

## موازنه زمان - هزینه برای بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار با الگوهای پرداخت هزینه و محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی (مطالعه موردی: بخش محدودی از پروژه احداث پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس)

مصطفی زارعی<sup>۱</sup>، حسینعلی حسن‌پور<sup>۲</sup>

**چکیده:** گزینه‌های انتخابی برای زمان‌بندی ترتیب فعالیت‌های پروژه برای اتمام پروژه، جواب منحصر به فرد ندارد، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها را شامل می‌شود که هیچ‌کدام بر دیگری ترجیح ندارند؛ بنابراین، انتخاب بهترین گزینه برای انجام دادن فعالیت‌ها مهم است، به طوری که هزینه و زمان انجام دادن پروژه، متناسب با دیدگاه پیمانکار یا کارفرما باشد. در نتیجه، در این تحقیق فعالیت‌های بخشی از پروژه احداث پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس شامل ۳۵ فعالیت و دارای دو منابع تجدیدپذیر شامل نیروی انسانی و ماشین‌آلات به عنوان مسئله نمونه انتخاب شد و برای حل آن یک مدل ریاضی زمان‌بندی پروژه با اهداف چندگانه بر مبنای الگوهای پرداخت هزینه و ملاحظه محدودیت منابع ارائه شد. از آنجاکه این مسئله از جمله مسائل بهینه‌سازی ترکیبی در خانواده مسائل NP-hard محسوب می‌شود، برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه NSGA-II و MOPSO برای زمان‌بندی پروژه استفاده شد و عملکرد الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌های مقایسه‌ای مقایسه شدند. در نهایت، برای اعتبارسنجی، جواب‌های الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های دقیق از نرم‌افزار GAMS مقایسه شد که نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی کارا و همگرا به جواب بهینه است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم‌های تکاملی، الگوهای پرداخت هزینه، حداکثر کردن ارزش خالص فعلی، زمان‌بندی پروژه، شاخص‌های مقایسه‌ای.

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷

نویسنده مسئول مقاله: مصطفی زارعی

Email: mozare66@yahoo.com

### مقدمه

جنبه‌های مالی در زمان‌بندی فعالیت پروژه، اهمیت و نقش زیادی دارند به طوری که شکست یا موفقیت بیشتر پروژه‌ها به آن وابسته است. جنبه‌های مالی در مسائل زمان‌بندی پروژه، با جریان‌های نقدی ورودی و خروجی متناظر با فعالیت‌ها یا رویدادهای پروژه مشخص می‌شود (سیف و توکلی‌مقدم، ۲۰۰۸). از معمولی‌ترین اهداف مالی، بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی<sup>۱</sup> (NPV) خالص جریان نقدی است. مسئله زمان‌بندی پروژه با معیار حداکثرکردن خالص ارزش فعلی، عبارت است از: زمان‌بندی فعالیت‌های یک پروژه در حضور محدودیت منابع، محدودیت‌های حاکم بر پروژه از جمله محدودیت روابط پیش‌نیازی به گونه‌ای که ارزش خالص فعلی جریان‌های نقدی کل پروژه حداکثر شود (شوشان و چانگ-جوآنگ، ۲۰۰۸). مسئله زمان‌بندی پروژه از دو دیدگاه قابل بررسی است، یک دیدگاه، کارفرما و دیدگاه دیگر، پیمانکار است (زنگ ون و یو، ۲۰۰۸). زمان‌بندی به موقع جریان‌های نقدی ورودی (پرداخت‌های کارفرما) و خروجی (هزینه فعالیت‌ها) پروژه می‌تواند نقش مؤثری در افزایش سوددهی یک پروژه داشته باشد (ریفات و بتمیر، ۲۰۱۲).

### پیشینه پژوهش

در مسائل زمان‌بندی پروژه، توابع هدف مختلفی در نظر گرفته می‌شود که از معمولی‌ترین آن‌ها، مسئله حداقل کردن زمان اجرای پروژه است (انگل و چپو-چنگ، ۲۰۰۸). از دیگر اهداف می‌توان به حداکثرکردن ارزش خالص فعلی پروژه (زنگ ون و یو، ۲۰۰۸) جریان نقدی محدودیت‌های بودجه اشاره کرد و تسطیح منابع را در کنار تابع هدف‌های سنتی کاهش زمان اتمام پروژه مطرح کرد (ایکسونگ و کانگ، ۲۰۰۸). هوشیار و همکاران (۲۰۰۸) برای حل مسئله موازنه بین زمان و هزینه از الگوریتم ژنتیک بهره بردند. عملگر جهش مورد استفاده در این الگوریتم هوشمند است و براساس ویژگی‌های هر پروژه عمل می‌کند. ژو (۲۰۱۱) از الگوریتم کلونی مورچگان برای موازنه هزینه و زمان بهره گرفت. مسئله بررسی شده به صورت گسسته چندحالتی در نظر گرفته شد و تابع هدف به صورت مجموع هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم در نظر گرفته شد. علاءدینی و همکاران (۲۰۱۱) برای حل مسئله موازنه زمان-هزینه با در نظر گرفتن ارزش پول در گذر زمان و اهمیت تحلیل جریان نقدی تنزیل شده برای مالکان و پیمانکاران، مدل بهینه‌سازی کلونی مورچگان چندهدفه را برای حداقل‌سازی هزینه مستقیم پروژه، با محاسبه جریان نقدی تنزیل شده

1. Net Present Value

ارائه دادند. چن و زنگ (۲۰۱۰) برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالتی تصادفی با جریان‌های نقدی تنزیل‌شده از الگوریتم کلونی مورچگان در کنار شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده کردند. اشتهاوردیان و همکارانش (۲۰۰۹) رویکرد جدیدی برای حل مسئله موازنه زمان هزینه در شرایط نداشتن قطعیت ارائه دادند. در این رویکرد، که ترکیبی از روش مجموعه‌های فازی و الگوریتم ژنتیک است، از اعداد فازی برای تعیین زمان و هزینه فعالیت‌ها در شرایط نداشتن قطعیت و به‌صورت عدد مثلثی فازی استفاده شد. این اعداد فازی برای حل یک مدل چندهدفه فازی ناپیوسته، با فضای جواب تقریباً بزرگ، توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه به‌کار گرفته شد. ژنگ و لی (۲۰۱۰) برای حل مسئله موازنه زمان- هزینه و جست‌وجوی جواب بهینه پارتویی، رویکردی ترکیبی مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه ذرات پراکنده ارائه دادند. در این الگو، میزان چگالی نقاط در مرز پارتو و روش انتخاب چرخه شانس در راستای تعیین بهینه کلی برای راهنمایی بهتر ذرات، ترکیب شدند. گو و همکارانش (۲۰۰۹) برای بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌ای و حداکثرکردن ارزش خالص فعلی پروژه در معادن زغال‌سنگ در چین، از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات پراکنده و بهینه‌سازی تعدیل‌شده ذرات پراکنده استفاده کردند. فرایند بهینه‌سازی دارای دو مرحله است که در مرحله اول، پارامترهای زمان هر فرایند و گراف شبکه براساس روش پرت و بر پایه داده‌های خام موجود به‌دست آمد و در مرحله دوم ارزش خالص فعلی براساس گراف ترسیم‌شده شبکه، بهینه‌سازی می‌شود. خلیل‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) یک الگوریتم فراابتکاری براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح‌شده ارائه کردند که از قاعده‌ای اصلاح‌شده برای جابه‌جایی ذرات در مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالتی برای به حداقل رساندن وزن کل هزینه جریمه تأخیر منابع استفاده می‌کند. چن و همکارانش (۲۰۱۰) برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالتی تصادفی با جریان‌های نقدی تنزیل‌شده برای حداکثرکردن ارزش خالص فعلی مورد انتظار برای جریان نقدی پروژه از الگوریتم کلونی مورچگان در کنار شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده کردند. در این روش، گروهی از مورچگان برای تعیین زمان‌بندی به‌صورت تکراری و بر پایه فرومون‌ها و روش ابتکاری هزینه تخفیف مورد انتظار تنظیم می‌شوند و از روش مونت‌کارلو برای ارزیابی عملکرد زمان‌بندی استفاده می‌شود.

ون هوک (۲۰۱۰) برای مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با جریان‌های نقدی با تخفیف و فرض ثابت‌بودن پرداخت اجرای فعالیت‌های پروژه، یک الگوریتم جست‌وجوی پراکنده توسعه داد تا ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت اولویت و منابع تجدیدپذیر به حداکثر برسد (خلیل‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱).

در جدول ۱، پیشینه تحقیق زمان‌بندی پروژه با اهداف چندگانه بر مبنای الگوهای پرداخت هزینه و ملاحظه محدودیت منابع آورده شد.

جدول ۱. پیشینه تحقیق زمان‌بندی پروژه با اهداف چندگانه بر مبنای الگوهای پرداخت هزینه

ردیف	مؤلف	اهداف	روش حل زمان‌بندی	سال
۱	هوشیار و همکاران	موازنه بین زمان و هزینه	الگوریتم ژنتیک	۲۰۰۸
۲	اشتهاردیان و همکارانش	موازنه زمان - هزینه در شرایط نداشتن قطعیت	ترکیبی از روش مجموعه‌های فازی و الگوریتم ژنتیک	۲۰۰۹
	گو و همکارانش	زمان‌بندی پروژه‌ای و حداکثرکردن ارزش خالص فعلی پروژه	الگوریتم بهینه‌سازی ذرات پراکنده و بهینه‌سازی تعدیل‌شده ذرات پراکنده	۲۰۰۹
۴	چن و زنگ	زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالتی تصادفی با جریان‌های نقدی تنزیل‌شده	الگوریتم کلونی مورچگان در کنار شبیه‌سازی مونت‌کارلو	۲۰۱۰
۵	چن و همکارانش	زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالتی تصادفی با جریان‌های نقدی تنزیل‌شده برای حداکثرکردن ارزش خالص فعلی مورد انتظار	الگوریتم کلونی مورچگان در کنار شبیه‌سازی مونت‌کارلو	۲۰۱۰
۶	ژنگ و لی	مسئله موازنه زمان - هزینه	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ذرات پراکنده	۲۰۱۰
۷	ون هوک	زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با جریان‌های نقدی با تخفیف به‌منظور به‌حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی پروژه	الگوریتم جست‌وجوی پراکنده	۲۰۱۰
۸	ژو	موازنه هزینه و زمان	الگوریتم کلونی مورچگان	۲۰۱۱
۹	علا‌دینی و همکاران	موازنه زمان - هزینه با در نظر گرفتن ارزش پول	الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه	۲۰۱۱
۱۰	خلیل‌زاده و همکاران	زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالتی برای به‌حداقل رساندن وزن کل هزینه جریمه تأخیر	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح‌شده	۲۰۱۲

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مسئله مورد نظر ارائه دادیم که برای مدل‌سازی مسئله فرض‌های زیر مد نظر قرار گرفتند و عبارت‌اند از: ۱. فعالیت‌های مسئله غیر قابل انقطاع‌اند. ۲. با توجه به محدودیت منابع در این پروژه، فقط منابع تجدیدپذیر به‌صورت قطعی است و مقدار آن‌ها مشخص است. برای منابع تجدیدناپذیر در این پروژه محدودیتی وجود ندارد. ۳. طول دوره انجام‌دادن فعالیت‌ها قطعی است. ۴. نیازمندی فعالیت‌ها به منابع در زمان انجام‌دادن فعالیت ثابت

است. ۵. تعداد پرداخت‌های مستمر در مذاکره با هر دو طرف قرارداد قبل از شروع پروژه مشخص می‌شود. ۸. مقدار هر پرداخت با هزینه‌های رخ داده‌شده تا زمان پرداخت تعیین می‌شود. متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در مدل، در زیر خلاصه می‌شوند:

$ST_j$ : زمان شروع فعالیت $j$ ام	$V$ : مجموعه رأس‌های گراف (گره‌ها)
$FT_j$ : زمان تکمیل فعالیت $j$ ام	$n$ : تعداد فعالیت‌ها
$EF_j$ : زودترین زمان تکمیل فعالیت $j$ ام	$G$ : گراف غیر مدور نمایشگر پروژه
$LF_j$ : دیرترین زمان تکمیل فعالیت $j$ ام	$d_j$ : زمان انجام دادن فعالیت $j$ ام
$R$ : تعداد منابع تجدیدپذیر	$CF_j^-$ : جریان نقدی منفی
$R_k$ : تعداد واحدهای در دسترس منبع $k$ ام	$CF_j^+$ : جریان نقدی مثبت
$r_{jk}$ : تعداد واحدهای مورد نیاز منبع $k$ ام برای فعالیت $j$ ام	$P_j$ : مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیازی فعالیت $j$ ام
$NPV$ : ارزش فعلی خالص پروژه	$C_{max}$ : حداکثر زمان تکمیل پروژه
$K$ : تعداد پرداخت‌های مستمر	$P_k$ : مقدار پرداخت $k$ ام
	$U$ : مقدار کل پرداخت‌ها
$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر پرداخت } k \text{ برای فعالیت } j \text{ انجام شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$	$X_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{اگر فعالیت } i \text{ در } t \text{ زمان به اتمام برسد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$T$ : افق زمان‌بندی پروژه (حداکثر زمانی که پروژه می‌تواند به انجام برسد. در اینجا،  $C_{max}$  از  $T$  کوچک‌تر است)  
 $\alpha$ : میزان تنزیل، زمانی که فعالیتی دیرتر از زودترین زمان پیش‌بینی شده ( $EF$ ) تمام شود از ارزش آن با یک میزان ویژه کم می‌شود یا به‌صورت هزینه اضافه می‌شود.

### مدل ریاضی پیشنهادی

$$\max NPV \quad (1)$$

$$st: \min c = \max \left( \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t X_{jt} \right) \quad (2)$$

$$\sum_{t=EF_j}^{LF_j} t x_{jt} \leq \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_j) x_{jt} \quad \forall j, w \in p_j \quad (3)$$

$$C_j = \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t X_{jt} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$C \max \geq C_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$T \leq \sum_{j=1}^n \max(d_j) \quad (۶)$$

$$C \max \leq T \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{jk} \sum_{b=1}^{t+d_j-1} X_{jb} \leq R_k, \forall_{k,t} \quad (۸)$$

$$ES_i = 0 \quad (۹)$$

$$EF_i = ES_i + d_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (۱۰)$$

$$ES_j = \max\{EF_i\} \forall_i \in p_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۱)$$

$$d_{n+1} = 0 \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{jk} = 1, k = 1, 2, \dots, k-1 \quad (۱۳)$$

$$\sum_{k=1}^k y_{jk} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۴)$$

$$\sum_{k=1}^k P_k = u, k = 1, 2, \dots, k \quad (۱۵)$$

$$P_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, k \quad (۱۶)$$

رابطه ۱ تابع هدف اول، بیانگر مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار از اجرای پروژه است و باید حداکثر شود که طبق یکی از شیوه‌های پرداخت انجام می‌گیرد. رابطه ۲ تابع هدف دوم نشانگر حداکثر زمان تکمیل فعالیت  $n+1$  است که باید کمینه شود. رابطه ۳ نشانگر روابط پیش‌نیازی فعالیت‌هاست. رابطه ۴ زمان تکمیل فعالیت‌های پروژه را نشان می‌دهد. رابطه ۵ به محاسبه حداکثر زمان تکمیل پروژه می‌پردازد. رابطه ۶ افق برنامه‌ریزی پروژه را محاسبه می‌کند. رابطه ۷ تضمین می‌کند پروژه قبل از افق برنامه‌ریزی پروژه به اتمام می‌رسد. رابطه ۸ برای اعمال محدودیت‌های منابع تجدیدپذیر است. به این ترتیب، مجموع مصرف تمامی فعالیت‌ها از هر منبع در هر واحد زمانی نمی‌تواند از حداکثر مقدار آن منبع ( $R_k$ ) در واحد زمانی مربوطه بیشتر باشد. رابطه ۹ بیانگر زمان شروع پروژه است. رابطه ۱۰ مربوط به روابط تقدمی و تأخیری (بدون تأخیر زمانی) بین فعالیت‌های پروژه است. رابطه ۱۱ نشانگر این است که زمان شروع فعالیت  $k$  بزرگ‌تر یا مساوی با بیشترین زمان اتمام فعالیت‌های پیش‌نیازی خودش است. رابطه ۱۲ نشان می‌دهد که فعالیت‌های صفر و  $n+1$ ، فعالیت‌هایی مجازی است. رابطه ۱۳ تعداد پرداخت‌های  $k$  برای فعالیت  $k$  را نشان می‌دهد. رابطه ۱۴ تضمین می‌کند در پایان یک فعالیت فقط می‌تواند یک

پرداخت صورت گیرد. رابطه ۱۵ تضمین می‌کند مجموع همه پرداخت‌ها برابر با قیمت قرارداد پروژه است. رابطه ۱۶ بیانگر این است که مقدار پرداخت‌ها همیشه مثبت است. انواع قراردادها برای پرداخت بین کارفرما و پیمانکار موجود است که بعضی از آن‌ها عبارت‌اند از: پرداخت یکجا در انتهای پروژه (LSP)، پرداخت در انتهای انجام‌دادن فعالیت (PAC)، پرداخت در بازه‌های زمانی مساوی (ETI)، پرداخت بر پایه پیشرفت (PP) (کاظمی، ۱۳۸۹). برای انجام‌دادن پروژه، پیمانکار با کارفرما در مورد کل مبلغ دریافتی، تعداد پرداخت‌ها و نسبت هزینه‌های بازپرداخت‌شده در هر پرداخت مذاکره می‌کند. سپس تمامی فعالیت‌های پروژه می‌توانند به‌عنوان فضای جست‌وجو برای مشخص کردن مکان پرداخت‌ها انتخاب شوند. با مشخص شدن مکان پرداخت‌ها و معلوم‌بودن زمان‌بندی فعالیت‌ها، زمان و مقدار هر پرداخت مشخص می‌شود. تابع هدف انواع پرداخت بین کارفرما و پیمانکار، برای حداکثر کردن ارزش خالص فعلی پروژه برای رابطه ۱ مدل ریاضی پیشنهادی، به‌صورت زیر است (سیف و توکلی، ۲۰۰۸؛ میکا و والیگرا، ۲۰۰۵):

پرداخت به قیمت مجموع (LSP): پرداخت به این شیوه یکی از رایج‌ترین پرداخت‌ها در زمان‌بندی پروژه است. کل هزینه انجام‌دادن پروژه در زمان تکمیل موفقیت‌آمیز پروژه از طرف کارفرما به پیمانکار پرداخت می‌شود. تابع هدف را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۷ به‌دست آورد:

$$\max z = CF_{lsp} (1 + \alpha)^{-FT_n} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=EF_i}^{LF_i} \sum_{m=1}^{M_i} \frac{CF_{jm}}{(1 + \alpha)^t} \times X_{jmt} \quad (17)$$

$$CF_{lsp} = \sum_{j=1}^n CF_j^+$$

پرداخت در زمان وقوع رویدادها (PEO): این مدل بسیار کاربردی و متداول است. در این شیوه، پیمانکار در زمان تکمیل هر فعالیت یک جریان نقدی مثبت متناظر با آن فعالیت را دارد. تفاوت پرداخت PEO با LSP در این است که در LSP کل پرداخت کارفرما به پیمانکار در انتهای تکمیل پروژه پرداخت می‌شود، ولی در PEO در زمان اتمام هر فعالیت این کار انجام می‌گیرد. در این حالت، تابع هدف را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۸ به‌دست آورد:

$$\max z = \sum_{j=1}^n CF_j^+ (1 + \alpha)^{-FT_j} - \sum_{j=1}^n \sum_{t=EF_j}^{LF_j} \sum_{m=1}^{M_j} \frac{CF_{jm}}{(1 + \alpha)^t} \times X_{jmt} \quad (18)$$

پرداخت در فواصل زمانی مساوی (ETI): در این مدل، کارفرما برای پروژه H پرداخت انجام می‌دهد که H-۱ پرداخت اول در فواصل زمانی مساوی در حین انجام‌دادن پروژه انجام می‌گیرد و

پرداخت آخر در زمان تکمیل پروژه صورت می‌پذیرد. در این حالت، تابع هدف را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۹ به دست آورد:

$$\max z = \sum_{P=1}^H P_p (1 + \alpha)^{-T_p} - \sum_{j=1}^n \sum_{t=EF_j}^{LF_j} \sum_{m=1}^{M_j} \frac{CF_{jm}}{(1 + \alpha)^t} \times X_{jmt} \quad (19)$$

پرداخت‌های مستمر (PP): در این مدل، کارفرما پرداخت‌ها را در فواصل زمانی منظم پرداخت می‌کند تا زمانی که پروژه به انجام برسد. تفاوت مدل PP با مدل ETI آن است که در مدل PP مقدار پرداخت از قبل مشخص نیست. در این حالت، تابع هدف را می‌توان با استفاده از رابطه ۲۰ به دست آورد:

$$\max z = \left( \sum_{P=1}^{H-1} P_p (1 + \alpha_i)^{-PT} + P_H (1 + \alpha_i)^{-FT_n} \right) - \sum_{j=1}^n \sum_{t=EF_j}^{LF_j} \sum_{m=1}^{M_j} \frac{CF_{jm}}{(1 + \alpha)^t} \times X_{jmt} \quad (20)$$

### روش‌شناسی تحقیق

مسئله مورد تحقیق، یک پروژه از n فعالیت است که برای هر فعالیت تنها یک حالت اجرایی در نظر گرفته شد و هنگامی که هر دو رویدادها در این پروژه محقق شود هر دو جریان نقدی منفی و مثبت اتفاق می‌افتد. با توجه به نسبتی ویژه، در شروع و پایان رویدادها، هزینه فعالیت‌ها توزیع می‌شود و ارزش به دست آمده از رویدادی برابر با مجموع ارزش پایان یافتن فعالیت‌های رویداد پروژه است. مقدار هر پرداخت توسط کارفرما به پیمانکار با توجه به ارزش کسب شده از انجام دادن فعالیت‌های پروژه، با توجه به روابط پیش‌نیازی است. این پژوهش، به دنبال تحقق هر دو تابع هدف - حداقل‌سازی زمان‌بندی پروژه و حداکثر کردن ارزش خالص فعلی پروژه - با توجه به محدودیت‌های مختلف است. مسئله زمان‌بندی پروژه با الگوهای مطلوب پرداخت هزینه با ملاحظات محدودیت منابع، به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در زمره خانواده مسائل NP-hard است و حل آن‌ها در ابعاد بزرگ، از طریق برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود امکان‌پذیر نیست یا به زمان زیادی نیاز دارند؛ به همین دلیل برای حل این‌گونه مسائل، از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. از آنجاکه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است، سعی می‌شود که اولاً تقریبی مناسب از جبهه نامغلوب به وجود آید و ثانیاً جواب‌ها بتواند تمام آن پارتو را پوشش دهد. دو راه برای حل تابع هدف چندهدفه وجود دارد. یکی تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه و حل آن از طریق الگوریتم‌های تک‌هدفه است که در این حالت باید با چندین تکرار، مجموعه‌ای



از جواب‌ها را به‌دست آورد و البته بعضی از نقاط جبهه نامغلوب با این روش در نظر گرفته نمی‌شود. دوم حل مستقیم آن از طریق الگوریتم‌های چندهدفه است؛ بنابراین، از الگوریتم‌های چندهدفه برای حل مسئله استفاده می‌کنیم. با بررسی الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، روش NSGA-II برای این مسئله انتخاب شد. برای اعتبارسنجی مسئله، جواب الگوریتم پیشنهادی را با جواب نرم‌افزار GAMS مقایسه کردیم.

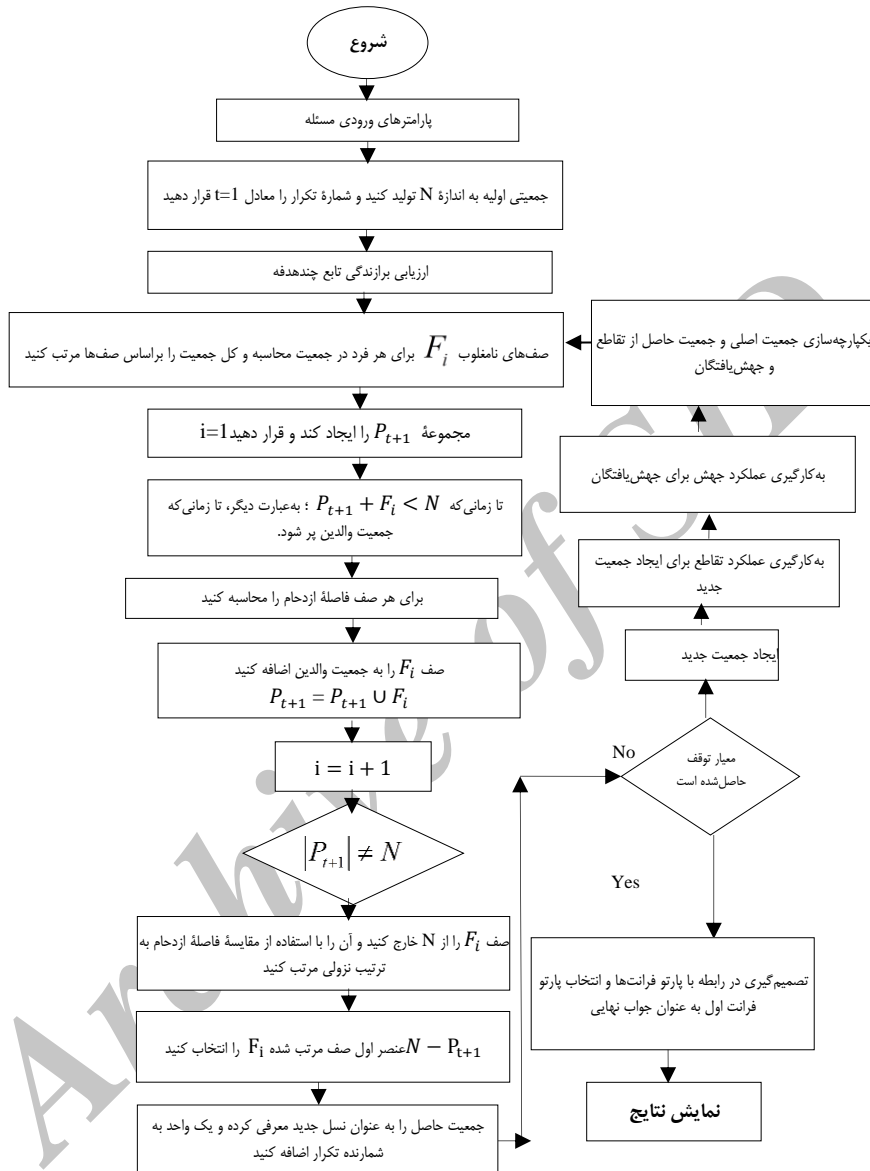
### ساختار پیشنهادی روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه (دب،)

ساختار کلی طراحی شده الگوریتم NSGA-II پیشنهادی به‌صورت زیر است:

- گام ۱. لحاظ کردن پارامترهای ورودی.
  - گام ۲. ایجاد جمعیت اولیه:
- در ابتدای الگوریتم، جمعیت اولیه به اندازه  $n_{pop}$  بر مبنای مقیاس و قیود مسئله تولید می‌شود.
- گام ۳. ارزیابی برازندگی تابع چندهدفه:
- در این گام، جمعیت تولیدشده بر مبنای تابع هدف مسئله ارزیابی می‌شود تا بهترین اعضای جمعیت انتخاب شوند که مقدار تابع هدف بهتری را برای مسئله در نظر می‌گیرند.
- گام ۴. روش مرتب‌سازی نامغلوب:
- در این مرحله، اعضای جمعیت مجموعه جواب‌های قابل قبول در داخل دسته‌هایی قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که اعضای موجود در دسته اول، مجموعه‌ای کاملاً غیر مغلوب توسط دیگر اعضای جمعیت فعلی باشند. اعضای موجود در دسته‌های دوم نیز بر همین مبنای آنها توسط اعضای دسته اول مغلوب می‌شوند و این روند به‌همین صورت در دسته‌های دیگر ادامه می‌یابد تا به تمام اعضای موجود در هر دسته، رتبه‌ای بر مبنای شماره دسته اختصاص داده شود.
- گام ۵. محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی:
- این پارامتر برای هر عضو در هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه است. به این صورت که به هر یک از اعضای مرزی مجموعه مرتب‌شده  $F_i$  برحسب هر یک از توابع هدف، مقدار بی‌نهایت را نسبت دهید.  $CD(i, n) = \infty$  و  $CD(i, 1) = \infty$  و درنهایت برای هر یک از اعضای جمعیت  $k$  از مجموعه مرتب‌شده  $F_i$  و از شماره ۲ تا  $n-1$  به‌صورت رابطه ۲۱ مراحل زیر را انجام دهید:

$$CD(i, k) = CD(i, k) + \frac{f_m(k+1) - f_m(k-1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (21)$$

- گام ۶. انتخاب والد برای تولید مثل: یکی از سازوکارهای انتخاب، برقراری تورنمنت دوتایی میان دو عضو منتخب است که به طور تصادفی از میان جمعیت انتخاب می شوند.
- گام ۷. انجام دادن عملیات تقاطع برای تولید فرزندان
- گام ۸. انجام دادن عملیات جهش برای تولید جهش یافتگان
- گام ۹. یکپارچه کردن جمعیت (جمعیت اولیه، جمعیت تقاطع، جمعیت جهش یافتگان)
- در این گام، جواب های اولیه و جواب های تولید شده از انجام دادن عملیات تقاطع و جهش را با هم تلفیق می کنیم و سپس بر مبنای رویکرد غلبگی، اعضای جمعیت را مرتب می کنیم.
- گام ۱۰. مرتب سازی جمعیت
- گام ۱۱. در نظر گرفتن مجموعه ای از راه حل های نامغلوب
- گام ۱۲. انتخاب و مرتب کردن جمعیت برای فرانت های مورد نظر
- گام ۱۳. اگر تعداد تکرار به اندازه تعیین شده رسید، اتمام یابد و در غیر این صورت به گام ۳ برگردد.
- گام ۱۴. توقف و نتایج خروجی
- در شکل ۱، فلوجارت الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیشنهادی ارائه شد.



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیشنهادی

## به روزرسانی جمعیت

### باز ترکیب

پارامتر  $p_c$  را به عنوان احتمال رخ دادن تقاطع در نظر می‌گیریم. برای انتخاب کروموزوم‌های والد، فرایندی را که در ادامه می‌آید به اندازه  $p_c \times (pop - size)$  مرتبه تکرار می‌کنیم. به ازای  $(pop - size)$ ،  $1, 2, \dots$ ، سه نوع تقاطع به صورت «تک نقطه‌ای، دونقطه‌ای و تقاطع یکنواخت» به کار می‌بریم. در عملیات تقاطع، به هر کدام از این عملگرها مقداری احتمالی برابر با  $1/3$  و  $0/6$  (که جمع هر سه نوع عملگر باید برابر با یک شود) اختصاص می‌دهیم و سپس با استفاده از روش چرخه شانس، از بین آن‌ها یکی انتخاب می‌شود.

### عملگر جهش

پارامتر  $p_m$  را به عنوان احتمال رخ دادن جهش در نظر می‌گیریم؛ برای مثال، عملیات تقاطع کروموزوم‌های والد را انتخاب می‌کنیم که تقریباً تعداد  $(pop - size) \times p_m$  می‌شوند. برای انجام دادن عملیات جهش برای تولید جهش‌یافتگان از روش جهش گوسی استفاده می‌کنیم به این صورت که برای یک متغیر  $X$  که دارای مقدار  $X_{min}$  و  $X_{max}$  است، در نظر می‌گیریم و متغیر جدید باید دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  باشد؛ یعنی  $X' = X + \Delta X$  که  $\Delta X \approx N(X, \sigma^2)$  است. مقداری استاندارد تولید می‌کنیم و در  $\sigma^2$  ضرب و با مقدار  $X$  جمع می‌کنیم. مقدار  $\sigma^2$  آن را برابر با  $0/2 \times (V_{max} - V_{min})$  تعیین می‌کنیم. که  $\sigma^2$  برابر با اندازه گام‌های جهش است؛ بنابراین،  $\mu$  (میزان جهش) درصد را به تصادف انتخاب می‌کنیم. سپس برای اینکه مقدار تعداد جهش‌یافتگان صحیح باشد و حداقل یک مورد یافت شود، مقدار آن را به بالا گرد می‌کنیم.

### تنظیمات پارامترها برای الگوریتم‌های NSGA-II<sup>۱</sup>، MOPSO<sup>۲</sup>

رویکرد تنظیم پارامترها به این صورت است که نخست مقدار اولیه از مرور ادبیات انتخاب می‌شود و با روش سعی و خطا بهترین مقدار پارامترها تعیین و استفاده می‌شود. پس از به دست آوردن مقدار اولیه در هر مرحله یک مقدار انتخاب می‌شود و در دامنه‌های تعیین شده تغییرات انجام می‌گیرد. در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ داده‌های مربوط به پارامترهای ورودی و کنترلی می‌آید.

1. Non-Dominate Sorting Genetic Algorithm-II
2. Multi-objective Particle Swarm Optimization

جدول ۲. داده‌های مربوط به پارامترهای ورودی

موجودیت	پارامتر	مقدار داده یا روش تولید داده‌ها
	تعداد فعالیت	۳۷
	زمان انجام‌دادن فعالیت	زمان انجام‌دادن فعالیت‌ها قطعی
فعالیت	مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیازی	$P_j$ مطابق اطلاعات قسمت تشریح مسئله مورد مطالعه
	منابع مورد نیاز فعالیت	$r_{ij}, \forall i, j$ مطابق اطلاعات قسمت تشریح مسئله
	جریان‌ات نقدی پروژه	$CF_j^+, CF_j^-$ و مطابق اطلاعات قسمت تشریح مسئله
	تعداد منابع	۲
منابع	مقدار موجود از هر منبع	$K, K = 1, 2$ و مطابق داده‌ها به‌ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۰۰ واحد
لیست اولویت	یک سطر با $\Pi$ ستون	یک سطر از فعالیت‌ها به‌ترتیب اولویت مینیمم طول فعالیت از چپ به راست

جدول ۳. پارامترهای کنترلی برای الگوریتم NSGA-II

پارامتر	مقدار پارامتر
حداکثر تعداد تکرارها	۲۰۰
اندازه جمعیت	۱۰۰
درصد تقاطع	۰/۹
تعداد تقاطع	$(2) / \text{تعداد جمعیت} * \text{درصد تقاطع} * \text{round}$
درصد جهش	طول رشته از کروموزوم ۱/
تعداد جهش	$\text{round}(\text{تعداد جمعیت} * \text{درصد جهش})$
میزان جهش	۰,۰۱
اندازه گام‌های جهش	(مینیمم متغیر-ماکزیمم متغیر) * ۰/۲
روش انتخاب والد	تورنمنت باینری
قانون توقف	تعداد نسل‌های تولیدشده که در این پژوهش معادل ۲۰۰ نسل در نظر گرفته شد

جدول ۴. پارامترهای کنترل برای الگوریتم‌های MOPSO

پارامتر	مقدار پارامتر
حداکثر تعداد تکرارها	۲۰۰
اندازه جمعیت	۱۰۰
اندازه انبار	۱۰۰
وزن اینرسی	۰/۵
میزان نوسانات وزن	۰/۹۹
ضریب یادگیری شخصی (C <sub>۱</sub> )	۱
ضریب یادگیری کلی (C <sub>۲</sub> )	۲
تعداد ابعاد در شبکه‌ها	۵
میزان تجمع	۰/۱
فشار انتخاب لیدر	۲
فشار انتخاب برای حذف	۲
میزان جهش	۰/۱
قانون توقف	تعداد نسل‌های تولیدشده که در این پژوهش معادل ۲۰۰ نسل در نظر گرفته شد

### تشریح مسئله مورد مطالعه

مسئله نمونه، پروژه احداث پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس، بیش از ۲۰ هزار فعالیت دارد. فعالیت‌های بخشی از پروژه شامل ۳۵ فعالیت به‌عنوان مسئله نمونه انتخاب شد و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل و زمان‌بندی شد. حداکثر مقدار موجود از منابع تجدیدپذیر شامل نیروی انسانی - ۱۵۰ نفر - و ماشین‌آلات - ۱۰۰ دستگاه - است. جریان نقدی مثبت نیز از ضرب جریان نقدی برای هر فعالیت در ضریب درآمد (RR) به‌دست می‌آید. اطلاعات مربوط به پروژه در مقاله زارعی و همکاران (۲۰۱۴) آورده شد.

با پیاده‌سازی الگوریتم سطحی از پارتو فرانت از راه حل‌های تولیدشده توسط الگوریتم بر مبنای انواع پرداخت به‌دست می‌آید. با توجه به این نتایج، پیمانکار با مجموعه‌ای از پاسخ‌ها می‌تواند با توجه به اهمیت هریک از تابع هدف (حداقل کردن زمان تکمیل و به‌حداکثر رساندن NPV پروژه) گزینه‌ای را انتخاب کند که نشانگر روشی برای انجام‌دادن فعالیت‌هاست. برای اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی، چند مسائل نمونه در مقیاس کوچک علاوه بر مطالعه موردی با تعداد فعالیت‌های مختلف از مرجع بیان‌شده ۱۴ (دانش‌پایه، ۱۳۹۰)، ۱۸ (ریفات و بتمیر، ۲۰۱۲)، ۲۰ (لانگ و اریو، ۲۰۰۸) و ۲۵ (کون و میتسو و گنجی، ۲۰۰۳) توسط الگوریتم پیشنهادی MOPSO و NSGA-II براساس چهار نوع از پرداخت‌ها حل شد.

### شاخصه‌های مقایسه‌ای الگوریتم‌های چندهدفه

برای انجام دادن مقایسه ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، پنج شاخص استفاده شد که عبارت‌اند از:

**معیار بیشترین گسترش:** این معیار طول قطر مکعب فضایی را اندازه‌گیری می‌کند که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود. رابطه ۲۲ رویه محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد (زیتلر و دب، ۲۰۰۰).

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\max f_i^j - \min f_i^j)^2} \quad (22)$$

**معیار فاصله‌گذاری:** این معیار میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه ۲۳ محاسبه می‌کند (کاظمی، ۱۳۸۹).

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (d_i - d_{mean})}{(N-1)d_{mean}} \quad (23)$$

**معیار تعداد جواب‌های پارتو:** این معیار نشانگر تعداد جواب‌های بهینه پارتو است و هرچه تعداد جبهه نامغلوب‌ها بیشتر باشد بهتر است (زیتلر و دب، ۲۰۰۰).

**معیار تنوع:** این مقیاس، پراکندگی در بین مجموعه راه حل‌های غیر مغلوب را اندازه‌گیری می‌کند و از رابطه ۲۴ به دست می‌آید. این معیار هرچه بیشتر باشد دلالت بر این دارد که جواب‌های یکسان کمتر وجود دارد و فضای بزرگ‌تری را پوشش می‌دهد (زیتلر و دب، ۲۰۰۰).

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^m \max(\|x_i^j - y_i^j\|)} \quad (24)$$

**معیار زمان اجرای الگوریتم:** زمان اجرای الگوریتم به عنوان معیار ارزیابی کیفیت است.

### نتایج مقایسه‌ای الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه

برای نشان دادن عملکرد مناسب الگوریتم طراحی شده، NSGA-II پیشنهادی با الگوریتم‌های MOPSO برای حل مسئله احداث پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس و مسائل متعددی در قالب

مسائل نمونه با تعداد فعالیت ۱۴، ۱۸، ۲۰ و ۲۵ از منابع ذکر شده در نظر گرفته شد و براساس نوع پرداخت‌های بیان شده تجزیه و تحلیل می‌شود. نتایج مقایسه‌ای الگوریتم‌های مورد نظر در جدول‌های ۵ تا ۸ نشان داده می‌شود.

جدول ۵. نتایج مقایسه‌ای بر مبنای پرداخت‌های LSP

تعداد فعالیت	شاخص مقایسه‌ای	فاصله‌گذاری	بیشترین گسترش	تعداد جواب‌های پارتو	تنوع	زمان اجرا
J=۱۴	NSGA-II	۰/۵	۲۵۹/۹	۳۵	۳۶۱/۶۷	۲۵۳/۳
	MOPSO	۱	۲۶۵/۰۳	۱۶	۲۴۳/۸۹	۱۵۷/۲۹
J=۱۸	NSGA-II	۱	۷۳۳۰/۶۳	۱۶	۱۰۵۵/۲۴	۲۸۲/۵۵
	MOPSO	۰/۵۲	۶۸۷۳/۱۳	۱۴	۹۹۳/۴۵	۱۵۱/۵۱
J=۲۰	NSGA-II	۰/۱۸	۴۳۸/۱۶	۲۰	۶۵۲/۵۸	۲۶۵/۸
	MOPSO	۰/۳۶	۴۳۶/۱۳	۱۹	۶۳۵/۹۵	۱۶۰/۴۹
J=۲۵	NSGA-II	۰/۱۷	۴۳۱/۱۳	۲۲	۶۳۸/۴۷	۳۰۳/۰۵
	MOPSO	۰/۲۴	۳۶۶	۱۹	۵۹۳/۸۹	۲۰۴/۹۱
J=۳۵	NSGA-II	۰/۶۶	۷۷۵۲۳۶/۳۵	۷۳	۶۲۶۵/۱۴	۷۵۶/۴۲
	MOPSO	۰/۷۸	۷۵۲۵۲۴/۷۵	۲۵	۴۹۳۶/۶۲	۹۷۷/۰۶

جدول ۶. نتایج مقایسه‌ای بر مبنای پرداخت‌های PEO

تعداد فعالیت	شاخص مقایسه‌ای	فاصله‌گذاری	بیش‌ترین گسترش	تعداد جواب‌های پارتو	تنوع	زمان اجرا
J=۱۴	NSGA-II	۰/۵۱	۵۴/۸۲	۱۳	۴۹۲/۰۱	۲۵۲/۴۸
	MOPSO	۰/۲۸	۵۴/۶۸	۹	۲۳۰/۹۲	۱۶۱/۵۴
J=۱۸	NSGA-II	۰/۷۴	۸۰۸/۱۵	۹	۷۴۵/۴۲	۲۹۱/۱۵
	MOPSO	۱/۰۶	۹۵۶/۷۶	۷	۶۸۱/۱	۱۵۵/۱۴
J=۲۰	NSGA-II	۰/۳۴	۱۴۶/۹۴	۱۵	۵۷۹/۱۸	۲۷۶/۳۹
	MOPSO	۱/۱۸	۱۴۹/۶۷	۱۵	۵۷۹/۲۳	۱۷۴/۳۵
J=۲۵	NSGA-II	۰/۵۵	۹۵/۱۴	۱۶	۵۵۷/۰۹	۳۲۷/۱۳
	MOPSO	۱/۲۲	۹۴/۰۳	۱۳	۵۰۲/۲	۱۷۷/۱۷
J=۳۵	NSGA-II	۰/۷۹	۳۶۵۵۰۲/۲۲	۳۳	۱۳۱۱۶/۴۵	۷۷۶/۴۳
	MOPSO	۱/۱۳	۳۱۸۰۰۸/۸	۱۲	۷۹۴۶/۴۲	۸۱۴/۵۷



جدول ۷. نتایج مقایسه‌ای بر مبنای پرداخت‌های ETI

زمان اجرا	تنوع	تعداد جواب‌های پارتو	بیشترین گسترش	فاصله‌گذاری	شاخص مقایسه‌ای	تعداد فعالیت
J=۱۴	NSGA-II	۹	۶۳/۶۳	۰/۴۸		
	MOPSO	۸	۳۴۹/۴۹	۰/۷۱		
J=۱۸	NSGA-II	۶	۱۲۰۹/۱۵	۰/۴۴		
	MOPSO	۴	۳۴۷۱/۸	۱/۳۳		
J=۲۰	NSGA-II	۱۰	۱۵۴/۴۹	۰/۴۷		
	MOPSO	۶	۳۳۴/۸۱	۱/۵۶		
J=۲۵	NSGA-II	۸	۱۱۱/۲۹	۰/۳۱		
	MOPSO	۶	۹۸/۵۴	۱/۵		
J=۳۵	NSGA-II	۱۰	۵۱۶۷۴۲/۱	۰/۹		
	MOPSO	۸	۴۹۸۸۱۷۳/۴	۰/۹۷		

جدول ۸. نتایج مقایسه‌ای بر مبنای پرداخت‌های PP

زمان اجرا	تنوع	تعداد جواب‌های پارتو	بیش‌ترین گسترش	فاصله‌گذاری	شاخص مقایسه‌ای	تعداد فعالیت
J=۱۴	NSGA-II	۱۲	۱۲۷۲/۵۶	۱		
	MOPSO	۷	۱۰۸۰/۹۱	۱/۶۱		
J=۱۸	NSGA-II	۱۰	۶۹۱۹/۶۹	۱/۲		
	MOPSO	۶	۵۹۸۱/۵۳	۱/۲۹		
J=۲۰	NSGA-II	۱۱	۳۳۵۲/۶۱	۰/۳۵		
	MOPSO	۷	۲۶۱۲/۶	۰/۳		
J=۲۵	NSGA-II	۱۰	۱۳۳۳/۵۹	۰/۹۶		
	MOPSO	۸	۲۵۲۲/۰۶	۰/۶۹		
J=۳۵	NSGA-II	۱۳	۱۷۱۷۷۳۰/۹۳	۰/۸۹		
	MOPSO	۷	۹۰۷۴۷۹/۳۸	۰/۵۸		

داده‌های جدول‌ها بیانگر موضوعات زیر است: الگوریتم NSGA-II توانایی بیشتری برای دستیابی به تعداد بیشتر جواب‌ها در جبهه نامغلوب دارد که از این منظر پیمانکار با تعداد بیشتری گزینه برای انتخاب شیوه اجرایی مواجه است و در بیشتر موارد دارای گستردگی جواب‌های بالاتری است. الگوریتم NSGA-II دارای وسعت جبهه نامغلوب بیشتر نسبت به الگوریتم MOPSO است و تنوع بیشتری در بین جواب‌ها نشان می‌دهد. الگوریتم NSGA-II در توزیع جواب‌های پارتو، دارای یکنواختی بالاتری نسبت به الگوریتم دیگر است. با توجه به داده‌های مشاهده‌شده با کاهش تعداد فعالیت به ۱۸، ۲۰ و ۲۵ فعالیت زمان اجرای الگوریتم NSGA-II مورد نظر نسبت به الگوریتم MOPSO بیشتر است.

### اعتبارسنجی روش پیشنهادی با روش دقیق

به منظور اثبات کارایی الگوریتم فراابتکاری، نتایج حل این الگوریتم با نتایج حل با نرم افزار GAMS برای چند مسئله نمونه در ابعاد کوچک- که شامل زیرمجموعه‌هایی از مسئله واقعی این تحقیق و مسائل نمونه است- استفاده شد و سپس با الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار GAMS حل شد. نتایج و زمان اجرای الگوریتم NSGA-II و نرم افزار GAMS در جدول‌های ۹ و ۱۱ نشان داده می‌شود. در جدول ۱۰، متوسط درصد اختلاف نتایج الگوریتم NSGA-II و نرم افزار GAMS نشان داده می‌شود.

جدول ۹. نتایج نرم افزار GAMS و NSGA-II

مسئله	نوع پرداخت	LSP		PEO		ETI		PP	
		$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV
J=۱۰	NSGA-II	۱۵	۴۲۹۷/۵۹	۱۵	۴۳۳۵/۴۳	۱۴	۳۸۴۰/۰۹	۱۶	۱۷۷۳/۲۶
	GAMS	۱۴	۴۳۰۴/۰۹	۱۴	۴۴۳۶/۲	۱۴	۳۸۴۰/۳۴	۱۴	۱۹۴۸/۱۵
J=۱۴	NSGA-II	۸۵	۳۹۵۹/۶۸	۸۵	۴۲۱۴/۳	۸۵	۳۹۵۴/۷۱	۸۷	۲۷۷۲/۸۳
	GAMS	۸۳	۳۹۶۹/۹۰	۸۳	۴۲۱۴/۵۸	۸۳	۳۹۶۲	۸۳	۲۷۸۰/۵۱
J=۱۸	NSGA-II	۱۹۰	۷۳۴۸۹/۳۸	۱۸۸	۹۳۳۲۶/۱۶	۱۹۶	۷۷۸۵۲/۳۹	۱۸۸	۷۸۴۴۵/۲۵
	GAMS	۱۸۷	۷۳۸۱۶/۴۴	۱۸۷	۹۳۴۲۷/۱۷	۱۸۷	۷۸۴۳۵/۳۸	۱۸۷	۷۸۶۱۱/۲۱
J=۲۰	NSGA-II	۶۶	۲۱۵۱۶/۵۷	۶۴	۲۲۵۰۲/۴۷	۶۵	۲۲۰۷۹/۶	۶۶	۱۳۴۰۷/۶۸
	GAMS	۶۳	۲۱۵۹۵/۱۱	۶۳	۲۲۵۱۹/۷۳	۶۳	۲۲۱۰۰/۱۵	۶۳	۱۳۶۱۲/۰۹
J=۲۵	NSGA-II	۶۷	۱۸۷۸۴/۱۵	۶۶	۱۹۵۱۶/۲۵	۶۸	۱۸۵۳۳/۳۹	۶۵	۱۲۹۶۷/۱۶
	GAMS	۶۵	۱۸۸۳۴/۴۵	۶۴	۱۹۵۲۹/۸۴	۶۵	۱۸۵۵۵/۲۹	۶۴	۱۳۴۱۲/۰۵

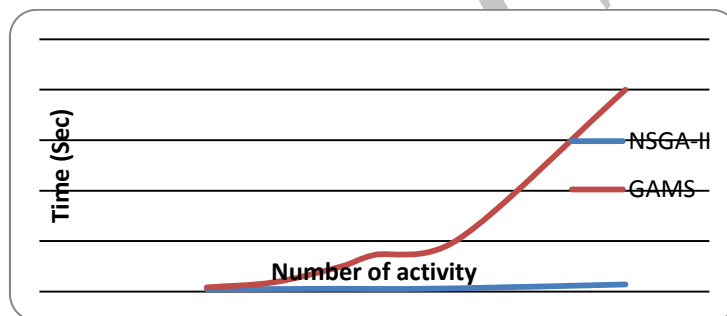
جدول ۱۰. متوسط درصد اختلاف نتایج نرم افزار GAMS و NSGA-II

مسئله	نوع پرداخت	LSP		PEO		ETI		PP	
		$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV	$C_{max}$	NPV
J=۱۰		۷/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۷	۲/۲۷	۰	۰	۰	۱/۲۸
J=۱۴		۲/۴	۰/۲۵	۲/۴	۰/۰۰۶	۲/۴	۰/۱۸	۴/۸	۰/۲۷
J=۱۸		۱/۶	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۰۹۷	۴/۸۱	۰/۷۴	۰/۵۳	۰/۲۱
J=۲۰		۴/۷۶	۰/۳۶	۱/۵۸	۰/۰۷	۳/۱۷	۰/۰۹	۴/۷۶	۸/۸۴
J=۲۵		۳/۰۷	۲/۲۶	۳/۱۲	۰/۰۶	۴/۶۱	۰/۱۱	۱/۵۶	۳/۳
متوسط درصد اختلاف		۳/۷	۰/۲۹	۲/۹۵	۰/۵	۳	۰/۲۲	۲/۳۳	۲/۲۷

جدول ۱۱. زمان اجرای نرم‌افزار NSGA-II و GAMS

مسئله الگوریتم	J=۱۰	J=۱۴	J=۱۸	J=۲۰	J=25	J=۳۵
NSGA-II	۲۲۸.۷۶	۲۵۲.۴۸	۲۸۲.۵۵	۲۶۵.۶	۳۲۷.۰۹	۷۰۷.۱۵
GAMS	۴۱۴.۳۱	۹۲۳.۶۳	۲۴۷۵.۴۳	۳۶۲۷.۹۴	۵۱۶۲.۵۷	-

متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دقیق از نرم‌افزار GAMS در جدول ۹ نشان داده شد که نتایج آن‌ها نزدیک به هم و دارای اختلاف کم است. همچنین، مطابق نتایج جدول ۱۰ و شکل ۲، زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی تقریباً ثابت است، ولی در نرم‌افزار GAMS به صورت تابع نمایی افزایش می‌یابد. نتایج اجرا توسط الگوریتم فراابتکاری با نتایج نرم‌افزار GAMS نزدیک به هم و دارای اختلاف کمتر از سه درصد است و این نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم همگرا به جواب بهینه و کاراست.



شکل ۲. زمان حل مسائل نمونه در الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار GAMS

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، زمان‌بندی بخش محدودی از احداث یک پالایشگاه با استفاده الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی شد که عملکرد الگوریتم NSGA-II پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های مقایسه‌ای با الگوریتم MOPSO بررسی شد. در بیشتر معیارها، عملکرد الگوریتم NSGA-II بهتر از MOPSO است. از آنجاکه باید کارایی هر الگوریتمی قبل از استفاده آن اثبات شود و همچنین تحقیق جاری بر یک پروژه واقعی در حال اجراست، امکان مقایسه نتایج پروژه با خروجی الگوریتم نیست؛ بنابراین برای اثبات کارایی الگوریتم، نتایج آن با نتایج حل مدل توسط نرم‌افزار GAMS بر چند مسئله نمونه در ابعاد کوچک مقایسه می‌شود. اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دقیق بیان می‌کند که نتایج آن‌ها نزدیک به هم و دارای اختلاف کمتر از ۳ درصد

است. زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی تقریباً ثابت است، ولی در نرم افزار GAMS به صورت تابع درجه دو افزایش می یابد. این نتایج نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتمی همگرا به جواب بهینه و کاراست.

### پیشنهادها

- پیشنهادهایی که می تواند در راستای ادامه این پژوهش انجام گیرد عبارت است از:
۱. در نظر گرفتن اهداف دیگری همچون استواری پروژه و تسطیح منابع و کیفیت پروژه در تابع هدف مسئله.
  ۲. در نظر گرفتن زمان و هزینه انجام دادن فعالیت و میزان منابع مصرفی به صورت فازی.
  ۳. ارائه رویکردی برای تنظیم و انتخاب بهینه پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری.
  ۴. استفاده از الگوریتم های دیگر برای تولید و بهبود جواب ها.
  ۵. در نظر گرفتن ضرایب تعدیل و میزان تورم در تابع هدف مدل.

### References

- دب ک.، "الگوریتم های ژنتیک با رویکرد بهینه یابی چند هدفه" تهران: انتشارات پلک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ۱۳۸۷.
- Angela, H. L. C. & Chiuh-Cheng, C. (2008). A memetic algorithm for maximizing net present value in resource-constrained project scheduling problem. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008)*, 2041-2049.
- Aladini, K., Afshar, A. & Kalhor, E. (2011). Discount Cash Flow Time-Cost Trade off Problem Optimization; ACO Approach. *Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing)*, 12(4): 511-522.
- Chen, W. N. & Zhang, Jun. (2012). Scheduling multi-mode projects under uncertainty to optimize cash flows: A monte carlo ant colony system approach. *Journal of Computer Science and Technology*, 27(5): 950-965.
- Chen, W. N., Zhang, J. & Liu, H. (2010). A monte-carlo ant colony system for scheduling multi-mode project with uncertainties to optimize cash flows. *Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1-8.
- Daneshpayeh, H. (2011). *Project schedule under the uncertainty of activities time using a Meta-heuristic algorithm (Case study: Part of the Project Activities*

*of Gas Condensate Refinery in Bandar Abbas*), M.S Thesis, Imam Hossein University. Tehran. (In Persian)

- Eshtehardian, E., Afshar, A. & Abbasnia, R. (2009). Fuzzy-based MOGA Approach to Stochastic Time-Cost Trade off Problem. *Automation in Construction*, 18(5): 692-701.
- Guo, H., Li, L., Zhu, K. & Ding, C. (2009). Application of PSO and MPSO in projects scheduling of the first mining face in coal mining. *Proceeding of International Joint Conference on Natural Computation*, 260-26.
- Hooshyar, B., Tahmani, A. & Shenasa, M. (2008). A genetic algorithm to time-cost trade off in project scheduling. *Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 3081-3086.
- Kwan, W. K., Mitsuo, G. & Genji, Y. (2003). Hybrid genetic algorithm with fuzzy logic for resource-constrained project scheduling. *Applied Soft Computing*, 2(3): 174-188.
- Khalilzadeh, M., Kianfar, F. & Ranjbar, M. (2011). A scatter search algorithm for the rcpsp with discounted weighted earliness-tardiness costs. *Life Science Journal*, 8(2): 634- 641.
- Kazemi, F. S. (2010). *Solving the multi-objective project scheduling problem by considering the resource constraint using multi-objective evolutionary algorithm*, M.S thesis of industrial engineering of Tehran university. tehran. (In Persian)
- Luong, D. L. & Ario, O. (2008). Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. *International Journal of Project Management*, 26: 688-698.
- Mika, M., Walig\_Ora G. & Wezglarz, J. (2005). Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. *European Journal of Operational Research*, 164: 639-668.
- Rifat, S. & Önder, H. B. (2012). A hybrid genetic algorithm for the discrete time-cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 39: 11428-11434.
- Seifi, M. & Tavakkoli Moghaddam, R. (2008). A new bi-objetive model for amulti-mode resource constrained project scheduling problem with discunted cash flows and four payment models. *IJE Transactions A: Basics*, 21(4): 347-355.

- Shu-Shun, L. & Chang-Jung, W. (2008). Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow. *Automation in Construction*, 17: 966–974.
- Waligora, G. (2008). Discrete–continuous project scheduling with discounted cash flows—A tabu search approach. *Computers and Operations Research*, 35: 2141 – 2153.
- Wei, O. S. (2013). Project Scheduling Under Resource Constraints: A Recent Survey. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 2(2): 1-20.
- Zhengwen, H. & Yu, X. (2008). Multi-mode project payment scheduling problems with bonus–penalty structure. *European Journal of Operational Research*, 189: 1191–1207.
- Zareei, M., Hassanpour, H. A. & Mosadeghkah, M. (2014). Time-cost tradeoff for optimizing contractor npv by cost payment and resource constraints using nsga-ii algorithm (case study bandar abbas gas condensate refinery project). *The Journal of Mathematics and Computer Science (JMCS)*, 12(1): 12– 26.
- Zitzler, E., Deb, K. & Thiele, L. (2000). Comparison of multi objective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation Journal*, 8(2): 125–148.
- Zheng, H. & Li, H. (2010). Multi-objective particle swarm optimization for construction time-cost trade off problems. *Construction Management and Economics*, 28(1): 75-88.
- Xu, S. (2011). Applying ant colony system to solve construction time-cost trade off problem. *Advances Materials Research*, (179): 1390-1395.
- Xiong, Y. & Kuang, Y. (2008). Applying an ant colony optimization algorithm-based multiobjective approach for time-cost trade-off. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(2): 153-156.