Mazandaran University of Science and Technology

Available online at www.iiec2017.com

Iran Institute of Industrial Engineering

13th International Conference on Industrial Engineering
(IIEC 2017)

بهینه سازی زمانبندی تولید تک ماشین برای حداقل کردن مجموع هزینه های مصرف انرژی و زمان پایان کارها

محمد حسین حقیقی [۱]، راشد صحرائیان [۲]، سید میثم موسوی [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ mh.haghighi.ie@gmail.com

[۲] دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛sahraeian@shahed.ac.ir

[۳] استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ sm.mousavi@shahed.ac.ir

چکیده:

بالا رفتن هزینه های انرژی یکی از فاکتورهای مهم مربوط به افزایش هزینه های تولید می باشد که مدیران تولید و تصمیم گیرندگان را تشویق می کند تا با روش های مختلف با این مسئله روبرو شوند. یک گام مهم در این روند این است که هزینه های مصرف انرژی در سیستم‌های تولید کاهش یابد و قیمت های انرژی متفاوتی در طی یک روز در نظر گرفته شود. این مقاله یک مدل ریاضی برای حداقل کردن هزینه‌های مصرفی انرژی با در نظرگرفتن زمان پایان کارها برای زمانبندی تولید تک ماشین در طی فرآیندهای تولید ارائه می دهد. با اتخاذ تصمیم‌هایی در سطوح ماشین تا زمان های انجام کار، توقف و خاموشی ماشین زمانبندی شود. این مدل مدیران عملیات را توانمند می سازد تا زمانبندی تولید را با حداقل هزینه در طی شیفت های کاری انجام دهند. نتایج نشان می‌دهد که کاهش چشمگیر در هزینه های انرژی می‌تواند براساس عدم تخصیص در دوره ها با هزینه های انرژی بالا باشد که این فرآیند حداقل کردن، اثرات مثبت محیط زیستی را همراه دارد که به دلیل کاهش هزینه های انرژی در طول دوره های پیک و اوج می باشد که اثرات مخرب co2 در محیط کاهش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: زمانبندی مسئله تک ماشین- مجموع هزینه های مصرفی انرژی-قیمت های انرژی متغیر-زمان پایان کارها

Optimization of single-machine production scheduling to minimize energy consumption costs and makespan

Mohammadhosein Haghighi, Rashed Sahraeian, S.Meysam Mousavi

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

Abstract

Rising energy cost can be regarded as one of the important factors related to production costs which encourages production managers to tackle this problem in different manners. One important step in this trend is to reduce the energy consumption costs of production systems by considering variable energy prices during a day. This paper proposes a mathematical model to minimize energy consumption costs and makespan for single machine production scheduling during production processes. This minimization process also has a positive environmental effect by reducing energy consumption during peak periods, which increases the possibility of reducing CO2 emissions from power generator sites.

Key words:

Single-machine scheduling, Minimizing energy consumption costs, Variable energy prices, Makespan

مقدمه

امروزه فشارها بر روی صنعت تولید برای کاهش دادن اثرات مخرب آلودگی های خروجی از کارخانجات و همچنین به عنوان عامل تاثیرگذار در تغییرات محیط زیستی افزایش یافته است و از طرف دیگر همواره باید اثربخشی انرژی در فرآیندهای تولید افزایش پیدا کند. به طور عمومی اثر بخشی انرژی یعنی با داشتن خروجی یکسان مصرف انرژی کاسته شود که نتیجه آن بر روی اثربخشی اقتصادی هم نمایان می شود (پترسون ۱۹۹۶) و به دلیل اهمیت موضوع ازگذشته تاکنون مطالعات زیادی درباره سیاست-های برنامه ریزی و اجرا اثربخشی انرژی در کشورهای مختلف انجام شده است.

در نظر گرفتن تغییرات پیوسته در قیمت های انرژی به عنوان یک فاکتور مهم در تعریف هزینه های مصرفی انرژی، عنوان گرفته است. بنابراین در این مقاله تلاش شده است تا با توجه به قیمت های مختلف انرژی در دوره های مختلف، به هزینه های انرژی در زمان های اوج مصرف نیز توجه شود و مدل ریاضی معرفی شده است تا کل هزینه های مصرفی انرژی برای زمانبندی تک ماشین حداقل شود و تصمیم گیرندگان بتوانند تشخیص دهند که ماشین در چه زمان‌هایی در حال انجام کار، متوقف و یا خاموش باشد که البته در این میان باید به مدت زمان لازم برای روشن شدن و یا خاموش شدن ماشین نیز توجه کرد. تغییرات در قیمت‌های انرژی یک فاکتور کلیدی در مدل ارائه شده است. ساختار این مقاله این گونه است که در بخش ۲ مرور ادبیات، بخش ۳ تعریف مسئله و مدلسازی ریاضی، بخش۴ اجرای مدل، بخش ۵ نتیجه گیری می باشد.

مرور ادبیات

به منظور اثر بخشی تولیدات مقاله های متفاوتی ارائه شده است که از میان آن ها هوگووین (۲۰۰۵) مقاله ای تحت عنوان حداقل کردن زمان پایان انجام کارها و کاهش هزینه های تولید ارائه کرده است. اما بعد از آن لیو (۲۰۰۳) مقاله ای به منظور کاهش مصرف انرژی در مسئله زمانبندی تولید در فرآیند تولید کارگاهی ارائه داد. در این میان مدلسازی های ریاضی و الگوریتم های بهینه سازی متفاوتی برای بهینه سازی زمانبندی تولید ارائه شده است که از میان آن ها می‌توان به مقاله ای که توسط لین و لیوو(۲۰۰۸) نگارش یافته اشاره کرد که یک الگوریتم بهینه به منظور حداقل کردن زمان انجام کارها برای مسئله ماشین های موازی ارائه داده اند که از مهمترین مطالعات به شمار می رود.

از منظر دیگر اثر بخشی تولید این گونه تعریف می شود: تولید بدون هدر دادن منابع که در نتیجه پیامدهای مثبتی روی اقتصاد و همچنین محیط زیست پیرامون خواهد داشت؛ البته راه حل ها و روش های زیادی استفاده شده است تا اتلاف انرژی در فرآیند های تولید کاهش پیدا کند که یکی از این تحقیقات مرتبط مقاله ای است که توسط موزن و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده است که عنوان مقاله زمانبندی تک ماشین برای حداقل کردن مجموع مصرف انرژی می باشد که یکی از مقالات مهم در این زمینه به شمار می رود که در این مقاله اذعان شده است که ماشین می تواند خاموش شود، به شرطی که مصرف انرژی برای روشن و خاموش شدن ماشین کمتر از مصرف انرژی در حالت توقف می باشد. از طرف دیگر روش های بهینه‌سازی زیادی هم استفاده شده است تا اثر بخشی انرژی را افزایش دهد. برای مثال لیو و همکاران (۲۰۰۸) یک مدل برنامه ریزی غیر خطی مختلط برای مسئله زمانبندی فرآیند خط تولید (flow shop) ترکیبی به منظور حداقل کردن مصرف انرژی ارائه داده اند و مسئله را از طریق الگوریتم ژنتیک بهبود یافته حل کرده اند و اگر چه مصرف انرژی، به عنوان تابع هدف بود اما زمان پایان انجام کار نیز به عنوان محدودیت کلیدی در نظر گرفته شده بود؛ البته ضعف مقاله در این بود که زمان های اوج و پیک برای انرژی را در نظر نگرفته است و ضعف دیگر مقاله در این بود که تصور می کردند تا زمانی که کلیه کارها انجام شوند، ماشین نباید خاموش شود. البته برخی مدل های ریاضی برای زمانبندی پویا در سیستم های انعطاف پذیر با تابع هدف حداقل کردن مصرف انرژی ارائه شده است. زنگ و همکاران (۲۰۱۲) و وای و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل زمانبندی فرآیند کارگاهی چند ماشینه برای حداقل کردن زمان انجام کارها و اثرات کربن ارائه کرده اند که آن ها الگوریتم ژنتیک چند هدفه را برای حل مسئله بهینه سازی در نظرگرفته‌اند و همچنین آن ها به دوره های اوج مصرف توجهی نکرده اند. ییلدریم و موزن (۲۰۱۱) یک مدل ریاضی برای کاهش دادن کل زمان تکمیل کارها و حداقل کردن مصرف انرژی برای مسئله تک ماشین ارائه داده اند که آن‌ها هم از الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده کرده اند و ضعف آن ها در این بود که به دوره های اوج مصرف بی توجه بوده اند که دراین مقاله توجه شایانی به دوره های اوج مصرف می شود.

فنگ و همکاران (۲۰۱۱) یک مدلسازی برنامه ریزی خطی مختلط چند هدفه عمومی برای بهینه سازی زمانبندی با حداقل کردن زمان انجام کارها و انرژی معرفی کرده اند. لیو و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل بهینه سازی زنبور عسل جدید برای حل زمانبندی فرآیند خط تولید با درنظر گرفتن مصرف الکتریسیته درنظر گرفته اند و آن ها یک راه حل چندهدفه برای حداقل کردن زمان انجام کارها و مصرف انرژی ارائه کرده اند.

اگر چه مقالات زیادی مصرف انرژی را در زمانبندی تولید در نظر گرفته اند اما هیچ کدام از آن ها مسئله زمانبندی را برای حداقل کردن هزینه های تولید با در نظر گرفتن نوسانات هزینه های تولید در دوره های مختلف و کوتاه در نظر نگرفته اند؛ از طرف دیگر توجه به حداقل کردن زمان انجام کارها با در نظر گرفتن حداقل مصرف انرژی با توجه به نوسانات هزینه در دوره های مختلف یک مسئله دو تابع هدفه ایجاد می‌کند که به عنوان خلا مهم در مطالعات گذشته به شمار می آید.

تعریف مسئله و مدلسازی

تعریف مسئله

طرح زمانبندی ایجاد شده در این مقاله مدیران عملیات را توانمند می‌سازد تا کل هزینه های مصرف انرژی را در مسئله تک ماشین حداقل کند و این مقاله تغییرات پیوسته در قیمت های انرژی را به عنوان یک فاکتور مهم در مسئله زمانبندی مشخص می کند.

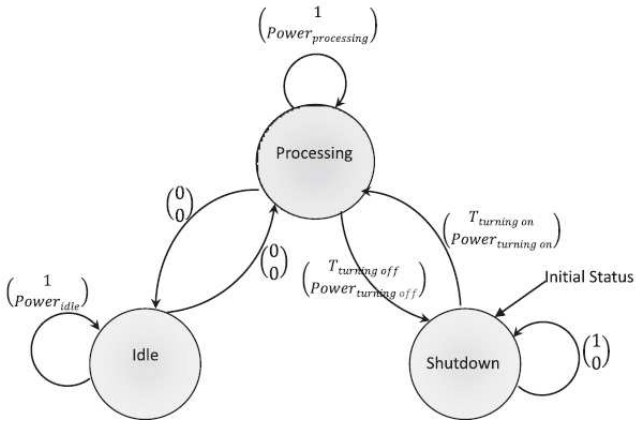
خروجی های مدل ارائه شده:

۱- زمان شروع فرآیند انجام هر کار
۲- تصمیم گیری درباره این که ماشین در چه زمان هایی باید بیکار و یا خاموش باشد و زمان های تغییر حالت را مشخص کنیم.
۳- هزینه های دقیق مصرف انرژی برای ماشین را محاسبه کنیم.

در واقعیت هر نوع ماشین حالت ها و الگو های تغییر حالت متفاوتی دارد که حاکی از الگو های متفاوت مصرف انرژی می باشد. وینر و همکاران (۲۰۱۱)، البته اطلاعات دقیق مربوط به مصرف انرژی ماشین‌ها توسط سنسورهای حرفه ای قابل اندازه گیری است (ادریسکلوادنل، ۲۰۱۳).

در این مقاله برای حل مسئله حداقل کردن هزینه های انرژی ۳ حالت برای ماشین در نظر گرفته می شود که عبارتند از: ۱- انجام فرآیند (تولید) ۲- توقف (کار بدون تولید) و ۳-خاموشی

مدل شهودی برای عملیات این ماشین در نمودار ۱ آورده شده است :



نمودار ۱: مدل شهودی عملیات ماشین

$\binom{a}{b}$ نشان دهنده این است که تغییر حالت ، نیازمند a واحد زمانی و b واحد مصرف انرژی است. زمان و هزینه مصرف انرژی در دو صورت در این مدل در نظر گرفته شده است: زمان سپری شده وقتی که از حالت خاموش به حالت انجام کار تغییر حالت می دهیم و برعکس (در حال خاموش شدن).

تغییر حالت بین توقف و خاموشی در نظر گرفته نمی شود؛ در مدل به دلیل این که وقتی که ماشین قصد دارد از انجام کار به حالت خاموشی تغییر حالت بدهد، دو گزینه به وجود می آید؛ اولا: ماشین در ابتدا از حالت انجام کار به حالت توقف تغییر حالت بدهد و سپس از حالت توقف به حالت خاموشی برود. دوما: مستقیما از حالت انجام کار به حالت خاموشی برود و این گزینه به دلیل داشتن هزینه کمتر ترجیح داده می شود و از طرف دیگر به زمان جابجایی از حالت توقف به انجام کار هم توجهی نمی شود؛ چرا که در واقعیت این زمان خیلی کوتاه است و تاثیر چندانی بر جواب ندارد و به دلیل این که زمان تنظیم و زمان انجار کار ماشین متفاوت است، زمان هر حالت به صورت تعداد دوره ها و زمان جابجایی هم براساس تعداد دوره ها معرفی می کنیم.

مفروضات و محدودیت های در نظر گرفته شده در مدل:

۱- همه کارها توسط یک ماشین انجام می‌گیرد.

۲-حق انقطاع در مدل وجود ندارد یعنی وقتی که کاری شروع به انجام شدن بکند باید آن کار تا انتها انجام بشود و در میانه راه نمی توان کار دیگه‌ای را آغاز کرد.

۳-کارها بر اساس توالی تعیین شده روی ماشین بروند.

۴-در این مدل وقتی ماشین برای دوره ای از زمان در حالت توقف باقی بماند ماشین باید خاموش شود؛ اگر دو شرط زیر را دارا باشد:

الف) زمان مورد نیاز برای خاموش و روشن کردن ماشین کمتر از زمان توقف بشود .ب) هزینه مصرف انرژی برای خاموش و روشن کردن ماشین باید کمتر از هزینه مصرف انرژی در حالت توقف باشد و اگر این دو شرط برقرار نباشد، ماشین باید در همان حالت توقف باقی بماند.

ورودی های مدل:

۱- مدت زمان شیفت های تولید که توسط طراحان تولید تعیین می شود.
۲- قیمت های انرژی در طول هر دوره یا شیفت.
۳- تعداد کارها و زمان فرآیند برای هر یک از کارها.
۴- مقدار مصرف انرژی در هر دوره و در هر حالت ماشین (انجام کار، توقف، خاموش) و در هر تغییر حالت ماشین (خاموش کردن، روشن کردن).
۵- زمان مورد نیاز برای تغییر حالت (روشن کردن، خاموش کردن).

مدل ریاضی

در این بخش برای حل مسئله، در ابتدا مجموعه های ضروری و پارامتر ها و متغیرها معرفی می شوند و سپس مدل (تابع هدف و محدودیت ها) ارائه می شود.

مجموعه ها:

J: تعداد کل کارها که توسط ماشین انجام می‌شود.

P: تعداد دوره ها

S: تعداد حالت ها{۱- انجام کار(تولید) ۲- توقف(کار بدون تولید) ۳ – خاموش}

پارامترها:

E_P^S :مقدار انرژی مصرفی در طول دوره P در هر حالت S

$E_{SS'}^T$: مقدار انرژی مصرفی متناظر با هر دوره pوقتی از حالت s به s' تغییر حالت می دهیم.

C_P :قیمت های انرژی متناظر با هر دوره P

T_j^J :زمان لازم برای انجام هر کار

$T_{SS'}^T$: مقدار دوره های که باید صرف بشود تا ماشین از حالت S به S' تغییر حالت بدهد: اگر برابر ۰ شود یعنی ماشین می تواند از حالت S در دوره P به حالت S' در دوره P+1 برود.

M: یک عدد قراردادی مثبت خیلی بزرگ

$$\alpha_{SP} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین در دوره } p \text{ در حالت } s \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$\beta_{ss'p} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین در دوره } p \text{ از حالت } s \text{ به حالت } s' \text{ تغییرکند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$X_{jp} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } j \text{ در دوره } p \text{ انجام بشود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$S_{jp} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } j \text{ در دوره } p \text{ شروع شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

مسئله می تواند به صورت زیر فرمول بندی بشود :

$$\min \sum_p C_P \left(\sum_s E_s^S \alpha_{sp} + \sum_s \sum_{s'} E_{SS'}^T \beta_{ss'p}\right) \quad (۱)$$

$$\min \quad C_J \quad (۲)$$

$$C_J \geq p + T_J - M(1 - S_{JP}) \quad (۳)$$

$$\sum_j X_{jp} = \alpha_{1P} \quad (۴)$$

$$\sum_s \alpha_{sp} + \sum_{s,s'} \beta_{ss'p} = 1 \quad (۵)$$

$$\alpha_{sp} \le \sum_{s',T^T_{SS'}=0} \alpha_{s'p+1} + \sum_{s'',T^T_{S''}\ge 1} \beta_{ss''p+1} \quad (۶)$$

$$\beta_{ss'p} \le \beta_{ss'p+1} + \alpha_{s'p+1} \quad (۷)$$

$$\sum_{p+1\le p'\le p+T^T_{SS'}} \beta_{ss'p'} \ge (\alpha_{sp} + \beta_{ss'p+1} - 1)T^T_{SS'} \quad (۸)$$

$$\beta_{ss'p} + \beta_{ss'p+T^T_{SS'}} \le 1 \quad (۹)$$

$$\sum_j X_{jp} \le 1 \quad (۱۰)$$

$$S_{j'p} \le \sum_{p'\le p} S_{jp'} \quad (۱۱)$$

$$\sum_{P\le p'\le p-T_{j-1}-1} X_{jp'} \ge T^J_j S_{jp} \quad (۱۲)$$

$$\sum_P X_{jp} \le T^J_j \quad (۱۳)$$

$$\sum_P S_{jp} = 1 \quad (۱۴)$$

$$\alpha_{2P} = 1 \quad (۱۵)$$

$$\alpha_{sp} \in \{0,1\} \quad (۱۶)$$

$$\beta_{ss'p} \in \{0,1\} \quad (۱۷)$$

$$X_{jp} \in \{0,1\} \quad (۱۸)$$

$$S_{jp} \in \{0,1\} \quad (۱۹)$$

رابطه ۱ متناظر با تابع هدف اول می باشد که هزینه های مربوط به حالت های ماشین و قیمت های انرژی در هر دوره را محاسبه می کند. رابطه۲ متناظر با تابع هدف دوم می باشد که زمان پایان تمام کارها (makespan) را حداقل می کند. رابطه ۳ نشان دهنده زمان کار نهایی می باشد. رابطه ۴ نشان دهنده این است که اگر ماشین در حال انجام کارباشد، ماشین روشن می باشد. رابطه ۵ ماشین همواره می تواند در یکی از سه حالت قرار داشته باشد و یا در حال جابجایی بین دو حالت باشد رابطه ۶ و ۷ محدود کردن حالت ها و تغییر حالت های ماشین وقتی که ماشین در دوره قبلی در هر کدام از حالت ها قرار داشته باشد. رابطه ۸ و ۹ ایجاد یک پارامتر بالا و پایین برای تغییر حالت ماشین رابطه ۱۰ فقط اجازه می‌دهد که یک کار روی ماشین در هر دوره در حال انجام دادن باشد رابطه ۱۱ اطمینان یافتن برای این که کارها مطابق با توالی تعیین شده روی ماشین می روند. رابطه ۱۲ نشان دهنده این است که حق انقطاع وجود ندارد. رابطه ۱۳ هر کار روی ماشین متناسب با مدت زمان انجامش تخصیص داده شود. رابطه ۱۴ همه کار ها باید در محدودیت های زمانی انجام بشوند. رابطه ۱۵ این محدودیت شرط کرانی را توصیف میکند. رابطه ۱۶ تا ۱۹ نشان دهنده متغیرهای باینری مدل می باشند.

اجرا

در این مقاله، برای مدل چندهدفه ارائه شده، از فرآیند جمع اوزان استفاده شده است تا توابع هدف با هم، به صورت تک هدفه در نظر گرفته شود و بتوان به جواب بهینه دست یافت.

$$\begin{cases} Z'_1 = \dfrac{Z_1}{Z_1^{max}} \\ Z'_2 = \dfrac{Z_2}{Z_2^{max}} \end{cases}$$

که Z_1^{max}حداکثر ارزش Z_1 و Z_2^{max} حداکثر ارزش Z_2 می باشد.

از همین رو تابع هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$\min \quad (\eta_1 Z'_1 + \eta_2 Z'_2) \quad (20)$$

که η_1 وزن(میزان اهمیت) تابع هدف اول و η_2 وزن تابع هدف دوم می باشد که توسط تصمیم گیرنده مشخص می شود. البته باید توجه داشت که:

$$\eta_1 + \eta_2 = 1 \quad (21)$$

برای اعتبار بخشیدن به مدل ارائه شده مثال های عملی وکاربردی در ابعاد مختلفی آورده شده است و هدف مثال ها ایجاد زمانبندی بهینه می باشد.

جدول ۱ – مدت زمان انجام کارها

کار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
مدت زمان انجام(دوره)	۱	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱

جدول ۲- مصرف انرژی ماشین

مصرف(kw)	حالت و تغییر حالت ها
۴	انجام کار
۲	توقف
۵	روشن کردن
۱	خاموش کردن

جدول ۳- مدت زمان (دوره) مورد نیاز برای تغییر حالت ها

مدت زمان (دوره) مورد نیاز	تغییر حالت ها
۲	روشن کردن(تغییرحالت ازخاموش به انجام کار)
۱	خاموش کردن(تغییر حالت ازانجام کار به خاموش)

جدول ۴- قیمت های انرژی در دوره ها و جواب بهینه

دوره ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
قیمت در هر دوره	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۸	۸	۸	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۷۰	۷۰	۶	۵	۵
انجام کار			۴	۸	۸	۸	۸	۴	۴	۴	۴	۸	۸	۸	۸				۸	۸	۸	۴	۴	۴							
توقف																۱۶	۱۶	۱۶													
روشن شدن	۵	۵																												
خاموش شدن																									۲					
خاموش																										۰	۰	۰	۰	۰
زمانبندی	روشن شدن		۱	۲		۳		۴			۵			۶		توقف			۷		۸		۹	۱۰	خاموش شدن	خاموش				

جدول ۵- مثال دوم: مدت زمان انجام کارها

کار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
مدت زمان انجام(دوره)	۲	۳	۳	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۲

جدول ۶- قیمت های انرژی در دوره ها و جواب بهینه

دوره ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵
قیمت در هر دوره	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۷	۷	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۶	۶	۶	۶	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۶
انجام کار			۸	۸	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۲۸		۸	۸	۸	۸	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۲۴	۲۴		۲۴	۸	۸	۸	۸	۸	۱۲	۱۲	۱۲			
توقف											۱۴												۱۲													
روشن شدن	۱۰	۱۰																																	
خاموش شدن																																	۳		
خاموش																																			۰
زمانبندی	روشن شدن		۱		۲		۳		۴		توقف		۵				۶			توقف		۷		۸		۹		۱۰		خاموش					

نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ریاضی دو هدفه به منظور حداقل کردن کل هزینه های مصرف انرژی و همچنین زمان پایان کارها (makespan) برای زمانبندی تک ماشین با در نظر گرفتن تغییرات پیوسته در قیمت های انرژی در دوره های مختلف ارائه شد. این مدل به دلیل درنظرگرفتن قیمتهای انرژی متفاوت در دوره های مختلف به واقعیت نزدیک تر می باشد از همین رو این مدل به مدیران عملیات و تصمیم گیرندگان کمک می‌کند تا یک زمانبندی تولید کارا و موثر و با حداقل مجموع هزینه های مصرفی و زمان پایان کارها (makespan) داشته باشند. اگر چه هدف اصلی مقاله کاهش دادن هزینه های تولید بود اما در کنار آن مدت زمان و میزان مصرف انرژی در زمان های اوج و پیک مصرف نیز کاهش داده شد که سرانجام بتوان اثرات مخرب بر روی محیط زیست را نیزکاهش داد. به عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی برای این مقاله به موارد زیر می توان اشاره نمود: ۱ – مسئله را در قالب سایر مسائل مثل ماشین های موازی و فرآیند تولید کارگاهی مورد بررسی قرار داد. ۲ - مسئله را با در نظر گرفتن حق انقطاع و عدم توقف و ... مورد حل قرار داد. ۳ – فاکتورهای هزینه (مثل هزینه نگهداری ماشین و ...) برای مسئله در نظر گرفته شود.

مراجع

[۱] Albadi, M.H., El-Saadany, E.F., 2008. A summary of demand response in electricity markets. Electr. Power Syst. Res. 78, 1989e1996.

[۲] Battaglini, A., Lilliestam, J., Haas, A., Patt, A., 2009. Development of SuperSmart grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources. J. Clean. Prod. 17, 911e918.

[۳] Bruzzone, A.A.G., Anghinolfi, D., Paolucci, M., Tonelli, F., 2012. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: a mathematical model for flexible flow shops. CIRP Ann. Manuf. Technol. 61, 459e462.

[۴] Bunse, K.Vodicka, M. Schönsleben, P.Brülhart, M, Ernst, F.O., 2011. Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. J. Clean. Prod. 19,

[۵] Castro, P.M., Harjunkoski, I., Grossmann, I.E., 2009. New continuous-time scheduling formulation for continuous plants under variable electricity cost. Ind. Eng. Chem. Res. 48,

[۶] Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., Sutherland, J.W., 2011. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction.

[۷] Fernandez, M., Li, L., Sun, Z., 2013. “Just-for-Peak” buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. Int. J. Prod. Econ. 146, 178e184.

[۸] Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness. W. H. Freeman and Company, New York.

[۹] Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, first ed. Addison-Wesley Professional.

[۱۰] Gupta, A., Venkataraman, S., 2013. Reducing price volatility of electricity consumption for a firm’s energy risk management. Electr. J. 26, 89e105.

[۱۱] Hasanbeigi, A., Menke, C., Pont, P., 2009. Barriers to energy efficiency improvement and decision-making behavior in Thai industry. Energy Ef. 3, 33-52.

[۱۲] He, Y., Liu, B., Zhang, X., Gao, H., Liu, X., 2012. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system. J. Clean. Prod. 23,

[۱۳] Heikkurinen, P., Bonnedahl, K.J., 2013. Corporate responsibility for sustainable development: a review and conceptual comparison of market- and stakeholderoriented strategies. J. Clean. Prod. 43, 191-198.

[۱۴] Herrmann, C., Thiede, S., 2009. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 1, 221-229.

[۱۵] Hoogeveen, H., 2005. Multicriteria scheduling. Eur. J. Oper. Res. 167, 592-623

[۱۶] . Kostka, G., Moslener, U., Andreas, J., 2013. Barriers to increasing energy efficiency: evidence from small- and medium-sized enterprises in China. J. Clean. Prod. 57,

[۱۷] Kuster, T., Lutzenberger, M., Freund, D., Albayrak, S., 2013. Distributed evolutionary optimisation for electricity price responsive manufacturing using multi-agent system technology 6, 27-40.

[۱۸] Lei, M., Feng, Z., 2012 .A proposed grey model for short-term electricity price forecasting in competitive power markets. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 43,

[۱۹] Lin, C.-H., Liao, C.-J., 2008. Makespan minimization for multiple uniform machines. Comput. Ind. Eng. 54,

[۲۰] Liu, X., Zou, F., Zhang, X., 2008 .Mathematical model and genetic optimization for hybrid flow shop scheduling problem based on energy consumption. In: 2008 Chinese Control Decis. Conf., pp. 1002e1007.

[۲۱] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., Gindy, N., 2013 .An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. J. Clean. Prod., 1-10.