Archive of SID.ir

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 10, No. 1 (2025) 1–19.

Paper Type: Original Article

Modeling the Combined Problem of Determining the Lot Sizing and Cutting Stock of Raw Materials and Solving It Using a Combined Method Based on a Genetic Algorithm and an Exact Solution Method

Ali Mohaghar[1,*], Ghasem Mokhtari[2], Mohammad Hasan Maleki[3], Seyed Jamaleddin Hosseini[4]

[1] Department of Operations Management and Decision Sciences, Faculty of Industrial and Technology Management, University of Tehran, Tehran, Iran; amohaghar@ut.ac.ir.

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, University of Qom, Qom, Iran; mokhtariy@yahoo.com.

[3] Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, University of Qom, Qom, Iran; bozorgmehr.maleki1363@gmail.com.

[4] Department of Industrial Management, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran; sirjamal@gmail.com.

Citation:

Received: 29 January 2024 *Revised: 15 March 2024* *Accepted: 07 May 2024*	Mohaghar, A., Mokhtari, Gh., Maleki, M. H., & Hosseini, S. J. (2025). Modeling the combined problem of determining the lot sizing and cutting stock of raw materials and solving it using a combined method based on a genetic algorithm and an exact solution method. *Journal of decisions and operations research, 10*(1), 1-19.

Abstract

Purpose: The problem of determining the lot sizing and cutting stock raw materials are two important issues in the production industry, which are used in the production process of many industries, including furniture, paper, aluminum, metal industries, etc. this research aims to determine the accumulated size in a multi-level and multi-period way and to cut the raw materials in a one-dimensional way.

Methodology: In this research, an integrated mathematical model has been introduced to determine the size of stockpiling and cutting of raw materials with the cost of delay in delivery of orders, overtime, and purchase of raw materials with the aim of minimizing production costs. Due to the NP-hard of the problem and the inefficiency of exact methods in large dimensions, a combined method based on a genetic algorithm and a precise solution with GAMS software is presented. In the proposed method, the desired problem is divided into two parts, in which a genetic algorithm determines the cutting patterns of raw materials, and then the problem is solved using GAMS software. In order to check the performance of the proposed method, several sample problems have been introduced and solved with the proposed solution method, and the results have been compared with problem-solving using the genetic algorithm.

Findings: The results of the problem indicate the effectiveness of the proposed solution method. The deviation of the proposed solution method from the exact solution is equal to 1.5%, and the improvement rate of the proposed method in large dimensions compared to the genetic algorithm, which the exact method is not able to solve, is equal to 16.8%. With an increase of 1 percent in purchase costs, the amount of rise in problem costs and maintenance costs is on average 0.6% and 0.43%, and with an increase of 1% in purchase cost, problem and maintenance costs are on average 0.73% and 0.23% increase.

Originality/Value: Determining the lot size is used to determine the amount of production of a set of parts and products, and cutting of raw materials is used to determine the cutting pattern of raw materials and the number of uses of each cutting pattern.

Keywords: Determination of accumulated size, One-dimensional cutting of raw materials, Lateness penalty, Overtime cost, Genetic algorithm.

Corresponding Author: amohaghar@ut.ac.ir

https://doi.org/10.22105/dmor.2024.440547.1819

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

www.journal-dmor.ir

دوره ۱۰، شماره (۱)، (۱۴۰۴)، ۱۹-۱

نوع مقاله: پژوهشی

مدل‌سازی مساله ترکیبی تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام و حل آن با استفاده از یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و یک روش حل دقیق

علی محقر[۱،*]، قاسم مختاری[۲]، محمدحسن ملکی[۳]، سید جمال‌الدین حسینی[۴]

[۱]گروه مدیریت عملیات و علوم تصمیم، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲]گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

[۳]گروه مدیریت، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه قم، قم، ایران.

[۴]گروه مدیریت صنعتی، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

هدف: تعیین اندازه انباشته برای تعیین میزان تولید مجموعه‌ای از قطعات و محصولات تولیدی و برش مواد خام برای تعیین الگوی برش مواد خام و تعداد استفاده از هر الگو برش استفاده می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش: در این پژوهش یک مدل ریاضی یکپارچه برای تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام با هزینه تاخیر در تحویل سفارشات، اضافه‌کاری و خرید مواد اولیه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید معرفی شده است. در مدل پیشنهادی تعیین اندازه انباشته به‌صورت چند سطحی و چند دوره‌ای و برش مواد خام به‌صورت یک بعدی درنظر گرفته شده است. با توجه به *NP-hard* بودن مساله و عدم‌کارایی روش‌های دقیق در ابعاد بزرگ، یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و حل دقیق با نرم‌افزار گمز ارایه شده است. در روش پیشنهادی، مساله موردنظر به دو قسمت تجزیه شده که در آن الگوهای برش مواد خام با الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود، سپس مساله با استفاده از نرم‌افزار گمز حل می‌شود. جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی چندین مساله نمونه معرفی و با روش حل پیشنهادی، حل شده است و نتایج آن با حل مساله با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

یافته‌ها: نتایج مساله حاکی از کارایی روش حل پیشنهادی است. میزان انحراف روش حل پیشنهادی از جواب دقیق برابر با ۱/۵% است و میزان بهبود روش پیشنهادی در ابعاد بزرگ نسبت به الگوریتم ژنتیک که روش دقیق قادر به حل آن نیست، برابر با ۱۶/۸% است. با افزایش ۱% در هزینه‌های خرید میزان افزایش هزینه‌های مساله و هزینه‌های نگهداری به‌صورت میانگین ۰/۶% و ۰/۴۳% و با افزایش ۱% در هزینه خرید، هزینه‌های مساله و نگهداری به‌صورت میانگین ۰/۷۳% و ۰/۲۳% افزایش می‌یابد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: مساله تعیین اندازه انباشته و مساله برش مواد خام دو موضوع مهم در صنعت تولید هستند که در فرآیند تولید بسیاری از صنایع ازجمله صنعت مبلمان، کاغذ، آلومینیوم، صنایع فلزی و ... کاربرد دارند.

کلیدواژه‌ها: تعیین اندازه انباشته، برش یک‌بعدی مواد خام، جریمه دیرکرد، هزینه اضافه‌کاری، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

در صنایع فلزی تولیدی که از موادی مانند تیرآهن، میلگرد، نبشی، قوطی، ناودانی و یا نظایر آن جهت تولید محصولات مختلف (دکل‌های مخابراتی یا دکل‌های انتقال برق فشار متوسط و فشارقوی) استفاده می‌شود، با توجه به ساختار محصول و برنامه تولید، می‌بایست مواد خام را از تامین‌کنندگان مختلف خریداری کرده و پس از تهیه الگوی برش، تعداد مختلف با طول‌های متفاوتی از مقاطع فولادی یادشده را برش داده و در ایستگاه‌های کاری

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

بعدی آن‌ها را از طریق جوش‌کاری یا پرچ و پیچ به هم متصل کنند. در بعضی موارد نیز قطعاتی خریدنی دیگری به محصولات اضافه می‌شود [1]. این فعالیت در تولید پل‌های فلزی، لوله‌کشی مجتمع‌های عظیم پتروشیمی یا صنایع غیرفلزی مانند تولید مبلمان، برش کاغذ در مقاطع مختلف و … نیز کاربرد دارد.

این نوع مسایل به مساله برش مواد خام معروف هستند. مساله برش تک‌بعدی مواد خام با سایزهای غیریکسان توسط دیکلی و همکاران [2] و کوی [3] بررسی شده است. این مساله می‌تواند به‌صورت دوبعدی (صفحات) و یا سه‌بعدی بررسی شود [4]. علاوه بر برش مواد خام، خرید این محصولات نیز یک چالش اساسی برای دنیای صنعت است. این حالت به مساله تعیین اندازه انباشته معروف است. مساله تعیین اندازه انباشته برای اولین بار توسط هندی [5] معرفی و بررسی شده است. این مساله به دو قسمت مسایل تک سطحی (تقاضای هر مورد مستقل از تقاضای سایر قطعات است) و مسایل چند سطحی (ساختار محصول دارای پیچیدگی، روابط والد و فرزندی بین اجزا و یا وجود تقاضای وابسته به سایر قطعات است) تقسیم می‌شود. مسایل در هر دو دسته می‌توانند با منابع محدود و یا بدون محدودیت ظرفیت باشند که درنهایت به ۴ طبقه‌بندی منتهی می‌شود.

۱. تک سطحی بدون محدودیت ظرفیت (*SLUP*) [6].
۲. تک سطحی دارای محدودیت ظرفیت (*SLCP*) [7].
۳. چند سطحی بدون محدودیت ظرفیت (*MLUP*) [7–9].
۴. چند سطحی دارای محدودیت ظرفیت (*MLCP*) [10]، [11].

همواره یکپارچگی در حل مسایل به نتایج کاراتر و دقیق‌تری منتهی می‌شود [12]. معمولا تعیین اندازه انباشته و تعیین برش مواد خام به ۲ دسته تقسیم می‌شود [13]: ۱- افق برنامه‌ریزی به چند دوره زمانی تقسیم شده و یکپارچگی در میان این دوره‌ها لحاظ شود. در این حالت موجودی از یک دوره به دوره بعدی منتقل می‌شود و ۲- یکپارچگی بین سطوح تولید بررسی می‌شود و ابعاد سطوح تولید می‌تواند تک سطحی و یا چند سطحی باشد. در این حالت بین دره‌های مختلف، تفاوت وجود دارد.

برش‌کاری در مساله برش مواد خام به دو قسمت تعیین الگوی برش و انجام عملیات برش یک‌بعدی یا دوبعدی روی چندین نوع ماده خام اولیه با سایزهای مختلف، مطابق با طرح برش تقسیم می‌شود [14]. برای مسایل در این حالت ابتدا مواد خام موردنیاز و قطعات پیش‌ساخته تامین می‌شود و بعد از آن برشکاری در دو حالت تعیین طرح برش و تعیین تعداد دفعات برش انجام می‌شود و تصمیم لازم درخصوص اندازه انباشته قطعات بریده شده و محصولات نهایی با لحاظ کردن محدودیت ظرفیت تولید و ظرفیت برش اتخاذ می‌شود. هدف همه‌ی تصمیم‌ها کاهش هزینه کل و ضایعات برش به‌طورکلی است [15].

در ادامه برای ساخت محصول نهایی قطعات دیگری که برای مونتاژ مورد احتیاج است، تهیه شده و در ادامه سایر عملیات‌های تولید مانند جوش و ضدزنگ و رنگ‌آمیزی جهت جلوگیری از خوردگی انجام شده و مونتاژ مطابق با ساختار محصول ادامه می‌یابد و پس از اتمام تولید محصول در محل موردنظر نصب و تحویل مشتری می‌گردد. تحویل هر سفارش یک پروژه در نظر گرفته می‌شود و برای شرکت درآمد ایجاد می‌کند. هر پروژه می‌بایست طبق قرارداد با مشتری و در زمان تحویل خود، به اتمام برسد؛ نه دیرتر به خاطر جریمه تاخیر و نه زودتر به خاطر هزینه‌های انبارداری و آسیب احتمالی نگهداری و یا آماده نبودن سایر زیرساخت‌های مرتبط. هرچند در مواردی هم مشتری از تحویل زودتر محصول استقبال می‌کند.

در این تحقیق یک مساله یکپارچه تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام با هزینه تاخیر در تحویل سفارش‌ها، اضافه‌کاری و خرید مواد اولیه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید معرفی شده است. در مدل پیشنهادی ساختار محصولات، تقاضای مشتری، تعداد آیتم برش‌خورده در هر محصول، ظرفیت ایستگاه‌های کاری هر مرحله، میزان سفارش مواد خام (نظیر میلگرد، نبشی، قوطی و …)، مقاطع مختلف مواد خام در دوره‌های مختلف مورد برنامه‌ریزی، میزان سفارش قطعات افزودنی در هر دوره برنامه‌ریزی، تعیین طرح برش مواد، موجودی مواد در پایان هر دوره زمانی و میزان شیفت کاری فوق‌العاده موردنیاز به‌صورت بهینه مشخص می‌شوند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

قابل‌ذکر است ساخت محصول در قواعد برنامه‌ریزی تولید انجام می‌شود و هر سفارش برنامه تولید خاص خودش را دارد. تعداد هر قطعه برش خورده موردنیاز در هر محصول مشخص شده است. هدف مدل پیشنهادی کمینه کردن هزینه (هزینه عبارت است از هزینه مواد خام اولیه، هزینه قطعات افزودنی خریداری‌شده به محصول نیمه ساخته‌شده حین تولید، هزینه نگهداری مواد خام، قطعات، محصولات نیمه ساخته‌شده، محصولات نهایی، هزینه شیفت کاری فوق‌العاده و دیرکرد تحویل محصول) است. عملکرد مدل پیشنهادی به این صورت است که با در نظر گرفتن یکپارچگی برش مواد خام، تعیین اندازه انباشته در افق زمانی چند دوره‌ای، ساختار محصولات، مقاطع مختلف مواد خام متفاوت با طول‌های مختلف، تقاضای مشتریان، به حل مساله برش یک‌بعدی قطعات پرداخته و طرح برش بهینه و برنامه‌ریزی تولید بهینه را ارایه دهد.

با توجه به *NP-hard* بودن مساله و عدم‌کارایی روش‌های دقیق در ابعاد بزرگ، یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و حل دقیق با نرم‌افزار گمز ارایه شده است. در روش پیشنهادی، مساله موردنظر به دو قسمت تجزیه شده که در آن الگوهای برش مواد خام با الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود سپس مساله با استفاده از نرم‌افزار گمز حل می‌شود. جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، مساله موردنظر فقط با الگوریتم ژنتیک نیز حل شده است. جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی چندین مساله نمونه مختلف معرفی و با روش حل پیشنهادی حل شده است و نتایج آن با حل مساله با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

ادامه مقاله به شرح زیر است؛ در بخش دوم، ادبیات پیشین تحقیق بررسی و جایگاه تحقیق شفاف شده است. در بخش سوم، مدل ریاضی مساله ارایه شده است. در بخش چهارم، جزییات روش حل مساله بیان شده است. در بخش پنجم، نیز نتایج حل ارایه شده است. در بخش ششم، تحلیل حساسیت بیان شده است و در بخش هفتم، نتیجه‌گیری و در قسمت هشتم نیز منابع بیان شده است.

۲- ادبیات تحقیق

مرور ادبیات شامل ۳ قسمت مختلف یکپارچگی، مساله تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام می‌شود. این یکپارچگی، بین مساله تعیین اندازه انباشته و مراحل مختلف برش مواد خام است.

مقالات زیادی موضوعات تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام تعیین را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند [16–18]. دو جنبه اصلی دسته‌بندی و تحلیل عبارت‌اند از یکپارچگی بین سطوح تولید، به صورتی که وقتی یک سطح درنظر گرفته شده است (۱، ۲ یا ۳) یعنی حداقل یک متغیر تصمیم مرتبط با آن سطح وجود دارد. جنبه دوم طبقه‌بندی یکپارچگی در میان‌دوره‌های زمانی چندگانه که ناشی از امکان نگهداری اقلام به‌عنوان موجودی است؛ یعنی یک متغیر موجودی دوره‌های زمانی را به هم ارتباط می‌دهد. با توجه به این دو جنبه یک نماد چهارقسمتی به‌صورت */*/*/* عنوان شده است که بخش اول و دوم و سوم از سمت چپ می‌تواند به ترتیب *L1*، *L2* و *L3* باشد به این معنی که یک متغیر تصمیم در سطح مربوطه درنظر گرفته شده است.

وقتی‌که یک سطح خاص درنظر گرفته نشده باشد، آن قسمت خالی خواهد بود ("-"). قسمت چهارم با حروف *S* یا *M* پر می‌شود و به دسته‌بندی مساله برش مواد خام به‌عنوان تک دوره‌ای ("*S*") یا چند دوره‌ای ("*M*") می‌پردازد که این باعث دسته‌بندی مقالات به ۴ دسته ازلحاظ درنظر گرفتن یا نگرفتن یکپارچگی در میان‌دوره‌های زمانی و سطوح تولید می‌شود. ازآنجایی‌که برای درنظر گرفتن یک مساله یکپارچه برش مواد خام و تعیین اندازه انباشته لازم است که دو جنبه یکپارچگی درنظر گرفته شود (یکپارچگی بین حداقل ۲ سطح تولید و یکپارچگی در میان‌دوره‌های زمانی) ازاین‌رو مقالاتی درنظر گرفته‌شده‌اند که به ۳ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱- *L1/L2/-/M*، ۲- *L2/L3/M/-* و ۳- *L1/L2/L3/M*.

۲-۱- یکپارچگی میان چند دوره زمانی و هر سه سطح تولید (L1/L2/L3/M)

تعداد مقالات کمی به این درجه از یکپارچگی پرداخته‌اند [19]. در سطح ۱ این مدل، مساله تعیین اندازه انباشته به بررسی موجودی مواد خام و تحویل آن‌ها به فرآیند برش می‌پردازد. مقدار اقلامی که باید به فرآیند برش تحویل داده شود، نمی‌توانند کمتر ازآنچه در فرآیند برش موردنیاز است، باشد. سطح ۲ از یک مساله برش چند دوره‌ای با محدودیت ظرفیت تعداد کل مواد برش خورده تشکیل شده است. در سطح ۳ این اطمینان باید

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

وجود داشته باشد که تقاضا برای هر محصول نهایی در هر دوره به‌طور مستقیم از تولید در همان دوره برآورده می‌شود. در مدل پیشنهادی او در فرآیند برش امکان استفاده از قطعات دورریز امکان‌پذیر است.

۲-۲- یکپارچگی میان چند دوره زمانی و سطوح ۱ و ۲ تولید (-/L2/L3/M)

وی گاس و همکاران [20]، یک مدل *L1/L2/-/M* را ارایه داده‌اند که برش ۳ بعدی (طول، عرض، ارتفاع) را در مساله خود به‌کار برده است. مدل تعریف‌شده یک مساله برش چند دوره‌ای است و متغیرهای تصمیم مربوط به هر دو موجودی و برش قطعات در سطوح یک و دو وجود دارد. یک فرض موجود در این مساله این است که باقیمانده‌های قابل‌استفاده از عملیات برش در یک روز، می‌تواند به‌عنوان موجودی جدید در دوره‌های بعدی مورداستفاده قرار گیرند.

۲-۳- یکپارچگی میان چند دوره زمانی و سطوح ۲ و ۳ تولید (-/L2/L3/M)

این نوع یکپارچگی که بیشتر موردتوجه این تحقیق است، یکپارچگی بین سطح ۲ یعنی برش مواد خام و سطح ۳ تولید محصول نهایی را درنظر می‌گیرد و تحقیقات ارایه شده در این زمینه بیشتر در سطح ۳ با یکدیگر متفاوت هستند. سلیمان [21] و ونزلا و همکاران [22] برنامه‌ریزی تولید محصولات نهایی را فقط با درنظر گرفتن محدودیت تعادل تقاضا برای محصولات نهایی مدل می‌کنند، درحالی‌که وو و همکاران [23] علاوه بر محدودیت ظرفیت در سطح ۳ یک مساله تعیین اندازه انباشته دارای محدودیت زمان و هزینه راه‌اندازی را نیز درنظر گرفته‌اند.

سلیمان [21] مساله ادغام تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام را به‌وسیله یک رویکرد حل الگوریتمی در یک کارخانه ساخت آلومینیوم به‌کار برده است. در مساله پیشنهادی آن‌ها، چگونگی ایجاد الگوهای برش قطعات و تعیین اندازه انباشته برای محصولات نهایی با هدف به حداقل رساندن هزینه کل در طول افق برنامه‌ریزی بررسی شده است.

هزینه کل شامل هزینه تولید (هزینه مواد، فرآیند و راه‌اندازی)، هزینه نگهداری موجودی و هزینه تاخیر تحویل سفارش است. محدودیت ظرفیت در این مدل در سطح ۲ قرار دارد و مربوط به تعداد کل برش‌ها است. آن‌ها یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مساله پیشنهاد کردند. وو و همکاران [23] مساله برش تک‌بعدی روی یک نوع قلم ماده اولیه را بدون مجاز بودن تاخیر و عدم وابستگی زمان و هزینه راه‌اندازی با هدف کمینه کردن هزینه کل بدون نقض کردن محدودیت ظرفیت زمان کل بررسی کردند.

هزینه کل شامل هزینه راه‌اندازی، نگهداری موجودی، هزینه برش و هزینه مواد خام است. ونزلا و همکاران [22] یکپارچگی مسایل تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام را در صنعت ساخت مبلمان درنظر گرفته‌اند. مدل ارایه شده از نوع *-/L2/L3/M* است که هدف آن به‌دست آوردن وابستگی بین تصمیمات تعیین اندازه انباشته و فرآیند برش به‌منظور کاهش ضایعات مواد اولیه و هزینه‌های موجودی و تولید است. تصمیمات تعیین اندازه انباشته، تعداد مبلمان موردنیاز را در هر دوره از افق برنامه‌ریزی تعیین می‌کند و تصمیمات برش بهترین الگوی برش را برای برش اقلام به‌منظور تولید محصولات نهایی تعیین می‌کند.

عملیات برش در این تحقیق دوبعدی است و انواع مختلف اقلام از نظر تفاوت در ضخامت صفحات وجود دارند. دستگاه برش اجازه می‌دهد که برش‌های هم‌زمان روی صفحات مختلف صورت گیرد. به‌عبارت‌دیگر صفحات را می‌توان روی دستگاه برش انباشته کرد تا بتوانند به‌طور هم‌زمان مطابق با یک الگوی برش، برش داده شوند. هدف مدل پیشنهادی آن‌ها کمینه کردن مجموع هزینه‌های تولید و هزینه‌های موجودی محصولات نهایی و موجودی قطعات و همچنین هزینه‌های مواد اولیه است. در ادامه تعدادی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه تحقیق به‌صورت زیر است.

گرامنی و همکاران [24] یک فرآیند تولید در صنعت مبلمان در نظر گرفته‌اند که فعالیت اصلی آن تولید انواع مختلف محصولات نهایی از طریق مونتاژ قطعات برش‌خورده حاصل از برش دوبعدی ورق‌های چوبی به طول L و عرض W است. بر اساس تقاضای مشخص محصولات نهایی، در هر دوره یک مساله تعیین اندازه انباشته برای تعیین مقدار تولید هر محصول نهایی حل می‌شود. هدف مساله کمینه کردن هزینه تولید، برش، نگهداری محصول نهایی و هزینه‌های راه‌اندازی است. گرامنی و همکاران [25] یک مساله تعیین اندازه انباشته چند سطحی با مساله برش در سطح ۱ را بررسی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کردند. در مساله پیشنهادی آن‌ها یک برش قائم گیوتینی که دو عدد قطعه مستطیل شکل جدید تولید می‌کند و در مرحله بعد هر یک از این مستطیل‌ها به‌طور پیوسته توسط برش گیوتینی بریده می‌شوند تا قطعات موردنیاز تولید شوند و در مونتاژ محصولات نهایی به‌کار گرفته شوند.

آلم و مورابیتو [26] از ابزارهای بهینه‌سازی استوار برای حل یکپارچگی در صنعت مبلمان استفاده کردند. در مساله آن‌ها هزینه‌های تولید و تقاضا محصولات پارامترهای غیرقطعی هستند. هدف آن‌ها کمینه کردن هزینه‌های تولید، نگهداری محصولات نهایی، راه‌اندازی، عقب‌افتادگی از تقاضا محصولات، از دست رفتن مواد اولیه در هر بار برش و هزینه اضافه‌کاری در هر دوره است. آلم و مورابیتو [27] یک مدل ریاضی قطعی با درنظر گرفتن فرآیندهای تولید واقعی در یک کارخانه مبلمان کوچک در برزیل با برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مختلف برای مقابله با مسایل ریسک‌پذیر و بدون ریسک پیشنهاد شده کردند.

دو ناسکیمنتو و همکاران [17] یک مساله برش یک‌بعدی با یکپارچگی در سطح سفارش خرید مواد اولیه و مرحله برش‌کاری را مدنظر قرار می‌دهند. در مفروضات مساله مواد خام در انواع و مقاطع مختلف با طول‌های متفاوت جهت برش یک‌بعدی وجود دارد. ورودی مساله میزان مواد خام و تقاضای مشتریان برای محصول نهایی است. مقادیر باقیمانده از مواد خام برش‌خورده در هر دوره به‌عنوان مواد خام دوره‌های بعد درنظر گرفته می‌شود. هزینه‌های درنظر گرفته‌شده عبارت‌اند از هزینه تولید، نگهداری قطعات برش‌خورده، مواد اولیه. روش آزادسازی قید عدد صحیح و تبدیل مساله به مساله برنامه‌ریزی خطی، استفاده از تولید ستون به روش سیمپلکس به حل مساله پرداخته و با استفاده از روش ابتکاری مقادیر عدد صحیح را به‌دست آورده است.

کریستوفولتی و همکاران [28] مساله یکپارچه برش سه‌بعدی صنعت تشک تختخواب با یکپارچگی سطوح ۱ و ۲ تولید، با استفاده از مدل ریاضی عدد صحیح مختلط و با هدف کمینه کردن هزینه‌های تولید را بررسی کردند. آیرس و همکاران [29] یک مدل یکپارچه ادغام دو مساله تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام را به‌صورت برش یک‌بعدی و دوبعدی در صنایع برش کاغذی که رول‌های بزرگ کاغذ را به کاغذهایی به‌اندازه قابل‌استفاده عمومی برش می‌دهد، بررسی کرده‌اند و با توجه به این‌که محصول نهایی کاغذ برش خورده است و عملیات تولید فاقد مرحله مونتاژ است. در مدل پیشنهادی آن‌ها ابتدا میزان رول‌های اولیه موردنیاز برای برطرف کردن تقاضا مشتری در افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شود و سپس رول‌ها با استفاده از برش یک‌بعدی به کلاف‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و در فاز سوم برش دوبعدی برای استفاده روزمره و عمومی روی کاغذها ایجاد می‌شود.

ملگا و همکاران [30] مساله تعیین اندازه انباشته دومرحله‌ای، برش مواد خام و زمان‌بندی را به‌طور یکپارچه در مساله برش یک‌بعدی با درنظر گرفتن زمان‌های راه‌اندازی وابسته ترتیبی و هزینه راه‌اندازی دستگاه‌های برش بررسی کردند. در فرآیند مرحله اول تولید با ایجاد الگوی برش، برش‌کاری انجام می‌شود و در مرحله دوم قطعات بریده‌شده برای تولید محصول نهایی مونتاژ می‌گردند. زمان‌بندی تولید بر اساس تقاضای مشتری تنظیم می‌گردد. ملگا و همکاران [31] از رویکرد حل دقیق برای مساله بسته‌بندی و تعیین سایز انباشته به‌طور هم‌زمان با درنظر گرفتن راه‌اندازی‌های وابسته دنباله‌ای را بررسی کردند. هدف آن‌ها بیشینه کردن تعداد خروجی به ازای ورودی معین و کمینه کردن میزان ورودی به ازای خروجی معین است.

سیلور و همکاران [32] به فرموله کردن و تحلیل نظری مساله برش یک‌بعدی با دوره‌های زمانی چندگانه با درنظر گرفتن هزینه راه‌اندازی دستگاه‌ها پرداخته‌اند. تمرکز در این پژوهش بر روی اثر الگوی برش بر هزینه راه‌اندازی است و سعی می‌کند تعداد الگوی برش کمتری جهت دستیابی به هزینه راه‌اندازی مجدد دستگاه برش پیدا کند. دلارا آندراده و همکاران [33] به بررسی در یک کارخانه تولید فنر اتومبیل پرداخته‌اند که سطوح اول و دوم تولید یکپارچه‌اند، مساله برش یک‌بعدی است و مقدار موجودی در انتهای هر دوره به‌عنوان خروجی درنظر گرفته شده است. هزینه تولید و نگهداری قطعات برش خورده به‌عنوان تابع هدف کمینه شده است. **جدول ۱** خلاصه‌ای از تحقیقات انجام در این زمینه را نشان می‌دهد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۱- خلاصه تحقیقات گذشته.

Table 1- Summary of past research.

نویسندگان	نوع مساله						ورودی							خروجی	هدف	سایر مفروضات						هزینه‌های درنظر گرفته‌شده				
	L1 / L2 / – / M	- / L2 / L3 / M	L1 /L2 / L3 / M	One-dimensional	Two-dimensional	Three-dimensional	مواد خام با مقاطع مختلف	BOM	تقاضای مشتریان	الگوی برش	تعیین مقدار موجودی نگهداری شده در پایان دوره	زمان بندی تولید	تعیین مقدار مواد خام استفاده شده	تعیین مقدار اندازه انباشته	حداقل کردن هزینه‌ها	برنامه‌ریزی اضافه‌کاری	قطعات خریدنی برای مونتاژ	دیرکرد تحویل پروژه	خرید	تولید	نگهداری قطعات بریده شده	نگهداری مواد اولیه	هزینه دیرکرد تحویل پروژه
[25]	*			*	*			*		*		*		*	*					*	*		
[19]	*			*					*	*		*	*							*			
[12]	*			*	*				*	*			*							*	*		
[21]			*	*				*	*	*		*			*					*	*		
[1]	*			*			*		*					*	*					*	*		
[4]		*			*				*					*	*					*	*		
[26]			*		*		*	*	*		*		*	*	*				*	*	*		
[16]	*			*				*	*		*			*	*					*	*		
[3]	*			*				*	*					*	*					*	*		
[6]		*			*			*			*		*	*	*					*	*		
[2]		*			*			*			*		*	*	*					*	*	*	
[17]		*			*		*	*			*		*	*	*					*	*		
[17]		*		*					*	*			*	*	*				*	*	*		
[15]		*			*			*			*			*	*	*				*	*		
[7]		*			*			*			*			*	*	*				*	*		
[7]	*				*			*	*		*			*	*					*	*		
[14]			*	*					*					*	*					*	*		
[13]	*			*			*							*						*	*		
[29]	*			*					*		*	*		*	*					*	*		
[28]	*			*			*		*					*	*					*	*		
[20]	*					*	*		*	*				*	*						*	*	
[35]	*			*				*	*		*			*	*					*	*		
[9]		*		*				*	*		*	*	*	*	*					*	*	*	
[18]		*			*			*	*		*		*	*	*					*	*	*	
[30]	*			*					*	*				*	*					*	*		
[23]	*			*	*			*			*		*	*	*					*	*		
تحقیق جاری			*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

با توجه به **جدول ۱** مساله یکپارچه تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام با هزینه تاخیر در تحویل سفارش‌ها، اضافه‌کاری و خرید مواد اولیه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید تاکنون به‌صورت یکپارچه بررسی نشده است. در این تحقیق یک مساله تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام با ویژگی‌های ساختار محصولات، تقاضای مشتری، تعداد آیتم برش‌خورده در هر محصول، ظرفیت ایستگاه‌های کاری هر مرحله، میزان سفارش مواد خام (نظیر میلگرد، نبشی، قوطی و ...)، مقاطع مختلف مواد خام در دوره‌های مختلف مورد برنامه‌ریزی، میزان سفارش قطعات افزودنی در هر دوره برنامه‌ریزی، تعیین طرح برش مواد، موجودی مواد در پایان هر دوره زمانی و میزان شیفت کاری فوق‌العاده موردبررسی و یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و روش حل دقیق برای حل مساله در ابعاد بزرگ پیشنهاد شده است.

۳- مدل پیشنهادی

در این قسمت مدل پیشنهادی مساله ارایه شده است. هدف مساله یافتن راه‌حل بهینه کلی در مساله یکپارچه تعیین اندازه انباشته چند سطحی و برش مواد خام یک‌بعدی با شکل مقطع‌های مختلف و سایزهای متفاوت است، به‌صورتی که تقاضای هر دوره در موعد مقرر به‌گونه‌ای برآورده شود که مجموع هزینه‌های سفارش‌دهی مواد خام، نگهداری مواد خام و قطعات نیمه ساخته‌شده و هزینه تاخیر ایستگاه‌های تولیدی کمینه شود. لازم به ذکر است که هزینه تاخیر بر اساس هزینه کمبود در هر دوره اندازه‌گیری شده است. مدل پیشنهادی بر اساس مقایسه هزینه اضافه‌کاری و هزینه جریمه می‌تواند بر اساس میزان لازم تا سقف ظرفیت، برای جلوگیری از هزینه جریمه، شیفت اضافه‌کاری برقرار کند. مفروضات مساله به شرح زیر است:

۱. اگر الگوهای برش تغییر کنند یک زمان راه‌اندازی جدید برای ایستگاه‌های برش اعمال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر متغیر راه‌اندازی ایستگاه‌های برش علاوه بر شکل مقطع و طول مواد خام و دوره‌ای که در آن عملیات برش انجام می‌شود، به الگوهای برش نیز مرتبط است.
۲. سفارش‌ها مشتریان در هر دوره به‌صورت تقاضای مشتریان از هر آیتم در هر دوره درنظر گرفته شده است.
۳. مقدار موجودی مواد خام از هر شکل مقطع و طول خاص در ابتدای افق برنامه‌ریزی صفر است.
٤. محدودیت ظرفیت در ایستگاه‌های برش و همچنین سایر ایستگاه‌های تولید درنظر گرفته شده است و با توجه به زمان راه‌اندازی و زمان پردازش عملیات مربوطه در هر ایستگاه، محدودیت‌ها اداره می‌شوند.
۵. زمان راه‌اندازی ایستگاه‌ها درنظر گرفته شده است اما هزینه راه‌اندازی در تابع هدف درنظر گرفته نشده است.

مدل مساله در **جدول ۲** آمده است.

جدول ۲- مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم.
Table 2- Collections, indices, parameters and decision variables.

مجموعه‌ها	
N	مجموعه کل آیتم‌ها
V	مجموعه آیتم‌های خام جهت برش $V \subset N$
R	مجموعه محصولات نهایی $r \subset N$
U	مجموعه قطعات مونتاژی $U \subset N$
$N-U-V$	مجموعه قطعات نیمه ساخته‌شده حین تولید به‌جز قطعات خام بریده‌شده و قطعات مونتاژی
S_i	مجموعه Immediate successors آیتم i در BOM
M	مجموعه تمام ایستگاه‌های موجود برای تولید محصولات
M_c	مجموعه ایستگاه‌های برش $M_c \subset M$
K_e	مجموعه طول‌های متفاوت مربوط به شکل مقطع e
F_{ek}	مجموعه الگوهای برش مربوط به شکل مقطع e و طول k
اندیس‌ها	
i, j	آیتم‌ها $i, j = 1,2, \dots, n$
T	دوره‌های زمان $t = 1,2, \dots, T$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۲- ادامه.

Table 2- Continued.

اندیس‌ها	
E	شکل مقطع مواد خام $e = 1,2,\ldots,E$
M	ایستگاه‌های کاری $m = 1,2,\ldots,M$
K	طول‌های متفاوت مواد خام $k = 1,2,\ldots,K$
F	الگوهای برش $f = 1,2,\ldots,F$
U	قطعات مونتاژی $u=1,2,\ldots,U$
h_i	هزینه نگهداری یک واحد آیتم i در هر دوره
π_i	هزینه کمبود آیتم i
d_{it}	تقاضا آیتم i در دوره t
a_{ij}	تعداد واحد آیتم i موردنیاز برای تولید یک واحد آیتم j
α_{if}^{ek}	تعداد آیتم خام i به‌دست آمده از برش مواد خام با شکل مقطع e و طول k مطابق الگوی برش f
pt_{mi}	زمان پردازش موردنیاز در ایستگاه m به‌منظور تولید یک واحد آیتم i
Pt_{mf}^{ek}	زمان پردازش موردنیاز در ایستگاه برش m، $(m \in M_c)$ به‌منظور برش مواد خام با شکل مقطع e و طول k مطابق الگوی برش f
st_{mi}	زمان راه‌اندازی ایستگاه m به‌منظور تولید آیتم i
St_{fm}^{ek}	زمان راه‌اندازی ایستگاه برش m $(m \in M_c)$ به‌منظور برش مواد خام با شکل مقطع e و طول k
b_{mt}	ظرفیت عادی ایستگاه m در دوره t برحسب ساعت
b'_{mt}	ظرفیت اضافه‌کاری ایستگاه m در دوره t برحسب ساعت
fc_t^{ek}	هزینه ثابت سفارش مواد خام با شکل مقطع e و طول k در دوره t
vc_t^{ek}	هزینه متغیر سفارش مواد خام با شکل مقطع e و طول k در دوره t
ho_t^{ek}	هزینه نگهداری مواد خام با شکل مقطع e و طول k در دوره t
پارامترها	
g_{ut}	هزینه خرید قطعه u در دوره t
gh_{ut}	هزینه نگهداری قطعه u در دوره t
o_{mt}	هزینه هر ساعت اضافه‌کاری ایستگاه m در دوره t
B	عدد مثبت بزرگ
متغیرها	
x_{it}	تعداد آیتم i تولیدشده در دوره، t
I_{it}^{+}	تعداد آیتم i نگهداری شده در پایان دوره، t
I_{it}^{-}	تعداد کمبود آیتم i در پایان دوره t
I_{it}	موجودی خالص آیتم i در دوره t، حاصل تفاضل دو متغیر نگهداری و کمبود
y_{ft}^{ek}	تعداد واحد مواد خام با شکل مقطع e و طول k بریده‌شده مطابق الگوی برش f در دوره t
z_t^{ek}	مقدار سفارش مواد خام با شکل مقطع e و طول k در دوره t
G_{ut}	مقدار سفارش خرید قطعه u در دوره t
Gh_{ut}	مقدار قطعه u نگهداری شده در پایان دوره t
O_{mt}	میزان اضافه‌کاری ایستگاه m در دوره t
Io_t^{ek}	مقدار مواد خام با شکل مقطع e و طول k نگهداری شده در پایان دوره t
w_{it}	متغیر باینری راه‌اندازی ایستگاه‌های تولید $w_{it} = \begin{cases} 1, & \text{if } x_{it} > 0, \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$
γ'^{ek}_{ft}	متغیر باینری راه‌اندازی ایستگاه برش $\gamma'^{ek}_{ft} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{ft}^{ek} > 0, \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$
λ_t^{ek}	متغیر باینری سفارش‌دهی که نشان می‌دهد سفارش مواد خام با شکل مقطع e و طول k در دوره t انجام می‌شود یا نه $\lambda_t^{ek} = \begin{cases} 1, & \text{if } z_t^{ek}>0, \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} Min\ Z &= \sum_{t=1}^{T}\sum_{e=1}^{E}\sum_{k\in K_e}\left(fc_t^{ek}.\lambda_t^{ek} + vc_t^{ek}.z_t^{ek}\right) \\ &+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{e=1}^{E}\sum_{k\in K_e} ho_t^{ek}.Io_t^{ek} + \sum_{u=1}^{U}\sum_{t=1}^{T}(g_{ut}.G_{ut} + gh_{ut}.Gh_{ut}) + \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}(O_{mt}.o_{mt} \\ &+ \sum_{i\in N}\sum_{t=1}^{T} h_i.I_{it}^{+}) + \sum_{i\in r}\sum_{t=1}^{T}\pi_i.I_{it}^{-}. \end{aligned} \qquad (۱)$$

تابع هدف (۱) با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های سفارش مواد خام که خود شامل دو بخش هزینه ثابت سفارش‌دهی و هزینه متغیر سفارش‌دهی است، نگهداری مواد خام و آیتم‌ها در پایان هر دوره و کمبود محصول نهایی در هر دوره مدل‌سازی شده است.

$$z_t^{ek} + Io_{t-1}^{ek} = Io_t^{ek} + \sum_{f\in F_{ek}} y_{ft}^{ek} \quad for\ all\ t = {}^{1,2,.,T}, e = 1,2,..,E, k \in K_e. \qquad (۲)$$

محدودیت (۲) بالانس میزان سفارش مواد خام برای تولید محصولات را نشان می‌دهد. بدین‌صورت که میزان سفارش مواد خام از هر شکل مقطع و طول، در هر دوره زمانی، به‌اضافه میزان موجودی باقیمانده از همان نوع مواد خام از دوره قبل باید برابر باشد با میزان مواد خامی که قرار است مطابق الگوهای برش تعیین‌شده بریده شوند، به‌اضافه میزان موجودی از مواد خام که ممکن است بریده نشده باشد و برای دوره بعد باقیمانده باشد (توجه داشته باشید که $Io_0^{ek} = 0$ درنظر گرفته شده است).

$$G_{ut} + Gh_{u,t-1} = Gh_{ut} + \sum_{j\in S_u} a_{uj}.\ x_{jt}, \quad for\ all\ \ u \in U, t = 1,2,..T. \qquad (۳)$$

محدودیت (۳) بالانس و کفایت قطعات خریدنی برای تولید محصول را نشان می‌دهد.

$$x_{it} + I_{i,t-1} = d_{it} + I_{it} + \sum_{j\in s_i} a_{ij}.x_{jt}\ for\ all\ i\ \in N - V, t = 1,2,\ldots.T. \qquad (۴)$$

محدودیت (۴) محدودیت بالانس تقاضا است و تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان در هر دوره برآورده شود. بدین‌صورت که مجموع مقدار تولید آیتم i در هر دوره و میزان موجودی باقیمانده آیتم موردنظر از دوره قبل، باید میزان تقاضا آن آیتم در همان دوره و مجموع میزان تولید آیتم‌های سطوح پایین‌تر BOM که در ساخت آن‌ها از آیتم i استفاده شده است را برآورده کند؛ همچنین ممکن است در پایان همان دوره به میزان $I_{i,t}$ نیز موجودی از آیتم i را نگهداریم.

$$\sum_{e=1}^{E}\sum_{k\in K_e}\sum_{f\in F_{ek}} \alpha_{if}^{ek}.y_{ft}^{ek} + I_{i,t-1} = I_{i,t} + \sum_{j\in s_i} a_{ij}.x_{jt}\ for\ all\ i\ \in V, t = 1,2,\ldots.T. \qquad (۵)$$

محدودیت (۵) نیز بالانس تولید و موجودی را برای سطوح بالاتر BOM تضمین می‌کند، یعنی باید مقدار آیتم‌های خام موجود در سطح آخر BOM محصولات، نیاز آیتم‌های سطوح پایین‌تر برای تولید محصول نهایی را برآورده کنند. بدین‌صورت که مجموع آیتم‌های خام بریده‌شده از مواد خام با شکل مقطع و طول مشخص مطابق الگوی برش تعیین‌شده به‌اضافه میزان موجودی باقیمانده آیتم موردنظر (آیتم خام) از دوره قبل، باید برابر با مجموع مصرف این آیتم‌های خام برای سطوح پایین‌تر به اضافه موجودی نگهداری‌شده در پایان همان دوره باشد.

$$\sum_{i\in N-V-U} pt_{mi}.x_{it} + st_{mi}.w_{it}) \ \le b_{mt} + O_{mt}, \quad for\ all \quad t = 1,2,\ldots,T, m \in M - M_c. \qquad (۶)$$

نامعادله (۶) محدودیت ظرفیت ایستگاه‌های تولید است و اطمینان می‌دهد که مجموع زمان‌های پردازش و راه‌اندازی ایستگاه‌های تولیدی برای تولید محصولات، نمی‌تواند بزرگ‌تر از ظرفیت موجود ایستگاه‌های تولیدی باشد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_{e=1}^{E}\sum_{k\in K_e}\sum_{f\in F_{ek}}\left(Pt_{fm}^{ek}.y_{ft}^{ek}+St_{fm}^{ek}.\gamma_{ft}^{ek}\right)\le b_{mt}\ +\ O_{mt}\ for\ all\ \ t=1,2,\ldots,T, m\in M_c. \qquad (۷)$$

رابطه (۷) نیز مانند محدودیت قبل، محدودیت ظرفیت است با این تفاوت که مربوط به ایستگاه برش است. بدین‌صورت که مجموع زمان‌های راه‌اندازی ایستگاه برش و پردازش عملیات برش نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت موجود ایستگاه مربوطه باشد.

$$x_{it}+I_{i,t-1}^{+}-I_{i,t}^{+}\ge\sum_{j\in s_i}a_{ij}.x_{jt},\quad for\ all\ i\in N\text{-}V\text{-}U,\ \ t=1,2,\ldots,T. \qquad (۸)$$

محدودیت (۸) تضمین می‌کند که میزان تولید آیتم‌ها و موجودی آن‌ها از دوره قبل نیاز آیتم‌های پایین‌تر در *BOM* را برآورده می‌کند.

$$\sum_{e}\sum_{k\in k_e}\sum_{f\in F_{ek}}\alpha_{if}^{ek}.y_{ft}^{ek}+I_{i,t-1}^{+}-I_{i,t}^{+}\ge\sum_{j\in s_i}a_{ij}.x_{jt},\quad for\ all\ \ i\in\ ^{V,}\ t=1,2,\ldots,T. \qquad (۹)$$

محدودیت (۹) نیز مانند **محدودیت (۸)** است با این تفاوت که برای آیتم‌های خام اعمال شده است.

$$0\ \le\ O_{mt}\ \le\ b'_{mt},\quad for\ all\ t=1,2,\ldots,T, m\in M_c. \qquad (۱۰)$$

محدودیت (۱۰) محدودیت اضافه‌کاری ایستگاه‌های تولید را نشان می‌دهد.

$$x_{it}\le B.w_{it},\quad for\ all\ \ t=1,2,\ldots,T\ ,\ \ i\in N. \qquad (۱۱)$$

محدودیت (۱۱) اطمینان می‌دهد که هیچ تولیدی از آیتم i در دوره t رخ نمی‌دهد، مگر این‌که متغیر راه‌اندازی مربوطه مقدار یک بگیرد.

$$y_{ft}^{ek}\le B.\gamma_{ft}^{ek},\quad for\ all\ \ t=1,2,\ldots,T\quad e=1,2,\ldots,E\ \ ,k\in K_e,\ \ f\in F_{ek}. \qquad (۱۲)$$

محدودیت (۱۲) نیز مانند محدودیت قبل است، با این تفاوت که برای ایستگاه‌های برش درنظر گرفته شده است و متغیرهای راه‌اندازی ایستگاه برش را به متغیرهای مربوط به آن‌ها یعنی تعداد واحد مواد خام با شکل مقطع e و طول k برش خورده مطابق الگو برش f مرتبط می‌سازند. به‌عبارت‌دیگر هیچ مواد خامی بریده نخواهد شد، مگر آنکه متغیر راه‌اندازی ایستگاه برش مقدار ۱ بگیرد.

$$z_t^{ek}\le B.\lambda_t^{ek},\quad for\ all\quad t=1,2,\ldots,T\quad e=1,2,\ldots,E\ \ ,k\in K_e. \qquad (۱۳)$$

این محدودیت متغیر باینری سفارش‌دهی را به متغیر میزان سفارش مواد خام در هر دوره مرتبط می‌سازد.

$$I_{it}=I_{it}^{+}-I_{it}^{-},for\ all\ \ t=1,2,\ldots,T\quad i\in N. \qquad (۱۴)$$

محدودیت (۱۴) نحوه محاسبه موجودی خالص را نشان می‌دهد که این موجودی می‌تواند مقادیر مثبت، منفی و یا صفر بگیرد.

$$I_{it}^{-}=0\ for\ all\quad i=N,\qquad t=T. \qquad (۱۵)$$

محدودیت (۱۵) بیانگر این است که کمبود محصول نهایی ($i=N$) در دوره آخر ($t=T$) مجاز نیست. به‌عبارت‌دیگر تقاضای ازدست‌رفته نداریم و درنهایت باید به تمام تقاضاها پاسخ داده شود.

$$Io_t^{ek}\ge 0\ ,x_{it}\ge 0\ \ ,integer.I_{it}\in ZI_{it}^{-}\ge 0\ ,I_{it}^{+}\ge 0\ ,y_{ft}^{ek}\ge 0\ ,z_t^{ek}\ge 0w_{it}\in\{0,1\}\ ,\gamma_{ft}^{ek}\in\{0,1\}\ ,\lambda_t^{ek}\in\{0,1\}. \qquad (۱۶)$$

مجموعه **محدودیت (۱۶)** نیز حدود متغیرها را نشان می‌دهند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴- روش حل

در این تحقیق ترکیب الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار سی‌پلکس جهت حل مساله معرفی شده است. در الگوریتم پیشنهادی متغیرهای الگوی برش و تعداد برش مشخص شده و سپس این جواب به‌عنوان ورودی نرم‌افزار سی‌پلکس استفاده می‌شود. روش سی‌پلکس با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح متغیرهای تولید آیتم‌ها در هر دوره، میزان سفارش مواد خام، میزان موجودی آیتم‌ها و میزان مواد خام در هر دوره و میزان کمبود را محاسبه کرده و سپس این جواب مجددا به الگوریتم ژنتیک منتقل می‌شود. الگوریتم ژنتیک مجددا الگوی برش و تعداد برش را محاسبه کرده و جواب جدید مجددا به نرم‌افزار سی‌پلکس منتقل می‌شود. این فرآیند تا رسیدن به یک جواب مناسب ادامه دارد.

۴-۱- جواب اولیه

الگوی برش و تعداد برش

در این حالت اندیس شکل مقطع‌های متفاوت مواد خام با اندیس طول‌های متفاوت مواد خام ادغام شده و هر نوع ماده خام با یک اندیس نمایش داده شده است. سپس به تفکیک هر ماده خام، متغیرهای الگوی برش و تعداد استفاده در هر الگو محاسبه شده و در نهایت یک ماتریس به‌دست می‌آید که سطرهای آن تعداد الگوهای برش و ستون‌های آن مواد خام هستند. تعداد برش نیز یک ماتریس به ابعاد تعداد الگوهای برش در تعداد دوره‌های زمانی است. **شکل ۱** کروموزوم مربوطه را برای یک ماده خام نشان می‌دهد.

q=1 e=1 k=200 — 8.5

	1	2	3	4
تعداد الگو برش				
1				
2				
2				

تعداد آیتم خام

	1	2	3	4
تعداد الگو برش				
1				
2				
2				

q=2 e=1 k=200 — تعداد آیتم خام

	2	3	4	2	3	4
تعداد الگو برش						
2						

تعداد آیتم خام

	2	3	4	2	3	4
تعداد الگو برش						
2						

q=3 e=1 k=200 — تعداد آیتم خام

	2	3	4	2	3	4
تعداد الگو برش						
2						

شکل ۱- کروموزوم الگوریتم ژنتیک.

Figure 1- Chromosome genetic algorithm.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴-۲- تابع برازندگی

تابع هدف مساله الگوریتم ژنتیک برابر با خروجی نرم‌افزار سی‌پلکس است. بعد از مشخص شدن الگوی برش و تعداد برش، این جواب به‌عنوان ورودی نرم‌افزار سی‌پلکس درنظر گرفته شده و خروجی نرم‌افزار نیز به‌عنوان تابع هدف مساله است.

۴-۳- جواب اولیه

سه روش برای تولید جواب اولیه استفاده شده است. در روش اول ابتدا تمامی آیتم برحسب طول خود به‌صورت نزولی مرتب می‌شوند. در این حالت آیتمی که بلندترین طول را دارد، در اولین انتخاب برش قرار می‌گیرد؛ این روش را *FFD* می‌نامیم. بعد از انتخاب آیتم، نوع برش آن به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در حالت دوم تمامی آیتم‌ها به‌صورت تصادفی چیدمان می‌شوند. نوع برش نیز به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در حالت سوم ابتدا به‌صورت تصادفی تمامی آیتم‌ها و برش‌ها را درنظر می‌گیریم، سپس یک الگوریتم اصلاحی را انجام می‌دهیم و هر کدام از آیتم‌ها که در برش ضایعات کمتری دارد، انتخاب می‌شود.

تولید متغیر تعداد برش

هدف از تولید متغیر برش این است که الگوهای برش هر کدام از مواد خام، به تعدادی به‌کار گرفته شود که نیاز آیتم‌های خام برای محصولات نهایی برآورده شود. در این حالت کمبود فقط برای محصول نهایی مجاز است و برای دیگر قطعات خام و ... مجاز نیست.

تقاضای محصولات مشخص است و با توجه به *BOM* هر محصول، تقاضای مواد اولیه نیز مشخص است. جهت تولید ماتریس تعداد برش از دوره اول و از آیتم اول خام شروع کرده و یکی از الگوهای برشی که این قطعه را تولید می‌کند، به‌صورت تصادفی انتخاب و برش را انجام می‌دهیم. بعد از برش، مقدار نیاز برآورده شده برای تولید محصول در آن دوره را بررسی کرده و این رویه را تا آخر ادامه می‌دهیم تا هیچ کمبودی نباشد.

۴-۴- جهش

عملگر جهش برای تعداد برش و الگوی برش انجام می‌شود. در هر بار تکرار الگوریتم یکی از این دو به تصادف انتخاب می‌شوند. برای انجام جهش برای تعداد برش در ماتریس مربوطه تعداد برش مربوط به آن ماده خام، جای دو عنصر بزرگ‌تر از صفر آن را به تصادف با یکدیگر جابه‌جا می‌کنیم. جهت جهش برای الگوی برش، ابتدا یک الگوی برش جدید برای تک‌تک محصولات خام تولید می‌کنیم.

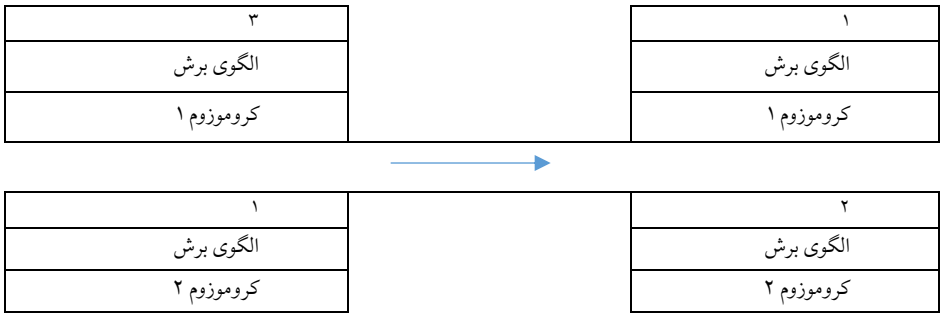
جهت انجام این کار ابتدا از طول ماده خام یکی‌یکی به اندازه طول قطعاتی که از این ماده خام به‌دست می‌آید کم کرده تا زمانی که دیگر امکان این کار نباشد. سپس برای هر کدام از مواد خام با احتمال ۵۰% این الگو را جایگزین یکی الگوهای برش ماتریس الگوی برش مواد خام در نظر گرفته و با احتمال ۵۰% این الگو را به مجموعه الگوی برش مواد خام اضافه می‌کنیم. از آنجایی که تغییر در الگوی برش باعث تغییر تعداد دفعات برش می‌شود. از این‌رو با اضافه یا جابه‌جا کردن این الگوی برش در ماتریس الگوهای برش، ماتریس برش نیز تغییر خواهد کرد؛ بنابراین، تمامی مقادیر سطر مربوط به الگو جدید در ماتریس تعداد برش را برابر صفر قرار می‌دهیم و در دوره‌هایی که تولید آیتم‌های این الگو کمتر از میزان نیاز به این آیتم‌هاست، الگو جدید را انتخاب می‌کنیم.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴-۵- تقاطع

جهش عمل تقاطع، الگوی برش برای مواد خام با یکدیگر جابه‌جا می‌شود. در **شکل ۲** به آن اشاره شد.



شکل ۲- عملگر تقاطع.

Figure 2- Intersection operator.

۴-۶- عملگر انتخاب

عملگر انتخاب با استفاده از چرخه رولت است. در این روش جواب‌هایی که بهتر هستند با احتمال بیشتری برای تقاطع انتخاب می‌شوند.

رویه کلی الگوریتم

تعداد تکرارها برابر با ۳۰۰ است. شرط توقف مساله ترکیبی از تعداد تکرار و همگرایی است. اگر در ۱۰۰ تکرار پیوسته الگوریتم بهبودی حاصل نشود، مساله متوقف می‌شود.

۵- یافته‌های پژوهش

مساله پیشنهادی در سه سایز مختلف کوچک، متوسط و بزرگ بررسی شده است. نتایج مساله در سه حالت مختلف حل با نرم‌افزار سی‌پلکس (که با c نشان داده می‌شود)، حل با ترکیب الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار سی‌پلکس (که با *CGA* نشان داده می‌شود) و حل با الگوریتم ژنتیک (که با *GA* نشان داده می‌شود) بررسی و نتایج آن گزارش شده است. برای هر حالت ۵ مثال مختلف حل و نتایج آن گزارش شده است. **جدول ۳** ابعاد مختلف مساله را نشان می‌دهد. این ابعاد از دنیای واقعی الهام گرفته شده است.

جدول ۳- ابعاد مساله.

Table 3- Dimensions of the problem.

	آیتم‌ها	آیتم خام	دوره	ایستگاه‌ها	ایستگاه برش	شکل مقطع	طول ماده خام
کوچک	5	2	5	2	2	2	2
متوسط	25	10	10	10	4	4	6
بزرگ	50	20	25	25	10	10	15

جداول زیر نتایج مساله برای تمامی سایزها را نشان می‌دهد. در **جدول ۴** و **جدول ۵** زیر میزان تابع هدف و زمان حل مسایل در هر ۳ حالت پیشنهادی بررسی شده است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۴- نتایج مساله برای ابعاد کوچک.

Table 4- Problem results for small dimensions.

مثال‌ها	تابع هدف			زمان حل		
	C	CGA	GA	C	CGA	GA
1	12157	12007	11775	2699	2104	17
2	12133	11895	11740	2545	2965	28
3	11860	11700	11535	2973	1745	26
4	11924	11687	11472	2528	1786	18
5	12314	12155	12010	3154	2799	20
6	12048	11849	11610	2410	2346	19
7	11772	11598	11441	2574	2510	21
8	12028	11887	11718	2830	2712	25
9	12387	12232	12033	2777	1518	26
10	11731	11508	11361	2993	2685	24

در **جدول ۴** روش سی‌پلکس تمامی مسایل را در زمان بهینه حل کرده است. میانگین زمان حل این نرم‌افزار ۲۷۴۹ ثانیه است. میزان انحراف الگوریتم پیشنهادی با جواب بهینه برابر با ۱٫۵% است که نشان از کارآمدی روش حل پیشنهادی دارد. همچنین میزان انحراف روش الگوریتم ژنتیک با حالت بهینه برابر با ۳% است. میانگین زمان حل روش پیشنهادی برابر با ۲۳۱۷ ثانیه بوده که بیشتر این زمان حل مربوط به نرم‌افزار سی‌پلکس است. همچنین میانگین زمان حل روش ژنتیک برابر با ۲۲٫۴ ثانیه است.

جدول ۵- نتایج مساله برای ابعاد متوسط.

Table 5- Results of the problem for medium dimensions.

مثال‌ها	تابع هدف			زمان حل		
	C	CGA	GA	C	CGA	GA
1	22454	22986	22584	7200	7094	60
2	22191	22937	22513	7200	6062	55
3	21941	22500	22100	7200	5617	64
4	21761	22375	21910	7200	5524	59
5	22510	23507	23197	7200	6064	65
6	22072	22688	22425	7200	5738	55
7	21507	22023	21563	7200	6754	74
8	22180	22970	22676	7200	6659	78
9	22643	23508	23144	7200	5519	65
10	21702	22663	22266	7200	5570	66

در **جدول ۵** روش سی‌پلکس تمامی مسایل را در زمان ۷۲۰۰ ثانیه متوقف شده است. میزان بهبود الگوریتم پیشنهادی با جواب سی‌پلکس برابر با ۳٫۱% است که نشان از کارآمدی روش حل پیشنهادی دارد. همچنین میزان انحراف روش الگوریتم ژنتیک با روش پیشنهادی برابر با ۱٫۶% است. میانگین زمان حل روش پیشنهادی برابر با ۶۰۷۰ ثانیه بوده که بیشتر این زمان حل مربوط به نرم‌افزار سی‌پلکس است. همچنین میانگین زمان حل روش ژنتیک برابر با ۶۴٫۱ ثانیه است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۶- نتایج مساله برای ابعاد بزرگ.

Table 6- Problem results for large dimensions.

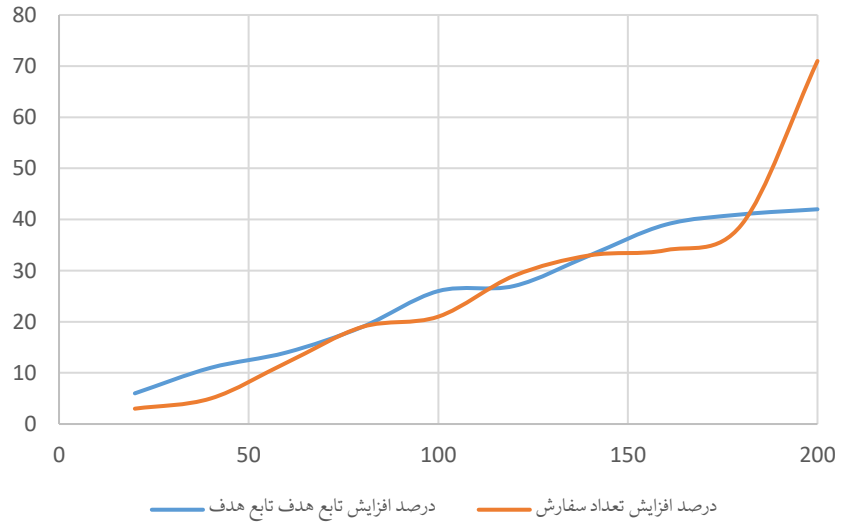
مثال‌ها	تابع هدف			زمان حل		
	C	CGA	GA	C	CGA	GA
1	N/A	65577	54567	7200	7192	150
2	N/A	19594	16347	7200	7026	137
3	N/A	19766	16426	7200	6569	140
4	N/A	18988	15883	7200	6236	121
5	N/A	18786	15758	7200	7396	157
6	N/A	18784	15305	7200	7246	142
7	N/A	18768	15598	7200	6075	147
8	N/A	18941	15543	7200	6372	136
9	N/A	18045	15165	7200	6092	114
10	N/A	19212	16023	7200	6682	137

در **جدول ۶** روش سی‌پلکس هیچ کدام از مسایل را حل نکرده است. میانگین زمان حل این نرم‌افزار ۷۲۰۰ ثانیه است. همچنین میزان انحراف روش الگوریتم ژنتیک با روش پیشنهادی برابر با ۱۶٫۸% است که نشان از کارایی روش پیشنهادی دارد. میانگین زمان حل روش پیشنهادی برابر با ۶۶۸۸ ثانیه بوده که بیشتر این زمان حل مربوط به نرم‌افزار سی‌پلکس است. همچنین میانگین زمان حل روش ژنتیک برابر با ۱۳۸٫۱ ثانیه است.

۶- تحلیل حساسیت

در این قسمت مساله پیشنهادی در حالات مختلف حل و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است.

حالت ۱ (افزایش هزینه‌های نگهداری): با افزایش هزینه‌های نگهداری، میزان سفارش مواد خام کاهش می‌یابد و سعی می‌شود در هر دوره سفارش مواد خام انجام شود. **شکل ۳** میزان افزایش هزینه نگهداری را از ۲۰% تا ۲۰۰% نشان می‌دهد.



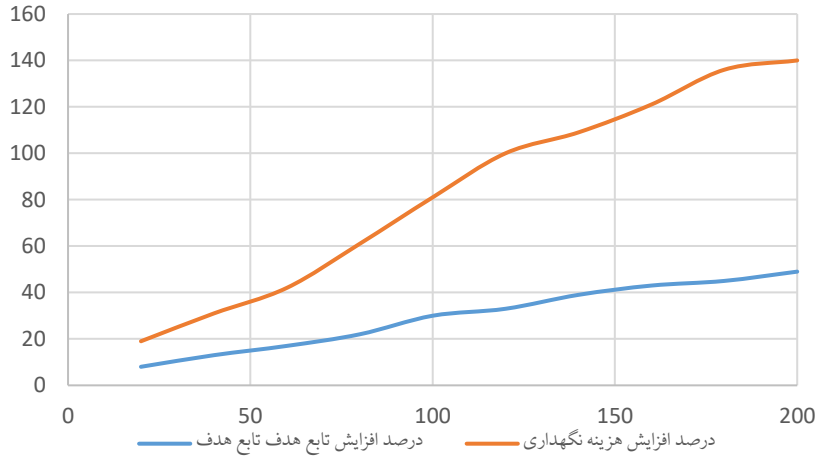
شکل ۳- بررسی مساله با افزایش هزینه‌های نگهداری.

Figure 3- Examining the problem with increasing maintenance costs.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

حالت ۲ (بررسی افزایش هزینه‌های خرید): با افزایش هزینه‌های خرید، میزان نگهداری مواد اولیه افزایش می‌یابد و سیستم سعی می‌کند با خرید بیشتر از هزینه‌های آن جلوگیری کند. **شکل ۴** میزان افزاش تابع هدف و هزینه‌های نگهداری را با افزایش هزینه‌های خرید نشان می‌دهد. در این شکل هزینه‌های خرید از ۲۰٪ تا ۲۰۰٪ افزاش یافته است.



شکل ۴- بررسی مساله با افزایش هزینه‌های خرید.

Figure 4- Examining the problem with increasing purchase costs.

حالت ۳: **جدول ۷**، مساله حالت حل جداگانه و یکپارچه را به تفکیک دوره‌های زمانی بررسی کرده است.

جدول ۷- بررسی مساله در حالات مختلف.

Table 7- Examining the problem in different situations.

روش‌های حل حالات مختلف مساله	یکپارچه هزینه	مجزا مجموع هزینه‌ها	درصد کاهش هزینه نسبت به حل یکپارچه	مجزا به تفکیک هر دوره مجموع هزینه‌ها	درصد کاهش هزینه نسبت به حل یکپارچه
حالت عادی	3030	4243	40.033	4862	46.6
افزایش هزینه نگهداری	3427	3622	5.69	4046	18.062
افزایش هزینه سفارش	4739	5889	24.26	6711	41.61

در **جدول ۷** میزان هزینه‌های مساله در حالت یکپارچه در حالتی که مساله به‌صورت مجزا حل شده است، در حالت عادی ۴۰٫۰۳۲٪ کاهش یافته است که نشان از اهمیت حل مساله به‌صورت یکپارچه دارد. این مقدار در حالت تحلیل حساسیت با هزینه نگهداری و سفارش‌دهی برابر با ۵٫۶۹ و ۲۴٫۲۶ است. همچنین در حالت حل به تفکیک هر دوره میزان کاهش هزینه در حالت عادی، تحلیل حسابت با هزینه نگهداری و تحلیل حساسیت با هزینه سفارش‌دهی برابر با ۴۶٫۶ و ۱۸٫۰۶۲ و ۴۱٫۶۱ است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مساله تعیین اندازه انباشته و برش مواد خام با هزینه تاخیر در تحویل سفارش‌ها، اضافه‌کاری و خرید مواد اولیه معرفی، یک مدل ریاضی یکپارچه برای آن با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید معرفی شده است. در مدل پیشنهادی تعیین اندازه انباشته به‌صورت چند سطحی و چند دوره‌ای و برش مواد خام به‌صورت یک‌بعدی درنظر گرفته شده است. مساله تعیین اندازه انباشته و مساله برش مواد خام دو موضوع مهم در صنعت تولید هستند که در فرآیند تولید بسیاری صنایع ازجمله صنعت مبلمان، کاغذ، آلومینیوم، صنایع فلزی و ... کاربرد دارند. این مساله، میزان تولید مجموعه‌ای از قطعات و محصولات تولیدی در طول افق برنامه‌ریزی مشخص‌شده را مشخص می‌کند. از طرف دیگر مساله برش مواد خام به تعیین الگوی برش مواد خام و تعداد استفاده از هر الگو برش به‌منظور تولید قطعات موردنیاز برای تولید محصول می‌پردازد، به‌طوری‌که هزینه‌های ضایعات مواد خام حداقل شود یا به‌عبارت‌دیگر میزان استفاده از مواد خام کمینه شود.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

با توجه به *NP-hard* بودن مساله و عدم‌کارایی روش‌های دقیق در ابعاد بزرگ، یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و حل دقیق با نرم‌افزار گمز ارایه شده است. در روش پیشنهادی، مساله موردنظر به دو قسمت تجزیه شده که در آن الگوهای برش مواد خام با الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود و سپس مساله با استفاده از نرم‌افزار گمز حل می‌شود. نتایج مساله حاکی از کارایی روش پیشنهادی در حل مساله دارد. میزان انحراف روش حل پیشنهادی از جواب دقیق برابر با ۱٫۵% است که نشان از کارایی روش پیشنهادی دارد. همچنین میزان بهبود روش پیشنهادی در ابعاد بزرگ نسبت به الگوریتم ژنتیک که روش دقیق قادر به حل آن نیست برابر با ۱۶٫۸% است.

همچنین با افزایش ۱% در هزینه‌های خرید میزان افزایش هزینه‌های مساله و هزینه‌های نگهداری به‌صورت میانگین ۰٫۶% و ۰٫۴۳% است. همچنین با افزایش ۱% در هزینه خرید، هزینه‌های مساله و نگهداری به‌صورت میانگین ۰٫۷۳% و ۰٫۲۳% افزایش می‌یابد. برای تحقیقات آتی می‌توان مسایلی مانند هزینه خرابی ماشین‌آلات و هزینه تعمیر آن‌ها و هزینه در دسترس نبودن ماشین‌آلات و نیروی کار را بررسی کرد. از اهداف این مساله کاهش هزینه‌های مساله بوده است (مانند دیگر مقالات ارایه شده در قسمت ادبیات تحقیق) که روش حل پیشنهادی نتایج مثبتی را برای این حالت به ارمغان آورده است. همچنین ارایه الگوی مناسب برش و تعیین اندازه بهینه انباشته به‌خوبی در روش حل پیشنهادی محاسبه شده است که نشان از کارآمدی روش حل مساله دارد.

برای تحقیقات آتی می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری عمیق جهت تعیین بهینه متغیرهای مساله در بلندمدت استفاده کرد. با توجه به پیچیدگی حل این نوع مسایل، روش حل پیشنهادی می‌تواند مفید باشد و نتایج مثبتی را به همراه داشته باشد. همچنین می‌توان امکان رد سفارش‌ها را به مساله اضافه کرد. رد سفارش‌ها این امکان را برای سازمان فراهم می‌کند تا دیگر سفارش‌ها در زمان مناسب‌تری کامل شده و از هزینه‌های تاخیر جلوگیری می‌کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله تماما توسط نویسندگان تهیه شده است.

منابع مالی

هیچ کمک مالی در فرآیند انجام پژوهش وجود نداشته است.

تعارض با منافع

هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد، همه نویسندگان، نسخه نهایی ارسال‌شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله، اثر اصلی آن‌ها بوده، قبلا چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نیستند.

منابع

[1] Chen, Q., & Chen, Y. (2024). Heuristics for the two-dimensional cutting stock problem with usable leftover. *Intelligent data analysis*, *28*(2), 591-611. https://doi.org/10.3233/IDA-227447

[2] Dikili, A. C., Takinacı, A. C., & Pek, N. A. (2008). A new heuristic approach to one-dimensional stock-cutting problems with multiple stock lengths in ship production. *Ocean engineering*, *35*(7), 637–645. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.01.003

[3] Cui, Y. (2012). A CAM system for one-dimensional stock cutting. *Advances in engineering software*, *47*(1), 7–16. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.12.004

[4] Cherri, A. C., Cherri, L. H., Oliveira, B. B., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2023). A stochastic programming approach to the cutting stock problem with usable leftovers. *European journal of operational research*, *308*(1), 38–53. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.013

[5] Hindi, K. S. (1995). Computationally efficient solution of the multi-item, capacitated lot-sizing problem. *Computers & industrial engineering*, *28*(4), 709–719. https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00021-R

[6] Delorme, M., & Iori, M. (2020). Enhanced pseudo-polynomial formulations for bin packing and cutting stock problems. *INFORMS journal on computing*, *32*(1), 101–119. https://doi.org/10.1287/ijoc.2018.0880

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[7] Kroth, K. M. (2024). Cutting and Packaging Optimization. In *Operations research and management: quantitative methods for planning and decision-making in business and economics* (pp. 45–67). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47206-0_3

[8] Kuik, R., & Salomon, M. (1990). Multi-level lot-sizing problem: evaluation of a simulated-annealing heuristic. *European journal of operational research*, *45*(1), 25–37. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90153-3

[9] Wu, T., Shi, L., Geunes, J., & Akartunalı, K. (2011). An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging. *European journal of operational research*, *214*(2), 428–441. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.04.029

[10] Roll, Y., & Karni, R. (1991). Multi-item, multi-level lot sizing with an aggregate capacity constraint. *European journal of operational research*, *51*(1), 73–87. https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90147-N

[11] Zhao, Q., Xie, C., & Xiao, Y. (2012). A variable neighborhood decomposition search algorithm for multilevel capacitated lot-sizing problems. *Electronic notes in discrete mathematics*, *39*, 129–135. https://doi.org/10.1016/j.endm.2012.10.018

[12] Bertolini, M., Mezzogori, D., & Zammori, F. (2024). Hybrid heuristic for the one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers and additional operating constraints. *International journal of industrial engineering computations*, *15*(1), 149–170. https://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2023.10.006

[13] Melega, G. M., de Araujo, S. A., & Jans, R. (2018). Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems. *European journal of operational research*, *271*(1), 1–19. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.002

[14] Luo, Q., Du, B., Rao, Y., & Guo, X. (2022). Metaheuristic algorithms for a special cutting stock problem with multiple stocks in the transformer manufacturing industry. *Expert systems with applications*, *210*, 118578. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118578

[15] Fang, J., Rao, Y., Luo, Q., & Xu, J. (2023). Solving one-dimensional cutting stock problems with the deep reinforcement learning. *Mathematics*, *11*(4), 1028. https://doi.org/10.3390/math11041028

[16] Cucuzza, R., Domaneschi, M., Rosso, M. M., Martinelli, L., & Marano, G. C. (2023). Cutting stock problem (CSP) applied to structural optimization for the minimum waste cost. *Ce/papers*, *6*(5), 1066–1073. https://doi.org/10.1002/cepa.2208

[17] do Nascimento, D. N., de Araujo, S. A., & Cherri, A. C. (2022). Integrated lot-sizing and one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers. *Annals of operations research*, *316*, 785–803. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03772-9

[18] Pierini, L. M., & Poldi, K. C. (2021). Lot Sizing and cutting stock problems in a paper production process. *Pesquisa operacional*, *41*(spe), e235094. https://www.scielo.br/j/pope/a/VBqk9xq8dkyH8zDCfpsRkrG/?lang=en

[19] Andrade, P. R. de L. (2021). *Optimization of the production process in an automotive spring industry*. https://repositorio.unesp.br/items/7d8d6d28-a8d3-4570-8561-f6b511e1e74c

[20] Viegas, J. L., Vieira, S. M., Henriques, E. M. P., & Sousa, J. M. C. (2016). Heuristics for three-dimensional steel cutting with usable leftovers considering large time periods. *European journal of industrial engineering*, *10*(4), 431–454. https://doi.org/10.1504/EJIE.2016.078141

[21] Suliman, S. M. A. (2012). *An algorithm for solving lot sizing and cutting stock problem within aluminum fabrication industry* [presentation]. Proceedings of the 2012 international conference on industrial engineering and operations management (pp. 783–793). https://ieomsociety.org/ieom2012/pdfs/194.pdf

[22] Vanzela, M., Melega, G. M., Rangel, S., & de Araujo, S. A. (2017). The integrated lot sizing and cutting stock problem with saw cycle constraints applied to furniture production. *Computers & operations research*, *79*, 148–160. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.10.015

[23] Wu, T., Akartunalı, K., Jans, R., & Liang, Z. (2017). Progressive selection method for the coupled lot-sizing and cutting-stock problem. *INFORMS journal on computing*, *29*(3), 523–543. https://doi.org/10.1287/ijoc.2017.0746

[24] Gramani, M. C. N., França, P. M., & Arenales, M. N. (2009). A Lagrangian relaxation approach to a coupled lot-sizing and cutting stock problem. *International journal of production economics*, *119*(2), 219–227. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.02.011

[25] Gramani, M. C. N., França, P. M., & Arenales, M. N. (2011). A linear optimization approach to the combined production planning model. *Journal of the franklin institute*, *348*(7), 1523–1536. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2010.05.010

[26] Alem, D. J., & Morabito, R. (2012). Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers & operations research*, *39*(2), 139–150. https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.02.022

[27] Alem, D., & Morabito, R. (2013). Risk-averse two-stage stochastic programs in furniture plants. *OR spectrum*, *35*(4), 773–806. https://doi.org/10.1007/s00291-012-0312-5

[28] Christofoletti, M. M., de Araujo, S. A., & Cherri, A. C. (2021). Integrated lot-sizing and cutting stock problem applied to the mattress industry. *Journal of the operational research society*, *72*(6), 1279–1293. https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1718013

[29] Ayres, A. O. C., Campello, B. S. C., Oliveira, W. A., & Ghidini, C. T. L. S. (2021). A Bi-Integrated Model for coupling lot-sizing and cutting-stock problems. *OR spectrum*, *43*(4), 1047–1076. https://doi.org/10.1007/s00291-021-00647-8

[30] Melega, G. M., de Araujo, S. A., & Morabito, R. (2020). Mathematical model and solution approaches for integrated lot-sizing, scheduling and cutting stock problems. *Annals of operations research*, *295*(2), 695–736. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03764-9

[31] Melega, G. M., de Araujo, S. A., Jans, R., & Morabito, R. (2023). Formulations and exact solution approaches for a coupled bin-packing and lot-sizing problem with sequence-dependent setups. *Flexible services and manufacturing journal*, *35*(4), 1276–1312. https://doi.org/10.1007/s10696-022-09464-9

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[32] Silva, E. M., Melega, G. M., Akartunalı, K., & de Araujo, S. A. (2023). Formulations and theoretical analysis of the one-dimensional multi-period cutting stock problem with setup cost. *European journal of operational research*, *304*(2), 443–460. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.04.023

[33] de Lara Andrade, P. R., de Araujo, S. A., Cherri, A. C., & Lemos, F. K. (2021). The integrated lot sizing and cutting stock problem in an automotive spring factory. *Applied mathematical modelling*, *91*, 1023–1036. https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.033

[34] Campello, B. S. C., Ghidini, C. T. L. S., Ayres, Ao., & Oliveira, W. A. (2022). A residual recombination heuristic for one-dimensional cutting stock problems. *Top*, *30*(1), 194–220. https://doi.org/10.1007/s11750-021-00611-3

Archive of SID.ir