

# کاربرد الگوریتم انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی

حسین صادقی<sup>۱</sup>، مهدی ذوالفقاری<sup>۲</sup>، حسین سهرابی<sup>۳\*</sup>، یونس سلمانی<sup>۳</sup>

## چکیده:

مدیریت تقاضای انرژی از اهمیت فراوانی در برنامه‌ریزی و تامین امنیت اقتصادی کشورها برخوردار است. شناسایی عوامل موثر بر روند تقاضای انرژی کشور و پیش‌بینی مصرف آتی آن می‌تواند به سیاست‌گذاران و فعالان در بازار انرژی در جهت تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و بهبود عملکرد بازار و تامین امنیت سوخت‌گذار کمک کند.

امروزه روش‌های نوینی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف ابداع گشته است که در میان این روش‌ها الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱</sup> جایگاه پیوسته ای دارند. در میان الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> و الگوریتم بهینه‌یابی انبوه ذرات<sup>۳</sup> از جمله شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در علوم مختلف می‌باشند. از این رو، در این مطالعه برای تخمین و پیش‌بینی روند تقاضای انرژی کشور از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات در قالب دو الگوی خطی و نمایی استفاده شده و کارایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است و با استفاده از کاراترین الگو و روش و بر اساس ستاریوهای مختلف، روند آتی تقاضای انرژی کشور تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شده است.

نتایج مطالعه نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای الگوی نمایی برآورده شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بوده است. همچنین نتایج مطالعه نشان می‌دهد که کارایی الگوهای خطی برآورده شده با استفاده از هر دو الگوریتم تقاضات محسوسی ندارند. با این حال، بررسی نتایج الگوها و روش‌های مختلف برآورده شده کارایی و دقت بالای الگوی نمایی برآورده شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات را تائید می‌کند.

## تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۱/۰۱/۱۳

## تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۱/۰۴/۱۸

## کلمات کلیدی:

تقاضا، انرژی، پیش‌بینی، الگوریتم انبوه ذرات، الگوریتم ژنتیک

Sohrabivafa@gmail.com  
1) Evolutionary Algorithm  
2) Genetic Algorithm  
3) Particle Swarm Optimization

(۱) استادیار دانشگاه تربیت مدرس

(۲) دانشجوی دکتری اقتصاد انرژی دانشگاه تربیت مدرس

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

## مقدمه

امروزه مدیریت تقاضا از جمله تقاضای انرژی نقش مهمی در برنامه‌ریزی کشورها دارد و از سوی دیگر، انرژی در تأمین امنیت اقتصادی نقش اساسی دارد و به عنوان یکی از عوامل تولیدی در کلیه بخش‌های اقتصاد به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در فرایند تولید نقش دارد. همچنین با اجرای برنامه‌های توسعه و روند صنعتی شدن کشور و افزایش جمعیت، افزایش نیاز به حامل‌های انرژی پررنگ‌تر گشته است. در سال‌های گذشته فراوانی ذخایر نفتی کشور و سیاست‌های تامین حامل‌های انرژی ارزان موجب انرژی بر بودن بخش‌های مختلف اقتصاد گشته است تا جایی که تولیدات داخلی حامل‌های انرژی (ساخت تولید شده در داخل کشور) در مواردی جوابگوی مصرف داخلی نبوده و بخشی از منابع ارزی کشور صرف واردات ساخت می‌گردد<sup>[۳]</sup>. لذا هر گونه سیاست گذاری و تصمیم‌گیری در حوزه انرژی مستلزم بررسی روند تقاضای انرژی و عوامل موثر بر آن است. بنابراین، شناخت تقاضای انرژی کشور و پیش‌بینی روند آتی آن در کنار دیگر سیاست‌های حاکم بر تقاضای انرژی می‌تواند نقش موثری در فرایند تصمیم‌گیری‌های اقتصادی داشته باشد.

ممولاً در مطالعات مختلفی که جهت بررسی تقاضای انرژی مورد نیاز یک کشور انجام می‌شود، از شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی (جمعیت، تولید ناخالص داخلی و صادرات و واردات کالا و خدمات) برای توضیح روند تقاضای انرژی کل کشور استفاده می‌شود<sup>[۱۶، ۱۷]</sup>. با توجه به این نکته که روند این متغیرها در طول زمان در نوسان است، مدل‌های غیرخطی می‌توانند تخمین دقیق‌تری از تابع تقاضای انرژی را حاصل کنند. از سویی، مشکلات روش‌های کلاسیک در پیدا کردن ضرائب بهینه مدل‌های غیرخطی جایگاه خاصی را به روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت داده است. همچنین افزایش روزافزون سرعت محاسبات رایانه‌ای، طراحی بهینه پارامترها در مسایل گوناگون را از طریق شبیه‌سازی هوش جمعی<sup>۱</sup>، امکان‌پذیر کرده است. امروزه روش‌های برنامه‌نویسی تکاملی<sup>۲</sup> به روش‌های بهینه سازی در زمینه طراحی مدل‌های غیرخطی جایگاه خاصی داده است<sup>[۴]</sup>.

در میان روش‌های برنامه‌نویسی الهام گرفته شده از طبیعت، الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات جایگاه خاصی دارد و در مطالعات متعددی با استفاده از این روش‌های برنامه‌نویسی قدرتمند به صورت مستقل، به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی پرداخته شده و هر یک بر توانایی این روش‌ها تاکید داشته‌اند. اما تاکنون این دو روش به صورت منسجم در یک مطالعه واحد مورد استفاده واقع نشده‌اند تا بتوان در مورد توانایی هر یک در مواجهه با یک مسئله خاص (شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی) به قضاوت پرداخت. از طرفی، متغیرهای اثرگذار بر شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی روندی غیرخطی داشته و همواره در نوسان می‌باشند و از سوی دیگر، به دلیل اینکه شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی در

1) Swarm Intelligence  
2) Evolutionary Computing

زمینه سیاست‌گذاری‌های اقتصادی، رفاه و انرژی مسأله‌ای مهم و ضروری محسوب می‌شود، دستیابی به تکنیکی قدرتمند با توانایی‌های بالا و خطای کم در شبیه سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی یکی از مسائل مورد توجه محققین و سیاست‌گذاران درگیر با مسائل انرژی می‌باشد. از این‌رو، در این مطالعه به بررسی و مقایسه کارایی الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برای تخمین و پیش‌بینی روند تقاضای انرژی کل کشور با استفاده از شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی در قالب الگوهای خطی و نمایی پرداخته شده است.

مطالعه حاضر در شش بخش تنظیم شده است؛ در بخش دوم مختصراً از مطالعات انجام شده در حوزه تقاضای انرژی و در بخش سوم مبانی نظری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم انبوه ذرات و تابع شایستگی ارائه شده است. در بخش چهارم، ضمن ارائه الگوهای تحت بررسی، ارزش پارامترهای هر یک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برآورد شده است. در بخش پنجم، روند مصرف انرژی با استفاده از الگوها و روش‌های مختلف پیش‌بینی شده و کارایی آنها با توجه به روند واقعی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته و سپس با تدوین سناریوهای مختلف روند مصرف انرژی کل کشور تا سال ۱۴۰۴ با استفاده از کارترین الگو و روش پیش‌بینی شده و در نهایت در بخش ششم، نتایج تجربی مطالعه ارائه شده است.

### پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه تقاضای انرژی با استفاده از تکنیک‌های نوین انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

قبری، خضری و اعظمی(۱۳۸۷) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک به شبیه‌سازی تقاضای انرژی بخش حمل و نقل پرداخته و با استفاده متغیرهای توضیحی؛ جمعیت، تولید ناخالص داخلی، مسافت طی شده توسط خودروها و ارزش تجمعی تعداد خودروهای تولیدی و وارداتی، وضعیت آتی تقاضای انرژی در حمل و نقل را تا سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی کرده‌اند.

صادقی و ذوالفقاری(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی تقاضای بتزین در بخش حمل و نقل از الگوریتم ژنتیک در قالب توابع خطی، نمایی و درجه دو استفاده کرده و تقاضای بتزین را تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی کرده‌اند.

میبدی، خضری و اعظمی(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تقاضای انرژی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات پرداخته و با بهره‌گیری از خط سیر شاخص‌های کلان اقتصادی-اجتماعی به پیش‌بینی تقاضای انرژی تا سال ۱۳۹۶ پرداخته‌اند.

پاکسوی<sup>۱</sup> و دیگران<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) در مقاله‌ای به تخمین تابع تقاضای انرژی ترکیه با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات پرداخته و تقاضای آتی انرژی ترکیه را تا سال ۲۰۲۴ پیش بینی کرده‌اند.

آنلر<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات به تخمین ارزش آتی تقاضای انرژی ترکیه تا سال ۲۰۲۵ پرداخته است.

کانیرت و اوزترک<sup>۴</sup> (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با عنوان سه مدل کاربردی تکنیک‌های جستجوی الگوریتم ژنتیک در تخمین تقاضای انرژی، به منظور برآورد تقاضای نفت با استفاده از روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک، با هدف تخمین ارزش آتی تقاضا برای نفت، به ارائه‌ی سه مدل غیر خطی تقاضا برای نفت در ترکیه پرداخته‌اند.

سیلان و اوزتورک<sup>۵</sup> (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای تقاضای انرژی ترکیه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر اساس شاخص‌های اقتصادی تخمین زده و تحت سناریوهای مختلف تا سال ۲۰۲۵ مصرف انرژی ترکیه را پیش بینی کرده‌اند.

تکساری<sup>۶</sup> (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها<sup>۷</sup> برای تخمین تقاضای انرژی ترکیه به منظور برآورد تقاضای انرژی ترکیه به ارائه توابع خطی و درجه دو تقاضای انرژی در این کشور پرداخته و تقاضای آتی انرژی را تا سال ۲۰۲۵ پیش بینی کرده است.

ووجیم و روپر<sup>۸</sup> (۲۰۰۹)<sup>۷</sup> در مقاله‌ای با عنوان تخمین تقاضای انرژی کره جنوبی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از متغیرهای توضیحی؛ جمعیت، تولید ناخالص داخلی، واردات و صادرات و طراحی یک شبکه عصبی پسخور<sup>۸</sup> تقاضای انرژی را تخمین و تحت چهار سناریو تقاضای آتی انرژی کره جنوبی را تا سال ۲۰۲۵ پیش بینی کرده‌اند.

هالدنبیلن و سیلان<sup>۹</sup> (۲۰۰۵) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تخمین تابع تقاضای انرژی ترکیه پرداخته و تحت سه سناریو به پیش بینی تقاضای آتی انرژی در بخش حمل و نقل تا سال ۲۰۲۰ پرداخته‌اند.

کارابلوت و آلکان و سیلان<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۸) در مقاله‌ای با عنوان پیش بینی تقاضای بلندمدت انرژی با استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک به تخمین و پیش بینی تقاضای انرژی الکتریکی در بخش‌های جنوب شرقی ترکیه پرداخته‌اند.

1) Turan Paksoy

2) Unler

3) Canyurt And Ozturk

4) Ceylan& Ozturk

5) Toksari

6) Ant Colony Optimization

7) Woogeema,Roper

8) Back-Propagation

9) Haldenbilen, Ceylan

### مبانی نظری الگوریتم های ژنتیک و انبوه ذرات

امروزه با پیشرفت ابزار محاسباتی و سرعت پردازش اطلاعات زمینه پیاده‌سازی و حل مسائل گوناگون با استفاده از مدل‌های محاسبات الهام گرفته شده از طبیعت از جمله الگوریتم‌های تکاملی فراهم شده است. الگوریتم‌های تکاملی با الهام از طبیعت یک ساختار جمعیتی ایجاد کرده و بر اساس قوانینی آنها را نمو می‌دهند. در این روش، به هر فرد در جمعیت بر اساس تابع شایستگی و بر اساس موقعیت آن در محیط یک مقدار شایستگی نسبت داده می‌شود و سپس براساس قوانین معین، عملگرهای مختلف بر روی هر فرد برای ارتقا و بهبود نتیجه اعمال می‌گردد. اگرچه این روش از دیدگاه زیستی بسیار ساده انگارانه به نظر می‌رسد، اما یک سازوکار جستجوی انتباقی بسیار قدرتمند و کارا ایجاد می‌کند که قادر به یافتن پاسخ بهینه در بسیاری از مسائل پیچیده می‌باشد.

برخی مزایای الگوریتم‌های تکاملی عبارتند از:

- ۱- با کدینگی از مجموعه جوابها کار می‌کنند نه با خود آنها.
- ۲- به جای جستجوی یک جواب منفرد، دسته‌ای از جواب‌ها را جستجو می‌کنند.
- ۳- از اطلاعات تابع هدف استفاده می‌کنند و نه مشتق یا اطلاعات کمی.
- ۴- از قواعد انتقال احتمالی استفاده می‌کنند و نه از قواعد قطعی.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در واقع شناخته‌شده‌ترین نوع از الگوریتم‌های تکاملی است که طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هلند<sup>۱</sup> و همکارانش ابداع و گسترش یافت. ایده محاسبات تکاملی<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ<sup>۳</sup> در کتابی با عنوان "استراتژی‌های تکامل" معرفی شد. تحقیقات بر روی الگوریتم ژنتیک دقیقاً پس از تحقیقات روی شبکه‌های عصبی مصنوعی آغاز شد که در هر دو شاخه از سیستم‌های بیولوژیکی به عنوان مدل انگیزشی و محاسباتی الهام گرفته شده است. این الگوریتم دارای روند تکراری بوده و در هر تکرار با یک راه حل یا چندین راه حل مختلف کار می‌کند.

الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه حل‌های اولیه تصادفی آغاز می‌کند. اگر معیارهای نهایی ارضاء نشود، سه عملگر متفاوت تکثیر<sup>۴</sup>، جهش<sup>۵</sup> و ادغام<sup>۶</sup> به کار گرفته می‌شوند تا جمعیت به روز شود. هر تکرار از این سه عملگر به عنوان یک نسل شناخته می‌شود [۱۴].

1) John holand

2) Evolutionary computing

3) Rechenberg

4) Reproduction

5) Mutation

6) Crossover

از آنجا که نمایش راه حل ها در الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه کروموزوم های طبیعی است و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک شبیه به عملگرهای ژنتیکی عمل می کنند، روند فوق را به نام الگوریتم ژنتیک نام گذاری کرده اند. در واقع، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می کند. گام اول، گروهی از نقاط جستجو را که جمعیت<sup>۱</sup> نامیده می شود، بر اساس تابع هدف ارزیابی می کند. در گام دوم، بر اساس وضعیت ارزیابی شده، برخی از نقاط به عنوان کاندیداهای حل مساله انتخاب می شوند. در گام سوم نیز عملگرهای ژنتیک<sup>۲</sup> روی این کاندیداهای اعمال می شوند تا جمعیت نسل بعدی ساخته شوند. این فرآیند تا زمانی که معیارهای نهایی به دست آید، تکرار می شود. معیار نهایی زمانی است که نتیجه ای در حد قابل قبول به دست آید یا تعداد حداکثر نسل تکرار شود.<sup>۳</sup>

### الگوریتم انبوه ذرات

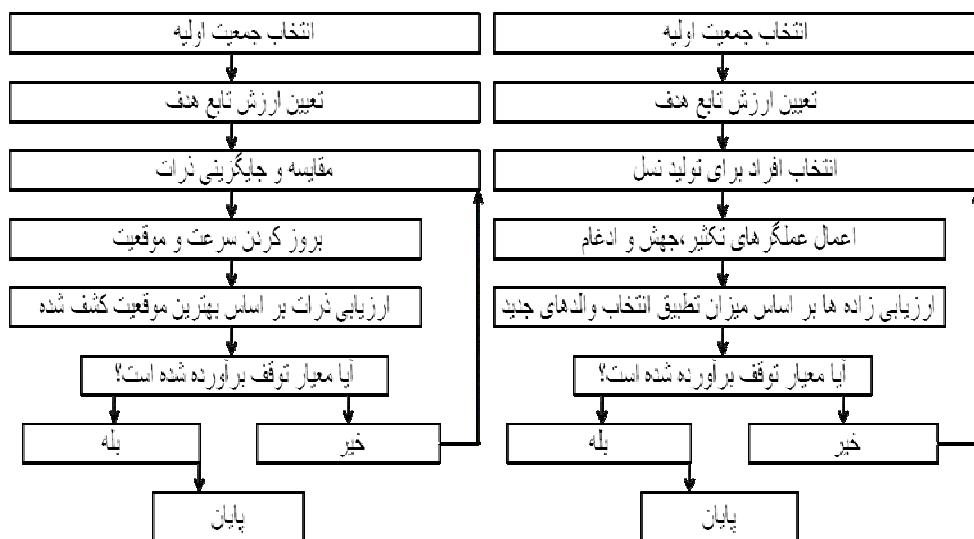
الگوریتم انبوه ذرات یک الگوریتم تکاملی<sup>۴</sup> جهت بهینه سازی توابع غیر خطی است که بر مبنای رفتار اجتماعی پرندگان ارائه شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت<sup>۵</sup> مطرح شد که برگرفته از رفتار ذرات هجومی همچون دسته کلاغها بوده است؛ به این گونه که در حرکت یک دسته از کلاغها یک کلاغ (سرگروه) دارای بهترین موقعیت می باشد و بقیه کلاغها با توجه به موقعیت خود و کلاغ های مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سرگروه را دارند. در این حین، چنانچه یکی از اعضاء تواند موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند، به عنوان سرگروه انتخاب می شود. عملکرد الگوریتم انبوه ذرات نیز به این گونه است؛ به این صورت که دسته ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسأله بهینه سازی) در محیط جستجو پخش می شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه، بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می باشد. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می گیرد. در واقع، هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است.<sup>[۱۱]</sup>

نمودار جریانی مربوط به الگوریتم های ژنتیک و انبوه ذرات در شکل های ۱ و ۲ ارائه شده است.

1) Population  
2) Genetic Operation

۳) برای مطالعه بیشتر در مورد الگوریتم ژنتیک مراجعه کنید به:<sup>[۱۴]</sup>

4) Evolutionary process  
5) Kennedy and Eberhart



شکل ۲: الگوریتم انبوه ذرات

شکل ۱: الگوریتم انبوه ذرات

### تابع شایستگی (تابع هدف)

برای بهینه‌یابی ضرایب الگو، پارامترها باید به نحوی تعیین شوند که مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر بسیار تزدیک به مقادیر واقعی باشد. برای این منظور فرض کنید  $E_i^{\text{observed}}$  مقادیر واقعی تقاضای انرژی در طول دوره ۱ و  $E_i^{\text{simulated}}$  مقادیر شبیه سازی شده توسط تابع تحت بررسی برای دوره ۱ باشد. در این صورت با تفاضل مقادیر واقعی از مقادیر شبیه سازی شده متناظر خود خطای شبیه سازی<sup>۱</sup> (SE) به دست می‌آید، که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$SE = E_i^{\text{observed}} - E_i^{\text{simulated}} \quad (1)$$

برای شبیه سازی تابع تقاضای انرژی و یافتن ضرایب بهینه باید مجموع مجذور خطاهای حداقل شود؛ چرا که در این حالت انحرافات مثبت و منفی مقادیر شبیه سازی شده از مقادیر واقعی آنها نمی‌توانند یکدیگر را خشی کنند و نیز این کار باعث می‌شود انحرافات بزرگ نسبت به انحرافات کوچک از وزن و اهمیت بیشتری برخوردار باشند. نحوه محاسبه مجموع مجذور خطاهای (SSE) در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (E_i^{\text{observed}} - E_i^{\text{simulated}})^2 \quad (2)$$

1) Simulation Error

در این مطالعه برای تخمین تابع تقاضای انرژی از رابطه (۲) به عنوان تابع برازنده‌گی در الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات استفاده شده است.

### معرفی مدل

با توجه به مطالعات و شواهد ارائه شده، تابع تقاضای انرژی را می‌توان به صورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

$$E=f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $E$  نشان دهنده کل مصرف نهایی انرژی معادل میلیون بشکه نفت خام است که از داده‌های ترازنامه انرژی استخراج شده و همچنین  $X_1$  و  $X_2$  به ترتیب نشان دهنده تعداد جمعیت، تولید ناخالص داخلی به قیمت ثابت از داده‌های بانک جهانی و نیز  $X_3$  و  $X_4$  به ترتیب نشان دهنده صادرات و واردات کالا و خدمات معادل میلیارد ریال می‌باشد که از داده‌های سری زمانی بانک مرکزی استخراج شده‌اند.

به منظور انجام محاسبات با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات ابتدا باید داده‌ها به صورت داده‌های نرمال بین صفر و یک تبدیل شوند. برای این کار از تابع (۴) استفاده شده است.

$$X_n = (X_R - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (4)$$

در تابع فوق  $X_n, X_R, X_{min}, X_{max}$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر واقعی، مقادیر نرمال شده، مقادیر حداکثر و حداقل داده‌های تحت بررسی می‌باشند. مقادیر حداکثر و حداقل مربوط به متغیرهای تحت بررسی (در سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۸۶) در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقادیر حداکثر و حداقل مشاهده مربوط به متغیرهای مورد بررسی

نوع متغیر	مقدار حداقل متغیر	مقدار حداکثر متغیر
صرف انرژی	۱۸۴/۷۵۹۲	۹۷۹/۴۲۸۷
تولید ناخالص داخلی	۱۷۲۸۰۱	۴۴۷۹۶۱
جمعیت	۳۷۲۲۷۳۰۶	۷۰۵۸۲۰۸۶
صادرات	۱۳۶۹۰	۷۹۵۸۵
واردات	۴۰۹۵۳	۱۰۲۳۳۶

منبع: نتایج تحقیق

برای برآورد تابع تقاضای انرژی از معادلات خطی و نمایی، به ترتیب از معادلات (۵) و (۶) استفاده شده است.

$$E_{Lin} = W_1 + W_2 X_1 + W_3 X_2 + W_4 X_3 + W_5 X_4 \quad (5)$$

$$E_{Exp} = W_1 + W_2 X_1^{W_3} + W_3 X_2^{W_4} + W_4 X_3^{W_5} + W_5 X_4^{W_6} \quad (6)$$

### برآورد مدل

برای برآورد ضرائب بهینه الگوهای (۵) و (۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک تعبیه شده در نرم افزار MATLAB و برای برآورد ضرائب بهینه این الگوها با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات، از برنامه نویسی در محیط MATLAB استفاده شده است. مشخصه‌ها و پارامترهای الگوریتم‌ها به صورت جداول زیر تعیین شده است:

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد جمعیت	تابع ایجاد جمعیت	تابع انتخاب جمعیت	تابع ادغام	تابع جهش	حداکثر تکرار
۴۶	uniform	Stochastic uniform	Scattered	Adaptive feasible	۱۰۰ بار

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم انبوه ذرات

تعداد جمعیت	پارامتر شناخت فردی	پارامتر شناخت اجتماعی	ضریب ایترنسی	حداکثر تکرار
۴۶	۱/۳	۲/۷	۰/۶۶	۱۰۰ بار

با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۸۲، معادلات مربوط به هر یک از الگوهای خطی و نمایی حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی به صورت زیر برآورد شده است.

معادله خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک:

$$E_{Lin}^{GA} = -0.0345 + 0.2743X_1 + 0.6656X_2 + 0.0438X_3 + 0.0016X_4 \quad (11)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک:

$$E_{Exp}^{GA} = -0.0129 + 0.1492X_1^{0.7397} + 0.7632X_2^{0.2551} + 0.0927X_3^{0.1119} - 0.0294X_4^{0.9581} \quad (12)$$

معادله خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات:

$$E_{Lin}^{PSO} = -0.0345 + 0.2741X_1 + 0.6656X_2 + 0.0439X_3 + 0.0016X_4 \quad (13)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات:

$$E_{Exp}^{PSO} = -0.0005 + 0.1218X_1^{0.7268} + 0.7917X_2^{0.4484} + 0.0618X_3^{0.7386} - 0.0623X_4^{0.0062} \quad (14)$$

### ارزیابی الگوهای در شبیه سازی

پس از تخمین ضرائب مربوط به هر یک از الگوهای مورد بررسی، با توجه به این نکته که داده‌ها به اعداد نرمال بین صفر و یک تبدیل شده‌اند، ابتدا مقادیر برآورده شده به مقادیر واقعی تبدیل می‌شوند و سپس با استفاده از مقادیر واقعی کارایی هر یک از الگوهای در شبیه سازی روند تقاضای انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای تبدیل مقادیر نرمال برآورده شده به مقادیر واقعی از تابع (۱۵) استفاده شده است.

$$X = X_n * (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min} \quad (15)$$

برای ارزیابی کارایی شبیه‌سازی معمولاً از معیارهای خطای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در این مطالعه از معیار میانگین محدود خطای<sup>۱</sup> و میانگین قدرمطلق درصد خطای<sup>۲</sup> به عنوان معیار ارزیابی کارایی شبیه‌سازی استفاده شده است. جدول (۴) نتایج ارزیابی کارایی هر یک از الگوهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج ارزیابی کارایی الگوهای تحت بررسی

$E_{Exp}$	$E_{Lin}^{PSO}$	$E_{Exp}^{GA}$	$E_{Lin}^{GA}$	الگوی استفاده شده
۲۰۲/۱۷۱۱	۵۲۱/۹۵۱۹	۲۵۷/۴۰۴۸	۵۲۱/۹۵۲۰	MSE
۰/۰۱۲۰۲۷	۰/۰۱۹۱۸۸	۰/۰۱۴۲۸۹	۰/۰۱۹۱۸۶	MAPE
۰/۹۹۵۸	۰/۹۸۹۱	۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۹۱	درصد دقت پیش‌بینی

منبع: یافته‌های محقق

همان گونه که مشاهده می‌شود، کلیه معیارها نشان دهنده برتری الگوی نمایی برآورده شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات می‌باشد، با این حال، تفاوت محسوسی بین الگوهای خطی برآورده شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات

$$1) \text{ Mean Squared Error} \quad \text{MSE} = \frac{\sum_{t=1}^{T+m} (Y_t^e - Y_t)^2}{m}$$

$$2) \text{ Mean Absolute Percentage Error} \quad \text{MAPE} = \frac{100 \sum_{t=1}^{T+m} \left| \frac{Y_t^e - Y_t}{Y_t} \right|}{m}$$

در توابع فوق  $Y_t^e$  و  $Y_t$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر واقعی و مقادیر شبیه سازی شده می‌باشند.

مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر، سهولت دستیابی هر دو الگوریتم به نقاط بھینه در توابع خطی بوده است. اما چنانچه ملاحظه می‌شود، به دلیل اینکه متغیرهای مسأله دارای الگوی رشد نمایی بوده‌اند، نتایج هر دو الگوریتم در الگوی نمایی بهتر از الگوی خطی بوده است. همچنین در برآوردتابع غیرخطی (الگوی نمایی) الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتم آنبوه ذرات به دلیل همگراپی کندر در حداقل ۱۰۰ تکرار، نتایج بهتری ارائه نمی‌کند.

### پیش‌بینی تقاضای انرژی

انرژی نقش مهمی در رشد و توسعه جوامع داشته و به عنوان یکی از عوامل تولید به اشکال مختلف در فرایند تولید اثرگذار است. از این رو، تخمين و شبیه سازی روند مصرف و همچنین پیش‌بینی روند آتی آن، اهمیت فراوانی در سیاست گذاری‌های اقتصادی و انرژی دارد. بنابراین، بکارگیری روش‌هایی که بتواند با دقت بالایی اهداف فوق را برآورد نماید، مورد علاقه سیاست‌گذاران و محققینی است که درگیر با مسائل تامین انرژی می‌باشند. لذا در این مطالعه پس از شبیه‌سازی روند تقاضای انرژی کشور در قالب الگوهای خطی و نمایی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و آنبوه ذرات، کارایی آنها در پیش‌بینی روند آتی تقاضای انرژی بررسی شده است تا کاراترین الگوی تقاضاً انرژی کشور پیش‌بینی گردد. بدین منظور پس از ارزیابی کارایی الگوهای مختلف، روند آتی متغیرهای مستقل با استفاده از روش ستاریو سازی پیش‌بینی شده و در نهایت بر اساس آن، تقاضاً انرژی تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی می‌گردد.

### ارزیابی الگوها در پیش‌بینی

به منظور ارزیابی الگوها در پیش‌بینی از معیار اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده تقاضاً و مقادیر تقاضای واقعی خارج از دامنه تخمين استفاده می‌شود. لذا از داده‌های سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ که در دسترس بوده به عنوان مبنای معیار ارزیابی کارایی پیش‌بینی استفاده و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج ارزیابی کارایی پیش‌بینی الگوهای تحت بررسی

معیار ارزیابی		۱۳۸۶	۱۳۸۵	۱۳۸۴	۱۳۸۳	سال
MAPE	MSE	۹۷۹/۴۳	۹۱۴/۷۴	۸۴۰/۰۹	۷۷۶/۴۱	روش پیش‌بینی
۰/۰۲۳۰۶۶	۶۹۷/۵۵	۹۳۹/۶۹	۸۸۶/۸۱	۸۴۲/۱۳	۷۹۷/۰۷	E <sub>Lin</sub> <sup>ga</sup>
		۳۹/۷۳۸	۲۷/۹۲۹	-۲/۰۳۷۵	-۲۰/۶۶۱	خطای برآورد
۰/۰۱۳۴	۱۸۳/۵۷	۹۶۷/۴	۹۰۲/۵۶	۸۴۹/۳۷	۷۹۵/۲۶	E <sub>Exp</sub> <sup>ga</sup>
		۱۲/۰۲۴	۱۲/۱۸۶	-۹/۲۸۳۷	-۱۸/۸۴۱	خطای برآورد
۰/۰۲۳۰۶۱	۶۹۷/۴۲	۹۳۹/۶۹	۸۸۶/۸۲	۸۴۲/۱۳	۷۹۷/۰۷	E <sub>Lin</sub> <sup>PSO</sup>
		۳۹/۷۳۸	۲۷/۹۲۶	-۲/۰۳۵۵	-۲۰/۶۵۴	خطای برآورد
۰/۰۰۸۱	۷۶/۹۸	۹۷۷/۴۵	۹۰۵/۲۴	۸۴۷/۸۵	۷۸۸/۸	E <sub>Exo</sub> <sup>PSO</sup>
		۱/۷۹۸۶	۹/۵۰۵۱	-۷/۷۵۵۴	-۱۲/۳۹	خطای برآورد

منبع: یافته‌های محقق

نتایج بدست آمده نشان دهنده قدرت بالای پیش‌بینی الگوی نمایی با کمترین میزان میانگین قدر مطلق درصد خطا در هر دو حالت استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات بوده و از میان حالت‌های فوق الگوی نمایی برآورده شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات با داشتن حداقل میانگین مجذور خطا و میانگین قدر مطلق درصد خطا، بهترین حالت برای پیش‌بینی روند آتی تقاضای انرژی کشور می‌باشد. این نتایج دور از انتظار نبوده است، چرا که در فرایند شبیه‌سازی نیز الگوی نمایی شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات دارای عملکرد بهتری بوده است.

### سناریوسازی

پس از مقایسه کارایی هر روش در پیش‌بینی مقادیر آتی تقاضای انرژی و تشخیص بهترین الگو، با تدوین سناریوهای مختلف برای روند متغیرهای مستقل می‌توان روند آتی تقاضای انرژی را با توجه به آن پیش‌بینی کرد. روش سناریوسازی یکی از روش‌های کیفی آینده‌نگری است که بر طبق آن به ترسیم و تصور آینده با طراحی سناریوهای فرضی می‌پردازیم. سناریوها تصویر روشنی از آینده‌اند که برنامه‌ریزی به کمک آنها می‌تواند مسائل، چالش‌ها و فرصت‌های محیط را به روشنی ببیند و بشناسد. سناریو، ابزاری برای تحلیل سیاست‌ها و شناخت شرایط، تهدیدات، فرصت‌ها، نیازها و ارزش‌های برتر آینده است. به سبب گوناگونی عوامل و نیروهای سازنده آینده و پیچیدگی و تعامل میان آنها، هرگز نمی‌توان آینده را به طور دقیق پیش‌بینی کرد. از این رو، متخصصان آینده‌نگری، انتخاب محتمل‌ترین تصویر آینده را چندان درست نمی‌دانند. در نتیجه، باید سناریوهای مختلفی را برای برنامه‌ریزی به کار برد. بنابراین، اگر سناریو شامل همه تصاویر ممکن آینده باشد، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی به شمار آید. چنان‌که با بهره برداری روش تأثیرات متقابل و بکارگیری این سناریو، به خوبی می‌توان به استقبال آینده رفت<sup>[۱]</sup>. از این رو، در این مطالعه به منظور پیش‌بینی تقاضای بلندمدت انرژی سه سناریوی احتمالی برای متغیرهای مستقل در نظر گرفته و سپس براساس آنها مقادیر آتی تقاضای بلندمدت انرژی پیش‌بینی می‌گردد. سناریوهای مورد نظر در جدول (۶) ارائه شده است.

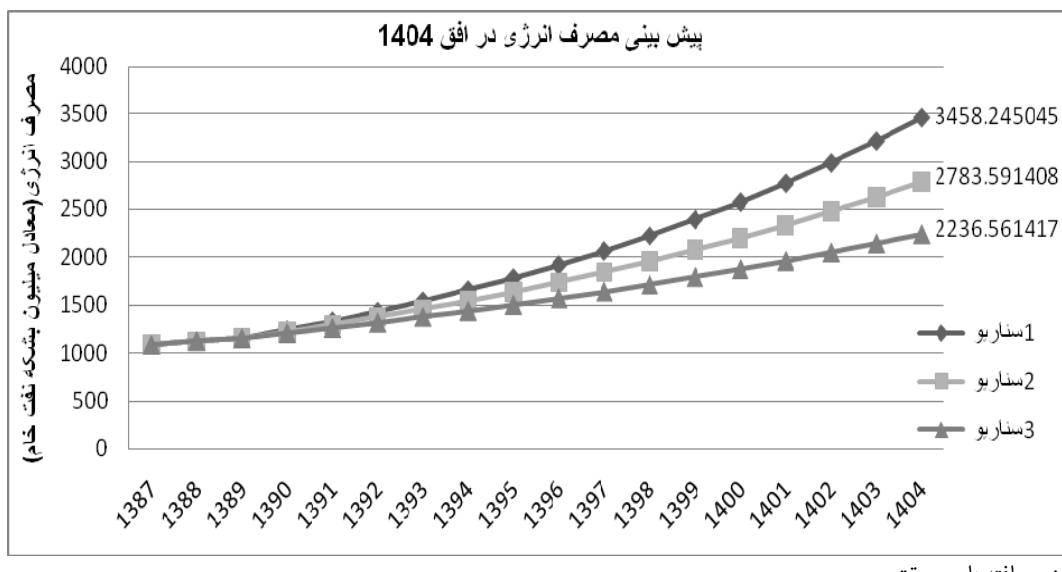
جدول (۶): سناریوسازی رشد متغیرهای توضیحی (درصد) در افق سند چشم انداز ۱۴۰۴

سناریو	جمعیت	تولید ناخالص داخلی	صادرات کالا و خدمات	واردادات کالا و خدمات
۱	۱/۵	۵	۵	۶
۲	۱/۲۵	۴	۴	۵
۳	۱	۳	۳	۴

### پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی

با توجه به سناریوهای تدوین شده برای متغیرهای مستقل مورد استفاده و با استفاده از الگوی نمایی برآورده شده توسط الگوریتم انبوه ذرات به عنوان بهترین روش برآورده، روند مصرف انرژی در کشور تا پایان سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی و نتایج آن در نمودار ۱ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن بحران اقتصادی اخیر و همچنین تشدید تحریم‌ها علیه ایران، سناریوی سوم یک حالت بدینانه در زمینه رشد متغیرهای مستقل الگو را ارائه می‌کند. با توجه به این سناریو، الگوی نمایی برآورد شده با الگوریتم انبوه ذرات پیش‌بینی می‌کند مصرف انرژی در سال ۱۴۰۴، افق سند چشم انداز کشور، برابر با ۲۲۳۶ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود. از سوی دیگر، سناریوی اول با یک خوشبینی نسبت روند رشد متغیرهای مستقل الگو و در نظر گرفتن بهبود روابط خارجی و کاهش تحریم‌ها علیه کشور و نیز اجرای برنامه‌های جمعیتی موفق جهت جلوگیری از کاهش نرخ رشد جمعیت، برآورده بیش از دو سناریوی دیگر را نشان داده و مصرف انرژی کشور را در افق ۱۴۰۴ برابر با ۳۴۵۸ میلیون بشکه معادل نفت خام پیش‌بینی می‌کند. سناریوی دوم نشان دهنده یک حالت بینایین دو سناریوی خوشبینانه و بدینانه است. این سناریو با در نظر گرفتن توفيق نسبی در اهداف سند چشم انداز یک رویکرد نسبتاً متوسط را در قبال رشد متغیرهای مستقل الگو ارائه می‌کند. لذا با توجه با این سناریو، میزان مصرف انرژی در کشور در سال ۱۴۰۴ برابر با ۲۷۸۳ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود. نتایج پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی کشور بر اساس سناریوهای مذکور در نمودار ۱ ارائه شده است.



منبع: یافته‌های محقق

نمودار ۱) پیش‌بینی تقاضای انرژی

### نتیجه‌گیری

امروزه انرژی اهمیت فراوانی در توسعه جوامع داشته و در تمام بخش‌های اقتصاد در فرایند تولید نقش اساسی دارد. لذا تامین کافی و به هنگام انرژی مورد نیاز کشور یکی از اهداف برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران هر کشوری می‌باشد. در این

راستا، اطلاع از روند آتی تقاضای انرژی و پیش‌بینی میزان مصرف آتی آن نقش اساسی در تامین اهداف فوق دارد. از طرف دیگر، با پیشرفت‌هایی که در زمینه فناوری و محاسبات رایانه‌ای انجام شده است، روش‌های فرا ابتکاری و ملهم از طبیعت برای محاسبات و پیش‌بینی جایگاه خاصی یافته‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات از جمله این روش‌های نوین محاسباتی می‌باشند.

در این مطالعه، کارایی الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات در تخمین و پیش‌بینی روند آتی مصرف انرژی کشور در قالب دو الگوی نمایی و خطی مورد بررسی قرار گرفته و روند آتی تقاضای انرژی تحت سه سناریو در افق چشم انداز ۱۴۰۴ مورد پیش‌بینی قرار گرفته است.

نتایج مقایسه الگوهای برآورده در این مطالعه با دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک به شرح زیر است:

۱- کارایی الگوهای خطی برآورده به وسیله هر دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک تقریباً یکسان است. دلیل این امر سهولت دستیابی به پاسخ‌های بھینه توسط هر دو الگوریتم مورد استفاده در مقاله بوده است.

۲- الگوی نمایی برآورده در مقایسه با الگوی خطی در هر دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک کارایی بیشتر داشته و نتایج دقیق‌تر را منجر می‌شوند. دلیل این امر نیز پیروی روند رشد متغیرهای مورد استفاده از الگوی رشد نمایی بوده است.

۳- مدل نمایی برآورده توسط الگوریتم انبوه ذرات در مقایسه با مدل نمایی برآورده توسط الگوریتم ژنتیک کارایی بیشتری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی دارد. دلیل این امر همگرایی سریعتر الگوریتم انبوه ذرات در دستیابی به پاسخ‌های بھینه بوده است.

شایان ذکر است که پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی با استفاده از الگوی نمایی برآورده توسط الگوریتم انبوه ذرات به عنوان الگوی برتر بر اساس ۳ سناریوی بدینانه، بینایی و خوبی‌بینانه برای متغیرهای مستقل نشان داد که تقاضای انرژی در ایران در سال ۱۴۰۴ در حالت بدینانه، بینایی و خوبی‌بینانه به ترتیب برابر با ۲۷۸۳، ۲۲۳۶ و ۳۴۵۸ میلیون بشکه معادل نفت خام خواهد بود.

بر اساس یافته‌های این مطالعه، پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی از الگوی نمایی و الگوریتم انبوه ذرات برای پیش‌بینی تقاضای انرژی کشور به تفکیک بخش‌های اقتصادی استفاده گردد و نیز کارایی این الگوریتم با سایر روش‌های محاسبات ملهم از طبیعت مقایسه گردد.

## منابع

- [۱] بانک اطلاعات سری های زمانی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (<http://tsd.cbi.ir>)
- [۲] بزرگی، محمدرضا. (۱۳۸۸)، روش های پژوهش در حوزه آینده‌اندیشی، مجله کتاب ماه علوم اجتماعی، ۱۴، صص ۱۹-۱۴.
- [۳] صادقی، حسین. ذوالقاری، مهدی. (۱۳۸۸)، تخمین تابع تقاضای بنزین در بخش حمل و نقل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، فصل نامه مطالعات انرژی، شماره ۲۱، صص ۲۷-۱.
- [۴] فرج زاده ده کردی، حسن. (۱۳۸۶)، کاربرد الگوریتم ژنتیک در مدل بندی پیش‌بینی ورشکستگی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد حسابداری دانشگاه تربیت مدرس.
- [۵] قنبری، علی. خضری، محسن. اعظمی، آرش. (۱۳۸۷)، شبیه سازی تقاضای بنزین و نفت گاز در حمل و نقل زمینی ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک، فصلنامه اقتصاد مقداری، شماره ۴، صص ۱۷۷-۱۵۷.
- [۶] میبدی، علی. خضری، محسن. اعظمی، آرش. (۱۳۸۸)، شبیه سازی تابع تقاضای انرژی در ایران با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات، فصل نامه مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۲۰، صص ۱۵۹-۱۴۱.
- [۷] عیوضی، وزارت نیرو، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، ترازنامه های انرژی (<http://pep.moe.org.ir>)
- [8] Assareh E. Behrang M.A. Assari M.R. Ghanbarzadeh A. 2010, “Application of PSO (Particle Swarm Optimization) and GA (Genetic Algorithm) Techniques on Demand Estimation of Oil In Iran”, Energy, Vol. 35, pp. 5223-5229.
- [9] Canyurt O.E. Ozturk H.K. 2006. “Three Different Applications of Genetic Algorithm (GA) Search techniques on Oil Demand Estimation”. Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 3138–3148.
- [10] Ceylan H. Ozturk H.K. 2004. “Estimating Energy Demand of Turkey Based on Economic Indicators Using Genetic Algorithm Approach”. Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 2525–2537.
- [11] Clerc M. 2006, “Particle Swarm Optimization”, london, British Library Cataloguing-in-Publication Data, UK.
- [12] Ebrahimi K. 2010, “Modeling And Forecasting Ling-Term Natural Gas(NG) Consumption In Iran, Using Particle Swarm Optimization(PSO)”, Master Thesis Computer Engineering , Hogskolan Dalarna, Swedish.
- [13] Haldenbilen S. Ceylan H. 2005. “Genetic Algorithm Approach to Estimate Transport Energy Demand in Turkey”, Energy Policy, Vol. 33, pp. 89–98.
- [14] Haupt R.L. Haupt S.E. 2006, “Practical genetic algorithms”, Hoboken, New Jersey, A Wiley-Interscience publication.
- [15] Karabuluta K. Alkanb A. YilmazA. 2008. “LONG TERM ENERGY CONSUMPTION FORECASTING USING GENETIC PROGRAMMING”, Mathematical And Computational Applications, Vol. 13, pp. 71-80.

- [16] Paksoy T. Özceylan E. Pehldvan N. Weber G. 2011. "Particle Swarm Optimization Approach For Estimation Of Energy Demand Of Turkey", Global Conference On Power Control And Optimization, Dubai, UAE.
- [17] Toksar M. 2007. "Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey", Energy Policy, Vol. 35, pp. 3984–3990.
- [18] Unler, A. 2008. "Improvement Of Energy Demand Forecasts Using Swarm Intelligence: The Case Of Turkey With Projections To 2025". Energy Policy, Vol. 36, pp. 1937-1944.
- [19] Woogeema Z. Williame R. 2009. "Energy Demand Estimation Of South Korea Using Artificial Neural Network", Energy Policy, Vol. 37, pp. 4049–4054.
- [20] World bank database(<http://data.worldbank.org>).