مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۱-۳۶، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۲۵-۳۶

Original Article

بهینه‌سازی توأم برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن ملاحظات انتشار کربن

وحید حاجی‌پور* **(استادیار)**
مریم سادات سادات موسوی (کارشناس‌ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب

با پیچیده‌تر شدن صنایع و افزایش هزینه‌های تعویض تجهیزات آسیب دیده و تولید، برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات به یکی از مباحث مهم در دنیا تبدیل شده است که با یکپارچه‌سازی این تصمیمات می‌توان در جهت کاهش چشم‌گیر هزینه‌های تولید گام برداشت. افزایش انتشار گازهای گل‌خانه‌یی و آسیب به محیط زیست نیز از جمله دغدغه‌های این تحقیق است و سعی شده است تا میزان آلاینده‌های ورودی به صنایع کاهش یابد. این تحقیق به برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات می‌پردازد به‌گونه‌یی که برای هر واحد تولیدی سقف مجاز انتشارات کربن مشخص می‌شود. برای مدیریت منابع، دو نوع راهبرد تولید سبز و عادی مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای دست‌یابی به بهینگی، با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی‌بر ژنتیک و میرایی ارتعاش بهینه‌سازی خروجی‌ها مشخص و کارایی آن‌ها مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات، انتشارات کربن، الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش، الگوریتم ژنتیک.

hajipour.v@wtiau.ac.ir
msm.indust@gmail.com

۱. مقدمه

با توجه به ماشینی شدن فرایندهای تولیدی و افزایش رقابت در بین صنایع تولیدی، برنامه‌ریزی بهینه‌ی تولید از جمله عوامل کلیدی در صنایع تولیدی است. از طرفی، با توجه به اهمیت تجهیزات و ماشین‌آلات تولیدی و بالا رفتن هزینه‌های تعویض تجهیزات آسیب دیده، مباحث مرتبط با برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات امروزه مورد توجه است. خرابی‌های واحد تولید یکی از عوامل مهم ایجاد اختلال و از دست رفتن بهره‌وری است؛ پس به منظور داشتن واحدهای تولیدی با ظرفیت مناسب، سطوح بالای دسترس‌پذیری باید تضمین شود. پیاده‌سازی سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روشی مطلوب برای رسیدن به این هدف است. به منظور کاهش توقف‌های تولیدی حین انجام عملیات نگهداری و تعمیرات و تأثیر آن بر عملکرد تعهدات تولیدی، سیاست نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید می‌تواند به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد. از جمله دلایل اهمیت استقرار سیستم‌های ترکیبی نگهداری و تعمیرات و تولید می‌توان به حرکت سریع صنایع به سمت خودکار شدن، بالا رفتن نیاز به مهارت کارکنان برای مراقبت و تعمیر تجهیزات، بالارفتن حجم سرمایه‌گذاری‌ها و سرعت تولید و بالا رفتن قیمت قطعات یدکی و ماشین‌آلات، اشاره کرد.[۱] سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات با هدف کاهش تعمیرات و هزینه‌های مربوط به آن خواهد توانست با بهره‌گیری از روش‌های بازرسی دوره‌یی، زمان‌بندی خدمات و غیره هزینه‌های تعمیرات و در نتیجه هزینه‌های تولید را کاهش دهد. اخیراً بحث نگهداری و تعمیرات مبتنی‌بر قابلیت اطمینان برای انتخاب راهبرد نگهداری و تعمیرات مطرح شده است؛ از این‌رو، با استفاده از این رویکرد می‌توان به شناسایی حالات خرابی تجهیزات در زمان مؤثر و در نتیجه به برنامه‌ریزی بهینه‌ی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پرداخت.[۲] با توجه به این‌که قابلیت اطمینان سیستم‌ها غالباً در حال کاهش است، با تعریف یک مقدار کمینه برای کمینه‌ی میزان قابلیت اطمینان، می‌توان اولویت‌های انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر روی تجهیزات را شناسایی کرد.

به‌علت افت سیستم‌های تولیدی، امروزه اثرهای چندگانه‌یی بر محیط زیست وارد شده است؛ مثلاً بسیاری از گازهای تولید شده، به افزایش اثرات گل‌خانه‌یی و گرم‌تر شدن سطح زمین منجر شده‌اند. با بالا رفتن آلودگی هوا و افزایش مشکلات مرتبط با آن، امروزه مسائل محیط زیستی یکی از ابعاد توسعه‌ی پایدار مورد توجه ویژه‌یی قرار گرفته‌اند. با افزایش آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی ایجاد شده، اغلب کشورها به سمت ایجاد سیاست‌هایی برای جلوگیری از انتشار گازهای گل‌خانه‌یی می‌روند (هونگ[۱] و همکاران[۳]). از سیاست‌هایی که بیشتر به‌کار می‌رود می‌توان به سیاست‌هایی نظیر «سیاست محدودیت انتشار» و «طرح تجارت محدودیت انتشار» اشاره کرد. در سیاست محدودیت انتشار، برای تولیدکنندگان سقف مجاز انتشار کربن

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۹/۱۰، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۱.
DOI:10.24200/J65.2019.52983.1972

مشخص شده است که در صورت انتشار بیش از حد مجاز از طریق دولت جریمه خواهند شد. در سیاست طرح تجارت کربن سقف مشخصی برای انتشارات کربن وجود دارد که تولیدکنندگان امکان خرید و فروش این سقف مجاز را خواهند داشت. در این پژوهش، محدودیت انتشار کربن برای تولیدکنندگان در دوره‌های مشخص تولید، وجود دارد؛ بدین منظور برای غلبه بر محدودیت انتشار، راهبردهای سبز می‌توانند استفاده شوند. در راهبرد سبز می‌توان با تمرکز برکاهش آسیب‌های محیط زیستی از ابزارآلات، مواد اولیه‌ی سبز، بسته‌بندی‌های بازیافت شدنی و سوخت‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی تولید با تمرکز بر عدم تولید در زمان‌های اوج مصرف برق، استفاده کرد. در این تحقیق، به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب راهبرد عادی و راهبرد سبز در برنامه‌های میان مدت پرداخته شده است و در نهایت مقدار بهینه‌ی تولید با هر دو نوع راهبرد تعیین خواهد شد. در راهبرد سبز هزینه‌های اولیه بالاتر است و در ازای آن مخاطرات کمتری وارد محیط زیست خواهد شد و به کاهش جریمه منجر می‌شود. در راهبرد عادی هزینه‌های اولیه کمتر است ولی در مقابل ممکن است با بالا رفتن انتشارگازها از حد مجاز هزینه‌ی جریمه به سیستم تحمیل شود. موازنه بین این دو راهبرد از جمله تصمیماتی است که بررسی می‌شود.

در ادامه در بخش ۲ به مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی مرتبط با برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و تولید و ملاحظات محیط زیستی پرداخته می‌شود؛ در بخش ۳ بیان مسئله و مدل‌سازی ارائه می‌شود. در بخش ۴ به معرفی الگورتیم‌های بهینه‌سازی استفاده شده و روش‌های عملکرد آنها پرداخته خواهد شد؛ در بخش ۵ حل مسئله و مقایسه‌ی پاسخ‌های ارائه شده توسط دو الگورتیم ارائه می‌شود و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری و جمعبندی عملکرد مدل ارائه شده بیان می‌شود.

۲. پیشینه‌ی تحقیق

اغلب مطالعات موجود در خصوص محدودیت‌های انتشار در قالب مسائل اندازه‌ی سفارش، مدیریت موجودی و حمل‌ونقل با تمرکز بر مسئله‌های تک‌دوره‌یی و بهینه‌سازی تصمیمات عملیاتی انجام شده است. در مسائل چنددوره‌یی سری‌هایی از مدل‌های اندازه‌ی سفارش‌دهی سنتی ارائه شده است که تأثیر محدودیت‌های انتشار را بر تصمیمات تولید بررسی کرده است و نتایج آن نشان داده است که با تنظیم عملیات بر مبنای محدودیت انتشار با کاهش هزینه‌ها نیز روبه‌رو می‌شود (بنجفر[۲] و همکاران[۳]). هوئن[۳] و همکاران[۴] تأثیر محدودیت‌های انتشار مختلف را بر روی راهبردهای انتخاب حمل‌ونقل شرکت‌ها بررسی کرده‌اند. نتایج بیان‌گر آن است که با وجود ایجاد محدودیت‌های انتشار و تأثیرگذاری آنها، سیاست‌ها و قوانین کشورها مهم‌ترین عامل برای کاهش آلودگی‌هاست.

ابسی[۴] و همکاران[۵] سه نوع مختلف از محدودیت‌های انتشار شامل محدودیت انتشار کربن دوره‌یی، محدودیت کربن انباشته، محدودیت انتشار کربن جهانی را بررسی کرده‌اند. همچنین با در نظرگرفتن محدودیت انتشار کربن به صورت ثابت در هر دوره، یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویای چندجمله‌یی برای حل مدل خود ارائه دادند.

آقزاف[۵] و همکاران[۱] به بررسی تأثیر برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات اصلاحی و تولید به صورت هم‌زمان پرداختند. با[۶] و همکاران[۶] با در نظرگرفتن محدودیت انتشار کربن، به بهینه‌سازی توأم موجودی قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه پرداختند و در سه سطح به برنامه‌ریزی سفارش قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات پرداخته‌اند و سه مدل مجزای مقدار سفارش‌دهی اقتصادی قطعات یدکی، مقدار سفارش‌دهی بهینه‌ی بوم‌شناختی و مقدار سفارش‌دهی قطعات یدکی اقتصادی و بوم‌شناختی را ارائه کردند. هنگوین[۷] و همکاران[۷] با در نظرگرفتن هزینه‌های اجتماعی و محیط زیستی نگهداری و تعمیرات و تولید سعی بر بهینه‌سازی تولید و نگهداری و تعمیرات داشته‌اند و با در نظرگرفتن راهبرد نقطه‌ی محصور و نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه دوره‌یی به پیدا کردن دوره‌ی بهینه‌ی نگهداری و تعمیرات و هزینه‌ی بهینه پرداخته‌اند.

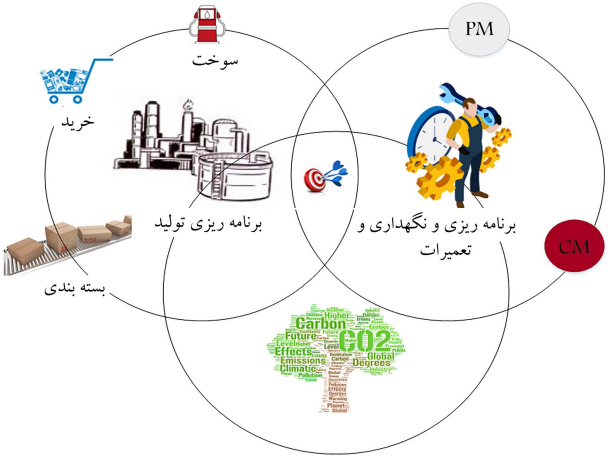
جدول ۱ مقالات بررسی شده و تحقیقات انجام شده در این حوزه و تحلیل شکاف تحقیقاتی، را نشان می‌دهد. با توجه به تحقیقات انجام شده و شکاف تحقیقاتی در بهره جستن از محدودیت‌های انتشار و در نظرگرفتن بهینه‌سازی هم‌زمان تصمیمات تولید و نگهداری و تعمیرات، در این مقاله به مدل‌سازی و بهینه‌سازی مسئله‌ی یکپارچه‌ی برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و تولید با انتخاب راهبرد تولید سبز پرداخته شده است.

۳. بیان مسئله و مدل

در این مقاله، به مدل‌سازی هزینه‌های تولید و نگهداری تعمیرات خواهیم پرداخت؛ فرض بر این است که افق تولید به بازه‌های مشخص تقسیم شده است و در کنار آن در بازه‌های مشخص و تعیین شده برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اجرا خواهد شد. سعی برآن است تا با برنامه‌ریزی بهینه میزان توقفات سیستم تولید کمینه شود.

درکنار آن با توجه به محدودیت انتشارکربن و جریمه‌ی لحاظ شده در صورت تخطی از میزان مجاز، برنامه‌ریزی به گونه‌یی انجام خواهد شد که با تعادل بین راهبرد تولید سبز و راهبرد تولید عادی، درکنار کمینه کردن هزینه‌های تولید، میزان انتشار وارد شده به محیط زیست نیزکمینه شود.

برای راهبرد تولید سبز پیشنهادی، همه‌ی مواردی که موجب ایجاد و انتشارکربن به محیط زیست می‌شود اعم از میزان انتشارکربن حین تولید، حین بسته‌بندی (جنس و نحوه‌ی بسته‌بندی محصول)، مواد اولیه‌ی مورد استفاده در تولید و حمل‌ونقل محصول به انبار یا فروشگاه‌ها، زمان‌های تولید در ساعت‌های غیر اوج مصرف برق، با راهبرد تولید عادی متفاوت در نظرگرفته می‌شود. نمای کلی مسئله و چالش‌های موجود در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱. مسئله‌ی بهینه‌سازی یکپارچه‌ی تصمیمات تولید و نگهداری و تعمیرات با انتخاب راهبرد تولید سبز.

جدول ۱. بررسی مقالات اخیر در حوزه‌ی برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات.

مرجع	نگهداری و تعمیرات		برنامه‌ریزی تولید	ملاحظات	بهینه‌سازی
	پیش‌گیرانه	اصلاحی		زیست‌محیطی	توام
آقزاف و همکاران[۱]	√		√		√
هونگ و همکاران[۲]			√	√	
بنجفر و همکاران[۳]				√	
هوئن و همکاران[۴]			√	√	
ابسی و همکاران[۵]			√	√	
با و همکاران[۶]	√	√		√	√
هنگویین و رسترپو[۷]	√		√	√	
دهان و همکاران[۸]	√		√		√
باتون و میلارت[۹]	√	√	√		
حدیدی و همکاران[۱۰]	√		√		
کلدانی و همکاران[۱۱]	√	√			
نورالفتح و همکاران[۱۲]	√		√		
کادر و همکاران[۱۳]	√	√	√	√	√
هنکوئین و همکاران[۱۴]	√		√	√	√
اکین[۱۵]	√	√	√		√
دلگی و همکاران[۱۶]	√	√	√		√
چیو و همکاران[۱۷]	√	√			√
لیو و همکاران[۱۸]	√	√	√		√
این تحقیق	√	√	√	√	√

۱.۳. مفروضات

- تولیدکننده برای پاسخگویی به نیاز مشتری، چند محصول تولید می‌کند که از قوانین انتشارکربن تبعیت می‌کند.
- موجودی اول و انتهای دوره صفر در نظرگرفته شده است.
- مقدار انتشارات تولید شده در راهبرد عادی از راهبرد سبز بیشتر است.
- هزینه‌ی تولید راهبرد سبز از تولید راهبرد عادی بیشتر است.
- کمبود مجاز نیست.
- مدت زمان انجام فعالیت‌ها ناچیز در نظرگرفته شده و فقط از بعد هزینه به این مسئله پرداخته شده است.
- افق زمانی به H عدد Tpr (دوره‌ی تولید) تقسیم شده است. همچنین به Nb قسمت مساوی تقسیم شده است که نشان‌گر زمان انجام فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[۸] است؛ بهترین زمان انجام فعالیت PM ضرایبی از Tpr است.
- سیاست نگهداری و تعمیرات دوره‌ی زمانی ثابت است.

۲.۳. پارامترها

T: افق زمانی برنامه‌ریزی برابر با $H \times T_{pr}$؛

H: تعداد دوره‌های تولید؛

Tpr: دوره‌ی ثابت برنامه‌ریزی تولید؛

Tpm: دوره‌ی ثابت انجام فعالیت PM؛

D_{nt}: تقاضای محصول n در دوره‌ی t؛

S_t: هزینه‌ی ثابت تولید در دوره‌ی t؛

PR_{nt}: هزینه‌ی متغیر تولید محصول n با راهبرد عادی در دوره‌ی t؛

PG_{nt}: هزینه‌ی متغیر تولید محصول n با راهبرد سبز در دوره‌ی t؛

ER_n: میزان انتشارات تولید شده حین تولید محصول n با راهبرد عادی؛

EG_n: میزان انتشارات تولید شده حین تولید محصول n با راهبرد سبز؛

μ: بیشینه‌ی مجاز انتشارکربن؛

H_{nt}: هزینه‌ی نگهداری محصول n در انبار در دوره‌ی t؛

x_{max}: مقدارکل بیشینه‌ی قابل تولید در هر دوره؛

$\lambda_n(t)$: نرخ خرابی سیستم هنگام تولید بیشینه‌ی دارای تابع توزیع وایبل با استفاده از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است.

$$\lambda_n(t) = \frac{\alpha}{\beta} \times \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \qquad (۱)$$

که در آن α و β بیان‌گر شکل و مقیاس تابع توزیع وایبل است.

۳.۳. متغیرهای تصمیم

xr_{nt}: تعداد محصولات n که با فنّاوری r تولید می‌شوند.

xg_{nt}: تعداد محصولات nام که با فناوری g تولید می‌شوند.

$\delta(x_{nt})$: وقتی $x_{nt} > 0$ باشد عدد یک، در غیر این صورت صفر.

$\delta(PM_t)$: اگر در دوره‌ی t تعمیرات پیش‌گیرانه داشته باشیم یک، در غیر این‌صورت صفر.

IN_{nt}: موجودی محصول n در دوره‌ی t؛

$$\varphi(xt_{nt}, Nb) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{j=0}^{Nb-1} \left\{ \begin{array}{l} (\mathrm{int}(j+1) \times \frac{T_{pm}}{T}) \\ -\mathrm{int}(j \times \frac{T_{pm}}{T}) \times T \times \lambda_0(t_0) + \\ \sum_{i=\mathrm{int}(j \times \frac{T_{pm}}{T})+1}^{\mathrm{int}((j+1) \times \frac{T_{pm}}{T})} \int_0^T \sum_{l=1}^{i-1} \frac{xt_l}{xt_{\max}} \times \lambda_n(T) dt + \\ \sum_{\mathrm{int}(j \times \frac{T_{pm}}{T})+1}^{\mathrm{int}((j+1) \times \frac{T_{pm}}{T})} \int_0^T \frac{xt_i}{xt_{\max}} \times \lambda_n(t) dt + \\ \int_0^{((j+1) \times T_{pm} - \mathrm{int}((j+1) \times \frac{T_{pm}}{T}) \times T)} \left(\sum_{l=1}^{\mathrm{int}((j+1) \times \frac{T_{pm}}{T})} \frac{xt_l}{xt_{\max}} \times \lambda_n(T) \right) dt + \\ \int_0^{((j+1) \times T_{pm} - (\mathrm{int}((j-1) \times \frac{T_{pm}}{T})+1) times T)} \left(\frac{xt}{xt_{\max}} \times \lambda_n(t) dt \right) + \\ \frac{xt}{xt_{\max}} \times \int_{\mathrm{int}((j+1) \times \frac{T_{pm}}{T}) \times T}^{(j+1) \times T_{pm}} \lambda_n(t) dt \end{array} \right. \quad (۲)$$

PM_t: هزینه‌ی انجام تعمیرات پیشگیرانه؛

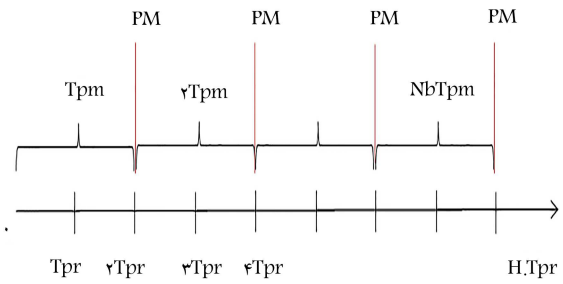
CM_t: هزینه‌ی انجام تعمیرات اصلاحی؛

Nb: تعداد بهینه‌ی نت پیش‌گیرانه؛

$\varphi(x_{nt}, Nb)$: متوسط کمینه‌ی تعداد تعمیراتی که در یک افق زمانی اتفاق می‌افتد با در نظرگرفتن متغیر بودن نرخ تولید در هر دوره است، این مقدار به دو عامل نرخ تولید در هر دوره و میزان بهینه‌ی نت پیشگیرانه وابسته است، نحوه‌ی محاسبه آن در رابطه‌ی ۲ نشان داده شده است.

در خصوص فرمول ارائه شده، ذکر این نکته الزامی است که فرض بر این است در افق زمانی برنامه‌ریزی، T دوره‌ی تولید است، هر T_{pm} دوره‌ی انجام PM است (در واقع T_{pm} مضرب ثابت از واحد تولید است)، Nb تعداد کل PMها در افق زمانی است. j شمارنده PM در هر دوره است. (t بیانگر زمانی است که در آن محاسبه انجام می‌گیرد).

سیاست در نظر گرفته شده برای نگهداری و تعمیرات در این تحقیق، با در نظرگرفتن بازه‌های مشخص برای انجام فعالیت PM، به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات می‌پردازد. همچنین راهبرد مورد استفاده راهبرد بلوکی است، که در آن در بازه‌های مشخص و ثابت فعالیت PM انجام می‌گیرد. پس از انجام فعالیت PM سیستم به حالت نو می‌رسد. در این تحقیق تعداد بهینه‌ی نت پیش‌گیرانه نیز قابل محاسبه است. شکل ۲ نشان‌گر تقسیم‌بندی توصیف شده است. در این شکل مثلاً بازه‌های زمانی تولید عدد ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. تشریح بازه‌های تولید و نگهداری و تعمیرات.

۴.۳. مدل ریاضی

مدل مسئله با توجه به بررسی‌های انجام شده و شناسایی خلأ تحقیقاتی در حوزه‌ی برنامه‌ریزی یکپارچه‌ی تولید و نگهداری و تعمیرات، همچنین به‌کارگیری ملاحظات مربوط به محدودیت انتشارات کربن نوشته شده است. در این مدل هزینه‌های راه‌اندازی خط تولید به صورت ثابت و به‌ازای تولید هر محصول، نگهداری محصول در انبار و همچنین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری به‌عنوان تابع هدف مسئله لحاظ شده است و محدودیت‌های موجود در فضای تولید، به‌عنوان محدودیت‌های مسئله آورده شده است.

$$Minimize \sum_{n=1}^{N} \sum_{t=T}^{H \times T} \left[\begin{array}{l} S_t.\delta(x_t) + PR_{nt}.xr_{nt} \\ +PG_{nt}.xg_{nt} + H_{nt}IN_{nt} \\ +PM_t.\delta(PM_t) \\ +CM.\varphi(x_{nt}, Nb) \end{array} \right] \quad (۳)$$

$$IN_{nt} + d_{nt} = IN_{n(t-1)} + xt_{nt} \quad ; t = T, ..., T \times H \;\; n = 1, ..., N \quad (۴)$$

$$\sum_{t=T}^{H \times T} \sum_{n=1}^{N} Er.xr_{nt} + Eg.xg_{nt} \leq \mu \quad ; t = T, ..., T \times H \;\; n = 1, ..., N \quad (۵)$$

$$xg_{nt} = x_{nt} - xr_{nt} \quad ; t = T, ..., T \times H \;\; n = 1, ..., N \quad (۶)$$

$$Nb = \sum_{t=T}^{H \times T} \delta(PM_t) \quad ; t = T, ..., T \times H \;\; n = 1, ..., N \quad (۷)$$

$$x_{nt} \leq \delta(x_t) \times M \quad ; t = T, ..., T \times H \;\; n = 1, ..., N \quad (۸)$$

$$IN_0 = IN_T = 0 \quad (۹)$$

$$\delta(x_{nt}) \in \{0, 1\} \quad (۱۰)$$

$$\delta(PM_t) \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$x_{nt} \geq 0; t = T, ..., T \times H \ n = 1, ..., N \quad (12)$$

$$xg_{nt} \geq 0; t = T, ..., T \times H \ n = 1, ..., N \quad (13)$$

$$xr_{nt} \geq 0; t = T, ..., T \times H \ n = 1, ..., N \quad (14)$$

$$IN_{nt} \geq 0; t = T, ..., T \times H \ n = 1, ..., N \quad (15)$$

رابطه‌ی ۳، تابع هدف مسئله است که بخش اول آن به کمینه‌سازی هزینه‌ی تولید می‌پردازد، هزینه‌ی راه‌اندازی خط تولید معمولی با S_t نمایش داده شده است، همچنین بر اساس تعداد تولید شده هزینه‌ی تولید معمولی با PR_{nt} و هزینه‌ی تولید سبز با PG_{nt} نمایش داده می‌شود. استفاده از راهبرد سبز امکان بررسی و مقایسه‌ی حالت معمول برنامه‌ریزی تولید (استفاده از روش عادی تولید) با حالت در نظرگرفتن ملاحظات محیط زیستی را ایجاد می‌کند و در صورت لزوم مقایسه‌ی حالت عادی با ملاحظات زیست‌محیطی، می‌توان با بی‌نهایت در نظرگرفتن هزینه‌های تولید سبز PG_{nt} نتایج مدل را بررسی کرد. در ادامه تابع هزینه‌ی نگهداری موجودی هر دوره با ضرب میزان موجودی IN_{nt} در هزینه‌ی نگهداری هر واحد از موجودی H_{nt} محاسبه می‌شود؛ همچنین محاسبه‌ی میزان هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه و اصلاحی هر دو راهبرد (سبز و عادی) با ادامه‌ی معادله محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۴ بیان‌گر شرط تعادل دارایی است. رابطه‌ی ۵ بیان‌گر شرط رعایت محدودیت انتشارات در هر دوره است که یکی از وجوه تمایز این مقاله با پژوهش‌های انجام شده است. رابطه‌ی ۶ بیان‌گر امکان تولید ترکیبی از هر دو نوع راهبرد سبز و عادی است و همچنین نشان‌گر این مطلب که میزان تولید شده با استفاده از راهبرد عادی باید کمتر از یا مساوی با میزان کل تولید مورد نیاز باشد. رابطه‌ی ۷ نشان‌گر تعداد کل عملیات نگهداری و پیشگیرانه است. رابطه‌ی ۸ بیان‌گر این شرط است که در صورت عدم لحاظ کردن هزینه‌ی راه‌اندازی در سیستم امکان تحمیل هزینه‌ی تولید به‌ازای هر واحد وجود نداشته باشد. رابطه‌ی ۹ شرط صفر بودن موجودی در ابتدا و انتهای دوره است. رابطه‌ی ۱۰ بیان‌گر این است که در دوره‌ی t از محصول n تولید انجام خواهد شد یا خیر. همچنین رابطه‌ی ۱۱ بیان‌گر انجام شدن یا نشدن فعالیت PM در دوره‌ی t است. رابطه‌های ۱۲ الی ۱۵ بیان‌گر غیرمنفی بودن میزان تولید و موجودی است.

با حل مدل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مقدار بهینه‌ی تولید با هرکدام از راهبردهای پیشنهادی و دوره‌ی مناسب انجام فعالیت‌های PM مشخص می‌شود؛ در نهایت هزینه‌ی بهینه نیز محاسبه خواهد شد. سپس به بهینه‌سازی مسئله با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی میرایی ارتعاش خواهیم پرداخت.

۴. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

به منظور حل مدل ارائه شده در این تحقیق ابتدا از نرم‌افزار GAMS استفاده شد، ولی با توجه به پیچیدگی بالای مسئله، نرم‌افزار GAMS قادر به ارائه‌ی پاسخ مناسب در ابعاد بزرگ نبود؛ به همین دلیل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB در رایانه‌یی با Ram ۸ ، هارد ۵۰۰ و CPU Core i۷ مدل مسئله پیاده‌سازی شد، در نهایت با به‌کارگیری دو الگوریتم بهینه‌سازی معتبر ژنتیک و میرایی ارتعاش مدل حل شد. الگوریتم ژنتیک به دلیل شناخته شده بودن و کارا بودن آن و الگوریتم میرایی ارتعاش با توجه به جدید بودن و مقایسه میزان کارایی آن با الگوریتم ژنتیک انتخاب شد. برای راستی آزمایی پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی به مقایسه‌ی جواب‌های ارائه شده برای مسائل در ابعاد کوچک در نرم‌افزار GAMS با پاسخ‌های این الگوریتم‌ها پرداخته شد و در کوچک‌ترین بعد نیز خروجی‌های رضایت‌بخشی ارائه نداد که کاملاً وابسته به شدت غیرخطی بودن مسئله‌ی مورد مطالعه است. با توجه به این‌که در ابعاد دیگر جوابی توسط این نرم‌افزار حاصل نشد، شرایط مقایسه‌ی مطلوبی فراهم نشد و تحقیق بر مقایسه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی متمرکز شد.

در ادامه به شرح دو الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده پرداخته شده است.

۱.۴. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر میرایی ارتعاش

بسیاری از مسائل مهم در دینامیک را حرکت‌هایی تشکیل می‌دهند که پیرامون وضع یک ذره، یک جسم یا یک سیستم به وقوع می‌پیوندند. ذره، جسم یا سیستم به حرکتی وادار می‌شود که به آن حرکت ارتعاشی می‌گویند. تمام اجسامی که دارای جرم و خاصیت کشسانی هستند می‌توانند حرکت ارتعاشی داشته باشند. هر حرکت ارتعاشی تحت تأثیر یک نیروی درون سیستم یا نیروی محرکه ایجاد می‌شود. وقتی منبع انرژی یک نوسان‌گر قطع شود، بخشی از انرژی تلف می‌شود، دامنه‌ی نوسان رفته رفته کم می‌شود و بالاخره نوسان‌گر از نوسان باز می‌ماند. این فرایند را میرا کردن ارتعاش یا فرایند میرایی می‌گویند.

شناسایی عوامل میرایی در ارتعاش یک سیستم اهمیت ویژه‌یی دارد. در مواردی نیاز است اثر میرایی چنان زیاد شود که از ارتعاشات ویرانگر جلوگیری شود. از طرفی در بسیاری از موارد برای جلوگیری از میرا شدن نوسانات یک سیستم باید انرژی تلف شده به گونه‌یی جبران شود. در اغلب سیستم‌ها یک نیروی خارجی تناوبی اعمال می‌شود. در هر دوره این نیرو به گونه‌یی عمل می‌کند که دامنه‌ی نوسان مقداری ثابت بماند. به این حالت سیستم دارای نوسان واداشته گفته می‌شود. در حالتی که بسامد نیروی خارجی وارد بر سیستم با بسامد طبیعی و ذاتی آن مساوی شود، دامنه‌ی نوسان به بیشترین مقدار خود می‌رسد در این حالت با شرایطی مواجه می‌شویم که به آن تشدید گفته می‌شود.

مطالعه‌ی حرکت‌های ارتعاشی و پاسخ زمانی آن‌ها موضوعی بسیارگسترده در فیزیک و مهندسی محسوب می‌شود. هر چقدر دامنه‌ی نوسان بیشتر شود فراوانی پاسخ بیشتر می‌شود و هر چقدر دامنه‌ی نوسان کمتر شود فراوانی پاسخ کمتر خواهد بود. به‌عبارت دیگر در دامنه‌های نوسان بالا به دلیل بزرگ‌تر بودن دامنه، محدوده یا فضای بزرگ‌تری در اختیار است و احتمال رخ‌دادن پاسخ‌های جدیدتر زیادتر است و برعکس در دامنه‌های نوسان پایین احتمال رخ دادن یک پاسخ جدید کمتر خواهد بود. به‌نحوی که وقتی دامنه‌ی نوسان به صفر میل می‌کند، احتمال رخ دادن یک پاسخ جدید به صفر میل می‌کند و سیستم از حالت نوسان باز می‌ایستد.

در این الگوریتم با در نظرگرفتن بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسان و هر بار انتخاب پاسخ در تناوب زمانی مورد مطالعه، مقدار انرژی را محاسبه می‌کنیم و به‌صورت تصادفی یک پاسخ دیگر انتخاب می‌کنیم، آن‌گاه انرژی پاسخ‌های جدید و فعلی را محاسبه می‌کنیم، اگر تفاوت انرژی کوچک‌تر از یا مساوی با صفر بود، سیستم از سطح بالاتر انرژی به سطح پایین‌تر انرژی منتقل می‌شود و در نتیجه پاسخ جدید پذیرفته می‌شود، در غیر این‌صورت پاسخ جدید با توزیع احتمال ریلی پذیرفته و با ارتعاش واداشته، دامنه‌ی نوسان ثابت نگه داشته می‌شود تا جواب جدید دیگری تولید شود. در نهایت به شرط توقف مراجعه می‌شود. اگر ضابطه‌ی توقف برقرار نباشد از برنامه‌ی میرا کردن برای کاهش دامنه‌ی نوسان بهره گرفته می‌شود و مجدداً گام‌های مذکور در دامنه‌ی نوسان جدید که کمتر از دامنه‌ی نوسان قبلی است تکرار می‌شوند.[۱۹]

الگوریتم بهینه سازی میرایی ارتعاش (VDO)[۹] یکی از الگوریتم‌های فرابتکاری

است که با استفاده از مفاهیم میرایی نوسان در نظریه‌ی ارتعاشات توسط مهدی‌زاده و توکلی‌مقدم ارائه شده است.[۲۰] جزئیات پیاده‌سازی این الگوریتم برای مدل پیشنهادی در ادامه تشریح می‌شود.

در علم ارتعاش، مفهوم ارتعاش می‌تواند به‌عنوان نوسان در نظرگرفته شود. اگر میرایی کوچک باشد، آنگاه تأثیر بسیار کمی بر روی بسامد طبیعی سیستم خواهد داشت و از این‌رو محاسبات برای بسامدهای طبیعی تقریباً برمبنای عدم وجود میرایی ساخته می‌شود. الگوریتم VDO در نوسانات بزرگ، دارای دامنه‌ی حل بزرگ است و احتمال به دست آمدن حل جدید بسیار زیاد است. بنابراین هنگامی که نوسانات کاهش می‌یابد، احتمال به دست آوردن حل جدید کاهش می‌یابد.[۱۹]

۱.۱.۴. پارامترهای الگوریتم

A_0: دامنه‌ی اولیه ارتعاشات (مقادیر بالاکاهش سرعت همگرایی ولی امکان جستجوی بیشتر)؛

t: شمارنده‌ی تعداد دفعات کاهش دامنه؛

γ: ضریب میرایی (کاهش دامنه‌ی نوسان)؛

L: تعداد تکرار حلقه‌ی واداشته (پارامترکنترل زمان دست‌یابی به جواب نهایی)؛

Q: دو برابر عکس ضریب میرایی؛

σ: پارامتر توزیع ریلی.

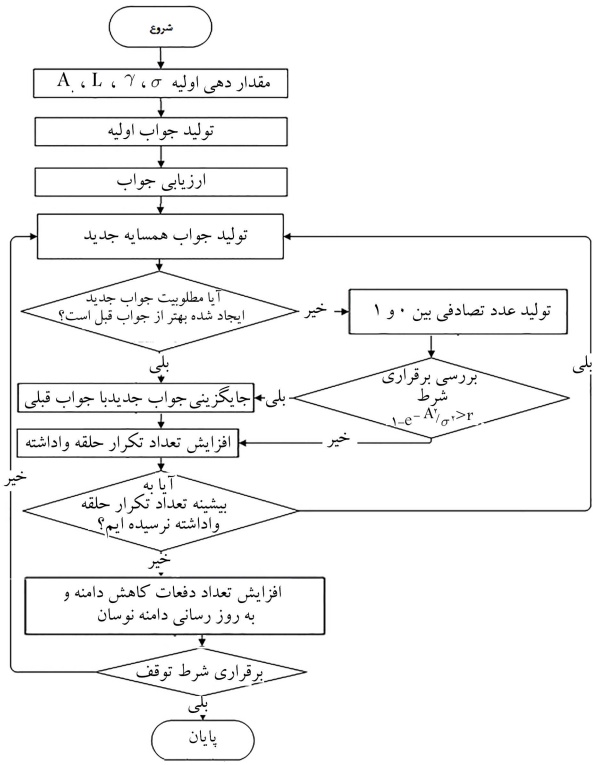
ضریب میرایی، سرعت کاهش دامنه‌ی نوسان را بر عهده دارد، هر چه ضریب میرایی بزرگ‌تر در نظرگرفته شود، سرعت کاهش دامنه پایین‌تر خواهد بود و بر عکس هرچه مقدار آن کوچک‌تر در نظر گرفته شود، سرعت کاهش دامنه‌ی نوسان بالاتر خواهد بود. تعداد تکرار حلقه‌ی واداشته به درصد موفقیت بستگی دارد و از ارتعاش واداشته تبعیت می‌کند. بالا بودن تعداد تکرار حلقه باعث می‌شود که در دامنه‌یی مشخص تعداد جستجوها بالا باشد. تعداد تکرار الگوریتم ارتباط مستقیم با زمان الگوریتم دارد، هر چه تعداد حلقه‌ی داخلی بیشتر باشد، زمان الگوریتم نیز بالا می‌رود. در برخی موارد، ممکن است بالا بودن آن بهبودی در کیفیت جواب ایجاد نکند. معیار توقف در این الگوریتم نقش مهمی را دارد، به صفر رسیدن دامنه‌ی نوسان یک معیار توقف است و مواردی مانند رسیدن تعداد تکرار حلقه به یک اندازه‌ی مشخص می‌تواند جزء معیارهای توقف باشد. در مقایسه‌ی بین مسئله‌ی بهینه‌سازی و فرایند میرایی نوسان، انرژی حالات با مقدار تابع هدف محاسبه شده متناظر است.

کمترین انرژی حالت متناظر با مقدار بهینه‌ی مسئله است و میرایی سریع می‌تواند بیان‌گر یک بهینه‌ی محلی باشد. شکل ۳ گام‌های الگوریتم میرایی ارتعاش را به‌صورت شفاف بیان می‌کند.[۲۱]

۲.۱.۴. سازوکار جستجوی همسایگی

برای حرکت در فضای جواب و استخراج و اکتشاف جواب‌های بهتر، به طراحی عملگرهای مناسب نیاز است. یک عملگر با تغییر جواب جاری منجر به تولید یک جواب همسایه می‌شود.

نحوه‌ی عملکرد عملگر و درجه‌ی انعطاف‌پذیری آن به ساختار جواب بستگی دارد. ساختار ماتریسی موجب سهولت در اجرای عملگرها می‌شود و موجب انعطاف‌پذیری بالا در طراحی عملگرهای متنوع می‌شود. یکی از عملگرهای کارا در این زمینه عملگر جهش است که دارای اقسام مختلف است. عملگر جهش در ساده‌ترین شکل خود مقدار یک عنصر را تغییر می‌دهد یا مقدار دو عنصر را با یکدیگر تعویض می‌کند.[۲۱]



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم میرایی ارتعاش.

۲.۴. الگوریتم ژنتیک

با توجه به وسعت محدوده‌ی کاری الگوریتم ژنتیک، روزانه با پیشرفت علوم و فنّاوری استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل رده‌سخت بسیار گسترش می‌یابد. الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های محاسبات تکامل یافته و از جمله روش‌های حل فراابتکاری است. این الگوریتم رابطه‌ی مستقیمی با مباحث هوش مصنوعی نیز دارد. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی کلی است که از قوانین تکامل زیستی طبیعی تقلید می‌کند. این الگوریتم به جستجوی جواب‌های بهتر در بین یک سری از جواب‌های مسئله می‌پردازد. در هر نسل ایجاد شده به کمک فرایند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که با استفاده از ژنتیک طبیعی ایجاد شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید. این فرایند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشد.[۲۲]

این الگوریتم اولین بار توسط ریچنبرگ[۱۰][۲۳] در تحقیقی با عنوان راهبرد تکاملی ارائه شد.

روند کلی این الگوریتم به‌صورت زیر است:

گام ۱. تولید تصادفی یک جمعیت که شامل تعداد زیادی کروموزم (روش‌های حل مسئله) است.

گام ۲. ارزیابی صحت برای تابع $f(x)$ به‌ازای هر کروموزوم x در جمعیت.

گام ۳. تولید یک جمعیت جدید با انجام تمام موارد زیر تا زمانی که یک جمعیت جدید ایجاد شود.

گام ۴. کروموزوم‌های پدر و مادر از جمعیت قبلی باتوجه به صحت و درستی آن انتخاب شود.

گام ۵. انجام زاد و ولد و ایجاد یک نسل جدید.

گام ۶. مشخص شدن مکان فرزند تولید شده در کروموزوم.

گام ۷. جا دادن فرزند جدید در داخل جمعیت.

گام ۸. جایگزینی جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی و مورد استفاده قرار دادن جمعیت جدید در مراحل بعدی الگوریتم.

گام ۹. اگر شرایط مطلوب در حل مسئله ارضا شد، اعلام می‌شود که بهترین جواب حاصل شده است و از الگوریتم خارج می‌شویم، در غیر این‌صورت روند ذکر شده از مرحله‌ی دوم تکرار می‌شود.[۲۴]

به‌طورکلی، الگوریتم ژنتیک از کروموزوم، عملگر، عملگر انتخاب تشکیل می‌شود.

۱.۲.۴. کروموزوم

در الگوریتم ژنتیک، هر کروموزوم نشان‌دهنده‌ی یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسئله‌ی موردنظر است. کروموزوم‌ها (راه‌حل‌ها) از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می‌شوند و برای نمایش کروموزوم‌ها، معمولاً از کدگذاری‌های دودویی (رشته‌های بیتی) استفاده می‌شود.

مهم‌ترین بخش در الگوریتم ژنتیک مربوط به نمایش کروموزوم‌هاست که به آن رمزگذاری مسئله گفته می‌شود. این فعالیت خود به دو دسته‌ی رمزگذاری و رمزگشایی تقسیم می‌شود. در این مسئله به‌منظور کدینگ مسئله و نمایش کروموزوم‌های مسئله برای متغیرهای دودیی مسئله به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ استفاده شده است.

$$\delta(x_{nt}) \in \{0, 1\} \qquad (16)$$

متغیر $\delta(x_{nt})$، نشان‌دهنده‌ی این است که در دوره‌ی t از محصول n تولید داریم یا خیر، باتوجه به موارد ذکر شده، مقادیر تولید شده تصادفی به گونه‌یی ایجاد شده که در هر سطر از ماتریس فقط یک مقدار یک وجود داشته باشد، تا از این طریق بتوان بر محدودیت‌های موجود فائق آمد.

در ادامه به نمایش یک نمونه از متغیرهای پیوسته مسئله در ساختار کروموزوم خواهیم پرداخت. برای نمونه، متغیر x_{nt} در نظرگرفته شده است. متغیرهای پیوسته‌ی مسئله به‌طورکلی دارای ساختاری شامل اعداد تصادفی در بازه‌یی مشخص‌اند. در شکل ۴ نمونه‌یی از ساختار کروموزوم‌های پیوسته‌ی مسئله نشان داده شده است.

به همین ترتیب می‌توان دیگر متغیرهای پیوسته‌ی مسئله‌ی بهینه‌سازی یکپارچه تصمیمات برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات با انتخاب راهبرد تولید سبز را در کروموزم‌های مسئله به نمایش درآورد. در انتها، مجموعه‌یی از کروموزوم‌ها یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. با تأثیر عملگرهای ژنتیکی بر روی هر جمعیت، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم جدید تشکیل می‌شود.

به‌منظور حل هر مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابتدا باید یک تابع برازندگی برای آن مسئله ابداع شود. برای هر کروموزوم، این تابع عددی غیرمنفی را برمی‌گرداند که نشان‌دهنده‌ی شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{112} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{101} & \cdots & X_{1012} \end{bmatrix}$$

شکل ۴. ساختار نحوه‌ی نمایش مسئله.

۲.۲.۴. عملگرهای الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که در ابتدا گفته شد در الگوریتم ژنتیک، در طی مرحله‌ی تولید مثل ازعملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود. با تأثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب، آمیزش و جهش معمولاً بیشترین کاربرد را در الگوریتم ژنتیک دارند.

۳.۲.۴. عملگر انتخاب

این عملگر از بین کروموزوم‌های موجود در یک جمعیت، تعدادی کروموزوم را برای تولید مثل انتخاب می‌کند. کروموزوم‌های برازنده‌تر شانس بیشتری دارند تا برای تولید مثل انتخاب شوند. انتخاب به روش‌های انتخاب نخبگان، چرخ رولت و تورنومنت قابل اجراست.

۴.۲.۴. نمونه‌برداری به روش چرخ رولت

در این روش، به هر فرد قطعه‌یی از یک چرخ رولت مدور اختصاص داده می‌شود. اندازه‌ی این قطعه متناسب با برازندگی آن فرد است. چرخ N بار چرخانده می‌شود که این تعداد برابر با تعداد افراد در جمعیت است. در هر چرخش، فرد زیر نشان‌گر چرخ، انتخاب می‌شود و در مخزن والدین نسل بعد قرار می‌گیرد. در این روش نرخ انتظارات افراد جمعیت تجمیع شده و T نامیده می‌شود. یک عدد تصادفی بین صفر تا T انتخاب شده و r نامیده می‌شود. با جمع نرخ شایستگی افراد جامعه، برگزیدگی افراد نسبت به هم مشخص می‌شود. بدین‌صورت که هرکه نرخ شایستگی آن بیشتر از r شود، فرد برگزیده‌یی است. در نهایت این کار N بار تکرار می‌شود. در مسئله‌ی مورد بررسی، از این روش برای انتخاب استفاده شده است.

۵.۲.۴. انتخاب تورنومنت

یک زیرمجموعه از صفات یک جامعه انتخاب می‌شوند و اعضای آن مجموعه با هم رقابت می‌کنند و سرانجام فقط یک صفت از هر زیرگروه برای تولید انتخاب می‌شوند.[۲۵]

۶.۲.۴. عملگر آمیزش

در جریان عمل تلفیق به‌صورت اتفاقی بخش‌هایی از کروموزوم‌ها با یکدیگر تعویض می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که فرزندان ترکیبی از خصوصیات والدین خود را به همراه داشته باشند و دقیقاً مشابه یکی از والدین نباشند.

هدف تولید فرزند جدید است، به این امید که خصوصیات خوب دو فرد در فرزندشان جمع شده و یک فرد بهتر را تولید کند. از انواع روش‌های تلفیق می‌توان به تلفیق تک‌نقطه‌یی، دونقطه‌یی، چندنقطه‌یی، جامع، حسابی و ماسک اشاره کرد.

۷.۲.۴. تلفیق حسابی

تلفیق حسابی به این گونه است که اگر A و B دو عضو از جمعیت فعلی باشند که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند، از آن‌ها دو فرزند a و b به‌صورت زیر به وجود می‌آید:

$$a = \delta A + (1 - \delta)B \qquad (17)$$

$$b = \delta B + (1 - \delta)A \qquad (18)$$

پارامتر δ مقداری در بازه‌ی $[0, 1]$ است که در هر ترکیب می‌تواند مقدار مختلفی داشته باشد. در این مسئله نیز از این روش برای متغیرهای پیوسته استفاده شده است. در این مقاله از تلفیق حسابی استفاده می‌شود.

۸.۲.۴. عملگر جهش

پس از اتمام عمل‌آمیزش، عملگر جهش بر روی کروموزوم‌ها اثر داده می‌شود. این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند و سپس محتوای آن ژن را تغییر می‌دهد. اگر ژن از جنس اعداد دودویی باشد، آن را به وارونش تبدیل

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و میرایی ارتعاشات بر روی ۲۰ مسئله‌ی آزمایشی.

ابعاد مسئله	شماره‌ی مسئله	تعداد محصول	مدت زمان بازه‌ی تولید در هر دوره	تعداد دوره‌های تولید در افق برنامه‌ریزی	هزینه‌ی کل		زمان محاسباتی	
		N	Tpr	H	GA	VDO	GA	VDO
کوچک	۱	۱	۲	۳	۹۹۴,۳۵۶	۵۰۱,۷۱۹	۲۷٫۳۸	۲۵٫۲۱
	۲	۲	۳	۲	۳,۳۹۰,۷۶۸	۴,۵۳۹,۸۲۲	۲۹٫۴۶	۲۴٫۷۹
	۳	۳	۲	۳	۴,۰۵۲,۹۷۰	۵,۵۶۱,۵۰۲	۳۰٫۸۲	۲۷٫۵۶
	۴	۵	۳	۳	۱۰,۰۱۵,۲۸۱	۱۶,۶۶۹,۱۶۴	۳۵٫۲۹	۲۸٫۱۸
	۵	۷	۲	۴	۸,۳۵۷,۲۸۳	۱۵,۸۴۹,۶۶۰	۳۷٫۸۵	۳۱٫۳۶
	۶	۹	۲	۵	۷,۸۵۹,۰۱۱	۲۸,۱۸۳,۳۵۸	۳۴٫۲۰	۳۰٫۸۵
	۷	۱۰	۳	۵	۱۷,۶۹۸,۸۵۱	۴۶,۱۳۷,۸۸۰	۳۴٫۱۹	۳۴٫۳۰
متوسط	۸	۱۵	۳	۵	۳۵,۲۱۱,۳۴۶	۵۶,۷۳۳,۵۴۴	۵۶٫۸۵	۳۳٫۹۵
	۹	۲۰	۴	۵	۵۰,۷۷۳,۶۷۸	۱۲۹,۵۸۵,۰۹۰	۳۳٫۶۸	۳۴٫۲۲
	۱۰	۲۵	۴	۶	۶۵,۹۵۶,۸۹۲	۵۳,۱۰۸,۴۸۲	۳۲٫۵۰	۳۳٫۸۲
	۱۱	۳۵	۵	۷	۱۰۳,۳۶۵,۱۴۵	۲۵۹,۱۷۴,۵۵۲	۳۴٫۷۸	۴۲٫۶۱
	۱۲	۴۵	۵	۸	۴۰۴,۳۰۷,۱۸۹	۳۹۲,۶۰۱,۱۰۲	۳۷٫۳۱	۴۲٫۹۴
	۱۳	۵۰	۵	۹	۶۴۸,۴۷۱,۳۷۴	۹۲۹,۴۸۶,۷۰۲	۳۶٫۳۸	۴۰٫۷۴
بزرگ	۱۴	۱۰۰	۶	۱۰	۱,۰۰۵,۴۵۹,۶۷۷	۴,۹۲۶,۳۲۷,۸۶۱	۴۴٫۱۷	۴۶٫۰۴
	۱۵	۱۵۰	۶	۱۲	۶۴۵,۹۰۶,۴۹۸	۳۳۸,۵۸۳,۷۳۳	۳۹٫۵۸	۴۱٫۱۴
	۱۶	۲۰۰	۷	۱۲	۶۹۷,۳۰۷,۸۶۰	۱۵,۲۲۶,۱۱۹,۶۵۹	۴۲٫۴۲	۴۸٫۹۲
	۱۷	۲۳۰	۸	۱۵	۲۳,۳۳۰,۳۴۸,۰۹۵	۲۱,۶۵۵,۸۱۱,۴۷۴	۴۴٫۲۹	۴۸٫۶۶
	۱۸	۲۵۰	۹	۱۵	۵۳,۶۳۳,۰۹۳,۴۷۴	۴۸,۴۵۲,۵۷۵,۹۰۶	۴۵٫۲۳	۴۴٫۹۷
	۱۹	۲۷۰	۱۰	۱۸	۹۸,۰۲۷,۹۴۰,۵۰۸	۱۹۷,۲۳۶,۴۸۰,۱۱۳	۴۵٫۳۸	۷۵٫۷۶
	۲۰	۳۰۰	۱۲	۱۸	۲۶۱,۷۸۲,۷۹۳,۲۷۳	۴۷۶,۲۳۷,۳۰۶,۰۱۶	۵۰٫۳۵	۷۰٫۸۱

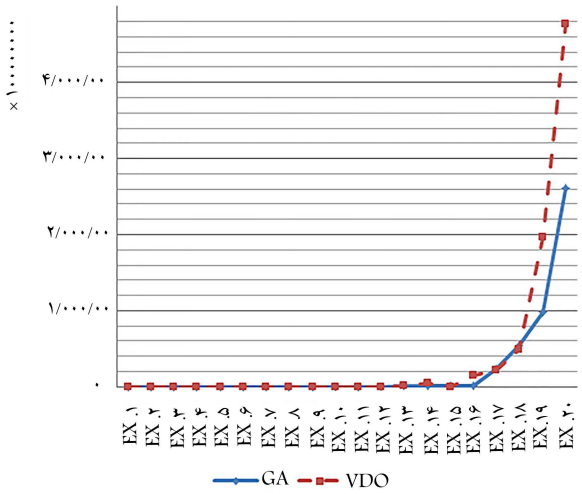
می‌کند و چنانچه متعلق به یک مجموعه باشد، مقدار یا عنصر دیگری از آن مجموعه را به جای آن ژن قرار می‌دهد.

از روش‌های جهش می‌توان روش‌های جانشینی، بیتی، یکنواخت و روش‌های ابتکاری دیگر نام برد. پس از اتمام عمل جهش، کروموزوم‌های تولید شده به‌عنوان نسل جدید در نظرگرفته می‌شوند و برای دور بعد اجرای الگوریتم ارسال می‌شوند.[۲۶] در این مسئله از الگوریتم ژنتیک بهره برده‌ایم و در ادامه به تحلیل نتایج به دست آمده از این روش خواهیم پرداخت.

۵. نتایج

مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب حل شده است و ابتدا برنامه‌ریزی تولید برای دوره‌های مختلف به‌دست خواهد آمد و سپس با توجه به مقادیر تولید و نرخ تولید در هر دوره میزان نرخ خرابی پیش‌بینی می‌شود، در نهایت به کمینه کردن هزینه‌ی کلی تولید پرداخته می‌شود.

برای حل مسئله‌ی پیشنهادی از دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و میرایی ارتعاشات استفاده شده است و جواب‌های به دست آمده توسط هر دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از ۲۰ مسئله با اندازه‌های مختلف مشخص شد، جدول ۲ مسائل تولید شده و نتایج را نشان می‌دهد؛ همان‌طورکه در این جدول آمده است در برخی نقاط الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش جواب‌های بهتر و در برخی الگوریتم ژنتیک پاسخ بهتری ارائه می‌دهد و از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند؛ اما از لحاظ مدت زمان پاسخگویی می‌توان گفت در مسائل کوچک سرعت الگوریتم ژنتیک بالاتر از الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش است، در مقابل در مسائل متوسط و بزرگ سرعت پاسخگویی الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش بالاتر است.



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تابع هدف دو الگوریتم ژنتیک و چندهدفه‌ی میرایی ارتعاشات.

۱.۵. مسائل آزمایشی

پس از پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار متلب و حل بهینه‌ی آن توسط الگوریتم‌های ژنتیک و میرایی ارتعاشات، مدل نشان داد که به‌صورت هوشمندانه ترجیح و اولویت به انتخاب استفاده از فنّاوری سبز را دارد و این مورد نشان‌گر این است که استفاده از سیاست محدودیت انتشار می‌تواند از ورود میزان آلودگی به محیط زیست جلوگیری کند در حالی که می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید نیز کمک کند.

برای نمونه مسئله‌یی با تعداد محصول ۳، بازه‌ی زمانی تولید ۲ و تعداد بازه‌های زمانی تولید ۳ را پیاده‌سازی کرده‌ایم و به تحلیل جواب‌ها می‌پردازیم. پس از اجرا کردن الگوریتم ژنتیک نتایج در روابط ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده است.

برای نمونه دو مسئله با ابعاد مختلف شامل تعداد محصول ۳، بازه‌ی زمانی تولید ۲ و تعداد بازه‌های زمانی تولید ۳ و تعداد محصول ۹، بازه‌ی زمانی تولید ۲ و تعداد بازه‌های زمانی تولید ۵ را پیاده‌سازی کرده‌ایم و به تحلیل جواب‌ها می‌پردازیم.

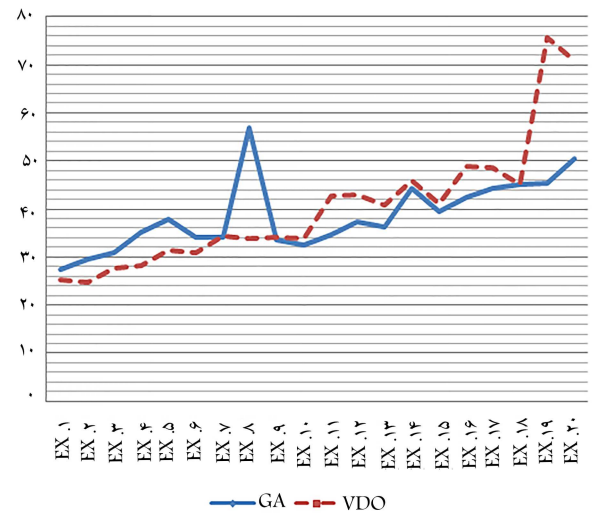
۲.۵. تحلیل نتایج

با مقایسه‌ی جواب‌های حاصل توسط هر دو الگوریتم از بعد هزینه‌ی کل و زمان محاسباتی، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو الگوریتم از نظر این دو بعد در برخی مسائل می‌توانند جواب بهتری را ارائه دهند و هیچ‌کدام برتری بر دیگری ندارد.

شکل ۵ بیان‌گر مقایسه‌ی نتایج حاصل از تابع هدف با استفاده از دو الگوریتم است.

همچنین با بررسی زمان اجرای دو الگوریتم مشخص شد که در مسائل کوچک الگوریتم میرایی ارتعاش سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند، اما در مسائل اندازه‌ی متوسط به بالا الگوریتم ژنتیک سرعت بالاتری دارد. در شکل ۶ مدت زمان اجرای دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده است.

پس از اجرا کردن الگوریتم ژنتیک نتایج به‌صورت رابطه‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده است. همان‌طورکه نشان داده شده است، در بیشتر دریه‌ها اولویت انتخاب با استفاده از فنّاوری سبز است.



شکل ۶. مقایسه‌ی مدت زمان اجرای دو الگوریتم ژنتیک و چندهدفه‌ی میرایی ارتعاشات.

رابطه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ پاسخ‌های ارائه‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی جواب‌های ارائه شده ترجیح الگوریتم بر استفاده از راهبرد تولید سبز، قابل توجه است.

$$Xnt = \begin{bmatrix} ۸ & ۰ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۶۷ \\ ۱۲ & ۰ & ۹ & ۰ & ۰ & ۷۰ \\ ۷ & ۰ & ۱۴ & ۰ & ۰ & ۳۸ \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

$$XRnt = \begin{bmatrix} ۰ & ۰ & ۸ & ۰ & ۰ & ۳۶ \\ ۰ & ۰ & ۲ & ۰ & ۰ & ۴۰ \\ ۵ & ۰ & ۱۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

$$XGnt = \begin{bmatrix} ۸ & ۰ & ۸ & ۰ & ۰ & ۳۱ \\ ۱۲ & ۰ & ۷ & ۰ & ۰ & ۳۰ \\ ۲ & ۰ & ۴ & ۰ & ۰ & ۱۸ \end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

$$Xnt = \begin{bmatrix} ۰ & ۳۵ & ۳۳ & ۰ & ۰ & ۱۹ \\ ۰ & ۴۰ & ۳۷ & ۰ & ۰ & ۵۲ \\ ۰ & ۵۱ & ۳۵ & ۰ & ۰ & ۴۱ \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

$$XGnt = \begin{bmatrix} ۰ & ۲۴ & ۱۳ & ۰ & ۰ & ۹ \\ ۰ & ۱۹ & ۲۴ & ۰ & ۰ & ۴۴ \\ ۰ & ۳۴ & ۳۰ & ۰ & ۰ & ۲۵ \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

$$XRnt = \begin{bmatrix} ۰ & ۱۱ & ۲۰ & ۰ & ۰ & ۱۰ \\ ۰ & ۲۱ & ۱۴ & ۰ & ۰ & ۸ \\ ۰ & ۱۷ & ۵ & ۰ & ۰ & ۱۵ \end{bmatrix} \quad (۲۴)$$

به‌منظور اطمینان از نتیجه‌ی حاصل شده، خروجی یک مسئله‌ی دیگر با ابعاد ۹ در ۱۰ بررسی شده است، تعداد تنوع محصول در این مسئله برابر ۹، مدت دوره‌ی تولید ۲ و تعداد دوره‌های تولید ۵ است.

پس از اجرای الگوریتم‌ها در این ابعاد رابطه‌های ۲۵ الی ۲۷ نشان‌گر نتایج الگوریتم ژنتیک است و رابطه‌های ۲۸ الی ۳۰ نتایج الگوریتم بهینه‌سازی را

نشان می‌دهد؛ همان‌طور که از پاسخ‌های ارائه شده مشخص است، در هر دو الگوریتم ترجیح استفاده از راهبرد سبز بیشتر است که بیانگر این موضوع است که پیشنهاد استفاده از راهبرد سبز که در این مقاله ارائه شده است، مؤثر می‌باشد.

$$Xnt = \begin{bmatrix} ۱۵ & ۵۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۷ & ۰ & ۳۰ & ۳۷ \\ ۱۹ & ۳۴ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۹ & ۰ & ۱۱ & ۱۴ \\ ۳۸ & ۱۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۹ & ۰ & ۱۶ & ۱۴ \\ ۲۴ & ۲۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۴ & ۰ & ۳۹ & ۴۳ \\ ۱۵ & ۲۴ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ & ۰ & ۲۷ & ۴۱ \\ ۳۴ & ۴۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۷ & ۰ & ۲۰ & ۲۶ \\ ۲۹ & ۱۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴۰ & ۰ & ۱۵ & ۵۱ \\ ۴۰ & ۱۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۵۲ & ۰ & ۲۸ & ۳۵ \\ ۳۸ & ۲۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۷ & ۰ & ۲۳ & ۲۵ \end{bmatrix} \quad (۲۵)$$

$$XGnt = \begin{bmatrix} ۸ & ۱۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۷ & ۰ & ۲ & ۲۹ \\ ۱۰ & ۳۲ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۸ & ۰ & ۱ & ۷ \\ ۷ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۸ & ۰ & ۱۱ & ۱۱ \\ ۱۳ & ۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۰ & ۰ & ۲۲ & ۱۸ \\ ۴ & ۱۳ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲ & ۰ & ۵ & ۹ \\ ۲۰ & ۲۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۹ & ۰ & ۳ & ۹ \\ ۲۵ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۴ & ۰ & ۱۲ & ۴۸ \\ ۲۵ & ۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۹ & ۰ & ۱۸ & ۱۱ \\ ۱۸ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۷ & ۰ & ۱۰ & ۸ \end{bmatrix} \quad (۲۶)$$

$$XRnt = \begin{bmatrix} ۷ & ۳۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ & ۰ & ۲۸ & ۸ \\ ۹ & ۲ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱ & ۰ & ۱۰ & ۷ \\ ۳۱ & ۴ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۱ & ۰ & ۵ & ۳ \\ ۱۱ & ۲۳ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴ & ۰ & ۱۷ & ۲۵ \\ ۱۱ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۸ & ۰ & ۲۲ & ۳۲ \\ ۱۴ & ۱۶ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۸ & ۰ & ۱۷ & ۱۷ \\ ۴ & ۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۶ & ۰ & ۳ & ۳ \\ ۱۵ & ۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴۳ & ۰ & ۱۰ & ۲۴ \\ ۲۰ & ۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ & ۰ & ۱۳ & ۱۷ \end{bmatrix} \quad (۲۷)$$

$$Xnt = \begin{bmatrix} ۵۸ & ۵۲ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴۵ & ۰ & ۳۵ & ۰ & ۰ \\ ۶۴ & ۲۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۲ & ۰ & ۳۸ & ۰ & ۰ \\ ۵۷ & ۲۳ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴۸ & ۰ & ۵۹ & ۰ & ۰ \\ ۵۳ & ۲۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۵۶ & ۰ & ۱۹ & ۰ & ۰ \\ ۲۱ & ۱۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۵ & ۰ & ۴۵ & ۰ & ۰ \\ ۵۳ & ۱۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۶۶ & ۰ & ۳۶ & ۰ & ۰ \\ ۵۵ & ۴۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۳ & ۰ & ۲۹ & ۰ & ۰ \\ ۵۱ & ۳۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۵۱ & ۰ & ۶۰ & ۰ & ۰ \\ ۶۵ & ۳۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۶۱ & ۰ & ۳۱ & ۰ & ۰ \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

$$XGnt = \begin{bmatrix} ۴۶ & ۲۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۰ & ۰ & ۲۸ & ۰ & ۰ \\ ۵۲ & ۱۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳ & ۰ & ۲۶ & ۰ & ۰ \\ ۱۵ & ۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۱ & ۰ & ۴۴ & ۰ & ۰ \\ ۱۳ & ۶ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۶ & ۰ & ۱۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ & ۰ & ۱۹ & ۰ & ۰ \\ ۱۷ & ۱۴ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲ & ۰ & ۲۷ & ۰ & ۰ \\ ۱۰ & ۱۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳ & ۰ & ۲۴ & ۰ & ۰ \\ ۴۲ & ۶ & ۰ & ۰ & ۰ & ۴۰ & ۰ & ۸ & ۰ & ۰ \\ ۶۰ & ۲۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۹ & ۰ & ۲۲ & ۰ & ۰ \end{bmatrix} \quad (۲۹)$$

$$XRnt = \begin{bmatrix} ۱۲ & ۲۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۵ & ۰ & ۷ & ۰ & ۰ \\ ۱۲ & ۱۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۹ & ۰ & ۱۲ & ۰ & ۰ \\ ۴۲ & ۱۵ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۷ & ۰ & ۱۵ & ۰ & ۰ \\ ۴۰ & ۲۲ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۰ & ۰ & ۹ & ۰ & ۰ \\ ۲۱ & ۱۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۵ & ۰ & ۲۹ & ۰ & ۰ \\ ۳۶ & ۱ & ۰ & ۰ & ۰ & ۶۴ & ۰ & ۹ & ۰ & ۰ \\ ۴۵ & ۲۲ & ۰ & ۰ & ۰ & ۲۰ & ۰ & ۵ & ۰ & ۰ \\ ۹ & ۲۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱۱ & ۰ & ۵۲ & ۰ & ۰ \\ ۵ & ۱۸ & ۰ & ۰ & ۰ & ۳۲ & ۰ & ۹ & ۰ & ۰ \end{bmatrix} \quad (۳۰)$$

۶. نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

در این مقاله ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شد، مدل ارائه شده با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات حل شد. بر اساس نتایج به دست آمده با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل، مدل در بیشتر مسائل اولویت استفاده از راهبرد سبز را در نظر می‌گیرد.

با مقایسه‌ی دو الگوریتم استفاده شده، پاسخ کلی ارائه شده توسط دو الگوریتم، تفاوت قابل توجهی وجود ندارد، به‌گونه‌یی که در برخی مسائل الگوریتم ژنتیک جواب بهتری ارائه می‌دهد و در برخی مسائل الگوریتم میرایی ارتعاش جواب بهتری ارائه می‌دهد. در این تحقیق از سیاست محدودیت انتشارکربن برای محدود کردن میزان انتشار گازهای وارد شده به محیط زیست استفاده شده است و برای غلبه بر این محدودیت دو نوع راهبرد تولید پیشنهاد داده شده است، راهبرد تولید سبز و راهبرد تولید عادی؛ منظور از راهبرد تولید سبز، روند و رویه‌ی تولید از ابتدا تا انتها با رعایت قوانین محیط زیستی است و شامل مواد اولیه‌ی سبز، انرژی قابل استفاده درکارخانه و همچنین نحوه‌ی حمل‌ونقل و بسته‌بندی به شیوه‌یی که کمترین آسیب را به محیط زیست وارد کند، می‌باشد. بدیهی است از لحاظ هزینه‌های اولیه این راهبرد هزینه‌ی بالاتری به سیستم وارد می‌کند، اما در این پژوهش به بررسی این نکته پرداخته شده است که در هزینه‌ی کل کدام راهبرد می‌تواند هزینه‌ی کمتری برای سیستم داشته باشد.

به‌منظور پاسخ به انتخاب فنّاوری بهتر از لحاظ هزینه و محیط‌زیستی با بررسی پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم‌ها، نتایج نشان داد هر دو الگوریتم، اولویت انتخاب تولید با راهبرد سبز را داشته‌اند و تعداد بیشتری از تقاضا را با تولید با راهبرد سبز پاسخ می‌دهند که بیانگر این موضوع است که ارائه‌ی طرح استفاده‌ی هم‌زمان از دو نوع راهبرد تولید سبز و عادی می‌تواند درکنارکاهش میزان انتشارات، هزینه‌ی تولید را بهینه کند. بنابراین استفاده از طرح محدودیت انتشارات‌کربن، در بهینه‌سازی

توأم برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات درکنارکاهش میزان انتشارات وارد شده در محیط‌زیست مؤثر است.

باتوجه به نتایج به دست آمده از تحقیق می‌توان پیشنهادهای زیر را برای تحقیقات آتی ارائه کرد:

- در نظرگرفتن زمان انجام نگهداری و تعمیرات در برنامه‌ریزی: زمان انجام تعمیرات بسته به نوع خرابی و زمان اتفاق افتادن آن می‌تواند متغیر باشد، همچنین شدت و نوع خرابی یا شکست ایجاد شده می‌تواند بر مدت زمان انجام تعمیرات تأثیرگذار باشد. در این پژوهش مدت زمان انجام تعمیرات ناچیز در نظرگرفته شده است، به‌منظور برنامه‌ریزی دقیق‌تر می‌توان به محاسبه و لحاظ کردن زمان انجام تعمیرات و همچنین هزینه‌های ناشی از توقف سیستم تولید در مدل پرداخت.
- در نظرگرفتن کمبود در هر دوره: در این پژوهش کمبود غیرمجاز در نظرگرفته شده بود، اما برای این‌که مدل با فضای واقعی نزدیکی بیشتری داشته باشد، پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آتی بر روی مدل‌سازی زمانی که کمبود مجاز باشد کار شود، با اضافه کردن این مورد، هزینه‌های کمبود و حتی نارضایتی مشتری می‌تواند به تابع هزینه اضافه شود. استفاده از سیاست طرح تجارت کربن: با توجه به این‌که در این تحقیق از سیاست محدودیت انتشار استفاده شد و از سقف مجاز انتشار استفاده شد، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی با استفاده از طرح تجارت کربن مدل حل شود و تأثیر این نوع سیاست بر برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات بررسی و مقایسه شود.

پانوشت‌ها

1. Hong
2. Benjafar
3. Hoen
4. Absi
5. Aghezzaf
6. Ba
7. Hennequinet
8. preventive maintenance (PM)
9. vibration damping optimization (VDO)
10. Rechenberg

منابع (References)

1. Aghezzaf, E.H., Khatab, A. and Le Tam, P. "Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems", *Reliability Engineering & System Safety*, **145**, pp. 190-198 (2016).
2. Hong, Z., Chu, C. and Yu, Y. "Dual-mode production planning for manufacturing with emission constraints", *European Journal of Operational Research*, **251**(1), pp. 96-106 (2016).
3. Benjaafar, S., Li, Y. and Daskin, M. "Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **10**(1), pp. 99-116 (2013).
4. Hoen, K.M.R., Tan, T., Fransoo, J.C. and et al. "Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, **26**(1-2), pp. 170-195 (2014).
5. Absi, N., Dauzère-Pérès, S., Kedad-Sidhoum, S. and et al. "Lot sizing with carbon emission constraints", *European Journal of Operational Research*, **227**(1), pp. 55-61 (2013).
6. Ba, K., Dellagi, S., Rezg, N. and et al. "Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory for an optimal production plan with consideration of CO2 emission", *Reliability Engineering & System Safety*, **149**, pp. 172-186 (2016).
7. Hennequin, S. and Restrepo, L.M.R. "Fuzzy model of a joint maintenance and production control under sustainability constraints", *FAC-PapersOnLine*, **49**(12), pp. 1216-1221 (2016).
8. Dahane, M., Clementz, C. and Rezg, N. "Effects of extension of subcontracting on a production system in a joint maintenance and production context", *Computers & Industrial Engineering*, **58**(1), pp. 88-96 (2010).
9. Batun, S. and Maillart, L. M. "Reassessing tradeoffs inherent to simultaneous maintenance and production planning", *Production and Operations Management*, **21**(2), pp. 396-403 (2012).
10. Hadidi, L.A., Al-Turki, U.M. and Rahim, A. "Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, **10**(1), pp. 21-50 (2011).
11. Colledani, M. and Tolio, T. "Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multistage asynchronous manufacturing systems with degrading machines", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **61**(1), pp. 455-458 (2012).
12. Nourelfath, M. and Châtelet, E., "Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components", *Reliability Engineering & System Safety*, **101**, pp. 59-66 (2012).
13. Kader, B., Sofiene, D., Nidhal, R. and et al. "Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan", *IFAC-PapersOnLine*, **48**(3), pp. 2139-2144 (2015).
14. Hennequin, S. and Restrepo, L.M.R. "A fuzzy hedging point policy for sustainable manufacturing system", *In Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference*, pp. 1041-1047 (2015).
15. Ekin, T. "Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield", *Reliability Engineering & System Safety*, **179**, pp.52-61 (2018).

16. Dellagi, S., Chelbi, A. and Trabelsi, W. "Joint integrated production-maintenance policy with production plan smoothing through production rate control", *Journal of Manufacturing Systems*, **42**, pp. 262-270 (2017).

17. Cui, W., Lu, Z., Li, C. and et al. "A proactive approach to solve integrated production scheduling and maintenance planning problem in flow shops", *Computers & Industrial Engineering*, **115**, pp. 342-353 (2018).

18. Liu, Q., Dong, M. and Chen, F.F. "Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **51**, pp. 238-247 (2018).

19. Hajipour, V., Mehdizadeh, E. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "A novel pareto-based multi-objective vibration damping optimization algorithm to solve multi-objective optimization problems", *Scientia Iranica*, **21**, pp. 2368-2378 (2013).

20. Mehdizadeh, E. and Tavakoli-Moghadam, R." Vibration damping optimization algorithm for an identical purallel machine scheduling problem", *In Proceeding of the 2nd International Conference of Iranian Operations Research Society,* Babolsar, Iran , pp.20-22 (2009).

21. Hajipour, V., Farahani, R.Z. and Fattahi, P. "Bi-objective vibration damping optimization for congested location-pricing problem", *Computers & Operations Research*, **70**, pp.87-100 (2016).

22. Saini, N. "Review of selection methods in genetic algorithms", *International Journal of Engineering and Computer Science*, **6**, pp. 2261-22263 (2017).

23. Rechenberg, I. "Evolutionsstrategie-Optimierung technisher Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution", *Journal of Botanical Taxonomy and Geobotony* , **86**(5), pp.337-339 (1975).

24. Mitchell, M. "An introduction to genetic algorithms", Massachusetts Institute of Technology press (1998).

25. Soni, N. and Kumar, T. "Study of various mutation operators in genetic algorithms", *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, **5**, pp. 4519-4521 (2014).

26. Holland, J.H. "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", MIT press (1992).