

حل مسئله تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌های به کمک الگوریتم فاخته

الهام شادکام*

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خيام، مشهد

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۴، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۷/۲۴

چکیده

تسطیح منابع در پروژه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و مدیران پروژه همیشه به یک برنامه زمان‌بندی براساس مصرف بهینه منابع مورد نیاز برای تکمیل پروژه‌ها نیاز دارند. بیشتر تحقیقات در زمینه تسطیح منابع فقط در حالت تک‌پروژه‌ای انجام گرفته است در حالی که در بسیاری از سازمان‌ها نظیر شرکت‌های پروژه‌محور چندین پروژه را به صورت هم‌زمان اجرا می‌کنند. بدین منظور یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌کردن تغییرات سطح منابع مختلف توسط کلیه پروژه‌ها مورد نیاز است. همچنین از آنجایی که مسئله تسطیح منابع یک مسئله با درجه پیچیدگی بالا بوده و دستیابی به حل بهینه آن در حالت کلی امکان‌پذیر نیست در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، COA (Cuckoo Optimization Algorithm) که یک الگوریتم الهام گرفته از طبیعت و از جدیدترین و قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌باشد، استفاده خواهد شد. مقایسه نتایج به دست آمده از حل مسئله با الگوریتم فاخته که روشی تقریبی است با روش دقیق شاخه و کران حاکی از آن است که در ابعاد کم، استفاده از روش دقیق مناسب‌تر است و هرچه ابعاد مسئله گسترش می‌یابد الگوریتم فاخته در مدت زمان کوتاه‌تر و با سرعت بیشتری جواب مناسب را ارائه خواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: مسئله تسطیح منابع، الگوریتم فاخته، کنترل چند پروژه‌ای، الگوریتم‌های فراابتکاری، زمان‌بندی فعالیت‌ها، تخصیص منابع.

۱- مقدمه

هدف از به‌کارگیری تسطیح منابع تلاش در جهت کمینه‌سازی اختلاف بین سطوح بیش‌ترین و کم‌ترین نرخ به‌کارگیری منابع نسبت به یک سطح کاربردی مطلوب و کاهش هزینه به‌کارگیری منابع حمل‌ونقل با استفاده از یک روش فراابتکاری مناسب می‌باشد (نادری‌پور، ۱۳۷۲).

تسطیح و تخصیص منابع از اساسی‌ترین وظایف مدیریت پروژه می‌باشد. به‌طور معمول در مدیریت پروژه برای برنامه‌ریزی و کنترل پروژه از روش‌های مشخصی مانند گرت^۱ و پرت^۲ استفاده می‌شود. باید توجه داشت که در تسطیح منابع تاریخ اتمام پروژه تغییر نمی‌کند (سهرابی و کابران‌زاد قدیم، ۱۳۸۳). در ادبیات موضوع، تحقیقات زیادی در مورد زمان‌بندی پروژه با هدف تخصیص و تسطیح منابع صورت گرفته است.

Bandelloni و همکاران (۱۹۹۴) در مورد تسطیح منابع نامحدود تحقیق نمودند و روش بهینه‌ای در این زمینه ارائه دادند. هدف آن‌ها از ارائه این مقاله، زمان‌بندی تمام فعالیت‌های پروژه در روزهای مشخص بین فرجه فعالیت‌ها است به‌گونه‌ای که مصرف

گسترش فراگیر پروژه‌ها و پیچیده بودن مدیریت و زمان‌بندی فعالیت‌ها با توجه به تأثیر و اهمیت منابع در اجرای به‌موقع فعالیت‌ها و تکمیل پروژه‌ها، باعث شده است که توجه محققان به چگونگی مصرف منابع در این زمینه متمرکز گردد. از این‌رو تسطیح منابع همواره یکی از مسائل مورد اهمیت در زمینه مدیریت کنترل پروژه‌ها به حساب می‌آید. پس از تعریف و تخصیص منابع به فعالیت‌های پروژه نوبت تسطیح منابع است و تسطیح منابع به‌منظور رفع تداخل منابع صورت می‌گیرد. به مجموعه عملیاتی که برای رفع تداخل منابع انجام می‌شود، تسطیح منابع گفته می‌شود. تداخل منابع زمانی به‌وجود می‌آید که به یک منبع بیشتر از کاری که می‌تواند انجام دهد، کار تخصیص داده شود. ولی اکثر تحقیقات در این زمینه، در راستای تسطیح منابع برای اجرای یک پروژه بوده است، در صورتی که بسیاری از شرکت‌ها در یک مقطع زمانی چندین پروژه را با استفاده از منابع مشترک به‌صورت هم‌زمان اجرا می‌کنند. بدین منظور موضوعی که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است مسئله تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌ای می‌باشد.

2. Program Evaluation and Review Technique (PERT)

1. Graphical Evaluation and Review Technique (GERT)

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۵۱-۳۵۱۵۶۳۱۶

آدرس ایمیل: e.shadkam@khayyam.ac.ir (ا. شادکام).

در مسائل تسطیح منابع سعی می‌شود تا میزان نوسان در سطح مصرف منابع در طی زمان کمینه شود. نوسان سطح استفاده از منابع در مدت زمان اجرای پروژه، موجب اضافه شدن هزینه‌های ناشی از آزادسازی و دوباره به‌کارگیری منابع خواهد شد (Yong و Fu، ۲۰۱۱). به تسطیح منابع، زمانی نیاز است که هدف کاهش نوسانات در الگوی استفاده از منابع در طول زمان باشد. علاوه بر این مطلوبیت در این مسائل ثابت نگه داشتن زمان از پیش تعیین شده برای تکمیل پروژه است (Ponz-Tienda و همکاران، ۲۰۱۳). جولای و باقری (۱۳۹۵) مقاله‌ای تحت عنوان حل مسئله تسطیح منابع پروژه با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارا^{۱۲} ارائه دادند آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی تبرید اقدام به حل مسئله کردند و سپس کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را با جواب‌های مدل ریاضی صفر و یک و نیز سه روش ابتکاری موردسنجش قرار دادند و نتایج حاکی از آن است که الگوریتم ارائه شده نسبت به سه روش ابتکاری برتری دارد و نتایج قابل‌رقابتی را با جواب‌های مدل ریاضی به‌دست می‌دهد.

فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیق خود مسئله زمان-بندی پروژه منابع محدود با فعالیت‌های چندحالتی را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی شبکه کنترل پروژه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی و خروجی‌های آن را با خروجی‌های حاصل از یک الگوریتم فراابتکاری مقایسه کردند.

حسین‌زاده و افشاری (۱۳۹۶) در مقاله خود مدل چندهدفه با رویکرد تسطیح منابع و کمینه‌سازی هزینه استفاده از منابع و زمان در شرایط منابع چندحالتی نامحدود و فعالیت‌های چندحالتی با استفاده از الگوریتم‌های محدودیت اپسیلون^{۱۳} و انبوه توده ذرات چندهدفه ارائه دادند.

کابارن‌زاد قدیم و رفوگر آستانه (۱۳۸۸) در تحقیقات خود مسئله تسطیح منابع- وسایل حمل‌ونقل به‌ویژه زمانی که تابع هدف چندگانه از نوع NP-hard^{۱۴} محسوب می‌شود مدنظر قرار داده بودند که برای حل آن از الگوریتم ژنتیک و روش بهینه‌سازی سیمپلکس^{۱۵} استفاده کردند.

خادمی‌زارع و همکاران (۱۳۸۴) یک روش کارا برای تخصیص و تسطیح منابع محدود در یک مسئله برنامه‌ریزی تولید چندمرحله‌ای، چندمحصولی و چندپرودی بر پایه ضرایب لاگرانژ^{۱۶} ارائه داده‌اند و طراحی آزمایش‌ها در این مقاله بیانگر استفاده بهینه این روش نسبت به الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی می‌باشد.

منابع به‌گونه‌ای مطلوب باشد. روش آن‌ها برای مسائل با اندازه کوچک و متوسط مناسب بود.

Khatab و Soyland (۱۹۹۶) مقاله‌ای تحت عنوان تخصیص منابع محدود در پروژه‌های ساختمانی ارائه کردند. این مسئله در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی، هنگامی که محدودیت‌های مختلفی در میزان منابع در دسترس پیمانکار است، پدید می‌آید. مقاله آن‌ها یک روش هیورستیک^۳ را برای زمان‌بندی فعالیت‌ها براساس نرم‌افزار پریمورا^۴ ارائه می‌کند.

Kastor و همکارانش (۲۰۰۸) با استفاده از مفهوم تسطیح منابع راه‌حلی برای مسئله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود (RCPSP)^۵ ارائه کردند و با استفاده از دو مثال واقعی به‌صورت مطالعه موردی به تشریح راه‌حل ارائه‌شده پرداختند.

Saad و Younis (۱۹۹۶) الگوریتمی برای حل بهینه تسطیح منابع ارائه دادند. الگوریتم آن‌ها حالت چند منبعی را پوشش می‌دهد. این الگوریتم در سه سطح اصلی اجرا می‌شود که در ادامه هر سطح را به‌اختصار توضیح می‌دهیم. در سطح اول، زمان‌بندی فعالیت‌های بحرانی و غیربحرانی از روش مسیر بحرانی (CPM)^۶ صورت می‌پذیرد و برای هر فعالیت، زودترین زمان شروع، دیرترین زمان شروع، زودترین زمان پایان، دیرترین زمان پایان، فرجه کل و فرجه آزاد محاسبه می‌شود. بیشتر روش‌هایی که برای حل مسئله تسطیح منابع ارائه شده است ابتکاری می‌باشد (مانند روش برگس^۷، بروس^۸، کومار^۹ و هاریس^{۱۰}). ایده اصلی این روش‌ها ایجاد نمودار منبع با اجرای فعالیت در زودترین زمان شروع براساس روش CPM می‌باشد. آنگاه براساس بعضی قواعد تجربی فعالیت‌های غیربحرانی را در بازه مجاز شناورشان جابه‌جا می‌کنند که منجر به تغییر نمودار منبع می‌شود. برای جابه‌جایی فعالیت‌ها ابتدا آن‌ها را براساس یک معیار مرتب می‌کنند و سپس به‌ترتیب، شروع به تسطیح می‌نمایند (Burke، ۲۰۰۴). روش‌های عددی با ماهیت ابتکاری اگرچه در پروژه‌های عملی و بزرگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی لزوماً به جواب بهینه نمی‌رسند. مسئله تسطیح منابع یک مسئله ترکیبی چندجمله‌ای نامعلوم (غیرمشخص) با تکمیل در زمان معین می‌باشد. لذا در زمینه بهینه‌سازی با روش‌های برنامه‌ریزی متعارف به دلیل ترکیبی بودن مسئله، تحقیقات کم-تری نسبت به تحقیقات روش‌های ابتکاری انجام گرفته است. تسطیح منابع با مدل‌های عدد صحیح خطی، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی کوادراتیک^{۱۱} و مدل‌های فازی فرموله شده است (Said، ۲۰۰۴).

10. Harris
11. Quadratic
12. Simulated Annealing Algorithm
13. Epsilon
۱۴. Non-deterministic Polynomial-time hard
15. Simplex
16. Lagrange

۳. Heuristic
4. Primavera
۵. Resource Constraint Project Scheduling Problem
۶. Critical Path Method
7. Burges
8. Bruce
9. Kumar

Quintanilla و همکاران (۲۰۱۲) مسئله زمان‌بندی را برای یک پروژه ارائه داد که آن پروژه از چند زیر پروژه دیگر تشکیل شده بود. Tian و Demeulemeester (۲۰۱۴) برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع از دو خط‌مشی الگوریتم ژنتیک و روش گرت استفاده کردند.

Szmerekovsky و Venkateshan (۲۰۱۲) از برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه استفاده و سپس با استفاده از نرم‌افزار سیپلکس^{۲۰} به حل آن پرداختند. Georgios و Konstantinos (۲۰۱۰) براساس الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارا به حل مسئله تسطیح منابع با محدودیت منابع پرداختند.

Boctor (۱۹۹۰) یک رویکرد ابتکاری برای حل مسئله زمان-بندی پروژه‌های موازی پیشنهاد داد که در این روش ابتکاری مسئله در ابتدا به زیربخش‌هایی تقسیم می‌گردد و سپس هر زیربخش به صورت مجزا با روش‌های دقیق بررسی می‌گردد.

در کلیه مطالعات گذشته اگرچه هدف تسطیح منابع کارایی و اثربخشی بیشتر منابع موجود بوده و مسئله همواره با توجه به محدودیت زمان انجام پروژه فرموله شده است ولی در هیچ‌یک از کارهای انجام گرفته عوامل بیرونی که تأثیرگذار بر زمان انجام فعالیت‌ها می‌باشند مورد توجه نبوده است. مسئله تسطیح منابع، یک مسئله NP-hard بوده و دستیابی به حل بهینه در حالت کلی امکان‌پذیر نیست و برای حل تقریبی آن باید از روش‌های ابتکاری یا روش‌های فراابتکاری استفاده کرد. در این مقاله به ارائه یک روش حل براساس روش فراابتکاری الگوریتم فاخته پرداخته می‌شود زیرا الگوریتم فاخته با این که روش تقریبی است ولی در مدت زمان کوتاه‌تری ما را به جواب بهینه می‌رساند که در حالت چند پروژه‌ای تاکنون صورت نگرفته است.

در جدول (۱) روند توسعه مدل‌های مسئله زمان‌بندی پروژه‌ها آورده شده است. این پژوهش در پاسخ به این پرسش مطرح شده است که آیا می‌توان با استفاده از الگوریتم فاخته، تسطیح منابع در حالت تک‌پروژه‌ای و چندپروژه‌ای را به گونه‌ای ایجاد کرد که نوسانات منابع مورداستفاده را حداقل کرد؟ نتایج حاکی از آن است که الگوریتم فاخته قادر است جواب‌های بسیار خوب را در زمان‌های قابل قبولی ارائه دهد. در ادامه در ابتدا به شرح مختصری از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته پرداخته می‌شود. سپس مدلی چندهدفه مبنی بر تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌ای و انجام پروژه در کم‌ترین زمان ممکن ارائه می‌شود. در قسمت بعدی به- منظور نشان دادن کارایی مدل و روش حل توسط الگوریتم فراابتکاری، این مدل با الگوریتم فاخته در محیط نرم‌افزار متلب^{۲۱}

در مقاله ارائه شده توسط Kyriklidis و همکاران (۲۰۱۴)، از یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها برای تسطیح منابع چندگانه استفاده شده است. روش پیشنهادی براساس سری داده‌های استاندارد با برخی از روش‌های سنتی تسطیح منابع مقایسه گردیده است.

Koulinas و Anagnostopoulos (۲۰۱۳) یک الگوریتم جستجوی ممنوعه برای مسئله تسطیح منابع مبتنی بر الگوریتم فوق فراابتکاری ارائه دادند. الگوریتم ارائه شده توسط آن‌ها، در سه پروژه به کار گرفته شده است و نتایج به دست آمده نشان‌دهنده توانایی بالای الگوریتم می‌باشد.

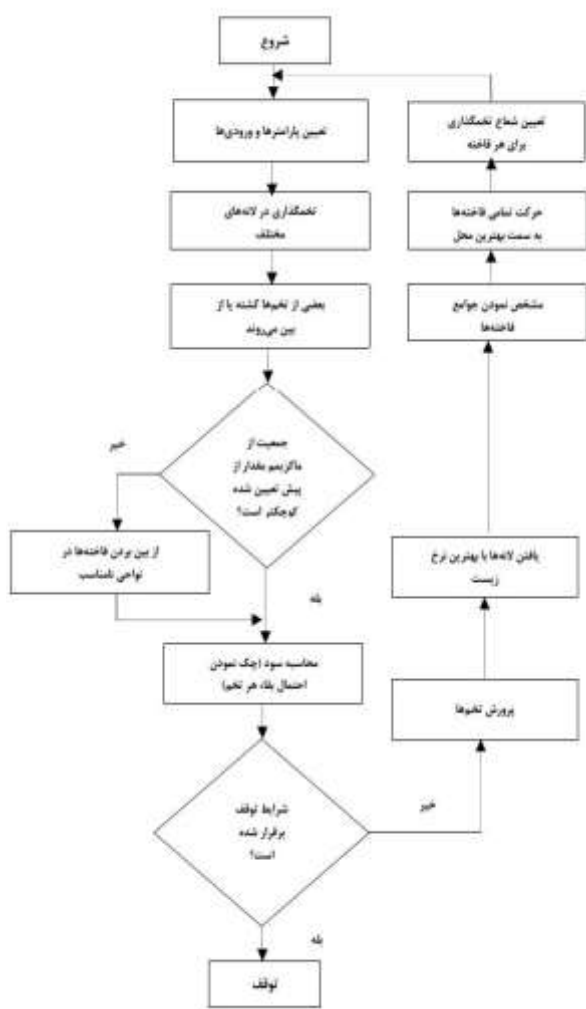
Hu و Flood (۲۰۱۲) با استفاده از رویکرد تعاملی پارتو^{۱۷} به بهینه‌سازی در زمینه تسطیح منابع چندگانه پرداختند. Guo و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به تسطیح منابع چندگانه پرداختند. Rayes و همکاران (۲۰۰۹) دو معیار جدید برای حداقل کردن نوسانات مصرف منابع مختلف معرفی کردند آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حداقل کردن تأثیرات منفی نوسانات منابع پرداختند. Wang و Wu (۲۰۰۱) برای مسئله تخصیص و تسطیح منابع محدود از ترکیب الگوریتم-های ژنتیک و جستجوی همسایگی (NS)^{۱۸} استفاده کردند. Leu و Chen (۱۹۹۹) نشان دادند که مسائل تسطیح منابع در حالت چندگانه از نوع NP-hard می‌باشد، به همین دلیل از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این نوع مسائل استفاده کردند.

جدول ۱- روند توسعه مدل‌های مسئله زمان‌بندی پروژه

سال	نوع روش	محقق
۱۹۶۱	روش مسیر بحرانی CPM	Kelley
۱۹۶۲	روش MPM	Roy
۱۹۶۳	روش RCPSP	Kelley
۱۹۶۷	GERT	Pritsker
۱۹۶۹	اولین فرمول‌بندی مسئله RCPSP	Pritsker
۱۹۸۳	نشان دادن RCPSP به عنوان یک مسئله NP-Hard	Blazevicz
۱۹۸۸	فرمول‌بندی مسئله RCPSP با قابلیت انقطاع فعالیت‌ها	Kaplan
۱۹۹۳	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Alvarez
۱۹۹۷	روش CCM ^{۱۹}	Goldratt
۱۹۹۸	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Mingozzi
۱۹۹۸	طبقه‌بندی مدل‌های RCPSP	Brucker
۲۰۰۰	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Klein
۲۰۰۰-۲۰۱۶	استفاده از روش‌های حل مختلف برای مسائل گوناگون RCPSP	محققین مختلف

20. CPLEX
21. MATLAB

17. Pareto
18. Neighborhood Search
19. Critical Chain Management



شکل ۱- فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (Rajabioun, ۲۰۱۱)

۳- شرح مسئله تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌ای

هدف مسئله تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌ای، دستیابی به سطح مصرف ایده‌آل از منابع هنگام اجرای چندین پروژه است که به‌طور هم‌زمان در یک محیط کاری اجرا می‌شوند. برای دستیابی به حل مسئله تعریف‌شده فرضیاتی در نظر گرفته شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. فرضیات مسئله تسطیح منابع در حالت چندپروژه‌ای عبارت‌اند از:

- ✓ هنگامی که هر فعالیت آغاز می‌شود، به‌صورت پیوسته ادامه می‌یابد و قطع نمی‌گردد.
- ✓ هر فعالیت زمانی می‌تواند آغاز شود که کلیه فعالیت‌های پیش‌نیاز آن خاتمه یافته باشند.
- ✓ بین زمان ختم فعالیت‌های پیش‌نیاز و شروع فعالیت‌های

و روش دقیق شاخه و کران در محیط نرم‌افزار لینگو^{۲۲} حل می‌گردد، جواب‌های حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه و در نهایت پیشنهاداتی جهت توسعه مدل و تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۲- معرفی و منطق الگوریتم فاخته

الگوریتم فاخته با الهام از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته است که در سال ۲۰۰۹ توسط شین او یانگ^{۲۳} و دب ساوش^{۲۴} ارائه شده است. همه ۹۰۰۰ نوع پرنده موجود در دنیا روش یکسانی برای مادر شدن دارند ولی فاخته مشهورترین پارازیت اولادی می‌باشد که به‌نوعی یک متخصص در زمینه فریب بی‌رحمانه می‌باشد (Rajabioun, ۲۰۱۱). در ادامه در شکل (۱) فلوجارت مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی فاخته آورده شده است. در الگوریتم ژنتیک (GA)^{۲۵} و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)^{۲۶} این آرایه‌ها با نام‌های "کروموزوم" و "موقعیت ذرات" مشخص می‌شوند. ولی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته این آرایه یا "محل سکونت"^{۲۷} نام دارند. در یک مسئله بهینه‌سازی N_{var} بعدی یک محل سکونت یک آرایه $1 \times N_{var}$ خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته‌ها را نشان می‌دهد. این آرایه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Habitat = [X_1, X_2, \dots, X_{N_{var}}] \quad (1)$$

میزان مناسب بودن (یا مقدار سود) در محل سکونت فعلی با ارزیابی تابع سود در محل سکونت طبق رابطه (۲) به‌دست می‌آید (Rajabioun, ۲۰۱۱).

$$Profit = f_p(habitat) = f_p(X_1, X_2, \dots, X_{N_{var}}) \quad (2)$$

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته دارای برتری‌های زیر نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری است که در مسائل مختلفی موردبررسی قرار گرفته‌اند (Rajabioun, ۲۰۱۱):

- ۱- همگرایی سریع‌تر
- ۲- سرعت بیشتر
- ۳- دقت بسیار بالاتر
- ۴- توانایی جستجوی محلی در کنار جستجوی کلی
- ۵- احتمال بسیار کم‌تر گیرافتادن در نقاط بهینه محلی
- ۶- جستجوی با جمعیت متغیر (به‌دلیل نابودی جمعیت در مناطق نامناسب)
- ۷- حرکت کلی جمعیت به‌سمت نقاط بهتر با از بین رفتن جواب‌های نامناسب
- ۸- توانایی حل سریع مسائل بهینه‌سازی با ابعاد بالا

25. Genetic Algorithm
26. Particle Swarm Optimization
27. Habitat

22. LINGO
23. Yang, X.S
24. Deb, S

پروژه به حداقل برسد. می توان تابع هدف مسئله را به صورت روابط (۶) و (۷) نوشت:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{T_{c-1}} (r_{t+1} - r_t)^2 \quad (6)$$

$$\text{st:} \sum_{t=1}^{T_c} r_t = R \quad (7)$$

۴-۲- مدل سازی مسئله در حالت چند پروژه ای و چند

منبعی

تابع هدف مسئله در این حالت را می توان به صورت روابط (۸) تا (۱۱) بیان نمود که در این مدل، $r_{t_{ij}}$ سطح منبع لازم برای اجرای فعالیت ij در تاریخ t ، r_t^k تعداد منبع لازم از نوع k ام در تاریخ t ، P تعداد پروژه ها و Q تعداد کل منابع موجود در سازمان پروژه می باشد (نوری و همکاران، ۱۳۸۹).

$$\begin{aligned} Z = \text{Min} \sum_{t=1}^{T_{c1}} \left(\sum_{ij} (r_{t_{ij}}^1)^2 \right. \\ \left. + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^2)^2 + \dots + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^n)^2 \right) \\ + \sum_{t=1}^{T_{c2}} \left(\sum_{ij} (r_{t_{ij}}^1)^2 \right. \\ \left. + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^2)^2 + \dots + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^n)^2 \right) \\ + \dots \\ + \sum_{t=1}^{T_{cn}} \left(\sum_{ij} (r_{t_{ij}}^1)^2 \right. \\ \left. + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^2)^2 + \dots + \sum_{ij} (r_{t_{ij}}^n)^2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{st:} \sum_{t=1}^{T_{c1}} r_t^1 = R_1; \sum_{t=1}^{T_{c1}} r_t^2 = R_2; \dots; \sum_{t=1}^{T_{c1}} r_t^n \\ = R_n; \sum_{t=1}^{T_{c2}} r_t^1 = R_1; \sum_{t=1}^{T_{c2}} r_t^2 \\ = R_2; \dots; \sum_{t=1}^{T_{c2}} r_t^n \\ = R_n; \dots; \sum_{t=1}^{T_{cn}} r_t^1 = R_n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^p R_i = Q \quad (10)$$

$$r_{t_{ij}} \geq 0 \quad (11)$$

بعدی هیچ تأخیر زمانی وجود ندارد، به عبارتی هر فعالیت بلافاصله پس از ختم فعالیت پیش نیازش مجاز می باشد که آغاز شود.

✓ تعداد منابع مورد استفاده هر فعالیت در طول اجرای فعالیت ثابت است.

✓ همه پروژه ها با هم، هم پوشانی منابع دارند.

✓ پروژه ها از یکدیگر مستقل بوده و هیچ فعالیت مشترکی ندارند.

✓ نوع منابع مورد استفاده در پروژه های مختلف مشترک می باشند.

✓ منابع مورد استفاده فعالیت های پروژه ها، از نظر مقدار مصرف در هر واحد زمانی هیچ گونه محدودیتی ندارند.

✓ منظور از منابع نیروهای انسانی و کاری پروژه می باشد و ماشین آلات به حساب نمی آیند (نوری و همکاران، ۱۳۸۹).

۴- مدل سازی مسئله

۴-۱- مدل سازی مسئله در حالت تک پروژه ای

در تسطیح منابع فرض بر آن است که منابع در دسترس نامحدود می باشد و هدف به حداقل رساندن نوسانات منابع در طول زمان است. در حالت ایده آل پروژه باید به نحوی برنامه ریزی گردد که به جای وجود تغییرات و نوسان منبع مورد نیاز در طول اجرای پروژه، تعداد نفرات لازم به صورت یکنواخت باشند. متوسط نفرات لازم در هر روز برای اجرای پروژه از طریق رابطه (۳) محاسبه می گردد که در این رابطه، r_t سطح منبع مورد نیاز در تاریخ t ، T_c زمان تکمیل پروژه و R حجم کل منبع می باشد.

$$r = \frac{R}{T_c} = \frac{\sum r_t}{T_c} \quad (3)$$

$$R = \sum_{t=1}^{T_c} r_t \quad (4)$$

برنامه ریزی پروژه به نحوی که میزان احتیاجات به هر منبع در طول اجرای پروژه دقیقاً ثابت و یکنواخت باشد به علت وجود محدودیت های زیاد در اجرای پروژه امری بسیار دشوار است. لذا در مدل های تسطیح یا موازنه منابع سعی بر آن است که نوسانات در سطح احتیاجات به حداقل برسد. در حالت ایده آل رابطه (۵) به ازای تمامی مقادیر ممکن t برقرار می باشد.

$$r_{t+1} - r_t = 0 \quad (0 < t < T_c) \quad (5)$$

در عمل لازم است سعی شود رابطه مجموع مربعات تفاضل میزان احتیاج به منابع در تاریخ های مختلف در طول زمان اجرای

جدول ۲- وضعیت نیاز پنج پروژه به منبع A

پروژه	روز				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۵	۱۰	۲۰	۲	۲
۲	۸	۱۵	۱۸	۱۸	۹
۳	۸	۲۰	۱۰	۱۶	۱۳
۴	۹	۱۹	۵	۱۴	۱۲
۵	۱۰	۱۸	۴	۱۳	۱۲
۶	۱۵	۱۶	۴	۱۲	۱۲
۷	۱۵	۱۶	۴	۱۲	۱۰
۸	۲۰	۱۴	۴	۰	۸
۹	۲۱	۱۱	۳	۰	۸
۱۰	۲۳	۱۰	۱	۰	۵
۱۱	۲۰	۱۰	۰	۰	۴
۱۲	۱۸	۵	۰	۰	۱
۱۳	۱۴	۴	۰	۰	۰
۱۴	۱۳	۴	۰	۰	۰
۱۵	۰	۳	۰	۰	۰
مدت زمان تکمیل	۱۴	۱۵	۱۰	۷	۱۲

۵-۲- بررسی نتایج حاصل از حل مسئله در حالت

چندپروژه‌ای و چندمنبعی

در این قسمت مسئله در حالت چندپروژه‌ای و با در نظر گرفتن چند نوع منبع مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور مقادیر TSD به ترتیب با در نظر گرفتن نوع منبع A، B و C در حالت ۳ تا ۹ پروژه‌ای محاسبه می‌گردد. تعداد منابع هر روز به‌طور تصادفی از بازه [0,50] انتخاب و در جداول (۳) تا (۵) آورده شده‌اند. مدل این مسئله برای حالت ۹ پروژه و سه منبع ارائه شده است و سایر حالات به صورت مشابه ایجاد می‌گردد. در این حالت Max Tc=15 است و مدل کلی مسئله به صورت روابط (۳۳) و (۳۴) خواهد بود. عدد ۲۵۴/۰۲ حداکثر مقدار مصرفی از مجموع منابع برای تمام پروژه‌ها در یک روز می‌باشد. عدد ۲۲۲۲/۴۱ مجموع کل اعداد جدول (۳) منبع A و عدد ۱۹۵۳/۱۵ مجموع کل اعداد جدول (۴) منبع B و عدد ۲۱۴۴/۱۹ مجموع کل اعداد جدول (۵) منبع C است. r_t میزان احتیاج از سطح منبع A در تاریخ t ، r_t'' میزان احتیاج از سطح منبع B در تاریخ t و r_t''' میزان احتیاج از سطح منبع C در تاریخ t می‌باشد.

با فرض در نظر گرفتن مدل قبل، محدودیت ۱۲ جهت شدنی بودن مدل اضافه می‌گردد و در این رابطه، r_t^i مقدار استفاده از سطح منبع i در زمان t و R_i مقدار منبع i می‌باشد.

$$\sum_{t=1}^{MaxTc} r_t^1 = R_1, \sum_{t=1}^{MaxTc} r_t^2 = R_2 \dots \sum_{t=1}^{MaxTc} r_t^n = R_n \quad (12)$$

۵- بررسی عددی مدل ریاضی

در این بخش با استفاده از مسائل عددی به بررسی مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبلی در حالت تک و چند منبع با تک و چندپروژه پرداخته می‌شود.

(۱) هر t مختص یک پروژه به صورت مجزا تعریف می‌شود.

(۲) تمامی پروژه‌ها در هم ادغام می‌شوند و تسطیح منابع بررسی می‌گردد.

در ادامه با ارائه مسائل عددی به بررسی نتایج حاصل از حل مسئله توسط الگوریتم فاخته و روش شاخه و کران در حالت چندپروژه‌ای با در نظر گرفتن یک نوع منبع پرداخته می‌شود.

۵-۱- بررسی مسئله در حالت چندپروژه و تک منبع

در این بخش به پیاده‌سازی مدل در حالت سه و پنج پروژه‌ای با تک منبع پرداخته شده است. به دلیل مشابه بودن مدل، روابط ریاضی فقط برای حالت پنج پروژه ارائه شده است. وضعیت نیاز این ۵ پروژه از منبع A به شرح جدول (۲) می‌باشد. همچنین Max Tc=۱۵ است. عدد ۶۸ حداکثر مقدار مصرفی از مجموع منابع برای تمام پروژه‌ها در یک روز می‌باشد و عدد ۶۳۰ مجموع کل اعداد جدول (۲) است. این مدل با روش شاخه و کران حل می‌گردد. سپس TSD و زمان لازم برای رسیدن به جواب محاسبه می‌گردند. مقدار TSD بیانگر سطح تسطیح منابع در هر بار انتخاب است و مقادیر کم‌تر TSD نشان‌دهنده نزدیک بودن سطح منابع مصرفی در دو روز متوالی و لذا منابع هم‌سطح‌تر هستند. مقادیر بالای TSD نشان می‌دهد که در هر دو روز متوالی مقدار منابع با هم اختلاف زیادی دارد و این در برنامه‌ریزی منابع به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد. مدل کمینه‌سازی نوسانات کل منابع به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } z = (r_1^2 + \dots + r_{14}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{15}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{10}^2) + (r_1^2 + \dots + r_7^2) + (r_1^2 + \dots + r_{12}^2) \quad (13)$$

$$\text{s.t:} \\ r_1 + r_2 + \dots + r_{15} = 630 \quad (14) \\ 0 \leq r_t \leq 68, t = 1, \dots, 15$$

جدول ۵- منبع C در حالت نه پروژه‌های

روز پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۱۹/۹	۸/۸	۴۲/۸	۱۹/۳	۶/۲	۴۴/۷	۴۶/۷	۱۱/۳	۷/۸
۲	۲۹/۹	۳۹/۷	۴/۹	۴۶/۵	۳/۲	۹/۱	۲۳/۸	۴۷/۶	۱۲/۹
۳	۲۸/۴	۲۳/۳	۲۹/۳	۱۹/۱	۴۷/۱	۸/۷	۳۱/۷	۱۲/۶	۱۵/۸
۴	۳۰/۸	۲/۳	۳۹/۹	۲۴/۱	۲۸/۳	۲۲/۳	۳۸/۹	۱۷/۹	۴۷/۹
۵	۲۷/۸	۴۴/۰۶	۹/۷	۱۶/۸	۱۷/۵	۲/۴	۴۱/۷	۰/۹	۴/۴
۶	۳۱/۹	۱۴/۳	۵/۴	۵/۶	۲۸/۵	۸/۹	۴/۸	۱/۱۴	۳/۲
۷	۲۶/۸	۳۴/۳	۱۹/۹	۱۴/۶	۲۷/۴	۰	۲۲/۶	۱۰/۶۹	۱/۹
۸	۱۶/۸	۴۷/۵	۱۶/۸	۳۷/۴	۰	۳۳/۸	۰	۴۱/۶	۱۸/۶
۹	۲۵/۹	۳۱/۹	۲۳/۹	۲۵/۰۸	۰	۳۲/۶	۵/۲	۰	۰
۱۰	۹/۹۴	۸/۱	۳۵/۵	۲۸/۷	۰	۱/۲	۳۳/۵	۰	۰
۱۱	۱/۰۴	۱۴/۴	۰	۰	۰	۲۰/۹	۲۳/۸	۴۹/۸	۰
۱۲	۴۹/۵	۳۷/۰۸	۰	۰	۰	۲/۳	۰	۰	۰
۱۳	۳۸/۳	۱۰/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۳۶/۴	۲۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۴۲/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۳- منبع A در حالت نه پروژه‌های

روز پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۲۸/۴	۴/۶	۴۱/۵	۴۲/۲	۴۶/۰۷	۴۴/۶	۲۳/۱	۱۰/۷	۵/۶
۲	۲۸/۳	۴۲/۴	۲۴/۲	۲۱/۷	۳۷/۴	۳۱/۹	۴۱/۸	۱/۱	۱۸/۶
۳	۳۲/۲	۴۳/۴	۴۲/۱	۲۳/۰۶	۳۹/۹	۶/۱۵	۷/۹۱	۴۵/۸	۱۳/۵
۴	۲۲/۶	۲۲/۶	۱۱/۳	۳۰/۴	۷/۰۴	۱۱/۲	۱/۲۱	۷/۲۳	۲۷/۲
۵	۴۴/۸	۳۴/۹	۴۴/۴	۴/۰۷	۲۱/۱	۱/۲	۳۴/۵	۲۲/۵	۴۰/۹
۶	۳۹/۸	۳۵/۱	۴۶/۳	۳۱/۵	۲۵/۰۳	۱۰/۹	۸/۷	۴/۱۵	۳۷/۹
۷	۲۸/۴	۳/۲	۱۴/۵	۹/۰۷	۲۱/۱	۰	۱۲/۶	۱۲/۸۷	۱۰/۱۱
۸	۲/۱۵	۲۲/۷	۱۶/۶	۰	۴۳/۴	۰	۳۵/۶	۴/۵	۷/۲
۹	۵/۸	۱۰/۲	۳۲/۳	۰	۱۱/۱	۰	۳۳/۱	۵/۶۹	۰
۱۰	۲۶/۴	۲۶/۱	۱۱/۷	۰	۷/۳	۰	۲۷/۲	۲۹/۸	۰
۱۱	۳۶/۱	۱۶/۳	۰	۰	۶/۸	۰	۰/۶	۴۶/۲	۰
۱۲	۴۱/۷	۳۸/۸	۰	۰	۴۴/۳	۰	۰	۰	۰
۱۳	۴۲/۲	۴۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۲۵/۶	۱۳/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۱۸/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

$$\text{Min } z = ((r_1^2)) + \dots + r_{14}^2 + (r_1^2 + \dots + r_{14}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{14}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_{15}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{15}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{15}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_{10}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{10}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{10}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_7^2) + (r_1^2 + \dots + r_7^2) + (r_1^2 + \dots + r_7^2) + ((r_1^2 + \dots + r_{12}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{12}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{12}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_6^2) + (r_1^2 + \dots + r_6^2) + (r_1^2 + \dots + r_6^2) + ((r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + (r_1^2 + \dots + r_{11}^2) + ((r_1^2 + \dots + r_8^2) + (r_1^2 + \dots + r_8^2) + (r_1^2 + \dots + r_8^2) + (r_1^2 + \dots + r_8^2)$$

S.t.

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 + \dots + r_{15} &= 2222.41 \\ r_1' + r_2' + \dots + r_{15}' &= 1953.15 \\ r_1'' + r_2'' + \dots + r_{15}'' &= 2144.19 \\ 0 < r_t, r_t', r_t'' < 254.02, t = 1, \dots, 15 \end{aligned}$$

جدول ۴- منبع B در حالت نه پروژه‌های

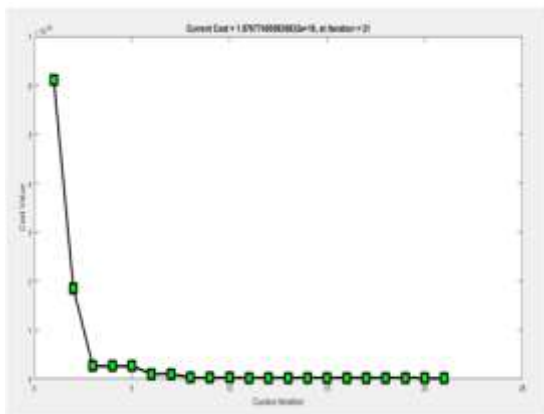
روز پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۳۲/۳	۵/۶	۲۰/۶	۱۷/۵	۴/۰۲	۹/۹۸	۱۹/۶	۲۷/۹	۵/۲
۲	۲۳/۲	۱۹/۶	۰/۶	۲/۷	۱۱/۷	۴۷/۰۶	۵/۴	۴۰/۷	۰/۹
۳	۴۵/۷	۱۷/۲	۱۳/۷	۲۵/۵	۲۵/۸	۴/۷	۶/۷۷	۱۰/۲	۱/۱
۴	۱/۵۸	۲۲/۴	۱۴/۵	۰/۲	۴۹/۷	۱۱/۶۱	۳۹/۹	۱۶/۳	۱۴/۲
۵	۳۸/۲	۴۹/۲	۲/۵	۴۳/۵	۴/۶	۲۶/۸	۹/۷۱	۳۰/۵۱	۱۹/۵
۶	۳۳/۸	۷/۳۸	۲۳/۸	۳/۸	۳۹/۳	۲/۰۷	۲۲/۴	۳۷/۲	۲۳/۶
۷	۳۱/۸	۲۰/۸	۲/۲	۳۱/۸	۳۲/۱	۰	۴۱/۶	۴۱/۸	۲۸/۹
۸	۲۸/۴	۳۸/۵	۲۴/۵	۰	۱۳/۶	۰	۹/۹	۱۳/۵	۳۳/۴
۹	۵/۵۳	۷/۸	۱۴/۷	۰	۳۶/۱	۰	۳/۶	۰/۶	۰
۱۰	۳۹/۹	۶/۲	۷/۵	۰	۳۹/۲	۰	۲۴/۱	۱۱/۲	۰
۱۱	۳۴/۶۸	۳۷/۴	۰	۰	۶/۵	۰	۳۷/۶	۱/۱	۰
۱۲	۴۰/۳	۳۱/۵	۰	۰	۱/۰۱	۰	۰	۰	۰
۱۳	۳۳/۲	۳۳/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۴۷/۴۴	۹/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۱۷/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

۶- حل مسئله تسطیح با روش شاخه و کران و الگوریتم فاخته

در این بخش مدل‌های ارائه شده با روش شاخه و کران و الگوریتم فاخته حل می‌گردند و سپس بهترین جواب، مقدار پارامتر TSD و زمان لازم برای رسیدن به جواب بررسی می‌گردند. مدل سه پروژه و یک منبع در طی ۱۰ تکرار به کمک الگوریتم فاخته

جدول ۷- مقادیر r و r' و r'' نه پروژه و سه منبع

تکرار	r	r'	r''
۱	۸۱	۲۳۴	۷۵
۲	۶۴	۲۵۴	۲۱
۳	۲۱	۱	۲۳۳
۴	۲۰۷	۵۴	۲۵۴
۵	۲۵۴	۲۳۷	۲۳۴
۶	۲۱۲	۴۲	۲۵۳
۷	۲۵۴	۳۲	۲۰۶
۸	۲۵۴	۴۹	۲۴۹
۹	۸۰	۱۷	۶۷
۱۰	۲۳۱	۲۰۴	۲۳۶
۱۱	۱۳۵	۶۰	۲۸
۱۲	۱۱	۲۰۱	۴۸
۱۳	۲۲۴	۱۰۹	۲۳۸
۱۴	۱۶۵	۲۱۸	۰
۱۵	۱۷	۲۳۷	۵



شکل ۳- نمودار همگرایی نه پروژه و سه منبع

جدول ۸- نتایج حاصل از پروژه‌ها در حالت تک و چند منبع

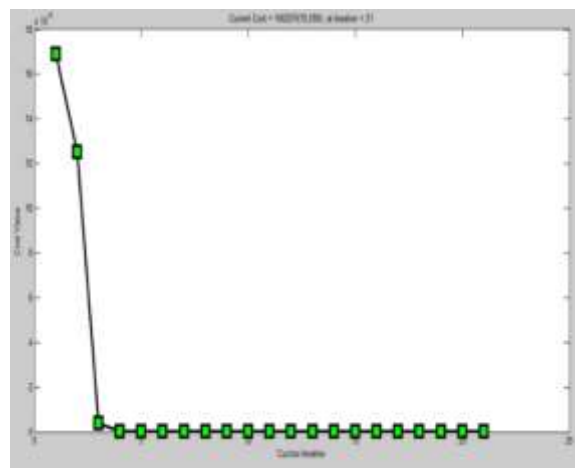
تعداد پروژه‌ها	تکرار
۳ پروژه و ۱ منبع	۴
۳ پروژه و ۲ منبع	۱۰
۳ پروژه و ۳ منبع	۱۴
۵ پروژه و ۱ منبع	۳
۵ پروژه و ۲ منبع	۹
۵ پروژه و ۳ منبع	۳۹
۷ پروژه و ۲ منبع	۶
۷ پروژه و ۳ منبع	۲۱
۹ پروژه و ۲ منبع	۱۲
۹ پروژه و ۳ منبع	۸

حل شده است. نتایج در جدول (۶) نشان داده شده است، در این جدول مقادیر r میزان منابع مصرفی در طی ۱۰ دوره مختلف می‌باشد. شایان ذکر است که شرط توقف برای الگوریتم فاخته میزان همگرایی جواب‌ها در نظر گرفته شده است. هر زمان که اختلاف مقادیر توابع هدف در تکرارهای متوالی به کم‌تر از ۰/۰۱ برسد الگوریتم متوقف می‌گردد. همان‌گونه که از جدول (۶) مشاهده می‌شود این الگوریتم نوسان نسبتاً کمی برای میزان منابع مصرفی در این ۱۰ دوره داشته است.

شکل (۲) مقدار تابع هدف مسئله است که هر قدر کم‌تر باشد مسلماً هزینه کم‌تری اعمال خواهد گردید. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید در تکرار ۴ تقریباً الگوریتم هم‌گرا می‌شود و این یک مزیت مهم به حساب می‌آید زیرا تعداد تکرارها در الگوریتم‌های فراابتکاری بسیار مهم است. در نتیجه نوسان به کم‌ترین میزان خود می‌رسد و هزینه نوسان صفر می‌گردد. همچنین شکل (۳) مقدار تابع هدف مسئله در حالت نه پروژه و سه منبع است که هر قدر کم‌تر باشند مسلماً هزینه کم‌تری اعمال خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد در تکرار ۸ تقریباً الگوریتم هم‌گرا می‌شود. در نتیجه نوسان به کم‌ترین میزان خود می‌رسد و هزینه نوسان صفر می‌شود. همچنین جدول (۷) میزان منابع مصرفی برای این حالت را نشان می‌دهد. در ادامه تمام نتایج مسائل بررسی شده در جدول (۸) ارائه شده‌اند.

جدول ۶- مقادیر r سه پروژه و یک منبع

تکرار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
r	۲۱	۲۱	۸	۲۱	۳	۱۸	۱۵	۲۱	۱۸	۱۵



شکل ۲- نمودار همگرایی سه پروژه و یک منبع

استفاده گردد. همان گونه که مشاهده می‌گردد طبق جدول (۱۱) نیز برای مسائل با ابعاد بزرگ مقدار خطا کاهش می‌یابد. محاسبه خطا طبق رابطه (۱۷) انجام می‌گردد:

$$(17) \quad \left| \text{دقیق TSD} - \text{تقریبی TSD} \right|$$

خطا	انواع پروژه‌ها
۹۰۱/۶۷۵	۳ پروژه و ۱ منبع
۷۵۶۸۳/۶۳	۳ پروژه و ۲ منبع
۱۱۴۵۳۵/۳۲	۳ پروژه و ۳ منبع
۱۸۴۶۴/۸۸۸	۵ پروژه و ۱ منبع
۱۷۳۳/۲۳	۵ پروژه و ۲ منبع
۵۳۴/۶۱	۵ پروژه و ۳ منبع
۲۹۰/۵۷	۷ پروژه و ۲ منبع
۵۷/۹۶	۷ پروژه و ۳ منبع
۱۰۹/۵۵	۹ پروژه و ۲ منبع
۱۰۲/۴۴	۹ پروژه و ۳ منبع

۷- نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله موضوع تسطیح منابع در حالت چند پروژه‌ای به کمک الگوریتم فاخته مورد بررسی قرار گرفت. این مسئله به‌عنوان یک مسئله NP-complete شناخته شده است و حل آن توسط روش‌های معمول بهینه‌ساز میسر نمی‌باشد. از این رو در این مقاله برای حل این مسئله برای اولین بار از الگوریتم فراابتکاری فاخته استفاده شد. پس از بررسی مفهوم کلی تسطیح منابع به بررسی این مسئله در حالت تک‌پروژه‌ای، چندین پروژه- یک منبع و چندین پروژه- چندین منبع پرداخته گردید که مدل ریاضی بیان شده در این پژوهش از نوع تک‌هدفه به‌منظور کاهش سطح نوسانات منابع مختلف می‌باشد. پس از ارائه مدل‌های مختلف تسطیح به حل آن‌ها با استفاده از رویکرد دقیق و رویکرد تقریبی پرداخته شده است. به‌منظور پیاده‌سازی رویکرد تقریبی از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است. براین اساس اگرچه الگوریتم بهینه‌سازی فاخته جواب کاملاً بهینه ارائه نمی‌کند ولی در مدت زمان کوتاهی به جواب مناسب می‌رسد. همچنین به‌منظور پیاده‌سازی رویکرد دقیق از روش شاخه و استفاده گردید و سپس به مقایسه زمان‌های حاصل از الگوریتم فاخته و روش شاخه و کران پرداخته شد و در نهایت خطای دو روش توسط رابطه بیان شده اندازه‌گیری گردید. نتیجه کلی نشان‌دهنده این است که در ابعاد کم استفاده از روش شاخه و کران برای مسئله تسطیح منابع بسیار بهتر است و هر قدر ابعاد مسئله گسترده‌تر گردد، مقدار TSD به‌دست‌آمده از الگوریتم فاخته به TSD به‌دست‌آمده از روش شاخه و کران نزدیک‌تر می‌گردد. بنابراین در ابعاد بزرگ استفاده از

یکی از مزایای این الگوریتم ثابت آن نسبت به ابعاد مسئله می‌باشد که با افزایش ابعاد عملکرد آن تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. باتوجه به این که الگوریتم‌های فراابتکاری جواب دقیق ایجاد نمی‌کنند، در هر بار اجرای الگوریتم یک جواب متفاوت ایجاد می‌گردد. به‌همین دلیل این الگوریتم برای ۱۰ تکرار اجرا شده است و میانگین و واریانس این تکرارها برای هر حالت محاسبه شده است. بهترین جواب، میانگین و واریانس (در ۱۰ بار تکرار برای هر مدل) مطابق جدول (۹) محاسبه شده‌اند. شایان‌ذکر است که بهترین جواب باتوجه به جنس تابع هدف، کم‌ترین مقدار آن می‌باشد.

جدول ۹- بهترین جواب، میانگین و واریانس

حالت	بهترین جواب	میانگین	واریانس
۳ پروژه و ۱ منبع	۱۶۶۲۰۷۶۷۸	۱/۳۸۸۹e+۱۱	۵/۲۴۵۷۷e+۲۲
۳ پروژه و ۲ منبع	۱۷۱۷۰۲۷۹۷۵۶۶۸	۲/۴۹۱۱۴e+۱۴	۴/۳۹۶۰۸e+۲۸
۳ پروژه و ۳ منبع	۶۱۳۹۵۸۸۰۹۵۰۴۶۷۱	۱/۹۲۲۴۳e+۱۵	۲/۵۲۳۰۷e+۳۰
۵ پروژه و ۱ منبع	۵۴۶۲۴۵۱۹۲	۶/۷۲۱۴۸e+۱۲	۱/۶۴۰۳۷e+۲۶
۵ پروژه و ۲ منبع	۱۱۶۸۹۳۰۱۰۰۷۴۰۸۲	۱/۶۵۱۵۹e+۱۵	۵/۰۰۳۶۳e+۳۰
۵ پروژه و ۳ منبع	۱۳۳۷۳۸۵۶۱۹۹۹۶۹	۱/۴۱۵۶۳e+۱۶	۵/۹۹۴۸۲e+۳۲

جدول ۱۰- مقایسه نتایج روش شاخه و کران و الگوریتم فاخته

انواع پروژه‌ها	TSD فاخته	TSD شاخه و کران	زمان فاخته (S)	زمان شاخه و کران (S)
۳ پروژه و ۱ منبع	۹۵۰	۴۸/۳۲۵	۱/۰۱۴	۰
۳ پروژه و ۲ منبع	۱۰۹۴۹۸	۳۳۸۱۴/۳۷	۱/۷۷۴	۰
۳ پروژه و ۳ منبع	۱۳۵۵۴۱	۲۱۰۰۵/۶۸	۲/۷۷۱	۰
۵ پروژه و ۱ منبع	۲۱۶۴۵	۳۱۸۰/۱۱۲	۱/۱۶۷	۰
۵ پروژه و ۲ منبع	۱۴۷۹۳	۱۳۰۵۹/۷۷	۱/۸۷۹	۲/۳۰۱
۵ پروژه و ۳ منبع	۳۱۴۷۹	۳۰۹۴۴/۳۹	۲/۰۶۰	۴/۰۵۴
۷ پروژه و ۲ منبع	۱۴۵۸۹	۱۳۸۷۹/۵۷	۵/۲۷۴	۹
۷ پروژه و ۳ منبع	۱۵۸۴۲	۱۴۷۸۴/۰۴	۶/۱۷۱	۱۳
۹ پروژه و ۲ منبع	۱۷۹۸۲	۱۶۷۷۲/۴۵	۴/۶۸۷	۱۷
۹ پروژه و ۳ منبع	۱۸۹۷۵	۱۷۴۱۲/۵۶	۵/۴۲۹	۲۱

در ادامه نتایج ایجاد شده از روش شاخه و کران در مقایسه با نتایج فاخته مورد بررسی قرار می‌گیرند و نتایج در جدول (۱۰) آورده شده است. نتایج مبین این مسئله است که در ابعاد کم استفاده از روش‌های دقیق مانند شاخه و کران برای مسئله تسطیح بسیار بهتر است و هر قدر ابعاد مسئله گسترده‌تر می‌شود مقدار TSD به‌دست‌آمده از فاخته به TSD به‌دست‌آمده از روش شاخه و کران نزدیک‌تر می‌گردد. بنابراین بهتر است از الگوریتم فاخته در حالت تسطیح چندین پروژه- چندین منبع در ابعاد گسترده

- Georgios KK, Konstantinos PA, "A simulated annealing hyperheuristic for construction resource leveling", *Construction Management and Economics*, 2010, 28 (2), 163-175.
- Guo Y, Li N, Zhang H, Ye T, "Elitist Vector Evaluated Particle Swarm Optimization for Multi-mode Resource Leveling Problems", *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8 (9), 3697-3705.
- Hu J, Flood I, "A Multi-objective Scheduling Model for Solving the Resource-constrained Project Scheduling and Resource Leveling Problems", *In Computing in Civil Engineering*, 2012, 1 (1), 49-56.
- Kastor A, Sirakoulis K, "The effectiveness of resource leveling tools for Resource Constraint Project Scheduling Problem", *International Journal of Project Management*, 2008, 6, 15-27.
- Khattab M, Soyland K, "Limited-resource allocations in construction projects", *Computers and Industrial Engineering*, 1996, 31 (1), 229-232.
- Koulinas GK, Anagnostopoulos KP, "A new tabu search-based hyperheuristic algorithm for solving construction leveling problems with limited resource availabilities", *Automation in Construction*, 2013, 31 (1), 169-175.
- Kyriklidis C, Vassiliadis V, Kirytopoulos K, "Hybrid nature-inspired intelligence for the resource leveling problem", *Operational Research*, 2014, 1 (1), 1-21.
- Leu SS, Chen AT, Yang CH, "A fuzzy optimal model for construction resource leveling scheduling", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1999, 26 (6), 673-684.
- Ponz-Tienda JL, Yepes V, Pellicer E, Moreno-Flores J, "The Resource Leveling Problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm", *Automation in Construction*, 2013, 29 (1), 161-172.
- Quintanilla S, Pérez Á, Lino P, Valls V, "Time and work generalised precedence relationships in project scheduling with pre-emption: An application to the management of Service Centers", *European Journal of Operational Research*, 2012, 219 (1), 59-72.
- Rajabioun R, "Cuckoo Optimization Algorithm, Applied Soft Computing", 2011, 1, 5508-551.
- Rayes K, ASCE M, Jun DH, "Optimization Resource Leveling in Construction Projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135 (11), 1172-1180.
- Said ME, "Resource Leveling in Construction by Optimization", *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006, 15 (2), 302-315.
- Szmerekovsky JG, Venkateshan P, "An integer programming formulation for the project scheduling problem with irregular time-cost tradeoffs", *Computers & Operations Research*, 2012, 39 (7), 1402-1410.
- Tian W, Demeulemeester E, "Railway scheduling reduces the expected project make span over roadrunner scheduling in a multi-mode project scheduling environment", *Annals of Operations Research*, 2014, 213 (1), 271-291.
- Yong DJ, Fu WZ, "Applying Ant Colony Optimization to Multiple Resource Leveling Problem", *Energy Procedia*, 2011, 13 (1), 2645-2653.
- الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بهتر می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد به- منظور تحقیقات آتی می‌توان پارامترهای موجود در مدل را به- صورت احتمالی در نظر گرفت و از الگوریتم فاخته برای حل آن‌ها استفاده کرد. همچنین می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر برای مدل‌های ریاضی ارائه شده در این مقاله استفاده کرد و نتایج را با الگوریتم فاخته مقایسه نمود.
- ### ۸- مراجع
- جولای ف، باقری م، "حل مسئله تسطیح منابع پروژه با استفاده از یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کارا"، *مهندسی صنایع و مدیریت شریف*، ۱۳۹۵، ۴۵-۳۵.
- حسین‌زاده م، افشاری ا، "تسطیح و بهینه‌سازی زمان‌بندی شبکه پروژه با در نظر گرفتن فعالیت‌های چندگانه و منابع چندگانه نامحدود با استفاده از الگوریتم فراابتکاری MOPSO"، *دومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت صنعتی*، بابلسر، ۱۳۹۶.
- خاتمی فیروزآبادی م ع، باقری م، یوسفی س، "زمان‌بندی پروژه-های ساخت با استفاده از ترکیب برنامه‌ریزی چندهدفه و بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی"، *مدیریت تولید و عملیات*، ۱۳۹۶، ۹۸-۸۳.
- خادمی زارع ح، فاطمی قمی م ت، "ارائه یک الگو برای تجزیه و ترکیب مسائل برنامه‌ریزی تولید چندمرحله‌ای-چندمحصولی و چندپربودی با محدودیت ظرفیت تولید"، *چهارمین کنفرانس ملی مهندسی صنایع*، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.
- سهرابی ب، کابران‌زاد قدیم م ر، "اهمیت مسئله مسیریابی در کاهش بهای تمام شده محصول"، *بررسی‌های حسابداری و حسابرسی*، ۱۳۸۳، ۳۵، ۷۷-۶۳.
- کابران‌زاد قدیم م ر، رفوگر آستانه ح، "طراحی یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) در مدیریت برای حل مسئله تسطیح منابع در مدیریت پروژه با رویکرد الگوریتم ژنتیک (GA)"، *مدیریت فناوری اطلاعات*، ۱۳۸۸، ۳، ۸۸-۶۹.
- نادری‌پور م، "برنامه‌ریزی و کنترل پروژه"، *سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی*، ۱۳۷۲.
- نوری س، حداد ح ر، "حل مسئله تسطیح منابع در حالت چندپروژه‌ای به کمک الگوریتم ژنتیک"، *مدیریت فردا*، ۱۳۸۹، ۲۶، ۱۷-۲۶.
- Bandelloni M, Tucci M, Rinaldi R, "Optimal resource leveling using non-serial dynamic programming", *European Journal of Operational Research*, 1994, 78, 162-177.
- Burke R, "Project Management: Planning and Control Techniques", 3rd Ed., 2004, John Wiley.
- Boctor FF, "Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling", *European Journal of O.R.*, 1990, 49, 3-13.

Younis MA, Saad B, "Optimal resource leveling of multi-resource projects", Computers and Industrial Engineering, 1996, 31 (1), 1-4.

Wang HF, Wu KY, "Hybrid genetic algorithm for models with permutation property", Computers and Operations Research, 2001, 31 (14), 2453-2471.

EXTENDED ABSTRACT

The problem of Resource Leveling in Multi-Project Mode by Cuckoo Optimization Algorithm

Elham Shadkam *

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khayyam University, Mashhad, Iran

Received: 08 March 2021; **Review:** 09 October 2021; **Accepted:** 16 October 2021

Keywords:

Resource leveling problem, Cuckoo optimization algorithm, Multi-project control, Meta-heuristic algorithms, Activity scheduling, Resource allocation.

1. Introduction

Resource leveling is very important in projects and project managers always need a schedule based on the optimal use of resources needed to complete their projects. Most resource leveling research has been done in a single project, while in many organizations several projects are done simultaneously. For this purpose, a mathematical model is presented by all projects with the aim of minimizing changes in the level of different resources. Leveling and allocating resources is one of the most basic tasks of project management. Typically, project management uses specific methods such as GERT and PERT to plan and control the project (Boctor, 1990). Because the problem of resource leveling is an NP-complete problem and it is not possible to achieve the optimal solution in the general case (Guo et al., 2012), the cuckoo optimization algorithm has been used, which is one of the newest and most efficient evolutionary optimization methods.

2. Methodology

In all previous studies, although the goal is to level the efficiency and effectiveness of more available resources and the problem has always been formulated due to the limited time of the project, but in none of the work done external factors that affect the time of activities there has been no attention. The problem of resource leveling is an NP-hard problem and it is not possible to achieve the optimal solution in the general case and to solve it approximately, innovative methods or meta-innovative methods should be used. In this paper, a solution method based on the meta-heuristic method of the cuckoo algorithm is presented, because the cuckoo algorithm, although it is an approximate method, gives us the optimal answer in a shorter time, which has not been done in the case of several projects.

3. Results and discussion

Comparison of the results obtained from problem-solving with the cuckoo algorithm, which is an approximate method with the exact branch and boundary method, indicates that it is more appropriate to use the exact method in small dimensions, and as the dimensions of the problem expand, the cuckoo algorithm It will provide the right answer more quickly.

* Corresponding Author

E-mail addresses: e.shadkam@khayyam.ac.ir (Elham Shadkam).

4. Conclusions

In this paper, the problem of leveling resources in multi-project mode using the cuckoo algorithm was investigated. This problem is known as NP-complete problem and cannot be solved by conventional optimization methods. Therefore, in this paper, to solve this problem, the cuckoo meta-heuristic algorithm was used for the first time. After examining the general concept of resource leveling, this issue was investigated in the case of a single project, several projects-one resource and several projects-several resources. After presenting different leveling models, they have been solved using a precise and approximate approach. In order to implement the approximate approach, the cuckoo optimization algorithm has been used. Accordingly, although the cuckoo optimization algorithm does not provide a completely optimal answer, but in a short time it reaches the appropriate answer. Also, in order to implement the exact approach, the branch method was used and then the times obtained from the cuckoo algorithm and the branch and boundary method were compared, and finally the error of the two methods was measured by the expressed relation. The overall result shows that in low dimensions the branch and boundary method is much better for the resource leveling problem and the wider the problem dimensions, the closer the TSD value obtained from the cuckoo algorithm to the TSD obtained from the branch and boundary method. Becomes. Therefore, in large dimensions, it is better to use the cuckoo optimization algorithm. It is suggested that for future research, the parameters in the model can be considered as probabilistic and the cuckoo algorithm can be used to solve them. Other meta-heuristic algorithms can also be used for the mathematical models presented in this paper and the results can be compared with the cuckoo algorithm.

5. References

- Boctor FF, "Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling", *European Journal of O.R.*, 1990, 49, 3-13.
- Guo Y, Li N, Zhang H, Ye T, "Elitist vector evaluated particle swarm optimization for multi-mode resource leveling problems", *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8 (9), 3697-3705.