

دانش مدیریت

شماره ۶۳ - زمستان ۱۳۸۲

صص ۱۳۱-۱۵۳

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

دکتر محمد مدرس\* - دکتر سعید خدامرادی\*\*

## چکیده

در این مقاله با استفاده از یک مدل ریاضی روش جدیدی جهت برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه ظرفیت<sup>۱</sup> و جایگزینی ماشین‌آلات<sup>۲</sup> با انجام تجزیه و تحلیل معیارهای مالی، عملیاتی، و سرمایه‌گذاری ارائه 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 از این‌رو فرایند تصمیم‌گیری در مورد 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<sup>۳</sup> شامل متغیرهای پیوسته و صفر و یک است. با توجه به این‌که مدل حاصل بسیار پیچیده و بزرگ است و قابل حل با روش‌های تحلیلی موجود نیست از این‌رو روش حل این مسأله با در نظر گرفتن ویژگی‌های مدل ریاضی توسعه می‌یابد. این مدل در چارچوب الگوریتم ژنتیک مختلط<sup>۴</sup> طراحی می‌گردد. در پایان برای اطمینان از اعتبار روش ارائه 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> به‌عنوان سازمان‌های متولی اداره و راهبری شرکت‌های تحت پوشش و سرمایه‌پذیر به دلایل 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 ماشین‌آلات، 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 امکان‌پذیر نیست و نیاز به طراحی یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری<sup>۱</sup> 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، قراردادهای، و ساختار ریاضی مدل در بخش سوم ارائه 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، بهینه‌سازی پایدار<sup>۲</sup>، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، روش تجزیه بندرز<sup>۳</sup>، برنامه‌ریزی خطی، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری به‌خصوص الگوریتم ژنتیک در ادبیات علمی مرتبط با موضوع مسأله وجود دارند.

1. Meta-Heuristic

2. Robust Optimization

3. Benders Decomposition

کتاب ارزنده مان<sup>۱</sup> (۱۹۷۶: ۱۸) را می‌توان مرجعی مفید برای شروع اولیه تحقیقات در بحث توسعه ظرفیت برشمرد. البته وی قبل از آن نیز (۱۹۶۱: 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 ارائه نمود.

با الهام از نتایج تحقیقات فوق، مان و ارلن کاتر<sup>۲</sup> (۱۹۶۸: ۵) ابعاد و جوانب واقعی مرتبط با طراحی مدل توسعه ظرفیت در صنعت کود شیمیایی نیتروژنه هندوستان را تشریح نمودند. ارلن کاتر (۱۹۷۷: ۴) با اضافه کردن عواملی نظیر واردات<sup>۳</sup> و موجودی‌ها، مدل توسعه ظرفیت صنایع آلومینیوم هندوستان روش برنامه‌ریزی پویا را پیشنهاد کرد. ارلن کاتر و تریپی<sup>۴</sup> (۱۹۷۶: ۷) عواملی همچون قیمت‌گذاری و کمیت تولید را در تحلیل‌های قبلی وارد کردند.

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

مدل برنامه‌ریزی پویا جهت تعیین توالی بهینه مجموعه‌ای محدود از طرح‌های توسعه ظرفیت توسط ارلن کاتر و راجرز<sup>۵</sup> (۱۹۷۷: ۶) و مدل برنامه‌ریزی خطی با فرض توسعه ظرفیت در موقعیت‌های چند کارخانه‌ای و بازارهای متعدد با هدف کاهش هزینه‌های تنزیل شده توسعه ظرفیت و حمل و نقل کالاها طی افق برنامه‌ریزی توسط فونگ و سرینیواسان<sup>۶</sup> (۱۹۸۰: ۸) طراحی و ارائه شدند. لوس<sup>۷</sup> (۱۹۸۲: ۱۶) با جمع‌آوری و دسته‌بندی نتایج تحقیقات قبلی یک راهنمای جامع بحث توسعه ظرفیت ارائه 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<sup>۱</sup> و لوس (۱۳:۱۹۸۱) انجام و روش حلی مبتنی بر نظریه شبکه توسعه داده شد.

سیم<sup>۲</sup> (۲۹:۲۰۰۰) 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<sup>۳</sup> برای حل آن استفاده نمود. لی و تیروپاتی<sup>۴</sup> (۱۴:۱۹۹۳) با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات انجام‌شده در بحث فناوری‌های انعطاف پذیر یک مدل صفر و یک با هدف انجام توازن و مصالحه بین صرفه‌جویی حاصل از مقیاس و مزایای حاصل از حوزه عملکردی وسیع<sup>۵</sup> به منظور 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<sup>۶</sup> 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 نمی‌شوند. 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<sup>۷</sup> از ماشین‌آلات مشابه است. راجاگوپالان<sup>۸</sup> (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 ارائه نمود. وی (۱۹۹۴:۲۲) هم‌چنین با الهام از لی و تیروپاتی (۱۹۹۳)؛ لی ولوس (۱۹۸۷) ولوس (۱۹۸۲) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با فرض اینکه گزینه‌های فناوری دارای درجه خاصی از صرفه‌جویی حاصل از مقیاس هستند طراحی کرد. اضافه کردن فرض فوق باعث افزایش اندازه و پیچیدگی مدل‌های قبلی می‌شود.

راجاگوپالان و سوتریو<sup>۱</sup> (۱۹۹۴:۱۹) فرض جایگزینی ماشین‌آلات به دلیل کهنگی یا افزایش هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و برکناری و توقف عملیاتی آن‌ها به دلیل تقاضای کاهنده، به مدل‌های قبلی اضافه نمودند و یک مدل عدد صحیح ارائه کردند.

نیر<sup>۲</sup> و هاپ<sup>۳</sup> (۱۹۹۲:۱۹) با این فرض که در برخی صنایع، جایگزینی به دلیل منسوخ شدن فناوری بیش از جایگزینی به دلیل افزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری اهمیت دارد، یک مدل برنامه‌ریزی پویا ارائه نمودند. به نظر آنان با فرض وجود تحولات فناورانه آتی، با سه موقعیت در هر یک از تجهیزات نصب‌شده مواجه هستیم: فناوری در دست یا مورد استفاده، فناوری برتر موجود و فناوری پیشرفته‌تری که در آتیه ظاهر خواهد شد.

راجاگوپالان و همکاران (۱۹۹۸:۲۵) با بهره‌گیری از نتایج راجاگوپالان (۱۹۹۲) و جونز و همکاران (۱۹۹۱) با فرض وجود رشته‌ای از تحولات فناورانه، عدم اطمینانی در وقوع تحولات و عدم اطمینانی در چرخه حیات فناورانه ماشین‌آلات؛ به تجدید نظر در مدل‌های سنتی توسعه ظرفیت پرداختند. اولین مدل با فرض تحولات قابل پیش‌بینی به صورت خطی طراحی شد و مدل دوم با فرض فرایند نیمه مارکوفی تحولات فناورانه و مبتنی بر نتایج نیر و هاپ (۱۹۹۲) تحلیل‌های لازم را ارائه می‌دهد.

هم‌چنین راجاگوپالان (۱۹۹۶:۲۳) با تأکید بر نتایج راجاگوپالان و سوتریو (۱۹۹۴)، راجاگوپالان و همکاران (۱۹۹۸)، نیر و هاپ (۱۹۹۲)، راجاگوپالان (۱۹۹۲)، و جونز و همکاران (۱۹۹۱) رویکردی یکپارچه برای تحلیل مسایل توسعه ظرفیت و جایگزینی تجهیزات ارائه 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 راثوسانگ<sup>۱</sup> (۱۹۹۸، ۲۴) با الهام از لیبرمن<sup>۲</sup> (۱۹۸۷: ۱۵) ماهیت پیچیده و پویای مسابقه توسعه ظرفیت را در قالب یک صنعت و تأثیرات آن بر سیاست‌های اتخاذی یک شرکت از همان صنعت را با استفاده از نظام پویای غیرخطی تحلیل نمودند. آن‌ها با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی به تحلیل سیاست‌های توسعه ظرفیت صنایع در شرایط عدم تعادل پایدار یا آشوب پرداختند.

راجاگوپالان و سوامیراتن<sup>۳</sup> (۲۰۰۰: ۲۷) 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<sup>۴</sup> و هود<sup>۵</sup> (۱۹۹۹: ۱) یک نظام پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر روش برنامه‌ریزی خطی در صنعت نیمه‌هادی‌ها با عنوان نظام برنامه‌ریزی بهینه‌سازی ظرفیت توسعه دادند. چند<sup>۶</sup> و مک‌کلارگ<sup>۷</sup> (۲۰۰۰، ۲) پس از بررسی نتایج تحقیقات مان (۱۹۶۱) و سایر موارد اعلام کردند که در اکثر موارد سعی بر آن است تا دوره‌های از قبل تعیین شده جایگزینی را پیش‌بینی کنند. در حالی که به دلیل 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  $t$  و فعال در دوره  $t$ ، تعداد ماشین‌آلات دارای عمر  $t$  دوره که در پایان دوره  $t$  به معرض فروش گذاشته می‌شوند و تعداد ماشین‌آلات هرگز استفاده‌نشده در پایان دوره  $t$  بوده و تصمیم جایگزینی به‌صراحت عنوان نمی‌شود.

اپن<sup>۸</sup> 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<sup>۱</sup> (۲۸:۱۹۹۸) یک مدل خطی عدد صحیح محض برای تعیین برنامه بهینه توسعه ظرفیت کلینکر کمپانی بی سی سی<sup>۲</sup> آفریقای جنوبی ارائه نمود. تعیین تعداد، اندازه و مکان بهینه استقرار کوره‌های پخت سیمان در فرمولاسیون مدل نقش مهمی بازی می‌کنند.

کر<sup>۳</sup> (۱۱:۱۹۸۸) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مسأله تعیین مکان، ظرفیت، شروع سال تولید کارخانجات تازه تأسیس، افزایش ظرفیت و سال انجام آن، سطوح تولید کارخانجات، 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<sup>۴</sup> و چیانگ<sup>۵</sup> (۹:۱۹۹۶) از روش موازی در الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت نظام‌های تولید انرژی الکتریکی استفاده کردند. پارک<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۰: ۲۰) برای افزایش کارایی و سرعت محاسبات الگوریتم و دوری جستن از دام نقاط بهینه محلی<sup>۷</sup> و مبتنی بر نتایج تحقیقات فوکویاما و چیانگ (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) هر یک از شرکت‌ها یا کارخانجات (W) تحت پوشش هولدینگ دارای یک یا چند خط تولید (L) به منظور تولید یک یا چند محصول (I) هستند. هر یک 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 به منظور توسعه ظرفیت و جایگزینی خواهد شد.
- د) بخش کوره به‌عنوان بخش اصلی تلقی می‌شود و سایر بخش‌ها به صورت بالادست و پایین‌دست نسبت به آن مستقر می‌شوند.
- ه) تعویض و نصب کوره جدید با آگاهی از زمان انتظار<sup>۱</sup> معین انجام شده که در نتیجه باعث از دست رفتن بخشی از ظرفیت فعلی و جدید خواهد شد.
- و) در نظام چندمرحله‌ای هر خط تولید، فرض می‌شود که کمیت ظرفیت هر یک از بخش‌های بالادست و پایین‌دست کوره باید معادل ضریب  $\alpha K$  بیش‌تر از کمیت ظرفیت کوره باشد.
- ز) تغییر حالت اجزاء با هدف جایگزینی یا توسعه ظرفیت طی افق برنامه‌ریزی فقط یک بار صورت می‌گیرد.
- ح) نگهداری موجودی به دلیل حجیم‌بودن محصولات و کالاهای نیمه‌ساخته و نیاز به فضای وسیع انبار امکان‌پذیر نیست.
- ط) برای ایجاد توازن بین جریان‌ات نقدی ورودی و خروجی و شرط تداوم فعالیت‌ها باید معادله 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 امکان‌پذیر است.

### صورت‌بندی مدل ریاضی

متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی به شرح ذیل هستند:

- ماشین زام بخش S خط تولید L کارخانه W در وضعیت K ام در دوره t باقی بماند یا خیر:  
 $Y_{jkslwt} \in (0,1)$
  - ماشین زام بخش S خط تولید L کارخانه W در دوره t به وضعیت K تغییر حالت بدهد یا خیر:  
 $W_{jkslwt} \in (0,1)$
  - افزایش سرمایه در کارخانه W در سال t انجام گیرد یا خیر:  
 $W_{wt} \in (0,1)$
  - کمیت تولید کالای زام در خط تولید L کارخانه W در دوره t ام:  
 $X_{ilwt} \geq 0$
  - کمیت تولیدی محصول i ام در ماشین زام بخش S خط تولید L کارخانه W با وضعیت K ام در دوره t  
 $X_{ijkslwt} \geq 0$
  - کمیت بدهی بلند مدت اخذشدهی کارخانه W در دوره t ام:  
 $L_{wt} \geq 0$
  - کمیت بدهی کوتاه مدت اخذشده کارخانه W در دوره t ام:  
 $S_{wt} \geq 0$
  - تعداد سهام منتشره کارخانه W بابت افزایش سرمایه در سال t ام:  
 $Q_{wt} \geq 0$
  - کمیت سود تقسیم شده کارخانه W در دوره t ام:  
 $D_{wt} \geq 0$
- مدل ریاضی برنامه ریزی توسعه ظرفیت و جایگزینی ماشین آلات به شرح ذیل است:

$$\begin{aligned}
 MaxZ = & \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T R_{ilwt} X_{ilwt} \\
 & - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T P_{ijkslwt} X_{ijkslwt} \\
 & - \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T n_{Lt} L_{wt} - \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T m_t S_{wt} - \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T b_{Qwt} \\
 & - \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T T X_{Dwt} - \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T f w_{wt} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T d_j Y_{jkslwt} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{w=1}^W \sum_{t=0}^T h_j W_{jkslwt}
 \end{aligned}$$

Subject to:

۱. تأمین تقاضا:

$$\begin{aligned}
 X_{ilwt} &= D_{ilwt} \\
 i &= 1, 2, \dots, I \\
 w &= 1, 2, \dots, W
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l &= 1, 2, \dots, L \\
 t &= 0, 1, \dots, T
 \end{aligned}$$





۱۲. تناسب بدهی با حقوق صاحبان سهام

$$\sum_{t=1}^T n_t L_{wt} + S_{wt} / (\sum_{t=1}^T ZQ_{wt} + B) \leq 1$$

w: 1, 2, ..., W

۱۳. رشد سود نقدی یا قابل تقسیم

$$D_{wt} \geq (1 + g) D_{wt-1}$$

w: 1, 2, ..., W

$$t: 0, 1, \dots, T$$

پارامترهای مورد استفاده در مدل عبارتند از:

$R_{it}$	قیمت فروش محصول $i$ ام در سال $t$ ام
$P_{ijrslwt}$	قیمت تمام‌شده‌ی تولید محصول $i$ بر روی جزء $j$ ام در سال $t$
$n_t$	ضریب بازگردان اصل و هزینه مالی بدهی بلندمدت
$n_{1t}$	ضریب بازگردان هزینه مالی بدهی بلندمدت
$m_t$	ضریب بازگردان هزینه مالی بدهی کوتاه‌مدت در سال $t$ ام
$b$	هزینه متغیر صدور هر سهم جدید
$t$	ضریب مالیات و پاداش مدیریت
$f$	هزینه ثابت صدور سهام جدید
$d_j$	هزینه استهلاک جزء $j$ ام
$h_j$	هزینه خرید ماشین نوع $j$ ام
$D_{iwt}$	تقاضای محصول $i$ ام در سال $t$ در کارخانه $W$
$C_0$	ظرفیت فعلی هر ماشین ( $k=0$ )
$C_R$	ظرفیت ترکیب یا حالت $R$ ام ماشین
$V_{OR}$	ظرفیت از دست‌رفته‌ی حین تغییر حالت از وضعیت فعلی به وضعیت $k$ ام
$Z$	ارزش اسمی هر سهم منتشر شده
$g$	نرخ رشد سود نقدی
$\alpha_s$	ضریب مقایسه ظرفیت قسمت‌ها با یکدیگر
$\beta$	مانده حقوق صاحبان سهام هر کارخانه در ابتدای دوره

## روش حل مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک فن جست و جوی تصادفی مبتنی بر فرایند انتخاب طبیعی کروموزوم‌ها یا گونه جاندار سازگارتر با محیط توسط هولند در سال ۱۹۷۰ ارایه و بعدها به شکل کامل تری بسط داده شد. هر جواب ممکن مسأله به صورت یک رشته یا کروموزوم تصادفی داده می‌شود. این رشته ممکن است شباهت‌هایی با کروموزوم بهینه (پاسخ بهینه مسأله) داشته باشد. این شباهت‌ها در واقع به صورت 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.

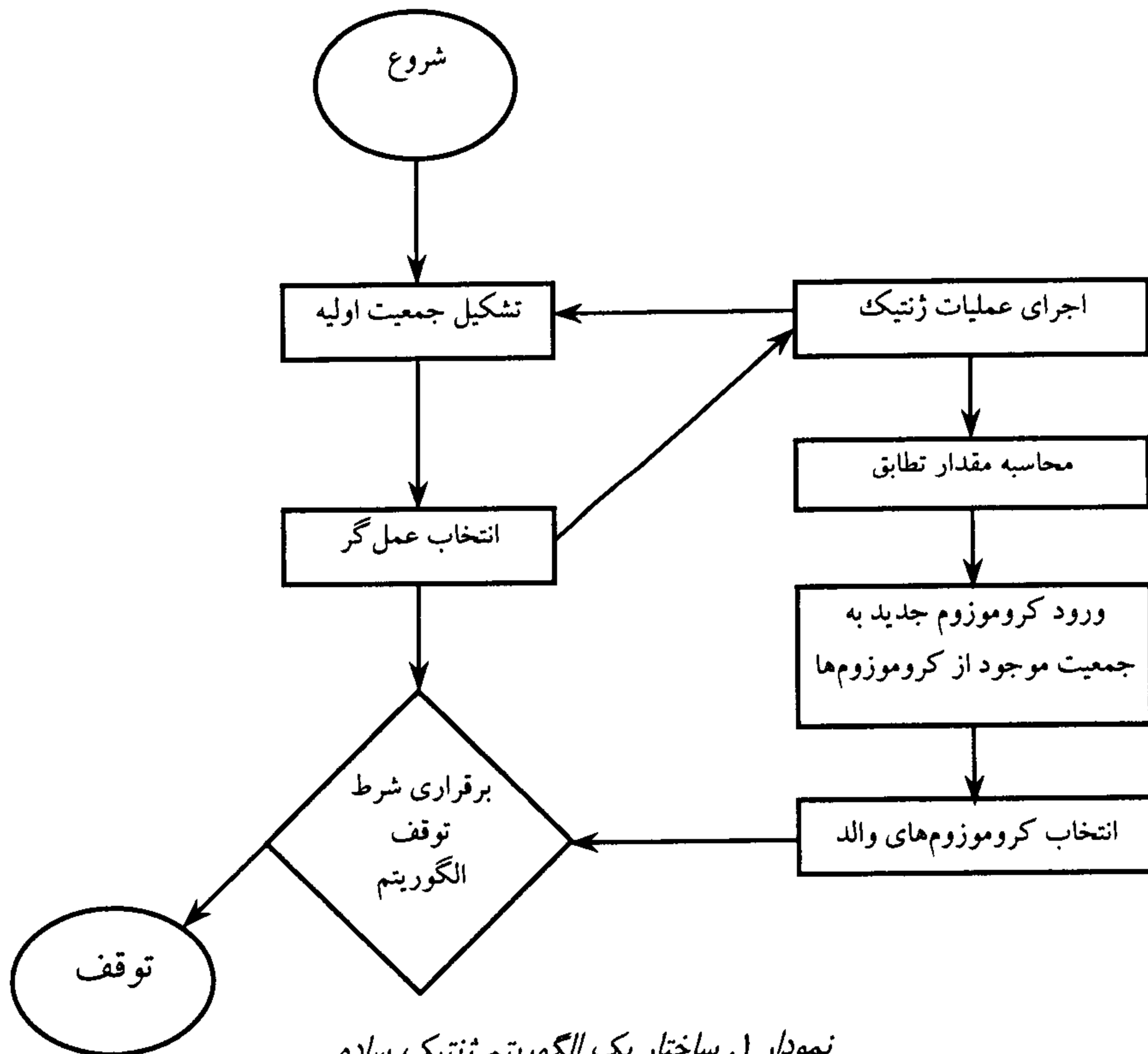
استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت حل یک مسأله خاص به دو نوع تصمیم‌گیری نیاز دارد. اول باید نحوه تبدیل مسأله یا مدل‌سازی آن در چارچوب الگوریتم ژنتیک را که شامل تعریف فضای جواب موجه، شکل تابع تطابق و روشی است که جواب‌های ممکن به عنوان یک رشته بیان می‌شوند، تعریف کرد. دومین تصمیم نیز به تعیین منطقی متغیرهای کنترلی الگوریتم شامل تعداد جمعیت اولیه، تعداد نسل‌ها، احتمال تداخل و جهش<sup>۱</sup> برمی‌گردد.

رویه متعارف یک الگوریتم ژنتیک ساده بدین صورت قابل تشریح است که ابتدا نحوه نمایش کروموزوم‌ها مشخص می‌شود. معمولاً از روش توصیف باینری<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها به طور تصادفی تعریف می‌شود و به ذخیره‌ای از کروموزوم‌ها به نام جمعیت اولیه تخصیص می‌یابد. پس از این مرحله، جست و جو به صورت موازی بر روی تمام کروموزوم‌ها با استفاده از عملیات نسل‌گردانی صورت می‌گیرد. این ویژگی یعنی جست و جوی 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<sup>۳</sup> ژنتیک نظیر تکثیر، تداخل، و جهش که به طور 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 انجام می‌شود. عملگر تداخل، کروموزوم‌های والد مناسب‌تر را جهت دستیابی به کروموزوم فرزند دارای میزان تطابق بیشتر، مبادله و تعویض می‌نماید. عملگر جهش نیز با انجام تغییراتی در کروموزوم والد به صورت ایجاد تغییر در مقادیر یک بیت یا چند بیت سبب کشف کروموزوم‌های بهتر شده و از همگرایی سریع الگوریتم جلوگیری می‌کند. پس از اتمام عملیات و تحقق شرط توقف الگوریتم، رشته‌ی دارای بهترین مقدار تطابق انتخاب می‌شود و به عنوان 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.



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

کاربردی توسعه یافته به مدد رویکردهای خاص مدل سازی تحقیق در عملیات به دلایلی نظیر پیچیدگی تابع هدف، تعداد قابل ملاحظه محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم از نوع مسایل سخت<sup>۱</sup> تلقی شده و با استفاده از ابزارها و نرم افزارهای موجود قابل حل نمی باشند. مدل ریاضی طراحی شده در این تحقیق نیز به دلیل وجود متغیرهای صفر و یک فراوان حین به کارگیری در موقعیت‌های عملی و کاربردی از نوع مسایل سخت بوده و به دلیل تعداد زیاد محدودیت‌ها با نرم افزارهای متداول موجود قابل حل نیست. در نتیجه، استفاده از روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به صورت مختلط<sup>۲</sup> توصیه می شود.

### ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک مختلط پیشنهادی

هریک از کروموزوم یا رشته‌های جمعیت اولیه، حاوی متغیرهای دودویی  $W_{wt}$  و  $W_{jkstwt}$  است. با مشخص شدن مقادیر متغیرهای تصمیم  $W_{jkstwt}$  به تبع آن وضعیت متغیرهای  $Y_{jkstwt}$  نیز تعیین خواهد شد. ساختار هر کروموزوم را در نگاره ۱ ملاحظه نمایید.

نگاره ۱. ساختار هر کروموزوم

$W_{jkstwt}$			$W_{wt}$		
$W_{\dots}$	$W_{\dots}$	$W_{\dots}$	$W_{jkstwt}$	$W_{\dots}$	$W_{wt}$
			تصمیم به خرید و تعویض	تصمیم به افزایش سرمایه	

رویه مورد استفاده در الگوریتم مختلط پیشنهادی به طور خلاصه به شرح ذیل است: پس از تولید تصادفی هر یک از کروموزوم‌ها چنانچه وضعیت هر رشته با توجه به محدودیت شماره سه مدل ریاضی توجیه پذیر باشد، به عنوان یک عضو جمعیت اولیه پذیرفته خواهد شد. پس از جای گذاری مقادیر متغیرهای دودویی  $(W_{wt}, Y_{jkstwt}, W_{jkstwt})$  در مدل MIP طراحی شده با یک مدل برنامه ریزی خطی روبه‌رو هستیم. مدل مزبور پس از حل به روش سیمپلکس<sup>۳</sup> دارای مقدار تابع هدفی است که به عنوان مقدار تطابق کروموزوم

1. NP-hard
2. Hybrid
3. Simplex

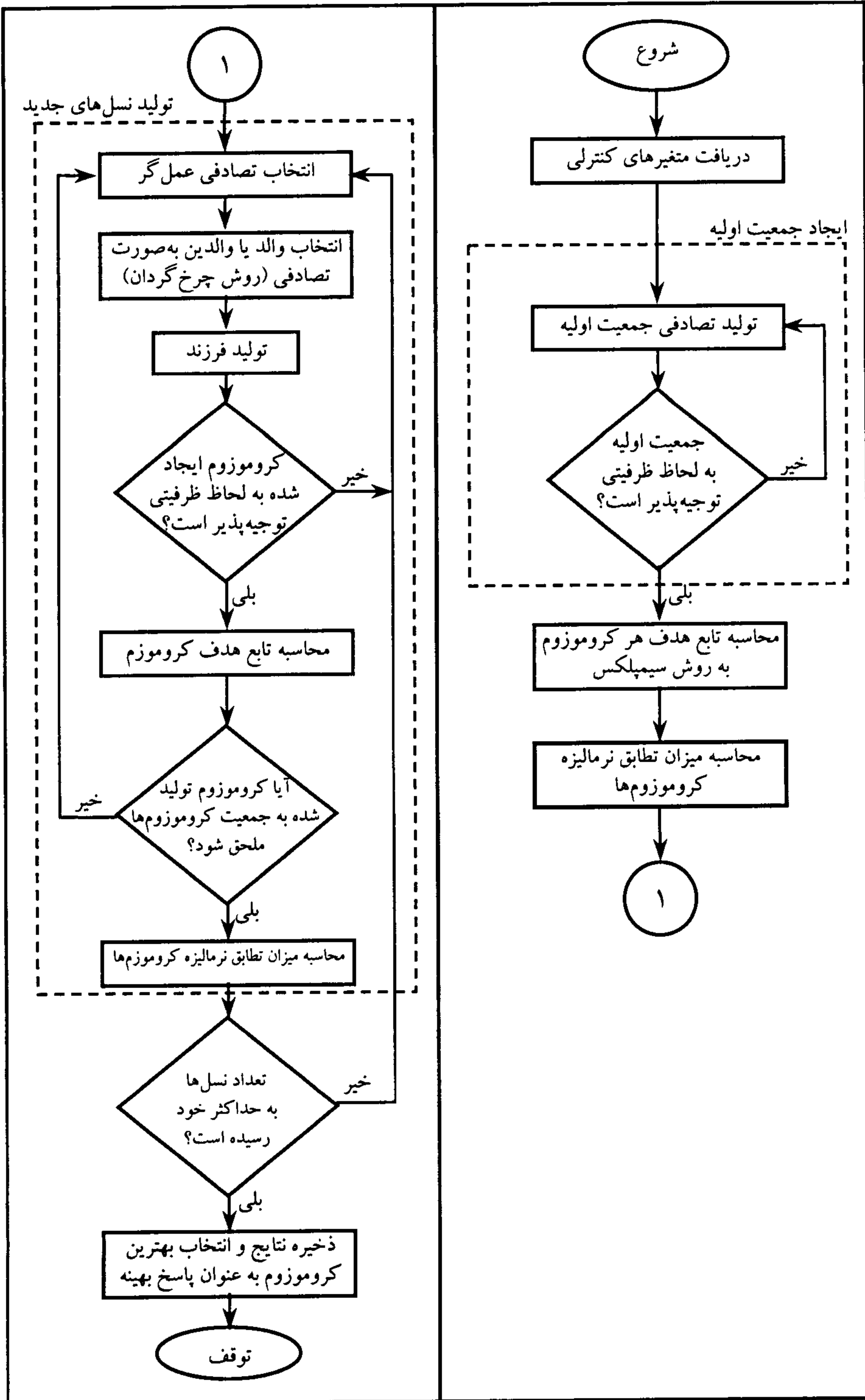


انتخاب می‌شود. پس از تشکیل جمعیت اولیه مقدار تطابق نرمالیزه کلیه کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود. پاسخ مقادیر متغیرهای پیوسته مدل ریاضی نیز پس از حل مدل برنامه‌ریزی خطی قابل استخراج است.

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

نمودار جریان یافتن پاسخ بهینه مسأله به روش الگوریتم ژنتیک را در نمودار ۲ ملاحظه

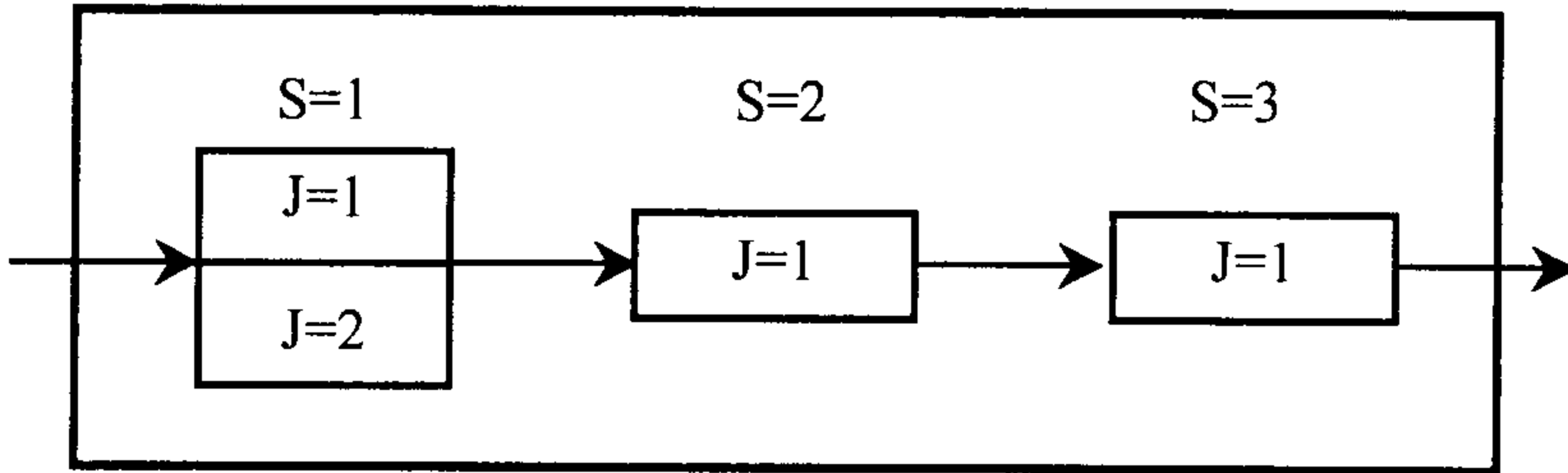
می‌شود.



نمودار ۲. جریان حل مسأله به روش الگوریتم ژنتیک

### اجرای مدل در یک نظام واقعی

اطلاعات واقعی یک شرکت تولید کننده کاشی گرانیته جهت استفاده آماده شد. شرکت دارای یک خط تولید و سه مرحله اصلی تولیدی است. مرحله اول دارای دو جزء، مرحله دوم و سوم نیز هر یک دارای یک جزء هستند.



نمودار ۳. فرایند تولید شرکت تولید کننده کاشی

پس از ورود داده‌ها به نرم افزار لیندو<sup>۱</sup> و حل آن، نتایج به دست آمده به طور خلاصه به شرح زیر می باشد:

نگاره ۲. مقادیر متغیرهای  $W_{jkslt}$

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 به صورت زیر پس از بررسی ترکیب‌های متعدد، اقدام به اجرای الگوریتم گردید.

احتمال جهش = ۰/۵      احتمال تداخل یک نقطه‌ای = ۰/۱۵

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

نسل = ۱۸ = حداکثر تعداد نسل‌ها

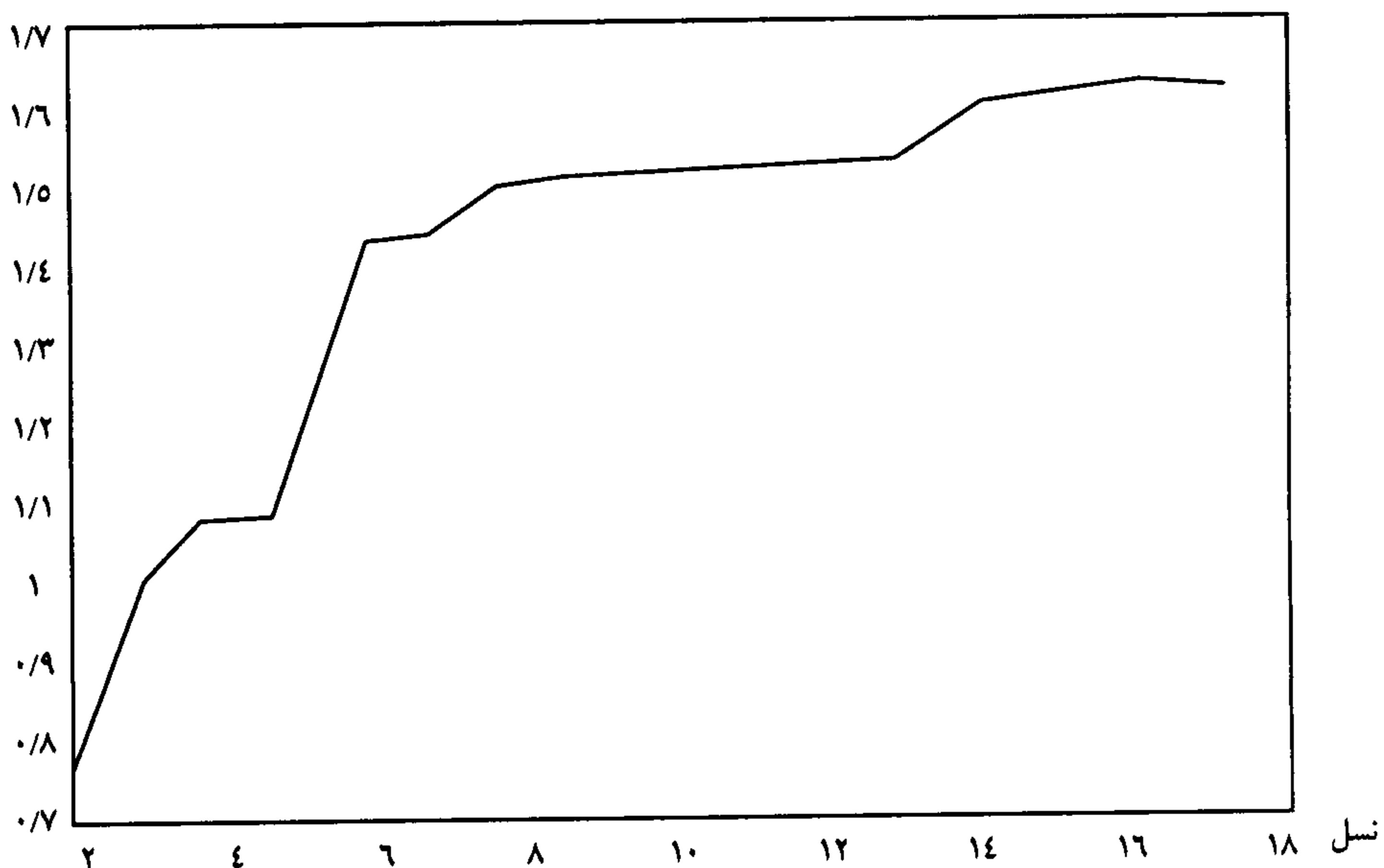
الگوریتم پس از ۱۴ نسل به همگرایی رسید و مقادیر مساوی یک کروموزوم بهینه به صورت  $M(2)$ ،  $M(26)$ ،  $M(38)$ ،  $M(57)$ ،  $M(62)$  و  $M(64)$  به دست آمد. چهار متغیر اول با توجه به تعریف کروموزوم در بخش‌های قبلی دارای مقادیر کاملاً برابر با پاسخ‌های متغیر  $W_{jkslwt}$  در مدل ریاضی است و فقط افزایش سرمایه در سال‌های اول و سوم مجاز شمرده می‌شود. در نگاره ۳ به صورت مقایسه‌ای، نتایج حاصل از مدل ریاضی و اجرای الگوریتم را مشاهده می‌گردد.

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

شرح	حل مدل ریاضی	اجرای الگوریتم ژنتیک
درصد تقاضای ارضاء نشده کل دوره‌ها	۵/۷٪	۵/۵٪
فروش (میلیارد ریال)	۱/۳۱۶	۱/۳۱۲/۶
سود قابل تقسیم (میلیارد ریال)	۳۷۵/۱	۴۹۲/۵
متوسط درصد قابل تقسیم بر فروش	۲۰/۷٪	۱۴/۲٪
مقدار تابع هدف (۱۰۰۰۰۰ ریال)	۱/۹۴۶/۱۳۱	۱/۸۲۶/۸۰۰

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

مقدار تطابق



نمودار ۴. نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک با  $pc_1 = 0.15$  و  $pc_2 = 0.25$  و  $pm = 0.5$

## 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 ارائه تصویری روشن‌تر از فضای سرمایه‌گذاری‌ها و اطمینان‌بخشی به سهام‌داران از سودآوری آتی طرح‌ها ضرورتی انکارناپذیر است.

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی شده 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 ماشین‌آلات، 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 زیرگروه 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 به کار 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 nitrogenous 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 scheduling with price-sensitive dynamic demand" *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 Logistics*, 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" *Operations 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 probabilistic growth" *Econometrica*, 29, 4, 632-649.

- Manne, A.S. (1976). "Investments for capacity expansion: size, location and time-phasing" *MIT Press, Massachusetts*.
- Nair, S.K. and Hopp, W.J. (1992). "A model for equipment due to technological obsolescence" *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 deterioration", *Management Science*, 38, 525-539.
- Rajagopalan, S. (1994). "capacity expansion with alternative technology choices" *European Journal of Operational Research*, 77, 392-403.
- Rajagopalan, S. (1996). "Capacity expansion and equipment replacement: a unified approach" *Operations Research*, 46, 846-857.
- Rajagopalan, S. and Rao Song, 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 breakthroughs" *Management Science*, 44, 12-30.
- Rajagopalan, S. and Soteriou, A.C. (1994). "Capacity acquisition 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.