Journal of Structural and Construction Engineering, 8(12), 2022, pp. 247-269

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

A Multi Objective Time-Cost-Quality Optimization Model for Project Scheduling and Human Resource Assignment Considering Manpower Competency

Bahman Shojaee[1], Heidar Dashti[2], Mohammad Javad Taheri Amiri[3*]

1- PhD student, Construction engineering and management, Islamic Azad University, Qeshm international Branch
2- Assistant Professor, Department of civil engineering, Islamic Azad University, Chaloos Branch
3- Assistant Professor, Department of civil engineering, Higher Education Institute of Pardisan

ABSTRACT

Today, information and knowledge are so intertwined with human life that the present age has been called the information era. In this situation, the role of human in the organization and the way of looking at him/her will have a significant contribution to the success or failure of the organization. The role of human resources is becoming more and more prominent and it is now mentioned as the only factor in gaining a sustainable competitive advantage. Furthermore, due to dramatic developments in the field of human resource management, competency-based human resource planning has found a special place. In this study, a project scheduling problem considering multi-skilled resource and manpower competency is investigated. To do this end, an integrated multi-objective optimization model of project scheduling and human resource assignment including total completion time and execution cost minimization and project quality maximization is presented. To solve problem exactly, a mixed-integer programming model is developed and then solved by ε-constraint method in GAMS software. As the proposed model is NP-hard, a non-dominated sorting genetic (NSGA-II) algorithm is developed to solve the large scale problem. Furthermore, in order to validate the proposed algorithm, its results compare with exact method for instance problem in small scale. Results indicate that the proposed algorithm is outperformed and it can be used for real case problems.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 December 2020
Revise Date: 01 May 2021
Accept Date: 30 May 2021

Keywords:
Project scheduling
Human resource assignment
Competency
Multi-objective optimization
Non-dominated sorting genetic algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261145.2307

*Corresponding author: Mohammad Javad Taheri Amiri
Email address: jvd.taheri@gmail.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه زمان-هزینه-کیفیت برای مسئله برنامه‌ریزی پروژه و تخصیص نیروی انسانی با در نظر گرفتن شایستگی

بهمن شجاعی[۱]، حیدر دشتی ناصرآبادی[۲]، محمد جواد طاهری امیری[۳*]

۱ - دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بین الملل قشم

۲ - استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

۳-استادیار گروه عمران موسسه آموزش عالی پردیسان فریدونکنار

چکیده

امروزه اطلاعات و دانش با زندگی بشر چنان درهم آمیخته شده است که عصر حاضر را عصر اطلاعات نامیده‌اند. در این شرایط نقش انسان در سازمان و نوع نگاه به او، سهم بسزایی در موفقیت یا شکست سازمان خواهد داشت. با آغاز هزاره سوم، هر روز نقش منابع انسانی پررنگ‌تر شده و اکنون از آن به عنوان تنها عامل کسب مزیت رقابتی پایدار یاد می‌شود. همچنین با توجه به تحولات شگرف در حوزه مدیریت منابع انسانی، برنامه‌ریزی منابع انسانی مبتنی برشایستگی‌ها جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. از اینرو در این مطالعه مسئله زمان-بندی پروژه با در نظر گرفتن منابع چندمهارته و شایستگی نیروی انسانی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه یکپارچه زمان‌بندی پروژه و تخصیص نیروی انسانی شامل حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه، حداقل‌سازی هزینه اجرای پروژه و حداکثر سازی سطح کیفی پروژه ارائه شده است. برای حل مسئله به طور دقیق، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده و در نرم افزار GAMS پیاده سازی شده و با استفاده از رویکرد اپسیلون محدودیت حل شده است. همچنین برای حل مسئله پیشنهادی در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGAII) توسعه داده شده است. صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی با مقایسه نتایج بدست آمده از آن با حل دقیق انجام گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد صحیح الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی بوده طوریکه می‌توان از آن برای حل مسائل در دنیای واقعی بهره برد.

کلمات کلیدی: زمان‌بندی پروژه، تخصیص نیروی انسانی، شایستگی، بهینه سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۹/۰۹/۱۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۱	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261145.2307
					doi: 10.22065/jsce.2021.261145.2307

[*]نویسنده مسئول: محمدجواد طاهری امیری

پست الکترونیکی: jvd.taheri@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه اطلاعات و دانش با زندگی بشر چنان درهم آمیخته شده است که عصر حاضر را عصر اطلاعات نامیده‌اند. در این شرایط نقش انسان در سازمان و نوع نگاه به او، سهم بسزایی در موفقیت یا شکست سازمان خواهد داشت. در مدیریت علمی تیلور، انسان چیزی جز ابزار کار تلقی نمی‌شد. با ظهور نهضت روابط انسانی، نوع نگاه به انسان تغییر کرد و به تدریج در کنار منابع مختلف سازمان چون منابع مالی، تکنولوژیک، اطلاعاتی و ... منابع انسانی نیز مطرح شد. اکنون صحبت از سرمایه انسانی است. با آغاز هزاره سوم، هر روز نقش منابع انسانی پررنگ تر شده و اکنون از آن به عنوان تنها عامل کسب مزیت رقابتی پایدار یاد می‌شود. این امر خصوصاً در اقتصاد دانش امروز بیش از پیش به حقیقت پیوسته است. با این وجود، مدیریت منابع انسانی در سازمان‌ها با چالش‌های متعددی مواجهه است که از جمله آن می‌توان جهانی شدن، کمبود نیروی کار ماهر و متعهد، عدم شناخت نیاز کارکنان، بی‌برنامگی، عدم شایسته سالاری، تبعیض، بهره‌وری ناکافی منابع انسانی، بی‌انگیزگی، عدم مشارکت کارکنان، ترک همکاری کارکنان باسابقه سازمان را نام برد. اما مدیران منابع انسانی می‌توانند از طریق توانمندسازی کارکنان خود و برنامه‌ریزی مناسب، این چالش‌ها را رفع کرده یا از بروز اکثر آنها پیشگیری نمایند. سازمان‌ها در تلاش هستند تا با استفاده از منابع، نیروی انسانی و تمهیدات به طریق علمی هزینه‌ها را کاهش داده و رضایت کارکنان، مدیران و مصرف کنندگان را به حداکثر برسانند. همچنین با بیشترین بهره‌وری از نیروی انسانی به منظور حرکت در جهت اهداف سازمان با کمترین زمان و حداقل هزینه پیشروی کنند. هر زمان که صحبت از پروژه‌های عمرانی می‌شود، سه فاکتور زمان، هزینه و کیفیت از اهمیت بالایی برخوردار است. در پروژه لازم است دو فاکتور زمان و هزینه به حداقل مقدار ممکن خود برسد، اما فاکتور کیفیت حداکثر شود. در این مساله یک پروژه با در نظرگرفتن منابع چند مهارته و با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برنامه‌ریزی شده است. علاوه بر حداقل کردن دو فاکتور زمان و هزینه و حداکثر کردن کیفیت، به دنبال کاهش تعداد نیروی انسانی مصرفی نیز هستیم. در این پروژه تعدادی فعالیت داریم که هر فعالیت ممکن است چند حالت برای انجام شدن داشته باشد که ممکن است زمان فعالیت در حالت‌های مختلف تغییر کند، اما در نهایت هر فعالیت می‌تواند فقط در یک حالت انجام شود. بین فعالیت‌ها، روابط پیش‌نیازی حاکم است، به این ترتیب که یک فعالیت زمانی می‌تواند شروع شود که فعالیت پیش‌نیاز آن تمام شده باشد همچنین در انجام فعالیت‌ها انقطاع جایز نیست، یعنی نمی‌توان یک فعالیت را متوقف کرد و ادامه آن را به بعد موکول کرد و یک فعالیت، زمانی می‌تواند شروع شود که تمام نیروهای انسانی با سطح مهارت مورد نیازش آماده فعالیت باشند و نیروی انسانی از ابتدا تا به انتهای فعالیت مشغول کار در آن فعالیت باشد. هر فعالیت بر حسب میزان اهمیتش یک عدد به عنوان وزن به خود اختصاص می‌دهد که در محاسبات لحاظ می‌شود. چند نوع مهارت در این تحقیق در نظر گرفته شده است که هر مهارت از اهمیت، هزینه و کیفیت متفاوتی برخوردار هستند، حال ممکن است دو نیروی انسانی با یک نوع مهارت، سطح تجربه متفاوتی داشته باشند که این تجربه در میزان دستمزد و کیفیت کار تاثیرگذار است. امروزه با توجه به تحولات شگرف در حوزه مدیریت منابع انسانی و گرایش مدیران به شایسته سالاری در برنامه‌ریزی‌های سازمانی، برنامه‌ریزی منابع انسانی مبتنی برشایستگی‌ها جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. علاوه بر این یکی از شروط اصلی موفقیت و پیشرفت هر سازمان، منابع انسانی آن و شایسته سالاری در حوزه منابع سازمانی است. از این رو، پایه‌ای‌ترین کار برای ایجاد مدیریت منابع انسانی مبتنی بر شایستگی در سازمان‌ها، برنامه‌ریزی نیروی انسانی مبتنی بر شایستگی است. بنابراین در این تحقیق به زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن منابع چندمهارته و شایستگی نیروی انسانی پرداخته شده است. از آنجایی که این مسئله از نوع مسائل NP-hard محسوب می‌شود، به منظور حل مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری بهره گرفته شده است.

۲-ادبیات موضوع

هیمرل و کولیچ (۲۰۱۰) مسئله زمان‌بندی و تخصیص نیروی کار را در چند پروژه فناوری اطلاعات مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه فرض شده است علاوه بر اینکه نیروی کار دارای چندین مهارت می‌باشد، می‌تواند از خارج از سازمان نیز انتخاب شود. هدف از مطالعه حداقل‌سازی هزینه‌های کارکنان می‌باشد. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای این مسئله ارائه شده است. عملکرد مدل پیشنهادی براساس فاصله از جواب بهینه و زمان محاسباتی ارزیابی گردیده است. همچنین مدل پیشنهادی براساس پارامترهای مختلف مسئله مانند اندازه پنجره زمانی پروژه‌ها، تعداد مهارت‌های نیروی انسانی و حجم کاری، تحلیل و بررسی شده است.

نتایج بدست آمده حاکی از برتری استفاده از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در مقایسه با الگوریتم‌های ابتکاری ساده ارائه شده در عمل برحسب دستیابی به جواب‌های شدنی و با هزینه کم می‌باشد[۱].

بالستروس و همکاران (۲۰۱۲) مسئله مدیریت تخصیص نیروی انسانی در چند پروژه را با استفاده از تکنیک‌های جامعه‌سنجی[1] مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، کاربرد جدیدی از مفاهیم کلیدی روانشناسی برای انتخاب کارکنان در سازمان‌هایی که پروژه‌های بزرگ انجام می‌دهند، ارائه شده است. مدیر پروژه با استفاده از این رویکرد جدید، قادر به انتخاب افراد مورد نیاز و ترکیب آنها با هم در قالب یک تیم کاری به منظور دستیابی به حداکثر کارایی از تعاملات بین آنها خواهد بود. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از محاسبات ماتریسی در کامپیوتر انجام می‌گیرد[۲].

چن و همکاران (۲۰۱۴) مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای و تخصیص نیروی انسانی را براساس ضریب زمان کاری نیروی انسانی و برنامه‌ریزی پویا مطالعه نمودند. در این تحقیق اشاره شده است که اثر نیروی کاری بر فعالیت‌ها نقش مهمی در پیاده‌سازی زمان‌بندی چند پروژه‌ای نیروی انسانی دارد. بدین منظور فرمول ضریب زمانی نیروی کار تخمین زده شد. علاوه بر این محدودیت‌هایی مانند حجم کاری فعالیت و تقاضای محدود وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. هدف از مدل ارائه شده، حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه با حداقل هزینه کل ممکن می‌باشد. برای بدست آوردن جواب بهینه، یک مدل برنامه‌ریزی پویا ارائه گردیده است. نتایج محاسباتی نشان داده است که روش پیشنهادی در مقایسه با توالی اولیه بطور مؤثر باعث کاهش زمان تکمیل پروژه‌ها شده است[۳].

بهلولی و همکاران (۲۰۱۶) شایستگی در حوزه مدیریت نیروی انسانی را ارزیابی نمودند. بدین منظور از تکنولوژی نرم‌افزاری، روش‌های ریاضی و آماری برای ارزیابی و تحلیل شایستگی استفاده شده است. براساس مدل استاندارد شایستگی که درخت شایستگی حرفه‌ای، نوآوری و اجتماعی نامیده می‌شود، چهارچوب پیشنهادی ابزار انعطاف‌پذیری در محیط واقعی برای متخصصان جهت ارزیابی نیروی انسانی فراهم آورده است[۴].

آلمیدا و همکاران(۲۰۱۶) مطالعه‌ای انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که یکی از عمده‌ترین مسائل زمانبندی پروژه با منابع محدود(RCPSP[2]) ، زمانبندی پروژه با منابع چند مهارته محدود است. برای حل این مساله از طرح برنامه‌ریزی موازی استفاده شده است. یکی از این نوع طرح‌ها با موفقیت بر روی مسئله زمانبندی پروژه با منابع محدود (RCPSP) انجام شده است. اما برای پیاده‌سازی آن بر روی مسائل زمانبندی با منابع چند مهارته محدود، ابتدا دو مفهوم وزن منبع و فعالیت گروه پیشرفت داده شد[۵].

مقصودلو و همکاران(۲۰۱۶) یک مسئله زمانبندی پروژه چند حالته با منابع چند مهارته اما محدود مورد مطالعه قرار داده‌اند که اهداف آن کاهش زمان و هزینه پروژه و افزایش کیفیت کار بوده است. برای حل این مسئله از یک الگوریتم فرا ابتکاری به نام الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه علف‌های هرز (MOIWO[3]) استفاده شده است. برای تایید جواب‌های این الگوریتم از دو الگوریتم دیگر نیز استفاده شده است که در نهایت نشان داده شد که الگوریتم علف‌های هرز کارایی بهتری نسبت به آن دو الگوریتم داشته است[۶].

کیانتو و همکاران (۲۰۱۷) مسئله مدیریت نیروی انسانی مبتنی بر دانش را مورد مطالعه قرار دادند. این ایده بطور عملی در مجموعه داده‌های ۱۸۰ شرکت اسپانیایی با استفاده از روش مدلسازی معادلات ساختاری (SEM)[4] و حداقل مربعات جزئی (PLS)[5] اجرا شده است. نتایج حاصل از مطالعات نشان داده است که مدیریت صحیح نیروی انسانی مبتنی بر دانش منجر به اثرگذاری مثبت بر بازگشت سرمایه و عملکرد نوآورانه شرکت خواهد شد[۷].

[1] Sociometric
[2] Resource Constrained Scheduling Problem
[3] Multi-Objective Invasive Weeds Optimization Algorithm
[4] Structrual Equation Modelling
[5] Partial Least Squares

باتارلین و همکاران (۲۰۱۷) اثر مدیریت نیروی انسانی بر بازار رقابتی در شرکت‌های حمل و نقلی را مورد مطالعه قرار دادند. این مقاله به تحلیل تأثیر مدیریت منابع انسانی در رقابت پذیری شرکت های حمل و نقل می پردازد. با توجه به بررسی مقالات علمی در این تحقیق، بحث در مورد مدیریت منابع انسانی، مزایای رقابتی و مفاهیم تجزیه و تحلیل رقابتی، مدل‌های مدرن مدیریت منابع انسانی و تئوری‌های رابطه بین شرکت‌ها و تخصیص منابع انسانی و رقابت ارزیابی شده است. در این مقاله شرکت‌های بخش حمل و نقل لیتوانیایی که در فرایندهای تحقیق در زمینه مدیریت منابع انسانی فعالیت می‌کنند، توصیف می‌شود. آنها دریافتند که تخصیص نیروی انسانی با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی همچون سطح مهارت، میزان تجربه و قابلیت مدیریت نقش بسزایی در افزایش بهره وری فعالیت‌های سازمانی در حوزه حمل و نقل دارند[۸].

طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۷)، مسئله برنامه‌ریزی پروژه موازنه زمان-هزینه را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک حل نموده است. در این تحقیق، تابع هدف زمان با استفاده از روش زنجیره بحرانی محاسبه شده و بافر پروژه از طریق روش بریدن و چسباندن بدست آمده است. همچنین به منظور محاسبه تابع هدف هزینه، از مجموع هزینه‌های مربوط به منابع مصرفی و غیرمصرفی استفاده شده است. اهداف زمان و هزینه با استفاده از تابع مطلوبیت به یک هدف تبدیل شده و مسئله به صورت تک هدفه حل شده است[۹].

طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۷)، همچنین به بررسی مسئله برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای موازنه زمان-هزینه-کیفیت را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پرداخته‌اند. در این تحقیق سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از توابع مطلوبیت به یک هدف تبدیل کرده و به صورت تک هدفه مسئله حل شده است. تابع هدف زمان با استفاده از روش زنجیره بحرانی محاسبه شده و بافر پروژه از طریق روش بریدن و چسباندن بدست آمده است. همچنین به منظور محاسبه تابع هدف هزینه، از مجموع هزینه‌های مربوط به منابع مصرفی و غیر مصرفی استفاده شده است. تابع هدف کیفیت نیز از طریق مجموع وزنی کیفیت هر یک از فعالیت‌ها بدست می‌آید[۱۰].

لیان و همکاران (۲۰۱۸) مسئله تخصیص نیروی انسانی چند مهارته را در شرکت تولید سرامیک مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه سطوح مهارت و کارایی مختلفی برای نیروهای انسانی در نظر گرفته شده است. همچنین گروه بندی نیروهای انسانی، بارگذاری و تخصیص فعالیت‌ها در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی با هدف ایجاد تعادل حجم بارگذاری بین نیروهای انسانی ارائه شده است. از آنجایی که مسئله NP-hard است، برای حل مسئله در ابعاد بزرگ الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGAII)[6] توسعه داده شده است. آنها توانستند با استفاده از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی به جواب‌هایی بهتر نسبت به مطالعات پیشین دست یابند. از اینرو ادعا کردند که الگوریتم آنها قابلیت حل مسئله در دنیای واقعی را دارا می‌باشد.[۱۱].

طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله موازنه زمان-هزینه را در شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در شرایط چندپروژه‌ای حل نموده است. در این تحقیق سه پروژه با تعداد فعالیت‌های ۷، ۸ و ۱۰ به طور همزمان مورد برنامه‌ریزی تحت محدودیت منابع قرار گرفته است، همچنین روش زمانبندی پروژه در این تحقیق روش زنجیره بحرانی بوده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ارائه شده عملکرد مناسبی به منظور حل مسئله زمان-هزینه در شرایط محدودیت منابع داشته است[۱۲].

برک و همکاران (۲۰۱۹) مسئله برنامه ریزی نیروی انسانی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه عدم قطعیت در پیش‌بینی درآمدها در نظر گرفته شده است. بدین منظور از روش بهینه سازی استوار برای حل مسئله با هدف حداکثرسازی سود استفاده شده است[۱۳].

طاهری امیری و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیق دیگری به بررسی مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت با فعالیت‌های چندحالته با استفاده از الگوریتم فراابتکاری چند هدفه ازدحام ذرات پرداخته‌اند. در این تحقیق برای هر یک از فعالیت‌ها چندین مد اجرایی در نظر گرفته شده است، بدین شکل که الگوریتم بهینه‌سازی این تحقیق به دنبال شناسایی بهترین توالی و مد اجرایی فعالیت‌ها بوده که در آن زمان و هزینه پروژه حداقل شده و کیفیت آن در بالاترین مقدار خود قرار داشته باشد[۱۴].

[6] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

لئو و همکاران (۲۰۲۰)، با در نظر گرفتن مصرف انرژی ، یک مشکل چند مهارته بودن کارگران و تعادل خط مونتاژ را مورد بررسی قرار دادند. این مشکل شامل برنامه‌ریزی محصولات و اختصاص کارگران به ایستگاه‌های کاری مناسب در یک دوره زمانی مشخص بوده است. دو هدف (۱) کل هزینه ها شامل هزینه پردازش و هزینه ثابت ناشی از به کارگیری کارگران ، و (۲) مصرف انرژی به طور همزمان در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه فرموله شده و یک روش محدود کننده برای بدست آوردن جبهه پارتو برای مشکلات در مقیاس کوچک اتخاذ شده است. برای حل مشکلات در اندازه بزرگ، یک قاعده زمان پردازش و مصرف انرژی طبقه‌بندی شده (PT-EC SFR) ، یک الگوریتم ژنتیکی چند هدفه (NSGA-II) و یک روش بازپخت شبیه سازی شده چند هدفه (MOSA) تدوین شده است. آزمایش‌های عددی انجام شده و نتایج محاسباتی نشان داده که PF-EC SFR طراحی شده از نظر زمان محاسبات و کیفیت راه حل‌ها از دو الگوریتم دیگر بهتر عمل کرده است [۱۵].

امبولا و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی موازنه زمان و هزینه برنامه‌ریزی کارآمد گردش کار در فضای ابری پرداختند. این مقاله شامل چهار مرحله اصلی انتخاب وظیفه، ارزیابی محدوده انواع نمونه‌های درخواست شده ضمنی، ارزیابی بودجه اضافی و انتخاب ماشین مجازی است. ارزیابی محدوده انواع نمونه‌های درخواست شده ضمنی یک مفهوم جدید برای برنامه‌ریزی است که هدف آن تعیین طیف وسیعی است که به بهترین وجهی برای اجرای گردش کار مناسب هستند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که توجه به نوع منابع و تعداد آنها حیاتی است[۱۶].

طی بررسی‌های انجام شده در تحقیقات پیشین در هیچ یک از مقالات مورد بررسی، به بررسی همزمان سه هدف زمان، هزینه و کیفیت در شرایط تخصیص نیروی انسانی با در نظر گرفتن شایستگی پرداخته نشده است که در این تحقیق با توجه به لزوم به کارگیری نیروهای شایسته در پروژه‌ها از این رویکرد در برنامه‌ریزی پروژه‌ها استفاده شده است.

۳-تعریف مسئله

در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه یکپارچه زمان‌بندی پروژه و تخصیص نیروی انسانی ارائه می‌شود. در این مسئله منابع انسانی دارای سطوح شایستگی مختلفی می‌باشند. که این شایستگی بر کیفیت اجرای فعالیت‌ها توسط نیروی انسانی اثر می‌گذارد، طوریکه هر چه سطح شایستگی فرد بیشتر باشد، کیفیت اجرای فعالیت توسط آن فرد بیشتر بوده و در مقابل هزینه اجرای آن فعالیت افزایش می‌یابد. اهداف در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه، حداقل‌سازی هزینه اجرای پروژه و حداکثرسازی سطح کیفی پروژه می‌باشد. در این پروژه تعدادی فعالیت وجود دارد که براساس روابط پیش‌نیازی انجام می‌پذیرند. متغیر تصمیم مسئله شامل تخصیص نیروی انسانی با سطح شایستگی مشخص برای انجام فعالیتی می‌باشد که قابلیت اجرای آن را داشته باشد طوریکه فعالیت در کمترین زمان ممکن، با کمترین هزینه و با بیشترین سطح کیفی اجرا شود. خروجی مسئله شامل نیروی انسانی تخصیص یافته به هر یک از فعالیت‌ها و زمان شروع و پایان آنها می‌باشد.

۳-۱- مفروضات تحقیق

مفروضات در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد.

- منابع غیر مصرفی در نظر گرفته شده شامل نیروی انسانی است.
- نیروی انسانی دارای سطوح شایستگی متفاوتی می‌باشند.
- نیروی انسانی دارای سطح تخصص مختلفی می‌باشند
- تعداد فعالیت‌های پروژه از پیش مشخص می‌باشد.
- فعالیت‌ها براساس روابط پیش نیازی حاکم بین آنها اجرا می‌شوند.
- امکان انقطاع فعالیت‌ها وجود ندارد.
- منابع انسانی براساس سطح شایستگی شان به فعالیت‌ها تخصیص می‌یابند.

- هر یک از فعالیت‌ها نیاز به افرادی با سطوح مهارتی مختلف دارند.

۳-۲- نمادگذاری‌ها

J: مجموعه فعالیت‌ها
I: مجموعه نیروی انسانی
E: مجموعه سطح شایستگی
T: مجموعه افق زمانی
j: اندیس فعالیت‌ها $j=1,\ldots,|J|$
i: اندیس نیروی انسانی $i=1,\ldots,|I|$
e: اندیس سطح شایستگی نیروی انسانی $e=1,\ldots,|E|$
t: اندیس دوره زمانی $t=1,\ldots,|T|$

۳-۳- پارامترهای مسئله

c_{eij} هزینه نیروی انسانی i با سطح شایستگی e برای اجرای فعالیت j
d_{eij} زمان انجام فعالیت j توسط نیروی انسانی i با سطح شایستگی e
q_{eij} میزان کیفیت مورد انتظار فعالیت j توسط نیروی انسانی i با سطح شایستگی e
a_{eij} اگر نیروی انسانی i با سطح شایستگی e توانایی انجام فعالیت j را داشته باشد ۱ و در غیر اینصورت ۰
$pr_{jj'}$ اگر فعالیت j بلافاصله بعد فعالیت 'j انجام شود ۱ و در غیر اینصورت ۰
N یک عدد خیلی بزرگ

۳-۴-متغیرهای مسئله

x_{eijt} اگر نیروی انسانی i با سطح شایستگی e به فعالیت j در دوره t تخصیص یابد ۱ و در غیر اینصورت ۰
y_{eij} اگر نیروی انسانی i با سطح شایستگی e به فعالیت j تخصیص یابد ۱ و در غیر اینصورت ۰
z_{jt} اگر فعالیت j در دوره t آغاز شود ۱ و در غیر اینصورت ۰
C_{max} زمان تکمیل پروژه
st_j زمان شروع فعالیت j
ct_j زمان تکمیل فعالیت j

۳-۵- مدل ریاضی چند هدفه پیشنهادی

مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق سه هدفه بوده و شامل حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه و هزینه بکارگیری نیروی انسانی و حداکثرسازی سطح کیفی پروژه می‌باشد. در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده است.

$$Min\ C_{max} \qquad ۱$$

$$Min \sum_{j=1}^{|J|}\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} c_{eij} \times d_{eij} \times y_{eij} \quad (۲)$$

$$Max \sum_{j=1}^{|J|}\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} q_{eij} \times y_{eij} \quad (۳)$$

$$\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} y_{eij} = 1 \qquad \forall j \quad (۴)$$

$$y_{eij} \leq a_{eij} \qquad \forall e,i,j \quad (۵)$$

$$\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|}\sum_{j=1}^{|J|} x_{eijt} \leq 1 \qquad \forall t \quad (۶)$$

$$st_j = \sum_{t=1}^{|T|} z_{jt} \times t \qquad \forall j \quad (۷)$$

$$ct_j = st_j + \sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} d_{eij} \times y_{eij} - 1 \qquad \forall j \quad (۸)$$

$$C_{max} \geq ct_j \qquad \forall j \quad (۹)$$

$$st_j - st_j \geq \sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} d_{eij} \times y_{eij} \times pr_{jj} - N \times (1 - pr_{jj}) \qquad \forall j,j \quad (۱۰)$$

$$x_{eijt}, y_{eij}, z_{jt} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,e,t \quad (۱۱)$$

$$st_j, ct_j \geq 0 \qquad \forall j,t \quad (۱۲)$$

رابطه ۱ مرتبط با حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه را نشان می‌دهد. رابطه ۲ به دنبال حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های پروژه شامل هزینه بکارگیری نیروی انسانی می‌باشد. رابطه ۳ حداکثرسازی کیفیت را نشان می‌دهد. رابطه ۴ بیان می‌نماید که هر فعالیت تنها به یک نیروی انسانی با سطح شایستگی مشخص تخصیص داده می‌شود. رابطه ۵ تضمین می‌کند تنها زمانی یک نیروی انسانی به فعالیتی تخصیص می‌یابد که شایستگی انجام آن را داشته باشد. رابطه ۶ تضمین می‌کند که هر نیروی انسانی در هر دوره تنها می‌تواند بر روی فعالیتی که به آن تخصیص یافته کار انجام دهد. نحوه محاسبه شروع و تکمیل هر فعالیت به ترتیب در رابطه ۷ و ۸ نشان داده شده است. رابطه ۹ نحوه محاسبه زمان تکمیل پروژه را بیان می‌نماید. رابطه ۱۰ روابط پیش نیازی بین فعالیت را نمایش می‌دهد. در نهایت روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب متغیرهای صفر و یک و صحیح مسئله را نشان می‌دهند.

۴- رویکردهای حل پیشنهادی

در این مطالعه از رویکرد اپسیلون محدودیت برای حل دقیق مسئله در ابعاد کوچک و از رویکرد فرابتکاری ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده است. در ادامه هر یک از این روش‌ها توضیح داده می‌شوند.

۴-۱- روش اپسیلون محدودیت

در مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه، بیشتر از یک تابع هدف وجود دارد و معمولاً یک جواب بهینه وجود ندارد که به‌طور هم‌زمان تمامی توابع هدف را بهینه سازد؛ بنابراین معمولاً مجموعه‌ای از جواب‌ها برای مسئله به دست می‌آید که جواب پارتو نامیده می‌شود. هرچند که هر یک از جواب‌های پارتو درواقع برای یکی از توابع هدف جواب بهینه است، اما دست‌کم یکی از توابع هدف دیگر را از جواب بهینه دور می‌نماید. دو روش مرسوم برای حل برنامه‌ریزی چندهدفه روش ضرایب وزنی و روش اپسیلون محدودیت هستند و روش اپسیلون محدودیت در مقایسه با روش ضرایب وزنی مشکل مقیاس توابع را ندارد [۱۷].. از این‌رو در این مطالعه از رویکرد محدودیت اپسیلون برای حل مسئله چندهدفه بهره برده شده است. روش اپسیلون محدودیت یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت، به حل این نوع مسائل می‌پردازد [۱۸]. مرز پارتو با استفاده از روش قید ε می تواند به‌صورت زیر ایجاد شود.

$$\begin{aligned}&\text{minimize } f_1(X)\\&\text{subject to}\\&x\in X,\\&f_2(X)\le\varepsilon_2,\\&\dots\\&f_n(X)\le\varepsilon_n.\end{aligned}$$

گام‌های روش محدودیت اپسیلون به شرح زیر است:

- یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید
- هر بار با توجه به یکی از توابع هدف مسئله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به دست آورید.
- بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم بندی کنید و یک جدول مقادیر برای $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ دست آورید.
- هر بار مسئله را با تابع هدف اصلی بازای هر یک از مقادیر $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ حل کنید.
- جواب‌های پارتو یافته شده را گزارش کنید.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب

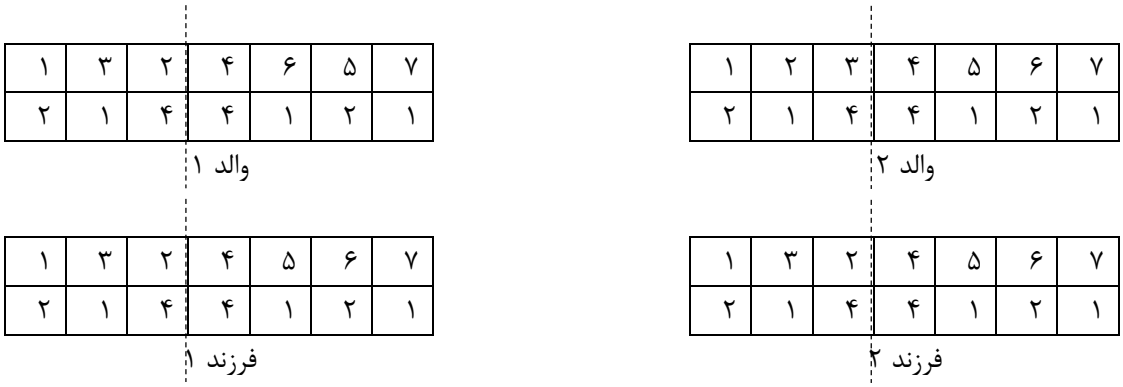
در میان الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک از کارایی بالایی برخوردار بوده و کارایی فراوانی دارد. این الگوریتم در مقالات مختلفی از جمله در حوزه مهندسی و مدیریت ساخت مورد استفاده قرار گرفته است[۹ و ۱۲ و ۱۹-۲۱] . الگوریتم ژنتیک دارای اجزای گوناگونی است که در ادامه هر یک از آنها برای مسئله پیشنهادی معرفی می‌شوند. ابتدا کروموزم مسئله است طوریکه هر کروموزوم نشان دهنده یک نقطه یا جواب از مسئله می‌باشد. در این مطالعه تعداد ژن‌های کروموزوم به تعداد فعالیت‌های مسئله می‌باشد. به عنوان نمونه اگر پروژه ای دارای ۷ فعالیت باشد، یک کروموزوم با ۷ ژن خواهیم داشت. مقادیر داخل هر ژن نیز نیروی انسانی تخصیص یافته به آن فعالیت را نشان می‌دهد. شکل ۱ نمونه ای از کروموزوم مسئله را نشان می‌دهد.

۱	۳	۲	۴	۶	۵	۷
۲	۱	۴	۴	۱	۲	۱

شکل ۱- نحوه تولید کروموزوم

همانطورکه در شکل ۱ نشان داده شده سطر اول کروموزوم نشان دهنده توالی انجام فعالیت‌ها می‌باشد. سطر دوم نیز نیروی انسانی تخصیص یافته به آن را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه نیروی انسانی ۲ فعالیت‌های ۱ و ۵ را انجام می‌دهد. پس از ایجاد یک جواب

اولیه، برای تولید نسل‌های آتی از دو عملگر تقاطع و جهش استفاده شده است. برای عمل تقاطع، از عملگر تقاطع تک نقطه ای استفاده شده است. شکل ۲ نحوه تقاطع تک نقطه ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نحوه اعمال عملگر تقاطع

همانطورکه در شکل ۲ نشان داده شده، دو والد از یک نقطه شکسته شده و قسمت اول والد ۱ با قسمت دوم والد ۲ ادغام می‌شود. البته بعد از انجام تقاطع روابط پیش نیازی و تخصیص نیروی انسانی بررسی می‌شود. در نهایت عملگر جهش بر روی یک والد انجام می‌شود طوریکه ترتیب انجام دو فعالیت در یک والد طوریکه رابطه پیش نیازی رعایت شود جابجا می‌شود. شکل ۳ نحوه جهش را در یک والد نشان می‌دهد.

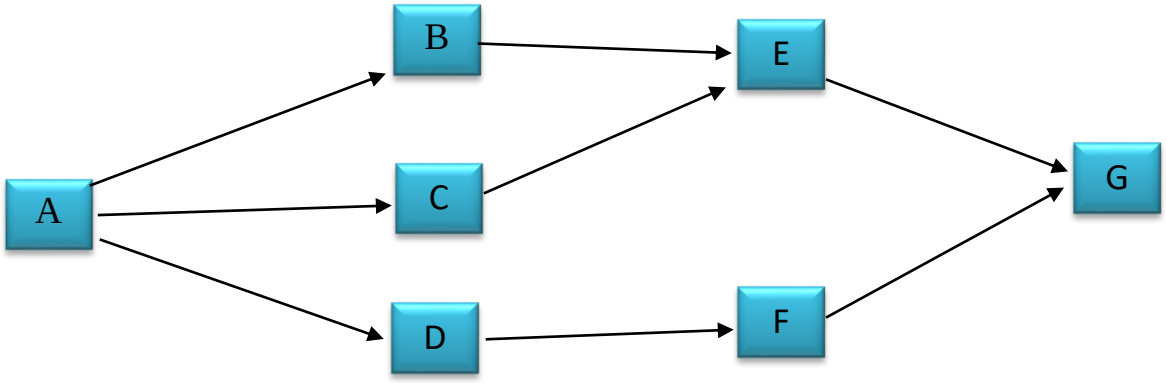
شکل ۳- نحوه اعمال عملگر جهش

۵- نتایج بدست آمده از حل مسئله

در این تحقیق به منظور حل مدل پیشنهادی از دو رویکرد حل دقیق و حل فراابتکاری استفاده شده و در نهایت به مقایسه نتایج بدست آمده از دو رویکرد و صحت سنجی نتایج بدست آمده پرداخته شده است که در ادامه به بررسی این موارد پرداخته شده است.

۵-۱- تشریح مسئله نمونه

در این بخش یک مسئله نمونه در ابعاد کوچک تشریح می‌گردد. در این مسئله یک پروژه با ۷ فعالیت در نظر گرفته شده است. برای اجرای این پروژه ۹ نیروی انسانی با سطوح شایستگی مختلف مد نظر قرار گرفته‌اند که بسته به سطح شایستگی، به فعالیت‌های مختلف تخصیص می‌یابند تا در نهایت پروژه در کمترین زمان و هزینه ممکن تکمیل شده و بیشترین کیفیت پروژه حاصل گردد. شبکه پروژه و رابطه پیش نیازی بین فعالیت‌ها به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴- شبکه پروژه

جدول ۱- رابطه پیش نیازی فعالیت‌ها

فعالیت	A	B	C	D	E	F	G
پیش نیاز	-	A	A	A	B,C	D	E,F

از آنجایی که هر یک از نیروهای انسانی دارای سطوح شایستگی و میزان توانایی متفاوتی می‌باشند، ممکن است هر یک قابلیت اجرای تمامی فعالیت‌ها را نداشته باشند. بر این اساس جدول ۲ قابلیت اجرای هر یک از فعالیت‌ها توسط نیروهای انسانی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- قابلیت اجرای فعالیت توسط نیروی انسانی

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱	✓	✓			✓	✓	
۲	✓	✓	✓		✓	✓	✓
۳			✓	✓	✓		
۴		✓	✓	✓	✓	✓	✓
۵	✓	✓		✓	✓	✓	
۶	✓			✓			✓
۷		✓			✓		
۸	✓		✓			✓	
۹		✓	✓	✓			✓

همچنین زمان و هزینه انجام هر یک از فعالیت‌ها توسط هر یک از نیروهای انسانی به ترتیب در جدول ۳ و ۴ گزارش شده است.

جدول ۳- زمان اجرای فعالیت‌ها توسط نیروی انسانی (روز)

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱	۷	۱۰			۸	۱۳	
۲	۵	۷	۴		۵	۹	۸
۳			۶	۸	۸		
۴		۷	۵	۶	۵	۱۲	۷
۵	۵	۱۰		۷	۷	۱۲	
۶	۹			۹			۱۱
۷		۱۱			۱۰		
۸	۹		۶			۱۳	
۹		۱۰	۷	۸			۱۰

جدول ۴- هزینه اجرای فعالیت‌ها توسط نیروی انسانی (هزار تومان)

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱	۳۵۰۰	۴۲۰۰			۴۸۰۰	۳۸۰۰	
۲	۴۵۰۰	۵۵۰۰	۵۱۰۰		۶۰۰۰	۵۲۰۰	۴۴۰۰
۳			۴۳۰۰	۳۵۰۰	۵۰۰۰		
۴		۵۰۰۰	۵۵۰۰	۴۸۰۰	۶۰۰۰	۴۵۰۰	۵۰۰۰
۵	۴۵۰۰	۴۲۰۰		۴۰۰۰	۵۵۰۰	۴۵۰۰	
۶	۳۰۰۰			۳۸۰۰			۳۵۰۰
۷		۳۵۰۰			۴۰۰۰		
۸	۳۰۰۰		۴۰۰۰			۳۲۰۰	
۹		۴۲۰۰	۴۱۰۰	۳۵۰۰			۴۰۰۰

پس از ارائه زمان و هزینه مربوط به فعالیت‌ها در ادامه میزان کیفیت مورد انتظار برای هر یک از فعالیت‌ها توسط نیروهای انسانی مختلف در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵- کیفیت اجرای فعالیت‌ها توسط نیروی انسانی (درصد)

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱	۸۴	۸۳				۸۲	
۲	۹۳	۹۴	۹۲		۹۵	۹۰	۹۱
۳			۷۶		۷۷		
۴		۹۲	۹۵	۹۱	۹۳	۹۴	۹۰
۵	۸۹	۸۸		۸۷	۹۰	۸۶	
۶	۷۹			۷۷			۷۸
۷		۷۳			۷۴		
۸	۷۷		۷۹			۷۶	
۹		۸۱	۸۶	۸۳			۸۸

۵-۲- رویکرد حل دقیق مسئله نمونه

همانطورکه اشاره گردید مسئله پیشنهادی سه هدفه می‌باشد. بنابراین در این تحقیق برای حل آن بصورت دقیق از رویکرد اپسیلون محدودیت استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، ابتدا مدل ریاضی پیشنهادی سه مرتبه حل می‌شود. در مرحله اول حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه به عنوان تابع هدف اصلی مسئله در نظر گرفته شده و با توجه به محدودیت‌های موجود مدل اول بصورت زیر تشکیل می‌شود.

$$Min\ C_{max} \qquad ۱۳$$

محدودیت های ۴ الی ۱۲

پس از حل مدل اول، بهترین مقدار تابع هدف (کمترین زمان) به عنوان مقدار بهینه تابع هدف اول ذخیره می‌شود. همزمان مقادیر دو تابع هدف دیگر نیز ثبت می‌شود. در ادامه مدل دوم براساس تابع هدف دوم یعنی حداقل‌سازی هزینه اجرای پروژه به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و با توجه به محدودیت‌های مسئله، مدل دوم بصورت زیر ایجاد می‌گردد.

$$Min \sum_{j=1}^{|J|}\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} c_{eij} \times d_{eij} \times y_{eij} \qquad ۱۴$$

محدودیت های ۴ الی ۱۲

به همین ترتیب بهترین مقدار تابع هدف دوم (کمترین هزینه اجرا) و مقدار سایر توابع ثبت می‌گردد. در نهایت تابع هدف سوم که حداکثرسازی کیفیت بدست آمده می‌باشد، به عنوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شده و مدل سوم بصورت زیر تشکیل می‌شود.

$$Max \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{e=1}^{|E|} \sum_{i=1}^{|I|} q_{eij} \times y_{eij} \quad (15)$$

محدودیت های ۴ الی ۱۲

مقدار بهینه تابع هدف اصلی و مقادیر سایر توابع بازای هر مدل در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶- مقادیر هر یک از توابع هدف

تابع هدف / حداقل سازی	اول (Z_1)	دوم (Z_2)	سوم (Z_3)
Z_1^*	**۳۰**	۳۷,۲۰۰,۰۰۰	۸۶
Z_2^*	۴۱	**۲۶,۱۰۰,۰۰۰**	۷۹
Z_3^*	۳۳	۳۶,۵۰۰,۰۰۰	**۸۸**

همانطورکه در جدول ۶ مشاهده می‌شود جواب بهینه هر یک از مسائل بدست آمده است. همچنین نحوه تخصیص بهینه نیروی انسانی به فعالیت‌ها در مدل اول به شرح جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۷- نحوه تخصیص بهینه نیروی انسانی در مدل اول

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱							
۲	■						
۳							
۴		■	■		■		■
۵				■			
۶							
۷							
۸							
۹							

همانطورکه در جدول ۷ نشان داده شده است دو فعالیت A و F به نیروی انسانی شماره ۲ که دارای بیشترین سطح شایستگی می‌باشد، تخصیص یافته است. همچنین چهار فعالیت B، C، E و G به نیروی انسانی شماره ۴ اختصاص داده شده است. در نهایت نیروی شماره ۵ فعالیت D را انجام می‌دهد. جدول ۸ زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها براساس نیروی انسانی تخصیص یافته به آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۸- زمان شروع و پایان هر فعالیت

فعالیت / زمان	A	B	C	D	E	F	G
شروع	۱	۶	۱۳	۶	۱۸	۱۳	۲۳
پایان	۶	۱۳	۱۸	۱۳	۲۳	۲۲	۳۰

علاوه بر این جدول ۹ نحوه تخصیص بهینه نیروی انسانی به فعالیت‌ها در مدل دوم جاییکه حداقل‌سازی هزینه اجرای پروژه مد نظر بوده را نشان می‌دهد.

جدول ۹- نحوه تخصیص بهینه نیروی انسانی در مدل دوم

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱							
۲							
۳							
۴							
۵							
۶							
۷							
۸							
۹							

همانطورکه در جدول ۹ مشخص است از آنجا که حداقل هزینه مد نظر می‌باشد فعالیت‌ها به نیروهای انسانی با سطح شایستگی کمتر و در نتیجه هزینه کمتر تخصیص یافته‌اند. در نهایت جدول ۱۰ نحوه تخصیص نیروی انسانی در مدل سوم که حداکثرسازی کیفیت مد نظر بوده را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰- نحوه تخصیص بهینه نیروی انسانی در مدل اول

فعالیت / نیروی انسانی	A	B	C	D	E	F	G
۱							
۲							
۳							
۴							
۵							
۶							
۷							
۸							
۹							

مطابق جدول ۱۰ تفاوت نحوه تخصیص این حالت با حالت اول تنها در تخصیص فعالیت B می‌باشد جاییکه در این مدل این فعالیت به فردی تخصیص داده شده که کیفیت اجرای فعالیت آن بیشتر بوده است. پس از محاسبه مقادیر بهینه هر یک از توابع، یکی از اهداف به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده و سایر اهداف بصورت محدودیت در مسئله اعمال می‌شود. با توجه به موضوع تحقیق، در این مطالعه حداکثرسازی میزان شایستگی مورد انتظار به عنوان هدف اصلی مد نظر قرار گرفته است. بنابراین مدل نهایی بصورت زیر بازنویسی شده است.

$$Min\ C_{max} \qquad ۱$$

$$\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} y_{eij} = 1 \qquad \forall j \qquad ۴$$

$$y_{eij} \le a_{eij} \qquad \forall e,i,j \qquad ۵$$

$$\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} y_{eij} \le 1 \qquad \forall i,t \qquad ۶$$

$$st_j = \sum_{t=1}^{|T|} z_{jt} \times t \qquad \forall j \qquad ۷$$

$$ct_j = st_j + \sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} d_{eij} \times y_{eij} - 1 \qquad \forall j \qquad ۸$$

$$C_{max} \ge ct_j \qquad \forall j \qquad ۹$$

$$st_j - st_j \ge \sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} d_{eij} \times y_{eij} \times pr_{jj} - N \times \left(1 - pr_{jj}\right) \qquad \forall j,j \qquad ۱۰$$

$$x_{eijt}, y_{eij}, z_{jt} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,t \qquad ۱۱$$

$$C_{max}, st_j, ct_j \ge 0 \qquad \forall j,t \qquad ۱۲$$

$$\sum_{j=1}^{|J|}\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} c_{eij} \times d_{eij} \times y_{eij} \le \varepsilon_1 \qquad ۱۳$$

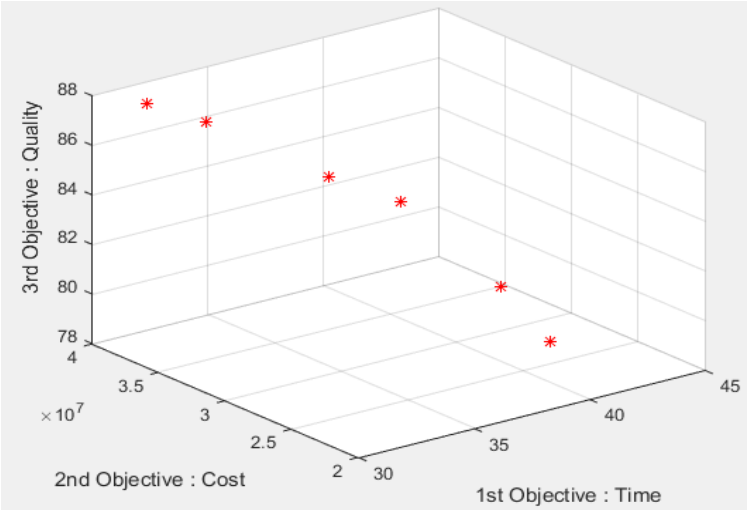
$$\sum_{j=1}^{|J|}\sum_{e=1}^{|E|}\sum_{i=1}^{|I|} q_{eij} \times y_{eij} \ge \varepsilon_2 \qquad ۱۴$$

با توجه به توضیحات ارائه شده بازه تغییرات تابع هدف اول و دوم به ۸ نقطه تقسیم شده و مسئله فوق بازای هر یک از این مقادیر، یکبار حل می‌شود. جدول ۱۱ مقادیر بدست آمده از حل مسئله فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱- جواب‌های پارتو بدست آمده از حل دقیق مسئله نمونه توسط نرم افزار GAMS

	تابع هدف		
	Z_1	Z_2	Z_3^*
مقادیر تابع هدف	۴۱	۲۴,۷۰۰,۰۰۰	۷۹
	۴۰	۲۶,۷۰۰,۰۰۰	۸۱
	–	۲۸,۷۰۰,۰۰۰	۸۳
	۳۸	۳۰,۷۰۰,۰۰۰	۸۴
	۳۶	۳۲,۷۰۰,۰۰۰	۸۵
	–	۳۴,۷۰۰,۰۰۰	۸۶
	۳۳	۳۶,۷۰۰,۰۰۰	۸۷
	۳۱	۳۷,۷۰۰,۰۰۰	۸۸

همانطورکه در جدول ۱۱ نشان داده شده از بین ۸ نقطه، تنها ۶ نقطه دارای جواب بوده است. بنابراین مسئله فوق دارای ۶ جواب پارتو می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده است.



شکل ۵- جواب پارتو بدست آمده از حل دقیق مسئله نمونه

۵-۲- طراحی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAII) برای مسئله پیشنهادی

همانطورکه اشاره گردید، در این مطالعه علاوه بر ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه، یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نیز توسعه داده شده است. از اینرو در این بخش، نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی ارائه خواهد شد. بدین منظور مطابق جدول ۱۲ مقادیر مختلفی بازای هر پارامتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۲- مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGAII

پارامتر	تعریف	مقادیر		
Npop	تعداد جمعیت اولیه	۵۰	۷۵	۱۰۰
Max_iteration	تعداد نسل ها (تکرار)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
Cross_rate	نرخ عملگر تقاطع	۰,۶	۰,۷	۰,۸
Mut_rate	نرخ عملگر جهش	۰,۴	۰,۳	۰,۲

در ادامه با استفاده از روش سعی و خطا براساس مقادیر تابع هدف، بهترین مقدار برای هر یک از آنها بدست آمده و در جدول ۱۳ گزارش شده است.

جدول ۱۳- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم NSGAII

پارامتر	بهترین مقدار
Npop	۱۰۰
Max_iteration	۲۰۰
Cross_rate	۰,۸
Mut_rate	۰,۲

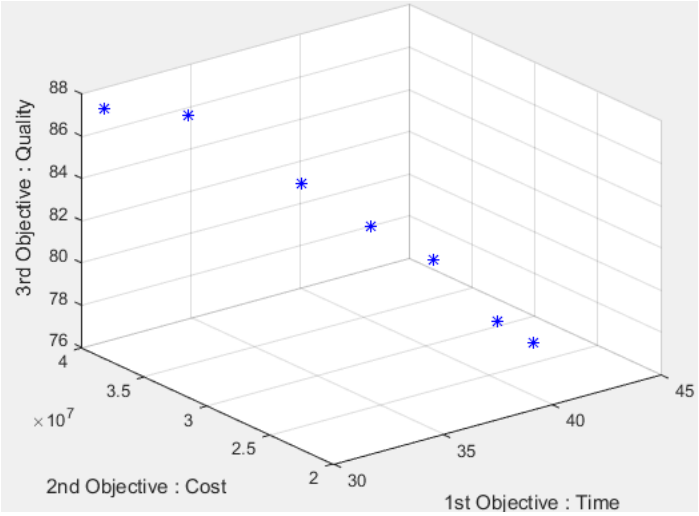
۵-۳- اعتبارسنجی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

به منظور بررسی صحت الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب پیشنهادی، مطالعه موردی ارائه شده که بصورت دقیق توسط نرم-افزار GAMS حل شده، در این بخش توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل می‌شود. بدین منظور مسئله نمونه، در الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی پیاده‌سازی گردید. برای تولید پارامترهای ورودی مسئله از جدول ۱ الی ۵ استفاده شده است. این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در مدت زمان ۳۲ ثانیه حل شده و جواب‌های پارتو در ۱۴ گزارش شده است.

جدول ۱۴- جواب‌های پارتو بدست آمده از حل مسئله نمونه توسط الگوریتم NSGAII پیشنهادی

شماره جواب	تابع هدف		
	Z_1	Z_2	Z_3
۱	۴۲	۲۴,۹۰۰,۰۰۰	۷۷
۲	۴۱	۲۶,۰۰۰,۰۰۰	۷۸
۳	۳۹	۲۷,۷۰۰,۰۰۰	۸۱
۴	۳۸	۳۰,۹۰۰,۰۰۰	۸۲
۵	۳۶	۳۳,۰۰۰,۰۰۰	۸۴
۶	۳۳	۳۶,۸۰۰,۰۰۰	۸۷
۷	۳۱	۴۰,۰۰۰,۰۰۰	۸۷

همچنین شکل ۳ جواب‌های پارتو بدست آمده از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- جواب پارتو بدست آمده از حل فراابتکاری مسئله نمونه

جدول ۱۵- مقایسه جواب‌های پارتو بدست آمده از حل مسئله نمونه توسط دو رویکرد پیشنهادی

شماره جواب	حل دقیق با GAMS			رویکرد NSGAII			میزان اختلاف (٪)
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_1	Z_2	Z_3	
۱	-	-	-	۴۲	۲۴,۹۰۰,۰۰۰	۷۷	-
۲	۴۱	۲۴,۷۰۰,۰۰۰	۷۹	۴۱	۲۶,۰۰۰,۰۰۰	۷۸	۲
۳	۴۰	۲۶,۷۰۰,۰۰۰	۸۱	۳۹	۲۷,۷۰۰,۰۰۰	۸۱	۲
۴	۳۸	۳۰,۷۰۰,۰۰۰	۸۴	۳۸	۳۰,۹۰۰,۰۰۰	۸۲	۱
۵	۳۶	۳۲,۷۰۰,۰۰۰	۸۵	۳۶	۳۳,۰۰۰,۰۰۰	۸۴	۱
۶	۳۳	۳۶,۷۰۰,۰۰۰	۸۷	۳۳	۳۶,۸۰۰,۰۰۰	۸۷	۰
۷	۳۱	۳۷,۷۰۰,۰۰۰	۸۸	۳۱	۴۰,۰۰۰,۰۰۰	۸۷	۲
زمان حل (ثانیه)	۴۳			زمان حل (ثانیه)		۲۱	

جدول ۱۵ مقایسه جواب‌های بدست آمده از حل دقیق و رویکرد فراابتکاری را نشان می‌دهد. همانطورکه در جدول ۱۴ مشاهده می‌شود جواب‌های پارتو بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در مقایسه با جواب‌های بدست آمده از حل دقیق توسط نرم افزار GAMS از نظر مقداری تقریبا نزدیک به هم بوده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که الگوریتم پیشنهادی کارایی لازم را برای حل مسئله در ابعاد بزرگ دارد. همچنین زمان حل مسئله نمونه پیشنهادی با استفاده از هر دو روش گزارش شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود زمان حل رویکرد فراابتکاری به مراتب کمتر از زمان حل دقیق بوده است.

۵-۴- حل مسائل در ابعاد مختلف

به منظور بررسی قابلیت حل مسئله در ابعاد مختلف توسط الگوریتم پیشنهادی، چند مسئله بصورت تصادفی تولید و حل شده است. نحوه تولید پارامترهای مسئله در جدول ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۱۶- نحوه تولید مسئله

پارامتر	بازه تولید
تعداد فعالیت	۱۵-۷
تعداد سطح شایستگی	۱۵-۸

براساس مقادیر در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترها چند نمونه مسئله در ابعاد بزرگ تولید و توسط الگوریتم NSGAII پیشنهادی حل شده که در جدول ۱۷ گزارش شده است.

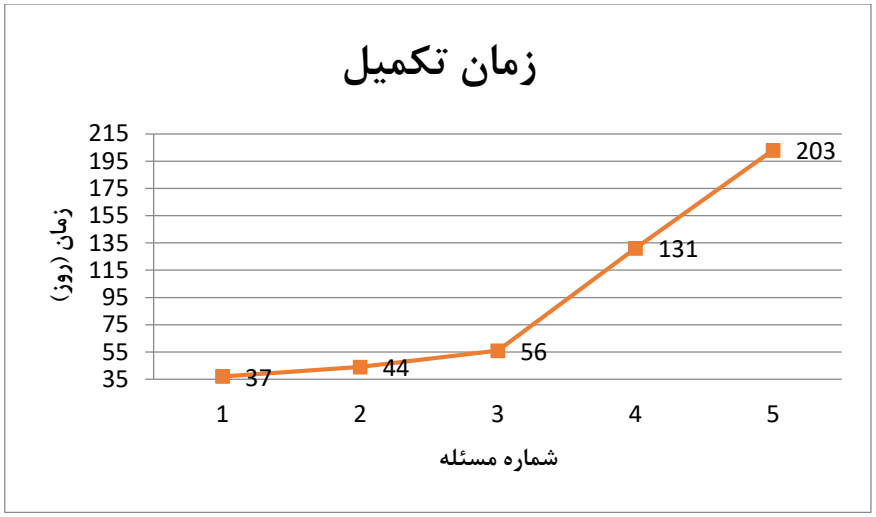
جدول ۱۷- حل مسائل بزرگ توسط NSGAII

شماره مسئله	تعداد فعالیت	تعداد سطح شایستگی	جواب پارتو			زمان حل (ثانیه)
			Z_1	Z_2	Z_3	
۱	۹	۸	۳۷	۳۵,۴۰۰,۰۰۰	۸۳	۲۶
			۴۲	۲۷,۵۰۰,۰۰۰	۸۱	
۲	۱۲	۱۰	۴۴	۴۱,۶۰۰,۰۰۰	۸۴	۳۸
			۵۳	۳۶,۲۰۰,۰۰۰	۸۲	
۳	۱۵	۱۲	۵۶	۴۸,۷۰۰,۰۰۰	۸۳	۵۳
			۶۷	۴۳,۵۰۰,۰۰۰	۸۰	
۴	۳۰	۱۵	۱۳۱	۱۰۳,۲۵۰,۰۰۰	۸۲	۱۱۲
			۱۳۸	۹۶,۴۰۰,۰۰	۷۹	
۵	۵۰	۲۰	۲۰۳	۱۶۴,۱۰۰,۰۰۰	۸۳	۱۷۹
			۲۱۱	۱۵۷,۵۰۰,۰۰۰	۸۱	

همانطورکه در جدول ۱۷ نشان داده شده، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب پیشنهادی قابلیت حل مسئله در ابعاد مختلف را داشته و قادر به دستیابی به جواب‌های پارتو مختلف بوده است.

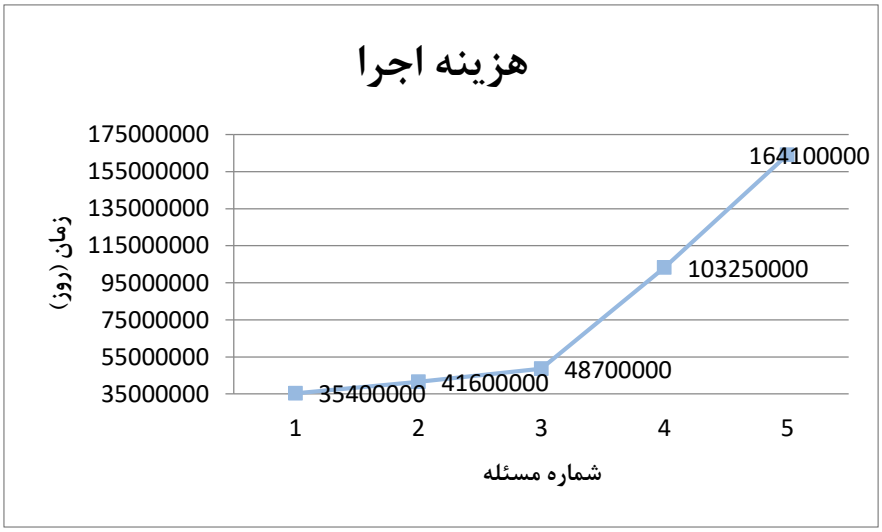
۵-۵- تحلیل حساسیت

در ادامه روند تغییر تابع هدف زمان و هزینه بازای تغییر ابعاد مسئله نشان داده شده است. شکل ۷ روند تغییر زمان تکمیل پروژه را براساس افزایش ابعاد مسئله نشان می‌دهد.



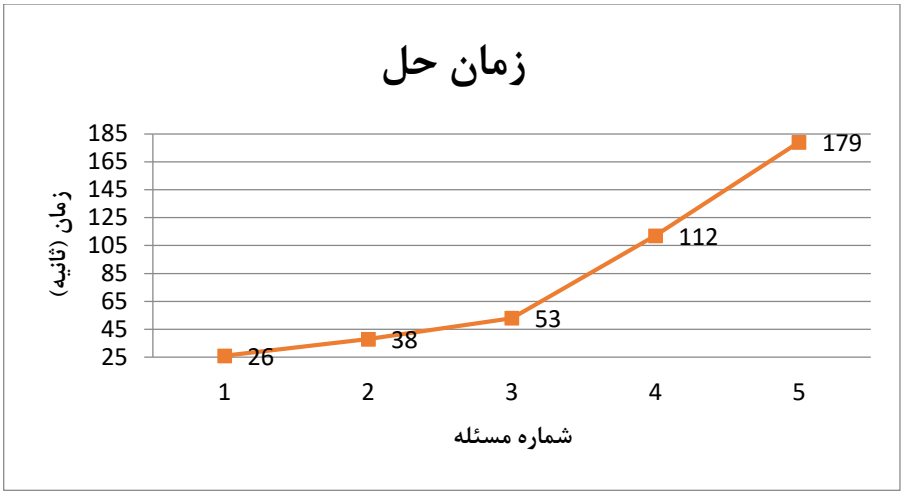
شکل ۷- روند تغییر تابع هدف زمان تکمیل پروژه

همانطورکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود هر چه ابعاد مسئله یعنی تعداد فعالیت‌ها افزایش می‌یابد زمان تکمیل پروژه نیز افزایش یافته است. همچنین شکل ۸ روند تغییر تابع هدف هزینه را نسبت به افزایش ابعاد مسئله نشان می‌دهد.



شکل ۸- روند تغییر تابع هدف هزینه اجرای پروژه

مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد فعالیت‌ها و همچنین تنوع نیروی انسانی با سطوح شایستگی مختلف، هزینه اجرای پروژه نیز افزایش یافته است. همچنین روند تغییر زمان حل مسئله با افزایش ابعاد آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطورکه مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد فعالیت‌ها به دلیل افزایش پیچیدگی مسئله زمان حل آن نیز افزایش چشمگیری داشته است.



شکل ۹- روند تغییر زمان حل مسائل

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله زمان‌بندی پروژه چند هدفه و تخصیص نیروی انسانی با در نظر گرفتن سطوح شایستگی ارائه گردید. در این مطالعه سه هدف حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه، حداقل سازی هزینه اجرای پروژه و حداکثرسازی کیفیت اجرای پروژه مد نظر قرار گرفته است. به منظور حل مدل پیشنهادی، یک مسئله نمونه در ابعاد کوچک طراحی شده و بصورت دقیق با رویکرد اپسیلون محدودیت و با استفاده از نرم افزار GAMS حل گردیده است. علاوه بر این یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAII) توسعه داده شده است. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، مسئله نمونه حل شده بطور دقیق مجدد توسط این الگوریتم حل شده و نتایج بدست آمده نشان دهنده عملکرد صحیح آن بوده است. نتایج حاکی از صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله نمونه می‌باشد.

با توجه به مطالعه انجام شده، پیشنهاداتی برای کارهای آتی ارائه می‌شود. می‌توان در این مسئله محدودیت منابع چند حالته و اثر یادگیری در نظر گرفته شود. در این مطالعه سه هدف زمان، هزینه و کیفیت به عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده است. درحالیکه می‌توان ارزش خالص فعلی، تعداد نیروهای انسانی بکار گرفته شده را نیز جز هدف‌های مسئله در نظر گرفت. در این مطالعه، مسئله پیشنهادی توسط نرم افزار MATLAB و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب حل شده است. به منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ، بدلیل افزایش پیچیدگی مسئله، امکان حل دقیق وجود ندارد. از اینرو می‌توان از روش‌های فرا ابتکاری دیگر همچون الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه، الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل آن استفاده کرد.

مراجع

1. Heimerl, C., and Kolisch, R., (2010),"Scheduling and staffing multiple projects with a multi-skilled workforce", *Operation Research Spectrum*, Vol. 32, pp. 343-368.
2. Ballesteros-Pérez, P., González-Cruz, M.C., and Fernández-Diego, M., (2012),"Human resource allocation management in multiple projects using sociometric techniques", *International Journal of Project Management*, Vol. 30, pp. 901-913.
3. Chen, Jun-jie, Zhu, Jiang-li, Zhang, Ding-ning, (2014),"Multi-project Scheduling Problem with Human Resources Based on Dynamic Programming and Staff Time Coefficient", International Conference on Management Science & Engineering.
4. Bohlouli, Mahdi et al. (2017), "Competence Assessment as an Expert System for Human Resource Management: A Mathematical Approach." *Expert Systems with Applications*, Vol. 70, pp. 83–102.

5. Bernardo F. Almeida , Isabel Correia , Francisco Saldanha-da-Gama, (2016), "Priority-based heuristics for the multi-skill resource constrained project scheduling problem", *Expert Systems with Applications*, Vol.57, pp.91-103.
6. Hamidreza Maghsoudlou , Behrouz Afshar-Nadjafi , Seyed Taghi Akhavan Niaki, (2016), "A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem", *Computer & Chemical Engineering*, Vol.88, pp.157-169.
7. Kianto, Aino, Josune Sáenz, and Nekane Aramburu, (2017),"Knowledge-Based Human Resource Management Practices, Intellectual Capital and Innovation.", *Journal of Business Research*,Vol. 81, pp. 11–20.
8. Batarlienė, Nijolė et al. (2017), "The Impact of Human Resource Management on the Competitiveness of Transport Companies.", *Procedia Engineering*, Vol. 187, pp. 110–16.
9. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., Hematian, M., Kordi, H., (2017), "Optimization of Time and Costs in Critical Chain Method Using Genetic Algorithm ", Journal of Engineering and Applied *Sciences*, Vol 12, No 4, 871-876.
10. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., Abessi, O., (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", *International Journal of Engineering*, Vol. 30, No. 5, PP. 705-713.
11. Lian, Jie, ChenGuang Liu, WenJuan Li, and Yong Yin., (2018), "A Multi-Skilled Worker Assignment Problem in Seru Production Systems Considering the Worker Heterogeneity", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 118, pp. 366–382.
12. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., Abessi, O., (2018), "Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 10, PP. 3738-3752.
13. Berk, Lauren, Dimitris Bertsimas, Alexander M. Weinstein, and Julia Yan, (2019), "Prescriptive Analytics for Human Resource Planning in the Professional Services Industry" *European Journal of Operational Research*, Vol.272, No. 2, pp. 636-641.
14. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., Abessi, O., (2019), "Time-Cost-Quality trade off in Critical Chain Method with multi mode activities by Multi Objective Particle Swarm Optimization", *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 134-154 (in persian).
15. Liu, R., Liu, M., Chu, F., Zheng, F., Chu, C., (2020), "Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem", *Computers & Industrial Engineering* (In press).
16. Mboula, J., Kamla, V., Djamegni, C., (2020), "Cost-time trade-off efficient workflow scheduling in cloud", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 103, 102107.
17. Esmaili, M., Amjady, N. and Shayanfar, H. A. (2011). "Multi objective congestion management by modified augmented e-constraint method." Appllied Energy. 88(3), 755-766.
18. Ehrgott, M., and Gandibleux, X. (2003). Multiobjective combinatorial optimization-theory, methodology, and applications. In Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys (pp. 369-444). Springer US.
19. Noparast, M., Hematian, M., Ashrafian, A, Taheri Amiri, M. J., AzariJafari, H, (2021), "Development of a non-dominated sorting genetic algorithm for implementing circular economy strategies in the concrete industry", Sustainable Production and Consumption, 27, 933-946.
20. Mahdavi, I., Hematian, M., Taheri Amiri, M. J., Ghenaat, O., (2019), "Presentation of exact and metaheurestic solution method for minimization project completion time with considering budget constraint problem", Journal of Structural and Construction Engineering 6 (3), 41-56 (In persian)
21. Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F., Rahmani Firoozjaee, A., Hematian, M., (2018), "Mazandaran Bridge Maintenance Optimization under Budget Constraint by Genetic Algorithm", Quarterly Journal of Transportation Engineering 10 (2), 199-211(In persian)