International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
June 2016, Volume 27, Number 1
pp. 105-114

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

A MATHEMATICAL MODEL FOR VIRTUAL MANUFACTURING CELLS SCHEDULING WITH SETUP TIME, TRAVELING TIME, TARDINESS AND MACHINE LOAD BALANCE ON A DISTRIBUTED LAYOUT

Mahdi Sarem Bafandeh, Reza Tavakkoli-Moghaddam*& Alireza Rashidi

Mahdi Sarem Bafandeh, *MSc. in Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University*
Reza Tavakkoli-Moghaddam, *Professor of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran,*
Alireza Rashidi, *Assistance Professor of Industrial Engineering, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh*

Keywords

Virtual manufacturing cell,
Flexible manufacturing system,
Mathematical model,
Scheduling

ABSTRACT

In this paper, a mixed-integer programming model for scheduling of virtual manufacturing cells is presented. Virtual cells in this model are a combination of and cellular and flexible manufacturing systems. It considers sequence-dependent setup time, travel time between machines, and workload balancing machines. The aim of this model is to minimize the cost of handling and performance indicators such as the completion time of the last job and tardiness. Then, a few numerical examples are solved and the computational results of the original and proposed models are presented.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 27, No. 1, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۱، جلـــد ۲۷، بهار ۱۳۹۵
صفحـــه ۱۱۴-۱۰۶

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

مدل ریاضی برای زمان‌بندی سلول‌های تولید مجازی با زمان آماده‌سازی، زمان سفر، دیرکرد و تعادل بارکاری ماشین در چیدمان فیزیکی توزیع شده

مهدی صارم‌بافنده، رضا توکلی‌مقدم* و علیرضا رشیدی

کلمات کلیدی

سلول تولید مجازی،
سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر،
مدل ریاضی،
زمان‌بندی

چکیده:

در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای زمـان بنـدی سـلولهای تولیـد مجـازی ارائـه می‌گردد. سلولهای مجازی در این مدل تلفیقی از سیستمهای تولید سلولی و تولید انعطاف‌پذیر می‌باشد. در این مدل زمان‌های آماده سازی وابسته به توالی عملیات، زمان جابجایی بین ماشین‌ها و همچنین تعادل بار کاری ماشین‌ها را در نظر گرفته شده اسـت. هـدف ایـن مـدل کمینـه کـردن هزینـه‌هـای جابـه جـایی و شاخص‌های عملکردی مانند زمان اتمام آخرین کار، زمان تاخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین می‌باشـد و نتایج حل چند مثال عددی با استفاده از مدل پیشنهادی و مرجع ارائه شده است.

۱. مقدمه

مانند هر بخش دیگر، بخش تولید نیـز امـروزه بـرای بقـا در برابـر رکـود اقتصادی که در سرتا سر جهان وجـود دارد، تـلاش مـی‌کنـد. از ایـن رو شرکتها نگاه بیشتری به گزینه‌های که هزینه‌های تولیـد خـود را کـاهش می‌دهد دارند. بدون شک یکی از مـوثرترین ایـن اسـتراتژی‌هـا، کـاهش هزینه در پیکربندی (چیدمان) دوباره امکانات تولیدی می‌باشد.

سیستم‌های تولید سلولی[۱] (CMS) که یکی از کاربردهـای تکنولـوژی گروهی[۲] (GT) در صنعت می‌باشد جایگزین سیستم‌های تولید سـنتی شده است. سیستم‌های تولید سلولی با در نظـر گـرفتن شـباهت بـین قطعات و فرآیندها و گروهبندی آنهـا بـراین اسـاس، زمینـه طراحـی و تولید بهینه آنها را فراهم می‌آورند. در اکثرتحقیقات گذشته مساله تولید سلولی برای شرایط ثابت تولید در نظر گرفتـه شـده اسـت. در نتیجـه تولید سلولی سنتی انعطاف‌پـذیری لازم را نـدارد تـا اینکـه خـود را بـا شرایط هر دوره وفق دهد.

تاریخ وصول: ۹۲/۰۶/۰۳
تاریخ تصویب: ۹۳/۰۲/۱۷

مهدی صارم بافنده، دانشکده مهندسی صـنایع، دانشـگاه آزاد سـلامی، واحـد تهـران جنوب، sarem.mahdi@gmail.com
علیرضا رشیدی، گـروه مهندسـی صـنایع، دانشـگاه آزاد سـلامی، واحـد فیروزکـوه، alireza_rashidi@yahoo.com
***نویسنده مسئول مقاله: رضا توکلی مقدم**، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران tavakoli@ut.ac.ir

روش‌های سیستم‌های تولید سلولی انعطـاف‌پـذیر[۳] ماننـد سیسـتم تولید سلولی دینامیک[۴] و تولید سلولی مجازی بـرای غلبـه بـر ایـن مشـکلات توسـعه پیـدا کـرده انـد. سـلول‌هـای تولیـدی مجـازی[۵] (VMC)، تقریباً در دهه ی گذشته پیشنهاد شـدند، در ایـن روش، ماشین‌ها بدون تغییر در مکان فیزیکی به خانواده قطعات تخصـیص داده می‌شوند و هر زمان که تقاضا تغییر کند می‌توان گـروه بنـدی ماشین‌ها را بدون تغییر فیزیکی آنهـا تغییـر داده و سـلول مجـازی جدید را تشکیل داد. در راهکارهای دیگر برای برخورد بـا تغییـرات تقاضا جانمایی ماشین‌ها در سطح کارخانه به صورت جانمایی توزیع شده[۶] یا جانمایی هولوگرافیک[۷] در نظر گرفته می‌شود. در ایـن نـوع جانمایی ماشین‌های مشابه به صـورت پراکنـده در سـطح کارخانـه مستقر می‌شوند . طراحان این شیوه معتقدند کـه چنـین جانمـایی باعث افزایش تعداد مسیرهای عملیاتی ممکن برای پردازش قطعات است [۶].

در این مقاله، جانمایی در نظر گرفته شده برای سلول‌های تولیـدی از نوع هولوگرافیک می‌باشد. در این نوع جانمایی از هر نوع ماشین، چنـد نمونـه مشـابه وجـود دارد کـه همجـوار نیسـتند و در سـطح کارخانه به صورت پراکنده مستقر شده اند. که ایـن سیسـتم تولیـد سلولی مجازی با این نوع جانمایی تا حدودی مشابه سیستم تولیـد کارگاهی انعطاف‌پذیر[۸] است با این تفاوت کـه در جانمـایی در نظـر گرفته شده در این مقاله بـرخلاف محـیط کارگـاهی انعطـاف‌پـذیر، ماشین‌های مشابه در نزدیکی یکدیگر مستقر نیسـتند و بـه صـورت موازی با هم کار نمی کنند.

در این مقاله، مدل ریاضی زمان بندی سیستم تولید سلولی مجازی با جانمایی هولوگرافیک مدنظر قرار گرفته است. برای زمان بندی در چنین سیستم‌های تولیدی، دو تصمیم اصلی باید اتخاذ شوند، تخصیص ماشین‌ها به کارها و تعیین زمان شروع و پایان کارها بر روی ماشین‌ها می‌باشد. در این مقاله، با مدنظر قراردادن زمانهای آماده سازی وابسته به توالی عملیات، زمان جابه جایی بین ماشین‌ها و همچنین شاخص‌های عملکردی نظیر زمان تاخیر کارها بر روی موقعیت ماشین‌ها و تعادل کاری ماشین‌ها، مسئله ی زمان بندی سلول‌های مجازی به صورت یک مدل ریاضی ارائه شده است. ساختار مقاله در ادامه شامل سه قسمت است، که در قسمت اول به تعریف مسئله که خود شامل دو بخش بیان مسئله و بیان مدل ریاضی می‌باشد. در قیمت دوم به خطی سازی مدل پیشنهادی می‌پردازد و در قسمت آخر نیز خلاصه ای از حل و نتایج مدل و ارائه پیشنهادهای برای مطالعات آتی را بیان کرده است.

۲. مرور بر ادبیات گذشته

با وجود آنکه مفهوم سلول‌های تولیدی مجازی بصورت غیر رسمی در کار تحقیقاتی آلتوم [۷] وجود داشته است، اولین بار در اوایل دهه ی ۸۰ اصطلاح سلول‌های مجازی در کار مک لین و همکاران [۸] مطرح گردید و سلول‌های تولید مجازی به این صورت تعریف شده است: سلول‌های مجازی را یک ساختار سلسله مراتبی و پویا را معرفی کرده اند.

در مطالعات ایرانی [۹] سلول‌های تولید مجازی VMCs بصورت زیر تعریف شده است: "تقسیم زمان کاری ایستگاها با استفاده از سیستم حمل ونقل انعطاف‌پذیر و مجموعه ی ایستگاه‌های کاری در سطح کارگاه انجام می‌شود و این امکان را می‌دهد که بتوانند سلول‌ها بصورت پویا دوباره ساختار دهی شوند."

سوریش و مریدیت [۱۰] بر روی اثر استفاده از زمانبندی مبتنی بر خانواده[۹] در یک طرح عملی تحقیق کرده اند، که در این مطالعه، تناقض‌های فراوان در انعطاف‌پذیری مسیرها تولید، در هنگامی که برای ایجاد سلول‌های قدیمی، ماشین‌ها به اشتراک گذاشته می‌شوند وجود داشته است. این سیستم از طرح کارگاهی[۱۰] و زمانبندی مبتنی بر خانواده استفاده می‌کند، و به سیستم‌های FLP[۱۱] منسوب شده اند. گوش [۱۲-۱۱] و کانن [۱۴-۱۳] این سیستم‌ها را سیستم تولید سلول مجازی نامیده اند آنان جریان تحقیقات را با بررسی بر روی استفاده از قوانین زمانبندی گروهی قطعات متعدد گسترش دادند.

سادتین و همکاران [۱۷-۱۶] در دو تحقق به زمانبندی سلول‌های مجازی پرداختند. این مولفین به مجموعه ای از ماشین‌ها که برای پردازش یک کار در محیط تولیدی با جانمایی توزیع شده تخصیص داده می‌شود، سلول مجازی کفته اند. بنابراین در کلیه تعاریف، اپراتورها به عنوان منبع اصلی از سلول‌های مجازی حذف شده اند. به هر حال، نویسندگان اخیرا شروع به ازبین بردن این شکاف کرده اند. کوهلینگ[۱۲] در سال ۱۹۹۸ به نیروی انسانی نیز توجه کرده است.

هری و براون [۱۸] به اهمیت ساختار اطلاعات که همکاری بین افراد و سلول‌های مجازی را ممکن می‌سازد، اشاره می‌کنند. سوریش و سلامپ [۱۹] دوباره براساس تعریف، سلول مجازی را کاربردی از تکنولوژی گروهی در چیدمان کارگاهی بیان کردند. آنها تحقیقات خود را بر روی ابعاد کاری با در نظر گرفتن ماشین‌ها و نبروی انسانی گسترش داده اند و علاوه بر ماشین‌ها، نیروی انسانی را نیز به عنوان منبعی محدود در نظر گرفته اند.

۳. تعریف مسئله

۳-۱. سلول‌های تولید مجازی

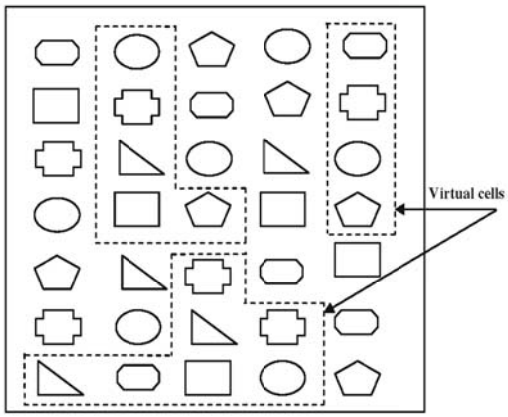
از آنجا که VMS به عنوان جایگزین برای CMS می‌باشد و تا حدودی ویژگی‌های سیستم تولید سلولی دارا است، و تفات قابل توجه این دو سیستم در پاسخ دهی سریع به تغییرات بیرونی می‌باشد. CMS نسبت به تغییرات به دلیل گروه بندی فیزیکی ماشین‌ها ناسازگار می‌باشد و پاسخ مناسبی به تغییرات نمی دهد. به جای محدود کردن قطعات به سلولهای ماشین، از ماشین‌ها با فرآیندهای مشابه که در مجاور یکدیگر قرار ندارند استفاده شده است و این امر باعث افزایش کارایی و همچنین امکان ایجاد مسیرهای متنوع تولید در فاز برنامه ریزی را ایجاد می‌کند.

برای درک بهتر و کاملتر ر برخی از سلولهای مجازی افق زمان بندی را به دوره‌های زمانی تقسیم می‌کنند. و فرض می‌شود که وقتی اولین عملیات از هر کار شروع می‌شود عملیات بعدی باید در دوره بعد شروع شود، همچنین فرض شده است که عملیات‌ها باید در ابتدا هر دوره شروع شوند حتی اگر عملیات قبلی در ابتدای دوره به پایان رسیده باشد، نمی توان عملیات بعد در آن دوره آغاز شود، که این برای درک بهتر بیان شده است اما در رفتار سیستم یک عامل منفی تلقی می‌شود. در واقع این نوع سلولهای مجازی از مفهوم تکنولوژی گروهی پیروری می‌کنند.

در این مقاله، سلول‌های مجازی از مفهوم تکنولوژی گروهی پیروی نمی کنند و دوره‌های زمان بندی در مدل بصورت تک دوره ای فرض شده و به دلیل اعمال زمان سررسید موقعیت‌های کاری برای ماشین‌ها که عبارت است از زمان‌های شروع، پردازش و آماده سازی و بدون در نظر گرفتن زمان تاخیر وجود هر قطعه در هر موقعیت کاری برای هر ماشین می‌باشد، از اتلاف منابع تا حد امکان جلوگیری می‌شود و در دوره زمانی تعدادی محصول - کار در یک بازه زمانی، در برنامه تولید قرار می‌گیرد و بر اساس برخی از تعاریف که به تعدادی ماشین که یک کار را انجام، سلولهای مجازی اتلاق می‌شود، عملیات‌ها می‌توانند پی در پی و در هر زمانی انجام شوند.

همچنین در این مقاله، جانمایی در نظر گرفته شده برای سلول‌های تولیدی از نوع هولوگرافیک می‌باشد. در این نوع جانمایی از هر نوع ماشین، چند نمونـه مشـابه وجـود دارد کـه همجـوار نیسـتند و در سطح کارخانه به صورت پراکنده مستقر شده اند. که ایـن سیسـتم تولید سلولی مجازی با این نوع جانمایی تا حدودی مشابه سیسـتم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر[۱۳] است با این تفاوت که در جانمـایی در نظر گرفته شده در این مقاله برخلاف محیط کارگاهی انعطاف‌پذیر، ماشین‌های مشابه در نزدیکی یکدیگر مستقر نیسـتند و بـه صـورت مـوازی بـا هـم کـار نمـی کننـد، زیـرا ایـن امـر باعـث افـزایش انعطاف‌پـذیری بیشـتر بـه دلیـل ایجـاد مسـیرهای تولیـد مختلـف می‌باشـد. همچنـین بسـته‌هـای کـاری (محصـولات-کارهـا) قابـل شکستن به بسته‌های کـاری کـوچکتر نیسـتند، زیـرا ماشـین‌هـای یکسان همجوار نیستند و بصورت موازی کار نمی کنند و همچنـین انعطاف‌پذیری مورد نظر که به دلیل پراکنـدگی ماشـین‌هـا کـه بـه منظور ایجاد مسیرهای تولید گوناگون برای محصولات-کارها وجود دارد، کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۱) زیر نشان دهنده مفهوم و طراحی سلولهای مجازی که به تعدادی ماشین که یک کار را انجام می‌دهند، می‌باشد و در ایـن مفهوم ممکن است که از هر نوع ماشین بیش از یکی وجود داشـته باشد و در قسمت‌های مختلف کارخانه قرار گرفته باشد.



شکل ۱. سلول مجازی با جانمایی توزیع شده

۳-۲. مدل ریاضی چند هدفه VMC

یکی از مهمترین اهداف در تشکیل سلول‌های مجازی، کمینه کردن مسافت یا هزینه جابه جایی می‌باشد. همچنین کمینه کردن زمـان اتمام آخرین کار یکی از معمـول‌تـرین معیارهـای زمـان بنـدی در سیستم تولیدی کارگاهی انعطاف‌پذیر است به گونه ای کـه کـاهش این معیار را هم ارز با افزایش بهره وری در سیستم تولیدی در نظـر گرفته اند. همچنین از دیگر اهدافی که در تحقیقـات گذشـته بکـار نرفته، تعادل بار کاری بین ماشین‌ها در محیط کاری مـی‌باشـد کـه منجرب به تقسیم کارها بین ماشین‌ها می‌شود و بار کاری ماشین‌ها را کاهش می‌دهد، سه هدف یاد شـده در تعـارض بـا یکـدیگر قـرار دارند به گونه ای که بهبود هزینه جابه جایی باعـث بـدتر شـدن دو هدف دیگر می‌شود. همچنین از دیگر اهـدافی کـه در ایـن شـرایط تولید برای بهبود سیستم تولیدی لحاظ شده اسـت زمـان تاخیرهـا است، که باعث می‌شود کارها در زمان مقرر به ماشین‌ها اختصـاص داده شود و کارها با تاخیر کمتری به اتمام برسد با این اوصاف لازم است تعاملی مناسب بین این اهداف ایجاد شود.

در تعداد بسیار محدودی از تحقیقات انجام شده در زمینـه طراحـی سلول‌های مجازی زمان آماده سازی ماشـین‌هـای تولیـدی و زمـان جابه جایی بین ماشین‌ها در نظر گرفته شده انـد، کـه ایـن عوامـل تاثیر بالایی بر نحوه عملکرد سیستم تولیدی دارد. بنابراین با ایجـاد تعاملی مناسب بین این اهداف می‌توان یک مدل کـارا بـرای بهبـود بهره وری و کارایی برنامه زمان بندی و کاهش هزینه‌ها جهت بهبود سیستم تولیدی ایجاد کرد.

در این بخش با در نظر گرفتن دیرکـرد و تعـادل کـار ماشـین‌هـا و زمان‌های آماده سازی وابسته به توالی و جابـه جـایی مسـاله زمـان بندی کار در سلول‌های مجازی به صورت یـک مـدل برنامـه ریـزی ریاضی عدد صحیح آمیخته چند هدفـه (MOMIP) مـدل سـازی شده است. مدل ارائه شده از دسته مدل‌های چند هدفه می‌باشد که اهداف آن به صورت وزین شده با نرم افزار بهینه سازی GAMS به طور دقیق حل گردیده است.

با توجه به شرایط و اهداف مسئله، مدل ارائه شده زمان شـروع هـر عملیات، زمان تکمیل هـر عملیـات، تخصـیص کارهـا بـه هـر نـوع ماشین و مقدار کاری که هر نوع ماشین پردازش مـی‌کنـد را بیـان می‌کند. مفروضات زیر در مدل ریاضی مدنظر قرار گرفته شده است:

- حجم تولید هر قطعه در افق برنامه ریزی مشخص است.
- مسیر عملیاتی و توالی عملیات هر قطعه، مشخص می‌باشد.
- زمان‌های انجام عملیات توسط هر ماشین بر روی هر قطعه، مشخص می‌باشند.
- همه کارها در زمان صفر در دسترس هستند.
- از هر نوع ماشین چند نمونه یکسان با ظرفیت زمان پردازش یکسان وجود دارند که به موزات هم کار نمی کنند.
- ماشین‌ها غیر قابل حرکت هستند و فاصله بین هرجفت ماشین، مشخص است.
- هر قطعه فقط یک بار یک نوع ماشین را ملاقات می‌کند یا به عبارتی فرض پردازش مجدد[۱۴] وجود ندارد.
- وقفه کاری[۱۵] مجاز نیست
- هزینه واحد جابه جایی برای هر واحد از قطعات مشخص است.
- زمان‌های آماده سازی ماشین‌ها وابسته به توالی عملیات می‌باشد و مقدار آنها از قبل مشخص است.

- امکان تقسیم بارکاری برای عملیاتی که می‌توان بر روی ماشین‌های متفاوت انجام شود،وجود ندارد.
- زمان‌های جا به جایی بین ماشین‌ها وابسته از قبل مشخص است.
- زمان سر رسید هر موقعیت کاری بر روی هر ماشین مشخص می‌باشد.

۳-۳. نمادها و اندیس‌ها

اندیس‌ها

j,j': اندیس نوع کار($(1,\ldots,j$

i,o,k: اندیس نوع ماشین‌ها ($(1,\ldots,m$

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

S(i): ماشین‌های نوع *i*ام

L: اندیس شماره موقعیت قرار گرفتن عملیات هر قطعه مربوط به ماشین $(1,\ldots,ls(i))$

پارامترها

W_r : وزن هدف r ام .

N_j : اندازه دسته کار J .

P_{jh} : زمان پردازش عملیات hام از کار jام .

$D_{s(i),s(k)}$: هزینه هر واحد جابه جایی برای هر کار که از ماشین $s(k)$ به ماشین $s(i)$ حمل شده است.

M : عدد مثبت بسیار بزرگ

$d_{s(i),l}$: زمان سر رسید توالی l از ماشین نوع $s(i)$

$S_{s(i),j,j'}$: زمان آماده سازی لازم برای ماشین $s(i)$ زمانی که کار J' بعد از کار J بر روی ماشین قرار می‌گیرد.

$mth_{s(i),s(o)}$: زمان جابه جایی کارها از ماشین $s(o)$ به ماشین $s(i)$

متغیرهای تصمیم

$Y_{s(i),j,h}$: ۱ اگر ماشین $s(i)$ برای پردازش عملیات hام از کار jام انتخاب شود و در غیر این صورت صفر.

$X_{s(i),j,h,l}$: ۱ عملیات hام از کار jام در توالی l بر روی ماشین $s(i)$ پردازش شود و در غیر این صورت صفر.

$t_{j,h}$: زمان شروع پردازش عملیات hام از کار jام

$Tm_{s(i),l}$: زمان شروع توالی l از ماشین نوع $s(i)$

$C_{s(i),l}$: زمان پایان توالی l از ماشین نوع $s(i)$

$C_{\max}$: زمان اتمام آخرین کار بر روی آخرین ماشین

$W_{s(i)}$: بارکاری ماشین نوع$s(i)$

$\overline{W}$: متوسط بارکاری ماشین‌ها

۴. مدل ریاضی پیشنهادی

$$\min f = W_1 C_{MAX} + W_2 \sum_{j-1}\sum_{h-1}\sum_{s(i)}\sum_{s(k)} Y_{s(i),j,h} Y_{s(k),j,h+1} D_{s(i),s(k)} N_j + W_3 \sum_{s(i)}\sum_{l} \max\left\{0,\left(C_{s(i),l} - d_{s(i),l}\right)\right\} + W_4 \sum_{s(i)} \left|W_{s(i)} - \overline{W}\right| \quad (۱)$$

$$s.t$$

$$t_{j,h} + P_{j,h} N_j \le t_{j,h+1} \forall j,h \quad (۲)$$

$$t_{j,h} + P_{j,h} N_j \le C_{MAX} \forall j,h \quad (۳)$$

$$\max \begin{Bmatrix} C_{s(i),l}, Tm_{s(i),l} + X_{s(i),j,h,l} N_j P_{j,h} \\ + X_{s(i),j,h,l} X_{s(i),j',h',l+1} S_{s(i),j,j'} \\ + Y_{s(o),j',h'-1} Y_{s(i),j',h'} mth_{s(i),s(o)} \end{Bmatrix} \le Tm_{s(i),l+1} \forall i,k,j,j',h,h',l \quad (۴)$$

$$C_{s(i),l} = Tm_{s(i),l} + \sum_j \sum_h X_{s(i),j,h,l} N_j P_{j,h} \forall i,l \quad (۵)$$

$$t_{j,h} + M\,(1 - X_{s(i),j,h,l}) \ge Tm_{s(i),l} \forall i,j,h,l$$

$$Tm_{s(i),l} + M\,(1 - X_{s(i),j,h,l}) \ge t_{j,h} \forall i,j,h,l \quad (۶)$$

$$\sum_j \sum_h X_{s(i),j,h,l} \le 1 \forall i,l \quad (۷)$$

$$\sum_l X_{s(i),j,h,l} = Y_{s(i),j,h} \forall i,j,h \quad (۸)$$

$$\sum_j \sum_h X_{s(i),j,h,l} \le \sum_j \sum_h X_{s(i),j,h,l-1} \forall j,h \quad (۹)$$

$$W_{s(i)} = \sum_j \sum_h \sum_l X_{s(i),j,h,l} N_j P_{j,h} \forall i \quad (۱۰)$$

$$\overline{W} = \frac{\sum_{s(i)} W_{s(i)}}{m} \forall i \quad (۱۱)$$

تابع هدف (معادله ۱) که شامل کمینه جمع وزین شده عبارت اول که زمان تکمیل آخرین کار بر روی آخرین ماشین می‌باشد (C_{MAX})،عبارت دوم هزینه جابجایی مواد را بیان می‌کند، عبارت سوم که مقدار تاخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین را نشان می‌دهد و بصورت یک تابع Max می‌باشد که مقدار صفر یا مثبت (تاخیر) را بیان می‌کند و عبارت چهارم بارکاری ماشین‌ها را متعادل می‌کند، به عبارت دیگر کارها بین ماشین‌های مشابه تا حد امکان بطور مساوی تقسیم شود. در این تابع وزن‌ها توسط تصمیم گیرنده بیان می‌شود.

محدودیت اول (معادله ۲) مربوط به روابط پیش نیازی کارها می‌باشد و نشان می‌دهد یک فعالیت تنها زمانی شروع می‌شود که فعالیت قبل از آن پردازش شده باشد. و محدودیت دوم (معادله ۳)

که تضمین کننده این مطب می‌باشد که C_{MAX} بزرگتر مساوی تمام زمان‌های تکمیل در سیستم می‌باشد.

محدودیت سوم (معادله ۴) تضمین می‌کند که زمان شروع بـه کـار ماشین نوع $s(i)$ برای پردازش کاری که توالی $l+1$ به ان تخصـیص داده شده است بعد از پردازش کامل توالی l انجام پزیرد، به عبارتی زمان شروع به کار ماشین نوع $s(i)$ برای پردازش کاری کـه تـوالی $l+1$ به ان تخصیص داده شده است برابر بـا بیشـترین مقـدار بـین زمان پایان موقیت توالی قبلی ماشین یعنی l و زمان پایان عملیـات ماقبل از قطعه ای که به موقعیت فعلی این ماشـین تخصـیص داده شده است. محدودیت چهارم (معادله ۵) تضمین می‌کند کـه زمـان پایان به کار ماشین نوع $s(i)$ برای پردازش کاری کـه تـوالی lبـه ان تخصیص داده شده است بعد از پردازش کامل توالی l زمـان آمـاده سازی کار تخصیص داده شده به توالی l انجام پزیرد.

محدودیت پنجم و ششـم (معـادلات ۶ و ۷) ایحـاب مـی‌کننـد کـه زمانی که متغیر x مقدار ۱ بگیرد آنگاه زمان شـروع عملیـات hام از کار jام با زمان شروع توالی lام از ماشین نوع $s(i)$ برابـر مـی‌باشـد. محدودیت هفتم (معادله ۸) نشان میدهد هر توالی از هر ماشین بـه یک عملیات تخصیص داده می‌شود و محدودیت هشتم (معادلـه ۹) تضمین می‌کنـد زمـانی کـه عملیـاتی بـه ماشـینی تخصـیص داده میشود توالی انجـام آن عملیـات بـر روی ماشـین مشـخص گـردد. محدودیت دهم (معادله ۱۱) بار کـاری هـر نـوع ماشـین را نشـان می‌دهد و محدودیت یازدهم (معادلـه ۱۲) نیـز متوسـط بـار کـاری تمام ماشین‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۱. خطی سازی مدل ریاضی پیشنهادی

بخش دوم، سوم و چهارم در تابع هدف و همچنین محدودیت سـوم غیر خطی می‌باشد. برای تبدیل تابع هدف به یک تابع هدف خطـی و محدودیت سوم به یک محـدودیت خطـی، متغیرهـای جدیـدزیر همراه با دسته ای از محدودیت‌ها متناظر به مدل افزوده می‌شوند. محدودیت‌های خطی سازی برای متغیرهـای جدیـد بـه ترتیـب در معالات زیر معرفی شده اند:

$$\max\left\{0,\left(C_{s(i),l}-d_{s(i),l}\right)\right\}=e_{s(i),l} \quad (۱۳)$$

$$\left|W_{s(i)}-\bar{W}\right|=f_{s(i)} \quad (۱۴)$$

$$\max\begin{Bmatrix} C_{s(i),l}, Tm_{s(i),l}+X_{s(i),j,h,l}N_jP_{j,h} \\ +X_{s(i),j,h,l}X_{s(i),j',h',l+1}S_{s(i),j,j'} \\ +Y_{s(o),j',h'-1}Y_{s(i),j',h'}mth_{s(i),s(k)} \end{Bmatrix}=k_{m,l} \quad (۱۵)$$

$$X_{s(i),j,h,l}X_{s(i),j',h',l+1}=U_{s(i),j,j',h,h',l,l+1}$$

$$Y_{s(i),j,h}Y_{s(k),j,h+1}=Z_{s(i),s(k),j,h,h+1} \quad (۱۶)$$

الف) محدودیت متناظر با متغیر جدید $e_{s(i),l}$

$$e_{s(i),l}\geq 0 \quad (۱۷)$$

$$e_{s(i),l}\geq C_{s(i),l}-d_{s(i),l} \quad (۱۸)$$

ب) محدودیت متناظر با متغیر جدید $f_{s(i)}$

$$W_{s(i)}-\bar{W}\leq f_{s(i)} \quad (۱۹)$$

$$W_{s(i)}-\bar{W}\geq -f_{s(i)} \quad (۲۰)$$

ج) محدودیت متناظر با متغیر جدید $k_{s(i),l}$

$$C_{s(i),l}\leq k_{s(i),l} \quad (۲۱)$$

$$Tm_{s(i),l}+X_{s(i),j,h,l}N_jP_{j,h}+X_{s(i),j,h,l}X_{s(i),j',h',l+1}S_{s(i),j,j'} +Y_{s(o),j',h'-1}Y_{s(i),j',h'}mth_{s(i),s(o)}\leq k_{s(i),l} \quad (۲۲)$$

د) محدودیت متناظر با متغیر جدید $U_{s(i),j,j',h,h',l,l+1}$

$$U_{s(i),j,j',h,h',l,l+1}\leq X_{s(i),j,h,l} \quad \forall i,j,j',h,h',l,h\neq h',j\neq j' \quad (۲۳)$$

$$U_{s(i),j,j',h,h',l,l+1}\leq X_{s(i),j',h',l+1} \quad \forall i,j,j',h,h',l,h\neq h',j\neq j' \quad (۲۴)$$

$$X_{s(i),j,h,l}+X_{s(i),j',h',l+1}-U_{s(i),j,j',h,h',l,l+1}\leq 1 \quad \forall i,j,j',h,h',l,h\neq h',j\neq j' \quad (۲۵)$$

محدودیت متناظر با متغییر جدید $Z_{s(i),s(k),j,h,h+1}$

$$Z_{s(i),s(k),j,h,h+1}\leq Y_{s(i),j,h} \quad \forall i,k,j,h,i\neq k \quad (۲۶)$$

$$Z_{s(i),s(k),j,h,h+1}\leq Y_{s(k),j,h+1} \quad \forall i,k,j,h,i\neq k \quad (۲۷)$$

$$Y_{s(i),j,h}+Y_{s(k),j,h+1}-Z_{s(i),s(k),j,h,h+1}=1 \quad \forall i,k,j,h,i\neq k \quad (۲۸)$$

۵. مثال‌های عددی

در این قسمت پارامترها و اطلاعات ورودی مدل در قالب یک مسئله در جداول ۱ الی ۸ ارائه گردیده است.

جدول ۱. مشخصات ماشین‌ها

شماره ماشین	نوع ماشین
1,2,3	A
4,5,6	B
7,8	C

جدول ۲. مشخصات کارها

شماره کار	توالی و زمان پردازش	اندازه دسته کار
1	(A,5),(B,7)	30
2	(C,8),(A,4)	28
3	(B,6),(A,5),(C,10)	12
4	(C,7),(B,2),(A,7)	18
5	(B,7), (C,4)	17
6	(B,7), (A,10)	21

جدول ۳. هزینه جابه جایی بین ماشین‌ها

شماره ماشین	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	22	54	73	72	77	16	41
2	22	0	31	18	17	26	29	16
3	54	31	0	38	39	38	74	45
4	73	18	38	0	79	32	77	18
5	72	17	39	79	0	64	38	65
6	77	26	38	32	64	0	39	79
7	16	29	74	77	38	39	0	59
8	41	16	45	18	65	79	59	0

جدول ۴. زمان جابه جایی بین ماشین‌ها

شماره ماشین	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	2	5	7	7	8	2	4
2	2	0	3	2	2	3	3	2
3	5	3	0	4	4	4	7	4
4	7	2	4	0	8	3	8	2
5	7	2	4	8	0	6	4	6
6	8	3	4	3	6	0	4	8
7	2	3	7	8	4	4	0	6
8	4	2	4	2	6	8	6	0

جدول ۵. زمان سررسید

شماره کار	L=	1	2	3	4	5
A		238	388	541	668	751
B		231	378	497	569	629
C		224	365	491	587	-

جدول ۶. زمان آماده سازی ماشین A

شماره کار	1	2	3	4	5	6
1	0	5	3	3	12	6
2	15	0	15	15	11	18
3	20	5	0	8	2	10
4	5	1	4	0	20	2
5	0	7	3	19	0	20
6	4	8	3	19	7	0

جدول ۷. زمان آماده سازی ماشین B

شماره کار	1	2	3	4	5	6
1	0	7	13	14	14	9
2	2	0	19	10	7	15
3	11	14	0	16	5	5
4	0	14	2	0	14	18
5	0	15	13	12	0	5
6	13	17	20	5	11	0

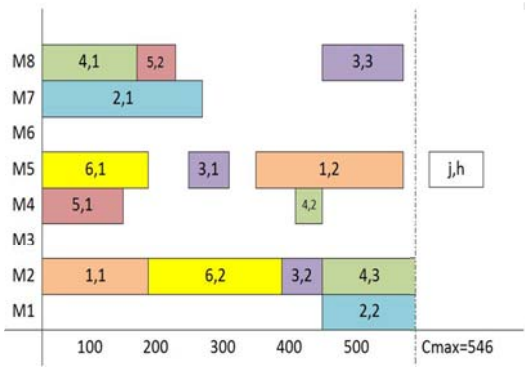
جدول ۸. زمان آماده سازی ماشین C

شماره کار	1	2	3	4	5	6
1	0	14	14	16	1	20
2	2	0	1	11	3	5
3	4	13	0	17	20	15
4	11	13	13	0	7	7
5	14	13	11	17	0	12
6	3	9	14	1	15	0

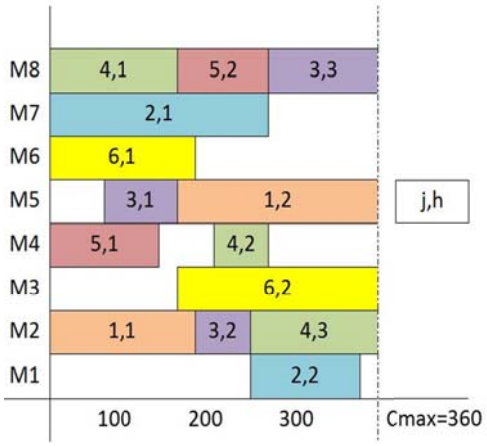
۶. حل مثال‌ها با نرم افزار بهینه سازی GAMS 23.4

با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده و بعد از کد نویسی مدل‌های مرجع و پیشنهادی در نرم افزار بهینه سازی GAMS و جواب بهینه سراسری برای مسئله شماره ۱ بدست می‌آید. در مدل مرجع تعداد محدودیت‌ها ۸۱۶ و متغیرها ۴۶۴۹ عدد است و زمان حل ۰/۱۵ دقیقه می باشد و در مدل پیشنهادی تعداد محدودیت‌ها ۳۶۷۱ و متغیرها ۵۴۰۱ عدد است و زمان حل ۱/۰۷ دقیقه می باشد. برای نمونه نتایج محاسباتی به دست آمده از حل مسئله در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۹ می‌باشد.

همان طور که در گانت زمانبندی برای مسئله شماره ۱ مشاهده می‌شود زمان تکمیل کارها در مدل پیشنهادی با توجه به اینکه زمان آماده سازی و جابه جایی را علاوه بر زمان پردازش در نظر گرفته است باز هم مقدار بهتری (کمتری) نسبت به مقدار زمان تکمیل کار در مدل مرجع دارد. همچنین پارامتر هزینه کل به دلیل اضافه شدن هزینه‌های تاخیر و بالانس کاری ماشین نسبت به جواب هزینه کل مدل مرجع تا حدودی بدتر شده است.



شکل ۲. گانت زمانبندی مسئله شماره ۱ از حل مدل مرجع



شکل ۳. گانت زمانبندی مسئله شماره ۱ از حل مدل پیشنهادی

در ادامه مسائلی با ابعـاد مختلـف و بـا فـرض برابـری وزن اهـداف TTC, C_{MAX} و مـدل پیشـنهادی TML[16]، TT[17]، TTC[18]، C_{MAX} مرجع حل کرده و مقادیر بهینه در جدول (۶-۱) آمده است.

جدول ۹. مقادیر بدست آمده از حل مدل مرجع و پیشنهادی

شماره مسئله	مدل مرجع		مدل پیشنهادی			
	Cmaxref	TTCref	Cmax	TTC	TT	TML
1	546	2665	360	3106	441	707
2	620	3695	557	3955	247	1408
3	637	7913	682	8026	695	2168
4	892	6958	756	7838	455	1207
5	824	16770	780	17864	3837	8049

۷. نتیجه‌گیری

امروزه در بسیاری از شرکت‌های تولیدی تعادل بار کاری ماشین‌ها و زمان تاخیر موقعیت کارها بر روی هر ماشین به عنوان شاخص‌های کارکردی جهت بهبود در بهره وری و بهبود در برنامه ریزی و کاهش هزینه‌های الزام شده است. هرچند تحقیقات زیادی در زمینه تولید سلولی با در نظر گرفتن شاخص‌های عملکردی انجام شده است اما در تولید سلولی مجازی در سطح برنامه ریزی تولید انجام نگرفته است.

از طرفی دیگر در تحقیقات بسیار اندکی در زمینه طراحی سلول‌های مجازی زمان‌های آماده سازی ماشین‌های تولیدی و زمان‌های جابه جایی بین ماشین‌ها در نظر گرفته شده است اما محققان در این تحقیقات اثر زمان‌های آماده سازی وابسته به توالی عملیات تولیدی و زمان جابه جایی بین ماشین‌ها را بر برنامه زمان بندی تولید شده نادیده گرفته است .در تحقیق حاضر برای زمان بندی سلول‌های مجازی مدل جدیدی ارائه شده است که زمان‌های وابسته به توالی عملیات تولیدی و همچنین زمان جابه جایی بین ماشین‌ها را مد نظر قرار می‌دهد.

جانمـایی در نظـر گرفتـه شـده بـرای سـلول‌هـای تولیـدی از نـوع هولوگرافیک(توزیع شده) می‌باشد. در این نوع جانمـایی از هـر نـوع ماشین چند نمونه مشابه وجود دارد که همجوار نیستند و در سطح کارخانه به صورت پراکنده مستقر شده اند. اگرچه هریک از قطعـات دارای مسیر عملیاتی منحصر به فردی است اما از آنجایی کـه بـرای هریک از عملیات موجود در مسیر عملیـاتی، چنـد ماشـین مشـابه وجود دارد، برای پردازش کارها ترکیـب‌هـای متفـاوتی را مـی‌تـوان انتخاب نمود .با این اوصاف سیستم تولید سلولی مجازی با این نـوع جانمایی تا حدودی مشابه سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر است با این تفاوت که در جانمایی در نظـر گرفتـه شـده در ایـن تحقیـق برخلاف محیط کارگاهی انعطاف‌پذیر، ماشین‌های مشابه در نزدیکی یکدیگر مستقر نیستند و به صورت موازی با هم کار نمی کنند.

مدل ارائه شـده بـرای زمـان بنـدی سـلول‌هـای مجـازی از دسـته مدل‌های چند هدفه می‌باشد و برای حل ایـن مـدل جهـت بدسـت آوردن جواب بهینه از نرم افزار بهینه سازی استفاده شده اسـت. بـا ارائه مثال‌های عددی کارایی مدل ارائه شده با مدل مرجع مقایسـه شده است همچنین به منظور حل مسائل با ابعاد واقعی با اسـتفاده از الگوریتم شاخه و کرانه موجود در نرم افزار بهینه سازی GAMS مقایسه شده است.

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

- ❖ در نظر گرفتن مفروضات جدید در مساله زمان بندی سلول‌های مجازی، در مدل ارائه شده زمان‌های دسترسی به ماشین‌های تولید ی برابر صفر در نظر گرفته شده اند که می‌توان حل مساله را با در نظر گرفتن این زمان‌ها به صورت غیر صفر مورد بررسی قرار داد دلیل این امر این است که زمانی که تقاضا تغییر می‌کند یا تقاضای جدیدی وارد سیستم می‌شود لزوما همه ماشین‌ها در همان لحظه در دسترس نیستند . همچنین در نظر گرفتن خرابی ماشین‌ها مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند.

❖ در نظر گرفتن سایر شاخص‌های عملکردی برای زمان بندی در نظر گرفته شود.

با توجه به نوع مسئله زمان بندی که حل در ابعاد بزرگ مسائل، زمان زیادی را صرف می‌کند از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل این مسائل استفاده شود.

پی‌نوشت

1. Cellular Manufacturing System
2. Group Technology
3. Flexible Cellular Manufacturing System
4. Dynamic Cellular Manufacturing System
5. Virtual Manufacturing Cell
6. Distributed Layout
7. Holographic Layout
8. Flexible Job shop
9. Family Based Scheduling
10. Job Shop Layout
11. Functional Layout Problem
12. Kuhling
13. Flexible Job shop
14. Recycling
15. Preemption
16. Total Machine Load Balance
17. Total Tardiness
18. Total Traveling Cost

مراجع

[1] Drolet J, Abdulnour G, Rheault M. The cellular manufacturing evolution, Computers and Industrial Engineering, 1996, Vol. 31, pp. 139-142.

[2] Wemmerlov U, Hery NL. Cellular manufacturing in the US industry: a survey of user, International Journal of Production Research, 1989, No. 9, Vol. 27, pp. 1511-1530.

[3] Khilwani N, Ulutas BH, Islier AA, Tiwari MK. A methodology to design virtual cellular manufacturing systems, Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, No. 4, Vol. 22, pp. 533-544.

[4] Suresh NC, Slomp J, Kaparthi S. Sequence-dependent clustering of parts and machines: a fuzzy art neural network approach, International Journal of Production Research, 1999, No. 12, Vol. 37, pp. 2793-2816.

[5] Slomp J, Chowdaryb BV, Suresh NC. Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach, International Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2005, Vol. 21, pp. 273-288.

[6] Montreuil B. Fractal layout organization for job shop environments, International Journal of Production Research, 1999, No. 3, Vol. 37, pp. 501-521.

[7] Altom RJ. Costs and savings of group technology, Research report, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1978.

[8] McLean CR, Bloom HM, Hopp TH. The virtual manufacturing cell, In Proceedings of the Fourth IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology, 1982, pp. 105-111.

[9] Irani SA, Cavalier TM, Cohen PH. Virtual manufacturing cells: exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem, International Journal of Production Research, 1993, No. 4, Vol. 31, pp. 791-810.

[10] Suresh NC, Meredith JR. Coping with the loss of pooling synergy in cellular manufacturing systems, Management Science, 1994, No. 4, Vol. 40, pp. 466-483.

[11] Kannan VR, Ghosh S. Cellular manufacturing using virtual cells, International Journal of Operations and Production Management, 1996, Vol. 16, pp. 99-112.

[12] Kannan VR, Ghosh S, Avirtual. Cellular manufacturing approach to batch production, Decision Sciences, 1996, No. 3, Vol. 27, pp. 519-539.

[13] Kannan VR. A simulation analysis of the impact of family configuration on virtual cellular manufacturing, Production Planning and Control, 1997, No. 1, Vol. 8, pp. 14-24.

[14] Kannan VR. Analysing the trade-off between efficiency and flexibility in cellular manufacturing systems, Production Planning and Control, 1998, No. 6, Vol. 9, pp. 572-579.

[15] Vakharai AJ, Moily JP, Huang Y. Evaluating virtual cells and multistage flow shops: an analytical approach, The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1999, Vol. 11, pp. 291-314.

[16] Kesen SE, Das SK, Gungor Z. A mixed integer programming formulation for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs), International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2010, Vol. 47, pp. 665-678.

[17] Kesen SE, Das SK, Gungor Z. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of

virtual manufacturing cells (VMCs), International Journal of Computers & Operations Research, 2010, Vol. 37, pp. 1148-1156.

[18] Hyer NL, Brown KA. The discipline of real cells, Journal of Operations Management, 1999, No. 5, Vol. 17, pp. 557-574.

[19] Suresh NC, Slomp J. Performance comparison of virtual cellular manufacturing with functional cellular layouts in DRC settings, International Journal of Production Research, 2005, No. 5, Vol. 43, pp. 945-979.

[20] Subash Babu A, Nandurkar KN, Thomas A. Development of virtual cellular manufacturing systems for SMEs, Logistics Information Management, 2000, No. 4, Vol. 13, pp. 228-242.

[21] Nomden G, Zee DJ. Van Der. Virtual cellular manufacturing: configuring routing flexibility, International Journal of Production Economics, 2008, No. 1, Vol. 112, pp. 439-451.

[22] Nomden G, Slomp J, Suresh NC. Virtual manufacturing cells: A taxonomy of past research and identification of future research issues, International Journal o f Flexible Manufacturing Systems, 2006, No. 2, Vol. 17, pp. 71-92.