

بهینه‌سازی تعداد سلول‌ها در سیستم تولید سلولی

مسعود ربانی*، فهیمه تقی‌نیام، حامد فرخی اصل و حامد رفیعی

دانشکده مهندسی صنایع پردیس فنی دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۹/۲۵)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.35.2.65

چکیده - در این مقاله حل یک مدل غیرخطی تولید سلولی در شرایط پویا و قطعی با در نظرگیری هزینه‌های درون سلولی و برون سلولی، هزینه ایجاد سلول، هزینه استقرار مجدد و هزینه حمل و نقل ماشین‌آلات به‌ازای مسافت طی شده مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که تعداد سلول‌ها در هر دوره‌ای از تولید مهم به‌شمار می‌آید و در صورت بهینه بودن تعداد سلول‌ها می‌توان هزینه‌های دیگر را نیز به حداقل مقدار خود رسانید به‌همین دلیل در این تحقیق تعداد بهینه سلول‌ها هدف اصلی این تحقیق قرار گرفته است. الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی برای اولین بار در این حوزه مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با الگوریتم شناخته شده ژنتیک مقایسه شده است. نتایج حاصل از آزمایشات صورت گرفته نشان از عملکرد خوب الگوریتم ژنتیک در این مسأله است. در ادامه نیز نتایج حاصل از تحلیل آزمایش بر روی برخی از پارامترهای مسأله ارائه شده است. در پایان نیز نتیجه‌گیری عنوان شده و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید سلولی، شرایط پویای قطعی، تعداد بهینه سلول‌ها، الگوریتم ژنتیک.

Optimizing the Number of Cells in a Cellular Manufacturing System

M. Rabbani*, F. Taghiniam, H. Farrokhi-Asl and H. Rafiei

School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract: *In this paper, the solution of a non-linear model of Cell Manufacturing (CM) in certain and dynamic conditions is studied, considering intracellular and extracellular costs, cell constructing costs, the cost of restoration and the cost of equipment transportation per distance travelled. Since the number of cells in each stage of production is important, by optimizing the number of cells, additional costs can be minimized. Therefore, the main objective of this study is to investigate the optimal number of cells located. Bio-geographical Based Optimization (BBO) algorithm is applied in the CM for the first time in the literature and the obtained results from this algorithm are compared with the results of well-known genetic algorithm. The results shows the good performance of genetic algorithm. Finally, the conclusion and future research are provided.*

Keywords: *Cell Manufacturing (CM) system, Certain dynamic conditions, Optimal number of cells, Genetic algorithm.*

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mrabani@ut.ac.ir

$a_{j,p,m}$	اگر عملیات j قطعه p بتواند روی ماشین m انجام شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر	$k_{m,t,c}$	اگر ماشین m در دوره t از سلول c حذف شود برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.
$b_{m,t,c}$	اگر ماشین m در دوره t در سلول c قرار بگیرد برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.	LB	حد پایین اندازه سلول
c	اندیس سلول	L_m	هزینه حرکت ماشین m به ازای جابه جایی بین سلولی
CE	هزینه ثابت ایجاد سلول C	m	اندیس تعداد ماشین‌ها
C_m	هزینه ثابت ماشین نوع m	M	تعداد ماشین‌ها
CN_t	تعداد سلول‌های ایجاد شده در دوره t	M	عدد مثبت بزرگ
$d_{c,t}$	اگر سلول c در دوره t ایجاد شود برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.	O_m	هزینه متغیر ماشین نوع m برای هر واحد زمانی
$D_{p,t}$	تقاضای قطعه p در دوره t	P	اندیس قطعات
$e_{j,p,c,t}$	اگر عملیات j قطعه p در دوره t در سلول c انجام شود برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.	P	تعداد قطعات
F	اندازه کارگاه به مترمربع	$q_{m,c,t}$	تعداد ماشین m در هر سلول در دوره t
f	اندیس جانمایی کف کارگاه	r	ارزش زمانی تولید
$g_{mff't}$	اگر ماشین m از مکان f به f' برود در ابتدای دوره t برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.	RC_m	هزینه حذف ماشین نوع m
$h_{j,p,m,c,t}$	اگر عملیات j قطعه p روی ماشین m در دوره t در سلول c انجام شود برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر صفر است.	t	اندیس دوره‌های زمانی
IC_m	هزینه نصب ماشین نوع m	T	تعداد دوره‌های زمانی
j	اندیس عملیات‌های متعلق به قطعه	$t_{j,p,m}$	زمان مورد نیاز برای اجرای عملیات j قطعه p روی ماشین نوع m
		UB	حد بالای اندازه سلول
		β^{inter}	اندازه دسته تولیدی در حرکت بین سلولی
		β^{intra}	اندازه دسته تولیدی در حرکت درون سلولی
		δ^{inter}	هزینه حرکت بین سلولی برای هر دسته تولیدی
		δ^{intra}	هزینه حرکت درون سلولی برای هر دسته تولیدی

۱- مقدمه

گروه‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. هر دسته‌بندی یک خانواده از محصولات نامیده می‌شوند و برای هر دسته یک مجموعه ماشین‌آلات تخصیص داده می‌شود. به این ترتیب برای هر خانواده (گروه) یک شبه‌خط تولید در داخل یک سلول یا کارگاه ایجاد می‌گردد. این باعث افزایش کارایی سیستم و کاهش زمان آماده‌سازی می‌شود. این روش هنگامی به‌کار

تکنولوژی گروهی روشی است که در تولید کارگاهی برای قطعاتی که دوره تولید آنها نسبتاً کوتاه است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش قطعاتی که اساساً غیرمشابه هستند بدون درنظر گرفتن مورد استفاده و کاربرد آنها و براساس تشابهاتی که از لحاظ اندازه و روش ساخت با هم دارند در خانواده یا

می‌رود که تشابه چند محصول در طراحی یا روش ساخت وجود داشته باشد. در داخل هر فرآیند، ماشین آلات براساس ترتیب ساخت محصول چیده می‌شوند یعنی براساس منطقی خاص گروه‌بندی می‌شوند. در واقع تکنولوژی گروهی ترکیبی از استقرار خط تولید و استقرار کارگاهی است، بنابراین تکنولوژی گروهی یک استقرار ترکیبی است. در این استقرار هر سلول برای ساخت یک خانواده از محصولات به‌کار می‌رود. در واقع تولید سلولی^۱ بهتر از تولید کارگاهی و تولید محصولی است. در عصر رقابت و تکنولوژی برای اینکه بتوان محصولات خود را با کمترین هزینه، بالاترین کیفیت و در سریع‌ترین زمان ممکن به دست مشتری رساند، سیستم تولید سلولی^۲ یکی از گزینه‌های خوب به‌شمار می‌آید. استقرار ماشین‌آلات تعیین شده برای هر خانواده از قطعات با بهره‌گیری از یکی از انواع استقرارهای زیر است:

الف) استقرار براساس تکنولوژی گروهی - خطی

ب) استقرار براساس تکنولوژی گروهی - سلولی

ج) استقرار براساس تکنولوژی گروهی - مرکزی

همچنین سیستم تولید سلولی شامل انواع مختلفی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) سیستم تولید سلولی کلاسیک

ب) سیستم تولید سلولی مجازی

ج) سیستم تولید سلولی انعطاف‌پذیر

د) سیستم تولید سلولی پویا

در این تحقیق تولید سلولی پویا در حالت قطعی با هدف بهینه‌سازی تعداد سلول‌ها موردنظر است.

سیستم تولید سلولی پویا^۳ در شرایطی استفاده می‌شود که سیستم دارای تقاضا و ترکیب محصول متغیر در دوره‌های مختلف است. در این سیستم ایستگاه‌های کاری قابل جابه‌جایی هستند. در کارخانه‌هایی که برون‌سپاری قطعات یا قراردادهای فرعی انجام می‌شود این سیستم استفاده می‌شود. در این سیستم کارگاه متمرکز بوده و انجام استقرار مجدد آسان‌تر از سیستم تولید سلولی کلاسیک و مجازی است [۱].

در سیستم تولید سلولی پویا در پریودهای زمانی برای بهینه‌سازی سلول‌ها، ماشین‌آلات جابه‌جا می‌شوند. اما در طول هر پریود تولید می‌توان محصولات را از یک سلول به سلول دیگر حرکت داد.

در سیستم تولید سلولی با شرایط قطعی، تقاضا در هر دوره مشخص و قابل اندازه‌گیری است اما تقاضا در هر دوره با دوره دیگر می‌تواند متفاوت باشد.

از مزایای سیستم‌های تولید سلولی می‌توان به موارد کاهش زمان راه‌اندازی، کاهش زمان تولید، کنترل بهتر فرآیند، استفاده بهینه از فضا، افزایش تخصص کارکنان، کاهش زمان حمل و نقل اشاره کرد. همچنین معایب سیستم تولید سلولی را می‌توان شامل هزینه بالا، حمل و نقل‌های بین سلولی، مشکلات خرابی، عدم تعادل در بارکاری ماشین‌ها و نیاز به نیروی کار تخصصی بیشتر دانست [۱]. در ادامه مقاله و در بخش دوم به مرور ادبیات در این حوزه پرداخته خواهد شد. مسأله در بخش سوم تعریف شده و مدل ریاضی مرتبط با آن ارائه می‌شود. متدولوژی‌های حل مسأله در بخش چهارم توضیح داده شده است و همچنین نتایج عددی و گزارش‌های مرتبط با آن در بخش پنجم ارائه می‌شود. در انتها نیز بحث و نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مرور ادبیات

صفایی و همکاران [۲] و بالاک ریشن و چانگ [۳] به بازبینی تحقیقات انجام شده در زمینه مسائل تشکیل سلولی در شرایط پویا در سیستم‌های تولید سلولی پرداختند. بالاک ریشن و چانگ یک مدل دو مرحله‌ای برای مسأله تشکیل سلول تولیدی در شرایط پویا ارائه دادند، هدف اصلی مدل پیشنهادی، حداقل‌سازی هزینه حمل و نقل مواد و مکانی‌یابی مجدد ماشین‌ها بود. توکلی مقدم و همکاران [۴] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تولید سلولی در محیط پویا با فرض حداقل‌سازی هزینه استقرار مجدد، هزینه ثابت و عملیاتی و هزینه حمل بین سلولی ارائه دادند و به مقایسه الگوریتم‌های

فراابتکاری جستجوی ممنوعه^۴، ژنتیک^۵، تبرید شبیه‌سازی شده^۶ برای حل پرداختند. دفرشا و چن [۵] نیز به بررسی تأثیر اهداف برنامه‌ریزی تولید بر تشکیل سلول پویا پرداختند. هدف مدل پیشنهادی آنها شامل حداقل‌سازی هزینه عملیاتی ماشین، هزینه استقرار مجدد، هزینه برون‌سپاری قطعات، هزینه مصرف ابزار، هزینه راه‌اندازی و بالانس بارکاری سلول‌ها بود. در این مدل حمل درون‌سلولی قطعات، نگهداری موجودی و هزینه تولید داخلی در نظر گرفته نشده است. توکلی مقدم و همکاران [۶] یک مدل سیستم تولید سلولی با تقاضای پویا و احتمالی را ارائه دادند. هدف مدل پیشنهادی آنها شامل حداقل‌سازی هزینه‌های ماشین، چیدمان مجدد، حمل بین سلولی و درون‌سلولی، عبارت جریمه مجموع انحراف از میانگین تقاضای قطعات بود و به کمک الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده آن را حل کردند.

سعیدی و صفایی [۷] از یک روش شبکه عصبی برای حل مسأله تشکیل سلول تولیدی پویا با هدف حداقل‌سازی هزینه استقرار مجدد، هزینه ثابت و تغییر ماشین با در نظر گرفتن مسیرهای چندگانه و تکرار ماشین‌ها^۷ استفاده کردند. اسکالر [۸] یک مدل عدد صحیح خطی را برای مسأله تشکیل سلولی با هدف حداقل‌سازی هزینه تولید قطعات، هزینه ثابت ماشین و هزینه جابه‌جایی ماشین ارائه و آن را به کمک یک الگوریتم جستجوی ممنوعه گسترش یافته حل کرد. صفایی و همکاران [۲] یک مدل سلولی با اهداف هزینه حمل بین‌سلولی و درون‌سلولی ارائه دادند. تأکید مدل پیشنهادی بر میزان جابه‌جایی مواد درون‌سلولی و بین‌سلولی با فرض توالی عملیات، مسیرهای عملیاتی چندگانه و امکان تکرار ماشین‌ها از یک نوع در سلول است و آنها برای حل مدل پیشنهادی از یک الگوریتم ترکیبی تبرید شبیه‌سازی شده استفاده کردند. دفرشا و چن [۹] یک مدل ریاضی جامع برای طراحی سیستم تولید سلولی پویا براساس نیازهای ابزاری قطعات و در دسترس بودن ابزار روی ماشین‌آلات پیشنهاد کردند. این مدل به حداقل‌سازی هزینه عملیاتی ماشین، هزینه استقرار مجدد، هزینه حمل بین

سلولی، هزینه مصرف ابزار، هزینه برون‌سپاری قطعات و بالانس بارکاری درون‌سلولی می‌پرداخت و برای حل آن از یک روش الگوریتم ژنتیک متوازی جدید استفاده کردند. مهدوی و همکاران [۱۰] مدل ریاضی عدد صحیح برای طراحی سیستم تولید سلولی پویا را با در نظر گرفتن فاکتورهای نیروی کار گسترش دادند. دلجو و همکاران [۱۱] نیز یک مدل ریاضی برای تولید سلولی پویا ارائه و آن را با الگوریتم ژنتیک بهبود یافته حل کردند.

دورن و همکاران [۱۲] مسأله تشکیل سلول‌های تولیدی را مورد مطالعه قرار داده و آن را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۸ و داده کاوی^۹ حل کردند. قطب‌الدینی و همکاران [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای مسأله تولید سلولی پویا بیان کردند. مدل مطرح شده گروه‌بندی ماشین و قطعات و همچنین تخصیص نیروی انسانی را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته است. کوشان به هزینه ثابت و متغیر ماشین، هزینه‌های حمل و نقل بین سلولی و درون‌سلولی، هزینه استقرار مجدد، هزینه راه‌اندازی تولید و هزینه استهلاک ماشین‌آلات پرداخته است [۱]. کیا و همکاران [۱۴] یک مدل ریاضی غیرخطی برای طراحی استقرار یک سیستم تولید سلولی پویا را مطالعه و از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده کارا برای حل این مسأله استفاده کردند.

در این تحقیق یک مسأله تولید سلولی پویا در نظر گرفته شده است که در آن تقاضاها در طول دوره ثابت ولی در دوره‌های مختلف با هم متفاوت است. تشکیل سلول‌ها و چگونگی قرارگیری ماشین‌ها در آن مدنظر بوده است. همچنین در این مقاله تعداد سلول‌های تشکیلی به‌عنوان متغیری در نظر گرفته شده است که باید مشخص گردد. هزینه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل هزینه‌های ایجاد سلول، هزینه جابه‌جایی بین سلولی، هزینه نصب و حذف ماشین‌آلات، هزینه‌های عملیاتی، هزینه قرارگیری ماشین در یک سلول با در نظرگیری ارزش زمانی پول، هزینه حمل و نقل قطعات درون‌سلولی و بین سلول‌ها است. همچنین مدل ارائه شده در

این مقاله برای اولین بار در ادبیات این موضوع توسط الگوریتم بهینه‌سازی برمبنای جغرافیای زیستی^{۱۰} حل شده و نتایج حاصله با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

۳- تعریف مسأله

مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل تولید سلولی پویا در شرایط قطعی است و هدف آن پیدا کردن تعداد بهینه سلول‌ها با استفاده از حداقل کردن هزینه ایجاد سلول، هزینه‌های درون سلولی و بین سلولی، هزینه‌های ثابت و متغیر ماشین‌آلات، هزینه قرارگیری ماشین‌آلات در یک سلول، هزینه استقرار مجدد (هزینه نصب و حذف ماشین‌آلات)، هزینه‌های عملیاتی و هزینه حمل و نقل ماشین‌آلات به‌ازای سلول‌های طی شده است.

۳-۱- هزینه‌های مدل

هزینه‌های مورد بررسی در این مدل پیشنهادی شامل موارد زیر است:

- ۱- هزینه ثابت ماشین: مجموع هزینه‌های خرید، نگهداری ماشین در هر دوره.
- ۲- هزینه متغیر ماشین: شامل هزینه‌های عملیات برای تولید قطعات وابسته به بارکاری اختصاص یافته به هر ماشین است.
- ۳- هزینه‌های حمل و نقل بین سلولی: این هزینه زمانی ایجاد می‌شود که همه عملیات‌های متوالی یک قطعه در یک سلول انجام نشود و قطعه به سلول دیگری منتقل شود.
- ۴- هزینه‌های حمل و نقل درون سلولی: این هزینه زمانی ایجاد می‌شود که همه عملیات‌های متوالی یک قطعه در یک سلول انجام شود اما روی ماشین‌های مختلفی باشد.
- ۵- هزینه نصب ماشین‌آلات: در ازای نصب هر ماشین سیستم متحمل هزینه می‌شود.
- ۶- هزینه ثابت راه‌اندازی سلول‌های تولیدی: هزینه راه‌اندازی هر دسته تولیدی درون سلولی بر روی ماشین‌های مختلف.
- ۷- هزینه استقرار مجدد: به‌ازای اضافه کردن یک ماشین جدید

به سلول یا حذف کردن یک ماشین از یک سلول، سیستم متحمل هزینه می‌شود. هزینه نصب و هزینه حذف ماشین‌آلات از هم متفاوت است.

- ۸- هزینه حمل و نقل ماشین‌آلات به‌ازای واحد سلول طی شده: در هر بار جابه‌جایی ماشین‌آلات، به‌ازای میزان جابه‌جایی ماشین‌آلات از یک سلول به سلول دیگر هزینه‌ای تخصیص داده می‌شود که برای هر ماشین این هزینه متفاوت است.
- ۹- هزینه ایجاد سلول: در ازای ایجاد سلول سیستم متحمل هزینه می‌شود.

۳-۲- مفروضات مدل

- پارامترهای مدل به‌صورت قطعی و معین هستند.
- ظرفیت هر ماشین مقدار معین و ثابتی است. جهت تامین احتیاجات ظرفیت، تکرار ماشین‌ها مجاز است.
- ماشین‌ها از ۱۰۰ درصد ظرفیت خود استفاده می‌کنند.
- قطعات به‌صورت دسته‌ای درون سلول و بین سلول حرکت می‌کنند. تعداد قطعاتی که درون هر بسته قرار می‌گیرند برای درون سلولی و بیرون سلولی متفاوت است ولی اندازه این دسته‌ها، هم در درون سلولی و هم در بیرون سلولی ثابت است و تغییر نمی‌کند.
- هزینه حرکت بیرون سلولی ماشین‌آلات به‌ازای جابه‌جایی بین سلول‌ها مشخص و معین است و این هزینه برای هر ماشین متفاوت است.
- حداقل و حداکثر تعداد ماشین‌آلات موجود در سلول‌ها مشخص است.
- تغییر مکان ماشین‌ها از یک محل به محل دیگر در بین دوره‌ها انجام شده و زمان آن صفر است.
- مدت زمان نصب و حذف ماشین‌آلات صفر است.
- مساحت کف کارگاه معلوم و مشخص است.
- در صورت ایجاد هر سلول، مکان آن مشخص و معین است.
- به‌دلیل وجود تقاضای متفاوت در هر دوره، ممکن است

استقرار سلولی در یک دوره برای دوره بعدی بهینه نباشد و در هر دوره نیاز به مکان‌یابی مجدد ماشین‌ها باشد.

• توالی عملیات: نشان‌دهنده ترتیب انجام عملیات بر روی قطعه است.

• انعطاف‌پذیری ماشین: هر ماشین می‌تواند یک یا چند عملیات را با زمان‌های مختلف، بدون هزینه اضافی انجام دهد.

۳-۳- مدل ریاضی

مدل ریاضی پیشنهادی عدد صحیح غیرخطی برای مسأله طراحی تولید سلولی پویا در شرایط قطعی تقاضا به صورت زیر است:

$$\text{Min cost} = \sum_{i=1}^{\hat{x}} \text{Cost}_i \quad (1)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{c=1}^{\text{CN}} \sum_{t=1}^T \text{CE} \times d_{c,t} \quad (2)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F \sum_{f'=1}^{F'} \sum_{t=1}^T g_{m,f,f',t} \times L_m \quad (3)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^{\text{CN}} b_{m,t,c} \times \text{IC}_m \times d_{c,t} \quad (4)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^{\text{CN}} k_{m,t,c} \times \text{RC}_m \times d_{c,t} \quad (5)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^{\text{CN}} D_{p,t} \times h_{j,m,p,c,t} \times t_{j,p,m} \times O_m \quad (6)$$

$$\text{Cost}_t = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^{\text{CN}} d_{c,t} \times b_{m,t,c} \times C_m (1+r)^{t-1} \quad (7)$$

$$\text{Cost}_{t_v} = \frac{1}{\gamma} \sum_{t=1}^T \delta^{\text{intra}} \frac{D_{p,t}}{\beta^{\text{intra}}} \sum_{j=p=c=1}^J \sum_{p=c=1}^P \sum_{m=1}^{\text{CN}} \sum_{m=1}^M |h_{j+1,p,m,c,t} \times d_{c,t} - h_{j,p,m,c,t} \times d_{c,t}| \quad (8)$$

$$\text{Cost}_{t_\lambda} = \frac{1}{\gamma} \sum_{t=1}^T \delta^{\text{inter}} \frac{D_{p,t}}{\beta^{\text{inter}}} \sum_{j=1}^J \sum_{p=c=1}^P \sum_{c=1}^{\text{CN}} |e_{j+1,p,c,t} \times d_{c,t} - e_{j,p,c,t} \times d_{c,t}| \quad (9)$$

$$\sum_{c=1}^{\text{CN}} \sum_{m=1}^M a_{j,p,m} h_{j,p,m,c,t} = 1 \quad \forall j, p, t \quad (10)$$

$$q_{m,t,c} = b_{m,t,c} - k_{m,t,c} \quad \forall m, c, t > 1 \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M b_{m,t,c} \geq \text{LB} \quad \forall c, t \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M b_{m,t,c} \leq \text{UB} \quad \forall c, t \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M h_{j,p,m,c,t} = e_{j,p,c,t} \quad \forall j, p, c, t \quad (14)$$

$$\sum_{c=1}^{\text{CN}} d_{c,t} \geq 1 \quad \forall t \quad (15)$$

$$\sum_{f'=1}^F g_{m,f,f',t} = 1 \quad \forall m, f, t \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M b_{m,t,c} \leq \text{CN}_t d_{c,t} \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{c=1}^{\text{CN}} d_{c,t} = \text{CN}_t \quad \forall t \quad (18)$$

$$d_{c,t}, b_{m,t,c}, k_{m,t,c}, e_{j,p,c,t}, h_{j,p,m,c,t}, g_{m,f,f',t} = 0 \text{ or } 1 \quad (19)$$

$$\text{CN}_t > 0, \text{ integer} \quad (20)$$

در تابع هدف رابطه (۲) بیانگر هزینه ایجاد سلول است.

رابطه (۳) بیانگر هزینه جابه‌جایی ماشین m از یک مکان به

مکان دیگر است که به‌ازای هر ماشین این هزینه متفاوت

است. رابطه (۴) هزینه نصب ماشین در یک سلول را بیان

می‌کند. رابطه (۵) هزینه حذف یک ماشین از یک سلول را

بیان می‌کند. هزینه ۴ و ۵ به این دلیل هستند که به‌ازای نصب

یا حذف ماشین یک سری عملیات فنی و مهندسی باید انجام

شود که همین عملیات باعث ایجاد هزینه می‌شود. رابطه (۶)

هزینه‌های عملیاتی را بیان می‌کند. به‌ازای تعداد قطعات و

مدت زمان کار ماشین بر روی قطعات این هزینه محاسبه

بر جمعیت استفاده می‌کنند، بخش مهمی از روش‌های فراابتکاری را تشکیل می‌دهند. ایده اولیه الگوریتم‌های تکاملی، استفاده از جمعیت محدودی از عناصر است که هر یک از آنها نقطه‌ای از فضای جستجو (یک جواب برای مسأله) را مشخص می‌کنند.

۴-۱- نحوه کدگذاری جواب‌ها

مدل در نظر گرفته شده یک مدل سلولی است. در این مدل ایجاد سلول و نحوه قرارگیری ماشین‌آلات در آن مهم است. در این مدل تعداد قطعه، تعداد ماشین‌آلات، تعداد عملیات، تعداد دوره‌ها و تعداد جایگاه‌های کف کارگاه معلوم هستند و هدف به دست آوردن تعداد سلول‌ها در هر دوره است. برای به وجود آوردن کروموزوم در این مدل فقط ماشین‌آلات و کف کارگاه در نظر گرفته شده است، چرا که جابه‌جایی قطعات وابسته به نحوه قرارگیری ماشین‌آلات در سلول‌ها است. به دلیل داشتن هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات از یک مکان به مکان دیگر، کارگاه قسمت‌بندی شده است و اگر ماشینی از یک قسمت به قسمت دیگر جابه‌جا شود سیستم متحمل هزینه می‌شود. بیشترین تعداد تشکیل سلول برابر n است (به تعداد جایگاه‌ها) و کمترین تعداد سلول برابر ۱ است (اگر تعداد سلول صفر باشد به دلیل ایجاد نشدن سلول و قرار نگرفتن ماشین‌آلات در سلول، تولید وجود نخواهد داشت). در این مدل تعداد ماشین‌آلات محدود در نظر گرفته شده است و در هر دوره تعداد ماشین‌آلات تغییری نمی‌کند و ثابت است. از آنجا که این مدل چند دوره‌ای است به همین دلیل برای هر دوره یک کروموزوم ایجاد می‌شود. به طور مثال در صورت ۴ دوره‌ای بودن مدل، ۴ کروموزوم تولید می‌شود. کروموزوم به صورت شکل (۱) تعریف می‌شود که در آن n نشان‌دهنده تعداد جایگاه‌ها و m نیز نشان‌دهنده تعداد ماشین‌آلات مورد استفاده است.

$$(21) \quad \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\} : \text{مجموعه جایگاه‌ها } N$$

$$(22) \quad \{n+1, n+2, \dots, n+m\} : \text{مجموعه ماشین‌آلات } M$$

می‌شود. رابطه (۷) هزینه قرارگیری ماشین درون یک سلول را محاسبه می‌کند. این هزینه با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول است. رابطه (۸) هزینه حمل و نقل درون سلولی را محاسبه می‌کند و نشان می‌دهد اگر عملیات در یک سلول اما روی دو ماشین مختلف انجام شود، دو عملیات متوالی به حرکت درون سلولی نیاز دارد. رابطه (۹) هزینه حمل و نقل بین سلولی را نشان می‌دهد که اگر دو عملیات متوالی در دو سلول جداگانه انجام شود، به حرکت بین سلولی نیاز است. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند اگر تقاضای هر قطعه در یک دوره معین تولید شود، هر عملیات به یک سلول و به یک ماشین تخصیص داده می‌شود. رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که اگر سلول C ایجاد شود چه تعداد ماشین‌آلات در هر دوره در سلول موجود است. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب حد بالا و پایین اندازه سلول را نشان می‌دهد. رابطه (۱۴) بیان می‌کند در هر سلول و در هر ماشین، حداقل یک عملیات انجام می‌شود. محدودیت (۱۵) نشان‌دهنده آن است که در هر دوره حداقل یک سلول باید ایجاد شود. محدودیت (۱۶) بیان می‌کند یک ماشین در هر دوره یک بار می‌تواند جابه‌جا شود. رابطه (۱۷) بیانگر این است که زمانی یک ماشین در یک سلول می‌تواند قرار بگیرد که آن سلول ایجاد شده باشد. رابطه (۱۸) بیانگر این است که در هر دوره چه تعداد سلول ایجاد شده است. رابطه (۱۹) و (۲۰) نوع متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کنند.

۴- متدولوژی

در این تحقیق برای حل مدل باید از روش‌های فراابتکاری استفاده شود تا بتوان جواب‌هایی قابل قبول و یا بهینه را به دست آورد. در روش‌های فراابتکاری به طور کامل نمی‌توان به جواب بهینه رسید اما می‌توان تا حدود زیادی به جواب بهینه نزدیک شد. الگوریتم‌های فراابتکاری، جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی به خصوص مسائل با ابعاد بزرگ دارند. در این بین الگوریتم‌های تکاملی که از تکنیک بهینه‌سازی مبتنی

به طور مثال فرض می شود یک سری اعداد به صورت تصادفی از اعداد ۱ تا ۸+۱۰ در این کروموزوم به صورت شکل (۲) تولید می شود، تخصیص دادن این اعداد به صورت زیر است:

$$(23) \{1, 2, 3, \dots, n\} = \{1, 2, 3, \dots, 8\} \text{ :مجموعه جایگاه‌ها } N$$

$$(24) \{n+1, \dots, n+m\} = \{9, \dots, 18\} \text{ :مجموعه ماشین‌آلات } M$$

بر اساس کروموزوم ایجاد شده در بالا می توان ترتیب سلول های ایجاد شده و ماشین آلات قرار گرفته در هر سلول را مشخص کرد. اعداد کوچکتر از ۹ مشخص کننده سلول ها هستند. ماشین آلتی که در داخل کروموزوم بعد از یک مکان یک سلول در کروموزوم تا مکان سلول بعدی آورده شده اند مشخص کننده ماشین آلات تخصیص داده شده به سلول است. در این شکل سلول های تشکیل شده عبارتند از: سلول های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷. به طور مثال ماشین ۹ به سلول شماره ۵ اختصاص یافته و ماشین ۱۱ به سلول شماره ۴. شکل (۳) نحوه قرارگیری ماشین آلات در هر سلول را نشان می دهد. این کروموزوم ایجاد شده تنها برای یک دوره زمانی مثلاً $t = 1$ است و برای بقیه دوره ها کروموزوم های مربوطه نیز باید محاسبه شوند.

بر اساس کروموزوم ایجاد شده در شکل (۴) سلول های تشکیل شده عبارتند از: سلول های ۲، ۳، ۵، ۶، ۷ و ۸. شکل (۵) نحوه قرارگیری ماشین آلات در هر سلول را نشان می دهد. در این کروموزوم شماره ماشین ۱۲ در اولین خانه کروموزوم افتاده است، این ماشین به سلولی اختصاص می یابد که شماره آن بعد از ماشین ۱۲ قرار گرفته است. بر اساس مدل، در هر دوره باید یک سلول ایجاد شود.

۴-۲- الگوریتم بهینه سازی برمبنای جغرافیای زیستی

مسئله تشکیل سلول جزء مسائل سخت طبقه بندی می شود [۱۵] که به دست آوردن جوابی دقیق برای آن در ابعاد بزرگ امکان پذیر نیست لذا از روش های فراابتکاری برای حل این نوع مسائل استفاده می شود. توکلی مقدم و همکاران [۴] در

مقاله خود ذکر می کنند که مسأله تشکیل سلول ها در حالت استاتیک (تک دوره ای) جز مسائل سخت است. مسأله بررسی شده در این مقاله تشکیل سلول ها را به صورت دینامیک (چند دوره ای) دیده است. بنابراین با توجه به سخت بودن حالت استاتیک مسأله در حالت دینامیک نیز سخت خواهد بود و نیاز به زمان محاسباتی بیشتری دارد. الگوریتم بهینه سازی بر پایه جغرافیای زیستی که به اختصار BBO نامیده می شود از جمله الگوریتم های مبتنی بر جمعیت است. این الگوریتم برای اولین بار توسط دن سایمون [۱۶] ارائه شد و در آن از چگونگی تقسیم جمعیت در اقلیم های مختلف الهام گرفته شده است. بر اساس اطلاعات ارائه شده در این مقاله جانوران تمایل دارند به اقلیم هایی که در آنها غذا راحت تر و با رقابت کمتر حاصل خواهد شد، مهاجرت کنند. بنابراین اقلیم هایی که شاخص راحتی λ در آنها بالاتر است نرخ مهاجرت پذیری λ در آنها بیشتر و نرخ مهاجرت μ از آنها کمتر است.

این الگوریتم بر اساس بهینه سازی پیوسته λ طراحی شده است ولی با استفاده از ترفندهایی می توان آن را برای استفاده در مسائل گسسته λ نیز مورد استفاده قرار داد. با توجه به روش حل این مقاله و اینکه از یک فرم جایگشتی از اعداد گسسته برای حل مسأله استفاده شده است باید اعداد پیوسته مورد استفاده در این الگوریتم به اعداد گسسته جایگشتی λ تبدیل شوند. با توجه به ماهیت پیوسته الگوریتم BBO اعداد تولیدی به صورت تصادفی در بازه $[0-1]$ تولید شده اند تا اعمال اپراتورهای الگوریتم ها بر روی آنها به راحتی صورت گیرد. بعد از تولید این اعداد تصادفی باید آنها را به اعداد صحیح تبدیل کرد تا بتوان آنها را به یک جواب قابل قبول تبدیل نمود. برای این کار، مانند مثال ارائه شده در شکل (۶) به هر یک از اعداد تولیدی یک شماره تخصیص داده شده و اعداد از بزرگ به کوچک مرتب می شود. با مرتب کردن این اعداد غیر صحیح، اعداد صحیح تخصیص داده شده به آنها نیز جابه جا می شوند و جایگشت مورد نظر از اعداد حاصل می شود.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	...	n	n+1	n+2					...	n+m
---	---	---	---	---	---	-----	---	-----	-----	--	--	--	--	-----	-----

شکل ۱- کروموزم تولید شده در n+m عدد

۵	۹	۳	۱۲	۱۰	۶	۱۳	۱۴	۴	۱۱	۱	۱۶	۷	۱۷	۲	۱۵	۱۸	۸
---	---	---	----	----	---	----	----	---	----	---	----	---	----	---	----	----	---

شکل ۲- کروموزوم ایجاد شده در ۱۰+۸ عدد

ماشین ۱۱- سلول ۴	ماشین ۱۲ و ۱۰- سلول ۳	ماشین ۱۵ و ۱۸- سلول ۲	ماشین ۱۶- سلول ۱
ایجاد نشده است. سلول ۸	ماشین ۱۷- سلول ۷	ماشین ۱۳ و ۱۴- سلول ۶	ماشین ۹- سلول ۵

شکل ۳- نحوه قرارگیری ماشین آلات در هر سلول

۱۲	۲	۱۴	۱۳	۸	۱۰	۷	۱۱	۴	۱	۳	۱۵	۵	۱۶	۹	۶	۱۷	۱۸
----	---	----	----	---	----	---	----	---	---	---	----	---	----	---	---	----	----

شکل ۴- کروموزوم ایجاد شده در ۱۰+۸ عدد. در زمان t=2

تشکیل نشد- سلول ۴	ماشین ۱۵- سلول ۳	ماشین ۱۲، ۱۴ و ۱۳- سلول ۲	تشکیل نشد- سلول ۱
ماشین ۱۰- سلول ۸	ماشین ۱۱- سلول ۷	ماشین ۱۷ و ۱۸- سلول ۶	ماشین ۹ و ۱۶- سلول ۵

شکل ۵- نحوه قرارگیری ماشین آلات در هر سلول در زمان t=2

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	اعداد تخصیص داده شده
۰/۱۲۵	۰/۹۰۲	۰/۸۷۸	۰/۵۲۳	۰/۰۰۱	۰/۲۵۸	۰/۴۸۱	اعداد تصادفی تولیدی
۶	۱	۲	۳	۷	۵	۴	رتبه اعداد
۳	۷	۲	۱	۴	۵	۶	جایگشت حاصله

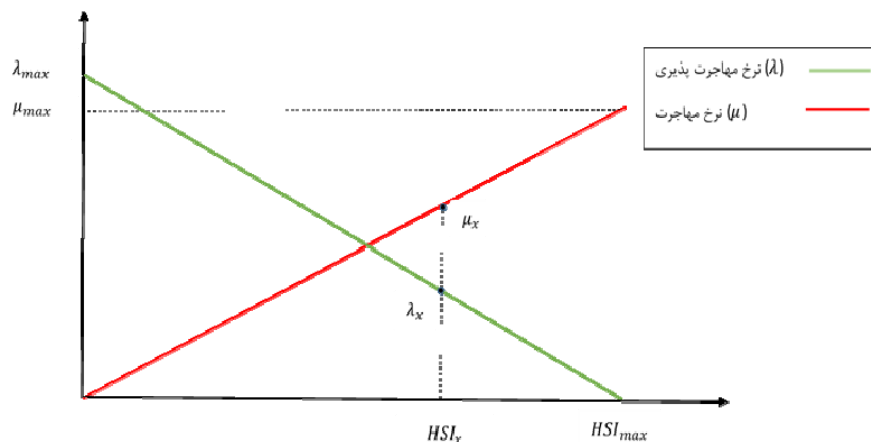
شکل ۶- تبدیل کروموزوم تولیدی پیوسته به گسسته

مطلوبیت^{۱۷} یا به اختصار SIV می نامند. در این الگوریتم هر یک از جواب ها با احتمالی که متناسب با مقدار μ آن جواب است SIV ها را مهاجرت می دهد و با احتمالی که متناسب با λ آن جواب است SIV ها مقصد SIV های جواب های دیگر خواهند بود. مراحل الگوریتم BBO شامل موارد زیر است که به طور خلاصه ذکر شده است:

گام ۱. تولید مجموعه ای از جواب ها و مرتب سازی آنها براساس تابع هدف.

شاخص راحتی منطقه که با HSI نشان داده می شود در مسائل بهینه سازی مشخص کننده نرخ های λ و μ است که مقدار آن متناسب با تابع هدف مسأله است. همانگونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، با افزایش شاخص مطلوبیت یک منطقه، نرخ λ آن کاهش و μ آن افزایش می یابد.

هر جواب موجود در فضای جواب ها از متغیرهای تصمیم مختلفی تشکیل شده است که مشخص کننده کیفیت جواب (مقدار تابع هدف) هستند و آنها را در این الگوریتم شاخص



شکل ۷- رابطه بین شاخص راحتی و نرخ‌های مهاجرت

عملگر جهش^{۱۹} با تولید عدد تصادفی نرمال با میانگین x_{ik} و واریانس σ ، که عددی متناسب با بازه جواب‌ها است، اعمال می‌شود.

گام ۹. مجموعه پاسخ‌های جدید به دست آمده ارزیابی می‌شود.

گام ۱۰. جمعیت قدیمی و جمعیت ناشی از اعمال مهاجرت‌ها و جهش‌ها ترکیب می‌شوند.

گام ۱۱. در صورت برآورده نشدن شرایط خاتمه، به مرحله ۳ بازگشت می‌شود.

۴-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط هالند [۱۷] ارائه شد. در این الگوریتم پس از ایجاد جمعیت اولیه، عملگر جهش برای توسعه جمعیت و یافتن جواب‌های پراکنده صورت می‌گیرد؛ سپس، در جهت یافتن جواب‌های بهتر و بهینه‌تر از فضای جستجو، با استفاده از عملگر تقاطع، جواب‌ها با هم ترکیب می‌شوند. در نهایت، براساس میزان برآزش^{۲۰}، انتخاب^{۲۱} بین جواب‌های موجود در جمعیت برای راهیابی به نسل بعدی انجام می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان ساختار کلی و عمومی یک الگوریتم تکاملی را به صورت زیر نشان داد:

(۱) جمعیت اولیه، به صورت تصادفی از نقاط فضای جستجو

گام ۲. تعیین مقادیر بین صفر و یک برای λ و μ براساس رتبه جواب‌ها (فضای بین صفر و یک را به تعداد جواب‌ها تقسیم و براساس رتبه جواب‌ها این مقادیر را به آنها اختصاص داده می‌شود. باید توجه داشت که بهترین جواب بالاترین نرخ μ و پایین‌ترین نرخ λ را خواهد داشت).

گام ۳. به ازای هر جواب مانند i مراحل ۴ تا ۸ تکرار می‌شود.

گام ۴. به ازای هر متغیر مانند k مرتب با جواب i مراحل ۵ تا ۸ انجام می‌شود.

گام ۵. با احتمال λ_i در x_{ik} تغییرات را اعمال می‌شود. طبق مراحل ۶ تا ۸ تغییرات انجام داده می‌شود.

گام ۶. تعیین مبدأ مهاجرت با استفاده از مقادیر μ_i و به صورت تصادفی که آن ز نامیده می‌شود.

گام ۷. انجام مهاجرت از x_{jk} به x_{ik} با استفاده از روابطی که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

$$x_{ik}^{new} = x_{ik}^{old} + a_k(x_{jk} - x_{ik}^{old}) \quad (25)$$

که در این رابطه a_k یک عدد تصادفی تولید شده بین صفر و یک است. با اندکی ساده‌سازی رابطه بالا، رابطه زیر حاصل می‌شود که نشان‌دهنده نوعی عملگر تقاطع^{۱۸} است:

$$x_{ik}^{new} = (1 - a_k)x_{ik}^{old} + a_k x_{jk} \quad (26)$$

گام ۸. با احتمال معین بر روی مؤلفه x_{ik} جدید تولید شده،

تولید می‌شوند؛

(۲) برازندگی هر عضو جمعیت محاسبه می‌شود؛

(۳) فرزندان از اعضای جمعیت به وجود می‌آیند؛

(۴) برازندگی فرزندان محاسبه می‌شوند؛

(۵) براساس میزان برازش، جمعیت نسل بعدی انتخاب می‌شود؛

(۶) در صورت برآورده نشدن شرط خاتمه، مراحل ۳ تا ۶ تکرار می‌شوند.

در این فرآیند، میزان برازش یک عدد حقیقی است که براساس تابع هدف برای هر عضو جمعیت محاسبه می‌شود و معیاری برای خوب یا بد بودن آن عضو نسبت به حل مسأله موردنظر است.

الگوریتم‌های ژنتیک به‌عنوان یک روش جهت انجام یک جستجوی هدایت شده برای مدل‌های خوب در فضای حل مسأله عمل می‌کند. این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های ژنتیک نامیده می‌شوند چون به‌طور بی‌قاعده‌ای الگوی تکامل زیستی، که در آن اعضای یک نسل بر سر انتقال خصوصیات خود به نسل بعد رقابت می‌کنند تا نهایتاً بهترین مدل یافت شود، را دنبال می‌کنند. اطلاعاتی که باید انتقال داده شود در قالب کروموزم‌ها که شامل پارامترهایی برای ساختن مدل است قرار می‌گیرد.

مراحل مربوط به الگوریتم ارائه شده در شکل (۸) نشان داده شده است. در این مراحل t برابر با تعداد دوره‌هایی است که در مدل اصلی در نظر گرفته شده است. برای شروع کار t و M مساوی یک در نظر گرفته شده است. عدد مکس^{۲۲} برابر با تعداد تکرارهای موردنظر برای به‌دست آوردن جواب بهینه مسأله است که از قبل توسط محقق مشخص شده و قابل تغییر است. در ابتدا به تعداد دوره‌های معلوم شده سلول ایجاد می‌شود و پس از ایجاد سلول‌ها، ماشین‌آلات به سلول‌ها و سپس قطعات به ماشین‌آلات تخصیص می‌یابند. پس از به‌دست آوردن هزینه کل، هزینه تمامی تکرارها با هم مقایسه شده و در آخر کمترین هزینه به‌عنوان هزینه بهینه انتخاب می‌شود. باید توجه شود که این هزینه لزوماً بهینه نیست چرا

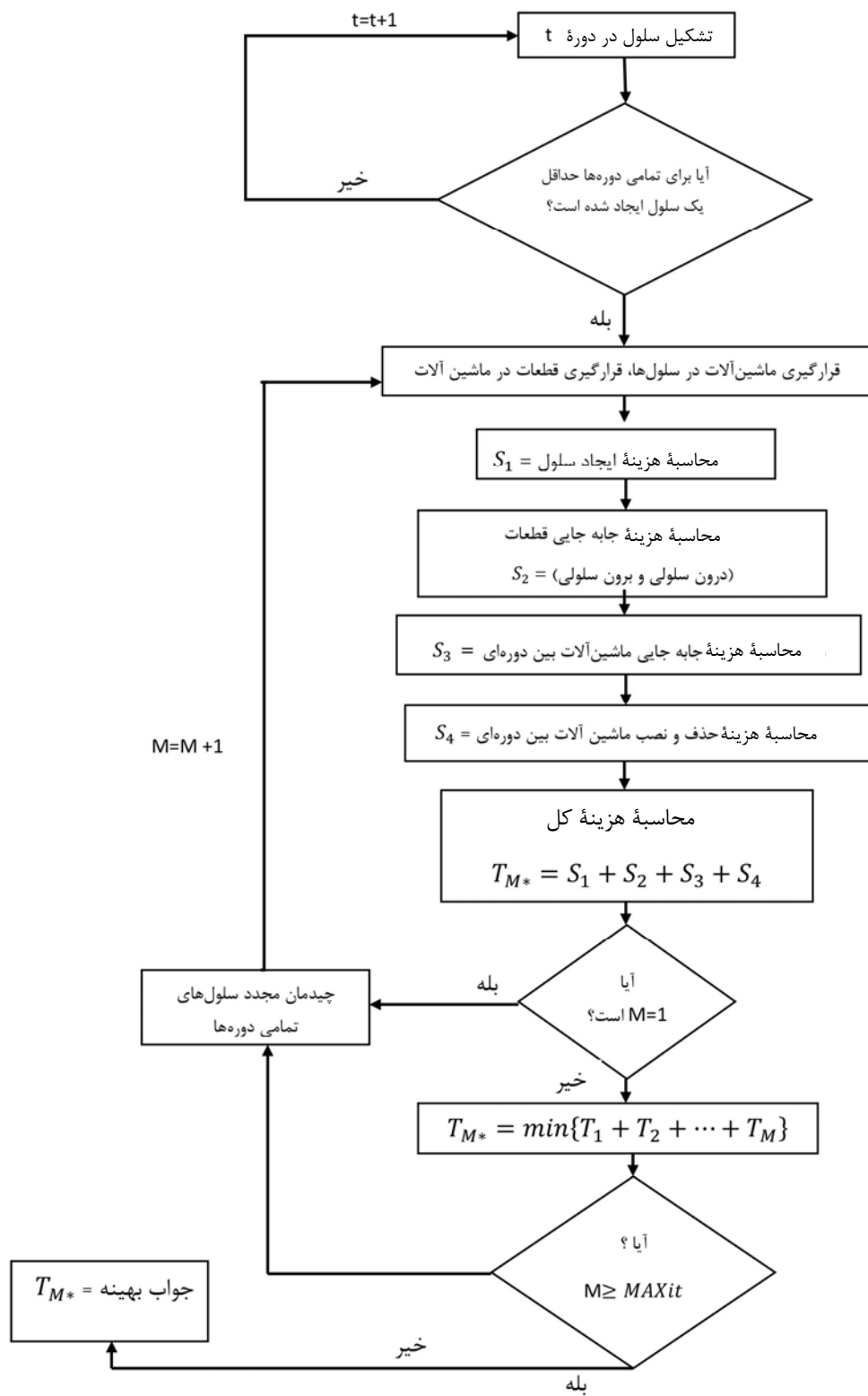
که امکان دارد با تعداد تکرارهای بیشتری بتوان به بهینه‌تری رسید.

در این تحقیق فرض شده است که تمام کف کارگاه به قسمت‌های مشخصی تقسیم‌بندی شده است و از قبل جایگاه هر سلول مشخص است. قابل ذکر است که در هر دوره این جایگاه‌ها ثابت است و در هیچ دوره‌ای تغییر نمی‌کند. شکل (۹) شمای شماتیکی از کارگاه را نشان می‌دهد.

در این مثال فرض شده است که حداکثر تعداد سلول‌هایی که در هر دوره می‌تواند ایجاد شود برابر با ۱۰ است و بنابر فرض مسأله این امکان وجود دارد که در یک دوره تنها یک سلول ایجاد شود و بقیه قسمت‌های کارگاه خالی بماند.

۵- تحلیل نتایج

در این تحقیق ابتدا مدل برای مثال‌هایی توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی برمبنای جغرافیای زیستی و همچنین الگوریتم ژنتیک با داده‌هایی با مقادیر کوچک و بزرگ حل شده است و داده‌های به‌دست آمده در جدول (۱) نشان داده شده است. از این جدول می‌توان برای مقایسه عملکرد دو الگوریتم استفاده کرد. اعداد موجود در جدول براساس ۵ بار اجرای هر مثال به‌دست آمده است و زمان محاسباتی نیز میانگین ۵ بار اجرا است. جدول (۱) با جمعیت اولیه ۵۰ و ۳۰۰ تکرار به‌دست آمده است. با استفاده از نتایج ارائه شده در جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که از نظر زمانی الگوریتم ژنتیک، برای این مسأله، الگوریتم کاراتری است. همچنین در میانگین عملکرد نیز الگوریتم ژنتیک در همه مسائل به‌غیر از مسأله شماره ۴ عملکرد بهتری از خود نشان داده است. حتی در همین مسأله شماره ۴ بهترین جوابی که الگوریتم ژنتیک به‌دست آورده بهتر از الگوریتم بهینه‌سازی برمبنای جغرافیای زیستی است. در مجموع می‌توان گفت برای این مسأله خاص الگوریتم ژنتیک در مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی برمبنای جغرافیای زیستی، هم از نظر زمانی و هم از نظر کیفیت جواب‌ها، عملکرد



شکل ۸- مراحل الگوریتم مدل مربوطه

جایگاه سلول ۱	جایگاه سلول ۲	جایگاه سلول ۳	جایگاه سلول ۴	جایگاه سلول ۵
جایگاه سلول ۶	جایگاه سلول ۷	جایگاه سلول ۸	جایگاه سلول ۹	جایگاه سلول ۱۰

شکل ۹- شمای شماتیک از کارگاه در تمامی دوره‌ها

جدول ۱- مقایسه بین عملکرد دو الگوریتم مورد استفاده

شماره مسأله	تابع هدف BBO			زمان BBO	تابع هدف GA			زمان GA
	کمترین	بیشترین	میانگین		کمترین	بیشترین	میانگین	
۱	۹۲۶۶۰	۹۲۶۶۰	۹۲۶۶۰	۵۱	۹۲۶۶۰	۹۲۶۶۰	۹۲۶۶۰	۳۳
۲	۱۶۲۲۲۱	۱۶۸۲۲۰	۱۶۵۵۴۵	۱۰۲	۱۶۴۱۲۱	۱۶۸۲۲۰	۱۵۹۱۵۱	۹۶
۳	۱۹۹۰۹۴	۲۰۹۱۵۷	۲۰۶۴۱۰	۱۵۸	۲۰۵۱۲۵	۲۱۰۵۲۴	۱۹۹۰۹۴	۱۵۰
۴	۶۱۲۲۵۱	۶۹۵۱۲۲	۶۴۷۵۲۱	۸۱۲	۶۸۵۱۳۳	۷۵۲۴۵۸	۵۹۱۹۵۱	۵۶۳
۵	۲۹۰۰۱۲۱	۳۱۲۵۸۵۲	۳۰۰۰۱۸۷	۳۱۵۲	۲۹۱۲۱۱۱	۲۹۹۵۷۸۱	۲۸۷۴۱۹۰	۲۲۵۸
۶	۱۶۸۹۴۲۵۱	۱۶۹۵۲۱۲۵	۱۶۹۱۲۱۱۱	۷۹۵۱	۱۶۷۱۲۱۱۱	۱۶۹۵۲۱۲۵	۱۶۶۲۴۴۶۹	۷۷۰۱

بهتری داشته است.

در ادامه تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مسأله و الگوریتم انجام و نتایج ارائه خواهد شد. در جدول (۲) خلاصه‌ای از بهترین جواب‌های حاصله مشاهده می‌شود که در هر دوره بین حداقل ۱ و حداکثر تعداد سلول‌های مجاز، سلول ایجاد شده است. به دلیل متفاوت بودن تقاضا، تعداد سلول‌های ایجاد شده با دوره بعد می‌تواند متفاوت باشد. با افزایش تعداد دوره‌ها، تعداد ماشین‌آلات، تعداد قطعات و تعداد عملیات قطعات، هزینه‌ها نیز افزایش یافته است.

در جدول (۳) به منظور بررسی امکان بهبود در الگوریتم ژنتیک، که عملکرد بهتری داشته است، تعداد جمعیت در دو مقدار ۵۰ و ۱۵۰ با ۳۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است و مقادیر آن ثبت شده است. همان‌طور که از جدول (۳) و شکل (۱۰) مشخص است با افزایش جمعیت اولیه می‌توان به جواب بهتری رسید. این اختلاف با افزایش داده‌ها و بزرگتر شدن مدل بیشتر می‌شود به طوری که در مسأله حل

شده (۶) این اختلاف بسیار مشهودتر است.

با توجه به جدول (۴) می‌توان دریافت کرد که در مسأله ۱ سلول ۲ با ۶۰۰۰ واحد هزینه دوبار ایجاد شده است. در مسأله ۲ مشاهده می‌شود که با دو برابر شدن هزینه ایجاد سلول ۲، تنها یک بار سلول ۲ ایجاد شده است. در مسأله ۳ با ۳/۳ برابر شدن هزینه ایجاد سلول ۲، سلول شماره ۲ در هیچ دوره‌ای ایجاد نشده است.

با توجه به جدول (۵) می‌توان دید که در مسأله ۱ سلول ۲ با ۶۰۰۰ واحد هزینه دوبار ایجاد شده است. در مسأله شماره ۲ با ۲۰۰ واحد هزینه، سلول ۲، سه بار ایجاد شده است. در مسأله ۳ با ۲ واحد هزینه، سلول ۲ در تمامی ۴ دوره ایجاد شده است.

از جداول (۴) و (۵) نتیجه‌گیری می‌شود در صورتی که هزینه ایجاد یک سلول در یک مسأله زیاد باشد (حدوداً بیشتر از دو برابر سایر هزینه‌های دیگر) آن سلول در هیچ دوره‌ای ایجاد نمی‌شود. در صورتی که هزینه ایجاد یک سلول بسیار پایین باشد (حدوداً کمتر از ۵۰۰

جدول ۲- ویژگی های بهترین جواب های به دست آمده

ویژگی های بهترین جواب به دست آمده										ویژگی های مسأله														
تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد عملیات	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد				
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	دوره ها	قطعات	قطعات	ماشین آلات	حداکثر	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۳	۳	۳	۶
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	۱۶۶۴۴۶۹	

جدول ۳- الگوریتم ژنتیک با دو جمعیت اولیه متفاوت

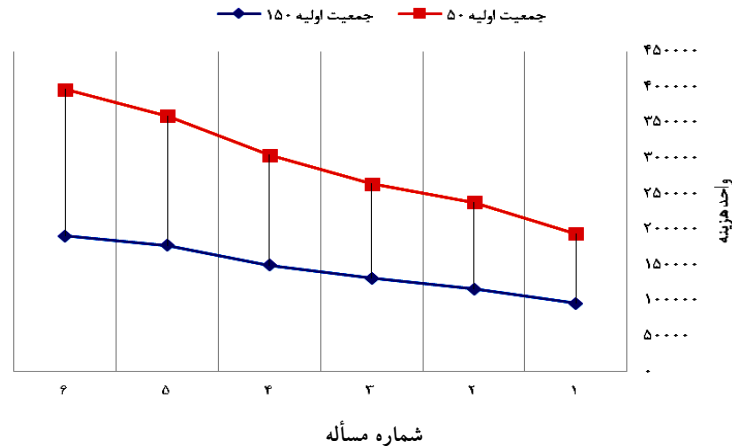
میزان اختلاف هزینه	بهترین جواب با جمعیت ۱۵۰	بهترین جواب با جمعیت ۵۰	بهرترین جواب با جمعیت ۵۰	بهرترین جواب با جمعیت ۱۵۰	شماره مسأله
-۲۳۲۷	۹۶۰۷۶	۹۸۴۰۳	۹۸۴۰۳	۹۸۴۰۳	۱
-۴۶۴۶	۱۱۶۷۸۰	۱۲۱۴۲۶	۱۲۱۴۲۶	۱۲۱۴۲۶	۲
-۷۰۰	۱۳۱۶۴۳	۱۳۳۳۴۳	۱۳۳۳۴۳	۱۳۳۳۴۳	۳
-۵۶۲۰	۱۴۹۶۷۶	۱۵۵۲۹۶	۱۵۵۲۹۶	۱۵۵۲۹۶	۴

جدول ۴- افزایش هزینه ایجاد یک سلول در مدل

شماره مسأله	حداکثر تعداد سلول‌هایی که می‌تواند در هر دوره ایجاد شود	تعداد ماشین‌آلات	تعداد قطعات	تعداد عملیات	تعداد دوره‌ها	هزینه ایجاد سلول	شماره ۲	در دوره ۱	در دوره ۲	در دوره ۳	شده در دوره ۴
۱	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۶۰۰۰	۶-۳-۲	۹-۸-۷-۵-۴-۱	۱۰-۷-۵-۳	۱۰-۷-۵-۳	۹-۸-۲-۵
۲	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۱۲۰۰۰	۱۰-۹-۵-۳-۲	۹-۷-۵-۴-۱	۱۰-۹-۵	۹-۸-۵-۳	۹-۸-۵-۳
۳	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۲۰۰۰۰	۱۰-۹-۸-۱	۱۰-۹-۸-۷-۵	۹-۷-۶-۳-۱	۹-۷-۶-۳-۱	۴-۳-۱

جدول ۵- کاهش هزینه ایجاد یک سلول در مدل

شماره مسأله	حداکثر تعداد سلول‌هایی که می‌تواند در هر دوره ایجاد شود	تعداد ماشین‌آلات	تعداد قطعات	تعداد عملیات	تعداد دوره‌ها	هزینه ایجاد سلول	شماره ۲	در دوره ۱	در دوره ۲	در دوره ۳	در دوره ۴
۱	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۶۰۰۰	۶-۳-۲	۹-۸-۷-۵-۴-۱	۱۰-۷-۵-۳	۱۰-۷-۵-۳	۹-۸-۲-۵
۲	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۲۰۰	۹-۸-۲-۵	۹-۸-۴-۳	۱۰-۹-۶-۲	۱۰-۹-۶-۲	۹-۴-۲-۱
۳	۱۰	۱۵	۶	۶	۴	۲	۱۰-۵-۲-۱	۹-۷-۴-۲	۶-۴-۳-۲-۱	۸-۷-۴-۳-۲	۸-۷-۴-۳-۲



شکل ۱۰- هزینه مدل با دو جمعیت اولیه متفاوت



شکل ۱۱- شمای شمانیک از قرارگیری ماشین آلات در سلول های تشکیل شده در دوره ۳

شماره ۲، این ماشین در آن سلولی که در دوره ۱ قرار گرفته است باقی مانده و تا انتهای مسأله نیز جابه جا نشده است. جدول (۶)، تعداد سلول های ایجاد شده در تمامی دوره ها با در نظر گرفتن هزینه ایجاد سلول و بدون در نظر گرفتن هزینه ایجاد سلول را نشان می دهد. بین تعداد سلول های ایجاد شده با در نظر گرفتن هزینه و بدون در نظر گرفتن هزینه در ابعاد کوچکتر مسأله این نسبت

واحد) آن سلول در تمامی دوره ها ایجاد می شود. شکل (۱۱) نشان می دهد که ماشین شماره ۲ در هر دوره یک بار جابه جا شده است. در شکل (۱۲) نشان داده شده است که ماشین شماره ۲ در تمامی دوره ها در سلول ۲ قرار دارد. هزینه جابه جایی ماشین شماره ۲ برابر با ۲/۰۰۰/۰۰۰ واحد در نظر گرفته شده است (حدوداً ۱۰۰۰ برابر هزینه جابه جایی ماشین آلات دیگر). به دلیل بالا بودن هزینه جابه جایی ماشین



شکل ۱۲- شمای شماتیک از قرارگیری ماشین آلات در سلول‌های تشکیل شده در دوره ۳ با افزایش هزینه جابه‌جایی ماشین شماره ۲

جدول ۶- تعداد سلول‌های ایجاد شده با هزینه ایجاد سلول و بدون هزینه ایجاد سلول

شماره مسأله	حداکثر تعداد سلول‌هایی که می‌تواند در هر دوره ایجاد شود	تعداد ماشین‌آلات	تعداد قطعات	تعداد عملیات	تعداد دوره‌ها	تعداد سلول‌های ایجاد شده در تمامی دوره‌ها با در نظر گرفتن هزینه ایجاد سلول ۱	تعداد سلول‌های ایجاد شده در تمامی دوره‌ها بدون در نظر گرفتن هزینه ایجاد سلول ۲	میزان نسبت سلول ۱/سلول ۲
۱	۸	۱۰	۳	۳	۳	۸	۱۵	۱/۸۷۵
۲	۱۰	۱۰	۳	۳	۳	۹	۱۳	۱/۴۴
۳	۲۰	۲۰	۳	۳	۳	۲۳	۳۱	۱/۳۴
۴	۲۴	۲۴	۳	۳	۳	۲۴	۲۸	۱/۱۶
۵	۳۰	۳۰	۳	۳	۳	۳۵	۳۷	۱/۰۵
۶	۳۵	۳۵	۳	۳	۳	۳۳	۳۴	۱/۰۳

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، در حالت کلی مسأله سیستم تولید سلولی یک مسأله سخت^{۳۳} است. یعنی با افزایش تعداد ماشین‌آلات، تعداد سلول‌ها، تعداد دوره‌ها، تعداد قطعات و تعداد عملیات قطعات زمان حل به شدت افزایش

نزدیک به ۲ است. با افزایش ابعاد مسأله از این نسبت کامسته می‌شود به گونه‌ای که در مسأله شماره ۶ می‌بینیم این نسبت تقریباً برابر با ۱ شده است. در ابعاد بزرگ می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد سلول بسیار وابسته به سایر پارامترها از جمله هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات و قطعات نیز است.

می‌یابد. در این تحقیق برای حل مسأله در ابعاد مختلف از دو الگوریتم فراابتکاری استفاده شد. الگوریتم بهینه‌سازی برمبنای جغرافیای زیستی برای اولین بار در این حوزه مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده و مثال‌های حل شده، الگوریتم ژنتیک الگوریتم کارایی برای حل این مسأله از نظر زمان و کیفیت جواب‌ها است. در مدل پیشنهادی سلول‌هایی ایجاد می‌شوند که با ایجاد آنها سیستم بتواند کمترین هزینه ممکن را متحمل شود. جابه‌جایی ماشین‌آلات در هر دوره وابسته به هزینه حذف و نصب و هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات است، به گونه‌ای که در صورت زیاد بودن این هزینه‌ها، سیستم سعی بر جابه‌جا نشدن ماشین‌آلات دارد. در صورت زیاد بودن هزینه ایجاد یک سلول، سیستم سعی بر ایجاد نشدن آن و در صورت کم بودن هزینه ایجاد سلول، سیستم سعی بر ایجاد شدن آن در تمامی دوره‌ها دارد. در حالت کلی با بهبود فاکتورهای اساسی الگوریتم ژنتیک، همانند رویه لازم جهت تولید نسل اولیه، نحوه طراحی و انتخاب عملگرها با توجه به ساختار کروموزوم و استراتژی انتخاب والدین، احتمال رسیدن به جواب بهینه کلی را می‌توان افزایش داد.

هرچند که در مدل ارائه شده سعی بر آن بود که مدل با واقعیات موجود تطابق داشته باشد ولی می‌توان آن را بهبود داد. برای تعمیم مدل می‌توان هر یک از موارد زیر را، که منتج به پیچیده‌تر شدن مدل می‌شود، لحاظ نمود:

- مدل می‌تواند با توجه به محدودیت در تعداد ماشین‌آلات در دسترس طراحی شود.
- زمان ماشین‌آلات صفر در نظر گرفته شده است در حالی که می‌توان زمان نصب و جابه‌جایی آنها را نیز به صورت هزینه و محدودیت اعمال نمود.
- راندمان و ظرفیت هر ماشین را می‌توان احتمالی در نظر گرفت.
- می‌توان نیروی انسانی را در نظر گرفت.
- می‌توان مسیرهای عملیاتی چندگانه در مدل در نظر گرفت.
- می‌توان مدل را در صورتی که تقاضا در حالت عدم قطعیت است بررسی کرد.

با اینکه سعی شد تا مدل شباهت بیشتری به واقعیت داشته باشد ولی با توجه به کمبودهای ذکر شده می‌توان مدل را تعمیم داد که برای تحقیقات پیشنهاد می‌شود.

واژه‌نامه

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. cellular manufacturing (CM) | 13. emigration rate |
| 2. cellular manufacturing system (CMS) | 14. continuous optimization |
| 3. dynamic cellular manufacturing system(DCMS) | 15. discrete |
| 4. tabu search (TS) | 16. permutation |
| 5. genetic algorithm (GA) | 17. suitability index |
| 6. simulated annealing (SA) | 18. cross over |
| 7. duplicate machines | 19. mutation |
| 8. particle swarm optimization (PSO) | 20. fitness |
| 9. data mining | 21. selection |
| 10. bio-geographical based optimization | 22. max (max it) |
| 11. habitat suitability index | 23. np-hard |
| 12. immigration rate | |

مراجع

1. وشان، م.، "به‌کارگیری الگوریتم ترکیبی داده‌کاوی- متاهوریستیک برای مسأله تولید سلولی پویا در حالت عدم قطعیت با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های درون‌سلولی و
2. Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., and Jabal-Ameli, M. برون‌سلولی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.

- S., "A Hybrid Simulated Annealing for Solving an Extended Model of Dynamic Cellular Manufacturing System", *European Journal of Operational Research*, Vol. 185, pp. 563-592, 2008.
3. Balakrishnan, J., and Cheng, C. H., "Dynamic Cellular Manufacturing under Multi Period Planning Horizons", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 16, No. 5, pp. 516-530, 2005.
 4. Tavakkoli- Moghadam, R., Aryanezhad, M. B., Safaei, N., and Azaaron, A., "Solving a Dynamic Cell Formation Problem using Meta-Heuristics", *Applied Mathematical and Computation*, Vol. 170, pp 761-780, 2005.
 5. Defersha, F., and Chen, M., "A Comprehensive Mathematical Model for the Design of Cellular Manufacturing System", *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, No. 2, pp. 767-783, 2006.
 6. Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B., and Safaei, N., "Design of a Facility Layout Problem in Cellular Manufacturing Systems with Stochastic Demands", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 184, pp. 721-728, 2007.
 7. Saidi-Mehrabad, M., and Safaei, N., "A New Model of Dynamic Cell Formation by a Neural Approach", *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 1001-1009, 2007.
 8. Schaller, J., "Designing and Redesigning Cellular Manufacturing System to Handle Demand Changes", *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 53, pp. 478-490, 2007.
 9. Defersha, F., and Chen, M., "A Parallel Genetic Algorithm for Dynamic Cell Formation in Cellular Manufacturing System", *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 22, pp. 6389-6413, 2008.
 10. Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M, and Solimanpur, M., "Designing a Mathematical Model for Dynamic Cellular Manufacturing Systems Considering Production Planning and Worker Assignment", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 60, pp. 1014-1025, 2010.
 11. Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem S. M. J., Deljoo, F., and Aryanezhad, M. B., "Using Genetic Algorithm to Solve Dynamic Cell Formation Problem", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 34, pp. 1078-1092, 2010.
 12. Durán, O., Rodriguez, N., and Consalter, L. A., "Collaborative Particle Swarm Optimization with a Data Mining Technique for Manufacturing Cell Design", *Expert Systems with Applications* Vol. 37, pp. 1563-1567, 2010.
 13. Ghotboddini, M. M., Rabbani, M., and Rahimian, H., "A Comprehensive Dynamic Cell Formation Design: Benders' Decomposition Approach", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 2478-2488, 2011.
 14. Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., and Khorrami, J., "Solving a Group Layout Design Model of a Dynamic Cellular Manufacturing System with Alternative Process Routings, Lot Splitting and Flexible Reconfiguration by Simulated Annealing", *Computers & Operations Research*, Vol. 39, pp. 2642-2658, 2012.
 15. Chen, M., and Dong C., "Coordinating Production Planning in Cellular Manufacturing Environment using Tabu Search", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 46, pp. 3571-588, 2004.
 16. Simon, D., "Biogeography-based Optimization, Evolutionary Computation", *IEEE Transactions*, Vol. 12, No. 6, pp. 702-713, 2008.
 17. Holland, J. L., *Making Vocational Choices, A Theory of Careers*, Prentice Hall, 1973.

