نشریه مکانیزاسیون کشاورزی/ دوره ۸ شماره ۱/ سال ۱۴۰۲/ صفحه‌های ۱-۱۴

DOI: https://dx.doi.org/10.22034/jam.2023.16162

مروری بر الگوریتم‌های حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با در نظر گرفتن مسائل کشاورزی

کیمیا شیرینی[۱]، عادل طاهری حاجی‌وند*[۲]، سینا صمدی قره‌ورن[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۲/۲۲

۱- گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* مسئول مکاتبه E-mail: adel.taheri@yahoo.com

چکیده

پروژه‌های زمان‌بندی در کشاورزی شامل عملیات و فعالیت‌هایی است که با ترتیب معین و در یک بازه زمانی مشخص انجام می‌گیرد. چنانچه این عملیات و فعالیت‌ها به موقع انجام نشوند، به دلیل افت کمی و کیفی محصول، کاهش سنگینی در درآمد کشاورز یا واحد کشاورزی ایجاد می‌شود که این هزینه‌ها نامشهود است. از طرفی دیگر عملیات کشاورزی برای اجرا نیازمند به کارگیری منابع هستند که معمولاً محدود بوده و در صورت عدم تخصیص بهینه به فعالیت‌ها، احتمال به موقع نبودن فعالیت‌ها افزایش می‌یابد. به منظور کاستن از هزینه‌های به موقع نبودن، این پروژه‌ها نیازمند برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و مدیریت علمی و منطقی زمان و منابع هستند. این به یک مسئله استاندارد در زمینه زمان‌بندی پروژه تبدیل شده که محققان زیادی را به خود علاقه‌مند کرده است و آن‌ها از روش‌های زمان‌بندی مختلف از جمله روش‌های دقیق و روش‌های اکتشافی و فراکتشافی استفاده کرده‌اند. در نتیجه، روش‌های مختلفی از مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع اولیه توسعه یافته‌اند. این مقاله یک مرور کلی بر روش‌ها و تحقیقاتی و تحلیلی بر روش‌های موجود است که تاکنون منتشر شده است. در این مقاله به بررسی اهداف و رویکردهای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن برخی کارهای موجود در حیطه کشاورزی و همچنین به داده‌های مربوط پرداخته شده است. نتایج نشان میدهد پژوهش‌های زیادی در راستای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود انجام شده است. اما کارهایی که برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه در حوزه کشاورزی باشد بسیار کم و انگشت شمار بوده است. بنابراین، برای کارهای آینده و تحقیقات آتی می‌توان از روش‌های ارائه شده در سایر حوزه‌ها، برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در حوزه کشاورزی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی، کشاورزی، الگوریتم، محدودیت منابع، فرااکتشافی

How to cite:

Kimia Shirini, Adel Taheri Hajivand, Sina Samadi Gharehveran, N. 2023. A review on algorithms for solving the resource-constrained projects scheduling problems with considering agricultural problems. *Journal of Agricultural Mechanization* 8 (1): 1−14.

A review on algorithms for solving the resource-constrained projects scheduling problems with considering agricultural problems

Kimia Shirini[1], Adel Taheri Hajivand[*2], Sina Samadi Gharehveran[3]

1- Department of Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: March 7, 2023 Accepted: May 12, 2023

*Corresponding Author: adel.taheri@yahoo.com

Abstract

Scheduling projects in agriculture include operations and activities that are carried out in a certain order and within a certain period of time. If these operations and activities are not performed on time, due to the quantitative and qualitative decline of the product, a heavy decrease in the income of the farmer or agricultural unit will occur, and these costs are invisible. On the other hand, agricultural operations require the use of resources for implementation, which are usually limited, and if the activities are not optimally allocated, the possibility of the delay in activities will increase.. In order to reduce the costs of not being on time, these projects require planning, scheduling and scientific and logical management of time and resources. This has become a standard problem in the field of project scheduling, which has attracted many researchers and they have used different scheduling methods, including exact methods and exploratory and meta-exploratory methods. As a result, various methods of project scheduling problem with limited primary resources have been developed. This article is an overview on research methods and analysis of existing methods that have been published so far. In this article, the goals and approaches in solving the project scheduling problem have been investigated, taking into account some existing works in the field of agriculture, as well as related data.

Keywords: scheduling, agriculture, algorithm, resource constraints, meta-huristic

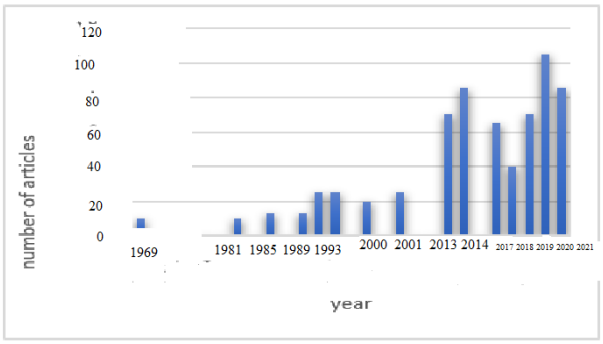
۱- مقدمه

برای رسیدن به یک برنامه منسجم که بتواند اهداف پروژه را تامین کند، می‌توان از علم برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه[1] کمک گرفت. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه که مهم‌ترین بحث این مقاله است، زیر حوزه خاصی از طرح‌ریزی پروژه[2] بوده که یکی از فرآیندهای اصلی مدیریت پروژه است. زمان‌بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه مدیریت پروژه محسوب می‌شود. مسئله زمان‌بندی پروژه شامل فعالیت‌ها، منابع، روابط پیش‌نیازی و معیارهایی برای ارزیابی کارایی است. این مسئله در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای این مسئله، می‌توان به نقش گسترده آن در حوزه مهندسی سازه و توسعه نرم‌افزار اشاره کرد. امروزه از تکنیک‌های مدیریت پروژه علاوه بر طرح‌های مختلف صنعتی، نظامی و عمرانی در طرح‌های کشاورزی نیز استفاده می‌کنند.

مدل‌های ابتدائی مدیریت پروژه، پروژه را با در نظر گرفتن منابع نامحدود حل می‌کردند، اما از آنجایی که این فرض در محیط‌های عملی غیرواقعی است، لذا تاثیر محدودیت منابع بر روی پروژه‌ها در نظر گرفته شد. در این مسئله که زمان‌بندی پروژه با منابع محدود (RCPSP)[3] نام دارد، فعالیت‌ها باید به گونه‌ای زمان‌بندی شوند که با توجه به محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی و ظرفیت منابع، زمان حاصل از پروژه حداقل شود. مدل واقعی‌تر این مسئله زمانی مطرح می‌شود که چند حالت اجرای مختلف برای هر یک از فعالیت‌ها تعریف شود. در این صورت مسئله زمان‌بندی مشخص می‌کند که حالت اجرا انتخاب و هر فعالیت در چه زمانی آغاز شود تا تعدادی از اهداف از پیش تعریف شده محقق شوند (Hartmann *et al.*, 1998) همان‌طور که اشاره شد، در حال حاضر RCPSP یک مدل قدرتمند است، با این وجود نمی‌تواند تمام فعالیت‌هایی را که در عمل رخ می‌دهد پوشش دهد. بنابراین، بسیاری از محققان مدل‌های جامع‌تری در زمان‌بندی پروژه ایجاد کرده‌اند که اغلب از استاندارد RCPSP به عنوان نقطه شروع استفاده می‌کنند. از دهه ۱۹۹۰، چندین مقاله در مورد زمان‌بندی پروژه منتشر شده است. بیشتر آن مقالات بر روی روش‌های استاندارد RCPSP تمرکز دارند (Leon *et al.*, 1995). شکل ۱ افزایش تعدد کارها و مطالعات انجام شده بر روی این مسئله را نشان می‌دهد. کتاب‌های زیمرمن و شاوینت چاپ‌شده در سال

[1] Project Scheduling
[2] Project Planning
[3] Resource Constrained Project Scheduling Problem

۲۰۱۵، شامل بیش از ۶۰ مقاله است که بسیاری از مدل‌ها و روش‌های مهم برای زمان‌بندی پروژه را پوشش می‌دهد.
هدف مقاله حاضر ارائه مدل جامع با تمرکز بر مطالعات دهه اخیر و مرور کلی از روش‌ها و الگوریتم‌ها مورد استفاده برای حل مسئله RCPSP است.



شکل۱- تعداد کارها و مطالعات انجام شده بر روی مسئله RCPSP
Fig. 1. The number of works and studies done on the RCPSP problem

طرح کلی مقاله به شرح زیر است:. بخش دوم کلیات مفهوم مسئله زمان‌بندی پروژه محدود به منابع توضیح داده می‌شود. اهداف این مسائل با انواع آن‌ها در بخش سوم خلاصه شده است. الگوریتم‌های مختلف در بخش چهارم تشریح شده‌اند. بخش پنجم به بررسی انواع داده‌های این نوع مسئله می‌پردازد. در نهایت، بخش ۶ خلاصه‌ای از چگونگی تغییر تمرکز تحقیقات در دهه گذشته در مقایسه با گذشته ارائه می‌شود.

۱-۱-اهمیت به موقع بودن عملیات کشاورزی

آمارهایی از هزینه‌ها و اثرات به موقع نبودن با پژوهش‌های مزرعه‌ای به دست آمده‌اند. طبق این پژوهش‌ها تاخیر در عملیات کشاورزی نه تنها منجر به کاهش عملکرد محصول می‌شود، بلکه بر کیفیت محصول نیز تاثیر دارد و این اثر در محصولات مختلف و ارقام مختلف محصولات متفاوت است. متخصصان صنایع غذایی دانشگاه ایالتی میشیگان اظهار کرده‌اند که هرروز تاخیر در برداشت یونجه پس از اول جون یک کاهش ۲.۵٪ در ارزش غذایی آن در پی خواهد داشت (Hartmann *et al.*, 1998). بخش کشاورزی دانشگاه کلیسمون اثر آماری مهمی در هورمون پاشی به موقع نیافتند،اما مشاهده کردند در زمان برداشت بر کیفیت و عملکرد پنبه و بازده برداشت اثر چشمگیری دارد. Lee *et al.* (1996) در پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی لازم و ضروری است که عملیات و فعالیت‌های پروژه با یک ترتیب معین در یک بازه زمانی مشخص و کوتاه انجام گیرد در غیر این صورت هزینه‌های به موقع انجام نشدن عملیات که هزینه بسیار هنگفتی می‌باشد، پیشی خواهد آمد. با توجه به اهمیت شاخص زمان جهت کاهش هزینه‌های مزبور و کاهش لنگی‌های حین کار، تکنیک‌های زمان‌بندی پروژه و مطالعه کار، به ویژه مدل‌های شبکه ای به منظور بررسی دقیق روش انجام کار، کاهش حجم کار و در نتیجه آن، کاهش زمان انجام کار، کاربرد دارند (Chen *et al.*, 2019).

۲- مسئله زمان‌بندی پروژه محدود به منابع

منابع مورد نیاز فعالیت، به کلیه امکانات و وسایلی گفته می‌شود که برای انجام آن فعالیت مورد نیاز است. اجرای هر فعالیتی منوط به تخصیص منابع مورد نیاز آن در زمان اجرا است. با توجه به محدود بودن منابع قابل دسترسی این احتمال وجود دارد که در طول اجرای پروژه در مقطعی از زمان سطح نیاز به یکسری منبع از منابع قابل دسترسی آن بالاتر باشد.

نمودار منابع و نمودار بیکاری منابع جهت استفاده از بهینه‌ترین سطح بهره‌وری و کارایی منابع در پروژه‌ها استفاده می‌شود. نمودارهای منابع، تصویر گرافیکی از میزان موجودی و تخصیص و تسطیح منابع به فعالیت‌ها و نمودار بیکاری منابع، عدم تخصیص منابع در طول زمان اجرای پروژه را نشان می‌دهند. بهترین تخصیص منابع، برای کم‌ترین سطح نمودار بیکاری است (Hartmann *et al.*, 2002). به طور کلی مسئله برنامه‌ریزی تخصیص منابع محدود از چهار مولفه تشکیل شده است:

فعالیت: کوچکترین واحد کنترل است و به قسمتی از امور پروژه گفته می‌شود که دارای زمان بوده و معمولا نیازمند منابع و هزینه است و تمام برنامه‌ریزی‌های منابع و زمان روی آن انجام می‌شود.

منابع: هر فعالیت j طی مدت d_j به اندازه r_{jk} واحد از منبع نوع k نیاز دارد ($k \in K$). منبع نوع K نیز در هر نقطه از زمان دارای یک ظرفیت محدود R_k است.

منابع پروژه از نظر محدودیت به دو دسته منابع تجدیدپذیر (کاری) و منابع تجدیدناپذیر (مصرفی) تقسیم می‌شوند. منابع تجدیدپذیر، منابعی هستند که با اتمام یک فعالیت یا بسته کاری تخصیص داده شده به آن، آزاد می‌شود و می‌توان آن‌ها را به سایر فعالیت‌ها تخصیص داد. زمان‌بندی: به طور کلی در مسئله RCPSP سه نوع مسئله زمان‌بندی می‌توان تعریف کرد:

زمان‌بندی فعال (AS): هیچ فعالیتی نمی‌تواند با نقض محدودیت‌های پیش‌نیازی فعالیت‌های دیگر شروع شود.

زمان‌بندی نیمه فعال(SAS): با مرتب کردن، فعالیت‌ها در زودترین زمان ممکن به دست می‌آید.

زمان‌بندی بدون تاخیر (NDS): با آغاز پروژه هیچ منبعی بیکار نمی‌ماند.

بین این سه زمان‌بندی، همواره رابطه زیر برقرار است:

NDS≤AS≤SAS≤Feasible Scheduling≤ Scheduling

شبکه‌ها: توالی فعالیت‌ها یا روابط وابستگی بین آن‌ها را می‌توان با روش‌های شبکه‌ای گرهی (AON[1]) یا روش‌های شبکه برداری (AOA[2]) نمایش داد.

[1] Activity On Node
[2] Activity On Ar

منابع یک محدودیت اصلی در مسئله زمان‌بندی پروژه است. در این بخش یک رابطه ریاضی از مسئله زمان‌بندی پروژه محدود به منابع ارائه داده که به آن RCPSP[۳] گفته می‌شود. RCPSP یک مسئله گسسته کلاسیک است، یعنی زمان برنامه‌ریزی به چندین دوره زمانی گسسته تقسیم می‌شود، مدت زمان فعالیت و منابع به صورت گسسته تفکیک می‌شوند و مجموعه‌ای از n فعالیت غیرقابل پیش بینی بازه‌های زمانی d_i، $i = 1, 2, \dots, n$ مفروض است. محدودیت‌های تقدم بین فعالیت‌ها به این معنی است که فعالیت‌ها باید بعد از اتمام فعالیت‌های قبلی شروع شود. فعالیت‌ها از A_0 تا A_{n+1} نام‌گذاری می‌شوند، فعالیت A_0 نشان‌دهنده فعالیت شماره یک و A_{n+1} نشان‌دهنده آخرین فعالیت است. علاوه بر این، هر فعالیت نیازمند منابع گسسته است، یعنی به گونه‌ای که تنها دسترسی موقت آن‌ها در هر لحظه محدود می‌شود. فرض کنیم R منابع محدود و k تعداد واحدهای موجود منبع $k = 1, \dots, R$ که است. علاوه بر این، تمام فعالیت‌ها و منابع در شروع پروژه در دسترس هستند. هدف RCPSP کمینه‌سازی زمان تکمیل پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع و اولویت فعالیت‌ها است. همچنین LF برای دیرترین زمان پایان فعالیت‌ها و EF برای زودترین زمان پایان فعالیت ها استفاده شده است.

$$Minimize \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} tx_{n+1,t} \qquad (۱)$$

$$subject\ to \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jt} = 1 \ \ for\ j = 0, \dots, n \qquad (۲)$$

$$\sum_{t=EF_i}^{LF_j} tx_{it} \le \sum_{t=EF_j}^{LF_j} tx_{jt} - d_j \ for\ all(A_i, A_j)$$

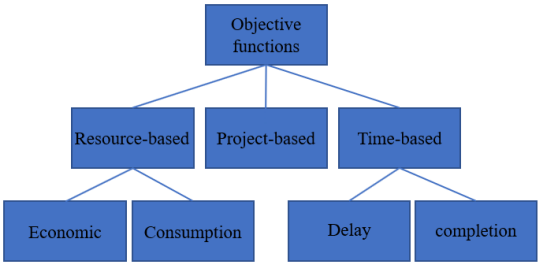
$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{q=max\{t,EF_j\}}^{min\{t+d_j-1\}LF_j} r_{jk} x_{jq} \le R_k \qquad (۴)$$
$$for\ k = 1, \dots, R\ and\ t = 1, \dots, H$$

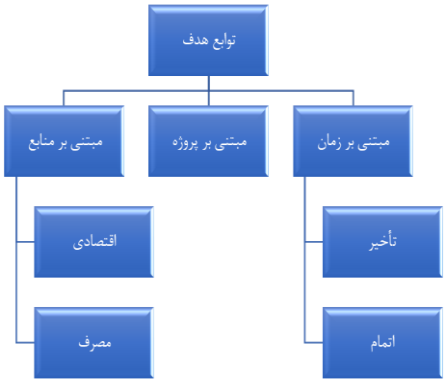
$$x_{jt} \in \{0,1\}\ for\ 0, \dots, n+1; t = EF_j, \dots, LF_j \qquad (۵)$$

در فرمول‌های ارائه شده فوق، رابطه (۱) هدف مسئله یعنی کاهش زمان تکمیل پروژه را بیان می‌کند. محدودیت (۲) اطمینان حاصل می‌کنند که هر فعالیت دقیقا یک بار کامل اجرا می‌شود. محدودیت (۳) به محدودیت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها اشاره می‌کند. مقدار در دسترس هر منبع نیز در هر بازه زمانی با محدودیت (۴) مشخص می‌شود. محدودیت (۵) بیان کننده متغیرهای تصمیم‌گیری باینری است.

۲-۱-توابع هدف

توابع هدف بر اساس سه عامل اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: منابع، پروژه‌ها و زمان. شکل ۲ طرح طبقه‌بندی پیشنهادی را نشان می‌دهد. توابع هدف بر اساس منابع، پروژه‌ها و زمان هستند.





شکل ۲- طبقه‌بندی توابع هدف RCPSP

Fig. 2. Classification of RCPSP objective functions

۲-۱-۱-توابع هدف مبتنی بر منابع

توابع هدف مبتنی بر منبع شامل دو مورد اقتصادی و مصرف است که در ادامه به بررسی کارهای انجام شده در این راستا اشاره می‌شود.

• اقتصادی: ارزش‌گذاری جنبه‌های اقتصادی در محیط‌های زمان‌بندی پروژه از موارد اساسی در این مسائل است. به همین دلیل، حداکثر کردن ارزش فعلی خالص (NPV[۱]) از اهداف مورد بررسی است.

برای مثال، زاپاتا و همکارانش (Jędrzejowicz *et al.*, 2019) به حل مسئله RCPSP با هدف حداکثر کردن ارزش فعلی خالص مورد انتظار با در نظر گرفتن محدودیت منابع پرداخته‌اند. به عبارت دیگر در این مطالعه، به کمینه‌سازی کل هزینه پروژه (TPC[۲]) پرداخته شده است که شامل هزینه‌های مربوط به استفاده، انتقال، فعالیت، ذخیره و نگهداری منابع است. در مثالی دیگر، چن (Chen *et al.*, 2014) هزینه پروژه حیاتی را به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته است که در آن فقط پروژه‌های حیاتی ارزش‌گذاری می‌شوند. (Mao *et al.*, 2009) هزینه‌های نیروی کار و کارایی متفاوت

[1] Net present value
[2] Total production cost

نیروی انسانی را به عنوان هدف اصلی مورد مطالعه قرار دادند و (Bagherpour et al., 2020) در راستای بیشینه‌سازی سود کل پروژه (TPP) به بررسی مجموع هزینه‌های ساخت و ساز مربوط به محل تاسیسات منابع پرداختند.

• مصرف: عدم استفاده از منابع زمانی رخ می‌دهد که منابع در دسترس هستند اما برای هیچ فعالیتی مورد نیاز نیستند. این می‌تواند به دلیل محدودیت‌های تقدم باشد. این جنبه تحت شرایط یکسان از طریق دو تابع هدف، یعنی کمینه‌سازی زمان بیکاری کل منابع و کمینه‌سازی منابع بیکار (IR) مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که هر دو معیار به یک هدف می‌پردازند، به این تابع هدف به عنوان کمینه‌سازی منابع بیکار اشاره می‌شود. هنگام مطالعه منابع در زمان‌بندی پروژه، ارزیابی عوامل مرتبط با موجودی منابع امری ضروری است.

۲-۱-۲- توابع هدف مبتنی بر زمان

دسته دوم از اهداف مورد مطالعه در این زمینه به زمان پروژه که می‌تواند شامل زمان تأخیر و اتمام باشد، اشاره می‌کند.

• تأخیرها: تأخیر پروژه زمانی رخ می‌دهد که زمان اتمام پروژه بیشتر از موعد مقرر باشد. تأخیر پروژه به عنوان تفاوت بین زمان مقرر و سررسید پروژه مورد نظر تعریف می‌شود، در صورتی که مدت زمان اتمام از تاریخ سررسید مورد نظر بیشتر باشد، پروژه دچار تأخیر شده است.

جدول ۱- مقالات و مطالعات انجام شده بر اساس اهداف موجود

Table 1. Articles and studies based on the existing goals

نوع تاخیر	نویسندگان و سال انتشار مقاله
Avg. pct. proj. delay (APPD)	Van Eynde & Vanhoucke (2020), Chen et al. (2019), Chakrabortty et al. (2017), Wang et al. (2017), Pérez et al. (2016), Vázquez et al. (2015), Adhau et al. (2013), Cai & Li (2012), Browning & Yassine (2010b), Krüger & Scholl (2009), Lova & Tormos (2001), Mohanty & Siddiq (1989) [18, 19, 22-28]
Avg. proj. delay (APD)	Ahmeti & Musliu (2021), Araujo et al. (2020), Gómez et al. (2019), Jedrzejowicz & Ratajczak-Ropel (2019), Shi et al. (2019), Chakrabortty et al. (2017), Geiger (2017), Joo & Chua (2017), Asta et al. (2016), Toffolo et al. (2016), Wauters et al. (2016), Gonçalves et al. (2015), Wauters et al. (2015), Singh (2014), Zheng et al. (2014), Adhau et al. (2012), Homberger (2012), Browning & Yassine (2010b), Krüger & Scholl (2009), Gonçalves et al. (2008), Lova & Tormos (2001), Tsai & Chiu (1996), Dumond (1992), Bock & Patterson (1990), Dumond & Mabert (1988), Mohanty & Siddiq (1989)[40-29,15,12]
Weighted proj. delay (WPD)	Li et al. (2021), Liu & Xu (2020), Nabipoor et al. (2020), Tian et al. (2020), Cheng et al. (2019), Li & Xu (2018), Zhu et al. (2018), Beşikci et al. (2015), Wang et al. (2015), Tasan & Gen (2013), Ju & Chen (2012), Xu & Zhang (2012), Krüger & Scholl (2010), Lee & Lei (2001), Kolisch (2000), Lawrence & Morton (1993), Kim & Schniederjans (1989), Pritsker et al. (1969) [21, 41-50]
اتمام	
Avg. perf. time (APT)	Gonçalves et al. (2015), Chen et al. (2014), Gonçalves et al. (2008), Dumond (1992), Deckro et al. (1991), Bock & Patterson (1990), Dumond & Mabert (1988), Pritsker et al. (1969) [15, 16, 20, 39, 50-53]
Makespan (M)	Davari Ardakani & Dehghani (2022), Satic et al. (2022), Ahmeti & Musliu (2021), Cui et al. (2021), Issa et al. (2021), Li et al. (2021), Zhu et al. (2021), Hauder et al. (2020), Kannimuthu et al. (2020), Tian et al. (2020) [17, 31, 33, 37, 54-57]
Weighted makespan (WM)	Xin et al. (2018), Zhu et al. (2018), Xu & Feng (2014), Hu et al. (2010), Man et al. (2008), Li & Liu (2005) [47, 58-62]

در غیر این صورت میزان تأخیر صفر است. چندین تابع هدف مرتبط با تاخیر وجود دارد. میانگین کمینه‌سازی تأخیر پروژه (APD[1]) از جمله توابع هدف پرکاربرد در این زمینه است. در این بررسی‌ها، در توابع هدف تأخیر کل برابر با میزان تأخیر متوسط پروژه درنظر گرفته می‌شود. (Gonçalves *et al*., 2005) انحراف معیار میانگین تأخیر (SDML[2]) را به عنوان یک هدف برای کمینه‌سازی تأخیرهای ایجاد شده در هر پروژه مطالعه کردند. از سایر توابع هدف مبتنی بر تأخیر می‌توان به کمینه‌سازی میانگین درصد تأخیر APPD اشاره کرد. همچنین در مطالعات ارائه شده توسط (Dehghani *et al*., 2022) با وزن‌های مختلفی برای هر پروژه براساس اهمیت آن‌ها بر زمان‌بندی

[1] Average Project Delay
[2] Standard deviation of the mean delay

وجود دارد. این وزن‌ها را می‌توان با جریمه‌های تأخیر متناسب کرد به عبارت بهتر، هر چه وزن بیشتر باشد، میزان جریمه تأخیر نیز بیشتر خواهد بود که به عنوان کمینه‌سازی تأخیر پروژه وزنی (WPD) شناخته می‌شود. مقالات (Liu *et al.*, 2020) در نظر گرفتن میانگین کمینه‌سازی زودهنگام پروژه (APE) به عنوان تابع هدف به حل این نوع مسائل پرداخته‌اند.اتمام: زمان اجرای پروژه یا makepan به عنوان زمانی تعریف می‌شود که تمام کارهای مرتبط با یک پروژه به طور کامل اجرا می‌شوند. زمان عملکرد که به عنوان زمان جریان یا زمان خروجی نیز شناخته می‌شود، به عنوان تفاوت بین زمان شروع اولین کار یک پروژه و مدت زمان ساخت پروژه تعریف می‌شود. در یک محیط پروژه واحد، به حداقل رساندن زمان عملکرد (APT) معادل کمینه‌سازی زمان ساخت است. جدول ۱ به بررسی کارهای انجام شده بر اساس اهداف موجود می‌پردازد.

۲-۱-۳-توابع هدف مبتنی بر منابع و زمان

زمان تکمیل پروژه و استفاده از منابع دو مورد از مهم‌ترین عوامل مورد مطالعه در مقالات هستند. در بخش‌های قبلی، توابع هدف مرتبط به صورت جداگانه تعریف شدند. با این وجود، در ادامه، در مورد بررسی مشترک هر دو نوع بحث خواهیم کرد.

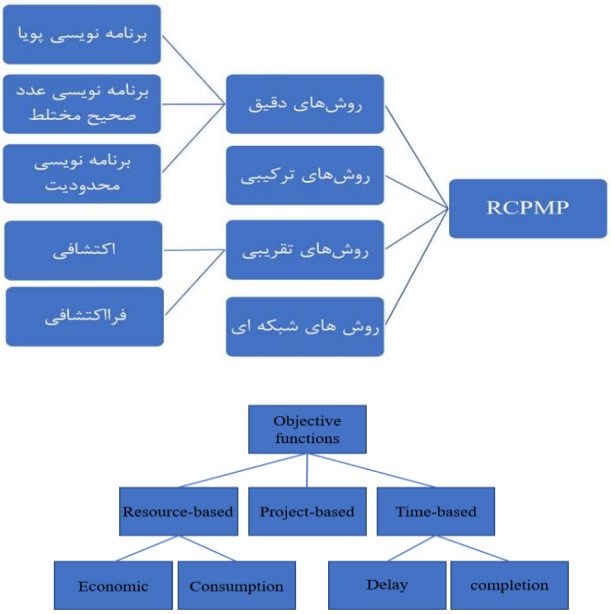
کمینه‌سازی تأخیر کل وزنی (WTD) به همراه هزینه منابع به عنوان هدف در نظر گرفته شده است. این تابع هدف توسط Vázquez *et al.* (2015) برای به حداقل رساندن مجموع منابع مورد نیاز هر پروژه ضرب در وزن تأخیر مربوطه استفاده شده است. استفاده از منابع را با اولویت اتمام به موقع پروژه مورد مطالعه قرار دادند.

۲-۱-۴- اهداف چندگانه

طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های مرتبط با RCPSP باعث می‌شود که در بسیاری از مطالعات، مسئله با در نظر گرفتن چندین هدف حل شود. توجه داشته باشید که این لزوماً به معنای رویکردهای توابع چند هدفه نیست، بلکه به معنای پیشنهاد بیش از یک هدف مستقل برای یک نوع معین است. در بسیاری از مقالات جمع آوری شده به بررسی این مسئله تنها به صورت تک هدفه پرداخته شده است، در مقابل، مطالعات بسیار کمی توابع چندهدفه را ارائه کرده‌اند.

۳- الگوریتم‌های مورد استفاده

با توجه به پیچیدگی مسئله و ظهور تکنیک‌ها و راه‌حل جدید، دامنه روش‌های ارائه شده گسترش یافته است. شکل ۳ به طبقه‌بندی الگوریتم‌های مختلف در حل مسائل RCPSP و انواع آن، شامل الگوریتم‌های دقیق، تقریبی و ترکیبی اشاره می‌کند. در دسته اول الگوریتم‌های دقیق که خود شامل برنامه‌نویسی پویا و روش شاخه و کران می‌باشند، از الگوریتم‌های مرسوم در حل مسائل زمان‌بندی هستند. در دسته دوم، الگوریتم‌های تقریبی شامل الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌باشد. در دسته سوم الگوریتم‌های ترکیبی جای دارند.همانطور که اشاره شد، مسئله RCPSP یک مسئله NP-hard است و با افزایش تعداد فعالیت‌ها و پروژه‌ها پیچیدگی مسئله افزایش پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های تقریبی می‌تواند حافظه کمتری را در مقایسه با الگوریتم‌های دقیق به خود اختصاص دهد.



شکل۳- طبقه‌بندی الگوریتم‌ها برای حل RCPSP

Fig. 3. Classification of algorithms to solve RCPSP.

روش‌های دقیق:

روش‌های دقیق، رسیدن به جواب دقیق مسئله را در هر اجرا در صورت وجود تضمین می‌کنند. اما وقتی که با مسائل با اندازه بزرگ با مجموعه محدودیت‌های زیادی در مسئله مواجه می‌شوند، ناکارآمد خواهند شد. این روش‌ها ابتدا برای حل مسئله ساده زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

روش‌های اکتشافی:

در حالیکه الگوریتم‌های قطعی رسیدن به جواب مسئله را تضمین می‌کنند، روش‌های اکتشافی اغلب جواب شبه‌بهینه یا نزدیک به بهینه را یافته و در بیش‌تر اوقات جواب‌های خوبی پیدا می‌کنند. این روش‌ها به زمان و حافظه کم‌تری نسبت به روش‌های قطعی نیاز دارند. مکاشفه‌ها در واقع به قانون‌هایی برای تصمیم درباره اینکه کدام فعالیت باید برای زمان‌بندی انتخاب شود. اشاره می‌کنند (Gonçalves *et al.*, 2005).

تالبوت درکسل و گرانوالد، کولیسچ و درکسل و بوکتور از جمله افرادی بودند که رویکرد اکتشافی را برای حل MRCPSP ارائه داده‌اند. Lawrence *et al.* (2000) روش قطعی خود را به عنوان رویکرد شمارشی هرس شده معرفی کرد که باعث ایجاد روش زمان‌بندی سریال مبتنی بر قاعده اولویت شد. درکسل و گرونوالد(۱۹۹۳)، رویکرد نمونه‌برداری تصادفی متمایل شده مبتنی بر تاثیر را پیشنهاد دادند که مشترکا از طرح تولید زمان‌بندی سریال و قانون اولویت SPT استفاده می‌کند. یک الگوریتم جستجوی محلی نیز توسط (Kolisch et.al, 1997) برای حل MRCPSP ارائه شده است.

این الگوریتم در ابتدا سعی در جواب‌های شدنی برای مسئله داشته و سپس عمل جستجو را در همسایگی افراد معتبر جمعیت اجرا می‌کند. بوکتور سه استراتژی حل برای MRCPSP بدون در نظر گرفتن منابع تجدیدناپذیر پیشنهاد داده است. اولین روش در سال ۱۹۹۳ بوده، رویکرد تک مسیره است که از طرح زمان‌بندی موازی استفاده می‌کند. در این رویکرد، فعالیت‌ها با قانون اولویت MLSK از مجموعه تصمیم انتخاب شده و در حالتی که با کوتاه‌ترین زمان، زمان‌بندی می‌شوند. در بوکتور ۱۹۹۶ تمام ترکیب‌های حالت ممکن که می‌توانند در زمان زمان‌بندی آغاز شوند، با به کارگیری حد پایین در افزایش زمان تکمیل ارزیابی می‌شوند.

روش‌های فرااکتشافی:

از آنجاکه مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود جزو مسائل NP-hard است، جواب‌های دقیق برای آن تنها با استفاده از روش‌های قطعی به دست می‌آید که این روش‌ها هم فقط برای پروژه‌های کوچک قابل استفاده است. روش‌های اکتشافی جایگزینی برای پروژه‌های بزرگ‌تر هستند که بهترین آن‌ها جواب‌های خوبی را در زمان مناسب تولید می‌کند. در این روش برخلاف روش‌های قطعی، تنها بخشی از فضای جست‌وجو که احتمال یافتن جواب در آن بیشتر است مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های فرااکتشافی آخرین نسل از روش‌های اکتشافی هستند که برای حل مسئله RCPSP مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع نیاز به جست‌وجو در حل مسائل کاربردی امری غیر قابل اجتناب و در عین حال دشوار است. به همین جهت تعداد زیادی از الگوریتم‌های جستجو با فلسفه و دامنه استفاده متفاوت و دامنه استفاده متفاوت به وجود آمده‌اند.

Mohanty *et al.* (2009) سعی کردند تا به برنامه‌ریزی برای زمان‌بندی استفاده از منابع با استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی از مراکز منابع ماشین‌آلات با در نظر گرفتن عوامل زمان، مکانی و آب و هوا پرداختند یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی فازی اصلاح شده برای ایجاد این مدل زمان‌بندی پیشنهاد شده است. یک مطالعه تجربی از یک مجموعه ماشین‌آلات کشاورزی در استان آنهویی چین نشان داده که مدل‌ها و الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی در این مطالعه می‌تواند کارایی استفاده از مراکز منابع ماشین‌آلات کشاورزی را بهبود بخشد و هزینه‌های استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی را کاهش دهد.

Wauters *et al.* (2015) به مطالعه، مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند پروژه‌ای و چند هدفه پرداختند. به عنوان یک روش حل، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط NSGA2 اتخاذ شده است. با آزمایش با مکانیسم‌های مختلف متقاطع و انتخاب والد، یک فرآیند تنظیم دقیق انجام می‌شود که در آن از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده می‌شود. به منظور بهبود کیفیت راه حل، روش پس انتشار برای پس پردازش و همچنین برای تولید جدید جمعیت پیشنهاد شده است. عملکرد الگوریتم و زمان‌های CPU گزارش شده است. علاوه بر این، روش جدیدی برای تولید نمونه‌های تست داده‌های کشاورزی چند پروژه‌ای پیشنهاد شده است و عملکرد الگوریتم از طریق نمونه‌های آزمایشی تولید شده از طریق این روش تولید داده ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش پس انتشار برای بهبود کیفیت راه‌حل موفقیت‌آمیز است

Wang *et al.* (2005) یک الگوریتم تکاملی چند هدفه به نام الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) را برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با حالت‌های عملکردی چندگانه و دو هدف برای به حداقل رساندن ساخت پروژه و استفاده از منابع پیشنهاد کرده است. راه حل با یک لیست فعالیت امکان پذیر اولویت و یک تخصیص حالت نشان داده می‌شود. یک مثال کشاورزی با دو هدف برای آزمایش عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که NSGA-II برای حل RCPSP چند هدفه کارآمد است و تقریب‌های چندگانه راه‌حل‌های بهینه پارتو را در یک اجرای الگوریتم پیدا می‌کند. جداول ۲ و ۳ مطالعاتی که به ترتیب از الگوریتم تقریبی و دقیق برای حل مسئله استفاده کرده‌اند را نشان می‌دهد.

در حال حاضر روش‌های تقریبی در حال استفاده می‌باشند ولی روش‌های دقیق به دلیل NP-hard بودن مساله کمتر مورد توجه قرار گرفتند. جدول شماره ۲ نشان دهنده محبوبیت روش‌های فرامکاشفه ای نسبت به روش‌های دقیق است.

جدول ۲- گزارش روش‌های حل تقریبی برای انواع RCPSP

Table 2. Report of approximate solution methods for RCPSP types

الگوریتم مورد استفاده	کارهای انجام شده
الگوریتم ژنتیک (GA[1])	Satic et al. (2022), Fu & Zhou (2021), Rostami & Bagherpour (2020), Van Eynde & Vanhoucke (2020), Namazian et al. (2019), Li & Xu (2018), Tian et al. (2018), Xin et al. (2018), Asta et al. (2016), Pérez et al. (2016)[12, 24, 25, 30, 38, 60, 65, 67, 71, 72]
الگوریتم‌های ترکیبی	Ahmeti & Musliu (2021), Fu & Zhou (2021), He et al. (2021), Issa et al. (2021), Van Den Eeckhout et al. (2021), Zhu et al. (2021), Liu & Xu (2020), Tian et al. (2020), Gómez et al. (2019), Liu & Lu (2019)[17, 31, 33, 37, 38, 40, 56, 73-75]
بازپخت شبیه سازی شده (SA[2])	He et al. (2021), Joo & Chua (2017), Sonmez & Uysal (2015), Chen & Shahandashti (2009), Man et al. (2008)[40, 59, 76-78]
هوش جمعی (SI[3])	Gómez et al. (2019), Tian et al. (2018), Chen & Ju (2015), Liu et al. (2014), Rokou et al. (2014), Xu & Feng (2014), Gutjahr et al. (2008), Linyi & Yan (2007)[31, 61, 72, 79-83]
جستجوی تابو (TS[4])	Ahmeti & Musliu (2021), He et al. (2021), Zhu et al. (2021), Tian et al. (2018), Zhu et al. (2018), Kolisch & Heimerl (2012) [11, 17, 37, 40, 47, 72]

جدول ۳- گزارش روش‌های راه حل دقیق برای انواعRCPSP

Table 3. Report of exact solution methods for RCPSP types

روش مورد استفاده	نویسندگان
برنامه‌نویسی محدودیت (CP[5])	Ahmeti & Musliu (2021), Hauder et al. (2020), Liu & Lu (2019) [74,55,37]
برنامه‌نویسی پویا (DP[6])	Satic et al. (2022), Wang et al. (2015), Chen et al. (2014), Confessore et al. (2007) [74,71,55,37]
برنامه‌نویسی خطی (LPb[7])	Davari Ardakani & Dehghani (2022), Cui et al. (2021), Issa et al. (2021), Li et al. (2021), Van Den Eeckhout et al. (2021), Araujo et al. (2020), Hauder et al. (2020), Rostami & Bagherpour (2020), Namazian et al. (2019), [12, 48, 54-56, 66, 67, 75, 84]

همانطور که اشاره شد الگوریتم‌های فرااکتشافی نوعی از الگوریتم‌های تقریبی برای یافتن پاسخ بهینه می‌باشند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسائل بهینه سخت کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در مقابل الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان حل کوتاه برای مسائل بهنیه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به دو دسته ابتکاری و فرااابتکاری بخش‌بندی می‌شوند. از مشکلات اصلی الگوریتم‌های اکتشافی، می‌توان به گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی و همگرایی زودرس به این نقاط اشاره کرد. الگوریتم‌های فرااکتشافی برای حل مشکلات الگوریتم‌های اکتشافی ارائه شده‌اند.

در این بخش به بررسی چند نمونه از روش‌های مختلف الگوریتم فرااکتشافی برای حل مسائل RCPSP اشاره می‌کنیم. همان‌طور که در بالا ذکر شد RCPSP به مسائل بهینه‌سازی NP-hard تعلق دارد (Issa *et al.*, 2011)، بنابراین استفاده از الگوریتم‌های دقیق زمانی که تعداد فعالیت‌ها افزایش می‌یابد باعث افزایش زمان اجرای آن می‌شود. بنابراین بسیاری از مطالعات RCPSP را با استفاده از رویکردهای فرااابتکاری حل می‌کنند. برخی از این روش‌ها را به اختصار توضیح داده می‌شود. الگوریتم ژنتیک (GA) یک تکنیک حل مسئله بر اساس ایده‌های تکاملی انتخاب طبیعی به عنوان تکامل جهانی است که با موفقیت در تعداد قابل توجهی از مسائل زمان‌بندی پروژه اعمال شده است(Hartmann *et al.*, 2007) اطلاعات در رشته‌ای به نام کروموزوم کدگذاری می‌شود. سپس الگوریتم ژنتیک تلاش می‌کند تا ارزش کروموزوم را توسط تابع fitness بهبود بخشد. الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده (SA) یک روش تقریبی برای حل مسئله بهینه‌سازی است. از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید اغلب برای تخمین «بهینه سراسری» در مسائل بهینه‌سازی که فضای جستجوی آن‌ها بزرگ است، استفاده می‌شود. این الگوریتم تلاش می‌کند تا با پارامتر دما، انرژی حرارتی سیستم را به حداقل برساند. هنگامی که انرژی حرارتی سیستم به حداقل برسد، به این معنی است که این محلول یک حالت

[1] Genetic Algorithm
[2] Simulated annealing
[3] Swarm intelligence
[4] Tabu search
[5] Constraint programming
[6] Dynamic programming
[7] Linear programming-based

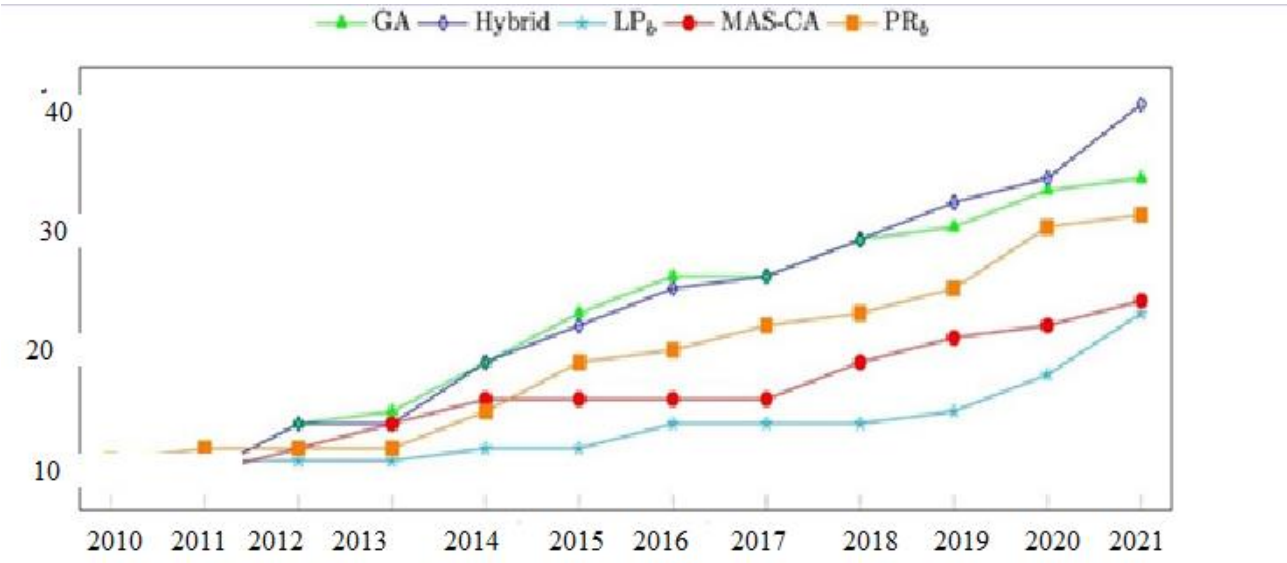
پایدار دارد و به همین ترتیب راه حل خوبی است. همچنین SA از مکانیزمی برای جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی استفاده می‌کند. مقالات زیادی به بررسی مسئله زمان‌بندی با الگوریتم SA پرداخته‌اند(Mendes *et al*., 2009). از دیگر الگوریتم‌های مرسوم در این حوزه می‌توان به جستجوی تابو اشاره کرد (Gonçalves *et al*., 2015)بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها رفتار مورچه‌ها را در یافتن غذا تقلید می‌کند. در ACO یک کلونی از مورچه‌ها بر اساس تغییر مسیرهای فرومونی به طور مکرر در طول اجرای الگوریتم راه حل می‌سازد (Vázquez *et al*., 2015). یکی دیگر از فراابتکاری که به طور گسترده برای حل مسائل زمان بندی استفاده شده است، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است (Li *et al*., 2019). در PSO دسته‌ای از ذرات فضای راه حل را جستجو می‌کنند و موقعیت یک ذره نشان دهنده یک راه‌حل برای حل مسئله است. کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) یکی از جدیدترین الگوریتم‌هایی است که کارابوگا (۲۰۰۵) با انگیزه رفتار هوشمندانه زنبورهای عسل تعریف کرده است. شکل ۴ نشان‌دهنده میزان استفاده از الگوریتم‌های به کار رفته در حل مسائل زمان‌بندی در مقالات طی ۱۰ سال اخیر است. در کاری که عبدی و همکارانش انجام دادند، به بررسی روش‌های حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پرداختند و سپس با معرفی روش تخمین توزیع به حل مسئله در مورد مطالعاتی دشت مغان پرداختند.) Zapata *et al*., 2009)

روش‌های شبکه‌ای:

Abdi *et al*. (2018) در تحقیق خود با توجه به اهمیت به موقع بودن فعالیت‌های کشاورزی، به مسئله زمان‌بندی پروژه‌های کشاورزی پرداخته است. برای حل مسئله طرح‌ریزی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی و به طبع آن تخصیص بهینه منابع، فنون شبکه‌ای PERT راه حلی مناسب به نظر می‌رسد چرا که در علوم مهندسی و مدیریت به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و نتایج درخشانی حاصل نموده است. به دلیل اهمیت ویژه تراکتور در به موقع بودن کار زراعی، در مسئله برنامه‌ریزی تخصیص منابع، تخصیص تراکتور به فعالیت‌های پروژه کشاورزی انجام شده است.در بین مسائلی که برای حل مسائل RCPSP ارائه شده است، اگرچه روش‌های دقیق، به ویژه روش برنامه‌ریزی صفر و یک، جواب بهینه را می‌دهند، اما این روش برای مسائلی که دارای کمتر از تعداد ۱۰۰ فعالیت است، مناسب می باشد. درحالی که مسئله مطرح شده در این پژوهش دارای ۱۹۰ فعالیت است. از طرفی روش‌های فراابتکاری و ترکیبی برای بهینه‌سازی مسائل کاربرد دارند. Fahimi Fard *et al*. (2009) زمان‌بندی پروژه در کشاورزی را برای تثبیت ۳۰۰هکتار باغ انگور در مرکز تحقیقات کشاورزی دانشگاه زابل مطالعه کردند. آن‌ها این مطالعه را به وسیله مدل‌های شبکه‌ای CPM و PERT انجام دادند و نتایج به دست آمده را با حالت عادی مقایسه کردند. حداقل زمان تکمیل پروژه در حالت عادی ۳۹۰روز بود، اما با استفاده از مدل شبکه های PERT این مدت زمان به ۳۶۵ روز کاهش پیدا کرد. Nabipoor *et al*. (2011) هزینه به موقع نبودن عملیات را به روش احتمال قابلیت کار متوسط بر اساس تابع قابلیت اطمینان تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ فعال در کشت و صنعت دعبل خزایی خوزستان مورد بررسی قراردادند. در این تحقیق، رابطه زمان ماموریت ماشین و هزینه به موقع نبودن در عملیات برداشت در سال دهم عمر تراکتور ها تعیین شد. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند هرچه زمان ماموریت ماشین بیشتر باشد،هزینه به موقع نبودن عملیات بیشتر است.پس بهتر است در برنامه‌ریزی جهت انجام ماموریت، ساعت‌های ماموریت ماشین کمتر در نظر گرفته شود. Chakrabortty *et al*. (2012) هزینه تاخیر در انجام عملیات خاک‌ورزی اولیه گندم آبی را در استان فارس با روش پویایی‌های سیستم مطالعه کردند.آن‌ها یکی از دلایل مهم تاخیر در انجام عملیات شخم اولیه گندم آبی را بارش‌های جوی پاییزه عنوان کردند که شرایط خاک را غیر قابل شخم می‌سازد و به منظور کاهش هزینه‌های به موقع نبودن، افزایش سرعت شخم را در دامنه‌های مجاز (مثلا۳۰٪)، افزایش ساعات کار روزانه در حد مجاز و افزایش ظرفیت مزرعه‌ای ادوات شخم به وسیله افزایش شخم و به وسیله افزایش عرض کار آنها را پیشنهاد کردند.

Sadri *et al*. (2009) برای برنامه ریزی پروژه های اکتشافی معدنی شبکه های گرت را ابزاری توانمند و مناسب معرفی می کنند. به دلیل اینکه در یک پروژه اکتشافی معدنی فعالیت‌های متعددی پیش روی ما قرار دارند. این فعالیت‌ها با توجه به اینکه در چه مرحله‌ای از اکتشاف هستیم چه نوع مکانی را مورد اکتشاف قرار می‌دهیم و چه اهدافی مورد نظر ماست، باید تعریف شوند. از آنجایی که پروژه‌های اکتشافی هزینه‌های زیادی را به خود اختصاص می‌دهند، داشتن برنامه زمان‌بندی درست و دقیق می‌تواند در کاهش هزینه‌های اکتشافی موثر باشد، باتوجه به ماهیت فعالیت‌ها در چنین پروژه‌هایی، شبکه‌های گرت روشی مناسب برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی آن‌هاست.

از آنجایی که اغلب امور در واحدهای تحقیق و توسعه به صورت پروژه‌های تحقیقاتی مطرح است،لذا مدیریت و کنترل نقش مهم و حیاتی در اتمام موفقیت‌آمیز و به موقع پروژه‌ها دارد، برای اینکه پروژه‌های تحقیق و توسعه از یک سری فعالیت‌های ساخت نایافته (غیر تکراری) تشکیل شده‌اند و خیلی از فعالیت‌ها حالت احتمالی دارند، تکنیک گرت به عنوان ابزاری تخصصی جهت زمان‌بندی و کنترل پروژه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شود (Fadzipour *et al*., 2012)



شکل ۴- میزان استفاده از الگوریتم‌های به کار رفته در حل مسائل زمان‌بندی از سال ۲۰۱۰

Fig. 4. The amount of use of algorithms used in solving scheduling problems since 2010

الگوریتم‌های تقریبی و ترکیبی بیشترین استفاده را در مقالات برای حل RCPSP دارند. این می‌تواند به دلیل سطح بالای پیچیدگی مسئله باشد. الگوریتم‌های مبتنی بر برنامه‌نویسی خطی پرکاربردترین الگوریتم‌های دقیق هستند.

۴- داده‌های مورد استفاده

در ابتدای مطالعه RCPSP، هیچ مجموعه نمونه‌ای برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی وجود نداشت و بیشتر محققان با استفاده از داده‌های تولید شده مسئله را اعتبارسنجی می‌کردند. به دلیل تعداد زیاد ویژگی‌های پیشنهادی و کمبود مجموعه نمونه‌ها برای حل مسائل، این عمل همچنان در تحقیقات اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Kolisch & Sprecher (1997) یک کتابخانه مسئله زمان‌بندی پروژه (PSPLib) برای مطالعه RCPSP پیشنهاد کردند (Kolisch *et al.*, 1997) پس از آن، بسیاری از مطالعات صورت‌گرفته از این داده‌ها بهره برده‌اند. علاوه بر این، چندین کار بر روی نمونه‌های واقعی انجام شد. که نشان دهنده اهمیت این مسئله در بخش صنعت است. اولین و شناخته‌شده‌ترین مجموعه نمونه‌ها، کتابخانه مسائل زمان‌بندی (MPSPLIb) است که توسط Homberger (۲۰۰۷) به طور خاص برای RCPSP غیرمتمرکز با منابع محلی ارائه شده است (Fadzipour *et al.*, 2007) بعدها، این کتابخانه توسط Homberger (۲۰۱۲) گسترش یافت و ۶۰ نمونه جدید اضافه کرد که تفاوت‌هایی را از نظر دسترسی پروژه به منابع محلی نشان می‌دهد. MPSPLIb امکان ارزیابی آنلاین راه‌حل‌های پیشنهادی را فراهم می‌کند و توابع هدف مختلفی را ارائه می‌دهد. یک مجموعه معیار به نام کتابخانه مسئله زمان‌بندی چند پروژه با محدودیت منابع (RCMPSPLIB) توسط پرز و پوسادا ایجاد شد.

جدول ۵- داده‌های مورد استفاده در مقالات

Table 5.The data used in the articles

داده‌ها	نویسندگان
داده‌های تولیدی	Davari Ardakani & Dehghani (2022), Satic et al. (2022), Issa et al. (2021), Li et al. (2021), Van Den Eeckhout et al. (2021), Zhu et al. (2021), Araujo et al. (2020), Hauder et al. (2020), Kannimuthu et al. (2020), Nabipoor et al. (2020), Rostami & Bagherpour (2020), Tian et al. (2020), Van Eynde & Vanhoucke (2020), [17, 25, 33, 48, 55, 56, 66, 71, 75, 84]
داده‌های واقعی	Cui et al. (2021), Kannimuthu et al. (2020), Tian et al. (2020), Song et al. (2018), Tian et al. (2018), Xin et al. (2018), Zhang & Chen (2018), Joo & Chua (2017), Gholizadeh-Tayyar et al. (2016), Gutjahr et al. (2008),[33, 35, 54, 57, 60, 72, 77, 80, 100-102]
داده‌های MPSPLib	Fu & Zhou (2021), Liu & Xu (2020), Gómez et al. (2019), Jedrzejowicz & Ratajczak-Ropel (2019), Villafáñez et al. (2019), Li & Xu (2018), Pérez et al. (2016), Wauters et al. (2015), Zheng et al. (2014), Adhau et al. (2013), Adhau et al. (2012), Homberger (2012), Homberger (2007) [22, 24, 29-31, 34, 36, 38, 73, 99, 103-105]
داده‌های MISTA-2013	Ahmeti & Musliu (2021), Geiger (2017), Asta et al. (2016), Toffolo et al. (2016), Wauters et al. (2016) [37, 65, 106-108]

۵- نتیجه گیری

این مقاله مروری بر روش‌های حل مسئله RCPSP که یک مسئله NP-hard است پرداخته است. به تجزیه و تحلیل مسئله از نظر توابع هدف، روش‌های راه‌حل پیشنهادی و داده‌ها ارائه می‌کند. در دهه گذشته رشد قابل‌توجهی در مطالعات مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود صورت گرفته است. توابع هدف مختلف شامل زمان، منابع و توابع چند هدفه مورد بررسی قرار گرفته شده است. از سوی دیگر، توابع هدف مبتنی بر زمان و منابع بیشترین مطالعه را داشتند، به‌ویژه با به حداقل رساندن زمان اجرای پروژه، متوسط تأخیر پروژه و هزینه کل پروژه غالب‌ترین اهداف بودند. علاوه بر این، الگوریتم‌های تقریبی بیشترین استفاده را برای حل مسائل مربوط به RCPSP داشتند که الگوریتم ژنتیک از مرسوم‌ترین آن‌ها بوده است. در هیچ یک از کارهای انجام شده هیچ رقابتی بین اهداف در حالت چندهدفه وجود نداشته است. و تنها با اشاره به وزن‌دهی به اهداف با استفاده از الگوریتم weighted sum method به حل مسئله پرداخته‌اند. بنابراین، در کارهای آینده می‌توان با ایجاد رقابتی بین اهداف و استفاده از الگوریتم‌های فرااکتشافی چندهدفه‌ای به حل این مساله پرداخت.

همان‌طور که اشاره شد، پژوهش‌های زیادی در راستای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود انجام شده است. اما کارهایی که برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه در حوزه کشاورزی باشد بسیار کم و انگشت شمار بوده است. بنابراین، برای کارهای آینده و تحقیقات آتی می تواند از روش‌های ارائه شده در سایر حوزه‌ها، برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در حوزه کشاورزی استفاده نمود.

منابع

Adhau, S., M. Mittal, and A. Mittal, A multi-agent system for decentralized multi-project scheduling with resource transfers. International journal of production economics, 2013. 146(2): p. 646-661.

Adhau, S., M.L. Mittal, and A. Mittal, A multi-agent system for distributed multi-project scheduling: An auction-based negotiation approach. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012. 25(8): p. 1738-1751.

Adhau, S.R. and M.L. Mittal, A multi-agent based approach for dynamic multi-project scheduling. International Journal of Advanced Operations Management ICOREM, 2011. 3(3-4): p. 230-238.

Ahmeti, A. and N. Musliu. Hybridizing constraint programming and meta-heuristics for multi-mode resource-constrained multiple projects scheduling problem. in Proceedings of the 13th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling-PATAT. 2021.

Amirian, H. and R. Sahraeian, Solving a grey project selection scheduling using a simulated shuffled frog leaping algorithm. Computers & Industrial Engineering, 2017. 107: p. 141-149.

Araujo, J.A., et al., Strong bounds for resource constrained project scheduling: Preprocessing and cutting planes. Computers & Operations Research, 2020. 113: p. 104782.

Asta, S., et al., Combining Monte-Carlo and hyper-heuristic methods for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem. Information Sciences, 2016. 373: p. 476-498.

Beşikci, U., Ü. Bilge, and G. Ulusoy, Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem. European Journal of Operational Research, 2015. 240(1): p. 22-31.

Bock, D.B. and J.H. Patterson, A comparison of due date setting, resource assignment, and job preemption heuristics for the multiproject scheduling problem. Decision Sciences, 1990. 21(2): p. 387-402.

Boctor, F.F., An adaptation of the simulated annealing algorithm for solving resource-constrained project scheduling problems. 1994.

Chakrabortty, R.K., R.A. Sarker, and D.L. Essam, Resource constrained multi-project scheduling: a priority rule based evolutionary local search approach, in Intelligent and evolutionary systems. 2017, Springer. p. 75-86.

Chen, H., et al., Research on priority rules for the stochastic resource constrained multi-project scheduling problem with new project arrival. Computers & Industrial Engineering, 2019. 137: p. 106060.

Chen, J.-j., J.-l. Zhu, and D.-n. Zhang. Multi-project scheduling problem with human resources based on dynamic programming and staff time coefficient. in 2014 International Conference on Management Science & Engineering 21th Annual Conference Proceedings. 2014. IEEE.

Chen, P.-H. and S.M. Shahandashti, Hybrid of genetic algorithm and simulated annealing for multiple project scheduling with multiple resource constraints. Automation in Construction, 2009. 18(4): p. 434-443.

Chen, T. and C. Ju, Comparative analysis of swarm intelligence and heuristic priority rules for solving multi-project scheduling problem. International journal of computing science and mathematics, 2015. 6(6): p. 581-599.

Chen, V.Y., A 0–1 goal programming model for scheduling multiple maintenance projects at a copper mine. European Journal of Operational Research, 1994. 76(1): p. 176-191.

Cheng, C.-B., C.-Y. Lo, and C.-P. Chu, Solving Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem with Combinatorial Auction Mechanisms. International Journal of Information and Management Sciences, 2019. 30(2): p. 143-167.

Confessore, G., S. Giordani, and S. Rismondo, A market-based multi-agent system model for decentralized multi-project scheduling. Annals of Operations Research, 2007. 150(1): p. 115-135.

Homberger, J., A multi-agent system for the decentralized resource-constrained multi-project scheduling problem. International Transactions in Operational Research, 2007. 14(6): p. 565-589.

Hu, W., et al. Scheduling and Optimization of Multi-Project Resources Based on Cellular Automata. in 2010 International Conference on Logistics Engineering and Intelligent Transportation Systems. 2010. IEEE.

Issa, S.B., R.A. Patterson, and Y. Tu, Solving resource-constrained multi-project environment under different activity assumptions. International Journal of Production Economics, 2021. 232: p. 107936.

Jędrzejowicz, P. and E. Ratajczak-Ropel, A-team solving distributed resource-constrained multi-project scheduling problem. Vietnam Journal of Computer Science, 2019. 6(04): p. 423-437.

Joo, B. and P. Chua. Multimode resource-constrained multi-project scheduling with ad hoc activity splitting. in 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2017. IEEE.

Kannimuthu, M., et al., Comparing optimization modeling approaches for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem. Engineering, Construction and Architectural Management, 2019.

Karaboga, D., An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. 2005, Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer ….

Kim, K.W., M. Gen, and G. Yamazaki, Hybrid genetic algorithm with fuzzy logic for resource-constrained project scheduling. Applied soft computing, 2003. 2(3): p. 174-188.

Kim, S.O. and M.J. Schniederjans, Heuristic framework for the resource constrained multi-project scheduling problem. Computers & operations research, 1989. 16(6): p. 541-556.

Kohlmorgen, U., H. Schmeck, and K. Haase, Experiences with fine-grainedparallel genetic algorithms. Annals of Operations Research, 1999. 90: p. 203-219.

Kolisch, R. and A. Sprecher, PSPLIB-a project scheduling problem library: OR software-ORSEP operations research software exchange program. European journal of operational research, 1997. 96(1): p. 205-216.

Kolisch, R. and C. Heimerl, An efficient metaheuristic for integrated scheduling and staffing IT projects based on a generalized minimum cost flow network. Naval Research Logistics (NRL), 2012. 59(2): p. 111-127.

Kolisch, R., Integrated scheduling, assembly area-and part-assignment for large-scale, make-to-order assemblies. International Journal of Production Economics, 2000. 64(1-3): p. 127-141.

Krüger, D. and A. Scholl, Managing and modelling general resource transfers in (multi-) project scheduling. OR spectrum, 2010. 32(2): p. 369-394.

Küçüksayacıgil, F., Use of genetic algorithms in multi-objective multi-project resource constrained project scheduling. 2014.

Lawrence, S.R. and T.E. Morton, Resource-constrained multi-project scheduling with tardy costs: Comparing myopic, bottleneck, and resource pricing

Cui, L., et al., A variable neighborhood search approach for the resource-constrained multi-project collaborative scheduling problem. Applied Soft Computing, 2021. 107: p. 107480.

Davari Ardakani, H. and A. Dehghani, Multi-objective Optimization of Multi-mode Resource-constrained Project Selection and Scheduling Problem Considering Resource Leveling and Time-varying Resource Usage. International Journal of Supply and Operations Management, 2022. 9(1): p. 34-55.

Deckro, R.F., et al., A decomposition approach to multi-project scheduling. European Journal of Operational Research, 1991. 51(1): p. 110-118.

Dumond, J. and V.A. Mabert, Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: an experimental analysis. Management Science, 1988. 34(1): p. 101-118.

Dumond, J., In a multi-resource environment, how much is enough? THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH, 1992. 30(2): p. 395-410.

Fu, F. and H. Zhou, A combined multi-agent system for distributed multi-project scheduling problems. Applied Soft Computing, 2021. 107: p. 107402.

Geiger, M.J., A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem. European Journal of Operational Research, 2017. 256(3): p. 729-741.

Gholizadeh-Tayyar, S., et al., Modeling a generalized resource constrained multi project scheduling problem integrated with a forward-backward supply chain planning. IFAC-PapersOnLine, 2016. 49(12): p. 1283-1288.

Glover, F., Tabu search—part I. ORSA Journal on computing, 1989. 1(3): p. 190-206.

Gonçalves, J.F., J.J. Mendes, and M.G. Resende, A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. European journal of operational research, 2008. 189(3): p. 1171-1190.

Gonçalves, J.F., J.J.d. Magalhães Mendes, and M.G. Resende, The basic multi-project scheduling problem, in Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 2. 2015, Springer. p. 667-683.

Gutjahr, W.J., et al., Competence-driven project portfolio selection, scheduling and staff assignment. Central European Journal of Operations Research, 2008. 16(3): p. 281-306.

Hartmann, S., A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. Naval Research Logistics (NRL), 1998. 45(7): p. 733-750.

Hartmann, S., A self-adapting genetic algorithm for project scheduling under resource constraints. Naval Research Logistics (NRL), 2002. 49(5): p. 433-448.

Hauder, V.A., et al., Resource-constrained multi-project scheduling with activity and time flexibility. Computers & Industrial Engineering, 2020. 150: p. 106857.

He, Y., Z. He, and N. Wang, Tabu search and simulated annealing for resource-constrained multi-project scheduling to minimize maximal cash flow gap. Journal of Industrial & Management Optimization, 2021. 17(5): p. 2451.

scheduling. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002. 6(4): p. 333-346.

Nabipoor Afruzi, E., A. Aghaie, and A.A. Najafi, Robust optimization for the resource-constrained multi-project scheduling problem with uncertain activity durations. Scientia Iranica, 2020. 27(1): p. 361-376.

Namazian, A., S. Haji Yakhchali, and M. Rabbani, Integrated bi-objective project selection and scheduling using Bayesian networks: A risk-based approach. Scientia Iranica, 2019. 26(6): p. 3695-3711.

Pérez, E., M. Posada, and A. Lorenzana, Taking advantage of solving the resource constrained multi-project scheduling problems using multi-modal genetic algorithms. Soft Computing, 2016. 20(5): p. 1879-1896.

Pritsker, A.A.B., L.J. Waiters, and P.M. Wolfe, Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach. Management science, 1969. 16(1): p. 93-108.

Rokou, E., M. Dermitzakis, and K. Kirytopoulos. Multi-project flexible resource profiles project scheduling with Ant Colony Optimization. in 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2014. IEEE.

Rostami, M. and M. Bagherpour, A lagrangian relaxation algorithm for facility location of resource-constrained decentralized multi-project scheduling problems. Operational Research, 2020. 20(2): p. 857-897.

Sánchez, M.G., A.F. Gil, and C. Castro. Integrating a SMT solver based local search in ant colony optimization for solving RCMPSP. in 2019 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). 2019. IEEE.

Satic, U., P. Jacko, and C. Kirkbride, Performance evaluation of scheduling policies for the dynamic and stochastic resource-constrained multi-project scheduling problem. International Journal of Production Research, 2022. 60(4): p. 1411-1423.

Shi, Y., Z. Du, and J. Li. Hierarchy Model for Distributed Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem. in Proceedings of the 2019 5th International Conference on Industrial and Business Engineering. 2019.

Song, W., et al., An agent-based simulation system for multi-project scheduling under uncertainty. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018. 86: p. 187-203.

Sonmez, R. and F. Uysal, Backward-forward hybrid genetic algorithm for resource-constrained multiproject scheduling problem. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015. 29(5): p. 04014072.

Tasan, S.O. and M. Gen, An integrated selection and scheduling for disjunctive network problems. Computers & Industrial Engineering, 2013. 65(1): p. 65-76.

Tayyar, S.G., J. Lamothe, and L. Dupont. Genetic algorithm for Generalized Resource Constrained Multi Project Scheduling Problem integrated with closed loop supply chain planning. in 2016 IEEE International heuristics. European Journal of Operational Research, 1993. 64(2): p. 168-187.

Lee, J.-K. and Y.-D. Kim, Search heuristics for resource constrained project scheduling. Journal of the Operational Research Society, 1996. 47(5): p. 678-689.

Leon, V.J. and R. Balakrishnan, Strength and adaptability of problem-space based neighborhoods for resource-constrained scheduling. Operations-Research-Spektrum, 1995. 17(2): p. 173-182.

Li, F. and Z. Xu, A multi-agent system for distributed multi-project scheduling with two-stage decomposition. PloS one, 2018. 13(10): p. e0205445.

Li, F., Z. Xu, and H. Li, A multi-agent based cooperative approach to decentralized multi-project scheduling and resource allocation. Computers & Industrial Engineering, 2021. 151: p. 106961.

Li, J. and W. Liu. A hybrid genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. in 2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. 2005. IEEE.

Linyi, D. and L. Yan. A particle swarm optimization for resource-constrained multi-project scheduling problem. in 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS 2007). 2007. IEEE.

Liu, D. and Z. Xu, A Multi-PR Heuristic for Distributed Multi-Project Scheduling With Uncertain Duration. IEEE Access, 2020. 8: p. 227780-227792.

Liu, J. and M. Lu, Robust dual-level optimization framework for resource-constrained multiproject scheduling for a prefabrication facility in construction. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019. 33(2): p. 04018067.

Liu, M., M. Shan, and J. Wu, Multiple R&D projects scheduling optimization with improved particle swarm algorithm. The Scientific World Journal, 2014. 2014.

Lo, S.-T., et al., Multiprocessor system scheduling with precedence and resource constraints using an enhanced ant colony system. Expert Systems with Applications, 2008. 34(3): p. 2071-2081.

Lova, A., C. Maroto, and P. Tormos, A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling. European journal of operational research, 2000. 127(2): p. 408-424.

Man, Z., et al. Research on multi-project scheduling problem based on hybrid genetic algorithm. in 2008 International Conference on computer science and software engineering. 2008. IEEE.

Mao, X., N. Roos, and A. Salden. Stable multi-project scheduling of airport ground handling services by heterogeneous agents. in Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1. 2009.

Mendes, J.J., J.F. Gonçalves, and M.G. Resende, A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem. Computers & operations research, 2009. 36(1): p. 92-109.

Merkle, D., M. Middendorf, and H. Schmeck, Ant colony optimization for resource-constrained project

Wauters, T., et al., The multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem. Journal of Scheduling p. 271-283.

Xin, S., et al. Optimization of resource-constrained multi-project scheduling problem based on the genetic algorithm. in 2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). 2018. IEEE.

Xu, J. and C. Feng, Multimode resource-constrained multiple project scheduling problem under fuzzy random environment and its application to a large scale hydropower construction project. The Scientific World Journal, 2014. 2014.

Xu, J. and Z. Zhang, A fuzzy random resource-constrained scheduling model with multiple projects and its application to a working procedure in a large-scale water conservancy and hydropower construction project. Journal of Scheduling, 2012. 15(2): p. 253-272.

Zapata, J.C., B.M. Hodge, and G.V. Reklaitis, The multimode resource constrained multiproject scheduling problem: Alternative formulations. AIChE Journal, 2008. 54(8): p. 2101-2119.

Zhang, H., H. Li, and C. Tam, Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling. International journal of project management, 2006. 24(1): p. 83-92.

Zhang, Z. and M. Chen, A bi-level multi-agent system model for decentralized multi-project scheduling of wind power plants. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018. 10(3): p. 035502.

Zheng, Z., et al., A critical chains based distributed multi-project scheduling approach. Neurocomputing, 2014. 143: p. 282-293.

Zhu, H., et al., Modeling and algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem based on detection and rework. Assembly Automation, 2021.

Zhu, H., Z. Lu, and X. Hu. A modified heuristic algorithm for resource constrained multi-project scheduling problem based on inspection and rework. in 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2018. IEEE.

Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2016. IEEE.

Thomas, P.R. and S. Salhi, A tabu search approach for the resource constrained project scheduling problem. Journal of heuristics, 1998. 4(2): p. 123-139.

Tian, J., X. Dong, and S. Han. Optimizing for a resource-constrained multi-project scheduling problem with planned resource unavailability. in 2018 3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018). 2018. Atlantis Press.

Tian, M., R.J. Liu, and G.J. Zhang, Solving the resource-constrained multi-project scheduling problem with an improved critical chain method. Journal of the Operational Research Society, 2020. 71(8): p. 1243-1258.

Toffolo, T.A., et al., An integer programming approach to the multimode resource-constrained multiproject scheduling problem. Journal of Scheduling, 2016. 19(3): p. 295-307.

Valls, V., F. Ballestin, and S. Quintanilla, A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. European journal of operational research, 2008. 185(2): p. 495-508.

Van Den Eeckhout, M., M. Vanhoucke, and B. Maenhout, A column generation-based diving heuristic to solve the multi-project personnel staffing problem with calendar constraints and resource sharing. Computers & Operations Research, 2021. 128: p. 105163.

Van Eynde, R. and M. Vanhoucke, Resource-constrained multi-project scheduling: benchmark datasets and decoupled scheduling. Journal of Scheduling, 2020. 23(3): p. 301-325.

Vartouni, A.M. and L.M. Khanli, A hybrid genetic algorithm and fuzzy set applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2014. 26(3): p. 1103-1112.

Vázquez, E.P., M.P. Calvo, and P.M. Ordóñez, Learning process on priority rules to solve the RCMPSP. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015. 26(1): p. 123-138.

Villafáñez, F., et al., A generic heuristic for multi-project scheduling problems with global and local resource constraints (RCMPSP). Soft Computing, 2019. 23(10): p. 3465-3479.

Wang, H., D. Lin, and M.-Q. Li. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem. in 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2005. IEEE.

Wang, X., et al., Proactive approach for stochastic RCMPSP based on multi-priority rule combinations. International Journal of Production Research, 2015. 53(4): p. 1098-1110.

Wang, Y., et al., On the performance of priority rules for the stochastic resource constrained multi-project scheduling problem. Computers & industrial engineering, 2017. 114: p. 223-234.

Wauters, T., et al., A learning-based optimization approach to multi-project scheduling. Journal of Scheduling, 2015. 18(1): p. 61-74.