

## مدل سازی ریاضی تأثیر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا بر انرژی الکتریکی مصرفی صنایع بر اساس زمان بندی سلول‌های تولید مجازی

مهدی صارم‌بافنده<sup>۱</sup>، حسن حسینی‌نسب<sup>۲\*</sup>، رضا توکلی‌مقدم<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### خلاصه

در این مقاله، تأثیر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با محاسبه انرژی مصرفی الکتریکی و میزان همکاری صنایع در برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، زمان بندی سلول‌های تولید مجازی، به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط مدل سازی گردیده است. در این مدل، با توجه به ماهیت صنایع بزرگ و سنگین و تأثیر گذاری آن‌ها در برنامه‌های پاسخ گویی بار از سلول‌های مجازی استفاده شده است. هدف این مدل حداکثر کردن میزان پاداش همکاری در برنامه‌های تشویق محور مدیریت سمت تقاضا و کمینه کردن زمان اتمام آخرین کار و نیز هزینه‌های انرژی الکتریکی و جابه‌جایی و شاخص‌های عملکردی مانند حداکثر توان الکتریکی مصرفی و زمان تأخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین می‌باشد. بر این اساس مدل ارائه شده از دسته مدل‌های چندهدفه می‌باشد که جهت به دست آوردن جواب بهینه از روش L-P متریک و از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز استفاده شده است و نتایج حل چند مثال عددی در دو قسمت شاخص‌های عملکردی و مدیریت سمت تقاضا با استفاده از مدل پیشنهادی و مرجع ارائه شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۳/۸

پذیرش ۱۳۹۸/۷/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مدیریت سمت تقاضا

سلول تولید مجازی

زمان بندی

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

انرژی الکتریکی

حداکثر توان الکتریکی

### ۱. مقدمه

بار الکتریکی یکی از ساده‌ترین راه‌کارهای مدیریت بار الکتریکی است که در آن تقاضای مصرف‌کننده در بازه‌ی زمانی اوج مصرف کاهش یافته و استفاده از ماشین‌آلات مصرف‌کننده به بازه‌های زمانی میان‌باری یا کم‌باری موکول می‌گردد. در این روش، هیچ بار الکتریکی مصرفی قطع نمی‌شود؛ بلکه جابه‌جایی در بار صورت می‌پذیرد و میزان تولید کل تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد [۱].

بر این اساس معمولاً روش‌های مدیریت سمت تقاضا (DSM<sup>2</sup>) به جای سایر روش‌ها در رأس برنامه‌های صنعت برق قرار می‌گیرد و به منظور جلوگیری از صرف هزینه‌های زیاد در بخش نیروگاهی و شبکه‌ی انتقال، از طرف مدیریت شبکه‌ی برق از سویی، تعرفه‌های برق

مصرف انرژی الکتریکی با توجه به پیشرفت‌های صنعتی و استانداردهای رفاه زندگی بشری دائماً در حال رشد و افزایش است. رشد چشم‌گیر مصرف انرژی الکتریکی مشکلاتی را برای تولیدکنندگان انرژی الکتریکی به منظور تأمین انرژی ایجاد کرده است. این مهم، شرکت‌های تولیدکننده‌ی انرژی را مجبور به افزایش سطح تولید واحدهای خود برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کنندگان کرده است. به طور خاص در ساعات اوج مصرف، نیروگاه‌ها با صرف هزینه‌ای زیاد، ظرفیت تولید خود را افزایش داده تا بتوانند توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان را در این بازه‌ی زمانی تأمین کنند. جابه‌جایی

تخصیص ماشین ها به کارها و تعیین زمان شروع و پایان کارها بر روی ماشین ها می باشند. بدین منظور، در این مقاله، با مدنظر قراردادن توان الکتریکی مصرفی هر یک از موقعیت های ماشین ها و حداکثر توان الکتریکی در هر بازه زمانی و همچنین شاخص های عملکردی نظیر زمان تأخیر کارها بر روی موقعیت ماشین ها مدل ریاضی ارائه شده است. ساختار مقاله در ادامه شامل چهار قسمت است؛ که قسمت اول، مروری بر پیشینه ی تحقیق در بخش مدیریت سمت تقاضا و تولید سلولی مجازی می باشد، در قسمت دوم، به تعریف مسأله که شامل بیان مسأله و بیان مدل ریاضی می باشد، پرداخته شده است. در قسمت سوم، به روش حل و خطی سازی مدل پیشنهادی می پردازد؛ و در قسمت آخر نیز خلاصه ای از حل و نتایج مدل و ارائه پیشنهادهای برای مطالعات آتی بیان گردیده است.

## ۲. مروری بر پیشینه ی تحقیق

واژه ی مدیریت سمت تقاضا (DSM) نخستین بار در اوایل دهه ی ۱۹۸۰ م. توسط محققین (EPRI<sup>۵</sup>) ارائه شده است. با مروری بر تحقیقات در حوزه ی پیش بینی بار، پژوهش های متفاوتی نیز در زمینه ی اجرای برنامه های مدیریت سمت تقاضا صورت پذیرفته است. این تحقیقات در حوزه ی مدیریت مصرف صنایع بزرگ، مدل سازی صنایع و بررسی اثر برنامه های قیمت محور بر فرایند تولید آن ها انجام شده است. نتایج به دست آمده در این مقالات اثرات مثبت ناشی از اجرای مناسب طرح ها را برای مشترکین صنعتی به خوبی نشان می دهد. فوایدی نظیر کاهش پیک شبکه و صرفه جویی قابل توجهی در هزینه ی انرژی مشترک از مزایای اجرای این طرح ها معرفی شده است.

پاولوس و همکاران [۴] در مطالعه ای به بررسی مدیریت مصرف در صنایع بزرگ و نقش عمده ی آن در بهبود رفتار بازار برق در کشور آلمان پرداخته اند. در این تحقیق، ظرفیت قابل حصول از صنایع بزرگ به کمک برنامه های مدیریت مصرف بررسی شده اند. برای تعیین این ظرفیت، فرایندهای تولید صنعتی مختلف نظیر تولید فولاد از بُعد فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. با شبیه سازی برنامه های مدیریت مصرف بر روی فرایند تولید صنایع مذکور، نقش و پتانسیل نهفته در این صنایع در سال های پیش رو معین شده است.

اسماعیل نژاد و همکاران [۵] در مطالعه ای مدیریت مصرف در صنایع کشور سوئد را مورد بررسی قرار داده اند. در این پژوهش، پتانسیل حاصل از اجرای برنامه های مدیریت مصرف برای صنایع بزرگ کشور سوئد تعیین شده است. این پتانسیل به کمک بررسی مورد به مورد صنایع مختلف این کشور نظیر صنعت فولاد و صنعت کاغذ و با توجه به مشخصات و ویژگی هریک از این صنایع تعیین شده است. علاوه بر این، انواع برنامه های مدیریت مصرف مورد استفاده در کشور سوئد در این تحقیق معرفی شده اند.

ژوو و همکاران [۶] در مطالعه ای خود به یکی از فرایندهای

و ازسوی دیگر مشوق هایی برای یکنواخت کردن منحنی بار<sup>۱</sup> (دره زدایی و پیک سایی<sup>۲</sup>) به طور معمول مطرح می شود تا با کمک آن بتوان نصب و احداث واحدهای نیروگاهی اضافی را به تعویق انداخت. مدیریت بار الکتریکی صنعتی، با توجه به سهم بالای انرژی مصرفی آن، می تواند نقشی کلیدی در اجرای برنامه های مدیریت سمت تقاضا در زمان اوج مصرف را ایفا کند. از طرفی صنایع نیز مانند هر بخش دیگر، امروزه برای بقا در برابر رکود اقتصادی که در سرتاسر جهان وجود دارد، در کاهش هزینه های خود تلاش می کند؛ از این رو، صنایع نگاه بیشتری به گزینه هایی که هزینه های انرژی و تولید خود را کاهش می دهد، دارند. بدون شک، علاوه بر کاهش هزینه های الکتریکی که با مدیریت در مصرف و حداقل رساندن مصرف در ساعات اوج که هزینه های بیشتری به صنایع تحمیل می کند و نیز استفاده از مزایا و پاداش های همکاری در برنامه های مدیریت سمت تقاضا، یکی از مؤثرترین این استراتژی ها، می تواند کاهش هزینه در پیکربندی (چیدمان) دوباره ی ماشین آلات و تجهیزات تولیدی باشد.

سیستم های تولید سلولی (CMS<sup>۳</sup>) با در نظر گرفتن شباهت بین قطعات و فرایندها و گروه بندی آن ها، زمینه ی طراحی و تولید بهینه ی آن ها را فراهم می آورند. روش تولید سلولی مجازی برای غلبه بر مشکلات و پیاده سازی محدودیت های محیط واقعی از جمله محدودیت های تأمین انرژی و انعطاف در تولید در اکثر صنایع به خصوص در صنایع بزرگ و سنگین هم چون صنایع فلزی و آلایژی قابل توسعه می باشند. سلول های تولیدی مجازی (VMC<sup>۴</sup>)، تقریباً در دهه ی گذشته پیشنهاد شده اند و یکی از شاخه های توسعه یافته تولید سلولی می باشد که به حذف مرزهای فیزیکی و تا حد زیادی جابه جایی ماشین آلات و مواد در درون و بیرون سلول ها پرداخته است. در واقع، برنامه ریزی تولید سلولی مجازی بیش از این که فیزیکی باشد، مجازی و منطقی هست. تولید سلولی مجازی برخلاف مدل کلاسیک تغییرات و جابه جایی زیادی ندارد و چیدمان اولیه تا حدود زیادی پاسخ گو تغییرات می باشد؛ بنابراین کاهش شدید هزینه تغییرات، آرایش مجدد سلول و جابه جایی مواد در سلول بسیار به صرفه و بهینه هست [۲]. در این روش، ماشین ها بدون تغییر در مکان فیزیکی به خانواده ی قطعات تخصیص داده می شوند و هر زمان که تقاضا تغییر کند می توان گروه بندی ماشین ها را بدون تغییر فیزیکی آن ها تغییر داده و سلول مجازی جدید را تشکیل داد. جانمایی ماشین ها در سطح کارخانه به صورتی است که ماشین های مشابه به صورت پراکنده در سطح کارخانه مستقر می شوند و باعث افزایش تعداد مسیرهای عملیاتی ممکن برای پردازش قطعات می شوند [۳].

در این مقاله، به منظور پیاده سازی تأثیر برنامه های مدیریت سمت تقاضا بر انرژی الکتریکی مصرفی صنایع، از مدل ریاضی زمان بندی سیستم تولید سلولی مجازی استفاده شده است. برای زمان بندی در چنین سیستم های تولیدی، دو تصمیم اصلی باید اتخاذ شوند، که شامل

1. Load Curve

2. Peak Shaving

3. Cellular Manufacturing System

4. Virtual Manufacturing Cell

5. Electric Power Research Institute

کرد.

پایدار و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای به طراحی مدل دوهدفه آرایش سلول مجازی و زنجیره تأمین پرداخته‌اند و در این تحقیق مدل دوهدفه برای برنامه‌ریزی تدارکات، تولید و توزیع توسعه داده شده است و با روش محدودیت اسپیلن تعمیم‌یافته حل گردیده است.

سرافرازی و همکاران [۲] در تحقیقی به مدل‌سازی چندهدفه برای تولید سلولی پویا با توسعه‌ی اقتصادی پایدار پرداخته‌اند. در این مطالعه به‌منظور پاسخ‌گویی به اهداف توسعه پایدار، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه‌ی پویا برای خوشه‌های صنعتی به‌جهت بهینه‌سازی چهار هدف؛ سود، اشتغال، هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد و امتیاز ارزیابی زیست‌محیطی، طراحی و آزمون شده است.

با توجه به اهمیت روزافزون منابع انرژی در دنیای امروز، شکاف تحقیقاتی در حوزه‌ی زمان‌بندی و سیستم‌های تولید سلولی مجازی را می‌توان به عدم وجود مباحث انرژی مصرفی و تأثیر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا و پاسخ‌گویی بار الکتریکی در بحث زمان‌بندی در سلول‌های مجازی تولید، معطوف کرد. در این پژوهش سعی می‌شود مباحث تولیدی و برنامه‌ریزی تولید با سلول‌های مجازی، به‌گونه‌ای ارائه گردد که تخصیص و توالی کارهای مربوط به هر یک از عوامل به روی ماشین‌آلات به‌نحوی مناسب که علاوه بر اهداف رایج مسائل زمان‌بندی براساس شاخص‌های دیگر مانند زمان‌های تأخیر در موقعیت‌های ماشین‌آلات و تعادل کار ماشین‌آلات برآورده شود، مشخص گردد و هم‌چنین مباحث مربوط به انرژی مصرفی از جمله محاسبه‌ی حداکثر توان الکتریکی مصرفی، مجموع توان مصرفی الکتریکی ماشین‌آلات در هر زمان و هزینه‌های مربوطه و نیز برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، برنامه زمان‌بندی را تحت تأثیر قرار دهند و هزینه‌های انرژی نیز کاهش یابد. پس می‌توان جنبه‌ی نوآوری این پژوهش را درگیر کردن مباحث مربوط به انرژی در مسائل زمان‌بندی سلول‌های تولید مجازی دانست.

### ۳. تعریف مسأله

#### ۱.۳. مدیریت سمت تقاضا

براساس تعریف IEEE<sup>3</sup>، مدیریت سمت تقاضا شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های شرکت برق یا مشترکان است که شکل بار را با هدف کاهش پیک و اصلاح منحنی بار مصرفی انجام می‌دهد [۱۶]. درحقیقت DSM را می‌توان به‌عنوان واژه‌ای که هم‌چون چتری گسترده بر مفاهیمی چون مدیریت بار (LM<sup>4</sup>)، کارایی (بازده) انرژی (EE<sup>5</sup>)، صرفه‌جویی انرژی (EC<sup>6</sup>) است قلمداد کرد [۱۷]. شکل (۱) اهداف مدیریت سمت تقاضا را نشان می‌دهد که می‌تواند شامل پیک‌سایی و پرکردن دره‌ی منحنی بار شبکه، جابه‌جایی بار، ایجاد منحنی انعطاف‌پذیر بار، افزایش مصرف استراتژیک، افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های تولید انرژی، بهبود مسائل زیست‌محیطی باشد.

پرمصرف انرژی که برای جداسازی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی هوای اتمسفر به‌صورت گاز و مایع می‌باشند، پرداخته‌اند؛ در این مطالعه با توجه به این‌که این واحدها خود یک صنعت هستند و یا در صنایع دیگر مانند فولاد به‌کار گرفته شده‌اند، به ارائه مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح برای بهینه‌سازی حاشیه‌ی سود کلی در یک افق زمانی مشخص پیشنهاد شده است.

والدس و همکاران [۷] بررسی تطبیقی پیشرفت‌های مهم سیاست انرژی در آلمان و شیلی را مورد مطالعه قرار داده و بیان نموده‌اند مدیریت سمت تقاضا به تأمین پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های انرژی کمک می‌کند. آن‌ها مطرح نمودند که در بین سیاست‌های DSM، اجرای معیارها و مکانیسم‌های پاسخ‌گویی بار (DR<sup>1</sup>) یک مسأله‌ی مهم است. بر این اساس در این تحقیق ارتباط بخش صنعت در هر دو کشور، دشواری اجرای چارچوب نظارتی بر مشتریان صنعتی در قوانین آلمان و ادبیات برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مورد توجه می‌باشد. هم‌چنین در این مطالعه تحلیل اصلی بروی مشتریان صنعتی متوسط و بزرگ متمرکز می‌باشد. مرور چالش‌های موجود در فعال کردن پتانسیل کامل صنایع تولیدی و ارائه توصیه‌هایی برای ترویج در کوتاه‌مدت و بلندمدت از اهداف دیگر این تحقیق می‌باشد.

هم‌چنین در ادامه به بررسی برخی از مطالعات و تحقیق‌های مسأله‌ی زمان‌بندی در سیستم‌های تولید سلولی پرداخته شده است. با وجود آن‌که مفهوم سلول‌های تولیدی مجازی به‌صورت غیررسمی در کار تحقیقاتی آلنوم [۸] وجود داشته است، اولین بار در اوایل دهه‌ی ۸۰ اصطلاح سلول‌های مجازی در کار مک‌لین و همکاران [۹] مطرح گردید و سلول‌های تولید مجازی را یک ساختار سلسله‌مراتبی و پویا معرفی کرده‌اند.

کسین و همکاران [۱۰ و ۱۱] در دو تحقیق به زمان‌بندی سلول‌های مجازی پرداختند. این مؤلفین به مجموعه‌ای از ماشین‌ها که برای پردازش یک کار در محیط تولیدی با جانمایی توزیع شده تخصیص داده می‌شود، سلول مجازی گفته‌اند و مدل ریاضی زمان‌بندی سلول‌های تولید مجازی به‌صورت تک‌دوره و در بازه‌ی زمانی اتمام تمام کارها فرموله شده است.

بن جعفر و همکاران [۱۲] در یک تحقیق به بررسی انواع چیدمان‌های توزیع شده پرداخته و چیدمان حداکثری یکنواخت توزیع شده<sup>۲</sup> را برای سلول‌های تولیدی مجازی مطرح و مدل ریاضی برای چیدمان توزیع شده پویا را ارائه نموده‌اند و به بررسی عملکرد درجات مختلف این نوع چیدمان پرداخته است.

رفیعی و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ی خود به ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی سیستم تولید سلولی پویا با در نظر گرفتن ماشین‌آلات چندکاره پرداخته‌اند. هم‌چنین از ویژگی‌های مدل ارائه شده در این تحقیق می‌توان به هزینه‌های پیکربندی (جابه‌جایی درون و بیرون سلولی) و پیکربندی مجدد نصب ماشین‌آلات در یک محیط پویا اشاره

4. Load Management  
5. Energy Efficiency  
6. Energy Conservation

1. Demand Response  
2. Maximally distributed layout  
3. Institute of Electrical and Electronics Engineers

کم باری حداقل قیمت انرژی را می پردازند. هدف از اعمال این روش ترغیب مصرف کنندگان به مدیریت مصرف انرژی می باشد. در برنامه های مبتنی بر طرح های تشویقی/ارخداد حادثه<sup>۲</sup>، بهره بردار شبکه به ازای کاهش بار مصرف کنندگان، پاداش های مالی را برای آنان در نظر می گیرد. پاداش های مالی در این روش به دو صورت پرداخت مستقیم و یا کاهش هزینه های برق مصرفی (که در صورت حساب مصرف کنندگان لحاظ می شود) خواهد بود.

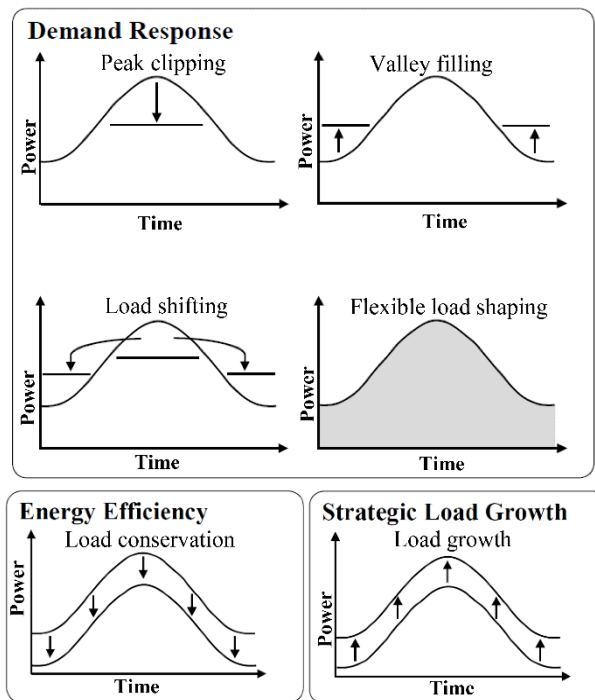
### ۲.۳. سلول های تولید مجازی در مدیریت سمت تقاضا

از آنجا که VMS به عنوان جایگزین برای CMS می باشد و تا حدودی ویژگی های سیستم تولید سلولی دارا است، و تفات قابل توجه این دو سیستم در پاسخ دهی سریع به تغییرات بیرونی می باشد [۲۱]. CMS نسبت به تغییرات به دلیل گروه بندی فیزیکی ماشین ها (سلول های تولید) ناسازگار می باشد و پاسخ مناسبی به تغییرات نمی دهد. به جای محدود کردن قطعات به سلول های ماشین، از ماشین ها با فرایندهای مشابه که در مجاور یکدیگر قرار ندارند، استفاده شده است و این امر باعث افزایش کارایی می شود و امکان ایجاد مسیرهای متنوع تولید در فاز برنامه ریزی را فراهم می سازد [۲۲].

در این مقاله، با توجه به خصوصیات سلول های تولید مجازی و ماهیت صنایع بزرگ در خصوص چیدمان محیط کار، جانمایی در نظر گرفته شده برای سلول های تولیدی از نوع توزیع شده حداکثری یکنواخت می باشد و از مفهوم تکنولوژی گروهی پیروی نمی کنند و دوره های زمان بندی در مدل به صورت تک دوره ای فرض شده است [۱۰]. هم چنین به دلیل اعمال زمان سر رسید موقعیت های کاری برای ماشین ها که شامل زمان های شروع، پردازش و آماده سازی (بدون در نظر گرفتن زمان تأخیر وجود هر قطعه در هر موقعیت کاری برای هر ماشین) می باشد، از اتلاف منابع تا حد امکان جلوگیری می شود و در دوره های زمانی تعدادی محصول-کار در یک بازه زمانی، در برنامه های تولید قرار می گیرد و براساس برخی از تعاریف که به تعدادی ماشین که یک کار را انجام، سلول های مجازی اطلاق می شود، عملیات ها می توانند پی در پی و در هر زمانی از دوره انجام شوند.

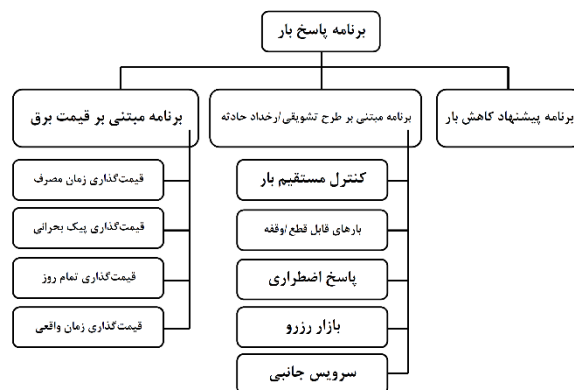
در جانمایی توزیع شده، از هر نوع ماشین، چند نمونه مشابه وجود دارد که همجوار نیستند و در سطح کارخانه به صورت پراکنده مستقر شده اند. سیستم تولید سلولی مجازی با این نوع جانمایی تا حدودی مشابه سیستم تولید کارگاهی انعطاف پذیر است؛ با این تفاوت که در جانمایی در نظر گرفته شده در این مقاله برخلاف محیط کارگاهی انعطاف پذیر، ماشین های مشابه در نزدیکی یکدیگر مستقر نیستند و به صورت موازی با هم کار نمی کنند. هم چنین بسته های کاری (محصولات-کارها) قابل شکستن به بسته های کاری کوچک تر نیستند؛ زیرا ماشین های یکسان همجوار نیستند و به صورت موازی کار نمی کنند [۹].

شکل (۳) مفهوم و طراحی سلول های مجازی که به تعدادی ماشین



شکل (۱): اهداف مدیریت سمت تقاضا [۱۸]

پاسخ گویی بار مطابق تعریف DOE<sup>1</sup>، در آمریکا عبارت است از توانایی مشترکان صنعتی، تجاری و مسکونی برای بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی به منظور نیل به قیمت های مناسب و بهبود قابلیت اطمینان شبکه [۱۹]. به عبارت دیگر، پاسخ گویی بار می تواند شکل مصرف انرژی الکتریکی را به نحوی تغییر دهد که پیک سیستم کاهش یافته و مصارف به ساعات غیرپیک منتقل شوند. برنامه های پاسخ گویی بار به دو شاخه اصلی تشویقی محور و تعرفه محور و چند زیرشاخه تقسیم بندی می شوند که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): برنامه های پاسخ گویی بار [۲۰]

در برنامه های مبتنی بر قیمت برق<sup>۱</sup>، قیمت برق مصرفی در هر زمان، متغیر و دارای نوسان است. در این روش مصرف کنندگان، برای دوره های زمانی اوج مصرف بیشترین قیمت برق و برای دوره های زمانی

3. Incentive/event-based DR Programs

1. Department of Energy  
2. Department of Energy

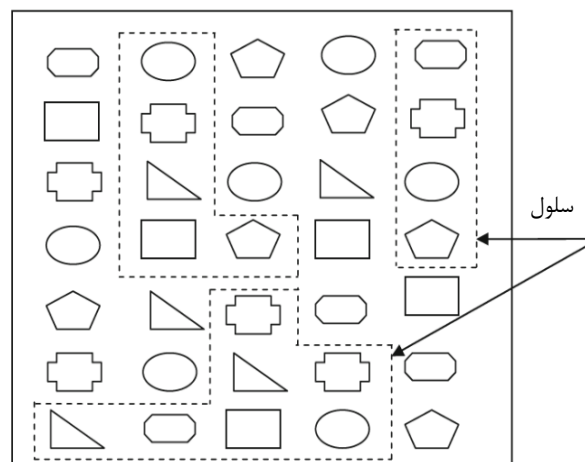
زمان مقرر به ماشین‌ها اختصاص داده شود و کارها با تأخیر کمتری به اتمام برسد؛ با این اوصاف، لازم است تعاملی مناسب بین این اهداف ایجاد شود.

در تعداد محدودی از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی طراحی سلول‌های تولید [۲۵] و سایر شاخص‌های عملکردی مانند زمان آماده‌سازی ماشین‌های تولیدی و زمان جابه‌جایی بین ماشین‌ها و... در نظر گرفته شده‌اند [۲۶ و ۲۷]، که این عوامل تأثیر بالایی بر نحوه‌ی عملکرد سیستم تولیدی دارد؛ بنابراین با ایجاد تعاملی مناسب بین این اهداف می‌توان یک مدل کارا برای بهبود بهره‌وری و کارایی برنامه‌ی زمان‌بندی و کاهش هزینه‌ها جهت بهبود سیستم تولیدی ایجاد کرد. در این بخش با در نظر گرفتن مدیریت انرژی و شاخص‌های عملکردی دیگر کرد و تعادل کار ماشین‌ها و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و جابه‌جایی، مسأله‌ی مدیریت مصرف انرژی الکتریکی به صورت مسأله‌ی زمان‌بندی کار در سلول‌های مجازی با محدودیت‌های متناسب و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته‌ی چندهدفه (MOMIP) مدل‌سازی شده است. مدل ارائه شده از دسته L-P متریک با نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS به طور دقیق حل گردیده است.

با توجه به شرایط و اهداف مسأله، مدل ارائه شده‌ی میزان انرژی الکتریکی مصرفی در هر زمان، میزان کاهش انرژی الکتریکی، مجموع حداکثر توان مصرفی ماشین‌آلات در هر زمان، زمان شروع هر عملیات، زمان تکمیل هر عملیات، تخصیص کارها به هر نوع ماشین و مقدار کاری که هر نوع ماشین پردازش می‌کند را بیان می‌دارد. مفروضات زیر در مدل ریاضی مدنظر قرار گرفته شده است [۲۸]:

- قیمت انرژی الکتریکی در هر بازه‌ی زمانی مشخص است.
- توان الکتریکی مصرفی در هر توالی از ماشین‌ها مشخص است.
- متوسط نرخ پاداش همکاری در برنامه‌های تشویق محور مشخص است.
- متوسط توان مصرفی در هر بازه‌ی زمانی مشخص است.
- افق برنامه‌ریزی مشخص است.
- حجم تولید هر قطعه در افق برنامه‌ریزی مشخص است.
- مسیر عملیاتی و توالی عملیات هر قطعه، مشخص می‌باشد.
- زمان‌های انجام عملیات توسط هر ماشین بر روی هر قطعه، مشخص می‌باشند.
- همه‌ی کارها در زمان صفر در دسترس هستند.
- از هر نوع ماشین چند نمونه یکسان با ظرفیت زمان پردازش یکسان وجود دارند.
- ماشین‌ها غیرقابل حرکت هستند و فاصله‌ی بین هر جفت ماشین، مشخص است.
- هر قطعه فقط یک‌بار یک نوع ماشین را ملاقات می‌کند یا به عبارتی فرض پردازش مجدد<sup>۱</sup> وجود ندارد.

که یک کار را انجام می‌دهند، اشاره می‌کند و در این مفهوم ممکن است که از هر نوع ماشین بیش از یکی وجود داشته باشد و در قسمت‌های مختلف کارخانه قرار گرفته باشد.



شکل (۳): سلول مجازی با جانمایی توزیع شده [۱۲]

### ۳.۳. مدیریت سمت تقاضا با مدل ریاضی چندهدفه

یکی از مهم‌ترین اهدافی که در مدیریت انرژی در صنایع سنگین و بزرگ هم‌چون صنایع فلزی و آلیاژی مورد توجه می‌باشد، کاهش هزینه‌های انرژی و صرفه‌جویی در انرژی است که این مهم در تعارض با شاخص‌های عملکردی یک سیستم تولید می‌باشد؛ از این‌رو، مدل ارائه شده به دنبال کمترین تداخل با برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، برنامه‌ی زمان‌بندی تولید و بهینه نمودن شاخص‌های عملکردی تولید می‌باشد. بر این اساس، با توجه به ویژگی‌های سیستم‌های تولید سلولی با سلول‌های مجازی [۱۰ و ۱۱]، به ارائه یک مدل چندهدفه پرداخت که علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش صرفه‌جویی در انرژی به مهم‌ترین اهداف در تشکیل سلول‌های مجازی از جمله کمینه کردن مسافت یا هزینه‌ی جابه‌جایی [۲۳] و هم‌چنین زمان اتمام کارها [۲۴] و آخرین کار که یکی از معمول‌ترین معیارهای زمان‌بندی در سیستم تولیدی کارگاهی انعطاف‌پذیر بوده، می‌پردازد. این مهم به گونه‌ای که کاهش زمان اتمام آخرین کار را هم‌عرض با افزایش بهره‌وری در سیستم تولیدی در نظر گرفته شده است. تعادل بار کاری بین ماشین‌ها در محیط کاری، یکی دیگر از اهداف است که منجر به تقسیم کارها بین ماشین‌ها می‌شود و بار کاری ماشین‌ها را کاهش می‌دهد. اهداف یاد شده در تعارض با یکدیگر قرار دارند به گونه‌ای که بهبود هزینه‌ی جابه‌جایی باعث بدتر شدن دو هدف دیگر می‌شود. هم‌چنین از دیگر اهدافی که در تحقیقات گذشته به کار نرفته، علاوه بر هزینه‌های انرژی، کاهش توان الکتریکی مصرفی ماشین‌آلات و حداکثر توان الکتریکی مصرفی که باعث ایجاد تأخیرها در فرایندهای کاری می‌شود و به همین دلیل از دیگر اهدافی که در این شرایط تولید برای بهبود سیستم تولیدی لحاظ شده زمان تأخیرها است، که باعث می‌شود کارها در

## متغیرهای تصمیم

$P_i^{\max}$ : مجموع توان الکتریکی مصرفی ماشین ها در زمان  $i$   
 $Pd_i$ : میزان توان الکتریکی کاهش داده شده در همکاری برنامه های مدیریت سمت تقاضا در زمان  $i$   
 $Ener_i$ : میزان انرژی الکتریکی مصرفی در زمان  $i$   
 $P_{\max}$ : حداکثر توان الکتریکی مصرفی  
 $t_{j,h}$ : زمان شروع پردازش عملیات  $h$ م از کار  $j$ ام  
 $Tm_{m,l}$ : زمان شروع توالی  $l$  از ماشین نوع  $m$   
 $C_{m,l}$ : زمان پایان توالی  $l$  از ماشین نوع  $m$   
 $C_{\max}$ : زمان اتمام آخرین کار بر روی آخرین ماشین  
 $W_m$ : بارکاری ماشین نوع  $m$   
 $\bar{W}$ : متوسط بارکاری ماشین ها  
 $O_{m,h,l}$ : ۱ توالی  $l$  بر روی ماشین  $m$  در زمان  $i$  پردازش شود و در غیراین صورت صفر.

$Y_{m,j,h}$ : ۱ اگر ماشین  $m$  برای پردازش عملیات  $h$ م از کار  $j$ ام انتخاب شود و در غیراین صورت صفر.

$X_{m,j,h,l}$ : ۱ عملیات  $h$ م از کار  $j$ ام در توالی  $l$  بر روی ماشین  $m$  پردازش شود و در غیراین صورت صفر.

## ۵.۳. تابع هدف و محدودیتها

به منظور لحاظ نمودن اهداف متعدد و محدودیت های مختلف می توان موارد زیر را مدنظر قرار داد:

اولین تابع هدف در مسأله ی مورد بررسی شامل حداکثر کردن میزان پاداش در همکاری برنامه های تشویق محور مدیریت سمت تقاضا می باشد که به صورت معادله ی (۱) ذکر شده است این توابع در تعارض با توابع هدف دوم (معادله ی (۲)) که زمان تکمیل آخرین کار بر روی آخرین ماشین ( $C_{\max}$ ) می باشد و توابع هدف سوم خود شامل پنج هدف متضاد می باشد و به صورت کمینه ی جمع وزن شده ی موارد زیر می باشد؛ عبارت اول، هزینه های انرژی الکتریکی مصرفی سیستم که براساس برنامه زمان استفاده و اوج مصرف از برنامه های قیمت محور می باشد. عبارت دوم، مجموع توان الکتریکی مصرفی سیستم می باشد. عبارت سوم، هزینه ی جابه جایی مواد را بیان می کند. و عبارت چهارم، که مقدار تأخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین را نشان می دهد و به صورت یک تابع Max می باشد که مقدار صفر یا مثبت (تأخیر) را بیان می کند؛ و عبارت آخر، بار کاری ماشین ها را متعادل می کند. به عبارت دیگر، کارها بین ماشین های مشابه تا حد امکان به طور مساوی تقسیم شود. در این توابع وزن ها  $W_r$  توسط تصمیم گیرنده بیان می شود.

$$\max f_1 = \sum_i Pd_i B \quad (1)$$

$$\min f_2 = C_{MAX} \quad (2)$$

- هزینه ی واحد جابه جایی برای هر واحد از قطعات مشخص است.
- زمان های آماده سازی ماشین ها وابسته به توالی عملیات می باشد و مقدار آن ها از قبل مشخص است.
- امکان تقسیم بارکاری برای عملیاتی که می توان بر روی ماشین های متفاوت انجام شود، وجود ندارد.
- زمان های جابه جایی بین ماشین ها وابسته از قبل مشخص است.
- زمان سر رسید هر موقعیت کاری بر روی هر ماشین مشخص می باشد.

## ۴.۳. نمادها و اندیس ها

## اندیس ها

$i$ : اندیس زمان  $(1, \dots, i)$

$j, j'$ : اندیس نوع کار  $(1, \dots, j)$

$m, m', m''$ : اندیس شماره ی ماشین  $(1, \dots, m)$

$m'_{jh}, m''_{jh}, m'_{jh}$ : اندیس شماره ی ماشین های که قابلیت انجام عملیات  $h$ م از کار  $j$ ام را دارند.

$h, h'$ : اندیس شماره ی عملیات  $(1, \dots, h)$

$L$ : اندیس شماره ی موقعیت قرار گرفتن عملیات هر قطعه مربوط به ماشین  $(1, \dots, l)$

## پارامترها

$B$ : متوسط نرخ پاداش همکاری در برنامه های تشویق محور مدیریت سمت تقاضا

$\gamma$ : درصد کاهش قدرت توافقی در برنامه های تشویق محور مدیریت سمت تقاضا

$P_{m,l}$ : توان مصرفی ماشین  $m$  در توالی  $l$

$Pav_i$ : متوسط توان مصرفی معیار برنامه های تشویق محور مدیریت سمت تقاضا مشابه زمان  $i$

$fc_i$ : نرخ هزینه ی انرژی الکتریکی مصرفی براساس برنامه ی پاسخ گویی بار  $TOU^1$  در زمان  $i$

$fc_{pp}$ : هزینه ی حداکثر توان الکتریکی مصرفی براساس برنامه ی پاسخ گویی بار  $PP^2$

$W_r$ : وزن هدف  $r$ ام.

$N_j$ : اندازه ی دسته کار  $J$

$R_{jh}$ : زمان پردازش عملیات  $h$ م از کار  $j$ ام.

$D_{m,m'}$ : هزینه ی هر واحد جابه جایی برای هر کار که از ماشین  $m'$  به ماشین  $m$  حمل شده است.

$M$ : عدد مثبت بسیار بزرگ

$d_{m,l}$ : زمان سر رسید توالی  $l$  از ماشین نوع  $m$

$S_{m,j,j'}$ : زمان آماده سازی لازم برای ماشین  $m$  زمانی که کار  $J'$  بعد از کار  $J$  بر روی ماشین قرار می گیرد.

$mth_{m,m'}$ : زمان جابه جایی کارها از ماشین  $m'$  به ماشین  $m$

ماشین به یک عملیات تخصیص داده می‌شود و محدودیت هشتم و نهم (معادلات (۱۱) و (۱۲)) تضمین می‌کند زمانی که عملیاتی به ماشینی تخصیص داده می‌شود توالی انجام آن عملیات بر روی ماشین مشخص گردد.

$$\sum_j \sum_h X_{m_{jh},j,h,l} \leq 1 \quad \forall m,l \quad (10)$$

$$\sum_l X_{m_{jh},j,h,l} = Y_{m_{jh},j,h} \quad \forall m,j,h \quad (11)$$

$$\sum_j \sum_h X_{m_{jh},j,h,l} \leq \sum_j \sum_h X_{m_{jh},j,h,l-1} \quad \forall j,h \quad (12)$$

محدودیت دهم و یازدهم (معادلات (۱۳) و (۱۴)) تضمین می‌کند که توالی و موقعیت ماشین‌هایی که در حال پردازش هستند به بازه‌های زمانی متناظر تخصیص داده شود.

$$O_{m_{jh},l,i} \leq C_{m_{jh},l} / 60 \quad \forall m,l,i \quad (13)$$

$$T_{m_{jh},l} / 60 \leq (1 - O_{m_{jh},l,i})M + i - 1 \quad \forall m,l,i \quad (14)$$

محدودیت دوازدهم (معادله (۱۵)) نشان‌دهنده‌ی بازه‌های زمانی که توالی  $l$ ام از ماشین  $m$  در آن‌ها در حال پردازش می‌باشد.

$$\sum_i O_{m_{jh},l,i} \geq (C_{m_{jh},l} - T_{m_{jh},l}) / 60 \quad \forall m,l \quad (15)$$

محدودیت سیزدهم (معادله (۱۶)) نشان‌دهنده‌ی حداکثر مجموع توان الکتریکی مصرفی توالی ماشین‌های در حال پردازش در هر یک از بازه‌ی زمانی می‌باشد.

$$\sum_m \sum_l O_{m_{jh},l,i} P_{m_{jh},l} \leq P_i^{\max} \quad \forall i \quad (16)$$

محدودیت چهاردهم (معادله (۱۷)) که تضمین‌کننده‌ی این مطلب می‌باشد که  $P_{max}$  بزرگ‌تر مساوی از تمام مجموع توان الکتریکی مصرفی در بازه‌های زمانی در سیستم و برای رعایت کردن برنامه‌های قیمت‌محور مدیریت سمت تقاضا می‌باشد و محدودیت پانزدهم (معادله (۱۸)) تضمین‌کننده‌ی این مهم می‌باشد که براساس برنامه‌های تشویق‌محور مدیریت سمت تقاضا، میزان درصد کاهش همکاری در برنامه‌ها با توجه به متوسط توان مصرفی در بازه‌ی زمانی مشابه (توان مبنا) رعایت شود.

$$P_i^{\max} \leq P_{MAX} \quad \forall i \quad (17)$$

$$P_i^{\max} \leq P_{av,i} \gamma \quad \forall i \quad (18)$$

محدودیت شانزدهم (معادله (۱۹)) میزان انرژی الکتریکی مصرفی در هر بازه‌ی زمانی را نشان می‌دهد و محدودیت هفدهم (معادله (۲۰)) میزان کاهش توان الکتریکی در برنامه‌های تشویق‌محور در بازه‌های زمانی مربوطه را محاسبه می‌کند.

$$Ener_i = \sum_m \sum_l O_{m_{jh},l,i} P_{m_{jh},l} \quad \forall i \quad (19)$$

$$Pd_i = P_{av,i} - Ener_i \quad \forall i \quad (20)$$

محدودیت هجدهم (معادله (۲۱)) بار کاری هر نوع ماشین را نشان

$$\begin{aligned} \min f_3 = & W_1 \left( \sum_i Ener_i f c_i + P_{MAX} f c_{pp} \right) \\ & + W_2 \sum_i P_i^{\max} \\ & + W_3 \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^m \sum_{m'} \sum_{m''} Y_{m_{jh},j,h} Y_{m'_{jh},j,h} Y_{m''_{jh},j,h} D_{m_{jh},m'_{jh}} N_j \\ & + W_4 \sum_m \sum_l \max \left\{ 0, \left( C_{m_{jh},l} - d_{m_{jh},l} \right) \right\} \\ & + W_5 \sum_m \left| W_m - \bar{W} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

محدودیت اول (معادله (۴)) مربوط به روابط پیش‌نیازی کارها می‌باشد و نشان می‌دهد یک فعالیت تنها زمانی شروع می‌شود که فعالیت قبل از آن پردازش شده باشد. و محدودیت دوم (معادله (۵)) که تضمین‌کننده‌ی این مطلب می‌باشد که  $C_{max}$  بزرگ‌تر مساوی تمام زمان‌های تکمیل در سیستم می‌باشد.

$$t_{j,h} + R_{j,h} N_j \leq t_{j,h+1} \quad \forall j,h \quad (4)$$

$$t_{j,h} + R_{j,h} N_j \leq C_{MAX} \quad \forall j,h \quad (5)$$

محدودیت سوم (معادله (۶)) تضمین می‌کند که زمان شروع به‌کار ماشین نوع  $m$  برای پردازش کاری که توالی  $l+1$  به آن تخصیص داده شده است بعد از پردازش کامل توالی  $l$  انجام گیرد؛ به‌عبارتی، زمان شروع به‌کار ماشین نوع  $m$  برای پردازش کاری که توالی  $l+1$  به آن تخصیص داده شده است برابر با بیشترین مقدار بین زمان پایان موقیت توالی قبلی ماشین، یعنی  $l$  و زمان پایان عملیات ماقبل از قطعه‌ای که به موقعیت فعلی این ماشین تخصیص داده شده است. محدودیت چهارم (معادله (۷)) تضمین می‌کند که زمان پایان به‌کار ماشین نوع  $m$  برای پردازش کاری که توالی  $l$  به آن تخصیص داده شده است، بعد از پردازش کامل توالی  $l$  زمان آماده‌سازی کار تخصیص داده شده به توالی  $l$  انجام شود.

$$\begin{aligned} \max & \left\{ \begin{aligned} & C_{m_{jh},l}, T_{m_{jh},l} + X_{m_{jh},j,h,l} N_j R_{j,h} \\ & + X_{m_{jh},j,h,l} X_{m_{jh},j',h',l+1} S_{m_{jh},j,j'} \\ & + Y_{m''_{jh-1},j',h'-1} Y_{m_{jh},j',h',l} m_{jh},m''_{jh} \end{aligned} \right\} \\ & \leq T_{m_{jh},l+1} \quad \forall m,m'',j,j',h,h',l \end{aligned} \quad (6)$$

$$C_{m_{jh},l} = T_{m_{jh},l} + \sum_j \sum_h X_{m_{jh},j,h,l} N_j R_{j,h} \quad \forall m,l \quad (7)$$

محدودیت پنجم و ششم (معادلات (۸) و (۹)) ایجاب می‌کنند زمانی که متغیر  $x$  مقدار ۱ بگیرد، آنگاه زمان شروع عملیات  $l$ ام از کار  $l$ ام با زمان شروع توالی  $l$ ام از ماشین نوع  $m$  برابر می‌باشد.

$$t_{j,h} + M(1 - X_{m_{jh},j,h,l}) \geq T_{m_{jh},l} \quad \forall m,j,h,l \quad (8)$$

$$T_{m_{jh},l} + M(1 - X_{m_{jh},j,h,l}) \geq t_{j,h} \quad \forall m,j,h,l \quad (9)$$

محدودیت هفتم (معادله (۱۰)) نشان می‌دهد هر توالی از هر

۳	B, 6, 10 - A, 15, 5 - C, 10, 10	۲۴
۴	C, 7, 20 - B, 2, 10 - A, 7, 15	۳۶
۵	B, 7, 10 - C, 4, 20	۳۴
۶	B, 7, 10 - A, 10, 15	۴۲

جدول (۳): قیمت های انرژی الکتریکی

برنامه ها	TOU	PP		
I=	۱-۱۲	۱۳-۱۶	۱۷-۲۴	۱-۴۸
	۲۵-۳۶	۳۷-۴۰	۴۱-۴۸	
قیمت	۴۳۹	۱۷۵۶	۸۷۸	۲۱۷۵

جدول (۴): مشخصات مسائل

شماره مسأله	تعداد کارها	تعداد عملیات کارها	تعداد ماشین ها
۱	۶	۱۴	۸
۲	۶	۱۵	۹
۳	۸	۲۲	۱۰
۴	۱۰	۲۴	۸

همان طور که در جدول (۵) مشاهده می شود زمان تکمیل کارها در مدل پیشنهادی با توجه به این که زمان آماده سازی و جابه جایی را علاوه بر زمان پردازش در نظر گرفته است، باز هم مقدار بهتری (کمتری) نسبت به مقدار زمان تکمیل کار در مدل مرجع دارد. هم چنین پارامتر هزینه کل به دلیل اضافه شدن هزینه های تأخیر و بالانس کاری ماشین نسبت به جواب هزینه کل مدل مرجع تا حدودی بدتر شده است.

جدول (۵): مقادیر حل مدل مرجع و پیشنهادی

شماره مسأله	مدل پیشنهادی		مدل مرجع	
	TTC	Cmax	TTCref	Cmaxref
۱	۳۱۰۶	۳۶۰	۲۴۷۳	۴۸۶
۲	۳۹۵۵	۵۵۷	۳۶۹۵	۶۲۰
۳	۸۰۲۶	۶۸۲	۷۹۱۳	۶۳۷
۴	۷۸۳۸	۷۵۶	۶۹۵۸	۸۹۲
۵	۱۷۸۶۴	۷۸۰	۱۶۷۷۰	۸۲۴

در ادامه با استفاده از اطلاعات و پارامترهای تکمیلی، شامل میزان درصد توافقی کاهش توان مصرفی الکتریکی در برنامه های تشویق محور و متوسط نرخ پاداش در سال ۱۳۹۸ به ازای توان کاهش یافته ۲۰۰۰ و قیمت برنامه ها بر اساس تعرفه های برق در ایران و مطابق جدول (۱)، مدل کامل پیشنهادی مجدد حل و نتایج در ادامه ارائه می گردد.

همان طور که در جدول (۶) و شکل های (۴) تا (۹) مشاهده می شود با فرض افزایش اندازه ی دسته ی کارها و حل مسائل ۱ و ۲ در دوره ی زمانی ۲۴ مرحله ای و مسائل ۳ و ۴ در در دوره ی زمانی ۴۸ مرحله ای و نیز توجه به محدودیت های انرژی الکتریکی و اجرای برنامه های مدیریت سمت تقاضا در بازهای زمانی اوج مصرف (۳۷-۴۰ و ۱۶-۱۳) مدل مرجع و مدل پیشنهادی حل شده و شاخص های عملکردی آخرین زمان تکمیل کارها افزایش یافته است. با توجه به محدودیت های ذکر شده، هزینه کل به دلیل حداکثر شدن پاداش همکاری در

می دهد و محدودیت نوزده (معادله ی (۲۲)) نیز متوسط بار کاری ماشین ها را نشان می دهد.

$$W_m = \sum_j \sum_h \sum_l X_{m_{j,h,l}} N_j R_{j,h} \quad \forall m \quad (21)$$

$$\bar{W} = \sum_m \frac{W_m}{m} \quad \forall m \quad (22)$$

#### ۴. روش حل

##### ۴.۱. خطی سازی و حل مدل ریاضی پیشنهادی

با توجه به چندهدفه بودن مدل و نیز غیرخطی بودن قسمتی از توابع هدف و محدودیت ها، تابع هدف اول، دوم و سوم که به صورت حداکثر و حداقل می باشند به روش LP متریک و به صورت زیر حل می شود [۲۹] و هم چنین تابع هدف سوم نیز خود توابع به صورت وزین شده می باشند.

$$\min f_f = \frac{f_1^* - f_1}{f_1^*} + \frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} + \frac{f_3 - f_3^*}{f_3^*}$$

هم چنین عبارت های بخش سوم، چهارم و پنجم در تابع هدف سوم و هم چنین محدودیت سوم غیرخطی می باشد که به همین منظور برای تبدیل تابع هدف به یک تابع هدف خطی و محدودیت سوم به یک محدودیت خطی، متغیرهای جدید به همراه دسته ای از محدودیت ها متناظر به مدل افزوده می شوند [۳۰].

##### ۴.۲. مثال عددی و نتایج محاسبات

در این قسمت بر اساس اطلاعات مسایل مورد بررسی که برخی از مشخصات آن ها در جداول (۱) تا (۴) آمده است، ابتدا با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده به ارزیابی شاخص های عملکردی اضافه شده به مدل مرجع در سیستم تولید سلولی مجازی، بدون در نظر گرفتن تابع هدف اول و هزینه های انرژی در تابع هدف سوم و نیز محدودیت های مربوطه و بعد از کدنویسی مدل های مرجع و پیشنهادی در نرم افزار GAMS نسخه ۲۵.۱.۳، جواب بهینه ی سراسری برای مثال ارائه شده به دست می آید و در ادامه مدل پیشنهادی به صورت کامل و با در نظر گرفتن تمام اهداف و محدودیت ها، پس از خطی سازی به روش L-P متریک و در نرم افزار GAMS نسخه ۲۵.۱.۳ حل گردیده است.

جدول (۱): مشخصات ماشین ها مسأله ی ۱

شماره ی ماشین	نوع ماشین
۱, ۲, ۳	A
۴, ۵, ۶	B
۷, ۸	C

جدول (۲): مشخصات کارها با توان الکتریکی مسأله ی ۱

اندازه ی دسته	توالی، زمان پردازش و توان الکتریکی	شماره ی کار
کار	مصرفی	کار
۶۰	A, 5, 15 - B, 7, 10	۱
۵۶	C, 20, 8 - A, 15, 4	۲

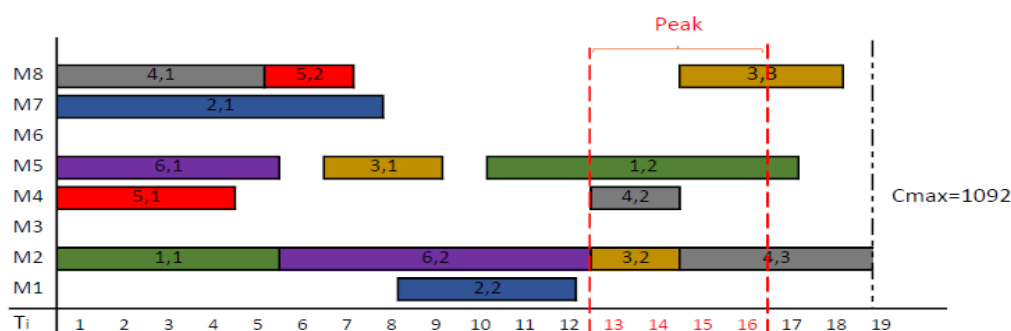


و پردازش در بازه‌ی زمانی اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا می‌باشد؛ به‌طوری‌که با توجه به سقف توان مصرفی در مسائل (۵۰-۳۰) در بازه‌ی اوج مصرف، حداکثر توان مصرفی صفر یا مقدار بسیار کمی می‌باشد.

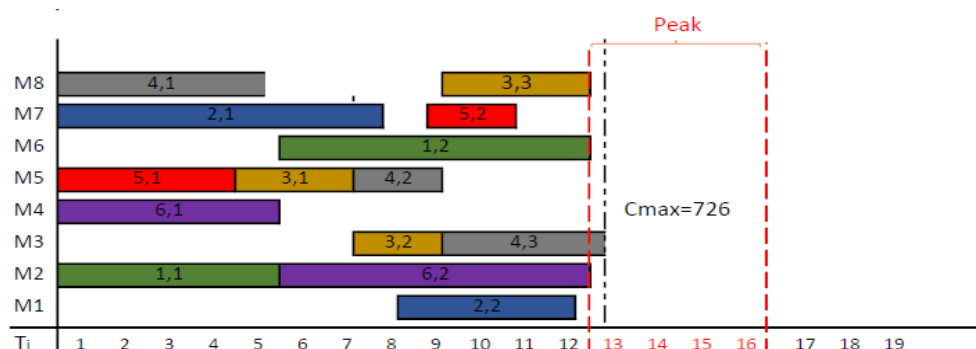
برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا و افزایش اندازه‌ی دسته کارها، و همچنین هزینه‌ی انرژی، هزینه‌های تأخیر و بالانس کاری ماشین نسبت به جواب هزینه‌ی کل مدل مرجع تا حدودی بیشتر شده است، ولی نکته‌ی با اهمیت در این موارد، عدم تخصیص کار به ماشین‌آلات

جدول (۶): مقادیر حل مدل مرجع و پیشنهادی

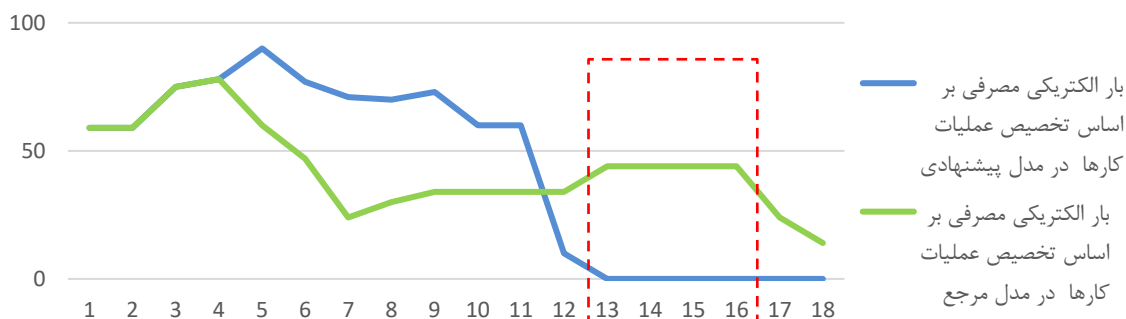
شماره‌ی مسأله	مدل مرجع						مدل پیشنهادی			
	Cmaxref	TTCref	Cmax	TTC <sup>5</sup>	TT <sup>4</sup>	TML <sup>3</sup>	EC <sup>1</sup> + PC <sup>2</sup>	Pmax In Peak (DSM-Pdi)	Avard DSM	Pmax
۱	۱۰۹۲	۵۳۳۰	۷۲۶	۸۰۰۵	۴۷۲۰	۱۴۴۰	۵۳۹۰۴۵	۰	۲۴۰۰۰۰	۹۰
۲	۱۲۴۰	۷۳۹۰	۱۴۴۰	۸۳۰۰	۸۹۱۰	۲۹۱۰	۷۱۷۴۰۰	۲۰	۱۶۰۰۰۰	۶۲
۳	۱۳۹۲	۱۶۹۳۲	۱۵۰۰	۲۴۹۶۰	۲۹۴۵۰	۳۵۴۰	۸۵۹۸۹۵	۰	۴۰۰۰۰۰	۹۳
۴	۱۷۸۴	۱۳۹۱۶	۱۸۳۴	۱۷۷۶۸	۱۰۵۰۴	۲۶۶۰	۷۱۱۴۹۰	۰	۲۴۰۰۰۰	۱۱۶



شکل (۴): نمودار گانت زمان‌بندی مسأله‌ی ۱ از حل مدل مرجع



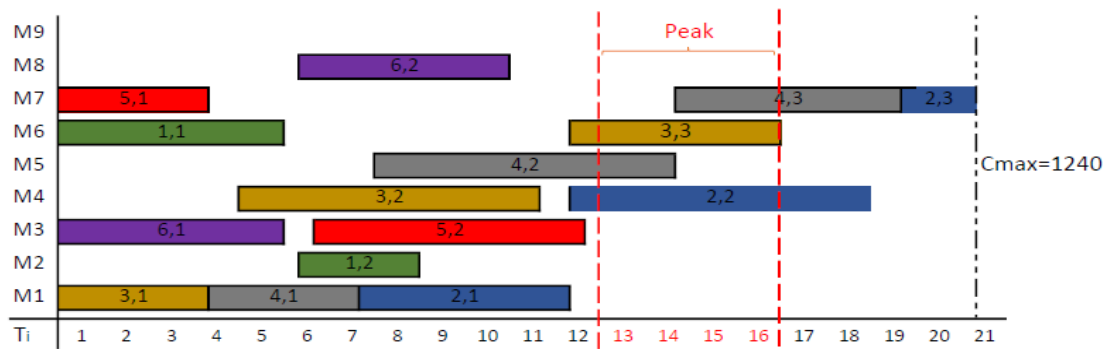
شکل (۵): نمودار گانت زمان‌بندی مسأله‌ی ۱ از حل مدل کامل پیشنهادی



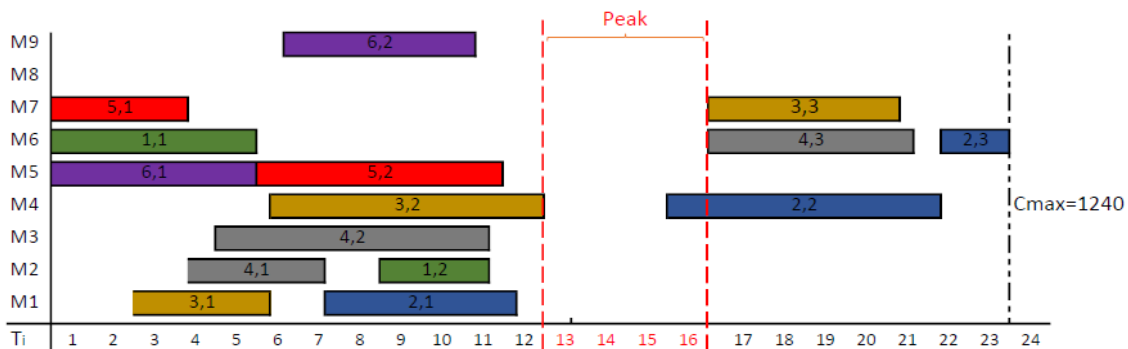
شکل (۶): نمودار بار الکتریکی مصرفی در ساعات مسأله‌ی ۱ از حل مدل مرجع و پیشنهادی

4. Total Tardiness  
5. Total Traveling Cost

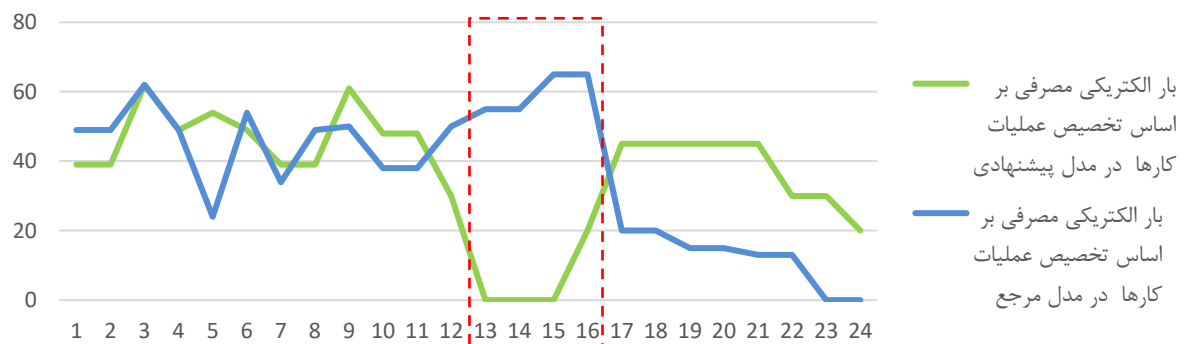
1. Electric cost  
2. Power cost  
3. Total Machine Load Balance



شکل (۷): نمودار گانت زمان بندی مسأله ی ۲ از حل مدل مرجع



شکل (۸): نمودار گانت زمان بندی مسأله ی ۲ از حل مدل پیشنهادی



شکل (۹): نمودار بار الکتریکی مصرفی مسأله ی ۲ از حل مدل مرجع و پیشنهادی

است. بر این اساس صنایع علاوه بر برنامه ریزی برای محدودیت های عرضه انرژی، می توانند هزینه های مرتبط به انرژی را با به حداقل رساندن در زمان های اوج و بحرانی که دارای هزینه های بیشتری هستند، کاهش داده و از پاداش های همکاری در برنامه های تشویق محور نیز بهره مند شوند. هم چنین در تحقیقات در زمینه طراحی سلول های مجازی، مدیریت انرژی الکتریکی و هزینه های آن و فرصت های پیش رو نادیده گرفته شده است. در تحقیق حاضر برای زمان بندی سلول های مجازی مدل جدیدی ارائه شده است که هزینه ها و محدودیت های انرژی الکتریکی و زمان های وابسته به توالی عملیات تولیدی را مدنظر قرار می دهد. بر این اساس، مدل ارائه شده در دو بخش شاخص های عملکرد در مسأله ی زمان بندی و مدیریت انرژی منطبق بر برنامه های مدیریت سمت تقاضا نسبت به مدل مرجع

### ۵. نتیجه گیری

در سال های اخیر برنامه های مدیریت سمت تقاضا مورد توجه فراوان واقع شده اند. یکی از این راه کارها، تشویق مشترکین به مصرف در ساعات غیرپیک است که برای این امر راه کارهایی وجود دارد. تشویق مشترکین برای مصرف در ساعات غیرپیک و کمک به پیک سایی در ساختار صنعت برق از طریق ارائه اعمال نرخ های چند تعرفه ای صورت می پذیرد. مدیریت بار الکتریکی صنعتی، با توجه به سهم بالای انرژی مصرفی آن، می تواند نقشی کلیدی در برنامه های مدیریت سمت تقاضا در زمان اوج مصرف را ایفا کند. از طرفی امروزه در بسیاری از شرکت های تولیدی تعادل بار کاری ماشین ها و زمان تأخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین به عنوان شاخص های کارکردی جهت بهبود در بهره وری و بهبود در برنامه ریزی و کاهش هزینه های الزام شده

اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با مدل مرجع مقایسه شده است.

با توجه به مطالعه‌ی انجام‌شده در تحقیق حاضر، حوزه‌های زیر می‌توانند زمینه‌های مناسبی برای انجام تحقیقات آتی قلمداد شود.

✓ در نظر گرفتن سایر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا براساس خودتأمین بودن صنعت مانند مولدها و انرژی تجدیدپذیر نظیر فتوولتائیک و بادی و تأثیر آن‌ها بر میزان مصرف انرژی الکتریکی در ساعات پیک و بحرانی شبکه‌ی برق.

✓ در نظر گرفتن مفروضات جدید در مسأله‌ی زمان‌بندی سلول‌های مجازی، در مدل ارائه شده زمان‌های دسترسی به ماشین‌های تولیدی برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند که می‌توان حل مسأله را به‌صورت انقطاع و با در نظر گرفتن این زمان‌ها به‌صورت غیرصفر مورد بررسی قرار داد؛ دلیل این امر، این است که زمانی که تقاضا تغییر می‌کند یا تقاضای جدیدی وارد سیستم می‌شود لزوماً همه‌ی ماشین‌ها در همان لحظه در دسترس نیستند. همچنین در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند و در عین حال در برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا نیز کارایی بهتر و بیشتری خواهد داشت.

✓ در نظر گرفتن سایر شاخص‌های عملکردی در مسأله‌ی زمان‌بندی.

✓ با توجه به نوع مسأله‌ی NP-Hard و زمان زیادی که در حل مسائل با ابعاد بزرگ، از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسائل استفاده شود.

دارای کارایی بهتری می‌باشد. همچنین در این بخش سعی شده است تأثیر توابع هدف بر مقادیر بهینه با فرض حل مدل پیشنهادی به‌صورت تک‌هدفه و یکسان بودن وزن‌ها در توابع هدف سوم مورد بررسی قرار گیرد. جدول (۷) نشان می‌دهد، مقادیر تابع هدف دوم ( $C_{max}$ ) که یکی از اهداف مهم در مسأله‌ی زمان‌بندی می‌باشد از مقادیر مدل مرجع در جدول (۶) بهتر می‌باشد که بر این اساس می‌توان گفت مدل در زمان عدم محدودیت در عرضی انرژی و هزینه‌های پایین انرژی دارای کارایی بهتری می‌باشد و قابل‌استفاده بوده است و در عین حال پس از حل مدل پیشنهادی به‌صورت کامل مقادیر شاخص‌های عملکردی تا حدودی بدتر شده است، اما عملکرد برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا و مدیریت انرژی تا حد زیادی به مقادیر بهینه‌ی خود نزدیک می‌باشد و به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا در شرایط اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا ضمن تحقق نسبی اهداف زمان‌بندی تولید، به مدیریت انرژی نیز بپردازد و از سایر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا براساس خودتأمین بودن صنعت مانند مولدها و انرژی تجدیدپذیر نظیر فتوولتائیک و بادی و تأثیر آن‌ها بر میزان مصرف انرژی الکتریکی در ساعات پیک و بحرانی شبکه‌ی برق برای تأمین انرژی مصرفی استفاده نماید.

مدل ارائه شده برای انرژی الکتریکی مصرفی صنایع و تأثیر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا براساس برنامه‌ی زمان‌بندی سلول‌های تولید مجازی از دسته مدل‌های چندهدفه می‌باشد و برای حل این مدل جهت به‌دست آوردن جواب بهینه از روش L-P متریک و از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS استفاده شده است. با ارائه مثال‌های عددی، کارایی مدل ارائه شده در دو قسمت شاخص‌های عملکردی و

جدول (۷): مقادیر بهینه‌ی توابع هدف در مدل پیشنهادی

شماره هدف	شماره مسأله				
	وضعیت توابع هدف	۱	۲	۳	۴
$f(1)$	$f(1), f(2), f(3)$	۲۴۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰
$f(2)$		۷۲۰	۱۱۱۰	۱۲۳۶	۱۶۲۰
$f(3)$		۱۰۳۵۶۲	۱۴۱۰۰۹	۱۴۲۶۶۶	۱۴۴۵۸۹
$f(1)$		۲۴۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰
$f(1)$		۷۲۶	۱۴۴۰	۱۵۰۰	۱۸۳۴

industries for electricity markets in Germany”, The 5th Conf. on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Dubrovnik.

[5] Esmailnadjad, S., Sundquist, J. (2014) “Demand Side Management in Swedish Industry”, M.Sc. Thesis in Chalmers University of Technology, Sweden.

[6] Zhou, D., Zhou, K., Zhu, L., Zhao, J., Xu, Z., Shao, Z., Chen, X. (2017). “Optimal scheduling of multiple sets of air separation units with frequent load-change operation”, Separation and Purification Technology, 172: 178–191.

[7] Valdes, J. (2019). “Industry, flexibility, and demand response: Applying German energy transition lessons in Chile”. Energy Research &

## مراجع

- [1] Gellings, C., Clark, W. (1985). “The concept of demand-side management for electric utilities”, Proceedings of the IEEE, 73: 1468–1470.
- [۲] سرافرازی، عباس، بشیری، مهدی، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۷). مدل‌سازی چندهدفه خوشه‌های صنعتی از منظر تولید سلولی پویا و توسعه اقتصادی پایدار، فصل‌نامه مدل‌سازی اقتصادی، ۲: ۴۹–۹۱.
- [3] Montreuil, B. (1999). “Fractal layout organization for job shop environments”, International journal of production research, 37: 501–521.
- [4] Paulus, M., Borggreffe, F. (2009). “The potential of demand – side management in energy intensive

- 1989-1996.
- [21] Subash Babu, A., Nandurkar, K.N., Thomas, A. (2000). "Development of virtual cellular manufacturing systems for SMEs", *Logistics Information Management*, 13: 228-242.
- [22] Nomden, G., Zee, D., Van Der, J. (2008). "Virtual Cellular Manufacturing: Configuring Routing Flexibility", *International Journal of Production Economics*, 112: 439-451.
- [23] Mohammad Golmohammadi, A., Honarvar, M., Hosseini-Nasab, H., and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). "Machine Reliability in a Dynamic Cellular Manufacturing System: A Comprehensive Approach to a Cell Layout Problem", *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 29: 175-196.
- [24] Jahed, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2021). "Mathematical Modeling for a Flexible Manufacturing Scheduling Problem in an Intelligent Transportation System", *Iranian Journal of Management Studies (IJMS)*, 14: 189-208.
- [25] Shafiee-Gol, S., Kia, R., Kazemi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., and Mostafayi Darmian, S. (2020). "A mathematical model to design dynamic cellular manufacturing systems in multiple plants with production planning and location-allocation decisions", *Soft Computing*, Article in Press.
- [26] Raoofpanah, H., Ghezavati, V., and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). "Applying an Imperialist competitive algorithm for scheduling parts in a green cellular manufacturing system with consideration of production planning", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12: 226-248.
- [27] Raoofpanah, H., Ghezavati, V., and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). "Solving a new robust green cellular manufacturing problem with environmental issues under uncertainty using Benders decomposition", *Engineering Optimization*, 51: 1229-1250.
- [28] Sarem-Bafandeh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). "A mathematical model for virtual manufacturing cells scheduling with setup time, traveling time, tardiness and machine load balance on a distributed layout", *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 27: 105-114.
- [29] Akbarpour, N., Hajiaghaei-Keshteli, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). "New approaches in meta-heuristics to schedule purposeful inspections of workshops in manufacturing supply chains", *International Journal of Engineering - Transactions B: Applications*, 33(5): 833-840.
- [30] Alimian, M., Ghezavati, V., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). "New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems", *Journal of Manufacturing Systems*, 56: 341-358.
- Social Science, 54: 12-25.
- [8] Altom, R.J., (1978). "Costs and Savings of Group Technology", Research report, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.
- [9] McLean, CR., Bloom, HM., Hopp TH. (1982). "The virtual manufacturing cell", In Proc. Fourth IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology. 105-111.
- [10] Kesen, SE., Das, S.K., Gungor, Z. (2010). "A mixed integer programming formulation for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 47: 665-678.
- [11] Kesen, S.E., Das, S.K., Gungor, Z. (2010). "A genetic algorithm-based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)", *International Journal of Computers & Operations Research*, 37: 1148-1156.
- [12] Lahmar, M., Benjaafar, S. (2007). "Design of distributed layouts", *IIE Transactions*, 37: 303-318.
- [۱۳] پایدار، محمد مهدی، سعیدی مهرآباد، محمد. (۱۳۹۳). طراحی یک مدل یکپارچه استوار دوهدفه زنجیره‌تأمین و آرایش سلولی مجازی یویا، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۲: ۳۳-۳۵.
- [۱۴] رفیعی، مجید، محمدی طلب، عطیه. (۱۳۹۶). ارائه مدل ریاضی با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی سیستم تولید سلولی یویا با در نظرگیری ماشین‌آلات چندکاره، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۹: ۲۸۱-۲۹۵.
- [۱۵] افسر، امیر، بهنامیان، جواد. (۱۳۹۸). زمان‌بندی چند عاملی ماشین‌های موازی ناهمگن با در نظر گرفتن هزینه انرژی و کارهای به‌هنگام، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۵: ۲۷۸-۳۰۳.
- [16] The International Institute for Energy Conservation (IIEC). (2006). "Demand side management best practices guidebook". the United Nations Department of Economic and Social Affairs (USAID).
- [17] River, C. (2005). "Primer on demand-side management with an emphasis on price-responsive programs", report prepared for the world bank, 06090, Charles River Associates, Washington, DC.
- [18] Lampropoulos, I., Kling, W. L., Ribeiro, P. F., and van den Berg, J. (2013). "History of demand side management and classification of demand response control schemes", *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, (Vancouver, BC), 1-5.
- [19] Hatami, A., Seifi H., and Sheik-El-Eslami, M. (2009). "A stochastic-based decision-making framework for an electricity retailer: time-of-use pricing and electricity portfolio optimization", *IEEE Transactions on Power Systems*, 26: 1808-1816.
- [20] Albadi, M.H., El-Saadany, E.F. (2008). "A summary of demand response in electricity markets", *Electric Power Systems Research*, 78:



DOI: 10.22084/ier.2020.19256.1855

## Mathematical modeling of the influence of demand-side management programs on electrical energy consumption in industries based on the scheduling of virtual manufacturing cells

M. Sarem Bafandeh<sup>1</sup>, H. Hosseini Nasab<sup>\*2</sup>, R. Tavakoli Moghadam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>3</sup> Professo, School of Industrial Engineering, Colleges of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 29 May 2019

Accepted 3 October 2019

#### *Keywords:*

Demand-side management

Virtual manufacturing cell

Scheduling

Demand response programs

Electric energy

Maximum electrical power

### ABSTRACT

This paper presents a mixed-integer programming model for the influence of demand-side management programs by calculating electricity consumption, the quality of cooperation of industries in demand-side management programs, and the foundation of virtual manufacturing cell scheduling. In this model, the time of travel among machines and machine work/task load balance are utilized due to the nature of large and heavy industries and their effectiveness in demand response programs compared to virtual cells, which are a compound of cellular and flexible manufacturing systems regarding the preparation times depending on the sequence of operations. This model aims to maximize the bonus of cooperation in reward-oriented programs of demand-side management, minimize the time of completing the last task, and minimize the energy and travel expenses. The performance indices (e.g., maximum electrical power consumption, machine sequence, and the latency of the positions of loads on each machine) and the results of solving some numerical examples are shown and analyzed. Accordingly, the proposed model is a multi-objective model that to obtain the optimal answer, the L-P metric method and Gams optimization software have been used. The results are presented in several numerical examples in two parts of performance characteristics and demand-side management using the proposed and reference model.

\* Corresponding author. H. Hosseini Nasab  
Tel.: 03531232407; E-mail address: [hhn@yazd.ac.ir](mailto:hhn@yazd.ac.ir)