

# ارایه یک مدل ریاضی برای یکپارچه سازی زمانبندی و حمل و نقل در زنجیره تامین چند کارخانه ای

عیسی نخعی کمال آبادی<sup>۱</sup>، نیکبخش جوادیان<sup>۲</sup>، مهری گوران<sup>۳</sup>، بهزاد نورزاده<sup>۴</sup>

## چکیده

جهانی شدن و سرعت پیشرفت تکنولوژی اطلاعات، افزایش فشارهای رقابتی، پیدایش شرکت‌های کوچک و پراکنده و ... سازمان‌ها را به سمت همکاری و ایجاد ارتباطات قوی سوق داده است و در واقع بحث زنجیره تامین مطرح گردیده است. یکی از جنبه‌های مهم زنجیره تامین، تولید از طریق سایت‌های مختلف می‌باشد که در مکان‌های متفاوتی قرار دارند. در این مقاله مسأله یکپارچه سازی زمانبندی و حمل و نقل در زنجیره تامین چند سایتی بررسی شده و با توجه به ویژگی‌های زیادی که در زنجیره تامین خودرو سازی وجود دارد و با استفاده از ساختار موجود در حمل و نقل و نوع مواد و نیز چند کارخانه ای بودن آن، مدل عدد صحیح آمیخته جدیدی برای مسأله زمانبندی در یک زنجیره تامین سه مرحله‌ای با هدف حداقل سازی بیشترین زمان تکمیل انجام کارها در حالت چند محصولی، چند مرحله ای ارائه شده است که مرحله اول شامل تامین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل شرکت‌های سازنده محصولات نهایی ارایه شده است، که ناوگان حمل و نقل شامل چندین وسیله نقلیه می‌شود که دارای سرعت‌ها و ظرفیت‌های متفاوت برای حمل کالا هستند، و شرکت‌های سازنده و تامین کنندگان در مکانهای جغرافیایی متفاوتی قرار دارند. سپس با توجه به اینکه مدل پیشنهادی NP-Hard بوده و دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی است، با استفاده از روشهای حل دقیق، حل این نوع مسأله در زمان معقول امکان پذیر نمی‌باشد. در نتیجه برای حل مسأله مذکور یک الگوریتم ژنتیک که دارای کروموزومهایی با ساختار ماتریسی است برای حل تقریبی مدل پیشنهادی ارایه شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسایل با ابعاد پایین با نرم افزار Lingo<sup>۱</sup> (به عنوان روش حل دقیق) مورد ارزیابی قرار گرفته و تعیین اعتبار شده است.

**واژگان کلیدی:** زمانبندی، حمل و نقل، زنجیره تامین، چند کارخانه ای، الگوریتم ژنتیک

۱- استادیار دانشگاه کردستان [nakhai\\_isa@yahoo.com](mailto:nakhai_isa@yahoo.com)

۲- استادیار دانشگاه علوم و فنون مازندران [nijavadian@yahoo.com](mailto:nijavadian@yahoo.com)

۳- کارشناس ارشد مهندسی صنایع [Sahar\\_goran@yahoo.com](mailto:Sahar_goran@yahoo.com)

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

[behzadnoorzadeh@yahoo.com](mailto:behzadnoorzadeh@yahoo.com)

## ۱- مقدمه

زنجیره‌ی تأمین یکی از موضوعات مهمی است که تاکنون در حوزه تولید تحقیقات زیادی درباره آن صورت پذیرفته است. یک زنجیره‌ی تأمین تمام مراحل را که روی یک محصول ارزش افزوده ایجاد می‌کند را شامل می‌شود. مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان به صورت وظیفه یکپارچه سازی واحدهای سازمانی در طول زنجیره تأمین و هماهنگ سازی جریان‌های مواد، اطلاعات و مالی، به منظور برآوردن تقاضای مشتری (نهایی) و با هدف بهبود رقابت پذیری یک زنجیره تأمین تعریف کرد. با ظهور پدیده‌ی جهانی سازی<sup>۲</sup>، هماهنگی<sup>۳</sup> در میان مراحل مختلف زنجیره تأمین، به منظور دستیابی به یک سیستم با اثربخشی ایده‌آل یکی از موضوعاتی است که هم مورد توجه بخش صنعت و هم مورد توجه محققان دانشگاهی قرار گرفته است.

در حقیقت مدیریت زنجیره‌ی تأمین چیزی نیست به جز یکپارچه ساختن فرآیندهای زنجیره‌ی تأمین از تأمین کننده اولیه تا مشتری نهایی به منظور ایجاد رضایت برای مصرف کننده نهایی.

یکپارچه سازی عامل بسیار مهمی در بهبود کارایی است. بعلاوه در بین سیستم‌های یکپارچه شده، ارتباط بین زمانبندی سفارش‌ها در مرحله تولید و حمل و نقل و تخصیص و زمانبندی آنها به تأمین کنندگان یکی از مهمترین زمینه‌ها است که روش‌های سنتی زمانبندی کارها در مرحله تولید و مرحله تأمین کنندگان را به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن تاثیر مقابل بین آنها در نظر می‌گیرند. اتخاذ تصمیم‌های جداگانه بدون در نظر گرفتن این رابطه متقابل، رسیدن به جواب بهینه عمومی را تضمین نمی‌کند.

از طرفی، رویکرد جهانی شدن، مجموعه‌ای از شرکت‌های ادغام شده و چند ملیتی را به وجود آورده است. بسیاری از این شرکت‌های سازنده، چندین سایت

مختلف تولیدی برای محصولات خود دارند و برخی از سایتها به عنوان تأمین کننده سایت‌های دیگر می‌باشند که این تبادل بین کارخانه‌ها با صرف زمان و توسط وسایل حمل و نقل صورت می‌گیرد.

در چنین شرایطی مسایل زیادی در رابطه با تولید چند سایتی مطرح می‌شود همانند، برنامه ریزی تولید، زمانبندی، بالانس خط، تعیین سطح بهینه نیروی کار، سطح موجودی و... علاوه بر این همکاری‌های مجازی، رشد فناوری اطلاعات و ارتباطات، کاهش زمان سیکل، کاهش هزینه و نیاز به تصمیم‌گیری‌های سریع باعث می‌شود تا گروه‌ها و کارخانه‌های مختلف با یکدیگر کار کنند در حالی که ممکن است این شرکاء در مکان‌های جغرافیایی مختلفی قرار داشته باشند [۱]. و حتی از لحاظ حقوقی نیز مستقل باشند. با توجه به اینکه امروزه بسیاری از شرکت‌های سازنده بهم پیوسته اند شرکت‌های تولیدی چند سایتی بسیاری به وجود آمده است. هر کدام از این سایت‌ها برنامه ریزی تولید و امکانات و منابع مجزایی نسبت به سایر سایتها دارند [۲]. در صورتی که بتوان هماهنگی و یکپارچگی را بین

سایت‌های گوناگون ایجاد نمود، در این حالت می‌توان از ظرفیت‌ها و توانایی‌های بالقوه و در واقع استفاده نشده سایت‌ها به نحو مقتضی بهره برداری نمود. برای مثال شرکت‌های خودروساز را می‌توان در نظر گرفت. این شرکت‌ها نیازمند قطعات گوناگونی برای تولید محصولات خود هستند که برای تولید آنها قطعه سازان فراوانی دارند که تقریباً در مکان‌های مختلفی پراکنده شده‌اند. در صورتی که ارتباطی بین قطعه سازان و کارخانه مادر وجود نداشته باشد، هر سایت مستقلاً اقدام به برنامه ریزی و تولید می‌نماید، حال اینکه با یک برنامه ریزی کلی در این زنجیره تولید می‌توان قطعات را در جایی که کمترین هزینه و سریعترین زمان را برای ساخت دارند، تولید نمود.

در این مقاله به بررسی زنجیره‌ی تأمین چند کارخانه‌ای، چند مرحله‌ای و با در نظر گرفتن یکپارچگی

مسیر ساخت و زمان‌های پردازش متفاوتی را دارد. هدف تخصیص کارها به کارخانه‌های متفاوت و تعیین زمانبندی تولید تمام کارخانه‌ها است. یک الگوریتم ژنتیک تطبیقی با یک عملگر تلفیق جدید با نام ژن قالب<sup>۴</sup> برای حل مساله ارائه شده است.

«بل و تیری» [۵] از مدل برنامه ریزی تولید برای حل مساله چند سایتی استفاده نموده و متغیرهای تصمیم خود را تعریف کرده اند. همچنین ویژگی‌های برنامه ریزی چند سایتی را در مقایسه با مساله برنامه ریزی در یک کارخانه تعریف نموده اند [۵].

«سور» [۱] نرم افزار زمانبندی مبتنی بر دانش توزیع، برای سیستم‌های چند سایتی (MUST<sup>۹</sup>) را طراحی کرده است تا به کارشناسان در مدیریت سیستم‌های ساخت پراکنده کمک کند [۱].

«مون و همکاران» تابع هدف مدل را برای زمانبندی چند سایتی به گونه‌ای انجام داده اند تا کل تاخیر (کندی) را با توجه به انتخاب ماشین‌ها و توالی عملیات مینیمم کند. برای حل این مساله پس از مدل‌سازی از رویکرد مساله فروشنده دوره گرد استفاده نموده و برای اینکه حل تقریبی مناسبی به دست آید از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است [۶].

«کواکس» و «پاگانل» مطالب جدیدی از مدیریت جریان لجستیکی مجتمع‌های چند سایتی و احتیاجات نرم افزاری یک سیستم پراکنده تحت ERP را بیان نموده است [۷].

«چانگ» و «لی» به بررسی زمانبندی ماشین آلات در زنجیره تامین پرداخته‌اند. زنجیره تامین مساله آنها شامل دو مرحله می‌شود. مرحله اول، مرحله تولید و مرحله دوم، مرحله حمل و نقل و تحویل کارها به مشتریان است. تابع هدف مساله کمینه کردن حداکثر زمانهای تکمیل کارها ( $C_{max}$ ) است [۷].

آنها صورت‌های ساده‌ای از مساله را که تنها یک

در مراحل آن و با در نظر گرفتن ناوگان حمل و نقلی متشکل از چندین وسیله نقلیه از دیدگاه عملیاتی با ظرفیت حمل و نقل متفاوت پرداخته می‌شود.

در ادامه در بخش ۲ مرور ادبیات زمانبندی در زنجیره تامین و زنجیره تامین چند کارخانه ای ارائه می‌گردد. در بخش ۳ به تشریح مساله پرداخته می‌شود و مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مساله ارائه می‌گردد. در بخش ۴ به بررسی پیچیدگیهای مساله پرداخته و در بخش ۵ ساختار الگوریتم ژنتیک برای مساله پیشنهادی ارائه می‌شود و در بخش ۶ نیز نتایج محاسباتی ارائه می‌گردد و در بخش آخر نیز به بیان نتیجه گیری و زمینه‌های تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات

«گنونی و همکاران» [۳] به بررسی برنامه ریزی تولید در سیستم‌های تولید چند مکانی<sup>۴</sup> پرداخته اند. در تحقیق آنها فرض می‌شود که برای برخی از قطعات نیمه ساخته تقاضای خارجی وجود دارد که تقاضای آنها نیز به صورت احتمالی است. این اقلام نیمه ساخته می‌توانند در کارخانه‌های مختلفی در زنجیره تامین تکمیل شوند. همچنین برای تولید محصولات اصلی و اقلام نیمه ساخته ممکن است مقداری مواد اولیه و نیمه ساخته نیز از بیرون زنجیره تامین خریداری شوند. آنها برای حل مساله از ترکیب مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط<sup>۵</sup> و شبیه‌سازی<sup>۶</sup> استفاده کرده و از مزایای هر دو این مدلها در برخورد با این مساله بهره برده‌اند.

«چان و همکاران» [۴] به بررسی مساله زمانبندی توزیع شده<sup>۷</sup> در محیط چند محصولی و چند کارخانه‌ای پرداخته‌اند. فرض می‌شود که تعدادی کارخانه وجود دارند و هر محصول در صورت پردازش در هر کارخانه،

4 Multi site manufacturing systems

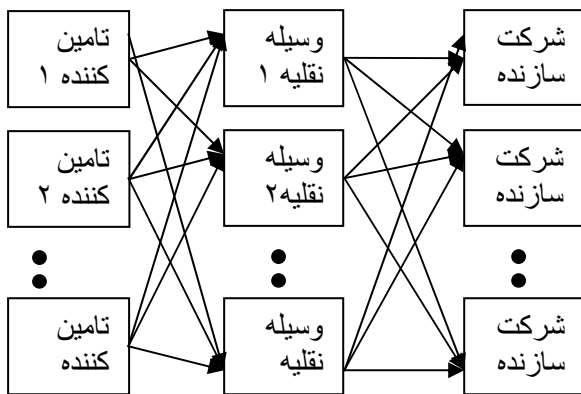
5 Mixed integer programming

6 Simulation

7 Distributed scheduling problem

8 Dominated gene

9 Multi Site



شکل ۱- ساختار زنجیره

هدف تعیین چگونگی ترتیب سفارش‌ها و تخصیص آنها به تامین کنندگان، تخصیص و ترتیب محموله‌ها در وسایط نقلیه و ترتیب انجام سفارش‌ها در شرکت‌های سازنده است، به طوری که حداکثر زمان تکمیل کلیه سفارش‌ها کمینه گردد.

**فرضیه‌های مدل:** مساله مورد بررسی تحت فرضیه‌های زیر مدل سازی شده است:

(۱) تامین کنندگان دارای ظرفیتهای تولید متفاوتی هستند

(۲) برخی از تامین کنندگان و کارخانه‌های تولیدی ممکن است به علت دارا بودن تجهیزات و ماشین آلات بیشتر، سرعت تولید بالاتری را نسبت به سایر تامین کنندگان و سایت‌های تولیدی داشته و کارهای مربوط به سفارش‌ها را سریعتر انجام دهند.

(۳) تفاوت سرعت تولید و یا حمل برای تمام کارها یکسان فرض می شود. به طور مثال اگر  $p_{ij}$  بیانگر زمان پردازش کار  $i$  در مرحله  $j$  باشد زمان واقعی پردازش کار  $i$  در مرحله  $j$  از رابطه  $p_{ij} / v$  به دست می آید. اگر  $j=1$  آنگاه  $v$  سرعت تولید تامین کننده ای است که قطعات مورد نیاز برای تولید محصول  $i$  به آن سفارش داده شده است. اگر  $j=2$  آنگاه  $v$  سرعت حمل وسیله نقلیه ای است که محموله مورد نیاز برای تولید محصول  $i$  ام به آن تخصیص داده شده است. اگر  $j=3$  آنگاه  $v$  نشان دهنده سرعت تولید در شرکت سازنده ای است که سفارش به آن وارد شده است.

وسيله نقلیه ناوگان حمل و نقل را تشکیل دهد را مورد بررسی قرار داده و برای هر یک از آنها یک الگوریتم ابتکاری ارایه داده اند [۸].

«چان و همکاران» به بررسی مساله زمانبندی توزیع شده<sup>۱</sup> در محیط چند محصولی و چند کارخانه‌ای پرداخته‌اند. فرض می شود که تعدادی کارخانه وجود دارند و هر محصول در صورت پردازش در هر کارخانه، مسیر ساخت و زمانهای پردازش متفاوتی را دارد. هدف تخصیص کارها به کارخانه‌های متفاوت و تعیین زمانبندی تولید تمام کارخانه‌ها است. یک الگوریتم ژنتیک تطبیقی با یک عملگر تلفیق جدید با نام ژن قالب برای حل مساله ارایه شده است [۹].

«چاوهان و همکاران» به بررسی مساله زمانبندی در زنجیره تامین با تابع هدف کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها پرداخته‌اند. آنها مساله زمانبندی در زنجیره تامین را تبدیل به یک مساله زمانبندی در محیط مونتاژی کرده و مساله را برای دو حالت وجود یک عملیات مونتاژ و چند عملیات مونتاژ بررسی کرده و برای هر حالت یک الگوریتم ابتکاری ارایه داده‌اند [۱۰].

### ۳- تشریح مساله

این تحقیق به بررسی زمانبندی در یک زنجیره تامین سه مرحله‌ای می پردازد. مرحله اول شامل تامین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل چندین شرکت سازنده محصولات نهایی می شود. فرض بر این که  $S$  شرکت سازنده وجود دارد که باید  $N$  سفارش را مورد پردازش قرار دهد. کارخانه سازنده دارای  $M$  تامین کننده است که قطعات مورد نیاز هر سفارش را برای این کارخانه تهیه می کنند. برای تبدیل مساله مورد بررسی به یک مساله زمانبندی، هر یک از تامین کنندگان، وسایط نقلیه و شرکت‌های سازنده بعنوان یک ماشین در نظر گرفته می شوند. (شکل-۱)

$m = 1, 2, \dots, M$ : شاخص تامین کنندگان،

$l = 1, 2, \dots, L$ : شاخص وسیله نقلیه،

$s = 1, 2, \dots, S$ : شاخص شرکت‌های سازنده،

پارامترها:

$N$ : تعداد کارها

$M$ : تعداد تامین کنندگان

$L$ : تعداد وسائط نقلیه

$S$ : تعداد شرکت‌های سازنده (سایتهای تولیدی)

$v_l$ : سرعت وسیله نقلیه  $l$  ام

$v'_m$ : سرعت تولید تامین کننده  $m$  ام

$v''_s$ : سرعت تولید در شرکت سازنده  $s$  ام

$p_{ij}$ : زمان پردازش کار  $i$  در مرحله  $j$  که  $j = 1, 2, 3$  (اگر

$j$  برابر ۲ باشد آنگاه  $p_{12} = p_{22} = \dots = p_{22} = p_2$ )

$u_l$ : ظرفیت حمل وسیله نقلیه  $l$  ام بر حسب تعداد

سفارشات

متغیرها:

$c_{ji}$ : زمان تکمیل کار  $i$  در مرحله  $j$  که  $j = 1, 2, 3$

$st_{lb}$ : زمانی که محموله  $b$  ام وسیله نقلیه  $l$  آماده حرکت است.

$C_{max}$ : حداکثر زمان تکمیل کارها در مرحله آخر

$d_{lb}$ : بیانگر زمان تحویل  $b$  امین محموله تخصیص داده شده به وسیله نقلیه  $l$  ام است.

$w_{lib}$ : وزن محموله  $b$  از سفارش  $i$  در وسیله نقلیه  $l$  ام

$T_{ss'}$ : فاصله زمانی بین شرکت‌های سازنده  $s, s'$

$T_{mm'}$ : فاصله زمانی بین تامین کنندگان  $m, m'$

(۴) مواد و قطعاتی که از تامین کنندگان به شرکتهای سازنده ارسال می‌گردند، توسط وسایط نقلیه مختلفی حمل می‌شوند. فرض می‌شود که تعداد  $l$  وسیله نقلیه که دارای ظرفیت متفاوتی برای حمل کالاها هستند، ناوگان حمل و نقل زنجیره تامین را تشکیل می‌دهند. میزان ظرفیت اشغال شده توسط هر کالا یکسان فرض می‌شود که این ظرفیت می‌تواند بر اساس حجم یا وزن تعیین شود.

(۵) همچنین وسایط نقلیه مختلف ممکن است سرعت‌های متفاوتی در حمل مواد داشته باشند که این سرعت در کل مسیر ثابت فرض می‌شود.

(۶) همچنین هر وسیله نقلیه می‌تواند قطعات یا مواد مورد نیاز برای تکمیل چند سفارش را در یک محموله به شرکت‌های سازنده حمل کند.

(۷) و نیز هر وسیله نقلیه می‌تواند یک محموله را به چند شرکت سازنده ببرد.

(۸) فرض می‌شود که تامین کنندگان در نواحی جغرافیایی متفاوتی قرار دارند و در نتیجه مسافت آنها تا شرکت سازنده متفاوت در نظر گرفته می‌شود.

(۹) محصولات از انواع مختلفی می‌باشند.

(۱۰) یک تامین کننده قادر به تامین چند قطعه می‌باشد.

(۱۱) برای یک قطعه چند تامین کننده وجود دارد.

(۱۲) تقاضای هر محصول، زمان‌های پردازش، تاریخ‌های تحویل و زمان‌های حمل بین تامین کنندگان و شرکت سازنده قطعی از قبل معین است.

(۱۳) شرکت سازنده دارای چند سایت کارخانه در نقاط جغرافیایی متفاوت است.

مدل پیشنهادی:

تعریف علائم و نمادها:

از علائم و نمادهای زیر برای توصیف مدل برنامه ریزی یکپارچه زمانبندی حمل و نقل استفاده شده است.

شاخص‌ها:

$i = 1, 2, \dots, N$ : شاخص کار،

۱ } اگر قطعات مورد نیاز برای سفارش  $i$  ام به تامین کننده  $m$  تخصیص یابد  
۰ } در غیر اینصورت.  $X_{mi}$

۱ } اگر قطعات مورد نیاز برای سفارش  $i$  به  $b$  امین محموله از وسیله نقلیه  $l$  تخصیص یابد  
۰ } در غیر اینصورت.  $Z_{ilb}$

مدل ریاضی: در این بخش مدل ریاضی عدد

صحیح مختلط مساله مورد بررسی را بیان می کنیم.

تابع هدف: هدف مدل کمینه کردن حداکثر زمان

تکمیل کلیه سفارش ها است که در زیر آمده است.

۱ اگر وسیله نقلیه  $l$  برای تکمیل محموله  $b$  از سفارش  $i$  بین تامین کنندگان  
 در غیر این صورت. }  $F'_{ilbmm'}$

۱ اگر وسیله نقلیه  $l$  برای تخلیه محموله  $b$  از سفارش  $i$  بین شرکتهای سازنده  
 در غیر این }  $F'_{ilbss'}$

$$\text{Min } C \text{ max}$$

Subject to:

$$\sum_{m=1}^M x_{mi} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{b=1}^{\left[\frac{N}{u_l}\right]+1} z_{lib} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N w_{lib} \leq u_l \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1 \quad (3)$$

$$c_{3i} \geq c_{2i} + \frac{p_{3i}}{v_s''} + \sum_l \sum_b \sum_s \sum_{[s \neq s']} T_{ss'} F'_{ilbss'} \quad s, s' = 1, 2, \dots, S \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$c_{1i} \geq \frac{p_{1i}}{v_m'} - Q * (1 - x_{mi}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad m = 1, 2, \dots, M$$

$$d_{lb} \geq st_{lb} + \frac{p_2}{v_l} - Q * (1 - z_{lib}) + \sum_l \sum_b \sum_m \sum_{[m \neq m']} T_{mm'} F'_{ilbmm'} \quad m, m' = 1, 2, \dots, M \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$st_{lb} \geq c_{1i} - Q * (1 - z_{lib}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1 \quad (6)$$

$$st_{lb} \geq d_{l(b-1)} + \frac{p_2}{v_l} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1$$

$$c_{0,i} = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$C_{\max} \geq c_{3i} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$c_{2i} \geq d_{lb} - Q * (1 - z_{lib}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad l = 1, 2, \dots, L \quad b = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{u_l}\right]+1 \quad (9)$$

مساله  $C_{max} | F3$  است، بنابراین حداقل از نوع  $NP$ - $Hard$  خواهد بود. در نتیجه پیدا کردن جواب بهینه در زمان معقول برای مساله غیر ممکن است و باید از راه حل های ابتکاری یا فرا ابتکاری برای حل مساله استفاده نمود. به علت اینکه مساله مورد بررسی در این تحقیق به نوعی تعمیم مساله زمان بندی ماشین های موازی نیز ارتباط دارد، همین نتیجه را می توان از  $NP$ - $Hard$  بودن پیچیدگی مساله  $C_{max} | P$  نیز به دست آورد [۱۲]. در این تحقیق از یک الگوریتم ژنتیک که دارای کروموزوم هایی با ساختار ماتریسی است، برای حل مساله استفاده می گردد.

## ۵- ساختار الگوریتم ژنتیک برای مدل

### پیشنهادی

در این قسمت به منظور حل مساله یک الگوریتم ژنتیک ارائه می گردد که دارای کروموزوم هایی با ساختار ماتریسی است. که بعد عمودی نشان دهنده تامین کنندگان، وسائط نقلیه و شرکت های سازنده و بعد افقی نشان دهنده سفارش های تخصیص یافته و ترتیب آنها به هر یک از تامین کنندگان، وسائط نقلیه و شرکت های سازنده است. برای هر یک از تامین کنندگان، وسائط نقلیه و همچنین شرکت های سازنده، یک رشته آرایه وجود دارد که طول و ترتیب عناصر آن نشان دهنده تعداد و ترتیب کارهای تخصیص یافته به آن تامین کنندگان، وسائط نقلیه یا شرکت سازنده است. به منظور توضیح بیشتر، فرض کنید ۵ کار، ۳ تامین کننده و ۲ وسیله نقلیه و ۲ سایت تولیدی داریم. وسیله نقلیه اول قادر به حمل دو محموله و وسیله نقلیه دوم قادر به حمل سه محموله است. فرض کنید ترتیب انجام کارها در شرکت های سازنده، ترتیب و تخصیص محموله ها به وسائط نقلیه، سفارش قطعات مورد نیاز برای کارها و ترتیب انجام آنها در تامین کنندگان، به صورت زیر است.

مجموعه محدودیت های (۱) تضمین می کند که هر کار فقط به یک تامین کننده تخصیص می یابد. مجموعه محدودیت های (۲) تضمین می کند که قطعات مورد نیاز برای تولید سفارش  $i$ ام، برای حمل دقیقاً به یک وسیله نقلیه و به یک محموله از آن وسیله اختصاص می یابد. مجموعه محدودیت های (۳) ظرفیت هر وسیله نقلیه را در حمل قطعات در نظر می گیرد. مجموعه محدودیت های (۴) ارتباط بین تاریخ تکمیل هر کار با تاریخ تکمیلش در مرحله قبل را برای مرحله تامین کنندگان و مرحله شرکت های سازنده در نظر می گیرد و نیز اگر برای تکمیل سفارش  $i$  حمل و نقل های بین سایتی داشته باشیم زمان آنها را در نظر می گیرد. در ضمن  $Q$  یک عدد مثبت بسیار بزرگ است. ( $Q \geq 0$ )

مجموعه محدودیت های (۵) زمان تحویل محموله  $i$ ام وسیله نقلیه  $l$  را به شرکت های سازنده تعیین می کند و نیز اگر برای تکمیل سفارش  $i$  حمل و نقل های بین تامین کنندگان داشته باشیم زمان آنها را در نظر می گیرد. مجموعه محدودیت های (۶) زمان آماده بودن محموله  $i$ ام وسیله نقلیه  $l$  را برای حرکت به سمت شرکت های سازنده در نظر می گیرد. این زمان، زمانی است که هم کارهای تخصیص داده شده به آن محموله توسط شرکت های تامین کننده تولید شده باشند و هم وسیله نقلیه  $l$  ام آماده باشد. مجموعه محدودیت های (۷) زمان تکمیل هر کار در مرحله صفر را برابر صفر در نظر می گیرد. مجموعه محدودیت های (۸)  $C_{max}$  را با توجه به زمان تکمیل کارها در مرحله آخر تعیین می کند. مجموعه محدودیت های (۹) بیان می کند که زمان تکمیل کارهای متعلق به یک محموله کوچکتر از زمان تحویل آن محموله به شرکت های سازنده نیست.

## ۴- بررسی پیچیدگی های مساله

«Garey و همکاران» [۱۱] نشان دادند که پیچیدگی مساله  $C_{max} | F3$  از نوع  $NP$ - $Hard$  است و از آنجا که مساله مورد بررسی در این تحقیق تعمیم یافته

تخصیص و توالی محموله ها به وسائط نقلیه و توالی انجام سفارشها در شرکت های سازنده نیز به همین صورت انجام خواهد شد.

پس از اتمام هر عملیات، تلفیق به زمانبندی کروموزوم حاصل پرداخته می شود و تابع شایستگی آن محاسبه می گردد. تعداد عملیات تلفیق در هر تکرار ثابت و توسط ضریبی از *popsiz* بنام *percross* که از پارامترهای الگوریتم ژنتیک است، مشخص می گردد.

$$C1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 5 \\ 1 & 0 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C2 \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 5 \\ 1 & 2 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

بردار اعداد تصادفی:

$$[0.3 \quad 0.7 \quad 0.6]$$

کروموزوم حاصل از عمل تلفیق (تقاطع):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 5 \\ 1 & 2 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

عمل جهش: این الگوریتم ژنتیک عمل جهش را در دو فاز انجام می دهد:

در فاز اول یک کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می شود و سپس رشته مربوط به یکی از تامین کنندگان یا وسائط نقلیه و یا سازندگان انتخاب می شود. سپس دو ژن از ژنهای تخصیص داده شده به رشته انتخابی، به صورت تصادفی انتخاب می شوند. فاز اول با معکوس کردن توالی ژنها بین دو ژن انتخابی (روی

جدول ۱ کارهای تخصیص یافته و ترتیب آنها

تامین کنندگان ۱	۱
تامین کنندگان ۲	۲→۳→۵
تامین کنندگان ۳	۴
وسيله نقلیه ۱	۵→۳→۱→۴
وسيله نقلیه ۲	۲
شرکت سازنده ۱	۵→۳→۲
شرکت سازنده ۲	۱→۴

آنگاه ساختار کروموزومی که بیان کننده ی تخصیص جدول ۱ باشد، به صورت نشان داده شده در ماتریس زیر خواهد بود. در ادامه، سایر پارامترها و عملگرهای این الگوریتم ژنتیک شرح داده می شوند.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 5 \\ 1 & 0 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

جمعیت اولیه: اندازه جمعیت اولیه توسط پارامتر *popsiz* مشخص می گردد.

تابع شایستگی: تابع شایستگی برای هر کروموزوم برابر  $C_{max}$  است، که از زمانبندی کروموزوم مربوط به آن به دست می آید.

عمل تلفیق: در عمل تلفیق، دو کروموزوم از جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می شوند. کروموزومی که دارای تابع شایستگی بهتری است با  $C1$  و کروموزومی که دارای تابع شایستگی بدتری است با  $C2$  نشان داده می شوند. سپس یک آرایه ۳ تایی از اعداد حقیقی بین صفر و یک ایجاد می شود. اگر مقدار عنصر اول کمتر از عدد  $r$  (که از پارامترهای الگوریتم است و مقداری بین صفر و یک دارد) باشد، آنگاه تخصیص و توالی کارها به تامین کنندگان در کروموزوم حاصل از عمل تلفیق، مشابه تخصیص و توالی کارها به تامین کنندگان در کروموزوم  $C1$  و در غیر اینصورت بر اساس تخصیص و توالی کارها به تامین کنندگان در کروموزوم  $C2$  به دست می آید.



## ۶- نتایج محاسباتی

در این بخش ابتدا مسایل مختلف، با اندازه‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته و سپس به مقایسه و ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده با یکدیگر پرداخته می‌شود.

### ۶-۱- تولید داده‌های تصادفی برای مساله

به منظور تولید مثال‌های متنوع برای ارزیابی الگوریتم ارائه شده، شش پارامتر از مساله انتخاب شده و برای هر کدام از پارامترها سطوحی چون بالا، پایین و متوسط در نظر گرفته می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده است،

به‌عنوان مثال برای پارامتر کار، ۳ سطح بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شده است. سطح پایین برابر ۱۰ کار، سطح متوسط برابر ۵۰ کار و سطح بالا برابر ۱۰۰ کار است. برای تعداد تامین‌کنندگان نیز سه سطح بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شده است. سطح پایین به‌صورت قطعی بیانگر وجود یک تامین‌کننده است. سطح متوسط بیانگر یک متغیر تصادفی یکنواخت با میانگین ۲/۵ و واریانس ۰/۷۵ است و در نهایت سطح بالا یک متغیر تصادفی یکنواخت با میانگین ۵ و واریانس ۳ است. اگر عدد تصادفی انتخاب شده عددی حقیقی باشد، آنگاه قسمت صحیح آن به‌عنوان تعداد تامین‌کنندگان در نظر گرفته می‌شود. تعداد وسایط نقلیه نیز ۱۰ برابر تعداد تامین‌کنندگان در نظر گرفته شده است و با تغییر تعداد تامین‌کنندگان، تغییر پیدا می‌کند.

جدول ۲- پارامترهای مختلف برای مسایل مختلف

پارامتر مساله	پایین	متوسط	بالا
تعداد کارها	۱۰	۵۰	۱۰۰
زمان رفت	۱۰	۲۰	۳۰
تعداد تامین‌کنندگان	۱	$U[1,4]$	$U[2,8]$
تعداد شرکت‌های سازنده	۱	$U[1,4]$	$U[2,8]$
زمانهای پردازش	$U[12,18]$	-	$U[8,22]$
سرعت ماشینها	-	$U[1,4]$	-

رشته انتخابی) به پایان می‌رسد. در این فاز تخصیص ژنها به رشته‌ها تغییری پیدا نمی‌کند و تنها توالی ژنهای اختصاص داده شده به رشته انتخابی تغییر پیدا می‌کند. اگر رشته انتخابی در فاز اول مربوط به تامین‌کنندگان (وسایط نقلیه یا سازندگان) باشد، در فاز دوم از کروموزوم حاصل از فاز اول دو رشته از تامین‌کنندگان (وسایط نقلیه یا سازندگان) به تصادف انتخاب می‌شوند و از هر کدام نیز یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در انتها نیز جای این دو ژن با هم عوض می‌شود. این فاز با تعویض دو ژن انتخاب شده، بین دو رشته مذکور، این امکان را فراهم می‌آورد که تخصیص ژنها به رشته‌ها تغییر پیدا کند. فاز دوم وقتی به پایان می‌رسد که عمل بالا به تعداد تامین‌کنندگان (وسایط نقلیه یا شرکت‌های سازنده) تکرار گردد.

بعد از هر عمل جهش به زمانبندی کروموزوم حاصل پرداخته می‌شود و مقدار تابع شایستگی آن محاسبه می‌گردد. تعداد تکرار عملگر جهش در هر تکرار ثابت و توسط ضریبی از  $permut \times popsize$  بنام  $permut$  مشخص می‌گردد که از پارامترهای الگوریتم است.

انتخاب نسل بعدی: در هر تکرار جمعیت نهایی پس از اعمال عملگرهای تلفیق و جهش به اندازه  $(permut + popsize \times (1 + permut + percross))$  برای انتخاب جمعیت بعدی ابتدا این کروموزومها بر اساس تابع شایستگی‌شان به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند. پس از آن تعداد  $best \times popsize$  کروموزوم، که  $best$  از پارامترهای این الگوریتم است، از کروموزومهایی که دارای بهترین مقدار تابع شایستگی هستند، برای نسل بعد انتخاب می‌شوند. سایر  $(popsize - best \times popsize)$  کروموزوم باقیمانده نیز به‌صورت تصادفی از بین جمعیت قبلی انتخاب می‌شوند.

معیار توقف: معیار توقف برای الگوریتم بدین صورت است که اگر بهترین مقدار تابع شایستگی کروموزومها در چند نسل متوالی بهبودی نیابد، الگوریتم به پایان می‌رسد.

گردیده و برای ارزیابی با جواب‌های به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک (به‌عنوان حل تقریبی) مقایسه گردیده است. و تمامی مسایل نمونه با ابعاد بالا نیز با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی (روش حل تقریبی) حل شده‌اند.

## ۷- خلاصه، نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آتی

در این مقاله مساله زمانبندی دریک زنجیره تامین سه مرحله ای با تاکید روی یکپارچگی مراحل آن، مورد بررسی قرار گرفت. مرحله اول شامل تامین کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل و نقل کالاها و مرحله سوم شامل شرکت‌های سازنده محصولات نهایی می‌شود. تابع هدف کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها است.

ابتدا مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مساله مذکور ارائه شد و یک الگوریتم ژنتیک ارائه گردید. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک مساله‌های زیادی توسط آن حل گردید و نتایج حاصل از آن در ابعاد پایین با نرم افزار لینگو ارزیابی گردید که نتایج نشان دهنده قابل قبول بودن الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

تعداد ترکیبات مختلفی که توسط مقادیر مختلف این ۶ پارامتر می‌توان به‌دست آورد برابر ۱۶۲ نوع مساله است. از هر نوع مساله، مثالهایی بصورت تصادفی ایجاد شده و در داخل یک فایل متنی قرار داده شده است. کلیه برنامه‌های کامپیوتری الگوریتم ژنتیک در این تحقیق در محیط Matlab7 برنامه نویسی و در یک کامپیوتر پنتیوم ۴، پردازنده ۲۴۰ گیگا هرتز، ویندوز XP (۲۰۰۰) و ۲۵۶ مگا بایت RAM اجرا شده‌اند.

## ۶-۲- بررسی پارامترها در الگوریتم ژنتیک

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و به‌صورت تجربی، برای پارامتر *popsiz* مقدار ۱۰۰ مناسب تشخیص داده شده است. مقدار ۰/۷ برای پارامتر *r*، مقدار ۰/۷ برای پارامتر *percross*، مقدار ۰/۲۸ برای پارامتر *permut* و مقدار ۰/۰۲ برای پارامتر *best* مناسب تشخیص داده شده است.

که نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است. به‌علت اینکه این مساله تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است، معیار مناسبی جهت ارزیابی جواب‌های به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک وجود ندارد. بنابراین تمامی مسایل نمونه با ابعاد پایین با استفاده از نرم افزار Lingo (روش حل دقیق) حل

جدول ۳- مسایل نمونه با ابعاد کوچک

تعداد مساله	N	M	S	L	سرعت ماشینها	زمان رفت	زمانهای پردازش	تعداد محدودیتها	تعداد متغیرها
۱	۵	۱	۱	۴	۱	۱۰	$16U[12,18]$	۵۱	۳۹
۵	۶	۱	۱	۴	۱	۱۰	$16U[12,18]$	۶۱	۴۶

جدول ۴- نتایج محاسباتی حاصل از حل مسایل نمونه با ابعاد کوچک

شماره مساله	حل با لینگو	تعداد تکرارها	زمان حل با لینگو (دقیقه)	حل با ژنتیک	زمان حل با ژنتیک (ثانیه)	خطای نسبی = [(حل با ژنتیک - حل با لینگو) / حل با لینگو] × ۱۰۰
1	۳۶،۰۰	۸	< 1	۴۲	< 1	٪۱۶
میانگین جوابها	۳۴،۶	-	-	۴۱	-	٪۱۸،۴

جدول ۵- مسایل نمونه با ابعاد متوسط

تعداد مساله	N	M	S	L	سرعت ماشینها	زمان رفت	زمانهای پردازش	تعداد محدودیتها	تعداد متغیرها
۴	۵	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۳	۱	۱۰	$U[12,18]$	۹۶	۴۰
۲	۴	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۳	۱	۱۰	$U[12,18]$	۷۷	۳۲
۵	۴	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۴	۱	۱۰	$U[12,18]$	۹۷	۲۶
۱۸	۳	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۴	۱	۱۰	$U[12,18]$	۱۰۰	۳۰
۱۹	5	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۳	1	۱۰	$U[12,18]$	۶۱	۳۵
۳	۱۰	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۱۰	۱	۱۰	$U[12,18]$	۲۳۱	۲۳۰
۴	۵۰	$U[1,4]$	$U[1,4]$	۱۰ برابر تعداد تامین کنندگان	$U[1,4]$	۲۰	$U[12,18]$	۲۱۵۱	۲۱۵۰

جدول ۶- نتایج حاصل از حل مسایل نمونه با ابعاد متوسط

حل با لینگو	تعداد تکرارها	زمان حل با لینگو(دقیقه)	حل با ژنتیک	زمان حل با ژنتیک(ثانیه)	خطای نسبی = ((حل لینگو- حل ژنتیک)/حل لینگو) × ۱۰۰
میانگین جوابها	۳۵,۲۵	< 1	۴۰,۵	< 1	٪۱۴
میانگین جوابها	۳۴,۵	< 1	۳۹	< 1	٪۱۳,۰
میانگین جوابها	۳۵,۲	< 1	۴۰,۴	< 1	٪۱۴
میانگین جوابها	۳۵,۰۰	< 1	۴۰	< 1	٪۱۴
میانگین جوابها	۳۶,۰۰	< 1	۴۲	< 1	٪۱۶,۶
میانگین جوابها	-	-	۴۰,۶۶۷	-	-
میانگین جوابها			۴۵,۵۰		

جدول ۷- مسایل نمونه با ابعاد بزرگ

تعداد مساله	N	M	S	L	سرعت ماشینها	زمان رفت	زمانهای پردازش	میانگین جوابها در حل با ژنتیک
۵	۱۰۰	$U[2,8]$	$U[2,8]$	۱۰ برابر تعداد تامین کنندگان	$U[1,4]$	۳۰	$U[8,22]$	۲۸,۹۱۶

آتی می توان با در نظر گرفتن توابع هدف برای مجموع سود به دست آمده در سیستم و یا با در نظر گرفتن سایر توابع هدف مساله را به صورت چند هدفه، فرموله نمود همچنین حالت فازی بودن داده ها را هم می توان بررسی کرد.

### منابع

[1] J. Sauer, "A multi-site scheduling system", Artificial intelligence and manufacturing, Research planning workshop, (1998).

توسعه ی مساله ارایه شده برای حالتی که سیستم توزیع نیز در یکپارچگی در نظر گرفته شود را می توان زمینه ای برای انجام تحقیقات آتی در نظر گرفت. اضافه کردن این محدودیت که هر دسته از تامین کنندگان توانایی ساخت قطعات برای برخی از سفارشها را داشته باشند نیز می تواند زمینه ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد. همچنین اضافه کردن مونتاژ در رابطه شرکت سازنده و تامین کنندگان می تواند زمینه ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد. مدل پیشنهادی در این تحقیق به صورت تک هدفه، فرموله شده است. برای تحقیقات

shop scheduling”, *Math. Oper. Res.*, 1, pp 117–129.

[12] Garey, M.R., Johnson, D.S., (1978), “Strongly NP-completeness results: motivation examples and implication”, *Journal of Association for Computing Machinery*, 25, pp 499–508

[2] J. Sauer, J. Suelmann, G. Appelrath, “Multi-site scheduling with fuzzy concepts”, *Int. J. Approximate Reasoning*, Amsterdam: Elsevier, (1998).

[3] Gnoni, M.G., Iavagnilio, R., Mossa, G., Mummolo, G., DiLeva, A. “Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modeling: A case study from the automotive industry”, *Int. J. Production Economics*, 85, (2003), pp. 251–262.

[4] Chan, F.T.S., Chung, S.H., Chan, P.L.Y. “An adaptive genetic algorithm with dominated genes for distributed scheduling problems”, *Expert Systems with Applications*, 29, (2005), pp. 364–371.

[5] C. Thierry, G. Bel, P. Esquirol, “Multi-site scheduling: A constrained based approach”, *Int. Conf. on Ind. Eng. And production management*, Fucam Mons, 2-4 June, (1993).

[6] C. Moon, J. Kim, S. Hur, “Integrated process planning and scheduling with minimizing tardiness in Multiplan’s supply chain”, *Computers & Industrial engineering*, Vol 43, (2002), pp 331-349.

[7] G.L. Kovacs, P. Paganelli, “A planning and management infrastructure for large, complex, distributed projects- beyond ERP and SCM”, *Computers in industry*, Vol 51, (2003), pp 165-183.

[8] Chang, Y.C., Lee, C.Y., “Machine scheduling with job delivery coordination”, *European Journal of Operational Research*, 158, (2004), pp 470–487.

[9] Chan, F.T.S., Chung, S.H., Chan, P.L.Y., “An adaptive genetic algorithm with dominated genes for distributed scheduling problems”, *Expert Systems with Applications*, 29, (2005), pp 364–371.

[10] Chauhan, S.S., Valery, G., Jean-Marie, P., “Scheduling in supply chain environment”, *European Journal of Operational Research*, In Press, (2006).

[11] Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R., (1976), “The complexity of flow shop and job