E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 4 (2024) 975–992.

Paper Type: Original Article

Presenting a Multi-Objective Mathematical Model with an Integrated Approach to Scheduling and Financial Flow in Production Projects Using NSGA-II

Sajad Janbaz[1], Sayyed Mohammad Reza Davoodi[1,*], Abdolmajid Abdolbaghi[2]

[1] *Department of Management, Dehaghan Branch, Islamic Azad University, Dehaghan, Iran; sajad.janbaz@iran.ir; smrdavoodi@ut.ac.ir.*

[2] *Department of Management, School of Industrial Engineering and Management, Shahrood, Iran; abdolbaghi@shahroodut.ac.ir.*

Citation:

Janbaz, S., Davoodi, S. M. R., & Abdolbaghi, A. (2024). Presenting a multi-objective mathematical model with an integrated approach to scheduling and financial flow in production projects using NSGA-II. *Journal of decisions and operations research, 8*(4), 975-992.

Received: 14/10/2022 Reviewed: 15/11/2022 Revised: 09/12/2022 Accepted: 01/02/2023

Abstract

Purpose: The current research aims to present a multi-objective mathematical model with an integrated approach to scheduling and financial flow in production projects using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II).

Methodology: This research presents a multi-objective mathematical model integrating scheduling and financial flow optimization in civil engineering projects. This research addresses the scheduling and financial flow challenges in construction companies' production projects. The objective is to develop a multi-objective mathematical model that integrates scheduling and financial considerations to optimize resource allocation and minimize costs. The statistical population is in the form of a case study, and the required information and data were collected through interviews with managers of Kisson Construction Company.

Findings: NSGA-II was used as an optimization algorithm to find efficient multi-objective solutions, and optimal results were presented to select civil and construction projects.

Originality/Value: This research contributes to the field by proposing a novel multi-objective mathematical model that integrates scheduling and financial flow considerations in production projects. The use of the NSGA-II algorithm enhances the efficiency of finding optimal solutions. The findings can be valuable for decision-making when selecting construction and production projects.

Keywords: Scheduling of production projects, Non-linear mixed integer multi-objective mathematical programming model, NSGA-II.

Corresponding Author: smrdavoodi@ut.ac.ir

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۴)، (۱۴۰۲)، ۹۹۲-۹۷۵

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل ریاضی چندهدفه با رویکرد یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط II

سجاد جانباز[۱]، سید محمد رضا داودی[۱،*]، عبدالمجید عبدالباقی عطاآبادی[۲]

[۱] گروه مدیریت، واحد دهاقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهاقان، ایران.

[۲] گروه مدیریت، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

هدف: هدف تحقیق حاضر ارایه یک مدل ریاضی چندهدفه با رویکرد یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) است.

روش‌شناسی پژوهش: این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه را ارایه می‌کند که زمان‌بندی و بهینه‌سازی جریان مالی را در پروژه‌های عمرانی ادغام می‌کند. این تحقیق به چالش‌های زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی در شرکت‌های ساختمانی می‌پردازد. هدف توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه است که ملاحظات زمان‌بندی و مالی را با هدف بهینه‌سازی تخصیص منابع و به حداقل رساندن هزینه‌ها ادغام می‌کند. جامعه آماری به‌صورت مطالعه موردی است و اطلاعات و داده‌های موردنیاز از طریق مصاحبه با مدیران شرکت عمرانی کیسون جمع‌آوری شد.

یافته‌ها: الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن راه‌حل‌های کارآمد در زمینه چندهدفه استفاده و نتایج بهینه جهت انتخاب پروژه‌های عمرانی و ساختمانی ارایه شد.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: این تحقیق با پیشنهاد یک مدل ریاضی چندهدفه جدید که ملاحظات زمان‌بندی و جریان مالی را در پروژه‌های تولیدی یکپارچه می‌کند، به این حوزه کمک می‌نماید. استفاده از الگوریتم *NSGA-II*، کارایی یافتن راه‌حل‌های بهینه را افزایش می‌دهد. یافته‌ها می‌تواند برای تصمیم‌گیری در انتخاب پروژه‌های ساخت‌وساز و تولید ارزشمند باشد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی پروژه‌های تولیدی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح غیر خطی، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II*.

۱- مقدمه

در پروژه‌های تولیدی، برنامه‌ریزی موثر برای کاهش هزینه‌های اشتغال منابع و دستیابی به اهداف پروژه بسیار مهم است. هدف این تحقیق پرداختن به مشکل زمان‌بندی، به‌ویژه مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع است که امکان تاخیر در فعالیت‌های پروژه را فراهم می‌کند. درحالی‌که هزینه‌های تکمیل پروژه و سرمایه‌گذاری‌های منابع را در مرحله برنامه‌ریزی هدف قرار می‌دهد. تعادل مطلوب بین زمان و هزینه

* نویسنده مسئول

smrdavoodi@ut.ac.ir

یک ملاحظات کلیدی برای تصمیم‌گیرندگان در برنامه‌ریزی پروژه‌های تولیدی است، مانند پروژه‌های صنایع نظامی که به دنبال دستیابی به قابلیت‌های نظامی تعریف‌شده در چارچوب محدودیت‌های سرمایه‌گذاری هستند [1].

سرمایه‌گذاری منابع در شرایط مساله با زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع شامل تعیین سطح بهینه منابع موردنیاز برای فعالیت‌های پروژه، با درنظر گرفتن وابستگی منابع و روابط تقدم است. این مشکل در ابتدا توسط مهرینگ معرفی شد و بر به حداقل رساندن هزینه‌های منابع درحالی‌که تاریخ سررسید پروژه را درنظر می‌گیرد، تمرکز می‌کند. دو دسته در مساله زمان‌بندی پروژه تعریف شده است: ۱- هدف دستیابی به کوتاه‌ترین زمان ممکن با محدود کردن سطح دسترسی به انواع منابع است و ۲- مشکل زمان‌بندی پروژه با محدودیت زمانی که هدف تعیین سطح بهینه منابع و به حداقل رساندن هزینه‌های استفاده از منابع با فرض در دسترس بودن نامحدود است [2].

این تحقیق در درجه اول بر مقوله مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تمرکز دارد که کاربردهای گسترده‌ای در سناریوهای دنیای واقعی دارد. مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع شامل مشکلات زمان‌بندی مختلف ازجمله کارگاه، فروشگاه جریان و زمان‌بندی فروشگاه باز است. هدف یافتن یک توالی فعالیت مناسب است که روابط اولویت شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منابع را برآورده کند، درحالی‌که یک معیار خاص مانند زمان یا هزینه را بهینه می‌کند. برای پرداختن به ماهیت چندهدفه مشکل، این تحقیق یک رویکرد یکپارچه را پیشنهاد می‌کند که ملاحظات زمان‌بندی و جریان مالی را ترکیب می‌کند. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی برای جستجوی راه‌حل‌های کارآمد در فضای چندهدفه استفاده می‌شود. *NSGA-II* اثربخشی خود را در حل مسایل پیچیده بهینه‌سازی ثابت کرده است و می‌تواند مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو را ارایه کند که به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا مبادلات بین برنامه‌ریزی و اهداف مالی را تجزیه‌وتحلیل کنند [3].

ادغام زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی برای تخصیص موثر منابع و بهینه‌سازی هزینه ضروری است. این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه را پیشنهاد می‌کند که ملاحظات زمان‌بندی و مالی را با استفاده از الگوریتم *NSGA-II* ترکیب می‌کند. با به‌کارگیری این رویکرد، تصمیم‌گیرندگان در شرکت‌های ساختمانی می‌توانند ضمن برنامه‌ریزی موثر پروژه‌های تولیدی، به تعادل مطلوب بین زمان و هزینه دست یابند. در این تحقیق سعی می‌شود به این پرسش پاسخ داده شود که یک مدل ریاضی چندهدفه با رویکرد یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی چگونه است و آیا الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* پاسخی برای حل این مدل دارد؟

۲- چارچوب نظری

در طول دهه‌های گذشته، *RCPSP* به‌طور گسترده توسط محققان موردبررسی قرار گرفت [4]، [5]. اگرچه تمرکز اصلی بر به حداقل رساندن زمان تکمیل پروژه است [6]؛ درحالی‌که برخی دیگر از توابع هدف بر به حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص[1] پروژه دلالت دارند [7].

از آن‌جایی‌که بحث جریان‌های نقدی در *PSP* توسط راسل [8] مطرح شد، مساله زمان‌بندی فعالیت‌های یک پروژه با هدف به حداکثر رساندن *NPV* توجه زیادی را در ادبیات به خود جلب کرده است. تلاش‌های بسیاری از کارهای تحقیقاتی منجر به بررسی مدل‌ها و روش‌ها برای حل انواع مختلف، همراه با نمایش روش مسیر بحرانی[2]، الگوهای پرداخت نقدی، محدودیت‌های منابع و مبادلات زمان هزینه شده است. در چارچوب بررسی *PSPs* با توجه به *PPP* با هدف به حداکثر رساندن *NPV*، مطالعات انجام‌شده توسط اوزدمار و همکاران [9] و هارتمن و بریسکورن [6] را می‌توان اشاره کرد.

دایاناند و پادمن [10] چندین مدل قطعی برای به حداکثر رساندن *NPV* پیمانکار ارایه کردند که در آن زمان تحویل و میزان پرداخت‌های از پیش تعیین‌شده برای پروژه تعیین می‌شود. در مطالعه بعدی، آن‌ها مجموعه‌ای از پرداخت‌ها را در رابطه با زمان‌بندی تعیین کردند و سپس در مرحله دوم، آن‌ها را برای بهبود *NPV* برنامه‌ریزی نمودند.

[1] Net Present Value (NPV)
[2] Critical Path Method (CPM)

اولسوی و سبلی [11] یک الگوریتم ژنتیک[1] را برای حل *PPSP* با درنظر گرفتن یک برنامه پرداخت به‌موقع که مزایای مشتری و پیمانکار را فراهم می‌کند، توسعه دادند. هی و ژو [12] تاثیر سیاست مشوق جریمه را بر برنامه‌های پرداخت بررسی کردند و دریافتند که وجود چنین ساختاری انعطاف‌پذیری برنامه پرداخت را بهبود می‌بخشد. هی و همکاران [7] دو الگوریتم فرا ابتکاری بازپخت شبیه‌سازی‌شده[2] و الگوریتم جستجوی تابو[3] را برای *PPSP* چندحالته (*MMPPSP*) توسعه داد و عملکرد آن‌ها را با تولید و حل نمونه‌های تصادفی بررسی کرد.

از سوی دیگر، مشکلات دیگر به‌عنوان *PSP* محدودشده با سرمایه (*CCPPSP*) موردمطالعه قرار گرفت. تعدادی از مطالعات بر روی *CCPPSP* توسط اوزدامار و دوندار [13] انجام شده است. میکا و همکاران [14] و بسیاری دیگر مشکل *CCPPSP* را در زمینه تک‌حالته و چندحالته بررسی کردند. چن و ژانگ [15] *RCPSP* را برای به حداکثر رساندن *NPV* پروژه در شرایط نامشخص بررسی کردند. آن‌ها زمان و هزینه تصادفی را برای هر فعالیت درنظر گرفتند و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها[4] مشکل را حل کردند.

ابوطالبی و همکاران [16] یک مدل ریاضی دو هدفه را برای حل یک مشکل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با جریان‌های نقدی تنزیل‌شده (*MMRCPSP-DCF*) با هدف به حداقل رساندن زمان تکمیل و به حداکثر رساندن *NPV* پروژه‌ها ارایه کردند. آن‌ها *NSGA-II* و یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه[5] را برای حل مشکل پیشنهادی به‌کار بردند. حسینی و همکاران [17] یک مدل ریاضی برای حل *MMRCPSP* با جریان‌های نقدی مثبت و منفی با هدف به حداکثر رساندن *NPV* پروژه ارایه کردند. آن‌ها یک *GA* کارآمد برای حل مشکل طراحی کردند.

لیمن و ونهوک [18] یک مدل تک‌هدفه برای *MMRCPSP* با منابع تجدیدپذیر و غیر قابل‌تجدید و جریان‌های نقدی مثبت و منفی ارایه کردند تا *NPV* پروژه را به حداقل برسانند. آن‌ها سه پرداخت مختلف *PAC*، *PEO* و *PP* را مطالعه کردند و برای حل مشکل از یک *GA* استفاده کردند. سبت و همکاران [19] یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی شامل *GA* و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[6] را برای حل *MMRCPSP* با هدف به حداقل رساندن زمان تکمیل پیشنهاد کردند. گایگر [20] یک جستجوی همسایگی متغیر تکراری (*IVNS*) را برای حل یک مشکل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند پروژه‌ای (*MPMMRCPSP*) توسعه داد. او عملکرد الگوریتم پیشنهادی خود را در برخی از نمونه‌های معیار آزمایش کرد.

اوزتمل و سلام [21] یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل[7] برای *MMRCPSP* در صنعت قالب‌گیری طراحی کردند. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی آن‌ها می‌تواند زمان‌بندی مناسبی برای پروژه‌هایی با تعداد زیاد فعالیت و منابع محدود ایجاد کند.

۳- پیشینه پژوهش

غفوری و تقی زاده یزدی [22] پژوهشی با عنوان ارایه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مساله زمان‌بندی پروژه تحت شرایط محدودیت منابع و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی‌شده انجام دادند. این پژوهش به‌منظور ارایه مدلی چندهدفه با در نظر داشتن انواع روابط پیش‌نیازی و هم‌چنین سنجش کارایی الگوریتم کرم شب‌تاب در حل مسایل *RCPSP* انجام شده است. ازاین‌رو ابتدا یک مدل ریاضی دو هدفه شامل زمان و هزینه با درنظر گرفتن روابط پیش‌نیازی کلی، جهت زمان‌بندی پروژه‌های استاندارد با محدودیت منابع ارایه شده است و سپس با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری کرم شب‌تاب ترکیب‌شده با یک الگوریتم ابتکاری، جواب‌های پارتو برای مساله در نرم‌افزار متلب به‌دست آمده است و هم‌چنین جهت سنجش کارایی الگوریتم کرم شب‌تاب، مساله با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده نیز حل شد که نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد مطلوب الگوریتم کرم شب‌تاب و عملکرد قابل‌قبول تبرید شبیه‌سازی‌شده در حل مساله فوق‌الذکر در مقایسه با بهترین جواب‌های موجود برای مسایل استاندارد تاکنون می‌باشد.

کاظمی و همکاران [23] در پژوهشی به بررسی و ارایه مدلی دو هدفه برای مساله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید-توزیع در یک زنجیره‌تامین چندسطحی با درنظر گرفتن سطح خدمت پرداختند. در این پژوهش، زنجیره‌تامین پیشنهادی شامل تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز

[1] Genetic Algorithm (GA)
[2] Simulated Annealing (SA)
[3] Tabu Search (TS)
[4] Ant Colony Optimization (ACO)
[5] Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
[6] Particle Swarm Optimization (PSO)
[7] Bee Colony Optimization (BCO)

توزیع و مناطق مشتری است. تصمیمات برای چندین ماده اولیه و محصول و در دوره‌های زمانی مختلف گرفته شده است. اهداف مساله علاوه‌بر کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره شامل هزینه‌های حمل و تامین مواد اولیه، آماده‌سازی و تولید محصولات، نگهداری موجودی مواد اولیه و محصولات در کارخانه‌ها و مراکز توزیع، حمل و خرید محصولات برای توزیع‌کنندگان و مشتریان و هزینه کمبود به‌صورت پس‌افت، سطح خدمت به مشتریان را با به حداقل رساندن زمان انتقال محصولات از سطوح بالایی زنجیره به دست مشتریان افزایش می‌دهد. به‌منظور حل مدل از دو الگوریتم چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو به نام‌های الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-II*) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی غیر مسلط (*NRGA*) استفاده شده است. از آن‌جایی‌که خروجی این الگوریتم‌ها به‌شدت وابسته به پارامترهای ورودی خود هستند؛ لذا از یک روش تاگوچی به‌منظور تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها استفاده شده است. درنهایت به‌منظور اثبات عملکرد مناسب روش‌های حل ارایه‌شده در مدل پیشنهادی، این روش‌ها بر روی مسایل آزمایشی تولیدشده با ابعاد مختلف مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است.

برادران و حسینیان [24] در پژوهشی به بررسی و توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مساله زمان‌بندی خدمه پرواز و حل آن توسط روش‌های *MODE* و *NSGA-II* پرداختند. در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مساله زمان‌بندی خدمه پرواز چندمهارته ارایه شده است. در این مساله، خدمه دارای دو مهارت سرمهمانداری و مهمانداری هستند و هر یک با توجه به تجربه‌ای که دارند امکان تخصیص یافتن به پروازها و یا انواع هواپیما را پیدا می‌کنند. اهداف مدل پیشنهادی عبارت‌اند از ۱- بیشینه‌سازی مجموع انطباق روزهای مرخصی بر روزهای درخواستی افراد و ۲- کمینه‌سازی مجموع جریمه انحرافات از حداقل و حداکثر ساعات کاری مجاز. با توجه به *NP-Hard* بودن مساله زمان‌بندی خدمه، برای حل مدل پیشنهادی از دو الگوریتم فرا ابتکاری تکامل تفاضلی چندهدفه[1] و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مسلط نسخه دوم (*NSGA-II*) استفاده شده است. پارامترهای دو الگوریتم توسط روش تاگوچی تنظیم شده‌اند. دو الگوریتم براساس چند معیار سنجش عملکردی چندهدفه مورد مقایسه قرار گرفتند. هرکدام از الگوریتم‌ها توانستند ازنظر برخی از معیارهای سنجش عملکردی موفق‌تر عمل کنند. نتایج مقایسات الگوریتم‌ها و تحلیل حساسیت نشان داد که الگوریتم *NSGA-II* در زمان کم‌تر (حدود ۱۸%) و کیفیت جواب‌های بهتری می‌تواند زمان‌بندی‌های مناسب‌تری برای مساله زمان‌بندی خدمه پرواز ارایه کند.

رضایی مقدم و دوستی [25] در پژوهشی با هدف ارایه مدل ریاضی چندهدفه برنامه‌ریزی تولید تجمیعی در زنجیره‌تامین معکوس تحت شرایط عدم قطعیت، از الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* استفاده کردند. اولین تابع هدف مدل مذکور حداقل‌سازی انواع هزینه، تابع هدف دوم حداکثرسازی کیفیت محصولات تولیدی در زنجیره‌تامین مذکور، تابع هدف سوم و چهارم به ترتیب بیانگر حداقل کردن مجموع وزنی حداکثر کمبود در میان مشتریان و حداکثرکردن مجموع وزنی حداقل میزان تامین کالا از تامین‌کنندگان است. در این مقاله یک مدل ریاضی چندهدفه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی چندمحصولی، چنددوره‌ای در یک زنجیره‌تامین برگشت‌پذیر سه‌سطحی شامل تامین‌کنندگان، تولیدکننده و مشتریان ارایه شد، سپس برای کنترل تاثیر تغییرات محیطی، توابع اول و دوم مدل مذکور برحسب نظر مسئولین آن صنعت درحالت عدم قطعیت-استوار فازی احتمالی به روش مالوی با درنظر گرفتن سه سناریو، کم، متوسط و زیاد و با احتساب احتمال وقوع برای هر سناریو طراحی شد. آن‌چه در طراحی این مدل که به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی فرمول شده است، اهمیت دارد و در پژوهش های مشابه مشاهده نشده است، وجود مرکز بازسازی و مرکز نگهداری و تعمیرات و درنظر گرفتن رضایت مشتریان و تامین‌کنندگان و نیز توجه به کیفیت محصول دریافت شده از تامین‌کنندگان و محصول تولیدشده به‌وسیله تولیدکننده در ساعات عادی و اضافه‌کاری، حداقل مجموع وزنی حداکثر کمبود در میان مشتریان و حداکثر کردن مجموع وزنی حداقل میزان تامین کالا از تامین‌کنندگان در برقراری رابطه‌ای برد-برد بوده است. مدل ارایه شده به کمک نرم افزارمتلب با کد نویسی درالگوریتم ژنتیک چندهدفه طراحی و با داده‌های واقعی صنعت *High-Tech* حل شده است.

جانباز و همکاران [26] پژوهشی با عنوان ارایه یک مدل ریاضی چندهدفه یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی پروژه‌های تولیدی و استفاده الگوریتم‌های فرا ابتکاری کشتل و شبیه‌سازی تبرید انجام دادند. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی (*MINLP*) چندهدفه ارایه شد. مدل ریاضی این پژوهش شامل اهداف چندگانه بیشینه‌سازی سود حاصل از انتخاب پروژه تولیدی، کمینه‌سازی هزینه و ریسک اجرایی پروژه‌ها می‌باشد. هم‌چنین اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل ریاضی براساس فیش‌برداری از شرکت

[1] Multi-Objective Differential Evaluation (MODE)

عمرانی ساخت و تولید کیسون استفاده شده است. درنهایت مدل ارایه شده با دو الگوریتم *MOSA* و *MOKA* ارزیابی و اعتبارسنجی شدند و در اعتبارسنجی انجام‌شده در مورد مطالعه و براساس عملکردی جواب‌های بهینه، نشان داده شد که الگوریتم *MOSA* از کارایی بالاتری برخوردار است.

ترابی و زگوردی [27] در پژوهشی یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای زمان‌بندی پروژه با معیارهای تاب‌آوری تحت مدت‌زمان فعالیت نامشخص ارایه دادند. درواقع این مطالعه یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه را برای ساخت برنامه‌های پروژه انعطاف‌پذیر تحت محدودیت‌های منابع برای مقابله با مدت‌زمان فعالیت نامشخص ارایه می‌کند. در این مقاله، مفهوم زمان‌بندی پروژه انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری توانایی زمان‌بندی‌ها برای مقابله با اختلال در طول مدت تعریف می‌شود. از آن‌جایی‌که ارزیابی مستقیم تاب‌آوری ازنظر محاسباتی پیچیده و زمان‌بر است، یک معیار تاب‌آوری جایگزین جدید معرفی شده است. معیارهای تاب‌آوری پیشنهادی، شناور بودن فعالیت‌ها و ریسک‌های مرتبط با تکمیل پروژه را اندازه‌گیری می‌کنند. علاوه‌براین، یک مدل جدید مبتنی بر ترکیبی از بافر زمانی و رویکرد تخصیص شناور توسعه داده شده است. برای گسترش مدل‌های زمان‌بندی پروژه موجود با عدم قطعیت، روابط تقدم کلی بین فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی، پروژه ساخت نیروگاه سیکل ترکیبی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. با توجه به تعداد زیادی از فعالیت‌های پروژه در این مطالعه موردی، از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-II*) برای حل مشکل استفاده شده است. نتایج حل مدل ریاضی با استفاده از روش پیشنهادی از طریق آزمایش‌های شبیه‌سازی گسترده ارزیابی‌شده و با نتایج جدول پایه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با درنظر گرفتن معیار تاب‌آوری پیشنهادی و تخصیص بهینه زمان بافر به فعالیت‌ها، پروژه در همان مدت‌زمان با قابلیت اطمینان بالاتر به پایان رسید.

پنگ و همکاران [28] پژوهشی با عنوان ارایه یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط جدید برای حل مساله زمان‌بندی پروژه‌ها با اهداف سه‌گانه انجام دادند. در این مقاله، مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالته معمولی به یک مساله زمان‌بندی پروژه چندحالته سه هدفه جدید (*TOMPSP*) با اهداف به حداقل رساندن مدت‌زمان پروژه، به حداقل رساندن سرمایه‌گذاری منابع و به حداکثر رساندن استحکام تبدیل شد. برای حل مشکل سه هدف ارایه‌شده، آن‌ها از آخرین نسخه از الگوریتم ژنتیک چندهدفه و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *III* (*NSGA-III*) استفاده کردند. اگرچه *NSGA-III* در بسیاری از مسایل بهینه‌سازی چندهدفه با بیش از دو هدف عملکرد عالی نشان می‌دهد، اما یک نقطه‌ضعف بالقوه دارد به این دلیل که گهگاه نمی‌تواند رهگیری را در طول فرآیند عادی‌سازی تطبیقی انجام دهد. از آن‌جایی‌که یک مورد بدون رهگیری در *NSGA-II* غیرممکن است، آن‌ها فرآیند عادی‌سازی *NSGA-II* را به‌جای *NSGA-III* اتخاذ کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم ارایه‌شده نه‌تنها اجرای *NSGA-III* را تا حد زیادی ساده می‌کند، بلکه کارایی اجرا و کیفیت محاسبات را نیز به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد.

لیو و همکاران [29] پژوهشی با عنوان برنامه‌ریزی بهینه چندهدفه تجهیزات ساخت‌وساز خودکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-III*) انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که سایت‌های ساخت‌وساز چالش‌هایی را به همراه دارند که می‌توان با درنظر گرفتن پارامترهای مکانیکی، تکنیک‌های ساخت‌وساز خودکار و محدودیت‌های سایت، با آن‌ها مقابله کرد. این مقاله استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-III*) را برای چنین مشکلاتی توصیه می‌کند و مدعی است که این الگو نتایج بهتری نسبت به الگوریتم تکاملی *NSGA-II* و مدل پارتو (*SPEA*) دارد. این روش مجموعه‌ای از نتایج بهینه پارتو را برای هر مطالعه موردی تولید می‌کند که سپس با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین یک طرح زمان‌بندی بهینه رتبه‌بندی می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیران پروژه و توزیع‌کنندگان، از طریق خودکار کردن فرآیند زمان‌بندی و هم‌چنین با تجزیه‌وتحلیل گرافیکی راه‌حل‌ها مفید واقع شود.

بابور و همکاران [30] در پژوهشی به ارایه مدلی برای افزایش کارایی تولید نانوایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-II*) پرداختند. به حداقل رساندن زمان ساخت یک موضوع تحقیقاتی مهم در مهندسی است زیرا هزینه‌های تولید قابل‌توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. در تولید نانوایی، اجاق‌ها ماشین‌هایی پرانرژی هستند که در طول زمان تولید کار می‌کنند. یافتن ترکیبی بهینه از زمان پخت و زمان بیکاری فر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی مالی قابل‌توجهی شود. در این پژوهش، مسایل زمان‌بندی تولید از چندین خط تولید نانوایی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر پارتو، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط (*NSGA-II*) و یک الگوریتم جستجوی تصادفی بهینه‌سازی شده‌اند. نتایج محاسباتی از نمونه‌های واقعی نشان می‌دهد که راه‌حل‌های

الگوریتم‌ها به‌طور قابل‌توجهی از زمان‌بندی‌های موجود بهتر عمل می‌کنند. *NSGA-II* مجموعه کاملی از راه‌حل‌های بهینه را برای موارد پیدا می‌کند، درحالی‌که روش جستجوی تصادفی تنها یک زیرمجموعه را ارایه می‌دهد. این مطالعه نشان داد که استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در برنامه‌ریزی تولید نانوایی می‌تواند زمان بیکاری فر را از ۱٫۷% به ۲۶% کاهش دهد؛ درحالی‌که تا ۱۲% زمان پخت را به حداقل برساند. علاوه‌براین، راه‌حل‌های بهینه جایگزین، زمان بیکاری فر را تا ۶۱% در مقایسه با برنامه واقعی به حداقل می‌رسانند. استراتژی پیشنهادی می‌تواند برای نانوایی‌های کوچک و متوسط برای کاهش هزینه‌های تولید و کاهش انتشار CO_2 موثر باشد.

هو و همکاران [31] پژوهشی با عنوان برنامه‌ریزی مسیر بهینه زمان برای دستگاه‌های واسط تولید براساس بهبود الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) انجام دادند. برای پرداختن به مسایل مربوط به راندمان پایین و زمان اجرای طولانی مرتبط با برنامه‌ریزی، روش پیشنهادی این پژوهش شامل چند مرحله است. در ابتدا، سینماتیک دستگاه‌های واسط تولید تحلیل شد. ثانیا، نقاط مسیر فضای مشترک این دستگاه‌ها از طریق منحنی *B-Spline Quintic* درون‌یابی شدند. متعاقبا، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) با استفاده از یادگیری تقویتی برای بهینه‌سازی احتمالات متقاطع و جهش آن بهبود یافت و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر[1] برای افزایش قابلیت جستجوی آن ادغام شد. درنهایت، زمان اجرای عملیات با استفاده از الگوریتم بهبودیافته *NSGA-II* بهینه‌شده و مسیر بهینه زمانی با شبیه‌سازی در *MATLAB* تعیین شدند. در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی مرسوم، رویکرد پیشنهادی کل زمان اجرا را ۱۹٫۲۶% کاهش داده است که به‌طور موثری راندمان کاری دستگاه‌ها را بهبود می‌بخشد.

۴- تعاریف مفهومی

۴-۱- مدل‌سازی ریاضی[2]

مدل‌سازی ریاضی یک رویکرد اساسی و پرکاربرد در رشته‌های مختلف برای نمایش و تحلیل سیستم‌ها، پدیده‌ها و فرآیندهای دنیای واقعی با استفاده از معادلات، فرمول‌ها و نمادهای ریاضی است. این یک چارچوب سیستماتیک برای درک، پیش‌بینی و بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده با ثبت ویژگی‌ها و روابط ضروری آن‌ها فراهم می‌کند [32].

با فرمول‌بندی ریاضی مساله، می‌توان از تکنیک‌های ریاضی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای استخراج راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه استفاده کرد. مدل‌های ریاضی در مدیریت پروژه تولید معمولا شامل متغیرها، پارامترها، محدودیت‌ها و توابع هدف هستند. متغیرها، متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهند مانند زمان شروع فعالیت، تخصیص منابع یا زمان‌بندی پرداخت که باید تعیین شوند. پارامترها داده‌های ورودی مانند مدت‌زمان فعالیت، در دسترس بودن منابع یا محدودیت‌های مالی را ضبط می‌کنند. محدودیت‌ها، محدودیت‌ها و وابستگی‌های موجود در سیستم را تعریف می‌کنند مانند روابط تقدم، ظرفیت‌های منابع یا محدودیت‌های مالی. توابع هدف، اهداف و مقاصد پروژه مانند به حداقل رساندن زمان اتمام پروژه، به حداکثر رساندن بازده مالی، یا متعادل کردن استفاده از منابع را کمیت می‌کنند. برای حل مدل‌های فرموله‌شده می‌توان از تکنیک‌های ریاضی مختلفی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌نویسی پویا یا الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده کرد. این تکنیک‌ها این امکان را می‌دهند تا راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را در منطقه امکان‌پذیر تعریف‌شده توسط محدودیت‌ها و اهداف مدل جستجو کرد [33].

۴-۲- بهینه‌سازی[3]

در زبان انگلیسی کلمه "مشکل" را می‌توان به‌عنوان یک سوال در نظر گرفت، حل کرد یا به آن پاسخ داد. کلمه "بهینه‌سازی" را می‌توان به‌عنوان طراحی یک سیستم یا فرآیند برای بهتر ساختن آن تا حد ممکن تعریف کرد؛ بنابراین، با کنار هم قرار دادن این دو تعریف می‌توان مشخص کرد که حداقل یک مساله بهینه‌سازی، طراحی یک سیستم یا فرآیند است که نیاز به حل یا پاسخ دارد. مشکلات بهینه‌سازی در طول زندگی روزمره اکثر افراد وجود دارد و بدون این‌که حتی به آن فکر کنند آن‌ها را حل می‌کنند. این‌ها می‌توانند مشکلات ساده‌ای مانند "سریع‌ترین راه برای سفر از خانه به محل کار چیست" یا "چگونه تمام فنجان‌ها و بشقاب‌ها را در ماشین ظرف‌شویی بریزیم" باشد. این مشکلات در پیچیدگی مشکلاتی مانند "نحوه طراحی شاسی خودرو" یا "چگونه کارآمدترین آنتن رادیویی را طراحی کنیم" [34] افزایش می‌یابد؛ بنابراین، مسایل

[1] Variable Neighborhood Search (VNS)

[2] Mathematical modeling

[3] Optimization

بهینه‌سازی می‌توانند در درجات مختلفی از پیچیدگی به وجود بیایند، به‌طوری‌که حل برخی از مسایل پیش‌پاافتاده و برخی دیگر پیچیده‌تر هستند. در محاسبات نظریه پیچیدگی تصمیم‌گیری یک مساله را می‌توان با سختی *NP* طبقه‌بندی کرد، جایی که یک مساله سخت‌تر را نمی‌توان با یک ماشین تورینگ غیر قطعی در زمان چندجمله‌ای حل کرد [35].

۳-۴- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه یک رویکرد قدرتمند است که با بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف متضاد متعدد در مسایل تصمیم‌گیری سروکار دارد. در بسیاری از سناریوهای دنیای واقعی، تصمیم‌گیرندگان با چالش ایجاد تعادل در اهداف متعدد که هرکدام دارای مجموعه‌ای از معیارها و الزامات خاص خود هستند، مواجه هستند. هدف بهینه‌سازی چندهدفه، یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌هایی است که مبادلات بین این اهداف را نشان می‌دهد، نه شناسایی یک راه‌حل بهینه واحد. در زمینه تحقیق پیش‌رو در مورد زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی، بهینه‌سازی چندهدفه نقش مهمی در دستیابی به موفقیت پروژه و به حداکثر رساندن عملکرد کلی دارد.

به‌طور سنتی، بهینه‌سازی تک‌هدفه بر بهینه‌سازی یک معیار واحد تمرکز می‌کند که اغلب منجر به راه‌حل‌های غیر بهینه می‌شود که اهداف و محدودیت‌های گسترده‌تر مساله را در نظر نمی‌گیرند. از سوی دیگر، بهینه‌سازی چندهدفه، پیچیدگی و تنوع ذاتی مسایل دنیای واقعی را با درنظر گرفتن چندین هدف متضاد به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه، می‌توان به‌طور موثری از مبادلات و وابستگی‌های بین زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی مدیریت کرد. به‌عنوان‌مثال، درحالی‌که به حداقل رساندن زمان تکمیل پروژه بسیار مهم است، باید با نیاز به بهینه‌سازی بازده مالی و اطمینان از استفاده کارآمد از منابع متعادل شود. بهینه‌سازی چندهدفه چارچوبی برای بررسی راه‌حل‌های بهینه پارتو فراهم می‌کند که بهترین سازش را بین این اهداف متضاد نشان می‌دهد [36].

یکی از روش‌های رایج مورد استفاده در بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) است. *NSGA-II* از الگوریتم‌های ژنتیک برای جستجوی راه‌حل‌هایی استفاده می‌کند که ازنظر همه اهداف به‌طور هم‌زمان تحت سلطه هیچ راه‌حل دیگری نیستند. این الگوریتم به‌طور مکرر جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید را تکامل می‌دهد و از عملگرهای ژنتیکی مانند انتخاب، متقاطع و جهش برای تولید راه‌حل‌های بهتر در طول نسل‌ها استفاده می‌کند. از طریق بهینه‌سازی چندهدفه، می‌توان مبادلات بین کارایی زمان‌بندی و عملکرد مالی را بررسی نمود، بهترین راه‌حل‌های مصالحه را شناسایی کرد و مجموعه‌ای از گزینه‌ها را برای تصمیم‌گیرندگان براساس اولویت‌ها و اولویت‌هایشان انتخاب کرد. علاوه‌براین، تکنیک‌های تجسم مانند جبهه پارتو می‌تواند به تجزیه‌وتحلیل رابطه بین اهداف و تصمیم‌گیری آگاهانه کمک کند. به‌طور خلاصه، بهینه‌سازی چندهدفه یک رویکرد ارزشمند برای مقابله با مشکلات تصمیم‌گیری پیچیده در پروژه‌های تولیدی است [37].

۴-۴- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط II

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پرکاربرد است که براساس اصول الگوریتم‌های ژنتیک است. این به‌طور خاص برای رسیدگی به مشکلات با اهداف متضاد چندگانه طراحی شده است تا جایی‌که هدف یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها است که تحت سلطه هیچ راه‌حل امکان‌پذیر دیگری نیستند. *NSGA-II* با حفظ جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید که به‌عنوان افراد نیز شناخته می‌شوند، کار می‌کند و به‌طور مکرر این جمعیت را برای بهبود کیفیت و تنوع راه‌حل‌ها تغییر می‌دهد. از ترکیبی از عملگرهای ژنتیکی مانند انتخاب، متقاطع و جهش برای شبیه‌سازی فرآیند طبیعی تکامل و جستجوی راه‌حل‌های بهینه استفاده می‌کند [38].

یکی از ویژگی‌های کلیدی *NSGA-II* استفاده از مرتب‌سازی غیر غالب برای طبقه‌بندی افراد به جبهه‌ها یا لایه‌های مختلف است. عدم تسلط به خاصیتی اطلاق می‌شود که یک‌راه حل حداقل در یک هدف بهتر از راه‌حل دیگر باشد بدون این‌که در هیچ هدف دیگری بدتر باشد. با مرتب‌سازی افراد براساس عدم تسلط، *NSGA-II* سلسله‌مراتبی از راه‌حل‌ها را ایجاد می‌کند که در آن جبهه اول شامل راه‌حل‌های غیر تحت سلطه و جبهه‌های بعدی شامل راه‌حل‌هایی است که تحت سلطه راه‌حل‌های قبلی هستند. برای حفظ تنوع در جمعیت، *NSGA-II* از مکانیسم فاصله ازدحام استفاده می‌کند. فاصله ازدحام تراکم محلول‌ها در فضای هدف را اندازه‌گیری می‌کند و برای هدایت

فرآیند انتخاب در طول تکامل استفاده می‌شود. *NSGA-II* با ترجیح راه‌حل‌هایی با فواصل ازدحام بالاتر، تضمین می‌کند که جمعیت مجموعه‌ای از راه‌حل‌های توزیع‌شده را در سراسر جبهه پارتو نشان می‌دهد که نشان‌دهنده مبادلات بهینه بین اهداف متضاد است [39].

یکی دیگر از جنبه‌های مهم *NSGA-II* نخبه‌گرایی است که بهترین افراد را از نسلی به نسل دیگر حفظ می‌کند. *Elitism* به حفظ کیفیت راه‌حل‌ها کمک می‌کند و از همگرایی زودهنگام الگوریتم به یک راه‌حل غیر بهینه جلوگیری می‌کند. افراد نخبه به‌طور خودکار به نسل بعدی منتقل می‌شوند و این اطمینان حاصل می‌شود که الگوریتم به‌طور مداوم مناطق امیدوارکننده فضای جستجو را بررسی می‌کند.*NSGA-II* به‌طور گسترده‌ای برای مسایل مختلف دنیای واقعی در زمینه‌هایی مانند مهندسی، مالی، برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی استفاده شده است. اثربخشی آن در توانایی آن برای رسیدگی به اهداف متعدد و ایجاد مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های باکیفیت بالا نهفته است. *NSGA-II* با ارایه طیف وسیعی از گزینه‌های مبادله‌ای به تصمیم‌گیرندگان، آن‌ها را قادر می‌سازد تا براساس اولویت‌ها و اولویت‌های خود تصمیمات آگاهانه بگیرند [40].

علاوه‌براین، *NSGA-II* برای کارایی محاسباتی و مقیاس‌پذیری آن شناخته شده است. می‌تواند مشکلات با تعداد زیادی متغیر و اهداف را حل کند و برای سناریوهای بهینه‌سازی پیچیده مناسب است. پیچیدگی زمانی الگوریتم تحت تسلط روش مرتب‌سازی است که معمولا با استفاده از الگوریتم‌های مرتب‌سازی کارآمد مانند الگوریتم مرتب‌سازی سریع غیر مسلط اجرا می‌شود.

درنتیجه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) یک الگوریتم قدرتمند برای حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه است. از طریق استفاده از مرتب‌سازی بدون تسلط، فاصله ازدحام و نخبه‌گرایی، *NSGA-II* یک رویکرد قوی و کارآمد برای یافتن راه‌حل‌های بهینه ارایه می‌کند که مبادلات بین اهداف متضاد را نشان می‌دهد. تطبیق‌پذیری و مقیاس‌پذیری آن، آن را به یک انتخاب محبوب در حوزه‌های مختلف تبدیل کرده است که در آن تصمیم‌گیرندگان به دنبال کشف و تجزیه‌وتحلیل مجموعه متنوعی از راه‌حل‌های بهینه پارتو هستند [41].

۵-۴- پروژه‌های ساخت و عمرانی

پروژه‌های ساختمانی طیف وسیعی از فعالیت‌های مرتبط با برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌ها و زیرساخت‌های مختلف را در برمی‌گیرد. آن‌ها شامل هماهنگی منابع، مواد، تجهیزات و نیروی کار برای اجرای یک پروژه با توجه به الزامات، جدول زمانی و بودجه مشخص شده است. پروژه‌های ساختمانی نقش مهمی در شکل‌دهی به محیط ساخته‌شده، فراهم کردن امکانات ضروری و محرک رشد اقتصادی دارند [42].

فرآیند پروژه‌های ساخت‌وساز معمولا با شناسایی یک نیاز یا فرصت آغاز می‌شود و به دنبال آن شروع پروژه و مفهوم‌سازی می‌شود. این شامل تعریف اهداف پروژه، ارزیابی امکان‌سنجی و انجام مطالعات اولیه برای تعیین محدوده، خطرات بالقوه و هزینه‌های است. ذینفعان پروژه ازجمله مالکان، سرمایه‌گذاران، معماران، مهندسان و پیمانکاران، برای توسعه طرح‌های پروژه، تعیین بودجه و اخذ تاییدیه‌ها و مجوزهای لازم همکاری می‌کنند. پس از اتمام مرحله برنامه‌ریزی، پروژه‌های ساختمانی وارد فاز طراحی می‌شوند. این شامل ایجاد نقشه‌ها، نقشه‌ها و مشخصات دقیقی است که الزامات فنی، مواد و روش‌های ساخت پروژه را مشخص می‌کند. متخصصان طراحی از نزدیک با ذینفعان پروژه همکاری می‌کنند تا اطمینان حاصل کنند که طراحی با عملکرد، زیبایی‌شناسی و استانداردهای نظارتی موردنظر مطابقت دارد [43].

۵- مدل ریاضی تحقیق

با درنظر گرفتن اهداف پژوهش به تشکیل مدل ریاضی و هدف‌ها و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود. مدل ریاضی مطالعه پیش‌رو در ادامه آمده است.

$$Max\ z1 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\left(\sum_{i=1}^{n}(\ W'ji)\left(T-\left(\sum_{t=1}^{T}(Tq+dq\right).xq,t\right)-\ Tj+dj)\right) + \left(\sum_{i=1}^{n}(\ Wji)\left(T\ -\ Tj+dj\right)\right), \quad (۱)$$

$$Min\ Z2\ =\ \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ (Ccapexj\ +\ Copexj\left(T-\ Tj+dj\right)), \quad (۲)$$

$$Min\ Z3\ =\ \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ .\ Rjt, \quad (۳)$$

$$s.t.$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ \leq\ 1,\ for\ all\ j, \quad (۴)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ =\ 1,\ for\ all\ \ j\epsilon\ Sm, \quad (۵)$$

$$\left(\sum_{t=1}^{T} t\ .\ xj,t\ \right)-1\leq\ Tj\ <\ \sum_{t=1}^{T} t\ .\ xj,t,\ forall\ \ j\ \ ,xj,t\ \neq\ 0, \quad (۶)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ \ Tj+\ dj)\ \leq T,\ for\ all\ T, \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} xj\,,t\ .\ CL-t+1\ \leq BL,\ for\ all\ L=1,2,\ldots,T, \quad (۸)$$

$$\sum_{I\epsilon\ Sj}\sum_{t=1}^{T} x\,I,t\ \geq\ \left|Sj\right|\sum_{t=1}^{T} xj,t,\ for\ all\ \ j\epsilon Sd, \quad (۹)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,e,t\ +\ xf,t\ \leq\ 1,\ for\ all\ \ e,f, \quad (۱۰)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,a,t-\ xb,t\ =\ 0,\ for\ all\ a,b, \quad (۱۱)$$

$$Mj\ =\ Max\ [\ \textstyle\sum_{t=1}^{T} x\,p,t\ (Tj\ +\ dj)\ \ for\ p\epsilon Sj],\ for\ all\ j\epsilon Sd, \quad (۱۲)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x\,j,t\ \ Tj+\ dj)\ \geq\ Mj,\ for\ all\ j\epsilon Sd, \quad (۱۳)$$

$$xj,t\ \epsilon\ [0,1],\ \ Integer\ Numbers,$$
$$Tj\ \varepsilon\ N.$$

۱-۵- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل

اندیس‌های مدل

J, q	پروژه‌های تعریف‌شده $(j=1,2,\ldots,N, j\epsilon J)$.
T, L	افق برنامه‌ریزی که شامل T دوره خواهد بود $(t = 1,2,\ \ldots,T)$.
Ji	محصول ith از پروژه j $(i = 1,2,\ldots,\ n)$.
Z	اهداف مساله $(z = 1,2,\ \ldots,\ Z)$.
P	پروژه‌های پیش‌نیاز $(p\ \epsilon\ Sp)$.
Q	پروژه‌های وابسته $(q\ \epsilon\ Sd)$.

e, f	پروژه‌های غیر هم‌خوان $(e,f \in j)$.
a,b	پروژه‌های هم‌خوان $(a,b \in j)$.

پارامترهای مدل

$Ccapexj$	هزینه احداث پروژه j.
$C\ j, L\text{-}t+1$	تامین مالی موردنیاز برای احداث پروژه j در دوره L.
$Copexj$	هزینه‌های عملیاتی پروژه j در هر دوره.
$W'ji$	درآمد سالیانه حاصل از فروش محصول قابل ارتقای i از واحد j.
Wji	درآمد سالیانه حاصل از فروش محصول غیرقابل ارتقای i از واحد j.
Rjt	ریسک پروژه j در دوره t.
dj	زمان موردنیاز جهت انجام پروژه j.
BL	بودجه موجود برای ساخت پروژه‌ها در ابتدای دوره L.
Sm	پروژه‌های اجباری ۱.
Sp	مجموعه پروژه‌های پیش‌نیاز ۲.
Sd	مجموعه پروژه‌های وابسته ۳.
Sj	پروژه‌های پیش‌نیاز پروژه j $(Sj \epsilon Sp)$.

متغیرهای تصمیم مساله

$xj,t = 1$	انتخاب پروژه j در دوره t.
$xj,t = 0$	عدم انتخاب پروژه j در دوره t.
Tj	زمان آغاز به احداث پروژه j.

حال برای روشن‌تر شدن مدل به تشریح هریک از اهداف و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود. **رابطه (۱)** به حداکثرسازی درآمد حاصل از فروش محصولات هریک از پروژه‌ها پس از اتمام دوره ساخت می‌پردازد. در این رابطه همه محاسبات حول محور تصمیم در خصوص زمان آغاز هر پروژه (Tj) می‌چرخد و نکته قابل‌تامل در این مدل قابلیت ارتقای برخی محصولات بعضی از واحدها می‌باشد که درصورتی‌که احداث واحد تکمیلی وابسته محصول مربوطه، محصول موردبررسی قابلیت فروش و درآمدزایی نداشته و پروژه به بخش $R\&D$ برای توسعه محصول می‌شود. **رابطه (۲)** به حداقل‌سازی هزینه‌های پروژه در دو سطح ساخت و توسعه محصول در طی T دوره می‌پردازد که در اینجا نیز زمان آغاز پروژه از منظر محاسبه هزینه‌های عملیاتی پس از بهره‌برداری نقش کلیدی خواهد داشت و درنهایت در **رابطه (۳)** که هدف آخر است و ماهیت کیفی دارد و به حداقل‌سازی مجموع ریسک پروژه‌های انتخابی طی T دوره انجام می‌پذیرد (ریسک پروژه براساس راهبرد روش $FMEA$[4] و نرخ RPN[5] به‌صورت کمی محاسبه می‌شود). شایان‌ذکر است ریسک هر پروژه در دوره‌های مختلف و بر پایه نظرات و الگوهای ذهنی خبرگان قابل‌استخراج خواهد بود. **رابطه (٤)** تضمین‌کننده این مهم است که هریک از پروژه‌ها در طول T دوره حداکثر یک‌بار می‌توانند انتخاب گردند. **رابطه (٥)** برای پروژه‌هایی به کار می‌رود که با توجه به سیاست‌های تصمیم‌گیرندگان بایستی حتما تا انتهای T دوره انتخاب گردند که اصطلاحا به آن‌ها پروژه‌های اجباری اطلاق می‌گردد. **رابطه (٦)** تضمین‌کننده آن است که زمان آغاز هر پروژه یعنی Tj درون دوره‌ای است که xj,t در آن دوره مقدار می‌گیرد. **رابطه (۷)** اتمام کلیه پروژه‌های انتخابی را تا اتمام دوره T برآورده می‌سازد. در **رابطه (۸)** محدودیت مربوط به سرمایه موجود برای $R\&D$ توسعه محصول در هر دوره موردبررسی قرار گرفته است. نکته حایز اهمیت در این محدودیت هزینه مرتبط از ساخت هر پروژه در دوره‌های مختلف از زمان ساختش است که آن را با نشان $C\ j, L\text{-}t+1$ می‌دهیم. **رابطه (۹)** تضمین‌کننده رعایت پیش‌نیازی و وابستگی برخی از پروژه‌ها است. به‌عبارتی‌دیگر پروژه وابسته زمانی حق انتخاب دارد که کلیه پروژه‌های پیش‌نیازش برآورده شده باشند. در این رابطه $|Sj|$ نشان‌دهنده تعداد پروژه‌های پیش‌نیاز پروژه j می‌باشد. **رابطه (۱۰)** نشان‌دهنده پروژه‌هایی است که در صورت احداث هریک از آن‌ها قطعا پروژه دیگر انتخاب نخواهد شد که در اصطلاح به آن‌ها پروژه‌های غیرهمخوان

[1] Mandatory projects
[2] Prerequisite projects
[3] Dependent projects
[4] Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)
[5] Risk Priority Number (RPN)

می‌گویند در مقابل **رابطه (۱۱)** برای پروژه‌های همخوان ساخته شده است که در صورت انتخاب هریک از آن‌ها واحد دیگر نیز بایستی در طول دوره T انتخاب گردد. **رابطه (۱۲)** تضمین می‌کند که اتمام احداث واحدهای وابسته قطعا پس از اتمام دوره احداث تمامی پروژه‌های پیش‌نیازشان خواهد بود و درنهایت **رابطه (۱۳)** خاطرنشان می‌نماید که متغیر xj,t مساله از جنس صفر و یک بوده و متغیر Tj زیرمجموعه اعداد طبیعی می‌باشد. همان‌طور که بیان شده است، مدل ریاضی ارایه‌شده به‌صورت *MINLP* می‌باشد و به دلیل استفاده از متغیر تصمیم باینتری و محدودیت‌های غیر خطی در مدل‌سازی انجام‌شده، این مساله به‌صورت *NP-HARD* بوده و مدل ریاضی در ابعاد کوچک در نرم‌افزار حل دقیق مانند گمز و لینگو قابل‌حل در مدت‌زمان مناسب ندارد. ازاین‌رو با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به ارزیابی و تحلیل مدل ریاضی پرداخته می‌شود.

۲-۵- روش حل

مدل به‌کاررفته در این مطالعه چهار هدف را تعریف می‌کند: ۱- به حداکثر رساندن سود حاصل از اجرای پروژه، ۲- به حداقل رساندن زمان‌بندی تکمیل پروژه، ۳- به حداقل رساندن بودجه جاری و ٤- به حداکثر رساندن کیفیت اجرای پروژه. این اهداف براساس یک رشته باینری که انتخاب پروژه را برای هر دوره نشان می‌دهد، ارزیابی می‌شوند. مدل هم‌چنین چند محدودیت را تعریف می‌کند: ۱- هر پروژه حداکثر یک‌بار در طول افق برنامه‌ریزی قابل انتخاب است، ۲- پروژه‌های اجباری باید تا پایان افق برنامه‌ریزی انتخاب شوند و ۳- زمان شروع هر پروژه باید در محدوده افق برنامه‌ریزی باشد.

جهت بررسی مدل از روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) بهره گرفته شد. این الگوریتم یک الگوریتم فرا ابتکاری است که در دسته الگوریتم‌های تکاملی قرار می‌گیرد. این به‌طور خاص برای حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی شده است. *NSGA-II* از ترکیبی از تکنیک‌ها مانند عملگرهای ژنتیکی (انتخاب، متقاطع و جهش) و مرتب‌سازی غیر غالب برای تکامل جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید در چندین نسل استفاده می‌کند. هدف آن یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو است که نشان‌دهنده مبادله بین اهداف مختلف، بدون نیاز به اطلاعات ترجیحی صریح از کاربر است. *NSGA-II* برای حل مسایل پیچیده بهینه‌سازی با اهداف متضاد متعدد به‌طور گسترده مورداستفاده قرار گرفته و موثر است. جهت بررسی مدل با روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*) از زبان برنامه‌نویسی پایتون بهره گرفته شد. این کد از کتابخانه *DEAP* برای ایجاد و ارزیابی راه‌حل‌ها استفاده می کند و یک الگوریتم ژنتیک را برای یافتن راه‌حل‌های بهینه‌ای که اهداف و محدودیت‌ها را برآورده می‌کند، پیاده‌سازی می‌کند. اطلاعات اصلی در مورد مکانیسم *NSGA-II* پیشنهادی به شرح زیر است: اپراتور متقاطع دو نقطه و اپراتور جهش یک نقطه به ترتیب برای متقاطع و جهش استفاده می‌شود. علاوه‌براین، شرط توقف این الگوریتم در صورت عدم بهبود ۵۰ تکرار متوالی است. علاوه‌براین، مقادیر پارامترها با روش آزمون‌وخطا که در **جدول ۱** توضیح داده شده است، تعیین می‌شود.

الگوریتم ۱- شبه کد NSGA-II.

Algorithm 1- NSGA-II pseudo code.

Procedure NSGA-II

Input: $N', G, f_k(X)$ ▷ N' members evolved g generations to solve $f_k(X)$
Initialize Population $\mathbb{P}'$;
Generate random population – size N';
Evaluate Objectives Values;
Assign Rank (level) based on Pareto – *sort*;
Generate Child Population;
    Binary Tournament Selecection;
    Recombination and Mutation;
for *i=1* to g **do**
    for each *Parent and Child* in Population **do**
        Assign Rank (level) based on Pareto – *sort*;
        Generate sets of nondominated solutions;
        Determine Crowding distance;
        Loop (inside) by adding solutions to next generation starting from the *first* front until N' individuals;
    end
    Selection points on the lower front with high crowding distance;
    Create next generation;
      Binary Tournament Selection;
      Recombination and Mutation;
end

جدول ۱- سطوح بهینه پارامترهای پیشنهادی NSGA-II.

Table 1- Optimal levels of NSGA-II proposed parameters.

پارامتر	Value
جمعیت اولیه	300
احتمال تلاقی	0.8
احتمال جهش	0.2

۵-۳- داده‌های تحقیق

ازاین‌رو ورودی‌های مدل ریاضی براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده در بازه زمانی یک‌ساله نمونه آماری تحقیق (شرکت کیسون) ارزیابی‌شده به شرح زیر است.

جدول ۲- تنظیم پارامترهای مدل ریاضی.

Table 2- Setting the parameters of the mathematical model.

پارامتر	مقدار	واحد
Ccapexj	Uniform ~ [114290, 185715]	دلار
C j, L-t+1	Uniform ~ [14285, 22855]	دلار
Copexj	Uniform ~ [123415, 213435]	دلار
W´ji	Uniform ~ [745673, 987254]	دلار
Wji	Uniform ~ [445673, 587254]	دلار

۵-۴- نتایج بررسی الگوریتم

تابع اصلی، الگوریتم *NSGA-II* را با ایجاد یک مجموعه جواب اولیه، ارزیابی تناسب هر راه‌حل و سپس اجرای الگوریتم برای تعداد مشخصی از نسل‌ها، اجرا می‌کند. راه‌حل‌ها با اعمال عملیات متقاطع و جهش بر روی راه‌حل‌های اولیه ایجاد می‌شود. ارزیابی تناسب‌اندام و بررسی محدودیت در جمعیت راه‌حل‌های جدید نیز انجام می‌شود. پس از هر نسل، راه‌حل‌ها براساس مرتب‌سازی غیر مسلط و فاصله ازدحام انتخاب می‌شود و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های متنوع را تضمین می‌کند. سپس بهترین راه‌حل‌ها (۵ راه‌حل برتر) از راه‌حل‌های نهایی با استفاده از تابع "*selBest*" انتخاب می‌شوند و جزییات آن‌ها (ارزش‌ها و تناسب‌اندام) نمایش داده می‌شود. خروجی ارایه‌شده نشان‌دهنده پیشرفت الگوریتم *NSGA-II* در بیش از ۵۰ نسل است. هر ردیف در خروجی مربوط به یک نسل است و ستون‌ها تعداد نسل و تعداد افراد ارزیابی‌شده در آن نسل (*nevals*) را نشان می‌دهد.

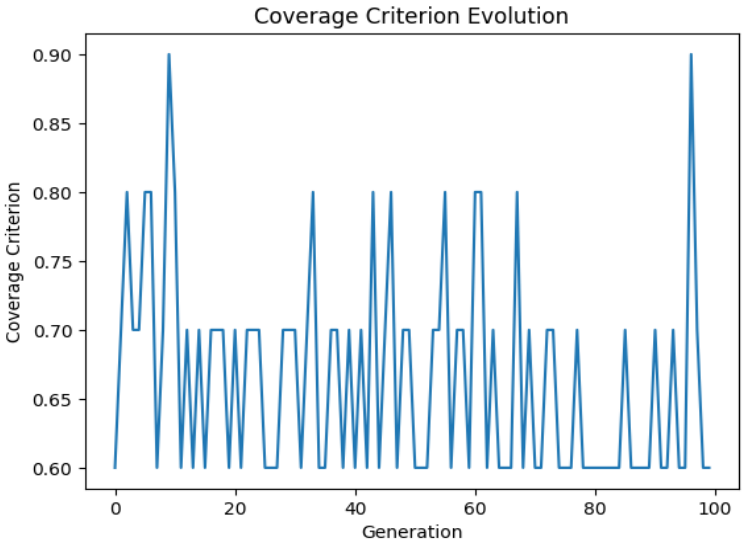
این الگوریتم ۱۰۰ راه‌حل را در هر نسل ارزیابی کرد. الگوریتم با بهبود راه‌حل‌ها از طریق تغییراتی مانند متقاطع و جهش پیشرفت می‌کند. پس‌ازاین‌که الگوریتم تکرارهای خود را کامل کرد، جزییات بهترین راه‌حل‌های یافت‌شده را نمایش می‌دهد. در این مورد، کد نمایش باینری بهترین راه‌حل‌ها (به‌عنوان مثال، [۰، ۱، ۰، ۱، ۰، ۰، ۱، ۱، ۱، ۱]) و مقادیر تناسب آن‌ها را نشان می‌دهد (به‌عنوان مثال، (۰٫۱-، ۰٫۱-)). مقادیر تناسب، کیفیت راه‌حل‌های یافت‌شده توسط الگوریتم را با هدف به حداقل رساندن زمان‌بندی تکمیل پروژه، بودجه جاری و به حداکثر رساندن سود نشان می‌دهد. به‌طورکلی، خروجی پیشرفت الگوریتم و بهترین راه‌حل پیداشده در پایان فرآیند بهینه‌سازی را نشان داد.

در **جدول ۳** نتایج بررسی الگوریتم و اثربخشی و عملکرد کد طی معیارهایی بررسی می‌شود.

جدول ۳- خروجی نرم‌افزار.

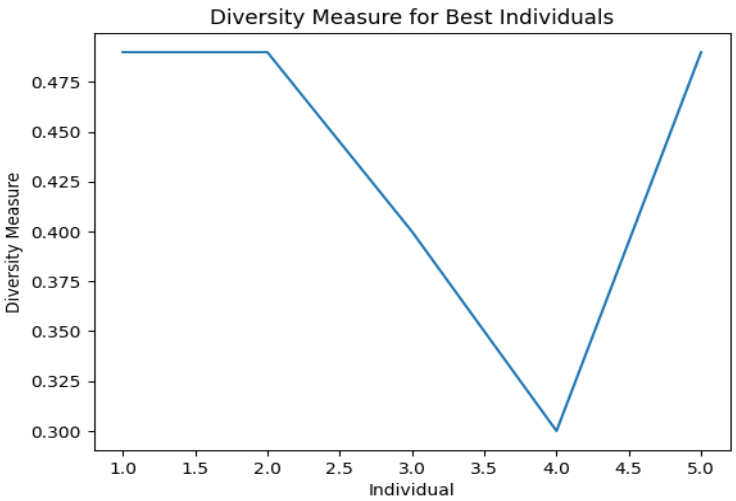
Table 3- Software output.

راه‌حل‌ها	معیار تنوع	معیار تسلط	معیار پوشش	معیار همگرایی
[1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]	0.458	9	0.6	12
[1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1]	0.4	8	0.7	16
[1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1]	0.458	6	0.8	12
[1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1]	0.458	6	0.7	14
[1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1]	0.4	8	0.7	12



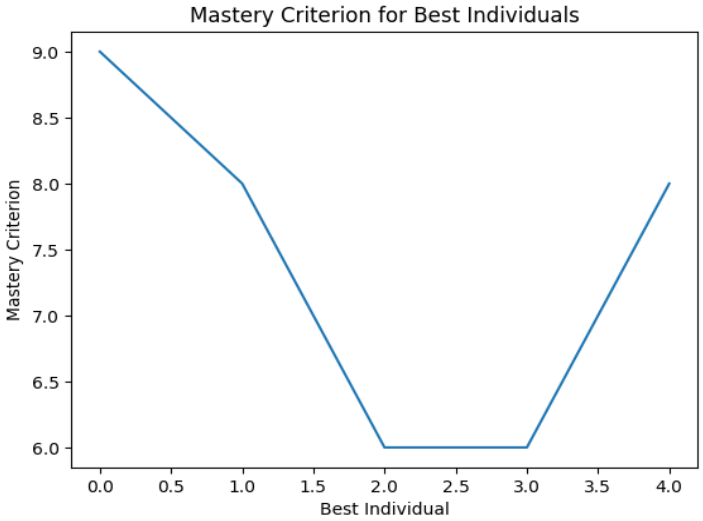
شکل ۱- معیار پوشش.

Figure 1- Coverage criteria.



شکل ۲- معیار تنوع.

Figure 2- Diversity criterion.



شکل ۳- معیار تسلط.

Figure 3- Mastery criterion.

راه‌حل‌های ارایه‌شده به‌صورت زیر می‌باشد.

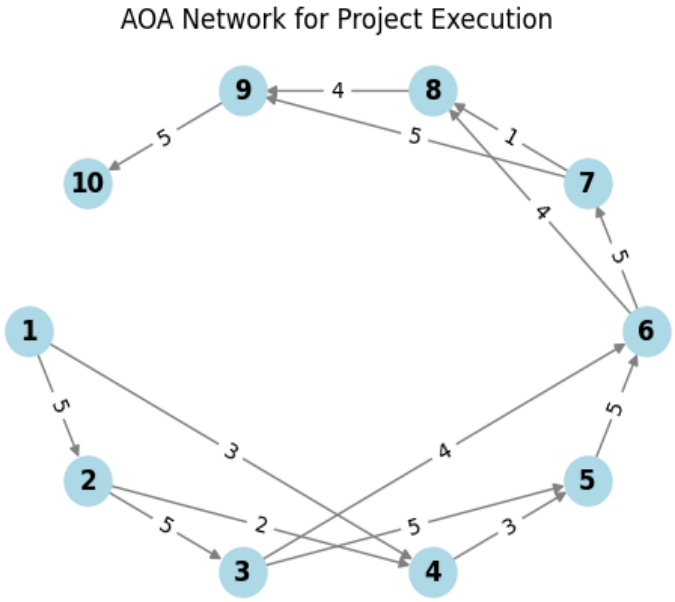
Solution 1: 1 -> 4 -> 5 -> 6 -> 7 -> 8 -> 9
Diversityfxffgs: 0.458
Coverage: 0.6

Solution 2: 1 -> 2 -> 4 -> 5 -> 6 -> 8 -> 9 -> 10
Diversity: 0.4
Coverage: 0.7

Solution 3: 1 -> 4 -> 5 -> 6 -> 8 -> 9 -> 10
Diversity: 0.458
Coverage: 0.8

Solution 4: 1 -> 2 -> 3 -> 6 -> 8 -> 9 -> 10
Diversity: 0.458
Coverage: 0.7

Solution 5: 1 -> 2 -> 3 -> 5 -> 6 -> 7 -> 9 -> 10
Diversity: 0.4
Coverage: 0.7



شکل ۴- مسیرهای انجام پروژه.

Figure 4- The paths of the project.

خروجی ارایه‌شده پیشرفت الگوریتم را در ۵۰ نسل نشان می‌دهد. هر ردیف نشان‌دهنده یک نسل است و ستون‌ها، تعداد نسل و تعداد ارزیابی‌های انجام‌شده در آن نسل را نشان می‌دهند. پس از اجرای الگوریتم *NSGA-II*، بهترین راه‌حل نشان داده می‌شوند.

همگرایی بررسی می‌کند که آیا الگوریتم به سمت مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های غیر غالب همگرا می‌شود یا خیر. راه‌حل‌ها باید طیف وسیعی از جبهه پارتو را پوشش دهند که نشان‌دهنده مبادله بین اهداف است. به نظر می‌رسد معیار همگرایی نمایش داده شده، مجموع مقادیر باینری در هر بهترین راه‌حل باشد. مقادیر معیار همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم چقدر به سمت یک‌راه حل همگرا شده است. هر چه مقدار کم‌تر باشد، همگرایی بهتر است. مقادیر معیار همگرایی برای هر یک از این راه‌حل‌ها به ترتیب برابر با ۱۲، ۱۶، ۱۲، ۱۴ و ۱۲ است. این مقادیر نشان‌دهنده سطح عملکرد هر راه‌حل است. این واقعیت که چندین راه‌حل دارای ارزش معیار همگرایی یکسان هستند، نشان می‌دهد که آن‌ها ممکن است سطح تناسب یا عملکرد مشابهی داشته باشند. بااین‌حال، مشخص نیست که آیا یک مقدار بالاتر یا کم‌تر نشان‌دهنده عملکرد بهتر بدون زمینه بیش‌تر است.

پوشش ارزیابی می‌کند که الگوریتم چقدر کل جبهه پارتو را پوشش می‌دهد. هرچه راه‌حل‌های بیش‌تری در امتداد جبهه پارتو کشف کند، پوشش بهتری خواهد داشت. براساس مقادیر پوششی که ارایه شده (۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۷)، به نظر می‌رسد که معیار پوشش برای خروجی نسبتا بالا باشد. مقادیر پوشش نشان می‌دهد که راه‌حل‌های تولیدشده تا چه حد معیارها یا الزامات خاصی را پوشش می دهند.

معیار تسلط بررسی می‌کند که آیا راه‌حل‌های یافت‌شده تحت سلطه نیستند. هیچ راه‌حلی نباید وجود داشته باشد که در همه اهداف از راه‌حل دیگری بهتر عمل کند. مقادیر معیار تسلط برای بهترین راه‌حل‌ها به ترتیب برابر با ۹، ۸، ۶، ۶ و ۸ است. این مقادیر نشان‌دهنده معیار تسلط برای هر یک از بهترین راه‌حل‌ها به‌دست‌آمده از الگوریتم *NSGA-II* است.

تنوع راه‌حل‌های یافت‌شده را ارزیابی می‌کند. راه‌حل‌ها باید نشان‌دهنده پراکندگی خوبی در سراسر جبهه پارتو باشند و از خوشه‌بندی در یک منطقه خاص اجتناب کنند. اقدامات تنوعی به ترتیب برابر است با ۰/۴۵۸، ۰/۳، ۰/۴۵۸، ۰/۴۸۹ و ۰/۴۵۸. این مقادیر نشان‌دهنده اندازه‌گیری تنوع محاسبه‌شده برای هر راه‌حل است. هر مقدار نشان‌دهنده تنوع یا تنوع موجود در ویژگی‌ها یا ویژگی‌های راه‌حل مربوطه است.

۶- نتیجه‌گیری

براساس اطلاعات ارایه‌شده، الگوریتم *NSGA-II* برای حل یک مساله با ایجاد مجموعه‌ای اولیه از راه‌حل‌ها، ارزیابی تناسب هر راه‌حل و سپس اجرای الگوریتم برای تعداد مشخصی از نسل‌ها استفاده شد.

خروجی ارایه‌شده پیشرفت الگوریتم *NSGA-II* را در بیش از ۵۰ نسل نشان داد. الگوریتم ۱۰۰ راه‌حل را در هر نسل ارزیابی کرد. الگوریتم با بهبود راه‌حل‌ها از طریق تغییراتی مانند متقاطع و جهش پیشرفت کرد. معیارهای عملکردی کئل بررسی شد و نتایج نشان داد الگوریتم استفاده‌شده به‌خوبی توانسته مدل تحقیق را تبیین کند و با درنظر گرفتن محدودیت‌های تحقیق، اهداف حاصل شد. با توجه به این نتایج به شرکت موردمطالعه و شرکت‌های مشابه پیشنهاد می‌شود به بهبود برنامه‌ریزی پروژه با توجه به الگوریتم بررسی‌شده در تحقیق بپردازند.

با استفاده از الگوریتم *NSGA-II* و مدل ریاضی چندهدفه پیشنهادی، شرکت‌های ساختمانی می‌توانند روند برنامه‌ریزی پروژه خود را بهبود بخشد. این الگوریتم چندین هدف را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد که منجر به برنامه‌ریزی بهینه پروژه، جریان مالی و کیفیت اجرا می‌شود. هدف فرآیند بهینه‌سازی به حداکثر رساندن سود پروژه است. با گنجاندن مدل پیشنهادی در برنامه‌ریزی پروژه خود، شرکت‌های عمرانی می‌تواند تصمیمات آگاهانه‌ای اتخاذ کند که با درنظر گرفتن اهداف دیگر، حداکثر کردن سود را در اولویت قرار دهد. برنامه‌ریزی بهینه پروژه و جریان مالی به حداقل رساندن زمان تکمیل پروژه و بودجه جاری کمک می‌کند. با استفاده از الگوریتم *NSGA-II*، شرکت‌های عمرانی می‌توانند منابع را به‌طور موثر تخصیص دهد که منجر به تکمیل به‌موقع پروژه و صرفه‌جویی در هزینه می‌شود.

مدل پیشنهادی چارچوبی را برای درنظر گرفتن اهداف متعدد و مبادلات در برنامه‌ریزی پروژه فراهم می‌کند. این مدل شرکت‌های عمرانی را قادر می‌سازد تا تصمیمات آگاهانه‌ای اتخاذ کند که سودآوری، مدت‌زمان پروژه، محدودیت‌های بودجه و کیفیت اجرا را متعادل می‌کند.

به‌طورکلی، نتایج تحقیق پیش‌رو و استفاده از الگوریتم *NSGA-II* با بهینه‌سازی فرآیندهای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری پروژه، مزایای عملی را برای شرکت‌های عمرانی و ساختمانی ارایه می‌کند. ادغام بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم‌های ژنتیک می‌تواند عملکرد پروژه، سودآوری و استفاده از منابع را افزایش دهد و درنتیجه یک مزیت رقابتی در صنعت ساخت‌وساز ایجاد کند. علاوه‌براین، سهم علمی در توسعه یک مدل ریاضی جدید نهفته است که به چالش‌های زمان‌بندی پروژه و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی می‌پردازد.

تشکر و قدردانی

مایلم صمیمانه تشکر و قدردانی خود را از استاد راهنما به خاطر راهنمایی و حمایت ارزشمندشان در طول انجام این پژوهش ابراز کنم. تخصص و بازخورد روشنگرانه ایشان در شکل دادن به جهت و کیفیت این مطالعه بسیار موثر بوده است. من واقعا از شکیبایی، تشویق و تعهد ایشان به رشد تحصیلی‌ام سپاسگزارم. راهنمایی آن‌ها بسیار ارزشمند بوده است و من از فرصتی که برای یادگیری تحت راهنمایی ایشان به دست آوردم سپاس‌گزارم.

تعارض با منافع

مقاله پیش‌رو تحت عنوان "ارایه یک مدل ریاضی چندهدفه با رویکرد یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی در پروژه‌های تولیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط *II* (*NSGA-II*)" جهت چاپ در نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات تدوین‌شده و تضمین می شود که این مقاله اثر اصلی است، قبلا چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.

منابع

[1] Hartmann, S., & Briskorn, D. (2022). An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *297*(1), 1–14.

[2] Pellerin, R., Perrier, N., & Berthaut, F. (2020). A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *280*(2), 395–416. DOI:10.1016/j.ejor.2019.01.063

[3] Deng, W., Zhang, X., Zhou, Y., Liu, Y., Zhou, X., Chen, H., & Zhao, H. (2022). An enhanced fast non-dominated solution sorting genetic algorithm for multi-objective problems. *Information sciences*, *585*, 441–453. DOI:10.1016/j.ins.2021.11.052

[4] Herroelen, W. S., Van Dommelen, P., & Demeulemeester, E. L. (1997). Project network models with discounted cash flows a guided tour through recent developments. *European journal of operational research*, *100*(1), 97–121. DOI:10.1016/S0377-2217(96)00112-9

[5] Kolisch, R., & Hartmann, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European journal of operational research*, *174*(1), 23–37. DOI:10.1016/j.ejor.2005.01.065

[6] Hartmann, S., & Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *207*(1), 1–14. DOI:10.1016/j.ejor.2009.11.005

[7] He, Z., Wang, N., Jia, T., & Xu, Y. (2009). Simulated annealing and tabu search for multi-mode project payment scheduling. *European journal of operational research*, *198*(3), 688–696. DOI:10.1016/j.ejor.2008.10.005

[8] Russell, A. H. (1970). Cash flows in networks. *Management science*, *16*(5), 357–373. DOI:10.1287/mnsc.16.5.357

[9] Özdamar, L., Ulusoy, G., & Bayyigit, M. (1998). A heuristic treatment of tardiness and net present value criteria in resource constrained project scheduling. *International journal of physical distribution & logistics management*, *28*(9/10), 805–824. DOI:10.1108/09600039810248181

[10] Dayan, N., & Padman, R. (1997). On modelling payments in projects. *Journal of the operational research society*, *48*(9), 906–918. DOI:10.1057/palgrave.jors.2600440

[11] Ulusoy, G., & Cebelli, S. (2000). Equitable approach to the payment scheduling problem in project management. *European journal of operational research*, *127*(2), 262–278. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00499-3

[12] He, Z., & Xu, Y. (2008). Multi-mode project payment scheduling problems with bonus-penalty structure. *European journal of operational research*, *189*(3), 1191–1207. DOI:10.1016/j.ejor.2006.07.053

[13] Özdamar, L., & Dündar, H. (1997). A flexible heuristic for a multi-mode capital constrained project scheduling problem with probabilistic cash inflows. *Computers and operations research*, *24*(12), 1187–1200. DOI:10.1016/S0305-0548(96)00058-5

[14] Mika, M., Waligóra, G., & Wkeglarz, J. (2005). Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. *European journal of operational research*, *164*(3), 639–668.

[15] Chen, W. N., & Zhang, J. (2012). Scheduling multi-mode projects under uncertainty to optimize cash flows: A Monte Carlo ant colony system approach. *Journal of computer science and technology*, *27*(5), 950–965. DOI:10.1007/s11390-012-1276-2

[16] Aboutalebi, R. S., Najafi, A. A., & Ghorashi, B. (2012). Solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem using two multi objective evolutionary algorithms. *African journal of business management*, *6*(11), 4057–4065.

[17] Hosseini, Z. S., Hassan Pour, J., & Roghanian, E. (2014). A bi-objective pre-emption multi-mode resource constrained project scheduling problem with due dates in the activities. *Journal of optimization in industrial engineering*, *7*(15), 15–25.

[18] Leyman, P., & Vanhoucke, M. (2016). Payment models and net present value optimization for resource-constrained project scheduling. *Computers and industrial engineering*, *91*, 139–153. DOI:10.1016/j.cie.2015.11.008

[19] Sebt, M. H., Afshar, M. R., & Alipouri, Y. (2017). Hybridization of genetic algorithm and fully informed particle swarm for solving the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *Engineering optimization*, *49*(3), 513–530. DOI:10.1080/0305215X.2016.1197610

[20] Geiger, M. J. (2017). A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem. *European journal of operational research*, *256*(3), 729–741. DOI:10.1016/j.ejor.2016.07.024

[21] Oztemel, E., & Selam, A. A. (2017). Bees algorithm for multi-mode, resource-constrained project scheduling in molding industry. *Computers and industrial engineering*, *112*, 187–196. DOI:10.1016/j.cie.2017.08.012

[22] Ghafoori, S., & Taghizadeh Yazdi, M. (2016). Proposing a multi-objective mathematical model for RCPSP and solving It with firefly and simulated annealing algorithms. *Modern researches in decision making*, *1*(4), 117–142.

[23] Kazemi, A., Sarrafha, K., & Alinezhad, A. (2018). Presenting a bi-objective integrated production – distribution planning problem model in a multi echelon supply chain with considering service level. *Production and operations management*, *8*(2), 115–134.

[24] Baradaran, V., & Hosseinian, A. H. (2021). A multi-objective mathematical formulation for the airline crew scheduling problem: MODE and NSGA-II solution approaches. *Journal of industrial management perspective*, *11*(1), 247–269.

[25] Rezaie Moghadam, S., & Doosti, A. (2022). Designing a multi _objective mathematical model for integrated production planning in a reversible supply chain with the uncertainty approach and using the NSGA-II meta_industry. *Journal of decisions and operations research*, *6*(Spec. Issue), 1–24.

[26] Janbaz, S., Davoodi, S. M. R., & Abdolbaghi Ataabadi, A. (2023). An integrated multi-objective model of scheduling and financial flow of production projects and useing of MOSA and MOKA meta-heuristic algorithms. *Journal of industrial engineering research in production systems*, *10*(20), 17–31. DOI:magiran.com/p2572744

[27] Torabi Yeganeh, F., & Zegordi, S. H. (2020). A multi-objective optimization approach to project scheduling with resiliency criteria under uncertain activity duration. *Annals of operations research*, *285*(1–2), 161–196. DOI:10.1007/s10479-019-03375-z

[28] Peng, W., Mu, J., Chen, L., & Lin, J. (2021). A novel non-dominated sorting genetic algorithm for solving the triple objective project scheduling problem. *Memetic computing*, *13*(2), 271–284. DOI:10.1007/s12293-021-00332-x

[29] Liu, Y., You, K., Jiang, Y., Wu, Z., Liu, Z., Peng, G., & Zhou, C. (2022). Multi-objective optimal scheduling of automated construction equipment using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III). *Automation in construction*, *143*, 104587. DOI:10.1016/j.autcon.2022.104587

[30] Babor, M., Pedersen, L., Kidmose, U., Paquet-Durand, O., & Hitzmann, B. (2022). Application of non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to increase the efficiency of bakery production: a case study. *Processes*, *10*(8), 1623. DOI:10.3390/pr10081623

[31] Hou, J., Du, J., & Chen, Z. (2023). Time-optimal trajectory planning for the manipulator based on improved non-dominated sorting genetic algorithm II. *Applied sciences (switzerland)*, *13*(11), 6757. DOI:10.3390/app13116757

[32] Mircioiu, C., Voicu, V., Anuta, V., Tudose, A., Celia, C., Paolino, D., … & Mircioiu, I. (2019). Mathematical modeling of release kinetics from supramolecular drug delivery systems. *Pharmaceutics*, *11*(3), 1–140. DOI:10.3390/pharmaceutics11030140

[33] Mainardi, F. (2022). *Fractional calculus and waves in linear viscoelasticity: an introduction to mathematical models*. World Scientific.

[34] Kurihara, K., Maruyama, H., & Masuda, K. (2010). Hierarchical planning method for product supply based on multi objective genetic algorithm. *Proceedings of the 15th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation, ETFA 2010* (pp. 1–8). IEEE. DOI: 10.1109/ETFA.2010.5641164

[35] Gerstel, O., Filsfils, C., Telkamp, T., Gunkel, M., Horneffer, M., Lopez, V., & Mayoral, A. (2014). Multi-layer capacity planning for IP-optical networks. *IEEE communications magazine*, *52*(1), 44–51.

[36] Chen, H., Deng, T., Du, T., Chen, B., Skibniewski, M. J., & Zhang, L. (2022). An RF and LSSVM–NSGA-II method for the multi-objective optimization of high-performance concrete durability. *Cement and concrete composites*, *129*, 104446. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2022.104446

[37] Zhang, P., Qian, Y., & Qian, Q. (2021). Multi-objective optimization for materials design with improved NSGA-II. *Materials today communications*, *28*, 102709. DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102709

[38] Rahimi, I., Gandomi, A. H., Deb, K., Chen, F., & Nikoo, M. R. (2022). Scheduling by NSGA-II: review and bibliometric analysis. *Processes*, *10*(1), 98. DOI:10.3390/pr10010098

[39] Kumar, A., & Kumar, T. V. V. (2022). Multi-objective big data view materialization using NSGA-III. *International journal of decision support system technology*, *14*(1), 1–28. DOI:10.4018/IJDSST.311066

[40] Hojjati, A., Monadi, M., Faridhosseini, A., & Mohammadi, M. (2018). Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. *Journal of hydrology and hydromechanics*, *66*(3), 323–329. DOI:10.2478/johh-2018-0006

[41] Nebro, A. J., Barba-González, C., López-Ibáñez, M., & García-Nieto, J. (2019). Automatic configuration of nsga-ii with jmetal and irace. *GECCO 2019 companion - proceedings of the 2019 genetic and evolutionary computation conference companion* (pp. 1374–1381). Association for computing machinery. DOI: 10.1145/3319619.3326832

[42] Altuwaim, A., & El-Rayes, K. (2018). Minimizing duration and crew work interruptions of repetitive construction projects. *Automation in construction*, *88*, 59–72. DOI:10.1016/j.autcon.2017.12.024

[43] García-Nieves, J. D., Ponz-Tienda, J. L., Ospina-Alvarado, A., & Bonilla-Palacios, M. (2019). Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects. *Automation in construction*, *105*, 102799. DOI:10.1016/j.autcon.2019.03.020

جانباز و همکاران / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۹۹۲-۹۷۵