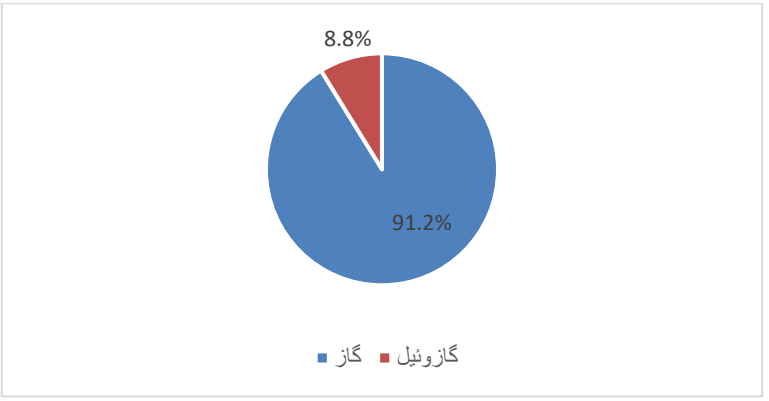


نمودار ۶. میانگین مصرف برنامه ریزی شده انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۴

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



نمودار ۷. میانگین مصرف برنامه ریزی شده انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۵



نمودار ۸. میانگین مصرف برنامه ریزی شده انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی در سال ۹۶

٤-۳. تولید الکتریسیته برنامه‌ریزی شده

- نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد مقدار تولید نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه کمتر از مقدار بهینه بوده‌است، همان‌طور که در نمودار ۹ و جدول ۲ مشاهده می‌شود حدود بالایی و پایینی تولید بهینه این نیروگاه طبق برنامه‌ریزی بیش از مقدار تولید واقعی آن می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

نمودار ۹. تولید سالانه الکتریسیته برنامه ریزی شده و واقعی نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه بر حسب هزار مگاوات ساعت

جدول ۳. تولید واقعی و برنامه ریزی شده نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه
در طول دوره برنامه ریزی بر حسب مگاوات ساعت

تولید / سال	۹۴	۹۵	۹۶
تولید سالانه واقعی نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه	۳۵۴۲۰۰۰	۳۴۵۷۰۰۰	۳۷۷۹۰۰۰
حدود بالایی تولید سالانه نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه طبق برنامه ریزی	۴۰۶۸۰۰۰	۴۴۲۸۰۰۰	۴۴۲۸۰۰۰
حدود پایینی تولید سالانه نیروگاه چرخه ترکیبی ارومیه طبق برنامه ریزی	۳۷۴۰۰۰۰	۴۰۸۰۰۰۰	۴۰۸۰۰۰۰

مأخذ: نتایج تحقیق

- نیروگاه چرخه ترکیبی خوی

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار تولید نیروگاه چرخه ترکیبی خوی کمتر از مقدار بهینه می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ۱۰ و جدول ۳ مشاهده می‌شود، حدود بالایی و پایینی برنامه‌ریزی شده برای تولید این نیروگاه بیش از مقدار واقعی تولید این نیروگاه می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

نمودار ۱۰. تولید سالانه الکتریسیته برنامه ریزی شده و واقعی
نیروگاه چرخه ترکیبی خوی بر حسب هزار مگاوات ساعت

جدول ۴. تولید واقعی و برنامه ریزی شده نیروگاه چرخه ترکیبی خوی
در طول دوره برنامه ریزی بر حسب مگاوات ساعت

تولید / سال	۹۴	۹۵	۹۶
تولید سالانه واقعی نیروگاه چرخه ترکیبی خوی	۱۹۳۵۰۰۰	۱۸۹۰۰۰۰	۲۰۵۷۰۰۰
حدود بالایی تولید سالانه نیروگاه چرخه ترکیبی خوی طبق برنامه ریزی	۲۳۳۴۵۰۰	۲۶۶۹۱۰۰	۲۶۷۳۰۰۰
حدود پایینی تولید سالانه نیروگاه چرخه ترکیبی خوی طبق برنامه ریزی	۱۹۷۵۰۰۰	۲۴۱۹۷۰۰	۲۴۲۳۸۰۰

مأخذ: نتایج تحقیق

- نیروگاه گازی ارومیه

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مقدار تولید واقعی نیروگاه گازی ارومیه در طول دوره دوم و سوم برنامه‌ریزی بیشتر از مقدار بهینه آن می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ۱۱ و جدول ۴ مشاهده می‌شود

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

در دوره اول برنامه ریزی حدود بالایی تولید بیشتر از مقدار تولید واقعی می‌باشد ولی در دوره‌های دوم و سوم برنامه‌ریزی کاهش شدید در تولید این نیروگاه طبق برنامه‌ریزی مشاهده می‌شود. ممکن است برای خوانندگان سوال ایجاد شود که چه توجیهی برای عدم استفاده از ظرفیت فعال یک نیروگاه وجود دارد؟ در پاسخ به این سوال بایستی توضیح داده شود که وقتی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و چرخه ترکیبی توانایی افزایش تولید و ظرفیت آماده و فعال جهت جایگزینی را دارند، بهتر است تولید این نیروگاه‌ها جایگزین نیروگاه گازی شود، زیرا مصرف سوخت و آلودگی زیست‌محیطی ایجاد شده توسط این نیروگاه‌ها به مراتب کمتر از نیروگاه‌های گازی می‌باشد.

نمودار ۱۱. تولید سالانه الکتریسیته برنامه ریزی شده و واقعی نیروگاه گازی ارومیه بر حسب هزار مگاوات ساعت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

جدول ۵. تولید واقعی و برنامه‌ریزی شده نیروگاه گازی ارومیه
در طول دوره برنامه ریزی بر حسب مگاوات ساعت

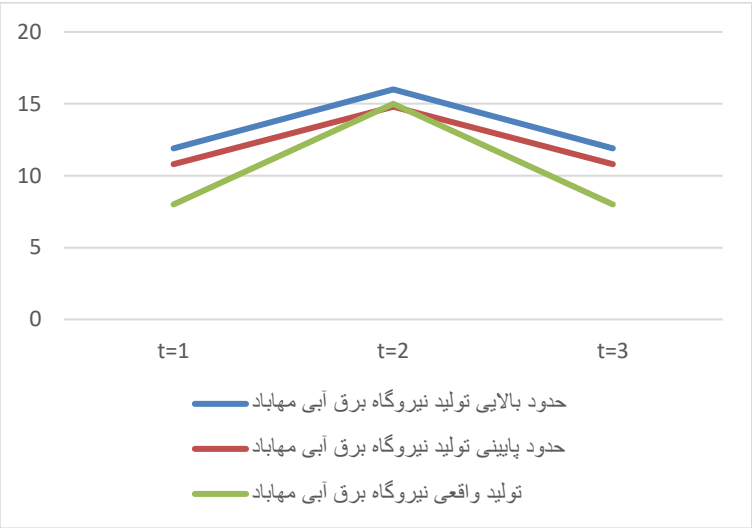
تولید / سال	۹۴	۹۵	۹۶
تولید سالانه واقعی نیروگاه گازی ارومیه	۱۰۷۰۰۰	۸۷۰۰۰	۱۰۲۰۰۰
حدود بالایی تولید سالانه نیروگاه گازی ارومیه طبق برنامه ریزی	۱۲۰۰۰۰	۱۱۹۰۶	۱۱۹۰۶
حدود پایینی تولید سالانه نیروگاه گازی ارومیه طبق برنامه ریزی	۸۷۰۰۰	۱۰۸۱۰	۱۰۸۱۰

مأخذ: نتایج تحقیق

- نیروگاه برق‌آبی مهاباد

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد مقدار تولید نیروگاه برق‌آبی مهاباد بسیار کمتر از مقدار بهینه آن می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ۱۲ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، حدود بالایی و پایینی تولید برنامه‌ریزی شده این نیروگاه بیشتر از مقدار تولید واقعی این نیروگاه می‌باشد. به‌جز تولید دوره دوم که حدود پایینی تولید برنامه‌ریزی شده نیروگاه برق‌آبی مهاباد اختلاف کمی با تولید واقعی این نیروگاه دارد و در ادامه بایستی ذکر شود دلیل کاهش تولید این نیروگاه در دوره سوم برنامه‌ریزی محدودیت‌های زیست‌محیطی و کاهش ذخیره آب پشت سد می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



نمودار ۱۲. تولید سالانه الکتریسیته برنامه ریزی شده و واقعی نیروگاه برق آبی مهاباد بر حسب هزار مگاوات ساعت

جدول ۶ . تولید واقعی و برنامه ریزی شده نیروگاه برق آبی مهاباد در طول دوره برنامه ریزی بر حسب مگاوات ساعت

تولید / سال	۹۴	۹۵	۹۶
تولید سالانه واقعی نیروگاه برق آبی مهاباد	۸۰۰۰	۱۵۰۰۰	۸۰۰۰
حدود بالایی تولید سالانه نیروگاه برق آبی مهاباد طبق برنامه ریزی	۱۱۹۰۶	۱۶۰۰۰	۱۱۹۰۶
حدود پایینی تولید سالانه نیروگاه برق آبی مهاباد طبق برنامه ریزی	۱۰۸۱۰	۱۴۸۰۰	۱۰۸۳۳

مأخذ: نتایج تحقیق

٤-٤. توسعه ظرفیت

در این پژوهش تنها توسعه ظرفیت به‌دست آمده مربوط به نیروگاه چرخه ترکیبی خوی در محدوده ۱۱۸ و ۳۹ مگاوات ساعت می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

٤-٥. کمبود الکتریسیته یا الکتریسیته وارداتی

جدول ۶ کمبود الکتریسته تحت سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحت سناریوهای h=1,2,3,4 کمبود الکتریسته وجود ندارد، زیرا میزان ظرفیت تولید نیروگاه‌ها بیش از مقادیر سطوح تقاضای در نظر گرفته شده می‌باشد. تحت سناریوهای h=5,6 در دوره اول برنامه‌ریزی با کمبود الکتریسته مواجه می‌شویم، که بایستی از الکتریسیته وارداتی استفاده شود. ولی در این سطوح تقاضا در دوره‌های دوم و سوم برنامه‌ریزی دیگر با کمبود الکتریسیته مواجه نیستیم، زیرا میانگین تولید نیروگاه‌های این استان طبق برنامه‌ریزی بایستی در طول دوره‌های دوم و سوم افزایش یابد. در نهایت تحت سناریو h=7 در تمام دوره‌های برنامه‌ریزی با کمبود الکتریسیته مواجهیم و بایستی از الکتریستی وارداتی جهت برطرف کردن کمبود الکتریسیته استفاده شود.

جدول ۷. مقدار کمبود الکتریسیته تحت سناریوهای مختلف تقاضا

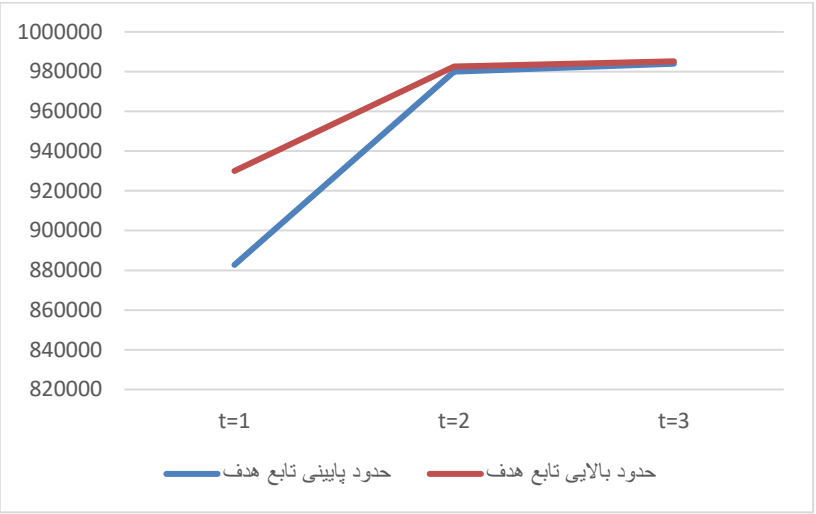
	h=1	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7
t=1	0	0	0	0	0-103450	0-528450	953450-346280
t=2	0	0	0	0	0	0	10810-11906
t=3	0	0	0	0	0	0	10810-11906

مأخذ: نتایج تحقیق

٤-٦. تابع هدف

در نمودار ۱۳، حدود بالایی و پایینی مقادیر تابع هزینه هدف که در واقع مجموع کل هزینه‌ها می‌باشد، نشان داده شده‌است. همچنین ملاحظه می‌شود که مقدار تابع هزینه هدف در طول دوره برنامه‌ریزی افزایش یافته است، که به دلیل افزایش تولید نیروگاه‌ها می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



نمودار۱۳. حدود بالایی و پایینی تابع هدف برحسب هزار دلار

جدول ۸. حدود بالایی و پایینی تابع هدف در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی تابع هدف	۸۸۲۷۲۰۰۰۰	۹۸۰۰۰۰۰۰۰	۹۸۴۰۰۰۰۰۰
حدود بالایی تابع هدف	۹۳۰۰۰۰۰۰۰	۹۸۲۶۰۰۰۰۰	۹۸۵۲۰۰۰۰۰

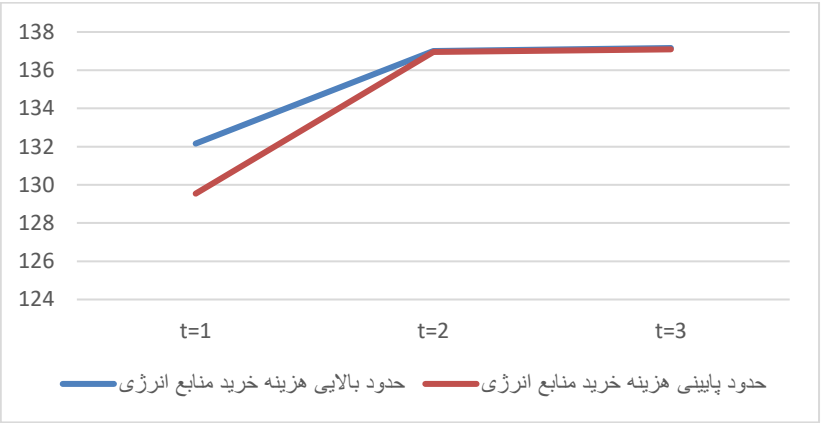
مأخذ: نتایج تحقیق

٤-۷. توابع هزینه

در نمودارهای ۱۴و ۱۵و۱۶و۱۷و۱۸ و جداول ۹و۱۰و۱۱و۱۲و۱۳، مقادیر حدود بالایی و پایینی توابع هزینه مختلف در طول دوره برنامه‌ریزی نشان داده شده‌است. همان‌طور که در نمودار ۱۴ و جدول ۹ ملاحظه می‌شود، هزینه خرید منابع انرژی در دوره دوم افزایش داشته که به دلیل جایگزینی منابع گاز به جای گازوئیل می‌باشد. نمودار ۱۵ و جدول ۱۰ مربوط به هزینه عملیاتی الکتریسته می‌باشد، و نشان می‌دهند هزینه عملیاتی تولید الکتریسیته در طول دوره برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل افزایش در تولید الکتریسیته،جهت جلوگیری از واردات الکتریسیته می‌باشد. نمودار ۱۶ و جدول ۱۰ مربوط به هزینه واردات الکتریسیته می‌باشند، همان‌طور که مشاهده می‌شود این هزینه در طول دوره

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

برنامه‌ریزی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش تولید از واردات الکتریسیته که با زیان اقتصادی همراه است جلوگیری می‌شود. نمودار ۱۷ و جدول ۱۱، هزینه‌های مربوط به توسعه ظرفیت را نشان می‌دهند، و همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره دوم افزایش و در دوره سوم کاهش یافته‌است، که این امر با توجه به خروجی مدل که فقط توسعه ظرفیت در دوره دوم را پیش‌کرده بود بدیهی است. نمودار ۱۸ و جدول ۱۲ هزینه‌های مربوط به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی را نشان می‌دهند، و همان‌طور که مشاهده می‌شود این هزینه در طول دوره برنامه‌ریزی کاهش یافته است، و دلیل آن واضح است، زیرا سوخت با آلودگی کمتر به جای سوخت با آلودگی زیست‌محیطی بیشتر در نیروگاه‌ها جایگزین شده‌است. نمودار ۱۲ و جدول ۱۳، هزینه مربوط به انتقال الکتریسیته را نشان می‌دهند، همان‌طور که مشاهده می‌شود این هزینه با کاهش همراه است، که به دلیل کاهش در ساعات تولید برق در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد.

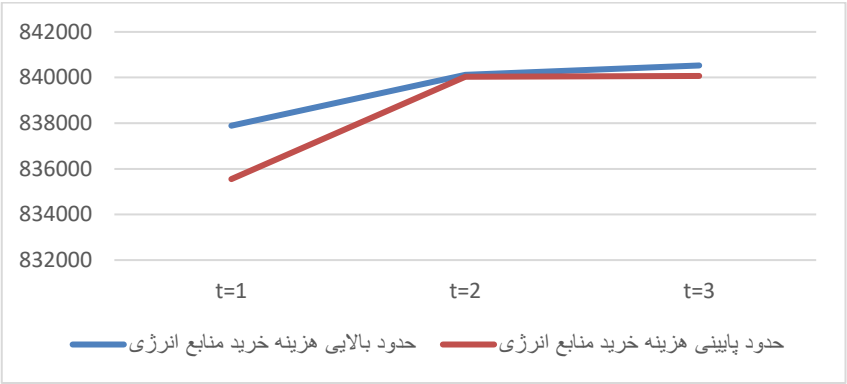


نمودار ۱۴. حدود بالایی و پایینی هزینه خرید منابع انرژی بر حسب میلیون دلار

جدول ۹. حدود بالایی و پایینی هزینه خرید منابع انرژی در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه خرید منابع انرژی	۱۲۹۵۴۰۰۰۰	۱۳۶۹۶۰۰۰۰	۱۳۷۰۹۰۰۰۰
حدود بالایی هزینه خرید منابع انرژی	۱۳۲۱۶۰۰۰۰	۱۳۷۰۰۳۰۰۰	۱۳۷۱۶۰۰۰۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

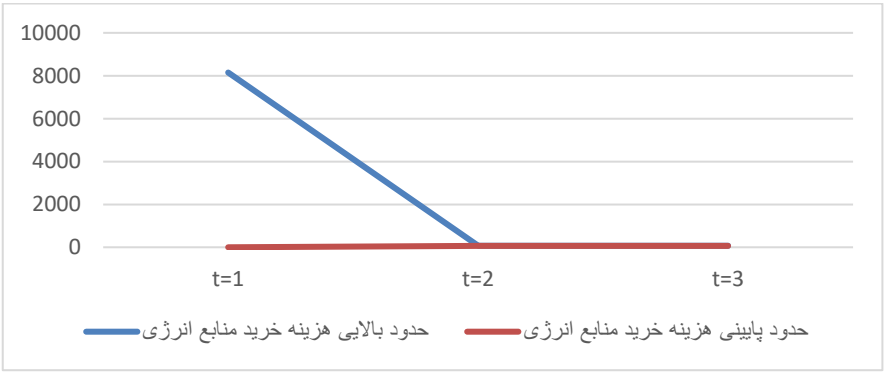


نمودار ۱۵. حدود بالایی و پایینی هزینه عملیاتی تولید الکتریسته بر حسب هزار میلیون دلار

جدول ۹. حدود بالایی و پایینی هزینه عملیاتی تولید الکتریسیته در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه عملیاتی تولید الکتریسته	۸۳۵۵۵۰۰۰۰	۸۴۰۰۳۰۰۰۰	۸۴۰۰۷۰۰۰۰
حدود بالایی هزینه عملیاتی تولید الکتریسیته	۸۳۷۸۹۰۰۰۰	۸۴۰۱۲۰۰۰۰	۸۴۰۵۳۰۰۰۰

مأخذ: نتایج تحقیق



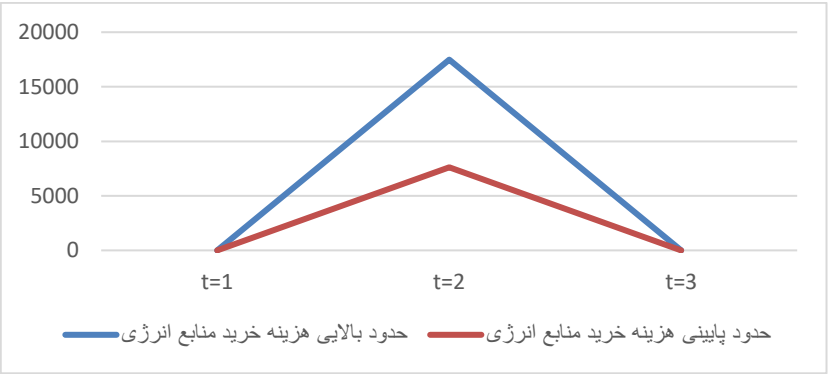
نمودار ۱۶. حدود بالایی و پایینی هزینه خرید الکتریسته وارداتی بر حسب دلار

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

جدول ۱۰. حدود بالایی و پایینی هزینه خرید الکتریسیته وارداتی
در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه خرید الکتریسته وارداتی	۰	۶۵	۶۵
حدود بالایی هزینه خرید الکتریسیته وارداتی	۸۱۵۰	۷۲	۷۲

مأخذ: نتایج تحقیق



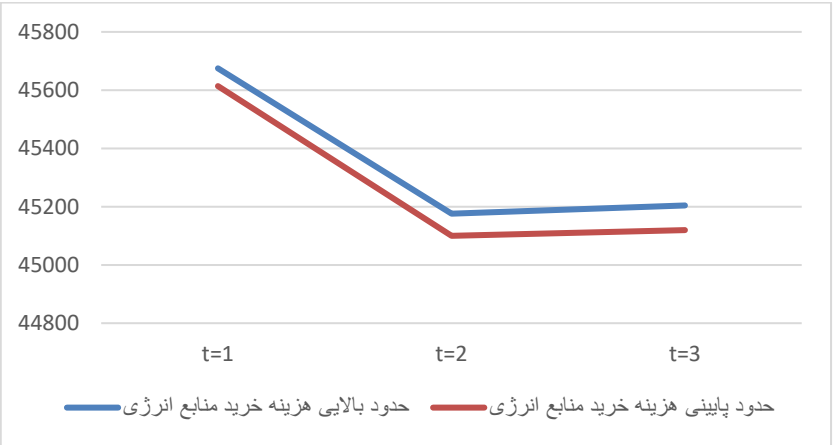
نمودار ۱۷. حدود بالایی و پایینی هزینه توسعه ظرفیت بر حسب دلار

جدول ۱۱. حدود بالایی و پایینی هزینه توسعه ظرفیت در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه خرید الکتریسته وارداتی	۰	۷۶۱۵	۰
حدود بالایی هزینه خرید الکتریسیته وارداتی	۰	۱۷۴۸۵	۰

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

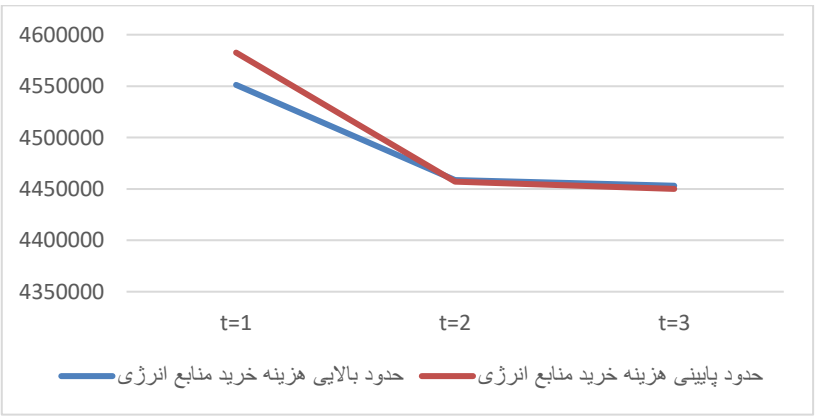


نمودار ۱۸. حدود بالایی و پایینی هزینه کاهش آلودگی بر حسب دلار

جدول ۱۲. حدود بالایی و پایینی هزینه کاهش آلودگی در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه کاهش آلودگی	۴۵۶۱۴	۴۵۱۰۰	۴۵۱۲۰
حدود بالایی هزینه کاهش آلودگی	۴۵۶۵۷	۴۵۱۷۶	۴۵۲۰۴

مأخذ: نتایج تحقیق



نمودار ۱۹. حدود بالایی و پایینی هزینه انتقال الکتریسیته بر حسب دلار

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

جدول ۱۳. حدود بالایی و پایینی هزینه انتقال الکتریسیته در طول دوره برنامه ریزی بر حسب دلار

	t=1	t=2	t=3
حدود پایینی هزینه کاهش آلودگی	۴۵۸۲۶۰۰	۴۴۵۷۰۰۰	۴۴۵۰۰۰۰
حدود بالایی هزینه کاهش آلودگی	۵۱۵۱۲۰۰	۴۴۵۸۷۰۰	۴۴۵۳۱۰۰

مأخذ: نتایج تحقیق

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به افزایش روزافزون در قیمت منابع فسیلی و همچنین افزایش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده از منابع انرژی فسیلی در نیروگاه‌ها با محدودیت‌هایی مواجه شده‌است. در این میان استفاده از تکنولوژی‌های جدید تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی به شمار می‌روند، ولی تولید این نیروگاه‌ها با نااطمینانی‌های بسیاری مواجه است از جمله میزان دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر. در این مطالعه روش مدیریت ریسک تصادفی-فاصله‌ای از طریق ادغام مفاهیم مدیریت ریسک و پارامترهای فاصله‌ای و برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای توسعه داده شده‌است. در این روش با در نظر گرفتن مقادیر فاصله‌ای برای پارامترها و همچنین ترکیب آن با روش برنامه‌ریزی تصادفی بعلاوه اضافه کردن محدودیت‌هایی جهت کنترل ریسک سرمایه‌گذاری سعی شده‌است تا جای ممکن با نااطمینانی‌های موجود مقابله شود. وقتی‌که مقادیر متغیرهای تصادفی متفاوت از هدف برنامه‌ریزی شده باشد مجازات اقتصادی در نظر گرفته می‌شود. این روش تصمیم‌گیرندگان را قادر به در نظر گرفتن نااطمینانی‌ها در ارزیابی می‌سازد، همچنین این مدلسازی در پی حداکثر کردن سود تصمیم‌گیرنده یا حداقل کردن هزینه‌ها می‌باشد.

در این پژوهش هدف به‌دست آوردن ترکیب بهینه مصرف انرژی‌های فسیلی، همچنین ترکیب بهینه تولید در نیروگاه‌های استان آذربایجان غربی می‌باشد. نیروگاه‌های این استان متشکل از دو نیروگاه چرخه ترکیبی، یک نیروگاه گازی و یک نیروگاه برق‌آبی در طول دوره برنامه‌ریزی این

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

پژوهش می‌باشد. سوخت مصرفی این نیروگاه‌ها نیز از گاز طبیعی و گازوئیل تشکیل شده‌است. پیشنهادات سیاستی این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- طبق نتایج به‌دست آمده در این پژوهش پیشنهاد می‌شود بهره‌برداری از نیروگاه برق‌آبی مهاباد در حداکثر مقدار ممکن باشد. با توجه به عدم ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی توسط این نیروگاه و زیان‌های وارده توسط آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد شده توسط نیروگاه‌های فسیلی ، بایستی تولید این نیروگاه تا جایی که محدودیت‌های زیست‌محیطی مانند میزان بارش و ذخیره آب پشت سد اجازه می‌دهد افزایش یابد.
- از دیگر پیشنهادات این تحقیق افزایش تولید در نیروگاه‌های چرخه ترکیبی این استان می‌باشد، از آنجا که ظرفیت نیروگاه تجدیدپذیر این استان محدود است و توانایی برآورده شدن تقاضای این استان صرفاً توسط نیروگاه تجدیدپذیر این استان وجود ندارد، بایستی سهمی از تولید به نیروگاه‌های فسیلی اختصاص یابد، که در میان نیروگاه‌های فسیلی این استان، نیروگاه‌های چرخه ترکیبی آلودگی زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کنند.
- در این تحقیق پیشنهاد می‌شود مقدار تولید نیروگاه گازی ارومیه به میزان قابل توجهی کاهش یابد، زیرا این نیروگاه در میان نیروگاه‌های فسیلی این استان بیشترین میزان آلودگی زیست‌محیطی را ایجاد می‌کند و بهتر است میزان قابل توجهی از تولید این نیروگاه توسط نیروگاه‌های دیگری که آلودگی زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کنند مانند نیروگاه برق‌آبی و نیروگاه‌های چرخه ترکیبی جایگزین گردد.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مصرف گازوئیل در نیروگاه‌های این استان بیش از مقدار بهینه است، و بایستی مصرف گازوئیل در نیروگاه‌های این استان کاهش و مصرف گاز طبیعی در نیروگاه‌های این استان افزایش یابد. در واقع در ساختار مصرف انرژی نیروگاه‌های فسیلی این استان بایستی سوختی که آلودگی زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کند (گاز) جایگزین سوختی که آلودگی زیست محیطی بیشتری ایجاد می‌کند (گازوئیل) گردد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

- طبق نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود میزان کل تولید نیروگاه‌های این استان افزایش یابد، این افزایش تولید جهت جلوگیری از کمبود تولید الکتریسیته و زیان‌های ناشی از واردات الکتریسیته پیشنهاد می‌شود.
- در این تحقیق سناریوهای مختلفی برای مقادیر تقاضا در نظر گرفته شد، مقدار تقاضا در سطح h=7 بسیار بیشتر از مقادیر تقاضای ثبت شده برای این استان در طول افق برنامه‌ریزی می‌باشد، ولی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد اگر سطح تقاضای این استان افزایش قابل توجهی یابد، بایستی از الکتریسته وارداتی جهت برطرف کردن کمبود عرضه استفاده شود، که هزینه بسیاری در بر خواهد داشت. بنابرین توصیه این پژوهش این است که از افزایش قابل‌توجه و ناگهانی تقاضای برق در این استان جلوگیری شود.

مقایسه نتایج این تحقیق و تحقیقات گذشته در زمینه برنامه‌ریزی برای نیروگاه‌های برق نشان می‌دهد تمامی این تحقیقات در یک مورد اتفاق نظر دارند، آن هم استفاده از حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشد. در مورد توسعه ظرفیت نیروگاه‌های تولید برق تجدیدپذیر، تحقیقات مختلف نتایج متفاوتی به‌دست آورده اند که این تفاوت به دلیل سطوح تقاضای مختلف در مناطق متفاوت و ترکیب نیروگاه‌های متفاوت در نواحی مورد مطالعه می‌باشد. همچنین در تمامی تحقیقات برنامه‌ریزی‌ها تمایل به کاهش استفاده از سوختهای با آلودگی زیاد مثل گازوئیل و زغال سنگ دارند و همچنین افزایش استفاده از گاز طبیعی بعنوان سوخت در فرایند تولید.

منابع

آقاسی، ابوالفضل و لیلا وفاجو (۱۳۹۳). "مدل مارکال در مدلسازی سیستم‌های انرژی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال چهاردهم، شماره ۸۰.

صفاری، بابک؛ نصراصفهانی،رضا و نسیم منصوری (۱۳۹۴). "برنامه‌ریزی عرضهٔ بهینهٔ انرژی پایدار با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی (مطالعه موردی: شهرستان اصفهان)"، *تحقیقات اقتصادی*، دورهٔ ۵۱، شماره ۲، صص۴۱۳-۴۳۵.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

صفاریان، علی و مرتضی محمدی اردهالی (۱۳۸۷). "تدوین سیستم انرژی مرجع و توسعه مدل برنامه ریزی انرژی الکتریکی کشور"، فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۱۹، صص۱۶۳-۲۰۲.

قاسمی، محبوبه و زین‌العابدین صادقی (۱۳۹۳). "ارزیابی رانت اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی استان خوزستان : رهیافت برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت"، *مجله اقتصاد منابع طبیعی*، شماره ۲، صص۴۳-۶۲.

کاظمی، عالیه؛ شکوری گنجوی، حامد؛ رئوفی، زینب؛ حسین‌زاده، مهناز و شیوا شکیبا (۱۳۹۲). "مروری بر مطالعات مدلسازی عرضه انرژی و انتخاب بهترین تحقیقات انجام شده در ایران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی"، *مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی*، شماره ۲، صص ۲۸-۵.

کاظمی، عالیه؛ مهرگان، محمدرضا و حامد شکوری گنجوی (۱۳۹۰). "ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای تخصیص بهینه منابع انرژی ایران"، *چشم انداز مدیریت صنعتی*، شماره ۳، صص ۶۶-۴۳.

منظور، داوود و وحید آریان‌پور (۱۳۹۷). "نقدی بر توسعه ظرفیت نیروگاهی کشور؛ ارزیابی میزان انحراف از حالت بهینه"، *فصلنامه پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی*، سال هشتم، شماره۳۰، صص۸۲-۶۷.

منظور، داوود؛ فرمد، مجید؛ آریان‌پور، وحید و احسان الدین شفیعی (۱۳۹۳). "ارزیابی ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور با لحاظ هزینه‌های زیست‌محیطی". *مجله محیط‌شناسی*، دوره ۴۰، شماره ۲، صص ۴۱۵-۴۳۰.

منظور، داوود؛ و علیرضا رحیمی (۱۳۹۴). "اولیت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه"، *پژوهش‌نامه اقتصاد انرژی ایران*، شماره ۱۴، صص۱۹۱-۲۱۵.

منظور، داوود؛ فرمد، مجید؛ آریان پور، وحید و احسان الدین شفیعی (۱۳۹۳). "ارزیابی ترکیب بهینه نیروگاه‌های کشور با لحاظ هزینه‌های زیست محیطی"، *محیط شناسی*، دوره ۴۰، شماره ۲، صص۴۱۵-۴۳۰.

میرحسنی، سیدعلی و فرناز هوشمند خلیق (۱۳۹۷). *برنامه‌ریزی تصادفی*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

نیک‌پیام، حسین و مجید رفیعی (۱۳۹۸). "برنامه‌ریزی همزمان سیستم‌های برق و گاز طبیعی در قالب بخشی از زنجیره تأمین برق"، *مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن*، سال شانزدهم، شماره چهارم، صص ۵۴-۳۷.

Dong C., Huang G., Cai Y., Yue W. and Q. Rong (2014). "An Interval-Parameter Fuzzy Approach for Accounting and Planning of Energy-Environmental Management Systems", *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2(1), pp.13-29.

Handayani K., Krozer Y. and T. Filatova (2017). "Trade-offs between Electrification and Climate Change Mitigation: an Analysis of the Java-Bali Power System in Indonesia". *Applied Energy*, No. 208, pp. 1020–1037.

Heinrich G., Howells M., Basson L. and J. Petrie (2007). "Electricity Supply Industry Modelling for multiple objectives under demand growth uncertainty", *Energy*, No. 32, pp. 2210-2229.

Huang R., Huang G., Chenge G. and C. Dong (2017). "Regional Heuristic Interval Recourse Power System Analysis for Electricity and Environmental Systems Planning in Eastern China", *Resources, Conservation and Recycling*, No. 122, pp.185-201.

Huang R., Huang G., Cheng G. and C. Dong (2017). "Regional Heuristic Interval Recourse Power System Analysis for Electricity and Environmental Systems Planning in Eastern China", *Resources,Conservation and Recycling*, No.122, pp.185-201.

Li Y.F., Huang G.H. and X. Chen (2010). "Energy and Environmental Systems Planning under Uncertainty- An Inexact Fuzzy-Stochastic Programming Approach", *Applied Energy*, No. 87, pp. 3189-3211.

Maher A. and A.R. Mamoun (2013). "Estimation of Main Greenhouse Gases Emission from Household Energy Consumption in the West Bank", *Palestine*, No.179, pp. 250-257.

Muis Z.A., Hashim H., Manan Z., Taha F. and P. Douglas (2010). "Optimal Planning of Renewable Energy-integrated Electricity Generation Schemes with CO2 Reduction Target", *Renewable Energy*, No. 3525, pp. 62-70.

Nie S., Haung Z.C., Haung G.H., Yu L. and J. Liu (2018). "Optimization of Electric Power Systems with Cost Minimaization and Environmental-impact Mitigation under Multiple Uncertainties", *Applied Energy*, No. 221, pp. 249-267.

Nie S., Liu J., Li Y.P. and C. Haung (2016). "Risk Management of Energy System for Identifying Optimal Power mix with Financial-cost Minimization and Environmental-impact Mitigation under Uncertainty", *Energy Economics*, No. 61, pp. 313-329.

Yu L., li Y., Huang G. and S. Yin (2018). Planning Regional-scale Electric Power Systems under Uncertainty: A Case Study of Jing-Ji region, China", *Applied energy*, No. 212, pp. 834-849.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]