

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شماره ۸ - زمستان ۱۳۹۱

صص ۱۶۵-۱۴۳

پیش‌بینی تقاضای حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف مصرف ایران با استفاده از رگرسیون خطی فازی

عالیه کاظمی*، مهناز حسین‌زاده**

چکیده

در این تحقیق، تقاضای فرآورده‌های نفتی، گاز و برق در بخش‌های مختلف مصرف شامل خانگی-تجاری، حمل و نقل، صنعت، کشاورزی و نیروگاه‌ها، با در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل‌های رگرسیون و رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی شده است. از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۹ برای انتخاب مدل مناسب و بررسی اعتبار آن استفاده شده است و تقاضای حامل‌های مختلف انرژی برای هر کدام از بخش‌های مختلف، طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ تخمین زده شده است.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی تقاضای انرژی، حامل‌های انرژی، رگرسیون خطی فازی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۴/۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۲۰

**استادیار، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).

E-mail: aliyehkazemi@ut.ac.ir

**دانشجوی دکتری، دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

رشد و حتی بقای اکثر فعالیت‌های اقتصادی کشورها به مساله تامین انرژی وابسته است. با پیش‌بینی هرچه دقیقتر مصرف انرژی و برنامه‌ریزی صحیح در هدایت مصرف، می‌توان پارامترهای عرضه و تقاضای انرژی را به نحو مطلوب کنترل کرد. تحلیل عوامل موثر بر شدت افزایش مصرف و چشم‌اندازی از پیش‌بینی مصارف انرژی، این امکان را برای مدیران فراهم می‌سازد تا تدابیر لازم را در جهت کنترل متغیرهای عرضه و تقاضای انرژی اتخاذ کنند. تاکنون از مدل‌های مختلف همچون سری‌های زمانی [۱۱]، اقتصادسنجی [۱۴]، [۱۳]، منطق فازی [۱۰]، شبکه‌های عصبی [۱۲]، برنامه‌ریزی ژنتیک [۵]، الگوریتم جامعه پرندگان [۱۵]، [۲۰] و ... برای پیش‌بینی تقاضای انرژی استفاده شده است. در این تحقیق از مدل رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای حامل‌های انرژی استفاده شده است. با در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی، بررسی تحقیقات انجام‌شده و کسب نظر خبرگان، ورودی‌های مدل انتخاب شده‌اند. مدل‌های ارائه شده دارای داده‌های قطعی و پارامترهای مدل فازی هستند. با توجه به اینکه ورودی‌ها و خروجی مدل‌های ارائه شده قطعی هستند از این مدل استفاده شده است. پس از طراحی و اجرای مدل‌های ارائه شده تقاضای حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف مصرف به صورت فازی پیش‌بینی می‌شود. نتایج حاصل، برای برنامه‌ریزی مناسب در خصوص تامین تقاضای انرژی بخش‌های مختلف مصرف قابل استفاده است.

مدل رگرسیون خطی فازی توسط تاناکا معرفی شده است [۱۹]. این مدل برای کاربردهای متنوعی از جمله پیش‌بینی‌های مربوط به بازاریابی، انرژی و فروش به کار رفته است [۶]، [۱۷]. در تکنیک رگرسیون معمولی، تفاوت میان مقادیر مشاهده و تخمین زده شده مربوط به خطاهای مشاهده است، اما این تفاوت در رگرسیون خطی فازی ناشی از ابهام ذاتی در سیستم می‌باشد. تحقیقات متفاوتی با استفاده از این روش برای پیش‌بینی تقاضای انرژی انجام شده است. در سال ۲۰۰۴، ال‌کاندری و همکاران یک مدل رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای برق در فصول زمستان و تابستان توسعه داده‌اند [۲]. در این تحقیق تخمین فازی با مدل بهینه‌سازی خطی انجام شده است و پیش‌بینی تقاضای برق تا ۲۴ ساعت آینده امکان‌پذیر است. در سال ۲۰۰۸، تقی‌زاده و همکاران، پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش حمل و نقل ایران را با استفاده از رگرسیون خطی فازی چندلایه مدلسازی نمودند [۱۸]. در این تحقیق ورودی‌های مدل، جمعیت، تولید ناخالص داخلی، تعداد خودرو و میزان مصرف انرژی بخش حمل و نقل در سال قبل و خروجی، مصرف انرژی در بخش حمل و نقل است. از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۵ برای مدلسازی و بررسی اعتبار مدل استفاده شده و تقاضای انرژی بخش حمل و نقل در ایران طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰ پیش‌بینی شده است. شکوری و ندیمی در سال ۲۰۰۹، با

استفاده از یک مدل رگرسیون خطی فازی جدید به پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش خانگی تجاری ایران پرداختند [۱۶]. ورودی‌های این مدل تولید ناخالص داخلی، تعداد خانوار و شاخص قیمت انرژی بوده و خروجی به صورت فازی ارائه شده است. در سال ۲۰۰۹، آزاده و همکاران الگوریتم رگرسیون فازی را برای تخمین مصرف نفت خام ارائه دادند [۳]. در این تحقیق شاخص‌های استاندارد اقتصادی شامل جمعیت، هزینه واردات نفت خام، تولید ناخالص داخلی و تولید سالیانه نفت در آخرین سال مورد توجه قرار گرفته است. برای بررسی کارایی و اعتبار مدل از داده‌های مربوط به مصرف نفت در کانادا، ایالات متحده، ژاپن و استرالیا طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ استفاده شده است. در سال ۲۰۱۰، آزاده و همکاران مدل رگرسیون فازی را برای پیش‌بینی تقاضای برق در ایران توسعه دادند [۴].

در این تحقیق، پس از آشنایی مختصر با روش رگرسیون خطی فازی، در بخش ۳، به طراحی مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای حامل‌های مختلف انرژی در بخش‌های مختلف مصرف پرداخته شده است. در بخش ۴، تقاضای انرژی بخش‌های مختلف مصرف برآورد شده و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه شده است.

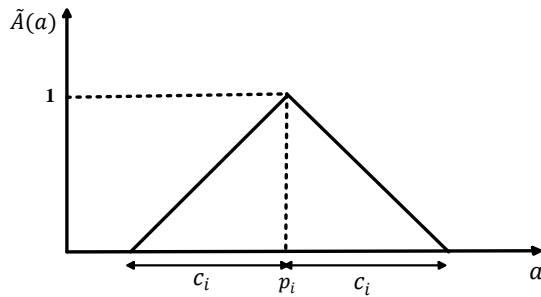
۲. مبانی و چارچوب نظری تحقیق

رگرسیون خطی فازی. رگرسیون خطی فازی، تعمیمی از رگرسیون خطی کلاسیک است که برای محاسبه رابطه تابعی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته در یک محیط فازی استفاده می‌شود. این مدل برای کاربردهای متنوعی از جمله پیش‌بینی‌های مربوط به انرژی به کار رفته است. در این مدل ورودی‌ها و خروجی‌ها، داده‌های غیرفازی هستند. مدل پایه به صورت یک تابع خطی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tilde{y} = f(x, \tilde{A}) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X_1 + \tilde{A}_2 X_2 + \dots + \tilde{A}_n X_n \quad (1)$$

در اینجا \tilde{A}_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) ضرایب فازی به صورت (p_i, c_i) هستند به نحوی که p_i پارامتر میانه و c_i پارامتر گستره عدد فازی است. مقدار پارامتر میانه بر میزان فازی بودن دلالت می‌کند. تابع عضویت مربوط به ضریب فازی \tilde{A}_i در شکل ۱ نشان داده شده است. رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{y} = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)x_1 + (p_2, c_2)x_2 + \dots + (p_n, c_n)x_n \quad (2)$$



شکل ۱. تابع عضویت ضریب فازی \tilde{A}_i

با استفاده از اصل گسترش تابع عضویت زیر به دست می‌آید [۱۹].

$$\tilde{y}(y) = \begin{cases} \max(\min_i \{\tilde{A}_i(a_i)\}) & \{a_i | y = f(x, a_i)\} \neq \emptyset \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

از رابطه‌های (۲) و (۳) داریم:

$$\tilde{y}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - \sum_{i=1}^n p_i x_i|}{\sum_{i=1}^n c_i |x_i|} & x_i \neq 0 \\ 1 & x_i = 0, y = 0 \\ 0 & x_i = 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\tilde{y}_j = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)x_{1j} + (p_2, c_2)x_{2j} + \dots + (p_n, c_n)x_{nj} \quad (۵)$$

$j = 1, 2, \dots, m$

که m تعداد مشاهدات است.

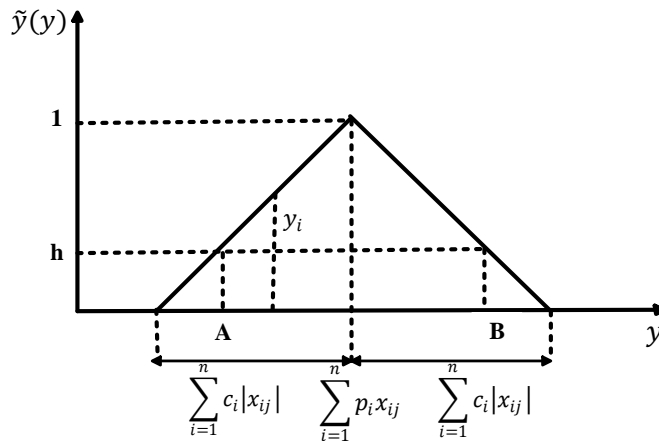
می‌خواهیم ضرایب $\tilde{A}_i = (p_i, c_i)$ را به نحوی بیابیم که مقدار پارامتر گستره عدد فازی خروجی مربوط به مجموعه داده‌ها مینیمم شود. معادله (۶) تابع هدف را نشان می‌دهد [۶].

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|) \quad (۶)$$

هدف مدل رگرسیون، تعیین مقادیر بهینه پارامترها است به گونه‌ای که مشاهده y_j با درجه عضویت حداقل h متعلق به $\tilde{y}(y)$ باشد. بنابراین داریم [۶]:

$$\tilde{y}(y_j) \geq h \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (۷)$$

درجه عضویت h توسط کاربر تعیین می‌شود. شکل ۲ تابع عضویت خروجی فازی را نشان می‌دهد. معادله (۷) نشان می‌دهد خروجی فازی می‌بایست بین دو مقدار A و B قرار گیرد.



شکل ۲. تابع عضویت متغیر خروجی مدل رگرسیون

با جایگزینی رابطه (۴) در رابطه (۷) داریم:

$$\begin{aligned} y_j &\geq p_0 + \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} - (1-h)(c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|), \quad j = 1, 2, \dots, m \\ y_j &\leq p_0 + \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} + (1-h)(c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|), \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (۸)$$

توضیحات بالا منجر به مدل برنامه ریزی خطی زیر می‌شود:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|)$$

s.t.

$$y_j \geq p_0 + \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} - (1-h)(c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

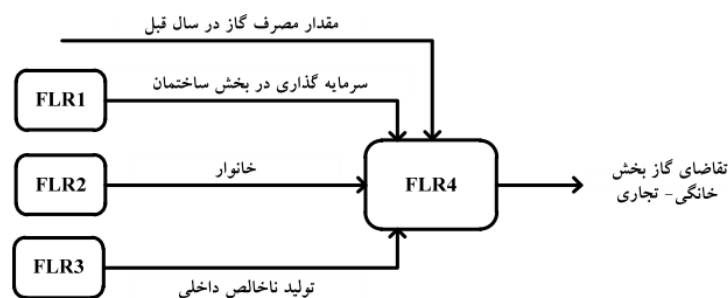
$$y_j \leq p_0 + \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} + (1-h)(c_0 + \sum_{i=1}^n c_i |x_{ij}|) \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$c_i \geq 0, \quad p_i \geq 0$$

۳. روش‌شناسی تحقیق

طراحی مدل مناسب پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش‌های مختلف مصرف. در این بخش مدل‌های پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش‌های مختلف مصرف شامل خانگی- تجاری، حمل و نقل، صنعت، کشاورزی و نیروگاه‌ها طراحی می‌شوند. همانگونه که ذکر شد ورودی‌های مدل‌های مختلف با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده قبلی و نظر خبرگان انتخاب شده است. همچنین از داده‌های سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۹ [۱]، [۷]، [۸]، [۹] برای طراحی مدل مناسب پیش‌بینی استفاده شده است. قابل ذکر است از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ به عنوان داده‌های تست مورد استفاده شده است. برای بررسی اعتبار مدل‌های طراحی شده، شاخص درصد میانگین قدرمطلق خطا برای داده‌های تست مورد بررسی و مدل مناسب با توجه به این شاخص توسعه داده شده است.

پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی- تجاری با استفاده از رگرسیون خطی فازی. مدل پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی- تجاری با توجه به شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی سلسله مراتبی طراحی شده است. شکل ۳ ساختار این مدل رگرسیون خطی فازی سلسله مراتبی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ساختار مدل رگرسیون فازی سلسله مراتبی پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی- تجاری

ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری در بخش ساختمان؛

۲. نرخ رشد خانوار؛

۳. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی؛

۴. میزان مصرف گاز در بخش خانگی تجاری در سال قبل.

و خروجی این مدل، میزان گاز مصرفی در بخش خانگی و تجاری است.

هر کدام از ورودی‌های ۱ تا ۳ نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی می‌شوند. قابل ذکر است مدل‌های مختلف با ورودی‌های مختلف بررسی و مدلی که داده‌های تست آن خطای کمتری داشت به عنوان مدل مناسب انتخاب شده است. مدل‌های فازی به کار گرفته شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مدل‌های رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی-تجاری

مدل	فرمولبندی مدل
FLR1	$BCAP(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)BCAP(t-1) + (p_2, c_2)BCAP(t-2)$
FLR2	$HH(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)HH(t-1) + (p_2, c_2)HH(t-2)$
FLR3	$GDP(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)GDP(t-1) + (p_2, c_2)GDP(t-2)$
FLR4	$RG(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)\alpha BCAP(t) + (p_2, c_2)\alpha HH(t) + (p_3, c_3)\alpha GDP(t) + (p_4, c_4)RG(t-1)$

در اینجا:

$BCAP$: میزان سرمایه‌گذاری در بخش ساختمان؛

HH : تعداد خانوار؛

GDP : تولید ناخالص داخلی؛

RG : مصرف گاز در بخش خانگی-تجاری؛

$\alpha BCAP$: نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری در بخش ساختمان؛

αHH : نرخ رشد خانوار؛

αGDP : نرخ رشد تولید ناخالص داخلی؛

t : زمان (سال)

می‌باشد.

با استفاده از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۹، مدل‌های جدول ۱ اجرا و اعتبار آنها بررسی شده است. مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی - تجاری مطابق با معادله (۱۰) است.

$$RG(t) = (0/1185,0) + (0/4511,0)\alpha BCAP(t) + (0,0/6986)\alpha HH(t) + (1/5399,0)\alpha GDP(t) + (1/0412,0/0704)RG(t-1) \quad (10)$$

پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش خانگی - تجاری با استفاده از رگرسیون خطی فازی. ساختار این مدل مشابه با ساختار مدل پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی - تجاری است. ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی؛
۲. نرخ رشد جمعیت؛
۳. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش خانگی تجاری در سال قبل؛

و خروجی این مدل، میزان فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش خانگی و تجاری است. مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش خانگی - تجاری مطابق با معادله (۱۱) است.

$$RO(t) = (0/5512,0)\alpha GDP(t) + (1/3405,2/5354)\alpha POP + (0/9233,0/0033)RO(t-1) \quad (11)$$

در اینجا:

RO : مصرف فرآورده‌های نفتی بخش خانگی - تجاری

αPOP : نرخ رشد جمعیت است (جمعیت مشابه با تعداد خانوار پیش‌بینی شده است).

پیش‌بینی تقاضای برق بخش خانگی - تجاری با استفاده از رگرسیون خطی فازی. ساختار مدل رگرسیون خطی فازی مشابه با ساختار مدل پیش‌بینی تقاضای گاز بخش خانگی - تجاری است. ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد میزان سرمایه گذاری در بخش ساختمان؛
۲. تولید ناخالص داخلی؛
۳. میزان مصرف برق بخش خانگی تجاری در سال قبل؛

و خروجی این مدل، میزان برق مصرفی در بخش خانگی و تجاری است.

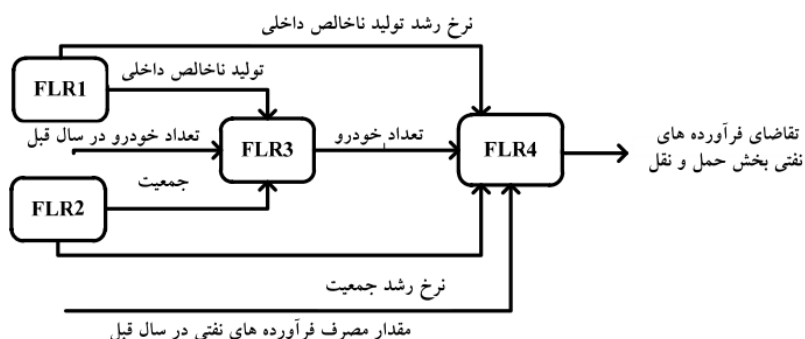
مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای برق بخش خانگی - تجاری مطابق با معادله (۱۲) است.

$$RE(t) = (0,0/63) + (0/0123,0/0094)\alpha BCAP(t) + (0,0/0542) \alpha GDP(t) + (1/0592,0)RE(t-1) \quad (12)$$

در اینجا:

RE : مصرف برق بخش خانگی - تجاری است.

پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل با استفاده از رگرسیون خطی فازی. پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل با توجه به شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی سلسله مراتبی مطابق با شکل ۴ انجام شده است.



شکل ۴: ساختار مدل رگرسیون فازی سلسله مراتبی پیش‌بینی فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل

ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی؛

۲. نرخ رشد جمعیت؛

۳. تعداد خودرو؛

۴. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل در سال قبل؛

و خروجی این مدل، فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش حمل و نقل است.

به غیر از ورودی‌های اول و دوم، ورودی سوم نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی می‌شود. همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، برای تخمین تعداد خودرو از یک مدل رگرسیون خطی فازی استفاده شده است که ورودی‌های آن تولید ناخالص داخلی، جمعیت و تعداد خودرو در سال قبل است. مدل‌های فازی به کار گرفته شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. مدل‌های رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل

مدل	فرمول‌بندی مدل
FLR3	$VEH(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)\alpha POP(t) + (p_2, c_2)\alpha GDP(t) + (p_3, c_3)VEH(t-1)$
FLR4	$TO(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)GDP(t) + (p_2, c_2)POP(t) + (p_3, c_3)VEH(t) + (p_4, c_4)TO(t-1)$

در اینجا:

VEH : تعداد خودرو

TO : میزان مصرف فرآورده‌های نفتی در بخش حمل و نقل

می‌باشد.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل مطابق با معادله (۱۳) است.

$$TO(t) = (0,0/601) + (0/00003,0)GDP(t) + (0,0/0000003)VEH(t) + (1/0214,0/0455)TO(t-1) \quad (13)$$

پیش‌بینی تقاضای CNG در بخش حمل و نقل با استفاده از مدل رگرسیون. با توجه به تعداد داده‌های اندک مربوط به مصرف CNG در بخش حمل و نقل، پیش‌بینی تقاضای آن با استفاده از مدل رگرسیون مطابق با معادله (۱۴) انجام شده است.

$$TG(t) = 5/3948(t) - 031/656 \quad (14)$$

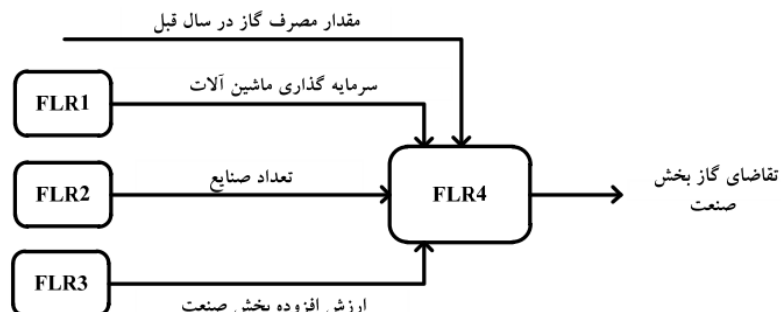
TG : میزان مصرف CNG در بخش حمل و نقل است.

پیش‌بینی تقاضای برق در بخش حمل و نقل با استفاده از مدل رگرسیون. با توجه به تعداد داده‌های اندک مربوط به مصرف برق در بخش حمل و نقل، پیش‌بینی تقاضای آن با استفاده از مدل رگرسیون مطابق با معادله (۱۵) انجام شده است.

$$TE(t) = 0/0228(t) - 0/0928 \quad (15)$$

TE : میزان مصرف برق در بخش حمل و نقل است.

پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت. پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت با توجه به شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی مطابق با شکل ۵ انجام شده است.



شکل ۵. ساختار مدل رگرسیون فازی پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت

ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری ماشین‌آلات؛
۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنایع؛
۳. تعداد صنایع (با ۵۰ نفر یا بیشتر کارکن)؛
۴. میزان مصرف گاز بخش صنعت در سال قبل

و خروجی این مدل، میزان گاز مصرفی در بخش صنعت است.

هر کدام از ورودی‌های ردیف ۱ تا ۳ نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی می‌شوند. مدل‌های فازی به کار گرفته شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. مدل‌های رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت

مدل	فرمول‌بندی مدل
FLR1	$ECAP(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)ECAP(t-1) + (p_2, c_2)ECAP(t-2)$
FLR2	$INVAL(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)INVAL(t-1) + (p_2, c_2)INVAL(t-2)$
FLR3	$INNUM(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)INNUM(t-1) + (p_2, c_2)INNUM(t-2)$
FLR4	$ING(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)\alpha ECAP(t) + (p_2, c_2)\alpha INVAL(t) + (p_3, c_3)INNUM(t) + (p_4, c_4)ING(t-1)$

در اینجا:

$ECAP$: میزان سرمایه گذاری ماشین آلات؛

$INVAL$: ارزش افزوده بخش صنعت (صنایع و معادن)؛

$\alpha ECAP$: نرخ رشد سرمایه گذاری ماشین آلات؛

$\alpha INVAL$: نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنعت (صنایع و معادن)؛

$INNUM$: تعداد صنایع؛

ING : میزان مصرف گاز بخش صنایع

می باشد.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت مطابق با معادله (۱۶) است.

$$ING(t) = (0,10/5130)\alpha INVAL(t) + (0/084,0)INNUM + (0/9539,0)ING(t-1) \quad (16)$$

پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش صنعت. ساختار این مدل رگرسیون خطی فازی مشابه با ساختار مدل پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت است.

ورودی‌های این مدل:

۱. میزان سرمایه‌گذاری ماشین آلات؛

۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنعت؛

۳. تعداد صنایع؛

۴. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش صنعت در سال قبل

و خروجی این مدل، میزان فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش صنعت است.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش صنعت مطابق با معادله (۱۷) است.

$$INO(t) = (35/3,0) + (0/1142,0)\alpha INVAL(t) + (0/0033,0/0008) INNUM + (0,0/0349)\alpha ECAP + (0/1599,0)INO(t-1) \quad (17)$$

INO : میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش صنعت است.

پیش‌بینی تقاضای برق بخش صنعت با استفاده از رگرسیون خطی فازی. ساختار این مدل رگرسیون خطی فازی مشابه با ساختار مدل پیش‌بینی تقاضای گاز بخش صنعت است. ورودی‌های این مدل:

۱. میزان سرمایه‌گذاری ماشین‌آلات؛

۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنعت؛

۳. تعداد صنایع؛

۴. میزان مصرف برق در بخش صنعت در سال قبل

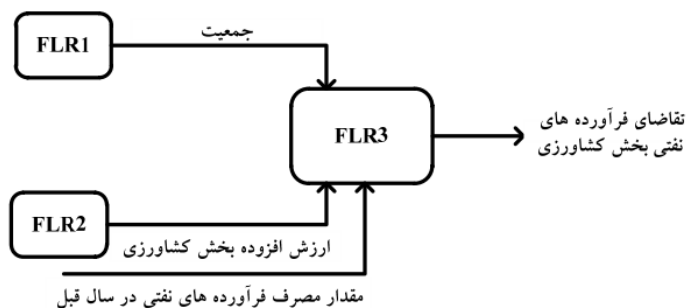
و خروجی این مدل، میزان برق مصرفی در بخش صنعت است.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای برق بخش صنعت مطابق با معادله (۱۸) است.

$$INE(t) = (0/245,0/0024) + (0/0942,0/0155)\alpha INVAL + (0/0019,0)INNUM(t) + (0,0/0073)\alpha ECAP(t) + (0/7095,0/0196)INE(t-1) \quad (18)$$

INE : میزان برق مصرفی در بخش صنعت است.

پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی. پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی با توجه به شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی مطابق با شکل ۶ انجام شده است.



شکل ۶. ساختار مدل رگرسیون فازی سلسله مراتبی پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی

ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی؛

۲. نرخ رشد جمعیت؛

۳. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی در سال قبل و خروجی این مدل، فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش کشاورزی است. هر کدام از ورودی‌های ۱ و ۲ نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی خواهند شد. مدل‌های فازی به کار گرفته شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴. مدل‌های رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی

فرمول‌بندی مدل	مدل
$AGVAL(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)AGVAL(t-1) + (p_2, c_2)AGVAL(t-2)$	FLR 1
$AGO(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)AGVAL(t) + (p_2, c_2)\alpha POP(t) + (p_3, c_3)AGO(t-1)$	FLR 3

در اینجا:

$AGVAL$: ارزش افزوده بخش کشاورزی؛

AGO : میزان مصرف فرآورده‌های نفتی در بخش کشاورزی؛

$\alpha AGVAL$: نرخ رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی

می‌باشد.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی مطابق با معادله (۱۹) است.

$$AGO(t) = (1/3952,1/8007)AGVAL / POP(t) + (5/9227,0) \alpha POP(t) + (0/7475,0/013)AGO(t-1) \quad (19)$$

پیش‌بینی تقاضای برق بخش کشاورزی با استفاده از رگرسیون خطی فازی. ساختار مدل رگرسیون خطی فازی مشابه با ساختار مدل پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی است. ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی؛

۲. نرخ رشد جمعیت؛

۳. میزان مصرف برق بخش کشاورزی در سال قبل

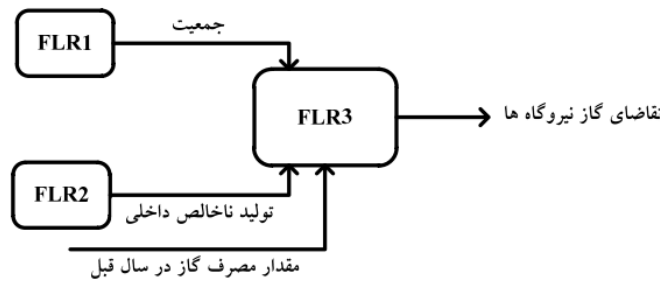
و خروجی این مدل، میزان برق مصرفی در بخش کشاورزی است.

مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای برق بخش کشاورزی مطابق با معادله (۲۰) است.

$$AGEL(t) = (0,0/5125) + (0/000006,0)AGVAL(t) + (1/063,0)AGEL(t-1) \quad (20)$$

AGEL: میزان مصرف برق در بخش کشاورزی است.

پیش‌بینی تقاضای گاز نیروگاه‌ها با استفاده از رگرسیون خطی فازی. پیش‌بینی تقاضای گاز بخش نیروگاه‌ها با توجه به شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی و با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی مطابق با شکل ۷ انجام شده است.



شکل ۷. ساختار مدل رگرسیون فازی سلسله‌مراتبی پیش‌بینی تقاضای گاز نیروگاه‌ها

ورودی‌های این مدل:

۱. نرخ رشد جمعیت؛

۲. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی؛

۳. میزان مصرف گاز نیروگاه‌ها در سال قبل

و خروجی این مدل، میزان گاز مصرفی نیروگاه‌هاست.

هر کدام از ورودی‌های ردیف ۱ و ۲ نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی پیش‌بینی می‌شوند. مدل فازی به کار گرفته شده برای پیش‌بینی تقاضای گاز نیروگاه‌ها در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. مدل رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای گاز نیروگاه‌ها

مدل	فرمول‌بندی مدل
FLR3	$PG(t) = (p_0, c_0) + (p_1, c_1)\alpha GDP + (p_2, c_2)\alpha POP(t) + PG(p_3, c_3)(t-1)$

در اینجا PG میزان مصرف گاز نیروگاه‌ها است. مدل مناسب برای پیش‌بینی تقاضای گاز نیروگاه‌ها مطابق با معادله (۲۱) است.

$$PG(t) = (10/7201,1/7354) + (4/9542,7/4737)\alpha GDP(t) + PG(0/934,0)(t-1) \quad (21)$$

پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی نیروگاه‌ها با استفاده از رگرسیون. با توجه به اینکه میزان خطای داده‌های تست برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی نیروگاه‌ها با استفاده از مدل رگرسیون خطی فازی نسبتاً زیاد بود، برای پیش‌بینی فوق از مدل رگرسیون مطابق با معادله (۲۲) استفاده شده است.

$$PO(t) = 25/364 \times \ln(t) + 40/157 \quad (22)$$

PO میزان مصرف فرآورده‌های نفتی در نیروگاه‌ها است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش‌های مختلف مصرف. در بخش ۳، ورودی‌ها و خروجی‌های مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی و برق در بخش‌های مختلف مصرف مشخص شد. خلاصه‌ای از موارد مذکور در جداول ۶، ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۶. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل‌های رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی

بخش مصرف	ورودی‌های مدل	خروجی مدل
خانگی - تجاری	۱. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	میزان فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش خانگی و تجاری
	۲. نرخ رشد جمعیت	
	۳. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش خانگی تجاری در سال قبل	
صنعت	۱. میزان سرمایه‌گذاری ماشین آلات	میزان فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش صنعت
	۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنعت	
	۳. تعداد صنایع	
	۴. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش صنعت در سال قبل	
حمل و نقل	۱. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش حمل و نقل
	۲. نرخ رشد جمعیت	
	۳- تعداد خودرو	
	۴- میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش حمل و نقل در سال قبل	
کشاورزی	۱- نرخ رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی	فرآورده‌های نفتی مصرفی در بخش کشاورزی
	۲- نرخ رشد جمعیت	
	۳- میزان مصرف فرآورده‌های نفتی بخش کشاورزی در سال قبل	

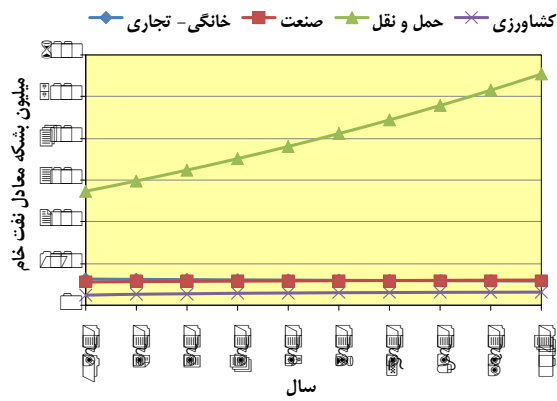
جدول ۷. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل‌های رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای گاز طبیعی

بخش مصرف	ورودی‌های مدل	خروجی مدل
خانگی - تجاری	۱. نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری در بخش ساختمان	میزان گاز مصرفی در بخش خانگی و تجاری
	۲. نرخ رشد خانوار	
	۳. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	
	۴. میزان مصرف گاز در بخش خانگی تجاری در سال قبل	
صنعت	۱. نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری ماشین‌آلات	میزان گاز مصرفی در بخش صنعت
	۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنایع	
	۳. تعداد صنایع (با ۵۰ نفر یا بیشتر کارکن)	
	۴. میزان مصرف گاز بخش صنعت در سال قبل	
نیروگاه	۱. نرخ رشد جمعیت	میزان گاز در مصرفی نیروگاه‌ها
	۲. نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	
	۳. میزان مصرف گاز نیروگاه‌ها در سال قبل	

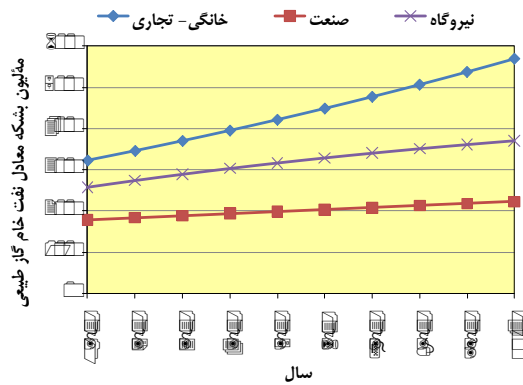
جدول ۸. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل‌های رگرسیون خطی فازی برای پیش‌بینی تقاضای برق

بخش مصرف	ورودی‌های مدل	خروجی مدل
خانگی - تجاری	۱. نرخ رشد میزان سرمایه‌گذاری در بخش ساختمان	میزان برق مصرفی در بخش خانگی و تجاری
	۲. تولید ناخالص داخلی	
	۳. میزان مصرف برق بخش خانگی تجاری در سال قبل	
صنعت	۱. میزان سرمایه‌گذاری ماشین‌آلات	میزان برق مصرفی در بخش صنعت
	۲. نرخ رشد ارزش افزوده بخش صنعت	
	۳. تعداد صنایع	
	۴. میزان مصرف برق در بخش صنعت در سال قبل	
کشاورزی	۱. نرخ رشد ارزش افزوده بخش کشاورزی	میزان برق مصرفی در بخش کشاورزی
	۲. نرخ رشد جمعیت	
	۳. میزان مصرف برق بخش کشاورزی در سال قبل	

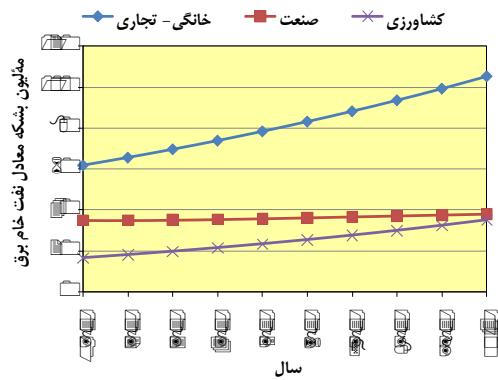
با استفاده از مدل‌های ارائه شده در بخش ۳، تقاضای فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی و برق در بخش‌های مختلف مصرف طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ پیش‌بینی شده است. شکل‌های ۸ تا ۱۶ نتایج حاصل از اجرای این مدل‌ها در حدود پایین، وسط و بالا را نشان می‌دهد.



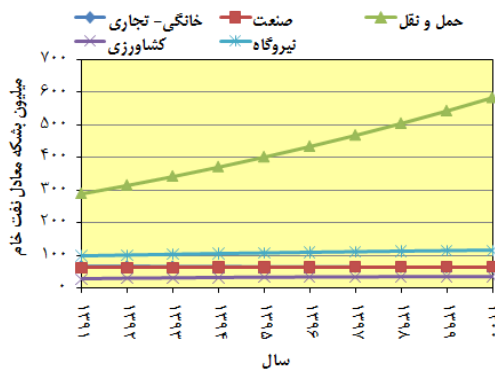
شکل ۸. پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی در بخش‌های مختلف مصرف (حد پایین)



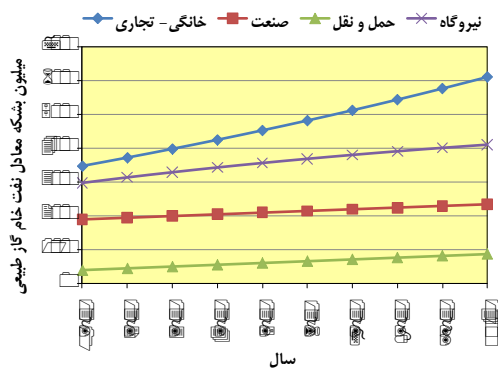
شکل ۹. پیش‌بینی تقاضای گاز طبیعی در بخش‌های مختلف مصرف (حد پایین)



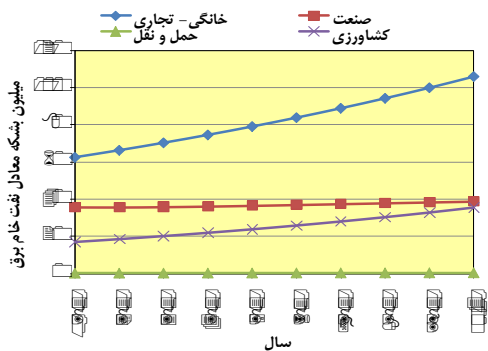
شکل ۱۰. پیش‌بینی تقاضای برق در بخش‌های مختلف مصرف (حد پایین)



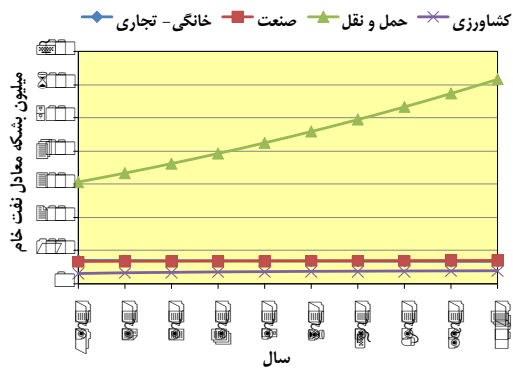
شکل ۱۱. پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی در بخش‌های مختلف مصرف (حد وسط)



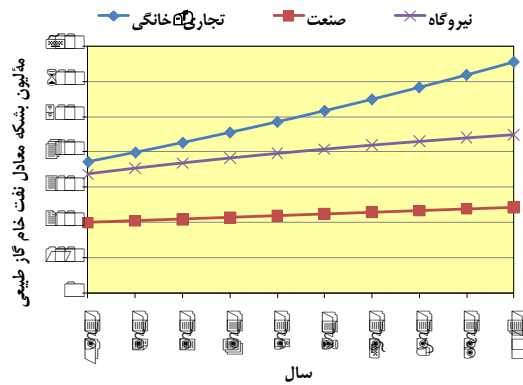
شکل ۱۲. پیش‌بینی تقاضای گاز طبیعی در بخش‌های مختلف مصرف (حد وسط)



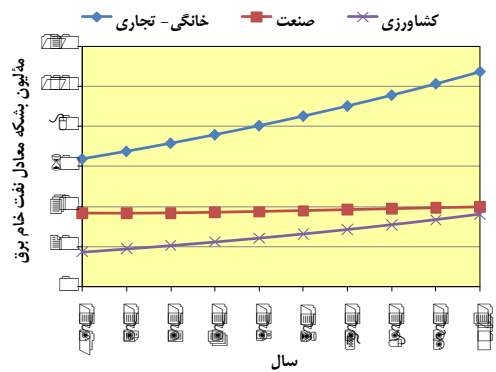
شکل ۱۳. پیش‌بینی تقاضای برق در بخش‌های مختلف مصرف (حد وسط)



شکل ۱۴. پیش‌بینی تقاضای فرآورده‌های نفتی در بخش‌های مختلف مصرف (حد بالا)



شکل ۱۵. پیش‌بینی تقاضای گاز طبیعی در بخش‌های مختلف مصرف (حد بالا)



شکل ۱۶. پیش‌بینی تقاضای برق در بخش‌های مختلف مصرف (حد بالا)

همانگونه که ملاحظه می‌شود، بخش حمل و نقل از مصرف‌کنندگان اصلی فرآورده‌های نفتی است. تقاضای بخش خانگی-تجاری روندی کاهشی دارد که علت آن توسعه گازرسانی در سطح کشور است. روند تقاضای این حامل انرژی برای سایر بخش‌های مصرف، افزایشی است. در خصوص گاز طبیعی، تقاضای بخش‌های مختلف مصرف روندی افزایشی دارد. پیش‌بینی می‌شود مصرف برق در بخش‌های مختلف مصرف روندی افزایشی داشته باشد. این روند در بخش حمل و نقل با توجه به عدم وجود زیرساخت‌های لازم جهت بهره‌برداری بیشتر از این حامل انرژی دارای شبیهی کند است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله با استفاده از مدل‌های رگرسیون و رگرسیون خطی فازی و با در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی، مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی تقاضای حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف مصرف طراحی شد. سپس تقاضای فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی و برق در بخش‌های مختلف مصرف شامل خانگی-تجاری، حمل و نقل، صنعت، کشاورزی و نیروگاه‌ها طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ برآورد شد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، سایر شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی نظیر قیمت حامل‌های انرژی نیز مورد توجه قرار گیرد. همچنین می‌توان تقاضای حامل‌های انرژی در زیربخش‌های هر کدام از بخش‌های مصرف را پیش‌بینی کرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله، نتیجه بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره قرارداد ۲۳۷۸۹/ص/۹۱/مورخ ۱۳۹۱/۲/۱۶ است. همچنین این پژوهش با استفاده از اعتبارات شورای پژوهشی دانشگاه تهران به شماره طرح ۰۲/۰۱/۴۳۰۳۰۳۰ انجام گردیده است.

منابع

۱. وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، ترازنامه انرژی
2. Al-Kandari, A.M., Soliman, S.A., El-Hawary, M.E. (2004). Fuzzy short-term electric load forecasting, *Electrical Power and Energy Systems*, 26, 111-122.
3. Azadeh, A., Khakestani, M. & Saberi, M. (2009). A flexible fuzzy regression algorithm for forecasting oil consumption estimation. *Energy Policy*, 37, 5567-5579.
4. Azadeh, A., Saberi, M. & Seraj, O. (2010). An integrated fuzzy regression algorithm for energy consumption estimation with non-stationary data: A case study of Iran. *Energy*, 35, 2351-2366.
5. Forouzanfar, M., Doustmohammadi, A., Hasanzadeh, S. & Shakouri G, H. (2012). Transport energy demand forecast using multi-level genetic programming, *Applied Energy*, 91(1), 496-503.
6. Heshmaty, B. & Kandel, A. (1985). Fuzzy linear regression and its applications to forecasting in uncertain environment, *Fuzzy Sets and Systems*, 15, 159-191.
7. <http://amar.sci.org.ir/>
8. <http://ifco.ir/>
9. <http://new.iies.org/>
- 10 Kucukali, S. & Baris, K. (2010). Turkey's short-term gross annual electricity demand forecast by fuzzy logic approach, *Energy policy*, 38(5), 2438-2445.
11. Kumara, U. & Jainb, V.K. (2010). Time series models (Grey-Markov, Grey Model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in India, *Energy*, 35(4), 1709-1716.
12. Marvuglia, A. & Messineo, A. (2012). Using Recurrent Artificial Neural Networks to Forecast Household Electricity Consumption, *Energy Procedia*, 14: 45-55.
13. Parameswara Sharma, D., Chandramohanan Nair, P.S. & Balasubramanian, R. (2002). Demand for commercial energy in the state of Kerala, India: an econometric analysis with medium-range projections, *Energy policy*, 30(9), 781-791.
14. Pokharel, S., Parameswara Sharma, D., Chandramohanan Nair, P.S. & Balasubramanian, R. (2007). An econometric analysis of energy consumption in Nepal, *Energy policy*, 35(1), 350-361.
15. Servet K, M., Ozceylan, E., Gunduz, M. & Paksoy, T. (2012). A novel hybrid approach based on Particle Swarm Optimization and Ant Colony Algorithm to forecast energy demand of Turkey, *Energy Conversion and Management* 35(1), 75-83.

16. Shakouri G, H. & Nadimi, R. (2009). A novel fuzzy linear regression model based on a non-equality possibility index and optimum uncertainty, *Applied soft computing*, 9(2), 590-598.
17. Soliman, S.A., Helal, E. & Al-Kandari, A.M. (1999). Fuzzy linear regression for measurement of harmonic components in a power system, *Electric Power Systems Research*, 50, 99–105.
18. Taghizadeh, MR., Shakouri G, H., Menhaj, MB. & Kazemi, A. (2008). Design of a multi-level fuzzy linear regression model for forecasting transport energy demand, The 13th IIES International Oil & Gas Conference.
19. Tanaka, H., Uejima, S. & Asai, K. (1982). Fuzzy linear model, fuzzy linear regression model, *IEEE Trans. System Man Cybernet*, 12, 903- 907.
20. Unler, A. (2008). Improvement of energy demand forecasts using swarm intelligence: The case of Turkey with projections to 2025, *Energy policy*, 36(6), 937–1944.