فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۲، شماره ٤، تابستان ۱٤۰۰، ص. ۸۳۱-۸۱۳
مقاله علمی-پژوهشی

الگوریتم ژنتیک دوجنسیتی برای حل مساله زمانبندی تولید و حمل ونقل در سیستم تولید چند مکانی

محمد علی بهشتی نیا (مسول مکاتبات)، دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان
Email: beheshtinia@semnan.ac.ir
اکبر نظری، کارشناس ارشد MBA، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان
پریسا فیض اللهی، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۸/۰٦/۲٦

چکیده

امروزه استفاده از سیستم های تولید چند مکانی به علت مزایای آن از قبیل کاهش هزینه های حمل و نقل، کاهش تمرکز جمعیت، آلودگی، امکانات و ترافیک در یک منطقه و سرویس دهی بهتر به مشتریان مورد توجه بسیاری از کارخانجات قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی مساله زمانبندی تولید کارگاهی منعطف توزیع شده با دو تابع هدف کیمنه سازی زمانهای تحویل سفارشات و هزینه های تولید و حمل و نقل پرداخته می شود. در این مساله فرض می شود که چند واحد تولیدی در نواحی مختلف جغرافیایی وجود دارند که هر یک از آنها دارای محیط کارگاهی منعطف هستند. هدف این مقاله تعیین نحوه تخصیص سفارشات به واحدهای تولیدی مختلف، تخصیص عملیات به ماشینهای درون هر واحد و تعیین توالی پردازش عملیات تخصیص یافته به هر ماشین به طوری که مجموع هزینه ساخت و حمل و نقل و مجموع زمان تکمیل کارها حداقل شود. این مسأله، جزء مسائل NP-Hard به شمار می‌رود و برای حل آن باید از روش‌های فرا ابتکاری استفاده نمود. در این مقاله یک الگوریتم ژنتیک، به نام الگوریتم ژنتیک دوجنسیتی که دارای دو دسته کرومزوم است برای حل مساله پیشنهاد شده است. کروزمزوم‌های دسته اول را کرومزوم‌های مذکر و کرومزوم‌های دسته دوم را مونث گویند. به منظور انجام عملگر تقاطع حتما باید یکی از والدین از دسته اول و دیگری از دسته دوم انتخاب شود. مقایسه نتایج حاصل از این الگوریتم با یک توسعه یک الگوریتم ژنتیک موجود در ادبیات موضوع نشان از کارایی بالای این الگوریتم دارد.

کلمات کلیدی: تولید چند مکانی، حمل و نقل، زمانبندی، الگوریتم ژنتیک، محیط کارگاهی منعطف و توزیع شده

۱. مقدمه

در طول دهه‌های اخیر سیستم‌های تولیدی در حال تغییر از حالت مجتمع سنتی به محیط‌های جدا از هم شامل شبکه‌های تولید چند مکانی[۱] یا چند کارخانه‌ای می‌باشند. مزیت استفاده از این سیستم ها کاهش هزینه های حمل و نقل، سرویس دهی بهتر به مشتریان، استفاده از امکانات محیطی نواحی مختلف جغرافیایی، جلوگیری از ازدحام امکانات، جمعیت و آلودگی محیط زیست در یک ناحیه، کاهش ریسک توقف کامل تولید در صورت بروز سوانح طبیعی یا غیر طبیعی می باشد. مسأله زمانبندی تولید توزیع شده (DSP[۲])، یک نوع مساله زمانبندی تولید می باشد که در آن فرض می شود محیط‌های تولیدی جدا از هم وجود دارند که سفارشات مربوط به کارخانه را تولید می کنند.در این تحقیق یکی از جامع ترین این نوع مسایل که هر واحد تولیدی دارای محیط کارگاهی منعطف هستند(FJS[۳])، بررسی می شود که مساله زمانبندی تولید کارگاهی منعطف توزیع شده ($DFJSP$[۴]) نامیده می شود. بعبارت دیگر کارخانه متشکل از چند زیر مجموع تولیدی است که هر یک از این زیر مجموعه ها واحد تولیدی منعطف (FMU[۵]) نامیده می شود. از آنجا که بسیاری از محیطهای تولیدی نظیر کارگاهی[۶]، جریان کاری منعطف[۷]، جریان کاری[۸]، ماشینهای موازی[۹] و تک ماشینه[۱۰] حالات خاصی از محیط کارگاهی منعطف می باشند، می توان گفت این حالت یکی از جامع ترین مسائل زمانبندی توزیع شده نظیر مساله زمانبندی تولید جریان کاری منعطف توزیع شده یا مساله زمانبندی تولید ماشینهای موازی توزیع شده می باشد. تاکنون تحقیقات معدودی در این حوزه انجام شده است که هیچ یک از آنها پارامترهای مرتبط با حمل و نقل را در مساله در نظر نگرفته اند. در این تحقیق هزینه و زمان حمل بین سفارشات نیز درتخصیص سفارشات به واحدهای تولیدی مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین دو تابع هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل و مجموع هزینه‌ی تولید و حمل و نقل کارها برای مساله در نظر گرفته می شود. در این مقاله یک الگوریتم ژنتیک[۱۱]، به نام الگوریتم ژنتیک دوجنسیتی[۱۲] که دارای دو دسته کرومزوم[۱۳] است برای حل مساله پیشنهاد شده است. کروزمزوم‌های دسته اول را کرومزوم‌های مذکر و کرومزوم‌های دسته دوم را مونث گویند. به منظور انجام عملگر تقاطع[۱۴] حتما باید یکی از والدین[۱۵] از دسته اول و دیگری از دسته دوم انتخاب شود.

قسمت‌های بعدی این مقاله بدین ترتیب تشکیل شده‌است که در بخش ۲ پیشینه‌ی تحقیق ارائه می‌گردد. تشریح مسأله در بخش ۳ بیان می‌شود. در بخش ٤ الگوریتم ژنتیک پیشنهادی ارائه می‌گردد و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی آورده شده‌است.

۲. مرور ادبیات تحقیق

سیستم تولید کارگاهی منعطف توزیع شده تعمیم مساله تولید کارگاهی منعطف کلاسیک می‌باشد که امکان اجرای کارهای یک پروسه‌ی تولیدی را توسط چندین واحد تولیدی منعطف مختلف فراهم می‌سازد. این نوع سیستم تولیدی، مسأله زمانبندی توزیع شده‌ی بدون انعطاف پذیری مسیر ماشین‌ها را نیز توسعه می‌دهد که کارها می‌توانند به چندین واحد تولیدی تخصیص داده شوند اما مسیر کارها در هر واحد ثابت است بدین معنی که هر عملیات کاری می‌تواند توسط یک ماشین منحصر به فرد پردازش شود [Beheshtinia & Ghazivakili, 2018].

در بسیاری از صنایع نظیر صنایع اتومبیل سازی، لوازم خانگی، صنایع غذایی از سیستم های تولید چندمکانی استفاده می شود. از سوی دیگر در نظر گرفتن جداگانه مسایل برنامه ریزی تولید و حمل و نقل منجر به بهینه عمومی نخواهد شد [Taheri & Beheshtinia, 2019]. از این رو در این تحقیق به یکپارچه سازی مسایل زمانبندی تولید و حمل و نقل در حالت تولید چند مکانی پرداخته می شود.

تحقیقات متعددی در زمینه مساله زمانبندی در زنجیره تامین مطرح شده است که در تمامی آنها هر واحد تولیدی را به صورت یک محیط تک ماشینه در نظر می گیرند

[Beheshtinia et al., 2018; Issabakhsh et al., 2018; Ullrich, 2013; بهشتی نیا و همکاران ۲۰۱۸; سلم آبادی & بهشتی نیا, ۲۰۱۹] .

در مورد مساله زمانبندی توزیع شده نیز تحقیقات مختلفی وجود دارند که هر یک برای واحدهای تولیدی، محیطهای مختلفی را در نظر گرفته اند. برخی از پژوهشگران مساله زمانبندی توزیع شده را در حالتی که هر واحد تولیدی دارای محیط جریان کاری است، بررسی نموده‌اند. لین و ژانگ [Lin & Zhang, 2016] با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ترکیبی مبتنی بر بیوگرافی[۱۶] به حل برنامه ریزی مونتاژ در محیط جریان کاری توزیع شده با تابع هدف کمینه سازی بازه ساخت[۱۷] انجام دادند. رای فای و همکاران [Rifai et al., 2016] یک مدل برای مساله برنامه ریزی جریان کاری توزیع شده با سه تابع هدف کمینه سازی بازه ساخت، هزینه و میانگین دیرکرد را ارائه کردند. آنها همچنین یک الگوریتم جستجوی همسایگی گسترده با چند هدف را برای حل مساله پیشنهاد دادند. برگایو و همکاران [Bargaoui et al., 2017] یک الگوریتم فراابتکاری به نام واکنش شیمیایی مصنوعی برای حل مساله زمانبندی جریان کاری توزیع شده ارائه کرده اند. لین و همکاران [Lin et al., 2017] با استفاده از یک الگوریتم به نام الگوریتم ابتکاری تقویت شده بازخوانی جستجو[۱۸] به حل مساله زمانبندی جریان کاری توزیع شده پرداختند. دنگ و وانگ [Deng & Wang, 2017] یک الگوریتم ممتاز رقابتی[۱۹] را برای حل مساله زمانبندی جریان کاری توزیع شده ی چند هدفه با توابع هدف برای به حداقل رساندن بازه ساخت و زمان دیرکرد پیشنهاد کرده اند. آنها از دو جمعیت استفاده کردند، که هر کدام برای یک تابع هدف می‌باشد.

همچنین برخی از تحقیقات به بررسی مسائل زمانبندی توزیع شده در حالتی که هر یک از واحدهای تولید داری محیط کارگاهی باشند، پرداخته اند. آذب و نادری [Azab & Naderi, 2014] از یک مدل برنامه ریزی خطی مختلط ترکیبی برای مساله زمانبندی کارگاهی توزیع شده ارائه نمودند. آنها با استفاده از ٦ الگوریتم اکتشافی مسال را حل کردند و نتایج خود را با یکدیگر مقایسه کردند. در یک مطالعه دیگر [Naderi & Azab, 2014]، آنها این مساله را با استفاده از دو مدل برنامه ریزی خطی مختلط در قالب متغیرهای مبتنی بر توالی[۲۰] و مبتنی بر موقعیت[۲۱] فرموله کردند. هسو و همکاران [Hsu et al., 2016] یک مکانیزم مذاکره با هدایت شده با محدودیت مبتنی بر عامل فازی[۲۲] به منظور حل مساله زمانبندی کارگاهی توزیع شده ارائه نمودند.

علاوه بر این، برخی از تحقیقات به بررسی مساله زمانبندی کارگاهی منعطف توزیع شده پرداخته اند. دیجوانی و پازلا [De Giovanni & Pezzella, 2010] یک الگوریتم ژنتیک توسعه یافته برای حل مساله DFJS ارائه نموده اند که تخصیص سفارشات به واحدهای تولیدی، تخصیص عملیات به ماشین الات و اولویت پردازش سفارشات را تعیین می کند. با هدف به دست آوردن نتایج با کیفیت خوب در یک زمان کوتاه، ضیایی [Ziaee, 2014] مساله DFJS را با استفاده از یک الگوریتم سریع و ساده بر اساس یک رورویکرد سازنده حل نموده است.

لیو و همکاران [Liu et al., 2014] یک الگوریتم ژنتیک که دارای ساختار کدینگ اصلاح شده جوابها به کرومزوم ها است را برای حل مساله DFJS پیشنهاد داده اند. چانگ و لیو[Chang & Liu, 2015] یک الگوریتم زنتیک ترکیبی برای حل مساله DFJS پیشنهاد نمودند که از روش تاگوچی برای بهینه سازی پارامترهای الگوریتم ژنتیکی استفاده می کند. آنها همچنین یک روش کدگذاری جدید ارائه دادند و اپراتورهای جهش و متقاطع مختلف را برای تنوع کروموزوم ها استفاده کردند. بهشتی‌نیا و همکاران [Beheshtinia et al., 2018] توسعه ای از الگوریتم ژنتیک به نام RGGA به منظور حل مساله یکپارچگی زمانبندی تولید و حمل‌ونقل در حالت چندکارخانه ای ارایه دادند که از مجموعه های الگوهای خوب

و بد در فرایند حل استفاده می کند. ناجیان و بهشتی‌نیا از الگوریتم RGGA جهت حل مساله مذکور در حالتی که همزمان از رویکردهای VRP و Cross-dock جهت حمل و نقل به کار گرفته‌شود، استفاده نمودند. برومند و بهشتی نیا[Borumand & Beheshtinia, 2018]یک الگوریتم ترکیبی جدید با ادغام الگوریتم ژنتیک و روش VIKOR جهت حل مساله یکپارچه سازی مساله تولید و حمل و نقل در زنجیره تامین ارایه نمودند. بهشتی‌نیا و قاسمی [Beheshtinia et al., 2018] یک الگوریتم فراابتکاری جدید با نام (MLCA) جهت حل مساله مذکور ارایه نمودند که دارای دو عملگر تمرین و مسابقه است و از فرایند مسابقات قهرمانی الهام گرفته شده است.

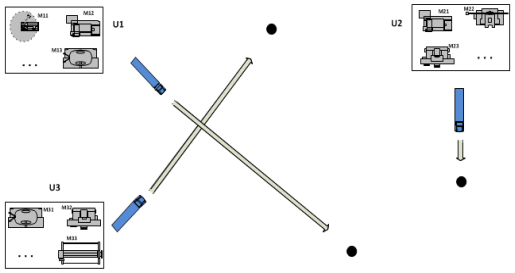
هیچ یک از تحقیقات مذکور پارامترهای مرتبط با حمل و نقل نظیر زمان و هزینه حمل و نقل را در مساله در نظر نگرفته اند. نزدیکترین مساله در ادبیات موضوع به مساله مورد بررسی در این تحقیق، مساله در نظر گرفته شده توسط دیجوانی و پازلا [De Giovanni & Pezzella, 2010] که به پارامترهای حمل و نقل در آن توجهی نشده است. در این تحقیق هزینه و زمان حمل بین سفارشات نیز درتخصیص سفارشات به واحدهای تولیدی مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین دو تابع هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل و مجموع هزینه‌ی تولید و حمل و نقل کارها برای مساله در نظر گرفته می شود. در واقع نوآوریهای این مقاله عبارتند از، در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط با حمل و نقل نظیر زمان تولید و حمل و نقل در مسأله زمانبندی سیستم تولید کارگاهی منطعف و توزیع شده و همچنین ارائه یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک دو جنسیتی برای حل مساله که در آن دو دسته کرومزوم مونث و مذکر وجود دارد.

۳. تشریح مساله زمانبندی تولید کارگاهی منعطف و توزیع شده

مسأله تولید کارگاهی منعطف و توزیع شده بدین صورت بیان می‌شود که یک مجموعه از کارهای مستقل از هم وجود دارد $J=\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ که بایستی توسط مجموعه‌ای $U=\{U^1, U^2, \dots, U^q\}$از واحدهای تولیدی منعطف مورد پردازش قرار گیرند. باید توجه کردکه یک واحد تولیدی منعطف نشان دهنده-ی یک سلول در یک سیستم سلول‌های تولیدی منعطف می‌باشد برای هر کارi و واحد تولیدی منعطفl یک فاصله d_i^l تعریف می‌شود. d_i^l زمان حمل کار iام به مقصد خود در صورت تخصیص به کارخانه lام می‌باشد. هر واحد تولیدی منعطف l ام با یک مجموعه از ماشین‌های $M^l=\{M^{l1}, M^{l2}, \dots, M^{lk}, \dots, M^{lm^l}\}$ تجهیز شده‌است. هر سفارش iام شامل یک مجموعه سفارشی(توالی) از عملیات است و می‌تواند توسط زیرمجموعه‌ای از $\overline{U_i}\subset U$ واحدهای تولیدی منعطف مورد پردازش قرار گیرد. اگر یک کار به یک واحد تولیدی منعطف تخصیص داده شد، بایستی کل عملیاتش در همان واحد تولیدی منعطف پردازش گردد. ممکن است توالی متفاوت برای هر کار در هر واحد تولیدی منعطفی که قادر به پردازش آن کار است، تعریف شود. ترتیب عملیات برای کار iام یعنی J_i که در واحد lام (U^l) پردازش می‌شود بصورت $(O_{i1}^l, O_{i2}^l, \dots, O_{ij}^l, \dots, O_{in_i^l}^l)$ است. واحدهای تولیدی منعطف مختلف، ممکن است از تکنولوژی‌های تولید متفاوت استفاده نموده و در نتیجه هر واحد تولیدی منعطف ممکن است تعداد متفاوتی از عملیات برای یک کار واحد تعریف نمایند.

اگر کار iام به U^l تخصیص داده شود، هر عمل j (که O_{ij}^l نامیده می‌شود) بایستی بدون تداخل روی یک ماشین k پردازش شود. ماشین k باید از بین زیرمجموعه‌ای از ماشین‌های موجود در U^l انتخاب شود که مجموعه $M_{ij}^l\subset M^l$ نامیده می‌شود. زمان پردازش هر عملیات به هر دو عامل واحد تولیدی منعطف انتخابی و ماشین انتخابی بستگی دارد و با p_{ij}^{lk} نشان داده می-شود. زمان تکمیل یک کار برابر با زمان تکمیل آخرین عملیات آن کار بعلاوه d_i^l است. عملیات بایستی طبق ترتیب تعیین شده

توسط واحد تولیدی منعطف انتخابی، یکی پس از دیگری و بدون هم‌پوشانی پردازش شوند. هزینه‌ی پردازش عملیات مربوط به کارهای مختلف(CO_{ijkl}) توسط ماشین‌ها در هریک از واحدهای تولیدی متفاوت بوده و برای انتقال هر یک از سفارشات تکمیل شده از واحدهای تولیدی منعطف به محل کارخانه‌ی اصلی یک هزینه ترانزیت(CO_{il}^{T}) نیز صرف می‌شود. بنابراین هزینه کل یک سفارش با مجموع هزینه‌های پردازش عملیات و هزینه ترانزیت مربوط به آن سفارش برابر است. به منظور تبیین بهتر مساله، یک نمونه از سیستم تولیدی منعطف و توزیع شده در جدول ۱ نشان داده شده‌است. این سیستم از سه واحد تولیدی منعطف تشکیل شده‌است که بایستی پنج سفارش را تکمیل نمایند. واحدهای تولید اول و دوم دارای ۳ ماشین و واحد تولیدی سوم دارای ۲ ماشین جهت پردازش عملیات مربوط به سفارشات می‌باشند. واحدها طوری مکان‌یابی شده‌اند که زمان حمل بین واحدها و کارخانه مرکزی(d_i^l) در تمامی سفارشات یکسان است امّا هریک از واحدها دارای هزینه‌ی ترانزیت(CO_{il}^{T}) متفاوت برای سفارشات گوناگون می‌باشند. در خانه‌هایی از این جدول که مربوط به ستون‌های ماشین‌های هریک از واحدهای تولیدی منعطف می‌باشند، دو عدد آورده شده است. عدد ردیف اول زمان پردازش عملیات و عدد ردیف دوم هزینه پردازش این عملیات را توسط ماشین درج شده در ستون آن خانه از جدول ۱، نشان می‌دهد. اگر خانه‌های مذکور با علامت "–" پر شده باشند بیانگر این مطلبند که ماشین مربوطه توانایی پردازش آن عملیات را ندارد. به عنوان نمونه ماشین M^{32} واحد U_3 قادر به پردازش عملیات O_{12} کار J_1 نمی‌باشد. هدف تعیین نحوه تخصیص سفارشات به واحدهای تولیدی، تخصیص عملیات به ماشینهای درون هر واحد و تعیین توالی پردازش عملیات تخصیص یافته به هر ماشین به منظور کمینه‌سازی همزمان دو تابع هدف مجموع هزینه ساخت و حمل و نقل و مجموع زمان تکمیل کارها است. یک جواب موجه نیز در این جدول نشان داده شده است که در آن شکل ۲ نشان دهنده جوابی است که در آن سفارشات J_1 و J_3 توسط واحد U^1، J_2 و J_4 توسط U^2 و سفارش J_5 در واحد U^3 پردازش می‌شوند. همچنین عملیات اول تا سوم سفارش ۱ به ترتیب به ماشینهای دوم، اول و سوم واحد تولیدی U^1 اختصاص یافته اند.



شکل ۱. شماتیک یک سیستم تولید کارگاهی منعطف و توزیع شده

٤. الگوریتم حل

٤-١ الگوریتم ژنتیک

نگاهی به ادبیات موضوع نشان می دهد که بسیاری از تحقیقات از الگوریتم ژنتیک به منظور حل مساله استفاده نموده اند از این رو در این تحقیق نیز از الگوریتم ژنتیک جهت حل مساله استفاده شده است. الگوریتم‌های ژنتیک روش‌های انطباقی هستند که برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم‌ها بر اساس تغییرات بیولوژیکی می‌باشند[Hosseini-Motlagh et al., 2015]. در این الگوریتم، هر جواب به صورت یک کرموزوم نشان داده می‌شود. ابتدا یک جمعیت اولیه از کرومزوم‌ها در نظر گرفته می‌شود، سپس در فرایند حل مساله توسط دو عملگر تقاطع و جهش کرومزومهای جدیدی به جمعیت اولیه اضافه شده و سپس طبق اصول انتخاب طبیعی مثل بقا شایسته ترین‌ها تعدادی از آنها جهت رفتن به نسل بعد انتخاب می‌شوند. در عمل تقاطع دو کرومزوم به عنوان کرومزوم والد انتخاب شده و از ترکیب آنها کرومزوم (های) فرزند[۲۳] بوجود می‌آید.

جدول ۱. یک نمونه ساده از مساله سیستم تولید کارگاهی منعطف و توزیع شده با در نظر گرفتن دو بعد زمان و هزینه

FMU		U_1						U_2						U_3					
سفارش	عملیات	CO_{i1}^T	d_i^1	M^{11}	M^{12}	M^{13}	CO_{i2}^T	d_i^2	M^{21}	M^2	M^{23}	CO_{i3}^T	d_i^3	M^{31}	M^{32}
J_1	O_{11}	۵	۳	۲ ٤	۱ ۳	۳ ۳	٦	۳	۳ ٤	_ _	۲ ٦	٤	۳	۲ ۵	٤ ۳
	O_{12}			۳ ۵	۵ ۳	_ _			۳ ٦	۳ ٦	۳ ۷			۳ ۵	_ _
	O_{13}			۳ ٤	۳ ۵	۲ ۵			۲ ۵	۱ ۸	_ -			_ _	۳ ۷
J_2	O_{21}	۷	۳	٤ ٤	٦ ۲	۲ ٦	٤	۳	۵ ۳	٤ ٦	۵ ۲	۲	۳	٤ ٦	۵ ۷
	O_{22}			۳ ۷	۲ ۹	۷ ۵			۵ ٦	٤ ۸	۳ ۹			٤ ۷	۳ ۹
J_3	O_{31}	٤	۳	۳ ۵	۱ ۸	٤ ٤	٦	۳	۳ ۹	٦ ٦	٤ ۷	٦	۳	٤ ۷	۳ ۸
	O_{32}			_ _	۳ ٦	٤ ۵			۵ ۷	۳ ۱ ۱	٤ ۹			۲ ۹	۲ ۱۰
	O_{33}			٤ ۷	٤ ۸	۲ ۱۱			_ _	_ _	_ _			۲ ۱۲	۳ ۹
J_4	O_{41}	٦	۳	۵ ۷	٤ ۹	۵ ٦	٤	۳	٦ ۷	۳ ۱ ۰	۵ ۸	۷	۳	۳ ۱۱	٤ ۷
J_5	O_{51}	۸	۳	_ _	۵ ۹	۸ ٦	_	_	_ _	_ _	_ _	۹	۳	۵ ۸	٤ ۱۰
	O_{52}			۲ ۸	۱ ۱۱	۲ ۹			_ _	_ _	_ _			۲ ٦	۳ ٤

٤-۲ الگوریتم ژنتیک دو جنسیتی

الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده در این تحقیق، یک الگوریتم ژنتیک دو جنسیتی است. به این صورت که برای **هر** کرومزوم یک جنسیت در نظر گرفته می‌شود و جمعیت اولیه[۲٤] به دو گروه مذکر و مونث تقسیم می‌گردد. نحوه‌ی اجرای این استراتژی بدین صورت است که ابتدا جنسیت هر یک از کرومزومهای اولیه به صورت تصادفی و با احتمال یکسان تعیین می‌شود.گام های این الگوریتم به صورت زیر می‌باشد:

گام ۱- تعداد ***popsize*** کرومزم تصادفی به عنوان جمعیت اولیه ایجاد کنید و به هر یک از آنها یک جنسیت نسبت دهید.

گام ۲- به تعداد ***cross_rate*popsize*** عمل تلفیق را انجام دهید که ***cross_rate*** نرخ تلفیق[۲۵] می‌باشد. در هر

بار عمل تلفیق یک کرومزوم از جمعیت کرومزومهای مذکر و دیگری از جمعیت کرومزومهای مونث انتخاب می‌شود. به کرومزوم حاصل از عملگر تلفیق به تصادف و با احتمال یکسان یک جنسیت مذکر یا مونث تخصیص دهید.

گام ۳- به تعداد ***mut_rate*popsize*** عمل جهش را انجام دهید که ***mut_rate*** نرخ جهش[۲۶] می‌باشد. به کرومزوم حاصل از عملگر جهش به تصادف و با احتمال یکسان یک جنسیت مذکر یا مونث تخصیص دهید.

گام ٤- اگر معیار خاتمه[۲۷] محقق شده است، الگوریتم را خاتمه دهید. در غیر این صورت به گام ۵ بروید.

گام ۵- با استفاده از عملگر رتبه بندی[۲۸]، کرومزوم‌های شایسته تر را به نسل بعدی منتقل کنید، به نحوی که نیمی از کرومزمهای نسل بعد مذکر و نیمی دیگر مونث باشند. سپس مجددا به گام ۲ بازگردید.

شبه کد الگوریتم ژنتیک به کاررفته در این تحقیق به صورت زیر ارائه می‌شود:

- Read Problem and Set Parameters

- Create [*popsize*/2] random male chromosomes and (*popsize*-[*popsize*/2]) random female chromosome as initial population

- While termination criteria not met

    - Choose two chromosome with difeerent gender type randmly
    - Perform crossover operator between the selected chromosomes and consider a gender for the offspring chromosomes
    - Choose a chromosome randmly perform the mutation operator and a gender for the offspring chromosome
    - Perform Selection operator between male chromosomes and choose [*popsize*/2] chromosomes randomly
    - Perform Selection operator between female chromosomes and choose (*popsize*-[*popsize*/2]) chromosomes randomly

- End while

٤-۲-۱ کدگذاری[۲۹] و رمزگشائی[۳۰] کرومزوم‌ها

در مسأله $DFJS$ که سفارشات می‌توانند بین چندین واحد تولیدی مختلف توزیع شوند و در هر واحد نیز عملیات می‌توانند به چندین ماشین مختلف تخصیص یابند،کرموزوم‌ها بایستی شامل اطلاعاتی همچون واحد تولیدی تخصیص داده شده به هر سفارش، ماشین اختصاص یافته به هر عملیات و توالی پردازش سفارشات تخصیص یافته به هر عملیات باشد.

به منظور کدگذاری هر جواب به یک کرومزوم از ۳ رشته استفاده شده‌است. طول رشته اول برابر تعداد سفارشات می باشد. اعداد درون این رشته به تصادف انتخاب شده و نشان دهنده واحد تولیدی متناظر با هر کار می‌باشند (شکل ۲). طول رشته های دوم و سوم برابر تعداد کل عملیات کارها می‌باشد. در رشته دوم به تعداد عملیات هر کار ژن تکراری وجود خواهد داشت. مثلا اگر سفارش ۱ ، سه عملیات داشته باشد در رشته اول، عدد ۱ سه بار تکرار خواهد شد. اولین عدد ۱ نشاندهنده عملیات O_{11} ، دومین عدد ۱ نشاندهنده O_{12} و سومین عدد ۱ نشاندهنده عملیات O_{13} هستند. به همین صورت شماره هر کار به تعداد عملیاتش تکرار می‌شود و این شماره‌ها به صورت تصادفی در رشته دوم پراکنده می‌شوند. اعداد داخل رشته سوم نیز مبین شماره‌ی ماشینی است که عملیات مذکور را باید مورد پردازش قرار دهد. اعداد این رشته به تصادف و بر مبنای واحد تولیدی انتخاب شده در رشته اول تعیین می‌شوند.

شکل ۲ نشان دهنده جوابی است که در آن سفارشات J_1 و J_3 توسط واحد U^1، J_2 و J_4 توسط U^2 و سفارش J_5 در واحد U^3 پردازش می‌شوند. رشته دوم بیانگر توالی سفارشات می‌باشد.

شکل بعدی نشان دهنده‌ی نمودار گانت[۳۱] کرومزوم قبلی می‌باشد که بیانگر نحوه کدگشائی کرومزوم از منظر زمانی نشان می‌دهد و مجموع زمان تکمیل سفارشات از آن قابل محاسبه است.

کار	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
واحد تولیدی	۱	۲	۱	۲	۳

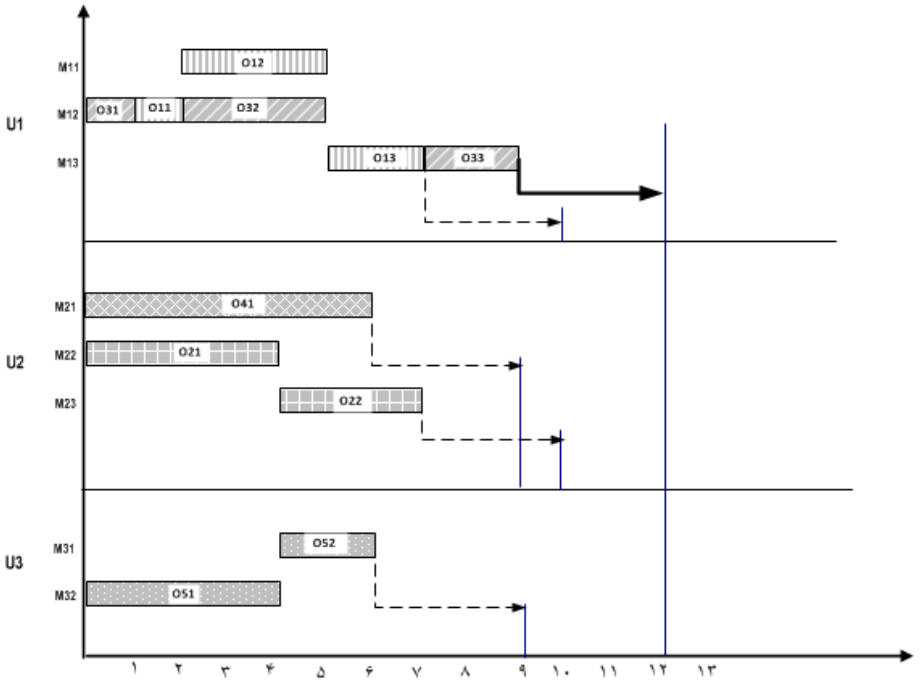
عملیات	۳	۲	۲	۱	۵	٤	۱	۵	۱	۳	۳
ماشین	۲	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۲	۳

شکل۲. یک نمونه از کرمزوم

کار	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
واحد تولیدی	U_1	U_2	U_1	U_2	U_3

عملیات	O_{31}	O_{21}	O_{22}	O_{11}	O_{51}	O_{41}	O_{12}	O_{52}	O_{13}	O_{32}	O_{33}
ماشین	M_{12}	M_{22}	M_{23}	M_{12}	M_{32}	M_{21}	M_{11}	M_{31}	M_{13}	M_{12}	M_{13}

شکل۳. کد گشایی کرمزوم



شکل٤. گانت چارت کرومزوم

جدول۲. جزئیات زمان و هزینه‌ی تکمیل تک تک سفارشات

سفارش	زمان پردازش	زمان حمل	زمان کل	هزینه پردازش	هزینه حمل	هزینه کل
J_1	۷	۳	۱۰	۱۷	۵	۲۲
J_2	۷	۳	۱۰	۱۵	٤	۱۹

هزینه کل	هزینه حمل	هزینه پردازش	زمان کل	زمان حمل	زمان پردازش	سفارش
۲۹	٤	۲۵	۱۲	۳	۹	J_3
۱۱	٤	۷	۹	۳	٦	J_4
۲۵	۹	۱٦	۹	۳	٦	J_5
۱۰٦	مجموع هزینه ها		۵۰	مجموع زمانهای تکمیل		

به منظور تبدیل هر دو تابع هدف به یک تابع هدف به هر یک از آنها یک ضریب اختصاص یافته است که نشان دهنده اهمیت آن تابع هدف است. اندازه جمعیت اولیه یکی از پارامترهای الگوریتم ژنتیک است که با Pop-Size نشان داده می‌شود.

٤-۲-۲ عملگر انتخاب[۳۲] کرومزوم

از بین استراتژی‌های قابل اجرا برای عملگر انتخاب از رتبه‌بندی خطی استفاده شده‌است De Giovanni and) Pezzella 2010) استراتژی رتبه‌بندی خطی افراد(جواب‌ها) را بر اساس مقدار مجموع زمان تکمیل و هزینه کل، بصورت نزولی مرتب می‌کند (از بدترین فرد تا بهترین فرد). اگر $\sigma_i \in \{1, 2, \ldots, N\}$ موقعیت فرد iام باشد، احتمال انتخاب آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$p_i = \frac{2\sigma_i}{N(N+1)},\ \text{i= 1, 2 , . . ., N.}$$

مثلا احتمال انتخاب بهترین کرومزوم $\left(\frac{2}{N+1}\right)$ دو برابر احتمال انتخاب کرومزوم میانی $\left(\frac{1}{N+1}\right)$ می‌باشد. پس از آنکه احتمال انتخاب کرموزوم ها تعیین گردید، یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می شود. سپس کرموزوم ها (که به شکل صعودی مرتب شده اند) از اول بررسی شده و اولین کروموزوم که توزیع تجمعی آن بیشتر یا مساوی عدد تولید شده باشد، انتخاب می گردد. جستجو به سمت نواحی محتمل‌تر حرکت خواهد نمود در حالیکه تنوعی از جواب‌ها را در مخزن کرومزوم‌ها[۳۳] تضمین کرده و از همگرائی زودرس الگوریتم جلوگیری می‌نماید. (همانطور که پیش‌تر هم اشاره شد، تابع هدف کلی مسأله دارای دو جزء زمان و هزینه می‌باشد که هر یک از آنها دارای یک ضریب وزنی بوده به شرطی که مجموع اوزان برابر یک می‌باشد. این ضریب از پارامترهای ورودی مسأله می‌باشد و این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان در شرایط مختلف، اهمیت زمان و هزینه را در مسأله زمانبندی تغییر داد.)

به منظور انتقال کرومزوم‌ها به نسل بعد عملگر انتخاب به صورت مستقل روی جمعیت کرومزوم‌های مذکر و مونث صورت می‌پذیرد. به نحوی که نیمی از کرومزوم‌های نسل بعد مذکر و نیمی دیگر مونث باشند و به نوعی توازن جنسیت کرومزوم‌ها در نسل بعد حفظ شود.

٤-۲-۳ عملگر تقاطع دو جنسیتی

عملگرهای تقاطع ژن‌های دو کرومزوم انتخاب شده را با هم بازترکیب نموده تا کرومزوم جدید را تولید نمایند. در این پژوهش قبل از اینکه دو کرومزوم برای انجام عمل تقاطع انتخاب شوند، جمعیت اولیه به دو گروه مذکر و مونث تقسیم می‌گردد. نحوه‌ی اجرای این استراتژی بدین صورت است که ابتدا جنسیت هر یک از کرومزومهای اولیه به صورت تصادفی و با احتمال یکسان تعیین می‌شود. بر خلاف الگوریتم‌های معمولی که در انتخاب والدین جهت انجام عمل تقاطع محدودیتی وجود ندارد، در این الگوریتم به منظور انجام عمل تقاطع حتما یک والد باید از کروزوم‌های مذکر و دیگری از کرومزومهای مونث انتخاب شود.

به منظور انجام عمل تقاطع از روش یکنواخت استفاده شده است. به این منظور از گام‌های زیر استفاده می‌شود:

گام ۱- دو کرومزوم والد با نام‌های $P1$ و $P2$ را به تصادف از جمعیت فعلی انتخاب کنید.

گام ۲- یک آرایه به نام ماسک[۳٤] و به طول ۳ که دارایه های آن به تصادف مقادیر صفر و یک را به خود اختصاص داده-اند، ایجاد کنید.

گام ۳- کرومزوم فرزند را به صورت زیر ایجاد کنید:

گام ۳-۱- اگر درایه اول آرایه ماسک برابر ۱ باشد، رشته اول (تخصیص به واحدهای تولیدی) در کرومزوم فرزند اول را از $P1$ و در غیر اینصورت اینصورت از $P2$ منتقل کنید.

گام ۳-۲- اگر درایه دوم آرایه ماسک برابر ۱ باشد، رشته دوم (تعیین توالی عملیات) در کرومزوم فرزند اول را از $P1$ و در غیر اینصورت اینصورت از $P2$ منتقل کنید.

گام ۳-۳- اگر درایه سوم آرایه ماسک برابر ۱ باشد، رشته سوم (تخصیص ماشین‌آلات) در کرومزوم فرزند اول را از $P1$ و در غیر اینصورت اینصورت از $P2$ منتقل کنید.

گام ٤- عناصر رشته سوم را در فرزند ایجاد شده در نظر بگیرید. از ابتدای رشته شروع کنید. اگر تخصیص اختصاص یافته به عملیات مربوطه نادرست است، یک عدد تصادفی مجاز ایجاد کرده و به درایه مذکور تخصیص دهید. در غیر اینصورت به عدد قبلی را حفظ کرده و به گام بعد بروید. پس از انجام عمل تلفیق ممکن است در رشته سوم که مربوط به تخصیص ماشین‌آلات به عملیات است، تخصیص‌های نابجایی شکل گیرد که گام ٤ اقدام به اصلاح آن می‌کند.

کار	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
واحد تولیدی	۱	۲	۱	۲	۳

عملیات	۳	۲	۲	۱	۵	٤	۱	۵	۱	۳	۳
ماشین	۲	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۲	۳

کار	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
واحد تولیدی	۲	۱	۱	۳	۱

عملیات	۱	۵	۲	۳	۲	۳	۱	۵	۱	٤	۳
ماشین	۱	۲	۲	۱	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲

آرایه ماسک	۰	۱	۱

کار	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
واحد تولیدی	۲	۱	۱	۳	۱

عملیات	۳	۲	۲	۱	۵	٤	۱	۵	۱	۳	۳
ماشین	۲	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۲	۳
رشته ماشین اصلاح شده	۲	۲	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۳

شکل۵. نمونه ای از عمل تقاطع

٤-۲-٤ عملگرهای جهش

به منظور انجام عمل جهش از روش جابجایی استفاده می‌شود. به این منظور از گام‌های زیر استفاده می‌شود:

گام ۱- یک کرومزوم از جمعیت را به تصادف انتخاب کنید.

گام ۲- کرومزوم جدید را به صورت زیر ایجاد کنید:

گام ۲-۱- دو ژن از رشته اول (تخصیص به واحدهای تولیدی) کرومزوم مربوطه را به تصادف انتخاب و جای آنها را با یکدیگر تعویض کنید.

گام ۲-۲- دو ژن از رشته اول (تعیین توالی عملیات) کرومزوم مربوطه را به تصادف انتخاب و جای آنها را با یکدیگر تعویض کنید.

گام ۲-۳- دو ژن از رشته اول (تخصیص ماشین آلات) کرومزوم مربوطه را به تصادف انتخاب و جای آنها را با یکدیگر تعویض کنید.

گام ۳- عناصر رشته سوم را در فرزند ایجاد شده در نظر بگیرید. از ابتدای رشته شروع کنید. اگر تخصیص اختصاص یافته به عملیات مربوطه نادرست است، یک عدد تصادفی مجاز ایجاد کرده و به درایه مذکور تخصیص دهید. در غیر اینصورت به عدد قبلی را حفظ کرده و به گام بعد بروید.

معیار توقف الگوریتم رسیدن تعداد تکرار الگوریتم به یک تعداد از پیش تعیین شده به نام ***Num-Ter***می‌باشد که یکی از پارامترهای الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

به منظور تعیین پارامترهای الگوریتم پیشنهادی برای هر یک از پارامترها سه سطح در نظر گرفته شد و پس از تکرارهای متعدد، سطوحی که در آنها الگوریتم نتایج بهتری ارائه می‌نماید، شناسایی شد. نتایج نشان داد که مقادیر ۱۰۰ برای ***Pop-Size***، مقدار ۱ برای ***Cross-Rate***، مقدار ۰,۰۵ برای ***Mut-Rate*** و مقدار۲۰۰۰ برای پارامتر ***Num-Ter*** مناسب تشخیص داده شدند.

۵. ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده، عملکرد آن را با الگوریتم ارائه شده توسط دیجوانی و پازلا [De Giovanni & Pezzella, 2010] مقایسه نموده‌ایم. به منظور انجام مقایسه چند مثال تصادفی ایجاد شده است و نتایج به دست آمده از هر دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اعتبار مقایسات در صورتیکه نتایج به دست امده از دو الگوریتم از حل مسایل متعدد با طیفی متنوع مورد مقایسه قرار گیرد بیشتر خواهد شد.برای بررسی بهتر عملکرد حالات بهتر مسایل متنوعی با ایجاد مقادیر مختلفی برای پارامترهای آن ایجاد شود. به همین منظور سطوحی مانند بالا، پایین و متوسط برای مساله و به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳، $U[a,b]$ نشادهنده یک عدد تصادفی از بازه بین دو عدد a و bاست. توزیع های زمان و هزینه در سه حالت ترکیب شده‌اند تا نشان دهنده سه وضعیت مختلف باشند. در وضعیت اول

هزینه‌های تولید و حمل بیشتر از زمانهای تولید و حمل هستند. در حالت دوم یک نوع توازن بین هزینه‌ها و زمانها وجود دارد. در حال سوم هزینه ها کمتر از زمانها هستند. از ترکیب تمام این حالات (۲*۲*۳*۳*۳) تعداد ۱۰۸ مساله تصادفی ایجاد می شود.

جدول ۳. مشخصات پارامترهای سه وضعیتی

نام پارامتر		حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
تعداد واحدهای تولیدی		۱ (کم)	۲ (متوسط)	٤ (زیاد)
تعداد سفارشات		۲ (کم)	۵ (متوسط)	۲۰ (زیاد)
زمان – هزینه	زمان	U[1,20]	U[20,40]	U[40,60]
	هزینه	U[40,60]	U[20,40]	U[1,20]
تعداد ماشین		U[1,5]		U[6,10]
تعداد عملیات		U[1,5]		U[6,10]

جداول ٤، ۵ و ٦ به مقایسه جوابهای به دست امده از هر دو الگوریتم به ازای هر یک از حالات پارامترهای مساله می‌پردازد. سه حالت برای وزن توابع هدف در نظر گرفته شده است. در حالت اول وزن تابع هدف اول کمتر از حالت دوم در نظر گرفته شده است. در حالت دوم وزن هر دو تابع هدف یکسان در نظر گرفته شده است. در حالت سوم وزن تابع هدف اول بیشتر از تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است.

در جدول ٤ مقدار وزن تابع هدف اول برابر ۰,۲ و وزن تابع هدف دوم برابر ۰,۸ در نظر گرفته شده است.

جدول ٤. خروجی‌های در الگوریتم با در نظر گرفتن $\alpha = 0.2$

پارامتر	سطح	NWR	NER	NBR	الگوریتم پیشنهادی		الگوریتم دیجوانی و پازلا	
					میانگین جواب	میانگین زمان حل	میانگین جواب	میانگین زمان حل
تعداد واحدها	کم	۱۳	٤	۱۹	۱۱٦۹,۷۱	۷۸٦,٤۲	۱۱۷٥,۱	۷۹۷,۳
	متوسط	٤	٦	۲٦	۸۲۰,٥	٦۹۳,٦۹	۸٦۱,۳	۷۰۳,٥۲
	زیاد	۰	۲٥	۱۱	٤٦۱,۱٤	٦٥۷,۸	٤٦۱,۷۸	٦٥۳,٦٥
تعداد سفارش	کم	۱	۲۱	۱٤	۲٥۲,۹٥	٥۸۹,۷۸	۲٥٤,٦۸	٦۰۳
	متوسط	۱۳	۸	۱٥	٥۲۳,٤۷	٦۹٤,٥۲	٥۲۳,٦۳	٦٥۳,۷۳
	زیاد	۳	٦	۲۷	۱٦۷٤,۹۳	۸٥۳,٦۱	۱۷۱۹,۸۷	۸۹۷,۷٤
زمان و هزینه پردازش	حالت ۱	۷	۱۳	۱٦	۱۲۲۳,۲۱	٦۸۳,۸	۱۲۷٥,٤۹	۷۰۰,٤۹
	حالت ۲	۹	۱۰	۱۷	٦۹۳,۷٦	٦٦۱,٦	٦۷٤,۸	٦٦۸,۷۸
	حالت ۳	۱	۱۲	۲۳	٥۳٤,۳۸	۷۹۲,٥۱	٥٤۷,۸۹	۷۸٥,۲
تعداد ماشین	کم	٦	۱۳	۳٥	۹۹۱,۲۹	۹۲٤,۱۹	۱۰۲۲,٥۱	۹۳۰,۳۸
	زیاد	۱۱	۲۲	۲۱	٦٤۲,۹٤	٥۰۱,۰۸	٦٤۲,۹٤	٥۰٥,۹۳
تعداد عملیات	کم	۱۰	۱۹	۲٥	٥۸۲,٥۹	٤۳۷,۹٤	٥۹۳,۲	٤٤۲
	زیاد	۷	۱٦	۳۱	۱۰٥۱,٦٤	۹۸۷,۳۳	۱۰۷۲,۲٥	۹۹٤,۳۱
	کل نتایج	۱۷	۳٥	٥٦	۸۱۷,۱۱٥	۷۱۲,٦۳٥	۸۳۲,۷۲٥	۷۱۸,۱٥٥

جدول ٥. خروجی‌های در الگوریتم با در نظر گرفتن α=0.5

پارامتر	سطح	NWR	NER	NBR	الگوریتم پیشنهادی		الگوریتم دیجوانی و پازلا	
					میانگین جواب	میانگین زمان حل	میانگین جواب	میانگین زمان حل
تعداد واحدها	کم	۳	۱۹	۱٤	۱۲۰۷,٦	۷٥٥,۳	۱۲۸۳,٥۷	۷٦۸,٤۸
	متوسط	۱۰	٦	۲۰	۷٦۰,۸٦	٦۹۷,۸	۷۷۰,۷۱	٦۷۹,۸٥
	زیاد	۱۰	۱٥	۱۱	٤۲۹,۱۳	٦۲۸,٦٥	٤۲۹,۱۳	٦٤۲,٦۸
تعداد سفارش	کم	۰	۳۲	٤	٤۳۹,۹٥	٦۲٤,٦۸	٤۳۹,۹٥	٦۰۷,٦۸
	متوسط	۱۱	۳	۲۲	۷۲۰,۱۷	٦۳۷,۳۳	۷۳۱,٥٦	٦٥۱,۲۷
	زیاد	۱۲	٥	۱۹	۱۲۳۷,٤۷	۸۱۹,۷۳	۱۳۱۱,۹۱	۸۳۲,۰٦
زمان و هزینه پردازش	حالت ۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲٥٦,۳۹	٦۸۹	۱۲۲٤,۸۸	٦۳۱,۱۷
	حالت ۲	۲	۱٦	۱۸	٥٤۰,٤۲	٦۳۷,۸۹	٥۹٤,۱٦	٦٦۷,۰۸
	حالت ۳	۹	۱۲	۱٥	٦۰۰,۷۸	۷٥٤,۸٦	٦٦٤,۳۷	۷۹۲,۷٦
تعداد ماشین	کم	۱۱	۱۹	۲٤	۸۹۸,۸۹	۷۰٤,۲٦	۹۲٦,۸٦	٦۹۱,٦۳

الگوریتم دیجوانی و پازلا		الگوریتم پیشنهادی					پارامتر
میانگین زمان حل	میانگین جواب	میانگین زمان حل	میانگین جواب	*NBR*	*NER*	*NWR*	سطح	
۷۰۲٫۳۸	۷۲۸٫۷۵	٦۸۳٫۵۸	٦۹۹٫۵	۲۱	۲۱	۱۲	زیاد	
٦۵۰٫۱۲	۷۱۳٫۵	٦۵٤٫۹٤	۷۰۱٫۵۳	۱٤	۳۳	۷	کم	تعداد عملیات
۷٤۳٫۸۹	۹٤۲٫۱۱	۷۳۲٫۸۹	۸۹٦٫۸٦	۳۱	۷	۱٦	زیاد	
٦۹۷٫۰۰۵	۸۲۷٫۸۰۵	٦۹۳٫۹۱۵	۷۹۹٫۱۹۵	٤۵	٤۰	۲۳	کل نتایج	

جدول ٦. خروجی‌های در الگوریتم با در نظر گرفتن $\alpha = 0.8$

الگوریتم دیجوانی و پازلا		**الگوریتم پیشنهادی**					**پارامتر**
میانگین زمان حل	میانگین جواب	میانگین زمان حل	میانگین جواب	*NBR*	*NER*	*NWR*	**سطح**	
۷۵۳٫٦	۱۱٦۵٫۹۵	۷۳۸٫۸٤	۱۱۵٦٫۱	۱۵	۱۷	٤	کم	تعداد واحدها
٦۷٦٫٤۹	۹٤۲٫۷۸	٦٦۹٫٦۲	۸۷٦٫٦۵	۲۰	٦	۱۰	متوسط	
٦۰٤٫۹۸	۵۰۵٫٤۳	۵۹۸٫٦۷	۵۰۲	۱٦	۱۵	۵	زیاد	
۵۸٦٫۱۱	۲۷۷٫٤۷	۵۷٦٫٦۸	۲٦۵٫۹۵	۱۷	۱۵	٤	کم	تعداد سفارش
٦۳۱٫۳٦	۵۹٤٫۳۷	٦۱۷٫۲۷	۵٤۱٫٤۲	۱۸	۹	۹	متوسط	
۸۱۷٫٦	۱۷٤۲٫۳۲	۸۱۳٫۱۸	۱۷۲۷٫۳۷	۱٦	۱٤	٦	زیاد	
٦۷۳٫۷٤	۱۲۰۷٫۸٦	٦۸۱٫۸۷	۱۳۰۵٫٤۷	۸	۱۸	۱۰	حالت ۱	زمان و هزینه پردازش
٦۲۲٫٤۸	۵٦۱٫۸۳	٦۰۷٫۵۸	۵۵۸٫۵	۱٦	۱۲	۸	حالت ۲	
۷۳۸٫۸٦	۸٤٤٫٤۷	۷۱۷٫٦۸	٦۷۰٫۷۷	۲۷	۸	۱	حالت ۳	
۷۳۳٫۰۷	۱۱٦٤٫۳۲	۷۲۹٫٤۳	۱۱۱۱٫۳۷	۳۹	۰	۱۵	کم	تعداد ماشین
٦۲۳٫٦٤	۵۷۸٫٤٦	٦۰۸٫٦٦	۵۷۸٫٤٦	۱۲	۳۸	٤	زیاد	
٦۱۸٫۰۲	۵۹۸٫۱۷	۵۹۹٫۷۲	٦۰۵٫۳۷	۱۳	۲۸	۱۳	کم	تعداد عملیات
۷۳۸٫٦۹	۱۱٤٤٫٦	۷۳۸٫۳۷	۱۰۸٤٫٤٦	۳۸	۱۰	٦	زیاد	
٦۷۸٫۳۵۵	۸۷۱٫۳۷۵	٦٦۹٫۰٤۵	۸٤٤٫۹۱۵	۵۱	۳۸	۱۹	کل نتایج	

برای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم از چندین شاخص استفاده شده‌است که مهمترین آن "میانگین جواب" خروجی هر الگوریتم و "میانگین زمان حل" مسایل توسط الگوریتم‌ها است. شاخصهای دیگری که می توان مطرح نمود، تعداد دفعاتی است که الگوریتم پیشنهادی جواب بهتری را نسبت به الگوریتم مورد مقایسه ارائه داده است($NBR^{۳۵}$)، تعداد دفعاتی که هر دو الگوریتم جواب یکسانی داده‌اند($NER^{۳٦}$) و تعداد دفعاتی که الگوریتم پیشنهادی جواب بدتری نسبت به الگوریتم مورد مقایسه داده‌است($NWR^{۳۷}$). نتایج محاسباتی برای تمامی شاخص‌های مذکور بطور خلاصه در جداول ٤ تا ٦ آورده شده-است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در حالت کلی دارای میانگین جواب بهتر از الگوریتم دیجوانی و پازلا است.

در حالات مختلف برای پارامترها نیز این برتری محسوس است. در جداول ٤ و ٥ تنها به ازای یک حالت و در جدول ٦ به ازای دو حالت الگوریتم پیشنهادی دارای میانگین جواب بدتر از الگوریتم دیجوانی و پازلا است و در سایر موارد جوابهای بهتری ارائه داده است. علت برتری الگوریتم پیشنهادی را می توان در این دانست که به علت اینکه ممکن است جواب خوبی در یک نسل باشد و باعث همگرایی الگوریتم شود. با توجه به اینکه در عملگر انتخاب در الگوریتم ژنتیک دو جنسیتی حتما باید نیمی از جمعیت از جنسیت مخالف انتخاب شود، بنابراین سایر جوابها نیز شانس حضور در نسل بعد را خواهند داشت. این امر موجب افزایش تنوع جوابها در نسل بعد شده و در نتیجه همگرایی الگوریتم را به تعویق خواهد انداخت.

از منظر زمانهای حل هم هر دو الگوریتم تقریبا مشابه هستند ولی در کل الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم دیجوانی و پازلا برتری دارد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سفارشات، میانگین جواب‌ها و زمان حل مسأله افزایش پیدا می‌نماید. وقتی این پارامتر زیاد می شود هم هزینه و هم ماکزیمم زمان انتظار ساخت زیاد می گردد. با افزایش تعداد واحدهای تولیدی الگوریتم در تخصیص سفارشات به واحدها و نیز تخصیص عملیات سفارشات به ماشین‌های واحدهای تولیدی گزینه‌های بیشتری داشته و بار کاری هر واحد نیزکاهش می‌یابد. در نتیجه سفارشات با زمان و هزینه کمتری تکمیل گردند. با افزایش تعداد عملیات، مقادیر تابع هدف افزایش می‌یابد. چرا که حجم کار سیستم تولیدی زیاد شده و هزینه و زمان پردازش و تکمیل سفارشات زیاد می گردد. با افزایش تعداد ماشین آلات، در تخصیص عملیات به ماشین‌های هر واحد گزینه‌های زیادی وجود خواهد داشت و بار کاری هر ماشین کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار تابع هدف مسأله کاهش پیدا می‌کند. تاثیر زمان و هزینه پردازش و حمل بر تابع هدف یا خروجی الگوریتم با ضریب وزنی ($\propto$) نیز ارتباط دارد. وقتی که ضریب وزنی هزینه نسبت به زمان بالاست ($\propto = 0.2$) با افزایش هزینه و کاهش زمانهای پردازش و حمل (از حالت ١ به حالت ٢ و سپس حالت ٣) مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. این بدان معناست که در این تاثیر افزایش هزینه ها بیشتر از کاهش زمان های پردازش است.

وقتی ضریب وزنی هر دو تابع هدف یکسان است ($\propto = 0.5$) کمترین مقدار وقتی اتفاق افتاده است که هر دو پارامتر هزینه و زمانهای پردازش و حمل دارای مقادیر متوسطی هستند (حالت ٢) و با افزایش هر یک از این پارامترها تابع هدف افزایش می-یابد. همچنین تاثیر زیاد بودن زمانهای پردازش و حمل (حالت ١) در افزایش مقدار تابع هدف بیشتر از زیاد بود هزینه های پردازش و حمل (حالت ٣) است.

وقتی که ضریب وزنی هزینه نسبت به زمان کمتر است ($\propto = 0.8$) نیز شرایطی مشابه حالت قبل وجود دارد با این حال که این مقادیر توابع هدف بیشتر می‌شوند.

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

عواملی مثل توزیع عادلانه امکانات در مناطق مختلف یک کشور، امکان استفاده از مواد اولیه و نیروی انسانی با هزینه پایین‌تر در برخی مناطق و نیز وجود مشکلاتی همچون آلودگی هوا و ازدحام جمعیت و ترافیک در محل کارخانه اصلی باعث شده‌اند که محیط‌های تولیدی از حالت مجتمع و متمرکز سنتی به محیط‌های تولیدی جدا از هم و منعطف تغییر کنند. بنابراین نه تنها باید سیستم تولیدی را متناسب با شرایط انعطاف‌پذیر نمود، بلکه برنامه‌ریزی منعطفی را نیز برای آن انجام داد. در این مقاله زمانبندی سیستم تولید کارگاهی منعطف در حالت وجود چند مرکز تولیدی با تابع هدف کمینه نمود همزمان مجموع زمان تکمیل کارها و مجموع هزینه های تولید و حمل و نقل پرداخته شد. به منظور حل مساله یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک دوجنسیتی ارائه شد که در آن برای کرومزومها

دو جنسیت متفاوت در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم به منظور انجام عمل تلفیق حتما باید جنسیت والدین متفاوت در نظر گرفته شود. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با توسعه الگوریتم پیشنهادی برای نزدیکترین مساله در ادبیات موضوع به مساله مورد بررسی در این تحقیق، نشان از برتری الگوریتم ژنتیک دو جنسیتی دارد.

پیشنهاد می شود که مدیران جهت کاهش هزینه های تولید و حمل و نقل و همچنین بهبود در نتایج زمانبندی، تعداد واحدهای تولیدی خود را افزایش دهند. هر چند باید هزینه های سرمایه گذاری اولیه را نیز در نظر گرفت، اما باید مزایای دیگری از قبیل استفاده از پتانسیل های محیطی در محلهای مختلف نظیر نیروی کار یا مواد اولیه ارزان قیمت، حمایتهای منطقه ای، جلوگیری از تمرکز ترافیک، ازدحام جمعیت، امکانات و آلودگی هوا در یک نقطه را نیز مورد توجه قرار داد. در نظر گرفتن حالتی که حمل و نقل بین واحدهای تولیدی مجاز باشد و این واحدها بتوانند از وسایل نقلیه مشترکی استفاده نمایند، می تواند زمینه ای دیگر برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. این امر موجب کاهش هزینه های حمل و نقل و استفاده موثرتر از ظرفیت آنها می‌شود. همچنین اضافه نمودن مفروضات و ویژگیهای دیگر به مساله مانند زمانهای پردازش فازی به مساله می‌تواند به عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. در نظر گرفتن توابع هدف دیگر به مساله مانند متفاوت بودن کیفیت تولید در هر یک از واحدهای تولیدی می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد. ترکیب الگوریتم ژنتیک جنسیتی با سایر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Multi-site manufacturing
2. Distributed scheduling problem
3. Flexible jobshop scheduling problem
4. Distributed and flexible job shop scheduling problem
5. Flexible Manufacturing Unit
6. Jobshop
7. Flexible flow shop
8. Flow shop
9. Parallel machines
10. Single machine
11. Genetic Algorithm
12. Bi-Gender Genetic Algorithm
13. Chromosome
14. Cross-Over
15. Parents
16. Hybrid biogeography-based optimization
17. Makespan
18. Backtracking search hyper-heuristic algorithm
19. Competitive memetic algorithm
20. Sequence-based
21. Position-based
22. Agent-based fuzzy constraint-directed negotiation mechanism
23. Child
24. Initial Population
25. Cross-Over rate
26. Mutation rate
27. Termination Criteria
28. Ranking Operator
29. Coding
30. De-Coding
31. Gant chart
32. Selection Operator
33. Chromosome Poole
34. Mask array
35. Number of better results

۸ منابع

– بهشتی نیا، محمد علی، فیض, داود و سدادی, فاطیما (۱۳۹۷) "یکپارچگی مساله مسیریابی وسایل نقلیه با زمانبندی حمل‌ونقل و تولید در زنجیره‌تأمین"، فصلنامه علمی – پژوهشی مهندسی حمل و نقل، دور ۹، شماره ٤، ص. ٥٤٩–٥٧٠.

– سلم آبادی، نرجس و بهشتی نیا، محمد علی (۱۳۹۸) "مدل ریاضی چند هدفه برای مساله تولید–موجودی–مسیریابی دو – مرحله‌ای محصولات دارویی"، فصلنامه علمی – پژوهشی مهندسی حمل و نقل، پذیرفته شده.

- Azab, A., & Naderi, B. (2014) "Greedy Heuristics for Distributed Job Shop Problems", *Procedia CIRP*, Vol. 20, pp. 7-12 .

- Bargaoui, H., Belkahla Driss, O., & Ghédira, K. (2017) "A novel chemical reaction optimization for the distributed permutation flowshop scheduling problem with makespan criterion", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 111, pp. 239-250 .

- Beheshtinia, M., & Ghazivakili, N. (2018) "Reference group genetic algorithm for flexible job shop scheduling problem with multiple objective functions", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 11, pp. 153-169 .

- Beheshtinia, M. A., Ghasemi, A., & Farokhnia, M. (2018) "Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system (case study: a drug manufacturing company)", *Journal of Modelling in Management*, Vol. 13, pp. 27-49 .

- Borumand, A., & Beheshtinia, M. A. (2018) "A developed genetic algorithm for solving the multi-objective supply chain scheduling problem", *Kybernetes*, Vol. 47, pp. 1401-1419 .

- Chang, H.-C., & Liu, T.-K. (2015) "Optimisation of distributed manufacturing flexible job shop scheduling by using hybrid genetic algorithms", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. pp .

- De Giovanni, L., & Pezzella, F. (2010) "An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 200, pp. 395-408 .

- Deng, J., & Wang, L. (2017) "A competitive memetic algorithm for multi-objective distributed permutation flow shop scheduling problem", *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 32, pp. 121-131 .

- Hosseini-Motlagh, S.-M., Ahadpour, P., & Haeri, A. (2015) "Proposing an approach to calculate headway intervals to improve bus fleet scheduling using a data mining algorithm", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 8, pp. 72-86 .

- Hsu, C.-Y., Kao, B.-R., Ho, V. L., & Lai, K. R. (2016) "Agent-based fuzzy constraint-directed negotiation mechanism for distributed job shop scheduling", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 53, pp. 1 ١٥٤–٤٠.

- Issabakhsh, M., Hosseini-Motlagh, S.-M., Pishvaee, M.-S., & Saghafi Nia, M. (2018) "A

shops", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, pp. 7754-7763 .

- Rifai, A. P., Nguyen, H.-T., & Dawal, S. Z. M. (2016) "Multi-objective adaptive large neighborhood search for distributed reentrant permutation flow shop scheduling", *Applied Soft Computing*, Vol. 40, pp. 42-57 .

- Taheri, S. M. R., & Beheshtinia, M. A. (2019) "A Genetic Algorithm Developed for a Supply Chain Scheduling Problem", *Iranian Journal of Management Studies*, Vol. 12, pp. 281-306 .

- Ullrich, C. A. (2013) "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", *European Journal of Operational Research*, Vol. 227, pp. 152 .١٦٥-

- Ziaee, M. (2014) "A heuristic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem", *The Journal of Supercomputing*, Vol. 67, pp. 69-83 .

Vehicle Routing Problem for Modeling Home Healthcare: a Case Study", *International Journal of Transportation Engineering*, Vol. 5, pp. 211-228 .

- Lin, J., Wang, Z-J., & Li, X. (2017) "A backtracking search hyper-heuristic for the distributed assembly flow-shop scheduling problem", *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. pp .

- Lin, J., & Zhang, S. (2016) "An effective hybrid biogeography-based optimization algorithm for the distributed assembly permutation flow-shop scheduling problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 97, pp. 128-136 .

- Liu, T. K., Chen, Y. P., & Chou, J. H. (2014) "Solving Distributed and Flexible Job-Shop Scheduling Problems for a Real-World Fastener Manufacturer", *IEEE Access*, Vol. 2, pp. 1598-1606 .

- Naderi, B., & Azab, A. (2014) "Modeling and heuristics for scheduling of distributed job

محمد علی بهشتی نیا، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه .صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۸٤ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه سازی ترکیبی، زمانبندی حمل و نقل و تولید بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه .سمنان است.

اکبر نظری، درجه کارشناسی در رشته مکانیک ماشین های کشاورزی را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه ارومیه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت MBA در سال ۱۳۹٤ را از دانشگاه سمنان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان الگوریتمها ی فرا ابتکاری، زمانبندی تولید و حمل و نقل می باشد.

پریسا فیض الهی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹٤ از دانشکده فنی ومهندسی گلپایگان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۷ را از دانشگاه سمنان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان الگوریتمها یفرا ابتکاری، زمانبندی حمل و نقل و بهینه سازی چندهدفه می باشد.