دانش مدیریت
شماره ۶۳ ـ زمستان ۱۳۸۲
ص‌ص ۱۳۱ـ۱۵۳

کاربرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات

دکتر محمدمدرس* ـ دکتر سعید خدامرادی**

چکیده

در این مقاله با ا ستفاده از یک مدل ریاضی روش جدیدی جهت برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه ظرفیت[1] و جایگزینی ماشین‌آلات[2] با انجام تجزیه و تحلیل معیارهای مالی، عملیاتی، و سرمایه‌گذاری ارایه می‌گردد. از آن‌جا که راهبردهای بلندمدت هر سازمان با طرح‌های ظرفیتی تبیین می‌شود و از طرفی اجرای چنین طرح‌هایی مستلزم هزینه‌های بسیار بالا و در عین حال غیرقابل برگشت است ازاین‌رو فرایند تصمیم‌گیری درمورد طرح‌های توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات و تجهیزات مسأله‌ای حساس و پیچیده در مراکز صنعتی است.

مدل ریاضی حاصل از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[3] شامل متغیرهای پیوسته و صفر و یک است .با توجه به این‌که مدل حاصل بسیارپیچیده و بزرگ است و قابل حل با روش‌های تحلیلی موجود نیست ازاین‌رو روش حل این مسأله با در نظر گرفتن ویژگی‌های مدل ریاضی توسعه می‌یابد. این مدل در چارچوب الگوریتم ژنتیک مختلط[4] طراحی می‌گردد. در پایان برای اطمینان از اعتبار روش ارایه شده، نتایج حل مدل ریاضی با نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقایسه می‌شوند. یک مورد واقعی نیز معرفی و با استفاده از روش پیشنهادی بررسی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: توسعه ظرفیت، جایگزینی ماشین‌آلات، برنامه‌ریزی عدد صحیح، الگوریتم ژنتیک مختلط.

---

* استاد دانشگاه صنعتی شریف
** دکتری مدیریت تولید از دانشگاه تهران

1. Capacity Expansion
2. Equipment Replacement
3. Mixed Integer Programming (MIP)
4. Hybrid Genetic Algorithm

مقدمه

در این تحقیق دو موضوع برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی تجهیزات را طی یک مدل بررسی می‌کنیم. برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت عبارت است از تعیین مکان، زمان، و اندازه طرح‌های نصب ماشین‌آلات و راه‌اندازی خطوط تولیدی برای افزایش توان تولیدی صنایع با هدف ایجاد توازن بین صرفه‌جویی حاصل از مقیاس[1] ظرفیت ایجاد شده و هزینه ظرفیت مازاد. جایگزینی تجهیزات و ماشین‌آلات نیز به فرایند تعویض ماشین‌آلات قدیمی با هدف افزایش بازده تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری اطلاق می‌شود.

اگرچه در هر دو زمینه برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی تجهیزات و ماشین‌آلات تحقیقات زیادی انجام شده ولی عمدتاً مجزا بوده است. طی سال‌های اخیر برخی از محققان در صدد طراحی مدل‌هایی برای تحلیل یکپارچه هر دو بحث بوده‌اند. برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات به‌عنوان یک فرایند تحلیلی پیش سرمایه‌گذاری[2] از عوامل مختلفی متأثر است. رشد تقاضا، گزینه‌های فناوری، متغیرهای هزینه‌ای مربوط به تحقق ظرفیت، ارزش زمانی پول، تعدد محصولات و مکان‌های تولید، جریانات نقدی آتی، نحوه تأمین منابع مالی، بازده اقتصادی و غیره قابل یادآوری هستند. برخی از تحقیقات مرتبط با موضوع، عوامل فوق و سایر عوامل را در سه دسته عوامل یا معیارهای عملیاتی، مالی، و سرمایه‌گذاری طبقه‌بندی می‌کنند.

شرکت‌های هولدینگ[3] به‌عنوان سازمان‌های متولی اداره و راهبری شرکت‌های تحت پوشش و سرمایه‌پذیر به‌دلایل مختلف نظیر حفظ سهم بازار و قدرت رقابتی آن‌ها همواره با مشکل تصمیم‌گیری در خصوص توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات مواجه هستند. به منظور دستیابی به سازوکار منطقی بررسی، تأیید و تصویب طرح‌های فوق‌الذکر در شرکت‌های هولدینگ به ضرورتی غیر قابل انکار تبدیل شده است. پر واضح است که شکست مالی طرح‌های صنعتی، اثرات زیانبار قابل توجهی بر حقوق صاحبان سهام و آتیه شرکت‌ها بر جای می‌گذارد.

---

1. Economy Of Scale
2. Pre-Investment
3. Holding

زمان‌بندی و تعیین اولویت اجرای طرح‌های توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات در شرکت‌های تحت پوشش یک هولدینگ با اهدافی نظیر پاسخ‌گویی به تقاضای قابل افزایش، به‌روزآوری ماشین آلات، حفظ سهم بازار و قدرت رقابتی، افزایش نرخ بازدهی آتی سرمایه‌گذاری‌ها و غیره نیاز به یک سازوکار منطقی و ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری دارد.

توجه به مطالب فوق طرح این سؤال را قوت می‌بخشد که آیا می‌توان مدلی ریاضی طراحی کرد که با دخیل کردن انواع عوامل و معیارهای عملیاتی، مالی و سرمایه‌گذاری یک شرکت هولدینگ را در تعیین تعداد، زمان، اندازه، و مکان اجرای طرح‌های توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات شرکت‌های تحت پوشش خویش یاری کند؟

پاسخ به سؤال فوق به طراحی یک مدل ریاضی منجر می‌شود که حل آن با توجه به ابعاد گسترده و وجود متغیرهای صفر و یک فراوان با روش‌های تحلیلی کلاسیک امکان پذیر نیست و نیاز به طراحی یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری [1] را ضروری می‌سازد.

در ادامه و در بخش دوم به بررسی ادبیات علمی مربوط پرداخته می‌شود. این بخش مروری جامع بر کل تحقیقات انجام شده دارد. طراحی مدل ریاضی شامل تعریف مسأله، فرضیات، قراردادها، و ساختار ریاضی مدل در بخش سوم ارایه می‌شود. در بخش چهارم روش حل مسأله توسعه می‌یابد و ضمناً الگوریتم ژنتیک نیز معرفی و بررسی می‌گردد. سرانجام در بخش پنجم، یک مسأله واقعی بررسی و حل می‌شود.

پیشینه تحقیق

روش‌های مختلفی نظیر شبیه‌سازی، بهینه سازی پایدار [2]، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، روش تجزیه بندرز [3]، برنامه‌ریزی خطی، روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری به‌خصوص الگوریتم ژنتیک در ادبیات علمی مرتبط با موضوع مسأله وجود دارند.

---

1. Meta-Heuristic
2. Robust Optimization
3. Benders Decomposition

کتاب ارزنده مان[1] (۱۹۷٦: ۱۸) را می‌توان مرجعی مفید برای شروع اولیه تحقیقات در بحث توسعه ظرفیت برشمرد. البته وی قبل از آن نیز (۱۹٦۱: ۱۷) با الهام از قواعد و اصول مدل‌های اولیه کنترل موجودی با دخیل نمودن عواملی همچون رشد تقاضا، نرخ تنزیل، و صرفه جوئی حاصل از مقیاس در نصب ظرفیت روشی برای تعیین نقطه تجدید یا زمان نصب ظرفیت جدید ارایه نمود.

با الهام از نتایج تحقیقات فوق، مان و ارلن کاتر[2] (۱۹٦۸: ٥) ابعاد و جوانب واقعی مرتبط با طراحی مدل توسعه ظرفیت در صنعت کود شیمیایی نیتروژنه هندوستان را تشریح نمودند. ارلن کاتر (۱۹۷۷: ٤) با اضافه کردن عواملی نظیر واردات[3] و موجودی‌ها، مدل توسعه ظرفیت صنایع آلومینیوم هندوستان روش برنامه‌ریزی پویا را پیشنهاد کرد. ارلن کاتر و تریپی[4] (۷:۱۹۷٦) عواملی همچون قیمت گذاری و کمیت تولید را در تحلیل‌های قبلی وارد کردند.

هم‌زمان با افزایش عوامل مؤثر بر عملکرد و پیچیدگی محیط بنگاه‌های اقتصادی، به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی به‌دلیل کارایی و سودمندی آن‌ها رواج یافت.

مدل برنامه‌ریزی پویا جهت تعیین توالی بهینه مجموعه‌ای محدود از طرح‌های توسعه ظرفیت توسط ارلن کاتر و راجرز[5] (۱۹۷۷: ٦) و مدل برنامه‌ریزی خطی با فرض توسعه ظرفیت درموقعیت‌های چندکارخانه‌ای و بازارهای متعدد با هدف کاهش هزینه‌های تنزیل‌شده توسعه ظرفیت و حمل و نقل کالاها طی افق برنامه‌ریزی توسط فونگ و سرینیواسان[6] (۸:۱۹۸۰) طراحی و ارایه شدند. لوس[7] (۱۹۸۲: ۱٦) با جمع‌آوری و دسته‌بندی نتایج تحقیقات قبلی یک راهنمای جامع بحث توسعه ظرفیت ارایه کرد. بررسی فرض

---

1. Manne,A.S
2. Erlenkotter,D.
3. Imports
4. Trippi,R.
5. Rogers,J.
6. Srinivasan,V.
7. Luss,H.

تبدیل ظرفیت از یک نوع به نوع دیگر در مدل‌های سنتی توسعه ظرفیت توسط لی[1] و لوس (۱۳:۱۹۸۱) انجام و روش حلی مبتنی بر نظریه شبکه توسعه داده شد.

سیم[2] (۲۰۰۰: ۲۹) با فرض فعالیت در بازارهای جهانی، کاهش خطرپذیری و انتخاب ترکیب مناسب سرمایه‌گذاری‌ها در نقاط مختلف جهان، کمیت‌های گسسته ظرفیت و وجود هزینه‌های حمل و نقل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای تعیین اندازه و زمان بهینه توسعه ظرفیت طراحی و از روش آزادسازی لاگرانژی[3] برای حل آن استفاده نمود. لی و تیروپاتی[4] (۱۹۹۳: ١٤) با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات انجام‌شده در بحث فناوری‌های انعطاف پذیریک مدل صفر و یک با هدف انجام توازن و مصالحه بین صرفه‌جویی حاصل از مقیاس و مزایای حاصل از حوزه عملکردی وسیع[5] به‌منظور تعیین اندازه بهینه توسعه ظرفیت و گزینش فناوری ارایه نمودند. آنان هم‌چنین یک روش ابتکاری برای حل مدل صفر و یک مسأله با ابعاد بزرگ پردازش کردند.

جونز[6] و همکاران (۱۰:۱۹۹۱) با بررسی نتایج تحقیقات انجام‌شده در حوزه توسعه ظرفیت تا سال ۱۹۹۰ پی بردند که مدل‌های مذکور عمر ماشین‌آلات تولیدی را نامحدود فرض می‌کند و به‌رغم افزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری هیچ‌گاه ماشین‌آلات نصب شده تعویض نمی شوند. در نتیجه آنان یک مدل دو مرحله‌ای برای حل مسأله جایگزینی ماشین‌آلات موازی ارایه نمودند. در مرحله اول با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا بهترین مقدار تابع هزینه‌ای حالات و تصمیم مربوط به آن (نگهداری یا جایگزینی) یافته می‌شود و به‌عنوان متغیر تصمیم به مدل برنامه‌ریزی خطی مرحله دوم وارد می‌گردد. محدودیت‌های مدل نیز شامل گزینه‌های نگهداری یا جایگزینی هر خوشه[7] از ماشین‌آلات مشابه است. راجاگوپالان[8] (۲۱:۱۹۹۲) تأثیرات کهنگی و فرسودگی ماشین‌آلات را در کاهش ضرایب بهره‌برداری در دوره‌های بعد از نصب و به‌کارگیری ماشین‌آلات بر روی مدل‌های سنتی

---

1. Lee,H.
2. Syam,S.
3. Lagrangean Relaxation
4. Tirupati,D.
5. Economy Of Scope
6. Jones,P.
7. Cluster
8. Rajagopalan,S.

بررسی و یک روش حل ابتکاری برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مورد نظر نیز ارایه نمود. وی (۲۲:۱۹۹٤) هم‌چنین با الهام از لی و تیروپاتی(۱۹۹۳)؛ لی ولوس (۱۹۸۷) ولـوس (۱۹۸۲) یـک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با فرض اینکه گزینه‌های فناوری دارای درجـه خاصـی از صـرفه‌جویـی حاصـل از مقـیاس هسـتند طراحی کرد. اضافه کردن فرض فوق باعث افزایش اندازه و پیچیدگی مدل‌های قبلی می‌شود.

راجاگـوپالان و سـوتریو[1] (۱۹:۱۹۹٤) فـرض جایگزینـی ماشـین‌آلات به‌دلیل کهنگی یا افـزایش هـزینه‌هـای عملیاتـی، نگهداری و برکناری و توقف عملیاتی آن‌ها به‌دلیل تقاضای کاهنده، به مدل‌های قبلی اضافه نمودند و یک مدل عدد صحیح ارایه کردند.

نیـر[2] وهـاپ[3] (۱۹۹۲ : ۱۹) بـا ایـن فـرض که در برخی صنایع، جایگزینی به‌دلیل منسوخ شـدن فـناوری بـیش از جایگزینـی بـه‌دلـیل افـزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری اهمیت دارد، یـک مـدل برنامه‌ریزی پویا ارایه نمودند. به نظر آنان با فرض وجود تحولات فناورانه آتـی، بـا سـه موقعـیت در هـریک از تجهیزات نصب‌شده مواجه هستیم: فناوری در دست یا مورد استفاده، فناوری برتر موجود و فناوری پیشرفته‌تری که در آتیه ظاهر خواهد شد.

راجاگـوپالان و همکاران (۲۵:۱۹۹۸) بابهره‌گیری از نتایج راجاگوپالان (۱۹۹۲) و جونز و همکـاران(۱۹۹۱) بـا فـرض وجـود رشـته‌ای از تحـولات فناورانه، عدم اطمینانی در وقوع تحـولات و عدم اطمینانی د رچرخه حیات فناورانه ماشین آلات؛ به تجدید نظر در مدل‌های سـنتی توسـعه ظرفیت پرداختند. اولین مدل با فرض تحولات قابل پیش‌بینی به‌صورت خطی طراحـی شـد و مدل دوم با فرض فرایند نیمه مارکوفی تحولات فناورانه و مبتنی بر نتایج نیر و هاپ (۱۹۹۲) تحلیل‌های لازم را ارایه می‌دهد.

هـم‌چنـین راجاگـوپالان (۱۹۹٦: ۲۳) بـا تأکید بر نتایج راجاگوپالان و سوتریو (۱۹۹٤)، راجاگـوپالان و همکـاران (۱۹۹۸)، نیـر و هـاپ (۱۹۹۲)، راجاگـوپالان (۱۹۹۲)، و جونـز و همکـاران (۱۹۹۱) رویکـردی یکـپارچه بـرای تحلـیل مسـایل توسـعه ظـرفیت و جایگزینـی تجهیـزات ارایـه نمود .در هر صورت این مقاله یک مرجع نسبتاً کامل برای پیگیری بحث به شمار می‌رود.

---

1. Soteriou,A.
2. Nair,S.
3. Hopp,W.

راجاگوپالان و رائوسانگ[1] (۲٤،۱۹۹۸) با الهام ازلیبرمن[2] (۱۵:۱۹۸۷) ماهیت پیچیده و پویای مسابقه توسعه ظرفیت را در قالب یک صنعت وتأثیرات آن بر سیاست‌های اتخاذی یک شرکت از همان صنعت را با استفاده از نظام پویای غیرخطی تحلیل نمودند. آن‌ها با استفاده از یک مدل شبیه سازی به تحلیل سیاست‌های توسعه ظرفیت صنایع در شرایط عدم تعادل پایدار یا آشوب پرداختند.

راجاگوپالان و سوامیراتن[3] (۲۷:۲۰۰۰) با طراحی یک مدل ریاضی و به‌کارگیری گسترده روش ابتکاری تعامل تصمیمات توسعه ظرفیت و برنامه‌ریزی تولید در محیط تقاضای رشد یابنده را بررسی نمودند.

برمون[4] و هود[5] (۱:۱۹۹۹) یک نظام پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر روش برنامه‌ریزی خطی در صنعت نیمه‌هادی‌ها با عنوان نظام برنامه‌ریزی بهینه‌سازی ظرفیت توسعه دادند.

چند[6] و مک کلارگ[7](۲۰۰۰ ، ۲) پس از بررسی نتایج تحقیقات مان (۱۹٦۱) و سایر موارد اعلام کردند که در اکثر موارد سعی بر آن است تا دوره‌های از قبل تعیین‌شده جایگزینی را پیش بینی کنند. درحالی‌که به‌دلیل وابستگی تصمیمات توسعه ظرفیت و جایگزینی انجام این کار ارضاء‌کننده نیست. در نتیجه مدل عدد صحیح پیشنهادی آن‌ها دارای متغیرهای تصمیمی نظیر تعداد ماشین‌آلات قابل خرید در یک دوره، تعداد ماشین‌آلات با عمر j و فعال در دوره t، تعداد ماشین‌آلات دارای عمر j دوره که درپایان دوره t به معرض فروش گذاشته می‌شوند و تعداد ماشین‌آلات هرگز استفاده‌نشده در پایان دوره t بوده و تصمیم جایگزینی به‌صراحت عنوان نمی شود.

اِپِن[8] و دیگران (۱۹۸۸: ۳) با دخیل کردن عدم اطمینان در مسأله توسعه ظرفیت چندمحصولی، چندکارخانه‌ای و پویا به جایگاه خوبی در ادبیات علمی بحث توسعه

---

1. Raosong ,H.
2. Liberman ,M.
3. Swamirathen
4. Bermon, S.
5. Hood, S.
6. Chand, S.
7. Mcclurg, T.
8. Eppen, G.

ظرفیت دست یافتند. استیلیانیدس[1] (۲۸:۱۹۹۸) یک مدل خطی عدد صحیح محض برای تعیین برنامه بهینه توسعه ظرفیت کلینکر کمپانی بی‌سی‌سی[2] آفریقای جنوبی ارایه نمود. تعیین تعداد، اندازه و مکان بهینه استقرار کوره‌های پخت سیمان در فرمولاسیون مدل نقش مهمی بازی می‌کنند.

کر[3] (۱۹۸۸: ۱۱) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مسأله تعیین مکان، ظرفیت، شروع سال تولید کارخانجات تازه‌تأسیس، افزایش ظرفیت و سال انجام آن، سطوح تولیدکارخانجات، جریان مواد خام و محصولات در جریان کار و محصولات نهایی بین بخش‌ها، و سطوح واردات و صادرات در صنعت فولاد ترکیه طراحی نمود.

فوکویاما[4] و چیانگ[5] (۱۹۹۶ :۹) از روش موازی در الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت نظام‌های تولید انرژی الکتریکی استفاده کردند. پارک[6] و همکاران (۲۰۰۰ : ۲۰) برای افزایش کارایی و سرعت محاسبات الگوریتم و دوری جستن از دام نقاط بهینه محلی[7] و مبتنی بر نتایج تحقیقات فوکویاما و جیانگ (۱۹۹۶) نوعی روش خلق مصنوعی جمعیت اولیه با استفاده از روش‌های تصادفی پیشنهاد نمودند.

مدل ریاضی برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات

تعریف مسأله و تشریح عوامل مؤثر بر طراحی مدل ریاضی

الف) هریک از شرکت‌ها یا کارخانجات (W) تحت پوشش هولدینگ دارای یک یا چند خط تولید (L) به‌منظور تولید یک یا چند محصول (I) هستند. هریک از خطوط تولید دارای چند بخش (S) است و هر بخش نیز دارای چند جزء (j) یا ماشین است. هر ماشین از حیث ظرفیت تولید، نوع فناوری و متغیرهای هزینه‌ای دارای وضعیت خاص (K) است.

ب) هر شرکت با یک تابع تقاضای افزایش‌یابنده مواجه است.

---

1. Stylianides, T.
2. Blue Circle Company (B.C.C.)
3. Kuru, S.
4. Fukuyama, Y.
5. Chiang, H.
6. Park, J.
7. Local Optimization

ج) حجم عمده سرمایه‌گذاری بلندمدت در هر کارخانه صرف خرید ماشین‌آلات به‌منظور توسعه ظرفیت و جایگزینی خواهد شد.
د) بخش کوره به‌عنوان بخش اصلی تلقی می‌شود و سایر بخش‌ها به‌صورت بالادست و پایین‌دست نسبت به آن مستقر می‌شوند.
هـ) تعویض و نصب کوره جدید با آگاهی از زمان انتظار[1] معین انجام شده که در نتیجه باعث از دست رفتن بخشی از ظرفیت فعلی و جدید خواهد شد.
و) د ر نظام چندمرحله‌ای هر خط تولید، فرض می‌شود که کمیت ظرفیت هریک از بخش‌های بالادست و پایین‌دست کوره باید معادل ضریب αS بیش‌تر از کمیت ظرفیت کوره باشد.
ز) تغییر حالت اجزاء با هدف جایگزینی یا توسعه ظرفیت طی افق برنامه‌ریزی فقط یک بار صورت می گیرد.
ح) نگهداری موجودی به‌دلیل حجیم‌بودن محصولات و کالاهای نیمه‌ساخته و نیاز به فضای وسیع انبار امکان پذیر نیست.
ط) برای ایجاد توازن بین جریانات نقدی ورودی و خروجی و شرط تداوم فعالیت‌ها باید معادلهٔ زیر در هر دوره از افق برنامه‌ریزی و به ازای هر شرکت سرمایه‌پذیر برقرار باشد:

استقراض + افزایش سرمایه + فروش دارایی‌های مولد + هزینه استهلاک + درآمد حاصل از فروش = هزینه مالی + هزینه تبدیل + بازپرداخت اصل وجوه استقراضی + سود تقسیم شده و مالیات + خرید دارایی‌های مولد

ک) استقراض بلندمدت فقط برای خرید دارایی ثابت انجام شده و استقراض کوتاه مدت با هدف تأمین سرمایه در گردش صورت می‌پذیرد.
ل) تناسب بین حقوق صاحبان سهام و حجم بدهی‌ها طی هر دوره باید رعایت شود.
م) سود نقدی قابل تقسیم با نرخ رشد تعریف شده در هر دوره افزایش یافته و تأمین مالی از طریق افزایش سرمایه نیز امکان پذیر است.

صورت‌بندی مدل ریاضی

متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی به شرح ذیل هستند:

---

1. Lead Time

- ماشین jام بخش s خط تولید L کارخانه W در وضعیت K ام در دوره t باقی بماند یا خیر: $Yjkslwt \in (۰,۱)$
- ماشین jام بخش s خط تولید L کارخانه W در دوره t به وضعیت K تغییر حالت بدهد یا خیر: $Wjkslwt \in (۰,۱)$
- افزایش سرمایه در کارخانه W در سال t انجام گیرد یا خیر: $W_{wt} \in (۰,۱)$
- کمیت تولید کالای jام در خط تولید L کارخانه W در دوره t ام: $X_{ilwt} \geq ۰$
- کمیت تولیدی محصول i ام در ماشین jام بخش: S $X_{ijksl\,wt} \geq ۰$ خط تولید L کارخانه W با وضعیت K ام دردوره t
- کمیت بدهی بلند مدت أخذشده‌ی کارخانه W در دوره t ام: $L_{wt} \geq ۰$
- کمیت بدهی کوتاه مدت أخذشده کارخانه W در دوره t ام: $S_{wt} \geq ۰$
- تعداد سهام منتشره کارخانه W بابت افزایش سرمایه در سال t ام: $Q_{wt} \geq ۰$
- کمیت سود تقسیم‌شده کارخانه W در دوره t ام: $D_{wt} \geq ۰$

مدل ریاضی برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین‌آلات به شرح ذیل است:

$$MaxZ = \sum_{i=۱}^{I}\sum_{l=۱}^{L}\sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} R_{ilwt} X_{ilwt}$$
$$- \sum_{i=۱}^{I}\sum_{j=۱}^{J}\sum_{k=۱}^{K}\sum_{s=۱}^{S}\sum_{l=۱}^{L}\sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۱}^{T} P_{ijkslwt} X_{ijkslwt}$$
$$- \sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} n_{Lt} L_{wt} - \sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} m_t S_{wt} - \sum_{w=۱}^{w}\sum_{t\cdot}^{T} b_{Qwt}$$
$$- \sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} TX_{DWt} - \sum_{w=۱}^{w}\sum_{t=۰}^{T} fw_{wt}$$
$$- \sum_{j=۱}^{J}\sum_{k=۰}^{K}\sum_{s=۱}^{S}\sum_{l=۱}^{L}\sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} d_j Y_{jkslwt}$$
$$- \sum_{j=۱}^{J}\sum_{k=۰}^{K}\sum_{s=۱}^{S}\sum_{l=۱}^{L}\sum_{w=۱}^{W}\sum_{t=۰}^{T} h_j W_{jkslwt}$$

Subject to:

۱. تأمین تقاضا:

$$X_{ilwt} = D_{ilwt}$$

i=1,2,…..,I l:1,2,…..,L
w:1,2,….W t:0,1,……,T

۲. ظرفیت مرحله پخت یا کوره

$$X_{ilwt} \le COY_{j,1\,lwt} + \sum_{k=1}^{K} C_R Y_{jkslwt-1} - \sum_{k=1}^{K} V_{ok} W_{jkslwt-1}$$

i:1,2,……,I l:1,2,……,L
w:1,2,……,W t:0,1,……,T
j :1,2,……,J s :1,2,……,S

۳. توازن ظرفیت بخش‌های بالادست و پایین‌دست کوره با ظرفیت مرحله کوره یا پخت

$$\sum_{j=1}^{J} COY_{joslwt} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} C_k Y_{jkslwt-1,0} - \sum_{J=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} V_{ok} W_{jkslwt-1} \ge$$

$$\alpha S\left[COY_{joslwt} + \sum_{k=1}^{K} C_k Y_{jkslwt-1} - \sum_{k=1}^{K} V_{ok} W_{jkslwt-1} \right]$$

w:1,2,……,W s :1,2,……,S
l:1,2,……,L t:0,1,……,T

٤. الزام به تغییر شکل یا حالت هر ماشین در صورت تحقق تصمیم جایگزینی یا توسعه

$$Y_{jkslwt-1} - Y_{jkslwt} \le W_{jkslwt}$$

j :1,2,……,J k:0,1,……,K
l:1,2,……,L w:1,2,……,W
t:0,1,……,T

۵. تغییر شکل حداکثر فقط یک بار طی افق برنامه‌ریزی

$$\sum_{t=0}^{T}\sum_{k=0}^{K} W_{jkslwt} \le 1$$

j :1,2,……,J l:1,2,……,L
s :1,2,……,S w:1,2,……,W

٦. هر جزء در هر سال به یک شکل یا ترکیب باشد

$$\sum_{k=0}^{K}\sum_{t=0}^{T} Y_{jkslwt} = 1$$

j :1,2,……,J s :1,2,……,S
l:1,2,……,L w:1,2,……,W

۷. حد بالائی یا حداکثر تولید هر جزء در سال t ام

$$X_{ijkslwt} \le \sum_{k=0}^{K} C_k Y_{jkslwt}$$

i:1,.....,I l:1.....,L
w:1.....,W t:0,1,.....,T
j :1.....,J s :1,.....,S

۸ توازن تولید بین مراحل

$$X_{ilwt} = \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=0}^{K} X_{ijkslwt}$$

i:1,.....,I l:1.....,L
s :1,.....,S w:1.....,W
t:0,1,.....,T

۹. تعادل یا بالانس جریانات نقدی ورودی و خروجی هر سال

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{l=1}^{L} R_{ilwt} X_{ilwt} + \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=0}^{K} \sum_{s=1}^{S} \sum_{l=1}^{L} d_j Y_{jkslwt} + L_{wt} + S_{wt}$$

$$+ ZQ_{wt} - \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=0}^{K} \sum_{s=1}^{S} \sum_{l=1}^{L} P_{ijkslwt} X_{ijkslwt}$$

$$- \sum_{t=0}^{T} n_t L_{wt-1} - (1 + m_t) S_{wt-1} - T_x D_{wt} - fW_{wt}$$

$$- \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=0}^{K} \sum_{s=1}^{S} \sum_{l=1}^{L} h_j W_{jkslwt} = 0$$

w:1,2,.....,W t:0,1,.....,T

۱۰. تأمین مالی بلندمدت

$$L_{wt} \le \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} \sum_{s=1}^{S} \sum_{l=1}^{L} h_j W_{jkslwt}$$

w:1,2,.....,W t:0,1,.....,T

۱۱. افزایش سرمایه

$$Q_{wt} \le fW_{wt}$$

w:1,2,.....,W t:0,1,.....,T

۱۲. تناسب بدهی با حقوق صاحبان سهام

$$\sum_{t=۰}^{t} n_t L_{wt} + S_{wt} /(\sum_{t=۰}^{T} ZQ_{wt} + B) \leq ۱$$

w:1,2,……,W

۱۳. رشد سود نقدی یا قابل تقسیم

$$D_{wt} \geq (۱+g)D_{wt} -۱$$

w:1,2,……,W t:0,1,…….,T

پارامترهای مورد استفاده در مدل عبارتند از:

قیمت فروش محصول i ام در سال t ام	R_{it}
قیمت تمام‌شده‌ی تولید محصول i برروی جزءj‌ام در سال t	$P_{ijrslwt}$
ضریب بازگردان اصل و هزینه مالی بدهی بلندمدت	n_t
ضریب بازگردان هزینه مالی بدهی بلندمدت	n_{1t}
ضریب بازگردان هزینه مالی بدهی کوتاه‌مدت در سال tام	m_t
هزینه متغیر صدورهر سهم جدید	b
ضریب مالیات وپاداش مدیریت	t
هزینه ثابت صدور سهام جدید	f
هزینه استهلاک جزء jام	dj
هزینه خرید ماشین نوع jام	h_j
تقاضای محصول iام در سال t در کارخانه W	D_{iwt}
ظرفیت فعلی هر ماشین (k=0)	C_o
ظرفیت ترکیب یاحالت R ام ماشین	C_R
ظرفیت از دست‌رفته‌ی حین تغییر حالت از وضعیت فعلی به وضعیت k ام	V_{OR}
ارزش اسمی هر سهم منتشر شده	Z
نرخ رشد سود نقدی	g
ضریب مقایسه ظرفیت قسمت‌ها با یکدیگر	αs
مانده حقوق صاحبان سهام هر کارخانه در ابتدای دوره	β

روش حل مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک فن جست‌وجوی تصادفی مبتنی بر فرایند انتخاب طبیعی کروموزوم‌ها یا گونه جاندار سازگارتر با محیط توسط هولند در سال ۱۹۷۰ ارایه و بعدها به شکل کامل‌تری بسط داده شد. هر جواب ممکن مسأله به‌صورت یک رشته یا کروموزوم تصادفی داده می‌شود. این رشته ممکن است شباهت‌هائی با کروموزوم بهینه (پاسخ بهینه مسأله) داشته‌باشد. این شباهت‌ها در واقع به‌صورت یکسان بودن مقادیر بیت‌های کروموزوم بهینه و کروموزوم مورد نظر در برخی از مکان‌ها بر روی رشته کروموزومی ظاهر می‌شوند. مطلوبیت هر کروموزوم از حیث میزان نزدیکی به پاسخ بهینه نیز بر حسب همین شباهت‌ها قابل تبیین است.

استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت حل یک مسأله خاص به دو نوع تصمیم‌گیری نیاز دارد. اول باید نحوه تبدیل مسأله یا مدل‌سازی آن د رچارچوب الگوریتم ژنتیک را که شامل تعریف فضای جواب موجه، شکل تابع تطابق و روشی است که جواب‌های ممکن به‌عنوان یک رشته بیان می‌شوند، تعریف کرد. دومین تصمیم نیز به تعیین منطقی متغیرهای کنترلی الگوریتم شامل تعداد جمعیت اولیه، تعداد نسل‌ها، احتمال تداخل و جهش[1] برمی‌گردد.

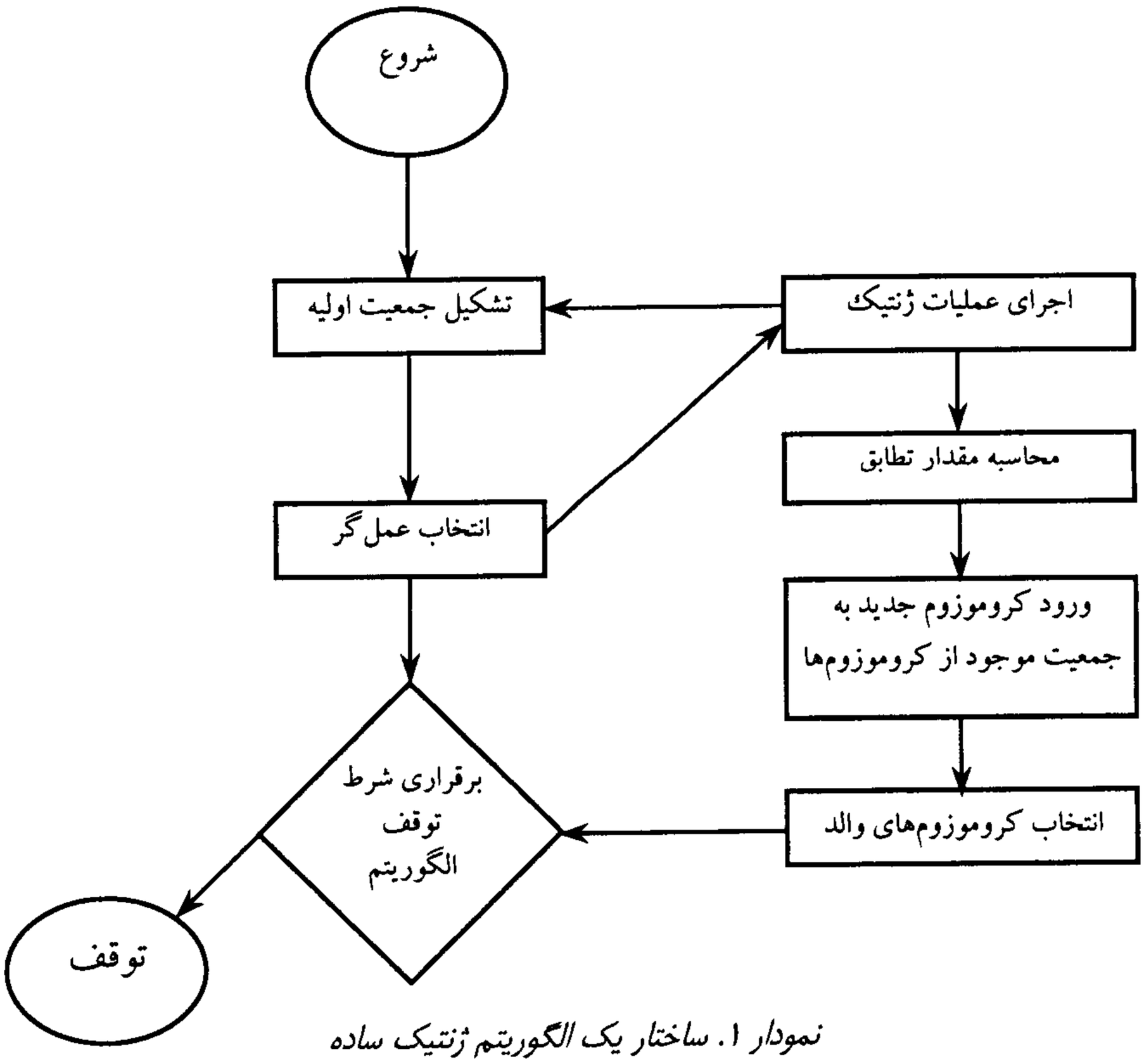
رویه متعارف یک الگوریتم ژنتیک ساده بدین‌صورت قابل تشریح است که ابتدا نحوه نمایش کروموزوم‌ها مشخص می‌شود. معمولاً از روش توصیف باینری[2] استفاده می‌شود. مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها به‌طور تصادفی تعریف می‌شود و به ذخیره‌ای از کروموزوم‌ها به نام جمعیت اولیه تخصیص می‌یابد. پس از این مرحله، جست‌وجو به‌صورت موازی بر روی تمام کروموزوم‌ها با استفاده از عملیات نسل گردانی صورت می‌گیرد. این ویژگی یعنی جست‌وجوی موازی تمامی نقاط فضای جواب یکی از مزیت‌های اصلی الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی موجود است.

پس از تشکیل جمعیت اولیه؛ با استفاده از یک عملگر[3] ژنتیک نظیر تکثیر، تداخل، و جهش که به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند اقدام به انجام تغییراتی در برخی از کروموزوم‌ها و بررسی نحوه تأثیر آن در همگرایی جواب الگوریتم به پاسخ بهینه می‌نماییم. سازوکار انتخاب، کروموزوم‌های دارای میزان تطابق بیش‌تر را جهت تکثیر و اجرای عملیات ژنتیکی

---

1. Crossover ,Mutation
2. Binary Coding
3. Operator

برمی‌گزینند. این گزینش با یک روش تصادفی نظیر روش چرخ گردان[1] انجام می‌شود. عمل‌گر تداخل، کروموزوم‌های والد مناسب‌تر را جهت دستیابی به کروموزوم فرزند دارای میزان تطابق بیشتر، مبادلهٔ و تعویض می‌نماید. عمل‌گر جهش نیز با انجام تغییراتی در کروموزوم والد به‌صورت ایجاد تغییر در مقادیر یک بیت یا چند بیت سبب کشف کروموزوم‌های بهتر شده و از همگرائی سریع الگوریتم جلوگیری می‌کند. پس از اتمام عملیات و تحقق شرط توقف الگوریتم، رشته‌ی دارای بهترین مقدار تطابق انتخاب می‌شود و به‌عنوان پاسخ بهینه باید مقادیر آن مجدداً به پاسخ‌های واقعی متغیرهای تصمیم مسأله اصلی تبدیل شود. در نمودار ۱ ساختار یک الگوریتم ژنتیک ساده را ملاحظه می‌نمائید.



نمودار ۱. ساختار یک الگوریتم ژنتیک ساده

به‌دلیل کارآیی، روش الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری، کاربرد بیش‌تری در حل مسایل تحقیق در عملیات یافته است. مدل‌های

---

1. Roulette Wheel

کاربـردی توسـعه یافـته بـه مدد رویکردهای خاص مدل سازی تحقیق در عملیات به‌دلایلی نظیـر پیچیدگـی تابـع هـدف، تعـداد قابـل ملاحظـه محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم از نوع مسایل سخت[1] تلقی شده و با استفاده از ابزارها ونرم افزارهای موجود قابل حل نمی باشند.

مـدل ریاضـی طراحی شده در این تحقیق نیز به‌دلیل وجود متغیرهای صفر و یک فراوان حـین بـه‌کارگیـری در موقعیت‌هـای عملـی و کاربردی از نوع مسایل سخت بوده و به‌دلیل تعـداد زیاد محدودیت‌ها با نرم‌افزارهای متداول موجود قابل‌حل نیست. در نتیجه، استفاده از روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به‌صورت مختلط[2] توصیه می‌شود.

ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک مختلط پیشنهادی

هـریک از کروموزوم یا رشته‌های جمعیت اولیه، حاوی متغیرهای دودویی W_{jkslwt} و W_{wt} اسـت. بـا مشـخص شـدن مقادیـر متغیـرهای تصـمیم W_{jkslwt} بـه تبع آن وضعیت متغیرهای Y_{jkslwt} نیز تعیین خواهد شد. ساختار هر کروموزوم را در نگاره ۱ ملاحظه نمایید.

نگاره ۱. ساختار هر کروموزوم

W_{jkslwt}				W_{wt}		
$W_{\text{۱۱۱۱۱۰}}$	$W_{\text{۱۱۱۱۱۱}}$	$W_{\text{۱۱۱۱۱۲}}$	... W_{jkslwt}	$W_{\text{۱۰}}$	...	W_{wt}
تصمیم به خرید وتعویض				تصمیم به افزایش سرمایه		

رویـه مـورد اسـتفاده در الگوریـتم مخـتلط پیشـنهادی به‌طور خلاصه به شرح ذیل است: پـس از تولـید تصـادفی هـریک از کـروموزوم‌هـا چـنان‌چـه وضـعیت هـر رشـته با توجه به محـدودیت شـماره سـه مـدل ریاضـی توجیه‌پذیـر باشـد، به‌عنوان یک عضو جمعیت اولیه پذیـرفته خواهد شد. پس از جای‌گذاری مقادیر متغیرهای دودویی (W_{wt} ، Y_{jkslwt} ، W_{jkslwt}) در مدل MIP طراحی‌شده با یک مدل برنامه‌ریزی خطی روبه‌رو هستیم. مدل مزبور پس از حـل به روش سیمپلکس[3] دارای مقدار تابع هدفی است که به‌عنوان مقدار تطابق کروموزوم

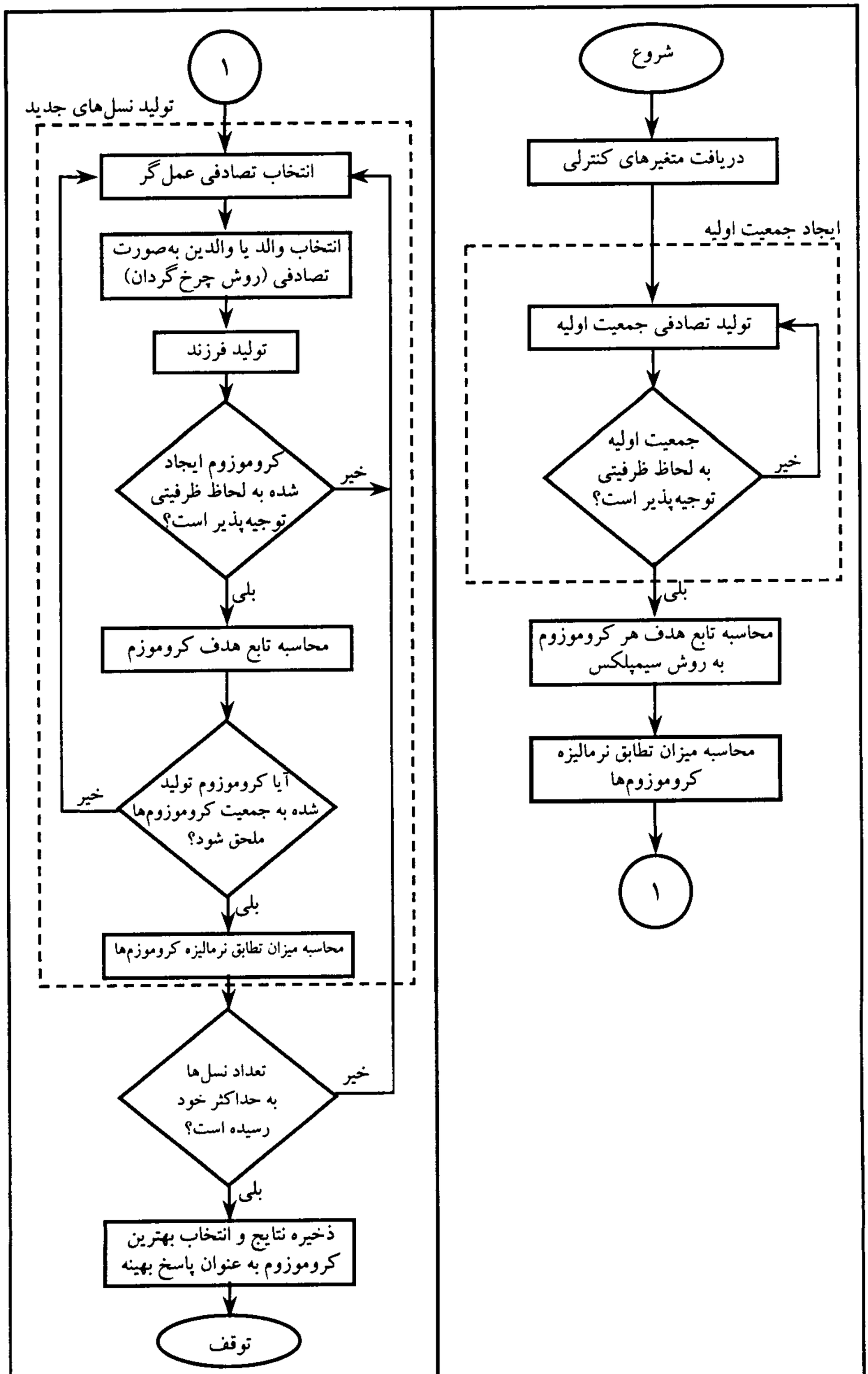
---

1. NP-hard
2. Hybrid
3. Simplex

انتخاب می‌شود. پس از تشکیل جمعیت اولیه مقدار تطابق نرمالیزه کلیه کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود. پاسخ مقادیر متغیرهای پیوسته مدل ریاضی نیز پس از حل مدل برنامه‌ریزی خطی قابل استخراج است.

پس از تولید کروموزوم‌ها به‌اندازه جمعیت اولیه، با استفاده از روش چرخ گردان انتخاب تصادفی والد یا والدین انجام می‌شود و عمل تولیدمثل با توجه به نوع عمل‌گر مورد نظر صورت می‌گیرد. هرگاه کروموزوم فرزند تولید شده از لحاظ ظرفیت توجیه‌پذیر باشد، اقدام به محاسبه مقدار تطابق آن می‌نماییم. هرگاه کروموزوم تولیدشده مشابه هیچ‌یک از کروموزوم‌های موجود در جامعه کروموزوم‌ها نباشد و مقدار تطابق آن نیز از کوچک‌ترین مقدار تطابق موجود در جامعه کمتر نباشد، پس به‌عنوان یک کروموزوم جدید وارد جامعه می‌شود و تجدید نسل صورت می‌پذیرد. در نهایت پس از اتمام عملیات نسل‌گردانی، بهترین کروموزوم جامعه به‌عنوان پاسخ مسأله برگزیده می‌شود.

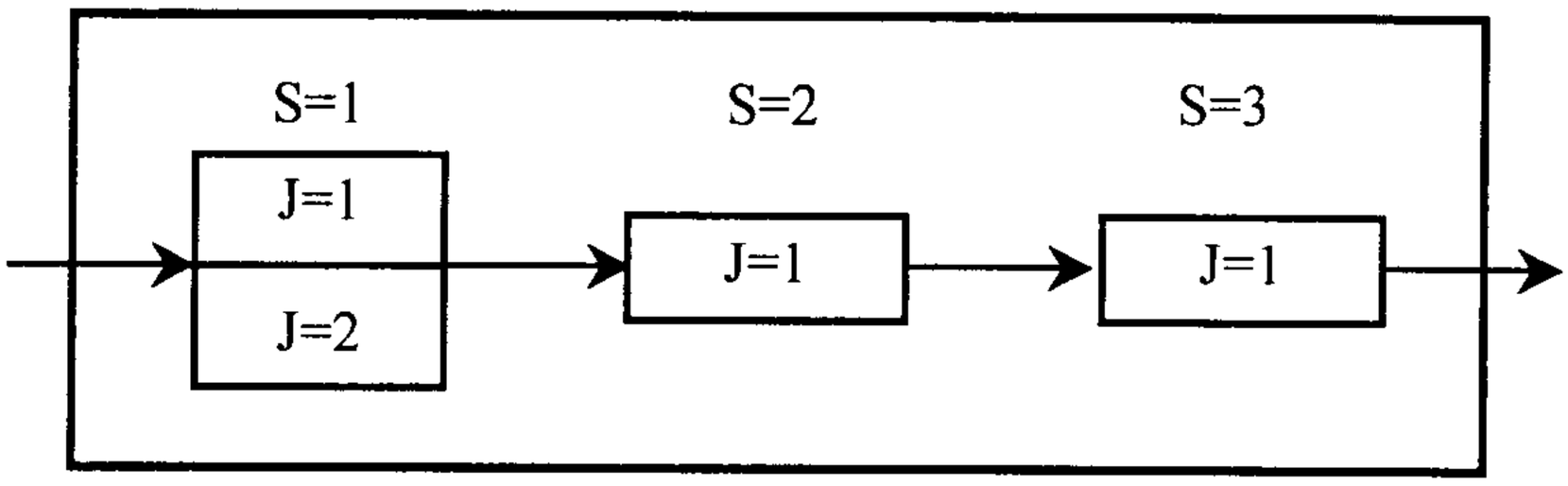
نمودار جریان یافتن پاسخ بهینه مسأله به‌روش الگوریتم ژنتیک را در نمودار ۲ ملاحظه می‌شود.



نمودار ۲. جریان حل مسأله به روش الگوریتم ژنتیک

اجرای مدل در یک نظام واقعی

اطلاعـات واقعـی یـک شرکت تولیدکننده کاشی گرانیتی جهت استفاده آماده شد. شرکت دارای یـک خـط تولـید و سه مرحله اصلی تولیدی است. مرحله اول دارای دو جزء، مرحله دوم و سوم نیز هریک دارای یک جزء هستند.



نمودار ۳. فرایند تولید شرکت تولیدکننده کاشی

پـس از ورود داده‌هـا بـه نـرم افـزار لیـندو[1] و حل آن، نتایج به‌دست آمده به‌طور خلاصه به‌شرح زیر می‌باشد:

نگاره ۲. مقادیر متغیرهای W_{jkslwt}

t		0 1 2 3 4 5
S=1	J=1	K=1
	J=2	K=3
S=2	J=1	K=2
S=3	J=1	K=3

K=1 در T=1 به ازای S=1 و J=1 به آن معنا است که ماشین اول در بخش اول در سال اول به ترکیب K=1 تغییر حالت یابد. متغیرهای W_{wt} همگی دارای مقدار مساوی صفر هستند. با تعیین مقادیر متغیرهای کنترلی الگوریتم ژنتیک به‌صورت زیر پس از بررسی ترکیب‌های متعدد، اقدام به اجرای الگوریتم گردید.

۰/۵ = احتمال جهش ۰/۱۵ = احتمال تداخل یک‌نقطه‌ای

کروموزوم ۱۰۰= اندازه جامعه (M) ۰/۲۵ = احتمال تداخل دونقطه‌ای

نسل ۱۸= حداکثر تعداد نسل‌ها

---

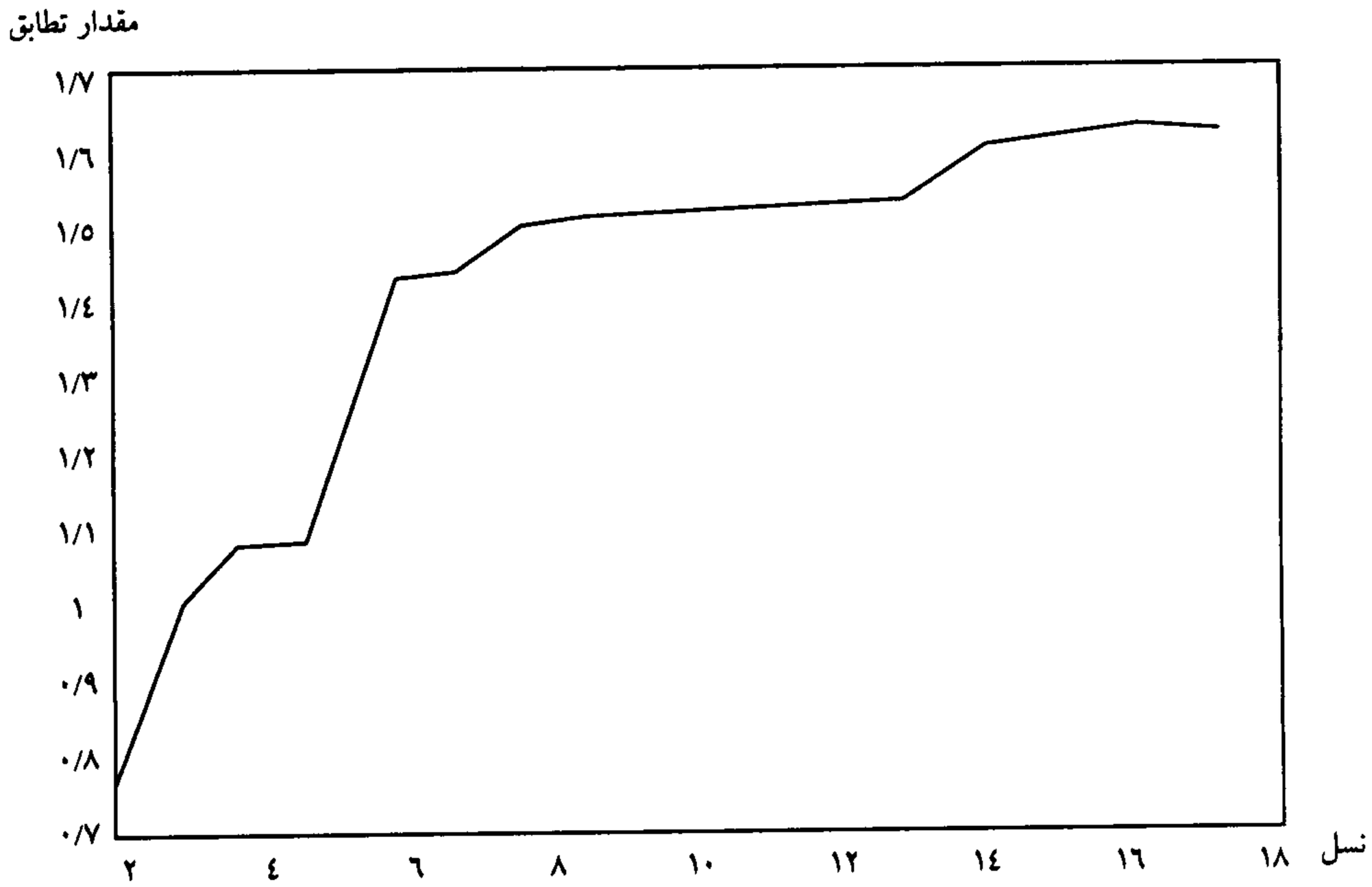
1. Lindo

الگوریتم پس از ١٤ نسل به همگرایی رسید و مقادیر مساوی یک کروموزوم بهینه به‌صورت M(2)، M(26)، M(38)، M(57)، M(62) و M(64) به‌دست آمد. چهار متغیر اول با توجه به تعریف کروموزوم در بخش‌های قبلی دارای مقادیر کاملاً برابر با پاسخ‌های متغیر W_{jkslwt} در مدل ریاضی است و فقط افزایش سرمایه در سال‌های اول و سوم مجاز شمرده می‌شود. در نگاره ۳ به‌صورت مقایسه‌ای، نتایج حاصل از مدل ریاضی و اجرای الگوریتم را مشاهده می گردد.

نگاره ۳. مقایسه نتایج حاصل از حل مدل ریاضی و اجرای الگوریتم ژنتیک

شرح	حل مدل ریاضی	اجرای الگوریتم ژنتیک
درصد تقاضای ارضاءنشده کل دوره‌ها	٪۵/۷	٪۵/۵
فروش (میلیارد ریال)	۱/۳۱٦	۱/۳۱۲/٦
سود قابل تقسیم (میلیارد ریال)	۳۷۵/۱	٤۹۲/۵
متوسط درصد قابل تقسیم بر فروش	٪۲۰/۷	٪۱٤/۲
مقدار تابع هدف (۱۰۰۰۰۰ ریال)	۱/۹٤٦/۱۳۱	۱/۸۲٦/۸۰۰

در نمودار بعدی،نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک مختلط و نحوه همگرایی جواب‌ها را ملاحظه می کنید.



نمودار ۴. نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک با **pc۱** = ۰/۱۵ *و* **pc۲** = ۰/۲۵ *و* **pm** = ۰/۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

احداث و نصب کارخانجات جدید، توسعه خطوط تولید فعلی و جایگزینی ماشین‌آلات از جمله طرح‌های هزینه‌بر و با مخارج سنگین تلقی می‌شود. بررسی هم‌زمان معیارهای عملیاتی و مالی در کنار معیارهای سرمایه‌گذاری جهت ارایه تصویری روشن‌تر از فضای سرمایه‌گذاری‌ها و اطمینان‌بخشی به سهام‌داران از سودآوری آتی طرح‌ها ضرورتی انکارناپذیر است.

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی‌شده با توجه به مسأله تحقیق، دارای ویژگی‌های خاصی نظیر در نظر گرفتن محدودیت توازن جریان نقدی، نحوه تأمین منابع مالی، ماهیت چندمرحله‌ای نظام تولید، تأثیر زمان خرید و انتظار نصب ماشین آلات، پیوستگی مراحل تولید و غیره بوده که آن را از مدل‌های موجود در ادبیات علمی متمایز می‌سازد. این مدل قابلیت استفاده در صنایع و شرکت‌های زیر گروه کانی غیر فلزی را بدون توجه به تعداد محصولات، خطوط تولید، کارخانجات، بخش‌ها، اجزاء و ماشین‌آلات و افق برنامه‌ریزی را دارا می‌باشد.

به‌علاوه نرم‌افزار تهیه شده با استفاده از MATLAB Ver 6.5 برای الگوریتم ژنتیک مختلط پیشنهادی را با اندک تغییراتی متناسب با شرایط نظام‌های دیگر می‌توان به‌کار گرفت. با در نظر گرفتن عامل موجودی‌ها، فناوری به‌عنوان یک عامل تصادفی، بررسی مسأله خطرپذیری، تنظیم دینامیکی متغیرهای الگوریتم ژنتیک و غیره می‌توان مدل ریاضی و نتایج تحقیق را توسعه داد.

منابع

Bermon, S., and Hood, S.J. (1999). "Capacity optimization planning system" *Interfaces* , 29,No.5.

Chand, S. and T. Mcclurg, J. Ward, (2000). "A model for parallel machine replacement with capacity expansion" *European Journal Of Operational Research* , 121, 519-531.

Eppen, G.D. Martin, R.K and Schrage, L. (1988). "A scenario approach to capacity planning" *Operations Research* , 37, 517-527.

Erlenkotter, D. (1977). "Capacity expansion with imports and inventories" Management Science , 23,7, 694-702.

Erlenkotter, D. and Manne, A.S. (1968). "Capacity expansion for Indian's nitrojenous fertilizer industry" *Management Science*, 14,B-553-B-572.

Erlenkotter,D. and Rogers, J.S. (1977). "Sequencing competitive expansion projects" *Operations Research* , 25,6,937-951.

Erlenkotter, D. and Trippi, R.R. (1976). "Optimal investment seheduling with price-sensetive dynamic dermend" *Management Science* , 23,1,1-11.

Fong, C.O. and Srinivasan, V. (1980). "The multigrain dynamic capacity expansion problem" *Operations Researchs*, 29,787-799.

Fukuyama.Y,H.D.Chiang, (1996) "A parallel genetic algorithm for generation expansion planning" *IEEE Trans. On Power Systems*, 11,no.3, 1-8.

Jones, P.C. and Others, (1991). "Parallel machine replacement" *Naval Research Logisitics*, 38, 351-365.

Kuru, S. (1988). "Long term planning of a major national sector using a linear programming model" *European Journal of Operational Research* ,36, 153-166.

Lee, H. and Guignard, M. (1995). "Selection of capacity expansion projects" *Journal Of The Operational Research Society*, 46, 1418-1432.

Lee, S. and Luss, H. (1987). "Multi-facility type capacity expansion planning algorithms and complexities" *Operations Research* ,35,249-253.

Li, S. and Tirupati, D. (1993). "Dynamic capacity expansion problem with multiple products: technology selection and timing of capacity additions" *Operationas Research*, 42,958-979.

Lieberman, M.B. (1987). "Strategies for capacity expansion" *Sloan Management Review*, Summer, 19-27.

Luss, H. (1982). "Operations research and capacity expansion problems: A survey" *Operations Research*, 30, 907-947.

Manne, A.S. (1961). "Capacity expansion and probablistic growth" *Econometrica*, 29,4,632-649.

Manne, A.S. (1976). "Investments for capacity expansion: size, location and time-phasing" *MIT Press. Massachusette*.

Nair, S.K. and Hopp, W.J. (1992). "A model for equipment due to technological obsolescene" *European Journal of Operational Research*,63, 207-221.

Park, J.B. and Others, (2000). "An improved genetic algorithm for generation capacity expansion planning" *IEEE Trans. On Power Systems*, 15,No.3, 916-922.

Rajagopalan, S. (1992). "Deterministic capacity expansion under detereoration", *Management Science*, 38, 525-539.

Rajangopalan, S. (1994). "capacity expansion with alternative technology choices" *European Journal of Operational Research*, 77, 392-403.

Rajagopalan, S. (1996). "Capacity expansion and equipment replecement: a unified approach" *Operations Research*, 46,846-857.

Rajagopalan, S. and RaoSong, H.R. (1998). "Deterministic chaos in the capacity expansion race" *Thirty-First Annual Hawaii International Conference On system Sciences*

Rajagopalan, S., Singh, M.R. and Morton, t.e. (1998). "Capacity expansion and replacement in growing markets with uncertain technological break throughs" *Management Science*, 44, 12-30.

Rajagopalan, S. and Soteriou, A.C. (1994). "Capacity acquistion and disposal with discrete facility sizes" *Management Science*,40 ,903-917.

Rajagopalan, S. Swamirathen, (2001). "A coordinated production planning model with capacity expansion and inventory management" *Management Science*, 47,No.11

Stylianides, T. (1998). "A model of clinker capacity expansion" *European Journal of Operational Research*, 110, 215-222.

Syam, S.S. (2000). "Multiperiod capacity expansion in globally dispersed regions" *Decision Sciences*, Winter, 173-195.