فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال دهم / شماره ۳۴ / زمستان ۱۳۹۶

حل مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع چندهدفه در حالت چند مد با الگوریتم زنبورهای عسل چندهدفه

امیر صادقی (نویسنده مسؤول)
دانشکده مدیریت و حسابداری ، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ، ایران
Email: Amir_Sadeghi_ie@yahoo.com
سینا نمازی
واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
زهرا گراقاجهلو
دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
بهنام رضوان پور
واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۲۴ * تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۸

چکیده

مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، در واقع کلی ترین مساله زمان‌بندی است. مسائل زمان‌بندی کارگاهی ، جریان کارگاهی ، زمان‌بندی و سایر مسائل زمان‌بندی همگی زیر مجموعه ای از این مسئله به حساب می آیند. در این مقاله مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در حالت چند مد و روابط پیش نیازی جزئی در حالت مدل چندهدفه پیشنهاد شده است. در جهت کاربردی تر کردن بیش از پیش این مسئله مشهور اهداف مهم و کاربردی از قبیل کمینه کردن زمان اتمام پروژه و بیشینه کردن کیفیت انجام فعالیت های پروژه و کمینه کردن هزینه کل پروژه در نظر گرفته شده است. پس از اعتبار دهی مدل با استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل به حل این مدل چند هدفه پیشنهادی، پرداخته شده است و نتایج عملکرد، با الگوریتم NSGA-II مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی عملکرد مناسبی در حل این گونه مسائل داشته است.

کلمات کلیدی: زمانبندی پروژه ، محدودیت منابع، چندهدفه،RCPSP، الگوریتم MOBEE، الگوریتم NSGA-II.

۱- مقدمه

مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، در واقع کلی‌ترین مساله زمان‌بندی است. مسائل زمان‌بندی کارگاهی، جریان کارگاهی، زمان‌بندی و سایر مسائل زمان‌بندی همگی زیر مجموعه ای از این مسئله به حساب می آیند (Brucker,1999) (Sprecher,1997). زمان‌بندی پروژه یکی از وظایف اصلی و فعالیت‌های اصلی در مدیریت پروژه است. وجود محدودیت منابع و همچنین روابط پیش نیازی بین فعالیت‌ها مسئله زمان‌بندی پروژه را امری دشوار می‌سازد. در عمل نرم افزارهای خاصی برای فرآیند زمان‌بندی به کار برده می‌شود. اساس این نرم افزارها یک مدل رسمی است که اجازه می‌دهد که پروژه واقعی تنها با یک مجموعه از محدودیت‌های زمان‌بندی و یک تابع هدف توصیف شود(Abbasi, 2006).

برای زمان‌بندی پروژه‌ها به طور کلی از دو حالت استفاده می‌شود :

در روش اول ابتدا برنامه زمان‌بندی فقط با در نظر گرفتن روابط پیش نیازی تعیین شده (با روش CPM/PERT) ایجاد شده، سپس با وارد کردن منابع، میزان مصرف منابع در دوره‌های زمانی و نحوه توزیع آنها در طول برنامه بدست می‌آید. با توجه به این اطلاعات اقدام به تامین منابع یا برون‌سپاری کارها با هدف تحقق برنامه صورت می‌گیرد. در صورت وجود محدودیت در سطوح منابع اقدام به تسطیح منابع می‌گردد. تسطیح منابع ممکن است منجر به طولانی شدن زمان پروژه گردد. در این روش زمان‌بندی بهینه نیست اما قابل قبول است ولی به علت سهولت محاسباتی این روش بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و نرم افزارهای تجاری، این روش را پوشش می‌دهند. در روش دوم زمان‌بندی، در واقع تعیین برنامه با توجه همزمان به پیش نیازها و سطح منابع صورت می‌گیرد. در واقع محاسبات شبکه بر ارضاء محدودیت‌های منابع اولویت ندارد بلکه به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند. در این روش هدف در اغلب اوقات حداقل کردن زمان اتمام پروژه است. تک هدفه بودن از کاستی‌های مطالعات انجام گرفته درباره این مدل‌ها می‌باشد. مدل‌هایی که برای تهیه زمان‌بندی به روش دوم توسعه داده شده‌اند در ادبیات RCPSP مشهور هستند.در جدول زیر روند توسعه مدل RCPSP نمایش داده شده است :

جدول شماره (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 فعالیت ها	Kaplan
۱۹۹۳	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Alvarez
۱۹۹۷	روش CCM	Goldratt
۱۹۹۸	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Mingozzi
۱۹۹۸	طبقه بندی مدلهای RCPSP	Brucker
۲۰۰۰	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	Klein
۲۰۰۰-۲۰۱۶	استفاده از روش‌های حل مختلف برای مسائل گوناگون RCPSP	محققین مختلف

در جدول زیر پایان نامه های اخیر انجام پذیرفته در این زمینه در داخل کشور آورده شده است:

جدول شماره (۲): مروری بر پایان نامه های انجام شده در حوزه RCPSP

ردیف	نام پایان نامه	دانشگاه	سال
۱	الگوریتمی جهت کاربرد تئوری محدودیت ها در زمانبندی پروژه	دانشگاه تربیت مدرس	۱۳۷۷
۲	ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم PSO برای حل مساله زمانبندی پروژه های چندهدفه با منابع محدود	دانشگاه بوعلی سینا	۱۳۸۸

۳	طراحی یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مسئله زمانبندی پروژه ها با فعالیت های چند حالته تحت محدودیت منابع	دانشگاه تربیت مدرس	۱۳۹۰
۴	زمان بندی پروژه با منابع محدود با اهداف چندگانه زمان تکمیل، نیرومندی و NPV با استفاده از روش فراابتکاریMOPSO	دانشگاه بوعلی سینا	۱۳۹۰

زمان‌بندی پروژه با در نظرگرفتن محدودیت منابع(RCPSP) عبارت است از زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه با توجه به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع. مسئله RCPSP شامل یک پروژه با J فعالیت است که بصورت $j = 1,...,J$ نمایش داده می‌شوند. زمان انجام هر فعالیت j با D_j نمایش داده می‌شود. هر فعالیت فقط یکبار می‌تواند شروع شود، و فعالیت می‌تواند قابل انقطاع[1] باشد یا نباشد. به علت نیازهای فنی، یک سری روابط پیش نیازی[2] بین فعالیت‌ها وجود دارد که به این صورت مجموعه‌ای از روابط به صورت P_j نمایش داده می‌شود که نشان می‌دهد که یک فعالیت j امکان شروع شدن ندارد مگر در حالتی که تمامی روابط پیش نیازی و پیش نیازهایش ($i \in P_j$) کامل شده باشد. روابط پیش نیازی می‌تواند با استفاده از شبکه‌های فعالیت روی گره[3] (AON) نمایش داده شود که این با فرض غیر مدور بودن شبکه نمایش داده می‌شود. هر فعالیت یک مقدار مشخص از منابع را برای انجام و اجرا نیاز دارد.

بلازویچ و همکاران[4] (Blazewicz, 1994) نشان دادند که مسئله RCPSP از جمله مسائل NP-Hard قوی[5] است. مدل ریاضی RCPSP بوسیله پریتسکر و همکاران[6] توسعه داده شده است.

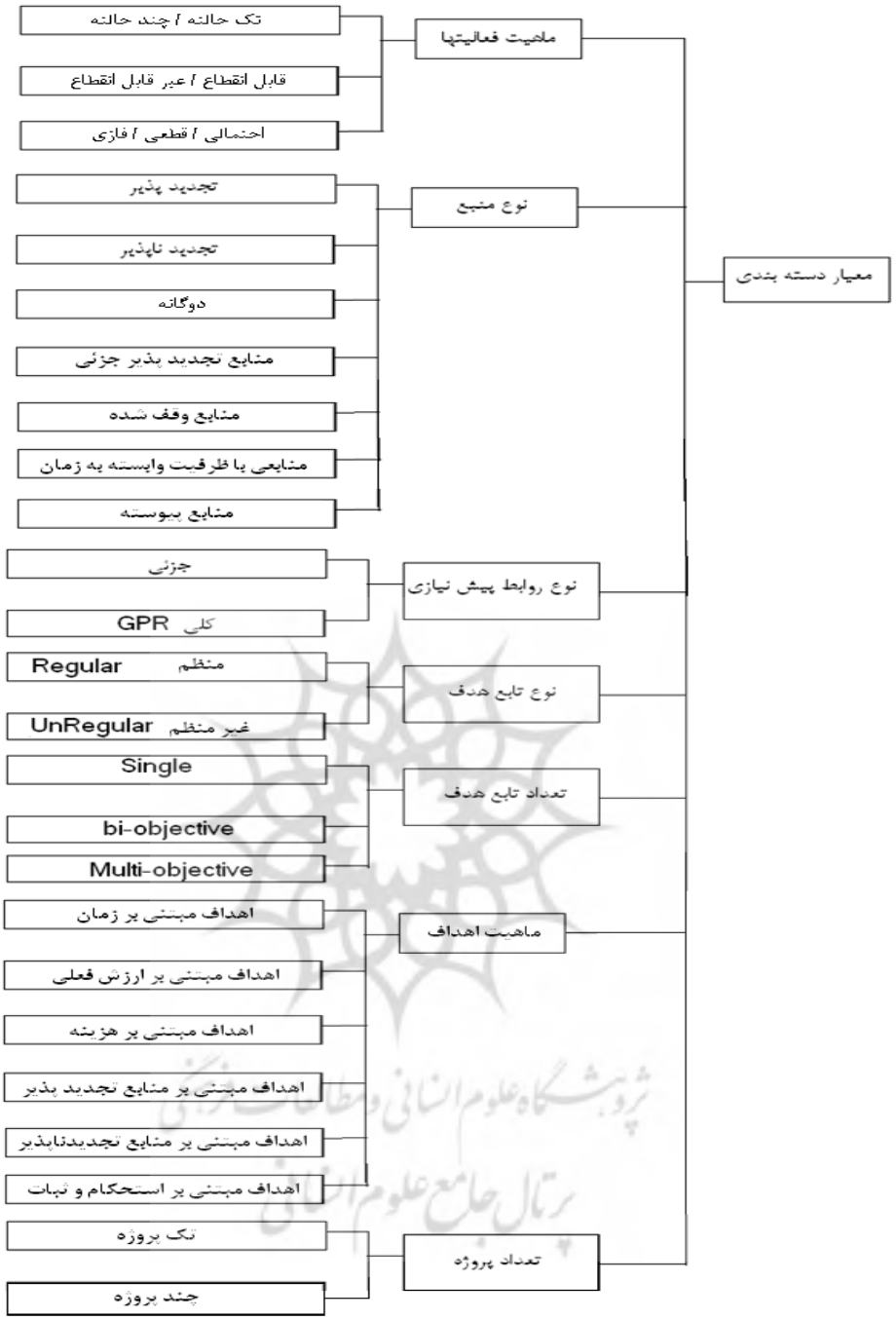
مدل استاندارد RCPSP به صورت $ps|prec|C_{max}$ نمایش داده می‌شود که به ترتیب نمایانگر مسئله زمانبندی پروژه با روابط پیش‌نیازی بین فعالیت ها و هدف کمینه کردن زمان اتمام پروژه است. با آنکه مدل RCPSP بیان شده در بالا یک مدل بسیار توانا است. اما نمی‌تواند تمامی موقعیت‌ها را در واقعیت و عمل پوشش دهد، بنابراین خیلی از محققین مدل‌های کلی بسیاری را برای مسئله زمان‌بندی پروژه توسعه داده‌اند که غالبا با یک RCPSP استاندارد به عنوان نقطه شروع کار می‌کند.
مسئله RCPSP دارای انواع گوناگونی است و در حالتهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به دسته بندی زیر اشاره کرد(Nabrzynski, 1999).

۱- بر اساس ماهیت فعالیت‌ها
۲- بر اساس منابع مورد نیاز
۳- بر اساس روابط پیش‌نیازی
۴- بر اساس نوع تابع هدف
۵- بر اساس تعداد تابع هدف
۶- بر اساس تعداد پروژه‌ها

در نمودار زیر معیارهای دسته بندی و زیر معیارها بطور کامل نشان داده شده‌اند که در ادامه بطور کامل توضیح داده خواهند شد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[1] Preemptive
[2] Precedence Relations
[3] Activity On Node
Blazewicz
[5] Strong Np-Hard
[6] Pritsker



نمودار شماره (۱): دسته بندی مسائل مختلف RCPSP

۲- مواد و روشها

با کمی دقت مشخص می گردد که در یک حالت ایده آل بهتر است بیش از یک هدف برای اجرای زمان‌بندی پروژه در عمل در نظر گرفته شود، زیرا ممکن است در نظر گرفتن فقط یک هدف برای حل این‌گونه مسائل باعث زیان‌های فراوانی در عمل و اجرا گردد. بنابراین تعدادی از محققین از مدل سازی چند هدفه در زمان‌بندی پروژه استفاده نموده اند.

نادتاسمبون و رانداها (Nudtasomboon,1997). یک رویکرد کاربردی وسیع را برای در نظر گرفتن چند هدف با ایجاد یک تابع هدف وزنی از چندین تابع هدف را در نظر گرفتند که شامل تابع‌های مختلفی از قبیل مینیمم کردن هزینه، مینیمم

کردن دیرکرد وزنی و تسطیح منابع و مصرف منابع تجدید ناپذیر است. ویت و وب[۷] [9] یک مسئله RCPSP چند حالته با اهداف مینیمم کردن هزینه، مینیمم وزن تاخیرها و مینیمم کردن هزینه‌های آماده سازی را در نظر گرفتند. در نظرگرفتن هزینه‌های آماده سازی، دسته‌بندی فعالیت‌ها را ممکن می‌کند. این مسئله در اثر یک مسئله برنامه‌ریزی تولید در یک کارخانه فولاد بوجود آمد. هاوری و آل- فاوزن [۸] (Al-Fawzan, 2007) دو هدف ماکزیمم کردن تعداد کل شناوری آزاد و مینیمم کردن زمان اتمام پروژه را در یک هدف به کار بردند. راه دیگر برای مسائل چند هدفه RCPSP گسترش یک زمان‌بندی پارتو بهینه است. داویس و همکاران [۹] (Davis, 2007) مینیمم کردن زمان اتمام پروژه و همچنین استفاده بیش از حد مجاز منابع تجدید پذیر را بررسی کردند. ویانا و دسوسا (Al-Fawzan, 2000) مینیمم کردن استفاده بیش از حد مجاز از منابع تجدید ناپذیر و وزن اصلی دیرکرد را یکی کردند. هاپک و همکاران [۱۰] (Hapke, 1998) یک رویکرد چند هدفه را به کار بردند که شامل اهدافی از نوع مبتنی بر زمان و مبتنی بر منابع و اهداف مالی بود. اسلوینسکی و همکاران[۱۱] (Slowinski, 1994) یک مسئله RCPSP چند حالته با اهداف گوناگونی شامل مینیمم کردن زمان پروژه و وزن اصلی دیرکرد تمام فعالیت‌های دارای دیرکرد و هموارسازی پروفایل منابع و وزن منابع مصرفی و ارزش فعلی را در نظر گرفتند. ورنر و همکاران[۱۲] (Dorner,2008) این سه هدف را با یک مسئله تبادل زمان [۵] هزینه در نظر گرفتند که هدف اول مینیمم کردن زمان اتمام پروژه و دومین و سومین هدف هم اهدافی از نوع هزینه‌های پولی و غیر پولی برای شکست فعالیت‌ها بودند. حالت زمان‌بندی بهینه پاراتو می‌تواند در دسته‌بندی بروکر در بخش ۷ با یک بردار از تمام توابع هدف بکار گرفته شده نمایش داده شود. وگلرز و نابرزینسکی[۱۳] (Weglarz and Nabrzynski,1999) یک رویکرد شناخته شده را برای مسئله زمان‌بندی پروژه چند حالته و یک مجموعه از زمان و هزینه‌های بحرانی در نظر گرفتند. این مقاله شامل زمان اتمام پروژه و هموارسازی سطح منابع و وزن اصلی دیرکرد و وزن اصلی جریان کار (زمانی) و مجموع و وزن مصرفی منابع و هم‌چنین ارزش فعلی بود.

برای توسعه مدل پیشنهادی توجه به مواردی که در عناوین پیشین مورد بررسی قرار گرفت، مشخص گردید مدل‌هایی که تاکنون برای این مسئله بکار گرفته شده‌اند دارای محدودیت هایی می باشند که می‌توان با توسعه این مدل‌ها به مدلی دست یافت که جامع‌تر و کاربردی‌تر گردد. لذا مدل پیشنهادی به صورتی تعریف گردیده تا محدودیت های مدل‌های قبل را پوشش دهد. در مدل پیشنهادی این پژوهش با توجه به ماهیت چند هدفه بودن این مسئله و کم توجهی به این مهم تاکنون، مدلی چندهدفه پیشنهاد شده و اهداف نیز اهدافی که بسیار مورد توجه مدیران در صنعت قرار می‌گیرند، در نظر گرفته شده است.

در مدل پیشنهادی سه هدف کمینه کردن زمان اتمام پروژه، کمینه کردن هزینه پروژه و بیشینه سازی کیفیت انجام فعالیت‌های پروژه در نظر گرفته شده‌اند. هدف اول که مشهورترین هدف در این دسته از مسائل است کمینه سازی زمان اتمام پروژه است. با کمینه کردن زمان اتمام آخرین فعالیت در پروژه می‌توان به این هدف دست پیدا کرد لذا در مدل پیشنهادی نیز این هدف بدینگونه تعریف شده است. هدف دیگر نیز که در دنیای امروز با وجود محدودیت‌های فراوان اقتصادی بسیار مطرح است همان کمینه سازی هزینه انجام پروژه است که در این تحقیق از طریق مینیمم سازی هزینه هر فعالیت در حالت انجام آن فعالیت به این هدف دست پیدا خواهد شد. هدف آخر بیشینه سازی کیفیت انجام فعالیت‌های پروژه است که این هدف نیز در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه کارفرمایان و مدیران پروژه قرار گرفته است. در این تحقیق از طریق ماکزیمم سازی میانگین هندسی کیفیت هر فعالیت به این هدف رسیده خواهد شد.برای جامع‌تر کردن مدل، در روابط بین فعالیت‌ها نیز روابط پیش نیازی کلی در نظر گرفته شده است تا مدل را بیش از پیش جامع و کاربردی سازد.حال به بیان متغیرهای تصمیم و پیش فرض‌ها و محدودیت‌های مسئله پرداخته شده است.

پیش فرض‌های مدل پیشنهادی نیز موارد زیر در نظر گرفته شده‌اند :

---

[7] Witt and Vob
[8] Haouri and Al-fawzan
[9] Davis
[10] Hapke
[11] Slowiniski
[12] Dörner
[13] Weglarz and Nabrzynski

۱- " مسئله قطعی و انجام فعالیت‌ها چند حالته (چند مد) می‌باشد"

در مدل پیشنهادی مسئله قطعی در نظر گرفته شده است و از در نظر گرفتن حالت‌های احتمالی صرفنظر شده است. لذا یکی از پیشنهادات آتی برای گسترش این مدل در نظر گرفتن حالت عدم قطعیت یا حالت فازی در مسئله پیشنهادی است. مورد دیگر در نظر گرفتن حالت چند مد برای فعالیت‌های پروژه است. همانطور که واضح است در عمل می توان یک فعالیت را به چندین روش به انجام رسانید لذا در این مدل فعالیت‌ها در حالت چند حالته (چند مد) در نظر گرفته شده‌اند.

۲- " پس از شروع هر فعالیت توقف آن مجاز نیست"

در این پژوهش حالت انقطاع برای مسئله پیشنهادی در نظر گرفته نشده است و فعالیت‌ها قابلیت شکست و انجـام در زمانهـای مختلف را دارا نیستند لذا بعد از اینکه یک فعالیت شروع گشت باید به طور پیوسته انجام گیرد تا پایان پذیرد.

۳- " ظرفیت منابع محدود و مشخص است"

در مدل پیشنهادی منابع محدود و از نوع تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر است و ظرفیت منابع در آغاز پروژه مشخص و محدود اسـت. مواردی از قبیل بودجه پروژه و... نیز در قالب منابع تجدید ناپذیر در نظر گرفته شده است.

۴- " به زمان آماده سازی برای انجام فعالیت‌ها نیازی نیست"

همانطور که در ادبیات موضوع این مسئله آورده شده است یکی از حالتهای این مسائل در نظر گرفتن زمانی برای آماده سـازی منابع برای شروع و انجام یک فعالیت پروژه است. در مدل پیشنهادی فرض شده است که هیچگونه زمان آماده سازی برای اتجام فعالیت‌های مختلف پروژه مورد نیاز نیست.

شمارنده‌های مدل پیشنهادی

i,j : معرف شماره فعالیت‌های پروژه است.

mi : معرف حالت اجرایی انجام فعالیت i ام است

ti : معرف بازه زمانی بین زودترین زمان شروع و دیرترین زمان شروع فعالیت iام ست.

k: معرف نوع منبع تجدیدپذیر یا تجدید ناپذیر

∂_k: نماد منابع تجدید ناپذیرk ام

di: مدت زمان انجام فعالیت iام

متغیر تصمیم مدل پیشنهادی

متغیر تصمیم‌گیری همان X_{imt} است که باینری است. اگر فعالیت i در حالت اجرایی m در زمان t آغاز شود مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر می‌گیرد. این متغیر به صورت زیر قابل بیان است :

$$x_{imt} \in \{0,1\} \qquad i = 1,2,...,n; \quad m = 1,2,...,M_i; \quad t = es_i,..,ls_i$$

به علت اینکه مسئله در حالت چند مد است سه شمارنده برای متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است شمارنده اول که همان i است معرف شمارنده فعالیت مربوطه است و شمارنده m نیز حالت اجرایی فعالیت i می‌باشد و در نهایت شمارنده t مربـوط به زمان شروع فعالیت i است که این زمان بین زودترین و دیرترین زمان شروع فعالیت i است.

پارامترهای مدل پیشنهادی

پارامترهای این مدل به شرح زیر است :

i:	فعالیت i
M_i :	مجموعه حالت های اجرا برای فعالیت i
A :	مجموعه فعالیت ها
q_{im} :	کیفیت انجام فعالیت i در حالت اجرایی m
Ls_i :	دیرترین زمان شروع فعالیت iام
Es_i :	زودترین زمان شروع فعالیت iام

C_{im} : هزینه انجام فعالیت i در حالت اجرایی m

E_{Fs} : مجموعه پایان-شروع روابط پیش نیازی

FS_{ij} : یک منیمم یا ماکزیمم زمان تاخیر حالت پایان ° شروع فعالیت i,j

d_{im} : زمان انجام فعالیت i در حالت اجرایی m

r_{imk} : مقدار مصرف فعالیت i در حالت اجرایی m از منبع تجدید پذیر نوع kام

α_k : سطح دسترسی منبع تجدید پذیر نوع kام در هر دوره

r^{∂}_{imk} : مقدار مصرف فعالیت i در حالت اجرایی m از منبع تجدید ناپذیر نوع kام

α^{∂}_k : سطح دسترسی منبع تجدید ناپذیر نوع kام در کل پروژه

مدل ریاضی مسئله بصورت زیر نمایش داده می شود :

$$Max\ f_1 = \left(\prod_{i \in A} \left(\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} q_{im} X_{imt} \right) \right)^{\frac{1}{|A|}}$$

$$Min\ f_2 = \sum_{t=es_n}^{ls_n} t.x_{n1t}$$

$$Min\ f_3 = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} c_{im} \times X_{imt}$$

s.t.

(۱)

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} X_{imt} = 1$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{im_i} + FS_{ij}) X_{im_i t} \le \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=es_j}^{ls_j} tx_{jm_i t} \qquad \forall\ (i,j) \in E_{fs} \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{m=1}^{M_i} r_{imk} \sum_{s=\max\{t-d_{im},es_i\}}^{\min\{t-1,ls_i\}} x_{ims} \le \alpha_k \qquad k=1,2,\dots,K\ ,\ t=1,2,\dots,T \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{m=1}^{M_i} r^{\partial}_{imk} \sum_{s=es_i}^{ls_i} x_{ims} \le \alpha^{\partial}_k \qquad k=1,2,\dots,K\ ,\ t=1,2,\dots,T \qquad (۴)$$

$$\sum_{m=1}^{M} q_{im} \sum_{t=es_i}^{ls_i} x_{imt} \ge \sigma_i \qquad i=1,\dots,n \qquad (۵)$$

$$x_{imt} \in \{0,1\} \qquad (6)$$

پیش فرض‌های مسئله

- ✓ مسئله قطعی و انجام فعالیت ها، چند حالته (چند مد) می باشد.

- ✓ پس از شروع هر فعالیت توقف آن مجاز نیست.
- ✓ مدت زمان لازم برای انجام هر فعالیت قطعی است.
- ✓ به زمان آماده سازی برای انجام فعالیت‌ها نیازی نیست.
- ✓ ظرفیت منابع محدود و مشخص است.
- ✓ هر زمان که پیش نیاز یک فعالیت انجام شده باشد، آن فعالیت قابل اجراست

توابع هدف

هدف اول کیفیت کل پروژه را ماکزیمم می‌کند. میانگین هندسی از هر کیفیت فعالیت برای اندازه گیری کیفیت کل پروژه به کار رفته است. اساسا میانگین هندسی برای مواقعی که کیفیت فعالیت ها پراکندگی دارد، بکار می‌رود.

هدف دوم زمان اتمام فعالیت آخر را مینیمم می‌کند و در نتیجه زمان اتمام پروژه نیز مینیمم می‌شود و هدف سوم همان مینیمم کردن هزینه کل پروژه است.

محدودیت‌های مختلفی در مسئله پیشنهادی وجود دارد که به موارد زیر دسته‌بندی شده‌اند:

- محدودیت‌های زمان شروع

محدودیت (۱) معین می‌کند که هر فعالیت حداکثر می‌تواند به یک حالت تنها به اجرا درآید. در واقع این محدودیت بدینگونه عمل می کند که اگر یک فعالیت دارای حالت‌های مختلف اجرایی باشد و یک حالت اجرا برای انجام فعالیت با توجه به شرایط حالت انتخاب گردد این فعالیت تنها به‌همان حالت قابل انجام است و تا پایان انجام فعالیت نیز باید بدینگونه انجام گردد و در زمان انجام قابل تبدیل به حالت‌های دیگر انجام نمی‌باشد.

- محدودیت روابط پیش نیازی

همانطور که پیش‌تر بیان شد در این مدل پیشنهادی روابط پیش‌نیازی جزئی در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت (۲) که مشهورترین محدودیت است ودر تمامی مسائل RCPSP با روابط پیش‌نیازی جزئی فقط این محدودیت پیش‌نیازی وجود دارد، محدودیت پایان به شروع می‌باشد که برای فعالیتهایی که بعد از انجام فعالیتی قادر به انجام می‌باشند.

- محدودیت منابع تجدید پذیر

محدودیت (۳) محدودیت منابع تجدیدپذیر است که در مسئله RCPSP پایه نیز این محدودیت به چشم می‌خورد. تمامی منابع که میزان حداکثر استفاده آن در هر دوره قابل بکارگیری است در این محدودیت گنجانده شده‌اند. محدودیت‌های تجدیدپذیر مانند نیروی انسانی و تجهیزات و... همگی در این محدودیت گنجانده می‌گردد.

- محدودیت منابع تجدید ناپذیر

محدودیت (۴) محدودیت منابع تجدید ناپذیر است که این منابع مقادیر کل آنها در ابتدای پروژه مشخص است و با مصرف آنها این میزان رفته رفته کاهش می‌یابد. منابعی از قبیل بودجه پروژه، انواع ملزومات و مواد مصرفی و... از اینگونه مواد می‌باشند. از آنجا که هزینه انجام فعالیت‌ها هم از طریق تابع هدف سوم منیمم می‌گردد و بودجه پروژه را نیز می‌توان یک نوع منبع تجدید ناپذیر در نظر گرفت لذا از آوردن محدودیت جدیدی برای جلوگیری از صرف هزینه اضافی صرف‌نظر شده است و محدودیت بودجه پروژه در محدودیت شماره (4) گنجانده شده است.

- محدودیت کیفیت

نهایتا محدودیت شماره (5) اطمینان می‌دهد که کیفیت انجام هر فعالیت از سطح از پیش تعیین شده‌ای که قاعده محاسبه آن در جلوتر توضیح داده می‌شود، کمتر نباشد.

محدودیت (۶) هم همان باینری بدون متغیر تصمیم X_{imt} را نشان می دهد.

برای ایجاد مسائل نمونه برای مدل جدید ارائه شده از همان مسائل استاندارد PSPLIB کمک گرفته شده است. در این مورد از مسائل RCPSP چند حالته استفاده شده است که تعداد حالت انجام هر فعالیت و زمان انجام هر فعالیت در آن حالت در دسترس است و تنها تغییر انجام گرفته در مقدار منابع در دسترس است که مقدار منابع برای این مسئله جدید به

مقدار ۲ برابر منابع در دسترس از مدل پایه MRCPSP است که با توجه به پیچیدگی و چند هدفه بودن این مسئله، چنین تغییری جایز شمرده شده است.

پس از توسعه مدل ریاضی باید به بررسی روشهای حل پرداخت که در این پژوهش از الگوریتم فراابتکاری زنبورهای عسل کمک گرفته شده است لذا در ابتدا الگوریتم زنبورهای عسل معرفی می گردد و سپس این الگوریتم برای حل مدل پیشنهادی بکار گرفته می شود.

الگوریتم زنبور مبتنی بر الگوریتم جستجو است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این الگوریتم شبیه سازی رفتار جستجوی غذای گروههای زنبور عسل است. در نسخه ابتدایی این الگوریتم، الگوریتم نوعی از جستجوی محلی انجام می دهد که با جستجوی تصادفی[۱۴] ترکیب شده و می تواند برای بهینه سازی ترکیبی {زمانی که بخواهیم چند متغیر را همزمان بهینه کنیم.} و یا بهینه سازی تابعی به کار رود. یک کلونی زنبور عسل می تواند در مسافت زیادی و نیز در جهت های گوناگون پخش شود تا از منابع غذایی بهره برداری کند.قطعات گلدار با مقادیر زیادی نکتار و گرده که با تلاشی کم قابل جمع آوری است،به وسیله ی تعداد زیادی زنبور بازدید می شود؛ به طوری که قطعاتی از زمین که گرده یا نکتار کمتری دارد، تعداد کمتری زنبور را جلب می کند.

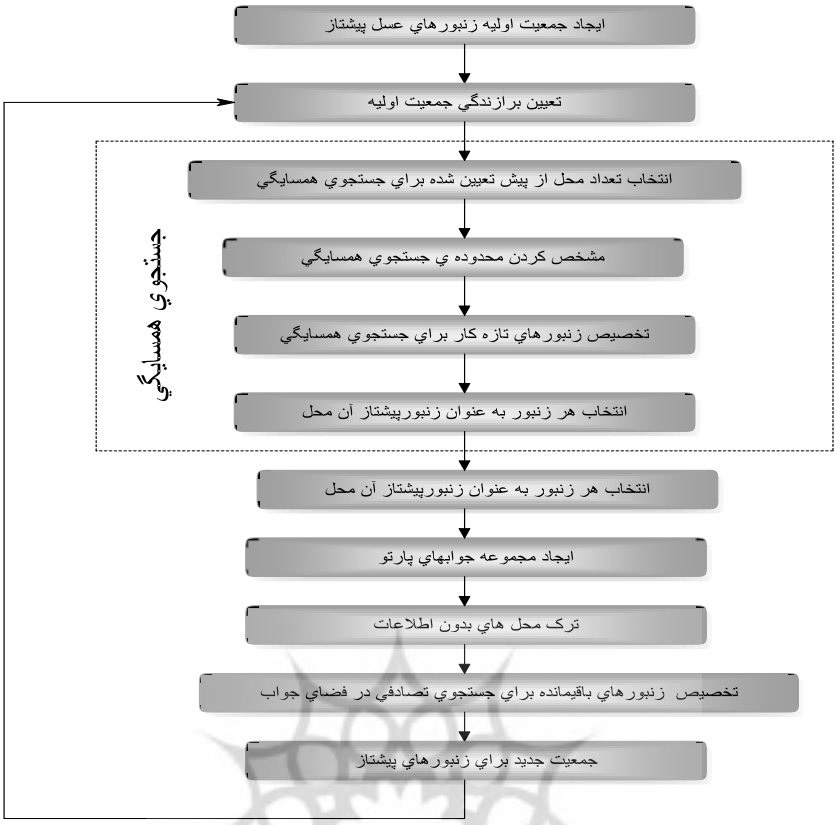
پروسه ی جستجوی غذای یک کلونی به وسیله ی زنبورهای دیده بان آغاز می شود که برای جستجوی گلزار های امید بخش {دارای امید بالا برای وجود نکتار یا گرده}فرستاده می شوند.زنبورهای دیده بان به صورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگر حرکت می کنند.در طول فصل برداشت محصول{گل دهی}، کلونی با آماده نگه داشتن تعدادی از جمعیت کلونی به عنوان زنبور پیشتاز (دیده بان) به جستجوی خود ادامه می دهند.هنگامی که جستجوی تمام گلزار ها پایان یافت، هر زنبور دیده بان، بالای گلزاری که اندوخته ی کیفی مطمئنی از نکتار و گرده دارد، رقص خاصی را اجرا می کند.

این رقص که به نام "رقص چرخشی" (حرکتی مانند حرکت قرقره) شناخته می شود، اطلاعات مربوط به جهت تکه گلزار(نسبت به کندو)، فاصله تا گلزار و کیفیت گلزار را به زنبور های دیگر انتقال می دهد. این اطلاعات زنبور های اضافی و پیرو را به سوی گلزار می فرستد.

بیشتر زنبور های پیرو به سوی گلزار هایی میروند که امید بخش تر هستند و امید بیشتری برای یافتن نکتار و گرده در آنها، وجود دارد. وقتی همه ی زنبور ها به سمت ناحیه ای مشابه بروند، دوباره به صورت کتره ای و به علت محدوده ی رقصشان در پیرامون گلزار پراکنده می شوند تا به موجب این کار سرانجام نه یک گلزار، بلکه بهترین گل های موجود درون آن تعیین موقعیت شوند.الگوریتم زنبور هر نقطه را در فضای پارامتری(متشکل از پاسخ های ممکن) به عنوان منبع غذا تحت بررسی قرار می دهد."زنبور های دیده بان" کارگزاران شبیه سازی شده به صورت کتره ای فضای پاسخ ها را ساده می کنند و به وسیله ی تابع شایستگی کیفیت موقعیت های بازدید شده را گزارش می دهند(Francisco,2011).

جواب های ساده شده رتبه بندی می شوند، و دیگر "زنبورها" نیروهای تازه ای هستند که فضای پاسخ ها را در پیرامون خود برای یافتن بالاترین رتبه محل ها جستجو می کنند{که "گلزار" نامیده می شود. الگوریتم به صورت گزینشی دیگر گلزار ها را برای یافتن نقطه ی بیشینه ی تابع شایستگی جستجو می کند . در شکل زیر گردشکار این الگوریتم برای مسائل تک هدفه و چند هدفه قرار داده شده است که گامهای آن نمایش داده شده است.که گردشکار بالا همان شیوه کاوش کردن زنبورهای عسل برای غذا و یافتن بهترین منبع غذا می باشد و شکل بعدی فلوچارت این الگوریتم برای مسائل چند هدفه است.

[14] Random



شکل شماره (۱): گردشکار الگوریتم زنبور عسل برای مسائل چند هدفه (Pham,2007)

پارامترهای الگوریتم زنبور عسل

این الگوریتم نیازمند پارامترهایی می باشد که عبارتند از :

n =تعداد زنبوران پیشتاز

m = تعداد محل‌های انتخاب شده خارج از مناطق بررسی شده قبلی

e = تعداد بهترین محل‌های انتخاب شده خارج از m محل انتخاب شده

nep = e تعداد زنبوران بکار گرفته شده برای بهترین مکان‌های

nsp = (m-e محل باقیمانده) تعداد زنبوران بکار گرفته شده برای دیگر محل‌های انتخاب شده

ngh = اندازه اولیه منطقه‌ها که شامل مکان ، قسمت‌های مجاور آن و معیار توقف می‌باشد

این الگوریتم با n سرباز دیده‌بان (پیشتاز) که به طور تصادفی در فضای جستجوی قرار دارند شروع می‌شود. مناسب بودن مکان‌های بررسی‌شده توسط سربازان دیده‌بان در مرحله ی ۲ ارزیابی می‌شود.

مرحله ۱ : جمعیت اولیه با راه حل های تصادفی

مرحله ۲ : ارزیابی سازگاری جمعیت

مرحله ۳ : شکل‌گیری جمعیت جدید

مرحله ۴ : انتخاب مکان‌ها برای جستجوی قسمت‌های مجاور

مرحله ۵ : بکار گرفتن زنبوران برای محل‌های انتخاب شده و ارزیابی آنها

مرحله ۶ : انتخاب مناسبت‌ترین زنبوران (زنبوران شایسته) از هر منطقه

مرحله ۷ : تعیین زنبوران باقی مانده برای جستجوی تصادفی و ارزیابی سازگاری شان

مرحله ۸ : پایان

با توجه به موارد فوق الگوریتم زنبور عسل پیشنهادی برای مسئله پیشنهادی RCPSP چندهدفه بصورت زیر خواهد بود :

گام‌های الگوریتم زنبور عسل برای حل این مسئله بصورت زیر است :

پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

- تعداد زنبورهای پیشتاز
- تعداد جواب‌های آرشیو
- تعداد محل‌های انتخابی
- تعداد بهترین محل‌ها
- تعداد زنبورهای تخصیص یافته برای جستجوی همسایگی در محل‌های انتخابی
- تعداد زنبورهای تخصیص یافته برای جستجوی همسایگی در بهترین محل‌ها

گامهای الگوریتم

گام ۱ : تولید جواب اولیه

زنبورهای پیشتاز بصورت تصادفی در مکان‌هایی قرار می گیرند که دارای مقادیری از هر سه هدف خواهند بود.

گام ۲ : رتبه بندی بر حسب جواب‌های پارتو

در این مرحله جواب های تولید شده رتبه بندی می‌شوند. بدین صورت که جواب‌های پارتوی که توسط هیچ یک از جواب‌ها مغلوب نشده اند رتبه ۱ و جواب‌هایی که نسبت به جوابهای رتبه ۱ مغلوب هستند اما نسبت به سایر جواب‌ها نامغلوب هستند رتبه ۲ می‌گیرند و به همین صورت تمامی جواب‌ها رتبه بندی می‌شوند.

سپس معیار فاصله تراکم (CD)[15] که برای هر جواب بدست می آید و پس از آن جواب‌ها در درجه اول بر اساس رتبه پارتو و در درجه دوم بر اساس معیار فاصله تراکم مرتب می شوند و تمامی زنبورهای پیشتاز اولیه در لیست آرشیو قرار می گیرند.

گام ۳ : مرحله حلقه اصلی الگوریتم

در این گام به ازای تعداد تکراری که از پیش تعیین شده است موارد زیر اجرا می گردد :

ابتدا زنبورهای پیشتازی که در لیست آرشیو مرحله قبل قرار گرفته‌اند انتخاب می گردند و سپس زنبورهای تازه کار جدید بر اساس فرمول زیر معین می‌شوند :

بهترین محل ها × تعداد زنبورهای پیشتاز = تعداد زنبورهای جدید

سپس به ازای تعداد بهترین محل‌های انتخابی عملیات رقص و جستجوی همسایگی در این بهترین محل‌ها صورت می پذیرد. همزمان با این امر برای سایر محل‌هایی که انتخاب شده‌اند اما جزو بهترین جوابها نیستند نیز این امر صورت می‌گیرد. برای محل‌های انتخاب نشده نیز ابتدا یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌گردد اگر عدد تصادفی کوچکتر از ۰,۵ باشد زنبورها به طور تصادفی به جستجوی سایر محل‌ها در بازه جواب می‌پردازند و در غیر اینصورت در همان محل جواب قبلی به جستجوی همسایگی می‌پردازند.

گام ۴: جواب‌های آرشیو

جواب‌های تولید شده توسط زنبورهای تازه کار به جوابهای آرشیو اضافه می‌شود و دوباره این آرشیو بر اساس گام ۲ که مرتب شدن بر حسب رتبه پارتو و معیار فاصبله تراکم است مرتب می‌شوند.

اگر تعداد جوابهای آرشیو از تعداد از قبل تعیین شده برای جوابهای آرشیو (در اینجا برابر ۵۰ عدد) بیشتر باشد در اینصورت سایر جوابهایی که در آخر لیست قرار دارند حذف می‌شوند تا تعداد باقیمانده آرشیو برابر همان مقدار از قبل تعیین شده شود.

گام ۵ : (گام پایانی) بازگشت به گام ۳

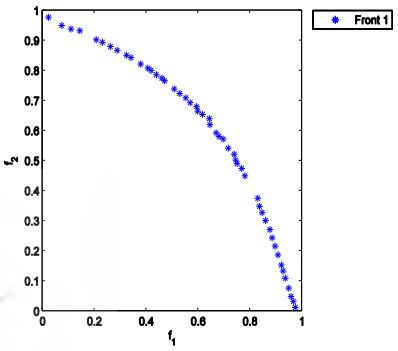
[15] Crowding Distance

۳- نتایج و بحث

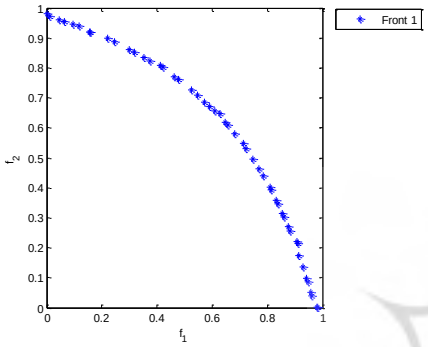
با توجه به ادبیات موجود (Francisco,2011) الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم های قدرتمندی از قبیل PSA، SPEA-IIو ... عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها در حل مسائل چندهدفه RCPSP داشته و لذا از این الگوریتم برای مقایسه با الگوریتم زنبورهای عسل بکاررفته در این پژوهش شده است.

برای مقایسه این دو الگوریتم، در ابتدا از یک مسئله استاندارد ریاضی به نام تابع FON کمک گرفته شده است که این تابع به صورت زیر تعریف می شود

$$f_1(\mathbf{x}) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^{3}\left(x_i - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2\right)$$



نمودار شماره (۲): جوابهای پارتو الگوریتم NSGA-II



نمودار شماره (۳): جوابهای پارتو الگوریتم زنبور عسل

همانطور که در نمودارهای بالا دیده می شود هر دو الگوریتم برای حل این مسئله بخوبی عملکرده اند ولی از نظر معیار نظم جوابهای پارتو، الگوریتم زنبور عسل بهتر عمل کرده است.

برای بررسی عملکرد این دو الگوریتم در حل مدل پیشنهادی از معیارهای ارزیابی "معیار نظم[۱۶] " ، " معیار تعداد[۱۷]" ، "معیار کیفی و نسبی[۱۸] " ، "معیار پراکندگی[۱۹] " و نهایتا CPU Time استفاده شده است.

حال به بررسی چند مسئله RCPSP در ابعاد مختلف کوچک و بزرگ که با نامهای j102-2 و j122-8 و j141-8 و j301-1 و طبق مسئله RCPSP چند هدفه بیان شده توسط برنامه MATLAB کدینگ شده اند، پرداخته شده است و نمودارهای آن ها نیز با یکدیگر مقایسه شده است.

- تنظیم پارامترها برای حل مسائل RCPSP چند هدفه

تنظیم پارامترها برای حل مسائل مختلف مسئله چندهدفه تعبیه شده بصورت زیر بوده است:

تعداد زنبورهای پیشتاز : ۲۰ عدد ----- تعداد جوابهای آرشیو : ۵۰ عدد ----- تعداد محل های انتخابی : ۱۰ عدد

تعداد بهترین محل ها : ۵ عدد

تعداد زنبورهای تخصیص یافته برای جستجوی همسایگی در محل های انتخابی : ۱۰ عدد

تعداد زنبورهای تخصیص یافته برای جستجوی همسایگی در بهترین محل ها : ۳۰ عدد

برای تنظیم پارامترها، ابتدا پارامترهای تاثیرگذار بر معیارهای مقایسه دو الگوریتم، از طریق حل مسائل مختلف مشخص گردید. برای این امر یک پارامتر متغیر و بقیه پارامترها ثابت فرض شده‌اندو مسائل چندین بار مورد حل قرار گرفته و سپس نتایج مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید که پارامتر تعداد زنبورهای پیشتاز و تعداد زنبورهای تخصیص یافته به محل‌های انتخابی و بهترین محل‌ها در عملکرد الگوریتم موثر و سایر پارامترها دارای اثرات خیلی واضحی بر روی نتایج عملکرد نداشته‌اند. لذا به

[16] Pareto distribution
[17] Number Of Solutions
[18] Mean Ideal Distance
[19] Maximum spread or diversity

تنظیم این سه پارامتر پرداخته شده است. برای تنظیم پارامترهای موثر نیز با توجه به دارا بودن مسائل استاندارد و ادبیات موضوع بازه‌ای برای هر پارامتر تعریف شد و سپس به حل این مسائل استاندارد با پارامترها مشخص شده در بازه های مشخص شده پرداخته شد و سپس با توجه به نتایج، بهترین مقدار پارامتر که بهترین نتیجه را در حل مسائل چندهدفه از جمله مدت زمان حل (CPU Time) و مقادیر تابع هدف و... داشت به عنوان مقدار مطلوب پارامتر تعیین شد.

بررسی عملکرد دو الگوریتم مورد نظر از لحاظ معیار تعداد

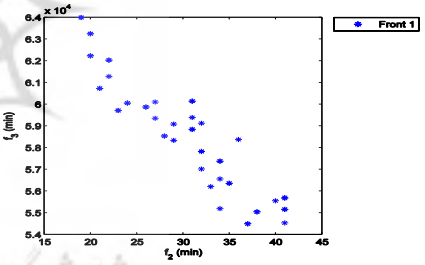
با توجه به معیارهای مقایسه تعریف شده در بخش قبل نتایج مقایسه این دو الگوریتم از لحاظ معیار تعداد بصورت زیر است.

جدول شماره (۳): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II از لحاظ معیار تعداد

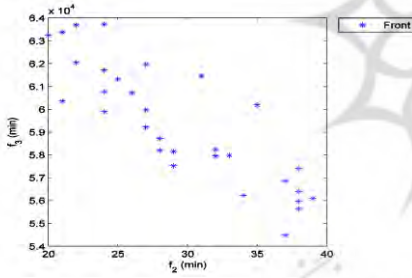
معیار تعداد / نام مسئله	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم NSGA-II
$j102-2$	۳۵	۳۲
$j122-8$	۳۵	۳۰
$j141-8$	۳۵	۲۸
$j203-2$	۳۳	۳۱
$j301-1$	۴۱	۳۳

همانطور که از جدول ۳ مشخص است الگوریتم زنبورهای عسل در تمامی مسائل نمونه با اندازه های مختلف از لحاظ این معیار برتری خود رانشان داده است (در این معیار هر چه تعداد بیشتر باشد عملکرد الگوریتم بهتر بوده است)

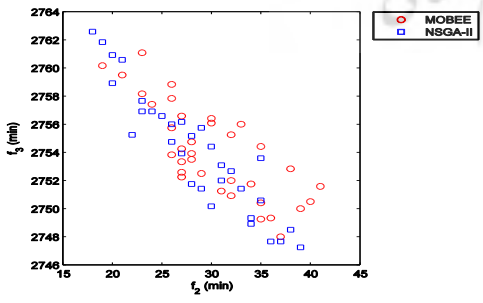
در نمودارهای زیر نیز عملکرد دو الگوریتم در تولید مجموعه جوابهای پارتو برای مسئله نمونه j102-2 نمایش داده شده است.

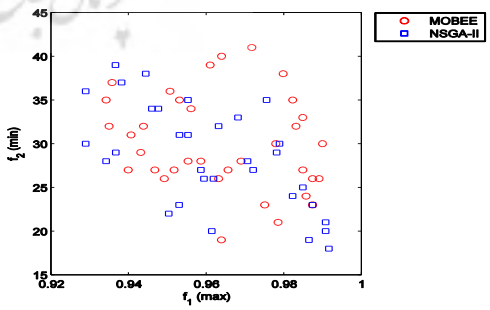


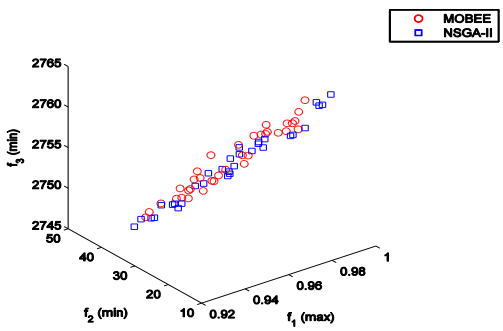
نمودار شماره (۴): جوابهای پارتو الگوریتم NSGA-II

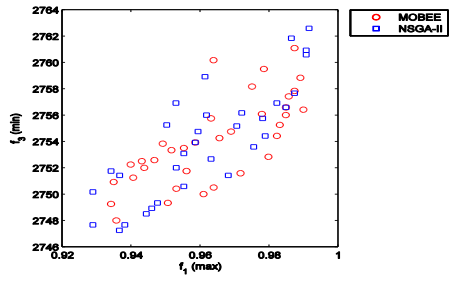


نمودار شماره (۵): جوابهای پارتو الگوریتم زنبور عسل









نمودار شماره (۶): مقایسه دو الگوریتم NSGA-II و زنبور عسل برای دو تابع به ترتیب از بالا سمت راست

(F_3, F_2, F_1)، (F_3, F_2) و (F_3, F_1) و (F_2, F_1)

F1= تابع هدف کیفیت F2= تابع هدف مدت زمان اتمام پروژه F3= تابع هدف هزینه(مسئله نمونه j102-2)

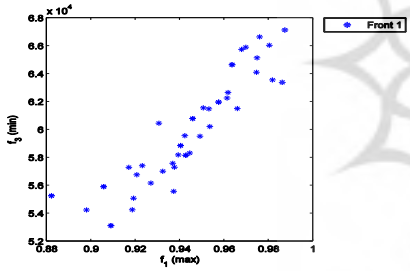
بررسی عملکرد دو الگوریتم مورد نظر از لحاظ معیار پراکندگی

با توجه به معیارهای مقایسه تعریف شده دربخش قبل نتایج مقایسه این الگوریتمها ازلحاظ معیار پراکندگی بصورت زیر است.

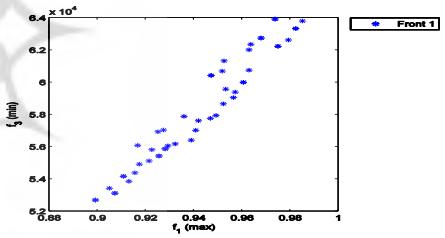
جدول شماره (۴): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II از لحاظ معیار پراکندگی

معیار پراکندگی / نام مسئله	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم NSGA-II
$j102-2$	۹۶۳۹۰/۹۸۹۵	۸۸۱۲۹/۱۰۵۴
$j122-8$	۱۰۹۰۹۱/۸۰۷۷	۹۳۴۹۰/۶۱۹۶
$j141-8$	۷۵۹۲۸/۷۳۶	۶۰۷۴۳/۳۹۹
$j203-2$	۸۴۹۰۹/۷۱۹۲	۷۹۷۴۸/۰۹۱۶
$j301-1$	۱۰۸۴۹۱/۰۶۹	۸۷۳۵۰/۴۶۶۲

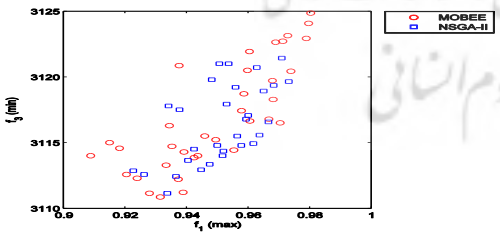
در نمودارهای زیر نیز عملکرد دو الگوریتم در تولید مجموعه جوابهای پارتو برای مسئله نمونه j122-8 نمایش داده شده است. همانطور که در جدول ۴ مشخص است الگوریتم زنبورهای عسل در تمامی این مسائل نیز که دارای تعداد فعالیت های متفاوت می باشد برتری خود را نشان داده است.(در این معیار نیز هر چه مقدار بیشتر باشد نشانه عملکرد بهتر الگوریتم می باشد)

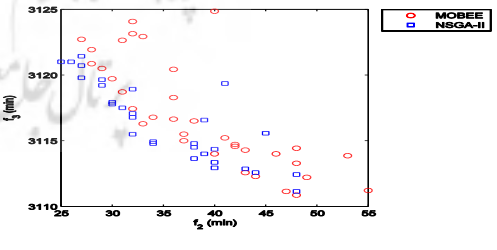


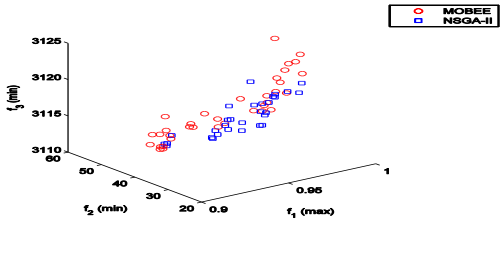
نمودار شماره (۷): جوابهای پارتو الگوریتم NSGA-II

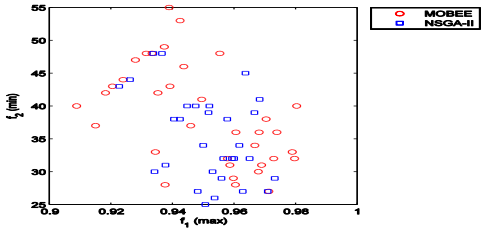


نمودار شماره (۸): جوابهای پارتو الگوریتم زنبور عسل









نمودار شماره (۹): مقایسه دو الگوریتم NSGA-II و زنبور عسل به ترتیب از بالا سمت راست

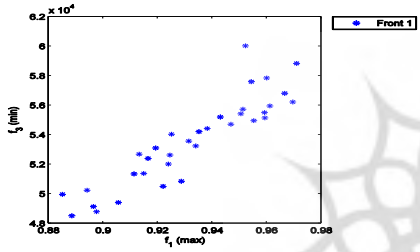
برای دو تابع (F_3, F_2, F_1)، (F_3, F_2) و (F_3, F_1) و (F_2, F_1)

با توجه به معیارهای مقایسه تعریف شده در بخش قبل نتایج مقایسه این دو الگوریتم از لحاظ معیار نظم بصورت زیر است:

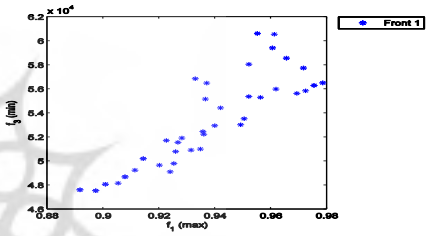
جدول شماره (۵): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II از لحاظ معیار نظم

معیار نظم / نام مسئله	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم NSGA-II
$j102-2$	۰/۵۸۹۸۹	۰/۴۱۰۳
$j122-8$	۰/۸۳۱۴۶	۰/۸۶۱۰۵
$j141-8$	۰/۶۹۲۰۹	۰/۸۷۶۶۷
$j203-2$	۰/۸۱۰۱۸	۰ /۶۵۸۹۲
$j301-1$	۰/۶۲۲۱۱	۰/۶۶۰۱۱

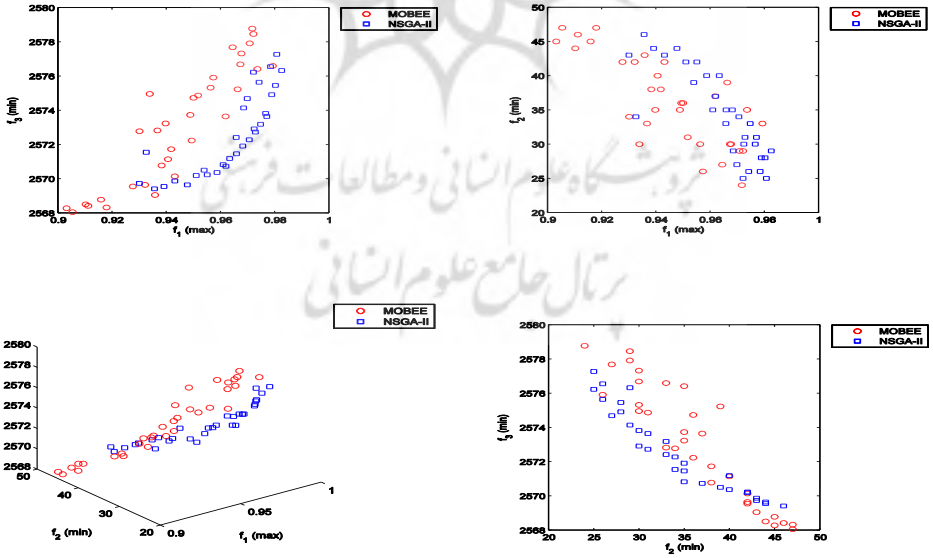
در نمودارهای زیر نیز عملکرد دو الگوریتم در تولید مجموعه جوابهای پارتو برای مسئله نمونه j141-8 نمایش داده شده است. همانطور که از جدول بالا مشخص است الگوریتم زنبورهای عسل در بیشتر مسائل بجز مسائل سری ۱۰ و ۲۰ فعالیته، برتری نسبی خود را نشان داده است.



نمودار شماره (۱۰): جوابهای پارتو الگوریتم NSGA-II



نمودار شماره (۱۱): جوابهای پارتو الگوریتم زنبور عسل



نمودار شماره (۱۲): مقایسه دو الگوریتم NSGA-II و زنبور عسل برای دو تابع (F_2,F_1) و (F_3,F_1) و (F_3,F_2)، (F_3,F_2,F_1)

بررسی عملکرد دو الگوریتم مورد نظر از لحاظ معیار کیفی و نسبی

با توجه به معیارهای مقایسه تعریف شده در بخش قبل نتایج مقایسه این دو الگوریتم از لحاظ معیار کیفی و نسبی بصورت زیر است:

جدول شماره (۶): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II از لحاظ معیار کیفی و نسبی

معیار پراکندگی / نام مسئله	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم NSGA-II
$j102-2$	۰/۵۴۶۴۳	۰/۵۵۳۵۷
$j122-8$	۰/۵۶۳۶۴	۰/۶۳۶۳۶
$j141-8$	۰/۸۲۵	۰/۱۷۵
$j203-2$	۰/۶۷۵	۰/۷۲۵
$j301-1$	۰/۷۲۹۱۷	۰/۷۷۰۸۳

در این معیار الگوریتم NSGA-II موفق تر عمل کرده است و الگوریتم زنبورهای عسل تنها در سری مسائل J14 توانسته است جواب بهتری را تولید کند البته باید متذکر شد که اختلاف نتایج نسبت به سایر معیارها بسیار اندک می باشد.

بررسی عملکرد دو الگوریتم مورد نظر از لحاظ معیار CPU Time

جدول شماره (۷): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II از لحاظ زمان CPU

CPU Time برحسب ثانیه / نام مسئله	الگوریتم NSGA-II	الگوریتم زنبور عسل
$j102-2$	۸۹/۱۲۵۰	۸۰/۹۰۶۳
$j122-8$	۸۷/۷۰۳۱	۸۴/۲۳۴۴
$j141-8$	۹۰/۲۰۳۱	۸۷/۰۱۵۶
$j203-2$	۱۰۲/۹۲۱۹	۹۷/۹۵۳۱
$j301-1$	۱۲۹/۹۵۳۱	۱۲۴/۸۱۲۵

از دیگر معیارهای مقایسه الگوریتم های فرا ابتکاری جهت حل یک مسئله، مدت زمان صرف شده پردازشگر CPU برای رسیدن به جواب است. لذا این دو الگوریتم نیز از این لحاظ مورد بررسی قرار گرفته اند. همان‌طور که مشهود است با افزایش تعداد فعالیت ها، زمان رسیدن به جواب دارای افزایشی نسبی است. البته در تمامی موارد الگوریتم زنبورهای عسل در رسیدن به جواب نهایی در تعداد تکرار یکسان نسبت به الگوریتم NSGA-II سریع‌تر عمل نموده است. برای اجرای هر دو الگوریتم از یک رایانه با CPU به مشخصات 2.1 GHz و سیستم عامل ویندوز XP استفاده شده است. با توجه به اینکه کدنویسی این مسئله در این پژوهش با نرم افزار Matlab صورت گرفته است، مطمئنا زمان صرف شده برای حل این مسائل، قابل مقایسه با سایر الگوریتم‌هایی که تاکنون برای حل این مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌اند و قریب به اتفاق آنها همگی با C++ یا Java برنامه نویسی شده‌اند، قابل مقایسه نیست. لذا تنها متوسط زمان مصرفی CPU برای مسائل سری j30 و j60 و j120 آورده شده است و تک تک نتایج و مقایسه نتایج CPU Time با سایر الگوریتم‌ها آورده نشده است و یکی از توصیه‌های آتی برای توسعه این پژوهش می‌تواند برنامه‌نویسی این الگوریتم با زبان C یا Java باشد تا بتوان عملکرد این الگوریتم را از لحاظ زمان حل نیز مورد بررسی دقیق قرار داد.

تحلیل جامع عملکرد الگوریتم زنبورهای عسل و NSGA-II

برای سنجش دقیق‌تر کارآیی الگوریتم مورد نظر و بررسی عملکرد آن سایر مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ نیز توسط دو الگوریتم مورد حل قرار گرفته و نتایج در قالب جداول و گراف‌های زیر آورده شده است که نتایج بر برتری نسبی الگوریتم زنبورهای عسل صحه نهاده است.

برای این منظور ابتدا ۲۰ مسئله با ابعاد کوچک (از سری مسائل j10, j12, j14,j16) و ۲۰ مسئله با ابعاد بزرگ (از سری مسائل j20,j18 j30) انتخاب شده اند و توسط دو الگوریتم مورد حل قرار گرفته‌اند. نتایج در جدول زیر آورده شده است.

جدول شماره (۸): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II در مسائل کوچک مختلف

مسائل کوچک	معیار تعداد	معیار پراکندگی	معیار نظم	معیار کیفی

		MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II
۱	j102-4	۳۶	۳۲	1839150.851	1612700.15	0.58352	0.61364	0.66038	0.33962
۲	j104-2	۳۲	۳۵	1497739.15	1613744.11	0.89318	1.036	0.35849	0.64151
۳	j106-3	۳۶	۳۵	2523933.408	2443121.95	0.62875	0.75111	0.39655	0.60345
۴	j108-6	۳۲	۳۴	1661382.631	1763999.3	0.65665	0.89325	0.45455	0.54545
۵	j1011-5	۴۰	۳۶	2177656.797	2032103.86	0.52433	0.75618	0.76923	0.23077
۶	j1064-10	۳۷	۳۸	2082972.302	2138625.77	0.95624	0.62958	0.36207	0.63793
۷	j1211-2	۳۳	۴۰	1957940.852	1979058.2	0.69657	0.80428	0.8722	1
۸	j1211-10	۳۶	۳۶	2443121.949	1832490.31	0.63441	0.8996	0.39655	0.39655
۹	j12-12-7	۴۱	۳۴	2751256.849	2240360.6	0.77645	0.83215	0.67857	0.32143
۱۰	j1224-9	۳۹	۳۶	2637104.762	2432635.08	0.68025	0.71073	0.64407	0.35593
۱۱	j144-10	۳۳	۳۷	2151125.919	2385798.39	0.56799	0.56718	0.30189	0.69811
۱۲	j1411-3	۳۳	۳۷	1909905.573	2126371.1	0.78391	0.77971	0.37037	0.62963
۱۳	j1411-10	۵۰	۵۰	2708536.563	2685066.38	0.83215	0.95624	0.5	0.5
۱۴	j1414-1	۳۷	۳۴	2432635.075	2091791.76	0.79311	0.62958	0.8722	0.35484
۱۵	j1414-8	۳۴	۴۵	2104312.079	2774632.85	0.54233	0.55469	0.30769	0.69231
۱۶	j169-5	۳۸	۳۹	2133833.857	2124235.13	1.2085	0.89987	0.20408	0.79592
۱۷	j1612-6	۳۹	۳۶	2523032.425	2322996.07	0.79249	0.8996	0.76471	0.23529
۱۸	j1612-2	۳۲	۳۵	1929609.99	2091791.76	0.51931	0.68343	0.38596	0.61404
۱۹	j1635-9	۳۶	۳۶	2007518.881	2005510.5	0.79626	0.79311	0.25532	0.80517
۲۰	j1664-9	۴۰	۳۳	2226637.696	1832490.31	0.61629	0.63441	0.64516	0.35484

جدول ۹ نیز دو الگوریتم زنبورهای عسل و NSGA-II برای مسائل بزرگ MRCPSP چندهدفه مورد حل قرار گرفته و نتایج عملکرد در جدول زیر آورده شده است که مسائل بزرگ MRCPSP چند هدفه شامل مسائل j18 و j20 و j30 در نظر گرفته شده است.از لحاظ معیار تعداد و پراکندگی الگوریتم زنبورهای عسل برتری نسبی نسبت به NSGA-II داشته است.

جدول شماره(۹): مقایسه دو الگوریتم زنبور عسل و NSGA-II در مسائل بزرگ

	مسائل بزرگ	معیار تعداد		معیار پراکندگی		معیار نظم		معیار کیفی	
		MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II	MOBEE	NSGA-II
۱	j181-1	**۳۷**	**۳۶**	1085767.516	105681.7881	0.6926	0.68306	0.55556	0.44444
۲	j1810-6	**۳۳**	**۳۳**	1097612.673	1081743.445	0.76626	0.76626	0.36872	0.46513
۳	j1812-2	**۳۳**	**۳۵**	1675511.336	1631433.53	0.632	0.67321	0.75432	0.73144
۴	j1812-9	**۳۸**	**۳۸**	1092453.633	1093534.524	0.78445	0.6723	0.8791	0.85632
۵	j1821-1	**۴۰**	**۴۲**	2198343.342	2298843.111	0.6421	0.67622	0.5681	0.67132
۶	j2011-8	**۳۶**	**۳۳**	1091636.622	1060042.94	0.70381	1.064	0.72	0.48
۷	j2012-8	**۳۷**	**۳۷**	1894211.633	1954465.345	0.3463	0.5352	0.53	0.6722
۸	j2030-1	**۳۹**	**۴۰**	1979058.203	1909915.573	0.89325	0.89987	0.67857	0.67857

۹	j2030-10	۳۵	۳۵	187531.131	186632.1313	0.5653	0.7632	0.61	0.57913
۱۰	j2050-7	۳۵	۳۶	2637304.762	2432635.075	0.62103	0.71073	0.64417	0.75593
۱۱	j2061-8	۳۹	۳۶	2637104.762	2432635.075	0.68025	0.71324	0.64407	0.45391
۱۲	j2062-1	۳۴	۳۳	1408232.322	1058232.421	0.5211	0.6792	0.5613	0.6711
۱۳	j2064-10	۳۶	۳۶	1872431.231	1866131.001	0.4421	0.7619	0.8713	0.6721
۱۴	j304-1	۳۶	۴۱	105655.7086	1260267.683	0.60549	0.72183	0.7069	0.52778
۱۵	j304-3	۴۰	۳۸	147611.3211	1466671.313	0.8101	0.67813	0.6711	0.78131
۱۶	j305-2	۳۸	۳۸	107903.4213	1086932.434	0.67432	0.64533	0.65242	0.59083
۱۷	j304-10	۳۷	۳۵	1198776.322	1187763.434	0.7832	0.69024	0.6732	0.7133
۱۸	j309-9	۴۲	۴۲	189123.131	183432.2412	0.7523	0.7632	0.67452	0.59032
۱۹	j3050-6	۳۹	۴۰	2179058.203	2092915.573	0.89325	0.89987	0.67857	0.67857
۲۰	j3064-10	۴۰	۴۲	121740.7972	127806.096	0.64304	0.82878	0.50755	0.79245

در این مقاله یک مدل ریاضی چند هدفه با مهمترین اهداف در دنیای واقعی برای مسئله زمانبندی پروژه چندحالته پیشنهاد داده شد و سپس با الگوریتم فراابتکاری زنبورهای عسل مورد حل قرار گرفت و نتایج با الگوریتم NSGA-II که با توجه به ادبیات موضوع در حل مسائل چندهدفه این سری مسائل بهتر از سایر الگوریتم ها عمل نموده بود مورد ارزیابی قرار گرفت نتایج از عملکرد مناسب الگوریتم زنبورهای عسل حکایت داشتو در تحقیقات آتی می توان مدل ریاضی پیشنهادی را طوری توسعه داد که روابط پیش نیازی کلی جایگزین روابط پیش نیازی جزئی گردد و یا زمان آماده سازی را نیز در مدل مربوطه وارد نمود که این امر مسئله را پیچیده تر و در عین حال کاربردی تر می سازد.

٤- منابع

1. Brucker P., Drexl A., Mohring R., Neumann K., Pesch E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods, European Journal of Operational Research 112, 3˚41.
2. Sprecher A. (1997). Exact algorithm for RCPSP in multi-mode case. OR Spectrum, Volume 19, Number 3, 195-203.
3. Abbasi B., Shadrokh S., Arkat J. (2006). Bi-objective resource-constrained project scheduling with obustness and makespan criteria, Applied Mathematics and Computation 180 (1), 146˚152.
4. Nudtasomboon N., Randhawa S.U. (1997). Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs, Computers and Industrial Engineering 32 (1), 227˚242.
5. S owinski R., B. Soniewicki, J. (1994). We_glarz, DSS for multiobjective project scheduling, European Journal of Operational Research, 79, (2), 220˚229.
6. Viana A., de Sousa J.P. (2000). Using metaheuristics in multio-bjective resource constrained project scheduling, European Journal of Operational Research, 120 (2), 359˚374.
7. Al-Fawzan M., Haouari M. (2005). A bi-objective model for robust resource constrained project scheduling, International Journal of Production Economics, 96, 175˚187.
8. Davis K.R., A. Stam, R.A. Grzybowski. (1992). Resource constrained project scheduling with multiple objectives: A decision support approach, Computers and Operations Research, 19, (7), 657˚669

9. Vos, S., Witt A. (2007). Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application, International Journal of Production Economics, 105, (2), 445˚458.
10. Hapke, M., Jaszkiewicz, A., S owinski R. (1998). Interactive analysis of multiple criteria project scheduling problems, European Journal of Operational Research, 107,315˚324.
11. Dorner, K.F., Gutjahr, W.J., Hartl R.F., Strauss C., Stummer C. (2008). Nature-inspired metaheuristics for multiobjective activity crashing, Omega, 36, 1019˚1037.
12. Nabrzynski J., We_glarz J. (1999). Knowledge-based multi-objective project scheduling problems, in: We_glarz , 383˚411.
13. Pham D.T., Ashraf Afify. (2007). Ebubekir Koc Manufacturing cell formation using the Bees Algorithm". IPROMS Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference, Cardiff, UK.
14. Francisco Ballestín, Rosa Blanco. (2011). Theoretical and practical fundamentals for multi-objective optimisation in resource-constrained project scheduling problems, Computers & Operations Research, 38(1), 51˚62.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی