دریافت: ۲۳ اسفند ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۵ آذر ۱۴۰۴ صفحات ۹۹ الی ۱۲۹

# ارائه یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی هزینه‌های فرایند تولید و مصرف انرژی در صنعت برق با استفاده از روش لاگرانژ

**نصرت ا.. میرزایی**
دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
**رضا احتشام رائی**[۱]
گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
**علیرضا ایرج پور**
گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

**چکیده**

تولید انرژی برق با هدف کمینه‌سازی هزینه تولید و بهینه سازی مصرف برای واحدهای نیروگاهی فعال موجود در شبکه از مهم‌ترین مباحث برای سیستم‌های قدرت مدرن امروزی است. به‌عبارت دیگر، هدف از توزیع اقتصادی بار، برنامه‌ریزی بهینه و مناسب برای واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن عوامل و محدودیت‌های غیر خطی موجود در شبکه قدرت و واحدهای تولیدی است. روش پژوهش حاضر از نوع توصیفی – کاربردی با رویکرد مدلسازی ریاضی و استفاده از داده‌های مطالعه موردی نیروگاه شهید رجایی قزوین می‌باشد. در این پژوهش مساله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیرخطی از جمله تلفات شبکه انتقال، معادله توازن تولید و مصرف در سیستم، حدود تولید و نرخ‌های افزایشی و کاهشی به یک مساله بهینه‌سازی NP Hard تبدیل گردیده و با روش‌های دقیق قابل حل نمی‌باشد، لذا برای پیاده سازی مدل پژوهش از روش ضریب لاگرانژ استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی سریع، با دقت قابل قبول و هزینه‌ی به مراتب پایین تر در مقایسه با روش‌های مرسوم است. اعتبار سنجی پژوهش با استفاده از روش طراحی آزمایشات انجام گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، هزینه، مصرف انرژی، برق.

[۱] نویسنده مسئول



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

## ۱. مقدمه

در جوامع صـــنعتی امروزی، کنترل و کاهش هزینه‌های (هزینه‌های متغیر و ثابت) انرژی یکی از اهداف عمده است. با عنایت به افزایش هزینه‌های تولید برق در نیروگاه‌های برق کشور، کاهش مؤثر هزینه برق و اطمینان از راندمان کلی آن برای توسعه پایدار سیستم‌های قدرت در کشور حیاتی است (ونگ و ژن،۲۰۲۴). امروزه مسئله‌ی کاهش هزینه‌ها و کاهش مصرف انرژی چه در صنعت و چه در زندگی روزانه به‌عنوان یک موضـــوع مهم و اســـاســـی محســـوب می‌گردد. به‌علاوه مصـــرف انرژی الکتریکی در فرآیندهای تولید تأثیر بسیار زیادی بر روی هزینه‌های تولید و سایر پارامترهای محصول تولید شده دارند. بنابراین کمینه‌سازی میزان مصرف انرژی می‌تواند از دیدگاه‌های مختلف ثمربخش باشد. به‌کارگیری فناوری و اصلاح هزینه‌ها و فرآیند تولید در جهت دستیابی به فرآیند تولید بهینه با هدف کاهش مصرف انرژی و نیز کاهش هزینه در تولید امری ضروری به‌شمار می‌آید (کاستلو و همکاران، ۲۰۱۹). برای شروع برنامه کاهش هزینه و مصرف برق، بررسی نحوه فعالیت بخش کنترل هزینه یعنی تعیین هزینه و اینکه چگونه هزینه‌ی واقعی شـــکل می‌گیرد و یا چگونه عوامل هزینه دســـته‌بندی یا کدبندی و نظارت می‌شـــوند، لازم و ضـــروری اســـت. منافع اقتصـــادی و هزینه‌ها در سناریوهای مختلف چرخه عمر پروژه برق رسانی با استفاده از رویکرد ارزش فعلی (PV) در تحلیل هزینه - سود (BCA) مورد مقایسه واقع گردیده است (آبرا و همکاران، ۲۰۲۴). احداث تأسیسات تولید انرژی الکتریکی و شبکه‌های برق رسانی نیاز به هزینه‌های زیادی دارد. هزینه احداث تأسیسات تولید و انتقال و توزیع برق برای هر کیلووات ساعت معادل ۸۰۰ دلار است. هزینه‌های جاری و ثابت ســـالیانه نیروگاه‌ها گاهی بالغ بر ۲۰ درصـــد ســـرمایه‌گذاری اولیه می‌شـــود. از این رو بهینه‌ســـازی فرآیندهای تولید و هزینه‌ها در عرصه‌های مختلف صنعت، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های اضافی و کاهش مصـــرف انرژی الکتریکی به میزان قابل ملاحظه‌ای خواهد بود. با توجه به پتانســـیل‌های صرفه‌جویی موجود در بخش صنعت، سالانه می‌توان ۶۷۰ میلیارد تومان در این بخش صرفه‌جویی نمود، در این راستا ضروری است با اصلاح فرآیند تولید و به‌کارگیری فناوری‌ها وتکنولوژی های جدید و بازیافت انرژی با در نظر گرفتن مسـله‌ی هزینه در جهت بهینه‌سازی مصـرف و هزینه انرژی



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

حرکت نمائیم (زاده باقری،۱۴۰۲). در این زمینه مدل‌های ریاضی ساختار مشخص و تعریف‌شده‌ای دارند، چرا که ملاک انجام یا عدم انجام فعالیت‌ها روشن و مبرهن است. ترجیحات و انتظارات مدیران، شکل دهنده‌ی توابع هدف مدل ریاضی در تخصیص بودجه و کنترل هزینه‌ها است. علاوه بر ترجیحات مدیران، رسالتی که برای سازمان و زیرمجموعه‌های آن ترسیم گردیده است، در تعریف توابع هدف مؤثر است (گریگروکنبالخ،۲۰۰۴).

در این پژوهش با استفاده از مطالعات اخیر به ارائه‌ی مدل ریاضی به‌منظور بهینه‌سازی (نزدیک به بهینه) برنامه‌ریزی تولید و مصرف روزانه انرژی برق پرداخته می‌گردد و با در نظر گرفتن عامل انرژی برق، مصرف انرژی نیز بهینه خواهد شد که سهم به سزایی در کاهش هزینه‌های فرآیند تولید خواهد داشت و جواب‌های بهینه (نزدیک به بهینه) حاصل خواهد گردید. پژوهش حاضر درصدد است با بهره‌گیری از مدل ریاضی و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش‌های حل به‌گونه‌ای عمل نماید که هزینه ی تولید، هزینه‌ی ضایعات و مجموع هزینه‌های وزنی فعالیت‌هایی که در زمان خاصی مانند t شروع می‌شود، کمینه گردد و برای حل از روش لاگرانژ استفاده خواهد گردید که در نهایت رضایت مشتریان و سودآوری سازمان برق را به حداکثر رساند. بر طبق مطالعه احمد و همکاران (۲۰۲۴)، ایستگاه انتقال برق تولید شده توسط نیروگاه و ریزشبکه تولیدی به‌صورت موازی را به مصرف کنندگان نهایی انتقال می‌دهد. مصرف‌کنندگان برق قادر به تولید برق به‌تنهایی از طریق تولید برق تجدید پذیر هستند. حساب دیفرانسیل برای به‌دست آوردن هزینه کل هر گره زنجیره تأمین اعمال می‌شود و هزینه کل مشترک جامع از این معادلات به‌دست می‌آید. هدف، به حداقل رساندن هزینه کل سیستم است که شامل هزینه انتقال، تولید، نگهداری موجودی و انتشار است. با مرور تحقیقات صورت گرفته در این حوزه می‌توان خلأهای موجود در ادبیات مرتبط با هزینه و مصرف برق را شناسایی نمود؛ از جمله اینکه در اکثر موارد آنچه به‌عنوان هدف در کلیه برنامه‌ریزی‌ها مورد توجه قرار گرفته، حداکثر کردن سود با در نظر گرفتن سنجه‌های مربوط به مصرف برق در کشور است و توجه چندانی به آن در سال‌های پس از جنگ تحمیلی ۸ ساله نگردیده است. همچنین اختلال‌های مورد بررسی غالباً به‌صورت کلی و بدون در نظر گرفتن شرایط خاص و منابع وقوع هر اختلال است،



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

در حالی که توجه به این مسائل می‌تواند تأثیر بسزایی بر استراتژی انتخابی برای کاهش اثرات یا مقابله با هزینه تولید و مصـرف برق باشـد. اما نکته قابل توجه اینکه ریسـک‌های اختلال در مصـرف برق، کاملاً وابسته به بستر هستند و چه‌بسا موردی در یک کشور ریسک جدی اختلال تلقی شود، حال آنکه در ادبیات به‌هیچ‌وجه مورد اشاره و توجه قرار نگرفته باشـد. لذا تعیین میزان مصـرف با توجه به بار مصرف آن در فضای مورد مطالعه نه‌تنها مشارکت در علم دنیای تئوری / نظری است، بلکه برای فضـای صـنعت نیز ضـروری اسـت. از سـوی دیگر با توجه به تأثیرات متقابل ریسـک‌های اختلال بر یکدیگر، توجه به این ارتباط از نکات مهمی است که از دید مراجع دور مانده است. اما تحلیل اختلال به‌تنهایی گره‌ای از مشـکلات صـنعت برق باز نمی‌کند، لذا باید به‌دنبال راهکاری برای رفع مصـائب حوزه مصـرف برق بود که در این پژوهش به هر سـه مسـئله "شـناسـایی، تحلیل و روش‌های مقابله محاسبه مصرف برق" پرداخته می‌گردد. امروزه افزایش مصرف برق و هزینه تولید آن در کشورهای جهان ، تبدیل به یک مشـکل جدی گردیده و کشـورهای دنیا سـعی بر آن دارند با اسـتفاده از انرژی خورشـیدی مصـرف برق را کاهش داده و تا حد بسـیار زیادی پاسـخگوی نیازهای مصـرف‌کنندگان باشـند و تا حد ممکن از فشـار بار ایسـتگاه‌های برق و نیروگاه‌ها کاهش به عمل آورند. در مطالعه‌ی پیش رو، محقق بر آنست که با استفاده از مدل ریاضی بر مبنای مدل زمان (به‌صورت متغیری پیوسته) و با توجه به مسـله دسـتیابی و بارگذاری انرژی برق ، برنامه‌های تولید روزانه و نیز کاهش هزینه‌های اضـافی به صـورت بهینه را ارائه نمایند. منابع دسـترسـی به برق به صـورت متغیر فرض خواهد شـد و امکان بازگشـت برق نیز به منبع اصـلی وجود دارد. در مسـئله‌ای که بررسـی خواهد گردید از مزایای انجام عملیات تولید با در نظر گرفتن عامل زمان به‌صـورت متغیر پیوسـته اسـتفاده خواهد شـد که این عامل باعث می‌شود که مدل و مسله به‌صورت واقعی مورد بررسی قرار گیرند. در این پژوهش، مدل ریاضی ارائه شده ساختار واقعی مربوط به هزینه‌ی پیچیده تولید را در نظر می‌گیرد و به‌صورت بهینه، مقادیر واقعی انرژی برق مورد نیاز را تعیین می‌نماید. محدودیت‌های مربوط به بارگیری انرژی و امکان فروش آن به منبع اصـلی نیز در مسـله مدنظر واقع می‌گردد. مدل پژوهش با اسـتفاده از روش لاگرانژ بر روی مطالعه‌ی موردی (صـنعت برق کشـور – نیروگاه شـهید رجایی قزوین) پیاده سـازی



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

می‌شود و سؤال اصلی این پژوهش عبارتست از: چگونه می‌توان مدلی برای بهینه‌سازی هزینه‌های فرایند تولید و مصرف انرژی در صنعت برق (نیروگاه شهید رجایی) ارائه نمود؟

## ۲. پیشینه پژوهش

امروزه مطالعات بسیار زیادی حول محور انرژی برق صورت پذیرفته و در این مطالعات تأکید بر روی الگوریتم‌های حل مسله جهت دستیابی به یک پاسخ مناسب در یک زمان محدود و اندک است.در این بخش از پژوهش به مطالعه دو حوزه پژوهش های داخلی و خارجی خواهیم پرداخت:

طحاری و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی به مطالعه سیستم‌های برق کشور و نیروگاه‌های با مقیاس بزرگ پرداختند که در مکان‌های دور از مصرف کننده قرار دارند. با افزایش تقاضا برای برق، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اتلاف وقت و قابلیت اطمینان زمان بیشتر می‌گردد. مدیریت صحیح منابع انرژی بهینه‌سازی استفاده از آن و به حداقل رساندن هزینه تولید انرژی و مخاطرات زیست محیطی را الزام می‌کند. در این پژوهش مدل ریاضی برای بهینه‌سازی چندهدفه انرژی در راستای حداقل سازی هزینه، آلودگی و پیک مصرف را همزمان با قابلیت اطمینان ارائه نمودند. نامی و رحمتی (۱۴۰۲) در پژوهش خود، مصرف انرژی برق را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مصارف منابع در جهان به‌شمار آوردند. مدیریت مصرف انرژی، مجموعه راهکارهایی است که می‌تواند در یک مجموعه مصرف‌کننده انرژی اتخاذ گردد، به شیوه‌ای که مصرف انرژی را به حداقل ممکن رسانیده و در عین حال کیفیت تولید یا خدمات نیز در اثر این راهکارها با مشکل مواجه نگردد. رستمیان و همکاران(۱۴۰۲)، در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع هوشمند که متغیرها و پارامترهای زیادی وجود دارد، یک الگوریتم کارآمد که قابلیت همگرایی و حل در شبکه‌های بزرگ را داشته باشد را ارائه نمودند. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای بهبود عملکرد شبکه توزیع در مقیاس بزرگ با استفاده از مسله مدیریت تقاضا، سیستم ذخیره انرژی، کنترل بهینه تپ ترانس OLTCو SVR و همچنین منابع تولید پراکنده فسیلی و تجدیدپذیر در کنار خازن و رآکتورهای شنت را ارائه نمودند. تابع چند هدفه در نظر گرفته شده یک مدل تصادفی مبتنی بر



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

سناریو است، که مدل دقیقی از عدم قطعیت‌های موجود در منابع انرژی تجدیدپذیر را مدلسازی می‌کند. در این پژوهش عملکرد مطلوب الگوریتم تکاملی ترکیبی پیشنهادی بر روی شبکه‌های توزیع بزرگ نشان داده شده ، که قادر به رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری نسبت به الگوریتم‌های مشابه است.

هاو و همکاران (۲۰۲۶) بیان نمودند که فرآیند تولید محصولات یک مرحله حیاتی و انرژی‌بر است و مصرف برق بخش عمده‌ای از کل مصرف انرژی را تشکیل می‌دهد. به‌دلیل تأثیر ترکیبی عوامل متعدد مانند پارامترهای فرآیند ، وضعیت تجهیزات و اختلالات محیطی، داده‌های مصرف برق ویژگی‌های پیچیده‌ای را نشان می‌دهند. این عوامل شامل تأخیر زمانی بالا، غیرخطی بودن شدید و کوپلینگ چند متغیره هستند که چالش‌های مهمی را برای مدلسازی و پیش‌بینی روند بلندمدت ایجاد می‌کنند. این مدل ابتدا سیگنال‌های خام مصرف برق را با استفاده از تجزیه مودال متغیر پیش‌پردازش می‌کند. سپس یک ساختار ورودی سری زمانی چند کاناله موازی را بر اساس یک مکانیسم وزنی می‌سازد که به‌طور مؤثر قابلیت‌های مدلسازی وابستگی بلندمدت را افزایش می‌دهد. لی و همکاران (۲۰۲۶) در مطالعه خود عنوان نمودند که توسعه انرژی هیدروژن سبز برای دستیابی به گذار انرژی کم کربن بسیار مهم است. تحقیقات موجود، تقاضای عملی برای برنامه‌ریزی انرژی هیدروژن بین منطقه‌ای و پتانسیل کاهش هزینه‌های آینده در تولید هیدروژن مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر را نادیده گرفته‌اند. برای پرداختن به این شکاف‌ها، این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی برای توزیع انرژی هیدروژن در هفت منطقه در چین ایجاد نمود که شامل قیمت برق، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و روندهای توسعه صنعت هیدروژن است. ژو و همکاران(۲۰۲۵) بینش‌های جدیدی را در مورد پیش‌بینی دقیق روندهای بلندمدت مصرف برق در طول فرآیند تولید ارائه نمودند. این رویکرد در نتیجه مدیریت هوشمند بهره‌وری انرژی صنعتی را ارتقا می‌دهند. ونگ و ژن (۲۰۲۴) ، یک مدل بهینه‌سازی همکاری منطقه‌ای برای ارتقای مدل هزینه برق موجود را توسعه دادند. این امر با ترکیب سناریوهای تجارت برق و ملاحظات آلودگی ، استفاده از ویژگی‌های متمایز هزینه‌های تولید برق از منابع مختلف حاصل گردید. مدل بهینه‌سازی همکاری منطقه‌ای توسعه یافته به‌طور همزمان کارایی



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

تولید و هزینه‌های کلی برق را محاسبه می‌نماید، و توزیع عادلانه و جبران منافع را در بین واحدهای همکار تضمین می‌کند. علاوه بر این، یافته‌های کلیدی نشان داد که مدل بهینه‌سازی همکاری بین منطقه‌ای به‌طور قابل توجهی هزینه کل عملیات برق در چین را کاهش داد. به‌طور خاص، در دوره برنامه پنج ساله یازدهم، کل هزینه برق در چین به‌دلیل بهینه‌سازی چندهدفه، کاهش قابل توجه ۵۰۸۷۶ میلیون دلاری را نشان داد که ۲۵.۹۹٪ از کل هزینه برق را در مقایسه با دوره پیش از بهینه‌سازی را تشکیل می‌داد. ژو و همکاران(۲۰۲۴)، در تحقیقی به مطالعه کاهش مصرف برق به عنوان یک نیاز اجتناب‌ناپذیر برای توسعه پایدار در چین پرداختند. درک نقش تمرکز زدایی مالی در حفظ انرژی و کاهش مصرف برق از جمله موارد بسیار مهم محسوب می‌گردد. این پژوهش، از داده‌های تابلویی ۳۰ استان از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ برای ساخت مدل‌های اثر ثابت ، اثر واسطه و اثر تعدیل‌کننده استفاده می‌کند و به‌طور تجربی تأثیر به سبک چینی را بر مصرف برق تحلیل می‌کند. افزایش تقاضای برق که ناشی از پیشرفت تکنولوژی و رشد جمعیت است ، طراحی زنجیره تأمین برق را به یک چالش بزرگ تبدیل نموده است. انتقال به منابع انرژی تجدیدپذیر منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید برق گردیده است (پناهی و همکاران،۲۰۲۴). لو و همکاران(۲۰۲۴)، در پژوهش خود به پیش‌بینی مصرف برق در ارتقای توسعه پایدار، تضمین امنیت انرژی و انعطاف‌پذیری، تسهیل برنامه‌ریزی منطقه‌ای و یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر پرداختند. یک مدل مشخصه و پیش‌بینی مصرف برق جدید بر اساس کاربری زمین پیشنهاد نمودند. این مدل به تقسیم کاربری زمین برای ارائه متغیرهای بسیار همبسته بود. متین و همکاران(۲۰۲۳)، یک الگوریتم گرده افشانی ژنتیکی گل ترکیبی (GFPA) جدید با الهام از طبیعت برای به حداقل رساندن هزینه با تأخیر مقرون به صرفه در زمان‌بندی دستگاه‌ها پیشنهاد نمودند. الگوریتم GFPA پیشنهادی، عناصر الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم گرده افشانی گل (FPA) را برای ایجاد یک رویکرد ترکیبی ترکیب می‌نماید. برای ارزیابی اثربخشی الگوریتم پیشنهادی، یک شهر مقیاس‌پذیر را به‌ترتیب شامل ۱، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ خانه در نظر گرفته و راه‌حل پیشنهادی یک الگوی زمان‌بندی بهینه را پیدا می‌نماید که به‌طور همزمان EC و نسبت اوج به میانگین (PAR) مصرف را به حداقل می‌رساند.



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

در حالی که راحتی کاربر(UC) را به حداکثر می‌رساند، فرض می‌کنیم که همه خانه‌ها از نظر لوازم خانگی و الگوی مصرف برق همگن هستند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح پیشنهادی، GFPA هنگام اعمال سیگنال قیمت‌گذاری اوج بحرانی (CPP) با استفاده از فواصل زمانی عملیاتی مختلف (OTIs) و در مقایسه با راه‌حل‌های برنامه‌ریزی نشده، GA و مبتنی بر FPA از نظر کاهش هزینه بهتر عمل می‌کند؛ زیرا آنها به‌طور متوسط به ۹۸٪ دست می‌یابند و به‌ترتیب ۳۶، ۲۳ و ۲۲ درصد. به‌طور مشابه، PAR به‌ترتیب ۹۸٪، ۳۶٪، ۵۹٪ و ۵۵٪ است. در حالی که UC در مقایسه با GA و FPA، به‌ترتیب حدود ۸۸٪، ۴۸٪ و ۶۳٪ است. طرح پیشنهادی با اعمال سیگنال‌های زمان واقعی قیمت‌گذاری (RTP) و OTIهای مختلف به نتایج بهتری دست پیدا نمود.وانگ و همکاران(۲۰۲۳) ، یک شبکه هوشمند انرژی به‌منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی و نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه نمودند. در این پژوهش برنامه‌های پاسخگویی بار برای عملکرد بهتر در سمت تقاضا به کار گرفته شد. لبو و همکاران(۲۰۲۳) رابطه انرژی برق و انرژی حرارتی را برای بار توزیع در شبکه هوشمند پیشنهاد نمودند. یانگ و همکاران(۲۰۲۲) یک مدل برای محاسبه کاهش انتشار شبکه هوشمند با در نظر گرفتن تعرفه زمان استفاده طراحی نمودند.

**جدول ۱. شکاف تحقیق**

| مقاله (سال) | هزینه | آلودگی محیط‌زیست آلودگی | کارایی تولید | حفظ انرژی | قیمت‌گذاری | مصرف انرژی | بار مصرف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| هاو و همکاران(۲۰۲۶) | * | * | | * | * | * | |
| لی و همکاران(۲۰۲۶) | * | * | * | | | | * |
| ژو و همکاران(۲۰۲۵) | * | | * | | * | | |
| ونگ و ژن (۲۰۲۴) | * | * | * | * | * | | |
| ژو و همکاران | | | * | * | | * | |



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

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ( ۲۰۲۴) | | | | | | | |
| لو و همکاران(۲۰۲۴) | | * | | * | * | * | |
| خان و همکاران(۲۰۲۴) | * | * | | | | * | |
| ونگ و همکاران(۲۰۲۳) | * | | * | * | * | | |
| لبو و همکاران(۲۰۲۳) | | | | * | * | | * |
| متین و همکاران(۲۰۲۳) | * | * | | | | * | |
| یانگ و همکاران(۲۰۲۲) | | * | | | * | | |
| او و همکاران(۲۰۲۱) | * | * | | | | * | |
| نیتا و همکاران(۲۰۲۱) | * | * | | | | * | |
| پژوهش حاضر | * | * | | * | * | * | * |

در پژوهش حاضر، یک سیستم توزیع یکپارچه متشکل از یک ایستگاه انتقال، نیروگاه، و تامین کنندگان را معرفی می کند تا توزیع برق و هزینه کل مشترک زنجیره تأمین برق را بهینه‌سازی نماید. در حوزه تحقیقات زنجیره تأمین برق، این مطالعه با پرداختن به چالش‌های حیاتی و پیشنهاد راه‌حل‌های نوآورانه، پتانسیل تغییر شکل چشم‌انداز توزیع نیروی برق را دارد. این پژوهش بر بهینه‌سازی کارایی زنجیره تأمین برق از طریق ادغام فناوری‌های پیشرفته مانند شبکه‌های هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی متمرکز است. در این مطالعه ، مسله توزیع اقتصادی بار برق با در نظرگرفتن محدودیت‌های غیرخطی از جمله تلفات شبکه انتقال ، معادله توازن تولید و مصرف در سیستم با رویکرد مدیریت هزینه ، محدوده تولید و نرخ‌های افزایشی و کاهشی به یک مسله بهینه‌سازی تبدیل شده و در نهایت با روش لاگرانژ به حل آن پرداخته خواهد شد. برای این



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

منظور به ارائه‌یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید و هزینه‌های اضافی در تولید و با رویکرد مدیریت هزینه و در نظر گرفتن عامل زمان پرداخته می‌شود.

در این پژوهش، مسله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیر خطی از جمله تلفات شبکه انتقال ، معادله توازن تولید و مصرف در سیستم با رویکرد مدیریت هزینه ، محدوده تولید و نرخ‌های افزایشی و کاهشی به یک مسله بهینه‌سازی تبدیل شده و برای این منظور به ارائه‌ی مدل ریاضی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید و هزینه‌های اضافی در تولید و با رویکرد مدیریت هزینه و در نظر گرفتن عامل زمان پرداخته می‌شود. ابعاد نوآوری این پژوهش در درجه اول در هفت جنبه منعکس شده است:

(۱) توسعه یک مدل بهینه‌سازی همکاری منطقه‌ای که کارایی تولید و هزینه‌های کلی برق را در نظر می‌گیرد؛

(۲) گنجاندن تفاوت در هزینه‌های تولید برق از منابع مختلف انرژی؛

(۳) غنی‌سازی و گسترش مدل هزینه برق موجود با درون زایی سناریوی تجارت برق؛

(۴) اجرای ساز وکار توزیع عادلانه و جبران مزایای واحدهای همکار طی دوره‌های مطالعاتی متوالی، با تمرکز بر پیش بینی دوره بعدی؛

(۵) تعادل بار و طرح‌های زمان‌بندی را می‌توان برای متعادل کردن بار روی شبکه با برنامه‌ریزی استفاده از دستگاه‌ها و وسایل مختلف برای اطمینان از بار ثابت و پایدار به کار برد؛

(۶) پاسخ به تقاضا در طرح‌های زمان‌بندی را می‌توان برای مدیریت تقاضای برق در دوره‌های تقاضای بالا با برنامه‌ریزی استفاده از وسایل و دستگاه‌ها برای کاهش تقاضای کلی مورد استفاده قرار داد؛

(۷) صرفه‌جویی در انرژی و طرح‌های زمان‌بندی را می‌توان برای کاهش مصرف انرژی با برنامه‌ریزی استفاده از وسایل و دستگاه‌ها در مواقعی که انرژی کم‌هزینه یا فراوان‌تر است، به کار برد.

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

## روش پژوهش

پژوهش حاضر بر اساس هدف ، کاربردی است. این نوع پژوهش بعد از آنکه مشکل به وجود می‌آید، به جریان افتاده و برخورد با موقعیت مسئله‌ای اساس این پژوهش است و برای یافتن پاسخ برای مشکلات استفاده می‌گردد که درصدد است با بهره‌گیری از مدل ریاضی و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش‌های حل نوین به‌گونه‌ای عمل نماید که مجموع هزینه‌های وزنی فعالیت‌هایی که در زمان خاصی مانند t شروع می‌شود ، کمینه و با توجه به نوع مسله به‌دنبال انتخاب روش حل خواهیم بود که در نهایت پیامد آن این است که رضایت مشترکین برق، سودآوری و افزایش موجودی هزینه‌های به‌دست آمده صنعت برق را به حداکثر برساند. از آنجا که مسله بهینه نمودن برنامه‌ریزی هزینه‌های تولید، با روش‌های مبنا به‌راحتی قابل حل نبوده، از این رو از روش لاگرانژ استفاده خواهد شد. در این پژوهش، با به‌کارگیری مطالعات میدانی به جمع‌آوری داده‌ها پرداخته و سپس مسله برای دنیای واقعی پیاده‌سازی می‌گردد. بنابراین ، روش‌های گردآوری داده ها و اطلاعات شامل مطالعات میدانی، کتابخانه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات از طریق جستجو در اینترنت و سایت‌های معتبر علمی است. از نظر جمع‌آوری اطلاعات جهت دستیابی به ادبیات و پیشینه تئوریک موضوع پژوهش توصیفی است. برای جمع آوری داده‌های مربوط به صنعت برق از مطالعه‌ی میدانی در نیروگاه شهید رجائی قزوین استفاده گردید. پژوهش حاضر از نظر جمع‌آوری اطلاعات جهت دستیابی به ادبیات و پیشینه تئوریک موضوع ، پژوهش توصیفی – کاربردی با رویکرد مدلسازی ریاضی است. برای گردآوری داده‌های مربوط به صنعت برق (نیروگاه شهید رجائی قزوین) از مطالعه‌ی میدانی استفاده گردید. بسیاری از مسائل دنیای واقعی نیازمند بهینه‌سازی چندین تابع هدف به‌صورت همزمان است. در اکثر موارد این توابع در رقابت با یکدیگر و یا به‌صورت معکوس و ناسازگار می‌باشند. بهینه‌سازی مسائل با توابع هدف چندگانه ناسازگار با یکدیگر مانند هزینه و کیفیت جواب بهینه منحصر به فردی ندارند. بلکه دسته‌ای از جواب‌های بهینه را تعیین می‌کنند. در واقع این دسته جواب‌های بهینه ،



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

جواب‌های دیگر را تحت پوشش قرار می‌دهند. با عنایت به اینکه، پژوهش به‌دنبال مدلسازی ریاضی است، لذا مراحل ساخت مدل به شرح ذیل می‌باشد:

تعریف مسله: اولین مرحله در مدلسازی، تعیین درک و توضیح مسئله‌ای است که صنعت برق با آن مواجه می‌گردد.

گردآوری داده‌ها: بعد از تعریف مسله، محقق برای تعیین و تخمین مقدار پارامترهایی که بر مسله مورد بررسی صنعت برق تأثیر می‌گذارد، داده‌های لازم را جمع آوری می‌نماید.

ساخت مدل: ساخت مدل در عین نیاز به فنون مربوط، به میزان زیادی به تخیل و هنر محقق وابسته است. ایجاد یک مدل ریاضی نیاز به تعیین روابط متقابل بین متغیرها (متغیرهای تصمیم)، تعیین هدف و مشخص کردن محدودیت‌های موجود در مسله است.

بررسی صحت عملکرد مدل: در این روش باید اطمینان حاصل گردد که مدل می‌تواند به‌خوبی عمل کند و صحت عملکرد مدل مورد تایید واقع گردد.

ارائه نتایج: مدلساز باید مدلی بسازد که به‌کارگیری و استفاده از آن راحت و درک آن تا حد امکان سهل و آسان باشد.

حل مدل: بعد از انجام مراحل فوق ، پیاده‌سازی تصمیمات یا استراتژی‌های توصیه شده توسط مدل است.

پیاده سازی: فرآیند مدلسازی با به‌کارگیری مدل در عمل تکمیل و به پایان می‌رسد. اجرای موفق مدل، وقتی امکان‌پذیر است که شش مرحله فوق به‌درستی انجام گردد.

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

با عنایت به نوع مدل به استناد مطالعات گذشته، مدل پژوهش از نوع NP-Hard خواهد بود که برای حل آن از نرم‌افزار متلب ۷.۸ انجام خواهد شد. اجرای مدل با این نرم‌افزار در مقایسه با نرم افزارهای دیگر با توجه به تعداد متغیرها و برنامه‌ریزی عدد صحیح در مدت زمان بسیار اندک انجام می‌شود.

### ۱.۳. مفروضات پژوهش

مفروضات بهینه‌سازی در حوزه میزان مصرف و هزینه‌های برق مصرفی در نیروگاه‌ها به شرایط خاص نیروگاه‌های برق در کشور بستگی دارد؛ زیرا بسیاری از نیروگاه‌های کشور به‌دلیل عدم به‌روزرسانی صنعت نسل ۴و۵ و عدم تطابق با استانداردهای روز دنیا از رده خارج و میزان بهره‌برداری از آنها نیز بسیارکاهش یافته است. این پژوهش به‌دلیل ماهیت مدلسازی ریاضی فاقد فرضیه‌های آماری است و مفروضات مدل ریاضی به شرح ذیل می‌باشند:

۱- هزینه اضافی و مصرف بالای روزانه انرژی از طریق بهینه‌سازی هزینه‌های فرآیند تولید کاهش می‌یابد؛

۲- بهینه‌سازی هزینه‌ها در فرآیند تولید باعث کاهش زمان تولید می‌شود؛

۳- بهینه‌سازی هزینه‌ها در فرآیند تولید باعث کاهش موازی کاری می‌شود؛

۴- بهینه‌سازی هزینه‌ها در فرآیند تولید باعث افزایش بازده تولید می‌شود؛

۵- بهینه‌سازی هزینه‌ها در فرآیند تولید باعث افزایش سودآوری و کاهش هزینه‌های اضافی تولید می‌شود؛

۶- بهینه‌سازی هزینه‌ها در فرآیند تولید باعث افزایش رضایت مشتریان و پاسخ‌گویی بهینه به تقاضا می‌گردد.

### ۲.۳. مدلسازی ریاضی

در این پژوهش مبنای مدلسازی، بهینه‌سازی هزینه‌های تولید شبکه اقتصادی بار نیروگاه برق است، بنابراین در ابتدا متغیرها، پارامترها، اندیس‌ها و محدودیت‌های مدل را تعریف و سپس اقدام به ارائه مدل می‌نماییم. برای فرموله کردن مدل ریاضی نمادهای زیر را تعریف می‌کنیم:



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

**جدول ۲. پارامترها و اندیس‌های پژوهش**

| های مدل‌اندیس | تعریف | پارامترهای مدل | تعریف |
|---|---|---|---|
| i | علامت شماره ژنراتور | $C_i$ | امین نیروگاه$i$هزینه سوخت |
| D | علامت بار شبکه | $P_i$ | امین ژنراتور$i$توان خروجی |
| loss | علامت انتقال شبکه | $P_D$ | تقاضای بار |
| n | واحد تولیدی شبکه انتقال | $P_{loss}$ | تلفات شبکه انتقال |
| t | علامت و دوه زمانی | N | تعداد ژنراتورهای در حال برداری سیستم‌بهره |

**جدول ۳. متغیرهای تصمیم**

| متغیرهای تصمیم مساله | تعریف |
|---|---|
| $B_{ij}$ | ضریب تلفات شبکه |
| $P_{ij}$ | حدود تلید |
| $B_{io}$ | ضریب تلفات شبکه |
| $B_{oo}$ | ضریب تلفات شبکه |
| $P_i$ | امین ژنراتور$i$توان خروجی |
| $P_{loss}$ | تلفات شبکه |
| $P_d$ | بار سیستم |
| B | ضرایب تلفات |
| $a_i$ | امین ژنراتور$i$ضریب هزینه |
| $b_i$ | امین ژنراتور$i$ضریب هزینه |



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

| | |
|---|---|
| $c_i$ | امین ژنراتورiضریب هزینه |
| D | بار شبکه |
| $c_ip_i$ | امین نیروگاهiهزینه سوخت |
| N | برداری سیستم‌تعداد ژنراتورهای در حال بهره |
| I | شماره ژنراتور |
| $P_{loss}$ | تلفات شبکه انتقال |
| $P_d$ | تقاضای بار |

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کمترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به‌وسیله پخش مناسب منابع تولید، انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌نماید. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به منظور کم کردن هزینه‌ها ارائه می‌نماید. فرمول‌بندی آن نیز به‌عنوان یک مسله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می کنند، ارائه می‌نماید. بنابراین مسله توزیع اقتصادی بار می‌تواند با تابع هدف زیر بیان شود:

$$\min \sum_{i=1}^{N} C_i(P_i) + k_l\left(\sum_{i=1}^{N} P_i - P_D - P_{loss}\right)^2 \quad (1)$$

که $C_i(P_i)$ هزینه سوخت i امین نیروگاه، N تعداد ژنراتورهای در حال بهره‌برداری سیستم و $P_i$ توان خروجی i امین ژنراتور است. $P_D$ تقاضای بار و $P_{loss}$ تلفات شبکه انتقال می‌باشد. $C_i(P_i)$ معمولاً به‌صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می‌شود:

$$C_i(P_i) = a_i + b_iP_i + c_iP_i^2 \quad (۲)$$

در رابطه (2) $a_i$، $b_i$ و $c_i$ ضرایب هزینه i امین ژنراتور است.

در این بخش محدودیت‌های مورد استفاده در فرمول بندی مسله توزیع اقتصادی بار ارائه شده است. شبکه انتقال دارای n واحد تولیدی را در نظر بگیرید که نیروگاه‌های آن به‌وسیله خطوط انتقال به همدیگر و به ۴ مصرف کننده متصل می‌شوند. این خطوط انتقال دارای تلفات می‌باشند. اگر تلفات



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

حاصل از انتقال توان در سیستم در نظر گرفته نشود، حل مسله توزیع اقتصادی بار با مساوی قرار دادن مجموع میزان تولید نیروگاه‌ها با مقدار بار مصرفی شبکه صورت می‌گیرد که این فرض خلاف واقعیت است. پس به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی در سیستم قدرت باید میزان تلفات انتقال توان را نیز در مسله وارد نمود. در نتیجه مجموع توان تولید شده برق توسط کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم برابر باشد:

$$\sum_{i=1}^{N} P_i - P_D - P_{loss} = 0 \quad (۳)$$

در این رابطه $P_D$ بار سیستم است و تلفات شبکه انتقال، $P_{loss}$، به ساختار فیزیکی شبکه و مقدار تولید بستگی دارد و از محاسبات پخش بار یا ضرایب تلفات B با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} B_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^{N} B_{i0} P_i + B_{00} \quad (۴)$$

در این رابطه $B_{ij}$، $B_{i0}$ و $B_{00}$ ضرایب رابطه تلفات شبکه هستند که به‌طور مستقیم با استفاده از ماتریس امپدانس شبکه به‌دست می‌آیند. قدرت خروجی هر ژنراتور نباید بیشتر از مقدار اسمی آن باشد و همچنین نباید کمتر از مقداری باشد که برای بهره‌برداری پایدار دیگ بخار ضروری است. بنابراین، تولید چنان محدود می‌شود که در بین دو محدوده از پیش تعیین شده حداقل و حداکثر قرار گیرد. هر واحد تولیدی در مدار دارای حدود تولید با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (۵)$$

حدود فوق، علاوه بر اینکه ناشی از محدودیت‌های فنی هر واحد می‌باشند، باعث می‌شوند تا واحد با هزینه‌کمتر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیشتر، کمتر از حد مجاز خود تولید نداشته‌باشد.

### ۲.۳. روش حل مدل ریاضی

در این بخش روش یا الگوریتم برای حل مسله توزیع اقتصادی بار ارائه شده است. ابتدا به صورت مختصر روش یا الگوریتم ضریب لاگرانژ ارائه خواهد گردید. روش ضریب لاگرانژ، یکی از روش‌هایی است که به‌روش معمول معروف است. برای تعیین توزیع اقتصادی بار در این روش، ابتدا برای لاندا تخمین اولیه زده می‌شود که به‌صورت $\lambda^{(1)}$ نشان داده می‌شود، سپس باید معادلات خطی



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

همزمان حل گردند. در MATLAB از فرمان P = E / D استفاده می‌شود. آنگاه این فرایند تکراری با استفاده از روش گرادیان ادامه می‌یابد. برای انجام این کار، با استفاده از معادله ذیل مقدار $P_i$ در تکرار k ام به‌صورت زیر خواهد بود:

$$P_i^{(k)} = \frac{\lambda^{(k)}(1-B_{0i})-\beta_i-2\lambda^{(k)}\sum_{j\neq i}B_{ij}P_j^{(k)}}{2\left(\gamma_i+\lambda^{(k)}B_{ii}\right)} \quad (۶)$$

با جایگزینی $P_i$ از معادلات خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^{ng}\frac{\lambda^{(k)}(1-B_{0i})-\beta_i-2\lambda^{(k)}\sum_{j\neq i}B_{ij}P_j^{(k)}}{2\left(\gamma_i+\lambda^{(k)}B_{ii}\right)} = P_D + P_L^{(k)} \quad (۷)$$

$$f(\lambda)^{(k)} = P_D + P_L^{(k)} \quad (۸)$$

با بسط سری تیلور معادله ذیل حول نقطه کا $\lambda^{(k)}$ و چشم پوشی از جملات مرتبه دوم و بالاتر خواهیم داشت:

$$f(\lambda)^{(k)} + \left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda}\right)^{(k)}\Delta\lambda^{(k)} = P_D + P_L^{(k)} \quad (۹)$$

یا:

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda}\right)^{(k)}}$$

$$= \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum\left(\frac{dP_i}{d\lambda}\right)^{(k)}}$$

که در آن:

$$\sum_{i=1}^{ng}\left(\frac{\partial P_i}{\partial\lambda}\right)^{(k)} = \sum_{i=1}^{ng}\frac{\gamma_i(1-B_{oi})+B_{ii}\beta_i-2\gamma_i\sum_{j\neq i}B_{ij}P_j^{(k)}}{2\left(\gamma_i+\lambda^{(k)}B_{ii}\right)^2} \quad (۱۰)$$



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

و بنابراین داریم:

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \quad (۱۱)$$

که در ان:

$$\Delta P^{(k)} = P_D + P_L^{(k)} - \sum_{i=1}^{ng} P_i^{(k)} \quad (۱۲)$$

این فرایند آن‌قدر تکرار می‌شود تا $\Delta P^{(k)}$ کمتر از مقدار دقت مشخص شده گردد. با به‌دست آمدن لاندا و توان‌های اکتیو، می‌توان هزینه و تلفات را به‌دست‌آورد. در نتیجه مسله توزیع بار به این صورت حل می‌شود.

## ۴. پیاده سازی مدل ریاضی پژوهش

داده‌های مورد نیاز برای پیاده سازی مدل پژوهش از نیروگاه شهید رجایی استان قزوین جمع‌آوری گردید و برای حل از روش ضریب لاگرانژ استفاده نمودیم. هر یک از این روش‌ها عملکرد و توانایی خود را در حل مسله نشان می‌دهند و در انتها با هم مقایسه می‌شوند تا مشخص گردد که کدام روش از لحاظ هزینه، پخش توان اکتیو و تلفات خط انتقال مناسب است. همچنین لازم به ذکر است که تمام قیود ارائه شده در این بخش برای حل مسله با استفاده از روش لاگرانژ رعایت گردیده است. کلیه داده‌ها از نیروگاه و از متخصصین مربوطه گردآوری شده است.

### ۱.۴. پیاده سازی مطالعه موردی نیروگاه شهید رجایی قزوین

شکل (۱) پیوست نمایش تک خطی سیستم قدرت نیروگاه شهید رجایی با ۲۶ شین، ۴۶ خط انتقال و ۶ واحدی تولیدی را نشان‌می‌دهد. شین ۱ به‌عنوان شین مرجع با ولتاژ تنظیم شده $1/025\angle 0^{o}\text{pu}$ انتخاب شده است. داده‌های بار در جدول (۴)، اندازه ولتاژها، برنامه‌ریزی تولید و حدود توان راکتیو در شین‌های تنظیم شده در جدول (۵) ارائه شده است.

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

**جدول ۴. داده‌های بار**

| بار | | | بار | | |
|---|---|---|---|---|---|
| شماره شین | MW | MVAr | شماره شین | MW | MWAr |
| ۱ | ۵۱/۰ | ۴۱/۰ | ۱۴ | ۲۴/۰ | ۱۲/۰ |
| ۲ | ۲۲/۰ | ۱۵/۰ | ۱۵ | ۷۰/۰ | ۳۱/۰ |
| ۳ | ۶۴/۰ | ۵۰/۰ | ۱۶ | ۵۵/۰ | ۲۷/۰ |
| ۴ | ۲۵/۰ | ۱۰/۰ | ۱۷ | ۷۸/۰ | ۳۸/۰ |
| ۵ | ۵۰/۰ | ۳۰/۰ | ۱۸ | ۱۵۳/۰ | ۶۷/۰ |
| ۶ | ۷۶/۰ | ۲۹/۰ | ۱۹ | ۷۵/۰ | ۱۵/۰ |
| ۷ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۲۰ | ۴۸/۰ | ۲۷/۰ |
| ۸ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۲۱ | ۴۶/۰ | ۲۳/۰ |
| ۹ | ۸۹/۰ | ۵۰/۰ | ۲۲ | ۴۵/۰ | ۲۲/۰ |
| ۱۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۲۳ | ۲۵/۰ | ۱۲/۰ |
| ۱۱ | ۲۵/۰ | ۱۵/۰ | ۲۴ | ۵۴/۰ | ۲۷/۰ |
| ۱۲ | ۸۹/۰ | ۴۸/۰ | ۲۵ | ۲۸/۰ | ۱۳/۰ |
| ۱۳ | ۳۱/۰ | ۱۵/۰ | ۲۶ | ۴۰/۰ | ۲۰/۰ |

**جدول ۵. داده‌های تولید و اندازه ولتاژ**

| شماره شین | اندازه ولتاژ | تولید | حدود MWAr | |
|---|---|---|---|---|
| | | MW | Min. | Max. |
| ۱ | ۱/۰۲۵ | – | – | – |
| ۲ | ۱/۰۲۰ | ۷۹/۰ | ۴۰/۰ | ۲۵/۰ |
| ۳ | ۱/۰۲۵ | ۲۰/۰ | ۴۰/۰ | ۲۵/۰ |
| ۴ | ۱/۰۵۰ | ۱۰۰/۰ | ۴۰/۰ | ۸۰/۰ |
| ۵ | ۱/۰۴۵ | ۳۰۰/۰ | ۴۰/۰ | ۱۶۰/۰ |
| ۲۶ | ۱/۰۱۵ | ۶۰/۰ | ۱۵/۰ | ۵۰/۰ |

مگاوار مربوط به خازن‌های موازی نصب شده در پست‌ها و تنظیم تپ ترانسفورماتورها مطابق جدول‌های (۵) و (۶) می‌باشد.

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

**جدول ۶. مگاوار خازن**

| شماره شین | MWAr |
|---|---|
| ۱ | ۴۰/۰ |
| ۴ | ۲/۰ |
| ۵ | ۵/۰ |
| ۶ | ۲/۰ |
| ۱۱ | ۱/۵ |
| ۱۲ | ۲/۰ |
| ۱۵ | ۰/۵ |
| ۱۹ | ۵/۰ |

**جدول ۷. تپ ترانسفورماتورها**

| شین‌ها | تنظیم تپ |
|---|---|
| ۳-۲ | ۰/۹۶ |
| ۱۳-۲ | ۰/۹۶ |
| ۱۳-۳ | ۱/۰۱۷ |
| ۸-۴ | ۱/۰۵۰ |
| ۱۲-۴ | ۱/۰۵۰ |
| ۱۹-۶ | ۰/۹۵ |
| ۹-۷ | ۰/۹۵ |

محدودیت‌های توان حقیقی (اکتیو) ژنراتورها در جدول (۸) داده‌شده‌است:

**جدول ۸. محدودیت‌های توان حقیقی ژنراتورها**

| شین | حداقل تولید مگاوات | حداکثر تولید مگاوات |
|---|---|---|
| ۱ | ۱۰۰ | ۵۰۰ |
| ۲ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۳ | ۸۰ | ۳۰۰ |
| ۴ | ۵۰ | ۱۵۰ |
| ۵ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۲۶ | ۵۰ | ۱۲۰ |

ضرایب هزینه ۶ واحدی تولیدی در جدول (۹) ارائه شده‌است.



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

**جدول ۹. ضرایب هزینه ژنراتورها**

| واحد | $\alpha_i(\$)$ | $\beta_i(\$)$ | $\gamma_i(\$)$ |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۴۰ | ۷/۰ | ۰/۰۰۷ |
| ۲ | ۲۰۰ | ۱۰/۰ | ۰/۰۰۹۵ |
| ۳ | ۲۲۰ | ۸/۵ | ۰/۰۰۹۰ |
| ۴ | ۲۰۰ | ۱۱/۰ | ۰/۰۰۹۰ |
| ۵ | ۲۲۰ | ۱۰/۵ | ۰/۰۰۸۰ |
| ۲۶ | ۱۹۰ | ۱۲/۰ | ۰/۰۰۷۵ |

همان طور که گفته شده بود، تابع هزینه سوخت ژنراتور به‌صورت تابع درجه ۲ بر حسب توان حقیقی (اکتیو) ارائه می‌شود. بهره‌برداری ژنراتورها بر حسب $/h و توان‌های $P_i$ بر حسب MW به‌صورت زیر می‌باشند:

$$C_1 = 240 + 7/0P_1 + 0/007P_1^2$$
$$C_2 = 200 + 10/0P_2 + 0/0095P_2^2$$
$$C_3 = 220 + 8/5P_3 + 0/0090P_3^2$$
$$C_4 = 200 + 11/0P_4 + 0/0090P_4^2$$
$$C_5 = 220 + 10/5P_5 + 0/0080P_5^2$$
$$C_6 = 190 + 12/0P_6 + 0/0075P_6^2$$

حال در شکل (۱) پیوست نمایش تک خطی سیستم آورده شده‌است. در این شکل شین مرجع، ژنراتورها، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و شین‌ها به‌صورت ساده مشخص می‌باشند. برای حل مسله به ضرایب تلفات شبکه نیز نیاز می‌باشد. تلفات شبکه با استفاده از رابطه ماتریس B محاسبه شده‌است. نتایج مربوط به ضرایب نهایی تلفات در زیر ارائه شده است:



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

```
B =

    0.0017    0.0012    0.0007   -0.0001   -0.0005   -0.0002
    0.0012    0.0014    0.0009    0.0001   -0.0006   -0.0001
    0.0007    0.0009    0.0031    0.0000   -0.0010   -0.0006
   -0.0001    0.0001    0.0000    0.0024   -0.0006   -0.0008
   -0.0005   -0.0006   -0.0010   -0.0006    0.0129   -0.0002
   -0.0002   -0.0001   -0.0006   -0.0008   -0.0002    0.0150

B0 =

  1.0e-003 *

   -0.3908   -0.1297    0.7046    0.0591    0.2162   -0.6635

B00 =

    0.0056
```

که برای راحتی نوشتن، به این صورت نیز نوشته می‌شود:

$$B_{ij} = 10^{-3}\begin{bmatrix} 1/7 & 1/2 & 0/7 & -0/1 & -0/5 & -2/0 \\ 1/2 & 1/4 & 0/9 & 0/1 & -0/6 & -0/1 \\ 0/7 & 0/9 & 3/1 & 0/0 & -1/0 & -0/6 \\ -0/1 & 0/1 & 0/0 & 0/24 & -0/6 & -0/8 \\ -0/5 & -0/6 & -0/1 & -0/6 & 12/9 & -0/2 \\ -2/0 & -1/0 & -0/6 & -0/8 & -0/2 & 15/0 \end{bmatrix}$$

$$B_{0i} = 10^{-3}[-3/908 \quad -1/297 \quad 7/047 \quad 0/591 \quad 2/161 \quad -6/635]$$

$$B_{00} = 0/0056$$

تقاضای بار مورد نیاز این سیستم MW ۱۲۶۳ است. از طریق پخش بار نیوتن- رافسون به‌دست آمده است. با استفاده از برنامه dispatch، در نرم‌افزار MATLAB، فرامین لازم برای به‌دست آوردن توزیع بهینه تولید نوشته شده است. فرآیند بهینه‌سازی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا اختلاف (مقدار قدر مطلق) بین تولید برنامه‌ریزی شده شین مرجع (که از معادلات هماهنگی محاسبه شده است) و مقدار تولید شین مرجع (که از حل پخش بار به‌دست آمده است) کوچک‌تر از MW ۰/۰۰۱ شود. با اجرای فرامین لازم، نتیجه توزیع بهینه تولید نهایی به‌صورت زیر ارائه شده‌است:

همان طور که از نتایج پیداست، مقدار تلفات کل MW ۱۲/۸۰۷، هزینه افزایشی یا لاندا MWh / $ ۱۳/۵۳۸۱۱۳، مقادیر $P_1$ ، $P_2$ ، $P_3$ ، $P_4$ ، $P_5$ و $P_{26}$ بر حسب MW به‌ترتیب ۴۴۷/۶۹۱۹، ۱۷۳/۱۹۳۸، ۴۸۵۹ /۲۶۳، ۱۳۸/۸۱۴۲، ۱۶۵/۵۸۸۴ و ۸۷/۰۲۶۰ می‌باشد. هزینه تولید کل با توزیع بهینه تولید h / $ ۱۵۴۴۷/۷۲ می‌باشد.



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

```
Total system loss = 12.807 MW
Incremental cost of delivered power (system lambda) = 13.538113 $/MWh
Optimal Dispatch of Generation:

  447.6919
  173.1938
  263.4859
  138.8142
  165.5884
   87.0260

Absolute value of the slack bus real power mismatch, dpslack =   0.0008 pu
```

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
Maximum Power Mismatch = 2.33783e-005
No. of Iterations = 2

| Bus No. | Voltage Mag. | Angle Degree | Load MW | Load Mvar | Generation MW | Generation Mvar | Injected Mvar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.025 | 0.000 | 51.000 | 41.000 | 447.611 | 250.582 | 4.000 |
| 2 | 1.020 | -0.200 | 22.000 | 15.000 | 173.087 | 57.303 | 0.000 |
| 3 | 1.045 | -0.639 | 64.000 | 50.000 | 263.363 | 78.280 | 0.000 |
| 4 | 1.050 | -2.101 | 25.000 | 10.000 | 138.716 | 33.449 | 2.000 |
| 5 | 1.045 | -1.453 | 50.000 | 30.000 | 166.099 | 142.890 | 5.000 |
| 6 | 1.001 | -2.874 | 76.000 | 29.000 | 0.000 | 0.000 | 2.000 |
| 7 | 0.995 | -2.406 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8 | 0.998 | -2.278 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9 | 1.010 | -4.387 | 89.000 | 50.000 | 0.000 | 0.000 | 3.000 |
| 10 | 0.991 | -4.311 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 11 | 0.998 | -2.824 | 25.000 | 15.000 | 0.000 | 0.000 | 1.500 |
| 12 | 0.994 | -3.282 | 89.000 | 48.000 | 0.000 | 0.000 | 2.000 |
| 13 | 1.022 | -1.261 | 31.000 | 15.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 1.008 | -2.445 | 24.000 | 12.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 15 | 0.999 | -3.229 | 70.000 | 31.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 |
| 16 | 0.990 | -3.990 | 55.000 | 27.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17 | 0.983 | -4.366 | 78.000 | 38.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 18 | 1.007 | -1.884 | 153.000 | 67.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 19 | 1.005 | -6.074 | 75.000 | 15.000 | 0.000 | 0.000 | 5.000 |
| 20 | 0.983 | -4.759 | 48.000 | 27.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21 | 0.977 | -5.411 | 46.000 | 23.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 22 | 0.980 | -5.325 | 45.000 | 22.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 23 | 0.978 | -6.388 | 25.000 | 12.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 24 | 0.969 | -6.672 | 54.000 | 27.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 25 | 0.975 | -6.256 | 28.000 | 13.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 26 | 1.015 | -0.284 | 40.000 | 20.000 | 86.939 | 27.892 | 0.000 |
| Total | | | 1263.000 | 637.000 | 1275.815 | 590.396 | 25.000 |

```
Total generation cost =   15447.72 $/h
```

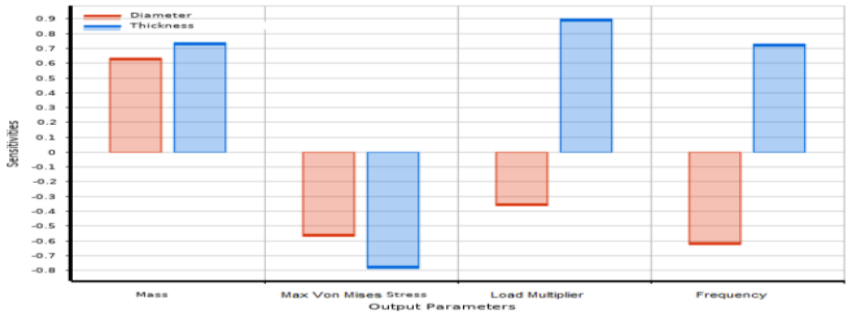
[ Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01 ]

**جدول 10. نتایج به‌دست آمده از روش ضریب لاگرانژ برای سیستم**

| واحد تولیدی | میزان تولید (مگاوات) |
|---|---|
| $P_1$ | ۴۴۷/۶۹۱۹ |
| $P_2$ | ۱۷۳/۱۹۳۸ |
| $P_3$ | ۲۶۳/۴۸۵۹ |
| $P_4$ | ۱۳۸/۸۱۴۲ |
| $P_5$ | ۱۶۵/۵۸۸۴ |
| $P_{26}$ | ۸۷/۰۲۶۰ |
| مجموع تولید (MW) | ۱۲۷۵/۸ |
| تلفات | ۱۲/۸۰۷ |
| هزینه تولید کل ($ / h) | ۱۵۴۴۷/۷۲ |

### ۲.۴. طراحی آزمایش و تحلیل حساسیت

طراحی آزمایش یک رویکرد علمی است که به محققان و پژوهشگران اجازه کسب دانش برای فهم بهتر یک فرایند و همچنین تعیین چگونگی تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها را می‌دهد و تعیین می‌نماید که کدام ورودی‌ها بیشترین تأثیر را بر روی خروجی‌ها دارند و چه مقدار از هر ورودی بهترین خروجی را حاصل می‌نماید. یکی از CCD [1] روش‌های طراحی آزمایش، روش طراحی مرکب مرکزی است که در این پژوهش از آن برای طراحی آزمایشات استفاده شده است. در تحلیل حساسیت، میزان حساسیت یک تابع نسبت به متغیرهای ورودی (طراحی) بررسی و مقدار حساسیت می‌تواند عددی بین ۱- تا ۱+ را اتخاذ کند. مقدار مثبت ، نشان دهنده رابطه مستقیم متغیر با تابع و مقدار منفی، نشان دهنده رابطه عکس است.

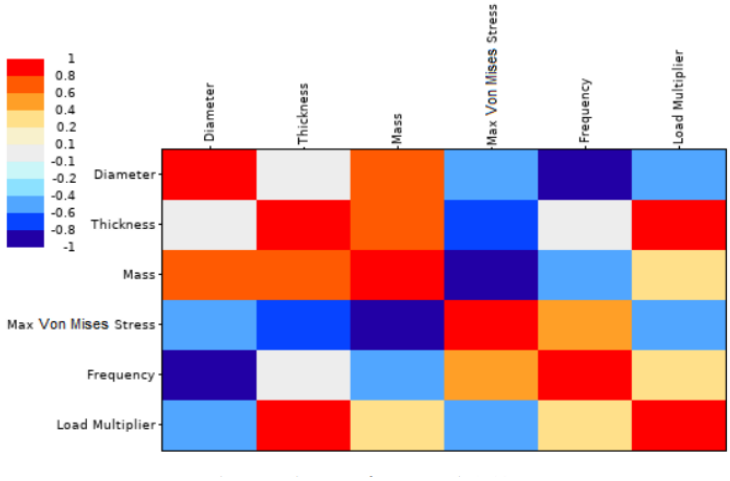



**شکل ۱. تحلیل حساسیت توابع هدف و محدودیت‌ها بر حسب متغیرهای طراحی**

[1] -Central Composite Design



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




**شکل ۲. ماتریس همبستگی ورودی‌ها و خروجی‌ها**

شکل(۱)، تحلیل حساسیت توابع هدف و محدودیت‌ها نسبت به متغیرهای طراحی را نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت برای تابع هدف و توابع محدودیت‌ها بررسی شده است. با توجه به‌شکل(۱) مشخص است که دو متغیر تأثیر تقریباً یکسانی بر روی تابع هدف دارند. شکل(۲)، ماتریس همبستگی ورودی و خروجی‌های تحلیل را نشان می‌دهد. ماتریس همبستگی یک ماتریس متقارن است که در این مسله شامل ۶ سطر و ۶ ستون است. مشاهده می‌شود که تعداد سطر و ستون‌ها برابر مجموع تعداد متغیرها و توابع است. هر کدام از خانه‌ها با عددی مشخص‌شده‌اند که در بازه منفی ۱ تا مثبت ۱ قرار دارند. اعداد منفی (کانتور آبی‌رنگ)، نشان دهنده رابطه معکوس و اعداد مثبت (کانتور قرمز رنگ)، نشان دهنده رابطه مستقیم هستند. هر چه این عدد کمتر باشد به این معنی است که دو متغیر به همدیگر وابستگی کمتری دارند و هر چه قدر این عدد بزرگ‌تر باشد. یعنی دو متغیر به همدیگر وابستگی بیشتری دارند. قطر این ماتریس برابر ۱ است؛ زیرا هر متغیر با خودش طبیعتاً همبستگی حداکثری دارد. همان طور که مشاهده می‌گردد، متغیر ضخامت بیشترین تأثیر را بر روی فرکانس دارد.



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

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادهای پژوهش

در این پژوهش روش‌های هوشمند توزیع اقتصادی توان اکتیو بین ژنراتورها با در نظر گرفتن تلفات تولید برق پرداخته شده است. ابتدا توزیع اقتصادی توان اکتیو با استفاده از روش‌های کلاسیک و هوشمند به‌صورت مختصر ارائه گردید. تحقیقات و پژهش‌هایی که در این زمینه انجام شده نیز ذکر گردید. در این پژوهش، توزیع اقتصادی به‌صورت ریاضی فرمول‌بندی و قیود لازم ارائه گردید. و سپس به‌طور مفصل روش ضریب لاگرانژ شرح داده شد. مسله توزیع اقتصادی توان اکتیو با در نظر گرفتن قیود حدود تولید، توازن تولید و مصرف در سیستم و میزان تلفات، با استفاده از روش ضریب لاگرانژ مورد بررسی قرار گرفت ، که هدف آن حداقل سازی کل هزینه بهره‌برداری سیستم با رعایت قیود ذکر شده است. به‌منظور نمایش توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسله توزیع اقتصادی توان اکتیو، از سیستم ۶ نیروگاهی استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

-کارآمدی و توانایی در حوزه برق در این پژوهش محاسبه گردید به گونه ای که هزینه برق مصرفی را به حداقل میزان ممکن رسانید.

- تعریف صحیح تابع هزینه در روند میزان مصرف برق هرچه بهتر در عملیات بهینه‌سازی و تعیین هزینه واقعی بهره‌برداری نقش به سزایی را دارد.

-روش پیشنهادی ضریب لاگرانژ روند یافتن جواب را ساده سازی نموده و سرعت آن بالایی دارد و توانسته واقعیت‌های حاکم بر سیستم قدرت و نیروگاه‌ها را مد نظر قرار دهد.

- به‌علاوه در این پژوهش تمام هزینه‌های فرآیند تولید برق و مصرف آن مورد بررسی قرار گرفته و کلیه عوامل مؤثر در آن شناسایی گردیده است. نتایج حاصل از پژوهش نشان دهنده آن است که کاهش هزینه جزو مهم‌ترین و اساسی‌ترین عوامل بوده و مدیریت آن نیز باید پیوسته صورت پذیرد. در مدل ریاضی پژوهش، تمام عوامل مؤثر در هزینه‌های فرآیند تولید برق مد نظر واقع گردیده و این موضوع بر پیچیدگی بیش از پیش برای اجرای مدل کمک نموده، در حالی که در مطالعات سایر محققین تنها یکی از عوامل هزینه‌های فرآیند تولید مدنظر واقع گردیده است. در جدول (۱۱) نتیجه نهایی بهینه سازی هزینه‌های توزیع اقتصادی بار نشان داده شده که حاکی از



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

آن است که روش ضریب لاگرانژ روشی کارآمد است، چرا که کمترین هزینه را برای تولید برق دارد.

**جدول ۱۱. نتایج هزینه توزیع اقتصادی بار با روش ژنتیک و مقایسه با سایر روش‌ها**

| روش | کمترین هزینه ($/h) | هزینه متوسط ($/h) | بیشترین هزینه ($/h) |
|---|---|---|---|
| ضریب لاگرانژ | ۱۵۴۴۷/۷۲ | - | ۱۶۷۶۰/۷۳ |

مدل ارائه شده در این نوشتار را می‌توان با در نظر گرفتن برخی موارد که در اینجا از آنها صرف‌نظر شده، تکمیل نمود. از جمله پیشنهادهای کاربردی می‌توان به موارد زیر می توان اشاره نمود:

- در این پژوهش از قیود و محدودیتهای تولید، توازن تولید و مصرف برق در نیروگاه استفاده گردید. در ادامه می‌توان قیود نواحی ممنوع، محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه برق را در نظر گرفت.
- تنها کمینه‌سازی هزینه اقتصادی تولید نمی‌تواند معیار کامل و جامع برای تخصیص میزان بار تولید واحدها باشد. یکی دیگر از عوامل موثردر هزینه‌های اقتصادی آلودگی زیست محیطی واحدهای تولید انرژی است که اکثراً سوخت فسیلی دارند، لزوم توجه به این موضوع بسیار مهم است.
- برای اجرای مسله می‌توان قید ولتاژ شین‌ها را نیز به قیود مسله اضافه‌کرد و عملیات بهینه‌سازی را با در نظر گرفتن این قیدها نیز انجام داد.

پیشنهادها برای تحقیقات آتی عبارتست از:

- متغیرهای مورد بحث در این پژوهش به صورت قطعی فرض گردیده اند ، پیشنهاد می‌گردد پژوهش ها در وضعیت ورودی / خروجی عدم قطعی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.
- در این پژوهش ، محققین به مطالعه هزینه‌های تولید و بار مصرفی برق پرداختند، در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد عوامل دیگری مانند سوخت فسیلی به عنوان یکی از عوامل دخیل در تولید برق مد نظر قرار گیرد.



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

- پیشنهاد می گردد در مدل ریاضی پژوهش ، به عواملی همچون آلودگی زیست محیطی نیز پرداخته و سعی گردد با تعداد شین های فعلی میزان تولید برق برای مشترکین افزایش یابد.

**منابع**

**طحاری مهرجردی، محمدحسین. کاظمی، عالیه. گنجوی شکوری، حامد(۱۴۰۳).** یک مدل ریاضی چندهدفه برای مدیریت بهینه انرژی مناطق مسکونی هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت. پژوهش‌های نوین تصمیم‌گیری. شماره ۹. صص ۱-۳۰.

**رستمیان، محمد هادی. حسینی، محمد. آذرفر، آزیتا. صالحی، نسرین(۱۴۰۲).** ارائه یک الگوریتم تکاملی ترکیبی برای بهینه‌سازی شبکه‌های هوشمند با استفاده از مدیریت بار در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی به مترو. کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران.۱۲شماره۴.صص ۷۱-۱۵.

**زاده باقری، محمود(۱۴۰۲).**برنامه‌ریزی بهینه وضعیت واحدهای تولید نیروگاه‌ها در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز جهت کاهش هزینه‌های تولید و بهره‌برداری، کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، شماره ۱۱،صص ۵۶-۷۸.

**نامی، مسعود. زحمتی، ایرج ۱۴۰۲.** ارزیابی راهکارهای مدیریت انرژی در صنعت فولاد با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی. پژوهش‌های کاربردی در فنی و مهندسی. شماره ۱۳،صص ۱-۱۱.

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

**Abera, Liya.a.,Surbeck,Q,C.Mc kay,S (2024).** Lifecycle cost and benefit analysis for parcel-scale implementation of green storm water infrastructure. Sustainability. Article in press.

**Ahmad, W. Salman, S. Imran, M. Agha, M. Moazaam, M (2024).** An inventory-based integrated model of a hybrid electricity supply chain for sustainable electricity storage management. Journal of Energy Storage,83.https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110746

**Costella, O. Kent, M. Kapacek, P(2019)**.Cost-Orientation Maintenance Engineering: Case Study of an Irish Manufacturing Plant. IFAC-Papers On Line . Vol (52) , Issue (25) ,pp.409-414.

**Geiger, M. Knoblach, J( 2004).** cost estimation of sheet metal parts with neural networks, Proceedings of the 5th International conference on sheet Metal: She Met' 97, BelFast, pp. 69-78.

**Hao, X. Qiu, Y. Li, Y. Yang,X(2026).** MSTFormer: A novel long-term time series prediction model for electricity consumption in the cement calcination process. Chemical Engineering Science.320. https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122696

**Li, R. lu, Y. Guo, Y. Zhang,C(2026).** Optimizing regional hydrogen energy layout with cost variations in renewable hydrogen production under electricity-hydrogen-carbon coupling. Renewable Energy.256. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124054

**Lu, X., Li, H., Zhou, K., & Yang, S. (2023).** Optimal load dispatch of energy hub considering uncertainties of renewable energy and demand response. Energy, 262, 125564. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125564

**Luo, H. zhang, Y. Gao, X. Liu, Z. M, X. Y, X(2024).** Multi-scale electricity consumption prediction model based on land use and interpretable machine learning: A case study of China. Advances in Aplied Energy.pp.16.

**Khan, M. O.Kirmani,Sh.Rihan,M(2024).** Impact assessment of electric vehicle charging on distribution networks. Renewable Energy Focus. Vol.50. https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100599.

**Mateen, A.Wasim,M.Ahad,A.Ashfag,T(2023).** Smart energy management system for minimizing electricity cost and peak to average ratio in residential areas with hybrid genetic flower pollination algorithm. Alexandria Engineering Journal.Vol.77.pp.593-611. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.053.

**Panahi, H.Sabouhi,F.Amiri,Ali.Ghaderi,S.F(2024).**A data-driven optimizationmodel for renewable electricity supply chain design. Renewable and Sustainable Energy Reviews.202.

**Xue, Y. Guan, S. Jia,W(2025). PMformer:** A novel informer-based model for accurate long-term time series prediction. Information scinecs.690. https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121586



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

**Wang, G., Gao, Y., Feng, J., Song, J., Jia, D., Li, G., Li, Y., & Vartosh, A**. (2023). Optimal stochastic scheduling in residential micro energy grids considering pumped-storage unit and demand response. Energy Strategy Reviews, 49(August), 101172. https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101172

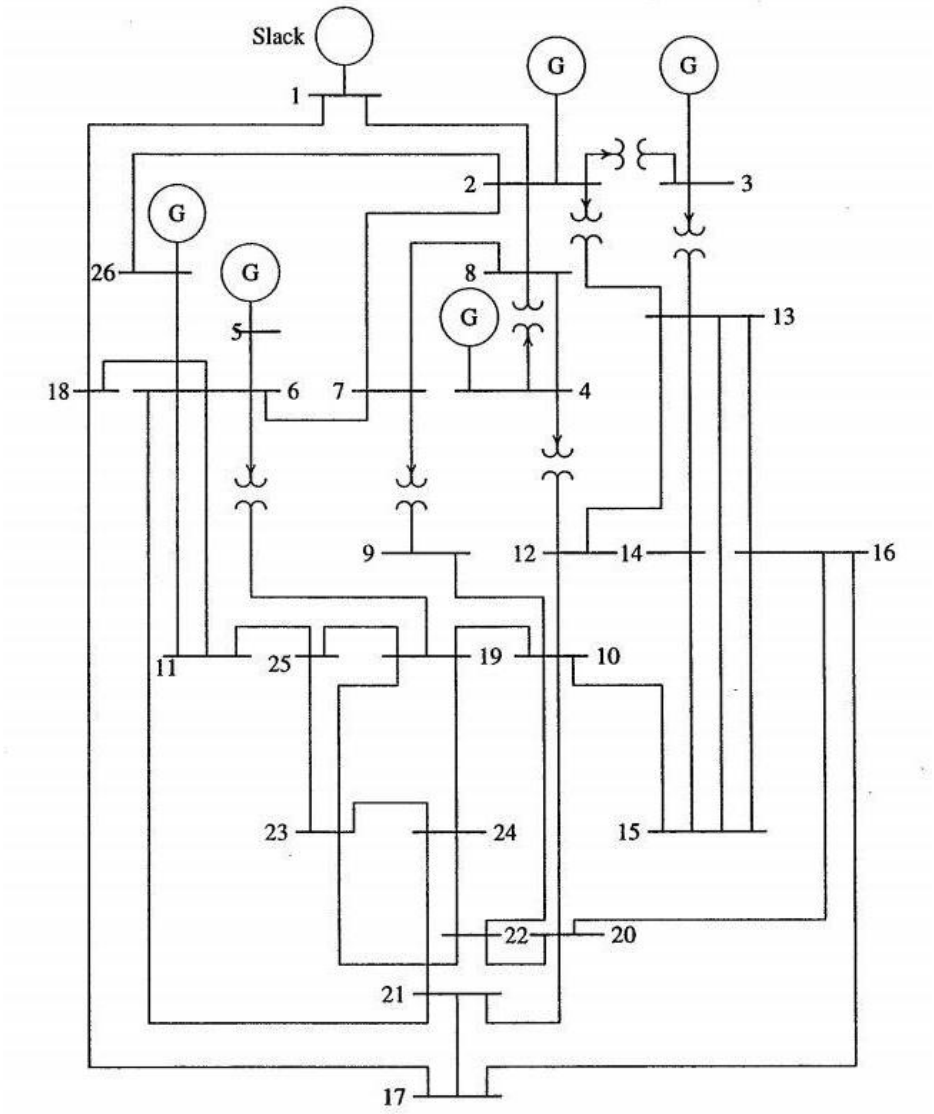
**Yang, S. X., Nie, T. qi, & Li, C. C. (2022).** Research on the contribution of regional Energy Internet emission reduction considering time-of-use tariff. Energy, 239, 122170. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122170

**Wang, Y. Zhen, J (2024).** Regional electricity cooperation model for cost-effective electricity management with an emphasis on economic efficiency.195. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114383.

**Zhou, Y. Lin, B(2024).** Exploring the fiscal context of electricity consumption in China: Does the Chinese-style fiscal decentralization matter?, Journal of Environmental Management.pp.371.

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

**پیوست ۱. نمایش تک خطی سیستم برق**






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