ارائه مدل جامع برای شاخص‌های اجتماعی انرژی الکتریکی بر اساس رفتار غیرخطی مشترکین

رامین نیرومندفام[1] و امیر نیرومندفام[2]

[1] کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت، دبیر آموزش و پرورش، شهرستان بناب، ایران، raminniroomandfam@gmail.com

[2] **نویسنده مسئول**: آزمایشگاه سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، a_niromandfam@sut.ac.ir و شرکت صنایع برق و انرژی صبا

دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1401.9.1.4.0

نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۹- شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

صفحات ۷۰ الی ۹۰

ISSN: 2322-3146

http://journals.sut.ac.ir/jnsee

چکیده

امروزه ارائه‌دهندگان سرویس انرژی الکتریکی ناگزیر هستند در کنار شاخص‌های اقتصادی، شاخص‌های اجتماعی و دیدگاه مصرف‌کنندگان را نیز مدنظر قرار دهند. در این مقاله با مطالعه تابع رضایت مصرف‌کنندگان به‌عنوان شاخص اجتماعی، مدل نوین‌بار مبتنی بر دیدگاه غیرخطی مصرف‌کنندگان توسعه داده‌شده است. ضریب رفتار فردی پارامتر اصلی تابع رضایت و درنتیجه مدل بار پیشنهادی می‌باشد که برای محاسبه این نیاز به فعالیت‌های میدانی و آماری است. به‌عنوان راه‌کار جایگزین، در این مقاله از کشش تقاضا که یک پارامتر شناخته شده در صنعت برق است برای محاسبه ضریب رفتار استفاده شده است. همچنین برنامه‌ی پاسخگویی تشویق-محور نوینی مبتنی بر مدل بار پیشنهادی توسعه داده می‌شود. در برنامه پاسخگویی طراحی شده، نرخ تشویقی برای مشارکت مصرف‌کنندگان به‌صورت بهینه بر اساس دیدگاه فردی آن‌ها مشخص شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که برای مطالعه تابع مصرف انرژی الکتریکی نیاز است تا علاوه بر افزایش قیمت برق، نرخ تورم و افزایش درآمد مصرف‌کنندگان نیز موردبررسی قرار گیرند. همچنین نشان داده شد که برای شبکه مورد مطالعه، اجرای برنامه‌ی پاسخگویی بار بر روی مصرف‌کنندگان خانگی کمترین هزینه را دارد. حال‌آنکه برای دست‌یابی به بیشترین رفاه، مناسب‌تر است که این برنامه‌ها بر روی مصارف عمومی انجام شود.

واژه‌های کلیدی

رفتار غیرخطی،

مدل بار غیرخطی،

کشش تقاضا،

پاسخگویی بار.

Sahand University of Technology

DOR:

20.1001.1.23223146.1401.9.1.4.0

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering

Vol.9, No.1

Spring and Summer 2022

ISSN: 2322 – 3146

http://journals.sut.ac.ir/jnsee

Providing a Eomprehensive Model for Social Indicators of Electrical Energy Based on Nonlinear Behavior of Consumers

Ramin Niromandfam[1] and Amir Niromandfam[2]

[1]MSc, Electrical Engineering, Education Teacher, Bonab, Iran, raminniroomandfam@gmail.com

[2]**Corresponding Author**, Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, a_niromandfam@sut.ac.ir and Saba Power and Energy Group

ABSTRACT

Today, electricity service providers have to consider economic index as well as social indicators and consumer perspectives. In this paper, by studying the consumer satisfaction function, a new load model based on nonlinear consumer perspective has been developed. The main variable in the proposed model is the coefficient of individual consumer behavior, which requires field and statistical activities to estimate. As an alternative solution in this paper, the relationship between demand elasticity and individual behavior coefficients has been mathematically developed to estimate these coefficients through demand elasticity information. Also, a new demand response program based on individual behavior and satisfaction function has been developed to determine the incentive rate for consumer participation in an optimal way based on their individual perspective. In the numerical results section, the data of Iran's electricity network has been selected for study. Numerical results showed that in order to study the annual consumption change, in addition to increasing prices, inflation rates and increasing consumer incomes also need to be examined. It was also shown that for the Iranian electricity grid, the demand response program implementation for the household consumers has the lowest cost. However, in order to achieve maximum welfare, it is more appropriate that these programs have been applied to the public customers.

Keywords

۱- مقدمه

امروزه به دلیل ارتباط تنگاتنگ مصـــرف انرژی الکتریکی با زندگی مدرن، تأمین انرژی الکتریکی بدون وقفه یکی از جنبه‌های اصلی زندگی در جوامع بشری شده است. در چنین جوامعی مصرف‌کننده تبدیل به یک بازیگر پویا در صنعت برق شده که قادر است با ارائه‌دهندگان انرژی به تعامل بپردازد. ازاین‌رو، شناسایی درست دیدگاه و رفتار مصرفی مصرف‌کننده نقش اساسی در ارائه سرویس مناسب انرژی الکتریکی ایفا می‌کند. شناسایی رفتار مصرفی‌مصرف‌کنندگان بهره‌بردار مستقل سیستم را قادر خواهد ساخت تا علاوه بر تخمین مناسب تعادل مصرف و تولید انرژی الکتریکی، تأثیر پارامترهای اقتصادی و اجتماعی مانند مالیات بر مصرف و یا یارانه‌ی انرژی را در سیستم قدرت به شکل مناسبی تخمین زده و مدیریت نماید. با در اختیار داشتن اطلاعات کافی از رفتار مصرفی مصرف‌کنندگان، شرکت‌های توزیع و خرده‌فروشان نیز قادر هستند با ارائه سرویس مطلوب به مصرف‌کنندگان ســود خود را بیشــینه نمایند. در ســال‌های اخیر رخدادهایی ازجمله تجدید ســاختار در صــنعت برق، افزایش هزینه‌ی ســوخت، نگرانی‌های زیست‌محیطی و توسعه‌ی برنامه‌های مدیریت سمت مصرف شناسایی و مدل‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان را بیش‌ازپیش اهمیت داده است [۱].

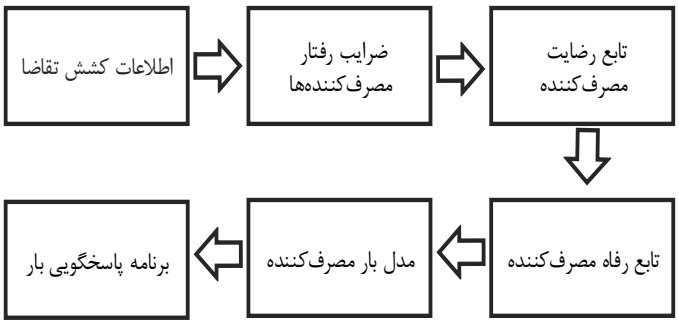
یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رفتاری مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی شاخص کشش تقاضا[1] است. کشش تقاضا یک شاخص نرمالیزه شده‌ای است که تغییرات میزان مصرف را نسبت به تغییرات پارامتر بخصوصی مورد سنجش قرار می‌دهد. این پارامتر ممکن اســت تغییرات قیمت، تغییرات ســطح درآمد، تغییرات در شــاخص شــهرنشــینی و غیره باشــد. مراجع مختلفی اقدام به بررسی و مدل‌سازی رفتار مصرف‌کننده‌های انرژی الکتریکی و تخمین کشش تقاضا نموده‌اند. برای مثال، مراجع [۲] و [۳] از مدل لگاریتمی و لگاریتمی-لگاریتمی برای مدل‌ســازی رفتار مصــرف‌کنندگان و کشــش تقاضــای انرژی الکتریکی برای مصــارف تک دوره‌ای و چند دوره‌ای اســتفاده کرده‌اند. همچنین از مدل[2] (AIDS) [۴و ۵]، روش حداقل مربعات[3] [۶]، پنل دیتا[4] [۷و ۸]، شــبکه عصبی[5] [۹]، سری‌های زمانی[6] [۱۴-۱۰] نیز برای مدل‌سازی بار الکتریکی و تخمین کشش تقاضا استفاده شده است. تمام روش‌های ذکر شده کشش تقاضا را به‌صورت جامع و برای مجموع مصارف انرژی الکتریکی در یک بازه زمانی تخمین می‌زنند [۱۵]. هرچند چنین تخمینی برای بررسی چگونگی تغییرات مصرف در حوزه‌ی جغرافیایی یک کشور مناسب است، برای بررسی رفتار فردی مصرف‌کنندگان به صورت مجزا کارایی چندانی ندارد. رفتار فردی غالباً تحت تأثیر مزایای جانبی مصرف است که غالباً به صورت کیفی و اندازه‌گیری آن‌ها مشکل می‌باشد [۱۶]. ازجمله این مزایا می‌توان به آسایش، راحتی و زیباشناختی ناشی از مصرف انرژی الکتریکی اشاره کرد. ازاین‌رو، در این مقاله مدل نوینی برای شناسایی و مدل کردن رفتار فردی مصرف‌کنندگان و تخمین کشش تقاضا با استفاده از تابع رضایت مصرف انرژی الکتریکی ارائه خواهد شد.

مراجع مختلف اقدام به بررسی و مدل‌سازی رفتار و ارائه مدل‌هایی برای رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی نموده‌اند، اما خرسندی و رضایت ناشی از مصرف انرژی الکتریکی در تابع رفتار مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله تلاش شده است تا

[1] Elasticity
[2] Almost ideal demand system
[3] Ordinary least squares
[4] Pannel data model
[5] Artificial neural networks
[6] Time-series methods

با استفاده از مفاهیم اجتماعی-اقتصادی و با استفاده از تابع رضایت[1]، تابع رفتار و درنتیجه رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی مدل شود. پارامتر اصلی در تابع رضایت، رفتار و دیدگاه شخصی هر مصرف‌کننده است که برای تخمین آن نیاز به بررسی‌های اجتماعی و میدانی می‌باشد. برای حل مشکل فوق در این مقاله تلاش شده از ارتباط کشش تقاضا با تابع رفتار و مصرف انرژی الکتریکی استفاده کرد. به‌عبارت‌دیگر مدل ریاضی جامعی بر اساس تابع رفاه و مدل بار توسعه یافته بر اساس تابع رضایت مشترکین ارائه شده است.

با در اختیار داشتن مدل بار و کشش تقاضا می‌توان با ارائه تشویقی مناسبی چگونگی مصرف انرژی مشترکین را در غالب برنامه‌ی پاسخگویی بار[2] (DR) مدیریت کرد. مراجع مختلف برای طراحی برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر رفتار مصرف‌کننده از مدل‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال، مرجع [۱۷] از یک مدل رفتار منطقی برای بررسی عکس‌العمل مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در مقابل برنامه‌های پاسخگویی تشویق-محور استفاده کرده است. در مرجع [۱۸] برنامه‌ی پاسخگویی باری بر پایه‌ی شاخص ارزش مصرف[3] استفاده شده است. همچنین مرجع [۱۹] از تئوری رونق[4] برای ارائه‌ی تشویقی مناسب به مصرف‌کنندگان مشارکت‌کننده در برنامه پاسخگویی بار استفاده کرده است. به‌عنوان یک مدل کارآمد که مبتنی بر دیدگاه و رضایت مصرف‌کنندگان است، در این مقاله یک برنامه پاسخگویی تشویق-محور بر اساس تابع رضایت ارائه خواهد شد. مدل ارائه شده این ویژگی را دارد تا علاوه بر تعیین سطح بهینه تشویقی بر اساس دیدگاه مصرف‌کنندگان، پارامترهای اجتماعی از قبیل تغییرات رفاه و رضایت ناشی از مشارکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار را مورد سنجش و ارزیابی قرار دهد. شکل (۱) روندنمای مدل بار و برنامه‌ی پاسخگویی بار پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. مطابق روندنما، با استفاده از ضرایب کشش تقاضا ضرایب رفتاری مصرف‌کننده مدل و بر اساس آن تابع رفاه و در انتها یک برنامه پاسخگویی تشویق-محور مبتنی طراحی خواهد شد.



شکل ۱. روندنمای مدل پیشنهادی برنامه پاسخگویی بار پیشنهادی

به دلیل ارتباط تنگاتنگ کشش تقاضا با رفتار مصرفی، بخش ۲ این مقاله به بررسی و مرور کارهای پیشین پیرامون تخمین ضرایب کشش تقاضا و تابع رضایت در سیستم‌های قدرت اختصاص داده شده است. در بخش ۳ نیز بر اساس تابع رضایت، تابع رفاه و مدل بار توسعه داده می‌شود. در این بخش کشش تقاضا بر اساس مدل بار ارائه شده به صورت روابط ریاضی استخراج شده‌اند. برنامه پاسخگویی بار تشویق-محور بر اساس ضرایب رفتاری مصرف‌کننده‌ها نیز در بخش ۴ ارائه شده است. اطلاعات سیستم

[1] Utility function
[2] Demand response
[3] Consumption value
[4] Prospect theory

قدرت ایران در بخش ۵ برای بررسی کارایی مدل‌های ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در انتها نیز نتیجه‌گیری در بخش ۶ گنجانده شده است.

۲- مروری بر کارهای گذشته

۲-۱-کشش تقاضا

مراجع مختلفی اقدام به تخمین کشش تقاضای انرژی الکتریکی مبادرت نموده‌اند که در این بخش سعی می شود کارهای پیشین در مورد تخمین کشش تقاضا به‌صورت مفصل مورد بررسی قرار گیرد. شاخص‌ها و متغیرهای زیادی در میزان کشش تقاضای انرژی الکتریکی تأثیرگذار هستند. مرجع [۲۰] به بررسی برخی از متغیرها ازجمله، نوع مصرف‌کننده، قیمت برق، قیمت سوخت‌های جایگزین، تغییرات آب‌وهوایی، بازارهای برق، اندازه خانه، اندازه شهر، سطح شهرنشینی و غیره بر کشش تقاضا پرداخته است. همچنین با مطالعه‌ی مراجع مختلف مشخص می‌شود که کشش تقاضای انرژی الکتریکی در بلندمدت، به دلیل توانایی بیشتر تطبیق مصرف، بیشتر از کوتاه‌مدت است [۲۱]. برای مثال مرجع [۲۲] کشش تقاضای کوتاه‌مدت و بلندمدت را برای کشورهای شورای همکاری خلیج‌فارس مورد بررسی قرار داده است. بر اساس نتایج این مرجع، کشش تقاضا در کوتاه‌مدت و بلندمدت برای کشورهای عربستان سعودی، کویت، عمان، بحرین، قطر و امارات متحده عربی به ترتیب برابر با ۰/۰۴-، ۰/۰۸-، ۰/۰۷-، ۰/۰۶-، ۰/۱۸-، ۰/۰۹- و ۱/۲۴-، ۱/۱-، ۰/۸۲-، ۳/۳۹-، ۱/۰۹-، ۲/۴۳- می‌باشد. همچنین کشش تقاضای بخش‌های مختلف مصرف نیز مقادیر متفاوتی دارند. برای مثال مرجع [۲۳] کشش تقاضای خودی را برای بخش‌های صنعت، کشاورزی و خدمات در کشور ایران به ترتیب برابر با ۰/۱۶-، ۰ و ۰/۴۸- تخمین زده است. همچنین کشش تقاضای نسبت به درآمد برای بخش‌های ذکرشده این کشور به ترتیب برابر با ۰/۳۹، ۰/۶ و ۰/۵۳ تخمین زده شده است. در حالت کلی مرجع [۱۰] نشان داده است که هرچند مصارف بخش صنعت دارای کشش بیشتری نسبت به مصارف خانگی در کوتاه‌مدت هستند، در بلندمدت کشش تقاضای مصارف خانگی بیشتر از مصارف صنعتی خواهد بود.

برخی از مراجع کشش تقاضای متقابل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. کشش تقاضای متقابل به دلیل انتقال مصرف یک دوره به دوره‌های زمانی به دلیل تغییرات قیمت در دوره‌های دیگر می‌باشد. برای مثال در مراجع [۴] و [۵] کشش تقاضای متقابل بین ساعات پرباری و کم‌باری مورد بررسی قرار گرفته است. هرچند که کشش تقاضای خودی همواره منفی می‌باشد، کشش تقاضای متقابل ممکن است مثبت، صفر و یا منفی باشد. کشش تقاضای مثبت به این معنی است که با افزایش قیمت در یک دوره، مصرف به دوره بعد منتقل می‌شود.

علاوه بر حساسیت تقاضا نسبت به قیمت، تقاضای انرژی الکتریکی به تغییرات درآمد مصرف‌کنندگان نیز حساس می‌باشد. مراجع [۹] و [۱۳] نشان داده‌اند که کشش تقاضای درآمد در بلندمدت بیشتر از کوتاه‌مدت است. مرجع [۱۱] به بررسی کشش تقاضای درآمد در کشورهای شورای همکاری خلیج‌فارس پرداخته است که در آن کشش تقاضای درآمد برای این کشورها در کوتاه‌مدت غیر کشسان (نزدیک به صفر) بوده حال‌آنکه در بلندمدت ۰/۴۳ تا ۰/۷۱ بوده است. همچنین می‌توان حساسیت مصرف انرژی را نسبت به شهرنشینی، درصد افزایش مصرف انرژی الکتریکی با افزایش ۱ درصد شاخص شهرنشینی، نیز مورد ارزیابی قرار داد. مرجع [۲۴] کشش تقاضای شهرنشینی را برای کوتاه‌مدت و بلندمدت به ترتیب برابر با ۱/۶۱ و ۳/۹۱ تخمین زده است. در مرجع

[۸] کشش تقاضای انرژی الکتریکی برای مناطق روستایی و شهری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به دلیل در دسترس بودن انرژی‌های دیگر، مانند هیزم برای پخت‌وپز، مصرف‌کنندگان خانگی روستایی کشش تقاضای بیشتری نسبت به مصرف‌کنندگان خانگی شهری دارند. همچنین کشش تقاضای درآمد نیز برای مصرف‌کنندگان روستایی و شهری به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۳۵ بدست آمده است. نویسندگان دلیل بالا بودن کشش تقاضای درآمد مصارف شهری را به ارتباط بیشتر زندگی شهری با انرژی الکتریکی توجیه کرده‌اند.

جدول ۱. جمع‌بندی اطلاعات مراجع مورد مطالعه پیرامون کشش تقاضا

مرجع	کشور (بخش)	کشش تقاضای خودی	کشش تقاضای متقابل	کشش تقاضای درآمد
[۲]	استرالیا (خانگی)	۰/۴۱۶- کوتاه‌مدت	-	-
[۳]	هند (خانگی)	۰/۴۵۲- فصل زمستان ۰/۲۹۰- فصل تابستان ۰/۵۱- فصل موسمی	۰/۲۷ فصل زمستان ۰/۶۵- فصل تابستان ۰/۲۱- فصل موسمی	۰/۶۴ فصل زمستان ۰/۶۳ فصل تابستان ۰/۶۰ فصل موسمی
[۴]	فرانسه (صنعت)	۱/۸۷- کم‌باری ۱/۴۷- پرباری	۰/۴۶ کم‌باری ۰/۸۵ پرباری	- -
[۵]	سویس (خانگی)	۲/۳- تا۲/۵۷- کم‌باری ۱/۲۵- تا ۱/۴۱- پرباری	۰/۳۴ تا ۱/۵۷	-
[۶]	پاکستان (صنعتی)	۰/۰۶- کوتاه‌مدت ۰/۲۲- بلندمدت	- -	۰/۸۵ کوتاه‌مدت ۲/۹۴ بلندمدت
[۷]	ژاپن (خانگی)	۱/۱۳- بلندمدت	-	۰/۶ بلندمدت
[۸]	پرتغال (خانگی)	۰/۶۷- شهری در بلندمدت ۰/۸۹- روستایی بلندمدت	۰/۲۴۴ شهری بلندمدت ۰/۳۷ روستایی بلندمدت	۰/۳ شهری بلندمدت ۰/۳۵ روستایی بلندمدت
[۱۱]	کشورهای همکاری خلیج‌فارس (خانگی)	۰ کوتاه‌مدت ۰ تا ۰/۱۶- بلندمدت	- -	۰ کوتاه‌مدت ۰/۴۳ تا ۰/۷۱ بلندمدت
[۱۲]	کره جنوبی (خانگی)	۰/۲۷- بلندمدت	-	۱/۳۳ بلندمدت
[۱۳]	ترکیه (تجمیع مصارف)	۰/۰۱۲- کوتاه‌مدت ۰/۹۱- بلندمدت	- -	۰/۰۱۵ کوتاه‌مدت ۱/۰۹ بلندمدت
[۱۴]	۲۰ کشور صنعتی (صنعتی)	۰/۰۸۲- تا ۰/۱۸۷- کوتاه‌مدت ۰/۲- تا ۰/۷- بلندمدت	- -	- -
[۲۲]	کشورهای همکاری خلیج‌فارس (تجمیع مصارف)	۰/۰۴- تا ۰/۱۸- کوتاه‌مدت ۰/۸۲- تا ۳/۳۹- بلندمدت	- -	- -
[۲۳]	ایران (خانگی/ صنعتی/ کشاورزی)	۰/۱۴- خانگی ۰/۴۸- صنعتی ۰/۰ کشاورزی	۰/۰ خانگی نسبت به گاز ۰/۳۸ صنعتی نسبت به گاز ۰/۰ کشاورزی نسبت به گاز	۰/۳۹ خانگی ۰/۵۳ صنعتی ۰/۶ کشاورزی
[۲۴]	تایوان (خانگی)	۱/۵-	-	۰/۲۳ کوتاه‌مدت ۱/۰۴ بلند مددت

۲-۲- تابع رضایت

تابع رضایت مفهومی برگرفته از علم اقتصاد است که میزان رضایت ناشی از مصرف محصول و یا دریافت خدمات را مورد سنجش و اندازه‌گیری قرار می‌دهد. این تابع در مراجع مختلفی برای سنجش رضایت ناشی از مصرف انرژی الکتریکی مورد استفاده

قرار گرفته است. ویژگی‌های تابع رضایت قابل استفاده برای مدل کردن رفتار مصرف‌کننده انرژی الکتریکی در مرجع [۲۵] به‌صورت زیر بیان شده است.

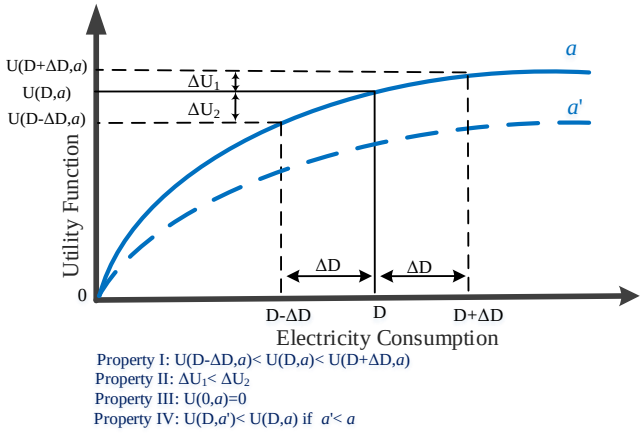
ویژگی ۱: تابع رضایت یک تابع افزایشی و پیوسته است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش مصرف انرژی الکتریکی رضایت مصرف‌کننده نیز افزایش خواهد یافت. این ویژگی نیازمند آن است که مطابق رابطه (۱)، مشتق مرتبه اول تابع رضایت بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد.

$$\frac{\partial U(D,a)}{\partial D} \geq 0 \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، U تابع رضایت، D میزان مصرف انرژی الکتریکی و a ضریب رفتار مشترک می‌باشند. ضریب رفتار شاخصی برای رفتار ریسک گریزی هر فرد می‌باشد.

ویژگی ۲: حاشیه رضایت با افزایش مصرف کاهش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال، رضایت کسب شده برای یک کیلووات اضافی مصرف انرژی الکتریکی برای مصرف‌کننده‌ای که یک کیلووات انرژی مصرف می‌کند بیشتر از رضایت کسب شده توسط مصرف‌کننده‌ای است که ۱۰۰ کیلووات مصرف انرژی دارد. این ویژگی را می‌توان به صورت رابطه (۲) با زبان ریاضی بیان کرد:

$$\frac{\partial U^2(D,a)}{\partial D^2} < 0 \qquad (۲)$$



شکل ۲. تابع رضایت برای مصرف‌کننده انرژی الکتریکی [۲۵]

ویژگی ۳: در صورت عدم مصرف، رضایتی عاید مصرف‌کننده نخواهد شد. این ویژگی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه (۳) بیان کرد.

$$U(0,a) = 0 \qquad (۳)$$

ویژگی ۴: هر چه ضریب رفتار بزرگ‌تر باشد، مصرف‌کننده رضایت بیشتری از مصرف انرژی الکتریکی کسب خواهد کرد.

$$\frac{\partial U(D,a)}{\partial a} > 0 \qquad (۴)$$

بر اساس ویژگی‌های فوق، تابع رضایت یک تابع مقعر و کاهشی می‌باشد که با افزایش مصرف اشباع خواهد شد. همچنین در مرجع [۲۶] نشان داده شده است که تابع رفاه مصرف‌کننده را می‌توان با کسر هزینه انرژی از تابع رضایت وی مدل کرد. تابع رضایت به دلیل سنجش سطح رضایت مصرف‌کننده در مراجع مختلفی برای طراحی برنامه‌های پاسخگویی بار مورد استفاده قرار گرفته شده است. توابع مختلفی در مراجع پیشین به‌عنوان تابع رضایت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پرکاربردترین توابع رضایت عبارتند از [۲۷]:

تابع رضایت خطی[1]:

$$U(D,a)=aD,\quad a>0 \tag{۵}$$

تابع رضایت نمایی[2]:

$$U(D,a)=1-e^{-aD},\quad a>0 \tag{۶}$$

تابع رضایت درجه دوم[3]:

$$U(D,a)=-(1-aD)^2,\quad D\le\frac{1}{a} \tag{۷}$$

تابع رضایت لگاریتمی[4]:

$$U(D,a)=\ln(1+aD),\quad a>0 \tag{۸}$$

تابع رضایت[5] CES:

$$U(D_i,D_j,a)=(D_i^{\,a}+D_j^{\,a})^{\frac{1}{a}},\quad a\le 1 \tag{۹}$$

تابع رضایت[6] Cob-Douglas:

$$U(D_i,D_j,a_i,a_j)=D_i^{a_i}\times D_j^{a_j} \tag{۱۰}$$

یکی از کاربردهای مهم تابع رضایت سنجش رضایت و در نتیجه رفاه مصرف‌کننده می‌باشد. با افزایش مصرف، رضایت و درنتیجه رفاه مصرف‌کننده افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش مصرف منجر به افزایش هزینه و صورتحساب مصرف‌کننده خواهد شد که عاملی بر کاهش رفاه می‌باشد. با توجه به مطالب فوق مرجع [۲۸] رفاه مصرف‌کننده را به صورت زیر رابطه (۱) بیان کرده است.

$$W(D,\pi,a)=AU(D,a)-\pi D \tag{۱۱}$$

در رابطه فوق، π برابر با قیمت برق است. همچنین پارامتر A به‌عنوان ضریب کالیبراسیون[7] انتخاب شده تا بتوان تابع رضایت را نیز از جنس پول بیان کرد. مطابق رابطه (۱۲)، هر مصرف‌کننده منطقی به میزانی انرژی الکتریکی مصرف خواهد کرد که به بیشینه رفاه دست یابد. ازاین‌رو داریم [۲۹]:

$$\frac{\partial W(D,\pi,a)}{\partial D}=\frac{\partial(AU(D,a))}{D}-\pi=0 \tag{۱۲}$$

$$A\frac{\partial U(D,a)}{\partial D}=\pi \tag{۱۳}$$

رابطه (۱۳) برای تمامی ساعات معتبر می‌باشد. ازاین‌رو، با فرض این‌که π_0 و D_0 برابر با قیمت و مصرف اولیه مشترک می‌باشد، ضریب کالیبراسیون را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$A=\frac{\pi_0}{\dfrac{\partial U(D_0,a)}{\partial D_0}} \tag{۱۴}$$

۳- تابع رضایت نمایی

در این مقاله از تابع نمایی برای مدل رفتار مصرف‌کننده‌ها استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است که رویه ارائه شده در این

[1] Linear utility function
[2] Exponential utility function
[3] Exponential utility function
[4] Logarithmic utility function
[5] Constant elasticity of subsitution function
[6] Cob-Douglas utility function
[7] Calibration coefficient

مقاله جامع بوده و با اجرای آن بر روی سایر توابع رضایت نتایج مشابهی قابل حصول خواهد بود.

تابع نمایی رضایت یکی از پرکاربردترین توابع برای مدل کردن رفتار مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی می‌باشد. این تابع رفتار مصرف‌کننده را به‌صورت ریسک‌گریز مطلق[1] مدل می‌کند. برای این تابع، تابع رفاه و ضریب کالیبراسیون به‌صورت زیر خواهند بود [۳۰]:

$$W(D,\pi,a)=A(1-e^{-aD})-\pi D \quad (۱۵)$$

$$A=\frac{\pi_0}{a}e^{aD_0} \quad (۱۶)$$

با در اختیار داشتن ضریب کالیبراسیون و با فرض رفتار منطقی مصرف‌کننده می‌توان تابع مصرف را به‌صورت تابعی از ضریب رفتار و قیمت انرژی الکتریکی به‌صورت زیر مدل کرد:

$$\frac{\partial W(D,a)}{\partial D}=\frac{\partial[A(1-e^{-aD})-\pi D]}{\partial D}=0 \quad (۱۷)$$

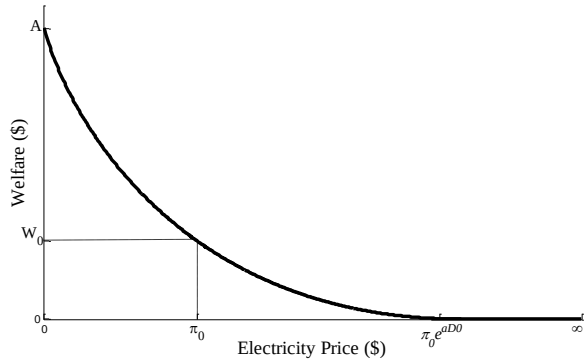
$$Aae^{-aD}-\pi=0 \quad (۱۸)$$

$$D=D_0-\frac{1}{a}\ln(\frac{\pi}{\pi_0}) \quad (۱۹)$$

همچنین با جایگذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۱۵) می‌توان رفاه مصرف‌کننده را مطابق رابطه (۲۰) و شکل (۳) مستقیماً با استفاده از قیمت انرژی الکتریکی و ضریب رفتار وی محاسبه کرد.

$$W_\pi(\pi,a)=A+\frac{\pi}{a}[\ln(\frac{\pi}{aA})-1] \quad (۲۰)$$

مطابق رابطه (۲۰)، رفاه و درنتیجه میزان مصرف انرژی الکتریکی به ضریب رفتار فردی مصرف‌کننده و قیمت انرژی ارتباط دارد. ازاین‌رو با تخمین مناسب این ضریب می‌توان رفتار مصرف‌کننده را به شکل مناسبی پیش‌بینی نمود.



شکل ۳.تابع رفاه درازای قیمت‌های مختلف انرژی الکتریکی

۳-۱- رابطه کشش تقاضا و تابع رضایت

یکی از شاخص‌های مهم رفتاری مصرف‌کننده، کشش تقاضای وی نسبت به تغییرات قیمت می‌باشد. کشش تقاضا را می‌توان از بررسی آماری اطلاعات مصرف‌کننده بدست آورد و یا برای آن مدل ریاضی ارائه کرد. در این قسمت قصد داریم رابطه‌ی ریاضی بین کشش تقاضا با ضریب رفتار مصرف‌کننده را استخراج کنیم تا بتوان از طریق اطلاعات کشش تقاضا ضریب رفتار را تخمین زد. با در اختیار داشتن ضریب رفتار می‌توان تابع رفاه و درنتیجه رفتار مصرف‌کننده سنجش نمود.

[1] Absolute risk aversion

۳-۱-۱- مصارف تک‌دوره‌ای

برخی از مصارف الکتریکی، مانند بارهای روشنایی، صرفاً به تغییرات قیمت در آن ساعت حساس می‌باشند. این دسته از بارها قابلیت جابه‌جایی به ساعات دیگر را دارا نیستند ازاین‌رو دارای کشش تقاضای تک‌دوره‌ای هستند. برای مصارف تک‌دوره‌ای تنها کشش تقاضای خودی قابل تعریف است که به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$\mathrm{E}=\frac{\pi}{D}.\frac{\partial D}{\partial \pi} \quad (۲۱)$$

مطابق رابطه فوق، کشش تقاضا برابر است با تغییرات نرمالیزه شده مصرف به تغییرات نرمالیزه شده قیمت انرژی الکتریکی. با در نظر گرفتن رابطه (۱۹) به‌عنوان تابع مصرف، مشتق تابع مصرف نسبت به قیمت و کشش تقاضا برای مصارف تک دوره‌ای به‌صورت روابط (۲۲) و (۲۳) خواهند بود.

$$\frac{\partial D}{\partial \pi}=-\frac{1}{a\pi} \quad (۲۲)$$

$$\mathrm{E}=-\frac{1}{aD_0} \quad (۲۳)$$

حال با فرض در اختیار بودن کشش تقاضا و در نظر گرفتن رابطه (۲۳)، می‌توان ضریب رفتار مصرف‌کننده را به صورت زیر بیان کرد:

$$a=\frac{-1}{D_0\mathrm{E}} \quad (۲۴)$$

۳-۱-۲- مصارف چند دوره‌ای

برخی دیگر از مصارف الکتریکی، همانند استفاده از ماشین لباسشویی، قادر هستند مصرف خود را از ساعات گرانی به ساعات ارزان‌تر منتقل کنند. در این صورت برای این دسته از مصارف علاوه بر کشش تقاضای خودی، کشش تقاضای متقابل نیز قابل تعریف خواهد بود. رابطه‌ی (۲۵) کشش تقاضای متقابل را به‌صورت ریاضی بیان می‌کند.

$$\mathrm{E}_{I,K}=\frac{\pi_K}{D_I}.\frac{\partial D_I}{\partial \pi_K} \quad (۲۵)$$

در رابطه فوق، اندیس I و K نشان دهنده دوره‌های زمانی می‌باشند. مصرف‌کننده با هدف بیشینه کردن رفاه خود در مجموع ساعات دوره اقدام به مصرف انرژی الکتریکی خواهد نمود، ازاین‌رو می‌توان رفاه مصرف‌کننده در طول کل دوره، دوره (۱ تا T) را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$W_{Total}=A_1U(D_1,a_1)+\ldots+A_TU(D_T,a_T)-[\pi_1D_1+\ldots..+\pi_TD_T] \quad (۲۶)$$

با فرض رفتار منطقی مصرف‌کننده و با در نظر گرفتن بیشینه‌سازی رفاه (رابطه (۲۸))، ضریب کالیبراسیون برای مصارف چند دوره‌ای در هر دوره به‌صورت رابطه‌ی (۲۸) خواهد.

$$\left.\frac{\partial W_{Total}}{D_I}\right|_{D_I=D_I^0}=0,\quad \forall I \quad (۲۷)$$

$$A_I=\left.\frac{\pi_I}{\frac{\partial U(D_I,a_I)}{\partial D_I}}\right|_{D_I=D_I^0,\pi_I=\pi_I^0},\quad \forall I \quad (۲۸)$$

مطابق رابطه‌ی (۲۹)، ضریب کالیبراسیون در هر دوره صرفاً به قیمت و مصرف اولیه در آن ساعت ارتباط دارد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، مصرف‌کننده میزان مصرف خود را بر اساس هدف بیشینه سازی رفاه خود تنظیم می‌کند. ازاین‌رو برای بارهای چند دوره‌ای تابع هدف مصرف‌کننده به‌صورت رابطه‌ی (۲۹) خواهد بود. باید توجه کرد که در کنار بیشینه‌سازی رفاه، باید

قید بودجه‌ی مصـــرف‌کننده مطابق رابطه‌ی (۳۰) نیز برقرار باشـــد. به‌عبارت‌دیگر مصـــرف‌کننده، میزان مصـــرف خود را به‌گونه‌ای مشخص می‌کند که علاوه بر بیشینه‌سازی رفاه، هزینه انرژی را نیز مدیریت کند.

$$Max: W_{Total} \tag{۲۹}$$

با قید:

$$\pi_1 D_1 + ... + \pi_T D_T = B \tag{۳۰}$$

بهینه سازی فوق از جنس مسائل بهینه سازی لاگرانژی است که با حل آن می‌توان تابع مصرف را بر اساس ضرایب رفتار و قیمت انرژی در ساعات مختلف به صورت رابطه (۳۱) بیان کرد. همچنین به طریق مشابه با مصارف تک‌دوره‌ای و با مشتق‌گیری از تابع مصرف، کشش تقاضای خودی و متقابل برای مصارف چند دوره‌ای به‌صورت روابط (۳۲) و (۳۳) خواهند بود.

$$D_I = \frac{B - \sum_{J=1}^{T} \frac{\pi_J}{a_J} \ln(\frac{\pi_I}{\pi_J} \frac{a_J}{a_I} \frac{A_J}{A_I})}{\sum_{J=1}^{T} \frac{a_I}{a_J} \pi_J} \tag{۳۱}$$

$$E_{I,I} = -\frac{1}{a_I D_I^0} + \frac{1 - a_I D_I^0}{a_1 D_I^0 \sum_{J=1}^{T} \frac{\pi_J^0}{\pi_I^0} \frac{a_I}{a_J}} \tag{۳۲}$$

$$E_{I,K} = \frac{1}{a_I D_I^0} \frac{(1 - a_K D_K^0)}{\sum_{J=1}^{T} \frac{\pi_J^0}{\pi_K^0} \frac{a_K}{a_J}} \tag{۳۳}$$

علاوه بر قیمت، تغییر در بودجه نیز بر میزان مصرف انرژی الکتریکی تأثیرگذار خواهد بود. ازاین‌رو می‌توان کشش تقاضا به بودجه (درآمد) را مطابق رابطه (۳۴) توسط مشتق‌گیری از تابع مصرف نسبت به بودجه مصرف‌کننده محاسبه کرد.

$$E_{I,B} = \frac{B}{a_I D_I^0 \sum_{J=1}^{T} \frac{\pi_J^0}{a_J}} \tag{۳۴}$$

حال در این قســمت به تفســیر مقدار کشــش تقاضــای درآمد می‌پردازیم، بســته به مقدار کشــش تقاضــای درآمد مصــارف انرژی الکتریکی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

مصارف پست: درصورتی‌که کشش تقاضای بودجه برای دوره‌ای عددی کمتر از صفر باشد، مصرف موردنظر از نوع بارهای پست خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر با افزایش درآمد مصــرف‌کننده، مصــرف آن دوره کمتر نیز خواهد شــد. به‌عنوان‌مثال با افزایش درآمد، مصرف‌کننده لامپ‌های پرمصرف را با نوع کم‌مصرف (LED) جایگزین خواهد کرد که منجر به کاهش مصرف وی خواهد شد.

مصارف معمولی: برای این دسته از مصارف، کشش تقاضا مقداری بین صفر و یک را دارا است. در این صورت میزان مصرف متناســب با افزایش درآمد افزایش خواهد یافت. برای مثال روشــنایی اتاق نشــیمن را می‌توان مثال زد که با افزایش ســطح درآمد، مصرف‌کننده از روشنایی بیشتری در این بخش استفاده خواهد کرد.

مصارف لوکس: در صورتی‌که کشش تقاضای درآمد عددی بزرگ‌تر از یک باشد، مصرف از نوع مصارف لوکس دسته‌بندی می‌شود. مصرف این دسته از بارها به‌مراتب بیش از افزایش درآمد افزایش خواهد داشت. به‌عنوان‌مثال می‌توان به سرمایه‌گذاری در روشنایی لوکس اشاره کرد که در آن با افزایش درآمد، مصرف‌کننده هزینه گزافی را به تأمین روشنایی لوکس اختصاص می‌دهد.

٤- طراحی برنامه پاسخگویی بار بر اساس تابع رضایت

در این بخش قصــد داریم بر اســاس تابع رضــایت و ضــریب رفتار، یک برنامه پاســخگویی بار تشــویق محور طراحی کنیم. هدف از طراحی برنامه پاسخگویی بار تشویق محور، ارائه تشویقی بهینه به هر یک از مصرف‌کننده‌ها می‌باشد تا مصرف خود را

بنابر نیاز سیستم تغیر دهند. همانند بخش‌های پیشین فرض می‌شود که مصرف‌کننده رفتار منطقی داشته و بر اساس بیشینه‌سازی رفاه خود رفتار می‌کند. در این صورت تابع رفاه مصرف کننده قبل از برنامه پاسخگویی بار به‌صورت (۳۵) بوده که با فرض بیشینه‌سازی تابع رفاه به رابطه (۳۷) خواهیم رسید.

$$W(D_0, \pi_0, a) = AU(D_0, a) - D_0\pi_0 \quad (۳۵)$$

$$\frac{\partial W(D_0,\pi_0,a)}{\partial D_0} = A\frac{\partial U(D_0,a)}{\partial D_0} - \pi_0 = 0 \quad (۳۶)$$

$$A\frac{\partial U(D_0,a)}{\partial D_0} = \pi_0 \quad (۳۷)$$

حال فرض می‌شود با دریافت نرخ تشویقی برابر با Inc مصرف‌کننده بار خود را به‌اندازه ΔD کاهش می‌دهد در این صورت داریم:

$$\Delta D = D_0 - D_{DR} \quad (۳۸)$$

در رابطه فوق D و D_{DR} میزان مصـــرف قبل و بعد از اجرای برنامه پاســـخگویی بار خواهد بود. کل مبلغ تشـــویقی دریافتی نیز برابر خواهد بود با:

$$Inc_{recieved} = Inc\Delta D \quad (۳۹)$$

با دریافت تشـویقی رفاه مشـترک تغییر خواهد کرد. رابطه‌ی (۴۱) رفاه مصـرف‌کننده را بعد از اجرای برنامه پاسـخگویی بار نشـان می‌دهد. برای بیشینه‌سازی تابع رفاه نیاز است که رابطه‌ی (۴۳) برقرار باشند.

$$W(D_{DR}, \pi_0, a) = AU(D_{DR}, a) - \pi_0 D_{DR} + Inc(D_0 - D_{DR}) \quad (۴۰)$$

$$\frac{\partial W(D_{DR},\pi_0,a)}{\partial D_{DR}} = A\frac{\partial U(D_{DR},a)}{\partial D_{DR}} - \pi_0 + \frac{\partial(Inc\Delta D)}{\partial D_{DR}} = 0 \quad (۴۱)$$

$$A\frac{\partial U(D_{DR},a)}{\partial D_{DR}} = \pi_0 + Inc \quad (۴۲)$$

با مقایسه روابط (۳۷) و (۴۲)، نرخ تشویقی برابر خواهد بود با:

$$Inc = A\frac{\partial U(D_{DR},a)}{\partial D_{DR}} - A\frac{\partial U(D_0,a)}{\partial D_0} \quad (۴۳)$$

$$Inc = \pi_0(e^{a\Delta D} - 1) \quad (۴۴)$$

با جایگزاری رابطه (۲۴) در (۴۴) ، نرخ تشویقی برابر با (۴۵) خواهد شد.

$$Inc = \pi_0(e^{-\frac{\Delta D}{ED_0}} - 1) \quad (۴۵)$$

با جایگذاری تقریب خطی تابع نمایی می‌توان نرخ تشویقی را به‌صورت رابطه (۴۶) بیان کرد.

$$Inc \cong -\pi_0\frac{\Delta D}{ED_0} \quad (۴۶)$$

همان‌طور که از رابطه (۴۶) مشخص است، نرخ تشویقی به کشش تقاضا، کاهش مصرف ناشی از برنامه پاسخگویی و شرایط اولیه مصرف ارتباط دارد.

می‌توان رابطه (۴۶) را برای مدل بار چند دوره‌ای نیز گسترش داد. در این صورت مطابق رابطه (۴۷)، نرخ تشویقی در هر ساعت به اطلاعات کشش تقاضا، نرخ قیمت در ساعات مختلف و تغییرات بار ارتباط خواهد داشت.

$$\begin{bmatrix} \frac{Inc_1}{\pi_1^0} \\ \dots \\ \frac{Inc_T}{\pi_T^0} \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} E_{1,1} & \dots & E_{1,T} \\ & \dots & \\ E_{T,1} & \dots & E_{T,T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta D_1}{D_1^0} \\ \dots \\ \frac{\Delta D_T}{D_T^0} \end{bmatrix} \quad (۴۷)$$

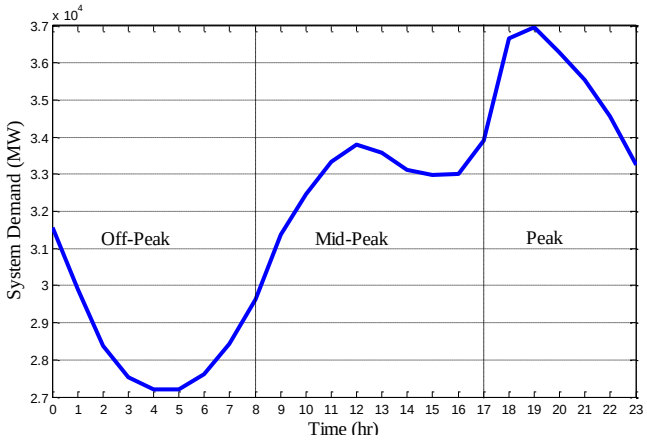
۵- نتایج عددی

در این بخش، برای ارزیابی مدل بار ارائه شده از اطلاعات منحنی بار از سایت مدیریت شبکه برق ایران برای روز ۳۰ آذر ۱۳۹۹ استفاده شده است که منحنی بار روزانه آن در شکل (۴) نشان داده شده است [۳۱]. مطابق شکل، ساعات مصرف به سه دوره‌ی کم باری (ساعات بامداد ۰ تا ۸ صبح)، میان باری (ساعات ۸ صبح تا ۱۷ عصر) و پرباری (ساعات ۱۷ عصر تا ۲۳ شب) تقسیم شده است. جدول (۲) قیمت انرژی الکتریکی را برای دوره‌های مختلف برحسب واحد ریال بر کیلووات نشان می‌دهد. مطابق جدول قیمت در ساعات کم‌باری، نصف و در ساعات پرباری دو برابر ساعات میان‌باری می‌باشد [۳۲].

همان‌طور که در بخش مدل سازی نشان داده شد، تخمین ضریب رفتار مصرف‌کننده پارامتر اساسی در مدل بار ارائه شده است. برای تخمین صحیح این پارامتر نیاز به فعالیت‌های میدانی و اجتماعی می‌باشد. از سوی دیگر، در این مقاله نشان داده شد که بین این پارامتر و کشش تقاضا رابطه‌ی ریاضی وجود دارد. ازاین‌رو با در اختیار داشتن ضرایب کشش تقاضا می‌توان ضرایب رفتاری مصرف‌کننده‌ها را استخراج کرد. جدول (۳) اطلاعات کشش تقاضا را برای بخش‌های مختلف صنعت برق ایران نشان می‌دهد که از مرجع [۳۳] استخراج شده است. ضرایب رفتاری برای مصرف‌کنندگان مختلف در جدول (۴) ارائه شده که برای محاسبه آن‌ها از اطلاعات کشش تقاضا و رابطه (۲۴) استفاده شده است.

جدول ۲. زمان‌های مختلف مصرف و قیمت‌های برق متناظر [۳۲]

	کم‌باری	میان‌باری	پرباری
دوره مصرف	۰ تا ۸ صبح	۸ صبح تا ۱۷ عصر	۱۷ عصر تا ۲۳ شب
قیمت برق	۲۶۰ ریال/کیلووات	۵۲۰ ریال/کیلووات	۱۰۴۰ ریال/کیلووات



شکل ٤. منحنی مصرف انرژی برای روز مورد مطالعه [۳۱]

جدول ۳. اطلاعات کشش تقاضا برای بخش‌های مختلف [۳۳]

بخش مصرف	کم‌باری	میان‌باری	پرباری	سهم بخش از کل بار
خانگی	-۱/۲۱	-۰/۶۴	-۱/۰۱	٪۳۴
صنعتی	-۱/۷۲	-۴/۵	-۰/۵۳	٪۳۱
کشاورزی	-۰/۸۷	-۰/۴۶	-۰/۵۶	٪۱۷
عمومی	-۱/۵۷	-۲/۸۷	-۱/۰۵	٪۹
تجاری	-۱/۱	-۱/۹۹	-۱/۶	٪۹

جدول ٤. ضرایب رفتار برای بخش‌های مختلف

بخش مصرف	کم‌بار	میان‌باری	پرباری
خانگی	۰/۸۲	۱/۵۶	۰/۹۹
صنعتی	۰/۵۸	۰/۲۲	۱/۸۹
کشاورزی	۱/۱۵	۲/۱۷	۱/۷۸
عمومی	۰/۶۴	۰/۳۵	۰/۹۵
تجاری	۰/۹۱	۰/۵	۰/۶۲

در این بخش، برای بررسی رفتار مصرفی مصرف‌کنندگان در مقابل تغییرات قیمت و درآمد چهار سناریو به شرح زیر طراحی شده‌اند:

سناریو ۱: تنها تأثیر تغییرات قیمت بر چگونگی مصرف، سطح رفاه و رضایت مصرف‌کنندگان موردبررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

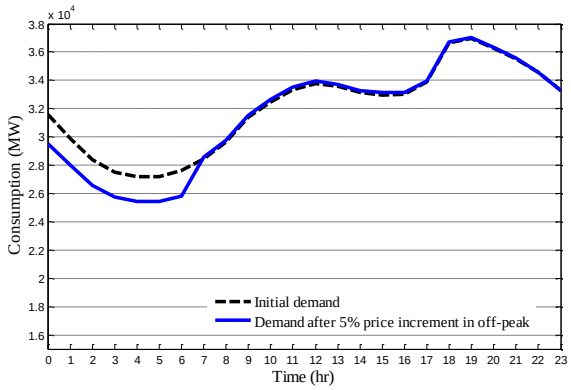
سناریو ۳: تنها تأثیر تغییرات درآمد بر چگونگی مصرف، سطح رفاه و رضایت مصرف‌کنندگان مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

سناریو ۳: تأثیر هم‌زمان تغییرات قیمت و درآمد بر چگونگی مصرف، سطح رفاه و رضایت مصرف‌کنندگان مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

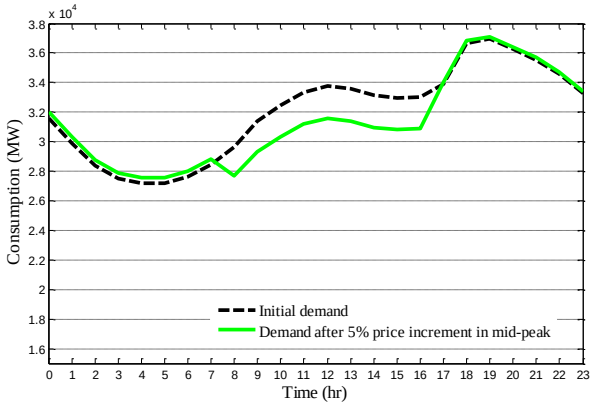
سناریو ۴: تأثیر برنامه پاسخگوی بار تشویق محور بر چگونگی مصرف، سطح رفاه و رضایت مصرف‌کنندگان مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۵-۱- سناریو ۱

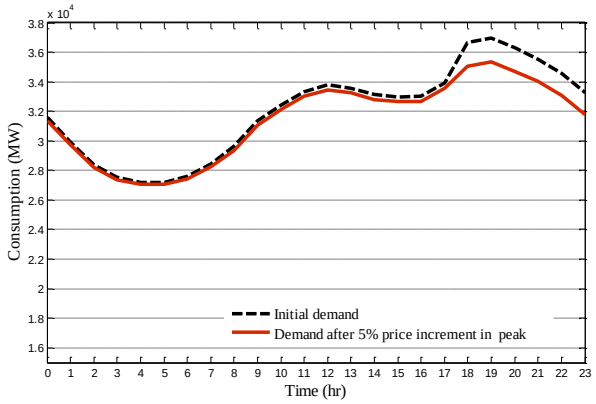
در این سناریو تغییرات منحنی بار سیستم قدرت ایران در ازای افزایش ۵ درصد در قیمت برق برای دوره‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. اشکال ۵ تا ۷ منحنی بار روزانه را برای افزایش قیمت مورد نظر در دوره‌های کم‌باری، میان‌باری و پرباری نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌بینی می شد و از اشکال مذکور نیز مشخص است، افزایش قیمت در هر دوره بیشترین تأثیر را در مصرف همان دوره می‌گذارد و منجر به کاهش مصرف در آن دوره می شود. از سوی دیگر و بسته به کشش تقاضای متقابل ممکن است در دوره‌های دیگر اندکی افزایش یا کاهش در مصرف رخ دهد.



شکل ۵. منحنی مصرف انرژی در مقابل افزایش ۵٪ قیمت در کم‌باری



شکل ٦. منحنی مصرف انرژی در مقابل افزایش ۵٪ قیمت در میان‌باری



شکل ۷. منحنی مصرف انرژی در مقابل افزایش ۵٪ قیمت در پرباری

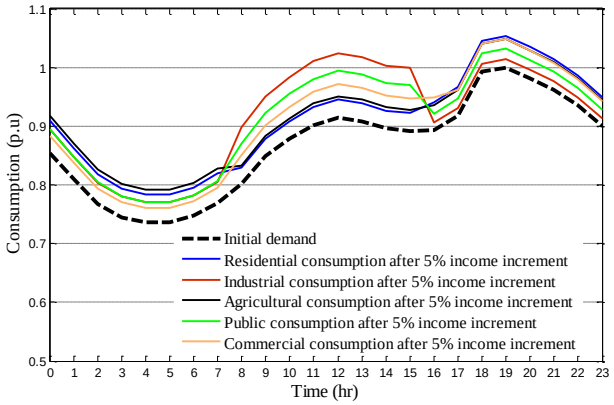
۵-۲- سناریو ۲

در بخش پیشین یک مدل بار جامع توسعه داده شد که علاوه بر کشش تقاضا نسبت به تغییرات قیمت، قادر است کشش تقاضا نسبت به تغییرات درآمد را نیز مورد سنجش و ارزیابی قرار دهد. جدول (۵) ضرایب کشش تقاضای درآمد را برای مصارف مختلف در روز مورد مطالعه نشان می‌دهد که برای محاسبه‌ی آن‌ها از ضرایب رفتار فردی محاسبه شده و رابطه (۳۴) استفاده شده است. به‌عنوان‌مثال، بارهای صنعتی در میان باری به‌شدت به تغییرات درآمد حساس هستند و با افزایش سطح درامد روزانه این بخش، مصرف به مقدار قابل‌توجهی در میان‌باری افزایش خواهد یافت، حال آن‌که تغییرات مصرف برای ساعات پرباری به نسبت کم خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر مصرف‌کننده صنعتی بخش اعظم افزایش درآمد خود را صرف افزایش مصرف در ساعات میان‌باری خواهد نمود.

جدول ۵. ضرایب کشش تقاضای درآمد برای بخش‌های مختلف

بخش مصرف	کم‌بار	میان‌باری	پرباری
خانگی	۱/۳	۰/۶۸	۱/۰۸
صنعتی	۰/۹۳	۲/۴	۰/۲۸
کشاورزی	۱/۵	۰/۸	۰/۹۷
عمومی	۰/۹۸	۱/۷۴	۰/۶۴
تجاری	۰/۶۸	۱/۲۴	۰/۹۶

برای بررسی بیشتر، منحنی بار برای مصارف مختلف با فرض افزایش ۵ درصدی درآمد روزانه در شکل (۸) نشان داده شده است.

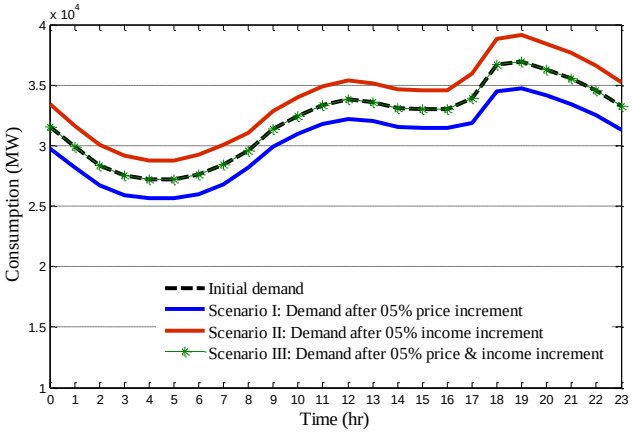


شکل ۸. منحنی مصرف انرژی در مقابل افزایش ۵٪ درآمد برای بخش‌های مختلف مصرف

۵-۳- سناریو ۳

بازار برق ایران از مکانیسم کشف قیمت یک‌طرفه استفاده می‌کند. در این ساختار سمت تولید رقابتی بوده و تولیدکنندگان با ارائه قیمت برای ساعات مختلف با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. حال‌آنکه قیمت برای سمت مصرف مقداری از پیش مشخص شده است که سالانه بر اساس افزایش نرخ تورم و سطح متوسط درآمد مصرف‌کنندگان افزایش داده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قیمت برق ارتباط مستقیمی با سطح درآمد متوسط مصرف‌کنندگان دارد. در این سناریو قصد داریم تأثیر همزمان افزایش قیمت برق و درآمد مشترکین را مورد بررسی قرار دهیم. شکل (۹) تغییرات منحنی بار روزانه را با فرض افزایش ۵ درصد قیمت برق، ۵ درصد سطح درآمد و افزایش همزمان قیمت برق و سطح درآمد به میزان ۵ درصد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، افزایش قیمت منجر به کاهش مصرف و از سوی دیگر، افزایش درآمد منجر به افزایش مصرف خواهد شد. حال با افزایش قیمت برق به اندازه افزایش متوسط سطح درآمد، منحنی مصرف هیچ تغییری نسبت به قبل از افزایش از خود نشان نمی‌دهد. به‌عنوان یک نتیجه مهم، درصورتی‌که نهاد تنظیم‌کننده صنعت برق افزایش قیمت سالانه را برابر با افزایش تورم و افزایش سطح متوسط درآمد در نظر بگیرد، منحنی مصرف انرژی الکتریکی نسبت به سال پیش تغییری نخواهد داشت. لازم به ذکر است هرچند که منحنی بار ثابت بوده و تغییر نمی‌کند، رفاه و سطح رضایت مصرف‌کنندگان دستخوش تغییر خواهند شد. جدول (۶) رضایت، رفاه، بودجه و انرژی مصرفی را که با استفاده از روابط (۴۰)، (۳۵)، (۳۰) و (۳۱) برای سناریوهای موردبررسی محاسبه شده است نشان می‌دهد. مطابق این جدول، افزایش قیمت در سناریو ۱ منجر به کاهش مصرف شده است. در این سناریو مصرف‌کننده‌ها به

دلیل مدیریت بودجه خود در طول کل دوره، مصرف خود را کاهش و بخشی از رفاه و رضایت خود را از دست داده‌اند. در سناریو دوم، مصرف‌کننده‌ها بودجه اضافی خود را صرف مصرف بیشتر انرژی الکتریکی کرده‌اند که منجر به افزایش رفاه و سطح رضایت آنها شده است. در سناریو سوم، افزایش قیمت برق افزایش درآمد را خنثی کرده ازاین‌رو مصرف انرژی تغییر نکرده است. هرچند سطح مصرف در این سناریو تغییر نکرده است، ولی هزینه انرژی بیشتر شده و رفاه مصرف‌کننده کاهش یافته است.



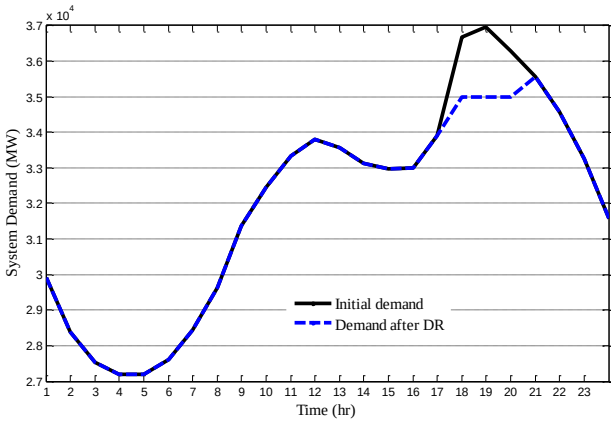
شکل ۹. منحنی مصرف انرژی ایران با در نظر گرفتن ۵٪ افزایش قیمت برق و درآمد مشترکین

جدول ٦. تقاضای برق، بودجه، رضایت و رفاه برای سناریوهای مختلف

	سطح اولیه	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
تقاضا (مگاوات ساعت/روز)	۷۶۸۲۹۹	۷۲۷۶۸۲	۸۱۰۱۲۳	۷۶۸۲۹۹
بودجه (میلیون ریال/روز)	۴۶۸/۸	۴۶۸/۴	۴۹۲/۷	۴۹۲/۳
رضایت (میلیون ریال/روز)	۷۶۶/۴	۷۳۰/۶	۸۰۸	۷۶۶/۵
رفاه (میلیون ریال/روز)	۲۹۹/۶	۲۶۲/۲	۳۱۵/۳	۲۷۴/۲

۵-٤- سناریو ٤

در این سناریو با استفاده از برنامه پاسخگویی بار تشویق محور طراحی شده، سعی خواهد شد میزان تشویقی به نحوی مشخص شود تا کاهش بار مورد نظر برنامه تحقق یابد. هدف از اجرای برنامه پاسخگویی بار کاهش بار به زیر ۳۵۰۰۰ مگاوات ساعت در ساعات پیک می‌باشد. برای این منظور لازم است که بار به اندازه‌ی ۱۶۷۳، ۱۹۵۸ و ۱۲۸۹ مگاوات ساعت مصرف انرژی در ساعات ۱۸، ۱۹ و ۲۰ کاهش یابد. شکل (۹) منحنی بار را قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخگویی بار نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. منحنی مصرف انرژی قبل و بعد از برنامه پاسخگویی بار

به دلیل ضـــرایب رفتاری مختلف، تشـــویقی متفاوتی برای ترغیب مصـــرف‌کنندگان مختلف به شـــرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار نیاز است. جدول (۷) تشویقی لازم برای انواع مصرف‌کنندگان (مطابق (۴۶))، کاهش تقاضا، تغییرات رفاه و رضایت ناشی از مصرف را برای ساعات مختلف نشان می‌دهد. مطابق رابطه (۴۷)، نرخ تشویقی علاوه بر ضریب رفتار، با درصد بار کاهشی هر بخش ارتباط دارد. شایان ذکر است در صد کاهش بار برای هر بخش برابر با تقسیم کل کاهش بار مورد نیاز بر تقاضای بخش مورد نظر اســت. ازاین‌رو، درصـورتی‌که بخشـی دارای بار بیشـتری باشـد، گزینه‌ی مناسـب‌تری برای اجرای برنامه پاسـخگویی بار می‌باشد. با توجه به جدول (۸)، برای ترغیب به مشارکت در برنامه پاسخگویی بار، بخش‌های خانگی و عمومی به ترتیب پایین‌ترین و بالاترین نرخ تشویقی را درخواست می‌کنند. هرچند کاهش بار سطح رضایت را کاهش می‌دهد، دریافت تشویقی، رفاه مشترک را افزایش خواهد داد. با رویکرد کمینه کردن هزینه، بخش خانگی بهترین گزینه برای اجرای برنامه پاســـخگویی بار می‌باشـــد. حال‌آنکه با رویکرد افزایش رفاه، مناســـب‌ترین گزینه بخش عمومی خواهد بود. ازاین‌رو، مدل ارائه شـــده در این مقاله توانایی دارد در کنار هزینه برنامه پاســـخگویی بار، تصـــمیم‌گیران و نهادهای تنظیم‌کننده را قادر ســـازد تغییرات رفاه ناشـــی از اجرای برنامه‌های پاسخگویی را مورد سنجش قرار دهند.

جدول ۷. تأثیر برنامه پاسخگویی بار بر تقاضای برق، رضایت و رفاه مصرف‌کنندگان مختلف

دوره زمانی	بخش مصرف	درصد کاهش مصرف	نرخ تشویقی (ریال/کیلووات)	هزینه تشویقی (میلیون ریال)	کاهش رضایت (میلیون ریال)	افزایش رفاه (میلیون ریال)
ساعت ۱۸	خانگی	۱۳٫۴٪	۱۳۸۲	۲۳۰٫۹	۱۸۵۷٫۹	۱۰۸٫۴
(P^{DR}=1673MW)	صنعتی	۱۴٫۷٪	۲۸۹	۴۸۳٫۵	۲۰۰۰٫۸	۲۲۰٫۵
	کشاورزی	۲۶٫۸٪	۴۹۷	۸۳۱٫۵	۲۲۲۵٫۵	۳۴۳٫۲
	عمومی	۵۱٪	۵۰۲	۸۳۹٫۸	۲۲۵۰٫۶	۳۴۴٫۵
	تجاری	۵۱٪	۳۲۸	۵۴۸٫۷	۲۰۵۹٫۲	۲۴۳٫۲
ساعت ۱۹	خانگی	۱۵٫۶٪	۱۶۰	۳۱۳٫۳	۲۱۹۸٫۹	۱۵۳٫۳
(P^{DR}=1958MW)	صنعتی	۱۷٫۱٪	۳۳۵	۶۵۵٫۹	۲۴۰۵٫۹	۴۰۲٫۱
	کشاورزی	۳۱٪	۵۷۸	۱۱۳۱٫۷	۲۷۰۱٫۷	۴۴۶٫۱
	عمومی	۵۹٪	۵۸۲	۱۱۳۹٫۶	۲۷۳۳٫۹	۴۹۹
	تجاری	۵۹٪	۳۸۲	۷۴۸	۲۴۶۱٫۲	۳۲۵٫۹
ساعت ۲۰	خانگی	۱۰٫۴٪	۱۰۷	۱۳۶٫۹	۱۴۰۶٫۲	۶۵٫۴
(P^{DR}=1280MW)	صنعتی	۱۱٫۴٪	۲۲۳	۲۸۵٫۴	۱۴۸۴٫۶	۱۳۳٫۸
	کشاورزی	۲۰٫۷٪	۳۸۵	۴۹۲٫۸	۱۶۰۳٫۷	۲۱۵٫۳
	عمومی	۳۹٫۲٪	۳۸۸	۴۹۶٫۷	۱۶۰۹٫۷	۲۱۸
	تجاری	۳۹٫۲٪	۳۵۵	۳۲۶٫۴	۱۵۰۵٫۲	۱۵۲٫۲

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شده که اطلاعات قابل‌توجهی در ضریب رفتار مصرفی مصرف‌کنندگان مستتر است. با در اختیار داشتن ضریب رفتار سطح رضایت مصرف‌کننده درازای مصرف انرژی قابل سنجش است. ازجمله نتایج این مقاله می‌توان به توسعه مدل بار جدیدی بر اساس تابع رضایت و رفاه مصرف‌کننده اشاره کرد. مدل بار مذکور بسته به ضریب رفتار فردی و قیمت انرژی الکتریکی چگونگی مصرف را در هر ساعت مشخص می‌کند. بر اساس مدل بار ارائه شده، کشش تقاضای برق برای مصارف تک دوره‌ای و چند دوره‌ای بسط داده شد تا از اطلاعات کشش تقاضا برای تخمین ضرایب بار استفاده شود. همچنین با استفاده از مدل بار و تابع رضایت، یک برنامه پاسخگویی تشویق-محور توسعه داده شد که در آن سطح تشویقی بر اساس رفتار فردی هر مصرف‌کننده و سطح نیاز به کاهش بار به‌صورت بهینه مشخص می‌شود.

نتایج عددی نشان می‌دهد که مصرف‌کننده باهدف مدیریت بودجه و هزینه انرژی خود، در صورت افزایش قیمت، مصرف خود را کاهش خواهد داد که منجر به کاهش سطح رضایت و رفاه وی می‌شود. در مقابل در صورت افزایش درآمد و بودجه، وی بودجه‌ی خود را به شکلی برای مصرف انرژی الکتریکی صرف خواهد کرد که رفاهش بیشینه گردد. مطابق نتایج عددی، اگر قیمت برق به‌اندازه‌ی افزایش درآمد مصرف‌کنندگان افزایش یابد، منحنی بار تغییر نخواهد کرد، هرچند سطح رفاه مشترکین دست‌خوش تغییر خواهد شد. با پیاده‌سازی پاسخگویی بار مبتنی بر رفتار مشترکین، مشخص شد که اهداف کمینه کردن هزینه برنامه پاسخگویی بار ممکن است باهدف بیشینه رفاه و رضایت مشترکین مغایرت داشته باشد. نتایج عددی نشان داد که باهدف کمینه کردن هزینه برنامه پاسخگویی بار، مناسب‌ترین گزینه برای صنعت برق اجرای برنامه بر روی مشترکین خانگی خواهد بود. حال‌آنکه اگر بیشینه‌سازی رفاه مشترکین مدنظر باشد، اجرای برنامه پاسخگویی بار بر روی مشترکین بخش عمومی مناسب‌تر خواهد بود.

مراجع

[1] Zhang, J. and He, S., 2020. Smart technologies and urban life: A behavioral and social perspective. Sustainable Cities and Society, p.102460.

[2] Fan, S. and Hyndman, R.J., 2011. The price elasticity of electricity demand in South Australia. Energy Policy, 39(6), pp.3709-3719.

[3] Filippini, M. and Pachauri, S., 2004. Elasticities of electricity demand in urban Indian households. Energy policy, 32(3), pp.429-436.

[4] Auray, S., Caponi, V. and Ravel, B., 2019. Price elasticity of electricity demand in france. Economie et Statistique, 513(1), pp.91-103.

[5] Filippini, M., 1995. Electricity demand by time of use An application of the household AIDS model. Energy Economics, 17(3), pp.197-204.

[6] Iqbal, M., 1983. Residential demand for electricity and natural gas in Pakistan. The Pakistan Development Review, pp.23-36.

[7] Nakajima, T., 2010. The residential demand for electricity in Japan: an examination using empirical panel analysis techniques. Journal of Asian Economics, 21(4), pp.412-420.

[8] Silva, S., Soares, I. and Pinho, C., 2018. Electricity residential demand elasticities: Urban versus rural areas in Portugal. Energy, 144, pp.627-632.

[9] Nakabi, T.A. and Toivanen, P., 2019. An ANN-based model for learning individual customer behavior in response to electricity prices. Sustainable Energy, Grids and Networks, 18, p.100212.

[10] Beenstock, M., Goldin, E. and Nabot, D., 1999. The demand for electricity in Israel. Energy Economics, 21(2), pp.168-183.

[11] Atalla, T.N. and Hunt, L.C., 2016. Modelling residential electricity demand in the GCC countries. Energy Economics, 59, pp.149-158.

[12] Sa'ad, S., 2009. Electricity demand for South Korean residential sector. Energy policy, 37(12), pp.5469-5474.

[13] Erdogdu, E., 2007. Electricity demand analysis using cointegration and ARIMA modelling: A case study of Turkey. Energy policy, 35(2), pp.1129-1146.

[14] Chang, B., Kang, S.J. and Jung, T.Y., 2019. Price and output elasticities of energy demand for industrial sectors in OECD countries. Sustainability, 11(6), p.1786.

[15] Alamaniotis, M., Bourbakis, N. and Tsoukalas, L.H., 2019. Enhancing privacy of electricity consumption in smart cities through morphing of anticipated demand pattern utilizing self-elasticity and genetic algorithms. Sustainable Cities and Society, 46, p.101426.

[16] Fell, M.J., 2017. Energy services: A conceptual review. Energy research & social science, 27, pp.129-140.

[17] Aalami, H.A., Pashaei-Didani, H. and Nojavan, S., 2019. Deriving nonlinear models for incentive-based demand response programs. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 106, pp.223-231.

[18] Monfared, H.J. and Ghasemi, A., 2019. Retail electricity pricing based on the value of electricity for consumers. Sustainable Energy, Grids and Networks, 18, p.100205.

[19] Jhala, K., Natarajan, B. and Pahwa, A., 2018. Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(3), pp.2809-2819.

[20] Tiwari, A.K. and Menegaki, A.N., 2019. A time varying approach on the price elasticity of electricity in India during 1975–2013. Energy, 183, pp.385-397.

[21] Zhu, X., Li, L., Zhou, K., Zhang, X. and Yang, S., 2018. A meta-analysis on the price elasticity and income elasticity of residential electricity demand. Journal of cleaner production, 201, pp.169-177.

[22] Al-Faris, A.R.F., 2002. The demand for electricity in the GCC countries. Energy Policy, 30(2), pp.117-124.

[23] Morovat, H., Faridzad, A. and Lowni, S., 2019. Estimating the Elasticity of Electricity Demand in Iran: A Sectoral-Province Approach. Iranian Economic Review, 23(4), pp.861-881.

[24] Holtedahl, P. and Joutz, F.L., 2004. Residential electricity demand in Taiwan. Energy economics, 26(2), pp.201-224.

[25] Niromandfam, A., Yazdankhah, A.S. and Kazemzadeh, R., 2020. Designing risk hedging mechanism based on the utility function to help customers manage electricity price risks. Electric Power Systems Research, 185, p.106365.

[26] Cicek, N. and Delic, H., 2015. Demand response management for smart grids with wind power. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(2), pp.625-634

[27] Niromandfam, A., Yazdankhah, A.S. and Kazemzadeh, R., 2020. Modeling demand response based on utility function considering wind profit maximization in the day-ahead market. Journal of Cleaner Production, 251, p.119317.

[28] Niromandfam, A., Pour, A.M. and Zarezadeh, E., 2020. Virtual energy storage modeling based on electricity customers' behavior to maximize wind profit. Journal of Energy Storage, 32, p.101811.

[29] Sharifi, Reza, Amjad Anvari-Moghaddam, Seyed Hamid Fathi, Josep M. Guerrero, and Vahid Vahidinasab. "Economic demand response model in liberalised electricity markets with respect to flexibility of consumers." IET Generation, Transmission & Distribution 11, no. 17 (2017): 4291-4298.

[30] Steriotis, K., Tsaousoglou, G., Efthymiopoulos, N., Makris, P. and Varvarigos, E.M., 2018. A novel behavioral real time pricing scheme for the active energy consumers' participation in emerging flexibility markets. Sustainable Energy, Grids and Networks, 16, pp.14-27.

[31] Iran Grid Management Company (IGMC); 2019. <http://www.igmc.ir/en>.

[32] Iran electric power industry statistic; 2019. <https://www.tavanir.org.ir/en/>.

[33] Zin, A.M., Moradi, M., Khairuddin, A., Naderipour, A. and Khavari, A.H., 2015, December. Estimation of elasticity of electricity demand in Iran: New empirical evidence using aggregate data. In 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD) (pp. 710-715). IEEE.