

تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر منحنی مصرف برق روزانه کشور

حبیب‌اله اعلمی، غلامرضا یوسفی و محسن پارسامقدم

⁵(DG) وارد مدار شوند [3].

در این مقاله ابتدا در مورد روش‌های پاسخ‌گویی بار، به‌خصوص دو روش پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)⁶ و قیمت زمان استفاده (TOU)⁷ بحث شده است. سپس انواع واکنش مشتری (دیماند) به قیمت (الاستیسیته خودی و الاستیسیته متقابل) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله TOU و EDRD به‌صورت توأمان لحاظ و مدل‌سازی شده است. در بخش 3 مدل ریاضی پاسخ‌گویی بار و تابع سودمندی مشتری با توجه به "قیمت زمان استفاده" و با توجه به برنامه EDRP استخراج و در بخش 4 با مطالعه موردی منحنی مصرف بار روزانه کشور ایران، تأثیر اجرای برنامه‌های TOU و EDRP بر منحنی مصرف به‌صورت تفکیکی و توأمان توسط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده و نتایج مورد تحلیل و بحث قرار گرفته است.

2- برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)⁸ در طرح راهبردی با افق سال‌های 2004 تا 2009 بررسی DR و اجرای آن را به‌عنوان محور تحقیقاتی شماره سیزدهم خود ذکر کرد و وظیفه فوق را به‌عهده ایالات متحده آمریکا گذاشت [4].⁹ FERC طراحی و اجرای برنامه‌های DR را در سال 2005 ابلاغ و در گزارش سالانه منتشر شده در سال 2006 نتایج تحقیقات و اجرای برنامه‌های DR در سطح شرکت‌های برق منطقه‌ای و بازارهای آمریکا را به‌کنگه آن کشور ارائه نمود. در گزارش مزبور برنامه‌های DR به دو دسته عمده و چند زیرگروه به شرح ذیل تقسیم شده‌اند [5] و [6]:

- الف) برنامه‌های تشویقی¹⁰
- ب) برنامه‌های تعرفه زمانی¹¹
- برنامه‌های تشویقی، به شش دسته تقسیم می‌شوند:
 - الف-1) کنترل مستقیم بار¹² (DLC)
 - الف-2) قطع یا کاهش بار¹³ (I/C)
 - الف-3) بازفروش مقدار دیماند¹⁴ (DB)
 - الف-4) برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)
 - الف-5) برنامه‌های ظرفیت بازار¹⁵ (CAP)
 - الف-6) برنامه‌های خدمات جانبی¹⁶ (A/S)
- برنامه‌های تعرفه زمانی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

چکیده: استفاده از برنامه‌های مدیریت مصرف برق (DSM) یکی از بهترین روش‌های حفظ منافع مشترک جامعه، شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی است. در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، این روش‌ها تحت عنوان پاسخ‌گویی بار نامیده می‌شوند.

در این مقاله دو روش از روش‌های نه‌گانه پاسخ‌گویی بار، قیمت زمان استفاده (TOU) و پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)، بیان و مدل ریاضی آنها (مدل‌های تک‌پرویی، چندپرویی و نهایی) با توجه به ضرایب حساسیت دیماند-قیمت استخراج شده است. در پایان، مدل‌های یادشده با لحاظ سناریوهای مختلف بر روی منحنی بار روزانه کشور ایران مورد تست و ارزیابی قرار گرفته و منحنی‌های مصرف جدید، میزان انرژی مصرفی، درصد کاهش پیک، مبلغ درآمد شرکت برق، میزان جایزه پرداختی و مقدار سود مشتری در هر سناریو محاسبه شده است.

کلید واژه: الاستیسیته بار، پاسخ‌گویی بار اضطراری، قیمت زمان استفاده، مدل پاسخ‌گویی بار، مدیریت مصرف.

1- مقدمه

واژه "مدیریت سمت مصرف"¹ (DSM) نخستین بار در اوایل دهه 1980 میلادی توسط محققین EPRI² استفاده شد. DSM دربرگیرنده گستره فعالیت‌هایی است که از سوی شرکت برق و یا دولت به‌منظور تغییر میزان و یا زمان مصرف برق مشترکین با توجه به منافع مشترک جامعه، شرکت برق و مصرف‌کنندگان طراحی می‌شود. در واقع DSM، مفاهیمی از قبیل مدیریت بار، کارایی انرژی، صرفه‌جویی انرژی و فعالیت‌هایی از این دست را دربر می‌گیرد [1].

با بروز تحولات ساختاری در صنعت برق، برخی واژه‌های جدید در کنار DSM ظاهر شده‌اند. از جمله می‌توان به واژه پاسخ‌گویی بار (DR)³ اشاره نمود که مطابق تعریف وزارت انرژی ایالات متحده⁴ (DOE) عبارتست از توانایی مشترکین (صنعتی، تجاری، مسکونی و ...) برای بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی در زمان‌های پیک بار به‌منظور نیل به قیمت‌های مناسب و افزایش قابلیت اطمینان [2].

DR قادر است شکل مصرف انرژی الکتریکی را به‌نحوی تغییر دهد که بیشترین بازده مصرف در طی ساعت‌های پیک به‌دست آید، بارها مدیریت شده، پیک سیستم کاهش یافته و در صورت لزوم منابع تولید پراکنده

این مقاله در تاریخ 17 مهر ماه 1386 دریافت و در تاریخ 12 فروردین ماه 1387 بازنگری شد.

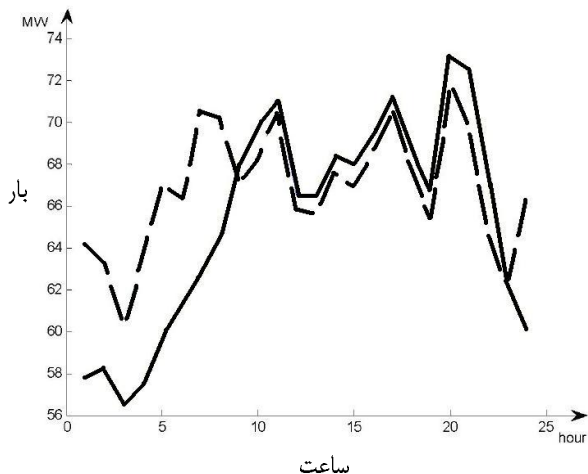
حبیب‌اله اعلمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: aalami@modares.ac.ir)

غلامرضا یوسفی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران (email: yousefi@cc.iut.ac.ir)

محسن پارسامقدم، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: parsa@modares.ac.ir)

1. Demand Side Management
2. Electric Power Research Institute
3. Demand Response
4. US Department of Energy

5. Distributed Generation
6. Emergency Demand Response Program
7. Time of Use
8. International Energy Agency
9. Federal Energy Regulatory Commission
10. Incentive -Based Programs
11. Time -Based Rate Programs
12. Direct Load Control
13. Interruptible/Curtailable Service
14. Demand Bidding/Buyback
15. Capacity Market Programs
16. Ancillary Service Market



شکل 2: اجرای TOU در یکی از ایالت‌های چین [10].

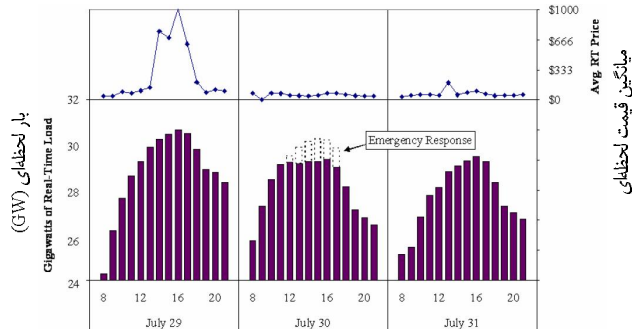
شکل 2 اجرای برنامه TOU در سال 2006 در یکی از ایالت‌های چین را نشان می‌دهد که در آن اپراتور سیستم با انتخاب قیمت‌های بهینه برای دوره‌های متفاوت توانسته است بار پیک را به میزان 2 MW و فاصله بین بار پیک و پایه را به مقدار 5 MW کاهش دهد (منحنی ممتد میزان بار قبل از اجرای برنامه و منحنی مقطع میزان بار بعد از اجرای برنامه TOU را نشان می‌دهد).

3- مدل اقتصادی بار

در آغاز انجام تجدید ساختار در سیستم‌های سنتی قدرت، معمولاً مشترکین در بازار حضور فعالی نداشتند و تصمیم‌گیرندگان اصلی، تولیدکنندگان برق مستقل⁴ (IPP)، شرکت‌های انتقال منطقه‌ای⁵ (RTO)، اپراتور مستقل سیستم و قانون‌گذاران صنعت برق بودند. چرا که مصرف‌کنندگان نه از مزایا و سود بازار بهره‌مند بودند و نه اطلاعات و مهارت لازم برای حضور در بازارهای پیچیده برق را داشتند. به همین دلیل بازارها به مصرف‌کنندگان به عنوان عناصر غیر فعال و صرفاً بارهای ساده‌ای که باید به آنها خدمت‌رسانی شود، نگاه می‌کردند و چه بسا خود مشترکین نیز علاقمند به دریافت برق با قیمت ثابت، بدون توجه به نوسانات بازار بودند. این نگرش موجب بروز مشکلاتی از قبیل وقوع جهش‌های قیمت در زمان پیک و تراکم خطوط گردید. عدم حضور مشترکین در بازار و عدم حساسیت آنها به قیمت برق در زمان‌های پیک در بسیاری از بازارها منجر به اعمال خاموشی‌های گسترده شده است. لذا برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به منظور بالابردن حساسیت مشترکین نسبت به تغییرات و تحولات بازار طراحی گردید [11]. شکل 3 نشان می‌دهد به دلیل حساسیت بار نسبت به قیمت، چگونه کاهش اندکی در طرف تقاضا، به مقدار زیادی بر قیمت انرژی الکتریکی اثر می‌گذارد [12]. حساسیت میزان مصرف به قیمت را الاستیسیته یا E می‌نامند و مطابق فرمول زیر تعریف می‌شود [13]

$$E = \frac{P_0}{d_0} \cdot \frac{\partial d}{\partial P} \quad (1)$$

که در آن d مقدار انرژی و P قیمت انرژی می‌باشد. بارها در خصوص قیمت متفاوت انرژی الکتریکی در پرونده‌های مختلف به دو دسته تقسیم می‌شوند:



شکل 5: EDRP در بازار نیویورک [5]

ب-1) برنامه‌های زمان استفاده (TOU)
 ب-2) برنامه‌های قیمت زمان - واقعی¹ (RTP)
 ب-3) برنامه‌های قیمت زمان پیک بحرانی² (CPP)
 از آنجا که در این مقاله، به مدل‌سازی بار با توجه به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری و برنامه‌های زمان استفاده پرداخته شده است، در مورد این دو روش توضیح مختصری ارائه می‌شود.

2-1 برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

هنگامی که اپراتور سیستم³ (ISO) برای شبکه تحت مدیریت خود، پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت انجام می‌دهد یا پس از بروز جهش بار یا قیمت احتمال می‌دهد جهش‌های قیمت تکرار شود، با استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری سعی در کاهش پیک مصرف و جلوگیری از بروز جهش‌های قیمت می‌نماید. در این برنامه، مشترکین عمده‌ای که مایلند قسمتی از بار خود را در زمانی که ISO اعلام می‌کند قطع نمایند شرکت می‌کنند و در قبال این کاهش، مبلغ قابل توجهی (مبلغی حدود 10 برابر قیمت انرژی در زمان کم‌باری) به عنوان جایزه دریافت می‌کنند [7]. البته مشارکت در برنامه داوطلبانه است و مشترکینی هستند که با صرف نظر از مبلغ جایزه مصرف خود را کاهش نخواهند داد. این عدم قطعیت در کاهش بار، مدیریت بازار را دچار مشکل خواهد کرد. اما از طرف دیگر چون مقدار جایزه تشویقی از پیش تعیین می‌شود و در صورت عدم قطع بار مشترک جریمه نمی‌شود، استقبال از این برنامه در بازارهای برق زیاد بوده است [4].

شکل 1 اجرای برنامه DR در سال 2005 در بازار نیویورک را نشان می‌دهد که در آن اپراتور سیستم با مشاهده منحنی بار در 29 جولای و پیش‌بینی میزان مصرف برای 30 جولای با اجرای توأمان برنامه EDRP و CAP توانسته است با برش پیک، قیمت برق را به حالت عادی بازگرداند.

2-2 برنامه زمان استفاده (TOU)

در این برنامه قیمت فروش انرژی الکتریکی در هر ساعت، به هزینه‌های تولید در همان زمان وابسته است. لذا قیمت در زمان کم‌باری، ارزان و در زمان میان‌باری، متوسط و در زمان پیک، گران خواهد بود. اجرای این برنامه باعث می‌شود تا مشترکین (به خصوص مشترکینی که می‌توانند بار خود را جابه‌جا کنند) مصرف خود را با قیمت تطبیق داده و در نتیجه پیک بار سیستم کاهش یابد و بارها از ساعت‌های پیک به ساعت‌های دیگر منتقل شوند [5]، [8] و [9].

1. Real Time Pricing
2. Critical Peak Pricing
3. Independent System Operator

4. Independent Power Producer
5. Regional Transmission Organization

$$\begin{aligned}
 B(d(i)) &= \text{مقدار درآمد ناشی از استفاده از برق در تولید کالا (Rials)} \\
 \rho_0(i) &= \text{قیمت برق قبل از کاهش بار (Rials/kWh)} \\
 \rho(i) &= \text{قیمت برق بعد از کاهش بار (Rials/kWh)} \\
 E(i) &= \text{الاستیسیته خودی بار} \\
 d(i) \cdot \rho(i) &= \text{هزینه مشتری (قبض برق) (Rials)} \\
 \Delta d(i) = d_0(i) - d(i) &= \text{تغییرات بار قبل و بعد از اجرای برنامه (kWh)} \\
 A(i) \geq 0 &= \text{مقدار جایزه تشویقی در پیروید } i \text{ ام (Rials/kWh)} \\
 P(\Delta d(i)) = A(i) \cdot \Delta d(i) &= \text{جایزه تشویقی برنامه EDRP (Rials)} \\
 \text{لذا تابع سود مشتری به صورت زیر خواهد بود} \\
 S = B(d(i)) - d(i) \cdot \rho(i) + P(\Delta d(i)) \quad \text{Rials} \quad (3)
 \end{aligned}$$

در شرایط بهینه میزان مصرف بهینه به منظور دست‌یابی به بیشترین سود، با مسأوی صفر قراردادن میزان سود یا S ، نسبت به مصرف یا $d(i)$ به دست می‌آید

$$\frac{\partial S}{\partial d(i)} = \frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} - \rho(i) + \frac{\partial P}{\partial d(i)} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} = \rho(i) + A(i) \quad \text{(Rials/kWh)} \quad (5)$$

تابع سود مشتری معمولاً به صورت یک تابع درجه دوم از توان مصرفی در نظر گرفته می‌شود [14] و [15]

$$B(d(i)) = B_0(i) + \rho_0(i)[d(i) - d_0(i)] + \frac{d(i) - d_0(i)}{2E(i)d_0(i)} \quad (6)$$

Rials

با مشتق‌گیری از (6)

$$\frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} = \rho_0(i) \left\{ 1 + \frac{d(i) - d_0(i)}{E(i)d_0(i)} \right\} \quad \text{(Rials/kWh)} \quad (7)$$

با جایگذاری (7) در (5)

$$\rho(i) + A(i) = \rho_0(i) \left\{ 1 + \frac{d(i) - d_0(i)}{E(i)d_0(i)} \right\} \quad \text{(Rials/kWh)} \quad (8)$$

$$\rho(i) - \rho_0(i) + A(i) = \rho_0(i) \frac{d(i) - d_0(i)}{E(i)d_0(i)} \quad \text{(Rials/kWh)} \quad (9)$$

و در نهایت مصرف‌کننده با توجه به قیمت زمان استفاده و جایزه تشویقی در برنامه EDRP، به‌میزانی مصرف می‌کند که سودش ماکزیمم شود. با استفاده از (9) مدل تک‌پریودی بار مطابق ذیل به دست می‌آید

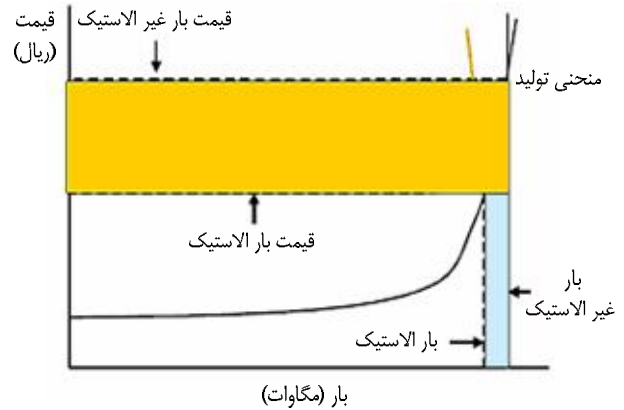
$$d(i) = d_0(i) \left\{ 1 + \frac{E(i)[\rho(i) - \rho_0(i) + A(i)]}{\rho_0(i)} \right\} \quad \text{(kWh)} \quad (10)$$

در (10) چنانچه $A(i) = 0$ باشد، یعنی جایزه‌ای در کار نباشد و قیمت برق نیز تک‌نرخ باشد، مقدار بار تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر حساسیت دیمانند نسبت به قیمت، صفر خواهد بود.

3-2 مدل چندپریودی

الاستیسیته ضربدری $\frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)}$ مطابق (2) تعریف شد و بیان می‌کند که میزان بار در پیروید i ام به مقدار قیمت در تک‌تک پریودهای دیگر وابسته است، لذا برای یک پیروید ثابت (i) ، حساسیت نسبت به تمامی پیرودها (j) باید محاسبه شود [16].

در نتیجه با استفاده از (2)، مدل خطی پاسخ‌گویی بار برای یک دوره 24 ساعته، طبق فرمول زیر تعریف می‌شود [10]



شکل 3: تأثیر الاستیسیته بار بر قیمت برق.

بارهایی که امکان جابه‌جایی در پریودهای مختلف را ندارند و فقط می‌توانند روشن یا خاموش شوند (مانند بارهای روشنایی). واکنش این نوع بارها در مقابل قیمت، حساسیت تک‌پریودی¹ نامیده شده و با الاستیسیته خودی² ارزیابی می‌شود. علامت الاستیسیته خودی همواره منفی است زیرا هنگامی که در یک پیروید قیمت افزایش می‌یابد، مقدار تقاضا در همان پیروید کم می‌شود و برعکس.

بارهایی که می‌توانند در پریودهای مختلف جابه‌جا شوند، یعنی مصرف می‌تواند از زمان پیک به زمان میان‌باری یا کم‌باری منتقل شود (مانند بارهای تهویه مطبوع، آبگرمکن‌های برقی و ...). واکنش این نوع بارها در مقابل قیمت، حساسیت چندپریودی³ نامیده و با الاستیسیته ضربدری⁴ ارزیابی می‌شود. علامت این ضریب همواره مثبت است، زیرا هنگامی که در یک پیروید خاص قیمت افزایش می‌یابد مقدار تقاضا در پریودهای دیگر افزایش می‌یابد [13].

بیان ریاضی الاستیسیته خودی و ضربدری به صورت زیر است

$$E(i, j) = \frac{\rho_0(j)}{d_0(i)} \cdot \frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E(i, j) \leq 0 & \text{if } i = j \\ E(i, j) \geq 0 & \text{if } i \neq j \end{cases}$$

که در آن $E(i, i)$ الاستیسیته خودی، بیانگر تغییرات بار در پیروید i ام، به تغییرات قیمت در همان پیروید است [10] و [12] و $E(i, j)$ الاستیسیته ضربدری، بیانگر تغییرات بار در پیروید i ام، به تغییرات قیمت در پیروید j ام است [12].

در ادامه با استفاده از فرمول‌های الاستیسیته خودی و ضربدری، مدل ریاضی پاسخ‌گویی بار، با توجه به برنامه‌های TOU و EDRP و با لحاظ بهینه‌سازی سود مشتری استخراج خواهد شد.

3-1 مدل تک‌پریودی

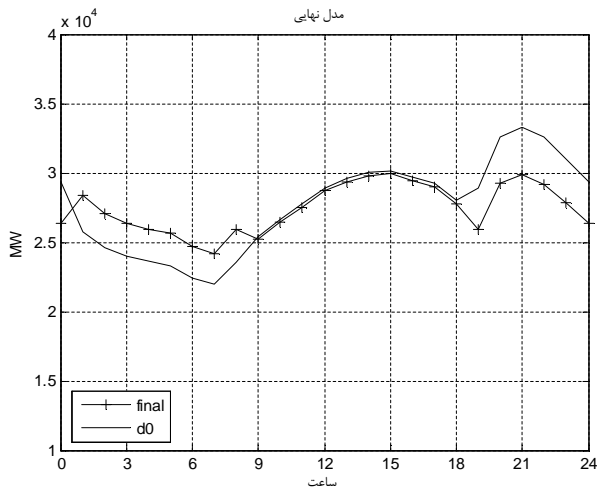
در مدل‌سازی از نمادها و علائم زیر استفاده شده است (آرگومان (i) بیانگر پیروید i ام است):

$d_0(i)$ = بار اولیه، (مصرف قبل از اجرای برنامه) (kWh)

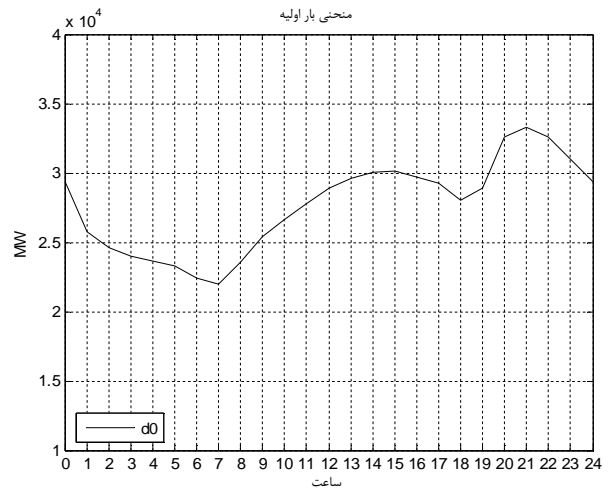
$d(i)$ = بار لحظه‌ای، (مصرف بعد از اجرای برنامه) (kWh)

$B_0(i)$ = مقدار درآمد ناشی از مصرف برق به اندازه d_0 (Rials)

1. Single Period
2. Self Elasticity
3. Multi Period
4. Cross Elasticity



شکل 5- الف: اجرای برنامه TOU.



شکل 4: منحنی بار روزانه شبکه سراسری مورخه 1385/06/04.

4- نتایج عددی

به منظور بررسی و تست توأم برنامه‌های TOU و EDRP، پیک بار شبکه سراسری برق کشور در سال 1385 که در مورخ 1385/6/4 اتفاق افتاده است، انتخاب و منحنی بار آن روز (شکل 4) مورد مطالعه قرار گرفته است [17]. این منحنی به سه پریود جداگانه کم‌باری (24 الی 9 صبح)، بار میانه (9 صبح الی 19) و بار پیک (19 الی 24) تقسیم شده است.

میانگین قیمت فروش هر kWh در سال 1385، 150 ریال بوده است [18]. بر این اساس قیمت در زمان پیک را معادل 260 ریال، قیمت در زمان میان‌باری را معادل 160 ریال و قیمت در زمان دره را معادل 80 ریال فرض می‌کنیم (تعرفه سه‌قسمتی). پاداش مبتنی بر اجرای برنامه EDRP را نیز در ابتدا معادل میانگین قیمت انرژی (150 Rials/kWh) در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه بازار خرده‌فروشی و به تبع آن اطلاعات الاستیسیته قیمتی بار در داخل کشور وجود ندارد، لذا مقادیر الاستیسیته بار را معادل نصف مقادیر الاستیسیته بازار انگلستان و ولز (مطابق جدول 1) فرض می‌کنیم [12].

شدت مصرف انرژی در کشور ما بیش از 8 برابر ژاپن و بیش از 2 برابر چین و به مراتب بالاتر از کشورهای در حال توسعه و حتی کشورهای هم‌جوار می‌باشد [19]. لذا پتانسیل بسیار بالایی برای صرفه‌جویی انرژی به‌طور عام و صرفه‌جویی انرژی الکتریکی به‌طور خاص وجود دارد. کارشناسان دفتر بهینه‌سازی مصرف انرژی وزارت نیرو، پتانسیل برنامه‌های مدیریت مصرف را بیش از 30% برآورد می‌کنند [20] و [21]. در تحقیق حاضر پتانسیل اجرای برنامه‌های EDRP و TOU معادل 20% در نظر گرفته شده است. این امر به این مفهوم است که 20% از کل بار در اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار مشارکت می‌کند. در گزارش حاضر، محاسبات با مقادیر متفاوتی از پتانسیل اجرا، ارائه و مقایسه خواهد شد.

الف) شکل 5- الف نشان‌دهنده منحنی‌های بار اولیه و بار تغییر یافته با احتساب مدل نهایی پاسخ‌گویی بار (رابطه (14)) می‌باشد، در حالتی که فقط برنامه TOU اجرا شود. مقایسه بین شکل 4 و شکل 5- الف نشان می‌دهد که فاصله بین مقادیر ماکزیمم و مینیمم بار از 11500 به 5700 MW و ضریب بار (که از شاخص‌های مهم مدیریت مصرف است) از 82% به 92% رسیده است.

برای نمایش میزان تغییرات بار در اثر کاهش مصرف مشترک، مقادیر بار اولیه در 20% ضرب شده و به‌همراه نتایج مدل تک‌پریودی

جدول 1: الاستیسیته خودی و متقابل در سه دوره متفاوت.

	پیک	میان‌باری	دره
پیک	-0,1	0,016	0,012
میان‌باری	0,016	-0,1	0,01
دره	0,012	0,01	-0,1

$$d(i) = d_0(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i, j) \frac{d_0(j)}{\rho_0(j)} [\rho(j) - \rho_0(j)] \quad (11)$$

$$(j = 1, 2, \dots, 24) \quad (\text{kWh})$$

اگر پاداش ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری در پریودهای j ام در آیتیم قیمت لحاظ شود خواهیم داشت

$$\Delta \rho(j) = \rho(j) - \rho_0(j) + A(j) \quad (\text{Rials/kWh}) \quad (12)$$

$A(j)$ برحسب (Rials/kWh) تشویقی است که در پریود j ام بابت EDRP پرداخت می‌شود. بدیهی است $A(j)$ در بعضی از پریودها مثبت (پریودهای پیک) و در بعضی از پریودها (میان‌باری و کم‌باری) صفر خواهد بود. در نهایت تابع مصرف مشتری با توجه به قیمت در پریودهای مختلف و پاداش تشویقی عبارتست از

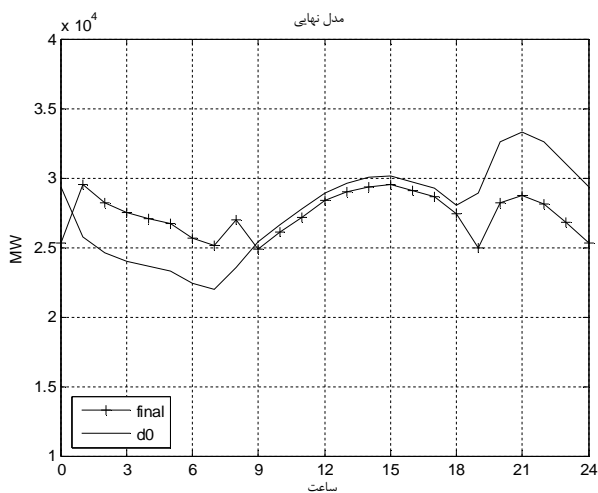
$$d(i) = d_0(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i, j) \frac{d_0(j)}{\rho_0(j)} [\rho(j) - \rho_0(j) + A(j)] \quad (\text{kWh}) \quad (13)$$

3-3 مدل نهایی پاسخ‌گویی بار

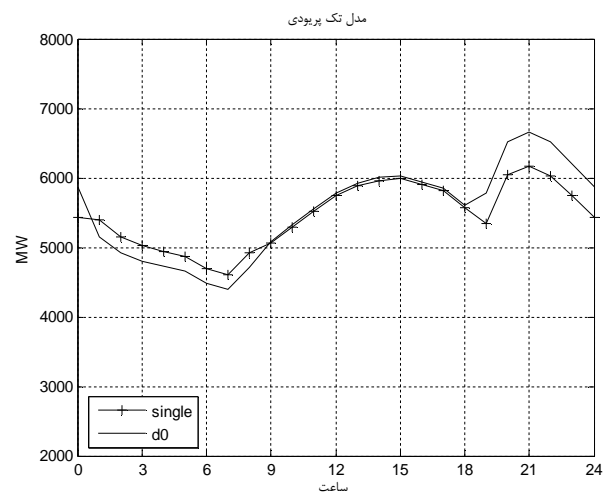
چنانچه (13) که تابع مصرف مشتری با توجه به الاستیسیته بار می‌باشد، در (10) که تابع سودمندی مشترک است جایگذاری شود، میزان مصرفی که در آن سود مشترک حداکثر می‌شود به‌دست می‌آید. همانگونه که در (14) مشاهده می‌شود، میزان مصرف بهینه مشتری با توجه به میزان تشویق و قیمت انرژی در هر پریود تعیین می‌شود

$$d(i) = d_0(i) \cdot \left\{ 1 + \frac{E(i)[\rho(i) - \rho_0(i) + A(i)]}{\rho_0(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i, j) \frac{d_0(j)}{\rho_0(j)} [\rho(j) - \rho_0(j) + A(j)] \right\} \quad (14)$$

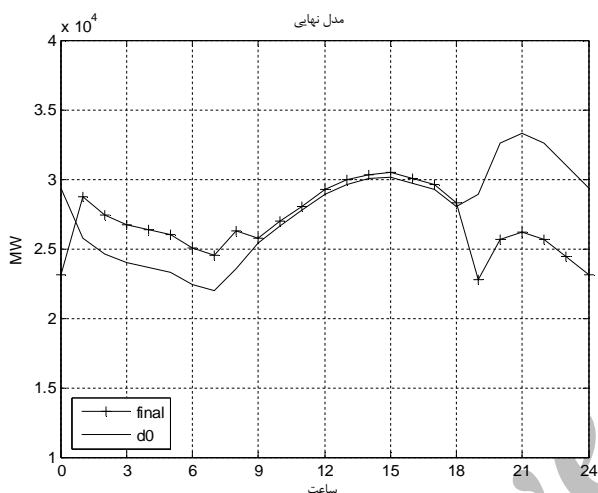
(kWh)



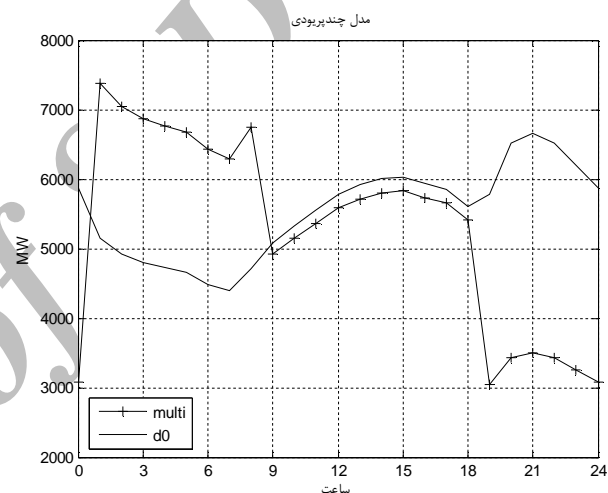
شکل 7: اجرای TOU با تعرفه سه قسمتی 50، 70 و 300 Rials/kWh.



شکل 5-ب: مدل تک پریودی و بار اولیه، پتانسیل اجرا 20%.



شکل 8: اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP با پاداش 150 Rials/kWh.



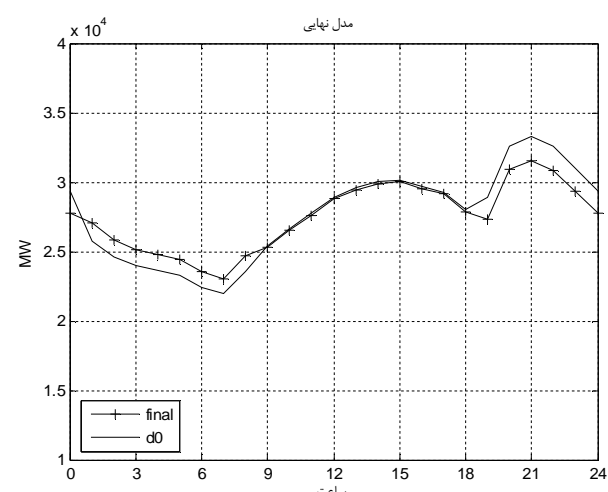
شکل 5-ج: مدل تک پریودی و بار اولیه، پتانسیل اجرا 20%.

نتایج مدل چند پریودی به همراه بار اولیه در شکل 5-ج برای 20% از بار ترسیم شده است. در مدل چند پریودی (رابطه (13))، متناسب با تفاوت قیمت در پریودهای مختلف، بارها از پریودهای گران قیمت به پریودهای ارزان قیمت جابه‌جا شده‌اند. به عنوان مثال مشترک در ساعت پیک 3413 MW یعنی حدود 10% از بار خود را جابه‌جا کرده است.

ب) شکل 6 منحنی بار بند الف را در حالتی نشان می‌دهد که مقادیر الاستیسته جدول 1 نصف شده‌اند. به عبارتی فرض شده حساسیت میزان بار نسبت به قیمت نصف شده است. دیده می‌شود با کم شدن الاستیسته، تغییرات منحنی بار و در نتیجه امکان اجرای برنامه کاهش می‌یابد.

ج) با انتخاب 170، 50 و 300 ریال بر کیلووات ساعت، به ترتیب برای قیمت انرژی در دوره کم‌باری (دره)، میان‌باری و پیک برنامه TOU روی منحنی شکل 1 اجرا شده است. نتیجه در شکل 7 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود چنانچه اپراتور سیستم بتواند قیمت‌های مناسبی برای زمان‌های پیک، میانه و دره تعیین کند، منحنی بار صاف شده و ضریب بار بهبود می‌یابد. در این حالت فاصله بین مقادیر ماکزیمم و مینیمم بار به 4600 MW و ضریب بار به 93% می‌رسد.

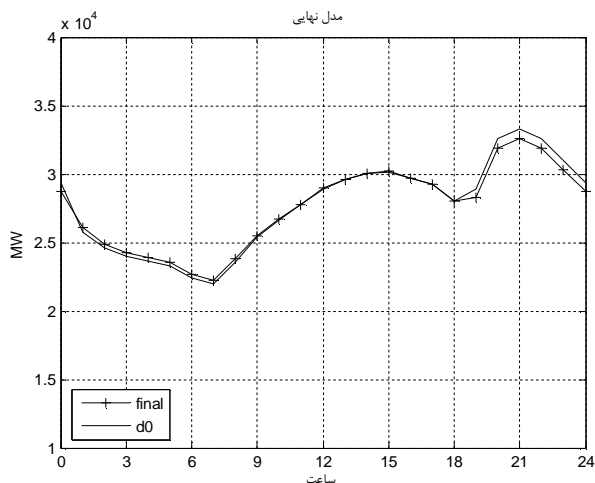
د) منحنی بار بند الف در حالت اجرای توأمان برنامه‌های TOU و EDRP و مقدار پاداش 150 Rials/kWh در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، به‌خاطر پاداش لحاظ‌شده در زمان پیک بار پیک کاهش و بار دره افزایش می‌یابد.



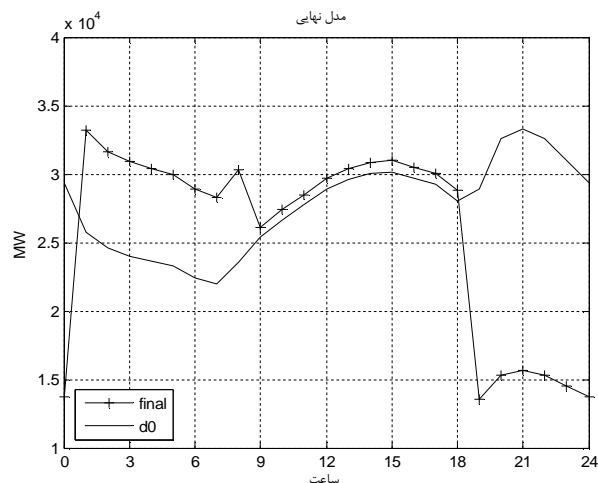
شکل 6: اجرای برنامه TOU با مقادیر الاستیسته معادل نصف مقادیر جدول 1.

(رابطه (10)) در شکل 5-ب نشان داده شده است.

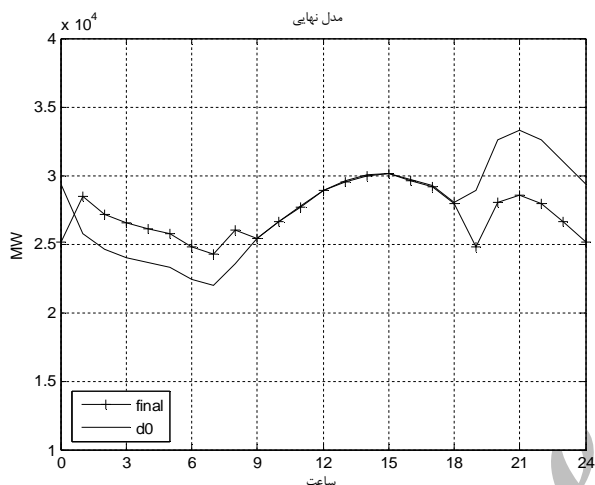
همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل تک پریودی باری جابه‌جا نشده، اما با توجه به افزایش قیمت در زمان‌های پیک، مشترک بار خود را کاهش و با توجه به کاهش قیمت در زمان‌های دره، مصرف خود را افزایش داده است. به عنوان مثال با اجرای برنامه TOU، مشترک در ساعت پیک (ساعت 21) 500 MW یعنی 1/5% از بار خود را کم کرده است.



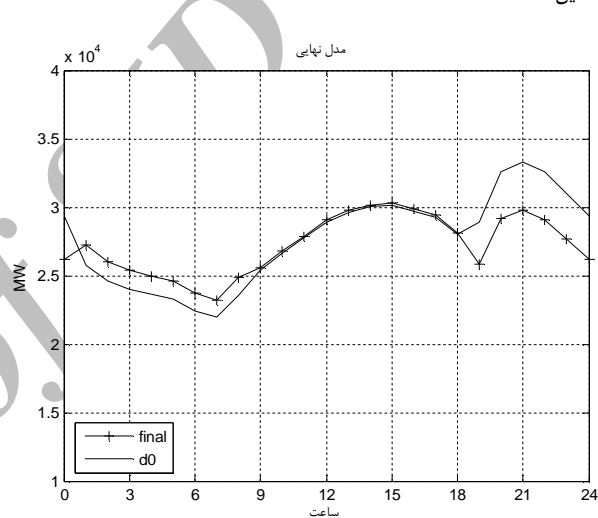
شکل 9-د: اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP (پتانسیل 2%).



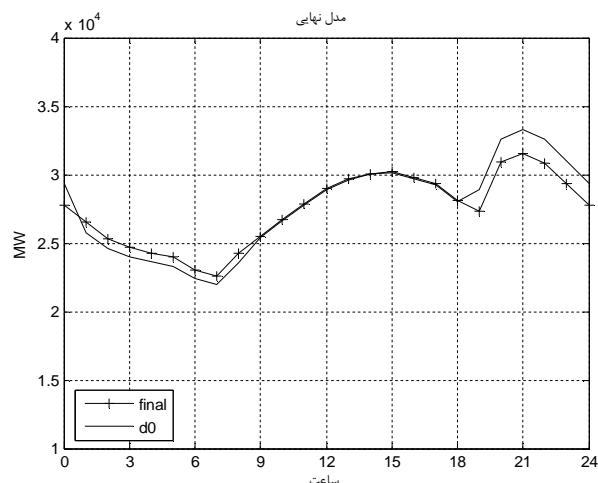
شکل 9-ف: اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP با پاداش 150 Rials/kWh و پتانسیل 50%.



شکل 9-ج: اجرای برنامه‌های TOU و EDRP با پاداش 50 Rials/kWh.



شکل 9-ب: اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP (پتانسیل 10%).

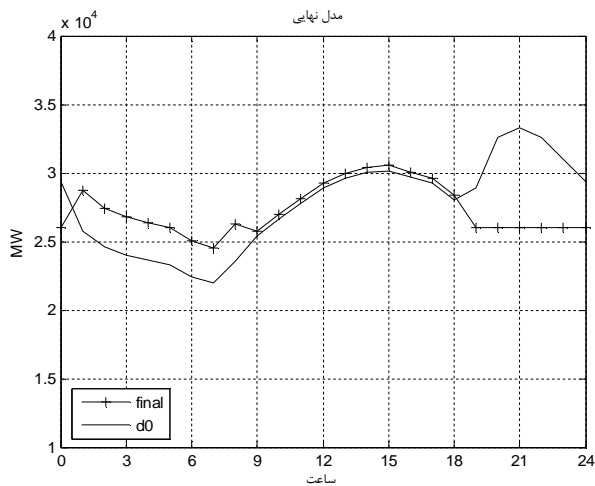


شکل 9-ج: اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP (پتانسیل 5%).

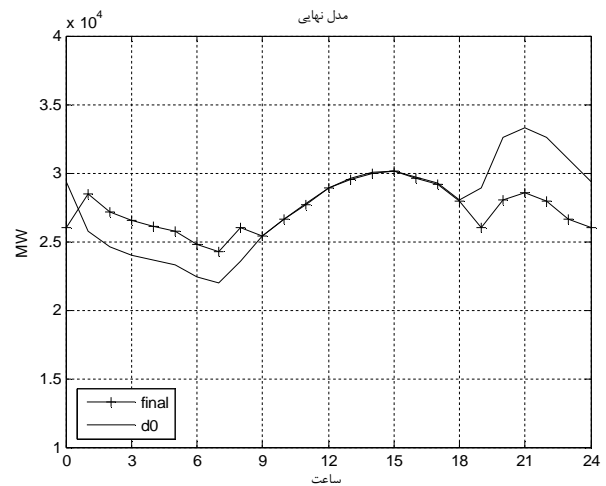
شبانه‌روز رخ دهد. اگرچه برای رفع مشکل خط بار پایه¹ تعریف می‌کند که در بندهای آتی تشریح خواهد شد. البته پتانسیل اجرای 50% در شرایط عادی امکان‌پذیر نیست و فقط به‌منظور آنالیز حساسیت مقادیر ارائه شده است. شکل‌های 9-ب، 9-ج و 9-د به ترتیب اجرای برنامه را برای پتانسیل‌های 10%، 5% و 2% نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هرچه پتانسیل اجرای یک برنامه DR پایین‌تر باشد توانایی تغییر و بهبود شکل منحنی بار کاهش می‌یابد. محاسبه میزان تأثیر بر انرژی مصرفی، هزینه برق، جایزه و سود مشترک در جدول 2 ارائه شده است. (و شکل 10 منحنی بار بند د را با پاداش 50 Rials/kWh نشان می‌دهد. در مقایسه شکل 8 و 10 مشاهده می‌شود پیک بار کمتر کاهش یافته است.

ز) اجرای توأمان TOU و EDRP با لحاظ خط بار پایه 26000 MW تکرار و نتیجه در شکل 11 آمده است. چنانچه اپراتور مستقل سیستم، خط بار پایه تعیین و مصرف در بالای خط را به‌وسیله پاداش 50 Rials/kWh کنترل کند، مشترک خود را تطبیق داده، به‌اندازه بار پایه مصرف می‌نماید و انگیزه‌ای برای کاهش بیشتر از مقدار تعیین‌شده توسط خط بار پایه را نخواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود با لحاظ مبلغ پاداش معادل 50 Rials/kWh میزان مصرف به زیر خط پایه کشیده نخواهد شد.

ه) شکل 9-الف منحنی بار بند الف نشان‌دهنده حالتی است که برنامه‌های TOU و EDRP به‌طور توأمان روی نیمی از بار (پتانسیل 50%) اجرا شوند. مشاهده می‌شود در این حالت پیک به‌شدت کاهش یافته و بار به پربودهای ارزان‌قیمت منتقل شده است. اپراتور سیستم باید مراقب باشد اگر مشارکت مصرف‌کنندگان در اجرای برنامه زیاد باشد، چنانچه قیمت‌ها را تعدیل نکند ممکن است پیک بار جدیدی در ساعتی دیگر از



شکل 10: اجرای برنامه‌های TOU و EDRP با پاداش بهینه با هدف برش پیک تا بار پایه.



شکل 11: اجرای برنامه‌های TOU و EDRP با لحاظ خط بار پایه معادل 26000 MW.

جدول 2: مقایسه روش‌های مختلف مورد مطالعه با حالت نرخ ثابت.

سود مشترک (میلیون ریال)	جایزه (میلیون ریال)	هزینه برق (میلیون ریال)	انرژی مصرفی (MWh)	سناریو	شماره شکل	ردیف
0	-	99340	662268	بار اولیه (مبنا)، نرخ ثابت (Rials/kWh) 150	شکل 4	1
-6397	-	105737	659646	TOU، تعرفه (Rials/kWh) 260-160-80	شکل 5-الف	2
-8224	-	107564	660439	TOU، الاستیسیته 50%	شکل 6	3
-7677	-	107017	658431	TOU، تعرفه (Rials/kWh) 300-170-50	شکل 7	4
3831	5974	101483	647355	TOU و EDRP، پاداش (Rials/kWh) 150	شکل 8	5
24956	14935	89319	624984	TOU و EDRP، پتانسیل اجرا 50%	شکل 9-الف	6
9634	2987	92693	654810	TOU و EDRP، پتانسیل اجرا 10%	شکل 9-ب	6
6076	1493	94757	658542	TOU و EDRP، پتانسیل اجرا 5%	شکل 9-ج	6
3944	598	95994	660775	TOU و EDRP، پتانسیل اجرا 2%	شکل 9-د	6
-859	3990	104189	655049	TOU و EDRP، پاداش (Rials/kWh) 50	شکل 10	7
-1703	3681	104724	657107	TOU و EDRP، خط بار، پاداش (Rials/kWh) 50	شکل 11	8
397	4745	103688	656103	TOU و EDRP، خط بار، پاداش (Rials/kWh) 160	شکل 12	9

می‌شود، اگر پاداشی معادل 160 Rials/kWh لحاظ شود، میزان مصرف در دوره پیک تا حد مشخص شده توسط خط بار پایه کاهش می‌یابد [22].

4-1 تحلیل نتایج

نتایج به دست آمده را از دو دیدگاه می‌توان مورد بررسی قرار داد: دیدگاه اول مقایسه با حالت نرخ ثابت می‌باشد که در این حالت میزان سود و زیان مشتری و شرکت برق در دو حالت قبل و بعد از اجرای برنامه‌های DR محاسبه و بررسی می‌شود. قیمت انرژی قبل از اجرای برنامه 150 Rials/kWh و پس از اجرا طبق تعرفه سه قسمتی محاسبه می‌شود. جدول 2 و توضیحات بعد از آن این روش را تبیین می‌کند. دیدگاه دوم میزان سود و زیان مشتری پس از اجرای برنامه‌های DR در صورت شرکت/عدم شرکت در برنامه را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. قیمت انرژی بر اساس تعرفه سه قسمتی محاسبه می‌شود. در جدول 3 و توضیحات بعد از آن این نتایج ارائه شده است. ردیف اول، بار اولیه را نشان می‌دهد که هیچ کدام از برنامه‌های DR بر روی آن اجرا نشده و به عنوان بار مبنا در نظر گرفته شده است و بقیه ردیف‌ها با آن مقایسه می‌شود.

ردیف دوم که در آن برنامه TOU اجرا شده است، نشان می‌دهد که مشترک قسمتی از بار خود را قطع و قسمتی را جابه‌جا کرده است (واکنش تک‌پرویی و چندپرویی). اما به رغم کاهش کلی مصرف به علت کوچکی

جدول 3: مقایسه روش‌های مختلف مورد مطالعه با حالت تعرفه سه قسمتی.

ردیف	تصویر	پیک بار (MW)	انرژی مصرفی در دوره پیک (MWh)	کاهش پیک/انرژی (درصد)	سود مشترک (میلیون ریال)
1	شکل 4	33286	187636	0	0
2	شکل 5-الف	29873	168396	10	5000
3	شکل 6	31522	177690	5	2586
4	شکل 7	28770	162178	14	7640
5	شکل 8	26221	147809	21	10355
شکل 9-الف	15623	88068	53	25888	
شکل 9-ب	29753	167722	11	5178	
شکل 9-ج	31520	177680	5	2589	
شکل 9-د	32579	183652	2	1036	
شکل 10	28567	161034	14	7917	
شکل 11	28567	163092	13	6381	
شکل 12	26006	156006	16	8224	

ج) در این قسمت به کمک اجرای یک روش سعی و خطا، مقدار پاداش بهینه به منظور تشویق مشتری در کاهش مصرف به مقدار تعیین شده توسط خط بار پایه محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل 12 مشاهده

این مقاله نشان داد چگونه مدیریت شبکه برق با انتخاب هوشمندانه پارامترهای مزبور می‌تواند ضمن دسترسی به مقادیر بهینه شاخص‌های مدیریت مصرف (با حفظ درآمد خود) به مشتری نیز سود رساند.

در خاتمه پیشنهاد می‌گردد اولاً به‌منظور اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در کشور، بستر قانونی مناسب توسط مسئولین ذی‌صلاح فراهم گردیده و ثانیاً با توجه به اینکه مشکل اصلی برق در ایران، عدم جواب‌گویی منابع تولیدی در زمان پیک می‌باشد که کشور را در تابستان‌های گرم با خاموشی‌های گسترده مواجه می‌کند، به‌منظور کاهش اوج مصرف، استفاده از روش‌های پاسخ‌گویی بار (اجرای هم‌زمان برنامه‌های TOU و EDRP با مقدار پاداش بهینه)، مد نظر مدیران وزارت نیرو قرار گیرد.

مراجع

- [1] C. River Associates, "Primer on demand side management," in *Report for the World Bank*, pp. 6-9, Feb. 2005.
- [2] U. S. Department of Energy, *Energy Policy Act of 2005, Section 1252*, pp. 372-375, Feb. 2006.
- [3] J. Wellingshoff, *Collaborative Dialog on Demand Response*, 12 Nov. 2006, www.ferc.gov.
- [4] IEA, *Strategic Plan for the IEA Demand-Side Management Programs 2004-2009*, www.iea.org.
- [5] FERC, *Regulatory Commission Survey on Demand Response and Time Based Rate Programs/Tariffs*, Aug. 2006, www.ferc.gov.
- [6] D. Cirio, G. Demartini, S. Massucco, A. Monni, P. Scaler, F. Silvestro, and G. Vimercati, "Load control for improving system security and economics," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, vol. 4, pp. 1-8, Jun. 2003.
- [7] M. Fahliglu and F. L. Alvarado, "Designing incentive compatible contracts for effective demand management," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1255-1260, Nov. 2000.
- [8] Y. Li and F. Peter, "Deregulated power prices: changes over time," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 565-572, May 2005.
- [9] Y. Tang, H. Song, and F. Ho, "Investigation on TOU pricing principles," in *IEEE TBD Conf.*, vol. 1, pp. 1-9, Dec. 2005.
- [10] N. Yu and J. Yu, "Optimal TOU decision considering demand response model," in *Proc. Int. Conf. on Power System Technology*, pp. 1-5, Jun. 2006.
- [11] D. S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 520-527, May 2003.
- [12] D. S. Kirschen, G. Strbac, P. Cúmpereyot, and D. Mendes, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 612-617, May 2000.
- [13] D. S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, John Wiley & Sons, 2004.
- [14] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, *Spot Pricing of Electricity*, Appendix E, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [15] J. G. Roos and I. E. Lane, "Industrial power demand response analysis for one port real time pricing," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 13, no. 1, pp. 159-164, Feb. 1998.
- [16] H. Yang, Y. Zhang, and X. Tong, *System Dynamics Model for Demand Side Management*, Hunan Provincial Natural Science Foundation of China, No. 05JJ3 0/07, 2006.
- [17] آمار تفصیلی صنعت برق ایران، وزارت نیرو، 1386.
- [18] *ترازنامه انرژی*، وزارت نیرو، صفحه 281، 1385.
- [19] The World Bank (ESMAP), *Demand - Side Management in China's Restructured Power Industry*, Dec. 2005.
- [20] اقدامات و نتایج طرح‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی، امور انرژی، وزارت نیرو، 1381.
- [21] ف. فصیحی هرندی و م. صادقی، "بررسی عملکرد ابزارهای مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در ایران"، *نشریه انرژی ایران*، د. 8، ش. 19، صص. 31-54، اردیبهشت 1383.
- [22] ح. ا. اعلمی، م. پارسامقدم و غ. ر. یوسفی، "تعیین مقدار بهینه پاداش برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری با استفاده از مدل DR"، *کنفرانس بین‌المللی برق، توانیر*، ش. 283، آبان 1386.

الاستیسیته و پتانسیل پایین برنامه و قیمت گران پربودهای پیک، به‌نسبت حالت نرخ ثابت هزینه مشترک افزایش یافته و متحمل زیان شده است. در ردیف سوم که الاستیسیته بار نسبت به قیمت نصف شده است با وجود این که باز هم مقدار نهایی انرژی کاهش یافته، اما چون مشترک نسبت به قیمت واکنش کمتری نشان داده دچار ضرر بیشتری شده است. در ردیف چهارم، ISO قیمت‌های TOU را تغییر داده، ضمن آن که مزایایی مانند افزایش ضریب بار، کاهش پیک و کاهش کلی مصرف انرژی حاصل شده زیان مشترک را نیز کم کرده است. در ردیف پنجم، برنامه EDRP به برنامه TOU اضافه شده و ISO برای کاهش بار در زمان پیک جایزه نسبتاً زیادی تعیین کرده است. مشتری واکنش مؤثری نشان داده و ضمن کاهش مصرف، سود مناسبی نیز کسب کرده است.

در ردیف ششم که برنامه TOU و EDRP توأمان بر روی نیمی از بار انجام شده، مقدار مصرف کلی انرژی بسیار کاهش یافته و سود مشترک نیز بسیار زیاد شده است. این مورد اهمیت میزان مشارکت در برنامه را نشان می‌دهد.

در ردیف هفتم، برنامه TOU و EDRP مانند ردیف پنجم اجرا شده، با این تفاوت که مقدار جایزه تشویقی به 50 ریال به ازای هر kWh کاهش یافته، در نتیجه مشترک متضرر شده و مقدار انرژی مصرفی نسبت به ردیف پنجم افزایش یافته است.

ردیف هشتم، نشان می‌دهد که ISO با تعیین خط بار پایه ضمن برش پیک، درآمد خود را افزایش و سود مشترک را کاهش داده است.

ردیف نهم، بیانگر این حقیقت است که ISO با یافتن مقدار بهینه جایزه تشویقی، ضمن رسیدن به اهداف خود (برش پیک تا مقدار بار پایه، کاهش مصرف کلی انرژی و صاف کردن منحنی بار) درآمد خود را افزایش داده و به مشترک نیز سود رسانده است.

جدول 3 محاسبات را با توجه به تعرفه سه‌قسمتی (80-160-260) نشان می‌دهد. چنانچه مشترک در دوره پیک برق خود را کاهش دهد به چه میزان از هزینه خود کم می‌کند؟ به‌عنوان مثال ردیف دوم بیان می‌کند که مشترک مقدار پیک/انرژی مصرفی خود را 10% کاهش می‌دهد (مقداری را قطع و مقداری را جابه‌جا می‌کند) و در عوض 5 میلیون ریال از مبلغ قبض او کاسته می‌شود. اعداد این جدول نشان می‌دهند هرچه مشترک بیشتر در اجرای برنامه مشارکت نماید سود بیشتری می‌برد، چنانچه در ردیف ششم که نیمی از بار در برنامه شرکت کرده است، 53% از پیک کاسته شده و سود مشترک بالغ بر 25 میلیارد ریال شده است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع روش‌های پاسخ‌گویی بار که در برنامه راهبردی آژانس بین‌المللی انرژی IEA (2004-2009) به‌عنوان یکی از محورهای مهم تحقیقاتی ذکر شده است مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مدل‌های پاسخ‌گویی بار برای اجرای توأمان برنامه‌های TOU و EDRP استخراج شد و با استفاده از مدل‌های ریاضی فوق، منحنی بار روزانه کشور ایران (بار روزانه پیک سال 1385) مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که تغییرات منحنی بار نسبت به اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به عواملی چون "الاستیسیته بار، شکل منحنی بار، قیمت پربودهای TOU، میزان پاداش EDRP و نحوه تقسیم‌بندی منحنی بار به حالت‌های پیک، میانه و دره" دارد. ارگان‌های ذی‌صلاح کشور با مطالعه منحنی‌های فوق می‌توانند برای بهینه‌کردن تابع هدف خود، ترکیب مناسب را برای بارهای مختلف در زمان‌های مختلف به‌دست آورده و اجرا نمایند. همچنین

غلامرضا یوسفی مدرک کارشناسی مهندسی برق را در سال 1373 از دانشگاه صنعتی اصفهان و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق را به ترتیب در سالهای 1376 و 1379 از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود و از سال 1383 تا سال 1388 استادیار دانشگاه تربیت مدرس بود. وی قبل از پیوستن به دانشگاه تربیت مدرس در شرکت Midwest Service Center در ایندیانا ای آمریکا مشغول به کار بود و هم‌اکنون به شرکت Pacific Gas and Electric (PG&E) در سانفرانسیسکو ای آمریکا پیوسته است. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی مدلسازی و طراحی سیستم‌های قدرت، مطالعات توان راکتیو و بازار برق می‌باشد.

محسن پارسا مقدم تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق در سال 1359 از دانشگاه شریف و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سالهای 1362 و 1365 از دانشگاه‌های تویوهاشی و توهوکو ژاپن به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی، کنترل و تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت.

حبیب‌اله اعلمی در سال 1368 مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و در سال 1371 مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران دریافت نمود. از سال 1371 الی 1385 نامبرده به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه امام حسین (ع) به تدریس دروس الکترونیک صنعتی، بررسی سیستم‌های قدرت و ماشین‌های الکتریکی مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران وارد گردید و هم‌اکنون در همین دانشگاه مشغول تحصیل می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، مدیریت مصرف برق، تاسیسات الکتریکی، شبکه‌های الکتریکی هوشمند، سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و برنامه‌های پاسخگویی بار می‌باشد.

Archive of SID

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop