ارائه مدلی برای زمانبندی در پروژه عمرانی چند هدفه با محدودیت منابع و حل آن با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری

مقاله علمی – پژوهشی

ندا نگارچی*، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران
صادق شهبازی، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران
سید یعقوب ذوالفقاری فر، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: n.negarchi@gmail.com
دریافت: ۱٤۰۳/۰۳/۲۰– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱
صفحه ۲٦۸–۲٤۹

چکیده

هدف از تحقیق ارائه رویکردی برای حل مسئله زمانبندی پروژه عمرانی با در نظرگرفتن تخصیص منابع به فعالیت‌ها با توجه به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع با مهارت‌های چندگانه بود. مدلی برای زمانبندی در پروژه تحقیقاتی عمرانی چند هدفه با محدودیت منابع با هدف حداقل‌سازی زمان و هزینه با کمینه سازی هزینه بیکاری نیروی انسانی به عنوان منابع با سطح مهارتی و جریمه عدم تخصیص سطح تخصصی واقعی منابع ضمن تکمیل پروژه ارائه شد. که حاصل آن یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی بود. برای حل مدل از روش ال‌پی متریک و الگوریتم فراابتکاری استفاده شدو از نرم افزارهای اکسل، متلب و گمز استفاده شد. مثال‌های مختلف و تصادفی در ابعاد مختلف ارائه و با کمک نرم افزارها حل شد و مشخص شد که با بزرگ شدن ابعاد مسئله، زمان حل مسئله با نرم افزار گمز به صورت نمایی افزایش یافت و از مرحله بعد، مسئله با نرم‌افزار گمز غیر قابل حل شدکه برای حل از الگوریتم NSGA II استفاده شد. سپس جوابهای بدست آمده با جواب‌های بدست آمده از الگوریتم MOSA مقایسه گردید و در نهایت صحت مدل ریاضی ارائه شده، بررسی گردید.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی پروژه، محدودیت منابع با مهارت‌های چندگانه، مدل بندی ریاضی، الگوریتم فراابتکاری

۱–مقدمه

اهمیت نیروی کار در مراکز کاری مختلف متفاوت است به طور مثال در سیستم‌های تولیدی محور اصلی بحث ماشین‌ها بوده و به دلیل سرمایه گذاری بالاتر برنامه‌ریزی برای ماشین‌ها جایگزین برنامه‌ریزی برای نیروی کار شده‌اند. اما در پروژه‌های عمرانی نیروی کار از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشد که در این زمینه توجه چندانی نشده یا به عنوان یک برنامه‌ریزی فرعی مورد توجه قرار گرفته است. ولی در سال‌های اخیر محققین به این سو گرایش پیدا کردند و سعی در بهینه‌سازی منابع نیروی انسانی کردند (صالحی و صباغ، ۱۳۹٦). توجه به اینکه سیستم زمانبندی برای هر نوع عملیات و رخداد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد محققین را به سوی استفاده بهینه از این منابع سوق داده. در زمان بندی نیروی انسانی هدف تخصیص یک الگوی کاری زمانی با توجه به خواسته‌ها و نیازهای سیستم و تخصص نیروی کار به گونه‌ای است که هزینه‌ها را به حداقل برساند. آنچه که در دیدگاه عملی و

نظری برای بهبود برنامه‌ریزی زمانبندی نیروی انسانی در پروژه‌ها با محدودیت منابع حائز اهمیت است این است که سود سازمان‌ها به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. از بعد نظری نیز زمانبندی نیروی انسانی در پروژه‌ها برای محققین بسیار جذاب می‌باشد زیرا اکثر مدل‌های معروف بهینه‌سازی نظیرمسئله تولید کارگاهی و فروشنده دوره گرد حالت خاصی از این مسئله هستند اما از آنجایی که پیچیدگی الگوریتم‌های ارائه شده برای حل این مسائل بسیار حائز اهمیت است این امر می‌تواند در مورد مسائل بزرگ حتی با پیشرفت‌هایی که امروزه در زمینه‌ی برنامه‌نویسی کامپیوتری و سخت افزاری مورد استفاده برای اجرای این برنامه حاصل شده‌است بسیار آزاردهنده باشد به همین دلیل اکثر محققین ترجیح می‌دهند تا از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل اینگونه مسئله‌ها استفاده‌کنند (Mehmanchi, & Shadrokh; 2005). در این تحقیق مسئله زمانبندی نیروی انسانی در پروژه مورد بررسی قرار خواهدگرفت که در آن تعدادی نیروی انسانی با مهارت‌های مختلف وجود خواهند داشت که قابلیت انجام کارهای متفاوت با سرعت‌های مختلف را دارند. هدف مسئله ارائه مدلی برای زمانبندی در پروژه عمرانی چند هدفه با محدودیت منابع و حل آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری می‌باشد به‌گونه‌ای که زمان تکمیل پروژه و هزینه کل پروژه کمینه شود. همچنین سعی می‌شود. هزینه بیکاری نیروی انسانی (کمینه‌سازی زمانهای بیکاری نیروی انسانی) و جریمه عدم تخصیص سطح تخصصی واقعی نیروی انسانی کمینه شود برای این منظور یک مدل ریاضی ارائه خواهدشد که این مدل در نرم‌افزار مناسب اجرا خواهدشد که می‌تواند مسائل با ابعاد کوچک را در مدت زمان معقول حل کند؛ اما به دلیل NP-hard بودن مسئله، این نرم‌افزار قادر به تولید جواب‌های بهینه برای مسائل با ابعاد بزرگ نخواهد بود. برای این منظور سعی می‌شود از روش فراابتکاری استفاده شود. اهداف تحقیق پیش رو را می‌توان به‌صورت ادامه بیان کرد.

-ارائه مدلی برای زمانبندی نیروی انسانی در پروژه عمرانی چند هدفه با محدودیت منابع

-کمینه نمودن زمان انجام پروژه

–کمینه نمودن هزینه کل پروژه

-کمینه‌سازی هزینه بیکاری نیروی انسانی (کمینه‌سازی زمان‌های بیکاری نیروی انسانی)

–کمینه سازی جریمه عدم تخصیص سطح تخصصی واقعی نیروی انسانی

۲–پیشینه تحقیق

در مقاله (احمدی و همکاران،۱۳۹۲)، سعی بر آن است تا با بکارگیری روش طولانی‌ترین مسیر، زمان پیش بینی شده اتمام پروژه در شبکه‌های با توپولوژی موازی را بر مبنای اطلاعات سیستم مدیریت ارزش کسب شده و بدون افزودن حجم قابل توجه به محاسبات، بهبود بخشد. علاوه بر این، انتظار می‌رود که بتواند به عنوان راه حلی مناسب برای استفاده مدیریت ارزش کسب شده در شبکه‌های موازی بکارگرفته شود. در مقاله (موحدیان عطار و همکاران، ۱۳۹٤)، با هدف حداکثرکردن ارزش فعلی خالص و درنظرگرفتن شیوه‌های مختلف پرداخت کارفرما، مسئله انتخاب و زمان‌بندی چندین پروژه با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و برنامه‌ریزی محدودیتی بررسی شده‌است؛ به‌طوری‌که امکان‌پذیری پروژه‌ها با توجه به میزان منابع دردسترس تضمین و کلیه روابط پیش‌نیازی رعایت شود. فعالیت‌ها با حالت مختلف از منابع، امکان اجرا دارند و از منابع تجدیدپذیر (نیروی انسانی، ماشین‌آلات) و تجدیدناپذیر (مواد اولیه، بودجه) استفاده کردند. در محاسبه هزینه‌ها، هزینه اضافه‌کاری منابع تجدیدپذیر، جریمه دیرکرد یا پاداش تحویل زودتر از موعد پروژه درنظرگرفته شده‌است. در پژوهش (رضایی‌نیک و مولوی، ۱۳۹٤)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای مسئلهٔ چندهدفهٔ انتخاب و زمان‌بندی همزمان با اهدف ماکزیمم‌سازی ارزش کنونی خالص مورد انتظار و مینیمم‌سازی ارزش کنونی واریانس درآمد کل پروژه‌ها، ارائه شد. با توجه به پیچیدگی زیاد آن به‌خصوص برای مسائل بزرگ، الگوریتم‌های ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید

و ژنتیک ارائه شده و کارایی آنها در یک مثال فرضی مقایسه شد. نتایج حاصل، بیانگر برتری نسبی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید از نظر کیفیت جواب و زمان اجرا بوده‌است. سرانجام مدل پیشنهادی با پیاده‌سازی در یک شرکت دانش‌بنیان در دانشگاه فردوسی مشهد اعتبارسنجی شد. در مقاله (افشارنجفی و همکاران، ۱۳۹۵) یک مدل ریاضی برای انتخاب پورتفولیوی پروژه و مسئله هزینه در دسترس بودن منابع برای زمان‌بندی فعالیت‌ها به منظور به حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص پروژه‌های انتخاب شده با حفظ اولویت و محدودیت منابع پیشنهاد شد. یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر ژنتیک برای مقابله با مدل توسعه‌یافته پیشنهاد شده‌است. درالگوریتم پیشنهادی در کنار عملگرهای متداول الگوریتم‌های ژنتیکی از چند عملگر هوشمند دیگر نیز برای جستجوی محلی در منابع و جابجایی فعالیت‌ها استفاده شده و نتایج نشان داد که در مسائل کوچک، راه حل‌های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نسبت به راه حل‌های بهینه محلی ناشی از نرم‌افزار Lingo بهتر بوده‌است. از سوی دیگر، برای مسائل با اندازه متوسط و بزرگ که بهینه محلی در زمان محدود CPU وجود ندارد، استحکام الگوریتم پیشنهادی مناسب بوده‌است. در مقاله (خادمی‌زاده و کاوندی،۱۳۹۵)، با استفاده از تکنیک ارزش افزوده یک روش کارا و موثر برای موازنه هزینه – زمان در بین پروژه‌های صنعتی و تجاری یک سازمان با هدف حداقل نمودن مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد پروژه‌های صنعتی و حداکثر نمودن درآمد پروژه‌های تجاری ارائه شده‌است. برنامه‌ریزی اولیه ومجدد پروژه، شامل سه مرحله زمانبندی فعالیت‌ها، تخصیص و تسطیح منابع و پیش‌بینی دقیق از وضعیت آینده پروژه بوده‌است. استفاده از تکنیک ارزش افزوده در این مقاله ضمن ایجاد تعادل در زمان و هزینه، افزایش دقت در برنامه‌ریزی اولیه و مجدد پروژه، بهبود میزان تسطیح منابع، باعث کاهش قابل توجه زمان و هزینه در پروژه‌های صنعتی و افزایش درآمد پروژه‌های تجاری مورد مطالعه شده‌است. در تحقیق (خاتمی و همکاران، ۱۳۹٦) مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود وبا فعالیت‌های چندحالته، شامل تعیین زمان‌بندی پایهٔ فعالیت‌های پروژه بوده‌است که توانست در چندین حالت انجام شود و روابط پیش‌نیازی را رعایت کند؛ درحالی‌که زمان پروژه، هزینه و نوسانات منابع را کمینه ساخت. در این پژوهش، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با استفاده از ابزار شبیه‌سازی شبکهٔ کنترل پروژه، وارد نرم‌افزار شبیه‌سازی (ED) شد و خروجی‌های آن با خروجی‌های حاصل از یک الگوریتم فراابتکاری مقایسه شد. درنهایت، راهکارهای مدیریتی به‌منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی از لحاظ کمینه‌سازی زمان کل، هزینه و تسطیح منابع ارائه شد. در تحقیق (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۷) سعی شد تا با ارائه مدل ریاضی دو هدفه، شرایط برای ایجاد توازن میان فشرده‌سازی، صرفه‌جویی در هزینه و به تاخیر انداختن زمان اجرای فعالیت‌ها مهیا شود به طوری که ابزار مناسبی در اختیار تصمیم‌گیرندگان برای تصمیم‌گیری در رابطه با زمان اجرای هر فعالیت با توجه به امکانات در دسترس و نیز زمان در اختیار، برای اتمام پروژه فراهم آید. در مدل ریاضی پیشنهادی تلاش شده‌است تا با به کارگیری فرضیاتی نظیر تابع هزینه غیرخطی و همچنین درنظرگرفتن ارزش زمانی پول، شرایط مسئله تا حد امکان به محیط واقعی نزدیک‌تر گردد. در پایان مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله را با استفاده از الگوریتم MOPSO بررسی و تاثیر فشرده‌سازی و به تاخیر انداختن فعالیت‌ها را بر روی مجموعه نامغلوب نهایی ارائه شد. در پژوهش (قلی‌زاده و افشارنجفی،۱۳۹۷) به بررسی مسئله زمان‌بندی چندحالته پروژه با درنظرگرفتن منابع محدود پرداخته شد و برای نزدیکتر شدن شرایط حاکم با دنیای واقعی از منابع تجدیدپذیر (از جمله نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات) و همچنین منابع تجدیدناپذیر (از جمله مصرفی و پول) هم‌زمان استفاده شد. در ادامه پژوهش نیز مبحث زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پرداخت پروژه با اهداف افزایش NPV پروژه و کاهش زمان اتمام پروژه در مسئله بررسی شد. به همین دلیل ابتدا بر اساس فرضیه‌های مطرح‌شده در فضای مسئله، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ریاضی برای فرموله سازی مسئله ارائه شد؛ سپس برای اعتبارسنجی مدل، چندین مسئله نمونه در ابعاد مختلف طراحی و با نرم‌افزار GAMS و روش محدودیت اپسیلون حل شد. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ نیز از روش الگوریتم NSGA-II بهره گیری شده و کارایی آن از طریق مقایسه با روش محدودیت اپسیلون سنجیده شد. در مقاله (مقدس‌زاده، ۱۳۹۸) مسئله

کمینه‌سازی هزینه تامین منابع پروژه با فرض عدم قطعیت در سطح دسترسی منابع مورد بررسی قرار داده‌اند. مدلسازی مساله با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای انجام شده‌است و کمبود منابع از توزیع دو جمله ای پیروی کرده است. برای کاهش ابعاد مساله و بهبود زمان حل از الگوریتم کاهش سناریوی رو به جلو استفاده شده‌است. در مطالعه (مهدوی،۱۳۹۸) مسئله موازنه زمان و هزینه زمانبندی پروژه در شرایط محدودیت بودجه بررسی شده‌است. بدین منظور یک الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای پیدا کردن بهینه اقدامات اصلاحی در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و توسعه داده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قابلیت حل مسئله بطور دقیق را داشته است چرا که فاصله بین جواب مسائل نمونه در سطوح بودجه مختلف برابر صفر بوده‌است. در جدول ۱ شکاف تحقیقاتی بیین مطالعات قبلی با تحقیق حاضر نشان داده شده است.

۳- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق کاربردی، برای شناسایی یک مسئله، یک فرضیه با دقت وارسی و برای صحت سنجی فرضیه‌ها از نرم‌افزارهای اکسل، متلب و گمز برای آنالیز و تحلیل داده‌ها استفاده شده است بدین صورت که برای حل مسئله در ابعاد کوچک از نرم افزار گمز و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از نرم افزار متلب استفاده شده است.

مراحل تحقیق مطابق فلوچارت شکل۱ می‌باشد.

شکل۱. مراحل تحقیق

نام مقاله	نام نویسنده	سال	روش حل در ابعاد بزرگ	روش حل در ابعاد کوچک	استفاده از روش های چند هدفه	وجود روابط پیشنیازی و پس‌نیازی	منابع با مهارت خاص	زمان بندی پروژه	تخصیص منابع	نوع مدل	عدم قطعیت	تابع هدف
Energy-efficient project scheduling with supplier selection in manufacturing projects	Rahman & et al.	2022	-	فرآیند تحلیل سلسله مراتبی	تک هدفه	*			*	LP	قطعی	هزینه
A filtering genetic programming framework for stochastic resource constrained multi-project scheduling problem under new project insertions	Chen & et al.	2022	برنامه‌ریزی ژنتیکی فیلتر مبتنی بر بیش‌ابتکاری	-	تک هدفه	*		*	*	LP	غیر قطعی	زمان
Integrated multi-project planning and scheduling - a multiagent approach	He & et al.	2022	بهینه‌سازی کلنی مورچه‌ها	-	تک هدفه	*		*		LP	قطعی	زمان
Search space decomposition for resource-constrained project scheduling	Liu & et al.	2022	الگوریتم کلاسیک	-	تک هدفه	*		*	*	LP	قطعی	زمان
An efficient genetic programming approach to design priority rules for resource-constrained project scheduling problem	Luo & et al.	2022	روش فوق ابتکاری GP با تکنیک حذف تکراری	-	تک هدفه	*		*	*	MIP	قطعی	زمان

جدول۱. شکاف تحقیقاتی

ادامه جدول۱. شکاف تحقیقاتی

A tool to test and validate algorithms for the resource-constrained project scheduling problem	Vanhoucke & et al.	2018	-	فرآیند تحلیل سلسله مراتبی	تک هدفه	*		*	*	MIP	قطعی	زمان
A tabu search procedure for the resource-constrained project scheduling problem with alternative subgraphs	Servranckx & et al.	2022	جستجوی ممنوعه	فرآیند تحلیل سلسله مراتبی	تک هدفه	*		*		NLP	قطعی	هزینه
Efficient priority rules for the stochastic resource-constrained project scheduling problem	Chen & et al.	2018	ابتکاری	-	تک هدفه	*		*	*	LP	غیر قطعی	زمان
An agent-based simulation system for multi-project scheduling under uncertainty	Song & et al.	2018	-	الهی متریک	چند هدفه	*		*	*	LP	قطعی	زمان
تحقیق حاضر			NSGA II ترکیبی	الهی متریک	چند هدفه	*		*	*	LP	قطعی	زمان – هزینه

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن مفروضات زیر انجام شده است.

-هر فعالیت نیازمند داشتن تواناییهای به خصوصی می‌باشد.

-هر منبع دارای تواناییهایی برای انجام فعالیتهاست.

-انجام هر فعالیت توسط هر منبع دارای زمان مشخصی است.

-محدودیت زمانی برای انجام هر فعالیت تعیین شده‌است.

-هزینه انجام هر فعالیت توسط هر منبع تعیین شده‌است.

-روابط پیش نیازی بین فعالیتها مشخص شده‌است.

با در نظر گرفتن مفروضات بالا مدلسازی ریاضی بهصورت زیر می‌باشد.

۳-۱-مدلسازی تحقیق

مجموعه‌های مورد استفاده بصورت زیر می‌باشد.

i, i': مجموعه فعالیت‌ها

j: مجموعه منابع

k: مجموعه مهارت‌ها

T: مجموعه دوره زمانی

پارامترها

to_{ij}: زمان انجام فعالیت i توسط منبع j

a_i: دیرترین زمان مجاز برای پایان فعالیت i

TP: دیرترین زمان مجاز برای پایان پروژه

$es_{ii'}$: پارامتر صفر و یک؛ اگر باید شروع فعالیت i' بعد از پایان فعالیت i باشد برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

$ss_{ii'}$: پارامتر صفر و یک؛ اگر باید شروع فعالیت i' بعد از شروع فعالیت i باشد برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

$ee_{ii'}$: پارامتر صفر و یک؛ اگر باید پایان فعالیت i بعد از پایان فعالیت i' باشد برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

M: عدد بزرگ دلخواه

d_{jk}: پارامتر صفر و یک اگر منبع j دارای مهارت k باشد برابر با یک و در غیر این صورت صفر.

$cost_j$: هزینه ثابت استفاده از منبع j

$cost'_{ij}$: هزینه متغیر انجام فعالیت i توسط منبع j

β_{ik}: اگر فعالیت i برای انجامش نیاز به مهارت k داشته باشد برابر یک در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

متغیرهای تصمیم‌گیری

c_j: مدت زمان انجام کار برای منبع jدر پروژه

A_j: متغیر صفر و یک؛ اگر منبع jدر طول پروژه استفاده شود برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

x_{ij}: متغیر صفر و یک؛ اگر فعالیت i توسط منبع j انجام شود برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

st_i: زمان شروع فعالیت i

ts_i:مدت زمان انجام فعالیت i با توجه به منبع تخصیص داده شده به فعالیت

et_i: زمان پایان فعالیت i

$time$: زمان پایان پروژه

α_{it}: مدت زمانی که از شروع فعالیت i می‌گذرد.

β_{it}: مدت زمانی که از فعالیت i گذشته است.

γ_{ij}: متغیر صفر و یک؛ اگر فعالیت i در زمان t انجام شود برابر با یک، در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

ts_i: مدت انجام فعالیت i با توجه به منبع تخصیص داده شده به آن فعالیت است.

تابع‌های هدف

تابع هدف در مدل به صورت زیر می‌باشد.

$$\min z_1 = time \quad (۱)$$

تابع هدف اول کمینه کردن زمان انجام پروژه است.

$$\min z_2 = \sum_j A_j.(time - c_j) \quad (۲)$$

تابع هدف دوم زمان‌های بیکاری برای منابع را کمینه می‌کند.

$$\min z_3 = \sum_j A_j \times cost_j + \sum_i \sum_j x_{ij} \times cost'_{ij} \quad (۳)$$

تابع هدف سوم شامل هزینه‌های سیستم است که کمینه می‌شود. قسمت اول تابع هدف، هزینه ثابت نیروی انسانی و قسمت دوم تابع هدف، هزینه متغیر انجام فعالیت‌ها می‌باشد.

۳-۲-محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل بصورت روابط ٤ تا ۱۹ زیر می‌باشد.

$$\sum_j x_{ij} = 1 \qquad \forall i \quad (٤)$$

$$ts_i \geq x_{ij} \times to_{ij} \qquad \forall i,j \quad (٥)$$

$$et_i = st_i + ts_i \qquad \forall i \quad (٦)$$

$$et_i \leq a_i \qquad \forall i \quad (٧)$$

$$time \geq et_i \qquad \forall i \quad (٨)$$

$$time \leq TP \qquad \forall i \quad (٩)$$

$$\sum_j x_{ij} \times d_{jk} \geq \beta_{ik} \qquad \forall i,k \quad (١٠)$$

$$st_{i'} \geq et_i \times es_{ii'} \qquad \forall i \quad (١١)$$

$$st_{i'} \geq st_i \times ss_{ii'} \qquad \forall i \quad (١٢)$$

$$st_{i'} \geq et_i \times ee_{ii'} \qquad \forall i \quad (١٣)$$

$$\alpha_{it} = (t - st_i) \qquad \forall i,t \quad (١٤)$$

$$\beta_{it} = (et_i - t) \qquad \forall i,t \quad (١٥)$$

$$\gamma_{it} \times M > \alpha_{it} \times \beta_{it} \qquad \forall i,t \quad (١٦)$$

$$x_{ij} \times x_{i'j} \leq 1 - (\gamma_{it} \cdot \gamma_{i't}) \qquad \forall i,i',j,t \quad (١٧)$$

$$\sum_i \sum_t \gamma_{it} \times x_{ij} = c_j \qquad \forall j \quad (١٨)$$

$$A_j \times M \geq \sum_i x_{ij} \qquad \forall i,j \quad (١٩)$$

محدودیت (۱) نشان می‌دهد هر فعالیت حتما توسط یک منبع انجام می‌شود.

محدودیت (۲) زمان انجام هر فعالیت را مشخص می‌کند.

محدودیت(۳) شروع و پایان هر فعالیت را مشخص می‌کند.

محدودیت (٤) تضمین می‌دهد که محدودیت زمانی برای شروع انجام هر فعالیت رعایت شده است.

محدودیت (٥) زمان اتمام پروژه را تعیین می‌کند.

محدودیت(٦) تعیین می‌کند که محدودیت زمان پایان پروژه در محدودیت زمانی سخت رعایت شده باشد.

محدودیت (۷) اطمینان می‌دهد که مهارت‌های لازم برای انجام فعالیت مهیا است.

محدودیت (۱۱) و (۱۲) و (۱۳) اطمینان می‌دهد که روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها رعایت شده‌است.

محدودیت (١٤) و (١٥) و (١٦) مشخص می‌کند که در هر زمان چه فعالیتی انجام می‌گردد.

محدودیت (۱۷) تضمین می‌دهد یک منبع همزمان نمی‌تواند برای دو فعالیت استفاده شود.

محدودیت (۱۸) مدت زمان مشغول بودن هر منبع را تعیین می‌کند.

محدودیت (۱۹) تعیین می‌کند از کدام‌یک از منابع استفاده شده‌است.

برای حل مسئله بهینه سازی چند هدفه ازالگوریتم فراابتکاری NSGA II استفاده شد. بهترین جواب برای هر یک از اهداف به صورت جداگانه بدست آمد سپس مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه با درجات متفاوتی از مقادیر هدف حاصل شد.

مراحل الگوریتم ژنتیک چند هدفه به ترتیب شامل موارد ذکر شده در شکل ۲ می‌باشد.

شکل ۲. الگوریتم NSGA II طراحی شده

٤- تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای اثبات پیچیده بودن مسئله، مثال‌های مختلف و تصادفی در ابعاد مختلف ارائه و سپس کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک و بزرگ بررسی شد و زمان حل با روش‌های ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفت و پارامترهای مسئله، تجزیه و تحلیل شد و در نهایت با ارائه مثال عددی و حل توسط نرم افزارگمز، صحت مدل ریاضی اثبات شد (جدول ۲ و نمودار ۳).

جدول ۲. ابعاد مثال‌های ارائه شده

شماره مثال	تعداد مجموعه‌ها		
	فعالیت‌ها	منابع	مهارت‌ها
۱	۵	۳	۲
۲	۸	۳	۲
۳	۱۰	٤	۳
٤	۱۲	۵	۳
۵	۱۵	۵	٤
٦	۲۰	٦	٤
۷	۲۵	۷	۵
۸	۳۰	۸	۵
۹	٤۰	۸	٦
۱۰	۵۰	۹	٦

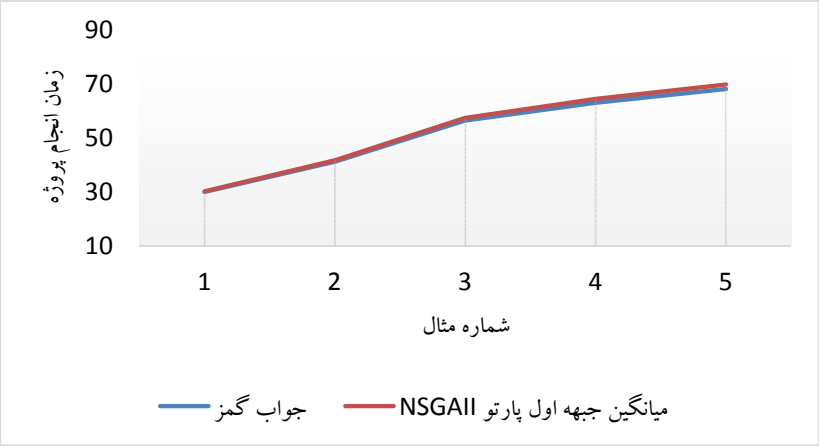
شکل ۳. نمودار بررسی افزایش شدید زمان حل مسئله با نرم افزار گمز

بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک

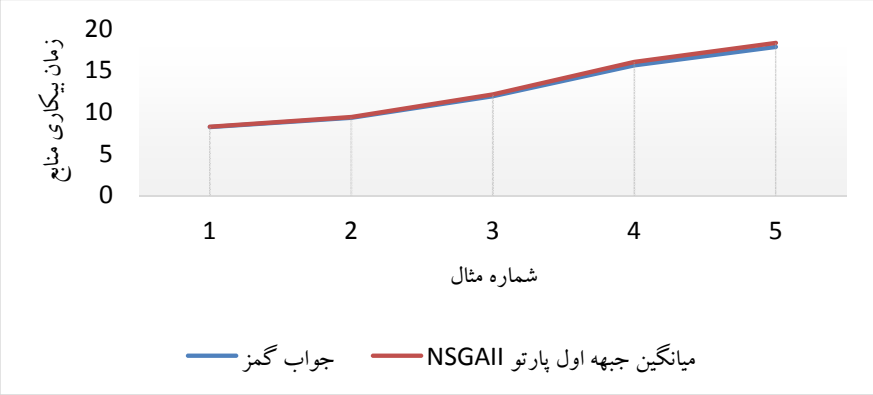
به منظور بررسی درستی، صحت و کارایی الگوریتم، پنج مثال عددی در ابعاد کوچک به صورت تصادفی تولید و به وسیله الگوریتم NSGA II و نرم افزار گمز حل و نتایج بدست آمده در جدول ٤ با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به اختلاف کم بین میانگین جواب‌های الگوریتم NSGA II در مقایسه با جواب حاصل از نرم افزار گمز، ثابت می‌گردد که الگوریتم NSGA II ارائه شده در ابعاد کوچک دارای کارایی مناسبی است. در جدول ۳ مقدار این انحراف بررسی گردیده ونتایج نشان داد که بیشترین انحراف، ۲/۷۹ درصد است که عددی قابل قبولی می‌باشد. در مرحله بعد، زمان حل مثال‌های مطرح شده با نرم افزار گمز و الگوریتم NSGA II در شکل ٤ تا ۷ مقایسه شده اند که نشان دهنده زمان حل بسیار پایین الگوریتم نسبت به نرم افزار گمز می‌باشد.

جدول ۳. بررسی کارایی الگوریتم NSGA II در ابعاد کوچک

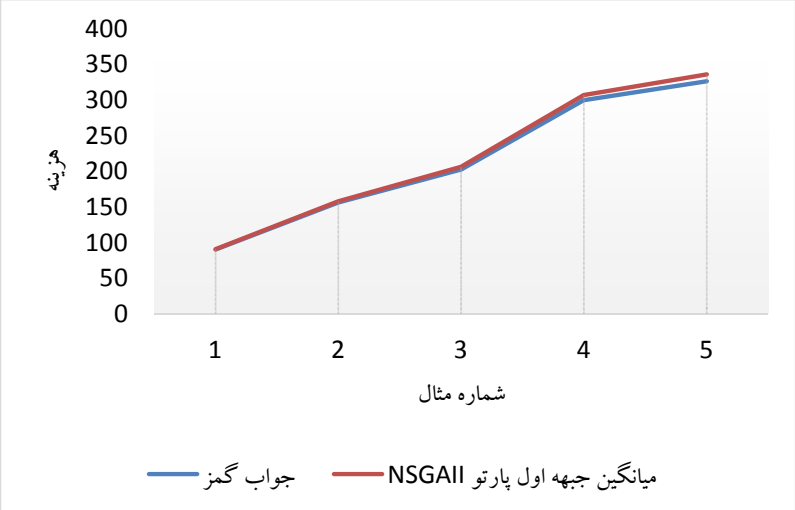
شماره مثال	تعداد مجموعه			زمان انجان پروژه			زمان بیکاری منابع			هزینه		
	فعالیتها	منابع	مهارتها	جواب گمز	میانگین جبهه اول پارتو NSGAII	انحراف	جواب گمز	میانگین جبهه اول پارتو NSGAII	انحراف	جواب گمز	میانگین جبهه اول پارتو NSGAII	انحراف
1	5	2	2	30	30/2	0/67%	8/2	8/25	0/61%	90/2	90/8	0/67%
2	8	3	2	41/2	41/7	1/21%	9/3	9/4	1/08%	156/3	157/9	1/02%
3	10	4	3	56/5	57/5	1/77%	11/9	12/1	1/68%	202/5	206/2	1/83%
4	12	4	3	63/1	64/5	2/22%	15/6	16	2/56%	299/9	307	2/37%
5	15	5	4	68/2	69/9	2/49%	17/8	18/3	2/81%	326/3	336	2/97%



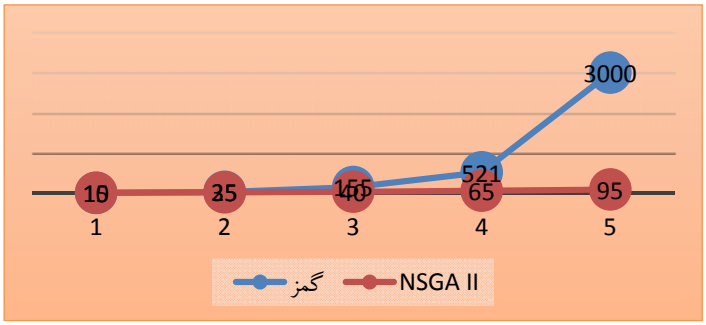
شکل ٤. نمودار مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف زمان انجام پروژه



شکل٥. نموار مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف زمان بیکاری منابع



شکل٦. نمودار مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف هزینه



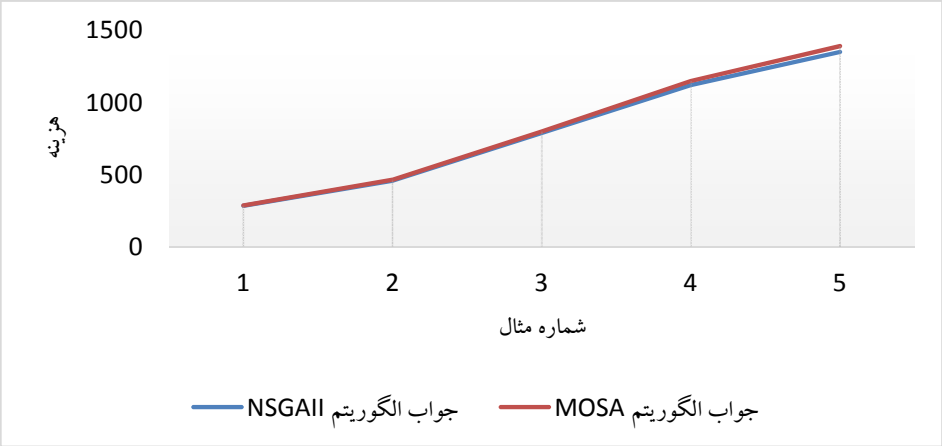
شکل ۷. مقایسه زمان حل با الگوریتم NSGA II

بررسی کارایی الگوریتم NSGAII در ابعاد بزرگ

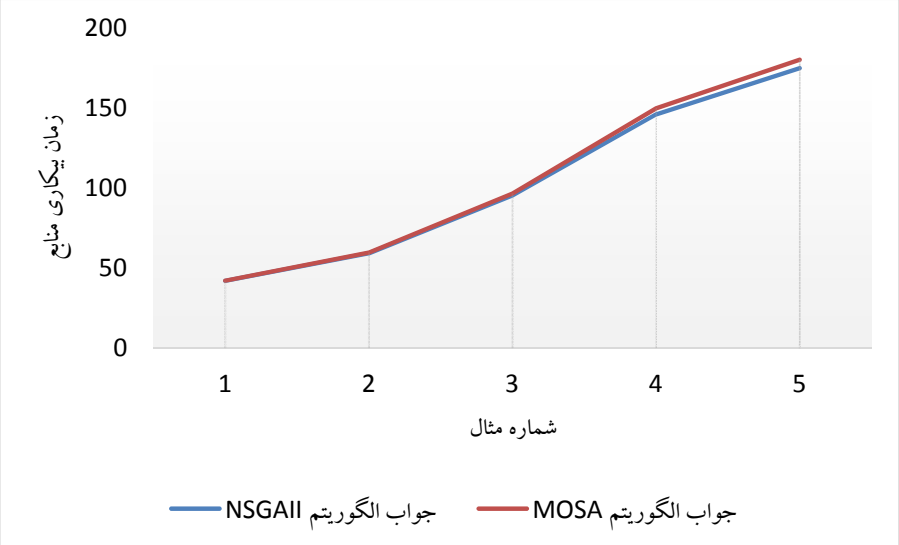
در این قسمت برای بررسی کارایی الگوریتمNSGAII، جواب‌های الگوریتم NSGAII با جواب‌های MOSA مقایسه خواهدشد. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم NSGAII در ابعاد بزرگ، چند مثال با داده‌های تصادفی در ابعاد بزرگ مطرح شد که بوسیله الگوریتم NSGAII برای تعداد سی مرتبه انجام گردید (علت تکرار اجرای مسئله برای سی بار نرمال بودن جامعه بود). در این حالت بهترین جواب به دست آمده از حل مسئله با جواب‌های MOSA مقایسه شده و درجدول ۵ و شکل ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده است. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که اختلاف بسیار کم است و درتابع هدف حداکثر ۲/۹۹ می‌باشد که کارایی مناسب الگوریتم NSGAII در ابعاد بزرگ مسئله را اثبات می‌نماید. در این بخش تعدادی مثال دیگر در ابعاد مختلف ارائه و به‌وسیله الگوریتم NSGA II و MOSA مقایسه می‌شود.

جدول ۵. بررسی کارایی الگوریتم NSGA II در ابعاد بزرگ

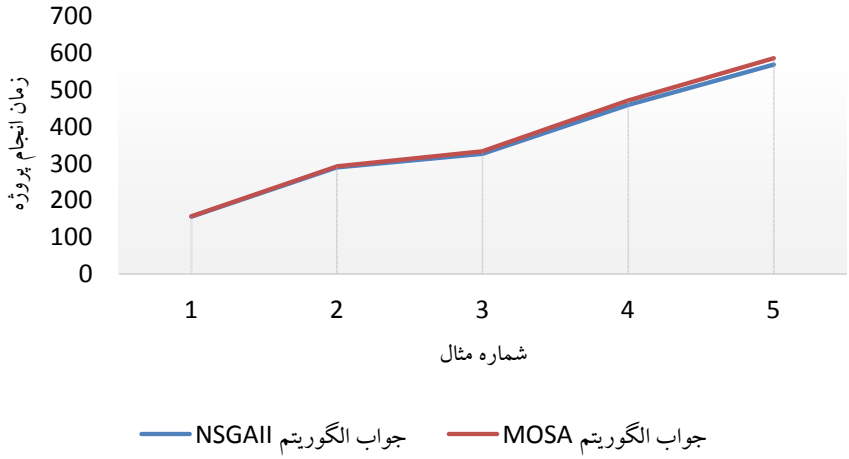
شماره مثال	تعداد مجموعه			زمان انجان پروژه			زمان بیکاری منابع			هزینه		
	فعالیتها	منابع	مهارتها	جواب الگوریتم NSGAII	جواب الگوریتم MOSA	انحراف	جواب الگوریتم NSGAII	جواب الگوریتم MOSA	انحراف	جواب الگوریتم NSGAII	جواب الگوریتم MOSA	انحراف
1	5	2	2	155/2	156	0/52%	42/2	42/3	0/24%	285/2	287	0/63%
2	8	3	2	289/2	292	0/97%	59/4	59/9	0/84%	459/2	465	1/26%
3	10	4	3	326/2	333	2/08%	95/6	96/8	1/26%	789/1	800	1/38%
4	12	4	3	459/2	471	2/57%	146/3	150	2/53%	1120/2	1149	2/57%
5	15	5	4	569	586	2/99%	175/2	180/4	2/97%	1350	1390	2/96%



شکل ۸. مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف هزینه



شکل ۹. مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف زمان بیکاری منابع.



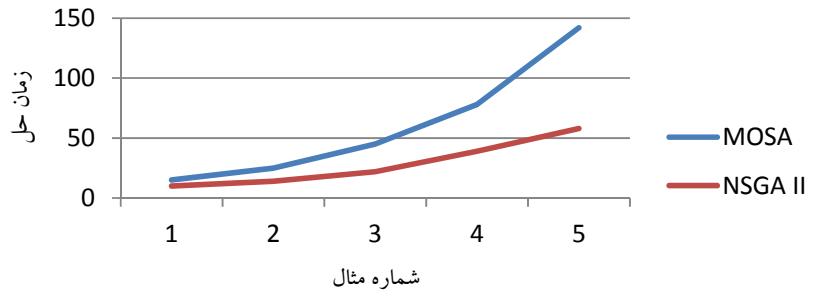
شکل ۱۰. مقایسه مقدار جواب گمز با الگوریتم NSGA II در تابع هدف زمان انجام پروژه.

مقایسه زمان حل مسئله با روش‌های ارائه شده

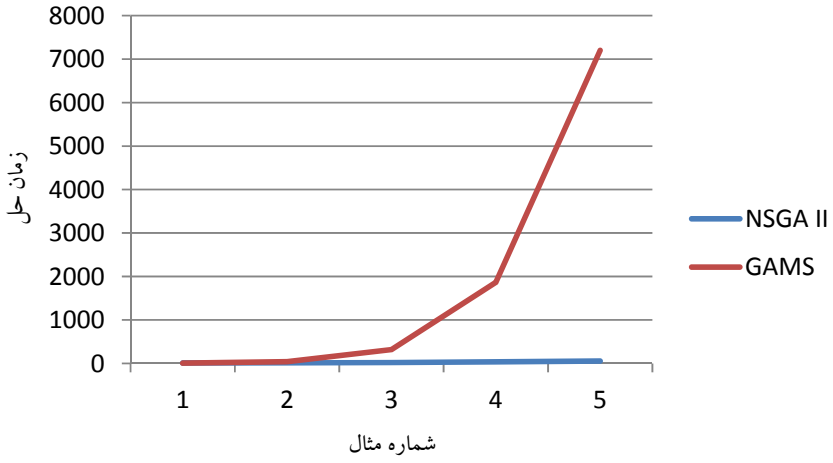
در این قسمت یک مثال عددی در ابعاد کوچک و متوسط ارائه شده‌است و به‌وسیله الگوریتم‌های NSGAII، MOSA و گمز مقایسه گردیده‌است. جدول ٦ مقایسه زمان حل با روش ارائه شده را نشان می‌دهد.

جدول ٦. مقایسه زمان حل با روش ارائه شده

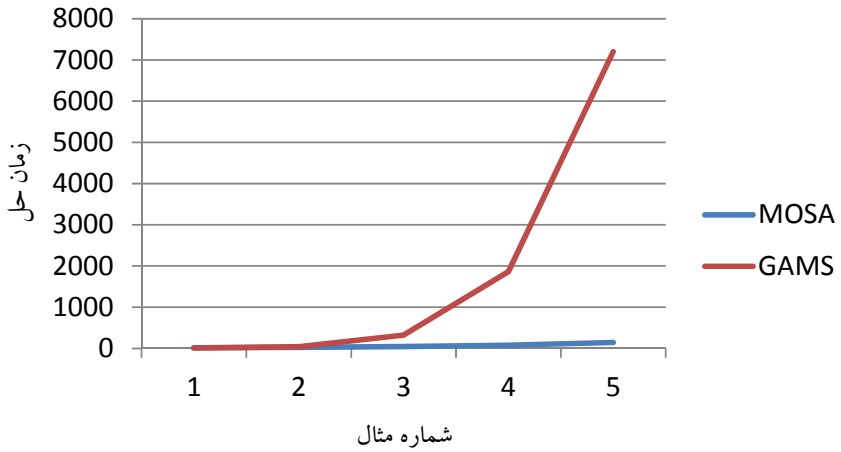
زمان حل				تعداد مجموعه	
MOSA	NSGA II	GAMS	فعالیت‌ها	منابع	مهارت‌ها
15	10	8	8	3	2
25	14	42	10	3	2
45	22	321	12	4	2
78	39	1865	14	5	3
142	58	7201	18	6	3



شکل ۱۱. مقایسه زمان حل به‌وسیله NSGAII و MOSA



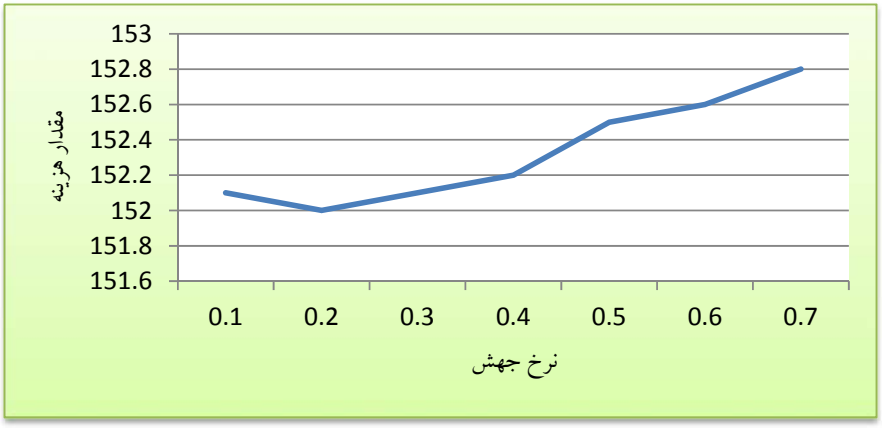
شکل ۱۲. مقایسه زمان حل به‌وسیله NSGAII و گمز



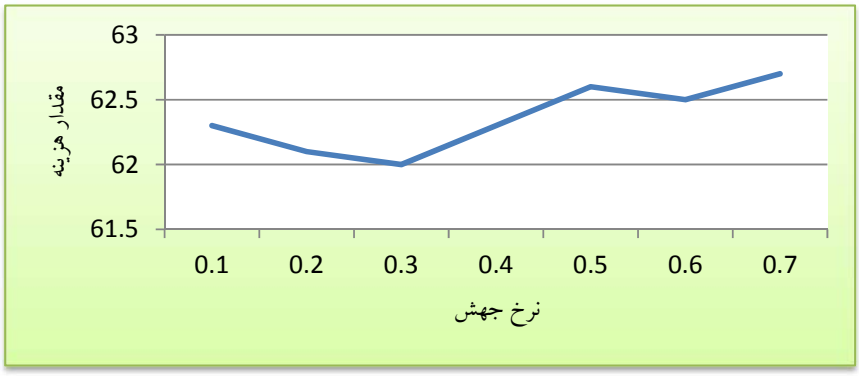
شکل۱۳. مقایسه زمان حل به‌وسیله MOSA و گمز

بررسی پارامترهای الگوریتم

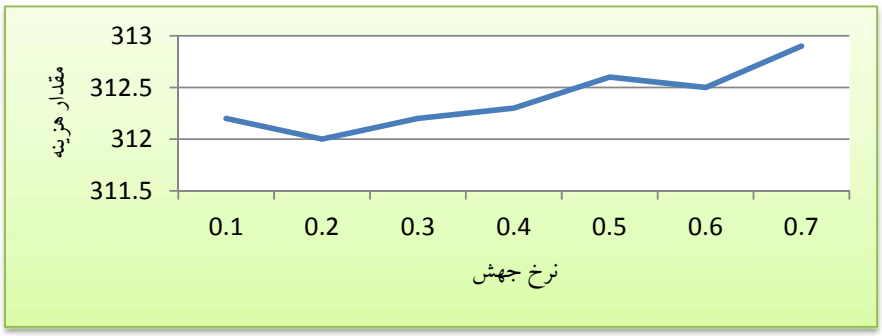
برای بررسی پارامترهای الگوریتم شامل نرخ جهش و تعداد جمعیت، یک مثال تصادفی ارائه شد. با توجه به شکل۱٤ تا ۱۷، بهترین مقدار نرخ جهش برابر۰/۲ و تعداد جمعیت نیز بین اعداد ۱۰۰ تا ۱۵۰ بوده است.



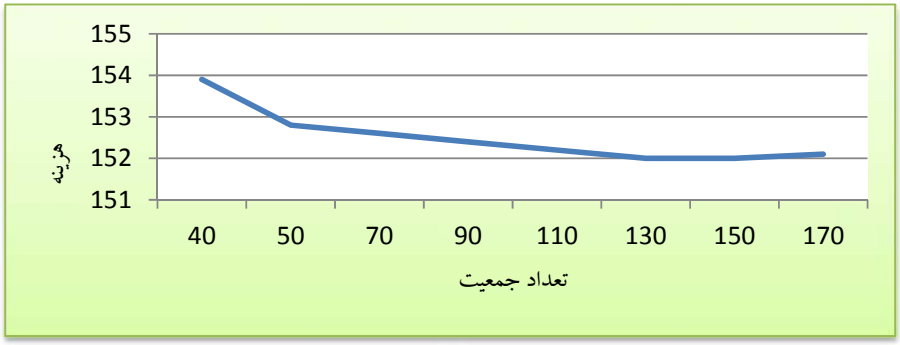
شکل ۱٤. بررسی نرخ جهش در تابع هدف اول



شکل۱۵. بررسی نرخ جهش در تابع هدف دوم



شکل ۱۶. بررسی نرخ جهش در تابع هدف سوم



شکل ۱۷. بررسی تعداد جمعیت در تابع هدف اول

بررسی صحت مدل ریاضی

در این قسمت به‌منظور بررسی صحت مدل ریاضی ارائه شده، یک مثال عددی تصادفی تولید شده و با نرم‌افزار گمز حل گردید. لازم به ذکر است که با توجه به چندهدفه بودن مسئله، از روش ال-پی متریک استفاده شده است. در این مرحله، با توجه به حل ارائه شده توسط نرم‌افزار گمز، درستی رعایت ویژگی‌ها و محدودیت‌های مسئله بررسی شده و درستی محاسبه مقدار تابع هدف بررسی گردیده. در این مسئله ۸ فعالیت، ۳ منبع و ۳ مهارت وجود دارد. با توجه به حل مسئله به‌وسیله نرم‌افزار گمز جواب ارائه شده به شرح جدول ۷ می‌باشد. یکی از ویژگی‌های مسئله، تخصیص منبع به فعالیت‌ها و تعیین زمان شروع و پایان فعالیت‌هاست که این کار در جدول ۸ انجام شده‌است. یکی دیگر از ویژگی‌های مسئله، درستی زمان شروع و پایان فعالیت‌ها با توجه به زمان انجام است که در جدول ۹ درستی آن به اثبات رسیده است.

جدول ۷. جواب ارائه شده توسط نرم‌افزار گمز

شماره فعالیت	شماره منبع	زمان شروع	زمان پایان
1	1	0	8
2	2	0	12
3	1	9	14
4	2	13	17
5	1	15	19
6	2	20	25
7	1	20	25
8	2	26	40

جدول ۸. درستی محاسبه زمان شروع و پایان فعالیت‌ها

شماره فعالیت	زمان شروع	زمان انجام	زمان پایان
1	0	8	8
2	0	12	12
3	9	5	14
4	13	4	17
5	15	4	19
6	20	5	25
7	20	5	25
8	26	4	30

جدول ۹. بررسی محدودیت زمان پایان پروژه و پایان فعالیت‌ها

شماره فعالیت	زمان پایان	زمان مجاز
1	8	10
2	12	15
3	14	15
4	17	20
5	19	25
6	25	35
7	25	30
8	30	40
کل پروژه	30	40

جدول ۱۰. بررسی روابط پیش نیازی

فعالیت پیش نیاز	فعالیت پس نیاز	وضعیت
1	3	رعایت شده
2	4	رعایت شده
3	5	رعایت شده
5	6	رعایت شده
6	8	رعایت شده

جدول ۱۱. مهارت‌های هر منبع

شماره منبع	شماره مهارت
1	2-1
2	3-2
3	3-1

جدول ۱۲. بررسی محدودیت تخصیص منابع با توجه به فعالیت‌ها

شماره فعالیت	منبع	مهارت لازم فعالیت	مهارت‌های موجود منبع
1	1	1	2-1
2	2	3	3-2
3	1	1	2-1
4	2	2	3-2
5	1	1	2-1
6	2	3	3-2
7	1	2	2-1
8	2	2	3-2

۵- نتیجه‌گیری

مدلی برای زمانبندی در پروژه تحقیقاتی عمرانی چند هدفه با محدودیت منابع با هدف حداقل‌سازی زمان ضمن تکمیل پروژه ارائه شد. که حاصل آن یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی بود. برای حل این مدل در ابعاد واقعی از یک الگوریتم فراابتکاری استفاده شد. برای حل مسئله در ابعاد کوچک از نرم‌افزار گمز و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از نرم‌افزار متلب استفاده شد. برای اثبات پیچیده بودن مسئله، مثال‌های مختلف و تصادفی در ابعاد مختلف مسئله ارائه شده که نشان دهنده آن بود که با بزرگ شدن ابعاد مسئله، زمان حل مسئله با نرم افزار گمز به صورت نمایی افزایش یافته و از مرحله خاصی، مسئله با نرم‌افزار گمز غیر قابل حل شد. پس از بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک و در ابعاد بزرگ چندین مثال عددی در ابعاد کوچک و بزرگ به صورت تصادفی تولید و به وسیله الگوریتم NSGAII حل و با جواب حاصل از نرم افزار گمز مقایسه گردید. با یک مثال عددی در ابعاد کوچک و متوسط توسط الگوریتم‌های NSGAII و MOSA و گمز مقایسه گردید و برای پارامترهای الگوریتم که شامل نرخ جهش و تعداد جمعیت می‌باشد یک مثال تصادفی گردید که نتایج بدست آمده از تحقیق به شرح ادامه است.

- اختلاف کم بین میانگین جواب‌های الگوریتم NSGAII در مقایسه با جواب حاصل از نرم افزار گمز، ثابت گردید که الگوریتم NSGAII ارائه شده در ابعاد کوچک و ابعاد بزرگ دارای کارایی مناسبی بوده‌است.
- بهترین مقدار نرخ جهش برابر ۰/۲ و تعداد جمعیت نیز بین اعداد ۱۰۰ تا ۱۵۰ بود.
- با حل مثال عددی تصادفی تولید شده با نرم افزار گمز صحت مدل ریاضی ارائه شده اثبات شد. برای چند هدفه بودن مسئله از روش الپی‌متریک استفاده شد که توسط نرم افزار گمز، درستی رعایت ویژگی‌ها و محدودیت‌های مسئله و درستی محاسبه مقدار تابع هدف اثبات گردید و با مقدار تابع هدف محاسبه شده با نرم افزار گمز برابر بود.

در ادامه این تحقیق می توان با در نظر گرفتن موارد زیر این تحقیق را انجام داد و نتایج آن را با نتایج این تحقیق مقایسه کرد.

- استفاده داده های فازی یا احتمالی و به کار گرفتن زمان انجام پروژه‌ها به صورت فازی یا احتمالی
- استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله و روش‌های فراابتکاری دیگر
- درنظر گرفتن تابع هدف چهارم (اضافه کردن تابع هدف زمان به مسئله)

٦- مراجع

- صالحی، مجتبی و صباغ، وحید (۱۳۹٦). مدلسازی و حل مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در دو حالت سفارش‌دهی برای خرید و تولید مواد مصرفی، *بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*۲، ۳۱۷-۳۲۹.
- موحدیان عطار، امید و اسماعیلیان، مجید، (۱۳۹٤). انتخاب و زمان‌بندی چندین پروژه با محدودیت منابع در چندین حالت اجرایی به‌منظور حداکثرکردن ارزش فعلی خالص، چشم انداز مدیریت صنعتی ۵، ۳٤-۲۱.
- رضایی نیک، ابراهیم و مولوی، فریبا (۱۳۹٤). مسئلهٔ چندهدفهٔ انتخاب و زمان‌بندی سبد پروژه در شرایط عدم‌قطعیت (مطالعهٔ موردی: شرکت دانش‌بنیان پایافناوران فردوسی)، *نشریه مدیریت صنعتی*۳، ٤۸۸-٤٦۹.

– قلی‌زاده، ابراهیم و افشار نجفی، بهروز (۱۳۹۷). حل مسئله دوهدفه زمان‌بندی چندحالته پروژه با درنظرگرفتن برنامه‌ریزی پرداخت و منابع محدود با استفاده از الگوریتم NSGA-II، *چشم انداز مدیریت صنعتی* ۲، ۴۲-۳۰.

– جولای، فریبرز (۱۳۹۵). حل مسئله‌ی تسطیح منابع پروژه با استفاده از یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارا، *مهندسی صنایع و مدیریت دانشگاه شریف ۱*، ۶۶-۵۶.

– خادمی زارع، حسین و کاوندی، امید (۱۳۹۵). توسعه یک مدل اقتصادی با هدف موازنه هزینه-زمان پروژه‌های صنعتی و تجاری یک سازمان بر اساس تکنیک ارزش افزوده، *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ۲*، ۲۴۵-۲۳۳.

– خاتمی فیروزآبادی، سید محمد علی و باقری، مجید و یوسفی، ساموئل (۱۳۹۸). زمانبندی پروژه‌های ساخت با استفاده از ترکیب برنامه‌ریزی چندهدفه از طریق شبیه‌سازی. *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات ۱۵*، ۹۳-۸۳.

– شفیعی، محمدعلی (۱۳۹۲). ارائه مدل ریاضی چندهدفه برای مسأله تبادل هزینه -زمان و درنظرگرفتن ارزش زمانی پول با استفاده از الگوریتم MOPSO، *فصلنامه علمی و پژوهشی شریف ۱۴*، ۲۳-۱۵.

– مقدس‌زاده، حمید (۱۳۹۸). ارئه یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله ای جهت کمینه سازی هزینه منابع در زمانبندی پروژه با عدم قطعیت ظرفیت منبع، پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع سیستم ها و بهره‌وری ۵، ۰۹-۰۴.

– مهدوی، احمد (۱۳۹۸). ارائه روش حل دقیق و فراابتکاری برای مسئله کمینه سازی زمان تکمیل پروژه با درنظرگرفتن محدودیت بودجه. *انجمن مهندسی سازه ایران۲*، ۳۳-۲۱.

-E. Mehmanchi, & S. Shadrokh. (2005). Solving a new mixed integer non-linear programming model of the multi-skilled project scheduling problem considering learning and forgetting effect on the employee efficiency. *In Industrial Engineering and Engineering Management 21*, 400-404.

-H. Liu, M. Al-Hussein & M. Lu, (2015). BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. *Automation in Construction 53*, 29-43.

-H. F. Rahman, R. K. Chakrabortty, S. Elsawah & M.J. Ryan, (2022). Energy-efficient project scheduling with supplier selection in manufacturing projects. *Expert Systems with Applications 193*,116-130.

-M. Asadujjaman, H. Rahman, R.K. Chakrabortty & M.J. Ryan, (2022). Multi-operator immune genetic algorithm for project scheduling with discounted cash flows. *Expert Systems with Applications 195*, 430-445.

-N. He, D.Z. Zhang & B. Yuce. (2022). Integrated multi-project planning and scheduling-a multiagent approach. *European Journal of Operational Research*, 302(2), 688-699.

- H. Chen, G. Ding, J. Zhang, R. Li, L. Jiang & S. Qin, (2022). A filtering genetic programming framework for stochastic resource constrained multi-project scheduling problem under new project insertions. *Expert Systems with Applications 198*,116-138.

- J. Luo, M. Vanhoucke, J. Coelho, & W. Guo, (2022). An efficient genetic programming approach to design priority rules for resource-constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications 198*, 188-194.

-X. Li, Y. H. Huang, S. C. Fang & Y. Zhang (2020). An alternative efficient representation for the project portfolio selection problem. *European Journal of Operational Research 281(1)*, 100-113.

-H. F. Rahman, R. K. Chakrabortty & M. J. Ryan, (2021). Scheduling project with stochastic durations and time-varying resource requests, *A metaheuristic approach. Computers & Industrial Engineering* 157, 147-163.

-T. Aouam & M. Vanhoucke, (2019). An agency perspective for multi-mode project scheduling with time/cost trade-offs. *Computers & Operations Research 105*, 167-186.

-M. Vanhoucke & J. Coelho. (2018). A tool to test and validate algorithms for the resource-constrained project scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering 118*, 251-265.

-T. Servranckx & M. Vanhoucke, (2019). A tabu search procedure for the resource-constrained project scheduling problem with alternative subgraphs. *European Journal of Operational Research 273*(3), 841-860.

-Z. Chen, E. Demeulemeester, S. Bai & Y. Guo, (2018). Efficient priority rules for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research 270(3)*, 957-967.

Presenting a Model for Scheduling in a Multi-Objective Construction Project with Limited Resources and Solving it Using a Meta-Heuristic Algorithm

Neda Negarchi, Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.
Sadegh Shahbazi, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.
Sayyed Yaghoub Zolfegharifar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

E-mail: n.negarchi@gmail.com

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT
The purpose of the research was to provide an approach to solve the scheduling problem of the construction project by considering the allocation of resources to the activities according to the prerequisite relationships and resource limitations with multiple skills. A model for scheduling in a multi-objective construction research project with limited resources was presented with the aim of minimizing time and cost by minimizing the cost of unemployment of human resources as resources with skill level and the penalty of not allocating the actual specialized level of resources while completing the project. The result was a mathematical programming model. To solve the model, LP metric method and meta-heuristic algorithm were used and Excel, MATLAB and GAMS software were used. The time to solve the problem with the GAMS software was increased exponentially. From the next stage, the problem became unsolvable with GAMS software, so the NSGA II algorithm was used to solve it. Then the answers obtained with the obtained answers results from the MOSA algorithm were compared and finally the accuracy of the presented mathematical model was checked.

Keywords: Project Scheduling, Resource Constraints with Multiple Skills, Mathematical Modeling, Meta-Heuristic Algorithm