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

حسین صادقی[۱]، مهدی ذوالفقاری[۲]، حسین سهرابی[*۳]، یونس سلمانی[۳]

**تاریخ دریافت مقاله:**
۱۳۹۱/۰۱/۱۳
**تاریخ پذیرش مقاله:**
۱۳۹۱/۰۴/۱۸

## 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 پیش بینی مصرف آتی آن می‌تواند به سیاست‌گذاران و فعالان در بازار انرژی در جهت تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و بهبود عملکرد بازار و تامین امنیت سوخت کشور کمک کند.

امروزه روش‌های نوینی برای مدل‌سازی و پیش بینی پدیده‌های مختلف ابداع گشته است که در میان این روش‌ها الگوریتم‌های تکاملی[۱] جایگاه ویژه ای دارند. در میان الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ژنتیک[۲] و الگوریتم بهینه‌یابی انبوه ذرات[۳] از جمله شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در علوم مختلف می‌باشند. از این رو، در این مطالعه برای تخمین و پیش بینی 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 سناریوهای مختلف، روند آتی تقاضای انرژی کشور تا سال ۱۴۰۴ پیش بینی شده است.

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

**کلمات کلیدی:**
تقاضا، انرژی، پیش بینی، الگوریتم انبوه ذرات، الگوریتم ژنتیک

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)
Sohrabivafa@gmail.com

1) Evolutionary Algorithm
2) Genetic Algorithm
3) Particle Swarm Optimization

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

**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 ازدیاد 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 بخش های مختلف اقتصاد گشته است تا جایی که تولیدات داخلی حامل‌های انرژی(سوخت تولید شده در داخل کشور) در مواردی جوابگوی مصرف داخلی نبوده و بخشی از منابع ارزی کشور صرف واردات سوخت می‌گردد[۳]. لذا هر گونه سیاست گذاری و تصمیم گیری در حوزه انرژی مستلزم بررسی روند تقاضای انرژی و عوامل موثر بر آن است. بنابراین، شناخت تقاضای انرژی کشور و پیش بینی روند آتی آن در کنار دیگر سیاست‌های حاکم بر تقاضای انرژی می‌تواند نقش موثری در فرایند تصمیم‌گیری‌های اقتصادی داشته باشد.

معمولا 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 [۱۶،۱۷و۱۸]. با توجه به این نکته که روند این متغیرها در طول زمان در نوسان است، مدل‌های غیر خطی می‌توانند تخمین دقیق‌تری از تابع تقاضای انرژی را حاصل کنند. از سویی، مشکلات روش‌های کلاسیک در پیدا کردن ضرائب بهینه مدل‌های غیر خطی جایگاه خاصی را به روش های الهام گرفته شده از طبیعت داده است. همچنین افزایش روزافزون سرعت محاسبات رایانه‌ای، طراحی بهینه پارامترها در مسایل گوناگون را از طریق شبیه سازی هوش جمعی[1]، امکان‌پذیر کرده است. امروزه روش‌های برنامه نویسی تکاملی[2] به روش های بهینه سازی در زمینه طراحی مدل‌های غیرخطی جایگاه خاصی داده است [۴] .

در میان روش‌های برنامه نویسی 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 پیش بینی 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 مسأله خاص (شبیه سازی و پیش بینی تقاضای انرژی) به قضاوت پرداخت. از طرفی، متغیرهای اثرگذار بر شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی روندی غیرخطی داشته و همواره در نوسان می باشند و از سوی دیگر، به دلیل اینکه شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی در

1) Swarm Intelligence
2) Evolutionary Computing

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

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 پیش بینی تقاضای انرژی یکی از مسائل مورد توجه محققین و سیاست گذارانِ درگیر با مسائل انرژی می‌باشد. از این رو، در این مطالعه به بررسی و مقایسهٔ کارایی الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برای تخمین و پیش بینی روند تقاضای انرژی کل کشور با استفاده از شاخص های کلان اقتصادی- اجتماعی در قالب الگوهای خطی و نمایی پرداخته شده است.

مطالعه حاضر در شش بخش تنظیم شده است؛ در بخش دوم مختصری 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 روش های مختلف پیش بینی 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 کاراترین الگو و روش پیش بینی 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:

قنبری، خضری و اعظمی(۱۳۸۷) در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک به شبیه‌سازی تقاضای انرژی بخش حمل‌ونقل 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 پیش بینی کرده‌اند.

صادقی و ذوالفقاری(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی تقاضای بنزین در بخش حمل‌ونقل از الگوریتم ژنتیک در قالب توابع خطی، نمایی و درجه دو استفاده کرده و تقاضای بنزین را تا سال ۱۴۰۴ پیش بینی 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 پیش بینی تقاضای انرژی تا سال ۱۳۹۶ پرداخته‌اند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

پاکسوی[1] و دیگران(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[2] (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[3] (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با عنوان سه مدل کاربردی تکنیک های جستجوی الگوریتم ژنتیک در تخمین تقاضای انرژی، به منظور برآورد تقاضای نفت با استفاده از روش بهینه یابی الگوریتم ژنتیک، با هدف تخمین ارزش آتی تقاضا برای نفت، به ارائه ی سه مدل غیر خطی تقاضا برای نفت در ترکیه پرداخته اند.

سیلان و اوزتورک[4](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[5](۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها[6] 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[7](۲۰۰۹) 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[8] تقاضای انرژی را تخمین و تحت چهار سناریو تقاضای آتی انرژی کره جنوبی را تا سال ۲۰۲۵ پیش بینی کرده‌اند.

هالدنبیلن و سیلان[9](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 حمل‌ونقل تا سال ۲۰۲۰ پرداخته‌اند.

کارابلوت و آلکان و ییلماز(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

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

## 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 سازوکارجستجوی انطباقی 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[1] و همکارانش ابداع و گسترش یافت. ایده محاسبات تکاملی[2] در دهه ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ[3] در کتابی با عنوان "استراتژی‌های تکامل" معرفی شد. تحقیقات بر روی الگوریتم ژنتیک دقیقا 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 راه‌حل یا چندین راه‌حل مختلف کار می‌کند.

الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه تصادفی آغاز می‌کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، سه عملگر متفاوت تکثیر[4]، جهش[5] و ادغام[6] 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

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

از آنجا که نمایش راه‌حل‌ها در الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه کروموزوم‌های طبیعی است و همچنین عملگرهای الگوریتم‌ژنتیک شبیه به عملگرهای ژنتیکی عمل می‌کنند، روند فوق را به نام الگوریتم ژنتیک نام‌گذاری کرده‌اند. در واقع، الگوریتم‌ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند. گام اول، گروهی از نقاط جستجو را که جمعیت[۱] نامیده می‌شود، بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌کند. در گام دوم، بر اساس وضعیت ارزیابی شده، برخی از نقاط به عنوان کاندیداهای حل مساله انتخاب می‌شوند. در گام سوم نیز عملگرهای ژنتیک[۲] روی این کاندیداها اعمال می‌شوند تا جمعیت نسل بعدی ساخته شوند. این فرآیند تا زمانی که معیارهای نهایی به دست آید، تکرار می‌شود. معیار نهایی زمانی است که نتیجه‌ای در حد قابل قبول به دست آید یا تعداد حداکثر نسل تکرار شود[۳].

### *الگوریتم انبوه ذرات*

الگوریتم انبوه ذرات یک الگوریتم تکاملی[۴] جهت بهینه‌سازی توابع غیرخطی است که بر مبنای رفتار اجتماعی پرندگان ارائه شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت[۵] مطرح شد که بر گرفته 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 می‌باشد و بقیه کلاغ‌ها با توجه به موقعیت خود و کلاغ‌های مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سر گروه را دارند. در این حین، چنانچه یکی از اعضا بتواند موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند، به عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. عملکرد الگوریتم انبوه ذرات نیز به این گونه است؛ به این صورت که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسأله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه، بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع، هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است[۱۱].

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

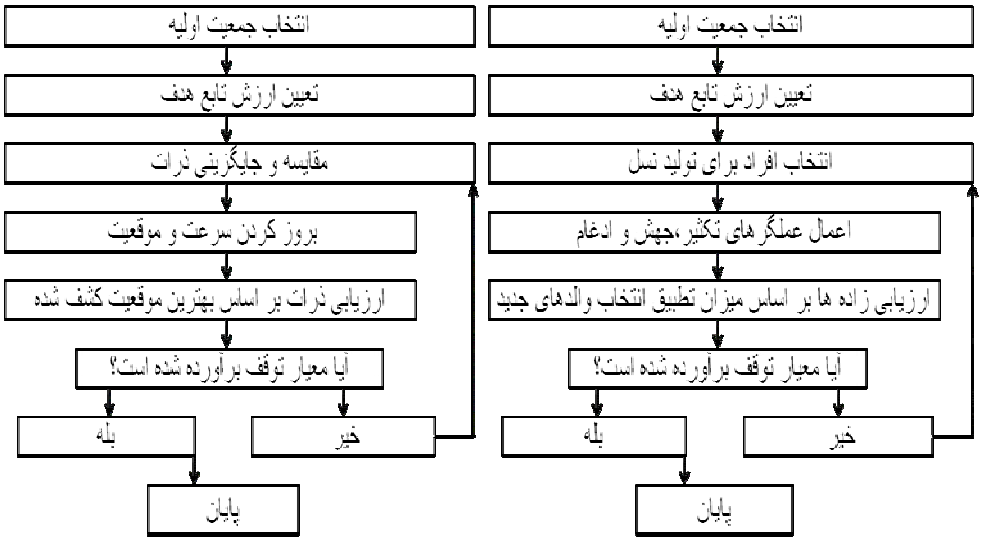
---

1) Population
2) Genetic Operation

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

4) Evolutionary process
5) Kennedy and Eberhart

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]




**شکل۱): الگوریتم انبوه ذرات** **شکل۲): الگوریتم ژنتیک**

### *تابع شایستگی (تابع هدف)*

برای بهینه‌یابی ضرایب الگو، پارامترها باید به نحوی تعیین شوند که مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر بسیار نزدیک به مقادیر واقعی باشد. برای این منظور فرض کنید $E_i^{observed}$ مقادیر واقعی تقاضای انرژی در طول دورهٔ i و $E_i^{simulated}$ مقادیر شبیه سازی شده توسط تابع تحت بررسی برای دورهٔ i باشد. در این صورت با تفاضل مقادیر واقعی از مقادیر شبیه سازی شده متناظر خود خطای شبیه سازی[1] (SE) به دست می‌آید، که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$SE = E_i^{observed} - E_i^{simulated} \quad (۱)$$

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

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(E_i^{observed} - E_i^{simulated}\right)^2 \quad (۲)$$

1) Simulation Error

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

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

**معرفی مدل**

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

$$E=f(X_1,X_2,X_3,X_4) \quad (۳)$$

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 می‌باشند که از داده های 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.

$$X_n =(X_R-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \quad (۴)$$

در تابع فوق $X_R$،$X_n$،$X_{max}$و$X_{min}$ به ترتیب نشان‌دهنده 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.

**جدول۱): مقادیر حداکثر و حداقل مشاهده مربوط به متغیرهای مورد بررسی**

| نوع متغیر | مقدار حداقل متغیر | مقدار حداکثر متغیر |
|---|---|---|
| مصرف انرژی | ۱۸۴/۷۵۹۲ | ۹۷۹/۴۲۸۷ |
| تولید ناخالص داخلی | ۱۷۲۸۰۱ | ۴۴۷۹۶۱ |
| جمعیت | ۳۷۲۳۷۳۰۶ | 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.

$$E_{Lin} = W_1 + W_2X_1 + W_3X_2 + W_4X_3 + W_5X_4 \quad (۵)$$

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

$$E_{Exp} = W_1+W_2X_1^{W_3}+W_4X_2^{W_5}+W_6X_3^{W_7}+W_8X_4^{W_9} \quad (۶)$$

***برآورد مدل***

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

**جدول۲): پارامترهای الگوریتم ژنتیک**

| تعداد جمعیت | تابع ایجاد جمعیت | تابع انتخاب جمعیت | تابع ادغام | تابع جهش | حداکثرتکرار |
|---|---|---|---|---|---|
| ۴۶ | uniform | Stochastic uniform | Scattered | Adaptive feasible | ۱۰۰بار |

**جدول۳): پارامترهای الگوریتم انبوه ذرات**

| تعداد جمعیت | پارامترشناخت فردی | پارامتر شناخت اجتماعی | ضریب اینترسی | حداکثر تکرار |
|---|---|---|---|---|
| ۴۶ | ۱/۳ | ۲/۷ | ۰/۶۶ | ۱۰۰بار |

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؛

$$E_{Lin}^{GA} = -۰/۰۳۴۵+۰/۲۷۴۳X_1 +۰/۶۶۵۶X_2 +۰/۰۴۳۸X_3+۰/۰۰۱۶X_4 \quad (۱۱)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک؛

$$E_{Exp}^{GA} = -۰/۰۱۲۹+۰/۱۴۹۲X_1^{۰/۷۲۹۷}+۰/۷۶۳۲X_2^{۱/۲۵۵۱}+۰/۰۹۲۷X_3^{۱/۱۱۷۹}-۰/۰۲۹۴X_4^{۰/۹۶۸۱} \quad (۱۲)$$

معادله خطی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات؛

$$E_{Lin}^{PSO} = -۰/۰۳۴۵+۰/۲۷۴۱X_1 +۰/۶۶۵۶X_2 +۰/۰۴۳۹X_3+۰/۰۰۱۶X_4 \quad (۱۳)$$

معادله نمایی برآورد شده با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات؛

$$E_{Exp}^{PSO} = -۰/۰۰۵+۰/۱۲۱۸X_1^{۰/۷۲۶۸}+۰/۷۹۱۷X_2^{۱/۴۴۸۴}+۰/۰۶۱۸X_3^{۰/۷۳۸۶}-۰/۰۶۲۳X_4^{۱/۰۰۶۲} \quad (۱۴)$$

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

### ارزیابی الگوها 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 برآورد شده به مقادیر واقعی تبدیل می‌شوند و سپس با استفاده از مقادیر واقعی کارایی هر یک از الگوها در شبیه سازی روند تقاضای انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای تبدیل مقادیر نرمال برآورد شده به مقادیر واقعی از تابع(۱۵) استفاده شده است.

$$X = X_n *(X_{max}-X_{min}) +X_{min} \qquad (۱۵)$$

برای ارزیابی کارایی شبیه‌سازی معمولا از معیارهای خطای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در این مطالعه از معیار میانگین مجذور خطا[1] و میانگین قدرمطلق درصد خطا[2] به عنوان معیار ارزیابی کارایی شبیه‌سازی استفاده شده است. جدول(۴) نتایج ارزیابی کارایی هر یک از الگوهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

**جدول ٤): نتایج ارزیابی کارایی الگوهای تحت بررسی**

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

*منبع: یافته‌های محقق*

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

---

1) Mean Squared Error $\mathbf{MSE} = \frac{\sum_{T+1}^{T+m}(Y_t^s - Y_t)^2}{m}$

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

در توابع فوق $Y_t$ و $Y_t^s$ به ترتیب نشان دهنده مقادیر واقعی و مقادیر شبیه سازی شده می باشند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر، سهولت دستیابی هر دو الگوریتم به نقاط بهینه 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 برآورد تابع غیرخطی (الگوی نمایی) الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتم انبوه ذرات به دلیل همگرایی کندتر در حداکثر 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، تخمین و شبیه سازی روند مصرف و همچنین پیش بینی روند آتی آن، اهمیت فراوانی در سیاست گذاری‌های اقتصادی و انرژی دارد. بنابراین، بکارگیری روش هایی که بتواند با دقت بالایی اهداف فوق را برآورد نماید، مورد علاقه سیاست‌گذاران و محققینی است که درگیر با مسائل تامین انرژی می باشند. لذا در این مطالعه پس از شبیه‌سازی روند تقاضای انرژی کشور در قالب الگوهای خطی و نمایی با استفاده از الگوریتم های ژنتیک و انبوه ذرات، کارایی آنها در پیش‌بینی روند آتی تقاضای انرژی بررسی شده است تا کاراترین الگوی تقاضا انرژی کشور پیش بینی گردد. بدین منظور پس از ارزیابی کارایی الگوهای مختلف، روند آتی متغیرهای مستقل با استفاده از روش سناریو سازی پیش بینی شده و در نهایت بر اساس آن، تقاضا انرژی تا سال ۱۴۰۴ پیش بینی می گردد.

### *ارزیابی الگوها در پیش بینی*

به منظور ارزیابی الگوها در پیش‌بینی از معیار اختلاف مقادیر پیش بینی شده تقاضا و مقادیر تقاضای واقعی خارج از دامنه تخمین 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.

**جدول۵): نتایج ارزیابی کارایی پیش بینی الگوهای تحت بررسی**

| سال / روش پیش بینی | ۱۳۸۳ | ۱۳۸٤ | ۱۳۸۵ | ۱۳۸٦ | معیار ارزیابی | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مقادیر واقعی | ۷۷۶/۴۱ | ۸۴۰/۰۹ | ۹۱۴/۷۴ | ۹۷۹/۴۳ | MSE | MAPE |
| پیش بینی الگوی $E_{Lin}^{ga}$ | ۷۹۷/۰۷ | ۸۴۲/۱۳ | ۸۸۶/۸۱ | ۹۳۹/۶۹ | ۶۹۷/۵۵ | ۰/۰۲۳۰۶۶ |
| خطای برآورد | -۲۰/۶۶۱ | -۲/۰۳۷۵ | ۲۷/۹۲۹ | ۳۹/۷۳۸ | | |
| پیش بینی الگوی $E_{Exp}^{ga}$ | ۷۹۵/۲۶ | ۸۴۹/۳۷ | ۹۰۲/۵۶ | ۹۶۷/۴ | ۱۸۳/۵۷ | ۰/۰۱۳۴ |
| خطای برآورد | -۱۸/۸۴۱ | -۹/۲۸۳۷ | ۱۲/۱۸۶ | ۱۲/۰۲۴ | | |
| پیش بینی الگوی $E_{Lin}^{pso}$ | ۷۹۷/۰۷ | ۸۴۲/۱۳ | ۸۸۶/۸۲ | ۹۳۹/۶۹ | ۶۹۷/۴۲ | ۰/۰۲۳۰۶۱ |
| خطای برآورد | -۲۰/۶۵۴ | -۲/۰۳۵۵ | ۲۷/۹۲۶ | ۳۹/۷۳۸ | | |
| پیش بینی الگوی $E_{Exo}^{pso}$ | ۷۸۸/۸ | ۸۴۷/۸۵ | ۹۰۵/۲۴ | ۹۷۷/۴۵ | ۷۶/۹۸ | ۰/۰۰۸۱ |
| خطای برآورد | -۱۲/۳۹ | -۷/۷۵۵۴ | ۹/۵۰۵۱ | ۱/۷۹۸۶ | | |

*منبع: یافته‌های محقق*

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

نتایج بدست آمده نشان‌دهنده قدرت بالای پیش‌بینی الگوی نمایی با کمترین میزان میانگین قدرمطلق درصد خطا در هر دو حالت استفاده از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات بوده و از میان حالت‌های فوق الگوی نمایی برآورد 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 نماییِ 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 پیش بینی کرد. روش سناریو سازی یکی از روش‌های کیفیِ آینده‌نگری است که بر طبق آن به ترسیم و تصور آینده با طراحی سناریوهای فرضی می پردازیم. سناریوها تصویر روشنی از آینده‌اند که برنامه‌ریزی به کمک آنها می تواند 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 نمی توان آینده را به طور دقیق پیش بینی 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. چنان که با بهره برداری روش تأثیرات متقابل و بکارگیری این سناریو، به خوبی می توان به استقبال آینده رفت[۱]. از این رو، در این مطالعه به منظور پیش بینی 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 ٦): سناریوسازی رشد متغیرهای توضیحی (درصد ) در افق سند چشم انداز ١٤٠٤**

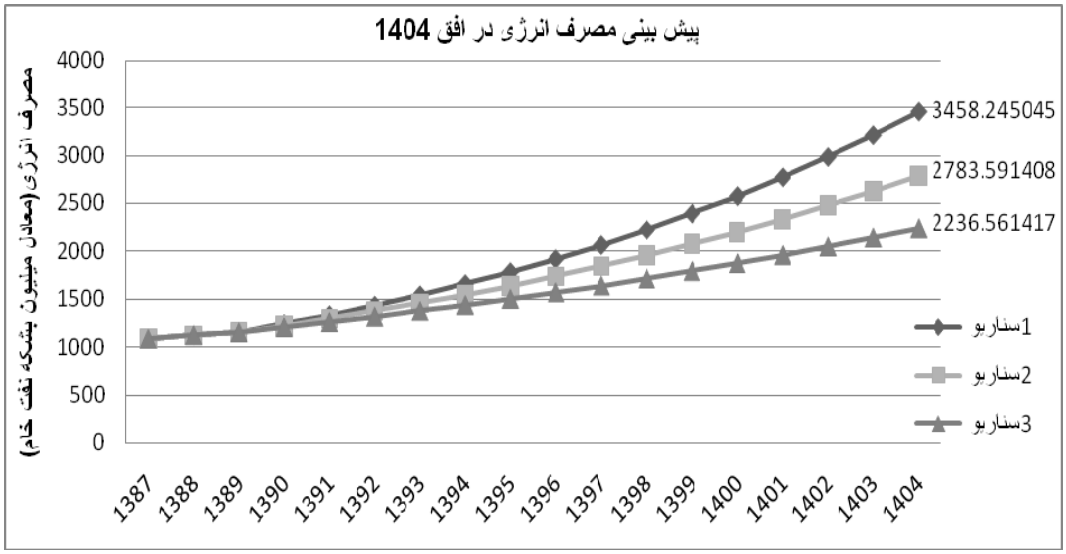
| سناریو | جمعیت | تولید ناخالص داخلی | صادرات کالا وخدمات | واردات کالا وخدمات |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱/۵ | ۵ | ۵ | ۶ |
| ۲ | ۱/۲۵ | ۴ | ۴ | ۵ |
| ۳ | ۱ | ۳ | ۳ | ۴ |

### *پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی*

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

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

با در نظر گرفتن بحران اقتصادی اخیر و همچنین تشدید تحریم‌ها علیه ایران، سناریوی سوم یک حالت بدبینانه 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 جمعیتیِ موفق جهت جلوگیری از کاهش نرخ رشد جمعیت، برآوردی بیش از دو سناریوی دیگر را نشان داده و مصرف انرژی کشور را در افق ۱۴۰۴ برابر با ۳۴۵۸ میلیون بشکه معادل نفت خام پیش بینی می کند. سناریوی دوم نشان دهنده یک حالت بینابینِ دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه است. این سناریو با در نظر گرفتن توفیق نسبی در اهداف سند چشم انداز یک رویکرد نسبتا متوسط را در قبال رشد متغیرهای مستقلِ 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 پیش بینی تقاضای آتی انرژی کشور بر اساس سناریوهای مذکور در نمودار ۱ ارائه شده است.




منبع: یافته‌های محقق

**نمودار ۱): پیش بینی 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

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

راستا، اطلاع از روند آتی تقاضای انرژی و پیش بینی 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، روش های 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 پیش بینی قرار گرفته است.

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

۱-کارایی الگوهای خطی برآورد شده به وسیله هر دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک تقریبا یکسان است. دلیل این امر سهولت دستیابی به پاسخ های بهینه توسط هر دو الگوریتم مورد استفاده در مقاله بوده است.

۲-الگوی نمایی برآورد شده در مقایسه با الگوی خطی در هر دو الگوریتم انبوه‌ذرات 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- مدل‌نمایی برآورد شده توسط الگوریتم انبوه‌ذرات در مقایسه با مدل نمایی برآورد شده توسط الگوریتم ژنتیک کارایی بیشتری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی دارد. دلیل این امر همگرایی سریعتر الگوریتم انبوه ذرات در دستیابی به پاسخ‌های بهینه بوده است.

شایان ذکر است که پیش‌بینی تقاضای آتی انرژی با استفاده از الگوی نمایی برآورد شده توسط الگوریتم انبوه ذرات به عنوان الگوی برتر بر اساس ۳ سناریوی بدبینانه، بینابین و خوشبینانه برای متغیرهای مستقل نشان داد که تقاضای انرژی در ایران در سال ۱۴۰۴ در حالت بدبینانه، بینابین و خوشبینانه به ترتیب برابر با ۲۲۳۶، ۲۷۸۳ 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.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

## منابع


[۱] بانک اطلاعات سری های زمانی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (http://tsd.cbi.ir)

[۲] بزرگی، محمدرضا. (۱۳۸۸)، روش‌های پژوهش در حوزهٔ آینده‌اندیشی، مجلهٔ کتاب ماه علوم اجتماعی،۱۴،صص۱۴-۱۹.

[۳] صادقی، حسین. ذوالفقاری، مهدی. (۱۳۸۸)، تخمین تابع تقاضای بنزین در بخش حمل و نقل با استفاده از الگوریتم ژنتیک،فصل نامه مطالعات انرژی،شماره۲۱،صص ۱تا۲۷.

[۴] فرج زاده ده کردی، حسن. (۱۳۸۶)، کاربرد الگوریتم ژنتیک در مدل بندی پیش بینی 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 ونقل زمینی ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک، فصلنامه اقتصاد مقداری،شماره ۴، صص ۱۵۷تا۱۷۷.

[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 ۱۵۹تا۱۴۱.

[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.


[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]

[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).

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07 ]