

ارائه یک الگوریتم ژنتیک برای مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه

ابراهیم تیموری^{۱*} و فاطمه‌السادات موسوی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی صنایع - دانشکده صنایع - دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۷/۹/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۱۲/۸، تاریخ تصویب ۹۰/۱/۲۰)

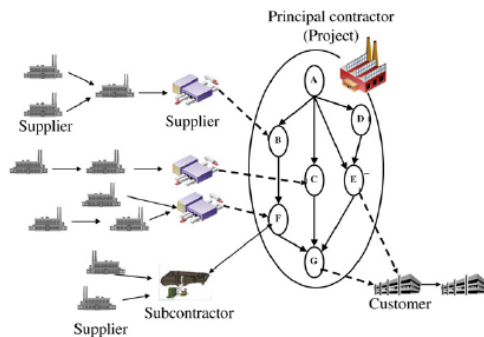
چکیده

تأمین به موقع مواد در پروژه‌های ساخت و ساز اهمیت بسیاری دارد، از این رو ایجاد هماهنگی با تأمین‌کنندگان مواد کلیدی یک پروژه، ضمن حصول اطمینان از حضور به موقع مواد، هزینه‌ها را نیز حداقل می‌کند. یکی از راه‌های ایجاد این هماهنگی، برنامه‌ریزی موجودی یکپارچه است، البته لازم به ذکر است که چنین مدلی از نظر رده پیچیدگی^۱ NP_hard تلقی می‌شود، زیرا این مدل ترکیبی از مسئله برنامه‌ریزی با منابع محدود^۲ و برنامه‌ریزی موجودی است که در ادبیات، مسئله برنامه‌ریزی با منابع محدود جزء رده NP_hard محسوب می‌شود. از این رو، در این مقاله تلاش می‌شود ضمن معرفی مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، مدلی فراابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک برای حل آن ارائه کرده و سپس در قالب یک مثال آن را حل کند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که الگوریتم معرفی شده، در اندازه‌های واقعی، طی یک زمان قابل قبول، پاسخ‌های مناسبی را ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین پروژه، برنامه‌ریزی موجودی، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

طرف دیگر اگر مواد خیلی زودتر در سایت آماده باشند، هزینه نگهداری موجودی زیادی باید پرداخت شود [۲]، بنابراین ضروری است تا با ایجاد هماهنگی با تأمین‌کنندگان از حضور به موقع مواد در سایت اطمینان حاصل شود.



شکل ۱: نمایی از زنجیره تأمین پروژه

یکی از روش‌های ایجاد هماهنگی در زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی موجودی یکپارچه است. برای ایجاد این برنامه‌ریزی، ابتدا باید هزینه‌های موجودی بررسی شوند. به طور کلی هزینه‌های موجودی برای هر بنگاهی شامل هزینه سفارش، هزینه نگهداری موجودی و هزینه‌های

زنجیره تأمین پروژه، مفهوم جدیدی است که در اثر تخصصی شدن کارها و رواج برون‌سپاری آن‌ها ظهور کرد. زنجیره تأمین پروژه شامل یک پیمانکار اصلی که متصدی اجرای پروژه است و زنجیره‌ای از تأمین‌کنندگان است. به تعبیر دیگر می‌توان زنجیره تأمین پروژه را یک ترکیب از زنجیره تأمین و مجموعه فعالیت‌های پروژه دانست. در شکل (۱) نمایی از زنجیره تأمین پروژه نشان داده شده است [۱]. در عمل زنجیره‌های تأمین پروژه فراوانی وجود دارند، مانند سیستم‌های تولید ساخت بر مبنای سفارش، پروژه‌های ساخت و ساز و فرایندهای توسعه محصول که یکی از ویژگی‌های خاص این زنجیره‌ها نیاز به دسترس‌پذیری به موقع مواد از طریق زنجیره تأمین است، زیرا دسترس‌پذیری این مواد زمان‌بندی پروژه را محدود کرده، بر هزینه کل سیستم و در نتیجه سود حاصل از انجام پروژه و زمان تحویل پروژه اثر می‌گذارد. این تأثیر به عنوان مثال به گونه‌ای است که اگر مواد به موقع تأمین نشوند، فعالیت‌ها نمی‌توانند شروع شوند، در نتیجه یا پروژه به تأخیر افتاده و هزینه تأخیر تحمیل می‌شود و یا برای تسریع فعالیت‌ها باید هزینه بیشتری پرداخت شود، از

بنابراین در این بخش ابتدا شرایط فرض شده در زنجیره تأمین پروژه تشریح می‌شود و در ادامه مدل ریاضی برنامه‌ریزی موجودی ارائه می‌شود.

فرضیه‌های مربوط به زنجیره تأمین پروژه

در این مقاله برای طراحی مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، یک زنجیره تأمین دوسطحی برای پروژه‌های ساخت و ساز فرض شده است که در آن قرارداد پیمانکار و کارفرما از نوع "قرارداد با قیمت ثابت" است، به این ترتیب که یک قیمت کلی با توجه به مشخصات و نوع کار برآورد می‌شود و کار به صورت کلی و یکجا با قیمت تعیین شده به پیمانکار واگذار می‌شود که در صورت کاهش هزینه‌ها، پیمانکار سود بیشتری کسب خواهد کرد. همچنین، کارفرما و پیمانکار توافق کرده‌اند که پروژه در زمان معینی به پایان برسد و اگر تأخیری اتفاق افتد، جریمه و در صورت پایان زود هنگام پروژه، پاداش در نظر گرفته شود. در اینجا فرض می‌شود که طبق قرارداد، کارفرما مبلغی را به عنوان پیش‌پرداخت در ابتدای پروژه به پیمانکار پرداخت می‌کند، سپس در فواصل زمانی معین (f)، کارفرما با توجه به صورت وضعیت که پیمانکار از مخارج پرداخت شده اعلام می‌کند، درصدی از این هزینه‌ها را به پیمانکار پرداخت می‌کند. این مبلغ پرداختی به عنوان منبع درآمد برای هزینه‌های دوره بعد، محسوب می‌شود. اما از آنجایی که ممکن است مبلغ پرداختی برای انجام فعالیت‌ها و خرید مواد کافی نباشد، بنابراین پیمانکار باید از منبع دیگری به تأمین مالی بپردازد، در غیر این صورت با تأخیر رو به رو می‌شود؛ البته میزان مبلغی که از منبع دوم تأمین می‌شود، محدود است. نکته قابل توجه دیگر این است که همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شد، پیمانکار پروژه در سطح دوم زنجیره، اغلب با دو نوع سازمان رو به روست: تأمین‌کننده مواد اولیه و پیمانکاران جزء که نحوه برنامه‌ریزی موجودی با آن‌ها متفاوت است. با توجه به اینکه در ابتدای پروژه، هنگامی که فعالیت‌های پروژه مشخص می‌شوند، مواد مورد نیاز فعالیت‌ها و حجم آن‌ها نیز مشخص می‌شود، در ابتدای پروژه امکان برنامه‌ریزی موجودی با تأمین‌کنندگان مواد اولیه میسر است. اما در مورد پیمانکار جزء، روش متفاوت است زیرا بخشی که به پیمانکاران جزء محول می‌شود، اغلب ساخت و تهیه قسمتی از اجزای پروژه است و تا زمانی که نقشه‌های مربوط به ساخت تهیه نشده باشد، امکان تعیین

کمبود می‌شود [۳]. در زنجیره‌های تأمین غیرپروژه‌ای، کل این هزینه‌های موجودی با توجه به محدودیت هر یک از عناصر و ارتباطی که بین این عناصر وجود دارد، حداقل می‌شود [۴]، [۵]، [۶]. در نگاه اول به نظر می‌رسد که همین روند را می‌توان در مورد زنجیره تأمین پروژه نیز به کار برد، اما با مطالعاتی که از سال ۱۹۸۰ در زمینه یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی موجودی و زمان‌بندی پروژه انجام شد [۷-۱۰]، به نظر می‌رسد که در مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، باید بحث زمان‌بندی نیز مد نظر قرار گیرد. از این رو در مدل ارائه شده در این مقاله، بحث زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین یکپارچه شده‌اند. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مدل ارائه شده شامل برنامه‌ریزی با منابع محدود می‌شود و برنامه‌ریزی با منابع محدود از نظر رده پیچیدگی NP_hard تلقی می‌شود [۱۱]، بنابراین این مدل نیز NP_hard محسوب می‌شود و برای حل این‌گونه مسائل، الگوریتم‌های قطعی موجود (مانند مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی) اغلب شامل تعداد بسیار زیادی متغیر و محدودیت هستند که از کارایی عملی آن‌ها در حل مسائل با ابعاد واقعی می‌کاهد، بدین لحاظ الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مسائل مورد توجه قرار گرفته است. از میان روش‌های مختلف ابتکاری، در این مقاله الگوریتم ژنتیک انتخاب شد، زیرا در هر تکرار به جای یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها (جمعیت) به وجود می‌آید که به این ترتیب امکان گرفتار شدن در تله بهینه محلی را کاهش می‌دهد. به این ترتیب در ادامه ابتدا مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه ارائه می‌شود. سپس بعد از معرفی مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک، مراحل لازم برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در حل مدل تشریح می‌شود. نحوه عملکرد مدل پیشنهادی طی یک مثال در بخش بعدی نشان داده شده است و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده مطرح می‌شود.

معرفی مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه

پیش از معرفی مدل ریاضی برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه لازم است تا فرضیه‌های در نظر گرفته‌شده در مورد زنجیره تأمین پروژه تشریح شود.

فعالیت‌ها، زمان و حجم سفارش پروژه و زمان و میزان تولید تأمین‌کننده به نحوی تنظیم می‌شوند که با رعایت انواع محدودیت‌های موجود، هزینه کل زنجیره حداقل شود. در ادامه پس از معرفی عوامل ورودی و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی ارائه می‌شود.

عوامل ورودی

در این مدل فرض می‌شود که شماره‌گذاری فعالیت‌ها در دیاگرام شبکه پروژه، از کمترین به بیشترین در جهت فلش است.

نمادهای مرتبط به فعالیت‌های پروژه

J: شماره فعالیت $J=1, \dots, J$ ، J شماره آخرین فعالیت و

نشان‌دهنده تعداد فعالیت‌ها است

B_j : مجموعه فعالیت‌های قبل از فعالیت J

B_0 : مجموعه فعالیت‌های بدون تقدم

e_j : زودترین زمان اتمام فعالیت J با فرض شروع در زمان صفر

t_j : مجموعه فعالیت‌ها که می‌توانند در زمان t تمام شوند (همه فعالیت‌های پیش نیاز آن‌ها انجام شده است)

z_j : دیرترین زمان اتمام فعالیت J با فرض اینکه H آخرین زمان تکمیل پروژه است

Z_j : طول فعالیت

W_j : ارزش فعالیت J به محض اتمام که برابر است با مجموع هزینه منابع مصرفی و غیرمصرفی در آن فعالیت

نمادهای مربوط به پروژه

d: تاریخ مقرر تحویل پروژه

H: حداکثر طول افق برنامه‌ریزی

P: جریمه دیرکرد به ازای هر واحد زمان تأخیر پس از زمان d

F: پاداش تکمیل پروژه به ازای هر واحد زمان زودتر از زمان d

S': درصدی از ارزش فعالیت که نشان‌دهنده هزینه نگهداری به ازای هر دوره، برای فعالیت‌های کامل شده است

t: متغیر زمان $t=1, \dots, H$

نمادهای مربوط به منابع

مواد و حجم مورد نیاز آن‌ها وجود ندارد. با توجه به اینکه اغلب طراحی این نقشه‌ها توسط پیمانکار اصلی و یا مشاور، در حین انجام پروژه انجام می‌گیرد، بنابراین با توجه به تجربه پیمانکار جزء در انجام فعالیت‌های مشابه، می‌توان فقط در مورد زمان و هزینه انجام کار با وی هماهنگی انجام داد؛ به این معنا که از پیمانکار جزء خواسته شود تا حالات مختلف انجام پروژه در زمان‌ها و با هزینه‌های مختلف را به پیمانکار اطلاع دهد تا پیمانکار از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی پروژه استفاده کند. در نتیجه برنامه‌ریزی موجودی فقط با تأمین‌کننده مواد اولیه و با هدف حداقل کردن هزینه‌های موجودی شامل هزینه دیرکرد و نگهداری موجودی، انجام می‌گیرد.

مدل ریاضی برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره

تأمین پروژه

همان طور که اشاره شد، در مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، اثرپذیری زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و سفارش مواد نیز مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های مختلفی که انجام گرفت، مشخص شد که از میان محدودیت‌های مختلفی که در انجام یک پروژه وجود دارد، محدودیت مالی باعث این اثرپذیری می‌شود، بنابراین با استفاده از این محدودیت، این اثرپذیری در مدل در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر باید برنامه‌ریزی موجودی پروژه و تأمین‌کننده نیز با هم یکپارچه شوند. بدین منظور برای تأمین‌کننده دو نوع سفارش در نظر گرفته شده است، یکی سفارش‌های پیمانکار و دیگری سفارش‌های سایر مشتریان تأمین‌کننده. برای هر سفارش دو عامل زمان و حجم سفارش در نظر گرفته شده است. فرض شده است که زمان و حجم سایر سفارش‌های تأمین‌کننده قطعی و مشخص است. زمان و حجم سفارش پیمانکار نیز به صورت متغیر تصمیم در مدل در نظر گرفته شده‌اند و این متغیرها به نحوی محاسبه می‌شوند که با توجه به اثرپذیری‌شان از زمان‌بندی فعالیت‌ها، هم هزینه‌های انجام فعالیت‌ها و موجودی پروژه و هم هزینه‌های تأمین‌کننده حداقل شود. همچنین با توجه به محدودیت ظرفیت تولید تأمین‌کننده، میزان حجم تولیدات روزانه تأمین‌کننده به نحوی تنظیم می‌شود که هزینه‌های نگهداری موجودی و دیرکردش حداقل شود. بنابراین در این مدل زمان‌بندی

T_{im} : زمان تحویل آمین سفارش سایر مشتریان
تأمین‌کننده m

نمادهای مربوط به محدودیت مالی

F : مجموعه زمان‌هایی که در آن‌ها طبق قرارداد، کارفرما بر اساس صورت وضعیت‌ها پول پرداخت می‌کند. فرض می‌شود که صورت وضعیت‌ها در فواصل زمانی برابر با p واحد زمان، به کارفرما تحویل داده می‌شود.
 O_f : میزان بودجه‌ای که از کارفرما در زمان f دریافت می‌شود.
 W : حداکثر مبلغی که می‌توان از منبع دوم تأمین کرد.

متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم این مدل شامل دو دسته متغیر هستند:

متغیرهای صفر و یک

$x_{jt}=1$: اگر فعالیت j در زمان t تمام شود و $x_{jt}=0$ غیر این صورت
 $\lambda_{mt}=1$: اگر ماده m در زمان t سفارش داده شود و $\lambda_{mt}=0$ در غیر این صورت

متغیرهای پیوسته غیر منفی

I_{mt} : سطح موجودی ماده m در انتهای زمان t
 q_{mt} : حجم سفارش داده شده از ماده m در زمان t
 W_t : ارزش پروژه در انتهای زمان t
 C_{mit} : میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده m در روز t به آمین سفارش
 C'_{mat} : مقدار تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده m در روز t به سفارشی که در روز a مورد نیاز است (λ_{ma})
 U_f : میزان پول مورد نیاز در زمان f که باید از منبع دوم تأمین شود

مدل ریاضی

$$\begin{aligned}
 \max TV = & \sum_{t=d}^H p(t-d)x_{jt} - \sum_{t=d}^a r(d-t)x_{jt} \\
 & + \sum_{t=1}^{H-1} s' \cdot W_t + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{H-L_m} G_{mt} \lambda_{mt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{H-1} h_{mt} I_{mt} \\
 & + \sum_{m=1}^M \sum_{a=2}^{H_m-L_m} \lambda_{ma} \cdot \sum_{t=1}^a C'_{mat} * h_{sm} * (a-t)
 \end{aligned}$$

k : شماره منبع $k=1, \dots, K$

F_{jk} : میزان نیاز روزانه فعالیت j به منبع k

A_k : میزان در دسترس بودن منبع k در هر روز

C_k : هزینه استفاده از هر واحد منبع k

نمادهای مربوط به مواد

m : شماره مواد $m=1, \dots, M$

δ_m : هزینه خرید هر واحد ماده m

G_m : هزینه سفارش ماده m

h_m : هزینه نگهداری یک واحد از ماده m در هر دوره

L_m : زمان تدارک ماده m

R_{jm} : مقدار ماده m مورد نیاز برای پردازش فعالیت j

(R_{jm} مستقل از طول فعالیت است)

نمادهای مربوط به تأمین‌کنندگان

با فرض اینکه هر یک از مواد مورد نیاز پیمانکار، یک تأمین‌کننده دارد، برای مشخص شدن تأمین‌کنندگان از همان شماره مواد استفاده می‌شود. برای مثال تأمین‌کننده شماره ۱، ماده شماره ۱ را برای پیمانکار تهیه می‌کند. همان گونه که در ابتدای این بخش بیان شد، تأمین‌کننده دو نوع سفارش دارد و هر سفارش زمان و حجم مشخصی دارد. زمان و حجم سفارش‌های پروژه، جزء متغیرهای تصمیم است، ولی زمان و حجم سفارش‌های سایر مشتریان به صورت عامل ورودی در نظر گرفته شده‌اند. در این جا هر یک از سفارش‌ها با توجه به ترتیب زمانی وقوع، شماره‌گذاری می‌شوند.

m : شماره تأمین‌کننده $m=1, \dots, M$

H_m : افق برنامه‌ریزی تأمین‌کننده m

C_m : حداکثر ظرفیت تولید تأمین‌کننده m در هر واحد زمان

i : تعداد سفارش‌های سایر مشتریان هر تأمین‌کننده، $i=1, \dots, I$

P_{im} : جریمه دیرکرد به ازای هر واحد زمان تأخیر در تحویل آمین سفارش تأمین‌کننده m

h_{sm} : هزینه نگهداری موجودی تأمین‌کننده m در واحد زمان

T'_m : هزینه حمل برای تأمین‌کننده

q_{im} : میزان آمین سفارش تأمین‌کننده m

$$(10) \quad + \sum_{t=f-p+1}^f \sum_{m=1}^M \lambda_{mt} G_{mt} \leq Q_f + u_f \quad \text{for } f \in F$$

$$(11) \quad \sum_{f \in F} u_f \leq W$$

$$\sum_{\alpha=1}^{H_m} c'_{mat} = q_{mt}$$

for each $m = 1, \dots, M$ $t = 1, \dots, H$ (12)

$$\sum_{t=1}^{H_m} c_{mt} = q_{mt} \quad \text{for } t = 1, \dots, I$$

$$\sum_{t=1}^I c_{mt} + \sum_{\alpha=1}^{H_m} c'_{mat} \leq C$$

for $t = 1, \dots, H_m$ $m = 1, \dots, M$ (13)

همان‌گونه که بیان شد، این مدل، ترکیبی از زمان‌بندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی موجودی است. از این رو تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که هزینه‌های مربوط به انجام پروژه و هزینه‌های برنامه‌ریزی موجودی را همزمان حداقل می‌کند. هزینه‌های پروژه که در ۳ جمله ابتدایی تابع هدف قرار دارند، به ترتیب عبارتند از هزینه تأخیر، پاداش پایان زودهنگام و هزینه نگهداری فعالیت‌های تکمیل‌شده. هزینه نگهداری فعالیت‌های تکمیل‌شده به این معنا است که وقتی یک فعالیت کامل می‌شود تا هنگام اتمام پروژه قابل استفاده نیست، بنابراین هزینه نگهداری ارزش فعالیت باید در نظر گرفته شود. هزینه مواد اولیه، نیروی انسانی و تجهیزاتی که برای انجام فعالیت صرف شده است، ارزش فعالیت محسوب می‌شود. جملات بعدی تابع هدف مربوط به هزینه‌های موجودی می‌شود. ۲ جمله ابتدایی، هزینه‌های سفارش مواد و نگهداری موجودی پروژه را نشان می‌دهند و ۴ جمله بعد هزینه نگهداری موجودی و هزینه دیرکرد تأمین‌کننده هستند که به ۲ جمله ابتدایی مربوط به سفارش‌های پیمانکار و ۲ جمله بعدی مربوط به سایر سفارش‌های تأمین‌کننده است. در این جا فرض شده است که موجودی تأمین‌کننده، فقط تا زمان تحویل نگهداری می‌شود و در

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{\alpha=1}^{H_m - L_m} \lambda_{ma} \cdot \sum_{t=\alpha+1}^{H_m - L_m} c'_{mat} * P_{\alpha t} * (t - \alpha)$$

$$+ \sum_{t=1}^I \sum_{m=1}^M c_{mt} * h_{sm} * (T_{tm} - t)$$

$$+ \sum_{t=1}^I \sum_{m=1}^M (c_{mt} * P_{tm} * (t - T_{tm}) + T'_{m,t})$$

$$+ (A \cdot \alpha + 1) \times \sum_{f \in F} u_f$$

S.T. (14)

$$\sum_{t=\sigma_t}^{i_t} t x_{jt} + z_j - \sum_{t=\sigma_t}^{i_t} t x_{jt} \leq 0 \quad \text{for each } t \in B_j$$

$$z_j - \sum_{t=\sigma_t}^{i_t} t x_{jt} \leq 0 \quad \text{for each } j \in B_0$$

$$\sum_{t=\sigma_t}^{i_t} x_{jt} = 1 \quad \text{for each } j = 1, 2, \dots, N$$

$$W_t \geq W_{t-1} + \sum_{j \in J_t} w_j x_{jt} \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, H$$

$$W_t \geq W_{t-1} + \sum_{j \in J_t} w_j x_{jt} - \sum_{j=1}^N w_j \times \sum_{t=\sigma_N}^t x_{Nt}$$

$$\sum_{j=1}^N \gamma_{jk} \sum_{\alpha=1}^{t-1+\alpha_j} x_{ja} \leq A_k \quad \text{for } k = 1, \dots, K$$

for $t = \sigma_j + 1, \dots, H$ (15)

$$I_{mt} = I_{m(t-1)} + q_{m(t-L_m)} - \sum_{j \in D_{mt}} R_{mj} x_{jt}$$

for $t = 1, \dots, H$, $m = 1, \dots, M$ (16)

$$Q \lambda_{mt} - q_{mt} \geq 0$$

$$\sum_{t=f-p+1}^f \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M C_k \gamma_{tk} \sum_{\alpha=t}^{t-1+\alpha_j} x_{t\alpha} + \sum_{t=f-p+1}^f \sum_{m=1}^M q_{mt} \delta_m$$

مجموع تولید در هر روز باید حداکثر برابر با ظرفیت تولید تأمین‌کننده باشد.

ارائه مدل الگوریتم ژنتیک برای حل مدل

برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه

همان‌گونه که اشاره شد، مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، NP_hard محسوب می‌شود و در این مقاله روش الگوریتم ژنتیک برای حل آن در نظر گرفته شده است. از این رو در ادامه ابتدا مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک بیان شده و سپس مدل طراحی شده ارائه می‌شود.

مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

اجرای الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله به این ترتیب است که ابتدا شکل جواب مسئله (کروموزوم‌ها) به نحوی که برای الگوریتم ژنتیک مناسب باشد تعیین می‌شود، سپس روش تولید جمعیت اولیه و نحوه محاسبه تابع (توابع) برآورد نیکویی جواب‌ها مشخص می‌شود. پس از تعیین عملگرهای ژنتیکی مانند تولیدمثل و جهش که ترکیبات فرزندان را در خلال تولید مجدد تحت تأثیر قرار می‌دهند، عوامل الگوریتم ژنتیک مانند اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ تولیدمثل و احتمال جهش نیز محاسبه می‌شوند. در ادامه بخش‌های بعد مراحل ذکر شده به طور کامل تشریح خواهد شد [۱۲-۱۵].

معرفی الگوریتم ژنتیک طراحی شده

همان‌گونه که در بخش ۲ نشان داده شد، مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه شامل متغیرها و محدودیت‌های بسیاری است که در نظر گرفتن همه این محدودیت‌ها و متغیرها در یک الگوریتم واحد، کار بسیار پیچیده و غیر ممکن است. در ادبیات، در چنین شرایطی از یک الگوریتم کلی و چندین زیر الگوریتم استفاده می‌شود [۱۶]. بنابراین در این مقاله نیز از چنین تکنیکی استفاده شده است. به این منظور، این زیربخش‌ها در الگوریتم طراحی شده در نظر گرفته شده است:

بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود: شامل متغیرهای تصمیم زمان اتمام فعالیت‌ها و ارزش پروژه و

زمان تحویل هر میزانی از سفارش که تولید شده است ارسال می‌شود و بقیه سفارش که به عقب افتاده، به محض تولید برای مشتری ارسال می‌شود. بنابراین هزینه نگهداری موجودی زمانی اتفاق می‌افتد که بخشی از سفارش‌آم تأمین‌کننده m در زمانی زودتر از زمان تحویل، تولید و نگهداری شود (مجموع C_{mit} هایی که قبل از T_{im} تولید شوند) و هزینه دیرکرد زمانی رخ می‌دهد که بخشی از سفارش در زمانی دیرتر از تاریخ تحویل، تولید و ارسال شود (مجموع C_{mit} هایی که بعد از T_{im} تولید شوند)، در ضمن فرض شده است که در صورت تأخیر هزینه حمل سفارش‌های به تعویق افتاده بر عهده تأمین‌کننده است که در هزینه دیرکرد لحاظ شده است. همان‌گونه که در ابتدای این بخش اشاره شد، پیمانکار از منبع دیگری نیز به تأمین مالی می‌پردازد که در پایان پروژه باید این مبلغ به همراه کارمزدش بازپرداخت شود، بنابراین در موازنه با سایر هزینه‌های مدل، میزان مبلغ بهینه‌ای که باید از منابع دوم تأمین شود نیز محاسبه می‌شود. هزینه این منبع در آخرین جمله تابع هدف نشان داده شده است. ۶ محدودیت اول مدل، محدودیت‌های انجام پروژه هستند. محدودیت ۳ و ۲ رابطه تقدمی بین فعالیت‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت ۴ بیان می‌کند که باید همه فعالیت‌های پروژه انجام شوند. محدودیت ۵ ارزش پروژه را محاسبه می‌کند که برابر است با مجموع ارزش همه فعالیت‌های تمام‌شده تا زمان t . برای جلوگیری از محاسبه چند باره ارزش پروژه بعد از تکمیل آن، محدودیت ۶ در نظر گرفته شده است. محدودیت ۷ هم محدودیت تعداد منابع غیرمصرفی در هر روز را نشان می‌دهد. دو محدودیت بعدی مربوط به برنامه‌ریزی مواد پروژه‌اند. محدودیت ۸ برای نظارت بر سطح موجودی در طول افق برنامه‌ریزی، در نظر گرفته شده است و با توجه به اینکه برای هر حجم سفارش باید یک سفارش انجام گیرد، محدودیت ۹ اضافه شده است. محدودیت ۱۰، محدودیت شرایط مالی را نشان می‌دهد و محدودیت ۱۱ حداکثر مبلغ منبع مالی دوم را نشان می‌دهد. سه محدودیت آخر نیز مربوط به تأمین‌کننده هستند. محدودیت ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده در روزهای مختلف به یک سفارش (چه پروژه، چه سایر مشتریان)، باید برابر با میزان آن سفارش باشد. محدودیت ۱۴ نیز نشان می‌دهد که

تعیین شده و برای شرایط مختلف پیمانکار جزء تکرار می‌شود و در نهایت از بین همه جواب‌ها، آن که کمترین هزینه را داشته باشد به عنوان جواب مسئله انتخاب می‌شود. در ادامه، نحوه تولید جواب‌های اولیه، محاسبه تابع هزینه، تعریف عملگرهای ژنتیکی (شامل انتخاب والد، جفت‌گیری و جهش) و تعیین عوامل الگوریتم ژنتیک هر بخش و همچنین نحوه بررسی شرایط محدودیت مالی و محاسبه کمترین هزینه هر نسل توضیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که مراحل الگوریتم ژنتیک بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود با اندکی تغییر، برگرفته از منبع [۱۱] و بقیه مراحل ایده‌های این مقاله است.

تعیین شکل جواب مسئله (کروموزم‌ها)

یکی از مهم‌ترین اجزای الگوریتم ژنتیک، شکل جواب مسئله (کروموزم‌ها) است. در الگوریتم طراحی شده، با توجه به متغیرهای تصمیم متعددی که وجود دارد، لازم است تا از شکل‌های مختلف کروموزوم استفاده شود. از این رو در بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود، کروموزوم‌ها با توجه به رابطه تقدمی فعالیت‌ها تولید می‌شوند، ولی در بخش‌های برنامه‌ریزی موجودی از قالب استاندارد دو به دو بی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به متغیرهای متعددی که در مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه وجود دارد و همچنین اثری که این متغیرها بر هم دارند، در الگوریتم طراحی شده فقط بعضی از متغیرها به شکل کروموزوم تعریف شده‌اند و سایر متغیرها بر اساس پاسخ کروموزوم‌ها به دست می‌آیند. بنابراین در ادامه برای هر بخش از مدل، ابتدا شکل کروموزوم توضیح داده می‌شود و سپس نحوه محاسبه متغیرهای دیگر آن بخش تشریح می‌شود.

شکل جواب مسئله در بخش برنامه‌ریزی با

منابع محدود

در کارهای انجام گرفته در زمینه برنامه‌ریزی با منابع محدود، اغلب کروموزوم‌ها به شکل زنجیره‌ای از فعالیت‌ها و با توجه به رابطه تقدمی آن‌ها تعریف می‌شوند [۱۱]. برای مثال یک پروژه ۱۰ فعالیتی را در نظر گرفته، با توجه به رابطه پیش‌نیازی فعالیت‌ها، شکل کروموزوم آن می‌تواند به این ترتیب باشد: (۱، ۲، ۴، ۳، ۷، ۶، ۹، ۸، ۱۰). در اینجا نیز از چنین روشی برای تعریف کروموزوم‌ها استفاده می‌شود.

محدودیت‌های ارتباط تقدمی فعالیت‌ها، تکمیل فعالیت‌ها، ارزش فعالیت‌ها و محدودیت منابع غیر مصرفی است.

بخش برنامه‌ریزی یکپارچه موجودی پیمانکار با تأمین‌کنندگانی که اتحاد استراتژیک تشکیل داده‌اند:

شامل متغیرهای تصمیم زمان سفارش، حجم سفارش و سطح موجودی موادی که پیمانکار سفارش می‌دهد و میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده به سفارش‌ها است. محدودیت‌های این بخش نیز عبارتند از معادلات توازن موجودی، سفارش مواد و محدودیت ظرفیت تولید تأمین‌کننده.

بخش برنامه‌ریزی موجودی برای سایر اقلام: شامل

متغیرهای تصمیم زمان سفارش، حجم سفارش و سطح موجودی مواد و محدودیت‌های معادلات توازن موجودی و سفارش مواد است.

بخش محدودیت مالی: شامل متغیر تصمیم میزان حجم

تأمین مالی از منبع دوم و محدودیت مالی می‌شود. نحوه ارتباط این زیر بخش‌ها به این ترتیب است که ابتدا زیر بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود حل شده و در پایان جمعیتی شامل زمان اتمام فعالیت‌ها، تولید می‌شود. سپس بر مبنای زمان اتمام فعالیت‌ها که در هر یک از کروموزوم‌های این جمعیت ایجاد شده‌اند، در بخش برنامه‌ریزی یکپارچه موجودی پیمانکار با تأمین‌کنندگان و بخش برنامه‌ریزی موجودی برای سایر اقلام، به طور مجزا، جمعیتی معادل جمعیت بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود تولید می‌شود که برای هر کروموزوم آن زمان و حجم سفارش مواد، سطح موجودی و میزان تولید تأمین‌کننده مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که در هر بخش برنامه‌ریزی موجودی، محاسبات مربوط به یک ماده انجام می‌گیرد، در نتیجه تعداد بخش‌های برنامه‌ریزی موجودی، بسته به تعداد مواد مورد نیاز پروژه است. سپس پاسخ‌های به دست آمده مربوط به کروموزوم‌های معادل همه جمعیت‌های تولید شده، با هم یکپارچه شده و وارد بخش محدودیت مالی می‌شود. آن کروموزوم‌های یکپارچه‌ای که شرایط محدودیت مالی را داشته باشند، وارد مرحله بعد شده و از بین آن‌ها، آن کروموزومی که کمترین هزینه را داشته باشد، به عنوان بهترین جواب این نسل انتخاب می‌شود. کل این روند به تعداد اندازه نسل

زمان‌های ۵، ۸ و ۱ ماده مورد نظر سفارش داده شود. به این ترتیب متغیر زمان سفارش تعیین می‌شود. متغیرهای دیگر این بخش عبارتند از: حجم سفارش، سطح موجودی موادی که پیمانکار سفارش می‌دهد و میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده به هر یک از سفارش‌ها. در ادامه نحوه تولید هر یک از این متغیرها توضیح داده می‌شود.

حجم سفارش مواد: برای به دست آوردن حجم سفارش مواد به این ترتیب عمل می‌شود که بر اساس کروموزوم‌های تولید شده در جمعیت اولیه، میزان حجم مواد مورد نیاز بین دو زمان سفارش محاسبه می‌شود، این حجم از مواد، میزان سفارش را مشخص می‌کند.

سطح موجودی مواد پیمانکار: متغیر دیگری که در این بخش باید محاسبه شود، سطح موجودی مواد پیمانکار است. برای محاسبه این متغیر مانند محدودیت ۸ عمل می‌شود.

میزان تولید اختصاص یافته به هر سفارش: همان طور که در بخش ۲ توضیح داده شد، برای تعیین میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده به هر یک از سفارش‌ها، ابتدا سفارش‌ها به ترتیب زمان وقوع شماره‌گذاری می‌شوند. سپس زمان و حجم هر یک از سفارش‌ها معین می‌شود. با توجه به اینکه سفارش پیمانکار در اولویت قرار دارد، ابتدا سفارش‌های پیمانکار تولید می‌شود. با توجه به محدودیت ظرفیت تولیدکننده و با در نظر گرفتن بروز حداقل هزینه برای تأمین‌کننده، برای پرهیز از پیچیده شدن مسئله فرض می‌شود که ابتدا سفارش‌های مربوط به هر واحد زمان در همان زمان تولید می‌شود؛ آنگاه اگر میزان تقاضا در یک واحد زمان بیش از ظرفیت تولید بود، با توجه به هزینه نگهداری موجودی و هزینه دیرکرد، بقیه تقاضا باید قبل و یا بعد از زمان سفارش تولید شود. پس از محاسبات مربوط به پیمانکار، سفارش‌های سایر مشتریان با توجه به ترتیب زمان وقوع، تنظیم می‌شود. لازم به یادآوری است که این محاسبات در بخش برنامه‌ریزی موجودی سایر اقسام، انجام نمی‌گیرد.

نحوه تولید جمعیت اولیه

اما با توجه به اینکه متغیر تصمیم در این قسمت زمان اتمام فعالیت‌ها است، بنابراین با توجه به شکل کروموزوم تولید شده و نحوه ترتیب فعالیت‌ها در آن، زمان اتمام فعالیت‌های آن کروموزوم به شرح زیر محاسبه می‌شود: با فرض اینکه تعداد فعالیت‌ها برابر با J است:

```

for t = J to 1
   $\pi R_{kt} := R_k - \sum_{j \in A_t} r_{jk} \quad k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, H$ 
   $j^* := s(t)$ 
   $LS_{j^*} := \min\{ST_j | j \in S_{j^*}\} - d_{j^*}$ 
   $ST_{j^*} := \text{choose at random}$ 
   $\left\{ \begin{array}{l} ES_{j^*} \leq t \leq LS_{j^*}, r_{j^*k} \leq \pi R_{kt}, k = 1, \dots, K_t \\ r = t, t + 1, \dots, t + d_{j^*} - 1 \end{array} \right\}$ 
   $FT_{j^*} := ST_{j^*} + d_{j^*}$ 
End;
```

در این جا، S زنجیره فعالیت‌ها با توجه به رابطه تقدمی است، $s(j)$ نشان‌دهنده فعالیتی است که در مکان j در زنجیره S قرار گرفته است، S_{j^*} مجموعه فعالیت‌هایی است که بلافاصله بعد از j^* قرار دارند و ST_{j^*} ، FT_{j^*} ، ES_{j^*} ، LS_{j^*} به ترتیب زمان واقعی شروع، زمان واقعی پایان، زودترین زمان شروع و دیرترین زمان شروع فعالیت j^* هستند. πR_{kt} حجمی از منبع k است که در زمان t اشغال نشده است. A_t مجموعه فعالیت‌هایی است که در زمان t در حال اجرا هستند.

متغیر دیگری که در این بخش وجود دارد، متغیر ارزش پروژه است که طبق محدودیت ۵، محاسبه می‌شود.

شکل جواب مسئله در بخش‌های برنامه‌ریزی موجودی

همان طور که در ابتدای این بخش بیان شد، کروموزوم‌های بخش برنامه‌ریزی موجودی به شکل استاندارد دو به دویی در نظر گرفته شده‌اند و این کروموزوم‌ها مقدار متغیر تصمیم زمان سفارش را مشخص می‌کنند. به این ترتیب که تعداد ژن‌های هر کروموزوم نشان‌دهنده زمان است و اگر مقدار ژنی برابر با یک شد یعنی در آن زمان سفارش انجام می‌گیرد و اگر برابر صفر شد به این معناست که در آن زمان سفارشی انجام نمی‌گیرد. برای مثال اگر کل زمان قابل قبول برای سفارش یک ماده ۱۰ واحد باشد، کروموزوم این بخش می‌تواند به این شکل باشد: (۰، ۱، ۰، ۰، ۰، ۰، ۰، ۰، ۰، ۰) به این معنا که در

با توجه به اینکه سفارش مواد باید قبل از شروع فعالیت‌ها انجام گیرد و با در نظر گرفتن زمان حمل مواد از تأمین‌کننده به سمت پیمانکار، در جمعیت اولیه مربوط به هر ماده، برای محاسبه T ، زمان شروع آخرین فعالیتی که به ماده مورد نظر نیاز دارد، از زمان حمل و نقل کم می‌شود.

انجام عملیات اصلاحی: در این مرحله سه عملیات اصلاحی به شرح زیر روی جمعیت اولیه هر یک از مواد انجام می‌گیرد:

۱- با توجه به اینکه حداکثر تعداد سفارش یک ماده برابر با تعداد فعالیت‌هایی است که به آن ماده نیاز دارند، در این صورت اگر تعداد ژن‌هایی که در یک کروموزوم دارای مقدار ۱ هستند، بیش از تعداد فعالیت‌های نیازمند به آن ماده بود، آنگاه کروموزوم به نحوی اصلاح می‌شوند که حداکثر تعداد ژن‌های دارای مقدار ۱، برابر با تعداد فعالیت‌ها شود.

۲- با توجه به اینکه مواد مورد نیاز باید قبل از شروع اولین فعالیتی که به آن‌ها نیاز دارد، سفارش داده شوند و با در نظر گرفتن زمان حمل و نقل، اصلاح دیگری انجام می‌گیرد تا اگر پیش از زمان شروع اولین فعالیت، هیچ درایه‌ای برابر یک نشده است، آنگاه درایه مربوط به دیرترین زمان ممکن برای سفارش، برابر ۱ شود.

۳- بررسی می‌شود که اگر بین دو زمان سفارش، هیچ فعالیتی نیاز به ماده مورد نظر نداشته باشد، درایه مربوط به اولین آن‌ها صفر شود.

نحوه محاسبه تابع هدف کل

در این الگوریتم ابتدا در هر بخش از مدل، هزینه هر کروموزوم محاسبه می‌شود. در بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود، جریمه دیرکرد، پاداش زود هنگام و هزینه ارزش پروژه در نظر گرفته می‌شود. در بخش برنامه‌ریزی موجودی یکپارچه، هزینه نگهداری موجودی و سفارش مواد پیمانکار و هزینه‌های موجودی و جریمه دیرکرد تأمین‌کننده، تابع هدف را تشکیل می‌دهند. در بخش برنامه‌ریزی موجودی سایر اقلام فقط هزینه‌های پیمانکار در نظر گرفته می‌شود. سپس این هزینه‌ها برای کروموزوم‌های معادل یکپارچه می‌شود. از بین کروموزوم‌هایی که شرایط محدودیت مالی را تأمین کنند،

گام بعدی در الگوریتم ژنتیک، تعریف جمعیت اولیه است. همان طور که توضیح داده شد، ابتدا جمعیت اولیه بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود شکل می‌گیرد و سپس جمعیت اولیه مربوط به هر یک از مواد در بخش‌های برنامه‌ریزی موجودی. در این قسمت نحوه شکل‌گیری هر یک از این جمعیت‌ها توضیح داده می‌شود.

نحوه شکل‌گیری جمعیت اولیه بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود

با توجه به کروموزوم طراحی شده برای این بخش، جمعیت اولیه به طور تصادفی به شکل زیر تولید می‌شود:

```
for i = 1 to popsize
  n = J , s(n) = j
  while n > 1 Do
    En := {j | Sj ⊆ {s(n), s(n+1), ..., s(j)}, j = 1, 2, ..., J}
    choose at random: j* ∈ En
    s(n-1) = j* ; n = n - 1
  End;
End;
```

به این ترتیب جمعیت اولیه به اندازه Popsiz تولید می‌شود. در این محاسبات E_n مجموعه فعالیت‌های شدنی است که فعالیت‌های بعدی آن‌ها در زنجیره قرار گرفته‌اند.

نحوه شکل‌گیری جمعیت اولیه بخش‌های برنامه‌ریزی موجودی

همان طور که ذکر شد، کروموزوم‌های این بخش به صورت دو به دویی تعریف شده‌اند. بنابراین برای تولید جمعیت اولیه شدنی و برای پرهیز از پیچیده‌شدن مسئله، ابتدا جمعیت اولیه برای مشخص شدن زمان سفارش به طور تصادفی، تولید می‌شود. سپس برای رعایت محدودیت‌های مدل و با توجه به وابستگی این جمعیت به بخش برنامه‌ریزی با منابع محدود، اصلاحات لازم در مدل اعمال می‌شود.

تولید جمعیت اولیه: جمعیت اولیه مربوط به هر یک از مواد، ماتریسی با ابعاد $\text{Popsiz} \times T$ است. برای مقاردهی به این ماتریس، برای هر درایه عددی به طور تصادفی بین ۰ و ۱۰ تولید می‌شود. اگر این مقدار کوچک‌تر مساوی ۰.۵ بود، مقدار آن درایه صفر و در غیر این صورت ۱ می‌شود. برای پرهیز از افزایش بی‌دلیل تعداد متغیرها،

J در این زنجیره قرار دارد، برای جهش انتخاب می‌شود و $p(k)$ نشان‌دهنده موقعیت این فعالیت در زنجیره است. سپس دو عامل LP, SS در نظر گرفته می‌شوند، به نحوی که LP نشان‌دهنده بزرگ‌ترین موقعیت در زنجیره S است که بلافاصله قبل از $s(j)$ قرار گرفته و SS نشان‌دهنده کمترین موقعیت در زنجیره S است که بلافاصله بعد از $s(j)$ قرار دارد. روند عملیات جهش به این شکل است:

```

choose at random:  $J \in (1, J)$ ;
 $LP := \max\{p(t) | t \in P_s(j)\}$ ,  $SS := \min\{p(t) | t \in S_s(j)\}$ 
choose at random:  $k \in (LP, SS)$  and  $k \neq J$ ;
temp :=  $s(j)$ ;
if  $k < J \rightarrow$  for  $t = J - 1$  to  $k$ 
     $s(t + 1) := s(t)$ ;
End;
else for  $t = J$  to  $k - 1$ 
     $s(t) := s(t - 1)$ ;
E
End;
 $s(k) := temp$ ;

```

انتخاب عوامل الگوریتم ژنتیک

منظور از عوامل ژنتیکی، عوامل مؤثر بر نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک هستند که به این شرح هستند: اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها (دفعات تکرار الگوریتم ژنتیک)، احتمال تولیدمثل و احتمال جهش (P_m, P_c). اغلب برای انتخاب این عوامل از روش سعی و خطا استفاده می‌شود. در مورد اندازه جمعیت و تعداد نسل‌ها بدیهی است که هر چه جمعیت بزرگ‌تر باشد و الگوریتم به دفعات بیشتری تکرار شود، جواب‌های نهایی بهتر خواهند بود. اما چون این موضوع خطر افزایش زمان را دارد، بنابراین باید این مطلب در نظر گرفته شود. برای محاسبه دو عامل احتمال تولیدمثل و احتمال جهش متناظر با هر جواب موجود در جمعیت، یک احتمال تعریف می‌شود که مقدار آن بستگی به مقدار نیکویی جواب دارد. برای محاسبه احتمال مورد نظر، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها روش «چرخ رولت وزنی» است که در آن شانس هر جواب برای انتخاب شدن و انجام تولید مثل به مقدار نیکویی آن بستگی دارد [۱۸].

آنکه کمترین هزینه را دارد به عنوان جواب در نظر گرفته می‌شود.

تعریف عملگرهای ژنتیکی

انتخاب عملگرها مهم‌ترین بخش الگوریتم ژنتیک هستند. نحوه تعریف عملگرها تأثیر بسزایی در عملکرد الگوریتم ژنتیک دارد. در واقع الگوریتم ژنتیک، به وسیله عملگرهای ژنتیکی، عمل جستجو بر فضای جواب را برای یافتن جواب‌های جدید انجام می‌دهد. اغلب سعی می‌شود عملگرها به نحوی تعریف شوند که تابع نیکویی جواب‌های جدید (فرزندان) بهتر از والدین باشد. با توجه به مدل طراحی‌شده فقط زیر بخش برنامه‌ریزی منابع محدود، دارای عملگرهای انتخاب، تولید مثل و جهش است که در ادامه تعریف هر یک آورده شده است.

عملگر انتخاب

در این مدل، از روش تورنومنت برای انتخاب والدین استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا به طور تصادفی یک زیر مجموعه از جمعیت انتخاب می‌شود، کروموزوم با کمترین هزینه به عنوان یک والد انتخاب شده و این عملیات آن قدر تکرار می‌شود که جمعیت به حد نصاب برسد [۱۷].

عملگر تولید مثل

با توجه به کروموزوم تعریف شده برای این بخش، عملگر تولیدمثل باید قادر باشد تا کروموزوم‌هایی را تولید کند که رابطه پیش‌نیازی فعالیت‌ها حفظ شود. از این رو یک عملگر تولیدمثل یک نقطه‌ای به شرح زیر در نظر گرفته شد که در آن $SP1, SP2$ والدین و $SC1, SC2$ فرزندان هستند.

```

Generate an Integer at random:  $r \in (1, J)$ 
for  $j = J$  to  $r$   $SC1(j) := SP1(j)$ ;
for  $j = J$  to  $1$  {if  $SP2(j) \in SC1$  then
 $r := r - 1$ ;  $SC1(r) := SP2(j)$ ;}

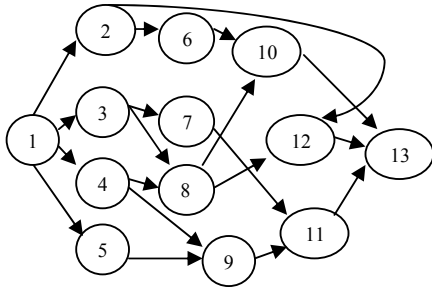
```

عملگر جهش

برای انجام عملیات جهش بر جمعیت، به این ترتیب زیر عمل می‌شود. ابتدا چند کروموزوم به طور تصادفی برای جهش انتخاب می‌شوند. با در نظر گرفتن S به عنوان زنجیره فعالیت‌ها با ارتباط تقدمی، فعالیتی که در موقعیت

نتایج حاصل از حل مدل برای مثال نمونه، توسط الگوریتم ژنتیک

در این قسمت نتایج حاصل از حل یک مثال نمونه، توسط مدل پیشنهاد شده ارائه می‌شود. در این مثال یک پروژه ۱۳ فعالیتی در نظر گرفته شده است که مبلغ قرارداد این پروژه ۲۴۵۰۰۰ واحد پول است. برای انجام این فعالیت‌ها به دو نوع منبع نیاز است. در ضمن، این پروژه به ۴ نوع ماده نیاز دارد که با توجه به حیاتی بودن یک نوع از این مواد و حجم نیاز به آن، پیمانکار تصمیم گرفته است که با تأمین‌کننده آن اتحاد استراتژیک تشکیل دهد. همچنین برای انجام این پروژه به ۲ پیمانکار جزء نیاز است که هماهنگی‌های لازم برای همکاری با آن‌ها نیز انجام گرفته است.



شکل ۲: شبکه فعالیت‌های مثال نمونه

جدول ۱: عوامل فعالیت‌های پروژه.

میزان نیاز به منبع		میزان نیاز به ماده				طول فعالیت	پیش‌نیازها	فعالیت J
k2	k1	m4	m3	m2	m1			
۲	۲	۶۰	-	۷۰	-	۱	-	۱
۴	۲	-	۱۰۰	-	۵۰	۸	۱	۲
-	۳	۸۰	-	۵۰	-	۳	۱	۳
-	-	-	-	-	-	۳ یا ۶	۱	*۴
۳	-	۶۰	۸۰	۸۰	۳۰	۲	۱	۵
۲	-	۸۰	۱۰۰	-	۴۰	۴	۲	۶
-	-	-	-	-	-	۵ یا ۸	۳	*۷
-	۳	-	۹۰	-	۲۰	۴	۳، ۴	۸
-	۳	۶۰	-	۱۰۰	-	۳	۴، ۵	۹
۳	-	۸۰	-	۷۰	-	۱	۶، ۸	۱۰
۳	-	-	۱۲۰	-	۵۰	۵	۷، ۹	۱۱
۲	۲	۶۰	-	-	۴۰	۶	۲، ۸	۱۲
-	۱	۵۰	-	۸۰	۲۰	۳	۱۰، ۱۱، ۱۲	۱۳

موعد پروژه: ۳۰، افق نهایی: ۳۵، جریمه دیرکرد: ۱۰۰۰، پاداش زود هنگام: ۱۵۰۰، هزینه نگهداری فعالیت‌های تکمیل شده: ۰.۱

جدول ۲: برنامه زمانی سفارش های مشتریان تأمین کننده ماده ۳.

زمان سفارش	حجم سفارش	زمان سفارش	حجم سفارش	زمان سفارش	حجم سفارش	زمان سفارش	حجم سفارش
۱	-	۱۰	۱۴۰	۱۹	-	۲۸	۲۰۰
۲	۲۰۰	۱۱	-	۲۰	۲۰۰	۲۹	-
۳	۱۵۰	۱۲	-	۲۱	۱۰۰	۳۰	۲۴۰
۴	۱۰۰	۱۳	۲۵۰	۲۲	۱۵۰	۳۱	۲۲۰
۵	۲۲۰	۱۴	-	۲۳	۱۵۰	۳۲	۳۵۰
۶	۱۸۰	۱۵	۲۱۰	۲۴	۲۵۰	۳۳	-
۷	۱۰۰	۱۶	۲۲۰	۲۵	۱۰۰	۳۴	-
۸	-	۱۷	۱۵۰	۲۶	۱۸۰	۳۵	-
۹	۱۹۰	۱۸	۱۸۰	۲۷	۱۵۰		

حداکثر ظرفیت: ۲۰۰ واحد، هزینه ی دیرکرد به ازای هر روز: ۱۰

جدول ۳: مقایسه نتایج Lingo و الگوریتم ژنتیک.

شماره ی مساله	تعداد فعالیت	تعداد تأمین کننده متحد	زمان حل Lingo	زمان حل GA	تابع هدف Lingo	تابع هدف GA
۱	۵	۱	۹۰ ثانیه	۵ ثانیه	۸۰۶۴	۷۵۶۳
۲	۷	۱	۳ دقیقه	۱۰ ثانیه	۱۱۵۲۶	۱۰۴۱۲
۳	۱۳	۱	حل نمیشود	۵۰ ثانیه	۲۱۲۰۲۸	-
۴	۱۵	۲	"	۶۰ ثانیه	۲۲۶۵۴۸	-
۵	۲۰	۲	"	۷۵ ثانیه	۳۵۶۲۴۸	-

واحد است. نرخ سود وام معادل ۱۰ درصد به ازای هر ماه در نظر گرفته شده است.

در اینجا اندازه جمعیت ۳۰، احتمال تولیدمثل ۰.۶ و احتمال جهش ۰.۰۶ در نظر گرفته شده است.

با حل مدل توسط الگوریتم ژنتیک، ترتیب انجام فعالیت ها (۱،۳،۹،۱۱،۱۲،۱۰،۴،۲،۷،۳،۵،۱) و زمان پایان فعالیت ها به ترتیب از ۱ تا ۱۳ عبارت شد از (۱۰،۷،۱۲،۴،۲۷،۲۲،۱۸،۱۷،۱۳،۱۵،۱۲،۱۶،۹). مقرر شد ماده ۱ در زمان های ۲، ۹، ۲۲ و با حجم ۲۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ماده ۲ در زمان های ۱، ۲۲، ۸ و با حجم ۸۰، ۱۷۰، ۲۰۰، ماده ۳ در زمان های ۱۴، ۱۰، ۲، ۸ و با حجم ۱۳۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ماده ۴ در زمان های ۱، ۴، در زمان های ۱، ۱۴ با حجم ۳۴۰، ۱۹۰ سفارش داده شوند. بر اساس برنامه ای هم که

میزان در دسترس از منبع اول ۴ واحد و از منبع دوم ۵ واحد است. فعالیت های ۴ و ۷ به پیمانکار جزء، محول شده اند. پیمانکاران اعلام کرده اند که فعالیت ۴ در دو زمان ۳ یا ۶ با هزینه ۲۰۰۰ یا ۱۴۰۰ و فعالیت ۷ در دو زمان ۵ یا ۸ با هزینه ۱۵۰۰ یا ۱۰۰۰ انجام پذیر است.

زمان تدارک مواد به ترتیب ۲، ۲، ۳ است. با تأمین کننده ماده ۳ اتحاد استراتژیک برقرار شده است که اطلاعات آن در جدول ۲ آورده شده است.

در این پروژه به توجه به قراردادی که با کارفرما بسته شده، تخمین زده شده است که برای ۱۰ روز اول پروژه ۴۵۰۰۰ واحد پول، برای ۱۰ روز دوم ۳۵۰۰۰ واحد و در مرحله آخر ۵۵۰۰۰ واحد پول دریافت می شود. حداکثر مبلغی هم که می توان از منبع دوم تأمین کرد، ۵۰۰۰۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای آینده

در این مقاله تلاش شد برای ایجاد یکپارچگی در زنجیره تأمین پروژه، مدل موجودی یکپارچه‌ای ارائه شود. در این مدل، زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه، زمان و حجم سفارش‌های پروژه و برنامه تولید تأمین‌کننده به طور همزمان، به نحوی تنظیم شد که هزینه‌های کل زنجیره حداقل شود. سپس با توجه به اینکه مدل ارائه‌شده جزء مسائل NP-hard محسوب می‌شود، الگوریتم ژنتیکی متناسب با شرایط مدل، برای حل آن ارائه شد.

با توجه به اینکه فرضیه‌های مختلفی در شکل‌گیری مدل مورد استفاده قرار گرفته است، به نظر می‌رسد با ایجاد تغییراتی در فرضیه‌ها و محدودیت‌های آن می‌توان مدل را بهبود داد. در ضمن با توجه به اینکه فقط دو متغیر توسط کروموزوم‌های الگوریتم حل شدند و بقیه با در نظر گرفتن فرضیه‌هایی، توسط برنامه ارائه‌شده حل شدند، اگر بتوان در ضمن حل الگوریتم، سایر متغیرها را توسط نرم‌افزارهای بهینه‌یابی مانند Lingo حل کرد، پاسخ‌های دقیق‌تری به دست خواهد آمد.

برای تأمین‌کننده ماده ۳ تعیین شد، هزینه موجودی برابر ۲۱۷۰۰ و جریمه دیرکرد معادل ۱۱۶۰۰، محاسبه شد. لازم به ذکر است که به دلیل هماهنگی ایجاد شده، هیچ یک از سفارش‌های پیمانکار به تعویق نیفتاد. همچنین پیمانکار باید ۳۵۴۸۰ واحد پول را از منبع دوم تأمین کند. بر اساس این پاسخ‌ها مدت زمان انجام پروژه ۲۷ روز و هزینه کل زنجیره تأمین پروژه برابر با ۲۱۲۰۲۸ واحد پول می‌شود. متوسط مقدار تابع هدف با افزایش تکرارهای الگوریتم ژنتیک بهبود می‌یابد. اما با توجه به زمان حل، در تعداد تکرار ۳۰، بهترین پاسخ به دست آمد.

برای اینکه کارایی مدل الگوریتم ژنتیک طراحی‌شده، نشان داده شود، چند مثال با داده‌های تصادفی توسط نرم‌افزار Lingo حل شده است. برای مقایسه کارایی این دو روش دو شاخص در نظر گرفته شده است: زمان لازم برای حل مسئله و مقدار به دست آمده برای تابع هدف. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول (۳) آورده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کارایی الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده در مقایسه با نرم‌افزار Lingo برای مسائل با ابعاد بزرگ بهتر است، ولی زمان حل و کیفیت جواب‌های به دست آمده برای مسائل کوچک (تعداد فعالیت‌ها کمتر از ۱۳) توسط نرم‌افزار Lingo بهتر است.

مراجع

- 1- Parrod, N., Thierry, C., Fargier, H. and Cavaille, J., B. (2007). "Cooperative subcontracting relationship within a project supply chain: A simulation approach." *Simulation Modeling Practice and Theory*.
- 2- Chen, C., Y. and Zhao, Y. (2007). Integrating Inventory Planning with Project Management in Project-Driven Supply Chains.
- 3- Chopra, S. and Meindl, P. (2007). Supply Chain Management: strategy, Planning and Operation. third edition.
- 4- Cachon, G. P. and Fisher, M. (2000). "Supply chain inventory management and the value of shared information." *Management Science*, Vol. 46, No. 8.
- 5- Graves, S., C. and Willems, S. P. (2000). "Optimizing strategic safety stock placement in supply chains." *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 2, No. 1.
- 6- Sucky, E. (2005). "Inventory management in Supply Chains: A bargaining problem." *Int. J. of Production Economics*.
- 7- Aquilano, N., J. and Smith, D., E. (1980). "A Formal set of algorithms for project scheduling with critical path method- material requirement planning." *Journal of Operation Management*, Vol. 1, No. 2, PP. 57-67.
- 8- Smith, D., E. and Aquilano, N., J. (1984). "Constrained resource project scheduling subject to material constraints." *Journal of Operation Management*, Vol. 4, No. 4, PP. 369-388.

- 9- Smith-Daniels, D. E. and Smith-Daniels, V.,L. (1987). "Optimal project scheduling with materials ordering." *IIE transaction*, Vol.19, No.2, PP.122-129.
- 10-Dodin,B. and Elmam,A. (2001). "Integrated project scheduling and material planning with variable activity duration and reward." *IIE Transaction*, Vol.33, PP.1005-1018.
- 11- Liu, Z. and Wang, H.(2005). "GA-Based resource-constrained project scheduling with the objective of minimizing activities' Cost". ICIC2005, Part I, LNCS 3644, PP. 937-946.
- 12- Chamber, Lance,(2001). *The Practical Handbook of Genetic Algorithms, Applications*, Second Edition.
- 13-Asgharpour, M.J. and Javadian, N.(1383). Designing the cellular manufacturing system in dynamic & stochastic states & solve it by using a genetic algorithm, University College of Engineering, Vol. 8, No. 31, PP. 107-119.
- 14-Asgharpour, M.J. and Ebrahim Nejad, S.A. (1380). Traffic assignment model for urban transportation network and solve it using genetic algorithm, University College of Engineering, Vol. 35, No. 4, PP. 587-602.
- 15-Pahlavani, P. and Samadzadegan, F. (1387). Analysis of GIS-based genetic algorithm in multi-objective route selection, University College of Engineering, Vol. 42, No. 3, PP. 287-299.
- 16-Leu S.S., Chen A.T. and Yang C.H. (2001). "A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off". *International Journal of Project Management*, Vol. 19, PP. 47-58.
- 17- Reeves R.R. and Rowe J.E. (2003). *Genetic Algorithms, Principles and Perspectives, A Guide to GA Theory*.
- 18- Coley D.A. (1999). "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers". Singapore.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Non-deterministic polynomial-time hard
- 2-Resource Constraint Project Scheduling