

طراحی مدل ریاضی چندهدفه زمان‌بندی در سیستم تولیدی کارگاهی و حل آن با استفاده از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبریدی

حسن رحیمی*، عادل آذر**، عباس رضائی پندری***

چکیده

سیستم تولید «کارگاهی» سیستمی مناسب برای تولید قطعات است و زمان‌بندی «کارگاهی» یکی از مؤثرترین شاخص‌های افزایش بهره‌وری این سیستم‌ها است. در حل مدل‌های ریاضی زمان‌بندی کارگاهی دو هدف، کمینه‌کردن بیش‌ترین زمان ساخت (C_{max}) و کمینه‌کردن جمع وزنی جریمه‌های زودکرد و دیرکرد کارها (WSET) مدنظر قرار می‌گیرد. در این پژوهش مدل ریاضی جدیدی برای رسیدن به هر دو هدف اشاره‌شده به‌طور هم‌زمان از طریق برنامه‌ریزی آرمانی (GP) ارائه شده است. مسائل زمان‌بندی سیستم‌های تولید کارگاهی از نظر پیچیدگی محاسباتی جز مسائل «حل‌نشده‌ی چند جمله‌ای سخت» قرار می‌گیرند، بنابراین در این مقاله از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبریدی برای حل مدل استفاده شده است. به‌طور معمول در روش‌های فراابتکاری از ساختار جواب تک‌ارائه‌ای (خانواده قطعات یا قطعات هر خانواده) استفاده می‌شود که باعث کوچک‌تر شدن فضای جواب می‌شود؛ اما در این پژوهش برای تعیین ساختار جواب دوارائه‌ای از روش تولید همسایگی ترکیبی، جابه‌جایی جهت‌دار (DIS) در خانواده قطعات و جابه‌جایی تصادفی (RIS) در قطعات هر خانواده، استفاده شده است. نتایج حل مدل آرمانی زمان‌بندی کارگاهی با روش شبیه‌سازی تبریدی، کارایی مدل طراحی شده در دست‌یابی به آرمان‌های مورد نظر را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی تولید کارگاهی؛ شبیه‌سازی تبریدی؛ برنامه‌ریزی آرمانی؛ تولید همسایگی ترکیبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۴/۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۸/۲۱.

* کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

** استاد، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول).

E-mail: azara@modares.ac.ir

*** دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۱. مقدمه

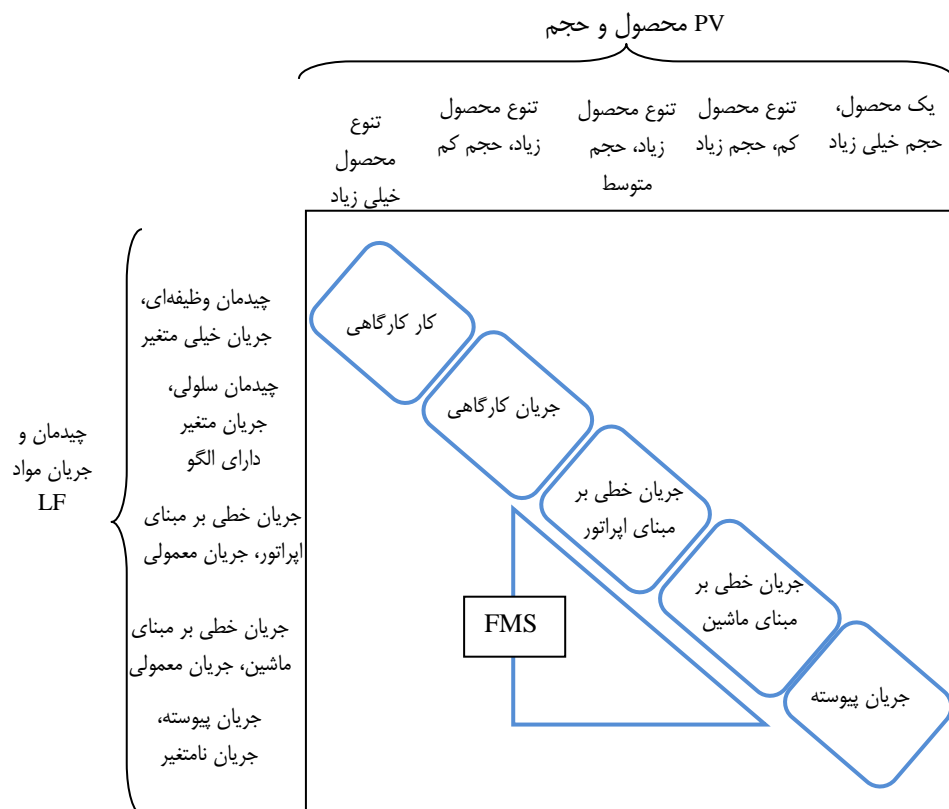
در بسیاری از کارخانه‌ها تولیدی قطعات و محصولات دارای فرآیندهای مشابه تولیدی هستند؛ بنابراین چیدمان ماشین‌آلات آنها نیز متأثر از این موضوع است و چیدمان وظیفه‌ای شکل می‌گیرد. جریان کار در این نوع کارخانه‌ها به صورت کار کارگاهی (JS)^۱ است. سیستم تولیدی کار کارگاهی ابزاری کارآ، برای برنامه‌ریزی تولید و بهره‌بری بالای تولید قطعات مشابه از نظر فرآیند تولیدی، است [۳۰،۲۵]. در بسیاری از سیستم‌های تولیدی زمان‌بندی نقش اساسی ایفا می‌کند [۳۱] که در سیستم‌های تولیدی کار کارگاهی به عنوان مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی JSP^۲ شناخته می‌شوند. برای مسئله زمان‌بندی در سیستم‌های تولیدی کارگاهی اهداف مختلفی مثل کمینه‌کردن بیش‌ترین زمان ساخت (C_{max}) و دیگری کمینه‌کردن جمع وزنی جریمه‌های زودکرد و دیرکرد کارها (WSET)^۳ مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش مدل ریاضی جدیدی برای رسیدن به هر دو هدف اشاره شده به طور هم‌زمان از طریق برنامه‌ریزی آرمانی (GP)^۴ ارائه شده است. از آنجاکه مسائل زمان‌بندی سیستم‌های تولید کار کارگاهی از نظر پیچیدگی محاسباتی جز مسائل «حل نشدنی چند جمله‌ای سخت»^۵ هستند [۳۸] از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبریدی (SA)^۶ برای رسیدن به جواب نهایی استفاده شده است. از طرفی در این پژوهش از ساختار جواب دوارائه‌ای استفاده شده است؛ یعنی در تولید همسایگی علاوه بر تغییر در ترتیب ورود خانواده قطعات، ترتیب ورود هر قطعه از خانواده قطعات نیز به طور هم‌زمان تغییر می‌کند. در خصوص تولید همسایگی نیز در این پژوهش با توجه به ساختار جدید جواب دوارائه‌ای (تغییر هم‌زمان در رشته جواب خانواده قطعات و همچنین قطعات در هر خانواده به صورت هم‌زمان) از روش ترکیبی بهینه تولید همسایگی استفاده شده است.

مقاله حاضر درصدد است با توجه به ضروریات ذکر شده به مدل مناسب برای زمان‌بندی کارگاهی بپردازد. در بخش دوم با مروری بر مبانی نظری سیستم‌های تولیدی و زمان‌بندی کارگاهی به بیان پیشینه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. در بخش سوم روش شناسی پژوهش و مدل ریاضی مناسب برای زمان‌بندی کارگاهی ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج اجرا و حل مدل در مورد مطالعه پژوهش (شرکت توریو کمپرسور نفت) ارائه و در بخش پایانی به نتایج و پیشنهادهای پژوهش پرداخته می‌شود.

-
1. Job Shop
 2. Job-shop Scheduling Problem
 3. Weighted Sum of Earliness and Tardiness penalties
 4. Goal Programming
 5. NP-Hard
 6. Simulated Annealing

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

میلتنبرگ (۲۰۰۸) انواع سیستم‌های تولیدی را با در نظر گرفتن شاخص‌هایی از قبیل حجم و تنوع تولید، چیدمان و جریان مواد به صورت ماتریس PV-LF^۱ (شکل ۱) تعریف کرده است که سیستم‌های تولیدی با مشخصه‌های تنوع محصول بالا، حجم تولید کم، چیدمان وظیفه‌ای و جریان متغیر حرکت قطعات را مشخصه سیستم‌های تولید «کارگاهی» دانسته است [۲۱].



شکل ۱. ماتریس PV-LF [۲۱]

بر اساس تعریف خان (۲۰۱۱) در صورتی که عملکرد و نوع عملیات تعدادی از ماشین‌آلات مشابه باشند، می‌توان سیستم تولیدی را سیستم تولیدی کارگاهی در نظر گرفت [۱۴]. زمان بندی تولید قطعات یکی از کلیدی‌ترین عوامل برنامه‌ریزی و کنترل در تولید کار کارگاهی است [۲۲]، [۶]؛ به نحوی که پژوهش‌های فراوانی از گذشته تاکنون بر روی زمان بندی صورت گرفته است

[۱۱، ۳۴]. به‌طور کلی هدف از زمان‌بندی در سیستم‌های تولید کار کارگاهی، تعیین توالی انجام قطعات در کارگاه است. مطالعات زیادی نیز در زمینه طبقه‌بندی این نوع از روش‌های زمان‌بندی انجام شده است [۹، ۱۷، ۱۸]. همان‌طور که در مقدمه گفته شد مسائل زمان‌بندی در کار کارگاهی از نوع «حل‌نشده چندجمله‌ای سخت» هستند [۱۶] و برای حل آنها باید از روش‌های فراابتکاری استفاده کرد که فنونی مثل؛ شبیه‌سازی تبرییدی (SA)، الگوریتم ژنتیک (GA) و جست‌وجوی ممنوع (TS) نمونه‌ای از این روش‌ها هستند [۳۷].

در مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی n کار وجود دارد که هر کدام دارای تعدادی عملیات متفاوت هستند که بر روی m ماشین‌های متفاوت انجام می‌شوند و هر کار دارای ترتیب انجام عملیات خاص خود است [۱۶]؛ از طرفی می‌توان قطعاتی را که دارای عملیات مشابه بر روی ماشین‌آلات هستند را در خانواده قطعات متفاوت تعریف کرد تا از مزایایی شباهت در نوع عملیات و استفاده از ماشین‌های مشابه آنها به‌نفع زمان‌بندی بهره‌گرفت [۱۲]؛ به همین منظور علاوه بر پیدا کردن ترتیب ورود قطعات هر خانواده به کارگاه باید ترتیب ورود هر خانواده از قطعات به کارگاه را نیز محاسبه و تعریف شود که این موضوع منجر به ایجاد ساختار جواب دوارائه‌ای می‌شود که در گذشته پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است که خلاصه‌ای از پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پژوهش‌های انجام شده در زمینه زمان‌بندی کارگاهی

منبع	ویژگی‌های مسئله و روش حل	سال	پژوهشگران
[۷]	زمان‌بندی خانواده قطعات در حالت کارگاهی با دو ماشین و با فرض زمان آماده‌سازی مستقل و حل آن با روش ابتکاری بر مبنای الگوریتم جانسون	۱۹۹۰	بیکر
[۲۷]	در نظر گرفتن فهرست ممنوع با طول ثابت و متغیر و حل آن با روش جست‌وجوی ممنوع	۱۹۹۳	اسکورین و همکاران،
[۲۴]	پیشنهاد یک مدل تک‌هدفه کاهش هزینه حل با روش شبیه‌سازی تیریدی و ارائه روشی جدید برای تولید همسایگی	۱۹۹۳	شریدر و همکاران
[۱۸]	پیشنهاد یک مدل دومرحله‌ای و حل آن با ترکیبی از روش‌های فراابتکاری	۱۹۹۵	لاچندران و همکاران
[۲۴]	مقایسه روش‌های ابتکاری مختلف	۲۰۰۰	اسچالر
[۳۵]	ارائه مدلی با دو سلول تولیدی و امکان وجود قطعات بین‌سلولی و حل آن با روش شاخه و کران	۲۰۰۲	یانگ و همکاران،
[۲۹]	ارائه مدلی با در نظر گرفتن قطعات بین کارگاهی و حل آن با روش ابتکاری شبکه‌ای	۲۰۰۴	سلیمان‌پور و همکاران
[۳۳]	ارائه مدلی چندهدفه و حل آن با روش بهینه‌سازی ترکیبی	۲۰۰۵	جیا و هوو
[۳۶]	ارائه مدلی چندهدفه و حل آن با استفاده از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی حرکت پرندگان	۲۰۰۹	ژانگ و همکاران
[۴]	ارائه مدل چندهدفه با امکان همپوشانی کارها و در نظر گرفتن زمان‌های بارگذاری به عنوان معیار و حل مدل با شبیه‌سازی تیریدی	۲۰۱۰	عبدی خلیفه و همکاران
[۲۳]	ارائه مدلی ترکیبی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تیریدی برای حل مسئله زمان‌بندی	۲۰۱۳	شهسواری پور و همکاران
[۱۰]	ارائه الگوریتمی ترکیبی با ساختار همسایگی جدید برای مسئله زمان‌بندی کارگاهی	۲۰۱۵	گاتو و همکاران
[۱۳]	ارائه مدلی شی‌محور برای زمان‌بندی و حل آن با شبیه‌سازی تیریدی	۲۰۱۶	کپلانگلو

بیکر (۱۹۹۰) قضایایی را برای حل مسئله زمان‌بندی خانواده قطعات در حالت کارگاهی با دو ماشین و با فرض زمان آماده‌سازی مستقل از توالی عملیات ارائه کرده است [۷]. اسکورین کاپوف و واکاریا (۱۹۹۳) یک روش جست‌وجوی ممنوع TS ارائه کرده و با روش شبیه‌سازی تیریدی مقایسه کرده‌اند [۲۷]. لاجندران و همکاران (۱۹۹۵) عملکرد چندین روش ابتکاری را در دو مرحله بررسی کرده‌اند. در مرحله اول توالی قطعات در هر خانواده قطعه و در مرحله دوم توالی خانواده قطعات مشخص می‌شود [۱۸]؛ همچنین اسچالر (۲۰۰۱) روش حل ابتکاری را در دو مرحله ارائه کرده است؛ به طوری که در مرحله اول از روش شاخه و کران برای تعیین توالی

خانواده قطعات و در مرحله دوم از روش تعویض جفتی برای تعیین توالی کارها در هر خانواده استفاده کرده است [۲۴]. در پژوهش‌های پیشین هرچند ساختار جواب به‌صورت دوارائه‌ای تعریف شده است؛ ولی هر دو روش ذکرشده، مدل را در دو مرحله حل می‌کنند که در هر مرحله از حل مدل یک ارائه از ساختار جواب ثابت فرض می‌شود (ثابت‌بودن ترتیب ورود خانواده قطعات در روش لاجندران (۱۹۹۵) و قطعات خانواده‌ها در روش اسپالز (۲۰۰۱) در مرحله اول حل مدل)، یعنی به نوعی روش‌های بالا از ساختار جواب تک‌ارائه‌ای بهره گرفته‌اند؛ به این معنا که منطقه بزرگی از جواب بررسی نشده است.

در این پژوهش از ساختار جواب دوارائه‌ای استفاده شده است؛ یعنی در تولید همسایگی علاوه بر تغییر در ترتیب ورود خانواده قطعات، ترتیب ورود هر قطعه از خانواده قطعات نیز به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کند. یکی از موضوعات مهم در روش‌های حل فراابتکاری مکانیزم تولید همسایگی در جواب‌ها است [۲۷] که در پژوهش‌های صورت‌گرفته از روش‌های جابه‌جایی مجاور (AIS) [۲۸] تصادفی (RIS) [۲۶] استفاده شده است و در تعداد اندکی نیز از روش‌هایی که منتج به بهبود در تابع هدف نیز خواهد شد به نام جابه‌جایی جهت‌دار (DIS) [۲] بهره گرفته‌اند که همسایگی‌ها در کلیه این روش‌ها فقط با توجه به تغییرات در ساختار جواب تک‌ارائه‌ای خانواده قطعات یا قطعات خانواده‌ها به‌صورت تفکیکی و مجزا تولید شده‌اند؛ ولی در این پژوهش با توجه به ساختار جدید جواب دوارائه‌ای (تغییر هم‌زمان در ارائه جواب خانواده قطعات و همچنین قطعات در هر خانواده به‌صورت هم‌زمان) از روش ترکیبی بهینه‌ی تولید همسایگی به‌طور هم‌زمان در هر دو ارائه ساختار جواب استفاده شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع ریاضی کاربردی است. مدل ارائه شده یک نوع مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است که مسئله زمان‌بندی تولید در سیستم‌های تولیدی «کارگاهی» را بررسی و حل خواهد کرد. این پژوهش درصدد ارائه پاسخی مناسب به سؤالات؛ مدل مناسب برای زمان‌بندی کارگاهی چیست؟ اهداف در طراحی این مدل کدام‌اند؟ آیا روش فراابتکاری شبیه‌سازی تیریدی قابلیت حل این مدل را دارد؟ در شبیه‌سازی تیریدی روش مناسب تولید همسایگی برای مسئله کدام است؟

در راستای اهداف و سؤالات پژوهش، در گام اول با استفاده از منابع معتبر در دسترس و شرایط حاکم بر مسئله اهداف و محدودیت‌های مدل شناسایی شد و در ادامه با توجه به

1. Adjacent Interchange Scheme
2. Random Interchange Scheme
3. Directed Interchange Scheme

مفروضات حاکم بر مسئله مدل چندهدفه ریاضی مناسب برای مسئله زمان بندی کارگاهی طراحی شد.

مسائل زمان بندی سیستم‌های تولید کارگاهی از نظر پیچیدگی محاسباتی جزء مسائل «حل نشدنی چندجمله‌ای سخت» هستند؛ بنابراین برای حل مدل از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود که در این پژوهش رویکرد شبیه‌سازی تبریدی به کار رفته است. با توجه به حجم محاسبات و پیچیده‌گی آن نرم‌افزار استاندارد و خاصی برای انجام محاسبات وجود ندارد و نرم‌افزارهای مهندسی شبیه Matlab نیز به طور کامل توانایی درج تمام شرایط و پارامترهای این نوع مدل را ندارند؛ بنابراین برای حل مدل و انجام محاسبات نیاز به کدنویسی رایانه‌ای است که در این پژوهش از زبان برنامه‌نویسی Vishual Basic نسخه ۶/۵ استفاده شده است.

مفروضات مدل. در طراحی مدل ریاضی مسئله، باتوجه به ویژگی‌ها و شرایط کاربردی، فرض‌هایی به صورت زیر مدنظر قرار گرفته است:

خانواده قطعات و فرآیند تولید قطعات مشخص است؛ موعد رسیدن هر کار به کارگاه از قبل مشخص و ثابت است؛ زمان انجام عملیات هر کار بر روی هر ماشین قطعی و غیراحتمالی است؛ امکان توقف عملیات هر کار بر روی هر ماشین وجود ندارد و هر کار تا زمان اتمام عملیات به صورت مستمر انجام می‌شود؛ ماشین‌های تولیدی همیشه در دسترس بوده و خرابی و قطع جریان عملیات وجود ندارد؛ استقرار به صورت کارگاهی است و بنابراین ترتیب انجام عملیات هر قطعه روی ماشین‌ها یکسان نیست؛ زمان انجام عملیات هر کار (قطعه) بر روی هر ماشین مستقل از سایر قطعات است؛ انجام عملیات قطعات هر خانواده به صورت متوالی تا آخرین قطعه صورت می‌پذیرد.

مدل ریاضی

اندیس‌ها و مجموعه

$$i = 1, \dots, N$$

i : شمارنده قطعات

$$f = 1, \dots, PF$$

f : شمارنده خانواده قطعات

$$j = 1, \dots, M$$

j : شمارنده ماشین

N : تعداد کل قطعات ورودی به کارگاه

PF : تعداد خانواده قطعات

M : تعداد ماشین‌آلات کارگاه

پارامترها

M: تعداد ماشین‌آلات کارگاه

 n_f : تعداد قطعات خانواده f P_{ifj} : مدت زمان عملیات قطعه i از خانواده f بر روی ماشین j ماشین‌آلات کارگاه R_{ifj} : اگر قطعه i از خانواده f به ماشین j نیاز داشته باشد D_{if} : تاریخ تحویل قطعه i از خانواده f T_{if} : مدت زمان دیرکرد قطعه i از خانواده f E_{if} : مدت زمان زودکرد قطعه i از خانواده f α_{if} : جریمه دیرکرد قطعه i از خانواده f β_{if} : جریمه زودکرد قطعه i از خانواده f**متغیرهای تصمیم**

$$X_{isf} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

$$Y_{ifr} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

اگر در توالی عملیات خانواده f قطعه i قبل از قطعه s قرار بگیرد
در غیر اینصورت

اگر خانواده قطعات f قبل از خانواده قطعات r وارد کارگاه شوند
در غیر اینصورت

زمان تکمیل عملیات قطعه i از خانواده f بر روی ماشین j = C_{ifj}

بر اساس متغیر C_{ifj} ، متغیر C_{if} و C_{max} محاسبه می‌شوند که:

C_{if} = زمان تکمیل عملیات قطعه i از خانواده f

C_{max} = بیش‌ترین زمان تکمیل عملیات کل قطعات

توابع هدف مدل. در این بخش توابع هدف (کمینه‌کردن زمان تمام ساخت و مجموعه وزنی جریمه‌های دیرکرد و زودکرد) ارائه می‌شوند.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \min (C_{max}) = \max (C_{if}) \quad f = 1, \dots, PF \quad ; \quad i = 1, \dots, n_f$$

رابطه (۲)

$$\text{MIN (WSET)} = \sum_{f=1}^{PF} \sum_{i=1}^{n_f} (\alpha_{if} \times T_{if} + \beta_{if} \times E_{if}) \quad f = 1, \dots, PF; i = 1, \dots, n_f$$

که در آن:

$$T_{if} = \text{Max}(0, C_{if} - D_{if}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$E_{if} = \text{Max}(0, D_{if} - C_{if}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

محدودیت‌های مدل. محدودیت‌های مدل با توجه به ترتیب و توالی انجام عملیات قطعات در خانواده‌ها و همچنین ترتیب و توالی ورود خانواده قطعات به کارگاه به شرح زیر است:

$$C_{sfj} - C_{ifj} + Q \times (1 - X_{isf}) \geq P_{sfj} \times R_{sf}^j \quad f = 1, \dots, PF; i, s = 1, \dots, n_f \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C_{ifj} - C_{sfj} + Q \times (X_{isf}) \geq P_{ifj} \times R_{if}^j \quad j = 1, \dots, m_k \quad \text{رابطه (۶)}$$

رابطه‌های ۵ و ۶ نشان‌دهنده این موضوع هستند که اگر قطعات i و s به‌طور هم‌زمان به ماشین j نیاز داشتند، تداخل زمانی رخ ندهد و متناسب با ترتیب تعیین‌شده بر روی ماشین موردنظر قرار بگیرند.

$$C_{irj} - C_{ufj} + Q \times (1 - Y_{fr}) \geq P_{irj}; r, f = 1, \dots, PF; i = 1, \dots, n_r \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$C_{ufj} - C_{irj} + Q \times (Y_{fr}) \geq P_{ufj} \quad u = 1, \dots, n_f; j = 1, \dots, m_k \quad \text{رابطه (۸)}$$

رابطه‌های ۷ و ۸ تضمین‌کننده انجام عملیات خانواده قطعات به‌ترتیب تعیین‌شده برای آنها است.

$$C_{1fj} \geq P_{1fj} \times R_{1f}^j \quad f = 1, \dots, PF; j = 1, \dots, m_k \quad \text{رابطه (۹)}$$

رابطه ۹ نیز نشان‌دهنده این موضوع است که زمان تکمیل قطعه اول از خانواده f حداقل از مدت زمان انجام عملیات آن قطعه بزرگ‌تر است.

$$C_{if} \geq C_{ifj} \quad f = 1, \dots, PF; i = 1, \dots, n_i; j = 1, \dots, m_k \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

رابطه ۱۰ نیز نشان‌دهنده نحوه محاسبه زمان تکمیل قطعه i از خانواده f است.

$$\begin{aligned} X_{isf} = 0,1 \quad Y_{fr} = 0,1 ; C_{ifj} \geq 0 \\ r, f = 1, \dots, PF ; i, s = 1, \dots, n_f ; j = 1, \dots, m_k \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

رابطه ۱۱ نیز نشان‌دهنده محدودیت متغیرها از لحاظ مقدار و علامت است.

در مدل برنامه‌ریزی آرمانی مفروضات، نمادها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های سیستمی همان مقادیر مدل برنامه‌ریزی خطی است، تنها محدودیت آرمانی اضافه می‌شود و تابع هدف متفاوت هستند [۳].

محدودیت‌های آرمانی در مدل برنامه‌ریزی آرمانی با توجه به آرمان‌های تعریف‌شده برای هر کدام از اهداف ایجاد می‌شوند؛ بدین صورت که اگر آرمان‌های تعریف‌شده برای اهداف مدل برنامه‌ریزی خطی به ترتیب G_1 برای هدف $\text{MIN}(C_{\max})$ و G_2 برای هدف $\text{MIN}(WSET)$ باشند، در نتیجه:

$$\text{MIN}(C_{\max}) = \text{Max}(C_{if}) \leq G_1 \quad f=1, \dots, PF ; i=1, \dots, n_f$$

و از آنجا که انحراف از آرمان در برنامه‌ریزی آرمانی قابل قبول است، در نتیجه:

$$\text{MIN}(C_{\max}) = \text{Max}(C_{if}) + d_1^- - d_1^+ = G_1 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

و به همین منوال برای تابع هدف $WSET$:

$$\begin{aligned} \text{MIN}(WSET) = \sum_{f=1}^9 \sum_{i=1}^{n_f} ((\gamma \times T_{if}) + E_{if}) \leq G_2 \quad f = 1, \dots, 9 ; i = 1, \dots, n_f \\ \text{رابطه (۱۳)} \quad \text{MIN}(WSET) = \sum_{f=1}^9 \sum_{i=1}^{n_f} ((\gamma \times T_{if}) + E_{if}) + d_2^- - d_2^+ = G_2 \\ d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+ \geq 0 \end{aligned}$$

برای نوشتن تابع هدف آرمانی ابتدا باید انحرافات مطلوب و نامطلوب شناسایی شود که با توجه به تعریف انحرافات مطلوب و نامطلوب برای تابع هدف کمینه‌کردن زمان ساخت یعنی $\text{MIN}(C_{\max})$ انحرافات بیش‌تر محقق‌شده یعنی (d^+) نامطلوب، و برای تابع هدف کمینه‌کردن جریمه‌های زودکرد و دیرکرد یعنی $\text{MIN}(WSET)$ هر دو انحرافات کمتر محقق‌شده و بیشتر محقق‌شده، نامطلوب هستند. از آنجا که تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی کمینه‌کردن مجموعه انحرافات نامطلوب است، در نتیجه:

$$\text{رابطه (۱۴)} \quad \text{MIN}(G) = d_1^+ + d_2^- + d_2^+ \\ d_1^+ = C_{\max} - G_1 ; d_2^- = G_2 - \text{WSET} ; d_2^+ = \text{WSET} - G_2$$

با توجه به اینکه مقادیر C_{\max} و WSET جمع پذیر نیستند (اولی از جنس زمان و دومی از جنس ریال است)؛ بنابراین با تقسیم هر کدام از متغیرهای d_2^- و d_2^+ بر مقدار آرمانشان، بی قیاس شده و سپس جمع می شوند.

$$d_1^+ = \frac{C_{\max} - G_1}{G_1} ; d_2^- = \frac{G_2 - \text{WSET}}{G_2} ; d_2^+ = \frac{\text{WSET} - G_2}{G_2}$$

از آنجا که فقط یکی از دو متغیر d_2^- و d_2^+ مقدار مثبت می گیرند؛ بنابراین مقدار G در دو حالت رخ می دهد:

$$\text{MIN}(G) = \begin{cases} d_1^+ + d_2^- \rightarrow \frac{C_{\max} - G_1}{G_1} + \frac{G_2 - \text{WSET}}{G_2} ; \text{ if } d_2^- \geq 0 \quad (G_2 \geq \text{WSET}) \\ d_1^+ + d_2^+ \rightarrow \frac{C_{\max} - G_1}{G_1} + \frac{\text{WSET} - G_2}{G_2} ; \text{ if } d_2^+ \geq 0 \quad (G_2 \leq \text{WSET}) \end{cases}$$

که با ساده سازی در نهایت تابع هدف زیر به دست می آید:

$$\text{MIN}(G) = \begin{cases} \frac{C_{\max}}{G_1} - \frac{\text{WSET}}{G_2} ; \text{ if } (G_2 \geq \text{WSET}) \\ \frac{C_{\max}}{G_1} + \frac{\text{WSET}}{G_2} - 2 ; \text{ if } (G_2 \leq \text{WSET}) \end{cases}$$

شبیه سازی تبریدی. رو پولیس و همکاران (۱۹۵۳)، نخستین بار ایده اصلی در روش SA را مطرح کردند [۲۰]. کرک پاتریک و همکاران (۱۹۸۳) مفهوم SA را برای مسائل بهینه سازی ترکیبی به کار بردند [۱۵]. در این الگوریتم جواب های غیر قابل قبول که تابع هدف را بدتر کرده اند نیز با احتمال زیر پذیرفته می شوند [۳۲].

$$P(\Delta E) = e^{\frac{\Delta E}{K_b \times T}} \quad \text{Kb: ثابت بولتزمن} , \quad T: \text{درجه حرارت}$$

روش تولید همسایگی. مکانیزم تولید همسایگی دارای اهمیت زیادی در روش SA است [۲۳]. روش های تولید همسایگی عبارتند از: روش جابه جایی تصادفی (RIS) [۲۷]، روش جابه جایی مجاور (AIS) [۲۸] و روش جابه جایی جهت دار (DIS) [۲].

درجه حرارت اولیه و نهایی. بر اساس مطالعات وایت (۱۹۸۳) دمای اولیه سیستم معادل انحراف معیار مقادیر تابع هدف از میانگین آن است (رابطه ۱۵).

$$\text{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{OBJ}_i}{N}$$

$$T_0 = \text{SD} = \left[\frac{\sum_{j=1}^N (\text{OBJ}_j - \text{Mean})^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در این پژوهش نیز تعداد ۱۰۰۰۰ جواب برای هر تابع هدف تولید شد و انحراف معیار هر کدام به‌عنوان درجه حرارت اولیه حل مدل با همان تابع هدف قرار گرفت (جدول ۲). مقدار درجه حرارت نهایی نیز معادل ۱۰٪ درجه حرارت اولیه در نظر گرفته شد ($T_f = 0.1 \times T_0$).

جدول ۲. مقادیر درجه حرارت اولیه و نهایی برای اهداف

تابع هدف	پارامتر	تابع هدف C_{\max}	تابع هدف WSET	تابع هدف G
انحراف معیار تابع T_0		۶۰	۶۰۰	۰/۶
T_f		۶	۶۰	۰/۰۶

نحوه تغییر درجه حرارت. برای کاهش درجه حرارت از تابع هندسی به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$T_{r+1} = \alpha \cdot T_r$$

T_r : درجه حرارت در مرحله r ; α : ضریب کاهش درجه حرارت، در این پژوهش ضریب α برابر ۰/۹ انتخاب شده است؛ یعنی در هر مرحله درجه حرارت به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

شرط تعادل. شرط‌های ۱ و ۲ برای برقراری تعادل استفاده می‌شوند [۳۱، ۵]:

$$\frac{|\bar{f}_e(\text{Tr}) - \bar{f}_g(\text{Tr})|}{\bar{f}_g(\text{Tr})} \leq \epsilon_1 \quad \text{شرط ۱}$$

$$\bar{f}_e(\text{Tr}) = \frac{\sum_{i=1}^e f_i(\text{Tr})}{e} \quad \text{که در این رابطه:}$$

$$L = M + [M \times F] \quad \text{شرط ۲}$$

در شرط ۲ تعداد جواب رده شده کنترل می‌شود. M حداکثر تعداد جواب پذیرفته شده در یک مرحله آنیل کردن و F نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$F = 1 - e^{-((f_h - f_l)/f_h)}$$

که در آن f_h و f_l به ترتیب بیشترین مقدار و کمترین مقدار جواب تولیدشده در درجه حرارت مربوطه است.

شرط توقف. در الگوریتم پیشنهادی SA برای بررسی شرط توقف، یکی از دو حالت زیر کنترل می شود:

رسیدن به درجه حرارت نهایی T_f یا رسیدن به اولین مقدار T_r که در رابطه ذیل صدق نماید.

$$V(T_r) = \frac{1}{n} (T_r) - [\sum_{i=1}^n f_i^2 \bar{f}(T_r)]^2$$

$$S(T_r) = \frac{V(T_r)}{T_r \times [\bar{f}(T_0) - \bar{f}(T_r)]} \leq \varepsilon 2$$

توضیح ۲: بدیهی است از آنجاکه برای دوره اول $T_r = T_0$ ($r=1$) است؛ بنابراین این شرط از دوره دوم به بعد کنترل می شود.

فهرست علائم و پارامترهای به کار رفته در الگوریتم شبیه سازی تبریدی (شکل ۲) به صورت زیر است:

T_0 : درجه حرارت اولیه

T_f : درجه حرارت نهایی

T_r : درجه حرارت در مرحله r ام

M : حداکثر تعداد جواب های پذیرفته شده در هر درجه حرارت

c : طول دوره یا تعداد تعویض های پذیرفته شده در هر دوره برای بررسی تعادل

α : ضریب کاهش درجه حرارت در هر مرحله (عدد اعشاری بین صفر و یک)

ε_1 : عدد مثبت و کوچک برای بررسی شرط تعادل سیستم در درجه حرارت T_r

ε_2 : عدد مثبت و کوچک برای بررسی شرط توقف (نقطه انجماد)

$\bar{f}_e(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای حالت های پذیرفته شده در هر دوره در درجه حرارت T_r

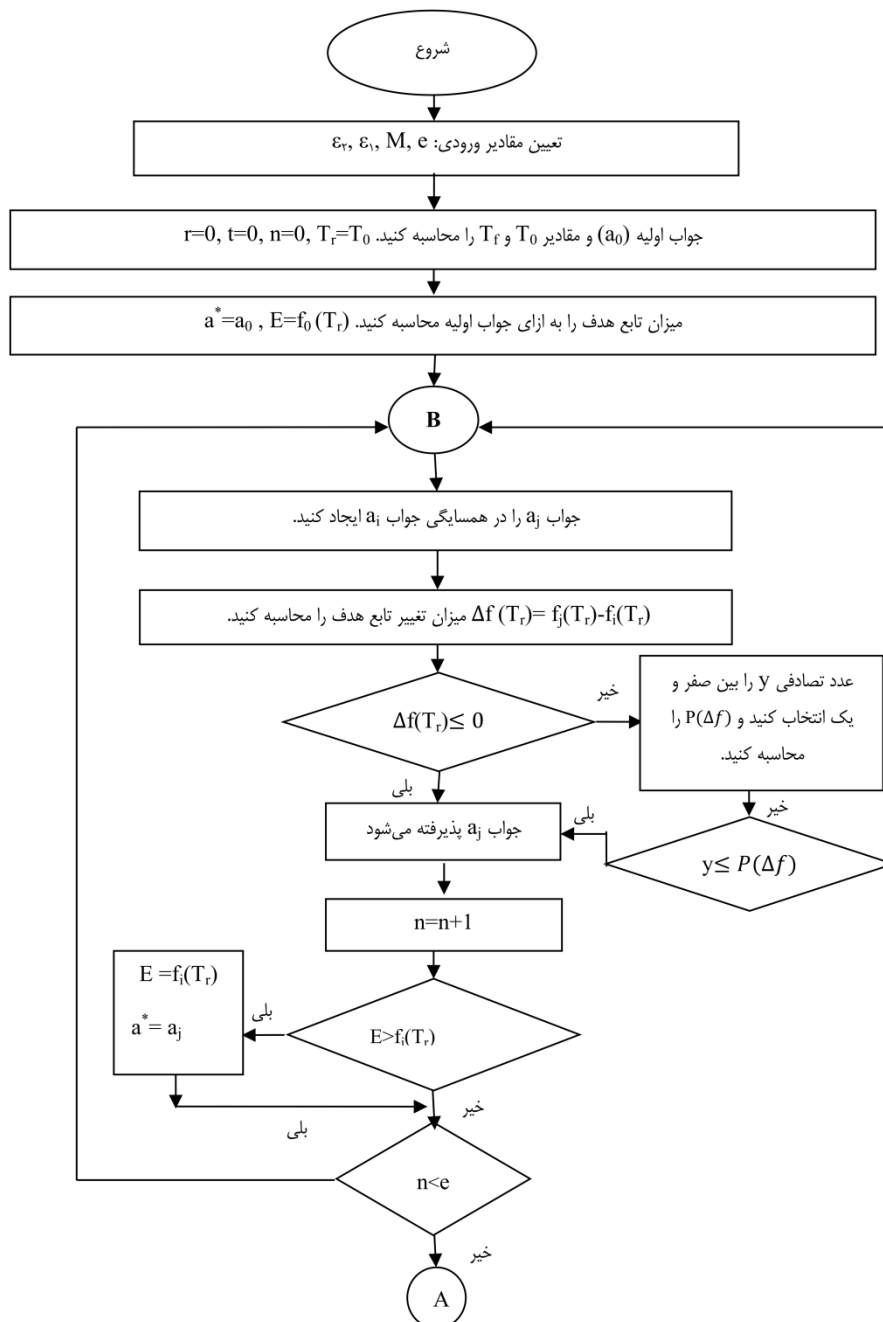
$\bar{f}_g(T_r)$: متوسط مقادیر \bar{f}_e برای تمام دوره های قبلی در درجه حرارت T_r

$\bar{f}(T_r)$: متوسط مقدار تابع هدف برای کلیه حالت های پذیرفته شده تا رسیدن به شرط تعادل در

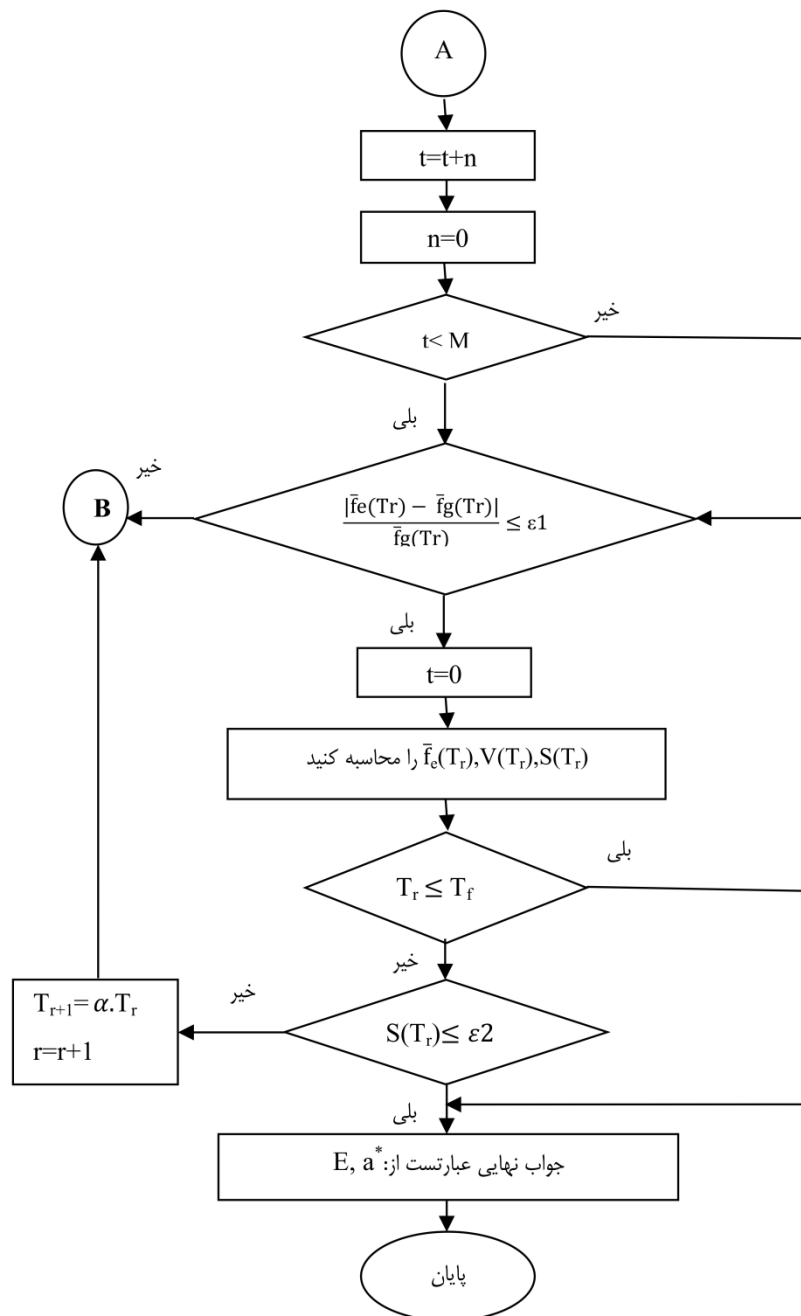
درجه حرارت T_r

$f_i(T_r)$: میزان تابع هدف با توجه به جواب a_i

a_i : جواب امکان پذیر



شکل ۲. الگوریتم کلی SA



ادامه شکل ۲. الگوریتم کلی SA

مورد مطالعه. مورد مطالعه در این پژوهش «شرکت توربوکمپرسور نفت (OTC)» است که اولین تولیدکننده توربین‌های گازی ۲۵ مگاوات زیمنس (مدل SGT600) است، مهم‌ترین مجموعه‌ها و قطعات این محصول (مجموعه‌های روتور، استاتور و بدنه‌های اصلی) در کارخانه OTC واقع در شهرک صنعتی شمس‌آباد تولید می‌شود. هدف مدل طراحی شده در این پژوهش ارائه یک سیستم برنامه‌ریزی تولید برای قطعات و مجموعه‌های این کارخانه است. اطلاعات موردنیاز مدل از مجموعه مورد مطالعه استخراج شد و با توجه به تعریف خانواده قطعات (شباهت فرآیند تولید) قطعات این کارخانه در ۹ خانواده قطعه شکل گرفت. سپس اطلاعات فرآیند تولید از لحاظ ترتیب عملیات، زمان عملیات و ماشین مورد نیاز عملیات دریافت شد.

N: تعداد کل قطعات ورودی به کارگاه = ۳۹

PF: تعداد خانواده قطعات = ۹

M: تعداد ماشین‌آلات کارگاه = ۴۶

اهداف مورد انتظار مدل، کمینه‌کردن زمان تحویل کل قطعات و کمینه‌کردن مجموعه جریمه‌های دیرکرد و زودکرد تولید قطعات است، معیارهای موردنظر برای محاسبه جریمه دیرکرد، میزان سود از دست‌رفته به‌ازای هر محصول و برای زودکرد هزینه‌های انبارداری، حقوق و سربار تعیین شد. با توجه به ظرفیت اسمی کارخانه و دو نوبت کاری چرخه تولید هر توربین C_p است و با توجه به قیمت و سود هر توربین و اطلاعات دریافتی از کارخانه نسبت جریمه دیرکرد به زودکرد هر قطعه برابر با γ محاسبه شد.

P = سود هر محصول ; Pr = قیمت محصول

C_p = درصد سود = $i\%$; $i\%$ = سیکل تولید هر محصول

$Pr = i\% \times P$

$\alpha = \frac{Pr}{C_p} =$ جریمه دیرکرد هر روز هر محصول

h = هزینه سربار هر روز ; oh = هزینه نگهداری هر روز محصول

hrc = هزینه حقوق هر روز بخش انبار

$\beta = h + oh + hrc =$ جریمه زودکرد هر روز هر محصول

$\frac{\alpha}{\beta} = \gamma$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

ساختار جواب و روش تولید همسایگی. در این پژوهش ساختار جدید جواب دوارائه‌ای؛ یک ارائه برای خانواده قطعات (PF-1, PF, ..., ۲, ۱) و دیگری برای قطعات هر خانواده ($n_f-1, n_f, n_f-1, n_f, \dots, ۲, ۱$) در نظر گرفته شده است.

روش های تولید همسایگی معمول عبارت از: روش جابه جایی تصادفی (RIS)، روش جابه جایی مجاور (AIS) و روش جابه جایی جهت دار (DIS) هستند؛ ولی از آنجا که ساختار جواب این پژوهش دوارائه ای است؛ بنابراین باید برای تولید همسایگی جدید هم زمان تغییر در هر دو ارائه رخ دهد. با بررسی جایگشت های روش تولید همسایگی در ساختار جواب خانواده و قطعات، حالت «جابه جایی جهت دار» در خانواده و «جابه جایی تصادفی» در قطعات نتایج بهتری داشت و در این پژوهش از آن استفاده شده است. جدول ۳ نتایج ۵ بار اجرای جداگانه برنامه حاصل از تولید همسایگی به روش ترکیبی برای هر تابع هدف را نشان می دهد.

جدول ۳. مقادیر بهینه اهداف در الگوریتم شبیه سازی تبریدی در حالت تولید همسایگی به روش DIS-RIS

شماره اجرا	C_{max}	WSET	G
۱	۱۹۴	۱۵۶۹۸	۰/۸۴
۲	۱۸۱	۱۸۲۵۴	۰/۹۲
۳	۱۷۲	۱۸۶۱۶	۰/۹۸
۴	۱۶۹	۱۸۵۴۵	۰/۷۵
۵	۱۷۲	۱۶۲۱۷	۰/۸۷
میانگین	۱۷۸	۱۷۴۶۶	۰/۷۸

حل مدل. با توجه به اطلاعات مورد مطالعه و استفاده از ساختار جدید جواب و روش ترکیبی بهینه تولید همسایگی مدل با اجرای نرم افزار در سه حالت مختلف کمینه کردن G و $WSET$ ، C_{max} حل شد که بهترین جواب های به دست آمده در جدول ۴ درج شده است.

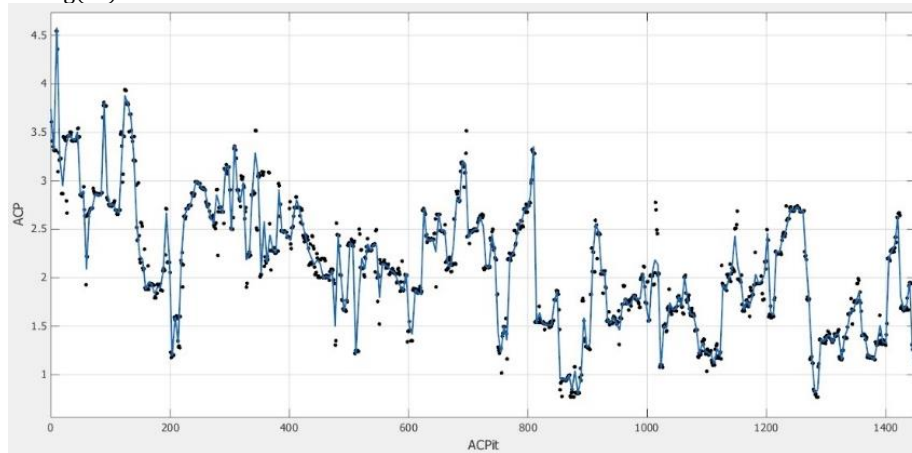
جدول ۴. مقادیر بهینه توابع هدف

G	(C,W)	Optimum	تابع هدف
۱/۲۹	(۱۶۹/۳۲۱۸۹)	$C^*=۱۶۹$	تک هدفه $MIN(C_{max})$
۱/۳۴	(۲۵۶/۱۵۶۹۸)	$W^*=۱۵۶۹۸$	تک هدفه $MIN(WSET)$
۰/۷۴	(۱۶۹/۱۸۱۷۴۶)	$G^*=۰,۷۵$	چند هدفه $MIN(G)$

با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش حل مدل با استفاده از برنامه ریزی آرمانی است؛ بنابراین نمودارهای بعدی همگی با مقادیر تابع هدف آرمانی (G) مرتبط هستند. نمودار ۱ نشان دهنده مقادیر تابع هدف و جواب های پذیرفته شده در الگوریتم شبیه سازی تبریدی بوده و کاملاً واضح است که مقادیر علاوه بر نزولی بودن به سمت هم گرایی و کاهش انحراف

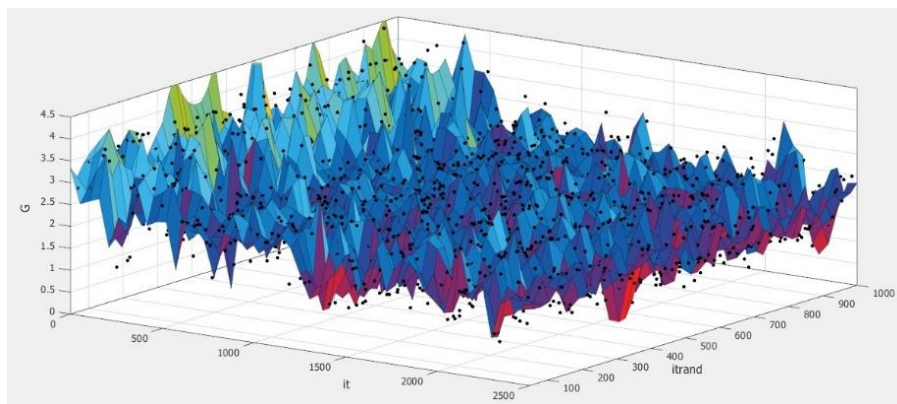
معیار نیز پیش می‌رود که نشان‌دهنده شرط تعادل در الگوریتم شبیه‌سازی تیریدی (شرط ۱) است.

$$\frac{|\bar{f}_e(\text{Tr}) - \bar{f}_g(\text{Tr})|}{\bar{f}_g(\text{Tr})} \leq \varepsilon_1$$



نمودار ۱. مقادیر پذیرفته شده در مدل در حالت آرمانی

نمودار ۲ نشان‌دهنده کل منطقه جوابی است که الگوریتم شبیه‌سازی تیریدی در آن به جستجو پرداخته است.



نمودار ۲. منطقه جواب مورد جستجوی الگوریتم شبیه‌سازی تیریدی

با توجه به نتایج جدول ۴:

$$G^* = 0.75 \rightarrow (C_{\max} = 169 ; WSET = 18746)$$

با توجه به اینکه $G_2 \geq WSET$ شده است ($18746 > 20000$)؛ بنابراین مقادیر متغیرهای مدل آرمانی عبارتند از:

$$d_1^+ = 169 - 100 = 69; d_2^- = 20000 - 18746 = 1254; d_2^+ = 0$$

- مقادیر متغیرهای مدل اصلی نیز به ازای ارائه‌های ساختار جواب بهینه عبارت‌اند از:
- ارائه بهینه توالی ورود خانواده قطعات به کارگاه به ترتیب ۲، ۶، ۴، ۷، ۳، ۱، ۹، ۵ و ۸؛
 - ارائه بهینه توالی ورود قطعات هر خانواده به کارگاه نیز مطابق با جدول ۵ است.

جدول ۵. توالی ورود قطعات هر خانواده به کارگاه

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
۶	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱
۱	۲	۱	۱	۲	۳	۰	۱	۲
۹	۰	۰	۰	۴	۵	۰	۰	۳
۸	۰	۰	۰	۳	۷	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰	۰	۹	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۱۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۸	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۱۲	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰	۰	۶	۰	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۰

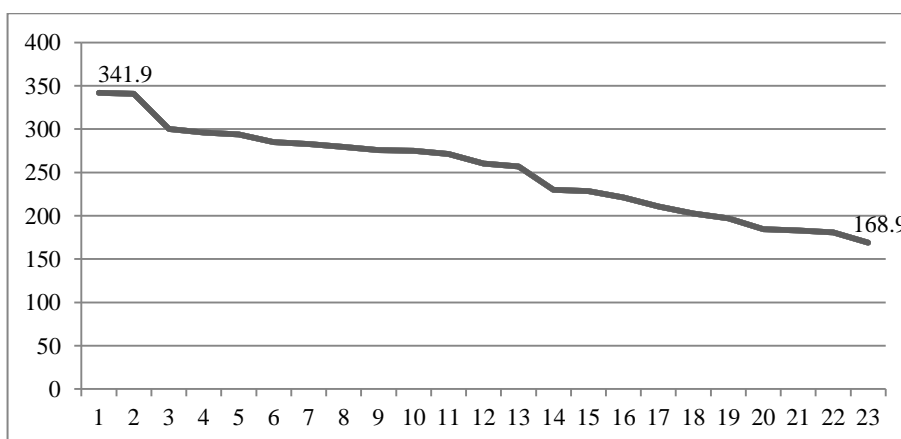
اعتبارسنجی مدل. با توجه به اینکه نوآوری این پژوهش در دو بخش: روش تولید همسایگی و ارائه مدل با اهداف چندگانه است؛ بنابراین اعتبار مدل در هر دو بخش با اجرای مدل‌های متعدد ارزیابی. در این پژوهش برای جلوگیری از دست‌دادن بخشی از منطقه جواب از ساختار جواب ترکیبی (دوبعدی) برای تولید همسایگی استفاده شده است. با توجه به اینکه در مبانی نظری پژوهش روش‌های تولید همسایگی معمول عبارت‌اند از: روش جابه‌جایی تصادفی (RIS)، روش جابه‌جایی مجاور (AIS) و روش جابه‌جایی جهت‌دار (DIS)، می‌توان شش حالت برای روش‌های تولید همسایگی تعریف کرد. هر کدام از روش‌های ترکیبی به صورت جداگانه پنج بار برای هر یک از سه حالت مساله حل شد. جدول ۶ میانگین نتایج هر روش ترکیبی برای حالت‌های مختلف حل مسئله را نشان می‌دهد.

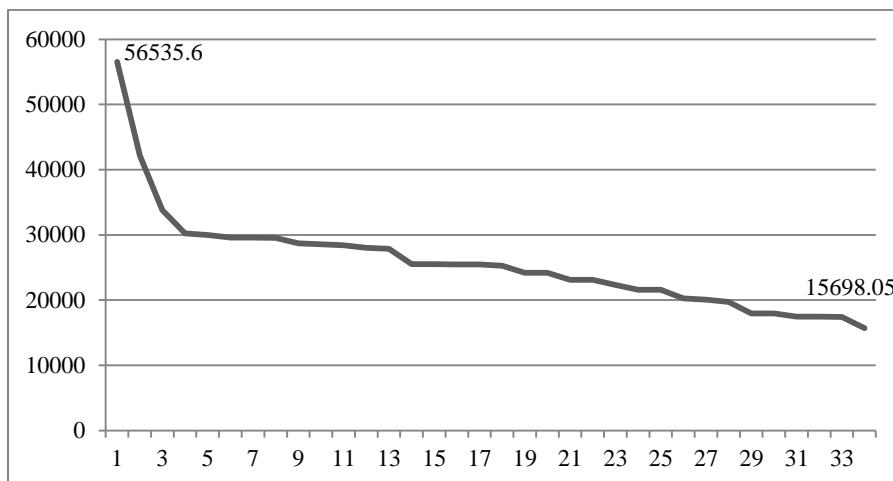
جدول ۶: نتایج اجرای مدل برای روش‌های مختلف تولید همسایگی

G	WSET	C _{max}	حالت حل مسئله
			روش تولید همسایگی
۱/۱۲	۲۰۵۰۰	۱۹۲	RIS-RIS
۱/۱۹	۲۱۳۰۶	۱۹۹	RIS-AIS
۱/۳۱	۲۲۴۱۴	۱۹۰	AIS-RIS
۱/۰۴	۲۲۶۰۲	۱۹۶	AIS-AIS
۰/۸۷	۱۷۴۶۶	۱۷۸	DIS_RIS
۱/۰۲	۲۱۱۵۵۶	۱۸۶	DIS-AIS

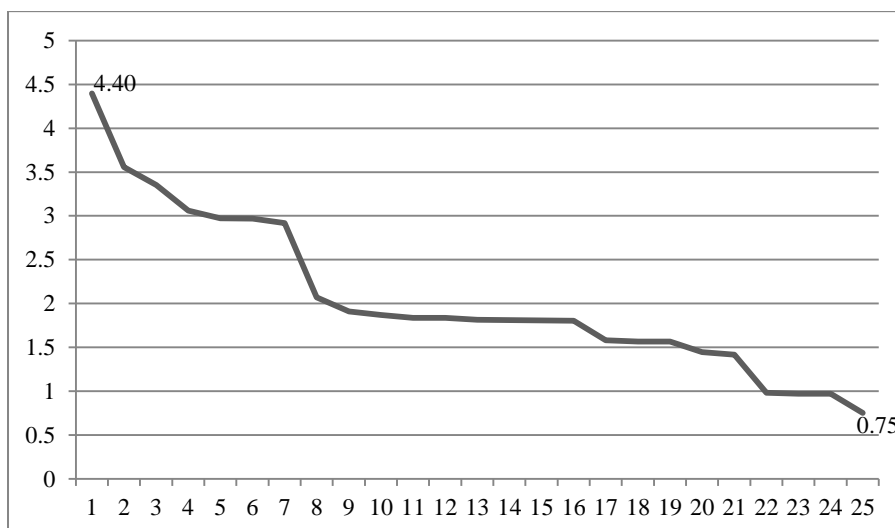
نتایج ارائه‌شده در جدول ۶ نشان‌دهنده کارآمدی روش ترکیبی DIS-RIS در حالت‌های مختلف حل مسئله است.

برای بررسی کارآمدی حالت‌های مختلف حل مسئله، از سرعت یافتن جواب استفاده شده است. نمودار ۳، سرعت دستیابی به جواب را برای حالت کمینه‌کردن زمان ساخت، نمودار ۴، سرعت دستیابی به جواب را برای حالت کمینه‌کردن هزینه‌های دیرکرد و زودکرد و نمودار ۵، سرعت دستیابی به جواب را برای حالت کمینه‌کردن توأم زمان ساخت و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد نشان می‌دهد.

نمودار ۳. سرعت دستیابی به تابع هدف در حالت کمینه‌کردن زمان ساخت (C_{Max})



نمودار ۴. سرعت دستیابی به تابع هدف در حالت کمینه‌کردن هزینه‌های دیرکرد و زودکرد (WSET)



نمودار ۵. سرعت دستیابی به تابع هدف در حالت کمینه‌کردن کمینه‌کردن توامان زمان ساخت و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد (G)

نتایج ارائه‌شده در نمودار ۳ تا ۵ نشان‌دهنده سرعت نسبتاً خوب مدل آرمانی نسبت به دو مدل دیگر در دستیابی به جواب مسئله است؛ همچنین بررسی دقیق‌تر نتایج نشان‌دهنده این است که در مدل C_{max} از ۲۹۴۷ جواب، ۲۳ بار، در مدل WSET از ۲۳۴۱ جواب، ۳۴ بار و در مدل G از ۲۴۳۴ جواب، ۲۵ بار بهینه‌یابی صورت گرفته است؛ بنابراین تعداد جواب و تعداد دفعه بهینه‌یابی مدل نیز دلیل دیگری بر کارآمدی مدل توسعه داده شده در این پژوهش است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش ابتدا سیستم تولیدی کار کارگاهی تعریف شد و به اهمیت زمان‌بندی در سیستم‌ها پرداخته شد و سپس مدل ریاضی جدیدی برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی به صورت چندهدفه (کمینه‌کردن بیش‌ترین زمان ساخت (C_{max}) و کمینه‌کردن جمع وزنی جریمه‌های زودکرد و دیرکرد کارها (WSET) ارائه شد. از آنجاکه مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی جز مسائل «حل‌نشده‌ی چندجمله‌ای سخت» هستند، برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبریدی استفاده شد؛ از طرفی در این پژوهش از ساختار جواب دوارائه‌ای استفاده شده است؛ یعنی علاوه بر تغییر در ترتیب ورود خانواده قطعات، ترتیب ورود هر قطعه از خانواده قطعات نیز به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کند و به این معنا است که مدل در فضای جواب بزرگ‌تری جست‌وجو می‌کند و درخصوص تولید همسایگی نیز در این پژوهش با توجه به ساختار جدید جواب دوارائه‌ای از روش ترکیبی بهینه‌ی تولید همسایگی استفاده شده است. با توجه به کارایی مدل جدید در کمینه‌سازی بیش‌ترین زمان ساخت و جریمه‌های زودکرد و دیرکرد از این مدل می‌توان برای زمان‌بندی تولید در سیستم‌های تولید کارگاهی استفاده کرد.

با توجه به مفروضات تعریف‌شده برای مسئله که نشان‌دهنده محدودیت‌های پژوهش است، پیشنهاد می‌شود پژوهشگران براساس ساختار پیشنهادی در این پژوهش در مطالعات آینده موارد زیر را بررسی کنند: متغیربودن زمان رسیدن کارها به کارگاه، زمان‌های عملیات احتمالی و غیرقطعی، در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی قطعات و ماشین‌آلات برای عملیات به‌طور مجزا، امکان توقف عملیات بر روی ماشین، در نظر گرفتن امکان خرابی و نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات، مدل‌سازی بر اساس تغییر پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی، مدل‌سازی بر اساس روش حل ترکیبی شبیه‌سازی تبریدی و جست‌وجوی ممنوع (به‌منظور جلوگیری از تولید جواب‌های تکراری)، بررسی روش‌های متفاوت تولید همسایگی (با توجه به توزیع زمان‌های عملیات و وجود یا عدم‌وجود گلوگاه کاری توسط یک قطعه و یا یک خانواده خاص)، در نظر گرفتن اندازه دسته در مدل، در نظر گرفتن امکان برون‌سپاری و تولید ترکیبی (ترکیبی از تولید کارگاه و پیمان‌کاران).

منابع

۱. فرناز، برزین‌پور (۱۳۸۳). زمان‌بندی در سیستم‌های تولید سلولی با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
۲. برزین‌پور، فرناز؛ ذگردی، سید حسام‌الدین (۱۳۷۸). ارائه روش SA برای زمان‌بندی در سیستم‌های تولید سلولی با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی. نشریه علمی و پژوهشی/امیرکبیر، ۱۱۱-۱۲۴.
۳. مومنی، منصور (۱۳۹۲). مباحث نوین پژوهش در عملیات. تهران، ناشر مولف.
4. Abdi, K. M., Abbasi, B. & Dolat Abadi A. (2010). A Simulated Annealing Algorithm for Multi Objective Flexible Job Shop Scheduling With Overlapping In Operations. *Journal of Industrial Engineering*, 5, 17-28.
5. Ali, M. M., Torn, A. & Viitanen, S. (2002). A direct search Variant of the simulated annealing algorithm for optimization involving continuous variables. *Computer and Operations Research*, 29, 87-102
6. Bagheri, A., & Zandieh, M., Mahdavi, I., Yazdani, M. (2010). An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Future Gener. Comput. Syst.* 26, 533-541.
7. Baker, K. (1990). Scheduling Groups of Jobs in the Two-Machine Flow Shop. *Mathematical, Computers and Modeling*, 13(3), 29- 36.
8. Fattahi, P., Saidi, M., Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *J. Intel. Manuf.* 18, 331-342.
9. Frazier, G.V. (1996). An Evaluation of Group Scheduling Heuristics in a Flow-line Manufacturing Cell. *International Journal of Production Research*, 34(4), 959- 976.
10. GAO, L., Li, X., Wen, X., Lu, C., & Wen, F. (2015). A hybrid algorithm based on a new neighborhood structure evaluation method for job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 417-429.
11. Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117-129.
12. Groover, M.P. (2008). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall.
13. Kaplanoğlu, V. (2016). An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 45, 71-84.
14. Khan, W.A., Raouf, A., Cheng, K. (2011). *Virtual Manufacturing*. Retrieved from <http://www.springer.com/978-0-85729-185-1>
15. Kirkpartick, S., Gelatt, C.D.Jr. & Vecchi, M.P. (1983). *Science*, 220, 4598, 671.
16. Krishna, K., Ganeshan, K., & Janaki Ram, D. (1995). Distributed Simulated Annealing Algorithms for job shop scheduling. *IEEE TRANSACTION ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, 25(7).
17. Krishnamoorthy, B. & Kamath, M. (2000). Scheduling in a Cellular Manufacturing Environment. A Review of Recent Research, *Engineering Valuation and Cost Analysis*, 2, 409-423.
18. Logendran, R., Mai, L., Talkington, D. (1995). Combined Heuristics for Bi-level Group Scheduling Problems. *International Journal Production Economics*, 38, 133- 145.

19. Mahmoodi, F., Dooley, K. J. & Starr, P. J. (1990). An Investigation of Dynamic Group Scheduling, Heuristics in a Job shop Manufacturing Cell. *International Journal of Production Research*, 28(9), 1695-1711.
20. Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., Teller, E. (1953). *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087.
21. Miltenburg, J. (2008). Setting manufacturing strategy for a factory-within-a-factory. *International Journal of Production Economics*, 113, 307- 323.
22. Naderi, B., Fatemi Ghomi, S.M.T., Aminnayeri, M., Zandieh, M. (2011). Scheduling open shops with parallel machines to minimize total completion time. *J. Comput. Appl. Math.* 235, 1275-1287.
23. Shahsavari-Pour, N., & Ghasemishabankareh, B. (2013). A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 771-780.
24. Schaller, J. E. (2001). A New Lower Bound for the Flow Shop Group Scheduling Problem. *Computers and Industrial Engineering*, 41, 151-161.
25. Shafer, S. M., & Charnes, J. M. (1995). A simulation analysis of factors influencing loading practices in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, 33(1), 279-290.
26. Shih, W.L., Chien, Y.H., Chung, C.L, Kuo-Ching Ying (2012). Minimizing Total Flow Time in Permutation Flowshop Environment. *International Journal of Innovative Computing*, 8(10), 6599-6612.
27. Skarin - Kapov, J., & Vakharia, A. J. (1993). Scheduling a Flow – line Manufacturing Cell: a Taboo. Search Approach, *International Journal of Production Research*, 31(7), 1721-1734.
28. Sridhar, J., & Rajendran, C. (1993). Scheduling in a Cellular manufacturing System: A simulated annealing Approach. *International Journal of Production Research*, 31(12), 2927-2945.
29. Solimanpur, M., Vrat, P., & Shankar, R. (2004). A heuristic to minimize makespan of cell scheduling problem. *International journal of production economics*, 88(3), 231-241.
30. Suer, G. A., Saiz, M., & Gonzalez, W. (1999). Evaluation of manufacturing cell loading rules for independent cells. *International Journal of Production Research*, 37(15), 3445-3468.
31. Vahit, K. (2015). An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*. 45, 71-84.
32. Wilhelm, M.R., & Ward, T.L. (1987). Solving Quadratic Assignment Problem by Simulated Annealing. *IIE Transactions*, 19, 109-119.
33. Xia, W., & Wu, Z. (2005). An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 48(2), 409-425.
34. Xingong, Z., Yong, W. (2015). Single-machine scheduling CON/SLK due window assignment problems with sum-of-processed times based learning effect. *Applied Mathematics and Computation*. 250, 628-635.
35. Yang, W. H. (2002). Group scheduling in a two-stage flowshop. *Journal of the Operational Research Society*, 53(12), 1367-1373.
36. Zhang, G., Shao, X., Li, P., & GAO, L. (2009). An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4), 1309-1318.

37. Zhang, R., Wu, C. (2011). A simulated annealing algorithm based on block properties for the job shop scheduling problem with total weighted tardiness objective. *Computers & Operations Research*. 38, 854-867.
38. Zhang, R. (2013). A Simulated Annealing-based Heuristic Algorithm for Job Shop Scheduling to Minimize Lateness. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 10, 214.