نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال دهم، شماره بیستم، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۷-۳۱
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2023.24909.2044

ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه یکپارچه زمان‌بندی و جریان مالی پروژه‌های تولیدی و استفاده الگوریتم‌های فراابتکاری کشتل و شبیه‌سازی تبرید

سجاد جانباز[۱]، سید محمدرضا داودی[۲*]، عبدالمجید عبدالباقی عطاآبادی[۳]

۱. دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی-مالی، واحد دهاقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهاقان، ایران
۲. استادیار گروه مدیریت، واحد دهاقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهاقان، ایران
۳. استادیار گروه مدیریت، دانشکدهٔ مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۰/۶/۲۱
پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۲۷
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
زمان‌بندی پروژه‌های تولیدی
مدل برنامه‌ریزی ریاضی
چندهدفه مختلط عدد صحیح
غیرخطی زمان‌بندی
الگوریتم فراابتکاری
شبیه‌سازی تبرید
الگوریتم فراابتکاری کشتل

خلاصه

امروزه سازمان‌های پروژه‌محور چندین پروژه موازی دارند که می‌تواند به‌صورت موازی شروع به برنامه‌ریزی کنند و اکثر این شرکت‌ها با بحران‌های تأمین اعتبارات مالی در جهت به‌ثمر نشستن پروژه‌ها روبرو هستند از سوی دیگر با تکمیل پروژه‌های اجرایی و واگذاری آن به حامی مالی یا کارفرما، سود مناسبی را نصیب سازمان می‌کند. در صورت انتخاب نامناسب پروژه‌ها برای شروع و عدم هماهنگی میان منابع مالی پروژه‌ها، علاوه‌بر از دست دادن منابع مالی سازمان، سبب شکست ساختار سازمانی و توقف پروژه‌های جاری در سازمان می‌شود. ازاین‌رو در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی (MINLP) چندهدفه ارائه 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 عمرانی ساخت و تولید کیسون استفاده شده است. درنهایت مدل ارائه‌شده با دو الگوریتم MOSA و MOKA ارزیابی و اعتبارسنجی شدند و در اعتبارسنجی انجام شده در مورد مطالعه و براساس عملکردی جواب‌های بهینه، نشان داده شد که الگوریتم MOSA از کارایی بالاتری برخوردار است.

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی پروژه‌های تولیدی یک رویکرد زمانی در قالب زمان‌بندی جهت انجام پروژه‌های وابسته به یکدیگر هستند [۱]. زمان‌بندی تولید نقش مهمی در مدیریت منابع سازمانی دارد. هدف اصلی این مسائل، بهینه کردن مجموعه‌ای از اهداف باتوجه به محدودیت روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌ها و محدودیت منابع سازمانی برای اجرای پروژه‌ها است [۲]. باتوجه به زمان‌بندی پروژه براساس رویکرد مسیر بحرانی (CPM[۲]) که اواخر دهه ۱۹۵۰ معرفی شده است پیشرفت‌های مهمی در این حوزه معرفی گردیده است [۳]. براساس پیشرفت‌های حاصل شده، خواه پروژه عظیم مانند احداث اسکله و پل‌های طویل باشد یا پروژه‌های کوچک مانند ساخت موانع جاده‌ای نیوجرسی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌های تولیدی دستخوش تغییرات زیادی شده است. برای مثال در یک کارخانه تعیین اینکه کدام فعالیت توسط ماشین و با چه منابع انسانی انجام می‌پذیرد، می‌تواند موجب سوددهی و یا زیان‌دهی اجرای فعالیت‌های سازمانی باشد [۴]. ازاین‌رو در شرکت‌های تولیدی، مسأله زمان‌بندی تولید و فروش محصول به بازار، سبب بروز تفاوت بین ارسال به‌موقع محصول به بازار و تصاحب سهم

* نویسنده مسئول: سید محمد رضا داودی
تلفن: ۰۹۱۳۲۲۹۰۳۶۷؛ پست الکترونیکی: smrdavoodi@ut.ac.ir

2. Critical Path Method

عمده‌ی بازار و یا از دست دادن آن بازه زمانی می‌شود. لذا امروزه لزوم برنامه‌ریزی مناسب به‌منظور تخمین صحیح از زمان و هزینه‌ی انجام پروژه و میزان منابع موردنیاز جهت تحقق اهداف تولید و معرفی به بازار فروش، بر کسی پوشیده نیست [۵]. این مسأله به‌خصوص در کشورهای پیشرفته اهمیت بسیاری دارد. به‌طور کلی مدیریت و برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و منابع مالی موردنیاز در یک پروژه، نیازمند تحلیل‌های متنوعی است که یکی از آن‌ها، مدل‌سازی و تخمین صحیح هزینه و زمان و ریسک اجرایی پروژه و مدت زمان لازم برای استفاده از منابع است. این مسأله کمک شایانی به مدیریت بهینه پروژه‌های تولیدی و تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی می‌نماید [۶]. مسأله‌ی برنامه‌ریزی پس از آن کنترل زمان‌بندی پروژه‌ها، هرروز اهمیتی بیش از گذشته می‌یابد. برنامه‌ریزی و کنترل منابع مالی پروژه‌های تولیدی، در ابتدای امر، مراحل مختلفی ازجمله تحلیل پروژه، برآورد مدت، هزینه و منابع اجرایی و درنهایت زمان‌بندی پروژه صورت می‌گیرد. در تمامی این موارد، به‌خصوص در زمان ارزیابی اولیه پروژه فرض می‌شود که تمامی فعالیت‌ها در زمان واقعی خود محاسبه‌شده و اجرا می‌شوند. گاهی اوقات به دلایل مختلف، مدیر پروژه تصمیم می‌گیرد زمان پروژه را کاهش دهد که این امر تأثیرات مستقیم بر هزینه تمام شده خواهد گذاشت [۷]. کاهش زمان با استفاده از تدابیر خاصی ازجمله به‌کارگیری منابع مالی اجرایی محقق می‌شود که باعث افزایش هزینه‌ها و ریسک اجرای پروژه نیز می‌گردد. در مواردی باتوجه به روابط فعالیت‌ها، شرایط تأخیری برای پروژه پیش‌بینی می‌شود و همراه با افزایش هزینه و تعاملی داخلی با خسارت‌های دیرکرد قرار می‌گیرد و درنتیجه منجربه کاهش یا افزایش هزینه‌های کلی شود که این نکته باید توسط مدیر پروژه بررسی گردد [۸]. مجریان پروژه علاوه‌بر محدودیت‌های مالی و زمانی، با محدودیت منابع فیزیکی نیز مواجه هستند. منظور از منابع فیزیکی عمدتاً منابع انسانی و ماشین‌آلات است. نیازهای منابع یک پروژه در طول افق برنامه‌ریزی دستخوش تغییراتی می‌شود. بدین معنی که در یک بازه زمانی ممکن است نیاز زیادی به منبع باشد و در بازه‌ی زمانی بعدی این نیاز کاهش یابد. لذا معمولاً شرکت‌ها از هرکدام از منابع، تعداد محدود و مشخصی را برای خود تهیه می‌کنند و اجرای پروژه‌ها را براساس این مقدار محدود برنامه‌ریزی می‌کنند [۹]. از دیگر عوامل که نیازمند توجه برنامه‌ریزان پروژه‌ها به‌طور کلی و پروژه‌های ساخت به‌طور خاص ایجاد می‌کند، مسأله نوسانات در مصرف منابع مالی براساس جریان نقدینگی پروژه‌ها است. در سال‌های اخیر یکی از مشکلات شرکت‌های پروژه‌محور، مسأله تخصیص منابع مالی باهدف کم کردن مقدار نوسان در طول مصرف پروژه است. هرچه نوسانات دوره‌ای تقاضای منابع برای هریک از پروژه‌ها بیشتر باشد، نیاز به نقل‌وانتقال بیشتر منابع به‌وجود می‌آید که خود دربرگیرنده‌ی هزینه می‌باشد [۱۰]. ازاین‌رو عدم برنامه‌ریزی مناسب سبب سردرگمی تخصیص منابع و اعتبارات مالی به پروژه‌های اجرایی سازمان‌ها می شود. مسأله اصلی که در این پژوهش بدان پرداخته می‌شود، مربوط به زمان‌بندی اجرایی پروژه‌هایی است که سازمان به‌واسطه انتخاب مناسب برای اجرای آن‌ها با اهداف چندبعدی مانند بیشینه‌سازی سود حاصل از انتخاب و کمینه‌سازی زمان‌بندی تولید و کاهش ریسک‌های اجرایی به‌واسطه توالی انتخاب اجرای پروژه است. در اکثر مقالات حوزه زمان‌بندی تولید، رویکرد مدل‌سازی در خصوص زودکرد و دیرکرد تحویل سفارش به مشتریان اشاره دارد و براساس مسأله زمان‌بندی تولید بدون درنظر گرفتن مؤلفه‌های زمان‌بندی و فعالیت‌های اجرایی سایر پروژه‌ها بحث و بررسی پرداختند. تاکنون پژوهشی درخصوص زمان‌بندی تولید در یک شرکت پروژه‌محور با درنظر گرفتن اهداف چندگانه، کسب سود، کاهش زمان تولید و ریسک اجرای فعالیت‌ها نپرداختند که در این پژوهش بدان پرداخته خواهد شد. شکاف اصلی مشاهده شده در این حوزه را می‌توان به‌شرح ذیل عنوان نمود:

شکاف پژوهشی ۱: اکثر پژوهش‌های زمان‌بندی تولیدی سازمان‌های پروژه‌محور، به مسأله زمان‌بندی زودکرد و دیرکرد تولید اشاره نموده و به سودآوری اجرای فعالیت‌ها و منابع تولیدی موردنیاز در فرآیند تولیدی اشاره‌ای نکردند. ازاین‌رو در این پژوهش مسأله سودآوری سازمان و کاهش ریسک تأخیر به‌واسطه کمبود نیروی انسانی، کسری بودجه تولیدی درنظر گرفته‌شده است که این موضوع سبب بهبود فرآیند تولیدی در شرکت‌های پروژه‌محور مانند شرکت‌های عمرانی تولیدکننده تجهیزات جاده‌ای بررسی شده است که تیراژ تولید پایین داشته (پروژه‌محور بودن تولیدات این شرکت) و به‌واسطه پروژه‌محور بودن فضای تولیدی آن‌ها نیاز به مدیریت زمان‌بندی تولید و منابع در کنار یکدیگر دارند.

شکاف پژوهشی۲: باتوجه به ارزیابی صورت پذیرفته در مقالات حوزه زمان‌بندی تولیدی در شرکت‌های پروژه‌محور، فرآیندهای تولیدی براساس کمینه‌سازی زمان‌بندی اجرای فعالیت‌ها برنامه‌ریزی و تخصیص داده می‌شدند. درصورتی که فاکتورهای زیادی در زمان‌بندی وجود دارد که تاکنون نادیده گرفته شده‌اند. ازاین‌رو در این پژوهش فاکتورهای جدیدی همچون سود اجرای فعالیت‌ها، دسترسی به منابع و اعتبارات و ریسک اجرای فعالیت‌ها پرداخته می‌شود که تاکنون به‌صورت یک مدل ریاضی چندهدفه برای زمان‌بندی پروژه‌ها ارائه نشده است.

شکاف ۳: اکثر روش‌های حل عددی درنظر گرفته شده در پژوهش‌های زمان‌بندی پروژه براساس رویکردهای الگوریتم فراابتکاری معمول مانند NSGAII[1] و MOPSO[2] و MOICA[3] به ارزیابی و حل مدل ریاضی پرداختند. باتوجه به این مسأله که در الگوریتم‌های فراابتکاری سنتی معیار عملکردی و کارایی الگوریتم کاملاً وابسته به تنظیم پارامترهای الگوریتم می‌باشد و از سمتی سرعت همگرایی الگوریتم‌ها به‌دلیل نوع مکانیز عملکردی پایین بوده است [۳۱]. ازاین‌رو

1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
2. Multiple Objective Particle Swarm Optimization
3. Multiple Objective Imperialist Competitive Algorithm

در این پژوهش یک رویکرد نوآور در ارزیابی حل عددی مدل ریاضی پرداخته شده است که در الگوریتم جدید الگوریتم کشتل چندهدفه (MOKA) و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA) به ارزیابی و حل مدل ریاضی پرداخته شده است. این دو الگوریتم به‌دلیل ماهیت عملکردی و سرعت همگرایی بالای خود انتخاب شدند که تحلیل جامعی از دو دسته از الگوریتم‌های با خاصیت حافظه‌ای و غیر حافظه‌ای مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد.

شکاف ۴: در اکثر پژوهش‌های انجام شده در حیطه برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه، مسأله جریان مالی و بودجه‌بندی پروژه‌های تولیدی مغفول واقع شده است. همان‌طور که می‌دانیم، مسأله زمان‌بندی پروژه‌ها یک مسأله حیاتی و کلیدی در شرکت‌های پروژه‌محور بوده و از سوی دیگر، عدم پیمایش دقیق جریان مالی در اعتبارات پروژه‌ها، سبب تأخیر افتادن فاز اجرایی فعالیت‌های پروژه‌ای می‌شود. ازاین‌رو جهت برنامه‌ریزی دقیق در فاز مدیریت پروژه‌ها، شناخت جریان مالی و زمانی در هدایت و راهبری پروژه‌ها یک مسأله استراتژیک می‌باشد که در این پروژهش در هر مرحله زمان‌بندی پروژه‌ها، محدودیت بودجه در دست اجرایی ارزیابی شده و متناسب با جریان مالی موجود برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها انجام شود.

یکی از وجه تمایز میان پروژه‌های تولیدی و فرآیند تولید در این مسأله است که در گذشته تنها دو نوع فرآیند برای سازمان‌ها درنظر می‌گرفتند، یا سازمان ماهیت تولیدی داشته و یا پروژه‌محور بوده است. باتوجه به توسعه کسب‌وکارهای جدید، سبب شده است که سازمان‌های پروژه‌محور فرآیندهای تجاری خود را دستخوش تغییرات نموده و ماهیت پروژه‌های تولیدی به‌خود بگیرند. برای مثال در شرکت مورد مطالعه، پروژه‌های تولیدی شامل تولید دیواره‌های نیوجرسی خیابانی است که ماهیت پروژه‌محوری دارد ولی باتوجه به تیراژ تولید محصول یک پروژه تولیدی محسوب می‌شود و نیاز به برنامه‌ریزی خاصی در این زمینه دارد.

ازاین‌رو در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی (MINLP[1]) چندهدفه با درنظر گرفتن اهداف مربوط به بیشینه‌سازی سود حاصل از زمان‌بندی پروژه‌ها و کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی ساخت و تولید و کمینه‌سازی ریسک اجرای پروژه پرداخته می‌شود که با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری MOKA[2] و MOSA[3] ارزیابی و تحلیل خواهند شد. باتوجه به ابعاد مسأله معرفی شده در این حوزه، این پژوهش از پنج بخش تشکیل شده است که بخش اول معرفی مسأله مورد مطالعه بوده که ابعاد مسأله معرفی شد. در بخش دوم پیشینه تحقیق بحث شده و سپس در بخش سوم مدل ریاضی مسأله مورد مطالعه بحث و بررسی شده و در بخش چهارم روش حل مدل معرفی شده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی پژوهش معرفی می‌گردد.

۲. پیشینه تحقیق

دانش‌آموز (۱۳۹۹) در پژوهش خود برای اولین‌بار یک الگوریتم شاخه‌وکران جهت حل مسأله زمان‌بندی در سیستم تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر همراه با یک مرحله‌ی مونتاژ با هدف حداقل کردن زمان تکمیل محصولات ارائه نمودند لذا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP[4]) همراه با پارامترها و متغیرهای تصمیم موردنیاز تشریح شده است. نتایج ارزیابی نشان داد که استراتژی جست‌وجوی عمق عملکرد بهتری داشته و موجب افزایش کارایی الگوریتم شاخه‌وکران پیشنهادی و کاهش زمان حل می‌شود [۱۱]. بهنامیان (۱۳۹۷) در پژوهش خود مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی درنظر گرفته شده که در عین کاربردی بودن آن به‌عنوان یکی از مسائل پیچیده در مبحث بهینه‌سازی ترکیبیاتی مطرح بوده و این امر باعث توجه روزافزون محققین به این مسأله شده است. لذا مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل گردیده است. سپس باتوجه به محدودیت حل مسأله به‌صورت دقیق با استفاده از این مدل، روش برش سطحی به‌منظور ایجاد نامعادلاتی که برای مسأله معتبرند در قالب الگوریتم شاخه و برش پیشنهاد گردیده است [۱۲]. بنی‌هاشمی و همکاران (۱۳۹۹) یک رویکرد جدید براساس روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به ارزیابی کارایی برنامه‌ریزی و بودجه صرف شده در پروژه پرداختند. در ارزیابی انجام شده نشان دادند که عدم کارایی جریان مالی می‌تواند توجیه اقتصادی فعالیت‌های اجرایی پروژه را زیر سؤال برده و شاخص کارایی بودجه مصوب کاهش چشم‌گیری داشته باشد [۱۳]. ایمانی و عبودی (۱۳۹۸) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت زمان‌بندی چندین پروژه و تخصیص منابع محدود با درنظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه اجرای کل پروژه‌ها به‌طوری‌که هزینه مصرف منابع مشترک و هم‌چنین هزینه تأخیرهای هریک از پروژه‌ها حداقل گردد و کمینه‌سازی زمان هریک از زیرپروژه که منجربه حداقل‌سازی زمان کل پروژه گردد. هزینه اجرای پروژه‌ها شامل هزینه خرید و هزینه نگهداری منابع، جریمه تأخیر پروژه‌ها و هزینه منابع تجدیدپذیر ارائه نمودند [۱۴]. حسنی و فلاح نژاد (۱۳۹۸) با درنظر گرفتن منابع چندمهارتی، فعالیت‌های متداخل و زنجیره‌ای جایگزین زمان‌بندی پروژه براساس یک مدل ریاضی عدد صحیح ترکیبی ارائه نمودند و سپس با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری این مدل حل گردیده و نتایج حاصل در قالب دو مثال عددی و یک مورد مطالعاتی مواقعی با یکدیگر مقایسه شدند [۱۵].

هیلمن (۲۰۰۱) یک الگوریتم ابتکاری برای مسأله MRCPSP[5] ارائه داد. او فرض کرد که بین فعالیت‌های مختلف پروژه تأخیر وجود دارد. هدف وی از ارائه مدل نیز کمینه‌سازی زمان کل پروژه بوده است. وی یک الگوریتم ابتکاری مبتنی‌بر روش قانون اولویت و زمان‌بندی روبه عقب را برای مسأله MRCPSP طراحی کرد. وی عملکرد الگوریتم

1. Mixed integer nonlinear programming
2. Multiple Objective Keshtel Algorithm
3. Multiple Objective Simulated Annealing
4. Mixed Integer Programming
5. Multi-mode resource constrained project scheduling proble m

پیشنهادی را بر روی مسائل واقعی و در شرایطی که تعداد فعالیت‌ها حداکثر ۱۰۰ واحد و تعداد حالت‌های اجرای هر فعالیت حداکثر برابر ۵ می‌باشد مورد بررسی قرار داد. بررسی‌های به‌عمل آمده بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله MRCPSP بوده است [۱۶]. بروکر و نوست (۲۰۰۳) یک مدل ریاضی برای مسأله MRCPSP ارائه نمودند. آن‌ها فرض نمودند که بین فعالیت‌های متوالی پروژه تأخیر وجود دارد و این امر قابل‌اجتناب نیست. لذا مقدار حداقل و حداکثر این تأخیر را نیز در مدل‌سازی خودشان لحاظ نمودند [۱۷]. میکا و همکاران (۲۰۰۸) یک مدل ریاضی برای مسأله MRCPSP ارائه دادند. آن‌ها فرض کردند که زمان راه‌اندازی با زمان‌بندی فعالیت‌ها ارتباط دارد. دلیل اصلی آن‌ها برای درنظر گرفتن این فرض این بود که منابعی که به فعالیت‌ها اختصاص پیدا می‌کنند در مکان‌های مختلف قرار دارند؛ بنابراین در چنین شرایطی زمان لازم برای تهیه منابع موردنیاز و تخصیص آن‌ها به فعالیت‌ها نه‌تنها به توالی فعالیت‌ها بستگی دارد بلکه به مکان‌هایی که فعالیت‌های متوالی در آنجا اجرا می‌شوند نیز بستگی دارد [۱۸].

پیتگم و ونحوکه (۲۰۱۰) یک الگوریتم ژنتیک دوجمعیتی برای حل مسأله MRCPSP پیشنهاد دادند. این الگوریتم از دو جمعیت مجزا برای حل مسأله استفاده می‌کند و طرح تولید زمان‌بندی متوالی را با استفاده از رویه بهبود در حالت‌های انتخابی توسعه می‌دهد. آن‌ها همچنین اثر وجود انقطاع فعالیت‌ها را در کیفیت جواب‌های به‌دست آمده مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک دوجمعیتی ارائه شده توسط آن‌ها یکی از بهترین الگوریتم‌هایی است که تابه‌حال برای این مسأله در ادبیات ارائه شده است [۱۹]. وانگ و فانگ (۲۰۱۱) یک الگوریتم جهش قورباغه برای مسأله MRCPSP ارائه دادند. در این الگوریتم، قورباغه‌ها به‌عنوان فهرست فعالیت‌ها درنظر گرفته شدند و به‌صورت طرح تولید زمان‌بندی فعالیت‌های چندحالتی کد شدند. براساس این الگوریتم، ابتدا یک جمعیت اولیه از حالت‌های مرتبط به هر فعالیت به‌صورت تصادفی تولید و فهرست فعالیت‌های پروژه نیز براساس یک روش نمونه‌گیری خاص و قانون اولویت زودترین یا دیرترین زمان پایان تولید شدند [۲۰]. کاظمپور و همکاران (۲۰۱۲) یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسأله زمان‌بندی تولید با هدف حداقل کردن مدت زمان انجام پروژه ارائه نمودند. باتوجه به پیچیدگی مسأله، آن‌ها از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید به‌منظور حل مسأله استفاده کردند و برای اعتبارسنجی مدل عملکرد الگوریتم فراابتکاری، نتایج جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم فراابتکاری را با حل دقیق در نرم‌افزار لینگو مقایسه نمودند [۲۱]. جوانمرد و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود مسأله زمان‌بندی پروژه با سرمایه‌گذاری منابع چندمهارتی ارائه نمودند. نویسندگان مقاله به‌دست آوردن سیاست بهینه‌سازی هم‌زمان زمان‌بندی و استخدام مهارت‌ها را ارائه کردند [۲۲]. المیدا و همکاران (۲۰۱۶) یک روش فراابتکاری براساس قوانین ارجحیت برای مسأله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندگانه و چندمهارتی ارائه نمودند. جهت حل مدل ارائه شده از روش منابع وزنی استفاده کردند [۲۳]. مائنهوت و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود به بررسی مسأله یکپارچه زمان‌بندی پروژه و نیروی انسانی چندمهارتی پرداختند به‌طوری‌که زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و زمان‌بندی منابع به‌صورت ادغامی انجام شود. در این پژوهش از برنامه‌ریزی آرمانی جهت حل مسأله استفاده کردند [۲۴]. دبیریان (۲۰۱۹) در پژوهش خود بیان نمودند که موفقیت پروژه‌های عمرانی به مدیریت صحیح منابع بستگی زیادی دارد. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای مؤثر در مدیریت منابع انسانی، تخصیص منابع به پروژه است. تخصیص منابع انسانی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مؤثر و عامل بهبود در پیشرفت اجرای یک پروژه می‌تواند به‌شدت ازلحاظ هزینه و زمان‌بر عملکرد پروژه تأثیر بگذارد. بنابراین، فرآیند تخصیص با برآورد نیاز نیروی کار و ارزیابی استراتژی‌های مختلف تخصیص نیروی انسانی قابل بهبود است. تخصیص نیروی کار به‌دلیل وجود پویایی، روابط پیچیده و بازخورد در پروژه بسیار کارآمد است. ازاین‌رو یک مدل پویا برای تخصیص مؤثر نیروی کار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم ارائه نمودند [۲۵]. دوتسنکو (۲۰۱۹) در پژوهش خود بر استفاده از یک رویکرد ترکیبی و منطقی برای ساختن مدل‌های رسمی برای شکل‌گیری و عملکرد گروه‌های پروژه در یک محیط چندپروژه‌ای، رویکرد ذینفعان محور در شکل‌گیری نیازهای منابع و یک اهداکننده رویکرد پذیرنده در توزیع منابع بین پروژه‌ها پرداختند [۲۶].

رحمانییای (۲۰۱۹) بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه و کیفیت را در یک مسأله تخصیص منابع درنظر گرفته شده است. ازآنجاکه این مسائل در یک پروژه معمولاً در برنامه‌ریزی چنددوره‌ای با پارامترهای نامشخص به‌وجود می‌آیند، یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی چندمرحله‌ای (MSSPM[1]) چندمنظوره تهیه و ارائه شده است [۲۷]. گاراسما (۲۰۱۹) مسائل برنامه‌ریزی پروژه چندمنظوره با محدودیت منابع یک مدل ریاضی برای تخمین سنجش شایستگی کارکنان پرداخته و یک مدل ریاضی MIP تک‌هدفه ارائه شده است [۲۸]. نجف زاده (۲۰۱۹) یک چارچوب یکپارچه برای مسأله زمان‌بندی پروژه و سفارش تولید با ملاحظات پایداری با هدف کمینه‌سازی شایستگی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی تأمین‌کنندگان بالقوه منابع پروژه، ارائه نمودند. این مدل قادر به تعیین برنامه فعالیت‌ها، زمان و مقدار سفارش مواد و انتخاب تأمین‌کننده است باتوجه به اینکه مدل ارائه شده در طبقه NP-Hard قرار دارد، بنابراین دو الگوریتم فراابتکاری چندمنظوره، یعنی NSGA-II و MOPSO به‌عنوان روش‌های راه‌حل برای این مدل به‌کار گرفته شد. در ارزیابی انجام شده نتایج نشان داد که صرف‌نظر از اندازه مسأله، NSGA-II در اکثر معیارهای ارزیابی از MOPSO بهتر است [۲۹]. چاکرابورتی و همکاران (۲۰۲۰) یک راه‌حل بهینه برای مسأله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته برای پروژه‌های دارای فعالیت‌های با منابع غیرقابل تجدیدپذیر و تجدیدپذیر معرفی کردند.

1. Multi-stage stochastic programming model

برای ارزیابی و تحلیل مدل ریاضی ارائه شده یک راهبرد الگوریتم چندهدفه جست‌وجوی ممنوعه توسعه دادند. درنهایت نشان دادند که الگوریتم‌های دارای خاصیت حافظه‌ای عملکرد بهتری دارند [۳۰]. عبیدو (۲۰۲۱) یک الگوریتم برنامه‌ریزی تکاملی چندهدفه (MOEP[1]) را برای مدل‌سازی و حل مشکلات زمان‌بندی پروژه محرفی نمودند. این الگوریتم شامل اجرای یک عملگر جهش جدید برای سازگاری با مسأله زمان‌بندی توسعه‌یافته است. علاوه‌بر این، الگوریتم MOEP اصلاح شده با دو الگوریتم چندهدفه SPEA-II و NSGA-II که به‌طور گسترده در ادبیات برای حل مسأله زمان‌بندی پروژه استفاده شده‌اند، ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که الگوریتم MOEP اصلاح‌شده از نظر تنوع و کیفیت مجموعه بهینه پارتو بهتر از SPEA-II و NSGA-II عمل می کند [۳۱].

همان‌طور که در ادبیات پژوهشی مشاهده می‌گردد، اکثر پژوهش‌ها به بررسی زمان‌بندی پروژه با درنظر گرفتن منابع انسانی پرداخته و تاکنون توجهی به ریسک و زمان‌بندی و سودآوری اجرای پروژه‌های تولیدی پرداخته نشده است و نوآوری این پژوهش در ارائه مدل ریاضی MINLP در حوزه ارزیابی و انتخاب پروژه و زمان‌بندی اجرای آن باتوجه به اهداف معرفی شده می‌باشد که درنهایت دو الگوریتم فراابتکاری بر روی مدل ریاضی توسعه داده شده است.

جدول (۱). ارزیابی ادبیات پژوهشی

	نویسنده/سال	تک‌هدفه	چندهدفه	زمان‌بندی	منابع انسانی	جریان مالی	مدیریت ریسک	سود برنامه‌ریزی	الگوریتم کلاسیک	الگوریتم جدید
۱	دانش‌آموز (۱۳۹۹)	*		*					*	
۲	بهنامیان (۱۳۹۷)	*		*	*				*	
۳	بنی‌هاشمی (۱۳۹۹)	*				*			*	
۴	ایمانی (۱۳۹۸)		*	*	*				*	
۵	حسنی (۱۳۹۸)	*		*					*	
۶	هیلمن (۲۰۰۱)	*		*					*	
۷	بروکر (۲۰۰۳)	*		*	*				*	
۸	میکا (۲۰۰۸)		*	*	*				*	
۹	پیتگم (۲۰۱۰)	*		*					*	
۱۰	وانگ (۲۰۱۱)		*	*	*					*
۱۱	کاظمپور (۲۰۱۲)	*		*	*				*	
۱۲	جوانمرد (۲۰۱۶)	*		*	*				*	
۱۳	المیدا (۲۰۱۶)	*		*	*				*	
۱۴	مائنهوت (۲۰۱۷)		*	*	*				*	
۱۵	دبیریان (۲۰۱۹)		*	*	*			*	*	
۱۶	دوتسنکو (۲۰۱۹)		*	*	*				*	
۱۷	رحمانیی ای (۲۰۱۹)		*	*	*				*	
۱۸	گاراسما (۲۰۱۹)	*		*	*	*			*	
۱۹	نجف زاده (۲۰۱۹)		*	*	*				*	
۲۰	چاکرابورتی (۲۰۲۰)		*	*	*				*	
۲۱	عبیدو (۲۰۲۱)		*	*	*					*
۲۲	پژوهش حاضر		*	*	*	*	*	*		*

۳. روش تحقیق

در شرکت‌های پروژه‌محور، فرآیندهای تجاری آن‌ها دستخوش تغییرات بسیاری شده است به‌گونه‌ای که دیگر نمی‌توان تفاوتی میان تولید و مسأله پروژه درنظر گرفت. ازاین‌رو شرکت‌های پروژه‌محور با مسأله تولید در محل مواجه هستند (مانند شرکت مورد مطالعه که سازنده محصولات عمرانی برای راه‌سازی است و محصولات تولیدشان در محل پروژه تولید می‌شود). ازاین‌رو در ابتدای افق برنامه‌ریزی، همواره با پروژه‌های متعددی برای اجرا مواجه هستند که بایستی براساس محدودیت‌های مالی و منابع اقدام به برنامه‌ریزی نمایند. ازاین‌رو مسأله انتخاب پروژه تولیدی برای شروع به اقدام و برنامه‌ریزی، مسأله‌ای استراتژیک در شرکت‌های پروژه‌محور تولیدی است که نیاز به برنامه‌ریزی دقیقی دارند به‌گونه‌ای که انتخاب نامناسب پروژه سبب ازبین رفتن بودجه سازمانی و عدم دسترسی به منابع مالی حاصل از سود فروش محصول است که در فرآیندهای تولیدی بسیار مهم و کلیدی است ازاین‌رو توسعه یک مدل ریاضی که بتواند هم‌زمان انتخاب نمایند سطح اجرایی پروژه‌ها را که در کمترین زمان و با بودجه‌بندی

1. Multi-Objective Evolutionary Programming

بهینه و ریسک عملیاتی پایین اقدام به تولید نمایند یک فرآیند پیچیده‌ای است که در این مدل بدان پرداخته می‌شود. ازاین‌رو مدل‌سازی مسأله به شرح ذیل است:

اندیس‌های مدل:

J,q	پروژه‌های تعریف شده	j=1,2,…,N, j∈J
T,L	افق برنامه‌ریزی که شامل T دوره خواهد بود	t = 1,2,…,T
Ji	محصول iام از پروژه j	i = 1,2,…,n
P	پروژه‌های پیش‌نیاز	$p \in S_p$
Q	پروژه‌های وابسته	$q \in S_d$
e,f	پروژه‌های غیرهم‌خوان	e,f ϵ j
a,b	پروژه‌های هم‌خوان	a,b ϵ j

پارامترهای مدل:

C_{capexj}	هزینه احداث پروژه j
$C_{j,\,L-t+1}$	تأمین مالی موردنیاز برای احداث پروژه j در دوره L
C_{opexj}	هزینه‌های عملیاتی پروژه j در هر دوره
W'_{ji}	درآمد سالیانه حاصل از فروش محصول قابل ارتقای i از واحد j
W_{ji}	درآمد سالیانه حاصل از فروش محصول غیرقابل ارتقای i از واحد j
R_{jt}	ریسک پروژه j در دوره t
d_j	زمان موردنیاز جهت انجام پروژه j
B_L	بودجه موجود برای ساخت پروژه‌ها در ابتدای دوره L
S_m	پروژه‌های اجباری[1]
S_p	مجموعه پروژه‌های پیش‌نیاز[2]
S_d	مجموعه پروژه‌های وابسته[3]
S_j	پروژه‌های پیش‌نیاز پروژه j $(S_j \epsilon S_p)$
Dji	پروژه‌های وابسته مستقیم به محصول i از پروژه j

متغیر تصمیم مسأله:

$x_{j,t}=1$	انتخاب پروژه j در دوره t
$x_{j,t}=0$	عدم انتخاب پروژه j در دوره t
T_j	زمان آغاز به احداث پروژه j

در این مرحله با درنظر گرفتن اهداف پژوهش به تشکیل مدل ریاضی و هدف‌ها و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود.

$$Max\ z_1 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}\left(\sum_{i=1}^{n}((W'_{ji})(T-(\sum_{t=1}^{T}(Tq+d_q)\,.\,x_{q,t})-(T_j+d_j)) + (\sum_{i=1}^{n}((W_{ji})(T-(Tj+d_j)))\right) \quad (1)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}\,(C_{capexj} + C_{opexj}\,(T-(T_j+d_j)) \quad (2)$$

$$Min\ Z_3 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}\,.\,R_{jt} \quad (3)$$

$$St: \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{j,t} \le 1 \qquad \forall j$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{j,t} = 1 \qquad \forall j \epsilon S_m \quad (5)$$

$$(\sum_{t=1}^{T} t.\,x_{j,t})-1 \le Tj < \sum_{t=1}^{T} t.\,x_{j,t} \quad \forall j\ ,\ x_{j,t\neq 0} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}(Tj+d_j) \le T \qquad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}\,.\,C_{L-t+1} \le B_L \qquad \forall L=1,2,\ldots,T \quad (8)$$

$$\sum_{I\varepsilon Sj}\sum_{t=1}^{T} x_{I,t} \ge |S_j|\sum_{t=1}^{T} xj,t \qquad \forall j\epsilon S_d \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{e,t} + x_{f,t} \le 1 \qquad \forall e, f \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{a,t} - x_{b,t} = 0 \qquad \forall a,b \quad (11)$$

$$M_j = Max\,[\sum_{t=1}^{T} x_{p,t}(T_j + d_j)\ for\ p\epsilon S_j] \qquad \forall j\epsilon S_d \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^{T} x_{j,t}(Tj+d_j) \ge M_j \qquad \forall j\epsilon S_d$$

$$x_{j,t} \epsilon [0,1]\ ,\ Integer\ Numbers \quad (13)$$

$$T_j \varepsilon N$$

حال برای روشن‌تر شدن مدل به تشریح هریک از اهداف و محدودیت‌ها پرداخته می‌شود. رابطه شماره (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 درخصوص زمان آغاز هر پروژه (T_j) می‌چرخد و نکته قابل تأمل در این مدل قابلیت ارتقای برخی محصولات بعضی از واحدها می‌باشد که درصورتی که احداث واحد تکمیلی وابسته محصول مربوطه، محصول مورد بررسی قابلیت فروش و درآمدزایی نداشته و پروژه به بخش R&D برای توسعه محصول می‌شود. رابطه شماره (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). شایان ذکر است ریسک هر پروژه در دوره‌های مختلف و بر پایه نظرات و الگوهای ذهنی خبرگان قابل استخراج خواهد بود. رابطه (۴) تضمین‌کننده این مهم است که هریک از پروژه‌ها در طول T دوره حداکثر یک‌بار می‌توانند انتخاب گردند. رابطه (۵) برای پروژه‌هایی به‌کار می‌رود که باتوجه به سیاست‌های تصمیم‌گیرندگان بایستی حتماً تا انتهای T دوره انتخاب گردند که اصطلاحاً به آن‌ها پروژه‌های اجباری اطلاق می‌گردد. رابطه (۶) تضمین‌کننده آن است که زمان آغاز هر پروژه یعنی T_j درون دوره‌ای است که $x_{j,t}$ 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 مورد بررسی قرار گرفته است. نکته حائز

1. Mandatory Projects
2. Prerequisite Projects
3. Dependent Projects

4. Failure Modes and Effects Analysis
5. Risk Priority Number

اهمیت در این محدودیت هزینه مرتبط از ساخت هر پروژه در دوره‌های مختلف از زمان ساختش است که آن را با $C_{j,\ L-t+1}$ نشان می‌دهیم. رابطه (۹) تضمین‌کننده رعایت پیش‌نیازی و وابستگی برخی از پروژه‌ها است. به‌عبارتی دیگر پروژه وابسته زمانی حق انتخاب دارد که کلیه پروژه‌های پیش‌نیازش برآورده شده باشند. در این رابطه $|S_j|$ نشان‌دهنده تعداد پروژه‌های پیش‌نیاز پروژه j می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده پروژه‌هایی است که در صورت احداث هریک از آن‌ها قطعاً پروژه دیگر انتخاب نخواهد شد که در اصطلاح به آن‌ها پروژه‌های غیرهمخوان 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 قطعاً پس از اتمام دوره احداث تمامی پروژه‌های پیش‌نیازشان خواهد بود و درنهایت رابطه (۱۳) خاطرنشان می‌نماید که متغیر $x_{j,t}$ مسأله از جنس صفر و یک بوده و متغیر T_j زیرمجموعه اعداد طبیعی می‌باشد.

همان‌طور که بیان شده است، مدل‌ریاضی ارائه شده به‌صورت MINLP می‌باشد و به‌دلیل استفاده از متغیر تصمیم باینتری، و محدودیت‌های غیرخطی در مدل‌سازی انجام شده، این مسأله به‌صورت NP-HARD بوده و مدل ریاضی در ابعاد کوچک در نرم‌افزار حل دقیق مانند گمز و لینگو قابل حل در مدت زمان مناسب ندارد. ازاین‌رو با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری به ارزیابی و تحلیل مدل ریاضی پرداخته می‌شود.

۴. معرفی الگوریتم فراابتکاری

الگوریتم فراابتکاری MOKA: یکی از کاراترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در سال‌های اخیر، الگوریتم کشتل بوده است که توسط حاجی‌آقایی کشتلی و امین نیری در سال ۲۰۱۳ پیشنهاد گردید [۳۲]. این روش که کارایی خود را در حل مسائل مختلف مهندسی و تحقیق‌درعملیات نظیر مسأله زنجیره‌تأمین و برنامه‌ریزی تولید نشان داده است، از رفتار حریصانه گروهی از اردک‌سانان در منطقه کشتل از استان مازندران الهام گرفته است. در این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، از یک جمعیت اولیه برای شروع الگوریتم استفاده می‌کند. جمعیت اولیه به سه نوع مختلف تقسیم می‌شوند. نوع اول که آن‌ها کشتل‌های خوش‌شانس نامیده می‌شوند، در کنار نزدیک‌ترین همسایه خود می‌گردند تا بهتر شوند. جنس دوم در میان کشتل‌های خوش‌شانس می‌گردند تا نواحی همسایگی آن‌ها را به‌درستی جست‌وجو کنند؛ و گروه سوم کشتل‌هایی هستند که خسته شدند و پرواز می‌کنند و گروه دیگری دوباره در کنار آنان می‌نشینند. در این الگوریتم، به فازهای فراابتکاری‌ها اهمیت قائل شده و این امکان را به استفاده‌کننده می‌دهد که از سه اپراتور جست‌وجوی الگوریتم یکی یا دو تا را در میان آن‌ها انتخاب کند؛ و در این الگوریتم جمعیت کشتل‌های خوش‌شانس تنظیم‌کننده تمرکز الگوریتم و دو اپراتور دیگر برای فاز جست‌وجو و تنوع جواب‌ها در موتور الگوریتم گنجانده شده است. در این پژوهش یک نسخه چندهدفه از آن ارائه شده است که در ادامه شبه‌کد آن در شکل (۱) آورده شده است.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA): یکی از موفق‌ترین الگوریتم‌های تک‌جواب را می‌توان الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نامید. این الگوریتم که از منطقی ریاضی و در عین‌حال ساده برای جست‌وجو استفاده می‌کند. کارایی این الگوریتم در انواع مسائل مختلف تحقیق‌درعملیات و علوم مهندسی بارها مورد تمجید قرارگرفته است. این الگوریتم از منطق سرد شدن فلز متبلور شده در درجه حرارت بالا استفاده می‌کند. این الگوریتم اولین‌بار توسط کیرکپاتریک و همکاران در سال ۱۹۸۳ معرفی شد. این الگوریتم با یک جواب تصادفی با درجه حرارت بالا شروع به جست‌وجو می‌کند. در هر مرحله از الگوریتم برای جواب مرحله قبل یک همسایگی ایجاد می‌شود. اگر جواب ذکرشده بهبود یافت جواب جدید پذیرفته می‌شود. در غیر این‌صورت با احتمالی جواب ذکرشده را می‌پذیریم؛ که این احتمال باتوجه به درجه حرارت فعلی و با استفاده از تابع بولتزمن کنترل می‌شود. این منطق کمک می‌کند که الگوریتم بتواند جواب‌های بد را در ابتدا با احتمال زیاد و سپس در ادامه با احتمال کمتر پذیرش کند و از بهینه‌ی محلی فرار کند. باتوجه به کارایی این الگوریتم در شرایط تک‌هدفه، در این پژوهش با استفاده از تابع برازش چندهدفه معرفی شده می‌تواند کارایی مناسب این الگوریتم را در محیط چندهدفه مشاهده نمود ازاین‌رو شبه‌کد الگوریتم MOSA معرفی شده در شکل (۲) آورده شده است.

1. Land the (N) Keshtels and calculate them fitness
2. Do non-dominate sorting and Calculate crowding distance
3. Sort Keshtels respect to the crowding distance
4. Find the Lucky Keshtels (LK).
5. Find the best lucky Keshtel.
6. For each LK (N_1)
6.1. Swirl the Nearest Keshtel (NK) around the LK.
6.2. If NK finds better food than LK, replace NK with LK, find new NK, go to step 6.1
6.3. If the food still exists, attract the NK, go to step, 61.if not, go to step 8.
7. Let the LKs remain in the lake.
8. Startle the Keshtels which have found less food and land new ones. (N_3)
9. Move the remained Keshtels in the lake between other Keshtels. (N_2)
10. Merged populations [N; N_1; N_2; N_3]
11. Do non-dominate sorting and Calculate crowding distance
12. Sort Keshtels respect to the crowding distance
13. Select (N) better Keshtels from this merged populations for next iteration
14. Do again step 11 and 12 for this new population
15. If stopping criteria are satisfied, stop, if not, go to step 5.

شکل (۱). شبه‌کد الگوریتم کشتل

4.3.3. Else $\Delta f_1 \geq 0$ && $\Delta f_2 \leq 0$
$P_1 = \exp\left(\frac{-\Delta f_1}{T}\right)$, $P_2 = \exp\left(\frac{-\Delta f_2}{T}\right)$, *h=rand*
If $h<P_1$ && $h< P_2$
Update the solution $x=x'$
*5. Update temperature (T=α*T)*
6. Do non-dominate sorting in this Pareto set.
7. If stopping criteria are satisfied, stop, if not, go to step 4.1.

شکل (۲). شبه‌کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه

ساختار کروموزمی الگوریتم فراابتکاری به شرح ذیل است:

دوره	بخش ۱								بخش ۲								بخش ۳									
	i			*j+k*					*j*				*k*				*i+j+k*								*l*	
۱	۰/۰۷۲	۰/۱۳۲	۰/۷۸۶	۰/۹۵۸	۰/۷۹۹	۰/۶۴۱	۰/۳۸۵	۰/۶۵۰	۰/۸۹۷	۰/۶۷۴	۰/۱۱۵	۰/۲۴۳	۰/۱۲۲	۰/۴۹۰	۰/۹۸۶	۰/۲۱۸	۰/۵۱۶	۰/۰۲۶	۰/۳۴۶	۰/۹۶۱	۰/۳۵۲	۰/۳۱۰	۰/۲۸۸
۲	۰/۵۲۶	۰/۲۶۸	۰/۲۰۹	۰/۵۶۲	۰/۱۲۳	۰/۵۴۴	۰/۷۳۸	۰/۷۲۶	۰/۷۸۳	۰/۸۶۰	۰/۱۶۸	۰/۴۶۹	۰/۹۸۹	۰/۷۱۶	۰/۲۸۹	۰/۲۳۹	۰/۴۵۷	۰/۷۲۳	۰/۱۹۹	۰/۱۴۴	۰/۸۳۰	۰/۰۲۳	۰/۹۷۶
۳	۰/۰۹۹	۰/۳۳۲	۰/۰۳۴	۰/۳۸۳	۰/۳۳۹	۰/۴۳۱	۰/۹۹۷	۰/۳۵۰	۰/۷۹۲	۰/۳۱۳	۰/۸۵۲	۰/۵۱۲	۰/۳۹۱	۰/۳۸۲	۰/۴۷۲	۰/۳۰۴	۰/۸۹۴	۰/۴۷۱	۰/۶۳۵	۰/۰۴۳	۰/۵۳۴	۰/۴۹۴	۰/۱۲۰
۴	۰/۳۱۷	۰/۸۷۷	۰/۹۹۵	۰/۴۹۲	۰/۸۹۲	۰/۳۲۱	۰/۹۸۲	۰/۱۹۵	۰/۷۶۰	۰/۳۰۲	۰/۶۷۸	۰/۹۰۰	۰/۰۱۰	۰/۷۸۷	۰/۴۴۸	۰/۷۰۰	۰/۲۴۶	۰/۹۱۳	۰/۲۰۳	۰/۲۱۱	۰/۹۱۹	۰/۴۴۹	۰/۹۴۹
۵	۰/۰۷۷	۰/۷۷۱	۰/۲۱۵	۰/۸۱۴	۰/۰۵۵	۰/۲۳۰	۰/۹۳۴	۰/۸۳۰	۰/۲۴۰	۰/۶۰۶	۰/۵۴۳	۰/۷۲۱	۰/۷۷۳	۰/۹۹۱	۰/۵۱۳	۰/۰۰۱	۰/۶۱۱	۰/۱۵۶	۰/۴۵۸	۰/۴۶۵	۰/۵۴۵	۰/۰۹۷	۰/۳۱۶
۶	۰/۲۸۶	۰/۹۸۳	۰/۲۵۲	۰/۱۸۵	۰/۵۸۷	۰/۸۶۱	۰/۴۵۴	۰/۶۴۹	۰/۰۹۰	۰/۹۵۱	۰/۹۵۸	۰/۵۹۸	۰/۰۶۷	۰/۶۰۲	۰/۵۹۳	۰/۴۶۷	۰/۳۰۷	۰/۵۶۸	۰/۵۲۳	۰/۸۴۵	۰/۲۳۱	۰/۰۷۰	۰/۰۵۷
۷	۰/۲۲۷	۰/۹۴۱	۰/۹۳۶	۰/۹۶۵	۰/۱۷۸	۰/۷۷۷	۰/۶۳۷	۰/۰۰۴	۰/۳۳۶	۰/۳۶۶	۰/۲۵۱	۰/۲۰۶	۰/۲۳۴	۰/۲۰۱	۰/۱۹۳	۰/۹۲۹	۰/۶۴۷	۰/۷۵۵	۰/۵۵۳	۰/۶۳۸	۰/۹۵۵	۰/۷۴۶	۰/۹۳۶
۸	۰/۲۲۲	۰/۹۰۶	۰/۸۹۴	۰/۷۷۷	۰/۳۳۹	۰/۷۵۷	۰/۶۱۷	۰/۲۹۶	۰/۲۰۵	۰/۷۷۱	۰/۲۵۸	۰/۲۳۶	۰/۳۴۷	۰/۸۶۲	۰/۴۰۲	۰/۹۰۱	۰/۷۷۷	۰/۶۰۷	۰/۷۳۳	۰/۶۸۷	۰/۳۳۱	۰/۲۳۸	۰/۹۸۸

۵. حل مدل ریاضی و تحلیل نتایج آن

در این بخش باتوجه به ارائه مدل ریاضی چندهدفه ارائه شده سپس با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ارائه شده انجام گردید. ازاین‌رو ورودی‌های مدل ریاضی براساس اطلاعات جمع‌آوری شده در بازه زمانی یک‌ساله شرکت کیسون ارزیابی شده به‌شرح ذیل است.

جدول (۲): تنظیم پارامترهای مدل ریاضی

پارامتر	مقدار	واحد
C_{capexj}	Uniform ~ [۱۱۴۲۹۰, ۱۸۵۷۱۵]	دلار
$C_{j,\ L\text{-}t+1}$	Uniform ~ [۱۴۲۸۵, ۲۲۸۵۵]	دلار
C_{opexj}	Uniform ~ [۱۲۳۴۱۵, ۲۱۳۴۳۵]	دلار
W'_{ji}	Uniform ~ [۷۴۵۶۷۳, ۹۸۷۲۵۴]	دلار
W_{ji}	Uniform ~ [۴۴۵۶۷۳, ۵۸۷۲۵۴]	دلار

۵-۱. آزمایش‌های تاگوچی

در اواخر سال ۱۹۴۰ میلادی، تاگوچی مفاهیم آماری جدیدی را مطرح کرد و بعدها ثابت شد که این مفاهیم، ابزارهای باارزشی در مقوله کنترل و بهبود کیفیت می‌باشد و از آن زمان به‌بعد، بسیاری از صنعتگران کشور ژاپن از این روش در بهبود محصولات و کیفیت فرآیند استفاده می‌کنند. افزایش کیفیت خودروهای ساخت این کشور شدیداً به استفاده گسترده از این روش ارتباط دارد. روش تاگوچی در زمینه کنترل کیفیت در صنایع تولیدی است و بر سه مفهوم اصلی و ساده بنا نهاده شده است:

- کیفیت باید هنگام تولید طراحی شود نه اینکه در طی فرآیند ساخت محصول بررسی شود.
- محصول باید طوری طراحی گردد که در برابر فاکتورهای محیطی غیرقابل کنترل ایمن باشد.

هزینه کیفیت باید به‌صورت تابع انحراف از حالت استاندارد اندازه‌گیری شده و ضرر و زیان‌ها در عرض سیستم سنجیده شود.

اصطلاحات:

عامل: یک عامل (فاکتور) یک متغیر قابل‌کنترل آزمایشی است که بر روی خروجی تأثیر می‌گذارد. می‌توان آن را به‌عنوان متغیر مستقل درنظر گرفت.

سطح عامل: یک مقدار مشخص از یک عامل است.

پاسخ: پاسخ (خروجی) پدیده‌ای قابل اندازه‌گیری است که بر روی تأثیر عوامل بر روی آن طی یک سری آزمایش مدنظر است.

طراحی آزمایش: یک طراحی آزمایش حاصل چیدمان عوامل و سطوح آن‌ها، به‌گونه‌ای خاص است.

تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت طراحی و ایجاد آن در خود محصول است. تاگوچی برای ارائه آزمایش‌هایش گروه‌های ویژه‌ای از آرایه‌های ارتوگونال (OA) را ترکیب و ایجاد نمود. آرایه‌های ارتوگونال فرآیند طراحی آزمایش‌ها را سهولت می‌بخشند. طراحی یک آزمایش شامل انتخاب مناسب‌ترین آرایه ارتوگونال، تعیین فاکتورها با ستون‌های مناسب و نهایتاً موقعیت آزمایش‌ها (شرایط آزمایش) می‌باشد. در این پژوهش از معادله هرچه کوچک‌تر بهتر از روش تاگوچی استفاده می‌کنیم [۳۳].

$$SN_s = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (۱۴)$$

ازآنجایی‌که مدل ریاضی این پژوهش چندهدفه است، از معادله‌ای با استفاده از شاخص‌های استاندارد چندهدفه به‌عنوان Response در روش تاگوچی استفاده می‌شود؛ که این رابطه به‌صورت زیر است.

$$MCOV = \frac{MID}{MS} \quad (۱۵)$$

حال نوبت شناسایی شاخص‌های استاندارد چندهدفه می‌رسد.

۵-۲. شاخص‌های استاندارد چندهدفه

یکی از روش‌های برخورد با این مسائل استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد است. چند مورد از این شاخص‌ها در زیر توضیح داده می‌شود:

تعداد جواب پارتو (Number of Pareto Solutions)

این معیار برابر با تعداد جواب‌های خروجی در هر بار اجرای الگوریتم می‌باشد. در مقایسه‌ی بین چند الگوریتم این معیار به‌عنوان تعداد جواب های خروجی نهایی از اجرای هر کدام از الگوریتم ها تعریف می شود. بدیهی است که هرچه تعداد جواب‌های پارتو یک روش بیشتر باشد، آن روش مطلوب‌تر است.

معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (MID)

این معیار به‌منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتو از مبدأ مختصات استفاده می‌شود. در رابطه زیر مشخص است که هرچه این معیار کمتر باشد، کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود [۳۳].

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(\frac{f1_i - f1_{best}}{f1_{total}^{max} - f1_{total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f2_i - f2_{best}}{f2_{total}^{max} - f2_{total}^{min}}\right)^2}}{n} \quad (۱۶)$$

معیار زمان اجرای الگوریتم (CPU time)

$$MS = \sqrt{\sum_{i=1}^{i}(minf(i) - maxf(i))^2} \quad (۱۷)$$

در مسائل بزرگ یکی از معیارهای مهم، زمان اجرای آن ها می‌باشد و به‌همین دلیل زمان اجرای الگوریتم به‌عنوان یک معیار ارزیابی کیفیت درنظر گرفته می‌شود.

معیار حداکثر پراکندگی (MS)

شاخص فاصله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

شاخص سنجش پراکندگی جواب‌های نامغلوب (SNS)

این شاخص برای شناسایی پراکندگی و تنوع جواب‌های پارتو به‌دست آمده ارائه شده است.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(MID - C_i)^2}{n-1}} \quad (۱۸)$$
$$C_i = \sqrt{f1_i^2 + f2_i^2}$$

۵-۳. نتایج طراحی آزمایشات

بعد از طراحی مسأله حال نوبت طراحی آزمایش با روش تاگوچی است. همان‌گونه که توضیح داده شد روش تاگوچی با کم کردن تعداد آزمایشات زمان تنظیم پارامتر را کاهش می‌دهد [۳۴]. ابتدا پارامترهایی را که در هر الگوریتم می‌خواهیم تنظیم کنیم مشخص می‌کنیم. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب سطوح پارامترها و آرایه‌های آرتوگنال برای آزمایش‌ها را به‌دست می‌آوریم و بعد از مشخص شدن تعداد آزمایشات برای هر الگوریتم، الگوریتم‌ها را باهمان سطوح مشخص آزمایش کرده و ده بار اجرا کردیم و از نتایج به‌دست‌آمده از این ده آزمایش میانگین گرفتیم سپس آن ها را بی‌وزن کرده و نمودارهای S/N را به‌دست آوردیم و پارامترهای بهتر را به‌دست آوردیم. در ابتدا لازم است سطوح هر الگوریتم را به‌دست آورده و ذکر کنیم. برای این کار مقالات مرتبط مطالعه شدند و سطوح کاندیدا از بین آن‌ها شناسایی گردید که به‌قرار جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): سطوح مختلف برای پارامترهای هر الگوریتم

الگوریتم‌ها	Algorithm parameters	Level 1	Level 2	Level 3
MOSA	T_0	30	40	50
	α	۰/۹۹	۰/۹	۰/۸۸
	Max-iteration	4* (i+j+k+l+o)	8* (i+j+k+l+o)	12* (i+j+k+l+o)
MOKA	M_1	5%	10%	15%
	M_2	20%	25%	30%
	S_{max}	10	15	20
	N-Keshtel	50	100	150
	Max-iteration	2* (i+j+k+l+o)	3* (i+j+k+l+o)	4* (i+j+k+l+o)

درنهایت به کمک نرم‌افزار minitab 16 طراحی آزمایشات انجام شد و آرایه‌های اورتوگنال L9 برای الگوریتم MOSA انتخاب گردید؛ اما برای الگوریتم MOKA آرایه های اورتوگنال L27 درنظر گرفته شد. پس از اجرای الگوریتم ها برای هریک از آزمایش های مذکور مقادیر Response برای روش تاگوچی به‌دست آمد. این مقادیر و آرایه‌های اورتوگنال در جداول (۴) و (۵) ارائه‌شده است.

جدول (۴): آرایه اورتوگنال L27 و نتایج محاسباتی برای الگوریتم MOKA

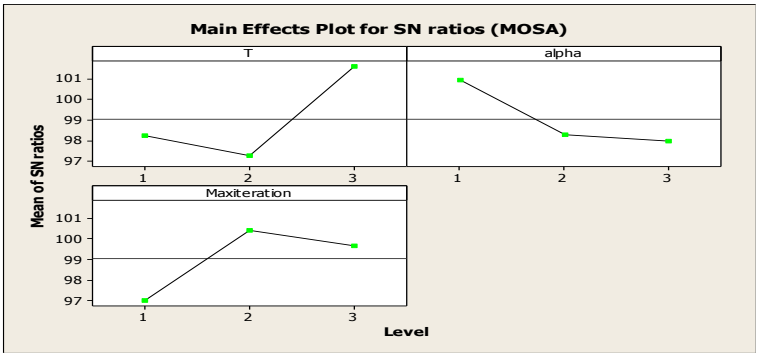
آزمایش	M_1	M_2	S_{max}	N-Keshtel	Max-iteration	MOKA Response
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸/۲۶۹e-۰۰۶
۲	۱	۱	۱	۱	۲	۵/۸۰۵e-۰۰۶
۳	۱	۱	۱	۱	۳	۷/۲۷۰e-۰۰۶
۴	۱	۲	۲	۲	۱	۶/۶۸۹e-۰۰۶
۵	۱	۲	۲	۲	۲	۵/۰۵۳e-۰۰۶
۶	۱	۲	۲	۲	۳	۸/۶۷۴e-۰۰۶
۷	۱	۳	۳	۳	۱	۵/۰۰۶e-۰۰۶
۸	۱	۳	۳	۳	۲	۷/۷۶۸e-۰۰۶
۹	۱	۳	۳	۳	۳	۲/۸۷۷e-۰۰۶
۱۰	۲	۱	۲	۳	۱	۴/۴۸۳e-۰۰۶
۱۱	۲	۱	۲	۳	۲	۱/۲۲۹e-۰۰۵
۱۲	۲	۱	۲	۳	۳	۵/۷۴۹e-۰۰۶
۱۳	۲	۲	۳	۱	۱	۵/۶۴۳e-۰۰۶
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲	۲/۵۲۱e-۰۰۵
۱۵	۲	۲	۳	۱	۳	۶/۱۶۳e-۰۰۶
۱۶	۲	۳	۱	۲	۱	۷/۳۳۱e-۰۰۶
۱۷	۲	۳	۱	۲	۲	۶/۷۳۲e-۰۰۶
۲۳	۳	۲	۱	۳	۲	۳/۰۰۱e-۰۰۶
۲۴	۳	۲	۱	۳	۳	۱/۷۱۶e-۰۰۵
۲۵	۳	۳	۲	۱	۱	۲/۷۳۶e-۰۰۵
۲۶	۳	۳	۲	۱	۲	۷/۲۹۶e-۰۰۶
۲۷	۳	۳	۲	۱	۳	۸/۵۶۶e-۰۰۶

درنهایت پس از ر سم نمودارهای سیگنال–نویز هر الگوریتم، می‌توان بهترین مقادیر پارامترها را شنا سایی کرد. این مقادیر در نمودارهای (۱) و (۲) ارائه‌شده‌اند.

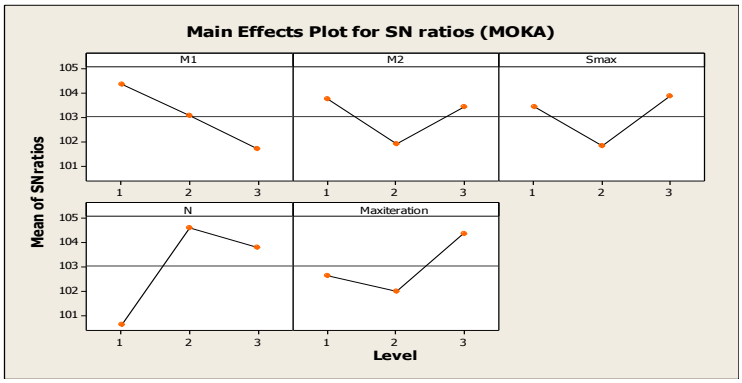
جدول (۵): آرایه اورتوگنال L9 و نتایج محاسباتی برای الگوریتم MOSA

آزمایش	T_0	α	Max-iteration	MOSA Response
۱	۱	۱	۱	۱/۳۸۴۶e-۰۰۵
۲	۱	۲	۲	۹/۹۲۹۷e-۰۰۶
۳	۱	۳	۳	۱/۳۳۷۶e-۰۰۵
۴	۲	۱	۲	۹/۷۵۷۷e-۰۰۶
۵	۲	۲	۳	۱/۵۵۳۶e-۰۰۵
۶	۲	۳	۱	۱/۶۹۸۹e-۰۰۵
۷	۳	۱	۳	۵/۴۱۶۱e-۰۰۶
۸	۳	۲	۱	۱/۱۸۷۲e-۰۰۵
۹	۳	۳	۲	۸/۹۵۱۱e-۰۰۶

باتوجه به تحلیل سیگنال به نویز انجام شده در نمودار (۱) و (۲)، هرچه سطح انحرافات کمتر باشد مطلوبیت انتخاب عملگرد بیشتر و بهتر می‌باشد. ازاین‌رو پس از حل مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از روش‌های نام‌برده، درنهایت جدول (۶) نتایج حاصل برای سه دسته مسأله سایز کوچک، متوسط و بزرگ مسأله را نشان می‌دهند.



نمودار (۱): نمودار سیگنال–نویز الگوریتم MOSA

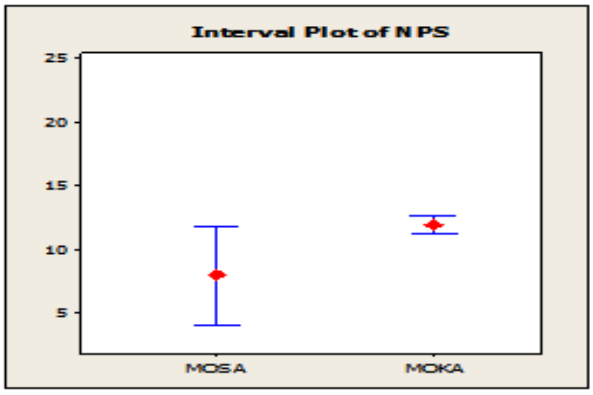


نمودار (۲): نمودار سیگنال–نویز الگوریتم MOKA

جدول (۶): نتایج محاسباتی از الگوریتم‌ها برای ۱۲ زیرمسأله

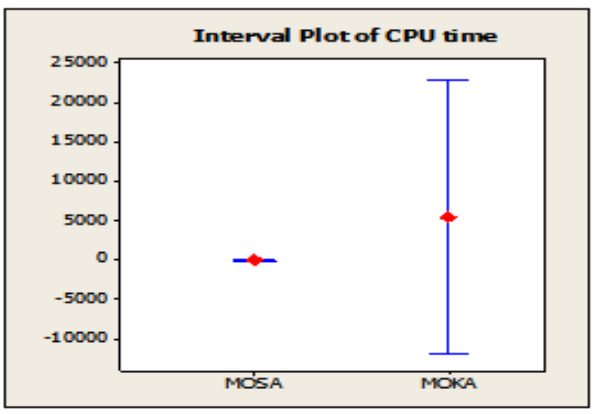
مسأله	*NPS*		*CPU Time*		*MID*		*MS*		*SNS*	
	MOSA	MOKA	MOSA	MOKA	MOSA	MOKA	MOSA	MOKA	MOSA	MOKA
۱	۶	۱۲	۱۵/۵۴۲۷	۹۰/۱۴۴	۳/۹۰۸۹	۱/۴۰۹۵	۱۹۹۵۷۳	۳۶۰۱۳۸	۳۶۳۵۳۳	۲۸۰۶۸۵
۲	۹	۱۱	۲۴/۴۳۸۱	۲۱۷/۰۳۵۷	۲/۳۲۶۴	۱/۱۷۵۱	۳۷۱۲۵۳	۶۲۹۱۲۱	۷۰۰۳۵۲	۶۴۴۰۹۳
۳	۸	۱۰	۲۵/۹۲۰۹	۴۰۶/۸۰۶	۲/۱۳۷۹	۲/۹۲۰۸	۵۳۶۶۷۳	۷۲۵۳۸۹	۱۰۹۱۸۵۵	۹۸۸۲۰۱
۴	۴	۱۴	۲۸/۰۴۷۶	۶۲۶/۵۳۶۳	۵/۴۹۷۷	۲/۳۲۵۲	۶۱۱۴۰۸	۶۰۹۶۹۳	۱۷۰۲۷۸۸	۱۱۴۶۹۶۹
۵	۸	۱۲	۳۵/۶۷۵۷	۱۶۹۳/۹۱۲۲	۳/۲۱۴۷	۳/۶۸۸۸	۸۵۹۲۵۴	۶۱۹۶۴۳	۲۳۶۰۰۸۹	۱۹۳۴۹۶۳
۶	۸	۱۱	۳۹/۰۷۲۳	۱۸۸۹/۱۵۴۴	۵/۰۳۲۲	۳/۳۲۸۱	۷۸۸۵۰۵	۱۷۴۳۱۹۳	۲۷۰۷۹۶۴	۲۵۷۶۱۸۲
۷	۸	۱۴	۴۲/۹۷۹۵	۲۲۱۲/۴۴۱۵	۴/۸۱۹۹	۴/۲۴۶	۹۷۸۵۳۴	۱۰۵۰۰۲۹	۳۲۲۵۷۱۸	۲۸۰۲۶۹۷
۸	۶	۱۲	۶۷/۹۴۰۶	۴۶۹۵/۸۷۷۶	۴/۹۷۵۵	۵/۳۴۴۳	۹۴۶۷۳۲	۱۱۴۶۶۵۶	۳۹۶۹۶۵۶	۳۶۶۵۷۶۱
۹	۸	۱۲	۹۰/۳۶۵۷	۸۵۹۱/۷۵۳	۵/۱۳۹۶	۶/۷۲۰۵	۱۴۱۸۲۵۳	۸۸۶۷۵۴	۵۸۴۲۴۵۶	۴۹۰۴۹۲۶
۱۰	۱۱	۹	۹۸/۲۳۷۵	۱۰۱۹۳	۵/۸۴۳۴	۱۰/۲۸۷۷	۱۴۲۹۱۴۷	۱۴۸۳۸۴۰	۶۲۱۲۴۹۲	۵۵۲۲۳۰۷
۱۱	۱۱	۱۴	۱۰۷/۲۸۹۹	۱۵۹۸۴	۸/۲۲۶۲	۴/۹۱۸۱	۹۸۲۵۷۹	۱۹۸۷۸۹۵	۶۱۹۰۲۳۸	۵۷۹۳۰۴۰
۱۲	۹	۱۲	۱۳۷/۵۲۳۴	۱۹۲۹۱	۸/۰۲۵۹	۵/۵۸۵۹	۱۷۰۲۲۰۱	۱۴۲۱۱۰۹	۶۸۰۷۱۵۷	۵۹۳۳۳۷۷

به‌منظور درک بهتر مو ضوع از روش های آ ماری Anova با Intterval Plot 95% استفاده شده است که نتایج حاصله در اشکال (۱) تا (۲) ارائه شده‌اند.



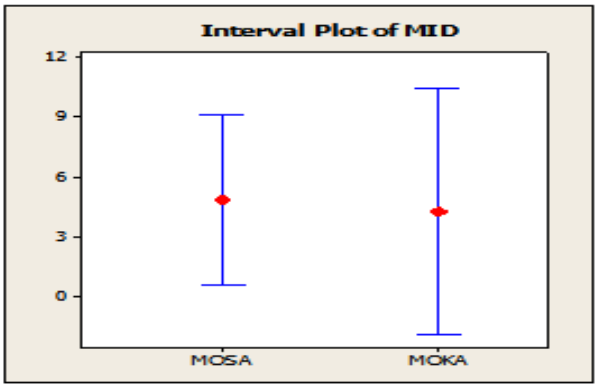
شکل (۳): تحلیل آماری برحسب شاخص NPS

همان‌طور که نمایان ا ست، از حیث شاخص NPS ابتدا MOKA و سپس MOSA بهترین عملکرد را دارا هستند.



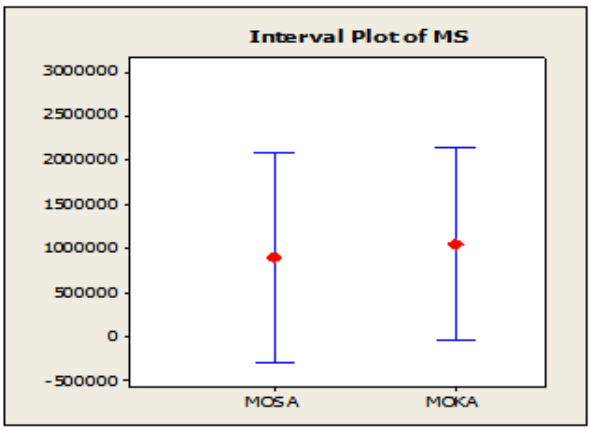
شکل (۴): تحلیل آماری برحسب شاخص CPU time

همچنین، از حیث شاخص CPU time (ثانیه) ابتدا MOSA و سپس MOKA بهترین عملکرد را دارا هستند.



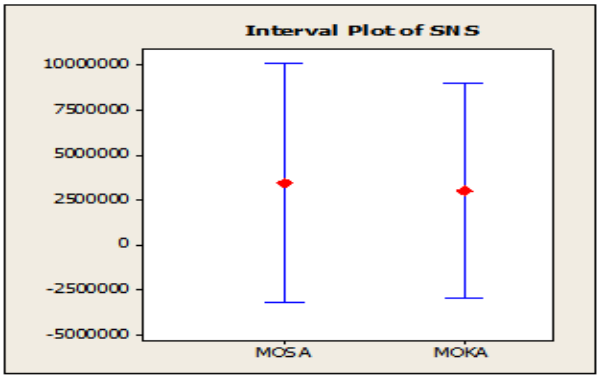
شکل (۵): تحلیل آماری برحسب شاخص MID

از حیث شاخص MID الگوریتم MOSA عملکرد بهتری را در مقایسه با MOKA دارا می‌باشد.



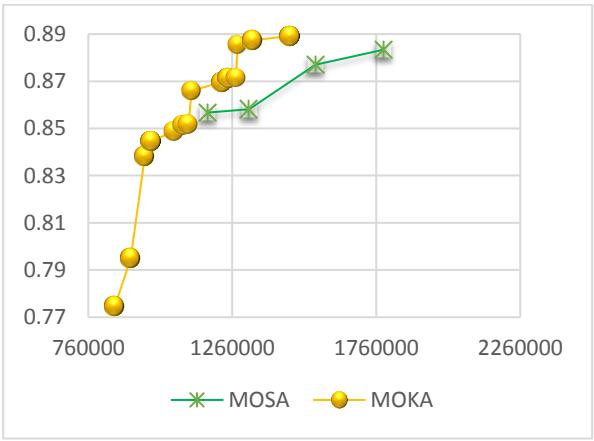
شکل (۶): تحلیل آماری برحسب شاخص MS

از حیث شاخص MS هم الگوریتم MOSA از MOKA بهترین عملکرد را دارا هستند.

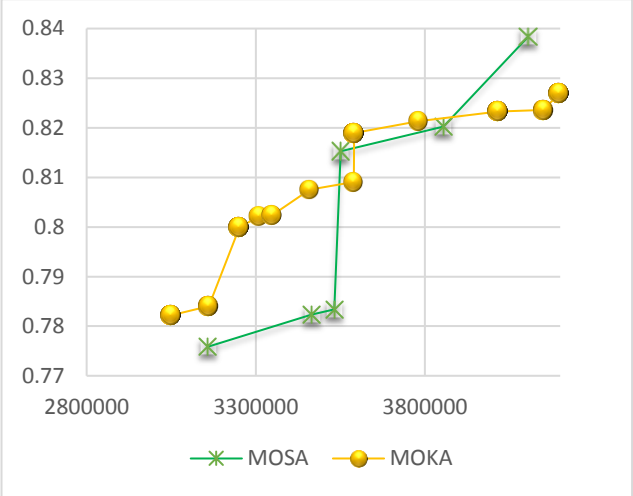


شکل (۷):. تحلیل آماری برحسب شاخص SNS

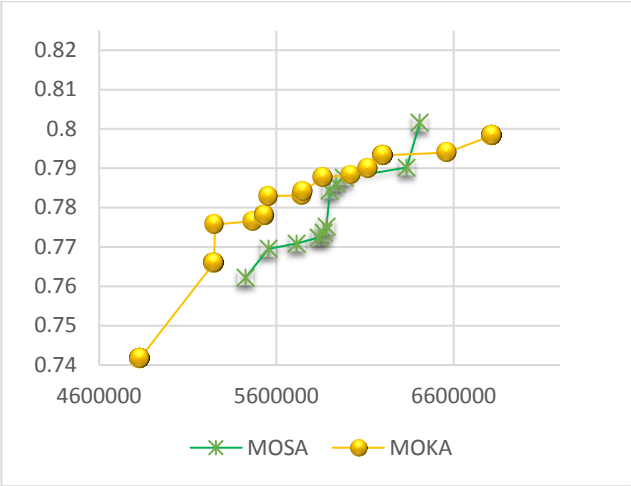
از حیث شاخص SNS به الگوریتم MOKA از MOSA بهترین عملکرد را دارا هستند. ازاین‌رو باتوجه به ارزیابی انجام‌شده نشان داده شد که الگوریتم MOSA کارایی بهتری نسبت‌به MOKA دارا هستند. همچنین برای درک بهتر چند نمودار پارتو از مسأله در ابعاد مختلف در اشکال (۸) تا (۱۰) ارائه گردیده است.



شکل (۸): نمودار پارتو برای ابعاد کوچک مسأله



شکل (۹): نمودار پارتو برای ابعاد متوسط مسأله



شکل (۱۰): نمودار پارتو برای ابعاد بزرگ مسأله

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی پژوهش

از دیدگاه عملی با بهبود زمان‌بندی پروژه‌های تولیدی در صنایع به‌عنوان بخشی از فرآیند مدیریت پروژه، می‌توان هزینه‌های مربوطه را به میزان زیادی کاهش داد. از جنبه نظری نیز این مسأله یک زمینه جذاب برای متخصصین تحقیق‌درعملیات و رشته‌های وابسته می‌باشد، زیرا بسیاری از مدل‌های معروف بهینه‌سازی حالت‌های خاصی از مدل‌های مطرح در زمان‌بندی پروژه می‌باشند. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در سال‌های اخیر، هنوز کمبودهای بسیاری در حوزه‌های مختلف این مسأله وجود دارد که یکی از دلایل اصلی این کمبودها دشوار بودن حل مدل‌های مربوطه می‌باشد. ازاین‌رو در این پژوهش به مسأله ارزیابی و انتخاب و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی زمان‌بندی پروژه‌های تولیدی و تأمین منابع مالی پرداخته شد و درنهایت مدل MINLP ارائه‌شده با استفاده از دو الگوریتم فرااتکاری MOSA وMOKA ارزیابی و تحلیل شدند. براساس اهمیت شاخص‌های MS و MID و CPU time نشان داده شد که الگوریتم MOSA کارایی بهتری نسبت به الگوریتم MOKA دارا می‌باشد. باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش پیشنهاد می‌گردد مسأله تاب‌آوری در برنامه‌ریزی تولید لحاظ شود و همچنین مسأله پیشنهاد می‌گردد مسأله چندحالته بودن فعالیت‌های پروژه و تخصیص منابع چندمهارته به مدل زمان‌بندی لحاظ شود درنهایت با استفاده از الگوریتم‌های هیبریدی مانند NSGAII و جست‌وجوی ممنوعه ارزیابی مناسبی از مدل ریاضی انجام گردد.

مراجع

[۱] برزگری، هومن؛ عالم تبریز اکبر و قاسمی احمدرضا، (۱۳۹۷)، ارائه و تبیین مدل ریاضی مسأله زمان‌بندی پروژه چندمهارتی همزمان با برنامه‌ریزی تولید منابع مصرفی، پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مدیریت و حسابداری، تهران، انجمن مدیریت ایران.

[2] Tavana, M., Abtahi, A. R., & Khalili-Damghani, K. (2014). A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project

scheduling problems. Expert Systems with Applications, 41(4), 1830-1846.
[3] Heldman, K. (2018). PMP: project management professional exam study guide. John Wiley & Sons.
[4] Scheiblich, M., Maftei, M., Just, V., & Studeny, M. (2017). DEVELOPING A PROJECT SCORECARD TO MEASURE THE PERFORMANCE OF PROJECT MANAGEMENT IN RELATION TO EFQM EXCELLENCE MODEL. Amfiteatru Economic, 19(11), 966-980.
[5] Bredillet, C., Tywoniak, S., & Tootoonchy, M. (2018). Exploring the dynamics of project management office and portfolio management co-evolution: A routine lens. International Journal of Project Management, 36(1), 27-42.
[6] Sanghera, P. (2019). Project Schedule Management. In CAPM® in Depth (pp. 173-220). Apress, Berkeley, CA.
[7] de Andrade, P. A., Martens, A., & Vanhoucke, M. (2019). Using real project schedule data to compare earned schedule and earned duration management project time forecasting capabilities. Automation in Construction, 99, 68-78.
[۸] برکیان سرخابی، مهرداد، (۱۳۹۷)، ساختار منشور پروژه طبق استاندارد PMBOK در پروژه‌های عمرانی، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری با تأکید بر اشتغال‌زایی در صنعت ساختمان، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس.
[۹] سرایی، محمد؛ قاهری سید علی و ابراهیم پور مریم، (۱۳۹۷)، ارائه یک روش مؤثر برای حل مسأله زمان‌بندی پروژه‌های فناوری اطلاعات با منابع محدود با استفاده از الگوریتم علف هرز (مطالعه موردی: اداره کل بندر و دریانوردی خرمشهر اداره فاوا)، کنفرانس بین‌المللی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس.
[10] Fernandes, G., Pinto, E. B., Araújo, M., & Machado, R. J. (2018). The roles of a Programme and Project Management Office to support collaborative university–industry R&D. Total Quality Management & Business Excellence, 1-26.
[۱۱] دانش‌آموز، فاطمه، فتاحی، پرویز، حسینی، سید محمدحسن. (۱۳۹۹). ارائه یک الگوریتم شاخه‌وکران برای حل مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر همراه با یک مرحله‌ی مونتاژ. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۸(۱۷)، ۳۵۹-۳۴۷. doi:10.22084/ier.2021.3927
[۱۲] بهنامیان، جواد، کمیجانی، فاطمه. (۱۳۹۷). ارائه الگوریتم شاخه و برش برای حل مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی با استفاده از نامعادلات معتبر. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۶(۱۳)، ۱۴۹-۱۳۹. doi: 10.22084/ier.2019.15262.1707
[۱۳] بنی‌هاشمی، سید علی و خلیل زاده، محمد و شهرکی، علیرضا و رستمی مال خلیفه، محسن،(۱۳۹۹)،ارزیابی کارایی زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پروژه: رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها با خروجی نامطلوب، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن ایرانی تحقیق‌درعملیات، شاهرود.
[۱۴] ایمانی؛ دین محمد و عبودی؛ سید حسن، (۱۳۹۸)، مدل‌سازی چندپروژه‌ای، چندهدفه با منابع تجدید ناپذیر فاسدشدنی، کنفرانس بین‌المللی راهکارها و چالش‌های مدیریت و مهندسی صنایع، تهران، شرکت همایش آروین البرز.
[۱۵] حسنی، سمانه و فلاح نژاد محمد صابر، (۱۳۹۸)، زمان‌بندی پروژه با منابع چندمهارتی با فعالیت‌های متداخل و زنجیره‌ای جایگزین در شرایط عدم قطعیت، اولین کنفرانس بین‌المللی توانمندسازی کسب‌وکارهای فناورانه و راهکارهای پیشرفت در تکنولوژی و مهندسی، تهران، شرکت همایش آروین البرز.
[16] De Reyck B., Herroelen W., (2001), The multi-mode resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations, European Journal of Operational Research,119, 538-556.
[17] Brucker P., Drexl A., Möhring R., Neumann K. Pesch E. (2003), Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods, European Journal of Operational Research, 112,3-41.
[18] Mika M., Waligóra G., Węglarz J., (2008), Tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with schedule-dependent setup times, European Journal of Operational Research, 187,1238-1250.
[19] Peteghem V.V., Vanhoucke M., (2010), A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem, European Journal of Operational Research, 201, 409-418.
[20] Wang L., Fang C., (2011), An effective shuffled frog-leaping algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem, Information Sciences, 181, 4804-4822.
[21] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahnazari-Shahrezaei, P., & Azaron, A. (2013). A differential evolution algorithm to solve multi-skilled project portfolio scheduling problems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 64(5-8), 1099-1111.
[22] Javanmard, S., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2017). Preemptive multi-skilled resource investment project scheduling problem: Mathematical modelling and solution approaches. Computers & Chemical Engineering, 96, 55-68.
[23] Ozceylan, E. (2016). A mathematical model using AHP priorities for soccer player selection: a case study. South African Journal of Industrial Engineering, 27(2), 190-205.
[24] Maenhout, B., & Vanhoucke, M. (2017). A resource type analysis of the integrated project scheduling and personnel staffing problem. Annals of Operations Research, 252(2), 407-433.
[25] Dabirian, S., Abbaspour, S., Khanzadi, M., & Ahmadi, M. (2019). Dynamic modelling of human resource allocation in construction projects. International Journal of Construction Management, 1-10.
[26] Dotsenko, N. (2019). Methodological provision of human resources management in a multi-project environment. Technology audit and production reserves, 1(2 (45)), 52-54.
[27] Rahmanniyay, F., Yu, A. J., & Seif, J. (2019). A multi-objective multi-stage stochastic model for project team formation under uncertainty in time requirements. Computers & Industrial Engineering, 132, 153-165.
[28] Garomsa, T., Agon, E. D. C., & Assefa, S. (2019). Concept of Value Engineering and Current Project Management Practice in Ethiopian Building Construction Projects. American Journal of Civil Engineering, 7(1), 1-8.
[29] Najafzad, H., Davari-Ardakani, H., & Nemati-Lafmejani, R. (2019). Multi-skill project scheduling problem under time-of-use electricity tariffs and shift differential payments. Energy, 168, 619-636.
[30] Chakrabortty, R. K., Abbasi, A., & Ryan, M. J. (2020). Multi-mode resource constrained project scheduling using modified variable neighborhood search heuristic. International Transactions in Operational Research, 27(1), 138-167.
[31] Abido, M. A., & Elazouni, A. (2021). Modified multi-objective evolutionary programming algorithm for solving

project scheduling problems. Expert Systems with Applications, 183, 115338.

[32] Hajiaghaei-Keshteli, M., & Aminnayeri, M. (2013). Keshtel Algorithm (KA); a new optimization algorithm inspired by Keshtels' feeding. In Proceeding in IEEE conference on industrial engineering and management systems (pp. 2249-2253).

[33] Chouhan, V. K., Khan, S. H., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. Soft Computing, 25(16), 11377-11404.

[34] Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110821.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2022, Volume 10., No. 20., pp. 17-31
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2023.24909.2044

An integrated multi-objective Model of scheduling and financial flow of production projects and useing of MOSA and MOKA meta-heuristic algorithms

S. Janbaz[1], S. M. R. Davoodi[2*], A. Abdolbaghi Ataabadi[3]

[1.] PhD Candidate of Industrial Management, Department of Management, Dehaghan Branch, Islamic Azad University, Dehaghan, Iran.
[2.] Assistant Professor, Department of Management, Dehaghan Branch, Islamic Azad University, Dehaghan, Iran.
[3.] Assistant Professor, Department of Management, School of Industrial Engineering and Management, Shahrood University of Technology, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received: 2021/9/12
Accepted: 2022/2/16

***Keywords*:**

Production Project Scheduling
MINLP Multi-Objective
Mathematical Model Scheduling
MOSA Meta-Heuristic Algorithm
MOKA Meta-Heuristic Algorithm

ABSTRACT

Today, project-oriented organizations have several parallel projects that can start planning in parallel, and most of these companies are facing funding crises in order for projects to be successful. On the other hand, by completing executive projects. And assigning it to a sponsor or employer brings a good profit to the organization. In case of improper selection of projects to start and lack of integration between financial resources, in addition to causing loss of resources and energy of the organization, it will cause failure of the organizational structure and stop current projects and create much higher losses in the organization. Therefore, in this research, a multi-objective MINLP mathematical model was presented. The mathematical model of this research includes multiple objectives of maximizing the profit from the selection of the production project, minimizing the cost and implementation risk of the projects. Also, information about the parameters of the mathematical model based on the receipt from the Kayson construction and production company has been used. Finally, the proposed model was evaluated and validated by two algorithms, MOSA and MOKA. In the validation performed in the study and based on the performance of the optimal solutions, it was shown that the MOSA algorithm is more efficient.

[*] Corresponding author. S. M. R. Davoodi
Tel.:09132290367; E-mail address: smrdavoodi@ut.ac.ir