



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2025) 4(2):1-16

Nonlinear Modeling of the Demand Response Programs in the Power Systems, Considering Indefinite Consumer Participation

Ehsan Bahrami¹, *M.Sc. Student*, Mohammadreza Moradian^{1,2}, *Assistant professor*¹ *Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*² *Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

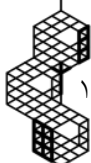
Abstract:

The challenge of excessive energy consumption, related environmental issues, and optimal utilization of restructured power systems require proper management on the demand side. In this context, demand response programs, try to encourage, persuade, or force consumers to adjust their consumption patterns within that established by the system operator. In this article, to improve accuracy, nonlinear models for demand response programs (power, exponential, and logarithmic models) for incentive-based and time-based programs, have been developed based on price elasticity and customer profit function. Then, the behavior of the proposed models against changes in elasticity, encouragement/penalty rate, and the effect of consumer participation have been investigated in several scenarios. Since consumer participation in these programs depends on various economic, cultural, and social factors, it cannot be accurately predicted. In addition, consumer participation has a significant effect on the program results. So, the consumer participation percentage has been considered an uncertain parameter based on a normal probability distribution function. The results show that the nonlinear models are more accurate and more conservative than the linear model. Moreover, considering consumer participation as an uncertain normal parameter results in more reliable responses with more peak reduction and a greater reduction in total energy consumption.

Keywords: Demand response, Elasticity, Load duration curve, Nonlinear models, Consumer participation

Received: 08 April 2024**Revised:** 13 May 2024**Accepted:** 28 June 2024**Corresponding Author:** Dr. Mohammadreza Moradian, moradian@iaun.ac.irDOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1106622>

s





فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

مدل سازی غیرخطی برنامه‌های پاسخگویی بار در سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن نامعینی میزان مشارکت مشترکین

احسان بهرامی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدرضا مرادیان^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: چالش مصرف بی‌رویه انرژی و مسائل زیست‌محیطی تابع آن از یکسو و مشکلات بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت تجدید ساختاریافته از سوی دیگر ایجاب می‌نماید که مدیریت مناسبی در سمت مصرف صورت پذیرد. در این زمینه برنامه‌های پاسخگویی بار برنامه‌هایی هستند که بسته به نوع برنامه، مشترکین و مصرف‌کنندگان را تشویق، ترغیب یا مجبور می‌کند که الگوهای مصرفی خود را در چهارچوب‌های وضع شده از طرف بهره‌بردار شبکه تنظیم کنند. در این مقاله، باهدف دستیابی به دقت بالاتر، مدل‌های غیرخطی برای برنامه‌های پاسخگویی بار (مدل‌های توانی، نمایی و لگاریتمی) مبتنی بر برنامه‌های تشویق محور و برنامه‌های زمان محور، بر اساس کشش قیمت و تابع سود مشتری توسعه داده شده است. سپس رفتار مدل‌های منظور شده در برابر تغییرات کشش، تشویق، جریمه و تأثیر میزان مشارکت مشترکین در قالب سناریوهای مختلف بررسی و ارائه شده است. از آنجایی که میزان مشارکت مشترکین در این برنامه‌ها تابع عوامل مختلف اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی است، قابل پیش‌بینی دقیق نبوده و تغییرات آن تأثیر شایانی در نتایج حاصل از برنامه دارد، درصد مشارکت مشترکین را به‌عنوان یک پارامتر نامعین که تغییراتی منطبق بر تابع توزیع احتمال نرمال دارد مدل‌سازی و در استخراج نتایج منظور شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی دارای دقت بیشتری بوده و محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌نمایند. از طرفی مقایسه این نتایج مشخص می‌کند که لحاظ نمودن میزان مشارکت مشترکین به‌عنوان یک پارامتر نامعین نرمال، ضمن آنکه نتایج را قابل اطمینان‌تر می‌نماید، پیک سایی شبکه را بهبود بخشیده و انرژی مصرفی در کل شبکه را نیز کاهش بیشتری می‌دهد.

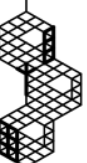
واژه‌های کلیدی: پاسخگویی بار، کشش، منحنی تداوم بار، مدل‌های غیرخطی، مشارکت مشترکین.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا مرادیان، moradian@iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1106622>

در دو دهه اخیر، مصرف بی‌رویه انرژی الکتریکی توسط مشترکین مختلف، چالش‌های فراوانی به لحاظ مسائل زیست‌محیطی، نیاز به توسعه زود هنگام شبکه قدرت، کاهش قابلیت اطمینان و کیفیت توان و جهش نامتعارف قیمت‌ها در بهره‌برداری از سیستم قدرت را فراهم کرده است. از سوی دیگر مصارف انرژی بالای متمرکز در ساعات محدود از دوره بهره‌برداری سیستم، مشکلات یاد شده را جدی‌تر می‌نماید. در این بین یکی از اساسی‌ترین راهکارهای اصلاحی را می‌توان در مدیریت انرژی در سمت مصرف‌کننده دانست. تبلور این مدیریت در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته به صورت برنامه‌های پاسخگویی بار مطرح شده است. برنامه‌های پاسخگویی بار دربرگیرنده روش‌هایی است که به تغییر و تنظیم میزان مصرف مشترکان بر اثر مواجهه با سیگنال‌های تشویقی، تنبیهی و نیز تغییر قیمت برق منجر می‌شود. منحنی تغییرات بار در یک شبکه، نشان‌دهنده الگوی مصرف برق در آن شبکه بوده و بدیهی است هدف اصلی بهره‌بردار در هر شبکه، دستیابی به ترکیب مناسبی از مصرف برق است.

تحقیقات زیادی در خصوص بررسی تاثیرگذاری برنامه‌های مختلف پاسخگویی بار در پیک‌سایه و اصلاح ضریب بار^۱ شبکه [۱]، کاهش مدیریت مصرف انرژی سالیانه [۲]، تعویق لزوم گسترش شبکه قدرت در سطوح تولید، انتقال و توزیع [۳]، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در شبکه [۴]، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی [۵] و بهبود انعطاف‌پذیری^۲ و شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه [۶] صورت گرفته است که در تمامی آنها مدل‌سازی ریاضی رفتار مشترکین در برخورد با برنامه‌های پاسخگویی بار^۲ بر مبنای مدل‌های خطی و غیرخطی عملیاتی شده و دقت مدل‌سازی نقش تعیین‌کننده‌ای در اعتبار نتایج دارد. تاکنون مدل‌های خطی و غیرخطی متعددی برای مدل‌سازی و بررسی تأثیرات این برنامه‌ها در اصلاح منحنی مصرف استخراج شده است. مدل‌های خطی به دلیل تقریب زیاد دارای دقت کمتری هستند، اما مدل‌های غیرخطی قابلیت مدل‌سازی دقیق‌تری را با توجه به مقادیر واقعی دارند [۷-۱۰].

یکی از موثرترین رویکردهای تحقیقاتی در موضوع برنامه‌های پاسخگویی بار، یافتن مقادیر بهینه برای تعرفه انرژی مصرفی، نرخ تشویق^۴ و نرخ جریمه^۵ مصوب در بهره‌برداری از سیستم قدرت است، بگونه‌ای که مشترکین با تعرفه‌های بهینه، کمترین انحراف را از الگوهای مورد انتظار بهره‌بردار شبکه داشته باشند [۱۱-۱۵]. بدیهی است که دقت مدل‌سازی در این حوزه نیز بر تعرفه‌های بهینه استخراج شده و نتایج حاصل از پاسخگویی بار تأثیر مستقیم دارد.

مفهوم الاستیسیته یا همان کشش تقاضا^۶ در بازار از مهم‌ترین مفاهیم در مدل‌سازی برنامه‌های مختلف پاسخگویی بار بوده که شرح مفصلی بر آن در [۱۶-۱۸] آمده است. به منظور بررسی تأثیرات متقابل تغییرات قیمت بر میزان مصرف مشترکین در ساعات یا بازه‌های زمانی مختلف، ماتریس‌های کشش در شرایط متنوع مطرح و نتایج حاصل از این تقابل بر منحنی‌های بار شبکه ارزیابی شده است [۱۷، ۱۸]. تمامی اهداف بالقوه مورد انتظار از برنامه‌های پاسخگویی بار، مستلزم مدل ریاضی دقیق و نزدیک به رفتار مشترکین هدف می‌باشد. دقت این مدل‌سازی تحت تأثیر عوامل مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و ... بوده که می‌تواند میزان مشارکت مشترکین را در پاسخ‌گویی به برنامه تحت تأثیر قرار دهد. بدیهی است که تنوع موجود در مشترکین انرژی الکتریکی می‌تواند میزان مشارکت را به عنوان یک پارامتر نامعین در شبکه مطرح نموده و چالشی جدی برای اعتبار نتایج حاصل به همراه داشته باشد.

در [۱۹] نویسندگان یک مدل پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت و کشش بازار را برای مشترکین پیشنهاد می‌کنند که مشترکین می‌توانند الگوی مصرفی خود را مطابق با آن تغییر داده و سود خود را به حداکثر برسانند. مدل پیشنهادی، یک مدل تشویق محور غیرخطی است و استراتژی جلیه‌جایی بار بین ساعات‌های مختلف، از دوره‌های پیک بار و میان‌باری به دوره کم‌باری را بازگو می‌کند. مدل‌های غیرخطی متنوعی برای تابع درآمد مشترکین در [۲۰] معرفی شده و نتایج مبتنی بر انواع مدل‌ها استخراج و مقایسه شده است ولی در خصوص جامعه هدف هر یک از این مدل‌های غیرخطی بررسی مناسبی صورت نگرفته و از سوی دیگر میزان مشارکت مشترکین نیز مقداری ثابت و معین در نظر گرفته شده است.

علاوه بر مدل‌های مبتنی بر کشش بار که با اصول اقتصاد خرد شکل گرفته‌اند، مدل‌هایی باهدف رفع معایب آن به منظور بررسی مشترکین مختلف و ترجیح مشترکین در پاسخگویی ارائه شده که یک نمونه در مرجع [۲۱] مشخص شده است. مرجع [۲۲] مدل‌سازی خطی و غیرخطی برنامه‌های تشویق محور و برنامه‌های مبتنی بر قیمت در بازارهای برق برای سطوح مختلف مشارکت بار در برنامه‌های پاسخگویی بار را مورد مطالعه قرار داده است. باید در نظر داشت طیف متنوعی از مصرف‌کنندگان با انواع مختلفی از بارهای غیرقابل





قطع وجود دارند این امر می‌تواند مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار را کاهش دهد. چگونگی کاهش اثرات به‌کارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار بر مصرف‌کننده، در [۲۳] بررسی شده است.

در بسیاری از موارد پاسخ‌هایی که از مطالعات میدانی و عملیاتی برنامه‌های پاسخگویی بار دریافت می‌شود با آنچه در برنامه‌های کامپیوتری و شبیه‌سازی به دست می‌آید تفاوت دارد. اگر به بررسی و ریشه‌یابی این تفاوت‌ها بپردازیم، عمدتاً عدم انطباق کامل رفتار مشترکین با مدل ریاضی استفاده شده از یک سو و نامعینی‌های مختلفی چون ضرایب الاستیسیته و درصد مشارکت مشترکین^۶ از سوی دیگر که پاسخ‌های میدانی اجرای برنامه‌ها را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهند، از اصلی‌ترین علل وجود این تفاوت‌ها بوده که کمتر نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، به‌منظور کاهش تفاوت نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات تئوری و نتایج میدانی، از مدل‌های غیرخطی برای برنامه‌های پاسخگویی بار (مدل‌های توانی، نمایی و لگاریتمی) مبتنی بر برنامه‌های تشویق محور (برنامه‌های بازار ظرفیت) و برنامه‌های زمان محور (برنامه‌های قیمت‌گذاری زمان استفاده)، استفاده شده و میزان مشارکت مشترکین در این برنامه‌ها نیز به‌عنوان یک پارامتر نامعین^۸ لحاظ شده است. به‌منظور بررسی عملکرد انواع مدل‌های غیرخطی مطروحه، یک مطالعه عددی با سناریوهای متنوع به‌صورت شبیه‌سازی کامپیوتری ارائه شده و از اطلاعات منحنی پیک بار شبکه برق ایران در تابستان ۱۴۰۰ و میزان تعرفه‌های تشویق و جریمه‌ی اعمال‌شده توسط وزارت نیرو در آن سال استفاده شده است.

۲- مدل سازی برنامه‌های پاسخگویی بار

برنامه‌های پاسخگویی بار به دو گروه اصلی برنامه‌های تشویق محور^۹ و برنامه‌های زمان محور^{۱۰} تقسیم‌بندی شده‌اند. [۲۴]. در شکل (۱) ساختار برنامه‌های پاسخگویی بار نشان داده شده است.



شکل (۱): برنامه‌های پاسخگویی بار

مدل‌های ارائه‌شده برای برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر مفهومی به نام کشش تعریف می‌شوند. کشش (الاستیسیته) به معنی حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت هست و مطابق (۱) تعریف می‌شود.

$$E = \frac{\rho_0}{d_0} * \frac{\partial d}{\partial \rho} \quad (1)$$



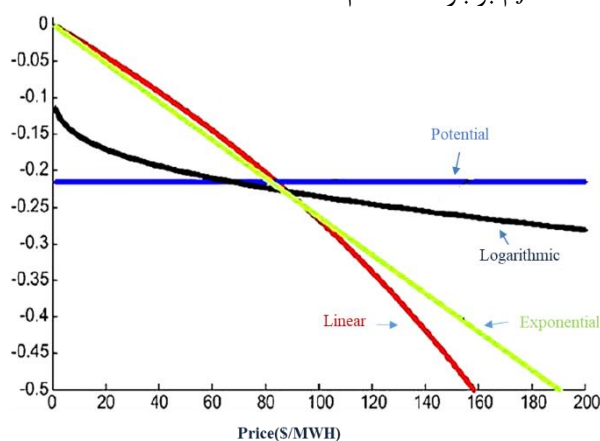
که در آن ρ و d به ترتیب قیمت و میزان بار سیستم و اندیس صفر مرتبط با مقادیر اولیه کمیت قبل از اجرای برنامه است. الاستیسیته یا کشش می‌تواند بر اساس توابع مختلفی تعریف شود که رفتار آن‌ها در شکل (۲) مشخص شده است [۱۳].
وقتی هدف بررسی تاثیر تغییر تعرفه در بازه زمانی j ام بر میزان بار در بازه زمانی i ام باشد، کشش متقابل بصورت (۲) تعریف می‌شود.

$$E(i, j) = \frac{\rho_0(j)}{d_0(j)} * \frac{\partial d(i)}{\partial \rho(i)} \quad (2)$$

اگر بازه‌های زمانی یک‌ساعتی مورد نظر باشد، تحلیل هر شبانه‌روز با ماتریس کشش مندرج در (۳) عملیاتی می‌گردد.

$$E = \begin{bmatrix} E(1,1) & E(1,2) & E(1,j) & \dots & E(1,24) \\ E(2,1) & E(2,2) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & E(i,j) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E(24,1) & \dots & E(24,j) & \dots & E(24,24) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن $E(i,j)$ میزان کشش متقابل ساعت j ام بر بار ساعت i ام است.



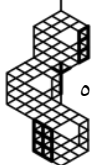
شکل (۲): رفتارهای مختلف توابع کشش [۱۳]

۳- مدل‌سازی غیرخطی برنامه‌های تشویق محور پاسخگویی بار

در برنامه‌های پاسخگویی بار، مشترکین شبکه در برابر برنامه‌ها به صورت یکی از دو حالت زیر واکنش نشان می‌دهند. بارهای تک‌پریودی بارهایی^{۱۱} هستند که قابل انتقال به ساعات دیگر نیستند و فقط می‌توانند خاموش و روشن شوند؛ بنابراین این بارها فقط نسبت به دوره خودشان حساسیت نشان می‌دهند و تنها با کشش خودی مدل می‌شوند. شایان ذکر است که کشش خودی همیشه دارای مقدار منفی بوده که بیانگر کاهش بار در برابر افزایش قیمت است.
در نقطه مقابل بارهای چندپریودی^{۱۲} قابلیت انتقال از ساعات پیک بار به ساعات کم‌باری را دارند؛ بنابراین این بارها نسبت به دوره‌های دیگر (ساعات دیگر) نیز حساسیت نشان می‌دهند و مدل‌سازی آنها علاوه بر کشش خودی با کشش متقابل صورت می‌پذیرد. کشش متقابل همیشه دارای مقدار مثبت بوده که بیانگر افزایش مصرف در هر بازه زمانی تحت تاثیر افزایش قیمت در سایر بازه‌های زمانی است [۲۵].

رفتار عموم مشترکین در بهترین حالت، در راستای بیشینه نمودن سود اقتصادی آنها است. بنابراین لازم است تابع سود مشترکین^{۱۳} با احتساب درآمد و هزینه‌های مختلف تعیین و تغییرات باری که سود مشترک را بیشینه می‌نماید، شناسایی گردد. به طور کلی تابع سود مشترکین را می‌توان به صورت (۴) در نظر گرفت [۲۴].

$$S = B(d(i)) - d(i) \cdot \rho(i) + P(\Delta d(i)) - PEN(\Delta d(i)) \quad (4)$$





که در آن $\Delta d(i)$ میزان تغییر بار، $B(d(i))$ درآمد کسب شده توسط مشترک حاصل از مصرف انرژی، $P(\Delta d(i))$ مبلغ تشویقی دریافتی مشترک بواسطه مشارکت در برنامه‌های تشویق محور و $PEN(\Delta d(i))$ میزان جریمه پرداختی مشترک بواسطه عدم همکاری در برنامه‌های تشویق محور اجباری می‌باشند که همگی در بازه زمانی t ام تعریف شده‌اند. چالش اصلی در (۴) تعیین تابع مناسب برای درآمد مشترکین بوده که با تحلیل مدل‌های اقتصادمحور می‌توان به صورت توابع غیرخطی توانی، نمایی و لگاریتمی بیان گردد. با توجه به آنکه جواب بهینه در شرایط صفر شدن مشتق تابع سود مشترک رقم خواهد خورد، با مشتق گیری زمانی از (۴) به رابطه (۵) می‌رسیم که مبنای شناسایی مقدار مصرف مشترکین است.

$$\frac{\partial S}{\partial d(i)} = \frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} - \rho(i) + \frac{\partial P}{\partial d(i)} - \frac{\partial PEN}{\partial d(i)} = 0 \quad (5)$$

در ادامه برای مدل‌های مختلف تابع درآمد، تابع میزان مصرف مشترکین در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار بررسی می‌گردد.

۳-۱- مدل توانی

تابع سود مشتری از بسط تیلور $B(d(i))$ در مدل توانی به صورت (۶) به دست می‌آید. توجه داشته باشید که درآمد مشتری از مصرف $d(i)$ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در طول ساعت i ام به دست می‌آید [۲۴].

$$B(i) = B_0(i) + \frac{\rho_0(i) \cdot d(i)}{1 + E(i, i)^{-1}} \left\{ \left(\frac{d(i)}{d_0(i)} \right)^{E(i, i)^{-1}} - 1 \right\} \quad (6)$$

این تابع یک تابع تصاعدی است که برای کشش با مقدار -1 و مقدار بار صفر تعریف نشده است. از ترکیب روابط (۵) و (۶) می‌توان مدل کامل پاسخ بار را در حالت توانی بصورت (۷) تنظیم نمود [۲۴].

$$d(i) = d_0(i) \cdot \prod_{j=1}^{24} \left(\frac{\rho(j) + A(j) + pen(j)}{\rho_0(j)} \right)^{E(i, j)} \quad (7)$$

که در آن $A(j)$ و $pen(j)$ به ترتیب تعرفه تشویق و جریمه مشارکت در ساعت j ام است.

۳-۲- مدل نمایی

در مدل نمایی برای تابع درآمد می‌توان بسط تیلور را مطابق (۸) در نظر گرفت [۲۴].

$$B(i) = B_0(i) + \rho_0(i) \cdot d(i) \left\{ 1 + \frac{1}{E(i, i)} \left[\ln \left(\frac{d(i)}{d_0(i)} \right) \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

توجه داشته باشید که $B(d(i))$ برای کشش صفر و بارهای صفر تعریف نشده است. با جایگزینی (۸) در (۵) می‌توان مقدار بار شبکه در بازه t ام را به صورت (۹) در نظر گرفت [۲۴].

$$d(i) = d_0(i) \cdot EXP \left\{ \sum_{j=1}^{24} E(i, j) \left(\frac{\rho(j) + A(j) + pen(j) - \rho_0(j)}{\rho_0(j)} \right) \right\} \quad (9)$$

۳-۳- مدل لگاریتمی

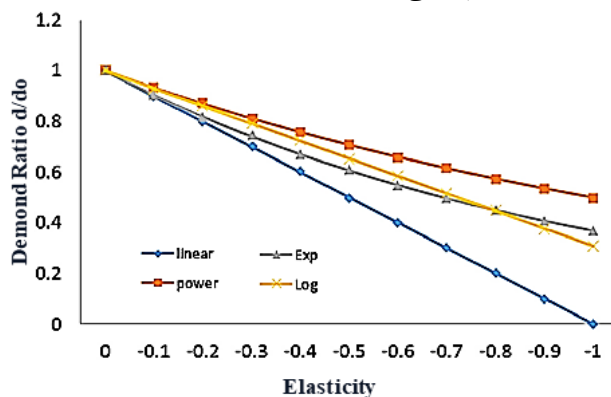
با استفاده از بسط تیلور $B(d(i))$ تابع سود برای مدل لگاریتمی به صورت (۱۰) و مقدار بار شبکه به صورت (۱۱) خواهند بود [۲۴].

$$B(i) = B_0(i) + \rho_0(i) \cdot d_0(i) \cdot E(i, i) \left\{ EXP \left[\left(\frac{d(i) - d_0(i)}{E(i, i) \cdot d_0(i)} \right) \right] - 1 \right\} \quad (10)$$

$$d(i) = d_0(i) \cdot \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{24} E(i, j) \ln \left(\frac{\rho(j) + A(j) + pen(j)}{\rho_0(j)} \right) \right\} \quad (11)$$

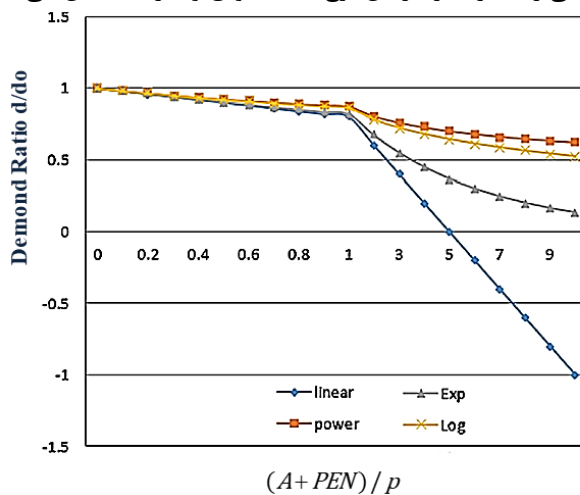


رفتار مدل‌های غیرخطی پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر و مدل‌های خطی برای پاسخ به تقاضا در برابر تغییرات میزان کشش در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۳)، هرچه مقدار کشش بزرگ‌تر باشد واگرایی بیشتری بین پاسخ مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان دید که برای مقادیر کم کشش (نزدیک به صفر) رفتار تمام مدل‌ها تقریباً یکسان است. باید توجه داشت که در مقادیر کشش کم، مقدار تغییرات تقاضا نسبت به مقدار اولیه ناچیز است. علاوه بر این در مقادیر کشش زیاد (نزدیک به یک) پاسخ مدل‌های مختلف با وضعیت واقعی شبکه مطابقت چندانی نخواهد داشت.



شکل (۳): تغییرات میزان بار در برابر کشش برای توابع مختلف

شکل (۴) رفتار مدل‌های خطی و غیرخطی را با در نظر گرفتن نرخ‌های تشویق و جریمه نشان می‌دهد.



شکل (۴): تغییرات میزان بار در برابر نرخ تعرفه تشویق و جریمه برای توابع مختلف

از شکل (۴) می‌توان دریافت که برای نرخ‌های تشویق کمتر نسبت به قیمت برق پاسخ تقاضای مدل‌های مختلف خطی و غیرخطی تقریباً عملکرد مشابهی دارند، اما در ازای نرخ‌های بالاتر تشویق و جریمه نسبت به قیمت برق تفاوت معناداری در رفتار مدل‌های مختلف دیده می‌شود.

۴- میزان مشارکت مصرف‌کنندگان

رفتار مشترکین انرژی الکتریکی در برابر برنامه‌های پاسخگویی بار بسیار متفاوت و تاثیرپذیر از مسائل فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و ... است. برخی از بارها هرگز به تغییرات قیمت انرژی یا برنامه‌های تشویق محور واکنشی نشان نداده و اصطلاحاً کاملاً غیرکشسان رفتار می‌کنند. برخی دیگر از بارها تنها در شرایط خاص و تنها با تعرفه‌های بالا در برنامه‌های پاسخگویی بار مشارکت می‌نمایند و بر همین اساس میزان مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار را نمی‌توان به صورت دقیق و قبل از اجرای برنامه تعیین کرد؛ و این پارامتر در واقع یک پارامتر نامعین محسوب می‌شود. در این مقاله علاوه بر اینکه انواع مدل‌های غیرخطی برنامه‌های پاسخگویی بار





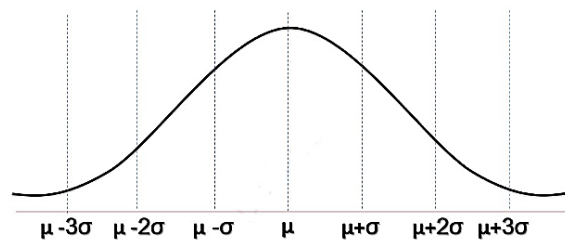
ارزیابی می‌گردد، به مسئله‌ی میزان مشارکت مشترکین به‌عنوان یکی از نامعینی‌های سیستم پرداخته و با استفاده از تابع توزیع نرمال، در مدل‌های ریاضی لحاظ شده است.

۴-۱- تابع توزیع نرمال

اگر میزان مشارکت مشترکین را یک متغیر تصادف x با میانگین μ و انحراف معیار σ در نظر بگیریم که دارای توزیع نرمال باشد، تابع چگالی احتمال آن به‌صورت (۱۲) خواهد بود [۲۶].

$$x \approx n(\mu, \sigma^2) \Rightarrow f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (12)$$

تابع چگالی احتمال نرمال زنگوله‌ای شکل و متقارن است، در توزیع نرمال پارامترهای میانگین و میانه و مد همگی باهم برابر بوده و در وسط منحنی قرار می‌گیرند. با توجه به قرینه بودن منحنی توزیع نرمال و مشخص بودن میانگین و انحراف معیار می‌توان از قاعده تجربی مطابق شکل (۵) استفاده کرد.



شکل (۵): تغییرات متغیر در توزیع نرمال

به ازای تمامی x ها مقدار $f(x)$ بزرگ‌تر و مساوی صفر است. در توزیع نرمال میانگین، مد و میانه باهم برابرند. با وجود اینکه دامنه تغییرات متغیر تصادفی x کل اعداد حقیقی است ولی تقریباً تمام مقادیر x در بازه $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ یعنی بازه‌ای با طول ۳ انحراف معیار از میانگین قرار دارند و احتمال اینکه x مقداری خارج از این بازه باشد بسیار کم است. اگر فاصله‌های ۱ و ۲ و ۳ انحراف معیار از میانگین را در طرفین میانگین روی منحنی مشخص کنیم، حدود ۶۸٪ داده‌ها در فاصله یک انحراف معیار از میانگین یعنی بازه $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ واقع شده و حدود ۹۵٪ داده‌ها نیز در فاصله ۲ انحراف معیار یعنی $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ قرار می‌گیرند؛ و اگر فاصله را بازهم بزرگ‌تر بکنیم حدود ۹۹/۸٪ از داده‌ها در فاصله ۳ انحراف معیار از میانگین یعنی بازه $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ هستند درصد داده‌هایی که خارج از فاصله ۳ انحراف معیار از میانگین واقع می‌شوند بسیار کم و در حد ۰/۲٪ است و از آن صرفه‌نظر می‌کنیم. متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z متغیر نرمالی است که میانگین آن صفر و واریانس آن یک باشد؛ بنابراین برای انجام محاسبات کافی است با تبدیل متغیر تصادفی نرمال به متغیر تصادفی نرمال استاندارد طبق (۱۳)، احتمالات را از جدول نرمال استاندارد استخراج کنیم. برای این تبدیل داریم: [۲۶]

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (13)$$

به‌این ترتیب فرض کنید میانگین مشارکت مشترکین را به‌طور مثال برابر با ۳۰٪ در نظر بگیریم و یک انحراف معیار ۵٪ برای آن لحاظ کنیم، میزان مشارکت و ضرایب مطابق با جدول (۱) خواهد بود.

جدول (۱): میزان مشارکت و ضرایب وزنی

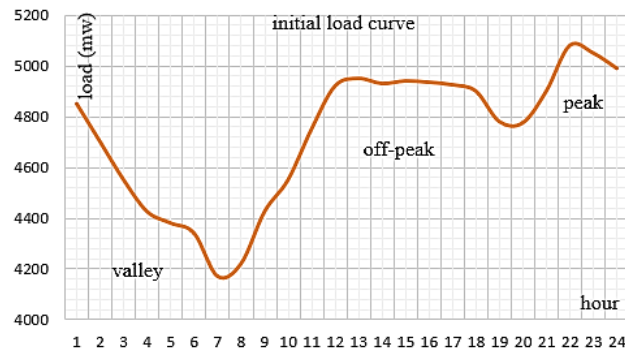
میزان انحراف معیار	درصد مشارکت	ضریب وزنی
۱	۲۸/۵٪ تا ۳۱/۵٪	۰/۳۴۱۳
۲	۲۷٪ تا ۳۳٪	۰/۱۳۵۹
۳	۲۵/۵٪ تا ۳۴/۵٪	۰/۰۲۱۵

در این مقاله تابع بار برای هر ساعت با درصد مشارکت‌های مختلف استخراج‌شده و سپس مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از جدول احتمالاتی تابع توزیع نرمال وزن دهی شده است.



۵- مطالعه عددی

در این مقاله از اطلاعات منحنی پیک بار شبکه برق ایران در سال ۱۴۰۰ که در شکل (۶) نشان داده شده و همچنین از برنامه‌های تشویق محور اجباری بازار ظرفیت^{۱۴} و برنامه‌های قیمت‌گذاری زمان استفاده^{۱۵} برای ارزیابی مدل‌های اقتصادی غیرخطی برنامه‌های پاسخگویی بار استفاده شده است. علت انتخاب این ترکیب آن است که مطالعه عددی در این پژوهش بر مبنای بار ایران است و در ایران با توجه به شبهه بازار برقی که وجود دارد، عملاً برنامه‌های پاسخگویی باری که اجرا می‌شود نزدیک به برنامه‌های انتخابی ما است.



شکل (۶): منحنی بار اولیه

جدول (۲) مقادیر مختلف کشش را نشان می‌دهد. مقدار مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار در ایران بیش از ۳۰ درصد برآورد شده است [۲۷].

جدول (۲): مقادیر کشش قیمتی خودی و متقابل تقاضا

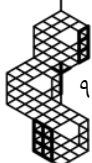
	کم باری	میان باری	پر باری
کم باری	-۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶
میان باری	۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۰۰۸
پر باری	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	-۰/۰۲

تعرفه مشترکین با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات که در اردیبهشت سال ۱۴۰۰ برای مشترکین منظور شده در جدول (۳) آورده شده است. همچنین برای مشترکین با قدرت ۳۰ کیلووات و بیشتر، به منظور تشویق مشترکین به جابه‌جایی مصرف از ساعات پیک بار، پس از محاسبه بهای برق مصرفی بر اساس جدول (۳)، مبالغ تشویق و جریمه منظور می‌گردد.

جدول (۳): تعرفه مشترکین با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات (kwh / ریال)

دوره	کم باری	میان باری	پیک بار
تعرفه بهای انرژی	۱۲۰۰	۲۴۰۱	۴۸۰۲
تعرفه جریمه	-	-	۸۷۳
تعرفه تشویق	۴۳۷	۱۷۵	-

مقدار پایه برای میزان مشارکت مشترکین ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن مقادیر مختلف تشویق، جریمه، کشش و میزان مشارکت مشترکین در برنامه‌های تشویق محور اجباری و زمان استفاده طراحی و در جدول (۴) آمده است. شایان ذکر است که در هر سناریو حالت الف با درصد مشارکت ثابت و برابر ۳۰٪ و حالت ب با درصد مشارکت نرمال با میانه مشخص و انحراف معیار ۵٪ پیاده‌سازی شده است. همچنین هر سناریو برای چهار تابع خطی، توانی، نمایی و لگاریتمی تکرار و نتایج به دست آمده مقایسه می‌شوند. برای مقایسه تفاوت سناریوها با یکدیگر، سناریوی (الف-الف) را به عنوان حالت پایه در نظر می‌گیریم و در نهایت تمامی سناریوها با مقدار بار اولیه شبکه (زمانی که هنوز برنامه‌ای اجرا نشده است) مقایسه خواهند شد.





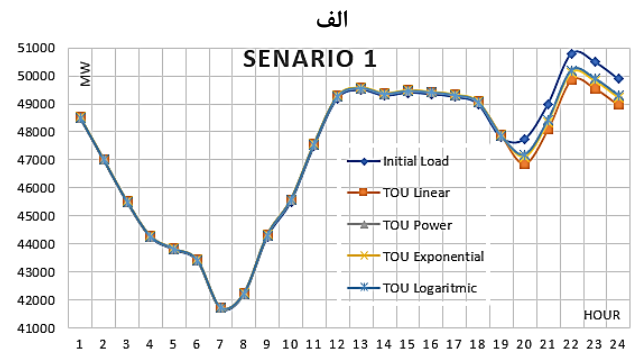
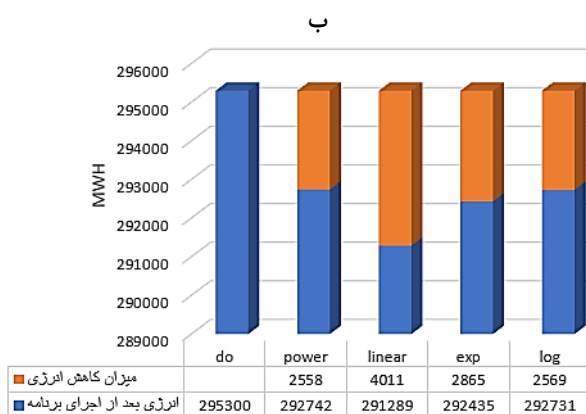
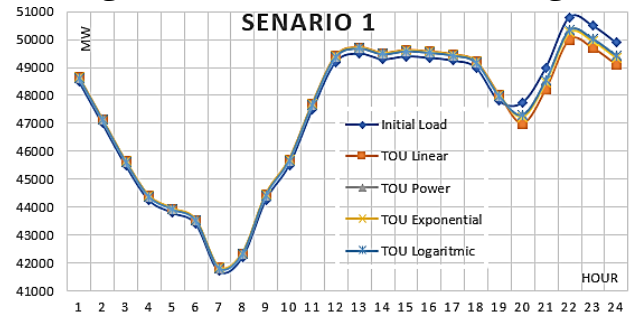
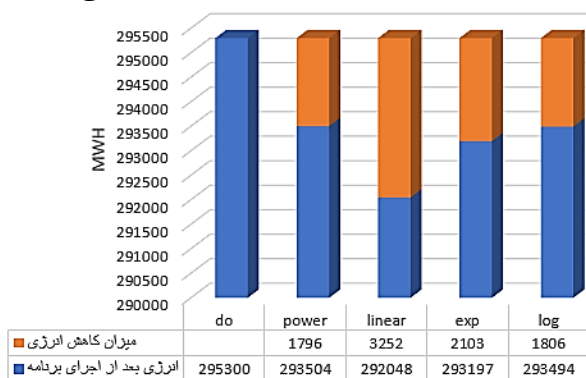
جدول (۴): تعریف سناریوهای مختلف

شماره سناریو	میزان مشارکت	کشش	مقدار تشویق (kwh / ریال)
۱	الف	مطابق با جدول ۲	مطابق با جدول ۳
	ب		
۲	الف	دو برابر جدول ۲	مطابق با جدول ۳
	ب		
۳	الف	مطابق با جدول ۲	دو برابر جدول ۳
	ب		
۴	الف	مطابق با جدول ۲	مطابق با جدول ۳
	ب		

مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها در سناریوهای مختلف، به خوبی نشان می دهد که لحاظ نمودن میزان مشارکت مشترکین در برنامه های پاسخگویی بار به عنوان یک پارامتر نامعین، تا چه اندازه نتایج به دست آمده را به نتایج میدانی شبکه نزدیک تر می کند

۱-۵- سناریوی اول

شکل (۷) نتایج حاصل از اجرای سناریوی اول را نمایش می دهد. تغییرات ایجاد شده در منحنی بار پس از اجرای سناریوی (۱-الف) در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. واضح است که مصرف در ساعات پیک بار کاهش و در ساعات های میان باری و کم باری افزایش می یابد. شکل (۷-ب) میزان کاهش انرژی مصرفی در ساعات پیک شبکه (ساعت ۱۷:۰۰ تا ساعت ۲۴:۰۰) را نشان می دهد.



شکل (۷): مقایسه مدل های مختلف در سناریوی اول

الف) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۱-الف) ب) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۱-الف)
ج) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۱-ب) د) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۱-ب)



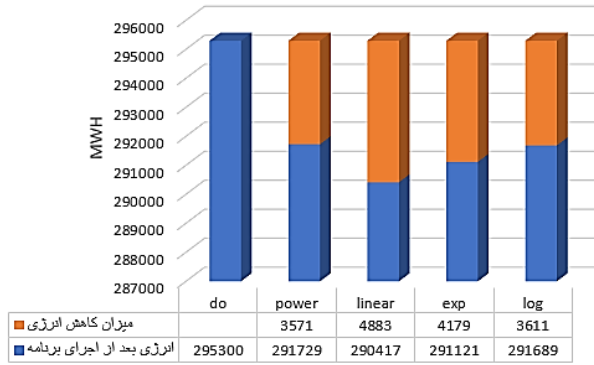
با توجه به اینکه در این پژوهش نرخ جریمه فقط برای ساعات پیک بار شبکه تعریف شده است، بدیهی است که مشارکت مصرف‌کنندگان نیز بیشتر معطوف به این ساعات از بار شبکه باشد. همان‌طور که از شکل (۷-ب) مشخص است بیشترین میزان کاهش انرژی مصرفی مربوط به مدل خطی است. بنابراین مدل خطی را می‌توان به‌عنوان غیر محافظه‌کارترین مدل در نظر گرفت. کمترین میزان کاهش انرژی نیز متعلق به مدل توانی است. این مدل را نیز می‌توان به‌عنوان محافظه‌کارترین مدل فرض کرد. البته باید توجه داشت که در این سناریو نتایج به‌دست‌آمده در مدل‌های مختلف نزدیک به هم است، چرا که میزان کاهش تقاضا و نرخ تشویق و جریمه در این سناریو مقادیر پایینی دارند؛ بنابراین به نظر می‌رسد در این سناریو مدل خطی به دلیل سادگی، مدل مناسبی برای انتخاب توسط اپراتور شبکه باشد. شکل (۷-ج) منحنی تغییرات بار شبکه را در مدل‌های مختلف در سناریوی (۱-ب) که در آن میزان مشارکت به‌عنوان یک پارامتر نامعین نرمال در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. میزان کاهش انرژی مصرفی ساعت‌های پیک بار با اعمال این سناریو در شکل (۷-د) آمده است. منظور کردن میزان مشارکت به‌عنوان یک پارامتر نامعین، انرژی مصرفی در ساعت‌های پیک و در کل منحنی بار را نسبت به وقتی که میزان مشارکت را عدد ثابتی لحاظ کنیم کاهش بیشتری می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج در شکل (۷) این نتیجه حاصل می‌شود که زمانی که میزان مشارکت مشترکین را به‌صورت نامعین لحاظ می‌کنیم، ضمن این که انرژی مصرفی در ساعات پیک شبکه کاهش بیشتری پیدا می‌کند، انتقال مصرف از ساعات پیک به ساعات میان بار و کم‌بار شبکه کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی مصرف‌کنندگان به نرخ‌های جریمه عکس‌العمل بیشتری نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد نتایج به‌دست‌آمده به شرایط واقعی شبکه و همچنین عکس‌العمل مشترکین نسبت به مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار نزدیک‌تر است.

۵-۲- سناریوی دوم

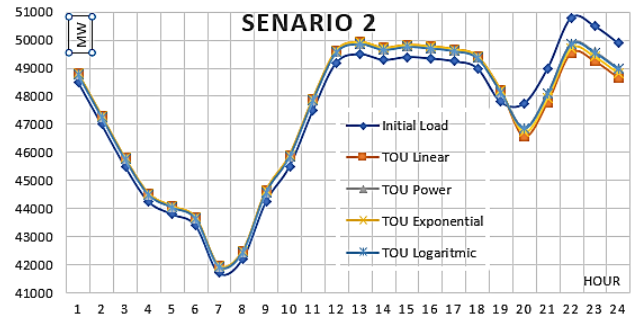
در این سناریو مقادیر کاهش تقاضا نسبت به سناریوی اول دو برابر شده است. میزان تشویق و جریمه و همچنین میزان مشارکت، مشابه سناریوی اول است. در واقع در این سناریو در نظر داریم تا تأثیر افزایش کاهش تقاضا بر اصلاح منحنی بار را بررسی کنیم. نتایج حاصل از اجرای سناریوی دوم در شکل (۸) نشان داده شده است. (۸-الف) منحنی تغییرات بار در سناریوی (۲-الف) بوده و نسبت به سناریوی پایه از پراکندگی بیشتری برخوردار است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این سناریو به وضوح می‌توان دید که با افزایش مقدار کاهش تقاضا نسبت به سناریوی پایه میزان پیک‌سایی در منحنی بار شبکه افزایش یافته و در واقع کاهش انرژی مصرفی در زمان پیک شبکه به نسبت سناریوی اول بیشتر است. شکل (۸-ب) میزان کاهش انرژی مصرفی با اعمال سناریوی (۲-الف) را نشان می‌دهد. به‌راحتی می‌توان دریافت که این سناریو نسبت به سناریوی پایه، پیک‌سایی بیشتری انجام داده و انتقال بار از ساعات‌های پیک بار به ساعات‌های میان‌باری و کم‌باری نیز در این سناریو بیشتر انجام می‌شود. نتیجه این که هر چه کاهش تقاضا و در واقع حساسیت بار نسبت به قیمت برق بیشتر باشد منحنی بار هموارتر می‌شود. با لحاظ نمودن میزان مشارکت مشترکین به‌صورت نامعین نرمال سناریوی (۲-ب) عملیاتی شده و نتایج مربوطه در شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) نمایش یافته است. بر این اساس شاهد کاهش بیشتر انرژی مصرفی در ساعات پیک شبکه و انتقال کمتر مصرف از ساعات پیک به ساعات میان‌بار و کم‌بار شبکه هستیم که در کل مصرف کمتر انرژی را رقم می‌زند.

۵-۳- سناریوی سوم

در این سناریو در نظر داریم تا تأثیر افزایش مقادیر تشویق و جریمه را بر اصلاح منحنی مصرف بررسی کنیم. به این منظور در این سناریو مقادیر تشویق و جریمه نسبت به سناریوی پایه دو برابر شده است. مقادیر کاهش تقاضا و میزان مشارکت مشترکین نیز برابر با سناریوی پایه در نظر گرفته شده و نتایج آن در شکل (۹) آمده است. شکل (۹-الف) تغییرات بار نهایی در سناریوی (۳-الف) را ارائه می‌دهد. می‌توان گفت که برای مقادیر بالاتر نرخ تشویق و جریمه، مدل‌های غیرخطی برنامه‌های پاسخگویی بار، پاسخ بهتری ارائه می‌دهند. در شکل (۹-ب) میزان کاهش انرژی مصرفی بعد از اجرای سناریوی (۳-الف) آورده شده است. مشخص است که پراکندگی منحنی‌های بار با مدل‌های مختلف در این سناریو نسبت به سناریوهای اول و دوم بیشتر است. ضمن این که مدل خطی نسبت به مدل‌های غیرخطی پراکندگی بیشتری دارد.



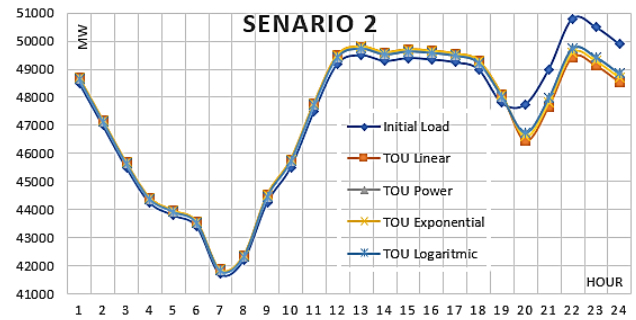
ب



الف



د

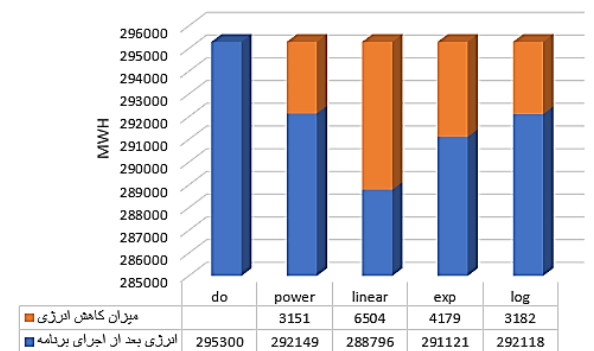


ج

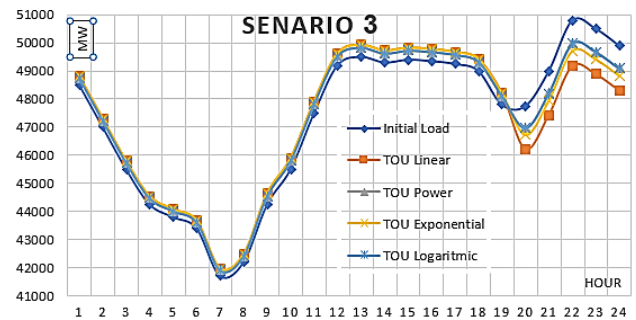
شکل (۸): مقایسه مدل های مختلف در سناریوی دوم

(الف) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۲-الف) (ب) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۲-الف)

(ج) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۲-ب) (د) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۲-ب)



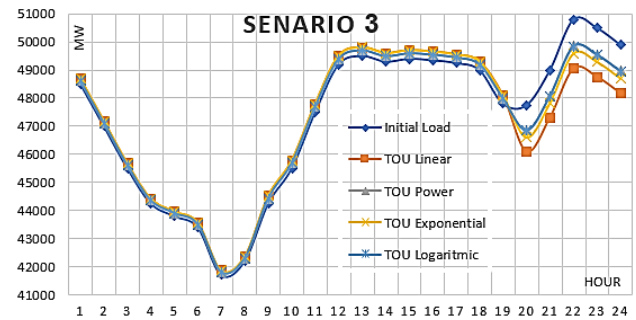
ب



الف



د

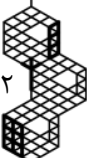


ج

شکل (۹): مقایسه مدل های مختلف در سناریوی سوم

(الف) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۳-الف) (ب) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۳-الف)

(ج) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۳-ب) (د) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۳-ب)



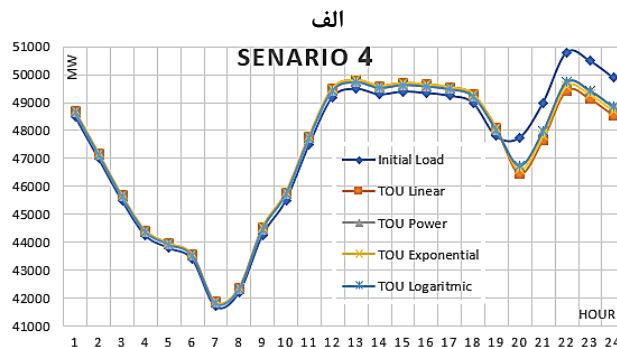
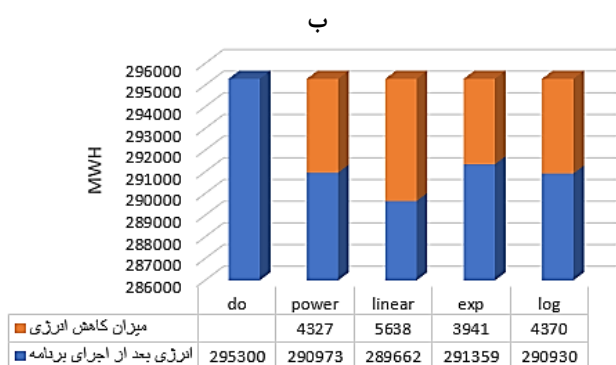
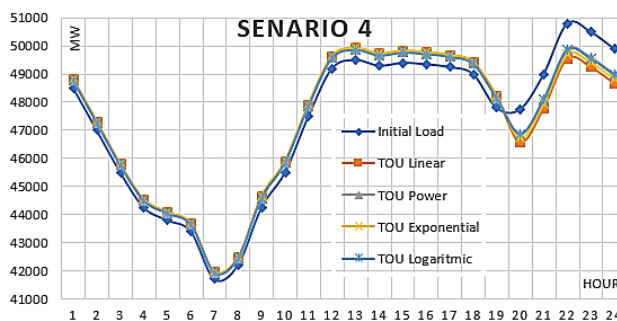
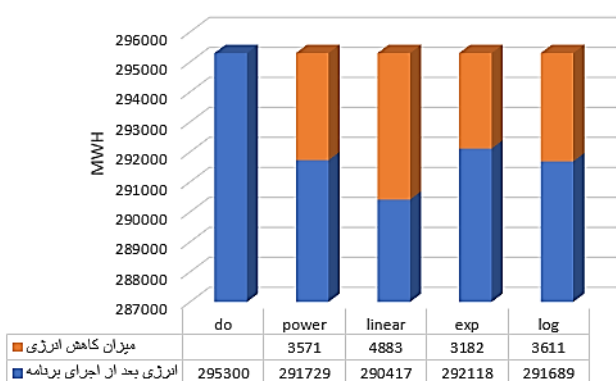
با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای (۲-الف) و (۳-الف) دیده می‌شود که دو برابر کردن نرخ‌های تشویق و جریمه نسبت به دو برابر کردن مقادیر کشش تقاضا، تأثیر بیشتری برای کاهش انرژی مصرفی در ساعت‌های پیک بار دارد، اما در انتقال انرژی مصرفی از ساعت‌های پیک با ساعت‌های میان‌باری و کم‌باری تغییرات قابل‌توجهی دیده نمی‌شود.

در سناریوی (۳-ب)، منحنی‌های مدل‌های مختلف در ساعت‌های پیک، نسبت به مشارکت ثابت، از منحنی بار اولیه فاصله بیشتری گرفته‌اند. البته در سناریوی سوم در هر دو حالت مشارکت ثابت و نامعین، منحنی بار مدل خطی کاهش زیادی در ساعت‌های پیک نشان می‌دهد به طوری که این کاهش، میزان بار در ساعت‌های پیک شبکه را، نسبت به برخی از ساعت‌های میان‌باری شبکه کمتر می‌کند. شکل‌های (۹-ج) و (۹-د) نتایج به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. پراکندگی منحنی‌ها در این سناریو به‌وضوح مشخص است. میزان کاهش انرژی در این سناریو نیز نسبت به مشابه خود با مشارکت ثابت، کاهش بیشتری را نشان می‌دهد.

۴-۵- سناریوی چهارم

در این سناریو میزان مشارکت مشترکین دو برابر سناریوی پایه در نظر گرفته شده است. مقدار کشش و مقادیر نرخ تشویق و جریمه مشابه با سناریوی اول است. نتایج سناریوی چهارم در شکل (۱۰) آورده شده است. فرم نهایی بار پس از اجرای سناریوی (۴-الف) در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. میزان کاهش انرژی مصرفی بعد از اجرای این سناریو نیز در شکل (۱۰-ب) آورده شده است.

با کمی دقت به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دریافت که میزان کاهش انرژی در این سناریو و سناریوی دوم در مدل‌های خطی، توانی و لگاریتمی تقریباً شبیه به هم بوده و تنها در مدل نمایی است که سناریوی دوم نسبت به این سناریو کاهش انرژی بیشتری انجام می‌دهد. در سناریوی (۴-ب) میزان مشارکت مشترکین دو برابر سناریوی پایه و به‌صورت نامعین لحاظ شده و مقدار کشش و مقادیر نرخ تشویق و جریمه مشابه با سناریوی اول است. شکل (۱۰-ج) منحنی تغییرات بار و شکل (۱۰-د) میزان کاهش انرژی مصرفی را بعد از اجرای این سناریو نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه مدل‌های مختلف در سناریوی چهارم

(الف) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۴-الف) (ب) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۴-الف)

(ج) بار اصلاح شده سیستم برای سناریوی (۴-ب) (د) کاهش انرژی مصرفی برای سناریوی (۴-ب)





نتایج عددی حاصل از اعمال سناریوهای هشت‌گانه انتخابی بر میزان پیک‌سایبی شبکه و برای انواع مدل انتخابی در جدول (۵) آمده است. بر اساس نتایج جدول (۵) دیده می‌شود که درصد مشارکت نامعین، باعث می‌شود که تاثیر برنامه در پیک‌سایبی افزایش یافته و ضریب بار شبکه بهتر شود.

جدول (۵): میزان کاهش انرژی کل مصرفی (مگاوات‌ساعت) در سناریوهای مختلف

مدل غیرخطی لگاریتمی	مدل غیرخطی نمایی	مدل غیرخطی توانی	مدل خطی	ردیف سناریو
۱۸۰۶	۲۱۰۳	۱۷۹۶	۳۲۵۲	الف
۲۵۶۹	۲۸۶۵	۲۵۵۸	۴۰۱۱	ب
۳۶۱۱	۴۱۷۹	۳۵۷۱	۴۸۸۳	الف
۴۳۷۰	۴۹۳۲	۴۳۲۷	۵۶۳۸	ب
۳۱۸۲	۴۱۷۹	۳۱۵۱	۶۵۰۴	الف
۳۹۴۱	۴۹۳۲	۳۹۰۸	۷۲۵۵	ب
۳۶۱۱	۳۱۸۲	۳۵۷۱	۴۸۸۳	الف
۴۳۷۰	۳۹۴۱	۴۳۲۷	۵۶۳۸	ب

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی غیرخطی برنامه‌های پاسخگویی بار، با در نظر گرفتن میزان مشارکت مشترکین به صورت یک متغیر نامعین با توزیع نرمال ارائه شده است. از آنجایی که رفتار مشترکین در برابر برنامه‌های پاسخگویی بار بسیار متنوع بوده و از عوامل مختلف فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و ... تاثیر می‌پذیرد، بررسی نتایج برنامه‌ها با نامعینی درصد مشارکت ضروری است. سناریوهای هشت‌گانه منطبق بر شرایط و تعرفه‌های انرژی و تشویق و تنبیه بار ایران در سال ۱۴۰۰ تعریف و انواع مدل‌های خطی و غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل خطی نتایجی کاملاً غیرمحافظه‌کارانه داشته و بیشترین تغییرات را در منحنی بار رقم می‌زند. در نقطه مقابل مدل غیرخطی توانی کمترین میزان تغییرات بار را داشته و محافظه‌کارانه‌ترین مدل تلقی می‌شود. از سوی دیگر وقتی درصد مشارکت مشترکین به صورت یک پارامتر نامعین با توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود، نتایج حاصل از اجرای برنامه واقعی‌تر و تاثیرگذارتر بوده و انتخاب سناریوی مناسب برای بهره‌بردار شبکه را آسان‌تر می‌کند.

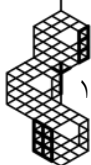
مراجع

- [1] M. Samadi, M. H. Javidi, and M. S. Ghazizadeh, "The effect of time-based demand response program on LDC and reliability of power system," in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, IEEE, May 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599801.
- [2] G. Hosseini, Mozafari S. B., and Soleymani S., "Energy Management and Operational Planning of Networked Microgrids in a Stochastic Environment," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, no. 1, pp. 77–97, Feb. 2024, doi: 10.30486/teeegs.2024.2001380.1111.
- [3] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 461–478, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.022.
- [4] A. J. Roscoe and G. Ault, "Supporting high penetrations of renewable generation via implementation of real-time electricity pricing and demand response," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 4, p. 369, 2010, doi: 10.1049/iet-rpg.2009.0212.
- [5] Zare M., Saeed S. A., and Akbari H., "Demand Response Programs Modeling in Multiple Energy and Structure Management in Microgrids Equipped by Combined Heat and Power Generation," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 99–120, 2023, (in Persian) dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.6.0.
- [6] M. Di Somma, G. Graditi, and P. Siano, "Optimal Bidding Strategy for a DER Aggregator in the Day-Ahead Market in the Presence of Demand Flexibility," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1509–1519, Feb. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2829677.





- [7] E. Vonesh and V. M. Chinchilli, *Linear and Nonlinear Models for the Analysis of Repeated Measurements*. CRC Press, 1996. doi: 10.1201/9781482293272.
- [8] Salehi S., Rezaei N., and Moshtagh J., "Techno-Economic Modelling of a Resilience Enhancement Strategy Based on Multi-microgrid Operational Capabilities," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, no. 1, pp. 35–57, 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1996973.1094.
- [9] Alavimatin S. A., Radmehr P., Ahmarinejad A., and Mansouri S. A., "Distribution Systems Energy Management in the presence of Smart Homes, Renewable Energy Resources and Demand Response Programs by Considering Uncertainties," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 79–98, 2023, (in Persian) dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.5.9.
- [10] M. Latifi, A. Rastegarnia, A. Khalili, V. Vahidpour, and S. Sanei, "A distributed game-theoretic demand response with multi-class appliance control in smart grid," *Electric Power Systems Research*, vol. 176, p. 105946, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105946.
- [11] C.-W. Chu and G. P. Zhang, "A comparative study of linear and nonlinear models for aggregate retail sales forecasting," *Int J Prod Econ*, vol. 86, no. 3, pp. 217–231, Dec. 2003, doi: 10.1016/S0925-5273(03)00068-9.
- [12] N. Eslaminia and H. R. Mashhadi, "Enhancing Peak Shaving through Nonlinear Incentive-Based Demand Response: A Consumer-Centric Utility Optimization Approach," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2023, pp. 1–15, Sep. 2023, doi: 10.1155/2023/4650539.
- [13] S. Yousefi, M. P. Moghaddam, and V. J. Majd, "Optimal real time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model," *Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5716–5727, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.06.045.
- [14] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-Time Demand Response Model," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, Dec. 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2078843.
- [15] G. Liu and K. Tomsovic, "A full demand response model in co-optimized energy and reserve market," *Electric Power Systems Research*, vol. 111, pp. 62–70, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.02.006.
- [16] R. C. Feenstra, P. Luck, M. Obstfeld, and K. N. Russ, "In Search of the Armington Elasticity," *Rev Econ Stat*, vol. 100, no. 1, pp. 135–150, Mar. 2018, doi: 10.1162/REST_a_00696.
- [17] X. Qu, H. Hui, S. Yang, Y. Li, and Y. Ding, "Price elasticity matrix of demand in power system considering demand response programs," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 121, p. 052081, Feb. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/121/5/052081.
- [18] N. Venkatesan, J. Solanki, and S. K. Solanki, "Residential Demand Response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network," *Appl Energy*, vol. 96, pp. 84–91, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.076.
- [19] H. Jalili, M. K. Sheikh-El-Eslami, M. P. Moghaddam, and P. Siano, "Modeling of demand response programs based on market elasticity concept," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 10, no. 6, pp. 2265–2276, Jun. 2019, doi: 10.1007/s12652-018-0821-4.
- [20] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Evaluation of nonlinear models for time-based rates demand response programs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 282–290, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.10.021.
- [21] R. Sharifi, S. H. Fathi, A. Anvari-Moghaddam, J. M. Guerrero, and V. Vahidinasab, "An economic customer-oriented demand response model in electricity markets," in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, Feb. 2018, pp. 1149–1153. doi: 10.1109/ICIT.2018.8352340.
- [22] M. Rahmani-andebili, "Modeling nonlinear incentive-based and price-based demand response programs and implementing on real power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 132, pp. 115–124, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.11.006.
- [23] M. Vahid-Ghavidel, M. S. Javadi, M. Gough, S. F. Santos, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Demand Response Programs in Multi-Energy Systems: A Review," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 17, p. 4332, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13174332.
- [24] H. A. Aalami, H. Pashaei-Didani, and S. Nojavan, "Deriving nonlinear models for incentive-based demand response programs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 223–231, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.003.
- [25] S. Nojavan and H. Allah Aalami, "Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of





- demand response program,” *Energy Convers Manag*, vol. 103, pp. 1008–1018, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.018.
- [26] D. H. Annis, “Probability and Statistics: The Science of Uncertainty,” *Am Stat*, vol. 59, no. 3, pp. 276–277, Aug. 2005, doi: 10.1198/tas.2005.s248.
- [27] A. Asadinejad, A. Rahimpour, K. Tomsovic, H. Qi, and C. Chen, “Evaluation of residential customer elasticity for incentive based demand response programs,” *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 26–36, May 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.12.017.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Load factor
 - ² Flexibility
 - ³ Demand response programs
 - ⁴ Incentive rate
 - ⁵ Penalty rate
 - ⁶ Elasticity
 - ⁷ Consumer participation
 - ⁸ Indefinite parameter
 - ⁹ Incentive based programs
 - ¹⁰ Time based programs
 - ¹¹ Single-period loads
 - ¹² Multi-period loads
 - ¹³ Customer profit function
 - ¹⁴ Capacity market program
 - ¹⁵ Time of use program

