



ارائه مدل زمانبندی استوار پروژه با منابع محدود و حل آن با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری بهینه سازی انبوه ذرات (مطالعه موردی: پالایشگاه میعانات گازی بندر عباس)

محمد حسین نبی زاده بهنمیری (نویسنده مسؤل)

کارشناسی ارشد مهندسی سیستم ها و پژوهشگر مرکز تحقیقات سیستم ها دانشگاه جامع امام حسین (ع)

Email: mhnb.158@gmail.com

حسینعلی حسن پور

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

روزبه عزیزمحمدی

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

نوید هشترودی

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۱۵ # تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۸

چکیده

انجام فعالیت های پروژه مطابق برنامه زمان بندی یکی از مسائل مورد توجه دست اندرکاران پروژه ها به ویژه مدیران پروژه ها می باشد. همچنین ماهیت بسیار دشوار این مسئله، علت دیگری برای توجه زیاد محققین به آن می باشد. بنابراین تکنیک ها و روش های خاصی برای حل این مسائل مطرح شده اند. از اینرو توجه بیشتر به پایداری زمانبندی پروژه برای مدیران پروژه موضوعیت دارد. در این مقاله برای یک مسئله واقعی زمانبندی پروژه پالایشگاهی ابتدا مدل زمانبندی پایدار ارائه شده و به دلیل اینکه زمانبندی پروژه با محدودیت منابع از جمله مسائل NP-Hard است، الگوریتم فرا ابتکاری بهینه سازی انبوه ذرات برای حل این مسئله پیشنهاد شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل نیز ۴ مسئله با ابعاد کوچک انتخاب و جواب های به دست آمده از الگوریتم های پیشنهادی با جواب دقیق به دست آمده حاصل از نرم افزار Lingo مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی کارا و همگرا به جواب بهینه می باشد.

کلمات کلیدی: زمانبندی پروژه، پایداری، انعطاف پذیری، الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات.

۱- مقدمه

به طور کلی زمانبندی پروژه در پی یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه است، به نحوی که محدودیت‌های تقدم و تأخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه به طور همزمان برآورد شوند و معیار سنجش معینی از جمله زمان انجام پروژه، هزینه انجام، تعداد فعالیت‌های با تأخیر و غیره بهینه شوند (Damghani et al., 2011). گرچه همه این معیارهای سنجش از اهمیت خاصی برخوردارند اما بسته به شرایط موجود کشور، زمان انجام پروژه از اهمیت بالایی برخوردار است. به عنوان مثال در مناطق نفت خیز جنوب، سرعت در حفر چاه و بهره برداری از مخازن مشترک، بسیار با اهمیت تر از هزینه اجرای پروژه است (Aliahmadi et al., 2013).

با استفاده از زمانبندی پروژه، مواردی همچون تخصیص منابع به فعالیت‌ها، تعهدات پیمانکاران، تعمیرات پیشگیرانه و تحویل سفارش به مشتری داخلی یا خارجی به راحتی قابل برنامه‌ریزی و کنترل خواهد بود. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی موضوع زمانبندی پروژه انجام شده است. در بیشتر تحقیقات فرض می‌شود فعالیت‌ها در یک شرایط ایده آل انجام می‌گیرد و زمانبندی ارائه شده می‌تواند به طور دقیق مطابق با برنامه اجرا شود. در عمل، وجود چندین عامل کنترل‌نشده نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها، نبود دسترسی به منابع، اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده به پروژه، شرایط بد آب و هوایی و غیره، ممکن است منجر به ایجاد اختلال‌هایی در زمانبندی پروژه شود. این اختلال‌ها می‌تواند هزینه‌های قابل‌توجهی به سیستم پروژه تحمیل کند (Basaghzade et al., 2010).

امروزه یکی از مشکلات رایج در انجام پروژه‌ها وجود عوامل غیر قابل کنترل است که در صورت رخ دادن سبب می‌شوند پروژه در موعد مقرر تکمیل نشود. از جمله این مشکلات دوباره‌کاری یا برگشت فعالیت به منظور برطرف کردن نقص‌های موجود، خرابی و در دسترس نبودن منابع را نام برد. هر کدام از این دلایل باعث تأخیر در تکمیل فعالیت شده و در نتیجه باعث تأخیر در کل پروژه خواهند شد علاوه بر این، باعث متضرر شدن ذینفعان پروژه نیز می‌شود (Wang et al., 2016). بر اساس ادبیات موضوع، بیشینه سازی پایداری پروژه به معنی بیشینه سازی شناوری کلی است که ضمن رعایت کمینه سازی زمان تکمیل پروژه باید تحقق یابد.

طبقه‌بندی مسائل زمان‌بندی پروژه از نظر توابع هدف با چارچوب‌های استاندارد امروزی به طور گسترده از سال ۱۹۶۹ توسط پریترسکر^۱ و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت (Ke et al., 2015). در مسائل زمان‌بندی پروژه توابع هدف مختلفی در نظر گرفته می‌شود که از معمولی‌ترین آن‌ها که در اکثر تحقیقات، مسئله حداقل کردن زمان اجرای پروژه^۲ می‌باشد. زمان شروع پروژه معمولاً در زمان $t=0$ در نظر گرفته می‌شود؛ که با این وجود، تابع هدف حداقل کردن بیش‌ترین زمان خاتمه‌ی فعالیت پروژه می‌باشد (Angela et al., 2008).

$$\min C_{max} = \min(\max(S_j + P_j))$$

که در آن S_j زمان شروع و P_j زمان عملیات فعالیت j می‌باشد.

در تدوین برنامه‌ریزی کلاسیک پروژه معمولاً معیار بهینگی، مانند حداقل طول یا حداقل تأخیر را مشخص می‌کنند. چنین معیارهایی تمایل دارند به طور ضمنی، استفاده از تجهیزات در طول افق زمانی برنامه‌ریزی شده را به حداکثر برسانند. درحالی‌که مدیریت به طور معمول به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌ها و به حداکثر رساندن استفاده از تجهیزات و منابع می‌باشد (Weil, 2013).

از دیگر اهداف در مسائل زمان‌بندی پروژه می‌توان حداکثر کردن ارزش خالص فعلی پروژه^۳، جریان نقدی محدودیت‌های بودجه و تسطیح منابع^۴ را در کنار تابع هدف‌های سنتی کاهش زمان اتمام پروژه مطرح کرد. در حقیقت پروژه با یک جریان نقدی منفی

¹ Pritsker

² Makespan Minimization

³ Maximum Net Present Value (NPV)

⁴ Resource Leveling Problems

در طول پروژه و پرداخت در انتهای آن روبروست، مدیریت جریان نقدی و توابع هدف مبتنی بر ارزش زمانی پول، اهمیت پیدا می‌کند و عملاً مسیر بحرانی پروژه ۵ از منظر جریان نقدی شناسایی می‌شود (Herroelen et al., 1999).

در مسئله تسطیح منابع، هدف تعیین زمان بندی بودجه به گونه‌ای است که همچنان پروژه پیش از مهلت مقرر به پایان رسد، با این شرط که تا حد امکان، استفاده از منابع به شکل مسطح صورت گیرد. به عبارت دیگر، نوسانات زیاد در سطح منبع مورد نیاز در هر دوره زمانی بروز ننماید؛ لذا در این گونه مسائل بدون محدودیت سطح، مهلت تحویلی برای پروژه در نظر گرفته می‌شود که نباید از مقدار تعیین شده بیشتر شود (Vanhoucke et al., 2011).

اکمیلی و روم (۱۹۹۷) کیفیت را در تابع هدف برنامه‌ریزی پروژه در نظر گرفته‌اند، به خاطر اینکه به حداکثر رساندن کیفیت پروژه ۶ مهم‌ترین هدف برای مدیران پروژه و مشتریان می‌باشد. آن‌ها یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۷ (MLP) برای برنامه‌ریزی پروژه با این هدف معرفی کردند. الفوزان و همکاران (۲۰۰۵) شاخص‌های جدید پایداری، برای پاسخ به یکی دیگر از نیاز مدیران پروژه ارائه کردند. آن‌ها برخی از عوامل غیرقابل کنترل که مدت زمان فعالیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نتایج مدیریت برای پاسخگویی به افق از پیش تعیین شده پروژه را مختل می‌کند، در نظر گرفتند. بنابراین، آن‌ها مدل دو معیاری برای به حداقل رساندن طول مدت اجرای پروژه و حداکثر کردن معیار پایداری پروژه را توسعه دادند. پایداری زمانبندی، به زمانبندی گفته می‌شود که توانایی برای مقابله با افزایش کوچک در طول برخی از فعالیت‌هایی که ممکن است در نتیجه برخی از عوامل غیرقابل کنترل تعریف شود، گفته می‌شود. الفوزان و همکاران (۲۰۰۴) شناوری آزاد SJ را به عنوان مقدار زمانی که فعالیت J می‌تواند بدون به تأخیر انداختن شروع فعالیت بعدی صورت گیرد، مبنا قرار دادند و پایداری یک زمان بندی را به صورت مجموع شناوری آزاد تعریف کردند (AL-Fawzan et al., 2004).

کوبیلانسکی و همکاران (۲۰۰۷) کمبود معیارهای پایداری پیشنهاد شده توسط الفوزان و همکاران (۲۰۰۴) را برای یک مثال ساده اثبات کردند. آن‌ها دو نوع از پایداری پروژه، به نام کیفیت پایداری و پایداری راه حل را در نظر گرفتند. نوع اول اشاره به ثبات برنامه ریزی طول مدت اجرای پروژه یا تاریخ اتمام کل پروژه و نوع بعد اشاره به جزئیات زمانبندی (یعنی از زمان شروع فعالیت) می‌باشد. بر اساس این مفاهیم، کوبیلانسکی و همکاران (۲۰۰۷) دو معیار جدید پایداری را اثبات کردند. اولین معیار به حداکثر رساندن حداقل شناوری آزاد و دوم به حداکثر رساندن حداقل نسبت $\frac{\text{مدت زمان پروژه}}{\text{شناوری آزاد}}$ می‌باشد. مسئله دیگر این است که مدیران پروژه باید منابع و محدودیت ظرفیت پیمانکاران پروژه را در برنامه‌ریزی پروژه در نظر بگیرند، از سوی دیگر، آن‌ها باید هزینه‌های پروژه را به حداقل برسانند؛ بنابراین، زینان و همکاران (۲۰۰۶) یک مسئله جدید را تعریف کردند که چگونه می‌توان هزینه فعالیت‌های پروژه با محدودیت زمان تحویل و ظرفیت منابع برای حل این مسئله را حداقل کرد، آن‌ها یک نوع مسئله RCPSP^۸ با هدف به حداقل رساندن هزینه فعالیت‌هایی که شامل هزینه‌های ثابت و هزینه اتمام فعالیت که از زمان پایان فعالیت و طول مدت اجرای پروژه، پویا و در حال تغییر می‌باشد را در نظر گرفتند (Seifi et al., 2008). معرفی انعطاف‌پذیری یک مسئله زمانبندی، نشان‌دهنده‌ی درجه آزادی زمانبندی در حین پیاده‌سازی آن می‌باشد. انعطاف‌پذیری چند صورت مطرح می‌شود:

الف- انعطاف‌پذیری زمانی: مربوط می‌شود به زمان شروع فعالیت‌ها. این انعطاف‌پذیری به صورت ضمنی در زمانبندی‌ها دیده می‌شود، با توجه به شرایط اجازه می‌دهد تا بعضی از فعالیت‌ها از زمان خود منحرف شوند. این نوع از انعطاف‌پذیری اولین سطح در انعطاف‌پذیری زمانبندی است.

ب- انعطاف‌پذیری ترتیب اجرا: انعطاف‌پذیری ترتیب اجرا که بیشتر با اصطلاح انعطاف‌پذیری ترتیبی بکار می‌رود، یعنی اینکه بتوان ترتیب انجام بعضی از کارها را تغییر داد که به صورت ضمنی مستلزم انعطاف‌پذیری زمانی نیز می‌شود. در حین اجرای توالی کارها، اگر شرایط اگر شرایط ایجاب کند، بعضی از فعالیت‌ها می‌توانند از بعضی دیگر سبقت بگیرند.

⁵ Project Critical Path

⁶ Project Quality Maximization

⁷ Mixed Integer Programming

⁸ Resource Constraint Project Scheduling

ج- انعطاف‌پذیری در تخصیص منابع: زمانی که منابع متعدد باشند اجازه می‌دهد تا فعالیت با منبع دیگری که در ابتدا برنامه‌ریزی شده بود، انجام شود. این انعطاف‌پذیری یک کمک بزرگ است؛ برای مثال زمانی که یک ماشین به خصوص موجود نباشد. این انعطاف‌پذیری به صورت ضمنی مستلزم انعطاف‌پذیری ترتیبی و انعطاف‌پذیری زمانی می‌شود.

د- انعطاف‌پذیری در شیوه اجرا: شیوه‌های اجرا شامل هم‌پوشانی، تغییرات در محدوده پروژه، تغییر در تعدادی از منابع مورد نیاز و ... می‌شود. این انعطاف‌پذیری را می‌توان بسته به موقعیت آن برای مدیریت بهتر وضعیت‌های پیش‌بینی نشده بکار برد.

فی‌الواقع بعضی از روش‌ها برای اختصاص انعطاف‌پذیری بیشتر در مورد زمان شروع، تخصیص درجه آزادی یک فعالیت به خود آن فعالیت و یا تخصیص درجه آزادی به فعالیت‌هایی که مهم‌تر هستند به عنوان مفهوم بافر در زنجیره بحرانی است (Pinedo, 2001; Tavagho & Makuee 2012).

برای اینکه انعطاف‌پذیری ترتیبی بیشتر شود جابجایی گروهی فعالیت‌ها (Goldratt, 1997) و ترتیب نسبی بین فعالیت‌ها (Herroelen et al., 2001) پیشنهاد شده است. این روش‌ها برای طراحی زمانبندی پایدار طراحی شده است.

زمانی که انعطاف‌پذیری مطرح می‌شود این چالش وجود دارد که روش اندازه گرفتن انعطاف به دست آمده چقدر است. بعضی از روش‌ها به اندازه‌گیری مطلوبیت به دست آمده از انعطاف‌پذیری تکیه می‌کنند که از مقایسه کیفیت یک جواب انعطاف‌پذیر با یک جواب غیر منعطف در حضور اختلالات به دست می‌آید. در نتیجه اندازه‌گیری پایداری یک زمانبندی، نشان می‌دهد که یک راه حل منعطف از راه حل غیر منعطف بهتر است یا خیر.

در مورد پایداری باید ذکر شود که ارائه یک تعریف خاص برای پایداری بسیار مشکل است، این مفهوم در حوزه‌های مختلف به صورت متفاوتی تعریف شده است. بعلاوه، اغلب در متون علمی، تعاریف به صورت ضمنی آورده می‌شوند و یا برای کاربرد خاصی تعریف می‌شوند. در نهایت خیلی از محققین ترجیح می‌دهند از مفهوم پایداری در تحقیقاتشان استفاده کنند.

ابتدا باید بر روی یک تعریف توافق کنیم: یک زمانبندی زمانی پایدار است که عملکرد آن به عدم قطعیت داده‌ها حساسیت کمتری داشته باشد. عملکرد در اینجا مفهومی گسترده‌تر از کیفیت جواب برای فرد مسئول دارد؛ عملکرد به طور طبیعی شامل مقدار یک معیار مشخص در جواب می‌شود، و شامل ساختار جواب نیز می‌شود. پایداری زمانبندی یک روش برای توصیف عملکرد است (Artigue et al., 2005).

در ادبیات موضوع، پایداری، به عملکرد یک الگوریتم در صورت وجود عدم قطعیت مطرح می‌شود. آنچه که در مورد پایداری زمانبندی مهم است اندازه گرفتن پایداری است. پایداری زمانبندی در چند سطح تعریف می‌شود:

۱. پایداری یک جواب

۲. پایداری راه حل به جواب رسیدن

پایداری نشان‌دهنده‌ی ظرفیت زمانبندی برای تحمل تقریب (بر روی فرضیات، مدل و داده‌ها) است. پایداری سنجش نتیجه بعد از استفاده از یک رویه در حضور یا ظهور عدم قطعیت است. همچنین پایداری مشخصه‌ی کارایی یک الگوریتم در شرایط عدم قطعیت است (Aloulou et al., 2002; Roy, 2002).

با توجه به مرور ادبیات موجود بهینه‌سازی پایدار، دو رویکرد برای مواجهه با پایداری وجود دارد. رویکرد اول احتمال نقض محدودیت را می‌توان عنوان کرد به این معنی که در آن یک محدودیت خاص به دلیل اختلال در داده، نقض شده است. رویکرد دوم می‌توان به سطح محافظه کاری مدل به این معنی که در آن مقدار تابع هدف تحت تأثیر تغییر در فضای شدنی جواب است (Tabrizi et al., 2016). در این مقاله رویکرد دوم حاکم مورد توجه قرار گرفته است.

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی ذکر شد، انعطاف‌پذیری میزان مجاز برای آزادی در فاز اجرا برای ایجاد زمانبندی نهایی است. در نتیجه، اگر انعطاف‌پذیری بیشتر شود، پایداری زمانبندی نیز بیشتر می‌شود. اگر احتمال رخ دادن همه عدم قطعیت‌ها باشد، اتخاذ هر تصمیمی در فاز اجرا ممکن خواهد بود و این باعث پایین آمدن کیفیت زمانبندی نهایی می‌شود (Sadeghi et al., 2012). یکی دیگر از ویژگی کلیدی این روش این است که می‌توان آن را برای همه عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده انجام داد. اگر عدم قطعیت و یا اختلالات زیاد باشد، امکان اجرای آن قابل تضمین نیست، از این رو باید سعی شود انعطاف‌پذیری به

حد اکثر برسد. در این صورت برای محاسبه پایداری زمانبندی کافی است، میزان انعطاف پذیری زمانبندی را اندازه گیری کنیم (Zhang, et al., 2005).

۲- مواد و روش ها

این تحقیق به مسئله پایداری زمانبندی پروژه تحت محدودیت منابع (RRCPS) می پردازد. در این مدل، منابع پروژه به صورت تجدیدپذیر فرض شده اند. در این قسمت متغیرهای مسئله، پارامترهای استفاده شده در مدل و مفروضات مدل ارائه گردیده و روش حل مدل بحث می شود. در مدل فرض شده است که پروژه از n فعالیت تشکیل شده و توسط شبکه AON و به صورت گراف $G=(V,E)$ نمایش داده می شود که گره ها (V) نشان دهنده فعالیت و یال ها (E) روابط پیش نیازی را بیان می کنند. در این مدل فعالیت ها به صورت تک مد انجام می شود یعنی هر فعالیت فقط در یک حالت اجرایی انجام و تکمیل خواهد شد.

اهداف مدل ارائه شده بدین شرح است:

الف- حداقل سازی حداکثر زمان تکمیل: اولین هدفی که در تابع هدف باید در نظر گرفت کمینه کردن حداکثر زمان اتمام پروژه است. این تابع هدف را می توان با رابطه زیر محاسبه نمود:

$$objective(1) = \min C_{max} \ \& \ C_{max} = \min(\sum_{j=EF_j}^{LF_j} t \cdot X_{jt}) \quad (1)$$

ب- حداکثر سازی پایداری پروژه: از آنجا که در قسمت های قبلی به تفصیل بحث شد پایداری پروژه با شناوری فعالیت ها دارای ارتباط مستقیم است. در واقع شناوری حداکثر زمانی است که یک فعالیت را می توان به تأخیر انداخت بدون اینکه کل پروژه دچار تأخیر شود بنابراین تابع هدف دوم، بیشینه سازی درجه شناوری کل با رعایت حداکثر زمان تکمیل است.

$$objective(2) = \max TF \ \& \ TF = \sum_{j=1}^n TF_j \quad (2)$$

ج- تابع هدف نهایی: همان طور که مشاهده می شود این دو تابع هدف دارای بعد یکسانی هستند بنابراین می توان تابع هدف نهایی را به صورت ترکیب خطی از این دو تابع هدف نوشت که باید کمینه گردد و از آنجا که تابع هدف دوم باید بیشینه گردد، با یک علامت منفی در ترکیب خطی ظاهر خواهد شد.

$$objectiv(total) = \lambda \cdot objective(1) - (1 - \lambda) \cdot objective(2) \Rightarrow objective(total) = \min(\lambda \cdot C_{max} - (1 - \lambda) \cdot TF) \ , \ \lambda \in [0,1] \quad (3)$$

پارامترهای مورد استفاده در مدل به صورت زیر است:

n : تعداد فعالیت ها
 TF_j : شناوری فعالیت j ام
 G : گراف بدون دور که نشان دهنده پروژه است
 λ : یک عدد حقیقی در بازه (۰,۱)

$$X_{jt} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

اگر فعالیت j ام در دوره t نوبتم X_{jt} برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ می باشد.

$$j = 1, 2, \dots, n$$

مدل زمانبندی پایدار بخشی از پروژه پالایشگاه میعانات گازی است به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$\min (\lambda * C_{max} - (1 - \lambda) * TF) \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{t=EF_j}^{LF_j} X_{jt} = 1 \ , \ \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{t=EF_w}^{LF_w} t \cdot X_{wt} \leq \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_j) \cdot X_{jt} \ , \ \forall j, w \in P_j \quad (6)$$

$$C_j = \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t \cdot X_{jt} \ , \ \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$C_{max} \geq C_j, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۸)$$

$$T \leq \sum_{j=1}^n \max\{d_j\} \quad (۹)$$

$$C_{max} \leq T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{jk} \cdot \sum_{b=t}^{t+d_j-1} X_{jb} \leq R_k, \forall k, t \quad (۱۱)$$

$$TF_j = LF_j - EF_j, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۲)$$

$$TF = \sum_{j=1}^n TF_j \quad (۱۳)$$

$$ES_1 = 0 \quad (۱۴)$$

$$EF_i = ES_i + d_j, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (۱۵)$$

$$ES_j = \max\{EF_i\}, \forall i \in P_i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۶)$$

$$LF_n = T \quad (۱۷)$$

$$LS_j = LF_j - d_j, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۸)$$

$$LF_j = \max\{LS_j\}, \forall i \in S_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۹)$$

$$X_{jt} = \{0, 1\}, \forall j, t \quad (۲۰)$$

رابطه (۴) تابع هدف مسئله است که ترکیب خطی حداکثر زمان اتمام پروژه و شناوری کل را نشان می‌دهد که باید کمینه گردد. محدودیت (۵) تضمین می‌کند که فعالیت j در یک زمان بین EF_j و LF_j به اتمام خواهد رسید. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که پیش‌نیازی فعالیت‌ها اعمال گردد. محدودیت (۷) زمان اتمام فعالیت‌ها را محاسبه می‌کند. محدودیت (۸) به محاسبه‌ی حداکثر زمان تکمیل پروژه می‌پردازد. محدودیت (۹) به محاسبه‌ی افق زمانبندی پروژه مربوط می‌شود و محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که برنامه زمانبندی طبق قبل از افق زمانی به اتمام برسد. محدودیت (۱۱) برای اعمال محدودیت‌های منابع تجدید پذیر می‌باشد و باید در هر دوره تمامی فعالیت‌هایی که در آن دوره هنوز در حال اجرا هستند را برای هر منبع در نظر بگیرد. این محدودیت به شکلی در نظر گرفته می‌شود که تا زمانی که در دوره زمانی t هستیم کلیه فعالیت‌هایی که بنا به زمان خاتمه‌شان در t و یا زودتر شروع شده‌اند و هنوز ادامه‌دارند را باید برای محدودیت مربوط به منبع در نظر گرفت. محدودیت (۱۲) درجه شناوری هر کدام از فعالیت‌ها را محاسبه می‌کند و محدودیت (۱۳) به محاسبه‌ی شناوری کل می‌پردازد. محدودیت (۲۰) مقدار متغیر تصمیم را مشخص می‌کند که اگر برابر ۱ باشد فعالیت j ام در زمان t اجرا می‌شود و در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۵) زودترین و دیرترین زمان اتمام فعالیت‌ها را محاسبه می‌کند.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی NP-Hard است که برای آن‌ها الگوریتم‌های کارای قابل اثباتی وجود ندارد. حل اینگونه مسائل نیازمند شیوه‌هایی با مرتبه‌نمایی است. مفهوم فرا ابتکاری گزینه‌های مهمی را برای حل این دسته از مسائل فراهم می‌کند. زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با ابعاد کوچک را می‌توان با روش‌های برنامه‌ریزی خطی و با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط با آن حل نمود اما با افزایش تعداد فعالیت‌ها و بزرگ‌تر شدن شبکه پروژه پیچیدگی محاسباتی آن به شدت به سمت NP-Hard میل می‌کند (Sadeghi et al., 2012). بنابراین برای حل مسئله با ابعاد بزرگ و واقعی از روش‌های حل فرا ابتکاری استفاده می‌شود این روش‌ها نسبت به روش‌های حل دقیق و بسیاری از روش‌های ابتکاری از کارایی بالاتری برخوردارند. این کارایی هم در زمینه زمان حل مسئله (به دلیل وسعت فضای جستجوی حل بهینه) و هم ریسک جواب نزدیک به بهینه خود نمایی می‌کند. در این تحقیق از روش بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است.

مراحل الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات به شرح زیر است:

۱- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها

۲- تعیین بهترین مقدار شخصی ($P_i(t)$) و بهترین مقدار جمعی ($G(t)$)

۳- به روز رسانی سرعت و موقعیت

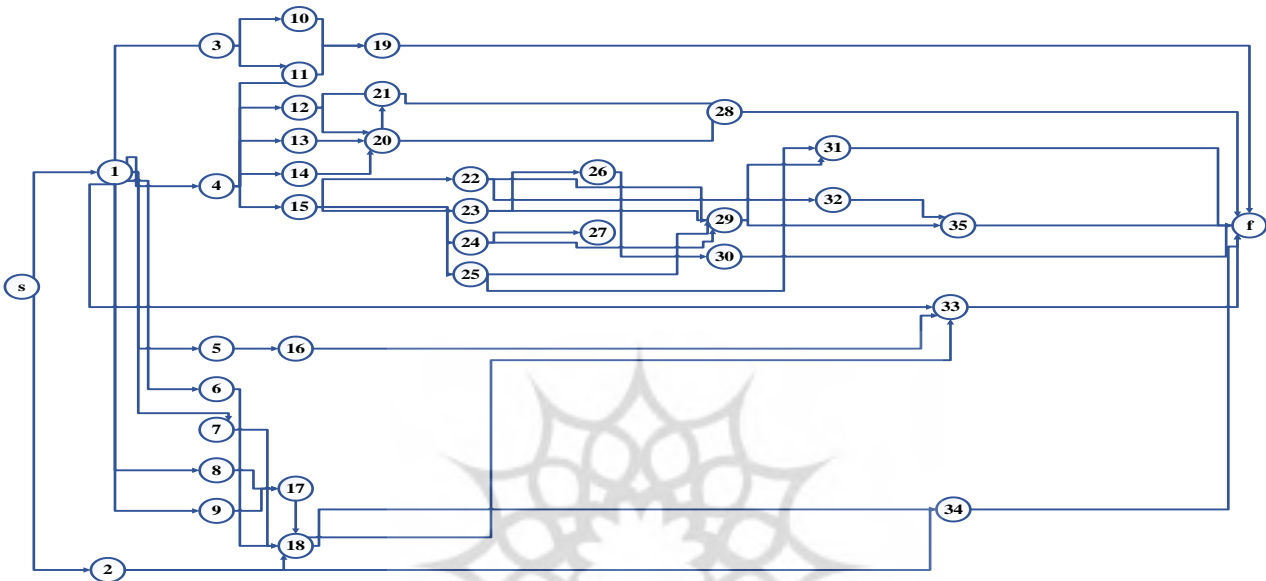
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + r_1 \cdot c_1 \cdot (p_i(t) - x_i(t)) + r_2 \cdot c_2 \cdot (G(t) - x_i(t))$$

۴- در صورت برآورده نشدن شرایط توقف به قدم ۲ بازمی‌گردیم

۵- پایان

در شکل زیر شبکه AON بخشی از فعالیت های یک پروژه پالایشگاهی (پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس) نشان داده شده است. اطلاعات و داده‌های این قسمت با کمک خبرگان به دست آمد و در شکل ۱ شبکه پیش‌نیازی فعالیت‌های این بخش از پروژه نشان داده شده است:



شکل شماره (۱): شبکه پیش‌نیازی فعالیت‌های بخشی از پروژه احداث پالایشگاه میعانات گازی

همان طور که مشاهده می‌شود این پروژه دارای ۳۵ فعالیت بوده و فعالیت‌های S و f که شماره گذاری شده‌اند فعالیت‌های موهومی بوده و دارای مدت زمان انجام صفر می‌باشند و به ترتیب بیانگر شروع و پایان پروژه هستند. در این مسئله فقط محدودیت منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است و فرض شده است منابع تجدید ناپذیر محدودیتی برای پروژه ایجاد نمی‌کنند. همان طور که از اسم منابع تجدیدپذیر بر می‌آید از دوره‌ای به دوره بعد قابل تجدید هستند و طی مصاحبه با خبرگان مقدار بیشینه منابع و میزان مصرف منابع توسط هر یک از فعالیت‌ها مشخص گردید. در این پروژه دو منبع نیروی انسانی و تجهیزات در نظر گرفته شده است. همچنین فرض گردید فعالیت‌های پروژه بدون انقطاع می‌باشند یعنی با شروع یک فعالیت تا انتهای آن فعالیت به صورت پیوسته ادامه می‌یابد. با توجه به واقعی بودن محیط اجرای پروژه و با توجه به وجود تحریم‌ها و عدم قطعیت‌ها در منابع لزوم زمانبندی پایدار بیشتر احساس می‌شود. مسئله با وجود این مفروضات مدل‌سازی گردید.

جدول شماره (۱): لیست فعالیت‌های مسئله

شماره فعالیت	مدت زمان انجام فعالیت	فعالیت‌های پیش‌نیاز	منبع	
			R ₁	R ₂
S	۰	—	۰	۰
۱	۱۵	S	۲۰	۲۳
۲	۴۵	S	۴۱	۳۰
۳	۳۰	۱	۲۷	۲۳

۴	۱۵	۱	۳۳	۲۹
۵	۶۰	۱	۳۸	۳۴
۶	۲۵	۱	۳۲	۲۲
۷	۱۵	۱	۲۳	۱۵
۸	۳۰	۱	۳۴	۱۸
۹	۳۰	۱	۳۶	۱۹
۱۰	۶۰	۳	۵۹	۴۷
۱۱	۴۵	۴-۳	۴۴	۳۸
۱۲	۲۴	۱۱-۴	۳۹	۱۸
۱۳	۴۵	۴	۳۷	۲۶
۱۴	۱۵	۴	۲۱	۱۶
۱۵	۱۵	۴	۲۹	۲۵
۱۶	۴۵	۵	۳۹	۴۰
۱۷	۲۴	۸-۲-۱	۳۵	۳۴
۱۸	۴۳۹	۷-۶-۱	۹۷	۷۸
۱۹	۱۵	۱۴-۱۳-۱۲	۳۴	۱۴
۲۰	۱۵	۱۹-۱۰	۱۲	۱۶
۲۱	۴۵	۱۹-۱۲	۲۳	۴۵
۲۲	۴۶	۱۵	۱۹	۲۱
۲۳	۳۰	۱۵	۳۴	۲۳
۲۴	۴۵	۲۳-۱۵	۲۳	۱۳
۲۵	۲۵	۲۴-۱۵	۲۷	۲۳
۲۶	۶۱	۲۴	۴۳	۳۴
۲۷	۴۵	۲۳	۲۳	۱۳
۲۸	۲۵	۲۱-۱۹	۱۸	۱۲
۲۹	۴۸۵	۲۵-۲۴-۲۳-۲۲	۱۲۰	۷۹
۳۰	۱۵	۲۹-۲۶	۲۳	۱۲
۳۱	۲۵	۲۹-۲۷-۲۵	۳۶	۲۲
۳۲	۳۰	۲۹-۲۲	۱۹	۲۱
۳۳	۳۰	۱۸-۱۶	۲۱	۲۸
۳۴	۴۵	۱۸-۲	۶۵	۴۵
۳۵	۲۳۵	۲۹	۹۵	۷۶
f	.	-۳۲-۳۱-۲۷-۲۰ ۲۵-۳۵-۳۳	.	.

۳- نتایج و بحث

همان طور که در قسمت های قبل بیان شد از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات برای حل مدل ارائه شده استفاده گردید. این الگوریتم در محیط نرم افزار MATLAB version 7.12.0635(2011a) کد نویسی شد و با استفاده از لپ تاپ با پردازنده Intel Core i7- 2630QM2GHZ اجرا گردید. در این بخش ابتدا توضیحاتی راجع به داده های ورودی الگوریتم و نتایج به دست آمده ارائه خواهد شد سپس اعتبارسنجی روش های حل بحث می شود.

داده های ورودی شامل دو بخش داده های عمومی مربوط به مسئله و پارامترهای کنترلی الگوریتم PSO می باشد. داده های عمومی شامل پیش نیاز های فعالیت، پس نیازی های فعالیت، مدت زمان انجام فعالیت، میزان منابع مورد نیاز برای هر فعالیت، تعداد فعالیت ها، حداکثر میزان منابع در دسترس و تعداد منابع مورد نیاز است.

پارامتر های کنترلی الگوریتم PSO شامل حداکثر تعداد تکرار، اندازه جمعیت، ضریب اینرسی، ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی است.

رویکرد تنظیم پارامترها به این صورت بوده است که ابتدا مقدار اولیه از مقالات و پژوهش های صورت گرفته در مرور ادبیات انتخاب می شود و سپس با روش سعی و خطا بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و استفاده می شود. پس از به دست آوردن مقدار اولیه در هر مرحله یک مقدار انتخاب می شود و در دامنه های تعیین شده تغییرات اعمال گردید و برای هر کدام از دامنه ها الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا شد و با توجه به درصد انحراف از جواب بهینه و شیب همگرایی به سمت جواب نهایی پارامترها انتخاب شدند. بدین منظور برای به دست آوردن مقدار اولیه پارامترها برای الگوریتم PSO از منبع (Zhang et al., 2005) استفاده شد. پارامتر های نهایی به همراه داده های عمومی مربوط به مسئله در جدول ۲ آمده است.

جدول شماره (۲): پارامترهای الگوریتم و داده های عمومی مسئله

پارامتر	مقدار داده و یا روش تولید داده	داده های عمومی مسئله	
مجموعه فعالیت پیش نیاز	P_j , طبق اطلاعات جدول ۱	داده های عمومی مسئله	
مجموعه فعالیت پس نیاز	S_j , طبق اطلاعات جدول ۱		
مدت زمان انجام فعالیت	d_j , طبق اطلاعات جدول ۱		
میزان منابع مورد نیاز برای هر منبع	$R1$ & $R2$, طبق اطلاعات جدول ۱		
تعداد فعالیت	۳۵		
حداکثر منابع در دسترس	$Max(R1)=100$ & $max(R2)=150$		
تعداد منابع مورد نیاز	۲		
حداکثر تعداد تکرار	۲۰۰		پارامتر های کنترلی الگوریتم PSO
اندازه جمعیت	۳۰		
ضریب اینرسی	۰/۳		
ضریب یادگیری شخصی	۰/۶		
ضریب یادگیری جمعی	۰/۶		
NFE	۶۰۰۰		

در نهایت پس از اتمام اجرای الگوریتم، مقدار تابع هدف نهایی^۹ به همراه لیست نهایی انجام فعالیتها به همراه زمان شروع فعالیتها به دست می آید. با توجه به منبع شماره (Khaji & Shoghaee, 2014) برای $\lambda = 0/99$ و $\lambda = 0/97$ الگوریتمها اجرا شد و نتایج به دست آمده در دو جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که پس از اجرای ۱۲ مرتبه الگوریتمها، بهترین جواب انتخاب شده است، البته واریانس این نتایج بسیار کم بوده به صورتی که واریانس برای نتایج جدول ۳ $\lambda = 0/99$ (برابر ۱/۸۷ و برای جدول ۴ $\lambda = 0/97$) برابر ۲/۲۳ می باشد.

⁹ $Objective(total) = \min(\lambda.C_{max} - (1 - \lambda).TF)$, $\lambda \in [0,1]$

جدول شماره (۴): نتایج به دست آمده به ازای $\lambda = 0/97$

جواب به دست آمده از الگوریتم

$$Objective(total)=516/02$$

$$Cmax=1514$$

$$TF=31752$$

$$Running\ Duration(s)=83/26$$

جدول شماره (۳): نتایج به دست آمده به ازای $\lambda = 0/99$

جواب به دست آمده از الگوریتم

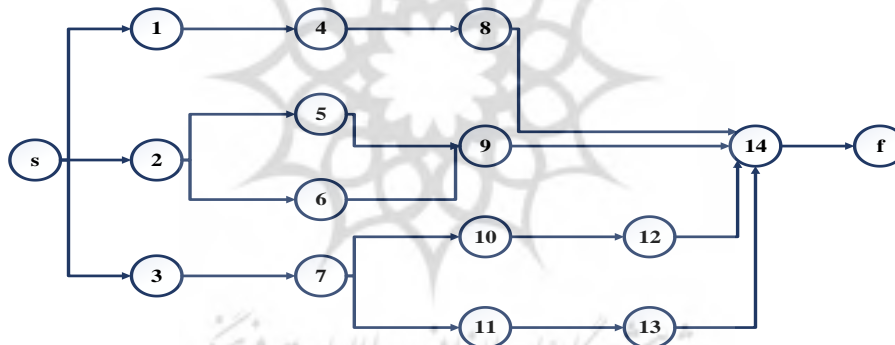
$$Objective(total)=1158/9$$

$$Cmax=1454$$

$$TF=28146$$

$$Running\ Duration(s)=80/6$$

به منظور اثبات کارایی و کارآمدی الگوریتم‌های ارائه شده چهار مسئله با ابعاد کوچک‌تر انتخاب گردید پس از حل دقیق آن توسط نرم افزار Lingo 8، جواب به دست آمده با جواب به دست آمده از الگوریتم‌ها مقایسه گردید. برای روشن تر شدن روند اعتبارسنجی یکی از ۴ مسئله را به تفصیل در ادامه شرح خواهیم داد. این مسئله از منبع شماره (Bhaskar, 2011) استخراج گردید و شامل ۱۴ فعالیت می‌باشد. این پروژه دارای ۳ نوع منبع تجدید پذیر می‌باشد و حداکثر مقدار موجود از هر کدام به ترتیب ۲، ۸ و ۹ واحد می‌باشد. شکل ۲ شبکه پروژه نمونه و جدول ۵ نیز اطلاعات مربوط به منابع مورد نیاز هر فعالیت و مدت زمان انجام فعالیت را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۲): گراف شبکه مربوط به مسئله نمونه

جدول شماره (۵): اطلاعات مربوط به منابع و مدت زمان فعالیت‌های مسئله نمونه

شماره فعالیت	مدت زمان انجام فعالیت	تعداد منابع مورد نیاز برای هر فعالیت		
		R1	R2	R3
S	0	0	0	0
۱	۲۰	۲	۳	۱
۲	۱۵	۲	۲	۱
۳	۱۳	۴	۳	0
۴	۲۸	۵	۳	0
۵	۱۵	۴	۲	0
۶	۱۲	۲	۱	0

۷	۱۰	۲	۲	۱
۸	۲۴	۴	۳	۰
۹	۱۸	۳	۲	۱
۱۰	۱۰	۲	۲	۱
۱۱	۱۲	۲	۲	۱
۱۲	۶	۲	۰	۱
۱۳	۸	۲	۲	۰
۱۴	۱۰	۵	۵	۲
F	۰	۰	۰	۰

با اعمال مفروضات مدل برای مسئله ذکر شده و حل آن توسط نرم افزار Lingo 8، جواب‌های به دست آمده و مدت زمان اجرای نرم افزار به ازای $\lambda = 0.99$ و $\lambda = 0.97$ در جدول ۶ نشان داده شده است. سپس این مسئله با الگوریتم PSO پیشنهادی نیز حل شد و جواب‌ها به دست آمده به جدول ۶ اضافه گردید.

جدول شماره(۶): جواب‌های به دست آمده برای مسئله نمونه

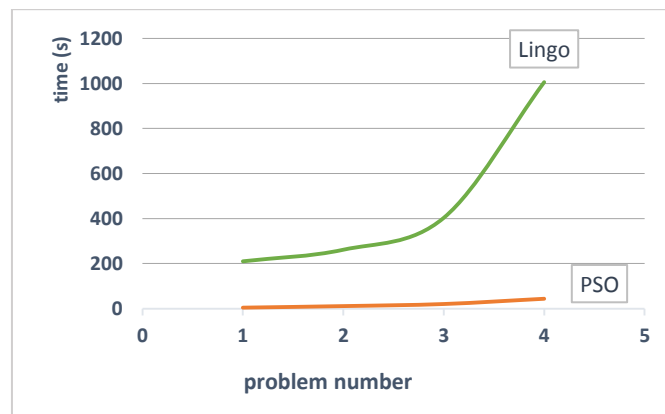
$\lambda = 0.99$					$\lambda = 0.97$				
روش حل	Objective(total)	Cmax	TF	t(s)	روش حل	Objective(total)	Cmax	TF	t(s)
روش دقیق (LINGO 8)	۷۷/۱۳	۸۰	۱۸۹	۲۵۹/۱۱	روش دقیق (LINGO 8)	۷۱/۹۳	۸۰	۱۸۹	۲۶۱/۹۴
الگوریتم PSO پیشنهادی	۷۹/۳۱	۸۲	۱۸۷	۶/۴۷	الگوریتم PSO پیشنهادی	۷۳/۹۳	۸۲	۱۸۷	۵/۹۶

همان طور که مشاهده می شود زمان به دست آوردن جواب از حل دقیق مسئله بسیار بیشتر از زمان به دست آوردن جواب توسط الگوریتم است. در جدول نتایج به دست آمده از حل این مسئله و سه مسئله دیگر استخراج شده از منابع (Issi et al., 2007; Devonder et al., 2010; Ke et al., 2010) نشان داده شده است. در نمودار ۱ اختلاف روند افزایش زمان دست یابی به جواب توسط روش دقیق و روش‌های فرا ابتکاری نشان داده شده است.

جدول شماره(۷): نتایج به دست آمده برای مسائل مختلف

$\lambda = 1$						
روش حل						
شماره مسئله	تعداد فعالیت	الگوریتم PSO پیشنهادی		روش دقیق (Lingo 8)		درصد انحراف
		Objective(total)	t(s)	Objective(total)	t(s)	
۱	۱۰	۵۸۵	۳/۹۸	۱۳	۱۷۱/۳۴	۲/۰۹
۲	۱۴	۸۲	۵/۱۲	۸۱	۲۶۱/۵۴	۱/۲۵
۳	۱۶	۸۴	۶/۷۹	۸۳	۴۰۳/۳۷	۱/۲

۴	۲۰	۶۵۳	۶۲/۴۹	۶۳۹	۱۰۰۵/۹۱	۲/۱۹
میانگین درصد انحراف						۱/۶



نمودار شماره (۱): زمان‌های به دست آمده از روش‌های مختلف

همان طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود میانگین درصد انحراف جواب‌های الگوریتم PSO پیشنهادی از جواب دقیق مسئله به ترتیب برابر ۱/۶۸۲۵ می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار ۱ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد فعالیت‌های مسئله (پیچیدگی مسئله) زمان به جواب رسیدن الگوریتم PSO با شیب بسیار کم (نزدیک صفر) افزایش می‌یابد اما زمان به جواب رسیدن برای روش دقیق (Lingo 8) به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این درصد انحراف نشان‌دهنده اختلاف ناچیز جواب‌های الگوریتم پیشنهادی با جواب دقیق مسئله است و این در حالی است که با افزایش تعداد فعالیت مسئله، زمان رسیدن به جواب توسط الگوریتم پیشنهادی با شیب بسیار کم، افزایش می‌یابد اما زمان رسیدن به جواب روش دقیق با شیب نمایی افزایش می‌یابد. این مشاهده نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم پیشنهادی الگوریتمی کارا و کاربردی می‌باشند و به سادگی می‌تواند توسط مدیران پروژه در پروژه‌های واقعی مورد استفاده قرار گیرند.

منابع -

- 1- Damghani, k., Tavakoli moghadam, R., & Tabari, M. (2011). Solving the problems of Scheduling projects with constraint resources by improved ant algorithm, *Industrial Engineering*, 45 (1), 59 ° 69.
- 2- Aliahmadi A., Jafari M., Mortaji T., Nozari H. (2013). Improve prediction of Project completion time Based Earned Value Management System, *Journal of Tomorrow management*, 37, 5-19.
- 3- Basaghzade I., Hejazi S., Amirmosa E. (2010). Development of project scheduling model with objectives of completion time and rebostness of scheduling, *Industrial Engineering*, 44 (1), 13 -24.
- 4- Wang C., Bingqi J., Li G., Zhe T., Jide N., Siwei L. (2016). Robust scheduling of building energy system under uncertainty, *Journal of Applied Energy*, 167, 366-376.
- 5- Ke H., Wang L., Huang H. (2015). An uncertain model for RCPSP with solution robustness focusing on logistics project schedule, *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 3, 71-83.
- 6- Angela H. and Chiu-Cheng C. (2008). A Memetic Algorithm for Maximizing Net Present Value in Resource Constrained Project Scheduling Problem, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2041-2049.
- 7- Wei1 S. (2013), Project Scheduling Under Resource Constraints: A Recent Survey, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2, 1-20.
- 8- Herroelen W., and Demeulemeester E., and De Reyck, B. (1999). *A Classification Scheme for Project Scheduling (Project Scheduling-Recent Models, Algorithms and Application)*, Boston-Kluwer Academic.

- 9- Vanhoucke M., Deblès D. (2011). The impact of various activity assumption on the lead time and resource utilization of resource-constrained project, *Computer & Industrial Engineering*, 54, 140-154.
- 10- AL-Fawzan M.A. and Haouari M. (2004). A Bi-Objective Model for Robust Resource-Constrained Project Scheduling, *International Journal of Production Economics*, 18, 1-13.
- 11- Seifi M. and Tavakkoli-Moghaddam R. (2008). A new bi-objective model for a multi-mode resource constrained project scheduling problem with discount cash flows and four payment models, *IJE Transactions A: Basics*, 21, 347-355.
- 12- Pinedo M. (2001). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice Hall, 2nd edition, Englewood Cliffs.
- 13- Tavagho M., Makuee A. (2012). Provide a method for determining the buffer size on the critical chain scheduling (Case Study: Company Soliran), *Journal of Industrial Management (IM)*, 17, 1-22.
- 14- Goldratt E.M. (1997). *Critical Chain*, The North River Press Publishing Corporation, Great Barrington.
- 15- Herroelen W. and Leus R. (2001). On the merits and pitfalls of critical chain scheduling, *Journal of Operations Management*, 19, (5), 559° 577.
- 16- Artigue C., Billaut J.C. and Esswein C. (2005). Maximization of solution flexibility for robust shop scheduling, *European Journal of Operational Research*, 165, (2), 314° 328.
- 17- Aloulou M.A., Portmann M.C. and Vignier A. (2002). Predictive-reactive scheduling for the single machine problem, *Proceedings of the 8th International Workshop on Project Management and Scheduling*, 39° 42.
- 18- Roy B. (2002). Robustesse de quoi et vis-à-vis de quoi mais aussi robustesse pourquoi en aide à la d'cision?, *Newsletter of the European Working group "Multicriteria Aid for Decisions"*, 3, (6), 1° 6.
- 19- Tabrizi B., Ghaderi S.F. (2016). A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement, *Computers & Industrial Engineering*, In Press, Accepted Manuscript.
- 20- Sadeghi A., Safi A., Barzinpur F. (2012). Project scheduling problem solving with resource constraints multimode (MRCPSP) By Bees algorithm, *Journal of Industrial Management (IM)*, 15, 2-4.
- 21- Zhang H., Li H., Huang F. (2005). Particle swarm optimization-based schemes for resource constraint project schedule Elsevier *Automation in Construction*, 14, 393-404.
- 22- Khaji M., Shoghaee R. (2014). Robust approach to supply network design with an emphasis on environmental uncertainty, *Journal of Tomorrow management*, 37, 171-188.
- 23- Bhaskar, T., Manabendra N., Asim K. (2011). A heuristic method for RCPSP with fuzzy activity time, *European Journal of Operational Research*, 208, 57-66.
- 24- Issi H., Bazgan C. (2007). Min-max and min-max regret versions of some combinatorial optimization problems: a survey, *Annales du Lamsade Paris*, 1° 32.
- 25- Devonder S.V., Ballestin F., Demeulemeester E., Herroelen, W. (2010). Heuristic procedures for reactive project scheduling, *Computer & Industrial Engineering*, 52, 11-28.
- 26- Ke H., Liu B. (2010). Project scheduling problem with mixed uncertainty of randomness and fuzziness, *European Journal of operational Research*, 83, 135-147.

