Journal of Industrial Management Studies
Vol. 20, No.65, Summer 2022
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/JIMS.2022.34024.2109

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 2022/03/05
Received: 2021/12/31
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

Presenting an Economic Lot-Sizing Scheduling Problem Considering Maximum Permissible Carbon Emissions

Amir Hossein Nobil — Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Abolfazl Kazemi * — Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Abstract

Carbon emissions related to energy consumptions from the manufacturing industry have become a substantial part of environmental burdens. This study presents carbon emission constraint into the economic lot scheduling problem to reduce carbon emissions. The aim of this research to satisfy customer demand for various items over the planning horizon, with an objective to minimize total costs, includes setup, production, rework and holding costs. In this problem, it is assumed that the production process is defective, and during the process some of the goods are produced with undesirable quality. Defective products can be sold using a rework process. This proposed model has been proven to be a nonlinear convex programming problem. Hence, the optimal solution of this proposed model can be obtained using the derivative method. Finally, a hypothetical example is solved to demonstrate the performance of the proposed exact solution algorithm.

Keywords: Carbon Emission Constraint, Nonlinear Programming, Exact Solution Algorithm, Sustainable Environment, Lot-Sizing Problem.

* Corresponding Author: abkaazemi@qiau.ac.ir
How to Cite: Nobil, A H., Kazemi, A. (2022). Presenting an Economic Lot-Sizing Scheduling Problem Considering Maximum Permissible Carbon Emissions, *Journal of Industrial Management Studies*, 20(65), 217-243.

مقاله پژوهشی

فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی
سال بیستم، شماره ٦٥، تابستان ١٤٠١، ص ٢١٧ تا ٢٤٣
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/JIMS.2022.34024.2109

ارائه‌ی یک مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی با نظرگرفتن حداکثر مقدار مجاز انتشار کربن

امیرحسین نوبیل دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

ابوالفضل کاظمی * دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴
ISSN: 2251/8029
eISSN: 2476-602X

چکیده

انتشار کربن مربوط به مصرف انرژی در صنایع تولیدی، بخش قابل‌توجهی از بار زیست‌محیطی است. در این مقاله، محدودیت انتشار کربن برای یک مدل اندازه انباشته اقتصادی جهت کاهش انتشار کربن ارائه شده است. هدف این مسئله برآورد تقاضای کالاهای مختلف در طول افق برنامه‌ریزی باتوجه به کمینه کردن هزینه‌های تولید، راه‌اندازی، دوباره‌کاری و نگهداری است. در این مسئله فرض شده است که فرآیند تولید کالا نامطلوب است و درحین فرآیند مقداری از کالاها باکیفیت نامطلوب تولید می‌شوند. کالاهای معیوب پس از شناسایی با انجام فرآیند دوباره‌کاری قابل‌استفاده می‌شوند. در این مدل پیشنهادی از یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی محدب استفاده شده است؛ بنابراین، جواب بهینه این مدل پیشنهادی را می‌توان با استفاده از روش مشتق‌گیری به دست آورد. درنهایت، مثال عددی فرضی برای نشان دادن کارایی الگوریتم حل دقیق پیشنهادی حل شده است.

کلیدواژه‌ها: محدودیت انتشار کربن، برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم حل دقیق، محیط‌زیست پایدار، مسئله اندازه انباشته.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین است.

* نویسنده مسئول: abkaazemi@qiau.ac.ir

مقدمه

در دنیای کنونی کشورها و سازمان‌های جهانی به یک توافق جامع دست پیدا کرده‌اند که انتشار کربن با گرمایش جهانی همراه است، لذا کاهش میزان انتشار کربن در دستور کار جهانی برای کنترل اثرات گرم شدن قرار گرفته است. درنتیجه، قوانینی به‌منظور کنترل انتشار کربن مانند پروتکل کیوتو و سیستم‌های صدور مجوز اتحادیه اروپا تحقق یافته است. بااین‌حال، انتشار کربن همچنان یک مسئله جهانی درازمدت است. همچنین در بحران مالی جهانی در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ میلادی، برای اینکه اقتصادهای دنیا به رشد اقتصادی گذشته خود برسند به مصرف بیش‌ازحد از سوخت‌های فسیلی روی آوردند. انتشار گازهای کربن به‌طور مستقیم با مصرف انرژی در طول فرآیند تولید کالاها مرتبط است؛ بنابراین، تولیدکنندگان محصولات مسئول یافتن تکنیک‌های سازگار با محیط‌زیست هستند تا میزان مصرف انرژی و انتشار کربن را کاهش دهند. محققین و متخصصین زیادی برای حمایت از صنعت تولید در این حوزه تحقیق کرده و در حال انجام هستند. برای سنجش و ارزیابی آلاینده‌های زیست‌محیطی از روش‌های مختلف مثل سنجش و آنالیز گازهای خروجی شامل انتشار کربن، سنجش و اندازه‌گیری گردوغبار و ذرات معلق، سنجش پارامترهای آلاینده هوای محیط، سنجش و ارزیابی سروصدای زیست‌محیطی و سنجش و آنالیز پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌کنند که در این مقاله انتشار کربن به‌عنوان یک پارامتر زیست‌محیطی موردبررسی قرار گرفته است (وو و همکاران، ۲۰۱۸).

همچنین یکی از جنبه‌های دیگر در صنایع تولیدی تعیین تکنیکی برای تولید کالاها است به‌نحوی‌که هزینه‌های تولید و کنترل موجودی به تعادل رسیده و کمترین مقدار هزینه کل حاصل شود. برنامه‌ریزی کنترل تولید و موجودی‌ها را می‌توان برنامه‌ریزی و کنترل کالاها و مواد اولیه، کالاهای نیمه ساخته و محصولات نهایی به‌منظور حفظ و نگهداری موجودی در سطحی که تقاضای مشتریان را برآورده کند، بیان نمود. بر اساس این تعریف تمام سازمان‌ها یا کارخانه‌ها نیاز دارند که موجودی را در انبارهای خود نگهداری کنند، حال این موجودی می‌تواند به‌صورت مواد اولیه، کالاهای نیمه ساخته در حین تولید و یا

کالاهای تمام شده باشند. کنترل موجودی در مدیریت عملیات کمک می‌کند که هزینه‌های سربار بدون کاهش مقدار فروش کم شوند؛ و موجب افزایش سود بدون کاهش سطح رضایت مشتریان با کمترین سرمایه‌گذاری در موجودی می‌شود. کنترل موجودی را می‌توان به‌طور جامع و ساده «فعالیت بررسی یا نظارت بر موجودی» تعریف نمود؛ اما چرا مدیران کسب‌وکارها به نگهداری موجودی با توجه به ریسک و هزینه‌های آن تمایل دارند؟ اولین دلیل آن، آمادگی با تغییرات ناگهانی تقاضای مشتریان است، زیرا رفتار مشتریان را نمی‌توان به‌صورت قطعی از قبل تعیین نمود و فرآیند پیش‌بینی نیز ماهیتاً با خطا همراه است؛ بنابراین ممکن است در مدت‌زمانی خاص تقاضای مشتریان به دلایل گوناگون افزایش یابد و اگر سازمان تمهیدات لازم (نگهداری موجودی) را در نظر نگرفته باشد، سود حاصل از فروش محصولات بیشتر را از دست می‌دهد. دومین دلیل مهم دیگر مدت‌زمان تحویل کالا است. زمانی که کالا سفارش داده می‌شود تا به دست شرکت برسد یک مدت‌زمانی طول می‌کشد که خود این زمان نیز همراه با عدم قطعیت است. این امر مدیران را مجاب به نگهداری موجودی می‌کند تا بتوانند به تقاضای مشتریان در این مدت‌زمان پاسخ دهند. سومین دلیل مهم دیگر استفاده از تخفیفات تجاری مانند هزینه خرید و هزینه حمل‌ونقل کالا است. اگر شرکت، کالاها را در مقادیر زیاد سفارش دهد، می‌تواند از تخفیفات خرید و سرشکن شدن هزینه حمل‌ونقل بر روی تمام کالاها بهره ببرد. ازاین‌رو محققین بسیار زیادی در زمینه مسائل برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی‌ها تحقیق کرده‌اند (طالعی‌زاده و نوبیل، ۱۳۹۶).

یکی از زمینه‌های مهم در برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی‌ها، مدل اندازه انباشته اقتصادی است. مدل اندازه انباشته اقتصادی یک مدل کلاسیک کنترل موجودی است که در حوزه‌های سیستم‌های تولیدی کاربرد گسترده‌ای دارد. در مدل اندازه انباشته اقتصادی هدف تعادل بین هزینه‌های سفارش‌دهی/تولید و نگهداری یک نوع کالا است به‌گونه‌ای به ۲ سؤال زیر پاسخ داده شود: ۱) چه موقع کالا سفارش داده یا تولید شود؟ و ۲) چه مقدار کالا سفارش داده یا تولید شود؟ مدل‌های کلاسیک اندازه انباشته اقتصادی دارای شرایط و

فرضیاتی هستند که در شرایط واقعی موجب عدم کارایی این مدل‌ها شده است (امیری و همکاران، ۱۳۹۳). از این جمله موارد می‌توان به تولید یک نوع کالا و فرآیند تولید با کیفیت قابل‌قبول اشاره نمود؛ بنابراین محققین بسیاری این مدل کلاسیک را توسعه داده‌اند و سعی کردند شرایط دنیای واقعی را در مسائل خود با حذف فرضیات مدل اولیه لحاظ کنند. یکی از توسعه‌های مهم دیگر که در این سال‌های اخیر بسیار حائز اهمیت است، مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی تک ماشینه چند محصولی است. در این سیستم موجودی تک ماشینه تمام کالاها توسط یک ماشین تولید و یا در یک سالن تولید می‌شوند.

در این مقاله یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی برای یک فرآیند تولیدی معیوب ارائه شده است. در این فرآیند تولیدی فرض شده است که ماشین تولیدی به‌دلیل مستهلک شدن، یا خطای اپراتور، یا ماده اولیه نامرغوب و مواردی از این قبیل، مقداری از کالاها را با کیفیت استاندارد تولید نمی‌کند. این کالاهای معیوب پس از پایان فرآیند تولید عادی بر روی آن‌ها عملیات دوباره‌کاری صورت گرفته و به کیفیت قابل‌قبول می‌رسند. در این مسئله فرض شده است که تمام کالاها روی یک ماشین تولید می‌شوند. همچنین حداکثر انتشار کربن مجاز برای اینکه انتشار کربن در محیط‌زیست در طول فرآیند تولید کمتر شود، در نظر گرفته شده است.

مابقی بخش‌های مقاله به‌صورت زیر مرتب شده‌اند: در بخش دوم مروری بر مطالعات گذشته روی مسائل زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی انجام شده است. تعریف مسئله، پارامترها، متغیر تصمیم و مدل ریاضی در بخش سوم آمده است. الگوریتم حل دقیق برای این مسئله پیشنهادی در بخش چهارم توضیح داده شده است. در بخش پنجم مثال عددی فرضی برای نشان دادن کارایی الگوریتم حل بیان شده است. درنهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی در بخش ششم آمده است.

مروری بر مطالعات گذشته

در اواخر قرن بیستم سازمان مدیریت کسب‌وکارهای کوچک آمریکا بیان نمود که هزینه‌های کنترل موجودی به‌طورمعمول ٪۴۵ تا ٪۹۰ از کل هزینه‌های کسب‌وکارها را شامل می‌شوند. این مطلب به‌روشنی بیانگر این موضوع است که منابع و سرمایه محدود کسب‌وکارها بیش‌ازحد با دارایی‌های اصلی و موجودی‌ها در ارتباط هستند و برآورد اشتباه از موجودی انبار ممکن است موجب فرسودگی، کهنگی و یا فاسدشدن کالاها در اثر نگهداری بیش‌ازحد کالاها گردد. درنتیجه محاسبه مقدار بهینه تولید یا سفارش و موجودی موجب تعادل مناسب میان تقاضای مشتریان و خطوط تولید می‌گردد (طالعی‌زاده و نوبیل، ۱۳۹۶).

بی‌تردید یکی از قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل در تحلیل مسائل موجودی، مدل مقدار سفارش اقتصادی است که توسط فورد ویتمن هریس بیان شد (نایبی و پناهی‌نیا، ۱۳۹۰). او اولین فردی است که مدل اندازه انباشته اقتصادی یا مدل مقدار انباشته اقتصادی را در سیستم‌های تولیدی تعیین نمود. مدل سفارش اقتصادی هریس برای اولین بار در فوریه سال ۱۹۱۳ میلادی در مقاله‌ای تحت عنوان «چه مقدار کالا یک‌دفعه تولید شوند؟» منتشر شد که این مقاله (حدود ۲ صفحه‌ای) در همان زمان حدود ۱۰,۰۰۰ بار توسط مدیران و مسئولان ارشد صنایع مرور شده بود (نوبیل و صدیق[1]، ۲۰۱۷). پیشرفت تکنولوژی و احداث کارخانه‌های زیادی در سراسر دنیا در همان اوایل قرن بیستم بسیاری از واحدهای تولیدی نیازمند این شدند که سیستم موجودی خود را بر اساس مقدار تولید و مقدار تقاضا بروز نمایند و از یک مدلی استفاده کنند تا بتواند این دو حوزه‌ی مهندسی را با یکدیگر ارتباط دهد و ظرفیت‌های تولید را نیز در نظر بگیرد. در مدل مقدار سفارش اقتصادی ساده فرض بر این است که مقدار هر بار سفارش به‌صورت یک‌جا دریافت می‌شود؛ اما اگر این سیستم موجودی برای یک واحد تولیدی در نظر گرفته شود، دیگر این فرض برقرار نیست. در یک کارخانه فرض می‌شود کالاها با یک نرخ ثابت تولید و به

1. Nobil and Sedigh

انبار ارسال می‌شوند. ۵ سال بعد از ارائه مدل سفارش اقتصادی هریس، تفت[1] (۱۹۱۸) مدل سفارش اقتصادی را با در نظرگرفتن ظرفیت تولید توسعه داد و مدل مقدار تولید اقتصادی را ارائه نمود.

حدود چند دهه‌ی بعد، ایلون[2] (۱۹۵۷) و راجرز[3] (۱۹۵۸)، مدل مقدار تولید اقتصادی را توسعه دادند و اولین مدل‌های کنترل موجودی را برای سیستم تولیدی با چند محصول ارائه کردند. این مدل‌های کنترل موجودی جزء اولین مطالعات در زمینه‌ی مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی یا همان مسئله موجودی تک ماشینه است. در این مسائل هدف کم کردن هزینه‌های زمان‌بندی و تولید برای سیستم‌های است که در آن‌ها تعدادی محصول توسط یک تسهیل تولید می‌شوند. در مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی نرخ تقاضا و تولید مشخص هستند اما توالی زمان‌بندی کالاها معلوم نیست. در این مسئله تمرکز اصلی روی زمان‌بندی سیکل است که به‌صورت دوره‌ای تکرار می‌شود. در مرور سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۲، چان[4] و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی یک زمینه‌ی بسیار پرکاربرد است. آن‌ها ۱۰۵ مقاله منتشرشده در این زمینه را مرور کردند و نشان دادند که رایج‌ترین رویکرد استفاده‌شده در مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی، با ۴۱ درصد تکرار (۴۶ مقاله)، رویکرد دوره مشترک است. هانسسمن[5] (۱۹۶۲) دوره مشترک را برای حل مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی معرفی نمود. در این رویکرد یک دوره مشترک برای تمامی کالاها در نظر گرفته می‌شود.

رویکرد دوره مشترک، همیشه زمان‌بندی موجه و نزدیک به بهینه‌ای را برای مسائل تک ماشینه با روشی بسیار ساده پیدا می‌کند. در رویکرد دوره مشترک فرض می‌شود که توالی قرارگرفتن کالاها روی تسهیل اهمیت چندانی ندارد. ده سال بعد، جانسون و مونتگمری[6] (۱۹۷۴) از رویکرد دوره مشترک برای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی

1. Taft
2. Eilon
3. Rogers
4. Chan et al.
5. Hanssman
6. Johnson and Montgomery

استفاده کردند. آن‌ها فرض کردند برای تولید کالاها روی ماشین باید تسهیل را در ابتدا آماده انجام فعالیت نمود؛ بنابراین تسهیل برای تولید هر کالا نیازمند مدت‌زمانی برای راه‌اندازی یا آماده‌سازی است. سیلور[1] (۱۹۹۰) زمان راه‌اندازی را برای یک سیستم تولیدی تک ماشینه در نظر گرفت. او این مدل را با روشی ابتکاری و با استفاده از حد پایین و بالای فضای جواب حل نمود. در همین سال، وِمیگانتی و همکاران[2] (۱۹۹۰) مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی را برای یک سیستم تولیدی توسعه داد که این سیستم شامل محدودیت‌های بودجه و فضا است. سپس او برای حل مسئله از یک روش ابتکاری استفاده کرد.

مون و همکاران[3] (۱۹۹۱) مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی را برای یک سیستم تولیدی قطعی ارائه کردند. سپس آن‌ها روشی ابتکاری برای این مدل پیشنهاد کردند. رامانی و نارایانان[4] (۱۹۹۲) سه مدل را برای یک سیستم تولیدی با محدودیت زمان پردازش پیشنهاد دادند. در این مطالعه، دو مدل اول با استفاده از روش‌های دقیق و مدل سوم با روش سعی و خطا حل‌شده است. کیم و همکاران[5] (۱۹۹۳) از رویکرد دوره مشترک برای پیدا کردن حد بالای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی با در نظر گرفتن زمان پردازش استفاده کردند. مون[6] (۱۹۹۴) سیستم تولیدی را در نظر گرفت که با سرمایه‌گذاری روی فرآیند تولید سعی می‌کند نرخ خرابی، زمان و هزینه راه‌اندازی را کاهش دهد. او این مسئله را با استفاده از رویه‌ای تکراری و بر اساس آزادسازی لاگرانژ حل کرد.

حجی و منصوری[7] (۱۹۹۵) مدل اندازه انباشته اقتصادی را با در نظرگیری سرمایه‌گذاری در سیستم تولیدی توسعه دادند و آن را با روشی قطعی حل کردند. بورلند و یانو[8] (۱۹۹۷) مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی را با در نظرگرفتن توالی محصولات روی

1. Silver
2. Vemuganti et al.
3. Moon et al.
4. Ramani and Narayanan
5. Kim et al.
6. Moon
7. Haji and Mansuri
8. Bourland and Yano

ماشین توسعه دادند. آن‌ها فرض کردند که ترتیب قرارگیری محصولات ثابت و به‌صورت یک پارامتر ورودی است. این مسئله با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. هاریگا[1] (۱۹۹۸) یک سیستم تولیدی چندمحصولی را که ظرفیت تولید آن برای تقاضای مشتریان ناکارآمد است، ارائه کرد. در این سیستم برای اینکه به تقاضای مشتریان پاسخ داده شود نیاز به اضافه‌کاری است. هدف مدل او بیشینه کردن سود است که هاریگا برای رسیدن به این مقصود از روشی دقیق برای حل استفاده کرده است. خوجا[2] (۱۹۹۹) هزینه دوباره‌کاری را برای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی با کالاهای معیوب در نظر گرفت. در این سیستم تولیدی پیشنهادی فرض شده است که بازرسی کالاهای تولیدی بعد از تولید تمام محصولات انجام می‌شود.

بن‌دایا و هاریگا[3] (۲۰۰۰) مدل مقدار تولید اقتصادی را برای یک سیستم تولیدی معیوب ارائه کردند. در این سیستم مقداری از کالاهای تولیدی خراب هستند که هزینه‌ی اضافی را به سیستم موجودی تحمیل می‌کنند. این خرابی‌ها به دلیل خارج شدن ماشین از وضعیت نرمال به وجود می‌آید و به‌صورت تصادفی است. همچنین آن‌ها فرض کردند که بازرسی کالاها بعد از دوره تولید برای تمام کالاها انجام می‌شود. هننت[4] (۲۰۰۱) مسئله اندازه انباشته اقتصادی را برای یک سیستم مونتاژ با سیاست کارگاهی پیشنهاد کرد. در مسئله او فرض بر این است که محدودیت منابع وجود دارد. ویسواناتان و گویال[5] (۲۰۰۲) در تحقیقی عمر مفید کالاها را برای مسئله زمان‌بندی اقتصادی در نظر گرفتند. سپس جواب بهینه این مسئله پیشنهادی با استفاده از روشی دقیق پیدا کردند. اِینان[6] (۲۰۰۳) نرخ تولید انعطاف‌پذیر را برای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی در نظر گرفت. آل و همکاران[7] (۲۰۰۴) مسئله اندازه انباشته اقتصادی را با در نظرگرفتن زمان راه‌اندازی وابسته به ترتیب قرارگیری محصولات توسعه دادند. در این مسئله ترتیب قرارگیری محصولات به‌صورت

1. Hariga
2. Khouja
3. Ben-Daya and Hariga
4. Hennet
5. Viswanathan and Goyal
6. Eynan
7. Alle et al.

یک متغیر دودوئی در نظر گرفته شده بود. آن‌ها این مسئله را با استفاده از نرم‌افزار گمز حل کردند.

برندر و فورسبرگ[1] (۲۰۰۵) روشی ابتکاری را برای حل مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی با زمان‌راه‌اندازی وابسته به ترتیب قرارگیری محصولات پیشنهاد کردند. اکرمی و همکاران[2] (۲۰۰۶) از دو الگوریتم ژنیک و جستجوی ممنوع برای حل مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی عددصحیح مختلط استفاده کردند. در این مسئله تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی و اولویت قرارگیری محصولات به‌صورت متغیرهای عددصحیح در نظر گرفته شده است. اونر و بیلجیک[3] (۲۰۰۸) مسئله زمان‌بندی اقتصادی را برای حالت‌های بدون کمبود و کمبود قابل جبران فرموله کردند و جواب‌های هریک را تحلیل و ارزیابی نمودند. بانیرجی[4] (۲۰۰۹) مسئله زمان‌بندی اقتصادی را با درنظرگرفتن تعداد ارسالات سفارش‌ها به‌صورت گسسته توسعه دادند. حجی و حجی[5] (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای مسئله اندازه انباشته را با در نظرگرفتن اینکه کالاهای دوباره‌کاری شده در هر دوره جمع می‌شوند و به‌طور یکجا در دوره آخر بروی آن‌ها فرآیند دوباره‌کاری انجام می‌شود توسعه دادند. آن‌ها فرض کردند که نرخ دوباره‌کاری با نرخ تولید عادی متفاوت است. در این مقاله نرخ دوباره‌کاری از یک توزیع احتمال پیروی می‌کرد. همچنین در این مسئله هزینه‌های دوباره‌کاری کالا و هزینه تولید عادی از یکدیگر متفاوت در نظر گرفته شده بودند.

شیرودکار و همکاران[6] (۲۰۱۱) سیاست تکنولوژی گروهی را برای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی با زمان راه‌اندازی وابسته به اولویت قرارگیری محصولات در نظر گرفتند. جودل‌بایوئر و رینتنر[7] (۲۰۱۲) مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی را با در نظرگیری کمبود قابل جبران و محدودیت سطح خدمت توسعه دادند. در این مسئله نرخ تقاضا، زمان راه‌اندازی و تولید تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. درنهایت، این مسئله با استفاده از روش

1. Brander and Forsberg
2. Akrami et al.
3. Öner and Bilgiç
4. Banerjee
5. Haji and Haji
6. Shirodkar et al.
7. Jodlbauer and Reitner

نیوتن-راپسون حل شده است. طالعی‌زاده و همکاران[1] (۲۰۱۳) یک مدل مقدار تولید اقتصادی چند محصولی تک ماشینه را برای یک سیستم تولیدی معیوب ارائه کردند. کالاهای معیوب در این سیستم به‌صورت دوباره‌کاری بودند و کمبود نیز مجاز و به‌صورت سفارشات عقب افتاده است. در این سیستم تولیدی در زمان فرآیند دوباره‌کاری فرض شده است که ضایعات به وجود می‌آید. چیو و همکاران[2] (۲۰۱۴) مدل مقدار تولید اقتصادی را برای یک سیستم تولیدی معیوب با کالاهای درووریز و قابل دوباره‌کاری فرموله کردند. در این مسئله تعداد ارسال‌ها ثابت فرض شده است و درصد کالاهای معیوب از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند.

پسندیده و همکاران[3] (۲۰۱۵) یک مدل مقدار تولید اقتصادی چند محصولی را برای یک سیستم تولید معیوب با در نظرگرفتن هزینه ساخت انبارها توسعه دادند. در این سیستم n نوع خرابی برای کالاها فرض شد و بر اساس این خرابی‌ها دوباره‌کاری‌ها صورت گرفتند. در این مدل هدف پیدا کردن طول سیکل بهینه و مقدار کمبود بهینه برای هر محصول با توجه به کمینه کردن هزینه‌های کل موجودی است. هی و همکاران[4] (۲۰۱۵) برای دو روش کنترل انتشار کربن یعنی روش مالیات بر کربن و روش مبتنی بر بازار (تجارت کربن) یک مدل مقدار سفارش اقتصادی[5] (EOQ) ارائه کردند. در این مدل مقدار بهینه اندازه انباشته و انتشار کربن با استفاده از دو روش کنترل انتشار کربن به‌دست‌آمده است. همچنین تأثیر پارامترهای تولید و مقررات بر روی مقدار بهینه اندازه انباشته و انتشار کربن موردبررسی قرار گرفته است.

نوبیل و همکاران[6] (۲۰۱۷) یک مدل مقدار تولید اقتصادی چند محصولی چند ماشینه را با در نظرگیری تصمیمات تخصیص و خرید ماشین‌آلات ارائه کردند. در این مدل پیشنهادی محدودیت بودجه، فضا و ظرفیت تولید برای سیستم تولید در نظر گرفته‌شده

1. Taleizadeh et al.
2. Chiu et al.
3. Pasandideh et al.
4. He et al.
5. Economic Order Quantity
6. Nobil et al.

است. در این مسئله هر ماشین رویکرد دوره مشترک برای محصولاتی که روی آن تولید می‌شوند را دارا است. نوبیل و همکاران[1] (۲۰۱۷) محدودیت بودجه و تعداد ارسالات را برای یک زنجیره تأمین دوسطحی در نظر گرفتند. این مسئله پیشنهادی با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ابتکاری با رویکرد دوره مشترک حل شد. نوبیل و همکاران[2] (۲۰۱۸) مدل مقدار تولید اقتصادی با چندین سطح خرابی را برای یک سیستم تولیدی معیوب ارائه داد. طالعی‌زاده[3] (۲۰۱۸) سیاست تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه را برای یک مسئله اندازه انباشته اقتصادی در نظر گرفت. در این مطالعه فرض شد که کالاهای معیوب شامل دورریز و قابل دوباره‌کاری هستند. همچنین کمبود در این سیستم مجاز و به‌صورت ترکیبی است.

وو و همکاران[4] (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله اندازه انباشته چند کالایی با محدودیت سبز بودن و همچنین ماشین‌های موازی ارائه کردند. هدف از ارائه این مدل ریاضی کاهش انتشار کربن در شرکت‌های تولیدی بود. آن‌ها برای حل مدل از یک روش هیورستیک برای پیدا کردن جواب موجه و حد بالای مدل استفاده کردند و همچنین از روش‌های آزادسازی لاگرانژ و تجزیه دانتزیگ- ولف برای حل نهایی مدل استفاده کردند. واعظ و همکاران[5] (۲۰۱۹) یک مدل دو هدفه برای مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیست‌محیطی ارائه کردند. در این مدل از محدودیت‌های پنجره زمانی تحویل کالا و همچنین هزینه راه‌اندازی وابسته به‌توالی استفاده کردند و با تبدیل مدل دو هدفه به یک مدل یک هدف مسئله را حل کردند. محمدی[6] (۲۰۲۰) یک مدل یکپارچه برای مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته احتمالی در زنجیره تأمین مواد خطرناک تحت اختلال و تقاضای غیرقطعی ارائه کرد. با توجه به اینکه تقاضا احتمالی در نظر گرفته شده بود، برای حل مدل از روش برنامه‌ریزی محدودیت شانس استفاده کرد.

بر اساس مرور ادبیاتی که ما انجام داده‌ایم مشخص شد که اثرات انتشار کربن در طول

1. Nobil et al.
2. Nobil et al.
3. Taleizadeh
4. Wu et al.
5. Vaez et al.
6. Mohammadi

تولید کالا توسط ماشین برای مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه، ما مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی را با درنظرگرفتن حداکثر مجاز انتشار کربن برای هر دوره توسعه داده‌ایم. در این مسئله فرض شده است که در طول فرآیند تولید عادی و دوباره‌کاری ماشین تولیدی کربن منتشر می‌کند. ازاین‌رو در این مطالعه سعی شده است ضمن کمینه کردن هزینه‌های کل سیستم، حداکثر کربن قابل مجاز منتشرشده برای محیط زیستی پایدارتر رعایت شود. به‌علاوه در این مسئله فرض شده است که تمام کالاهای معیوب با انجام دوباره‌کاری کیفیت مطلوبی پیدا می‌کنند. این امر بدین علت است که ضایعات کمتری به محیط‌زیست تحمیل گردد.

تعریف مسئله

در این مقاله یک فرآیند تولیدی معیوب برای تولید کالاها در نظر گرفته شده است. در این سیستم تمام کالاها بر روی یک ماشین تولیدشده و فرآیند دوباره‌کاری آن‌ها نیز بلافاصله بعد از پایان فرآیند تولید عادی روی همان ماشین صورت می‌پذیرد. در این سیاست فرض شده است که مقداری از کالاهای تولیدشده کیفیت قابل‌قبول را ندارند و باید پس از تولید بر روی آن‌ها دوباره‌کاری انجام شود تا کیفیت مطلوب پیدا کنند. نرخ تولید عادی فرض شده است که از نرخ تقاضای مشتریان بیشتر است. همچنین نرخ دوباره‌کاری کالاهای معیوب بیشتر از نرخ تولید عادی است. در این مدل پیشنهادی برای توسعه مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- تمام کالاها توسط یک ماشین تولید می‌شوند.
- کمبود کالا مجاز نیست.
- پارامترهای مسئله مشخص و معلوم هستند.
- محدودیت‌هایی نظیر انبار، سرمایه و مواردی از این قبیل وجود ندارد.
- حداکثر مقدار مجاز کربن منتشرشده برای هر دوره تولید مشخص و معلوم است.
- هزینه نگهداری برای کالاهای معیوب در نظر گرفته نشده است.

- بر روی کالاهای معیوب بلافاصله فرآیند دوباره‌کاری صورت می‌گیرد، بنابراین برای کالاهای معیوب موجودی در نظر گرفته نشده است.

همچنین، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله به‌قرار زیر هستند:

n: تعداد کل کالاها

i: شمارنده کالاها $(i = 1.2 \dots . n)$

m_i: نرخ تولید سالیانه‌ی کالای i

d_i: نرخ تقاضای سالیانه‌ی کالای i

r_i: نرخ دوباره‌کاری سالیانه‌ی کالای i

α_i: نرخ خرابی در طول فرآیند تولید عادی کالای i

A_i: هزینه هر بار راه‌اندازی ماشین برای تولید کالای i (واحد پولی/ راه‌اندازی)

c_i: هزینه تولید هر واحد کالای i (واحد پولی/ هر واحد کالا)

v_i: هزینه دوباره‌کاری هر واحد کالای i (واحد پولی/ هر واحد کالای معیوب)

I_i: هزینه نگهداری هر واحد کالای i در سال (واحد پولی/ واحد کالا.سال)

U_i: زمان راه‌اندازی ماشین برای تولید کالای i (سال)

f_i: مقدار کربن منتشرشده در زمان انجام تولید عادی هر واحد کالای i در سال (گرم/ سال)

e_i: مقدار کربن منتشرشده در زمان انجام فرآیند دوباره‌کاری هر واحد کالای i در سال (گرم/ سال)

L: حداکثر کربن مجاز منتشرشده در هر دوره (گرم)

T: طول دوره (متغیر تصمیم)

N: تعداد دوره‌ها در یک سال $(N = {}^{1}/_{T})$

Q_i: مقدار تولید کالای i در هر دوره

SC: هزینه راه‌اندازی سالیانه

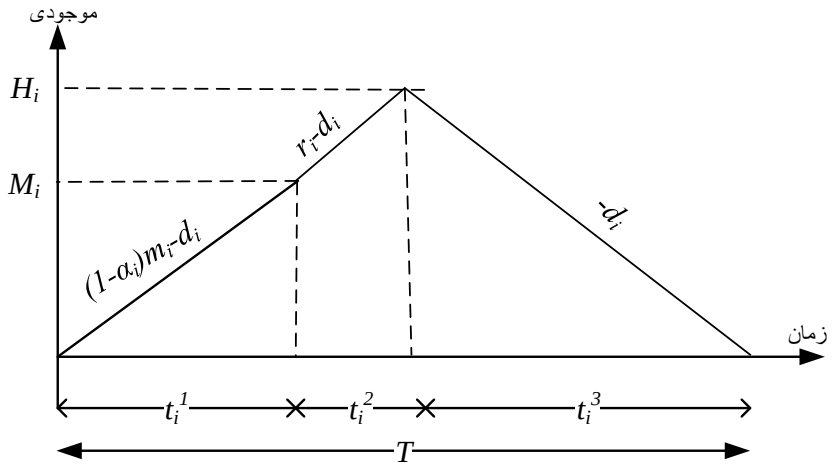
HC: هزینه نگهداری سالیانه

PC: هزینه تولید سالیانه

RC: هزینه دوباره‌کاری سالیانه

TC: هزینه کل موجودی سالیانه

نمودار موجودی این سیستم تولیدی با توجه به توضیحات بالا در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: نمودار موجودی در دست یک دوره کالای i

بر اساس شکل ۱ می‌توان رابطه‌های (۱) تا (۵) را به دست آورد:

$$M_i = \left((1-\alpha_i)m_i - d_i\right)\frac{Q_i}{m_i} \quad (۱)$$

$$H_i = M_i + \alpha_i(r_i - d_i)\frac{Q_i}{m_i} \quad (۲)$$

$$t_i^1 = \frac{M_i}{(1-\alpha_i)m_i - d_i} = \frac{Q_i}{m_i} \quad (۳)$$

$$t_{ik}^2 = \frac{H_i - M_i}{r_i - d_i} = \frac{\alpha_i Q_i}{r_i} \quad (۴)$$

$$t_i^3 = \frac{H_i}{d_i} \quad (۵)$$

بنابراین، طول دوره بهینه را می‌توان از رابطه‌ی (۶) به دست آورد:

$$T = t_i^1 + t_i^2 + t_i^3 = \frac{Q_i}{d_i} \quad (۶)$$

پس مقدار بهینه تولید از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = d_i T \quad (۷)$$

در این مدل پیشنهادی سعی می‌شود هزینه کل سالیانه (TC) که شامل هزینه راه‌اندازی سالیانه (SC)، هزینه نگهداری سالیانه (HC)، هزینه تولید سالیانه (PC) و هزینه دوباره-کاری سالیانه (RC) است، کمینه شود. بنابراین؛ زینه کل سالیانه را می‌توان مطابق رابطه (۸) نوشت.

$$TC = SC + PC + RC + HC \quad (۸)$$

در ادامه جزءبه‌جزء مؤلفه‌های رابطه (۸) شرح داده می‌شوند.

-هزینه راه‌اندازی سالیانه

در مدل مقدار تولید اقتصادی در هر دوره یک‌بار راه‌اندازی ماشین برای کالای i صورت می‌گیرد که هزینه آن برابر A_i است. همچنین در هرسال N دوره وجود دارد.؛ بنابراین، هزینه ثابت راه‌اندازی سالیانه را می‌توان از رابطه‌ی (۹) برای تمامی کالاها محاسبه کرد.

$$SC = \sum_{i=1}^{n} NA_i \quad (۹)$$

با داشتن $N = 1/T$، رابطه‌ی (۹) را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (۱۰) نوشت.

$$SC = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{T} \quad (۱۰)$$

-هزینه تولید سالیانه

در این سیستم تولیدی هزینه تولید هر واحد کال کالای i برابر c_i است. در هر دوره نیز مقدار Q_i کالا تولید می‌شود. بنا؛ این، هزینه تولید سالیانه را می‌توان از رابطه‌ی (۱۱) به دست آورد.

$$PC = \sum_{i=1}^{n} Nc_i Q_i \quad (۱۱)$$

که با جایگذاری Q_i از رابطه‌ی (۷)، رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید.

$$PC = \sum_{i=1}^{n} c_i d_i \qquad (۱۲)$$

- هزینه دوباره‌کاری سالیانه

در این سیستم تولیدی هزینه تولید هر واحد کال کالای i برابر v_i است. در هر دوره نیز مقدار $\alpha_i Q_i$ کالای معیوب دوباره‌کاری می‌شود. بنابراین، هزینه دوباره‌کاری سالیانه را می‌توان از رابطه‌ی (۱۳) به‌دست آورد.

$$RC = \sum_{i=1}^{n} N v_i \alpha_i Q_i = \sum_{i=1}^{n} v_i \alpha_i d_i \qquad (۱۳)$$

- هزینه نگهداری سالیانه

هزینه نگهداری سالیانه با توجه به مساحت زیر نمودار موجودی شکل (۱-۳)، از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$HC = \sum_{i=1}^{n} N I_i \left(\frac{M_i}{2}(t_i^1) + \frac{M_i + H_i}{2}(t_i^2) + \frac{H_i}{2}(t_i^3) \right) \qquad (۱۴)$$

که با جایگذاری t_i^1، t_i^2 و t_i^3 به‌ترتیب از رابطه‌های (۳)، (۴) و (۵) در رابطه (۱۴)، رابطه‌ی (۱۵) به دست می‌آید:

$$HC = \sum_{i=1}^{n} N I_i \left(\frac{M_i}{2}\left(\frac{Q_i}{m_i}\right) + \frac{M_i + H_i}{2}\left(\frac{\alpha_i Q_i}{r_i}\right) + \frac{H_i}{2}\left(\frac{H_i}{d_i}\right) \right) \qquad (۱۵)$$

که با جایگذاری M_i و H_i به ترتیب از رابطه‌های (۱) و (۲) در رابطه (۱۵)، رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آید:

$$HC = \sum_{i=1}^{n} \frac{I_i d_i}{2} \left(\frac{\big((1-\alpha_i)m_i - d_i\big)}{(1-\alpha_i)m_i} + \frac{\alpha_i^2 (r_i - d_i)}{r_i} + \frac{2\big((1-\alpha_i)m_i - d_i\big)(r_i - d_i)}{r_i} \right) \qquad (۱۶)$$

درنهایت هزینه کل سالیانه بر اساس ۴ معادله‌ی (۱۰)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۶) به‌صورت معادله-ی (۱۷) می‌شود.

$$TC = \sum_{i=1}^{n} \left[A_i \left(\frac{1}{T}\right) + \theta_i(T) + d_i(c_i + v_i\alpha_i) \right] \quad (۱۷)$$

که θ_i برابر رابطه (۱۸) است.

$$\theta_i = \frac{I_i d_i}{2} \left(\frac{\left((1-\alpha_i)m_i - d_i\right)}{(1-\alpha_i)m_i} + \frac{\alpha_i^2 (r_i - d_i)}{r_i} + \frac{2\left((1-\alpha_i)m_i - d_i\right)(r_i - d_i)}{r_i} \right) \quad (۱۸)$$

این مسئله پیشنهادی دارای دو محدودیت ساختاری است. اولین محدودیت مربوط به ظرفیت تولید کالاها روی ماشین است. بر اساس این محدودیت باید مجموع زمان کالاهای تولیدشده در فرآیند تولید عادی، دوباره‌کاری و زمان راه‌اندازی کوچک‌تر از زمان یک دوره باشد. این محدودیت تضمین‌کننده شدنی بودن جواب در نامعادله (۱۹) آمده است.

$$\sum_{i=1}^{n} (t_i^1 + t_i^2 + U_i) \leq T \quad (۱۹)$$

که با جایگذاری t_i^1 و t_i^2 به‌ترتیب از رابطه‌های (۳) و (۴) خواهیم داشت:

$$T \geq \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{1 - \sum_{i=1}^{n} d_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{\alpha_i}{r_i}\right)} = T_L \right\} \quad (۲۰)$$

که T_L برابر رابطه (۲۱) است.

$$T_L = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{1 - \sum_{i=1}^{n} d_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{\alpha_i}{r_i}\right)} \quad (۲۱)$$

محدودیت دوم نیز تضمین می‌کند که کربن به وجود آمده از فرآیندهای تولید عادی و دوباره‌کاری در هر دوره کمتر از مقدار مجاز تعیین شده باشد. محدودیت حداکثر کربن قابل مجاز در نامعادله‌ی (۲۲) آمده است.

$$\sum_{i=1}^{n}(f_{ik}t_{ik}^{1}+e_{ik}t_{ik}^{2})\leq L \qquad (۲۲)$$

که با جایگذاری t_i^1 و t_i^2 به‌ترتیب از رابطه‌های (۳) و (۴) خواهیم داشت:

$$T\leq\left\{\frac{L}{\sum_{i=1}^{n}d_i\left(\frac{f_{ik}}{m_{ik}}+\frac{\alpha_{ik}e_{ik}}{r_{ik}}\right)}=T_U\right\} \qquad (۲۳)$$

که T_U برابر رابطه (۲۴) است.

$$T_U=\frac{L}{\sum_{i=1}^{n}d_i\left(\frac{f_{ik}}{m_{ik}}+\frac{\alpha_{ik}e_{ik}}{r_{ik}}\right)} \qquad (۲۴)$$

این مسئله پیشنهادی را می‌توان بر اساس تابع هدف (۱۷) و محدودیت‌های (۲۰) و (۲۳) به فرم کلی مدل (۲۵) نوشت.

$$\begin{aligned}&Min\ TC=\sum_{i=1}^{n}\left[A_i\left(\frac{1}{T}\right)+\theta_i(T)+d_i(c_i+v_i\alpha_i)\right]\\&s\cdot t\colon T\geq T_L\\&T\leq T_U\\&T>0\end{aligned} \qquad (۲۵)$$

الگوریتم حل دقیق

باتوجه‌به مدل (۲۳) می‌توان گفت که تابع هدف مدل زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی با محدودیت انتشار کربن محدب است؛ زیرا این مدل چند محصولی تک ماشینه دارای فقط یک متغیر تصمیم است و مشتق درجه دوم تابع هدف نسبت به متغیر تصمیم T که در

نامعادله‌ی (۲۶) نشان داده شده است نیز مثبت می‌باشد. ازطرفی این مدل پیشنهادی دارای دو محدودیت خطی است. درنتیجه می‌توان گفت که این مدل پیشنهادی یک مسئله غیرخطی محدب پیوسته است.

$$\frac{\partial^2 TC}{\partial^2 T} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} A_i}{(T)^3} > 0 \qquad (۲۶)$$

درنتیجه، یک مسئله غیرخطی محدب با تابع هدف کمینه‌سازی را می‌توان با مشتق اول گرفتن از متغیر تصمیم، بهینه نمود؛ بنابراین طول دوره بهینه را می‌توان از رابطه‌ی (۲۷) محاسبه نمود.

$$T = \sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n} A_i}{\sum_{i=1}^{n} \theta_i}} \qquad (۲۷)$$

در الگوریتم پیشنهادی ابتدا جواب شدنی بودن مسئله بررسی می‌شود سپس برای طول دوره که یک متغیر تصمیم است یک حد پایین و یک حد بالا برای آن تعیین می‌شود و با توجه به طول دوره و حد پایین و حد بالای پیشنهادی مقدار بهینه طول دوره تعیین می‌شود.

گام‌های این الگوریتم پیشنهادی حل دقیق برای تعیین جواب بهینه به‌قرار زیر هستند:

گام ۱: اگر $\sum_{i=1}^{n} d_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{\alpha_i}{r_i}\right) < 1$، مسئله جواب شدنی دارد و باید به گام ۲ رفت. درغیراین‌صورت مسئله نشدنی است و باید به گام ۷ رفت.

گام ۲: مقدار θ_i، T_L و T_U به‌ترتیب از رابطه‌های (۱۸)، (۲۱) و (۲۴) محاسبه می‌شود.

گام ۳: اگر $T_L < T_U$، مسئله جواب شدنی دارد و باید به گام ۴ رفت. درغیراین-صورت مسئله نشدنی است و باید به گام ۷ رفت.

گام ۴: مقدار طول دوره از رابطه‌ی (۲۷) محاسبه می‌شود.

گام ۵: در این گام یکی از سه حالت زیر رخ می‌دهد:

اگر $T_L \le T \le T_U$، مقدار بهینه برابر $T^* = T$ می‌شود.

اگر $T_L > T$، مقدار بهینه برابر $T^* = T_L$ می‌شود.

اگر $T > T_U$، مقدار بهینه برابر $T^* = T_U$ می‌شود.

گام ۶: با داشتن مقدار T^*، مقدار بهینه‌ی هزینه کل از تابع هدف مدل (۲۵) محاسبه می‌شود.

گام ۷: الگوریتم متوقف‌شده و جواب استخراج می‌گردد.

نتایج عددی

در این بخش مثالی عددی برای نشان دادن عملکرد الگوریتم حل ارائه‌شده است. در مثال عددی یک فرآیند تولیدی ۳ محصولی معیوب در نظر گرفته شده است. اطلاعات پارامترهای ورودی این مسئله پیشنهادی در جدول ۱ آمده است. درنتیجه جواب بهینه این مدل پیشنهادی با درنظرگیری زمان راه‌اندازی دوباره‌کاری و کمبود ترکیبی از گام‌های زیر به دست می‌آید:

جدول ۲: پارامترهای ورودی مسئله پیشنهادی

کالا	e_i	f_i	U_i	A_i	I_i	c_i	v_i	α_i	r_i	d_i	m_i	L
۱	۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱	۷۰۰	۱۰۰	۵	۲۰۰	۰۰/۲	۶۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰	
۲	۲۰	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲	۸۰۰	۱۵۰	۷	۳۰۰	۰/۲۵	۸۰۰۰	۲۰۰۰	۶۰۰۰	
۳	۱۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳	۹۰۰	۲۰۰	۹	۴۰۰	۰/۳۰	۱۰۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	

گام ۱: چون مقدار $\sum_{i=1}^{n} d_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{\alpha_i}{r_i}\right) = 0.953$ کمتر از ۱ است بنابراین مسئله جواب شدنی دارد و باید به گام ۲ رفت.

گام ۲: محاسبه θ_i، T_L و T_U:

$$\theta_1 = 4631331.22; \theta_2 = 7062963.92; \theta_3 = 10514872.90;\ T_L = 0.067;\ T_U = 0.070$$

گام ۳: چون $T_L < T_U$ مسئله جواب شدنی دارد و باید به گام ۴ رفت.

گام ۴: محاسبه طول دوره

$$T = \sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n} A_i}{\sum_{i=1}^{n} \theta_i}} = 0.012$$

گام ۵: چون $T_L > T$، بنابراین مقدار بهینه برابر $T^* = T_L = 0.06$ می‌شود.

گام ۶: با داشتن مقدار T^*، هزینه کل بهینه برابر ۱۶۴۶۲۴۹٫۸۲ واحد پولی است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مطالعه، مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی با رویکرد دوره مشترک برای فرآیند تولیدی معیوب توسعه داده شد. مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی برای استفاده در سیستم‌های تولیدی و مونتاژ عملکرد بسیار بالایی دارد. مدیران از این سیستم‌ها می‌توانند برای تولید تعدادی از کالاها که تمام یا برخی از مؤلفه‌های آن‌ها توسط یک دستگاه تولید یا مونتاژ می‌شوند استفاده کنند. به‌علاوه، این مسائل برای خطوط مونتاژ که تمام مؤلفه‌های کالا در یک مکان مونتاژ می‌شوند بسیار مناسب است.

همچنین مدیران و برنامه‌ریزان می‌توانند از مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی برای سیستم‌های تولیدی که کالاها در یک بخش یا یک سالن تولید می‌شوند، استفاده کنند. مدل پیشنهادی این مقاله موجب می‌شود که مدیران بتوانند شرایط و موقعیت‌های دنیای واقعی نظیر معیوب بودن سیستم‌های تولیدی و اثرات زیست‌محیطی را برای مسئله زمان‌بندی انباشته اقتصادی در نظر بگیرند. در این مطالعه، مسئله مقدار تولید اقتصادی پیشنهادی با محدودیت حداکثر کربن مجاز منتشرشده فرموله شد. در این مسئله فرض شد کالاهای معیوب بلافاصله بعد از فرآیند تولید عادی، دوباره‌کاری می‌شوند. این مدل پیشنهادی ثابت شد که یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی محدب پیوسته است؛ بنابراین طول دوره بهینه این مدل پیشنهادی با استفاده از یک الگوریتم حل دقیق محاسبه شد. این مدل برای شرکت‌هایی مناسب است که همه کالاها بر روی یک ماشین تولید شوند. درصورتی‌که کالاهای تولیدشده کیفیت مناسبی را نداشته باشند، فرآیند دوباره‌کاری انجام می‌شود و فرض شده است که در طول فرآیند تولید و دوباره‌کاری ماشین تولیدی کربن منتشر می‌کند. همچنین فرض شده است که تمام کالاهای معیوب با انجام دوباره‌کاری کیفیت مطلوبی پیدا می‌کنند.

این مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی پیشنهادی را می‌توان با درنظرگرفتن مجاز بودن کمبود، فاسدشدن کالاها، ثابت بودن عمر مفید، خرابی ماشین تولیدی، سیاست

تعمیرات و نگهداری، حداکثر فضای موردنیاز، حداکثر بودجه، زمان راه‌اندازی غیرصفر برای دوباره‌کاری، سیاست قیمت‌گذاری و بازاریابی توسعه داد.

ORCID

Amir Hossein Nobil **https://orcid.org/0000-0003-4769-4460**

Abolfazl Kazemi **https://orcid.org/0000-0003-1870-2206**

منابع

امیری. مقصود، نایبی. محمدامین، زرآبادی‌پور. اویس (۱۳۹۳)، توسعه مدل‌های کنترل موجودی (r,Q) و (R,T)، *فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی*، سال دوازدهم، شماره ۳۳، ص ۱۲۵-۱۵۰.

نایبی. محمدامین، پناهی. مزرعتی (۱۳۹۰)، توسعه یک مدل موجودی چند هدفه احتمالی فازی، *فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی*، سال نهم، شماره ۲۲، ص ۲۰۹-۲۳۵.

طالعی‌زاده. عطااله، نوبیل. امیرحسین (۱۳۹۶)، کنترل موجودی: سیستم‌های سفارش‌دهی و خرده‌فروشی، جلد اول، چاپ اول، تهران، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

References

Akrami, B. Karimi, B., and Hosseini, S.M. (2006). Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case. *Applied Mathematics and Computation*, No. 183(1), PP: 634-645.

Alle, A., Pinto, J.M., and Papageorgiou, L.G. (2004). The economic lot scheduling problem under performance decay. *Industrial and engineering chemistry resear*ch, No. 43(20), PP: 6463-6475.

Banerjee, A. (2009). Simultaneous determination of multiproduct batch and full truckload shipment schedules. *International Journal of Production Economics*, 118(1), PP: 111-117.

Ben-Daya, M., and Hariga, M. (2000). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes. *Journal of the Operational Research Society*, No. 51(7), PP: 875-881.

Bourland, K.E., and Yano, C.A. (1997). A comparison of solution approaches for the fixed-sequence economic lot scheduling problem. *IIE transactions*, No. 29(2), PP: 103-108.

Brander, P., and Forsberg, R. (2005). Cyclic lot scheduling with sequence-dependent set-ups: a heuristic for disassembly processes. *International Journal of Production Research*, No. 43(2), PP: 295-310.

Chan, H. K., Chung, S.H., and Lim, M.K. (2013). Recent research trend of economic-lot scheduling problems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, No. 24(3), PP: 465-482.

Chiu, S.W., Tseng, C.T., Wu, M.F., and Sung, P.C. (2014). Multi-item EPQ model with scrap, rework and multi-delivery using common cycle policy. *Journal of applied research and technology*, No. 12(3), PP: 615-622.

Eilon, S. (1957). Scheduling for batch production. *Journal of Institute of Production* Engineering, No. 36, PP: 549-570 and 582.

Eynan, A. (2003). The benefits of flexible production rates in the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, No. 35(11), PP: 1057-1064.

Haji, R., and Mansuri, M. (1995). Optimum common cycle for scheduling a single-machine multiproduct system with a budgetary constraint. *Production Planning and Control*, No. 6(2), PP: 151-156.

Haji, R., and Haji, B. (2010). Optimal batch production for a single machine system with accumulated defectives and random rate of rework. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, No. 3(4), PP: 243-256.

Hanssman F. 1962. Operations research in production and inventory control (10nd ed)", John *Wiley* and Sons, New York.

Hariga, M.A. (1998). Economic production-ordering quantity models with limited production capacity. *Production Planning and Control*, No. 9(7), PP: 671-674.

He P., Zhang W., Xu X. and Bian Y. (2015). Production lot-sizing and carbon emissions under cap-and-trade and carbon tax regulations. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 103, PP: 241-248.

Hennet, J.C. (2001). A common cycle approach to lot-scheduling in multistage manufacturing systems. *Production Planning and Control*, No. 12(4), PP: 362-371.

Jodlbauer, H., and Reitner, S. (2012). Optimizing service-level and relevant cost for a stochastic multi-item cyclic production system. *International Journal of Production Economics*, No. 136(2), PP: 306-317.

Johnson, L.A., and Montgomery, D.C. (1974). Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control (17nd ed)", John Wileyand Sons. Inc. USA.

Kim, D., Mabert, V.A., and Pinto, P.A. (1993). Integrative cycle scheduling approach for a capacitated flexible assembly system. *Decision Sciences*, No. 24(1), PP: 126-147.

Khouja M. 1999. A note on' deliberately slowing down output in a family production context'. *International Journal of Production Research*, PP: 4067-4077.

Mohammadi M. (2020). Designing an integrated reliable model for stochastic lot-sizing and scheduling problem in hazardous materials supply chain under disruption and demand uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 274, PP: 125-139.

Moon, I., Gallego, G., and Simchi-Levi, D. (1991). Controllable production rates in a family production context. *The International Journal of Production Research*, No. 29(12), PP: 2459-2470.

Moon I. (1994). Multiproduct economic lot size models with investment costs for setup reduction and quality improvement: review and extensions. *International Journal of Production Research*, No. 32, PP: 2795-2801.

Nobil, A.H., and Sedigh, A.H.A. (2017). An economic production quantity inventory model with a defective production system and uncertain uptime. *International Journal of Inventory Research*, No. 4(2-3), PP: 132-147.

Nobil, A.H., Sedigh, A.H.A., and Cárdenas-Barrón, L.E. (2017). A multiproduct single machine economic production quantity (EPQ) inventory model with discrete delivery order, joint production policy and budget constraints. *Annals of Operations Research*, PP: 1-37 (In Press).

Nobil, A.H., Afshar Sedigh, A.H., Tiwari, S., and Wee, H.M. (2018). An imperfect multi-item single machine production system with shortage, rework, and scrapped considering inspection, dissimilar deficiency levels, and non-zero setup times. *Scientia Iranica* (In Press).

Öner, S., and Bilgiç, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled co-production. *European Journal of Operational Research*, No. 188(3), PP: 793-810.

Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A., Nobil, A.H., and Cárdenas-Barrón, L.E. (2015). A multiproduct single machine economic production quantity model for an imperfect production system under warehouse construction cost. *International Journal of Production Economics*, No. 169, PP: 203-214.

Ramani, S., and Narayanan, N. (1992). Single facility, multi-item lot sizing under Just-in-Time and "cyclic scheduling for improvement". *International Journal of Production Economics*, No. 26(1-3), PP: 333-339.

Rogers, J. (1958). A computational approach to the economic lot scheduling problem. *Management science*, No. 4(3), PP: 264-291.

Shirodkar, V.A., Sridharan, R., and Pillai, V. M. (2011). Effective allocation of idle time in the group technology economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, No. 49(24), PP: 7493-7513.

Silver, E.A. (1990). Deliberately slowing down output in a family production context. The *International Journal of Production Research*, No. 28(1), PP: 17-27.

Taft, E.W. (1918). The most economical production lot. *Iron Age*, No. 101, PP: 1410-1412.

Taleizadeh, A.A., Wee, H.M., and Jalali-Naini, S.G. (2013). Economic production quantity model with repair failure and limited capacity. *Applied Mathematical Modelling*, No. 37(5), PP: 2765-2774.

Taleizadeh, A.A. (2018). A constrained integrated imperfect manufacturing-inventory system with preventive maintenance and partial backordering. *Annals of Operations Research*, No. 261(1-2), PP: 303-337.

Vaez P., Sabouhi F. and Jabalameli M.S. (2019). Sustainability in a lot-sizing and scheduling problem with delivery time window and sequence-dependent setup cost consideration. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 51, PP: 1-9.

Vemuganti, R.R., Dianich, D., Oblak, M., and Dabbaghi, H. (1990). Constrained Optimal Production Lot Sizes for Several Products. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, No. 10(3-4), PP: 199-228.

Viswanathan, S., and Goyal, S. K. (2002). On' Manufacturing batch size and ordering policy for products with shelf lives'. *International Journal of Production Research*, No. 40(8), PP: 1965-1970.

Wu T., Xiao F., Zhang C., He Y. and Liang Z. (2018). The green capacitated multi-item lot sizing problem with parallel machines. *Computers & Operations Research*, Vol. 98, PP: 149-164.

استناد به این مقاله: نوبیل، امیرحسین، کاظمی ابوالفضل. (۱۴۰۱). ارائه‌ی یک مسئله زمان‌بندی اندازه انباشته اقتصادی با نظرگرفتن حداکثر مقدار مجاز انتشار کربن، *فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۰(۶۵)، ۲۱۷-۲۴۳.

DOI: 10.22054/JIMS.2022.34024.2109

Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.