



Designing an integrated model for innovative goods order fulfillment in a assemble-to-order system considering uncertainty in demand

Sasan Taslimi¹ , Babak Javadi²   and Niloofar Abdolmaleki³ 

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran. E-mail: s_taslimi@alumini.ut.ac.ir
2. Corresponding author, department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran. E-mail: babakjavadi@ut.ac.ir
3. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran. E-mail: niloofarabdolmaleki75@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 2024 February 9
Received in revised form 2023
December 31
Accepted 2024 March 10
Published online 2024 March 15

Keywords:

order fulfillment, assemble to order,
innovative goods, robust
optimization, flexible
manufacturing processes.

ABSTRACT

In this research, the production of innovative goods that have uncertain demand is considered in an order-based assembly system with several products and in several periods. In this environment, which is taken from one of the manufacturers of automation products and precision instruments, production processes are divided into three categories: inflexible, flexible and final assembly. Inflexible and final assembly processes must be carried out within the organization to maintain technical knowledge and guarantee quality; But the other category is flexible processes, which are usually outsourced in order to speed up the delivery of orders and increase production capacity, but if there is excess capacity, they can be carried out inside the company at the same time as inflexible processes. Therefore, to maximize profit and ensure the fulfillment of orders, we propose an integrated model that takes into account the production conditions and limitations, at the same time the decisions of rejecting/accepting the order, production planning and scheduling are taken into account, and a robust optimization approach is used to deal with uncertainty. Then we linearize the proposed model and after solving it in small and medium dimensions and various levels of uncertainty with optimization software, while analyzing the answers, we show the efficiency of the model along with the advantage of flexibility in production processes.

Cite this article: Taslimi, S. Javadi, B. and Abdolmaleki, N. (2023). Designing an integrated model for innovative goods order fulfillment in a assemble-to-order system considering uncertainty in demand. *Engineering Management and Soft Computing*, 9 (2). 19-34. DOI: <https://doi.org/>



© The Author(s)
DOI: <https://doi.org/>

Publisher: University of Qom

طراحی مدل یکپارچه برای برآورده‌سازی سفارشات کالاهای نوآورانه در سیستم مونتاز بر مبنای سفارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا

ساسان تسلیمی^۱، بابک جوادی^۲ و نیلوفر عبدالملکی^۳

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده‌گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: s_taslimi@alumini.ut.ac.ir
۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده‌گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: babakjavadi@ut.ac.ir
۳. کارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده‌گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: mohammad.abdali@ut.ac.ir

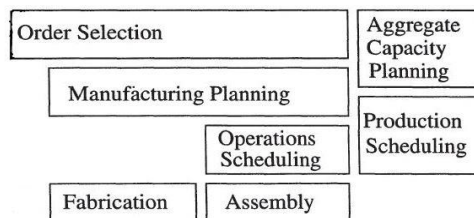
اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش تولید کالاهای نوآورانه که تقاضای نامعینی دارند، در یک سیستم مونتاز بر مبنای سفارش با چند محصول و در چندین دوره در نظر گرفته می‌شود. در این محیط که برگرفته از یکی از تولیدکنندگان محصولات اتوماسیون و ابزار دقیق می‌باشد، فرآیندهای تولید به سه دسته‌ی غیرمنعطف، منعطف و مونتاز نهایی تقسیم می‌شوند. فرآیندهای غیرمنعطف و مونتاز نهایی برای حفظ دانش فنی و تضمین کیفیت بایستی درون سازمان انجام شوند؛ اما دسته‌ی دیگر فرآیندهای منعطف هستند که به منظور تسریع در تحویل سفارشات و افزایش توان تولید، معمولاً برون‌سپاری می‌شوند، اما در صورت داشتن ظرفیت مازاد می‌توانند در داخل شرکت و هم‌زمان با فرآیندهای غیرمنعطف انجام گیرند. بنابراین برای بیشینه‌سازی سود و اطمینان از برآورده‌سازی سفارشات، مدل یکپارچه پیشنهاد می‌دهیم که با ملاحظه‌ی شرایط و محدودیت‌های تولید، هم‌زمان تصمیمات رد/پذیرش سفارش، برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را در نظر گرفته و برای مقابله با عدم قطعیت، رویکرد بهینه‌سازی استوار به کار گرفته می‌شود. سپس مدل پیشنهادی را خطی‌سازی کرده و پس از حل آن در ابعاد کوچک و متوسط و سطوح گوناگون عدم قطعیت با نرم‌افزار بهینه‌سازی، ضمن تحلیل پاسخ‌ها کارایی مدل به همراه مزیت وجود انعطاف در فرآیندهای تولید را نشان می‌دهیم.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵	
کلیدواژه‌ها: برآورده‌سازی سفارشات، مونتاز بر مبنای سفارش، کالاهای نوآورانه، بهینه‌سازی استوار، فرآیندهای تولید منعطف.	

استناد: تسلیمی، ساسان؛ جوادی، بابک و عبدالملکی، نیلوفر. (۱۴۰۲). «طراحی مدل یکپارچه برای برآورده‌سازی سفارشات کالاهای نوآورانه در سیستم مونتاز بر مبنای سفارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا». *مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، دوره ۹ (۲). صص: ۳۴-۱۹. <https://doi.org/>



۱) مقدمه

علاقه مشتریان به محصولات سفارشی و متنوع با کیفیت بالا، قیمت و مدت زمان تحویل اندک، در کنار تغییرات سریع تکنولوژی و نامعینی تقاضا در بازار کنونی سبب فراگیری استراتژی تولید مونتاژ بر مبنای سفارش^{۲۰} (ATO) شده است که در آن یک نقطه نفوذ سفارش مشتری^{۲۱} (CODP) برای هر محصول تعیین و اجزای سازنده قبل از آن نقطه بر اساس استراتژی انبار محور تولید و در انبار ذخیره می شوند؛ اما ساخت یا خرید قطعات سازنده پس از CODP و مونتاژ نهایی، بر اساس خط مشی ساخت بر مبنای سفارش تا زمان رسیدن سفارش مشتری و بر اساس گزینش وی به تأخیر انداخته می شود. بنابراین اگرچه ارزش مالی و حجم نگهداری موجودی تولید کننده اندک می باشد، اما می تواند تنوع زیادی از محصولات را با سرعت تحویل بالا عرضه کند. بنابراین؛ این استراتژی برای تولید کنندگان محصولات دارای فناوری بالا، که محصولات نهایی آن ها تقاضای نامعین و فراری را تجربه می کنند، بسیار گسترش یافته و با موفقیت پیاده سازی شده است. علاوه بر این امروزه برای کاهش ریسک از بین رفتن سرمایه گذاری اولیه، افزایش توان تولید، تسریع در تحویل و افزایش کیفیت، بنگاه های تولیدی با بهره گیری از ظرفیت های بیرونی کسب و کار خود را با سرمایه گذاری کم راه اندازی می کنند. آن ها با تمرکز بر فعالیت های اصلی سودآور، عملیات تولیدی کم اهمیت تر را به شرکت های هم پیمان دارای مزیت رقابتی برون سپاری می کنند. به علاوه برای بهره برداری مؤثر از ظرفیت، بایستی هم زمان طرز پردازش آن ها را نیز لحاظ نماید و در مدت زمان کوتاهی پس از سفارش گذاری خریداران، درباره پذیرش یا رد سفارش و نیز موعد تحویل آن اطلاعات دقیق و قابل اطمینانی به مشتری ارائه داده و درباره یک بازه زمانی تحویل و یک ضرب العجل با یکدیگر توافق کنند که عدم رعایت آن می تواند سبب کاهش درآمد و در نهایت از دست دادن مشتریان و تأثیر منفی بر تقاضای آینده تولید کننده شود. در چنین سیستم هایی علاوه بر زمان بندی کلان تولید^{۲۲} (MPS) به زمان بندی مونتاژ نهایی^{۲۳} (FAS) هم نیاز می باشد. چرا که پس از رد و پذیرش سفارش ها، بایستی یک برنامه برای تأمین و زمان بندی تولید برقرار شود تا اجرای مراحل مختلف تولید و مواعدهای تحویل را تضمین کند. چون در واقعیت این تصمیمات بسیار به یکدیگر مرتبط و تأثیر گذار هستند، برای پیاده سازی کارآمد آن ها و نیز پرهیز از رسیدن به یک پاسخ بهینه محلی، به یکپارچه سازی فرآیندهای برآورده سازی سفارش نیاز هست تا بنگاه میزان مواد خام در دسترس، ظرفیت درون سازمان و سرتاسر زنجیره تأمین به همراه سایر الزامات برای یک سفارش ویژه را با دقت محاسبه کند و به خواسته های مشتریان پاسخ مناسب دهد. بنابراین؛ رویکردی یکپارچه ارائه دادیم که هم زمان تصمیمات برنامه ریزی تولید، زمان بندی و پذیرش سفارش را برای برآورده سازی سفارشات سیستم تولید مونتاژ بر مبنای سفارش در نظر گرفته و به وضوح زمان پردازش و مواعدهای تحویل آن ها را لحاظ می کند.



شکل ۱. شمایی از حوزه کاری این پژوهش

²⁰ Assemble To Order (ATO)

²¹ Customer Order Decoupling Point (CODP)

²² Master Production Scheduling (MPS)

²³ Final Assembly Scheduling (FAS)

۲) پیشینه پژوهش

تحقیقات انجام گرفته در زمینه ATO طیف وسیعی از موضوعات را دربرمی‌گیرند. در این باره، سانگ و زیپکین [1] خلاصه‌ای از پژوهش‌های مربوط به عملیات زنجیره‌های تأمین در محیط‌های برخوردار از این استراتژی تولید، تهیه و آن‌ها را به چهار دسته کلی تقسیم و موضوعات مدل‌سازی، روش‌های تجزیه و تحلیل و برخی مفاهیم مدیریتی بدست آمده از این پژوهش‌ها را مرور کردند. اما علی‌رغم اهمیت انسجام تصمیمات برآورده‌سازی سفارش، تاکنون در پژوهش‌های انجام شده، این تصمیمات جداگانه بررسی شده‌اند. در نخستین تلاش‌های یکپارچه‌سازی تصمیمات سیستم‌های ATO کرن و گوئرو [2] برای فرآیند مدیریت تقاضا یک مدل ریاضی فراهم کردند که با تمرکز بر تصمیمات کوتاه‌مدت، یعنی رد یا پذیرش و زمانبندی پردازش سفارشات، امکان بهره‌برداری مناسب از ظرفیت برای برآورده کردن سفارشات داشت. سان و همکاران [3] برای پیشینه‌سازی احتمال پذیرش سفارشات، یک مدل برنامه‌ریزی اتفاقی-وابسته احتمالی^{۲۴} بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل سازوکار مؤثر نامعینی و رویکرد تخصیص موجودی (ظرفیت) قابل تعهد^{۲۵} (ATP/CTP) را ایجاد کردند که منابع دردسترس را نامعین در نظر گرفته، و یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی^{۲۶} (HGA) را برای حل مدل برنامه‌ریزی احتمالی ایجاد کردند. چن و دانگ [4] یک مدل جدید تخصیص سفارش میزان محصول قابل تعهد تشکیل شده از دو مرحله را ارائه دادند که اولویت مشتری را در یک زنجیره تأمین ATO قبل از آن که سفارش برآورده شود در نظر گرفته و ابتدا یک مدل از پیش تخصیص داده شده برای هر دسته مشتری پیشنهاد می‌شود، سپس مدل‌های برآورده‌سازی سفارش دسته‌ای و بلادرنگ فرمول‌بندی می‌شوند و چنانچه اجزا و ظرفیت تولید کافی نباشد، قوانین جست‌وجو در چهار بعد زمان، اولویت مشتری، محصول و حوزه‌ی فروش توسعه داده می‌شوند. گوهلیچ و همکاران [5] برای پیشینه‌سازی سود تولیدکننده در سیستم تولیدی مونتاژ بر مبنای سفارش با تقاضای احتمالی، تصمیمات مدیریت درآمد همراه با پذیرش سفارش، موعد تحویل و زمانبندی را در شرایط وجود محدودیت ظرفیت مونتاژ و دسترسی به مواد واسطه به‌طور یکپارچه با هم در نظر گرفته و این مسئله را به شکل یک برنامه‌ریزی پویای احتمالی مدل کردند. همچنین در این سال‌ها جریان دیگر پژوهش‌های مرتبط که به برنامه‌ریزی و کنترل تولید و موجودی می‌پردازند، توسط بن جعفر و الحفصی [6]، الحفصی [7] و چنگ و همکاران [8] توسعه داده شد. در این مدل‌ها یک مسئله انتخاب سفارش و تصمیم‌گیری درباره زمان تولید محصولات میانی با زمان تولید احتمالی و دسته‌های مختلف مشتری با هزینه‌های متفاوت فروش از دست رفته وجود داشت در حالی که در امکان سفارشات پس‌افت نمی‌باشد. البته برخلاف مدل کنونی به تعیین موعد تحویل نمی‌پردازند. به علاوه زمان مونتاژ نهایی ناچیز فرض شده و به همین علت، ظرفیت مونتاژ مدل نمی‌شود. ژن و وانگ [9] برای دوباره‌پرسازی در سازمان‌های تولیدی ATO که با تقاضای احتمالی برای چندین محصول دارای چندین جزء در یک دوره روبرو می‌شود، گزینه‌ی برون‌سپاری را با وجود تخصیص اجزا به تولید محصولات مختلف و کاهش قیمت محصولات با توجه به قیمت، در نظر گرفتند. طاهر احمدی و همکاران [10] به بررسی استراتژی پیش سفارش با زمان تعهدی تحویل^{۲۷} در سیستم تولیدی مونتاژ بر مبنای سفارش پرداختند و مقادیر بهینه موجودی پایه و طول زمان تعهدی تحویل تعیین گردید، نتایج نشان می‌دهد در صورتیکه زمان تعهدی تحویل برابر صفر باشد استراتژی پیش سفارش برای مشتری سودمند نخواهد بود. هوانگ و همکاران [11] در مطالعه خود به بررسی مشکل کنترل موجودی در یک سیستم ATO که در آن یک جزء مشترک و دو جزء فسادپذیر موجود است پرداختند و استراتژی بهینه سفارش‌دهی اجزای به کار رفته تعیین گردیده است، همچنین در این مسئله رویکرد برنامه‌ریزی پویا جهت پرداختن به مسئله‌ی چنددوره‌ای با توجه به طول عمر اجزای فسادپذیر و هزینه‌های مرتبط با آن ارائه گردیده است. جین و

²⁴ Stochastic Dependnt-Chance

²⁵ Available To Promise/ Capable To Promise (ATP/CTP)

²⁶ Hybrid Genetic Algorithm (HGA)

²⁷ Commitment Lead Time

وانگ [12] به تحلیل عملکرد سیستم‌های ATO چند محصولی و چند جزئی با تقاضای غیر ثابت و زمان تحویل تصادفی پرداختند و به منظور مدیریت موجودی از قوانین موجودی پایه مستقل²⁸ (IBS) و الگوریتم خدمت به ترتیب ورود²⁹ (FCFS) استفاده شده که در این سیستم‌ها به منظور تعیین سیاست‌های بهینه کنترل موجودی لازم است ابتدا رابطه بین معیارهای عملکرد سیستم نظیر نرخ سفارش و نقطه سفارش مجدد تعیین گردد. ریمان و همکاران [13] به منظور حداقل سازی میانگین بلندمدت کل موجودی در سیستم‌های تولیدی مونتاژ بر مبنای سفارش، یک سیاست مجانبی چهارمرحله‌ای را توسعه دادند، در مقاله‌ی ارائه شده رویکرد استفاده شده جهت مدل‌سازی و تعیین حد پایین هزینه‌های موجودی و مقادیر متغیرهای تصمیم رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای می‌باشد.

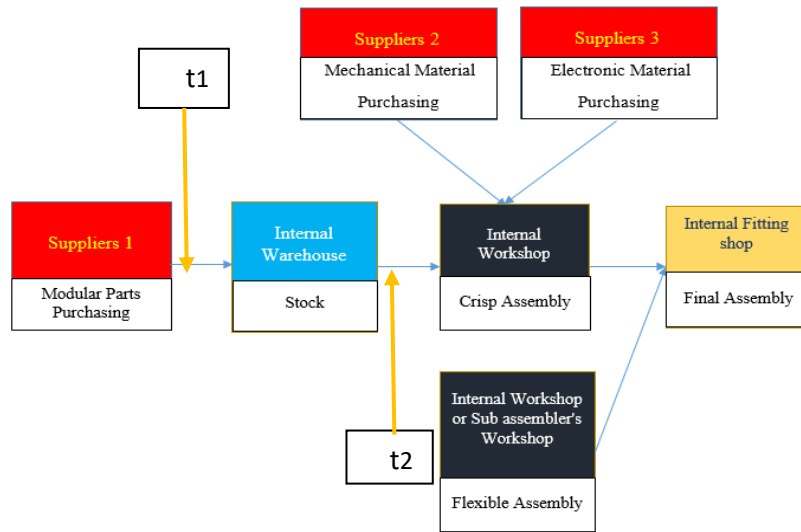
۳) تعریف مسئله

در این سیستم که برگرفته از یکی از تولیدکنندگان محصولات اتوماسیون و ابزار دقیق می‌باشد، همگی محصولات زیرمونتازهای ماژولار و سیاهه مواد³⁰ (BOM) متغیر، بر اساس انتخاب درجه کیفی مشتری دارند و فرآیندهای تولید آنها در سه دسته‌ی غیر منعطف، منعطف و مونتاژ نهایی قرار می‌گیرند. فرآیندهای غیر منعطف و مونتاژ نهایی برای حفظ دانش فنی و تضمین کیفیت بایستی درون سازمان انجام شوند؛ اما دسته‌ی دیگر فرآیندهای منعطف هستند که به منظور تسریع در تحویل سفارشات و افزایش توان تولید، معمولاً برون‌سپاری می‌شوند، اما در صورت داشتن ظرفیت مازاد می‌توانند در داخل شرکت و هم‌زمان با فرآیندهای غیر منعطف انجام گیرند. ضمن این که به خاطر حفظ یکپارچگی، هر سفارش یا به‌طور کامل برون‌سپاری و یا به‌طور کامل در داخل تولید می‌شود. همچنین برای انجام فرآیندهای تولید، دو دسته نیروی انسانی به تعداد ثابت وجود دارند. دسته اول نیروهای تک‌مهارته هستند که فقط می‌توانند فرآیندهای غیر منعطف و مونتاژ نهایی را انجام دهند و دیگری نیروهای چندمهارته هستند که علاوه بر فرآیندهای غیر منعطف و مونتاژ نهایی، فرآیندهای منعطف را نیز انجام می‌دهند. به گونه‌ای که اگر فرآیندهای منعطف برون‌سپاری شوند، آنگاه نیروهای چند مهارته برای انجام فرآیندهای غیر منعطف به کمک نیروهای تک‌مهارته آمده و در نتیجه مدت‌زمان انجام این فرآیند کاهش و هزینه انجام آن افزایش خواهد یافت. ولی چنانچه اجرای فرآیندهای مونتاژ منعطف به نیروهای چندمهارته واگذار شود، به‌طور طبیعی نیروهای تک‌مهارته در مدت‌زمان بیشتری این کار را انجام داده و در عوض هزینه فرآیندهای غیر منعطف کاهش خواهد یافت. و در پایان مونتاژ نهایی به‌طور مشترک توسط هر دو دسته انجام می‌گیرد. در این محیط انواع قطعات ماژولار، الکترونیکی و قطعات مکانیکی که نیاز به سرمایه اولیه زیادی دارند و برون‌سپاری آنها مخالف استراتژی سازمان نیست، همواره خریداری می‌شوند. اگرچه هر کدام از این قطعات می‌توانند چندین قلم اجزای سازنده را دربرگیرند، اما چون مدت‌زمان دریافت تمام این چند قلم یکسان می‌باشد، باهم در یک زمان سفارش داده می‌شوند؛ بنابراین زمان‌های صدور سفارش آنها متغیر تصمیم نیستند و هزینه سفارش‌دهی نیز در هزینه خرید ادغام شده‌است. در هر دوره تصمیم‌گیری، با فرض امکان پردازش هم‌زمان سفارشات و بر اساس اطلاعات دریافتی تا لحظه t1 که حدود سفارشات به‌طور تقریبی مشخص شده‌اند؛ انواع قطعات ماژولار سفارش‌گذاری می‌شوند. زیرا به دلیل محدودیت در سرعت دریافت این قطعات، امکان تأخیر در سفارش‌دهی آنها وجود ندارد. سپس در لحظه t2، مقدار قطعی سفارشات مشخص شده و چون امکان برآورده‌سازی سفارشات به‌طور جزئی وجود ندارد، هر یک از آنها به‌طور کامل پذیرفته یا رد شده، زمان‌بندی پردازش آنها تعیین گشته و دیگر قطعات لازم سفارش داده می‌شوند. بنابراین برخلاف قطعات الکترونیکی و مکانیکی، ممکن است مقدار سفارش قطعات ماژولار با مقدار مورد نیاز اختلاف داشته باشد. پس در هر دوره هیچ‌یک از فرآیندهای تولید زودتر از ابتدای دوره آغاز نمی‌شوند، چراکه قطعات مورد نیاز آنها در دسترس نیستند و موجودی کالای نهایی و پیرو آن، هزینه نگهداری و فروش اسقاط نداریم و نگهداری موجودی کمتر از یک دوره بدون هزینه فرض می‌شود.

²⁸ Independent Base Stock (IBS)

²⁹ First Come First Serve (FCFS)

³⁰ Bill Of Material (BOM)



شکل ۲. نمایش زنجیره تولید مسئله تعریف شده

بنابراین؛ برای مدل‌سازی این مسئله اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها به شرح زیر تعریف می‌شوند:

اندیس‌ها:

شماره سفارش محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : i, j

نوع محصول: n, n'

مدل نهایی محصول و درجه کیفی آن: g, g'

دوره تصمیم‌گیری: t

تأمین کنندگان قطعات مدولار: $S1$

تأمین کنندگان قطعات الکترونیکی: $S2$

تأمین کنندگان قطعات مکانیکی: $S3$

تأمین کنندگان فرآیندهای منعطف: $S4$

ثابت‌ها:

طول دوره: T

ثابت p : سطح نامعینی سیگنال سفارشات که عددی در بازه $[0,1]$ است.

پارامترهای سفارش‌دهی:

تعداد سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : Q_{ingt}

قیمت فروش محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : π_{ngt}

$[D1_{ingt}, D2_{ingt}]$: بازه مناسب تحویل سفارش i برای محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t که مورد توافق مشتری و

تولیدکننده می‌باشد.

$[D2_{ingt}, D3_{ingt}]$: بازه تحویل سفارش i برای محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t که با کاهش سود همراه است و

امکان تحویل سفارش پس از این بازه وجود ندارد.

پارامترهای مربوط به هزینه:

هزینه خرید قطعات ماژولار محصول نوع n از تأمین‌کننده $S1$ در دوره t : CM_{ntS1}

هزینه خرید قطعات الکترونیکی محصول نوع n با درجه کیفی g از تأمین‌کننده $S2$ در دوره t : CEP_{ngtS2}

هزینه خرید قطعات مکانیکی محصول نوع n با درجه کیفی g از تأمین کننده S3 در دوره t: CMP_{ngtS3}

هزینه نگهداری قطعات ماژولار محصول نوع n در دوره t: CHM_{nt}

هزینه فروش از دست رفته محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: CLS_{ngt}

هزینه انجام فرآیندهای خشک محصول نوع n با درجه کیفی g بدون کمک نیروهای چندمهارته در دوره t: $CCAS_{ngt}$

هزینه انجام فرآیندهای خشک محصول نوع n با درجه کیفی g با کمک نیروهای چندمهارته در دوره t: $CCAM_{ngt}$

هزینه تولید داخلی فرآیندهای منعطف محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $CIFA_{ngt}$

هزینه برون سپاری فرآیندهای منعطف محصول نوع n با درجه کیفی g از تأمین کننده S4 در دوره t: $COFA_{ngtS4}$

هزینه مونتاژ نهایی محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: CFA_{ngt}

هزینه کمبود پس اافت محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: Cbo_{ngt}

هزینه بیکاری منابع و تجهیزات داخلی در دوره t بر حسب روز: CIR_t

هزینه بیکاری نیروی انسانی تک مهارته بر حسب روز: $CISS_t$

هزینه بیکاری نیروی انسانی چندمهارته بر حسب روز: $CIMS_t$

پارامترهای مربوط به ظرفیت:

ظرفیت در دسترس نیروی انسانی چندمهارته در دوره t: $MSCap_t$

ظرفیت در دسترس نیروی انسانی تک مهارته در دوره t: $SSCap_t$

ظرفیت تأمین قطعات مدولار محصول نوع n در دوره t توسط تأمین کننده S1: $MCap_{ntS1}$

ظرفیت تأمین قطعات الکترونیکی محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t توسط تأمین کننده S2: $EPCap_{ngtS4}$

ظرفیت تأمین قطعات مکانیکی محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t توسط تأمین کننده S3: $MPCap_{ngtS3}$

ظرفیت در دسترس داخلی برای تولید کل سفارشات در دوره t: $ICap_t$

ضریب مصرف ظرفیت فرآیندهای مونتاژ خشک محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $CVCA_{ngt}$

ضریب مصرف ظرفیت فرآیندهای مونتاژ نهایی محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $CVFA_{ngt}$

ضریب مصرف ظرفیت داخلی فرآیندهای مونتاژ منعطف برای تولید محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $CVIFA_{ngt}$

ظرفیت در دسترس خارجی برای تولید فرآیندهای منعطف محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t به وسیله تأمین کننده S4: $ECap_{ngtS4}$

پارامترهای مربوط به مدت زمان انجام فرآیندهای مختلف:

مدت زمان مونتاژ خشک در کارگاه داخلی برای محصول نوع n با درجه کیفی g توسط نیروهای چندمهارته یا تک مهارته در دوره t: $PTCAS_{ngt}$

مدت زمان مونتاژ خشک محصول نوع n با درجه کیفی g توسط نیروهای چندمهارته و تک مهارته در کارگاه داخلی در دوره t: $PTCAM_{ngt}$

مدت زمان مونتاژ منعطف در کارگاه داخلی برای محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $PTIFA_{ngt}$

مدت مونتاژ منعطف توسط مونتاژ کننده جانبی S4 برای محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $PTOFA_{ngtS4}$

مدت زمان مونتاژ نهایی در کارگاه داخلی برای محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t: $PTFA_{ngt}$

متغیرهای تصمیم:

اگر سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t پذیرفته شود، $X_{ingt} = 1$ و گرنه صفر

مقدار برون سپاری قطعات ماژولار محصول نوع n در دوره t به تأمین کننده S1: QM_{ntS1}

تعداد خرید قطعات الکترونیکی محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t از تأمین کننده S2: QEP_{ngtS2}

تعداد خرید قطعات مکانیکی محصول نوع n با درجه کیفی g از در دوره t تأمین کننده $S3$: QMP_{ngtS3} موجودی پایان دوره قطعات ماژولار محصول نوع n در دوره t : $IQM_{nt,t}$

اگر فرآیندهای معطف سفارش i محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t در داخل انجام شود، $QIFA_{ingt}=1$ وگرنه صفر

اگر فرآیندهای معطف سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t توسط تأمین کننده $S4$ انجام شود، $QOFA_{ingtS4}=1$ وگرنه صفر

مقدار فروش ازدست رفته سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : LS_{ingt}

اگر فرآیند معطف سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t برون‌سپاری شود، $W_{ingt}=1$ وگرنه صفر

زمان آغاز تولید فرآیند مونتاژ خشک سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t و در کارگاه داخلی: RCA_{ingt}

زمان آغاز تولید فرآیند مونتاژ معطف سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t و در کارگاه داخلی: $RIFA_{ingt}$

زمان صدور سفارش تولید فرآیند مونتاژ معطف سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t به مونتاژکننده فرعی: $ROFA_{ingt}$

زمان آغاز فرآیند مونتاژ نهایی سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در کارگاه داخلی در دوره t : RFA_{ingt}

زمان تکمیل سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : Ct_{ingt}

مدت زمان تأخیر در تحویل سفارش i از محصول نوع n با درجه کیفی g در دوره t : Ut_{ingt}

مقدار ظرفیت باقی مانده منابع و تجهیزات داخل کارگاه شرکت که در دوره t استفاده نشده است: $RICap_t$

مقدار ظرفیت باقی مانده نیروی انسانی تک‌مهارة که در دوره t استفاده نشده است: $RSSCap_t$

مقدار ظرفیت باقی مانده نیروی انسانی چندمهارة که در دوره t استفاده نشده است: $RMSCap_t$

۴) تابع هدف و محدودیت‌ها

در این بخش با به کارگیری اندیس‌ها، ثابت‌ها، پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مدل‌سازی مورد نیاز برای بیشینه‌سازی سود انجام می‌شود و تساوی‌ها و نامساوی‌های مختلف در تابع هدف و محدودیت‌ها به ترتیب معرفی می‌شوند.

$$Max Z = \sum_i \sum_n \sum_g \sum_t \Pi_{ingt} \times Q_{ingt} \times X_{ingt} \quad \text{رابطه (۱.۱)}$$

$$- \sum_i \sum_n \sum_g \sum_t Cbo_{ngt} \times ut_{ingt} \times Q_{ingt} \quad \text{رابطه (۲.۱)}$$

$$- \sum_n \sum_t \sum_{S1} CM_{ntS1} \times QM_{ntS1} \quad \text{رابطه (۳.۱)}$$

$$- \sum_t \sum_n CHM_{nt} \times IQM_{nt} \quad \text{رابطه (۴.۱)}$$

$$- \sum_n \sum_g \sum_t \sum_{S2} CEP_{ngtS2} \times QEP_{ngtS2} \quad \text{رابطه (۵.۱)}$$

$$- \sum_n \sum_g \sum_t \sum_{S3} CMP_{ngtS3} \times QMP_{ngtS3} \quad \text{رابطه (۶.۱)}$$

$$- \sum_i \sum_n \sum_g \sum_t CCAS_{ngt} \times Q_{ingt} \times X_{ingt} \times (1 - W_{ingt}) \quad \text{رابطه (۷.۱)}$$

$$- \sum_i \sum_n \sum_g \sum_t CCAM_{ngt} \times Q_{ingt} \times X_{ingt} \times W_{ingt} \quad \text{رابطه (۸.۱)}$$

$$- \sum_i \sum_n \sum_g \sum_t CIFA_{ngt} \times QIFA_{ingt} \quad \text{رابطه (۹.۱)}$$

$$- \sum_i \sum_n \sum_g \sum_{S4} \sum_t COFA_{ngtS4} \times QOFA_{ingtS4} \quad \text{رابطه (۱۰.۱)}$$

$$-\sum_i \sum_n \sum_g \sum_t CFA_{ngt} \times Q_{ingt} \times X_{ingt} \quad \text{رابطه ۱۱.۱}$$

$$-\sum_t (CIR_t \times RICap_t + CISS_t \times RSSCap_t) \quad \text{رابطه ۱۲.۱}$$

$$+CIMS_t \times RMSCap_t) \quad \text{رابطه ۱۳.۱}$$

$$-\sum_i \sum_n \sum_g \sum_t CLS_{ngt} \times LS_{ngt} \quad \text{رابطه ۱۴.۱}$$

در تابع هدف فوق برای بیشینه‌سازی سود، بخش اول مجموع درآمد، قسمت دوم هزینه کمبود پس‌افت، بخش‌های سوم، چهارم به ترتیب خرید قطعات ماژولار و نگهداری آنها را نشان داده و بخش پنجم و ششم هزینه خرید قطعات الکترونیکی و مکانیکی، قسمت‌های هفتم، هشتم، نهم، دهم و یازدهم هزینه فرآیندهای تولید پس از نقطه نفوذ سفارش هستند که به ترتیب عبارتند از فرآیند منعطف توسط نیروهای تک‌مهارته بدون کمک نیروهای چندمهارته و با کمک آنها، مونتاژ منعطف در داخل و خارج و مونتاژ نهایی، قسمت‌های دوازدهم، سیزدهم و چهاردهم به ترتیب هزینه‌های بیکاری و عدم‌استفاده منابع و تجهیزات داخلی و نیروی انسانی تک و چندمهارته بوده و آخرین بخش نیز هزینه فروش از دست‌رفته می‌باشد.

$$QM_{ntS1} \leq MCap_{ntS1} \quad \forall n, t, S1 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$QEP_{ngtS2} \leq EPCap_{ngtS2} \quad \forall n, g, t, S2 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$QMP_{ngtS3} \leq MPCap_{ngtS3} \quad \forall n, g, t, S3 \quad \text{رابطه ۴}$$

سه‌دسته محدودیت‌های فوق، مربوط به ظرفیت تأمین بر اساس میزان مواد و قطعات در دسترس هستند.

$$\sum_i \sum_g (Q_{ingt} \times X_{ingt} + \rho \times Q_{ingt}) \quad \forall n, t = 1 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\times X_{ingt}) \leq \sum_{S1} QM_{ntS1}$$

$$\sum_i \sum_g (Q_{ingt} \times X_{ingt} + \rho \times Q_{ingt}) \quad \forall n, t \geq 2 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\times X_{ingt}) \leq \sum_{S1} QM_{ntS1} + IQM_{n(t-1)}$$

حداقل مقدار سفارش قطعات ماژولار را مطابق اطلاعات دریافتی از مشتریان و میزان موجودی باقی‌مانده از دوره‌های گذشته، بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار نشان می‌دهند.

$$\sum_{S1} QM_{ntS1} - \sum_i \sum_g Q_{ingt} \times X_{ingt} \quad \forall n, t = 1 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$= IQM_{nt}$$

$$\sum_{S1} QM_{ntS1} + IQM_{n(t-1)} \quad \forall n, t \geq 2 \quad \text{رابطه ۸}$$

$$- \sum_i \sum_g Q_{ingt} \times X_{ingt} = IQM_{nt}$$

این دسته از محدودیت‌ها نیز مربوط به توازن تقاضا و میزان قطعات ماژولار بوده و مقدار موجودی قطعات ماژولار باقی‌مانده در پایان هر دوره را نشان می‌دهد.

$$\sum_i Q_{ingt} \times X_{ingt} = \sum_{S2} QEP_{ngtS2} \quad \forall n, g, t \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_i Q_{ingt} \times X_{ingt} = \sum_{S3} QMP_{ngtS3} \quad \forall n, g, t \quad \text{رابطه ۱۰}$$

محدودیت‌های بالا برای تنظیم میزان سفارش‌دهی قطعات ماژولار، الکترونیکی و مکانیکی بوده و بیان می‌کنند که تعداد قطعات الکترونیکی و مکانیکی سفارش داده‌شده در هر دوره برابر با تعداد کل سفارشات است که در آن دوره پذیرفته شده‌اند.

$$\sum_i Q_{ingt} - \sum_i Q_{ingt} \times X_{ingt} = LS_{ngt} \quad \forall n, g, t \quad \text{رابطه ۱۱}$$

محدودیت‌های دسته ۱۱ مربوط به توازن تقاضا بوده و براساس نوع، درجه کیفی و اندازه سفارش، میزان برآورده‌سازی سفارشات و کمبودها را مشخص می‌کند.

$$X_{ingt} = QIFA_{ingt} + \sum_{S4} QOFA_{ingtS4} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۲}$$

محدودیت‌های دسته‌ی ۱۲ باعث می‌شوند فرآیند منعطف هر سفارشی که تولیدش تعهد داده شده است، یا فقط در کارگاه داخلی و یا فقط در خارج از بنگاه توسط تأمین کنندگان انجام شود.

$$X_{ingt} \leq Q_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۳}$$

این دسته از محدودیت‌ها سبب می‌شوند که متغیر پذیرش سفارش فقط برای آن دسته از سفارشات که مقدار مثبت دارند، بتواند مقدار ۱ بگیرد تا توالی پذیرش سفارشات به درستی انجام شود.

$$RCA_{ingt} + X_{ingt} \times (1 - W_{ingt}) \times \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$PTCAS_{ngt} \times Q_{ingt} \leq RFA_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$RCA_{ingt} + X_{ingt} \times W_{ingt} \times \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$PTCAM_{ngt} \times Q_{ingt} \leq RFA_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$RIFA_{ingt} + (1 - W_{ingt}) \times PTIFA_{ngt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\times Q_{ingt} \leq (1 - W_{ingt}) \times RFA_{ingt} \quad \forall i, n, g, t, S4 \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$ROFA_{ingt} + W_{ingt} \times PTOFA_{ngtS4} \quad \forall i, n, g, t, S4 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$\times Q_{ingt} \leq W_{ingt} \times RFA_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۲۱}$$

چهار دسته محدودیت بالا تضمین می‌کنند که زمان مونتاژ نهایی تمام سفارشات پذیرفته‌شده، پس از اتمام فرآیندهای پیش‌نیازشان باشد. همچنین با توجه به انجام یا عدم انجام برون‌سپاری، RIFA_{ingt} و ROFA_{ingt} مقادیر مناسب را بگیرند.

$$W_{ingt} = \sum_{S4} QOFA_{ingtS4} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۸}$$

محدودیت‌های دسته ۱۸ با مقداردهی به متغیر W_{ing}، تصمیمات برنامه‌ریزی تولید و زمانبندی انجام سفارشات پذیرفته‌شده را یکپارچه می‌کنند. یعنی براساس این که تصمیم بر برون‌سپاری فرآیند منعطف و یا انجام آن در داخل باشد، محدودیت متناظر فعال شده و زمانبندی متناسب با آن نیز انجام خواهد شد.

$$RFA_{ingt} \leq (D3_{ingt} - PTFA_{ngt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\times Q_{ingt}) \times X_{ingt}$$

محدودیت‌های دسته ۱۹ با محدود کردن زمان شروع فرآیند مونتاژ نهایی سفارش پذیرفته شده علاوه بر اینکه باعث می‌شوند سفارشات بعد از زمان D3 تکمیل نشوند، زمان آغاز مونتاژ نهایی و به تبع آن زمان شروع سایر فعالیت‌های سفارشات که رد شده‌اند را نیز صفر می‌کنند تا مدل واقعی تر شود.

$$\begin{aligned} RFA_{ingt} + PTFA_{ngt} \times Q_{ingt} \\ \times X_{ingt} = CT_{ingt} \end{aligned} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۲۰}$$

محدودیت‌های دسته ۲۰ زمان پایان یک سفارش را مشخص می‌کنند.

$$\begin{aligned} X_{ingt} \times D1_{ingt} \leq RFA_{ingt} \\ + PTFA_{ngt} \times Q_{ingt} \times X_{ingt} \end{aligned} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۲۱}$$

مجموعه محدودیت‌های ۲۱ اجازه نمی‌دهند که قبل از زمان D1_{ingt}، تولید محصول سفارش داده شده تکمیل شود.

$$Ct_{ingt} - D2_{ingt} \leq Ut_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$Ut_{ingt} \leq (D3_{ingt} - D2_{ingt}) \times X_{ingt} \quad \forall i, n, g, t \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_n \sum_g (Q_{ingt} \times X_{ingt} \times CVCA_{ngt} \\ + QIFA_{ingt} \times CVIFA_{ngt} \\ + Q_{ingt} \times X_{ingt} \times CVFA_{ngt}) \\ + RICap_i = ICap_i \end{aligned} \quad \forall t \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$\sum_i QOFA_{ingts4} \leq ECap_{ngts4} \quad \forall t, n, g, S4 \quad \text{رابطه ۲۵}$$

محدودیت‌های بالا تأخیر در تحویل سفارش را به گونه‌ای مشخص می‌کنند که سفارشات رد شده، تأخیر ندارند و تأخیر سفارشات پذیرفته شده هم هرگز بیش از اختلاف D2 و D3 نخواهد بود.

محدودیت‌های دسته ۲۴ و ۲۵ به ترتیب برای ظرفیت درونی تولیدکننده و ظرفیت مونتاژکنندگان جانبی هستند.

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_n \sum_g (Q_{ingt} \times X_{ingt} \times (1 - W_{ingt}) \times \\ PTCAS_{ngt} + Q_{ingt} \times X_{ingt} \times W_{ingt} \times \\ PTCAM_{ngt} + Q_{ingt} \times X_{ingt} \times PTFA_{ngt}) \\ + RSSCap_i = SSCap_i \end{aligned} \quad \forall t \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_n \sum_g (Q_{ingt} \times X_{ingt} \times (1 - W_{ingt}) \times \\ PTCAS_{ngt} + Q_{ingt} \times X_{ingt} \times W_{ingt} \times \\ PTCAM_{ngt} + Q_{ingt} \times X_{ingt} \times PTFA_{ngt}) \\ + RSSCap_i = SSCap_i \end{aligned} \quad \forall t \quad \text{رابطه ۲۷}$$

قیود ۲۶ و ۲۷ محدودیت‌های مدت‌زمان دسترسی به نیروی انسانی تک‌مهارته و چندمهارته هستند.

۵) روش حل

همچنان که مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی ترکیبی خطی و عدد صحیح بوده و نیاز به خطی‌سازی دارد. همچنین با توجه به این که مسئله مورد بررسی کاملاً جدید بوده و تا پیش از این نمونه مشابهی متوسط و تحلیل نتایج و پیامدهای آن، با

پیروی از قواعد رایج، داده‌های مورد نیاز با توزیع یکنواخت در بازه‌های مختلف، به طور تصادفی تولید شده و سپس حل خواهند شد. اطلاعات اندازه و ابعاد این مسائل در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول ۱. اندازه مسائل نمونه در ابعاد کوچک و متوسط

example	Indices							
	t	i	n	g	S1	S2	S3	S4
کوچک								
P1	2	4	2	2	2	2	2	2
P2	2	4	3	3	2	2	2	2
P3	3	5	4	3	2	2	2	2
P4	3	5	5	3	2	2	2	2
متوسط								
P5	3	5	8	4	3	3	3	3
P6	3	6	10	4	3	3	3	3

مسائل نمونه در شرایط قطعی و نیز سطوح مختلف عدم قطعیت، با یک کامپیوتر شخصی با مشخصات Intel Core(TM) i5 CPU 2.4 و دارای 4 GB RAM با به کارگیری نرم افزار بهینه سازی GAMS کدنویسی و توسط حل کننده CPLEX11 با روش دقیق شاخه و برش^{۳۱} (B&C) حل شد، چراکه تصمیم گیری در سطح تاکتیکی بوده و رسیدن به پاسخ بهینه حتی در صورت افزایش مدت زمان حل نیز، نسبت به روش‌های ابتکاری و فراابتکاری ارجحیت دارد. در هر یک از این مثال‌های نمونه چنانچه انحراف تقاضای واقعی محصولات از سیگنال‌های تقاضا اندک باشد، $p=0.1$ و در صورتی که میزان این انحراف بالا باشد، $p=0.3$ در نظر گرفته شده است. همچنین بدیهی است که در شرایط قطعیت $p=0$ می‌باشد. در این مثال‌ها هر دوره تصمیم گیری ۵۰ روز بوده و میزان ظرفیت داخلی در هر دوره ۱۸۰۰۰ و دسترسی به هر یک از نیروهای تک مهارته و چندمهارته در هر یک از این دوره‌ها برابر با ۶۰۰ نفر ساعت و هزینه فرصت از دست رفته برای منابع داخلی، نیروی انسانی تک و چندمهارته به ترتیب برابر با ۴، ۵ و ۷ تعریف شده است. در جدول زیر بازه توزیع احتمال دیگر پارامترها که دارای توزیع احتمال یکنواخت هستند، نشان داده شده است:

جدول ۲. معرفی بازه‌های تولید تصادفی پارامترها

Parameters	Values
π_{ngt}	~ uniform (525,610)
Q_{inet}	~ uniform (8,15)
$D1_{inet}$	~ uniform (0,5)
$D2_{inet}$	~ uniform (21,35)
$D3_{inet}$	~ uniform (45,50)
CM_{ntS1}	~ uniform (45,55)
CEP_{netS2}	~ uniform (11,15)
CMP_{netS3}	~ uniform (11,15)
CLS_{net}	~ uniform (8,11)
$CCAS_{net}$	~ uniform (8,11)
$CIFA_{net}$	~ uniform (6,9)
$CCAM_{net}$	$CCAS_{net} + CIFA_{net} - \sim$ uniform (1,3)
$COFA_{ngtS4}$	~ uniform (8,10)
CFA_{net}	~ uniform (6,9)
Cbo_{net}	~ uniform (1,3)
$MCAp_{ntS1}$	~ uniform (1050,1250)
$EPCap_{netS4}$	~ uniform (1200,1300)
$MPCap_{netS3}$	~ uniform (1200,1300)
$CVCA_{net}$	~ uniform (5,7)
$CVFA_{net}$	~ uniform (5,7)
$CVIFA_{net}$	~ uniform (5,7)
$ECap_{netS4}$	~ uniform (1000,1100)
$PTCAS_{net}$	~ uniform (0.23,0.27)
$PTCAM_{net}$	~ uniform (0.13,0.17)
$PTIFA_{net}$	~ uniform (0/11,0/15)

³¹ Branch & Cut (B&C)

جدول ۳. نتایج حل مثال‌های نمونه در شرایط قطعی

example	Certain condition	
	ρ=0	
	Time of execution	Optimum solution
P1	0/179 s	39490
P2	0/255 s	285981
P3	0/243 s	868136
P4	0/247 s	1134182
P5	5/468 s	2188408
P6	2/658 s	2231345

به این ترتیب داده‌های هر پارامتر برای مسائل نمونه تولید شده و نتایج حل برای حالت قطعی و سطوح مختلف عدم قطعیت به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نمایش داده شده است. در این جداول مدت‌زمان اجرا برحسب ثانیه و پاسخ بهینه می‌باشد که اعداد اعشاری بیش از سه رقم اعشار به پایین گرد شده‌اند. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که هم‌زمان با بزرگتر شدن ابعاد مسائل مدت‌زمان حل نیز افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که با تغییر ابعاد مسائل از اندازه‌های کوچک به متوسط به ناگاه مدت‌زمان حل چند برابر می‌شود و البته تابع هدف (سود کل) نیز کاملاً روند صعودی دارد. همچنین مطابق جدول (۴)، نتایج حل مثال‌ها در شرایط وجود نامعینی در مورد روند معیارهای مدت‌زمان حل و نیز سود کل، همچون حالت قطعی است. اما همچنان که مشخص است، با افزایش نامعینی برای هر یک از مثال‌ها مدت‌زمان حل افزایش و میزان سوددهی به دلیل اضافه‌شدن هزینه نگهداری قطعات ماژولار کاسته شده است.

جدول ۴. نتایج حل مسائل نمونه در سطوح عدم قطعیت پایین و بالا

example	Uncertain condition			
	ρ=0/1		ρ=0/3	
	Time of execution	Optimum solution	Time of execution	Optimum solution
P1	0/241 s	38057	0/298 s	35396
P2	0/301 s	282845	0/220 s	276686
P3	0/350 s	862438	0/416 s	851266
P4	0/493 s	1126909	0/606 s	1112844
P5	24/828 s	2175503	27/794 s	2150478
P6	6/829 s	2217786	35/916 s	2191442

در ادامه تأثیر عدم قطعیت بر معیارهای گوناگون را بررسی و اهمیت وجود انعطاف در فرآیندهای تولید را نشان خواهیم داد.

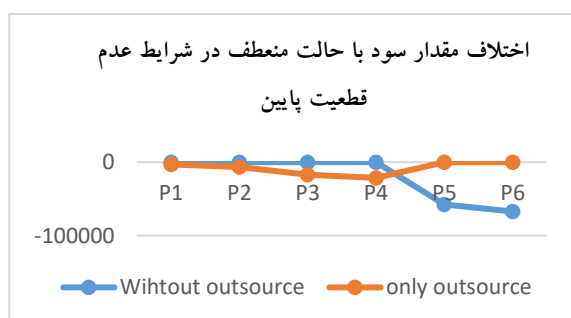
۶ تجزیه و تحلیل نتایج

برای سنجش حساسیت این مدل نسبت به نوسانات تقاضا هم‌زمان با تغییرات ظرفیت داخلی، مسئله P6 را برگزیده و در شرایط عدم قطعیت سیگنال تقاضای دریافتی برای محصولات نهایی در هنگام سفارش قطعات ماژولار، آن را در حالات وجود انحراف بالا و اندک از تقاضا حل کرده و تجزیه و تحلیل معیارهای سود کل، نسبت پذیرش سفارشات، نسبت فرآیندهای منعطف برون‌سپاری شده، نسبت بیکاری نیروی انسانی تک‌مهارته و چندمهارته و نیز عدم به‌کارگیری منابع داخلی را بررسی می‌کنیم که نتایج آن در جدول زیر ذکر شده‌اند. که در آن میزان انحراف سود برحسب درصد بر اساس عبارت (۲۸) محاسبه می‌گردد.

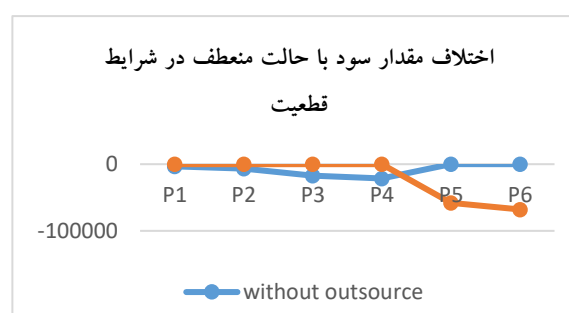
$$\frac{Z_{\text{Certain } y} - Z_{\text{Uncertain } y}}{Z_{\text{Certain } y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۲۸}$$

مطابق آنچه که در جدول (۵) دیده می‌شود، میزان انحراف سود برحسب درصد ذکر شده و برای دیگر معیارها، فقط اختلاف خالص آن‌ها با مقدار اسمی (شرایط قطعی) نشان‌دهنده شده است. در مجموع می‌توان گفت هیچ یک از معیارها در هیچ کدام از مقادیر ظرفیت منابع و تجهیزات داخلی و به‌ازای هیچ سطحی از نامعینی تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند.

به طوری که بیشترین میزان انحراف از مهمترین معیار یعنی سود کل برابر با ۱/۸۵٪، مربوط به شرایط نامعینی بالا در تقاضا و پایین ترین ظرفیت داخلی در دسترس می باشد که این مقدار نیز همزمان با افزوده شدن ظرفیت، با شیب بسیار اندکی، کمتر شده و به ۱/۷۴۶٪ می رسد. دقیقاً چنین روندی برای سطح اندک نامعینی، نیز با کاهش میزان انحراف سود کل از ۰/۶۳۲٪ به ۰/۵۸۸٪ نیز به خوبی دیده می شود. با توجه به این که سایر معیارها تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و حتی میزان انحراف به ازای تمام مقادیر ظرفیت و سطوح نامعینی برای نسبت برون سپاری کاملاً صفر و برای دیگر معیارها نیز متمایل به صفر می باشد، بایستی گفت که سهم عمده ای این انحراف اندک در سود کل نیز به خاطر تحمیل هزینه های نگهداری قطعات مازولار به سیستم می باشد. به گونه ای که همزمان با بالاتر رفتن سطح نامعینی از سود کل کاسته می شود. همچنین هر شش معیار مورد بررسی، در هر سه سطح نامعینی روند یکسانی دارند. به طوری که با افزایش ظرفیت منابع و تجهیزات داخلی سود کل و نسبت پذیرش سفارشات افزایش، نسبت بیکاری نیروی انسانی تک و چندمهارته کاهش و نسبت برون سپاری فرآیندهای منقطع به همراه نسبت عدم به کارگیری منابع داخلی تغییر محسوسی نخواهند داشت. به علاوه برای نمایش مزیت وجود انعطاف در فرآیندهای تولید، نتایج بدست آمده از حل شش مسئله نمونه را، با دو حالت مختلف که



شکل ۴. نمایش میزان اختلاف سود حالات فقط برون سپاری یا فقط تولید داخلی فرآیندهای منقطع با حالت وجود نیروی انسانی منقطع در شرایط عدم قطعیت پایین

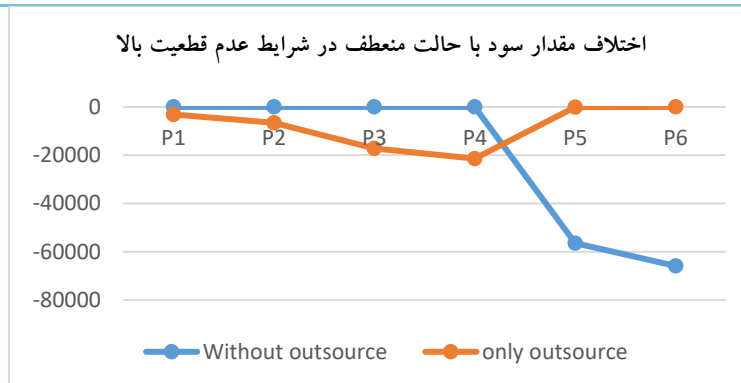


شکل ۳. نمایش میزان اختلاف سود حالات فقط برون سپاری یا فقط تولید داخلی فرآیندهای منقطع با حالت وجود نیروی انسانی منقطع در شرایط قطعیت

جدول ۵. مقدار بهینه شش معیار در شرایط قطعی، سطوح مختلف عدم قطعیت و اختلاف آن ها

معیار	Certain condition $\rho=0$		Uncertain condition			
	ظرفیت داخلی	مقدار عددی	$\rho=0/1$	میزان انحراف	$\rho=0/3$	
کل سود	۱۴۰۰۰	1755142	1744043	0/632%	1722759	1/845%
	۱۶۰۰۰	1994691	1982402	0/616%	1958694	1/804%
	۱۸۰۰۰	2231345	2217786	0/607%	2191442	1/788%
	۲۰۰۰۰	2464991	2450432	0/590%	2421765	1/753%
	۲۲۰۰۰	2695235	2679364	0/588%	2648175	1/746%
نسبت پذیرش سفارشات	۱۴۰۰۰	0/454	0/454	0	0/4538	0/0002
	۱۶۰۰۰	0/5122	0/512	0/0002	0/5118	0/0003
	۱۸۰۰۰	0/5692	0/569	0/0002	0/5691	0/0001
	۲۰۰۰۰	0/625	0/625	0	0/625	0
	۲۲۰۰۰	0/6818	0/6817	0/0001	0/6821	-0/00036
نسبت فرآیندهای منقطع برون سپاری شده	۱۴۰۰۰	1	1	0	1	0
	۱۶۰۰۰	1	1	0	1	0
	۱۸۰۰۰	1	1	0	1	0
	۲۰۰۰۰	1	1	0	1	0
	۲۲۰۰۰	1	1	0	1	0
نسبت بیکاری نیروی انسانی تک مهارته	۱۴۰۰۰	0/41087	0/41075	0/00012	0/41151	-0/00063
	۱۶۰۰۰	0/3345	0/3349	-0/0004	0/33519	-0/00069
	۱۸۰۰۰	0/25767	0/25813	-0/00046	0/25896	-0/00129
	۲۰۰۰۰	0/18612	0/18612	0	0/18665	-0/00053

معیار	Certain condition $\rho=0$		Uncertain condition			
	ظرفیت داخلی	مقدار عددی	مقدار عددی	میزان انحراف	مقدار عددی	میزان انحراف
نسبت بیکاری نیروی انسانی چندمهارته	۲۲۰۰۰	0/18612	0/11293	-0/00017	0/11233	0/000438
	۱۴۰۰۰	0/41087	0/41075	0/00012	0/41151	-0/00063
	۱۶۰۰۰	0/3345	0/3349	-0/0004	0/3351	-0/0006
	۱۸۰۰۰	0/2576	0/2581	-0/0005	0/2589	-0/0013
	۲۰۰۰۰	0/1861	0/1861	0	0/1866	-0/0005
	۲۲۰۰۰	0/1127	0/112	-0/0002	0/1123	0/0004
نسبت بیکاری منابع داخلی	۱۴۰۰۰	0	0	0	0/00002	0/00002
	۱۶۰۰۰	0	0	0	0	0
	۱۸۰۰۰	0	0	0	0	0
	۲۰۰۰۰	0/00001	0/00001	0	0	0/00001
	۲۲۰۰۰	0/00001	0/00004	0/00003	0/00004	0/00003



شکل ۵. نمایش میزان اختلاف سود حالات فقط برون سپاری یا فقط تولید داخلی فرآیندهای منقطع با حالت وجود نیروی انسانی منقطع در شرایط عدم قطعیت بالا

در اولی امکان برون سپاری فرآیندهای منقطع نیست و برای دومی امکان انجام فرآیندهای منقطع در داخل وجود ندارد، مقایسه می کنیم و مقادیر بدست آمده از آزمایشات درمی یابیم که برای تمام مسائل نمونه و در همه ی سطوح نامعینی نیروی انسانی منقطع که قابلیت تولید داخل را در کنار برون سپاری ایجاد می کنند، سبب افزایش سود کل تولیدکننده نسبت به حالات برون سپاری و یا تولید داخلی صد در صد می گردد و تنها گاهی مقدار سود در این دو حالت برابر حالت اول می گردد. نمودارهای زیر میزان اختلاف هر یک از دو حالت فوق از مقدار بدست آمده در مسئله منقطع نمایش داده می شود.

۷ نتیجه گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله تولید کالاها ی نوآورانه که محصولات نهایی آنها تقاضای نامعین و فرآری را تجربه می کنند، در یک سیستم مونتاژ بر مبنای سفارش با چند محصول و در چندین دوره و دارای سه دسته ی فرآیندهای تولید غیرمنقطع، منقطع و مونتاژ نهایی در نظر گرفته شد که مزایایی همچون افزایش سرعت تحویل و قابلیت ارائه تنوع بالایی از محصولات با هزینه نگهداری اندک را هم زمان دارا است. در این سیستم فرآیندهای غیرمنقطع و مونتاژ نهایی برای حفظ دانش فنی و تضمین کیفیت بایستی درون سازمان انجام شوند؛ اما دسته ی دیگر فرآیندهای منقطع هستند که به منظور تسریع در تحویل سفارشات و افزایش توان تولید، معمولاً برون سپاری می شوند، اما در صورت داشتن ظرفیت مازاد می توانند در داخل شرکت و هم زمان با فرآیندهای غیرمنقطع انجام گیرند. بنابراین برای بیشینه سازی سود و اطمینان از برآورده سازی سفارشات مدلی یکپارچه ارائه شد که محدودیت های تولید و زمان پردازش سفارشات را به وضوح لحاظ کرده و هم زمان تصمیمات رد/پذیرش، برنامه ریزی تولید و زمان بندی را دربر گرفته و برای رویارویی با نامعینی تقاضا از رویکرد بهینه سازی استوار بهره می برد. سپس مدل پیشنهادی خطی سازی شده و در سطوح قطعی و نیز عدم قطعیت پایین و بالا، در ابعاد کوچک و

متوسط با روش بهینه‌سازی شاخه و روش حل گردید. پاسخ‌های بدست آمده به شکلی گویا مزیت قابل توجه وجود فرآیندهای منعطف تولید را نسبت به حالات برون‌سپاری تنها و یا تولید داخلی صد در صد نشان دادند چراکه در این حالت سود کل تولیدکننده همواره بزرگتر و یا مساوی با دو حالت دیگر می‌باشد. این آزمایشات همچنین تأثیر اندک وجود نامعینی در چنین مسئله‌ای را نمایان می‌سازند. به طوری که بارزترین اثر نامعینی در بین شش معیار سود کل، نسبت پذیرش سفارشات، نسبت فرآیندهای منعطف برون‌سپاری شده، نسبت بیکاری نیروی انسانی تک و چندمهارته و نیز عدم به کارگیری منابع داخلی بر سود کل می‌باشد. و سهم عمده‌ی این انحراف اندک در سود کل نیز به خاطر تحمیل هزینه‌های نگهداری قطعات ماژولار به سیستم می‌باشد. برای توسعه این پژوهش نیز بایستی گفت که اگرچه مسئله‌ی تعریف شده و مدل متناظر آن از جامعیت بسیار خوبی برخوردار است اما یکی از حوزه‌های مهمی که به هیچ عنوان مورد کنکاش قرار نگرفته است، مدیریت درآمد و قیمت‌گذاری می‌باشد. می‌توان با افزودن این دسته از تصمیمات، تعیین نمود که در هر موقعیت، محصول با چه قیمتی ارائه شود. همچنین تصمیم‌گیری درباره پذیرش سفارشات هنگام وجود دسته‌بندی تقاضاهای مشتریان مختلف و اولویت داشتن برخی نسبت به برخی دیگر، مجاز دانستن برآورده‌سازی سفارشات در مواقعی که موجودی قطعات در دسترس نمی‌باشد از طریق سفارش اضطراری اجزای سازنده با مدت‌زمان تحویل و قیمت مشخص و یا عدم امکان پردازش هم‌زمان سفارشات می‌تواند از حوزه‌های جذاب پژوهشی باشد. علاوه بر این موارد به‌طور طبیعی ارائه الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از چالش‌های قابل پیش‌بینی در آینده نزدیک خواهد بود.

مراجع

- J. S. Song and P. Zipkin, "Supply Chain Operations: Assemble-to-Order Systems," *Handbooks Oper. Res. Manag. Sci.*, vol. 11, no. C, pp. 561–596, 2003, doi: 10.1016/S0927-0507(03)11011-0.
- G. M. Kern and H. H. Guerrero, "A conceptual model for demand management in the assemble-to-order environment," *J. Oper. Manag.*, vol. 9, no. 1, pp. 65–84, 1990, doi: 10.1016/0272-6963(90)90146-5.
- J. Modelling, "Using stochastic programming on ATP / CTP under uncertain ATO environment Dechang Sun * Haibo Shi Zhonghua Han," vol. 20, no. 3, pp. 242–252, 2013.
- J. Chen and M. Dong, "Available-to-promise-based flexible order allocation in ATO supply chains," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 6717–6738, 2014, doi: 10.1080/00207543.2014.911419.
- F. H. Frederick and J. P. Pinder, "A revenue management approach to demand management and order booking in assemble-to-order manufacturing," *J. Oper. Manag.*, vol. 13, no. 4, pp. 299–309, 1995, doi: 10.1016/0272-6963(95)00029-1.
- S. Benjaafar and M. Elhafsi, "Production and inventory control of a single product assemble-to-order system with multiple customer classes," *Manage. Sci.*, vol. 52, no. 12, pp. 1896–1912, 2006, doi: 10.1287/mnsc.1060.0588.
- M. ElHafsi, "Optimal integrated production and inventory control of an assemble-to-order system with multiple non-unitary demand classes," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 194, no. 1, pp. 127–142, 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2007.12.007.
- T. C. E. Cheng, C. Gao, and H. Shen, "Production planning and inventory allocation of a single-product assemble-to-order system with failure-prone machines," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 131, no. 2, pp. 604–617, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.02.005.
- L. Zhen and K. Wang, "Aengqun stochastic programming model for multi-product oriented multi-channel component replenishment," *Comput. Oper. Res.*, vol. 60, pp. 79–90, 2015, doi: 10.1016/j.cor.2015.02.006.
- T. Ahmadi, Z. Atan, T. de Kok, and I. Adan, "Optimal control policies for assemble-to-order systems with commitment lead time," *IIE Trans.*, vol. 51, no. 12, pp. 1365–1382, 2019, doi: 10.1080/24725854.2019.1589658.
- Y. S. Huang, H. W. Lo, and J. W. Ho, "Effects of component commonality and perishability on inventory control in assemble-to-order systems," *Oper. Res.*, vol. 21, no. 1, pp. 205–229, 2021, doi: 10.1007/s12351-018-0441-y.
- X. Jin and Z. Wang, "Performance Analysis and Evaluation of Assemble-to-Order Systems with Non-Stationary Demands," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25834–25849, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3139317.
- M. I. Reiman, H. Wan, and Q. Wang, *Asymptotically Optimal Inventory Control for Assemble-to-Order Systems*, vol. 13, no. 1. 2023. doi: 10.1287/stsy.2022.0099.