نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال پنجم/ شماره ۱۶/ پاییز ۱۳۹۸/ صفحات ۱۵۱ - ۱۸۲

طراحی مدل پیش‌بینی تلفات در شبکه‌های انتقال و توزیع برق: مقایسه رویکردهای پویایی سیستمی و اقتصادسنجی

محمد رضا منجذب
دانشیار دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی تهران (نویسنده مسئول)
dr_monjazeb@yahoo.com
بی تا رضایی موحد
کارشناس ارشد سیستم‌های انرژی
bitarezaei2000@gmail.com

در تحقیق حاضر عوامل مؤثر بر تلفات برق در صنعت برق ایران با استفاده از رویکرد پویایی سیستم در مقایسه با روش اقتصادسنجی بررسی شد. در چارچوب مدل پیش‌بینی تلفات در شبکه انتقال و توزیع برق با شبیه‌سازی تقاضای انرژی (برق) و همچنین توزیع آن و عوامل مؤثر بررسی شد. تجزیه و تحلیل مشکلات مربوط به این سیستم‌ها بسیار پیچیده بود چراکه این مدل یک مدل شبیه‌سازی‌شده بر اساس بسیاری از متغیرها، روابط و تأخیر بین این متغیرها است. در این تحقیق، با توجه به میزان عرضه و تقاضای انرژی و با در نظر گرفتن قیمت تعادلی بازار، تلفات مزبور تحلیل گردید و با استفاده از مدل سیستم پویا مقدار آن بررسی شد. همچنین با به‌کارگیری تجزیه‌وتحلیل رگرسیونی و با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی مدل‌سازی ARIMA مقدار آن برآورد شد. داده‌های مورد نظر برای سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۹۳ مورد استفاده قرار گرفت که از ترازنامه انرژی ایران اقتباس شد. شبیه‌سازی برای یک دوره ۲۵ ساله برای سیستم‌های پویا و یک دوره ۳۵ ساله برای مدل ساختاری در نظر گرفته شد. در این بررسی‌ها نتیجه به دست آمده این بود که معیار RMSE برای مدل ساختاری ۰/۰۱۵ و برای مدل سیستم های پویا ۰/۰۵۷ بود و نشان داد برآورد مدل ساختاری دقیق‌تر از شبیه‌سازی با سیستم‌های پویا است. با توجه به نتایج به دست آمده مدل‌سازی سیستم‌های پویا خطای بیشتری در برآورد داده‌ها داشت و بیشتر برای نشان دادن روابط متغیرها (روابط علی و معلولی) و همچنین میزان تأثیر هر متغیر بر دیگری مناسب بود. بنابراین در سیاست‌گذاری‌ها برای برآورد بهتر و دقیق‌تر داده‌ها با توجه به اطلاعات به دست آمده مدل‌سازی ساختاری مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: تلفات انرژی برق،عرضه‌ی انرژی برق، تقاضای انرژی برق، سیستم‌های دینامیک، مدل ساختاری، معیار RMSE

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/ ۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/ ۹/۲۵

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

۱. مقدمه

اهمیت بهینه‌سازی بخش عرضه و تقاضای انرژی، لزوم مدیریت راهبردی انرژی در عصر حاضر را پررنگ‌تر ساخته است. هم اکنون با توجه به آمار و ارقام موجود در بخش انرژی و همچنین مشکلات روزافزون در بخش انرژی جهان، ضرورت مدل‌سازی و برنامه‌ریزی در این بخش بیش‌ازپیش احساس می‌گردد.

شاخص تلفات در سیستم توزیع برق یکی از شاخص‌های مهم بیان کننده کارایی شبکه برق است. این شاخص نگاه کل مجموعه هر شرکت توزیع را در استفاده صحیح از تجهیزات برای ارائه برق نشان می‌دهد. بنابراین بهره برداران نیازمند محاسبه تلفات هستند.

امروزه انرژی الکتریسیته، به دلیل ارتباط با سایر بخش‌ها و نهادهای اقتصادی، نقش قابل توجهی در فرایند تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و پیشبرد اهداف توسعه کشورها ایفا می‌کند و به عنوان یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی مصرفی در همه بخش‌ها و نیز به دلیل فرایند تولید سرمایه‌بر و پیچیده آن‌که اغلب از حامل‌های انرژی تجدیدناپذیر استفاده می‌شود، اهمیت بسیار زیادی دارد. محدودیت حامل‌های انرژی تجدیدناپذیر از یک‌سو و رشد تعداد مشترکین و جمعیت کشور (که ارتباط نزدیکی با تقاضای برق دارد) از سوی دیگر، این موضوع را حساس‌تر کرده است. علاوه بر این با توجه به ماهیت علت و معلولی بخش انرژی و تأثیر متقابل متغیرها در این بخش و نیز پیچیدگی‌های حاکم بر آن لازم است تا به کمک ابزارهایی سیاست‌های اتخاذ شده در این بخش مورد بررسی قرار گیرد. در اینجا با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا مدلی ارائه شده که به کمک آن می‌توان اثرات ناشی از نوسان در بخش تولید، تقاضا و قیمت را بر روی تلفات در شبکه انتقال و توزیع برق بررسی نمود.

هدف اصلی از اجرای این مدل ترویج رفتار و الگوی مصرف انرژی پایدار است. استفاده‌کنندگان از این الگو می‌توانند تأمین‌کنندگان انرژی، مقامات منتخب مردم و سایر ذینفعان

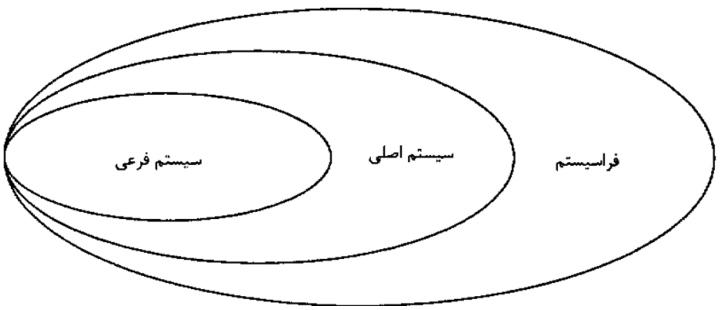
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

(مایل به کاهش تأثیرات منفی منابع انرژی فسیلی بر روی محیط‌زیست) باشند. از دلایل دیگر استفاده از این مدل برای استفاده‌کنندگان کاهش ریسک این مدل در مدت زمان دستیابی به آن است.در این مقاله تلفات در شبکه انتقال و توزیع برق شناسایی و میزان تقاضا در بخش‌های مختلف (کشاورزی، صنعتی، خانگی و ...) بررسی شد. همچنین با برآورد دقیق میزان تولیدات در بخش‌های خصوصی و غیرخصوصی میزان این تلفات تعیین شد. درواقع هدف استخراج نتایجی است که بتوان بر اساس آن میزان کمبود برق را کاهش داد و توازنی بین مصرف و توزیع آن ایجاد نمود. سئوال اصلی این پژوهش چگونگی تأثیر گذاری فاکتورهای اصلی بر تلفات مزبور در انرژی برق است. در این بخش آمار و اطلاعات مربوط به سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۳ جمع‌آوری شد. تمامی آمار و اطلاعات مورد نیاز از ترازنامه اقتباس شد (آمارنامه تفضیلی، ۱۳۹۳ و ترازنامه انرژی ایران، ۱۳۹۳). همچنین از تکنیک شبیه‌سازی پویا (در نرم افزار ونسیم) و روش اقتصادسنجی در نرم‌افزار ایویوز استفاده شد. برای مقایسه مدل اقتصادسنجی و مدل سیستم دینامیک از معیار جذر میانگین مربعات خطا یا RMSE استفاده‌شد. می‌توان گفت، نسبت به مقالات گذشته، بررسی در خصوص تناسب بین سمت توزیع و سمت مصرف در راستای تلفات توزیع مطالعه‌ای صورت نگرفته بود.

انتخاب متغیرها اولین قدم در راه ساختن مدلی است که نتایج شبیه‌سازی آن مدل بتواند ابهام را برطرف کند. مهمترین نکته‌ای که در رابطه با متغیرهای اصلی مسأله وجود دارد این است که آنها باید ارتباط محکمی با ابهام مشخص داشته باشند. همچنین هر یک از این متغیرها باید دارای آمار و اطلاعات دقیقی باشد. اطلاعات و آمار مورد نیاز این مقاله از ترازنامه سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ استخراج شده است. یکی از موارد مهم می‌تواند برق دزدی باشدکه متأسفانه آمار دقیقی در دسترس محققین نیست. ضمناً وقتی می‌گوییم بررسی تلفات و پیش‌بینی آن تلویحاً همه عوامل فی‌مابین که موجب تلفات در شبکه شده است مقدار آن نمایان شده است از جمله برق‌دزدی و لذا در پیش‌بینی ایرادی بوجود نمی‌آید. همچنین می‌توان n متغیر به مدل اضافه نمود ولی تا حد ممکن می‌خواهیم با مدلی خلاصه‌تر بتوانیم به بهترین نتیجه برسیم. در واقع ما یک سیستم فرعی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

خلاصه شده برای حل ابهام ایجاد شده طراحی نموده‌ایم. متغیرهایی که در مدل سیستم دینامیک (سیستم علی و معلولی) مورد نظر قرار گرفت شامل متغیرهای اصلی و تأثیرگذار در سیستم تعریف شده بود. محدوده و مرزهای یک سیستم، قراردادی است، زیرا هر سیستم می‌تواند جزئی از یک سیستم بزرگ‌تر باشد که در این صورت سیستم بزرگ‌تر را سیستم اصلی و سیستم‌های تشکیل دهنده آن را سیستم‌های فرعی می‌نامند. به همین ترتیب سیستم‌های فرعی نیز می‌توانند از سیستم‌های کوچک‌تر به‌وجود آمده باشند.



شکل ۱. نمایی از سیستم اصلی ، فرعی، فرا سیستم (مأخذ: کتاب سیستم دینامیک)

بعضی مسائل و موضوعات صنعتی –اجتماعی و مدیریتی پیچیدگی دارند و با فرضیات ساده بینشی و مدیریتی قابل حل نمی‌باشند. نظریه سیستم‌های پویا روشی برای مدل‌سازی و بررسی عوامل یک سیستم و در نهایت پیدا کردن راه حل مناسب است. خلاصه‌سازی عبارت است از صرف‌نظر کردن از جزئیات در رابطه با موضوعی که فقط کلیت آن در مسأله اهمیت دارد. پس در رابطه با خلاصه‌سازی باید اول جزئیات بی‌اهمیت را کنار بگذاریم و دوم جزئیات مهم را کنار نگذاریم.

مدل‌های ARMA و ARIMA ، مدل‌های خطی- تصادفی سری‌های زمانی در اقتصاد سنجی می‌باشند که برای سری‌های زمانی مانا و نامانا کاربرد دارند. پس باید اطلاعات دقیق برای

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

سری‌های زمانی در دسترس باشد. پس هر متغیری را نمی‌توان وارد مدلسازی نمود. این مدل‌ها مدل‌های علی و معلولی نیستند، بلکه مدل‌های پیش‌بینی از نوع خودرگرسیون هستند.

۲. پیشینه تحقیق

با مرور ادبیات انجام شده پیرامون موضوع، مشخص می‌گردد که عموماً تحقیقات انجام شده به‌صورت خیلی کلی، ساده‌سازی شده و یا به تنهایی به زیر بخش مصرف و یا به تنهایی به زیر بخش توزیع برق پرداخته‌اند و این دو بخش را هم‌زمان با هم مورد بررسی قرار نداده‌اند. در این بخش پیشینه تحقیق هم در زمینه سیستم دینامیک و هم در زمینه مدل‌سازی اقتصادسنجی آورده می‌شود.

فورد (۱۹۹۷) مروری بر تحقیقات سیستم دینامیکی انجام داده و نخستین کاربرد متدولوژی سیستم دینامیک در صنعت برق آمریکا را به تصویر کشیده است. ایشان در تحقیقی دیگر در سال۱۹۹۹ توان در ساخت نیروگاه‌ها را برای نمایش علل به وجود آمدن نوسان در عرضه برق بررسی کرده و نشان می‌دهد که نوسانات با استفاده از مقدار ثابت پرداخت بابت ظرفیت کاهش می‌یابد. ایشان در سال (۲۰۰۱) ساخت نیروگاه در کالیفرنیا را شبیه‌سازی نموده است.

بیانکو (۲۰۰۹) در مقاله‌ای با عنوان «پیش‌بینی مصرف برق در ایتالیا با استفاده از مدل رگرسیون خطی» به تخمین تابع تقاضای برق در کشور ایتالیا پرداخته است. طبق نتایج این تحقیق مقدار درآمد سرانه، قیمت برق در سال مورد مطالعه و همچنین با سه دوره تأخیر و نیز میزان مصرف برق با سه دوره‌ی تأخیر در این تابع مؤثر هستند. در این تحقیق کشش قیمتی مصرف به دو صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت محاسبه شده است و به طور کلی کشش درآمدی بیشتر از کشش قیمتی است.

وارف ال نجار (۲۰۱۳) در پایان‌نامه خود تحت عنوان «شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی برای تقاضای انرژی در شهر پوئبلو کانتی» به شبیه‌سازی تقاضای انرژی این شهر با استفاده از رویکرد سیستم دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم پرداخته است. داده‌ها و شبیه‌سازی انجام شده برای سال‌های ۲۰۲۰ – ۲۰۰۲ می‌باشد. هدف اصلی این پایان‌نامه توسعه یک مدل جامع سیستم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

دینامیکی برای حمایت از شبیه‌سازی تقاضای انرژی در یک شهر و عوامل مؤثر بر آن است. به عنوان نتیجه اصلی از این پایان نامه می‌توان با استفاده از سیستم‌های دینامیکی مدلی را برای برآورد تقاضای انرژی در این شهر پیش‌بینی کرد. از این طریق و بهینه‌یابی‌های مرتبط با مدل راه‌هایی را برای توسعه و بهبود کسب و کار، ارتقاء جذابیت منطقه، بهبود مخابرات، بهبود وضعیت حمل و نقل، و... یافت.

شاه محمدی و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله‌ای با عنوان «سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای ارزیابی اثرات مکانیزم افزایش تعرفه: مدل‌سازی دینامیکی تولید برق در مالزی» از روش سیستم‌های پویا برای ارزیابی تغییرات نرخ تعرفه و تأثیرات آن در بخش برق (تولید، عرضه و تقاضا) استفاده کرده است. مالزی دارای پتانسیل فراوان منابع انرژی تجدید پذیر است. تغییر در تعرفه‌ها از سال ۲۰۱۱ در مالزی باعث شده استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید برق گسترش یابد. این مطالعه برای یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۳۰-۲۰۱۱) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه اجرای سیاست‌های مختلف ممکن است منجر به رضایت گردد ولی کمبود بودجه منجر به افزایش اضافه بها بر روی قبض برق می‌گردد. با استفاده از مدل‌های سیستم‌های پویا و شبیه‌سازی، سیاست گذاران می‌توانند میزان افزایش اضافه بهای برق را مشخص نمایند.

سلمان احمد و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای تحت عنوان «استفاده از رویکرد پویایی سیستم در بخش مدل‌سازی برق: مرور» به نقش مهم برق در جامعه کنونی و همچنین اقتصاد آن پرداخته‌اند. به منظور ساده سازی برای تصمیم گیری و برنامه-ریزی در این بخش از مدل‌سازی سیستم‌های پویا و شبیه‌سازی استفاده شده است. داده‌ها به منظور شبیه‌سازی برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۰ است. زمینه‌های تحقیقاتی شامل مدل‌های توسعه یافته برای ارزیابی سیاست، گسترش ظرفیت تولید، ابزار مالی و مدیریت سمت تقاضا است. نقد و بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی سیاست و توسعه ظرفیت تولید دو موضوع مهم برای مدل سازی است. ابزارهای مالی به ارزیابی مکانیسم‌های مختلف برای حمایت از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر می‌پردازند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

صادقی و همکاران (۱۳۸۶)، به بررسی بازار عرضه انرژی الکتریکی ایران با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداخته‌اند. در این تحقیق با ارائه ساختار کلان برای تحلیل بازار برق و مدل‌سازی آن به تحلیل و بررسی تأثیرات متقابل برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر عرضه تقاضای انرژی الکتریکی در سه نوع فناوری تولیدی حرارتی، آبی و تجدید پذیر پرداخته‌شده است.

صمدی، شهیدی و محمدی (۱۳۸۷)، در مقاله‌ای تحت عنوان «تحلیل تقاضای برق در ایران با استفاده از مفهوم هم جمعی و مدل ARIMA (۱۳۸۸ – ۱۳۶۳)» با استفاده از مدل‌های هم جمعی و مدل ARIMA به پیش‌بینی تقاضای برق ایران پرداخته‌اند. نتایج حاصل از تحقیق، گویای این واقعیت است که واکنش مصرف کنندگان برق در ایران به تغییرات درآمد و قیمت کاملاً محدود است و بنابراین نیاز به طراحی مقررات اقتصادی در بازار برق ایران وجود دارد. همچنین پیش‌بینی های مربوط به تقاضای برق حاکی از رشد بسیار بالای مصرف برق در ایران است.

موسوی پوری (۱۳۸۸) در مقاله خود تحت عنوان محاسبه تلفات شبکه‌های توزیع نیروی برق به‌صورت دوره‌ای در راستای بهینه‌سازی تلفات شبکه‌های توزیع، تخمین و محاسبه میزان تلفات در شبکه به بررسی عوامل تأثیرگذار پرداخته است. بدیهی است بدون آگاهی از میزان تلفات نمی‌توان راهکارهای صحیح را برای کاهش آن طراحی و اجرا نمود . دراین مقاله سعی گردیده است با استفاده از دو روش میزان واقعی انرژی تحویلی و انرژی فروخته شده به مشترکین به تفکیک دوره تخمین زده شود و ضمن محاسبه درصد تلفات واقعی پس از اتمام هر دوره فروش، دو روش محاسباتی مقایسه گردند و از آنجا، برنامه‌ریزی لازم برای کاهش تلفات انجام و فیدبک مربوطه را اخذ نمود.

نهاوندی و نجف زاده (۱۳۹۰)، در مقاله‌ای با عنوان «مقایسه دو رویکرد توسعه سمت عرضه انرژی الکتریکی در مقابل مدیریت سمت تقاضا با روش سیستم دینامیک» به بررسی این دو مبحث و شبیه‌سازی آن توسط سیستم دینامیک پرداخته‌اند. داده‌های مدل برای سال‌های ۱۳۷۶ –۱۳۸۷ می‌باشد که از ترازنامه انرژی اقتباس شده است. در این مقاله با استفاده از رویکرد سیستم‌های دینامیکی مدلی ارائه شده که به کمک آن می توان اثرات ناشی از دو جهت گیری توسعه بخش عرضه و کنترل سمت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

تقاضا را باهم مقایسه نمود. نتایج حاصل از اجرای این مدل حاکی از آن است که دینامیک سرمایه گذاری و روند احداث همه فناوری ها در حالت مدیریت بخش تقاضا، شرایط بهتری را نسبت به حالتی که گرایش به سمت توسعه بخش عرضه است، ایجاد می کند.

منظور و رضایی(۱۳۹۲)، در مقاله «اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر قیمت برق در بازار تجدید ساختاریافته: رویکرد پویایی سیستمی» به بررسی تأثیر تغییر قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه ها بر قیمت بازار برق پرداخته‌اند و روند تغییرات آن را با شرایط عدم اجرای طرح تحول اقتصادی مقایسه می کنند. است. در این مدل می توان تأثیر تغییر متغیرهای سیاستی در سناریوهای مختلف بر روند تغییرات قیمت را شبیه سازی نموده و تصمیمات لازم را اتخاذ کرد. هدف این مقاله بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها بر میزان افزایش قیمت برق در بازار است. این مدل دارای بخش‌های تقاضا، قیمت و تولید است.

حجت و همکاران(۱۳۹۲) در مقاله‌ای تحت عنوان« تخصیص تلفات انتقال در محیط ترکیبی قراردادهای دوجانبه- حوضچه توان با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی » به بررسی تلفات در طرفین عرضه و تقاضا پرداخته‌اند. به دلیل طبیعت غیرخطی مسأله و همچنین محاسبات پیچیده و اهمیت پارامتر زمان وجود یک روش سریع و دقیق مورد نیاز است. در این مقاله از روش شبکه‌های عصبی با استفاده از الگوریتم بهبود یافته روش جدیدی برای تخمین تلفات تخصیصی شبکه معرفی شده است.

اکبری و بندرخانی (۱۳۹۴) در مقاله‌ای تحت عنوان «شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای برق خانگی با استفاده از مدل‌های ARIMA، ANFIS و GMDH-NN» به مطالعه موردی تقاضای استان مرکزی پرداخته‌اند. این مقاله به مقایسه کارایی مدل خطی ARIMA با مدل‌های غیرخطی شبکه عصبی GMDH و ANFIS در شبیه‌سازی تقاضای برق می‌پردازد و به دنبال معرفی بهترین مدل به منظور پیش‌بینی تقاضای برق در بخش خانگی استان مرکزی است. بدین منظور از سری داده‌های سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۵۷ برای آموزش و شبیه‌سازی و از داده‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۱ به منظور آزمون و اعتبارسنجی استفاده شده است. نتایج نشان دهنده کارایی بالا و دقت زیاد مدل های غیرخطی نسبت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

به مدل خطی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای برق است. در میان مدل‌های غیرخطی نیز شبکه عصبی GMDH در مقایسه با ANFIS دارای کارایی بالاتری در مدل‌سازی است و به عنوان بهترین مدل غیرخطی به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای برق در بخش خانگی معرفی شده است. با توجه به کارایی بالای شبکه عصبیGMDH، پیشنهاد می‌شود از این روش به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی تقاضای برق در سایر بخش‌های اقتصادی نیز استفاده گردد.

قهرمانی(۱۳۹۵) در مقاله‌ای تحت عنوان " تحلیل و بررسی روند تلفات انرژی در شبکه تحت مدیریت برق منطقه‌ای زنجان" به برررسی تلفات انرژی در صنعت برق پرداخته است. یکی از پارامترهای مهم در مطالعات اقتصادی شبکه قدرت انتقال انرژی، مقدار تلفات انرژی می‌باشد. در محاسبه مقدار تلفات انرژی عوامل بسیاری مؤثر بوده که به همین دلیل تعیین مقدار دقیق آن در شبکه‌های الکتریکی با دقت خوبی میسر نمی‌باشد. در عمل برای محاسبه تلفات انرژی در یک شبکه مشخص، روش‌هایی از قبیل مدلسازی (استفاده از ضریب تلفات بر حسب ضریب بار)، محاسباتی (محاسبات با در نظر گرفتن تلفات اجزاء شبکه) و اندازه‌گیری (استفاده از کنتور و محاسبه تلفات به روش تفاضل انرژی) به‌کار برده می‌شود. هدف این تحلیل مطالعه روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی برروی شبکه برق منطقه‌ای زنجان در جهت بررسی علت کاهش درصد تلفات انرژی سال ۱۳۹۴ نسبت به سال ۱۳۹۳ می‌باشد.

۳. مبانی نظری

امروزه سیستم دینامیک در سراسر بخش‌های خصوصی و دولتی برای تجزیه‌وتحلیل و طراحی سیاست‌ها بکار گرفته می‌شود (استرمن، ۱۳۹۲). البته عناوین مختلفی در این زمینه وجود دارد که ازجمله می‌توان به رویکرد سیستمی و دینامیک سیستم و تحلیل سیستم‌ها اشاره نمود. روش تحلیل مبتنی بر روش سیستم‌های پویا است و هدف اشاعه ی تفکر سیستمی پویا است که در آن روند تغییرات متغیرها در بخش عرضه متأثر از تغییرات تقاضا مورد مطالعه قرار می‌گیرد، در واقع تلفات انرژی برق مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. برای تحلیل از نرم‌افزار ونسیم استفاده شد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

در این تحقیق که برای بخش انرژی (برق) در ایران در انجام شد، در ابتدا به صورت کلان به موضوع نگاه شد و پس از ارائه یک مدل کلی برای بررسی رفتار و برهم کنش متغیرهای کلان در زنجیره انرژی الکتریکی ایران با استفاده از رویکرد سیستم دینامیک، با استفاده از اطلاعات موجود به بررسی وضعیت عرضه و تقاضای انرژی برق در ایران و همچنین تلفات ایجاد شده با استفاده از مفهوم بهینه یابی عملکرد سیستمی پرداختیم.

بر اساس اطلاعات موجود در ترازنامه کل تولید برق از مجموعه وزارت نیرو، بخش خصوصی، صنایع بزرگ و واردات تأمین می گردد. بخش‌بندی تولیدات وزارت نیرو شامل بخش بخاری، دیزل، گاز، ترکیبی، خورشیدی، بادی، اتمی، بیوسوز و برق‌آبی است. بخش‌بندی تولیدات بخش خصوصی شامل بخش بخاری و گازی است. بخش‌بندی تولیدات بخش صنایع بزرگ شامل بخش بخاری و گازی است. در نهایت این بخش بندی‌ها وارد بخش تولید برق در بخش حرارتی می‌شود و با کل واردات جمع شده و کل تولید برق را تشکیل می‌دهند. در این سمت مصرف برق شامل مصرف برق و بخش صادرات است. مصرف برق خود شامل زیر بخش های صنعت، خانگی، کشاورزی، عمومی، تجاری، سایر مصارف و حمل ونقل است. به این شکل سمت تقاضا و عرضه برای محاسبه تلفات انرژی برق به‌دست می‌آید.

بهینه‌یابی عملکرد سیستمی بدون آگاهی از ساختار سیستم قابل دسترسی نیست. به عنوان مثال یک بنگاه درباره‌ی قیمت حداکثر کننده‌ی سود یا ترکیب نیروی کار و سرمایه حداقل کننده هزینه آگاهی ندارد. برای این منظور، بنگاه در پی شناخت مسیر بهینه و نقطه بهینه سیستم در شرایط واقعی است. فرآیند شناخت نقطه بهینه در اصطلاح صعود از تپه نام دارد (نلسون و وینتر[1]، ۱۹۸۲).

صعود از تپه، تکنیک بهینه‌یابی است. برای مدل کردن صعود از تپه، وضعیت بهینه بازار به وضعیت کنونی آن ارتباط داده می‌شود. عوامل برونزای متعددی که مسیر صحیح را نشان

1. Nelson & Winter

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

می‌دهند وضعیت فعلی بازار را تعدیل و تصحیح می‌کنند تا در نهایت به هدف یا وضعیت مطلوب برسد. ساختار عمومی این فرآیند به شرح زیر است.

$$SS = \frac{Y^* - Y}{T} \quad (۱)$$

در رابطه فوق SS تغییر در وضعیت سیستم، *Y متغیر مبنا و Y مقدار واقعی سیستم است. تفاوت مقدار مطلوب از مقدار واقعی در طول دوره تعدیل یک سیستم، بازخورد منفی خطی است. در صورت نبود دیگر متغیرهای جریان، سیستم به صورت نمایی به سمت هدف قابل تعدیل است.

$$Y \times (E_1 y \times E_2 y \times \ldots \times E_n y) = y^* \quad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق Ey اثر متغیر X_i بر متغیر مطلوب *y است. متغیر y از نوع متغیر جریان یا متغیر کمکی مربوط به یک متغیر جریان است. T مدت زمان تعدیل است. زمان تعدیل، متوسط زمان مورد نیاز برای رسیدن وضعیت موجود به وضعیت مطلوب است. در فرمول ۲ ، متغیر واقعی y با ضرب در عوامل مختلف از متغیر X_i با متغیر هدف یا مطلوب *y ارتباط داده شده است. فرمول۲ از فرمول ۱ و روش نرمال‌سازی[1] استخراج شده است. در صورت ثابت بودن اثر عوامل بیرونی بر وضعیت مطلوب مدل بازخورد خطی مرحله‌ی اول سیستم به صورت زیر است.

$$Y^* = ky = \frac{(k-1)y}{T} \quad (۳)$$

۱. اغلب توابع غیرخطی با مقادیر مبنا یا نرمال نهاده‌های Xi به روش زیر قابل نرمال شدن است.

$$E_{iy} = f\left(\frac{X_i}{X^*}\right)^1$$

بر اساس نرمال‌سازی در صورت برابری نهاده‌های Xi یا مقدار آن، Y معادل مقدار مبنای خود خواهد شد. در رابطه بالا X و Y هر دو بدون واحد هستند. می‌توان اثبات کرد که رابطه ۲ این پروژه از رابطه ۱ حاصل شده است.

$$E_{iy} = f\left(\frac{X_i}{X^*}\right)^{e_i}$$

در رابطه‌ی فوق ei کشش قیمتی y نسبت به مقادیر نرمال شده است. برای اینکه مدل به راحتی تخمین زده شود از رابطه ۲ لگاریتم گرفته شده است. به این طریق تابع غیرخطی به خطی تبدیل شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

در رابطه‌ی فوق با فرض K>1 باشد، سیستم با نرخ $\frac{k-1}{T}$ رشد نمایی مثبت و با فرض K<1 سیستم دارای رشد منفی نمایی است. نقطه تعادلی از پیش قابل تعیین نیست و هنگامی که مقدار y به حدی برسد که فشار برای رسیدن به هدف حذف شود، سیستم به تعادل می‌رسد.

همچنین مدل‌های اقتصادسنجی نیز در مطالعات تقاضای انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی تنها مختص آنها نیستند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تعامل بین بخش انرژی و سایر بخش‌های اقتصادی را تجزیه و تحلیل نمود. در مدل‌های اقتصادسنجی هیچ‌گاه فناوری و آثار آن بر تقاضای انرژی، به‌طور صریح مورد اشاره قرار نمی‌گیرد.

در علم آمار و پردازش سیگنال مدل خود رگرسیون میانگین متحرک که به مدل آرما (ARMA) مشهور است و گاهی به آن مدل باکس جنکینز نیز می گویند، مدلی است که معمولاً برای سنجش داده‌های سری زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای داده‌های سری زمانی به صورت Xt، مدل آرما ابزاری برای مطالعه و شاید پیش‌بینی مقادیر آتی چنین سری‌هایی است. این مدل شامل دو بخش خودرگرسیون[1] به اختصار (AR) و میانگین متحرک[2] به اختصار (MA) است. بنابراین مدل آرما را در ادبیات علمی به صورت ARMA (p,q) نمایش می‌دهند. که در آن p مرتبه مدلAR و q مرتبه مدل MA است (گجراتی،۱۳۹۱).

۴. مدل تحقیق و روش برآورد

قبل از اجرای مدل پارامترهای مورد نظر با توجه به داده‌های تاریخی صنعت برق کشور از اطلاعات ترازنامه انرژی ایران استخراج شده است. برای شبیه‌سازی و اجرای این مدل پس از تبدیل یک مدل ذهنی به حلقه‌های علی و سپس نمودار جریان، از نرم‌افزار ونسیم استفاده می شود. معادلات ریاضی و ارزش هر پارامتر در این برنامه وارد شده و سپس تجزیه و تحلیل

1. Autoregressive
2. Moving Average

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

مدل انجام و نتایج جمع‌آوری می‌شود. همچنین در بخش مقایسه تلفات انرژی برق از مدل‌سازی ARMA در نرم‌افزار ایویوز استفاده شده است.

۴-۱. کشش قیمتی عرضه[۱]

کشش قیمتی عرضه در واقع بیانگر عکس‌العمل تولیدکنندگان به نوسانات قیمت در بازار است. ضریب ذخیره گردان[۲] و غیرگردان[۳] شبکه به عنوان کشش قیمتی عرضه استفاده شده است. براساس استاندارد تعیین ضریب ذخیره‌گردان در هر ساعت یا هر دوره‌ی زمانی مقدار ذخیره حداقل به اندازه بزرگ‌ترین واحد نیروگاهی لازم است. دلیل این مسأله آن است که اگر به هر دلیلی یکی از واحدها از مدار خارج شد، بهره‌بردار شبکه با استفاده از واحدهای ذخیره، تعادل بازار را حفظ نماید. در شبکه‌ی برق ایران بزرگ‌ترین واحد نیروگاهی ۹۵۶ مگاوات است.[۴] بنابراین حداقل ۹۵۶ مگاوات ظرفیت ذخیره گردان در هر ساعت در شبکه لازم است. با توجه به آمار منتشرشده در سایت مدیریت شبکه، ضریب ذخیره گردان ۰/۰۱۶ محاسبه و گزارش شده است. در کوتاه‌مدت کشش عرضه حداکثر به همین میزان در نظر گرفته شده است.

۱. برخی از داده های تحقیق منجمله کشش قیمتی عرضه و تقاضا از مقاله رضایی، حسین: منظور، داوود "بررسی اثر اصلاحات قیمت سوخت مصرفی نیروگاه ها و مالیات بر ارزش افزوده بر تقاضای برق در کشور: رویکرد پویایی سیستمی"، استخراج شده است.

۲. تفاضل توان قابل تولید و توان تولید شده واحدهای در مدار در زمان پیک است.

۳. توان قابل تولید واحد یا واحدهای خارج از مدار که آماده بهره‌برداری است.

۴. شرکت مدیریت شبکه برق ایران، معاونت راهبری، گروه ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۳.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

۴-۲. کشش قیمتی تقاضا[۱]

دوره زمانی و میزان دسترسی به انرژی‌های جانشین از عوامل مؤثر در کشش قیمتی تقاضا است. براساس مطالعات انجام شده مصرف‌کنندگان در کوتاه‌مدت، در برابر تغییرات قیمت امکان عکس‌العمل کمتری دارند به همین دلیل کشش قیمتی تقاضای برق در کوتاه‌مدت بسیار ناچیز است. در بلندمدت با جایگزین کردن فن‌آوری‌های جدید، استفاده از کالاهای جانشین و تغییر الگوی مصرف، امکان عکس‌العمل مصرف‌کنندگان در برابر تغییرات قیمت بیشتر است. مطالعات انجام شده در کشور به طور عمده، بخش‌های مختلف تقاضا به ویژه تقاضای خانگی و صنعتی را بررسی کرده‌اند. کشش قیمتی کل تقاضای برق ۰/۸۶- (سهیلی، ۱۳۸۱) و کشش قیمتی تقاضای بلندمدت در بخش‌های مختلف صنعت، کشاورزی، خانوار به ترتیب ۱/۴۲-، ۰/۶۹- و ۱/۳۶- (عسکری، ۱۳۸۰) استخراج شده است. در این تحقیق کشش قیمتی تقاضا در بازار برق در فضای تجدید ساختار شده ۰/۹- فرض شده است (مولایی، منظور و رضایی، ۱۳۹۱).

۴-۳. مقادیر مبنا[۲]

مقادیر مبنای Y^* و X_i^* می‌توانند ثابت یا متغیر باشند که بیانگر سطح تعادلی آن دو یا وضعیت بهینه سیستم یا مقادیر مطلوب درگذشته است. مقادیر مبنا می‌توانند مقادیر آن متغیر در یک سال مبنا باشند. در این تحقیق به دلیل اجرای مدل در فضای رقابتی، مقادیر بهینه عرضه، تقاضا و قیمت در بازار برق به عنوان مقادیر مبنا در نظر گرفته شده است. مقادیر مبنا برای قیمت، تقاضا و عرضه مطابق جدول زیر در نظر گرفته شده است.

---

۱. کشش قیمتی تقاضا از مقاله رضایی، حسین: مولایی، محمدعلی: منظور، داوود "فرآیند تعیین قیمت تعادلی در بازار برق ایران با رویکرد پویایی سیستمی"، استخراج شده است.

۲. مقادیر مبنا از مقاله رضایی، حسین: منظور، داوود "بررسی اثر اصلاحات قیمت سوخت مصرفی نیروگاه ها و مالیات بر ارزش افزوده بر تقاضای برق در کشور: رویکرد پویایی سیستمی"، استخراج شده است..

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

جدول ۱. مقادیر مبنا برای قیمت، عرضه و تقاضای برق در سال ۱۳۸۳

متغیر	واحد	مقادیر مبنا
قیمت	۱۵۱/۴۱	ریال بر کیلووات ساعت
عرضه‌ی کل	۱۶۹۰۸۶	گیگاوات ساعت
تقاضای کل	۱۲۴۴۶۱	گیگاوات ساعت

مأخذ: ترازنامه انرژی ایران سال ۱۳۸۳

در جدول فوق مقادیر مبنا که برای محاسبه وارد نرم‌افزار ونسیم شده، نشان داده می‌شود.

در جدول زیر مقادیر عرضه و تقاضا برای سال‌های **۱۳۹۳-۱۳۸۳** آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر عرضه و تقاضای برق در سال ۱۳۹۳-۱۳۸۳

سال	مجموع کل تولیدات (عرضه)	مجموع کل مصرف (تقاضا)
۱۳۸۳	۱۶۹۰۸۶/۱	۱۲۶۲۹۹
۱۳۸۴	۱۸۰۱۷۲/۶	۱۳۵۶۵۷/۲
۱۳۸۵	۱۹۵۲۲۲/۸	۱۴۷۳۵۶/۲
۱۳۸۶	۲۰۵۸۲۸/۳	۱۵۴۸۴۹
۱۳۸۷	۲۱۶۲۱۴/۲	۱۶۵۳۲۰/۴
۱۳۸۸	۲۲۳۴۳۸/۱	۱۷۴۵۹۰/۷
۱۳۸۹	۲۳۵۹۷۴/۲	۱۹۰۸۸۸/۸
۱۳۹۰	۲۴۳۷۰۷/۷	۱۹۲۵۷۳/۶
۱۳۹۱	۲۵۸۱۷۲/۴	۲۰۵۱۷۷/۶
۱۳۹۲	۲۶۶۱۴۰/۲	۲۱۴۸۰۰/۲
۱۳۹۳	۲۷۸۲۰۸/۷	۲۲۹۳۱۲/۷

مأخذ: ترازنامه انرژی ایران سال **۱۳۹۳-۱۳۸۳**

۵. شبیه‌سازی مدل

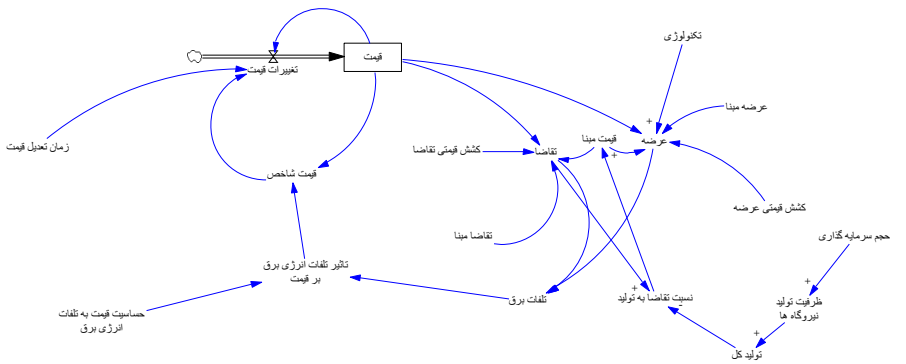
فرمول محاسبه تلفات انرژی برق (نسبت تقاضا به عرضه) به شکل زیر تعریف گشته است.

$$\text{تلفات انرژی برق (نسبت تقاضا به عرضه)} = \frac{\text{تقاضای برق}}{\text{عرضه‌ی برق}} \qquad (۶)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

اگر عبارت فوق مساوی یک گردد یعنی عرضه و مصرف برابر است و تلفاتی وجود ندارد. در غیراینصورت این تساوی از یک بیشتر یا کمتر می‌گردد.

نمودار جریان این سیستم به شکل زیر ترسیم شده است.



شکل ۲ نمودار جریان تحلیل تلفات انرژی برق

شکل (۲) از چهار بازخورد تشکیل شده است. در روابط قیمت دو حلقه بازخورد منفی و مثبت وجود دارد. بازخورد منفی، فاصله بین قیمت مطلوب و قیمت واقعی را کاهش می‌دهد. در واقع قیمت تعادلی وابسته به وضعیت کنونی قیمت است و حلقه‌ی بازخورد مثبت، قیمت را تعیین می‌کند.

عرضه (توزیع) و تقاضا (مصرف) نسبت به قیمت دو بازخورد منفی ایجاد می‌کنند. حلقه سوم حلقه بازخورد مثبت توزیع (عرضه) است. زمانی که قیمت افزایش می‌یابد، عرضه انرژی الکتریکی افزایش یافته، در نتیجه تلفات برق کاهش می‌یابد. حلقه چهارم، حلقه بازخورد منفی تقاضا است. با افزایش قیمت، تقاضا کاهش می‌یابد و به دنبال آن تلفات برق کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تا اثر تلفات برق بر قیمت کاهش یافته و در نتیجه قیمت شاخص کاهش یابد. کاهش قیمت شاخص سبب کاهش تغییرات قیمت و در نهایت کاهش قیمت می‌شود. تلفات برق در بازار برق بلافاصله به تغییرات قیمت عکس‌العمل نشان می‌دهند. به دلیل ماهیت خاص این حامل انرژی و عدم امکان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

ذخیره‌سازی آن در مقیاس زیاد تغییر در موجودی انبار بی‌معنا است. در نتیجه، این مدل با جهش یا فروپاشی[1] روبه‌رو نیست. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات تقاضا تبعی از عوامل قیمتی و عوامل حقیقی در اقتصاد است. قیمت تأثیر منفی روی تقاضا دارد. افزایش تقاضا سبب افزایش تلفات انرژی برق و در نتیجه باعث افزایش قیمت بازار برق می‌گردد. افزایش قیمت بازار برق تعادلی به نوبه خود کاهش تقاضا را موجب می‌شود.

انرژی الکتریکی در افزایش رفاه و توسعه اقتصادی کشورها سهم انکارناپذیری دارد. به علت ماهیت ویژه این حامل انرژی و همچنین عدم امکان ذخیره‌سازی در حجم بالا، بازار برق از حساسیت بالایی برخوردار بوده است. صعود از تپه یک تکنیک بهینه یابی است. برای مدل کردن صعود از تپه، وضعیت بهینه بازار به وضعیت فعلی آن ارتباط داده می‌شود. وضعیت فعلی بازار توسط عوامل برونزای متعددی که مسیر صحیح را نشان می‌دهند تعدیل و تصحیح می‌شود تا در نهایت به هدف یا وضعیت مطلوب برسد. هنگامیکه قیمت تعادلی بازار نامعلوم است، عاملان بازار قیمت بهینه را به قیمت کنونی بازار ارتباط می‌دهند و این تلفات را تعدیل می‌کنند.

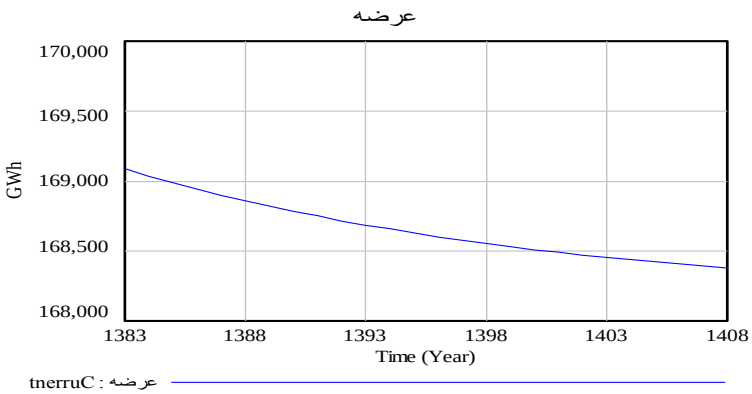
سطح قیمت مبنا تأثیری مثبت (با میزان سرمایه‌گذاری) بر روی ظرفیت تولیدی نیروگاه‌ها دارد. قیمت انتظاری، هزینه‌های عملیاتی و ضریب بهره برداری نیروگاه‌ها از جمله عوامل مؤثر بر پیش‌بینی میزان سرمایه‌گذاری در این صنعت است. همان‌طور که در نمودار مشخص شده است حجم سرمایه‌گذاری رابطه مستقیم با ظرفیت نیروگاه‌ها و افزایش حجم تولید دارد که این موضوع رابطه مستقیم با قیمت مبنا دارد که این قیمت مبنا همان‌طور که در نمودار مشهود است با تلفات برق دارای ارتباط است. در این مقاله چون بررسی بر روی تلفات انرژی برق (شکاف) می‌باشد این متغیر به عنوان یک متغیر فرعی در نظر گرفته شده و تأثیر آن در مقاله به صورت موردی بررسی نشده است و داده‌ها و نتایج حاصل تنها از روی کشش قیمتی عرضه و تقاضا به

1. Overshoot and Oscillation

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

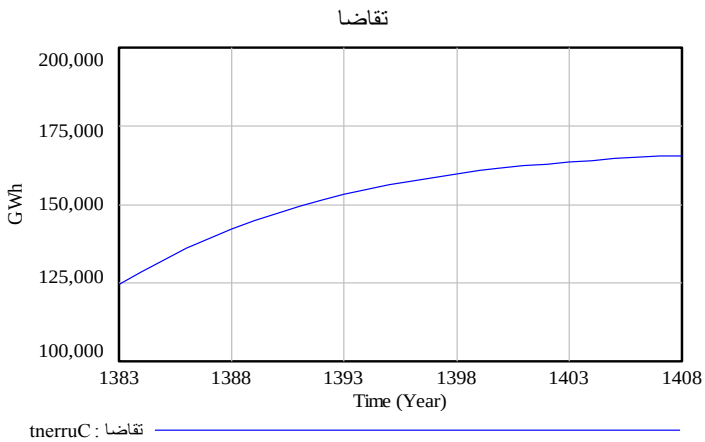
دست آمده است. هم چنین عرضه برق تحت تأثیر مثبت تکنولوژی در حال تغییر بوده است و لذا در مدل طراحی و تأثیر آن اندازه‌گیری شد.

پس از وارد کردن اطلاعات در مدل نمودار عرضه به شکل زیر به دست آمد.



نمودار ۱. عرضه انرژی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی الگو در نمودار ، میزان عرضه تقریباً روندی نزولی را طی می‌کند. این تغییر به دلیل محدودیت‌های تولید است که باعث می‌شود حجم تولید انرژی کاهش یابد. پس از وارد کردن اطلاعات در مدل نمودار تقاضا به شکل زیر به دست آمد.

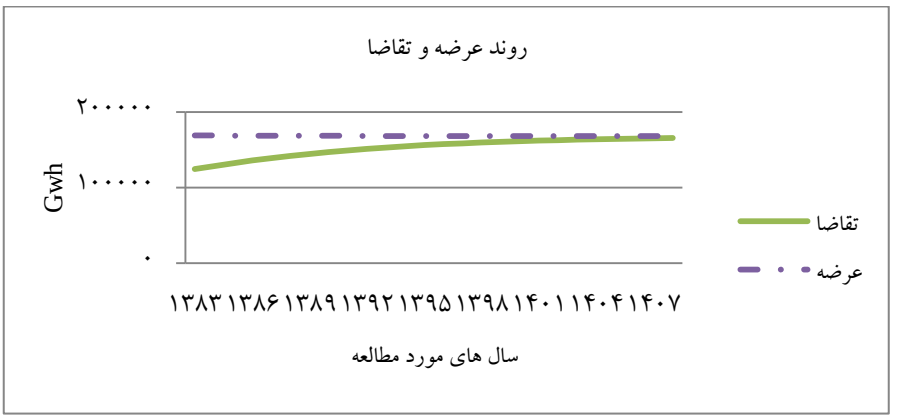


نمودار۲. روند تقاضا

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

شکل فوق روند تقاضا در طی این دوره نمایش می‌دهد. کشش مصرفی خانوارها نسبت به بخش صنعت بیشتر بوده و با افزایش هزینه انرژی، خانوارها نسبت به مصرف انرژی کنترل بیشتری دارند. اما بخش صنعت برای کاهش مصرف انرژی خود مجبور است که نسبت به تغییر تکنولوژی اقدام نماید که این موضوع به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری کلان، در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نخواهد بود. لازم به ذکر است که رفتار مصرف‌کنندگان در بلندمدت به سمت جانشینی انرژی و تغییر تکنولوژی برای کاهش مصرف آن خواهد بود.

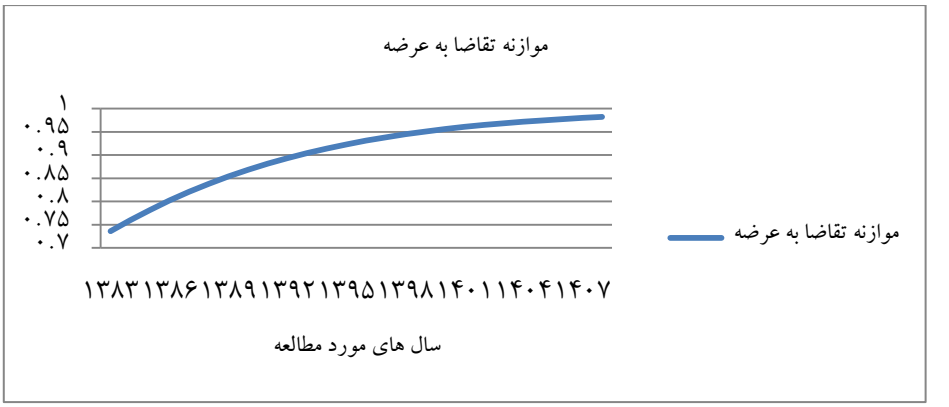
بر مبنای مدل فوق به روش سیستم پویا شبیه‌سازی انجام شد که خروجی نرم افزار ونسیم در شکل زیر بصورت روند عرضه و تقاضا تا سال ۱۴۰۸ را مشاهده می‌کنید.



نمودار۳. روند عرضه و تقاضا

در نمودار۳ روند عرضه (توزیع) و تقاضا (مصرف) از سال ۱۳۸۳ تا پایان سال ۱۴۰۸ مشاهده می‌گردد. روند عرضه کاهشی ولی با شیب ملایم، ولی روند تقاضا افزایشی است. با توجه به فرمول تعریف شده در سیستم شبیه‌سازی از نسبت تعریف شده بین این دو متغیر تلفات انرژی برق به دست می‌آید که در نمودار زیر ترسیم شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]



نمودار ۴. تلفات انرژی برق

همان‌طور که مشاهده می‌گردد تلفات انرژی برق با گذشت زمان به عدد یک نزدیک شده است و این موضوع نشان‌دهنده کاهش تلفات شبکه توزیع محصول بوده است. اعداد به صورت نسبت هستند به همین دلیل واحد ندارد.

۵-۱. اعتبارسنجی مدل

پس از شبیه‌سازی سیستم به اعتبارسنجی مدل پرداخته‌ایم که به شرح زیر است.

در ابتدا آزمون رفتار مجدد انجام شده است. بدین منظور مقدار شبیه‌سازی شده سیستم را با مقدار واقعی آن برای سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۹۳ را در یک نمودار رسم می‌کنیم.

جدول ۳. مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی تلفات انرژی برق در سال ۱۳۹۳-۱۳۸۳

سال	شبیه‌سازی	واقعی	اختلاف مقدار شبیه‌سازی و واقعی
۱۳۸۳	۰/۷۴	۰/۷۵	-۰/۰۱
۱۳۸۴	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۰۱
۱۳۸۵	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۰۳
۱۳۸۶	۰/۸	۰/۷۵	۰/۰۵
۱۳۸۷	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۰۶
۱۳۸۸	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۰۶

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

سال	شبیه‌سازی	واقعی	اختلاف مقدار شبیه‌سازی و واقعی
۱۳۸۹	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۰۴
۱۳۹۰	۰/۸۷	۰/۷۹	۰/۰۸
۱۳۹۱	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۰۹
۱۳۹۲	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۰۸
۱۳۹۳	۰/۹	۰/۸۲	۰/۰۸

مأخذ: ترازنامه انرژی ایران سال ۱۳۹۳-۱۳۸۳ و یافته‌های تحقیق

نمودار ۵. آزمون رفتار الگو

این نمودار نشان می‌دهد که رفتار متغیرهای موردبررسی به خوبی شبیه‌سازی شده است و اختلاف کمی بین میزان شبیه‌سازی شده و واقعی مشاهده می‌گردد.به هر حال این نمودار مقادیر پیش‌بینی را نشان می‌دهد و همواره دارای خطا است و ممکن است با مقدار واقعی کمی فاصله داشته باشد. در ادامه که از شبیه‌سازی اقتصادسنجی و مدلسازی ARMA استفاده شده است دقت بالاتری از شبیه‌سازی این سیستم را نشان می‌دهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

سپس آزمون محاسبه میزان خطا، حداقل خطای مجذورات انجام شده است. بر اساس این شاخص هر چه میزان تفاوت بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده کمتر باشد به نتایج شبیه‌سازی بیشتر می‌توان اعتماد کرد. میزان خطا در این روش بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{\theta}(y_{T+i}^{s} - y_{T+i}^{a})^2} \quad (۷)$$

در این فرمول:

نتایج شبیه‌سازی الگو y_{T+i}^{s}

داده‌های واقعی الگو y_{T+i}^{a}

θ نشان‌دهنده تعداد مشاهدات است.

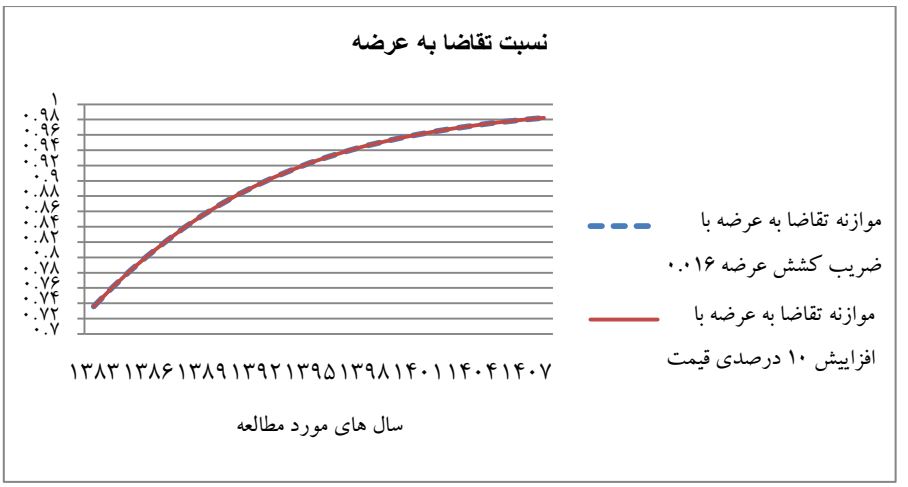
بر این اساس هر چه میزان RMSE به صفر نزدیک تر باشد به مفهوم خطای کمتر است و نزدیک بودن به ۱ نیز نشان‌دهنده خطای بالا است(استرمن،۲۰۰۲). میزان RMSE در نرم‌افزار اکسل محاسبه گردیده که عدد به دست آمده ۰/۰۵۷ است. این عدد به صفر نزدیک است که نشان دهنده دقت کافی در این شبیه‌سازی است.

سرانجام آزمون بازه زمانی انجام می‌گیرد. هدف از اجرای این آزمون اطمینان از تطبیق الگو با تغییرات دوره زمانی است. با توجه به اینکه معمولاً با افزایش دوره شبیه‌سازی، دقت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد، بنابراین دقت نتایج شبیه‌سازی ممکن است تحت تأثیر دوره زمانی قرارگرفته و کاهش یابد. برای اطمینان از عدم تحت تأثیر قرار گرفتن نتایج الگو از بازه زمانی، دوره زمانی را به طور مثال تا سال ۱۴۱۴ در نظر گرفتیم. نتایج شبیه‌سازی شده نشان دهنده صحت رفتار الگو در سال‌های آینده بود. به عبارتی دیگر با افزایش دوره زمانی ارتباط بین متغیرها یک‌باره دچار تغییرات شدید نخواهد شد.

۵-۲. بررسی سناریوها

در این بخش به بررسی یک سناریو برای شبیه‌سازی سیستم‌های پویا می‌پردازیم که عبارت است از:

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]



نمودار ۶. تلفات انرژی برق با افزایش ۱۰ درصدی قیمت

نمودار تلفات انرژی برق با افزایش ۱۰ درصدی قیمت را نشان می‌دهد. میزان کاهش تلفات بسیار کم است به‌طوری‌که نمودارها تقریباً روی هم رسم شده‌اند. افزایش قیمت تأثیر بسیار کمی بر روی تقاضا دارد و تقاضا با افزایش قیمت تفاوت محسوسی پیدا نمی‌کند ولی برای اینکه معنادار بودن و تأثیر این فرضیه بررسی گردد با استفاده از نرم‌افزار SPSS به بررسی این فرضیه پرداخته و مقایسه میانگین دو جامعه را از طریق آزمون تی استیودنت انجام می‌دهیم.

جدول ۴. آزمون t

معیار تصمیم	درجه آزادی	t آماره	فاصله اطمینان ۹۵٪ اختلاف		خطای استاندارد اختلافات	انحراف از معیار	میانگین	
			حد پایین	حد پایین				
۰/۰۳۲۷	۲۵	-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	اختلاف میانگین گروه اول و گروه دوم

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

نتایج آن بدین شکل است که تفاوت نمره میانگین آزمودنی‌ها از لحاظ تلفات انرژی برق در حالت افزایش ۱۰ درصدی قیمت برابر ۰/۰۰۰۰۱ - است، نسبت t مشاهده شده ۱- و در سطح P<۰/۰۰۳ قرار دارد که از لحاظ آماری معنی‌دار است. به بیان دیگر، افزایش ۱۰ درصدی در قیمت بر روی تلفات انرژی برق تأثیر مثبت دارد. با توجه به مقدار Sig= ۰/۰۳۲ که برای ضریب همبستگی ارائه شده است، فرضیه H_0 رد می‌شود. درنتیجه بین دو متغیر همبستگی معنی‌داری وجود دارد. . میانگین گروه دوم بیشتر و این موضوع نشان دهنده کاهش تلفات است.

۵-۳. مدل‌سازی ساختاری سیستم

در این بخش داده‌های مورد نظر که شامل عرضه و تقاضا است برای سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۷۳ وارد نرم‌افزار ایویوز شده است سپس با بررسی داده‌ها و محاسبه تلفات انرژی برق درون نمونه‌ای و برون نمونه‌ای انجام شده و حداقل خطای مجذورات نیز به دست آورده شده است که نتایج این محاسبات و شبیه‌سازی به شرح زیر است.

در ابتدا به بررسی مانایی داده‌ها می‌پردازیم. برای این کار بر روی داده‌هایی که برای تلفات انرژی برق به‌دست آورده‌ایم آزمون دیکی فولر تعمیم یافته انجام می‌دهیم. در این آزمون فرضیه‌های آماری عبارتند از:

H_0: داده‌ها نامانا هستند. (۱۰)

H_1: داده‌ها مانا هستند.

اگر قدرمطلق مقدار آماره ADF از قدرمطلق مقادیر بحرانی در سطح خطای یک درصد بیشتر باشد، فرضیه صفر مبنی بر وجود ریشه واحد در سری‌های زمانی رد می‌گردد و داده‌ها مانا هستند. نتایج به‌دست آمده به شرح جدول زیر است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

جدول ۵. مقدار آماره‌یADF

احتمال	مقدار آماره‌ی t	
۰/۰۱۴۹	-۳/۶۳۹۷۶۵	مقدار آماره‌یADF
	-۳/۶۳۱۵۱۱	سطح ۱٪
	-۳/۰۲۹۹۷۰	سطح ۵٪
	-۳/۶۳۵۱۹۴	سطح ۱۰٪

مأخذ: یافته‌های محقق

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که در تمامی سطوح مقدار ADF معنادار است. زیرا قدر مطلق آن از قدر مطلق مقادیر بحرانی بیشتر است. بنابراین متغیر تلفات انرژی برق مانا است.

بعد از بررسی داده‌ها و محاسبه تلفات انرژی برق توابع خودهمبستگی AC و PAC داده‌ها ترسیم گردید.

Date: 12/17/16 Time: 13:12
Sample: 1373 1408
Included observations: 21

Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.497	0.497	5.9750	0.015
		2	0.214	-0.04...	7.1380	0.028
		3	0.149	0.080	7.7331	0.052
		4	0.248	0.199	9.4753	0.050
		5	-0.05...	-0.36...	9.5513	0.089
		6	-0.18...	-0.05...	10.673	0.099
		7	-0.18...	-0.05...	11.880	0.105
		8	-0.26...	-0.30...	14.436	0.071
		9	-0.34...	0.002	19.148	0.024
		1...	-0.39...	-0.22...	26.024	0.004
		1...	-0.27...	-0.02...	29.622	0.002
		1...	-0.26...	-0.06...	33.416	0.001

نمودار ۷. توابع خودهمبستگی AC و PAC تلفات انرژی برق

در واقع این آزمون برای محاسبه مقادیر خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی (جهت بررسی مانایی سری‌های زمانی) انجام شده است. بر اساس اطلاعات فوق می‌توان تشخیص داد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

که مدل از نوع ar(1) است. به همین دلیل مدل را تخمین می‌زنیم ولی برای انتخاب بهترین مدل از معیار اطلاعات آکائیک(AIC) استفاده می‌کنیم. در واقع AIC ابزاری برای انتخاب مدل است.AIC یک معادله بین برازش و پیچیدگی مدل را توضیح می‌دهد. (سوری، ۱۳۹۵) و (آکائیک، ۱۹۷۴)

با توجه به داده‌ها، چند مدل رقیب ممکن است با توجه به مقدار AIC رتبه‌بندی شوند و مدل دارای کمترین AIC بهترین است (بورن هام،۱۹۹۸).

به همین جهت مدل برآورد شده و در جدول زیر خلاصه مقدار آکائیک و مدل مورد نظر آورده شده است.

جدول ۶. معیار اطلاعات آکائیک

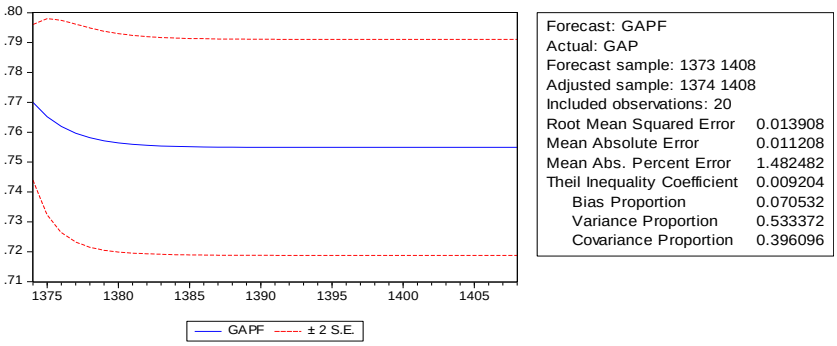
شماره	مدل‌سازی ARMA	معیار اطلاعاتی آکائیک
۱	ls gap c ar(1)	-۵/۹۵
۲	ls gap c ar(1) ar(2)	-۵/۸۱
۳	ls gap c ar(1) ar(2) ma(1)	-۵/۷۱
۴	ls gap c ar(1) ma(1)	-۵/۸۶
۵	ls gap c ar(1) ma(1) ma(2)	-۵/۷۶
۶	ls gap c ar(1) ar(2) ma(1) ma(2)	-۵/۶۰

مأخذ: نتایج تحقیق

نتایج به دست آمده از بررسی مدل ARMA و ضریب آکائیک در جدول (۶) ثبت گردیده است. بهترین مدل با توجه به ضریب آکائیک به دست آمده مدل اول یعنی مدل ls gap c ar(1) است که این نتیجه مؤید نتیجه قبلی است.

با توجه به مدل به دست آمده پیش‌بینی درون نمونه‌ای و برون نمونه‌ای برای معیار مورد نظر را انجام می‌دهیم. نتایج به شکل زیر است:

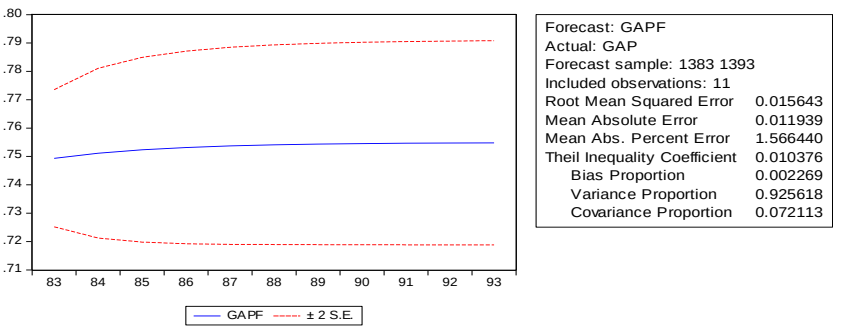
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]



نمودار ۸. پیش‌بینی برون نمونه‌ای برای سال‌های ۱۳۷۳- ۱۴۰۸

نمودار فوق پیش‌بینی میزان تلفات انرژی برق را نشان می‌دهد. پیش‌بینی برای سال‌های ۱۳۹۴ الی ۱۴۰۸ صورت گرفته است. داده‌های موجود نیز برای سال‌های ۱۳۷۳ الی ۱۳۹۳ است. همان‌طور که در جدول کنار نمودار مشاهده می‌گردد میزان RMSE این مدل ۰/۰۱ است که این موضوع نشان‌دهنده این است که مدل به خوبی تخمین زده شده است. از سال ۱۳۸۰ این میزان تلفات در حدود ۷۵ درصد است که روندی ثابت را تا سال ۱۴۰۸ طی می‌کند.

برای مقایسه بهتر این مدل با مدل سیستم‌های پویا مقدار RMSE برای سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۳ برای هر دو مدل محاسبه می‌گردد. نتایجی که از این مدل به دست می‌آید به شرح زیر است.



نمودار۹. نمودار مقایسه‌ای برای سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳

در نمودار فوق میزانRSME به دست آمده برای این مدل ۰/۰۱ است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

۵-۴. مقایسه دو مدل

برای مقایسه مدل اقتصادسنجی و مدل سیستم‌های پویا از ضریب RMSE استفاده‌شده است.

جدول۷. جدول مقایسه دو مدل

ردیف	نوع مدل	ضریب RMSE
۱	سیستم دینامیک	۰/۰۵۷
۲	اقتصادسنجی	۰/۰۱۵

مأخذ: نتایج تحقیق

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌گردد ضریبی که در شبیه‌سازی اقتصادسنجی به دست آمده است از ضریبی که برای سیستم‌های پویا به دست آورده‌ایم کمتر است که این موضوع نشان‌دهنده این است که محاسبات و پیش‌بینی انجام شده به روش اقتصادسنجی دقیق‌تر است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مدل‌های اقتصادسنجی تقاضای انرژی، قانونمندی حاکم بر روابط بین متغیرهای مدل را به آینده تسری می‌دهند. بنابراین به‌کارگیری این مدل‌ها مستلزم وجود ثبات در رفتار مصرف‌کنندگان انرژی و در دسترس بودن تعداد زیادی مشاهدات تاریخی است. اما مدل‌های فنی- اقتصادی یا همان مدل‌های شبیه‌سازی، اتکای چندانی به سری‌های زمانی تاریخی ندارند و بیشتر بر جهت‌گیری‌ها، سیاست‌ها و استراتژی‌های طراحی شده توسط سیاست‌گذاران بخش انرژی و سایر بخش‌های اقتصاد، متکی است. در ایران سری‌های زمانی طولانی و با دوره‌های تناوب کوتاه‌مدت به اندازه کافی در دسترس نیست. لذا در کشور ایران، عدم نیاز مدل‌های فنی- اقتصادی به سری زمانی تاریخی، از رجحان‌های این‌گونه مدل‌ها نسبت به مدل‌های اقتصادسنجی محسوب می‌شود. در مقابل، آمار و اطلاعات مورد نیاز در اجرای مدل‌های فنی اقتصادی بسیار جزئی‌تر و تفصیلی‌تر از مدل‌های اقتصادسنجی است. از این نظر، در کشوری شبیه ایران که از نظر منابع آماری چندان غنی نیست، مدل های اقتصادسنجی از مزیت بیشتری نسبت به مدل‌های مصرف نهایی برخوردار هستند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

در بلندمدت تکنولوژی حاکم بر اقتصاد جامعه دستخوش تغییر و تحول است. در مدل‌های اقتصادسنجی، نمی‌توان آثار تغییرات ساختاری و تکنولوژیکی که در گذشته اقتصاد تجربه نشده‌اند ولی در آینده متصور هستند را وارد مدل نمود. به همین دلیل، مدل‌های اقتصادسنجی جهت تجزیه‌وتحلیل تقاضای انرژی در بلندمدت چندان مناسب نیستند. اما در مدل‌های فنی- اقتصادی، وجود متغیرهای استراتژی «تحولات کارایی ناشی از تغییرات ساختاری» و «تحولات کارایی ناشی از تغییرات تکنولوژیکی»، این امکان را فراهم می‌سازد که آثار تغییرات ساختاری و تکنولوژیکی بر روی تقاضای انرژی دیده شود. در نتیجه مدل های مصرف نهایی جهت پیش‌بینی تقاضا در بلندمدت از مدل‌های اقتصادسنجی مناسب‌تر هستند.

انعطاف‌پذیری مدل های اقتصادسنجی و طراحی آن‌ها بر اساس مبانی نظری و یا ارتباط آماری سری‌های زمانی، از امتیازات این‌گونه مدل‌ها نسبت به مدل‌های مصرف نهایی بشمار می‌رود. روش‌های اقتصادسنجی صرفاً در زمانی که برای متغیرهای مدل، مشاهدات تاریخی به اندازه کافی وجود داشته باشد قابل اجرا هستند. در این مدل‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی کلی، رفتار گذشته متغیرها برون‌یابی می‌شود و به آینده تسری داده می‌شود. از آنجایی که در روش‌های اقتصادسنجی، رابطه آینده بین متغیرها بر روابط گذشته آن ها استوار است، بنابراین به‌کارگیری این روش‌ها مستلزم وجود ثبات در واکنش رفتار اقتصادی است. این مدل‌ها برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت بسیار مناسب است.

با توجه به نتایج به دست آمده مدل‌سازی سیستم‌های پویا خطای بیشتری در برآورد داده‌ها دارد و بیشتر برای نشان دادن روابط متغیرها (روابط علی و معلولی) و همچنین میزان تأثیر هر متغیر بر دیگری مناسب است. برای برآورد بهتر و دقیق‌تر داده‌ها با توجه به اطلاعات به دست آمده مدل‌سازی ساختاری مناسب‌تر است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

منابع

حجت، مهرداد و همکاران (۱۳۹۲)، "تخصیص تلفات انتقال در محیط ترکیبی قراردادهای دوجانبه - حوضچه توان با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، *مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول.*

استرمن، جان (۱۳۹۲)، *پویایی‌شناسی کسب‌وکار (تفکر سیستمی و مدل‌سازی برای جهانی پیچیده.* ترجمه (کورش برارپور، پریسا موسوی اهرنجانی، بنفشه بهزاد، مرضیه امامی، لاله رضایی عدل، حسن فغانی، علینقی مشایخی)، انتشارات سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)، *مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی، جلد اول، ویرایش هشتم.*

اکبری، مسعود، و مهدی بندر خانی (۱۳۹۴)، "شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای برق خانگی با استفاده از مدل‌های ARIMA، ANFIS و GMDH-NN"، *یازدهمین همایش بین‌المللی انرژی، صص۱۵-۲۵.*

آمارنامه (۱۳۹۳)، آمارنامه تفضیلی صنعت برق. ایران، تهران: شرکت توانیر.

ترازنامه (۱۳۹۳)، ترازنامه انرژی ایران. ایران، تهران: وزارت نیرو.

رضایی، حسین و داوود منظور (۱۳۹۱) "بررسی اثر اصلاحات قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها و مالیات بر ارزش افزوده بر تقاضای برق در کشور: رویکرد پویایی سیستمی"، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال دهم، شماره ۴۰، صفحات ۲۱-۳۷.*

رضایی، حسین و داوود منظور (۱۳۹۲)، "اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر قیمت برق در بازار تجدید ساختاریافته: رویکرد پویایی سیستمی". *فصلنامه علمی و پژوهشی برنامه‌ریزی و بودجه، صص ۱۰۸-۹۵.*

رضایی، حسین؛ مولایی، محمدعلی و داوود منظور (۱۳۹۱)، "فرآیند تعیین قیمت تعادلی در بازار برق ایران با رویکرد پویایی سیستمی"، *فصلنامه اقتصاد مقداری(بررسی‌های سابق)*، دوره ۹، شماره ۲، صص ۸۶-۷۱.

سوری، علی (۱۳۹۵)، *اقتصادسنجی* جلد (۲). تهران: نشر فرهنگ شناسی.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

حقیقت، علی و همکاران (۱۳۹۵)، *راهکارهای کاهش تلفات انرژی در شبکه‌های توزیع برق، دومین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی‌های پاک با محوریت مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و توسعه پایدار*، تهران: شرکت کیان طرح دانش.

قهرمانی، شیدا و همکاران (۱۳۹۵)، "تحلیل و بررسی روند تلفات انرژی در شبکه تحت مدیریت برق منطقه‌ای زنجان"، *سومین کنفرانس بین‌المللی علوم و مهندسی، استانبول- کشور ترکیه*، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا.

سهیلی، کیومرث (۱۳۸۱)، "روابط پویای بین متغیرهای کلان مؤثر بر تقاضای انرژی در ایران کاربردی از مدل تصحیح خطای برداری". *فصلنامه پژوهشی دانشگاه امام صادق (ع)، صص۱۳۹-۱۱۱.*

صادقی، ندا و همکاران (۱۳۸۶)، *بررسی بازار عرضه انرژی الکتریکی (با رویکرد سیستم دینامیک). پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، تهران: دانشکده صنایع دانشگاه تهران.

عسکری، علی (۱۳۸۰)، "تخمین تقاضای برق در بخش خانگی و برآورد کشش‌های قیمتی و درآمدی آن"، *برنامه‌ریزی و بودجه*،ج. ۲-۳.

گجراتی، دامور (۱۳۸۷)، *مبانی اقتصادسنجی*، ترجمه حسین ابریشمی، تهران: *انتشارات دانشگاه تهران.*

موسوی پوری، سیدمحمدرضا (۱۳۸۸)، "محاسبه تلفات شبکه‌های توزیع نیروی برق به‌صورت دوره‌ای"، *چهاردهمین کنفرانس سراسری شبکه‌های توزیع نیروی برق، کرمان.*

نهاوندی، نسیم و کیان نجف زاده (۱۳۹۰)، "مقایسه دو رویکرد توسعه سمت عرضه انرژی الکتریکی در مقابل مدیریت تقاضا با روش سیستم دینامیک"، *نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، شماره ۴، جلد ۲۲، صص ۳۴۲ - ۳۵۸.

محمدی، فرزانه و همکاران (۱۳۸۷)، "تحلیل تقاضای برق در ایران با استفاده از مفهوم هم جمعی و مدل ARIMA"، *مجلهٔ دانش و توسعه (علمی - پژوهشی)، سال پانزدهم، شماره ۲۵، صص۲۴-۱.*

Dashti R., Yousefi S. and M. Parsa Modhaddam (2013): "Comprehensive Efficiency Evaluation Model for Electrical Distribution System Considering Social and Urban Factors", *Energy, pp. 1-9.*

Ahmad S., MatTahar R., Muhammad-Sukki, F., Munir A. and A. Ruzairi. (2016), "Application of System Dynamics Approach in Electricity Sector Modelling: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews, ELSEVIE, pp. 29–37.*

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]

Akaike H. (1974), "A new look at the Statistical model Identification", *IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-19, pp. 716-723.*

Alnajjar Warref. (2013), "A System Dynamics Simulation Model for Forecasting Energy Demand in Pueblo County*", PhD thesis, The department of Engineering Colorado State University-Pueblo*.

Bianco Vincenzo (2009), "Electricity Consumption Forecasting in Italy Using Linear Regression Models*", Energy, vol. 34, issue 9, pp. 1413-1421*.

Burnham, Kenneth P. (1998). "Model Selection and Inference - A practical information-theoretic approach", *Springer-Verlag New York.*

Ford A. (1997), "System Dynamics And The Electric Power Industry", *System Dynamics Review*, Volume 13, No. 1, pp. 57-85.

Ford A. (1999), "Cycles in Competitive Electricity Markets: A simulation Study of the Western United States", *Energy Policy*, pp. 637-869.

Ford A. (2001), "Waiting For the Boom: A Simulation Study of Power Plant Construction In California*", Energy Policy, pp. 847-869*.

Nelson RICHARD R. Winter SIDNEY G. (1982), "An Evolutionary Theory of Economic Change", *Cambridge MA: Belknap press of Harvard University Press.*

Shahmohammadi M. Sadegh Y., Rosnah M., Keyhanian S. and H. Shakouri (2015), "A Decision Support System for Evaluating Effects of Feed-in Tariff Mechanism: Dynamic modeling of Malaysia's Electricity Generation mix", *ELSEVIER*, pp.217-229.

Sterman John (2002), "Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling For a Complex World", *Mcgraw-Hill College.*

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-11-04]