

مدل سازی مصرف انرژی در فرآیندهای تولید واحدهای صنعتی بر مبنای روش تقریب خطی تکه‌ای با هدف اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی

نیلوفر گرامی^۱ و احمد قاسمی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸	در این مقاله، یک مدل سازی کامل از مصرف انرژی در فرآیندهای تولید واحدهای صنعتی آلومینیوم و سیمان مطابق روش تقریب خطی تکه‌ای ^۳ (LPWA) ارائه شده است. سپس مدل ارائه شده در برنامه‌ریزی مدیریت انرژی روز بعد یک ریزش شبکه شامل این واحدهای صنعتی به کار گرفته شده است. به منظور افزایش بهره‌وری واحدهای صنعتی مذکور، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اجرا شده و بنابراین این واحدها قادر به مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی می‌باشند. برنامه‌ریزی مدیریت انرژی پیشنهادی در این مقاله ضمن نظر گرفتن مدل کامل و کلیه‌ی قیود مربوط به واحدهای صنعتی و ریزش شبکه، به پیشینه‌سازی سود ریزش شبکه و این واحدها می‌پردازد. کارایی مدل و برنامه‌ریزی پیشنهادی از طریق انجام دو نمونه مطالعاتی، با و بدون اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارزیابی شده است. علاوه بر این، تأثیر تغییر سود حاصل از فروش محصول هر واحد صنعتی و قیمت‌های فروش انرژی ریزش شبکه به بازار برق بر سود نهایی واحدها و ریزش شبکه با استفاده از تحلیل حساسیت بررسی شده است. نتایج ضمن تأیید اعتبار مدل پیشنهادی نشان می‌دهند که اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و مشارکت واحدهای صنعتی در بازار انرژی و خدمات جانبی می‌تواند ضمن اصلاح منحنی تقاضا، سود ریزش شبکه و واحدها را افزایش دهد.
واژگان کلیدی: بار صنعتی، ریزش شبکه صنعتی، مدیریت انرژی، پاسخ‌گویی بار، بازار انرژی و خدمات جانبی.	

۱- مقدمه

استفاده از برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا^۴ (DSM) مورد توجه بوده است. بخش صنعت با داشتن سهم قابل توجهی از انرژی مصرفی می‌تواند یک گزینه مناسب جهت اجرای این برنامه‌ها باشد. هرچند این امر به دلیل وجود پیوستگی در زنجیره تولید و پیچیدگی فرآیندهای صنعتی، چندان موفق نبوده است. در این مقاله با مدل سازی کامل فرآیندهای صنعتی پرکاربرد با مصرف انرژی بالا در واحدهای صنعتی آلومینیوم و سیمان، برنامه‌هایی پیشنهاد می‌شود که امکان اجرا و توسعه را با کارایی و سادگی بیشتر

دهه اخیر، عصر توسعه اقتصادی و صنعتی جهان بوده و روند توسعه در طول این دهه سرعت و شدت بیشتری گرفته است. انرژی الکتریکی، به عنوان یک انرژی پاک با افزایش تقاضا در سال‌های اخیر روبرو بوده است. این روند به خصوص در صنعت با سرعت چشمگیری در حال افزایش است. این در حالی است که تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی هزینه‌بر بوده و از لحاظ فنی محدودیت‌هایی دارد [۱]. بنابراین در سال‌های اخیر کاهش مصرف انرژی با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aghasemi@jssu.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه

صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

۲. استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور

دزفول، ایران

^۳ Linear piece-wise approximation

^۴ Demand side management

داشته باشد.

مرور مقالات

مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به سه دسته عمده مسکونی، تجاری و صنعتی تقسیم‌بندی می‌شوند. طبق آمار، بخش صنعت بیشترین مصرف انرژی تولید شده را دارا می‌باشد [۲]. بهسازی مصرف انرژی و ارتقاء سطح کیفی مصرف در یک واحد صنعتی، با توجه به مشخص بودن میزان انرژی لازم برای تولید محصول در طراحی و یا شرایط بهینه، با کاهش تلفات آغاز و سپس با بهسازی فرآیند، مدیریت بار و انرژی، افزایش راندمان تجهیزات با ایجاد تغییر تا تعویض تجهیز، افزایش بازیابی حرارتی و غیره ادامه می‌یابد. در واقع ممیزی انرژی نقطه شروع دستیابی به حالت بهینه مصرف در یک واحد صنعتی می‌باشد. عموماً در گذشته بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت، بر کاهش کلی بار با تشویق به استفاده از فناوری‌ها و دستگاه‌های پر بازده‌تر متمرکز بوده است. البته امروزه، با توسعه برنامه‌های مدیریت مصرف راه‌کارهای مدیریت سمت تقاضای انرژی به‌روزرسانی شده است [۳]. غالباً مصرف‌کننده صنعتی، تقاضای الکتریکی خود را به وسیله ذخیره‌سازی انرژی، جابه‌جایی بار، قطع بار غیر ضروری مانند روشنایی، تهویه و یا قطع موقت یک یا چند فرآیند قابل کنترل مدیریت می‌کند [۴]. هرچند دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی در مقیاس بزرگ مورد نیاز صنعت از لحاظ اقتصادی راه حل مناسبی نمی‌باشند. بنابراین، به‌کارگیری برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DR) می‌تواند به عنوان بهترین گزینه جهت بهره‌وری بیشتر صنایع مطرح باشد [۵]. طبق بیان وزارت انرژی ایالات متحده^۱، مفهوم پاسخ‌گویی بار به عنوان تغییر الگوی مصرف انرژی الکتریکی معمول توسط مصرف‌کنندگان نهایی در پاسخ به تغییرات قیمت الکتریسیته یا پرداخت‌های تشویقی، تعریف می‌شود [۶].

طبق گزارشات بسیاری از سازمان‌ها، ۲ تا ۱۰ درصد مصرف‌کنندگان موجود در بخش صنعتی ۸۰٪ کل انرژی را مصرف می‌کنند [۷]، بنابراین، در مقایسه با مشترکین بخش‌های مسکونی یا تجاری، انتظار می‌رود مصرف‌کنندگان صنعتی به منظور اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بیشتر مورد توجه باشند [۸]. هرچند، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که این امر در حال حاضر به صورت معکوس است [۸]. زیرا هرگونه

قطع برق در یک واحد صنعتی ممکن است منجر به متوقف شدن تولید، کاهش بهره‌برداری روزانه و یا نقض قیود تولیدی واحدهای صنعتی شود. همچنین، در برخی موارد این فرآیندها وابسته به هم هستند که مجزا نگه داشتن یا ایجاد وقفه در آن‌ها را سخت می‌کند. در برخی موارد دیگر، مواد باید برای هر روند قطع، ذخیره شوند و این عملیات سخت و هزینه‌بر می‌باشد. بنابراین همچنان از قابلیت مشارکت بخش صنعتی در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، به صورت کامل استفاده نشده است. این در حالی است که در محیط‌های صنعتی زیرساخت‌هایی همچون تجهیزات کنترلی، اندازه‌گیری و ارتباطی وجود دارد که از جمله الزامات اجرای موفق برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. همچنین اکثر بارهای صنعتی قادر به تنظیم پروفیل بار مصرفی و ایجاد تغییر سریع و در بار خود بوده و در پی افزایش سود یا کسب منافع اقتصادی بیشتر، پیچیده‌تر شدن فرایند برنامه‌ریزی خود را جهت مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌پذیرند [۹]. از جمله بارهای صنعتی که به دلیل داشتن زیرساخت‌های لازم و مصرف بالا، به صورت بالقوه پتانسیل بیشتری جهت مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دارند، صنایع آلومینیوم و صنایع سیمان می‌باشند. مشارکت این بارهای صنعتی در مدیریت انرژی شبکه با بهره‌گیری از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، فقط به جابه‌جایی قله مصرف منجر نمی‌شود، بلکه آن‌ها می‌توانند به صورت فعال خدمات جانبی از جمله ذخیره‌ی چرخان و تنظیمات را برای شبکه فراهم آورند [۱۰].

مرجع [۱۱] به مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی یک کارخانه آلومینیوم و افزایش سودهای آن از طریق مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و خدمات جانبی پرداخته است. در این مطالعه با استفاده از روش LPWA فرآیندهای مصرف یک کارخانه آلومینیوم مدل‌سازی شده و محدودیت‌های مربوط به آن در نظر گرفته شده است [۱۱]. همچنین، مرجع [۱۲] به بررسی فراهم‌سازی خدمات بهینه تنظیمات در صنایع آلومینیوم با استفاده از روش AGC^۳ پرداخته است. نتایج این بررسی افزایش فراهم‌آوری خدمات تنظیم را نشان می‌دهد ولی چگونگی مشارکت کارخانه در سایر برنامه‌های خدمات جانبی در این مقاله بررسی نشده است. مرجع [۱۳] به بررسی فرآیند تولیدی یک کارخانه

^۱ Automatic gain control

^۱ United States Department of Energy

^۲ Demand response

صنایع در کنار هم می‌تواند شرایط بهره برداری از شبکه را از لحاظ اقتصادی و امنیتی تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله به منظور نزدیک شدن به شرایط واقعی و بهره‌وری هرچه بیشتر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ابتدا یک مدل کامل از کارخانه‌های آلومینیوم و سیمان ارائه شده است. سپس مدل ارائه شده در یک برنامه‌ریزی مدیریت انرژی روز بعد یک ریزش شبکه شامل این کارخانه‌ها به کار گرفته شده است. هدف از این برنامه افزایش بهره‌وری واحدهای صنعتی مورد بررسی در برنامه‌های مدیریت بار از طریق مشارکت در بازارهای انرژی و ارائه خدمات جانبی می‌باشد. بنابراین نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- مدل‌سازی کامل کارخانه‌های صنعتی با در نظر گرفتن قیود و محدودیت‌های مربوط به آن‌ها در مجاورت یکدیگر و در غالب یک ریزش شبکه صنعتی.
 - مشارکت صنایع مذکور در بازار انرژی و خدمات جانبی از طریق مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار.
 - بررسی میزان تأثیر سود حاصل از فروش محصول یک صنعت و قیمت‌های بازار برق بر سود نهایی صنعت مذکور با استفاده از تحلیل حساسیت.
- مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله به یک مسئله MINLP منجر شده است که با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است. ادامه مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲، مدل‌سازی کامل اجزای ریزش شبکه صنعتی در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. در بخش ۳ فرمول نویسی ریاضی مربوط به بهینه‌سازی مدیریت انرژی ریزش شبکه مذکور ارائه می‌شود و در بخش ۴، مدل پیشنهادی توسط سیستم تست مورد مطالعه اعمال شده و تأثیر اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر واحدهای صنعتی بررسی شده و نتایج نمونه‌های مطالعاتی با یکدیگر مقایسه شده است. در ادامه به بحث و بررسی شاخص‌های فنی و اقتصادی پرداخته شده است و تأثیر سود حاصل از فروش محصول هر کارخانه و قیمت‌های فروش انرژی بر سود نهایی واحدهای صنعتی مذکور، توسط آنالیز حساسیت بررسی شده است. در پایان، نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات، ارائه شده است.

سیمان تحت تعرفه‌ی TOU برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخته است. نتایج چگونگی جابه‌جایی بار این کارخانه جهت بهبود پیک بار کلی شبکه را نشان می‌دهد، هر چند مدل کاملی از فرآیندهای این صنعت ارائه نشده است [۱۳]. همچنین مرجع [۱۴] به بررسی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت‌گذاری زمان واقعی^۱ (RTP) در یک کارخانه سیمان پرداخته است. نتایج به دست آمده از این مقاله بهبود پروفیل بار شبکه را نسبت به سایر تعرفه‌های پیشنهادی نشان می‌دهد. هر چند خدمات جانبی در این مقاله مد نظر نبوده است. مرجع [۱۵] به بررسی بهینه‌سازی ریزش شبکه صنعتی شاداب در تهران پرداخته است. هدف مقاله کاهش هزینه‌های تأمین توان ریزش شبکه و افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر می‌باشد. البته پروفیل بار ریزش شبکه مورد بررسی به صورت کلی لحاظ شده است و مدل کاملی از فرآیندهای صنعتی ارائه نشده است. همچنین مرجع [۱۶] به بررسی مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری یک نیروگاه توان مجازی^۲ (VPP) از جنبه‌های مختلفی همچون روش‌های حل و انواع برنامه‌های قیمت‌گذاری پاسخ‌گویی بار پرداخته است. بارهای موجود در این نیروگاه مجازی بارهای بزرگ صنعتی می‌باشند، هر چند در این مطالعه نیز پروفیل بار به صورت کلی لحاظ شده و مدل کامل فرآیندهای صنعتی و محدودیت‌های مربوط به آن در نظر گرفته نشده است. نویسندگان در مرجع [۱۷] به بررسی برنامه مدیریت انرژی یک ریزش شبکه صنعتی تحت تعرفه قیمت‌گذاری روز بعد^۳ (DAP) پرداخته‌اند. برنامه در دو حالت اتصال ریزش شبکه به شبکه اصلی و عدم اتصال به شبکه اصلی بررسی شده است. البته نوع صنایع موجود در ریزش شبکه، مدل‌سازی فرآیندهای صنعتی و محدودیت‌های مربوط به آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

در تمامی کارهای ارزشمند فوق مدل‌سازی کاملی جهت بهینه‌سازی مدیریت انرژی صنایع سیمان جهت مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه نشده است. همچنین بهینه‌سازی مدیریت انرژی هر واحد صنعتی به صورت کاملاً مجزا در نظر گرفته شده است. این در حالی است که معمولاً مصرف‌کنندگان صنعتی در اطراف کلان شهرها در مجاورت هم قرار گرفته‌اند که مجموعاً یک ریزش شبکه صنعتی را تشکیل می‌دهند. در نتیجه چگونگی مصرف انرژی این

⁴ Day ahead pricing

² Real time pricing

³ Virtual power plant

۲- اجزای ریز شبکه

۲-۱- صنایع

واحدهای صنعتی موجود در ریز شبکه شامل صنایع آلومینیوم و سیمان می‌باشد. به منظور بررسی مشارکت واحدهای صنعتی ریز شبکه مذکور در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و خدمات جانبی، فرآیندها و تجهیزات این واحدهای صنعتی، به صورت عمده به سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. نوع اول، فرآیندهای غیر قابل جابه‌جا شدن^۱ می‌باشند. در این فرآیندها امکان جابه‌جایی بار از نظر زمانی وجود ندارد. نام دارند. در این دسته علاوه بر جابه‌جایی زمانی بار امکان تغییر تقاضای انرژی فرآیند نیز وجود دارد. تقاضای انرژی فرآیندهای موجود در این دسته بسته به شرایط بهره‌برداری قابل تنظیم می‌باشد این تغییر می‌تواند در بازه‌ی گسسته یا پیوسته صورت گیرد. روش مدل‌سازی پیشنهادی و پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار در هر کدام از این واحدهای صنعتی در ادامه ارائه شده است.

۲-۱-۱- مدل‌سازی فرآیندهای واحد صنعتی آلومینیوم

فرآیند ذوب آلومینیوم در واقع فرآیند الکترولیت، فرآیند تبدیل آلومینا به آلومینیوم می‌باشد، که به عنوان ماده اولیه برای صنایع گوناگونی از جمله صنایع ساخت ماشین تا صنایع کنسروسازی به شمار می‌رود [۱۸]. این فرآیند در ظرف‌هایی سلول مانند و توسط ولتاژ DC انجام می‌شود. همچنین علاوه بر ماده‌ی اصلی آلومینا برخی مواد دیگر به منظور افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی به ظرف اضافه می‌شود. سلول‌ها به صورت سری به هم متصل شده تا یک خط ذوب را تشکیل دهند، هر خط ذوب می‌تواند متشکل از صدها سلول باشد. توان مصرفی کلی هر خط ذوب می‌تواند حدود صدها مگاوات باشد. به صورت معمول چندین خط ذوب در یک کارخانه‌ی آلومینیوم وجود دارد [۱۹].

تنظیم مصرف توان یک خط ذوب می‌تواند به صورت دستی و یا توسط تنظیم ولتاژ خروجی یکسوساز که جریان DC مورد نیاز خط ذوب را فراهم می‌کند، صورت پذیرد. به این طریق، نرخ مصرف توان می‌تواند به سرعت و دقت تنظیم شود. همچنین می‌توان انعطاف‌پذیری این بارها را از طریق خروج کامل خط ذوب به وسیله‌ی یک کلید قدرت ایجاد

تقاضای انرژی این دسته باید تحت هر شرایطی و بدون وابستگی به تعرفه برق، تأمین شود. نوع دوم، فرآیندهای قابل جابه‌جایی^۲ می‌باشند. تقاضای انرژی این دسته می‌تواند می‌تواند به منظور برقراری تعادل عرضه و تقاضا فراهم نشود و به زمان دیگری انتقال یابد. در این دسته فقط امکان جابه‌جایی زمانی بار وجود داشته و تقاضای انرژی فرآیند مورد نظر قابل تغییر نمی‌باشد، به بیان دیگر هر دستگاه فقط می‌تواند در حالت بهره‌برداری روشن یا خاموش باشد. نوع سوم، فرآیندهای کنترل‌پذیر

کرد. هرچند هنگام ایجاد انعطاف‌پذیری بار، چه از طریق کنترل یکسوساز یا خروج کامل خط ذوب توسط کلید قدرت، تعادل دمایی خط ذوب جهت اطمینان از بهره‌برداری امن کارخانه باید برقرار شود. انعطاف‌پذیری ذوب‌کننده در صنعت آلومینیوم، این صنعت را به یک منبع مناسب جهت پاسخ‌گویی بار تبدیل کرده است. در طی مصرف کم سایر بخش‌های صنعت آلومینیوم از مدل‌سازی سایر بخش‌ها صرف‌نظر شده و به مدل‌سازی کوره ذوب این صنعت پرداخته شده است. در این مقاله مشابه مرجع [۱۱]، کنترل ذوب از طریق یکسوساز در نظر گرفته شده است، بنابراین این فرآیند از نوع فرآیندهای کنترل‌پذیر می‌باشد. روابط و معادلات برگرفته از مرجع [۱۱] جهت مدل‌سازی واحد صنعتی آلومینیوم با استفاده از روش LPWA در ادامه آمده است. معادله‌ی (۱) نمایانگر میزان توان مصرفی هر خط ذوب در کارخانه آلومینیوم می‌باشد. اندیس l تعداد خطوط ذوب موجود در کارخانه در نظر گرفته شده است. λ_h بیانگر هزینه انرژی و ρ_h نمایانگر ضریب هزینه زرو چرخان می‌باشد. $P_{a,l,h}$ نمایانگر سطح مصرف توان هر خط ذوب بوده که زیروند h در آن، نمایانگر ساعات روز می‌باشد. مصرف توان هر فرآیند توسط پارامترهای $P_{a,l}^{\min}$ و $P_{a,l}^{\max}$ محدود می‌شود که بیانگر بیشترین میزان انعطاف‌پذیری کارخانه و محدودیت‌های مربوط به آن به منظور بهره‌برداری مطمئن و ایمن می‌باشد. بازدهی فروش محصولات کارخانه توسط مدل LPWA مدل شده است، در نتیجه مقادیر $P_{a,l,h}$ هم تحت این روش در نظر گرفته شده است. تعداد بخش‌های مدل n_l بوده و پارامترهای

² Shiftable equipment³ controllable equipment¹ Non-shiftable equipment

درصدی یا بیشتر خود از بار پایه طرح تشویقی متناسب با میزان P_{deca} دریافت می‌کند. AW_a متغیر باینری برنامه تشویقی می‌باشد. μ_a ضریب قیمت طرح تشویقی یا تنبیهی می‌باشد.

$$R_a = \sum_h \lambda_h (E_{a,h} + \rho_h V_{a,h} + \mu_a (AW_a) P_{deca} + \mu_a (Pn_a) P_{deca}) \quad \forall l, h \quad (6)$$

$$P_{a,h} = \sum_l P_{a,l,h} \quad \forall l, h \quad (7)$$

$$P_{deca,h} = P_{base} - P_{a,h} \quad (8)$$

طبق معادله (۹) سود ناشی از فروش محصولات آلومینیومی توسط روش LPWA مدل شده است.

$$Pr_a = \sum_h \sum_l \sum_{i=1}^{n_l} (c_{a,l,i} N_{a,l,h,i} + b_{a,l,i} \Delta P_{a,l,h,i}) \quad (9)$$

سود ناشی از فروش محصولات در هر بخش انرژی میزان ثابتی فرض شده است که با $c_{a,l,i}$ نشان داده می‌شود. فرض شده است، سود کلی ناشی از هر بخش انرژی متناسب با حد چپ آن می‌باشد. همچنین $b_{a,l,i}$ در بخش نام انرژی، نمایانگر سود ناشی از محصولات اضافی خط تولید نام از حد چپ همان بخش انرژی می‌باشد. به این طریق می‌توان تفاوت سود محصولات در سطح توان‌های مختلف هر خط ذوب را مدل کرد.

همان‌گونه که بیان شد، تعادل دمایی مهم‌ترین مساله در فراهم‌آوری انعطاف‌پذیری خط ذوب می‌باشد، همچنین دمای سلول‌ها به منظور بازدهی بالای ذوب و امنیت بهره‌برداری باید در حد مطلوبی باقی بماند. بدین منظور همان‌گونه که در معادله (۱۰) نشان داده شده است، مصرف توان در طی هر τ_l ساعت کار دستگاه باید بیشتر از E_l^f باشد.

$$\sum_{h'=h}^{h+\tau_l-1} (P_{a,l,h'} - V_{a,h}) \geq E_l^f \quad \forall l, h \quad (10)$$

E_l^f کمترین انرژی مورد نیاز در h' ساعت کار خط ذوب است تا دما در حد مطلوب باقی بماند. توجه شود که معادله (۱۰) حتی هنگامی که ذخیره‌ی چرخان توسط اپراتور شبکه فراخوانی و به شبکه متصل شود برقرار می‌باشد.

همچنین، فرض شده کارخانه قابلیت ذخیره‌سازی دارد، در نتیجه در زمانی که کارخانه در حال بهره‌برداری می‌باشد انعطاف‌پذیری لازم را دارا بوده، که متناسب با میزان

صعودی $\{\alpha_{a,l,1}, \dots, \alpha_{a,l,n+1}\}$ بیانگر بخش‌های مختلف آن هستند. در نظر داشته باشید که $\alpha_{a,l,1}$ و $\alpha_{a,l,n+1}$ به ترتیب برابر مقادیر $P_{a,l}^{\max}$ و $P_{a,l}^{\min}$ می‌باشند. همان‌گونه که در معادله (۲) نشان داده شده است، متغیر پیوسته $\Delta P_{a,l,h,i}$ میزان توان اضافی $P_{a,l,h}$ از بخش نام انرژی را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به معادله (۳)، متغیر باینری $N_{a,l,h,i}$ مشخص می‌کند که آیا توان در بخش نام انرژی قرار دارد یا خیر، و مجموع آن حول ۱ برابر می‌باشد. (۱)

$$P_{a,l,h} = \sum_{i=1}^{n_l} (a_{a,l,i} N_{a,l,h,i} + \Delta P_{a,l,h,i}) \quad \forall l, h$$

$$0 \leq \Delta P_{a,l,h,i} \leq (a_{a,l,i+1} - a_{a,l,i}) N_{a,l,h,i} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_l} N_{a,l,h,i} = 1 \quad \forall l, h \quad (3)$$

به منظور ساده‌سازی، فرض شده $\sum_l P_l^{\max}$ برابر توان قراردادی در قرارداد بلند مدت با شبکه می‌باشد. از این رو کارخانه در صورتی امکان فروش توان به شبکه را دارد که مصرف توان آن کمتر از میزان $\sum_l P_l^{\max}$ باشد. به بیان دیگر کمتر از میزان قراردادی مصرف کند. از این رو، میزان طبق معادله (۴) انرژی قابل فروش به بازار $E_{a,h}$ به صورت زیر مدل می‌شود:

$$E_{a,h} = \sum_l (P_{a,l}^{\max} - P_{a,l,h}) \quad \forall l, h \quad (4)$$

میزان ذخیره‌ی چرخان قابل ارائه، وابسته به توانایی ذوب کننده در کاهش میزان مصرف انرژی می‌باشد. از این رو میزان ذخیره‌ی چرخان قابل فروش طبق معادله (۵) مدل می‌شود. البته، در طی احتمال کم وقوع اتصال ذخیره‌ی چرخان با شبکه، مسائل اقتصادی مربوط به اتصال این خدمات به شبکه در نظر گرفته نشده است. این امر نیازمند بررسی در بازه‌های زمانی طولانی‌تری می‌باشد.

$$V_{a,h} \leq \sum_l (P_{a,l,h} - P_{a,l}^{\min}) \quad \forall l, h \quad (5)$$

سود ناشی از مشارکت در بازارهای انرژی طبق معادله (۶) محاسبه می‌شود. P_{deca} تفاضل توان پایه از توان مصرفی کارخانه می‌باشد. کارخانه در ازای مصرف توان بیش از حد پایه جریمه می‌شود. در این صورت Pn_a متغیر باینری جریمه، ۱ شده و متناسب با میزان P_{deca} کارخانه جریمه می‌شود. همچنین کارخانه در صورت کاهش بار ۱۵

بیانگر میزان توان مصرفی کارخانه در هر ساعت می‌باشد. اندیس 1 بیانگر فرآیندهای موجود در برنامه و اندیس j بیانگر تعداد حالات بهره‌برداری از هر فرآیند در این کارخانه می‌باشد. همان‌گونه که در جدول (۳) نشان داده شده است، j در برنامه‌های غیر قابل جابه‌جایی برابر ۱، در برنامه‌های قابل جابه‌جایی برابر ۲ و در برنامه‌های کنترل پذیر برابر ۳ می‌باشد. $a_{c,j,l}$ بیانگر میزان توان مصرفی هر دستگاه در حالت بهره‌برداری مورد نظر می‌باشد.

$$P_{c,i,h} = \sum_{j=1}^{n_j} (a_{c,j,i} N_{c,j,i,h}) \quad \forall i, h \quad (12)$$

$$P_{c,h} = \sum_i P_{c,i,h} \quad \forall i, h \quad (13)$$

همان‌گونه که در معادله (۱۴) مشاهده می‌شود، متغیر باینری $N_{c,j,i,h}$ مشخص می‌کند توان هر دستگاه در کدام حالت بهره‌برداری قرار دارد و مجموع آن حول 1 برابر می‌باشد.

$$\sum_{j=1}^{n_j} N_{c,j,i,h} = 1 \quad \forall i, h \quad (14)$$

معادله (۱۵) بیانگر حد بیشینه و کمینه تولید محصول در طول روز توسط واحد صنعتی سیمان می‌باشد.

$$E_{c,d}^{\min} \leq \sum_{h,i} P_{c,i,h} \leq E_{c,d}^{\max} \quad (15)$$

R_c بیانگر سود ناشی از مشارکت واحد صنعتی سیمان در برنامه‌های خدمات جانبی می‌باشد، که شامل سود ناشی از فروش انرژی به بازار ($E_{c,h}$)، ارائه‌ی ذخیره‌ی چرخان ($V_{c,h}$) و طرح تشویقی و تنبیهی حد مجاز مصرف می‌باشد که در معادلات (۱۶) تا (۱۸) بیان شده است. همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، کارخانه در ازای مصرف توان بیش از حد پایه جریمه می‌شود. این جریمه متناسب با میزان P_{decc} می‌باشد. همچنین کارخانه در صورت کاهش بار خود تا ۱۵ درصد بار پایه طرح تشویقی متناسب با میزان P_{decc} دریافت می‌کند. با توجه به معادله (۱۹)، P_{decc} تفاضل بار پایه از بار مصرفی در هر ساعت می‌باشد. متغیرهای باینری یا Aw_c و Pn_c به ترتیب بیانگر وجود طرح تشویقی یا تنبیهی و μ_c ضریب قیمت این طرح‌ها می‌باشد.

$$R_c = \lambda_h (E_{c,h} + \rho_h V_{c,h} + \mu_c (Aw_c) P_{decc} + \mu_c (Pn_c) P_{decc}) \quad \forall i, h \quad (16)$$

محصولات تولیدی در طول روز است و با معادله (۱۱) مشخص می‌شود:

$$E_{a,d}^{\min} \leq \sum_{h,l} P_{a,l,h} \leq E_{a,d}^{\max} \quad (11)$$

$E_{a,d}^{\min}$ و $E_{a,d}^{\max}$ کمینه و بیشینه مصرف انرژی بوده، که متناسب با کمینه و بیشینه محصولات تولیدی کارخانه می‌باشد.

۲-۱-۲- مدل‌سازی فرآیندهای واحد صنعتی سیمان بر اساس روش LPWA

پتانسیل بالایی جهت اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در کارخانه‌های سیمان، مخصوصاً در پردازش‌های غیر پیوسته مانند استخراج سنگ معدن، واحدهای تولید مواد خام و واحدهای سوخت وجود دارد. در واحد صنعتی سیمان اگر مصرف انرژی را در حالت کلی در نظر بگیریم، کوره فرآیند غالب مصرف انرژی محسوب می‌شود. به صورت کلی پتانسیل کارخانه‌های سیمان برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، متکی بر میزان ذخیره موجودی است که می‌تواند در فرآیندهای مختلف به کار گرفته شود. کارخانه‌هایی با مقدار ظرفیت ذخیره‌سازی کمتر، انعطاف‌پذیری کافی جهت تغییر بار را ندارند [۲۰]. به صورت کلی در یک کارخانه سیمان در طی فرآیند تولید، کوره باید به صورت پیوسته فعال باشد، در حالی که زمان بهره‌برداری با صرفه و اقتصادی واحدهای تولید مواد خام، سنگ معدن و محصول نهایی سیمان می‌تواند به صورت دلخواه تنظیم شود. به منظور ارائه مدل کاملی از فرآیندها و محدودیت‌های واحدهای صنعتی سیمان، در این مقاله یک مدل جدید از فرآیند تولید سیمان تحت روش LPWA صورت گرفته است. در این مقاله فرآیند تولید سیمان به ۴ مرحله اساسی با مصرف انرژی بالا (۱) خردسازی سنگ سیمان، (۲) آماده‌سازی وعده‌های خام، (۳) کوره و (۴) بسته‌بندی تولیدات سیمان، دسته‌بندی شده است. بدیهی است در طی مصرف انرژی الکتریکی پایین سایر بخش‌های این صنعت از مدل‌سازی آن‌ها صرف نظر شده است. با توجه به مطالب گفته شده، کوره در دسته فرآیندهای غیر قابل جابه‌جا شدن، فرآیندهای بسته‌بندی محصولات سیمان و آماده‌سازی وعده‌های خام در دسته فرآیندهای جابه‌جایی‌پذیر و خردسازی سنگ سیمان در دسته فرآیندهای کنترل‌پذیر قرار می‌گیرد. فرض شده ظرفیت کافی به منظور ذخیره‌سازی محصولات وجود دارد. معادلات (۱۲) و (۱۳)

$$\max R + Pr \quad (21)$$

$$R = R_a + R_c \quad (22)$$

$$Pr = Pr_a + Pr_c \quad (23)$$

مقادیر R_a, R_c به ترتیب نمایانگر سود ناشی از مشارکت در برنامه‌های خدمات جانبی کارخانه‌های آلومینیوم، فولاد و سیمان، و همچنین Pr_a, Pr_c نمایانگر سود ناشی از فروش محصولات تولیدی توسط این دو واحد صنعتی می‌باشد.

۳-۲- قیود بهره‌برداری از ریزشبكة

جهت افزایش اطمینان و همچنین مشارکت شبکه در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، ریزشبكة به شبکه بالادستی نیز متصل شده است، تا در صورت نیاز قادر به تبادل توان با شبکه بالادستی باشد. معادلات (۲۴) و (۲۵) قیود مربوط به تعادل توان اکتیو و راکتیو ریزشبكة می‌باشد. در این معادلات $Q_{i,n}$ و $P_{i,n}$ به ترتیب بیانگر توان اکتیو و راکتیو و $Q_{Dem,n}^h$ و $P_{Dem,n}^h$ به ترتیب بیانگر توان اکتیو و راکتیو مصرفی هر شین ریزشبكة در هر ساعت می‌باشد. v_n^h اندازه‌ی ولتاژ و δ_n^h زاویه‌ی متناسب با آن در هر شین می‌باشد. همچنین $|y_{n,m}|$ و $\theta_{n,m}$ بیانگر اندازه و زاویه‌ی ادیتمانس بین دو شین n و m می‌باشد.

$$P_{i,n} - P_{Dem,n}^h = \sum_m |v_n^h| |v_m^h| |y_{n,m}| \cos(\theta_{n,m} + \delta_m^h - \delta_n^h) \quad (24)$$

$$Q_{i,n} - Q_{Dem,n}^h = -\sum_m |v_n^h| |v_m^h| |y_{n,m}| \sin(\theta_{n,m} + \delta_m^h - \delta_n^h) \quad (25)$$

قیود مربوط به محدودیت میزان ولتاژ و توان هر شین ریزشبكة توسط معادله‌ی (۲۶) و (۲۷) مدل می‌شود.

$$V_n^{\min} \leq V_n^h \leq V_n^{\max} \quad (26)$$

$$P_n^{\min} \leq P_n^h \leq P_n^{\max} \quad (27)$$

روابط مربوط به محاسبات پخش بار به دلیل محاسبه میزان تلفات موجود خطوط ریزشبكة صنعتی و همچنین محاسبه میزان توان قابل خریداری از هر نقطه اتصال به شبکه ضروری می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

به منظور ارزیابی مدل و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پیشنهاد شده در این مقاله، یک ریزشبكة با ساختار نشان داده شده در شکل (۲) در نظر گرفته شده است. این ریزشبكة برگرفته از شبکه تست ۹ شین استاندارد IEEE می‌باشد، که در

$$E_{c,h} = \sum_i (P_{c,i}^{\max} - P_{c,i,h}) \quad \forall i, h \quad (17)$$

$$V_{c,h} \leq \sum_i (P_{c,i,h} - P_{c,i}^{\min}) \quad \forall i, h \quad (18)$$

$$P_{decc,h} = P_{base,c} - P_{c,h} \quad (19)$$

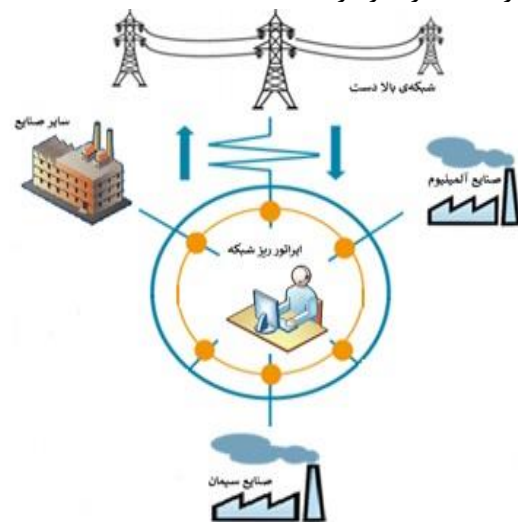
معادله (۲۰) بیانگر سود ناشی از تولید محصول واحد سیمان می‌باشد. $c_{c,j,i}$ نمایانگر هزینه هر دستگاه در حالت بهره‌برداری مورد نظر می‌باشد.

$$Pr_c = \sum_h \sum_i \sum_{j=1}^{nj} (c_{c,j,i} N_{s,j,i,h}) \quad (20)$$

۳- فرمول نویسی ریاضی مدل پیشنهادی

۳-۱- تابع هدف

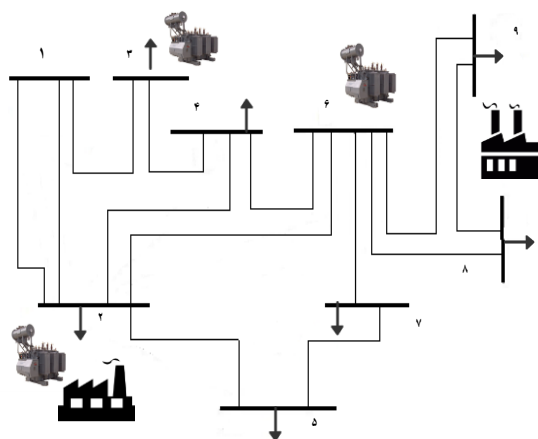
ریزشبكة ارائه شده در این مقاله یک ریزشبكة صنعتی دارای دو واحد صنعتی آلومینیوم و سیمان، و همچنین بارهای محلی می‌باشد که ساختار کلی این مجموعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مقاله، برنامه‌ی پیشنهاد انرژی و خدمات جانبی (ذخیره‌ی چرخان) برای کارخانه‌های موجود در ریزشبكة به منظور مشارکت در بازارهای برق یک روز بعد طراحی شده است. همچنین طرح پاسخ‌گویی بار تشویقی و تنبیهی برای میزان مصرف این کارخانه‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- اجزای ریزشبكة مورد بررسی

تابع هدف برنامه‌ریزی بهینه، بیشینه‌سازی سود ناشی از کارخانه‌های موجود در این ریزشبكة می‌باشد، که طبق معادله‌ی (۲۱) این سود متشکل از سود ناشی از مشارکت در بازارهای برق از طریق برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (R) و سود ناشی از فروش محصولات تولید شده (Pr) می‌باشد.

گیگابایت به ترتیب ۰/۰۹۲ و ۰/۰۹۴ ثانیه برآورد شده است.



شکل ۲- شمای ریزشبه تحت بررسی

جدول ۱- پارامترهای خط ذوب کارخانه آلومینیوم

l	$P_{a,l}^{\min}$ [MWh]	$P_{a,l}^{\max}$ [MWh]	τ_l [h]	E_l^r [MWh]
۱	۳۰	۷۰	۴	۱۸۵
۲	۴۰	۶۰	۳	۱۳۰

۴-۲- نمونه‌های مطالعاتی

نمونه مطالعاتی ۱

در نمونه مطالعاتی ۱ به بررسی چگونگی مصرف انرژی ریزشبه و واحدهای صنعتی موجود در آن پرداخته شده است. در این نمونه مطالعاتی اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته نشده است. میزان مصرف انرژی واحدهای صنعتی آلومینیوم، سیمان، بارهای صنعتی کوچک و بار کلی ریزشبه در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به دلیل عدم وجود برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و محدودیت در مصرف توان، واحدهای صنعتی جهت ایجاد منافع مالی بیشتر، هدف خود را تولید بیشینه محصول قرار داده و در نتیجه توان مصرفی واحدهای صنعتی در حد بیشینه خود قرار می‌گیرد. سود خالص ناشی از واحد صنعتی آلومینیوم و سیمان طبق جدول ۵ به ترتیب ۱۸۸۱۱۲ و ۱۰۴۴۰۰ دلار برآورد شده است. با توجه به جدول ۴ سود حاصله فقط ناشی از فروش محصولات تولید شده توسط واحدهای صنعتی می‌باشد و سود ناشی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در آن نقشی ندارد.

سطح ولتاژ ۱۳۲ kv قرار دارد. ریزشبه از طریق سه شین (GSP)^۱ به شبکه بالا دست خود متصل می‌شود.

۴-۱- داده‌های مسأله

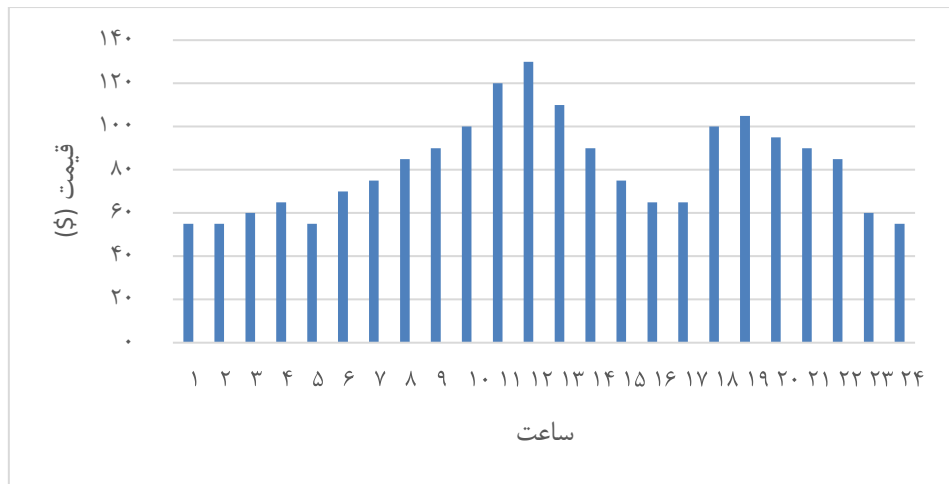
در این مقاله قیمت خرید انرژی بازار از ریزشبه فارغ از هزینه‌های خرید انرژی ریزشبه از بازار در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه‌های خرید انرژی ریزشبه از بازار، در سود خالص ناشی از فروش محصولات هر واحد صنعتی در نظر گرفته شده است. به این صورت که سود خالص واحدهای صنعتی موجود در جداول ۲ و ۴ برابر تفاضل سود ناشی از فروش محصولات تولیدی این واحدهای صنعتی و هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه می‌باشد. اطلاعات واقعی مربوط به قیمت خرید انرژی الکتریکی بازار از ریزشبه در نظر گرفته شده در این مقاله مطابق شکل (۳) مرجع [۱۱] می‌باشد. لازم به ذکر است قیمت‌های ارائه شده مغایرتی با بازارهای برق سایر کشورهای جهان ندارند. برنامه بهینه‌سازی تحت تعرفه قیمت‌گذاری روز بعد و در بازه‌های ۶۰ دقیقه‌ای استفاده می‌شود. هزینه رزرو چرخان ۰/۳ قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی و همچنین هزینه مربوط به طرح‌های تشویقی و تنبیهی، ۰/۱ هزینه خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی در هر ساعت در نظر گرفته شده است. میزان مصرف سایر مشترکین صنعتی موجود در ریزشبه در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین اطلاعات ورودی کارخانه‌های آلومینیوم و سیمان با توجه به فرآیندها و سطح مصرف هر کارخانه به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ برآورد شده است. واحد صنعتی آلومینیوم مورد بررسی در این مقاله دارای دو خط ذوب مجزا می‌باشد که توضیحات مربوط به اطلاعات فنی و اقتصادی این واحد با استناد به مرجع [۱۱] در جدول ۱ و ۲ موجود می‌باشد. همچنین به دلیل نزدیک شدن به شرایط واقعی، تعدادی بار صنعتی کوچک غیر قابل کنترل در ریزشبه در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS^۲ پیاده‌سازی شده است. به منظور تحلیل این مسئله از حل‌گر SBB^۳ استفاده شده است.

زمان شبیه‌سازی در نمونه مطالعاتی ۱ و ۲ با یک رایانه با سرعت پردازنده ۲/۵ گیگا هرتز، Core i7 و RAM ۶

³ Simple branch & bound

¹ Grid supply point

² General algebraic modeling system



شکل ۳- قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی

جدول ۲- پارامترهای مرتبط با میزان سود ناشی از تولید محصولات کارخانه آلومینیوم

L=1	$\{\alpha_i\}$ [MW]	{۴۰،۵۰،۶۰،۷۰،۸۰}
	$\{b_i\}$ [MW / \$]	{۵۶،۵۸،۶۰،۶۲}
	$\{c_i\}$ [\$]	{۱۶۸۰،۲۲۴۰،۲۸۲۰،۳۴۲۰}
L=2	$\{\alpha_i\}$ [MW]	{۴۰،۴۵،۵۰،۵۵،۶۰}
	$\{b_i\}$ [MW / \$]	{۶۶،۶۸،۷۰،۷۲}
	$\{c_i\}$ [\$]	{۲۶۴۰،۲۹۷۰،۳۳۱۰،۳۶۶۰}

جدول ۳- پارامترهای دستگاه‌های موجود در کارخانه سیمان

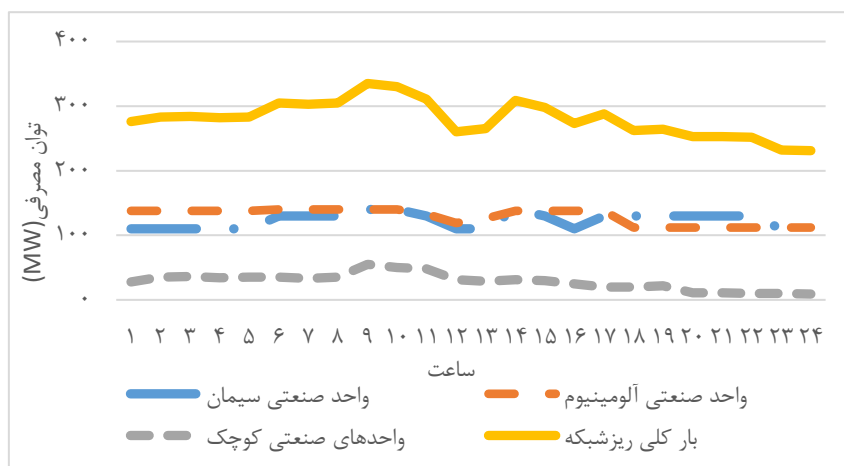
نام دستگاه	نوع فرایند دستگاه	میزان تقاضای انرژی (MW/h)		
		تقاضای ۱	تقاضای ۲	تقاضای ۳
خردسازی سنگ سیمان	فرایندهای کنترل‌پذیر	۰	۴۰	۵۰
آماده‌سازی وعده‌های خام	فرایندهای جابه‌جایی‌پذیر	۰	۳۰	۳۰
کوره	فرایندهای غیر قابل جابه‌جایی	۴۵	۴۵	۴۵
بسته‌بندی تولیدات سیمان	فرایندهای جابه‌جایی‌پذیر	۰	۱۵	۱۵

جدول ۴- میزان سود ناشی از محصولات تولیدی صنایع سیمان

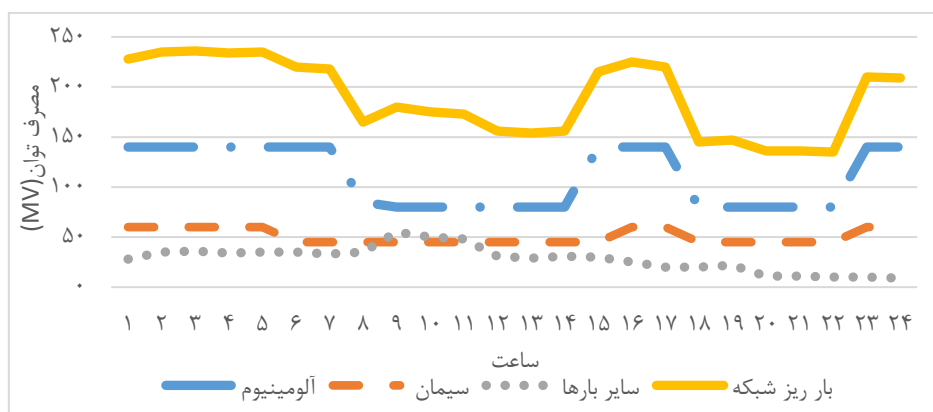
نام دستگاه	نوع فرایند دستگاه	میزان سود ناشی از تولید محصول هر دستگاه (\$)		
		تقاضای ۱	تقاضای ۲	تقاضای ۳
خردسازی سنگ سیمان	فرایندهای کنترل‌پذیر	۰	۲۴۰۰	۲۷۵۰
آماده‌سازی وعده‌های خام	فرایندهای جابه‌جایی‌پذیر	۰	۱۸۰۰	۱۸۰۰
کوره	فرایندهای غیر قابل جابه‌جایی	۲۴۸۰	۲۴۸۰	۲۴۸۰
بسته‌بندی تولیدات سیمان	فرایندهای جابه‌جایی‌پذیر	۰	۱۹۵۰	۱۹۵۰

جدول ۵- سود خالص ناشی از واحدهای صنعتی در نمونه مطالعاتی ۱

	سود کلی (\$)	سود ناشی از فروش محصولات (\$)	سود ناشی از مشارکت در برنامه‌های DR (\$)	میزان توان ارائه شده در بازار (MW)	میزان ذخیره‌ی چرخان فراهم شده (MW)
واحد صنعتی آلومینیوم	۱۸۸۱۱۲	۱۸۸۱۱۲	۰	۰	۰
واحد صنعتی سیمان	۱۰۴۴۰۰	۱۰۴۴۰۰	۰	۰	۰
مجموع	۲۹۲۵۱۲	۲۹۲۵۱۲	۰	۰	۰



شکل ۴- پروفیل بار ریزش‌بکه و واحدهای صنعتی موجود در آن در نمونه مطالعاتی ۱



شکل ۵- پروفیل بار ریزش‌بکه و واحدهای صنعتی موجود در آن در نمونه مطالعاتی ۲

نمونه مطالعاتی ۲

با هدف کاهش قله مصرف ریزش‌بکه صنعتی و همچنین افزایش سوددهی واحدهای صنعتی موجود در آن، در نمونه مطالعاتی دوم به بررسی مشارکت ریزش‌بکه در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. میزان مصرف انرژی ریزش‌بکه و واحدهای صنعتی موجود در آن در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مجموع بار مصرفی ریزش‌بکه و واحدهای صنعتی کاهش یافته است.

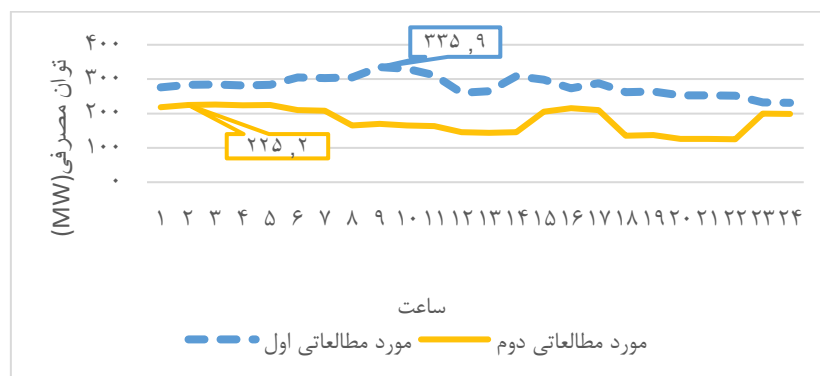
همچنین با توجه به جدول ۶ میزان سود خالص ناشی از واحدهای صنعتی نسبت به نمونه مطالعاتی اول افزایش یافته است، و میزان آن در کارخانه‌های آلومینیوم و سیمان به ترتیب ۲۳۷۸۳۱ و ۲۳۳۲۰۳/۵ دلار برآورد شده است. مطابق جدول ۶ برخلاف نمونه مطالعاتی ۱، سود حاصله متشکل از دو بخش مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و فروش محصولات واحدهای صنعتی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر دو واحد صنعتی در پی افزایش سود

مگاوات کاهش یافته است. با توجه به شکل ۵ میزان توان مصرفی واحدهای صنعتی موجود در ریزشبه در نمونه مطالعاتی دوم به صورت بهینه مشخص شده است. قابل ذکر است، جهت اعتبارسنجی نتایج ارائه شده توسط نرم افزار و راستی آزمایی بهینه بودن این نقاط، نویسندگان به صورت دستی محاسبات مربوط به سود ناشی از توان مصرفی ارائه شده توسط نرم افزار را در تمامی ساعات محاسبه نموده و نتایج حاصله با نتایج ارائه شده توسط نرم افزار همخوانی داشته است.

بیشتر از طریق مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تولید محصولات خود را کاهش داده‌اند. هرچند واحد صنعتی سیمان سهم عمده‌ای از افزایش سود خود را از طریق مشارکت در بازارهای انرژی داشته است، در حالی که واحد صنعتی آلومینیوم تولیدات خود را به میزان کمتری کاهش داده و از طریق فراهم‌آوری ذخیره‌ی چرخان سعی در افزایش منافع خود داشته است. در نتیجه در حالی که مصرف انرژی واحدهای صنعتی و ریزشبه کاهش یافته است، واحدهای صنعتی با افزایش سود کلی مواجه شده‌اند. همچنین مطابق شکل ۶، پیک بار مصرف ریزشبه ۱۱۰

جدول ۶- سود خالص واحدهای صنعتی در نمونه مطالعاتی ۲

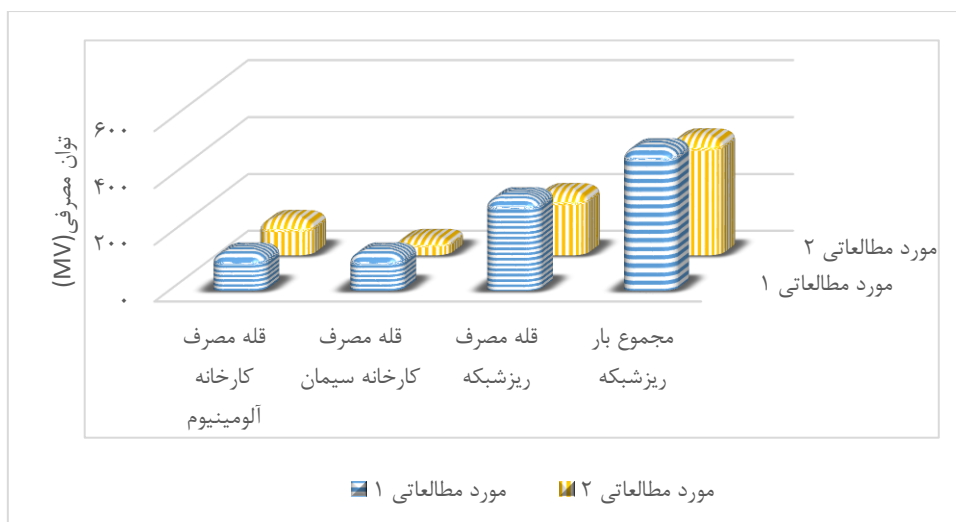
میزان ذخیره‌ی چرخان فراهم شده (MW)	میزان توان ارائه شده در بازار (MW)	سود ناشی از مشارکت در برنامه‌های DR (\$)	سود ناشی از فروش محصولات (\$)	سود کلی (\$)
۷۳۵	۷۰۵	۸۸۲۵۱	۱۴۹۵۸۰	۲۳۷۸۳۱
۱۳۵	۲۱۴۵	۱۹۲۴۰۳,۵	۴۰۸۰۰	۲۳۳۲۰۳,۵
۸۷۰	۲۸۵۰	۲۸۰۶۵۴,۵	۱۹۰۳۸۰	۴۷۱۰۳۴,۵



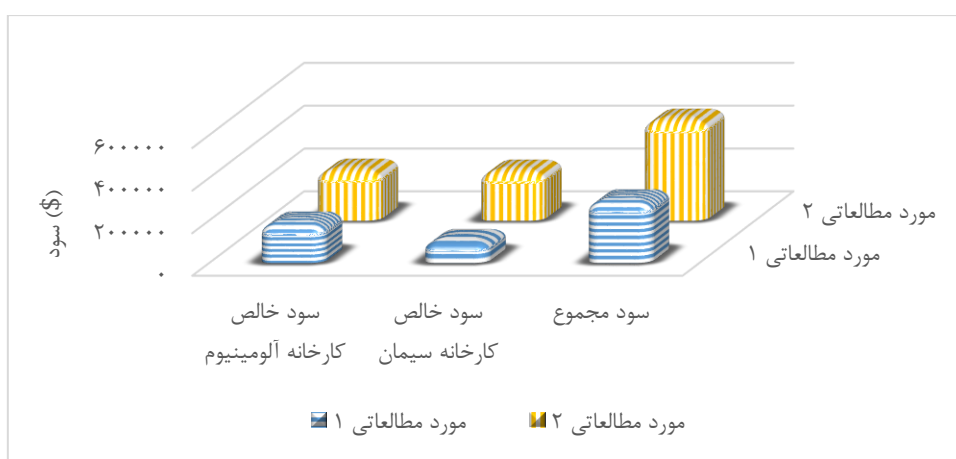
شکل ۶- مقایسه پروفیل بار مصرفی ریزشبه در نمونه مطالعاتی ۱ و ۲

است. همچنین سود واحدهای صنعتی و سود مجموع واحدها در نمونه مطالعاتی دوم افزایش یافته است. هرچند میزان تغییرات در واحد صنعتی سیمان بیشتر بوده و این کارخانه انعطاف‌پذیری بیشتری از خود نشان داده است.

شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب به بررسی شاخص‌های فنی و اقتصادی واحدهای صنعتی موجود در ریزشبه تحت دو نمونه مطالعاتی معرفی شده می‌پردازد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مجموع بار ریزشبه، قله مصرف ریزشبه و قله مصرف واحدهای صنعتی موجود در آن کاهش یافته



شکل ۷- بررسی شاخص های فنی در نمونه مطالعاتی ۱ و ۲

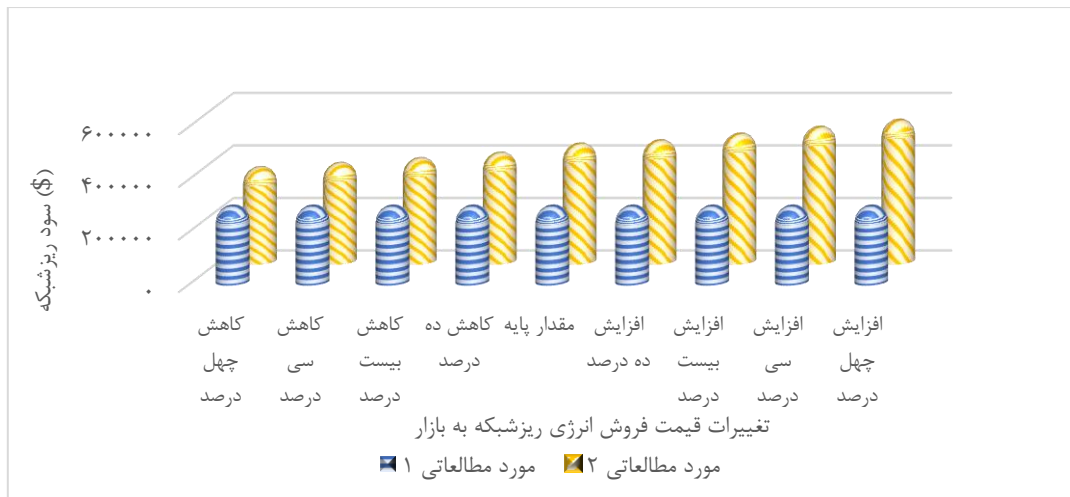


شکل ۸- بررسی شاخص های اقتصادی در نمونه مطالعاتی ۱ و ۲

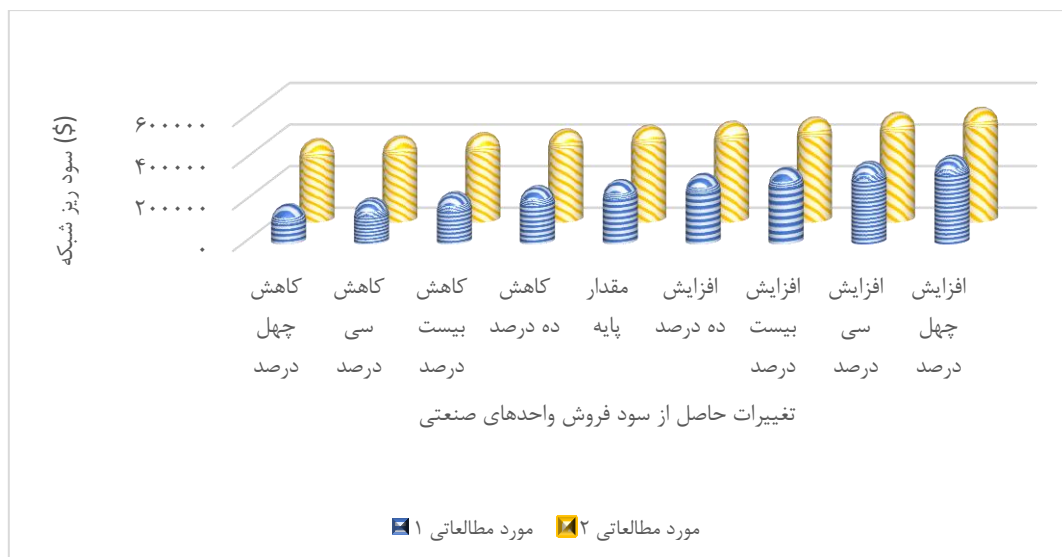
۴-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش، به دلیل وجود نوسانات قیمت در کشورهای مختلف تحلیل حساسیت خروجی های مقاله نسبت به قیمت های بازار صورت گرفته است. حساسیت سود خالص واحدهای صنعتی موجود در ریزشبه نسبت به پارامترهای قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی و سود حاصل از فروش محصولات در هر دو نمونه مطالعاتی بررسی می شود. حساسیت سود ریزشبه نسبت به تغییرات قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی از منفی ۴۰٪ تا مثبت ۴۰٪ در شکل ۹ نشان داده شده است. از شکل (۹) ملاحظه می شود که در نمونه مطالعاتی ۱ به دلیل عدم مشارکت واحدهای صنعتی مذکور در برنامه های پاسخ گویی بار، سود ریزشبه نسبت به تغییر قیمت خرید انرژی شبکه

از واحدهای صنعتی حساسیتی ندارد. هرچند در نمونه مطالعاتی دوم سود ریزشبه متناسب با کاهش یا افزایش قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی سیر نزولی یا صعودی خود را حفظ می کند. شکل (۱۰) به بررسی حساسیت سود ریزشبه نسبت به تغییرات حاصل از سود فروش محصولات از منفی ۴۰٪ تا مثبت ۴۰٪ می پردازد. ملاحظه می شود نمونه مطالعاتی ۱ حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات سود حاصل از فروش محصولات، نشان می دهد. دلیل این امر وابستگی مستقیم سود ریزشبه در نمونه مطالعاتی ۱ به سود ناشی از فروش محصولات می باشد. این در حالی است که سود ریزشبه در نمونه مطالعاتی ۲ علاوه بر سود ناشی از فروش محصولات، به قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی نیز وابسته می باشد.



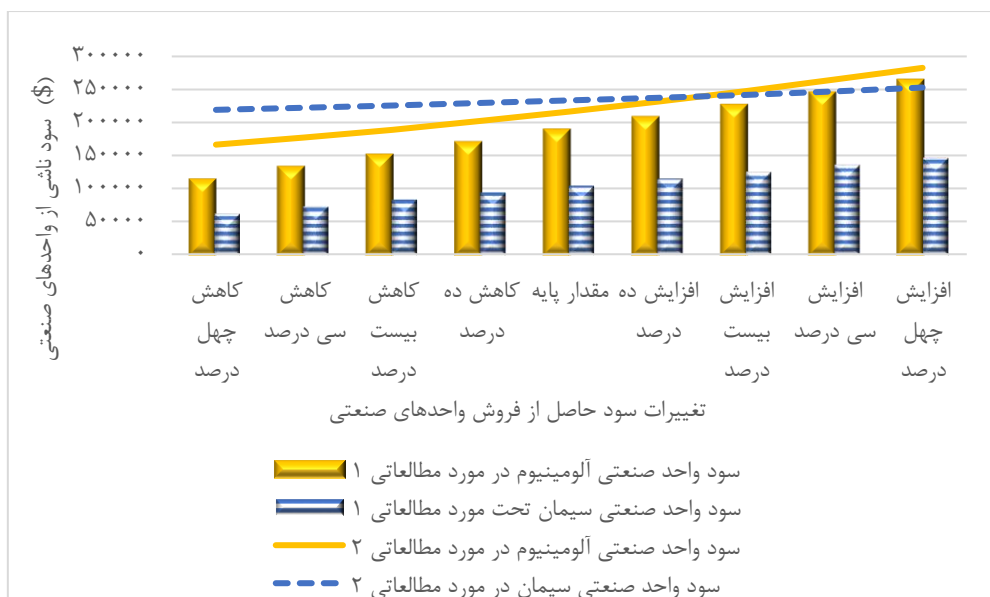
شکل ۹- تحلیل حساسیت سود ریز شبکه نسبت به تغییرات قیمت خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی



شکل ۱۰- تحلیل حساسیت سود ریز شبکه نسبت به تغییرات حاصل از سود فروش محصولات واحدهای صنعتی

صنعتی متناسب با تغییرات سود حاصل از خرید انرژی شبکه از واحدهای صنعتی می‌باشد. در نمونه مطالعاتی سود خالص ناشی از واحد صنعتی آلومینیوم همواره بیشتر از واحد صنعتی سیمان می‌باشد، هرچند این امر در نمونه مطالعاتی دوم صدق نمی‌کند. مشاهده می‌شود در ابتدا سود حاصل از واحد صنعتی سیمان بیشتر از واحد آلومینیوم بوده است اما با افزایش سود حاصل از فروش محصولات، سوددهی واحد صنعتی آلومینیوم با شیب بیشتری افزایش یافته و در قیمت‌های بالای فروش محصولات، سود این واحد بیش از واحد صنعتی سیمان شده است.

شکل (۱۱) به بررسی حساسیت سود ناشی از واحدهای صنعتی نسبت به تغییرات سود حاصل از فروش محصولات واحدهای صنعتی می‌پردازد. مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه مطالعاتی واحد صنعتی آلومینیوم نسبت به تغییرات ایجاد شده حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد واحد صنعتی آلومینیوم در کاهش تولید محصولات خود انعطاف‌پذیری کمتری از خود نشان داده و از طریق فراهم‌آوری ذخیره‌ی چرخان سعی در حفظ منافع خود داشته است. از این رو به دلیل تولید محصولات بیشتر، حساسیت بیشتری نسبت به واحد صنعتی سیمان نشان می‌دهد. در هر دو نمونه مطالعاتی سود ناشی از واحدهای



شکل ۱۱- تحلیل حساسیت سود واحدهای صنعتی نسبت به تغییرات سود حاصل از فروش محصولات

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل کاملی از فرآیندهای صنعتی با مصرف انرژی بالا در کارخانه‌های صنعتی آلومینیوم و سیمان به روش LPWA ارائه شده است. به منظور نزدیک شدن به شرایط واقعی، مدل ارائه شده در برنامه‌ریزی مدیریت انرژی روز بعد یک ریزش شبکه شامل این کارخانه‌ها و تعدادی بار صنعتی غیر قابل کنترل به کار گرفته شده است. هدف این مدل‌سازی افزایش بهره‌وری واحدهای صنعتی مورد بررسی در برنامه‌های مدیریت بار از طریق مشارکت در بازارهای انرژی و ارائه خدمات جانبی می‌باشد. به منظور بررسی صحت مدل و برنامه‌های پیشنهادی، نمونه‌های مطالعاتی با مشارکت واحدهای صنعتی در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و بدون در نظرگیری این برنامه‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه مطالعاتی دوم با استفاده از پاسخ‌گویی بار علاوه بر کاهش بار کلی ریزش شبکه به میزان ۱۷/۴۱ درصد و کاهش قله مصرف ریزش شبکه به میزان ۳۲/۸۳ درصد، سود واحدهای صنعتی مذکور به میزان ۶۱/۰۳ درصد افزایش

مراجع

[۱] سید محمد باقر ساداتی، جمال مشتاق، معیاد رضا شفیعی خواه، "تأثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخ‌گویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی توزیع در چهارچوب یک مدل دو سطحی جدید"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵۳-۶۸.

[2] N. Paterakisa, O. Erdinçb, J. Catalão, "An overview of Demand Response: Key-elements and international experience", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 69, 2017, pp 871-891

[۳] جمشید آقایی، امین رحیمی رضایی، محمد رضا کریمی، "هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.

[۴] علیرضا ابراهیمی، عباس دیدبان، رضا کی پور، "استراتژی کنترلی نوین در سیستم‌های انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی بر مبنای تعیین محدوده‌های بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳-۱۷۳.

[5] M. Starke, D. Letto, N. Alkadi, R. George, B. Johnson, K. Dowling, S. Khan, "Demand-side response from industrial loads", The Clean Energy and Technology Conference, Vol 2, 2013, pp 46-49.

[6] H. Nilsson, "The many faces of demand-side management", IET Power Engineering, 1994. Vol. 8, No. 5, pp. 207-210

[7] S. Mohagheghi, N. Raji, "Managing industrial energy intelligently: demand response scheme", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 20, No. 2, March-April 2014, pp. 53-62.

[8] J.S. Vardakas, N. Zorba, C. V. Verikoukis, "A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 17, No. 1, 2014, pp. 152-178.

[9] G. Heffner, C. Goldman, B. Kirby, "Loads providing ancillary services: review of international experience", U.S. Department of Energy, Ernesto Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2007, pp. 135-198.

[10] E. Ciapessoni, D. Cirio, F. Conte, S. Massucco, F. Silvestro, "Demand side response for frequency control in a regional power system", 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy, August 2015, pp. 258-264.

[11] X. Zhang, G. Hug, "Bidding Strategy in Energy and Spinning Reserve Markets for Aluminum Smelters", 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, June 2015, No. 15239638.

[12] W. Choate, "US energy requirements for aluminum production historical perspective theoretical limits and new opportunities", J.A.S. Green (Ed.), Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability, ASM International, 2007, pp. 267.

[13] X. Zhao, B. He, F. Yuan Xu, L. Lai, Ch. Yang, Sh. Lu, D. Li, "A model of demand response scheduling for cement plant", 2014 IEEE International Conference on Systems, San Diego, CA, USA, October 2014, No. 14790178.

[14] F. Yuan Xu, L. Lei Lai, "Novel Active Time-Based Demand Response for Industrial Consumers in Smart Grid", IEEE transactions on industrial informatics, Vol. 11, No. 6, December 2015, pp. 1564-1573.

[15] M. Naderi, S. Bahramara, Y. Khayat, H. Bevrani, "Optimal planning in a developing industrial microgrid with sensitive load, Energy Reports", Vol. 3, November 2017, pp. 124-134.

[16] R. hooshmand, S.nosratabadi, E. gholipour, "A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concept employed for distributed energy resources scheduling in power systems", renewable and sustainable energy reviews. Vol. 67, January 2017, pp. 341-363.

[17] H. li, J. zhang, D. zheng, "Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables", protection and control of modern power systems, April 2017, pp. 2-12.

[18] M. Ookie, et al., "Demand response for ancillary services", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 4, Dec. 2013, pp.1988-1995.

[19] A. Gholian, H. Mohsenian-Rad, J. Qin, "Optimal industrial load control in smart grid: a case study for oil refineries", 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 21-25 July 2013, pp. 1-5.

[20] Z. Liu, A. Wierman, Y. Chen, B. Razon, N. Chen, "Data center demand response: avoiding the coincident peak via workload shifting and local generation", Performance Evaluation, Vol. 70, No 10, October 2013, pp. 770-791.