

PSC2009

24th International Power System Conference

09-F-LEM-0147



بیست و چهارمین
کنفرانس بین‌المللی برق

مدیریت و اصلاح الگوی مصرف بار روزانه یک مصرف‌کننده بزرگ در محیط بازار برق به کمک روش‌های هوشمند

سید مجتبی روحانی*
استادیار گروه برق
m.rouhani@ieee.org

حبیب رجیب مشهدی*
دانشیار گروه برق
h_mashhadi@um.ac.ir

سید مهدی ضابطیان حسینی*
دانشجوی کارشناسی ارشد برق
mahdi.zabetian@gmail.com

* دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
** دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

واژه‌های کلیدی: مدیریت بار، مدیریت سمت تقاضا، پیش‌بینی بار،
پیش‌بینی قیمت، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک

چکیده

امروزه برق به عنوان کالای بدون جایگزین در سید کالای مردم جای دارد، به عبارت دقیق‌تر حساسیت میزان مصرف آن نسبت به نوسانات قیمت برق نسبتاً ناچیز است. اما به‌رحال تغییرات قیمت برای برخی مصرف‌کنندگان بزرگ که امکان حضور مستقیم در بازار برق را دارند، قابل توجه است. از این‌رو برای آن‌ها این امکان وجود دارد که بتوانند با پیش‌بینی قیمت برق به کمک روش‌های هوشمند، واکنش مناسب را در مقابل قیمت نشان داده و الگوی مصرف خود را بهینه نمایند. در این مقاله به کمک شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، به تنظیم بهینه رفتار یک مصرف‌کننده بزرگ در بازار برق با توجه به تغییرات قیمت پرداخته شده است.

پیاده‌سازی هدف در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول مصرف‌کننده به کمک شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی قیمت روز بعد می‌پردازد. در مرحله بعد بر پایه قیمت‌های بدست آمده، الگوریتم ژنتیک از طریق جابجایی بارهای مدیریت‌پذیر در جهت کاهش میزان پیک‌بار و هزینه انرژی مصرفی تلاش می‌کند. بررسی نتایج روی یک مثال مورد مطالعه نشان می‌دهد که روش فوق به‌صورت قابل انعطافی قادر است ضمن رعایت محدودیت‌های فنی، ضریب‌بار منحنی مصرف روزانه را تا حد امکان افزایش دهد.



مدیریت و اصلاح الگوی مصرف بار روزانه یک مصرف کننده بزرگ در محیط بازار برق به کمک روش های هوشمند

سید مجتبی روحانی*
استادیار گروه برق
m.rouhani@ieee.org

حبیب رجبی مشهدی*
دانشیار گروه برق
h_mashhadi@um.ac.ir

سید مهدی ضابطیان حسینی*
دانشجوی کارشناسی ارشد برق
mahdi.zabetian@gmail.com

* دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
** دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

واژه های کلیدی: مدیریت بار، مدیریت سمت تقاضا، پیش بینی بار، پیش بینی قیمت، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک

چکیده

پیاده سازی هدف در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول مصرف کننده به کمک شبکه عصبی مصنوعی به پیش بینی قیمت روز بعد می پردازد. در مرحله بعد بر پایه قیمت های بدست آمده، الگوریتم ژنتیک از طریق جایجایی بارهای مدیریت پذیر در جهت کاهش میزان پیک بار و هزینه انرژی مصرفی تلاش می کند. بررسی نتایج روی یک مثال مورد مطالعه نشان می دهد که روش فوق به صورت قابل انعطافی قادر است ضمن رعایت محدودیت های فنی، ضریب بار منحنی مصرف روزانه را تا حد امکان افزایش دهد.

مقدمه

محدودیت منابع تولید انرژی و رشد فزاینده تقاضای انرژی الکتریکی به عنوان یک چالش اساسی برای کشورهای در حال

امروزه برق به عنوان کالای بدون جایگزین در سبد کالای مردم جای دارد، به عبارت دقیق تر حساسیت میزان مصرف آن نسبت به نوسانات قیمت برق نسبتا ناچیز است. اما بهر حال تغییرات قیمت برای برخی مصرف کنندگان بزرگ که امکان حضور مستقیم در بازار برق را دارند قابل توجه است. از اینرو برای آن ها این امکان وجود دارد که بتوانند با پیش بینی قیمت برق به کمک روش های هوشمند، واکنش مناسب را در مقابل قیمت نشان داده و الگوی مصرف خود را بهینه نمایند. در این مقاله به کمک شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، به تنظیم بهینه رفتار یک مصرف کننده بزرگ در بازار برق با توجه به تغییرات قیمت پرداخته شده است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- کیفیت بهتر منابع از نظر دامنه ولتاژ و کاهش قطع بدون برنامه برق،
- آزادکردن سرمایه‌های صنعت برق به منظور افزایش کارایی و بهبود کیفی امکانات موجود در جهت افزایش رفاه مصرف‌کنندگان،
- کیفیت بهتر منابع از نظر دامنه ولتاژ و کاهش قطع بدون برنامه برق،
- افزایش بهره‌وری انرژی از طریق تجهیزات سمت تولید و مصرف‌کننده نهائی.

همواره باید در نظر داشت که با اتخاذ سیاست‌های مدیریت- مصرف نه تنها میزان تولید صنایع، مطلوبیت و سطح رفاه زندگی کاهش نمی‌یابد، بلکه هدف حفظ و یا حتی افزایش آن‌ها با مصرف انرژی کمتر می‌باشد [۳].

اقدامات متنوع و زیادی در زمینه مدیریت مصرف در کشورهای مختلف طی دهه‌های گذشته صورت گرفته است. از جمله مقالاتی که اخیراً در این زمینه مطرح شده‌اند می‌توان به مرجع [۴] نگاهی داشت که در آن مزایای مدیریت بار برای مصرف‌کنندگان صنعتی بیان شده است، که از آن جمله می‌توان به کاهش پیک تقاضا، کاهش تلفات، افزایش بهره‌وری از تجهیزات در ضریب بار بالاتر که نتیجه اعمال تعرفه‌های زمانی استفاده هستند و کاهش هزینه‌ها اشاره داشت.

استفاده از روش‌های هوشمند در زمینه اقدامات مدیریت- مصرف نتایج بسیار خوبی به دنبال داشته است. از جمله این روش‌ها، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک (GA) و یا ترکیب هر دو روش می‌باشد. مرجع [۵] جهت پیش‌بینی زمان و میزان پیک تقاضا از شبکه عصبی استفاده شده است، ساختار و پارامترهای شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه گردیده‌اند. مرجع [۶] جهت دستیابی به سناریوهای مختلف مدیریت مصرف، مانند کاهش همزمان هزینه دیماندا و افزایش ظرفیت تولید، به کمک شبکه عصبی به همراه الگوریتم ژنتیک به برنامه‌ریزی منابع تولید و مدیریت تطبیقی بار پرداخته است. مرجع [۷] با هدف پیک‌سایی، جابجایی بار پیک و کاهش هزینه مصرف‌کننده

توسعه مطرح است. تحت چنین شرایطی استفاده بهینه از منابع موجود انرژی، بسیار حائز اهمیت است. مفهوم مدیریت سمت تقاضا^۱ (DSM) در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم- های قدرت از جمله رویکردهایی است که در راستای این بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است و هدف اصلی آن دستیابی به تعادلی جدید است که منافع تولیدکننده و مصرف- کننده را بطور همزمان تامین می‌نماید [۱].

مدیریت مصرف برق شامل برنامه‌ریزی، اجرا و نظارت بر آن دسته از فعالیت‌های مرتبط با صنعت برق می‌شود که بر مصرف برق تاثیر می‌گذارد و سبب بوجود آمدن تغییرات مطلوب در شکل بار، الگوی زمانی مصرف و میزان انرژی مصرفی می‌گردد [۲]. به عبارتی دیگر مدیریت مصرف مجموعه‌ای از فعالیت‌های به هم پیوسته است که بر پایه تعامل صنعت برق و مشترکین آن به منظور تعدیل بار مصرفی مشترکین صورت می‌گیرد.

عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های مصرف‌کنندگان، شرایط بازار، ویژگی‌های تولیدکنندگان برق و ساختار قانونی هر جامعه باعث برداشت‌های متفاوت از مفهوم مدیریت مصرف برق می‌گردد. لکن همواره تاکید مدیریت مصرف بر مشترک برق و بهبود شکل منحنی مصرف آن بوده است، به عبارتی دیگر اصلاح و بهینه‌سازی الگوی مصرف برق مشترکین از اهداف مدیریت مصرف می‌باشد [۲]. در این راستا منافع نیز عاید صنعت برق می‌گردد که موارد عمده آن به صورت زیر است؛

- کاهش میزان پیک مصرف که موجب می‌شود از منابع برق موجود نهایت استفاده صورت پذیرد و با جلوگیری از رشد مصرف، ساخت نیروگاه‌های جدید برای پوشش پیک بار به تاخیر بیفتد،
- تخصیص بهینه منابع در بلندمدت با ایجاد توازن و تعادل بین عرضه و تقاضای برق،
- کاهش هزینه تولید به کمک بهبود ضریب بار (ایجاد شکل بار مسطح)

¹ Demand Side Management (DSM)

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

موفقیت این روش در مجموع به وجود اولویت‌بندی‌های مختلف در بهره‌برداری که به برنامه تولید صدمه‌ای وارد ننماید و جای کافی جهت کاهش بار تقاضا داشته باشد وابسته است. برای رسیدن به این امر روابط نزدیک بین بخش‌های مختلف صنعت نیاز می‌باشد.

۳-۲ - بریدن پیک و پرنمودن دره‌ها^۳

کاهش تقاضای پیک، هزینه دریافتی بابت تقاضای مصرف‌کننده را کاهش می‌دهد. بریدن پیک از طریق کنترل مستقیم تجهیزات و وسائلی که پیک را ایجاد نموده‌اند صورت می‌گیرد. این روش جهت کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری استفاده می‌شود. هدف اصلی از بریدن پیک نزدیک شدن تقاضا به تولید موجود می‌باشد، بطوریکه از هزینه‌های زیاد برای سرمایه‌گذاری در بخش تولید جلوگیری به عمل آید.

روش پرنمودن دره‌ها از طریق انتقال بار از دوره‌های با مصرف بالا به دوره‌های با مصرف پایین عمل می‌کند. در این روش، تجهیزات سمت تولیدکننده نظیر ژنراتورها، ترانسفورمرها، خطوط انتقال تا حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد از مقدار نامی خود به جای ۱۵ تا ۲۰ درصد در طول ساعات بارسیک، تحت بار قرار می‌گیرند. این امر منجر به بهره‌وری بالا و هزینه بهره‌برداری پایین‌تر به خاطر ارتقاء ضریب بار و یا بهره‌وری از انرژی سیستم می‌شود.

۴-۲ - روش تعرفه‌ای^۴

معمولا تولیدکننده برای استفاده از تجهیزات خود تحت ظرفیت نامی، قیمت برق را بصورت چندتعرفه و وابسته به زمان مصرف تعریف می‌کند. تولیدکننده تشویق‌هایی را برای مصرف‌کننده در طول دوره کم باری در نظر می‌گیرد (تعرفه‌ای تا حد نصف تعرفه معمول) و همچنین تنبیه‌هایی برای مصرف

مورد مطالعه، روش‌های مدیریت مصرف بار را از طریق تنظیم بارهای قابل قطع به کمک شبکه‌عصبی پیاده‌سازی نموده است. مرجع [۸] به کمک شبکه عصبی، به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری از طریق کاهش پیک تقاضا پرداخته است.

تکنیک‌های مدیریت سمت تقاضا

انتخاب روش‌های مناسب DSM مسئله مهمی برای هر دو طرف مصرف‌کننده و تولیدکننده انرژی الکتریکی می‌باشد در ادامه روش‌های DSM اعمال شده در بخش صنعتی ذکر شده است:

۱-۲ - کنترل مصرف‌کننده نهایی^۱

این روش به کنترل عملکرد وسائل نهایی متنوع جهت بهره‌وری از منابع موجود بدون تغییر در برنامه تولید می‌پردازد. کنترل مصرف‌کننده نهایی یکی از زمینه‌های فعال در بین روش‌های اعمالی DSM است که به دلیل عملکرد بعضی بارهای توده‌ای صنعتی به صورت ایجاد پیک‌ها و دره‌ها در منحنی بارشان مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به رشد فعالیت‌های صنعتی، معمولا بخش‌های مصرف صنعتی مصرف انرژی الکتریکی از حدود مجاز برای بعضی ساعات فراتر رفته و برای بعضی دیگر از ساعات روز بسیار کم می‌باشد. بنابراین برای اینگونه مصرف‌کنندگان صنعتی فضای لازم جهت مسطح نمودن منحنی بار موجود می‌باشد.

۲-۲ - روش اولویت‌بندی بار^۲

در اعمال این روش بارها به دو دسته بارهای قابل قطع و بارهای غیر قابل قطع تقسیم می‌شوند. بارهای غیرقابل قطع دارای تقدم بیشتری نسبت به بارهای قابل قطع هستند. معمولا در صنعت تقدم بارها با توجه به میزان اهمیت بارها در برنامه تولید توسط سرپرست و ناظر بخش مربوطه تعیین می‌شود.

^۳ Peak Clipping & Valley Filling

^۴ Differential Tariff

^۱ End Use Equipment Control

^۲ Load Priority Technique

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

۳-۱- پیش‌بینی قیمت برق

با آغاز تجدید ساختار در صنعت برق، قیمت برق مورد توجه تمام فعالیت‌ها در بازار برق قرار گرفته است. براساس نوع کاربرد، پیش‌بینی قیمت به صورت کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت قابل دسته‌بندی است. بحث پیش‌بینی قیمت مدت‌هاست در دیگر بازارهای کالا، همچون بازار بورس و بازار کالاهای کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است. برق نیز به صورت یک کالا مورد معامله قرار می‌گیرد. با این وجود، برق دارای ویژگی‌های خاصی در مقایسه با دیگر کالاها است. به‌عنوان مثال روشی اقتصادی برای ذخیره برق وجود ندارد و مراکز کنترل به دلیل تراکم انتقال ممکن است از مبادله آزادانه توان ممانعت به عمل آورند. بنابراین تغییرات قیمت برق می‌تواند بی‌ثباتی زیادی داشته باشد و به کارگیری از روش‌های رایج پیش‌بینی قیمت در دیگر بازارهای کالا، می‌تواند خطای بزرگی را در پیش‌بینی قیمت برق ایجاد کند [۹].

روش‌های مختلفی مانند سری‌های زمانی، شبیه‌سازی بازار و شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی قیمت برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از بین روش‌های بکار گرفته شده شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یک ابزار ساده و قوی برای پیش‌بینی در سیستم‌های عملی را مهیا می‌سازد. انتخاب ورودی‌های مناسب برای شبکه عصبی از مهمترین عواملی است که باید به منظور طراحی یک تخمین‌گر عصبی مناسب به آن توجه داشت.

مرجع [۱۰] پیش‌بینی قیمت ساعات پیک همراه با نوسانات شدید را توسط شبکه عصبی انجام داده است، بطوریکه در ابتدا بار ساعت پیک و در مرحله بعد قیمت ساعت پیک هر روز را پیش‌بینی نموده است و همبستگی بین بار پیک و قیمت برق را مورد مطالعه و بررسی قرار داده است. یک پیش‌بینی قیمت مناسب در محیط تجدید ساختار یافته باید بتواند عدم قطعیت‌های مربوطه را دنبال نماید. در کوتاه مدت، بعضی از عدم قطعیت‌های اساسی میزان بار، سطح تولید عرضه شده، وضعیت شبکه انتقال و تغییرات آب‌وهوایی هستند [۱۱]. مرجع [۱۱] به بررسی پیش‌بینی قیمت در کوتاه مدت

در طول پیک‌بار اعمال می‌نماید (تعرفه‌ای تا حدود ۲ برابر تعرفه معمول).

با اعمال چنین تعرفه‌هایی مصرف‌کننده از مصرف انرژی در ساعات پیک‌بار تولید کننده اجتناب می‌نماید و تلاش می‌کند در دوره‌های کم باری مصرف خود را افزایش دهد. جهت رسیدن به چنین منظوری مصرف‌کننده باید تغییراتی در برنامه عملکرد خود اعمال نماید.

روش پیشنهادی

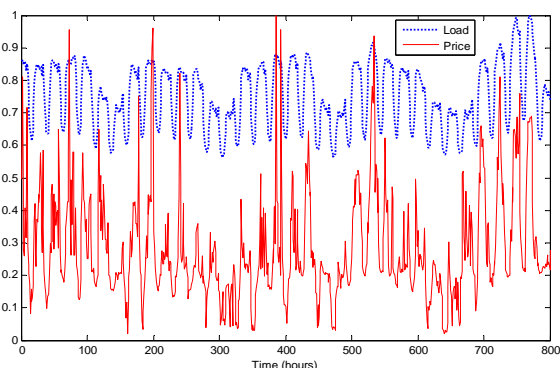
در مورد مصرف‌کنندگانی که قابلیت کنترل بارهای خود را داشته باشند این امکان وجود دارد که بتوانند در مقابل سیگنال قیمت که با آن روبرو می‌شوند واکنش مناسب نشان داده و الگوی مصرف خود را بهینه نمایند. این سیگنال قیمت برای مصرف‌کنندگان کوچک به صورت تعرفه‌ای است، که از طرف شرکت توزیع اعلام می‌شود. برای مصرف‌کنندگان بزرگی که امکان شرکت مستقیم در بازار برق را برای تهیه بارالکتريکی خود دارند، این سیگنال قیمت همان قیمت‌نهایی بازار است. گاهی مصرف‌کننده بزرگ اثرپذیری بیشتری از نوسانات ساعتی قیمت برق دارد. چنانچه توانایی پیش‌بینی قیمت برق را داشته باشد، می‌تواند با اولویت‌بندی مناسب بارهای خود به الگوی مصرف مناسبی برای کاهش اثر نوسانات دست یابد. در این روش پیشنهادی مصرف‌کننده بزرگ با توجه به داده‌های گذشته در زمینه بار و قیمت‌بازار به کمک شبکه عصبی به پیش‌بینی بار و سپس قیمت روز آینده پرداخته و در مرحله بعد به کمک نتایج پیش‌بینی بدست آمده برای قیمت برق در بازار روز آینده به مدیریت بارهای خود براساس اولویت‌بندی آن‌ها می‌پردازد. تنظیم الگوی بار بر پایه اهداف بهبود ضریب‌بار کاهش هزینه مصرف انرژی، کاهش پیک‌بار مصرف‌کننده که نتیجه آن کاهش هزینه دیماندا می‌شود، صورت گرفته است. در ادامه شرح دقیق اقدامات صورت گرفته در زمینه پیش‌بینی بار و قیمت روز آینده برق، مدیریت و بهینه‌سازی الگوی بار و پیاده‌سازی روی نمونه مورد مطالعه بیان شده است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

داده‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود که نوسانات بار و قیمت تا حد زیادی با یکدیگر ارتباط دارند. (اطلاعات بار و قیمت مربوط به بازار انتاریو در تابستان سال ۲۰۰۷ می‌باشد)

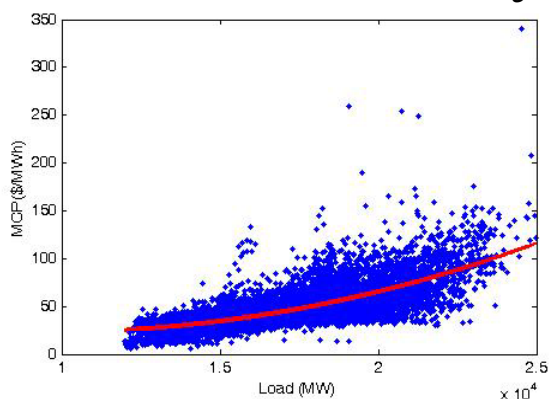
شکل ۲ بیانگر میزان ارتباط بین بار و قیمت برق در بازار برق انتاریو در سال ۲۰۰۷ می‌باشد. مدل ارتباط بین قیمت و بار را بصورت رابطه ۱ می‌توان بیان نمود.

$$P=(3.929E-7)*L^2-(7.6E-3)*L \quad (1)$$



شکل ۱- نمایش منحنی‌های بار و قیمت برق در سال ۲۰۰۷ بازار انتاریو و ارتباط نوسانات آن‌ها

در بخش اول پیش‌بینی، برای یافتن ورودی‌های مناسب جهت پیش‌بینی بار ساعتی روزآینده از تحلیل همبستگی روی داده‌های بار بار و بار قیمت استفاده شد. نتیجه به صورت شکل ۳ بدست آمد.



شکل ۲- ارتباط بین بار و قیمت در داده‌های سال ۲۰۰۷ انتاریو

ساختار شبکه عصبی و تعداد ورودی‌های لازم با توجه به حالتی که منجر به کمترین میزان خطا در خروجی شبکه عصبی شده است، تعیین گردید. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقادیر همبستگی بین داده‌های بار با یکدیگر بیشتر از مقادیر همبستگی داده‌های بار و قیمت است. بنابراین

پرداخته‌است همچنین فاکتورهای تاثیرگذار بر قیمت را معرفی کرده، در نهایت نتایج پیش‌بینی به کمک شبکه عصبی را با روش پیش‌بینی کلاسیک *ARIMA* مقایسه نموده است.

در مقایسه صورت گرفته در مرجع [۱۱] برتری پیش‌بینی به روش شبکه عصبی نسبت به *ARIMA* از نظر زمان پروسه پیش‌بینی و میزان خطای پیش‌بینی (صحت پیش‌بینی) نشان داده شده است. بنابراین در بخش اول روش پیشنهادی جهت پیش‌بینی قیمت روزآینده از روش شبکه عصبی استفاده گردید، بنابراین اطلاعات ورودی مورد نیاز برای بخش دوم با صحت بالاتری تامین می‌گردند.

با توجه به عملکرد مرجع [۱۰] که فقط روی پیش‌بینی بار بیک و قیمت بیک صورت گرفته بود، روش پیشنهادی با هدف پیش‌بینی بار و قیمت برای ۲۴ ساعت روزآینده و بطور مجزا صورت می‌گیرد. بطوریکه برخی از داده‌های ورودی شبکه‌های عصبی تخمین‌گر بار و تخمین‌گر قیمت برای ساعات طول روز از خروجی‌های قبلی خود آن شبکه‌ها گرفته شده است. به عبارت دیگر در این کار تحقیقاتی از شبکه‌های عصبی پویا و دینامیک در پیش‌بینی استفاده شده است.

۳-۲- پیش‌بینی بار و قیمت روز آینده

بار را می‌توان حاوی تمامی اطلاعات لازم دانست، زیرا اغلب پارامترها مانند دما، رطوبت، روزهای هفته و ... خود را در منحنی بار نشان می‌دهند و در نتیجه استفاده از داده‌های بار و قیمت ورودی‌های مناسب برای شبکه عصبی را در فرآیند پیش‌بینی بار روز آینده فراهم می‌آورد.

روش پیشنهادی برای مدیریت بار و تنظیم رفتار بهینه مصرف‌کننده بزرگ در بازار برق با توجه به تغییرات قیمت است. پیاده‌سازی هدف در دو مرحله انجام شده است، در مرحله اول توسط یک شبکه عصبی به کمک داده‌های گذشته پیش‌بینی بار ساعتی روزآینده صورت گرفته است. سپس شبکه عصبی دیگری قیمت روز آینده بازار برق را به کمک داده‌های پیشین و نتایج پیش‌بینی بار مرحله قبل پیش‌بینی می‌نماید. با توجه به نمودار نرمالیزه شده بار و قیمت برای محدوده‌ای از

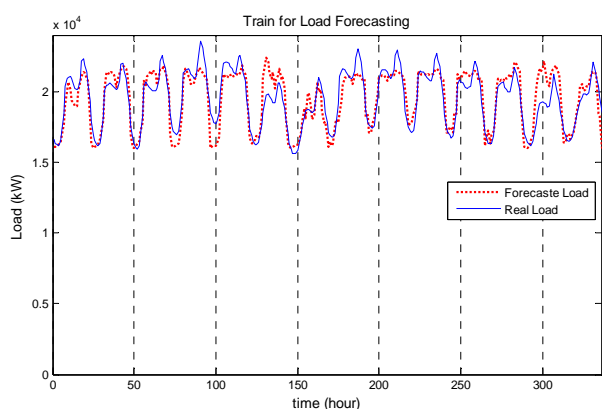
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقدار مطلق خطا و متوسط مقدار مطلق خطا نیز در روابط ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند:

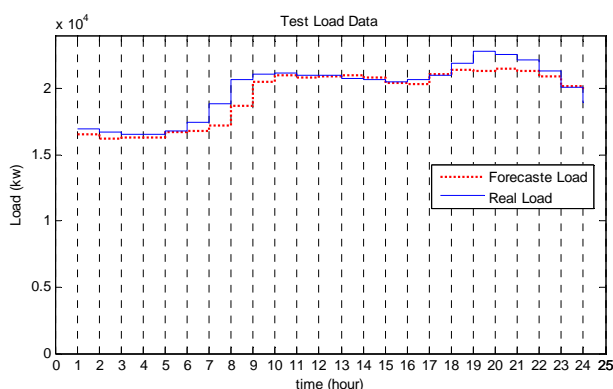
$$APE = |PE| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N APE_i \quad (4)$$

$X_{\text{forecasted}}$ = مقدار پیش‌بینی شده، X_{actual} = مقدار واقعی، N = تعداد داده‌ها
تست شبکه برای مدت یک روز (۲۴ ساعت) به صورت شکل ۵ اجرا گردید که دارای خطای تست MAPE ۲/۷۰٪ شد.



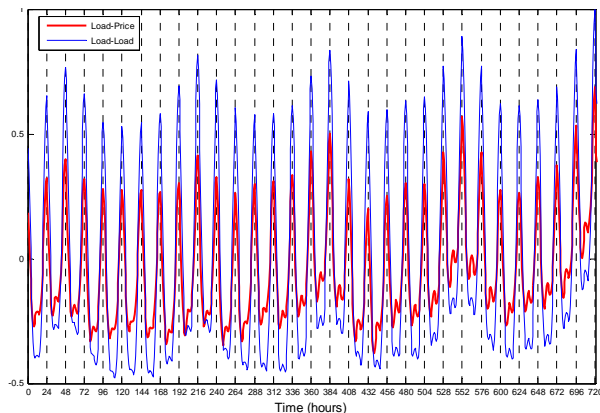
شکل ۴ - آموزش شبکه عصبی جهت پیش‌بینی بار



شکل ۵ - تست شبکه عصبی جهت پیش‌بینی بار با خطای ۲/۷۰٪

همچنین با تحلیل روی داده‌های قیمت و بار گذشته همبستگی بین داده‌های قیمت با یکدیگر و داده‌های قیمت و بار بصورت شکل ۶ بدست آمده است.

برای انتخاب ورودی‌های مناسب از میان داده‌های قیمت با همبستگی بیشتر از ۰/۴۵ و از میان داده‌های بار با همبستگی بیشتر از ۰/۷۰ استفاده شد.



شکل ۳ - نمایش همبستگی بین بار و بار قیمت

ورودی‌های مناسب برای پیش‌بینی بار به صورت زیر انتخاب گردیدند، که $L(t)$ و $P(t)$ مبین بار و قیمت در ساعت t می‌باشند.

$L(t-1), L(t-2), L(t-3), L(t-24), L(t-48), L(t-144), L(t-168), L(t-192), L(t-336), L(t-360), L(t-504), P(t-1), P(t-2), P(t-24), P(t-25), P(t-167), P(t-168), P(t-169), P(t-336),$

شبکه حاصل برای پیش‌بینی بار ساعتی روز آینده به صورت یک شبکه بازگشتی با دولایه مخفی با توابع فعالیت سیگموئیدی شامل ۱۹ ورودی فوق بود. آموزش مناسب‌ترین ساختار برای این شبکه برای مدت ۲ هفته (۳۶۶ ساعت) صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی، مقادیر پیش‌بینی شده را با مقادیر واقعی مقایسه می‌کنیم که برای این هدف چندین روش وجود دارد. متوسط درصد خطای مطلق^۱ (MAPE) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد تا مقدار پیش‌بینی شده را با مقدار واقعی مورد ارزیابی قرار دهد.

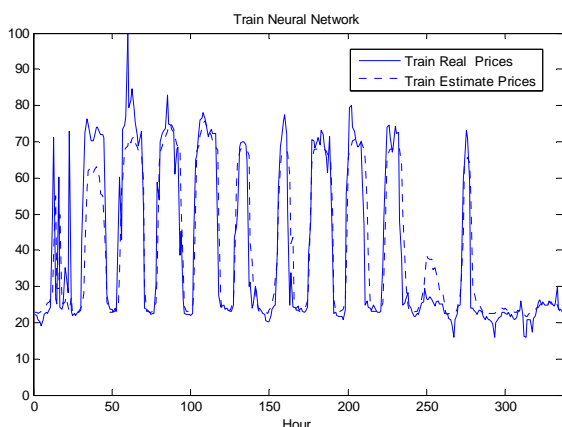
درصد خطا^۲ (PE) به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$PE = \frac{(X_{\text{forecasted}} - X_{\text{actual}})}{X_{\text{actual}}} * 100\% \quad (2)$$

¹ Mean Absolute Percent Error (MAPE)

² Percent Error (PE)

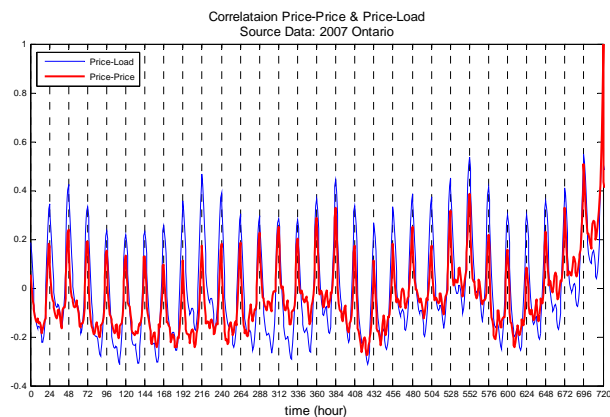
بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق



شکل ۷ - نمایش تعلیم شبکه عصبی جهت پیش بینی قیمت برق

شبکه حاصل برای پیش بینی قیمت ساعتی روز آینده دارای ۱۶ ورودی می باشد، در بین آن ها $L(t)$ همان پیش بینی بار ساعت بعد است که در مرحله قبل صورت گرفته و در این مرحله برای هر ساعت به عنوان یکی از ورودی ها اعمال می شود.

طرح کلی مرحله پیش بینی قیمت همراه با نمایش ورودی های لازم در شکل ۸ نشان داده شده است. خط چین ها نمایانگر ورودی های بار و قیمتی هستند که در طی فرآیند پیش بینی بدست می آیند و خطوط پیوسته، اطلاعات بار و قیمت گذشته سیستم می باشند. که در دوشبکه عصبی به منظور پیش بینی بار و قیمت به کار گرفته شده اند.

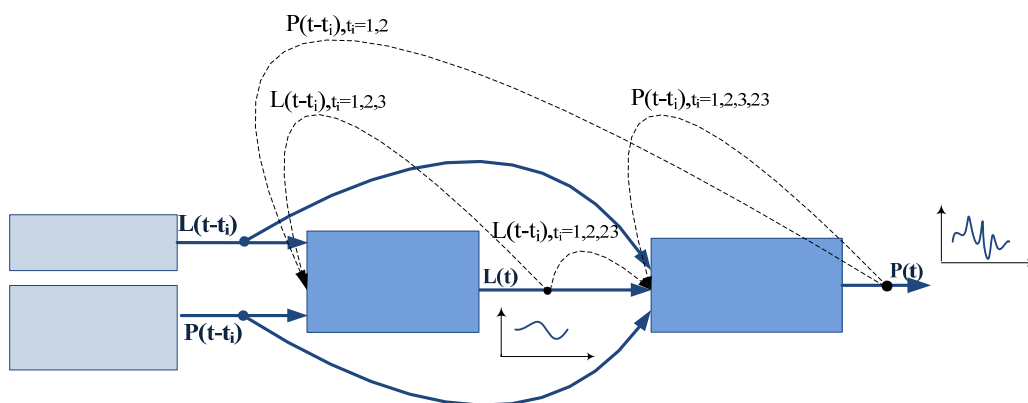


شکل ۶ - نمایش همبستگی بین قیمت-قیمت و قیمت-بار

چون هدف در اینجا پیش بینی کوتاه مدت به میزان ۲۴ ساعت می باشد مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی پیش بینی قیمت روز آینده با توجه به شکل ۶ به صورت زیر انتخاب شدند، که $L(t)$ و $P(t)$ میان بار و قیمت در ساعت t می باشند.

$P(t-1), P(t-2), P(t-3), P(t-23), P(t-24), P(t-25), P(t-168), P(t-336),$
 $L(t), L(t-1), L(t-2), L(t-23), L(t-24), L(t-25), L(t-168), L(t-336).$

مناسب ترین ساختار شبکه عصبی بازگشتی جهت پیش بینی قیمت، با دولایه مخفی و توابع فعالیت سیگموئیدی برای داده های دو هفته تحت تعلیم قرار گرفت، نتایج تعلیم در شکل ۷ نشان داده شده اند.



شکل ۸ - نمایش بخش های پیش بینی بار و قیمت

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۱- الگوی مصرف روزانه بارهای قابل قطع

شماره بار l	میزان بار L_l (kW)	زمان مصرف در طول ۲۴ ساعت t_l
۱	۱۱۰	۱۸
۲	۱۴۰	۱۰
۳	۱۵۰	۱۰
۴	۱۰۰	۱۰
۵	۱۵۰	۱۲
۶	۱۱۰	۱۱
۷	۱۵۰	۱۶
۸	۱۴۰	۱۱
۹	۱۳۰	۱۲
۱۰	۱۲۰	۹

در این مرحله به منظور بهینه‌سازی در تعیین ظرفیت پیک-تقاضا و مدیریت بارهای مصرف‌کننده و تنظیم برنامه عملکرد بهینه بارهای یک مصرف‌کننده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. بدین منظور هر کروموزوم را در ابعاد ۲۴×۱۰ (طول هر کروموزوم برابر با ۲۴ ساعت شبانه‌روز و تعداد سطر آن برابر با تعداد بارهای قابل قطع و جابجایی) در نظر گرفته شده است، هر بیت آن می‌تواند مقدار صفر یا یک را به خود اختصاص دهد که به ترتیب بیانگر عملکرد و یا عدم عملکرد آن بار در آن ساعت از شبانه‌روز خواهد بود. ساختار کروموزوم به صورت رابطه ۵ می‌باشد.

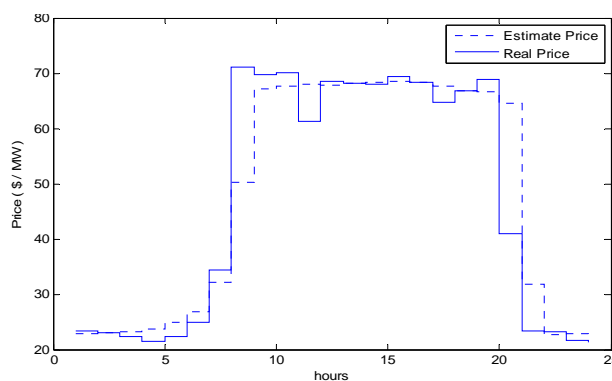
$$T = \begin{bmatrix} T_{1,1} & \cdot & \cdot & \cdot & T_{1,24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & T_{i,j} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{N,1} & \cdot & \cdot & \cdot & T_{N,24} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$N = \text{number of loads}, \quad (6)$$

$$T_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{If load } i \text{ is happen on hour } j \\ 0 & \text{Else} \end{cases}$$

مجموع عناصر هر سطر تعداد ساعت عملکرد بار آن سطر را نشان می‌دهد، که از جمله قیود مسئله بهینه‌سازی می‌باشد.

تست این شبکه برای مدت یک روز (۲۴ ساعت) مطابق شکل ۹ صورت گرفت که دارای خطای تست $MAPE$ ، ۸.۶۸% شد. در مقایسه با کار مشابهی که در مرجع [۱۱] بر روی پیش‌بینی داده‌های قیمت فصل تابستان سال ۲۰۰۲ بازار اسپانیا با خطای $MAPE$ $۱۱/۴۰\%$ صورت گرفته بود، میزان خطای روش پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

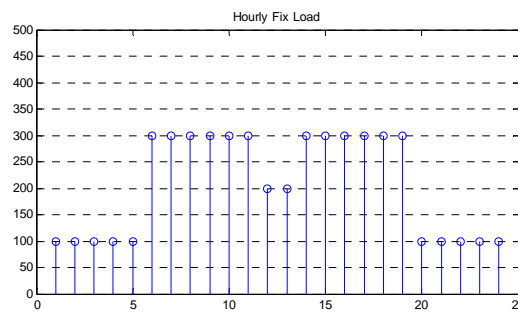


شکل ۹- نمایش تست شبکه عصبی جهت پیش‌بینی قیمت برق

۳-۳- بهینه‌سازی عملکرد واحدهای بار

در این قسمت مصرف‌کننده بزرگ مورد مطالعه کارخانه‌ای می‌باشد که دارای دو دسته بار است، یک دسته بارهای با اولویت بالا که دارای الگوی بار ساعتی ثابت هستند و قابلیت قطع و جابجایی ندارند. منحنی عملکرد روزانه بارهای با اولویت بالا در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

دسته دوم بارهایی که دارای اولویت پایین‌تر هستند و قابل قطع و جابجایی هستند. مشخصات بارهای دارای اولویت پایین‌تر در جدول ۱ بیان شده‌اند. بارهای دسته دوم دارای محدودیت ساعت عملکرد در طول روز مطابق با جدول ۱ می‌باشند.



شکل ۱۰- منحنی الگوی بار ثابت روزانه برای مصرف‌کننده نمونه

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

پرداختی به ازای پیک تقاضا. بنابراین تابع برازندگی ترکیبی از دو بخش هزینه دیماندا و هزینه انرژی به صورت رابطه ۹ تعریف شده است.

$$F = k_1 C_{Demand} + k_2 C_{Energy} \quad (9)$$

هزینه دیماندا در رابطه ۱۰ از حاصلضرب پیک تقاضا در هزینه دیماندا محاسبه می‌شود که برای نمونه مورد مطالعه استفاده شد ۶۰٪ در نظر گرفته شد.

$$C_{Demand} = P_D \times L_{Peak} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، L_{Peak} و P_D به ترتیب، پیک بار مصرف‌کننده و هزینه دیماندا به ازای هر کیلووات بار مصرفی است. هزینه انرژی مصرفی طبق رابطه ۱۱ از حاصلضرب کل بارهای مصرفی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در قیمت‌های متناظر ساعتی محاسبه می‌شود.

$$C_{Energy} = (L_{var} \times T + L_{cons}) \times [P_{10} + P_{24}] \quad (11)$$

در رابطه ۱۱ بارها به دو دسته تقسیم شده‌اند، L_{cons} که نشانگر الگوی بارهای ثابت و کنترل‌ناپذیر مطابق شکل ۹ و L_{var} که نشانگر میزان بارهای کنترل‌پذیر می‌باشد، عناصر ماتریس L_{var} مطابق با مقادیر بارها در جدول ۱ می‌باشند. ماتریس T نیز برنامه عملکرد بارهای کنترل‌پذیر در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌باشد، که عناصر آن به صورت باینری است و از خروجی الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود. $L_{var} \times T$ میزان بار کنترل‌پذیر در طول ۲۴ ساعت و L_{cons} میزان بار غیرقابل کنترل و ثابت در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز را نشان می‌دهند. ماتریس P قیمت پیش‌بینی شده روز آینده است که از شبکه عصبی بدست آمده است.

بررسی عددی مثال مورد مطالعه:

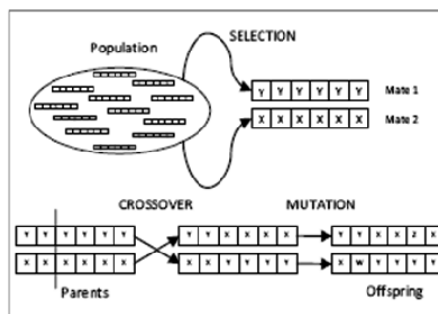
در این قسمت دو حالت برای مصرف‌کننده مورد مطالعه در نظر می‌گیریم و به بررسی نتایج آن‌ها می‌پردازیم. با توجه به متوسط انرژی مصرفی روزانه ۱۵۴۷۰ کیلووات برای بارهای کنترل‌پذیر و ۴۴۰۰ کیلووات برای بارهای

$$\sum_{j=1}^{24} T_{i,j} = t_i, \quad i = \text{load number} \quad (7)$$

از جمله قیود دیگر این مسئله محدودیت پیوستگی عملکرد برای بعضی از بارهای کنترل‌پذیر می‌باشد، این قید در رابطه ۸ نشان داده شده است.

$$T_{i_j}(t) = 1 \rightarrow T_{i_j}(t + k_i) = 1, \quad k_i = 1, 2, \dots, K_i \quad (8)$$

مقادیر K_i به عنوان حداقل زمان عملکرد بار i در صورت روشن شدن می‌باشد. این محدودیت در نمونه مورد مطالعه برای بارهای ۱ و ۲ هر یک به میزان ۲ ساعت در نظر گرفته شد.



شکل ۱۱- نمایشی از عملگرهای برش و جهش

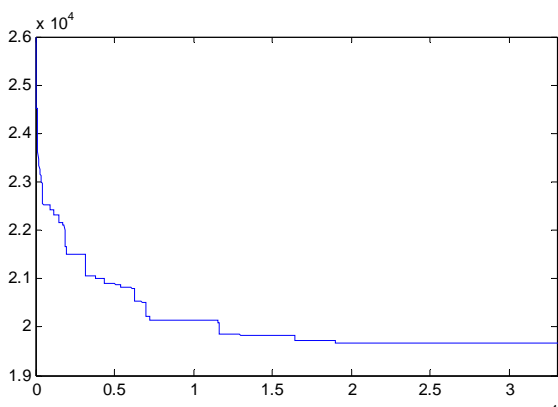
عملگر برش و جهش در طول هر سطر اجرا گردیده و قیود مسئله بعد از تولید هر نسل توسط یک زیر برنامه دیگر اعمال می‌شوند.

تابع برازندگی

از آنجا که هزینه تامین انرژی و ضریب بار منحنی مصرف حائز اهمیت می‌باشد پس از مشخص شدن برنامه عملکرد بارها و پیک تقاضا با استفاده از قیمت‌های بدست آمده از مرحله پیش‌بینی، برازندگی هر کروموزوم را می‌توان با استفاده از تابع برازندگی در نظر گرفته شده بدست آورد.

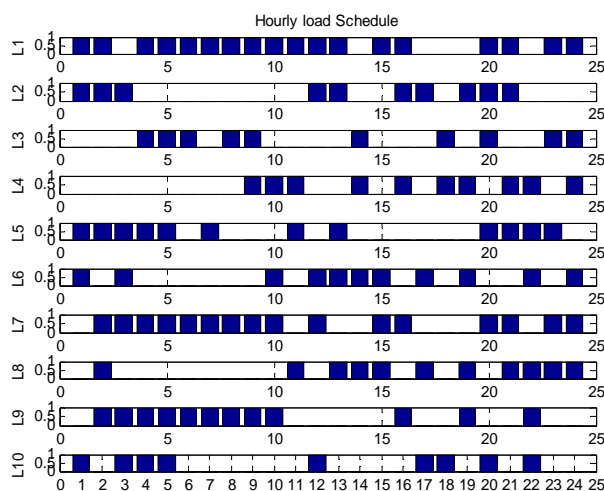
با توجه به معیارهای بیان شده به منظور تشکیل تابع برازندگی موارد زیر در نظر گرفته شده‌اند، حداقل کردن هزینه انرژی مصرفی و افزایش ضریب بار و در نتیجه کاهش هزینه دیماندا

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱۳ - روند کاهش تابع برازندگی کلی جهت رسیدن به برنامه بهینه عملکرد واحدها

برنامه عملکرد ساعتی بهینه بارهای کنترل‌پذیر به منظور تامین اهداف مسئله بهینه‌سازی؛ در شکل ۱۴ به‌طور مجزا برای تمامی بارهای کنترل‌پذیر نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - برنامه عملکرد ساعتی بارهای قابل قطع بعد از اجرای

DSM

در نهایت منحنی بار روزانه بهینه به صورت شکل ۱۵ بدست آمد. پیک بار در این منحنی به ۹۴۰ کیلووات رسید.

$$LF = \frac{18948/24}{940} * 100\% = 86\%$$

هزینه تامین انرژی در این حالت به صورت زیر گردید:

$$C_{Demand} = 940 * 0.60 = 564 \$$$

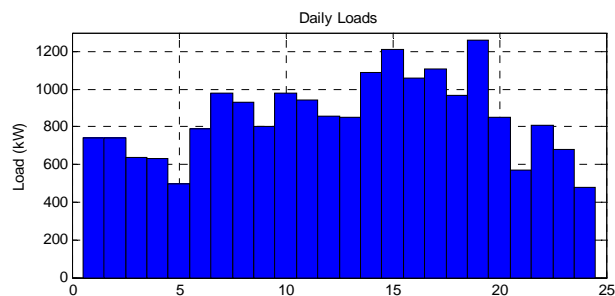
$$C_{Energy} = (L * T + L_{constant}) * price = 966.468 \$$$

$$C_T = C_{Demand} + C_{Energy} = 564 + 966.468$$

$$C_T = 1330.468 \$$$

غیرکنترل‌پذیر، کل متوسط انرژی مصرفی روزانه ۱۹۸۷۰ کیلووات می‌باشد.

حالت ۱: در ابتدا با در نظر گرفتن یک برنامه عملکرد اولیه برای بارهای کنترل‌پذیر این مصرف‌کننده، منحنی بار روزانه‌ای مطابق شکل ۱۲ بدست آمد.



شکل ۱۲ - منحنی بار ساعتی روزانه برای حالت قبل از اعمال DSM

در این حالت پیک بار مصرف‌کننده ۱۲۶۰ کیلووات حاصل شد. با توجه به تعریف ضریب بار به صورت رابطه ۱۲، ضریب بار مصرف‌کننده در این حالت ۶۵/۷٪ بدست آمد.

$$LF = \frac{14770/24}{1260} * 100\% = 65.7\% \quad (12)$$

هزینه تامین انرژی که مجموع هزینه دیماند و انرژی می‌باشد برای این حالت در ادامه محاسبه شده‌اند:

$$C_{Demand} = 1260 * 0.60 = 756 \$$$

$$C_{Energy} = (L * T + L_{constant}) * price = 1047.1 \$$$

$$C_T = C_{Demand} + C_{Energy} = 756 + 1047.1 = 1803.1 \$$$

حالت ۲: بعد از اجرای برنامه بهینه‌سازی عملکرد بارهای کنترل‌پذیر همانطور که در شکل ۱۳ روند کاهش میزان تابع برازندگی F دیده می‌شود که بعد از ۱۸۹۴۸ تکرار در مقدار ۱۹۶۶۰ ثابت می‌ماند.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۳- مقایسه نتایج حالت ۱ و ۲

ضریب بار	هزینه تامین انرژی (\$))	متوسط انرژی مصرفی ساعتی (KW)	پیک بار (kW)	حالت
۰/۶۵/۷	۱۸۰۳/۱	۸۲۷/۹۱	۱۲۶۰	حالت ۱
۰/۸۸	۱۵۳۰/۴۶۵	۸۲۷/۹۱	۹۴۰	حالت ۲

با توجه به تامین شدن تمامی انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده، مزایای این طرح را به صورت زیر می‌توان خلاصه نمود:
 ۱. کاهش پیک مصرف به میزان:

$$(1260 - 940) / 1260 * 100\% = 25.4\%$$

۲. کاهش هزینه تامین انرژی به میزان:

$$(1803.1 - 1530.465) / 1803.1 * 100\% = 15.1\%$$

۳. کاهش در ضریب بار به میزان

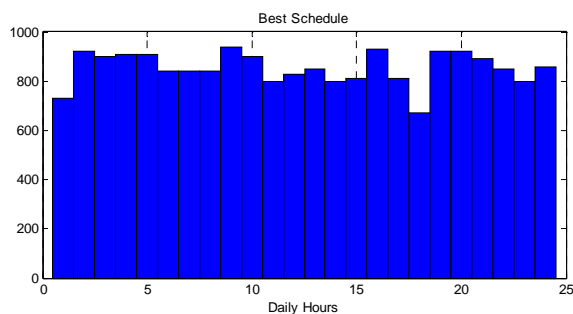
$$(88 - 69.7)\% = 22.8\%$$

نتیجه‌گیری:

مصرف‌کننده بزرگی که توانائی شرکت در بازار برق را دارد، می‌تواند به کمک پیش‌بینی قیمت روزآینده به تنظیم الگوی بار مصرفی خود که پاسخگوی نوسانات قیمت در بازار برق باشد، بپردازد. بطوریکه بدون هیچگونه تغییر در میزان انرژی مصرفی خود با برنامه‌ریزی بهینه عملکرد بارهای کنترل‌پذیر، هزینه انرژی مصرفی و پیک تقاضای خود را کاهش دهد.

در روش پیشنهاد شده این مقاله یک مرحله از شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش‌بینی بار روزآینده و در مرحله بعد از شبکه عصبی مصنوعی MLP دیگری برای پیش‌بینی قیمت روزآینده استفاده شد. تعلیم این شبکه‌ها به روش گرادینان کاهشی صورت گرفت. نتایج حاصل از پیش‌بینی بار روز آینده با خطای MAPE به میزان ۰/۲۷ و برای پیش‌بینی قیمت روز آینده با خطای MAPE به میزان ۰/۸۶۸ بدست آمدند.

با مقایسه میزان خطای پیش‌بینی قیمت در روش پیشنهادی نسبت به میزان خطای پیش‌بینی قیمت در مرجع [۱۱] (۰/۱۱/۴۰)، برتری روش پیشنهادی کاملاً مشهود است.



شکل ۱۵ - نمایش ستونی الگوی بار روزانه بهینه بعد از اجرای DSM

در نهایت نتایج بدست آمده در دو حالت فوق در جدول ۳ و ۲ بیان شده است.

جدول ۲- مقایسه بارهای ساعتی حالت‌های ۱ و ۲

ساعت	قبل از اعمال DSM	بعد از اعمال DSM
۱	۷۴۰	۷۳۰
۲	۷۴۰	۹۲۰
۳	۶۴۰	۹۰۰
۴	۶۳۰	۹۱۰
۵	۵۰۰	۹۱۰
۶	۷۹۰	۸۴۰
۷	۹۸۰	۸۴۰
۸	۹۳۰	۸۴۰
۹	۸۰۰	۹۴۰
۱۰	۹۸۰	۹۰۰
۱۱	۹۴۰	۸۰۰
۱۲	۸۶۰	۸۳۰
۱۳	۸۵۰	۸۵۰
۱۴	۱۰۹۰	۸۰۰
۱۵	۱۲۱۰	۸۱۰
۱۶	۱۰۶۰	۹۳۰
۱۷	۱۱۱۰	۸۱۰
۱۸	۹۷۰	۶۷۰
۱۹	۱۲۶۰	۹۲۰
۲۰	۸۵۰	۹۲۰
۲۱	۵۷۰	۸۹۰
۲۲	۸۱۰	۸۵۰
۲۳	۶۸۰	۸۰۰
۲۴	۴۸۰	۸۶۰

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [8] Babu, P.R.; Divya, V.P.S.; Srikanth, P.; Singh, B.D. "Neural network and DSM techniques applied to an industrial consumer a Case study.", *IEEE Compatibility in Power Electronics conferences*, pp. 1-4, 2007.
- [9] Shahidehpour, M.; Yamin, H. *Market Operation in Electric Power System*. N.Y.: A JOHN WILEY & SONS INC. 2006.
- [10] Ohta, Y.; Tani, Y. "Novel price prediction by using Neural Network under large volatility in electric power exchange.", *6th WSEAS International Conference on power systems*, Portugal, pp. 143-148, 2006.
- [11] Catalao, J.; Mariano, S.; "Short-Term Electricity Prices Forecasting in a Competitive Market: A Neural Network Approach.", *Electrical power system Research*, vol. 77, pp. 1297-1304, 2007.
- [۱۲] منہاج. محمدباقر، مبانی شبکه‌های عصبی، جلد اول، تهران ۱۳۸۱.

شناسایی بارهای مدیریت پذیر با توجه به میزان اهمیت و اولویت بندی آن‌ها برای مصرف‌کننده تعیین می‌شوند. اصلاح الگوی مصرف به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شد. با توجه به غیر خطی بودن و محدب بودن مسئله و محدودیت‌هایی که در حل وجود داشتند از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده شد.

مقایسه نتایج بدست‌آمده مزیت مدیریت مناسب بارهای کنترل پذیر را با استفاده از پیش‌بینی قیمت روزآینده، جهت کاهش در هزینه‌های تامین برق و تقاضای پیک مصرف‌کننده را به وضوح نشان می‌دهد. بطوریکه برای نمونه مورد مطالعه ۲۵/۴٪ کاهش در پیک تقاضا، ۱۵/۱٪ کاهش در هزینه کلی تامین انرژی و ۲۲/۳٪ افزایش ضریب بار مشهود است.

عملیاتی کردن این برنامه برای یک کارخانه واقعی به‌عنوان یک مصرف‌کننده بزرگ از اهداف آتی این تحقیق می‌باشد.

مراجع

- [1] Gellings, W; Chamberlin, J. H. *Demand Side Management Planning*. NY: The Farimont Press Inc. 1993.
- [2] Starbac, G. "Demand Side Management: Benefits and Challenges." *Energy policy journal*, vol. 36, pp. 4419-4426. 2008.
- [3] *Fundamental of Load Management*, IEEE Tutorial Course Text, 1988.
- [4] Ashok, S; Banerjee, R. "Load-management applications for the industrial sector." *Applied Energy*, vol. 66, pp. 105-111, 2000.
- [5] Chih-hsien Kung; Devaney, Michael J.; Chung-ming Huang; Chih-ming Kung. "An Adaptive Power System Load Forecasting Scheme Using A genetic Algorithm Embedded Neural Network" *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 1, pp. 308-311, 1998.
- [6] Kung, C. H; Devaney, M. J. "Power source scheduling and adaptive load managements via a genetic algorithm embedded neural network." *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 2, pp. 1061-1065, 2000.
- [7] Babu, P. R.; Divya, V. P. S.; Venkatesh K. "Application of ANN and DSM Techniques for peak load management a Case study.", *IEEE Sustainable Energy Technologies*, pp. 384-388, 2008.