

# روشی ابتکاری برای تعیین زمان بندی پرداختها در پروژه:

## دو رویکرد متفاوت برای پیمانکار و کارفرما

فرزاد بهرامی<sup>۱</sup>; قاسم مصلحی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله، مسأله تعیین همزمان مکان، زمان و مقدار پرداختها در مسائل زمان بندی پروژه با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی جریانهای نقدی پروژه مد نظر قرار گرفته است. با توجه به طبیعت پیچیده این مسأله، از یک روش ابتکاری دو مرحله ای تکرار شونده استفاده شده است؛ به طوری که در مرحله اول با تثبیت زمان بندی فعالیتها، زمان بندی پرداختها تعیین می گردد؛ در مرحله دوم با تثبیت مکان و مقدار پرداختها، با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار، فعالیتها دوباره زمان بندی می شوند. این دو مرحله تا زمان رسیدن به جوابهای ایده آل تکرار می گردند. در مرحله اول، دو رویکرد مد نظر قرار دارد؛ بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار و بیشینه کردن ارزش خالص فعلی کارفرما و دو الگوریتم فرا ابتکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی طراحی و پس از تنظیم پارامترها با هم مقایسه شده اند. با استفاده از مسائل استاندارد ۱۲۰ فعالیتی، اجرای روش به طور کامل بررسی و تاثیر پارامترهای مدل بر روی ارزش خالص فعلی و زمان تکمیل هر دو هدف ارائه می گردد. همچنین تاثیر مرحله دوم در امکان پذیر کردن پروژهها و بهبود وضعیت پیمانکار بررسی و نشان داده شده است که روش پیشنهادی در تکرارهای متوالی، قادر است به جوابهایی ناچیره دست یابد.

**کلمات کلیدی:** مدیریت پروژه، زمان بندی پرداخت، ارزش خالص فعلی، الگوریتمهای فرا ابتکاری، جواب ناچیره.

## *A Heuristic for Scheduling Payments in project: Two Different Approaches for Contractor and Client*

F. Bahrami; G. Moslehi

### ABSTRACT

In this paper, we consider the problem of simultaneously determining the amount, timing and location of progress payments in projects to maximize NPV of the cash flows. Due to the combinatorial nature of the problem, for the first time, we propose an iterative two-stage heuristics where payment scheduling is determined in the first stage ones activities are fixed, and in the second stage activities are rescheduled to improve contractor NPV by fixing the amount and location of payment scheduling. The two stages iterate up to achieve ideal solutions. In the first stage, two objects are considered; maximization of contractor NPV and maximization of client NPV. Two Meta heuristics; genetic algorithm and simulated annealing are designed and the results are compared. By standard test problems with 120 activities, whole performances of the algorithm is considered and effect of model parameters on NPV and completion time for both objective functions is measured. In addition, effect of the second stage on project feasibility and contractor improvement is considered. The result shows that the proposed algorithm is able to achieve non-dominated solutions in consequential iterations.

**KEYWORDS:** Project management; Payment Scheduling; Net present value; Meta heuristics; Non-dominated solution.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۲/۲۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۸/۲۷

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول و کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان. پست الکترونیک: farzad-bahrami@in.iut.ac.ir  
<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان. پست الکترونیک: moslehi@cc.iut.ac.ir

ارزش خالص فعلی کارفرما با زمان‌بندی پرداخت‌ها در ابتدا یا انتهای پروژه به‌صورتی که هر پرداخت تعداد فعالیت‌های کمی را در بر بگیرد، افزایش می‌یابد.

اخیراً نیز هه و ژو [۷] مسأله زمان‌بندی پرداخت از دیدگاه پیمانکار و کارفرما را بر روی شبکه‌های برداری با نظر گرفتن مدهای مختلف و جریمه و پاداش در انتهای پروژه بررسی کرده‌اند و یک روش دو مرحله‌ای بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی ارائه نموده‌اند.

در این مقاله با توسعه‌ی تحقیق دایاناند و پادمن [۳]، هدف پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار برای کاربرد در شبکه‌های گره‌ای بررسی شده است. با تغییر شبکه، جستجوی نقاط پرداخت از رویدادها به فعالیت‌ها تغییر و در نتیجه فضای جواب به‌شدت گسترش یافته است، لذا با دقت بیشتری می‌توان فضای جواب و تاثیر زمان و مکان پرداخت‌ها را بر روی معیار ارزش خالص فعلی و زمان ختم پروژه بررسی کرده، شانس یافتن جواب‌های بهتر را افزایش داد. از سوی دیگر، با بررسی پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی کارفرما به صورتی جداگانه و ترکیب با هدف پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار، بینشی جدید در بررسی پروژه‌ها از سوی دو طرف ایجاد شده است. همچنین به منظور جستجوی نقاط پرداخت، دو الگوریتم بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی و الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> توسعه و در دو هدف پیمانکار و کارفرما با یکدیگر مقایسه شده است.

در ادامه، در بخش دوم معرفی مسأله و مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. در بخش سوم روش ارائه شده به همراه الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی آمده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها با استفاده از آزمایش‌های وسیع بر روی مسائل استاندارد و مقایسه آنها در بخش چهارم آمده است. همچنین در این تحقیق با استفاده از مسائل استاندارد، اجرای روش مورد بررسی قرار گرفته، تاثیر پارامترهای مدل بر روی مقادیر ارزش خالص فعلی و زمان تکمیل پروژه در هر دو هدف ارائه می‌گردد. در انتها نیز نتایج حاصله و نحوه ادامه کار به اختصار بیان شده است.

## ۲- معرفی و فرمولاسیون مسأله

دو عامل مهم در مدیریت جریان نقدی پروژه، نوع قرارداد و روش توزیع پرداخت‌ها است [۳]. در این مقاله فرض شده است که پیمانکار یک مبلغ کل ثابت برای انجام پروژه دریافت می‌کند؛ به‌طوری‌که زمان‌بندی پرداخت‌ها باعث توزیع این مبلغ کل در طول اجرای پروژه می‌شود. همچنین مقدار هر پرداخت بر اساس هزینه‌های تا زمان پرداخت تعیین می‌شود، یعنی

معمول‌ترین هدف مالی، بیشینه کردن ارزش خالص فعلی<sup>۱</sup> جریان‌های نقدی است که مدت‌هاست محققان و مدیران پروژه اهمیت آن را در ارزیابی‌های پروژه تشخیص داده‌اند [۱۲]. در یک پروژه، هزینه‌ی اجرای فعالیت‌ها به عنوان جریان نقدی منفی پیمانکار محسوب می‌شود و جریان نقدی مثبت او مربوط به دریافت‌هایش است که متناظر با جریان نقدی منفی کارفرما است. راسل [۱۳] اولین بار مسأله زمان‌بندی پروژه با جریان‌های نقدی ثابت را به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی بر روی شبکه‌های برداری<sup>۲</sup> فرموله کرد. او نشان داد که وقتی هدف مالی در پروژه مطرح می‌شود، مسیر بحرانی متفاوت از مسیر بحرانی با هدف کمینه کردن زمان است. گرینولد [۵] تحقیق راسل را با اضافه کردن یک ضرب‌الاجل<sup>۳</sup> به پروژه و تغییر شکل دادن مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی به یک مسأله برنامه‌ریزی خطی معادل، بسط و گسترش داد. تالبوت [۱۴] نیز این مسأله را با اضافه کردن محدودیت منبع با استفاده از یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بر روی شبکه‌های گره‌ای<sup>۴</sup> فرموله نمود.

مسأله زمان‌بندی پرداخت با در نظر گرفتن پرداخت‌های بر اساس پیشرفت پروژه اولین بار توسط دایاناند و پادمن [۱] معرفی شد. آنها یک روش برنامه‌ریزی "صفر و یک" ارائه کردند و چندین روش ابتکاری را پیشنهاد و آزمایش نمودند. دایاناند و پادمن [۲] با اضافه نمودن محدودیت‌هایی به مدل‌های قطعی راسل [۱۳]، گرینولد [۵] و تالبوت [۱۴]، مدل‌هایی ارائه کردند که بتواند پرداخت‌های بر اساس پیشرفت پروژه را در نظر بگیرد. دایاناند و پادمن [۳] یک روش دو مرحله‌ای برای مسأله زمان‌بندی پرداخت با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار در شبکه‌های برداری ارائه کردند که در اولین مرحله زمان‌بندی پرداخت‌ها را با استفاده از یک الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی<sup>۵</sup> تعیین می‌کند و سپس در مرحله دوم فعالیت‌ها به منظور بهبود ارزش خالص فعلی پروژه دوباره زمان‌بندی می‌شوند. آزمایش‌ها نشان داد که روش مذکور بهتر از روش‌های ابتکاری قبلی [۱] است.

اولین بار دایاناند و پادمن [۴] مسأله زمان‌بندی پرداخت از دیدگاه کارفرما را در شبکه‌های برداری بررسی و با توسعه چندین مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، نشان دادند که این مدل‌ها در بسیاری از موقعیت‌های قراردادی معتبر است. همچنین مشخص شد برخلاف دید رایج، زمان‌بندی منظم پرداخت‌ها هزینه‌های کارفرما را در پروژه افزایش می‌دهد، اما

پرداخت‌ها بر اساس پیشرفت پروژه است.

با توجه به این‌که در این مقاله از شبکه‌های گره‌ای استفاده می‌شود، بر خلاف روش دایاناند و پادمن [۳] به جای بسط مدل راسل [۱۳]، بسط مدل تالبوت [۱۴] مد نظر قرار گرفته است. پیمانکار با کارفرما در مورد کل مبلغ دریافت شده برای انجام پروژه، تعداد پرداخت‌ها و نسبت هزینه‌های بازپرداخت شده در هر پرداخت مذاکره می‌کند، سپس تمامی فعالیت‌های پروژه می‌توانند به عنوان فضای جستجو برای مشخص کردن مکان پرداخت‌ها انتخاب شوند. با مشخص شدن مکان پرداخت‌ها و معلوم بودن زمان‌بندی فعالیت‌ها، زمان و مقدار هر پرداخت مشخص می‌شود.

فرض شده است که هزینه‌های پیمانکار در زمان ختم فعالیت‌ها رخ می‌دهند؛ چون در بیشتر مواقع هر پیمانکار اجرای فعالیت‌های مختلف یک پروژه را به تعدادی پیمانکار فرعی واگذار می‌نماید و زمانی هزینه کارهای انجام شده را می‌پردازد که فعالیت به درستی پایان پذیرفته باشد [۱۵].

در اینجا یک پروژه را با  $n$  فعالیت در نظر بگیرید.  $N_j$  هزینه مرتبط با فعالیت  $j$  است. پیمانکار در طول اجرای پروژه مجموع  $Z$  واحد پولی را در  $k$  پرداخت بر اساس پیشرفت، از کارفرما دریافت می‌کند و آخرین پرداخت در زمان تکمیل پروژه انجام می‌شود که در بر گیرنده مبلغ کل بودجه منهای تمامی پرداخت‌های صورت گرفته است.  $\pi$  سود حاشیه‌ای پیمانکار را نشان می‌دهد به طوری که  $Z = (1 + \pi) \cdot \sum_{j=1}^n N_j$  است. نسبت هزینه‌های پوشش داده شده با هر پرداخت با  $\beta$  نشان داده می‌شود، که حد بالای مقدار پرداخت است. از سوی دیگر، حد بالای  $\beta$  برابر  $1 + \pi$  است. تکمیل پروژه برای کارفرما در برگیرنده مقداری سود است که این مقدار بسیار بزرگتر از  $Z$  و حتی چندین برابر آن در نظر گرفته می‌شود [۴].

پروژه دارای نرخ تنزیل  $\alpha$  است؛ به طوری که تمامی محاسبات با این نرخ تنزیل محاسبه می‌شود. همچنین پروژه دارای یک ضرب‌الاجل است که به هیچ وجه تخطی از آن مجاز نیست.

## ۲-۱- پارامترهای مسأله

پارامترهای استفاده شده در مسأله به اختصار به صورت زیر تعریف می‌گردد:

تعداد فعالیت‌ها	$n$
تعداد پرداخت‌ها	$k$
زودترین زمان تکمیل فعالیت $j$ ام، $j = 1, \dots, n$	$EF_j$
دیرترین زمان تکمیل فعالیت $j$ ام، $j = 1, \dots, n$	$LF_j$
مدت زمان فعالیت $j$ ام، $j = 1, \dots, n$	$d_j$

برابر ۱ است اگر پرداخت  $i$  در پایان فعالیت  $j$  انجام پذیرد. در غیر اینصورت صفر،  $j = 1, \dots, n$  و  $i = 1, \dots, k$   
 برابر ۱ است اگر فعالیت  $j$  در زمان  $t$  تکمیل گردد. در غیر اینصورت صفر،  $j = 1, \dots, n$  و  $i = 1, \dots, k$   
 هزینه فعالیت  $j$  ام،  $j = 1, \dots, n$   
 مقدار پرداخت  $i$  ام،  $i = 1, \dots, k$   
 خالص جریان نقدی فعالیت  $j$  ام،  $j = 1, \dots, n$   
 مبلغ سرمایه‌گذاری شده (جمع پرداخت‌های کارفرما) سود حاصل از تکمیل پروژه برای کارفرما  
 نرخ تنزیل  
 سود حاشیه‌ای پیمانکار  
 نرخ پوشش هزینه‌های انجام شده با هر پرداخت  
 مجموعه روابط تقدم تاخر شروع به پایان  
 مجموعه روابط تقدم تاخر پایان به پایان  
 ضرب الاجل تکمیل پروژه  
 فاکتور تنزیل در دوره زمانی  $t$   
 که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c_t = \exp(-\alpha t) \quad , \quad t = 0, 1, 2, \dots, D. \quad (1)$$

## ۲-۲- مدل ریاضی مسأله

با بسط مدل ریاضی تالبوت [۱۴] و در نظر گرفتن پرداخت‌هایی بر اساس پیشرفت پروژه [۲] و همچنین تغییر زمان رخداد هزینه‌ها از زمان شروع به زمان ختم فعالیت‌ها [۱۵]، مدل ریاضی مسأله با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^k P_i \sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} c_t y_{jt} - \sum_{j=1}^n N_j \sum_{t=EF_j}^{LF_j} c_t y_{jt} \quad (2)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, k. \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k x_{ij} \leq 1 \quad , \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

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

$$\sum_{t=EF_h}^{LF_h} (t - d_h) \cdot y_{ht} - \sum_{t=EF_g}^{LF_g} t \cdot y_{gt} \geq 0 \quad , \quad \forall (g, h) \in W. \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k P_i = Z \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^k P_i \sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{s=0}^t y_{st} - \beta \sum_{j=1}^n N_j \sum_{s=0}^t y_{st} \leq 0 \quad , \quad t = 0, 1, 2, \dots, D. \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad , \quad i = 1, \dots, k \quad , \quad j = 1, \dots, n. \quad (9)$$

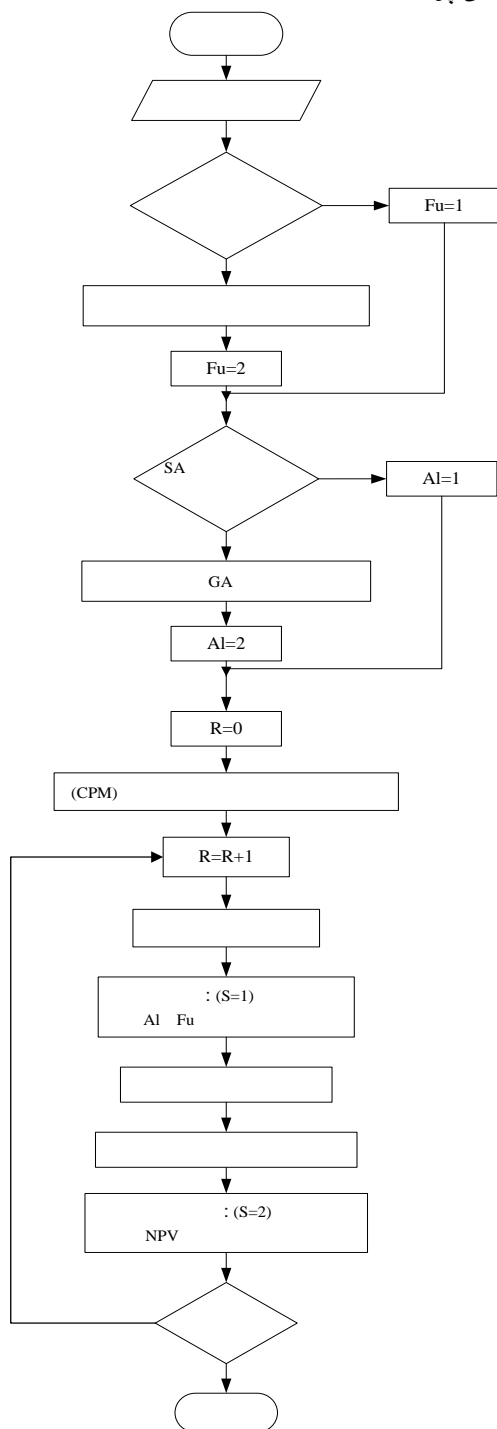
$$y_{jt} \in \{0, 1\} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad t = 0, 1, 2, \dots, D. \quad (10)$$

$$P_i \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, k. \quad (11)$$

مرحله زمان‌بندی پرداخت‌ها به منظور دو هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما به صورتی جداگانه توسعه داده شده است. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۱) وجود دارد.

### ۳-۱- مرحله اول - زمان‌بندی پرداخت‌ها

در این مرحله از دو الگوریتم فرا ابتکاری شناخته شده ژنتیک و شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی به منظور زمان‌بندی پرداخت‌ها استفاده شده است.



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

تابع هدف پیمانکار با (۲) مشخص شده است؛ محدودیت (۳) زمان‌بندی پرداخت‌ها را طوری تنظیم می‌کند که دقیقاً به تعداد پرداخت‌ها، فعالیت برای تخصیص در نظر گرفته شود؛ محدودیت (۴) باعث می‌شود که در هر فعالیت حداکثر یک پرداخت صورت پذیرد؛ محدودیت (۵) فعالیت‌ها را در بازه زودترین و دیرترین زمان ممکن زمان‌بندی می‌کند؛ محدودیت (۶) روابط تقدم تاخر میان فعالیت‌ها را رعایت می‌کند؛ محدودیت (۷) نشان می‌دهد که قرارداد از نوع مبلغ ثابت است و از مبلغ بودجه تعیین شده نمی‌توان تخطی کرد؛ محدودیت (۸) یا محدودیت توزیع مبلغ بودجه، اجازه نمی‌دهد مقدار کل پرداخت‌های انجام شده در هر دوره زمانی، از هزینه فعالیت‌های انجام شده تا آن لحظه، با توجه به نرخ پوشش، بیشتر شود؛ محدودیت‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نیز نوع متغیرهای مسأله را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، مدل‌سازی هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی کارفرما نیز می‌تواند همانند مدل پیمانکار انجام شود؛ کافی است تابع هدف به جای (۲) به صورت (۱۲) تغییر کند:

$$Max \quad B \sum_{i=EF_n}^{LF_n} c_i x_{kn} - \sum_{i=1}^k P_i \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{i=EF_j}^{LF_j} c_i y_{jt} \quad (12)$$

هر دو مدل ارائه شده مسأله عدد صحیح غیر خطی هستند با تابع هدف غیر خطی و محدودیت‌های توزیع پرداخت غیر خطی به طوری که یافتن جواب بهینه برای چنین مدل‌هایی تضمین شده نیست. در چنین شرایطی روش‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌توانند نتیجه‌بخش باشند.

### ۳- روش حل مسأله

به منظور حل این مسأله از یک روش ابتکاری دو مرحله‌ای تکرار شونده استفاده شده است؛ به طوری که ابتدا زمان‌بندی فعالیت‌ها بر اساس زودترین زمان ختم به دست می‌آید و تثبیت می‌شود. در مرحله اول ( $S=1$ ) با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری زمان‌بندی پرداخت‌ها مشخص می‌گردد. چون زمان‌بندی فعالیت‌ها بر عهده پیمانکار است، در مرحله دوم ( $S=2$ ) با تثبیت مکان و مقدار پرداخت‌ها و اضافه نمودن محدودیت‌های تقدم تاخر پایان به پایان و در نظر گرفتن ضرب‌الاجل پروژه، با هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پیمانکار، فعالیت‌ها به صورت بهینه زمان‌بندی می‌شوند. سپس زمان فعالیت‌ها تثبیت شده، مرحله اول دوباره اجرا می‌گردد. این دو مرحله به صورت پی‌درپی تکرار می‌شوند تا زمانی که تغییری در جواب‌ها حاصل نگردد یا تعداد تکرارها ( $R$ ) از حد مشخص شده‌ای تجاوز نماید. در حالی که مرحله دوم تنها بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار را در نظر می‌گیرد،

غیر از ژن اول) عوض می‌شود. لازم به ذکر است که در الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی نیز مکانیزم تولید جواب همسایه همانند عملگر جهشی الگوریتم ژنتیک است.

کروموزوم ۱	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
کروموزوم ۲	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1
فرزند	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1

شکل (۲): حالت اول عملگر تقاطعی در پروژه‌های با ۱۲ فعالیت و ۵

پرداخت

کروموزوم ۱	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
کروموزوم ۲	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
فرزند	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1

شکل (۳): حالت دوم عملگر تقاطعی در پروژه‌های با ۱۲ فعالیت و ۵

پرداخت

برای توقف در شرایط مختلف سه معیار حداکثر تعداد نسل‌ها، عدم بهبود بهترین جواب پس از تولید چند نسل و گذشت زمانی مشخص در نظر گرفته شده است. گام‌های الگوریتم ژنتیک به صورت زیر است:

گام صفر: اطلاعات اولیه را وارد کنید.

گام ۱: جمعیت اولیه را تولید و در جمعیت جاری ذخیره نمایید. - مقدار تابع هدف هر کدام از اعضای جمعیت جاری را به دست آورده، مقدار برازندگی آنها را محاسبه نمایید.

گام ۲: از جمعیت جاری یک کروموزوم ( $X_1$ ) بر اساس مکانیزم چرخ رولت<sup>۹</sup> انتخاب نمایید.

گام ۳: یک عدد تصادفی  $\rho_1$  تولید نمایید.

گام ۳-۱: اگر  $\rho_1 \leq Pr_c$  است بر اساس مکانیزم چرخ رولت یک کروموزوم دیگر ( $X_2$ ) از جمعیت جاری انتخاب کنید.

- با استفاده از  $X_1$  و  $X_2$  و عملگر تقاطعی یک فرزند ( $X_3$ ) تولید نمایید.

- یک عدد تصادفی  $\rho_2$  تولید نمایید.

- اگر  $\rho_2 \leq Pr_m$  است بر روی  $X_3$  عملگر جهشی را انجام دهید.

گام ۳-۲: اگر  $\rho_1 > Pr_c$  است با اعمال عملگر جهشی بر روی  $X_1$  یک فرزند ( $X_3$ ) تولید نمایید.

گام ۴:  $X_3$  را به استخر کاندیداتوری<sup>۱۰</sup> منتقل کنید.

گام ۵: گام‌های ۲ تا ۴ را به اندازه تعداد جمعیت تکرار کنید.

گام ۶: مقدار تابع هدف هر کدام از جواب‌های جمعیت را به دست آورید.

گام ۷: جمعیت جاری را به استخر کاندیداتوری اضافه نمایید تا اعضای آن دو برابر شود.

گام ۸: مقدار برازندگی کروموزوم‌های استخر کاندیداتوری را محاسبه نمایید.

گام ۹: بر اساس روش تورنمنت<sup>۱۱</sup> و انتخاب بهترین

الگوریتم ژنتیک یکی از عمومی‌ترین انواع شناخته شده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که توسط هالند [۸] ارائه شد و سپس گلدبرگ [۶] از آن در بهینه‌سازی استفاده کرد. یک الگوریتم ژنتیک از شش جزء اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: کروموزوم، جمعیت اولیه، تابع برازندگی، نحوه انتخاب والدین، عملگرهای ژنتیکی و معیار توقف.

الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها آغاز می‌گردد. این مجموعه جمعیت اولیه نام دارد که در اینجا به صورت تصادفی تولید شده است. هر کروموزوم یک جواب از فضای شدنی مسأله است. در این مقاله کروموزوم‌ها به صورت رشته‌ای از ژن‌های صفر و یک هستند که تعداد ژن‌ها به اندازه تعداد فعالیت‌ها است؛ به اندازه تعداد پرداخت‌ها عدد ۱ و بقیه صفر هستند. با توجه به اینکه یک پرداخت حتماً بایستی در زمان تکمیل پروژه انجام پذیرد، آخرین ژن کروموزوم همیشه ۱ است. از سوی دیگر چون اکثراً فعالیت اول نشان‌دهنده شروع پروژه و فعالیتی مجازی است، مقدار آن صفر است. در هر تکرار کروموزومی که تابع برازش بیشتری دارد، احتمال بیشتری برای پذیرش به عنوان والد دارد. در این مقاله تابع برازش بر اساس رتبه به صورت (۱۳) در نظر گرفته شده است:

$$F_i = ((L - v_i) / \sum_{i=1}^L v_i) \quad (13)$$

در فرمول فوق،  $L$  تعداد اعضای جمعیت،  $v_i$  رتبه کروموزوم و  $F_i$  مقدار برازش کروموزوم  $i$  را نشان می‌دهد که بر اساس مقدار ارزش خالص فعلی به صورت نزولی مرتب شده است.

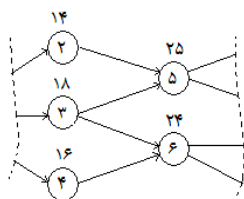
از دو عملگر تقاطعی<sup>۷</sup> و جهشی<sup>۸</sup> استفاده شده است. در عملگر تقاطعی طراحی شده، دو حالت با توجه به مشابهت بین کروموزوم‌ها ممکن است رخ دهد. در حالت اول دو کروموزوم کمتر از  $k-1$  ژن مشابه دارند. در این حالت، همانند شکل (۲)، تمامی ژن‌های مشابه دو کروموزوم به فرزند منتقل شده و ژن‌های بعدی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که از هر کروموزوم حداقل یک ژن متفاوت انتخاب گردد. در حالت دوم دقیقاً  $k-1$  ژن مشابه هستند. در این حالت ابتدا دو ژنی که مشابه نیستند به فرزند منتقل می‌شوند، سپس از  $k-1$  ژن مشابه،  $k-2$  ژن به تصادف انتخاب می‌گردد. این مورد در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین اگر هر دو کروموزوم در  $k$  ژن مشابه باشند، فرزند با اعمال عملگر جهش تولید می‌شود. در عملگر جهشی یکی از ژن‌های با مقدار ۱ انتخاب شده (به غیر از ژن آخر) و به صورت تصادفی با یکی از ژن‌های با مقدار صفر (به

### ۳-۲- مرحله دوم - بهبود زمان بندی فعالیت ها

در شرایط واقعی، زمان بندی فعالیت ها بر عهده پیمانکار است. با توجه به اینکه پرداخت ها بر اساس پیشرفت پروژه است، هنگامی که فعالیت به عنوان مکان پرداخت انتخاب می شود، مقدار پرداخت، متناظر با هزینه فعالیت های تکمیل شده از پرداخت قبلی، محاسبه می شود. مقدار این پرداخت ها و هزینه ها در انتهای مرحله اول تثبیت می گردد تا در مرحله دوم با خالص جریان نقدی سر و کار داشته، تابع هدف از حالت غیر خطی (۲) به حالت خطی (۱۶) تبدیل شود:

$$\text{Max} \sum_{j=1}^n \text{Net}_j \sum_{i=EF_j}^{LF_j} c_i y_{ji} \quad (16)$$

از یک سو، در مرحله دوم، زمان بندی دوباره فعالیت ها نباید موجب بر هم خوردن مقدار و مکان ثابت پرداخت ها گردد. از سوی دیگر مقدار پرداخت ها متناظر با هزینه چندین فعالیت است که لزوماً پیش نیاز آن مکان پرداخت نیستند، لذا محدودیت های تقدم و تأخر جدیدی میان فعالیت هایی که به عنوان مکان پرداخت انتخاب شده اند با سایر فعالیت ها، به نام روابط تقدم و تأخر پایان به پایان، ایجاد می گردد. به عنوان مثال شکل (۴) برشی از شبکه فعالیت های یک پروژه است که شماره فعالیت ها در داخل گره ها و زمان ختم توسط روش مسیر بحرانی، بر روی آن نشان داده شده است.



شکل (۴): برشی از شبکه یک پروژه

فرض کنید فعالیت ۵ بر روی مسیر بحرانی قرار گرفته و مقدار شناوری آن صفر است و توسط الگوریتم فرا ابتکاری به عنوان یکی از نقاط پرداخت در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر فعالیت ۶ دارای ۵ واحد زمان شناوری است ولی در مرحله اول تکرار اول (S=1, R=1) در سریع ترین زمان ممکن یعنی ۲۴ تثبیت شده است. هزینه مربوط به آن در پرداخت های قبلی در نظر گرفته نشده و چون تاریخ تکمیل آن زودتر از فعالیت ۵ است، هزینه اش جزو مقادیر پرداخت در گره ۵ در نظر گرفته خواهد شد. حال در S=2, R=1، به منظور موجه ماندن زمان بندی پرداخت حاصل از S=1, R=1 بایستی محدودیتی در نظر گرفت تا این فعالیت دیرتر از فعالیت ۵ زمان بندی نشود. در این صورت اضافه شدن محدودیت (۱۷) باعث می شود تا شناوری فعالیت ۶ به یک روز تقلیل پیدا کند.

جواب ها، به اندازه جمعیت جاری از استخر کانیداتوری کروموزوم ها را انتخاب کرده، به جمعیت جاری منتقل نمایید. گام ۱۰: گام های ۲ تا ۹ را تا رسیدن به هر کدام از معیارهای توقف تکرار نمایید.

### ۳-۱- الگوریتم شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی

الگوریتم شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی از الگوریتم های محبوبي است که پس از معرفی توسط کرکپاتریک و همکاران [۹] به طور گسترده ای در حل مسائل بهینه سازی ترکیبی استفاده شده است. گام های الگوریتم شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی به صورت زیر است.

- گام صفر: اطلاعات اولیه را وارد کنید.
- گام ۱: با ۱ قرار دادن k-1 فعالیت غیر مجازی اول به همراه فعالیت مجازی آخر، یک جواب اولیه تولید نمایید.
- مقدار ارزش خالص فعلی متناظر را محاسبه کنید.
- این جواب را جواب جاری (X<sub>C</sub>) و بهترین جواب (X<sub>B</sub>) بنامید.
- گام ۲: بر مبنای مکانیزم تولید جواب همسایه، یک جواب (X<sub>N</sub>) از X<sub>C</sub> تولید نمایید.
- مقدار ارزش خالص فعلی متناظر با X<sub>N</sub> را محاسبه کنید.
- گام ۳: طبق مکانیزم زیر در مورد X<sub>N</sub> تصمیم گیری نمایید.

گام ۳-۱: اگر مقدار تابع هدف X<sub>N</sub> برابر یا بهتر از X<sub>C</sub> است، آن را جایگزین X<sub>C</sub> نمایید.

- اگر مقدار تابع هدف X<sub>N</sub> بهتر از X<sub>B</sub> است، آن را جایگزین X<sub>B</sub> نمایید.

گام ۳-۲: اگر مقدار تابع هدف X<sub>N</sub> بدتر از X<sub>C</sub> است؛ - مقدار تابع احتمال (۱۴) را محاسبه نمایید.

$$\text{Pr} = \exp(\Delta C_l / T_l) \quad (14)$$

که در آن ΔC<sub>l</sub> مقدار اختلاف بین X<sub>N</sub> و X<sub>C</sub> در تکرار l و T<sub>l</sub> پارامتر کنترلی یا همان دما است.

- یک عدد تصادفی ρ بین صفر و یک تولید کنید.

- اگر ρ از مقدار احتمال تابع (۱۴) کوچکتر بود X<sub>N</sub> را جایگزین X<sub>C</sub> نمایید.

گام ۴: دما را بر اساس (۱۵) به هنگام کنید.

$$T_{l+1} = r.T_l \quad (15)$$

که در آن r نرخ سرد شدن است.

گام ۵: گام های ۲ تا ۴ را تا رسیدن به هر کدام از معیارهای توقف تکرار نمایید.



$$\sum_{t=EF_h}^{LF_h} t.y_{ht} - \sum_{t=EF_g}^{LF_g} t.y_{gt} \geq 0, \quad \forall (g, h) \in V. \quad (17)$$

الگوریتم در هر سه دسته و با تمامی نمونه‌ها اجرا می‌گردد.

#### ۴-۱- تنظیم پارامترهای دو الگوریتم و مقایسه بین آنها

دو الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی و ژنتیک با استفاده از نرم افزار سی شارپ دات نت ۲۰۰۵ کد شده و بر روی یک کامپیوتر ای ام دی ۶۴ ایکس ۲ دو آل ۱۳ با پردازشگر ۲/۵۱ گیگا هرتز و حافظه ۱ گیگا بایت اجرا گردید. به دلیل تعدد پارامترها، مقادیر بر روی مقداری مشخص تثبیت شدند. از این رو در تمامی مسائل واحد زمان هفته انتخاب شد. سود حاشیه‌ای ۲۰٪، نرخ پوشش هزینه‌ها ۱۱۰٪، نرخ تنزیل ۴٪ در هفته و سود حاصل از تکمیل پروژه برای کارفرما، دو برابر مجموع هزینه‌ها در نظر گرفته شد و در مسائل با ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ فعالیت به ترتیب ۴، ۸ و ۱۲ پرداخت مد نظر قرار گرفت و زمان‌بندی فعالیت‌ها بر اساس روش مسیر بحرانی تثبیت گردید. همچنین زمان حل در تنظیم پارامترها و مقایسه‌ها، در هر دسته از مسائل، بر اساس میانگین زمان همگرایی الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی مشخص گردید. این مقدار برای مسائل ۱۲۰ فعالیتی ۲ ثانیه انتخاب شد.

به‌طور خلاصه در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، بهترین تعداد جمعیت برای هر دو هدف ۳۰، احتمال تقاطع ۰/۲۵ برای پیمانکار و ۰/۵۰ برای کارفرما، نرخ جهش ۰/۷۰ برای پیمانکار و ۰/۵۰ برای کارفرما و احتمال تورنومنت در هر دو هدف ۰/۷۰ انتخاب شد. در الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی نیز مقدار ضریب کاهش دما در هر دو هدف ۰/۹۹۹ و دمای اولیه برای پیمانکار و کارفرما به ترتیب ۱۰ و ۱۰۰ انتخاب گردید. سپس مقایسه دو الگوریتم انجام شد. جدول (۱) نتیجه مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه دو الگوریتم در دو هدف

۱۲۰		۶۰		۳۰		تعداد فعالیت	
تعداد جوابهای بهتر در مقایسه	میانگین تابع هدف	تعداد جوابهای بهتر در مقایسه	میانگین تابع هدف	تعداد جوابهای بهتر در مقایسه	میانگین تابع هدف	الگوریتم	هدف
۱۴۴	۸۶۷۹/۰۰	۱۲۷	۴۶۰۶/۳۸	۱۵	۲۳۴۴/۹۱	ژنتیک	پیمانکار
۴۵۶	۸۶۹۸/۱۰	۲۴۶	۴۶۱۰/۰۴	۲۴	۲۳۴۴/۹۹	شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی	
۳۴۸	۹۷/۳۰۹۵۱	۱۹۵	۳۵/۱۷۱۵۹	۱۴	۹۶۱۸/۳۱	ژنتیک	کارفرما
۷۱	۱۶/۳۰۹۱۷	۵۹	۹۳/۱۷۱۴۲	۳۰	۹۶۲۰/۱۸	شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی	

اضافه کردن محدودیت (۱۷) تثبیت مقدار و مکان پرداخت‌ها را هنگام اجرای  $S=2, R \geq 1$  تضمین می‌نماید. به هر حال مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده شده در این مرحله شامل بیشینه‌سازی تابع هدفی همانند (۱۶) با محدودیت‌های (۵)، (۶)، (۱۷) و (۱۰) است. جواب مدل به‌صورت بهینه با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری موجود دست یافتنی است.

#### ۴-۲- آزمایش‌های عددی

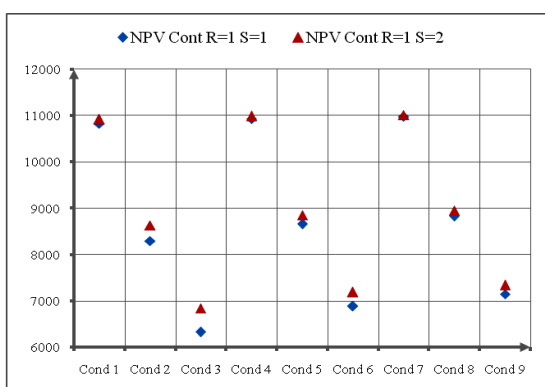
در این بخش ابتدا مقدار پارامترهای دو الگوریتم مرحله اول تعیین و در دو هدف پیمانکار و کارفرما به‌صورت مستقل مقایسه می‌شوند. سپس روش پیشنهادی با هر دو هدف و مقادیر مختلف پارامترهای مدل در تعداد تکرارهای مشخص اجرا شده، تاثیر مرحله دوم و پارامترهای مدل بر روی مقادیر ارزش خالص فعلی و زمان ختم پروژه بررسی می‌گردد. در این مقاله، آزمایش‌ها بر روی مسائل استاندارد شبکه‌های گره‌ای یعنی کتابخانه [۱۰] و در دسته مسائل با ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ فعالیت غیر مجازی با حذف محدودیت منابع انجام شده است. این مسائل فاقد هزینه هستند؛ لذا همانند [۱۱] برای هر فعالیت هزینه‌ای در بازه [۰، ۱۰۰۰] به‌صورت تصادفی تولید گردید. مسائل ۳۰ و ۶۰ فعالیتی این کتابخانه حاوی ۴۸۰ نمونه و مسائل ۱۲۰ فعالیتی آن شامل ۶۰۰ نمونه می‌باشد. چون هر ۱۰ نمونه نشان‌دهنده یک سری از مسائل با شرایط مشابه است و تنظیم پارامترهای الگوریتم و تحلیل پارامترهای مدل به آزمایش‌های بسیاری نیازمند است؛ این گونه آزمایش‌ها با انتخاب یک نمونه از هر سری انجام می‌شود، ولی مقایسه دو

جدول (۲): شرایط مختلف در اجرای روش پیشنهادی

نرخ تعداد پرداخت ها	تتزیل	٪۰/۱۰	٪۰/۴۰	٪۰/۷۰
۸	Cont 1	Cont 2	Cont 3	
۱۲	Cont 4	Cont 5	Cont 6	
۱۶	Cont 7	Cont 8	Cont 9	

#### ۴-۲-۱ نتایج اجرای روش پیشنهادی با هدف پیمانکار

نتایج در این هدف نشان می‌دهد که اجرای مرحله دوم در تکرار اول، یعنی  $R=1, S=2$ ، به‌طور میانگین بیش از ۲٪ مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول ( $S=1$ ) پیمانکار را بهبود داده است. با اجرای  $S=2$  زمان ختم فعالیت‌های میانی تا زمان پرداخت متناظرشان به تاخیر افتاده است ولی زمان ختم فعالیت‌های واقع بر روی مسیر بحرانی تغییر نکرده تا پرداخت آخر (که پرداخت بزرگی است) به تاخیر نیفتد؛ لذا تنها در ۷ مسأله زمان ختم پروژه افزایش یافته و در ۳۳۵ مسأله، با اجرای  $S=2, R=1$ ، علاوه بر ارزش خالص فعلی پیمانکار، مقدار ارزش خالص فعلی کارفرما نیز بهبود یافته است؛ به‌طوری‌که مقدار ارزش خالص فعلی کارفرما به‌طور میانگین ۱٪/۰ نسبت به  $S=1, R=1$  افزایش یافته است. در اشکال (۵) و (۶) به ترتیب میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما در مرحله‌ی اول و دوم تکرار اول در حل ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت و در اشکال (۷) و (۸) نیز میانگین اختلاف بین مقادیر ارزش خالص فعلی مشاهده شده در اشکال (۵) و (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در اجرای مرحله اول و دوم تکرار اول در حل ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت

در جدول (۱) ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد فعالیت‌ها، الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی نتایج بهتری در هدف پیمانکار و الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری در هدف کارفرما ایجاد کرده است. انتخاب دمای اولیه زیاد الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی و نرخ تقاطع بالاتر الگوریتم ژنتیک در هدف کارفرما و بهتر بودن جواب‌های الگوریتم ژنتیک در هدف کارفرما، نشان‌دهنده پیچیدگی فضای جواب و حضور بیشتر بهینه‌های محلی در هدف کارفرما در مقایسه با هدف پیمانکار است. در نتیجه هدف کارفرما به روشی مانند الگوریتم ژنتیک نیازمند است تا در هر لحظه به کمک فضای جواب بزرگ‌تر، شانس بیشتری برای فرار از بهینه محلی داشته باشد. از سوی دیگر فضای جواب هدف پیمانکار به‌گونه‌ای است که به جستجو در فضای نزدیک به بهترین جواب یافت شده با استفاده از یک روش جستجوی محلی همانند الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی نیازمند است. اما بهتر بودن نتایج الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی در مسائل با ۳۰ فعالیت، در هر دو هدف، را می‌توان به کوچک بودن فضای جواب این مسائل ربط داد؛ به‌طوری‌که به الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی اجازه می‌دهد جستجوی عمیق‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته باشد.

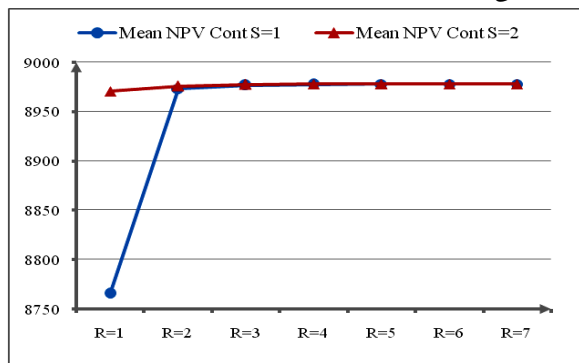
#### ۴-۲-۲ اجرای روش پیشنهادی و تحلیل پارامترهای مدل

برای اجرای روش پیشنهادی، در هدف پیمانکار الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی و در هدف کارفرما الگوریتم ژنتیک انتخاب گردید. پس از انجام آزمایش‌های اولیه، حد خروج از روش در هدف پیمانکار ۷ و در هدف کارفرما ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد. ۶۰ مثال با ۱۲۰ فعالیت انتخاب گردید. به منظور تحلیل پارامترهای مدل سه مقدار ۱٪/۰، ۴٪/۰، و ۷٪/۰ برای نرخ تتزیل و سه مقدار ۸، ۱۲ و ۱۶ برای تعداد پرداخت‌ها در نظر گرفته شد. سود حاشیه‌ای نیز ۲۰٪، نرخ پوشش هزینه‌ها ۱۱۰٪ و سود حاصل از تکمیل پروژه برای کارفرما، دو برابر مجموع هزینه‌ها مد نظر قرار گرفت و برای تمامی مسائل ۱۰ واحد زمانی ضرب الاجل در نظر گرفته شد. با این شرایط هر مسأله در ۹ حالت به‌صورت جدول (۲) اجرا شد. معیار خروج از مرحله اول هر تکرار، افزایش کمتر از ۰/۰۱ در میانگین بهترین جواب در طی ۱۰۰۰ تکرار الگوریتم شبیه‌سازی ذوب و انجماد تدریجی و ۲۰ نسل الگوریتم ژنتیک انتخاب گردید. با این حد خروج، به‌طور میانگین مرحله اول زمانی معادل ۲/۱ ثانیه گرفت. همچنین برای حل مدل در مرحله دوم از نرم افزار گمز/سی پلکس سولور<sup>۱۴</sup> استفاده گردید.

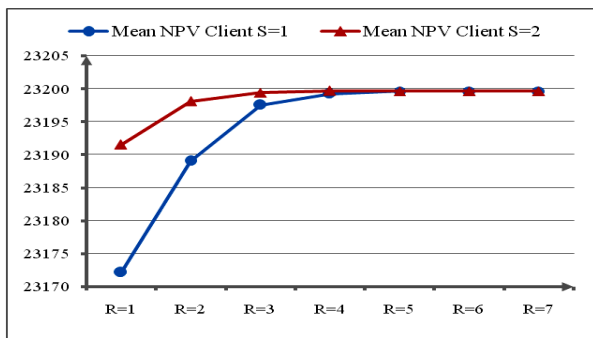


افزایش مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار، راحت‌تر است.

با انجام تکرارهای بعدی ( $R > 1$ ) تاثیر اجرای مرحله دوم در بهبود مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار کمتر شده است؛ به طوری که با اجرای  $S=2, R=2$  مقدار تغییر در مقایسه با  $S=1, R=2$  به  $0.3\%$  رسیده است و با ادامه تکرارها مقدار ارزش خالص فعلی در بیش از  $0.99\%$  مسائل به همگرایی می‌رسد. در اشکال (۹) و (۱۰) به ترتیب میانگین مقادیر ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما در حل ۵۴۰ مسأله در طی اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا هفتم مشاهده می‌شود.



شکل (۹): روند تغییرات میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا هفتم در حل ۵۴۰ مسأله

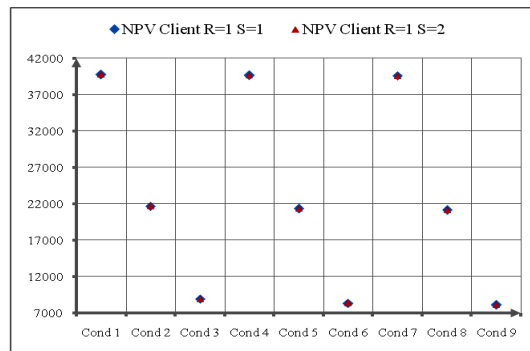


شکل (۱۰): روند تغییرات میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا هفتم در حل ۵۴۰ مسأله

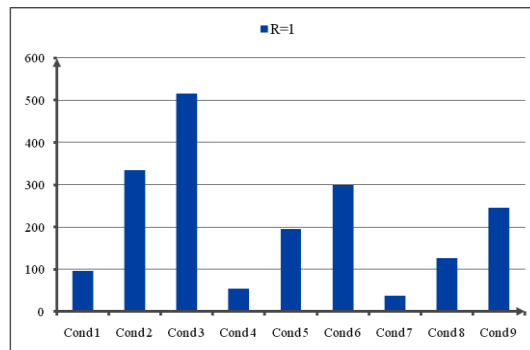
بایستی توجه داشت که شکل (۱۰) تنها تغییرات میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما را نشان می‌دهد و در مسائلی که اجرای مرحله دوم باعث کاهش زمان پرداخت‌ها یا افزایش زمان ختم پروژه گردد، ارزش خالص فعلی کارفرما کاهش می‌یابد.

#### ۴-۲-۲ نتایج اجرای روش پیشنهادی با هدف کارفرما

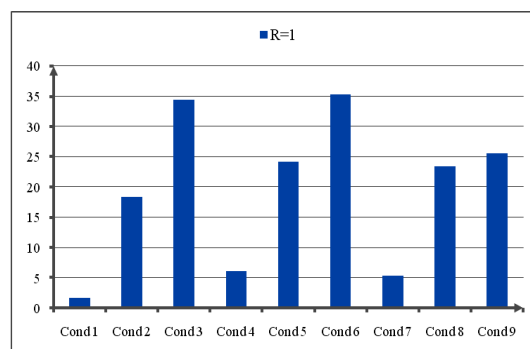
چون تغییرات ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما در  $R > 2$  مشابه با تغییرات ارزش خالص فعلی در تکرارهای اول و دوم است، در اشکال (۱۱) و (۱۲) به ترتیب میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما در اجرای مرحله اول و دوم تکرار اول و دوم ۶۰ مسأله منتخب نشان داده شده است.



شکل (۶): میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در اجرای مرحله اول و دوم تکرار اول در حل ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت



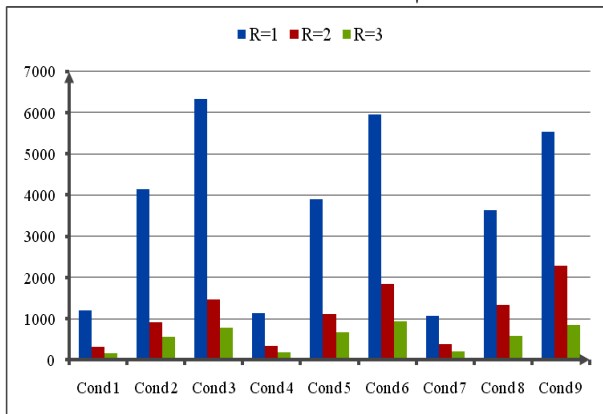
شکل (۷): میانگین تغییر در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار با اجرای در حل ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت



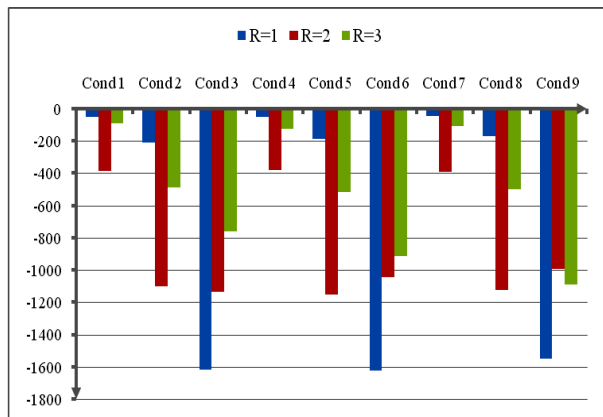
شکل (۸): میانگین تغییر در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول کارفرما با اجرای در حل ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت

مشخص است که هر چه نرخ تنزیل افزایش می‌یابد، مقدار هر دو ارزش خالص فعلی کاهش می‌یابد، اما افزایش تعداد پرداخت‌ها باعث افزایش ارزش خالص فعلی پیمانکار و کاهش ارزش خالص فعلی کارفرما می‌گردد. هر چه مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول بزرگ‌تر باشد، اجرای مرحله دوم تاثیر کمتری در تغییر آن می‌گذارد. اما در شکل (۷) هر قدر تعداد پرداخت‌ها کاهش می‌یابد، اجرای  $S=2, R=1$  تاثیر بیشتری در بهبود مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار می‌گذارد؛ زیرا با کاهش تعداد پرداخت‌ها، محدودیت‌های تقدم و تأخر جدید کمتری ایجاد شده، تغییر زمان ختم فعالیت‌ها، برای

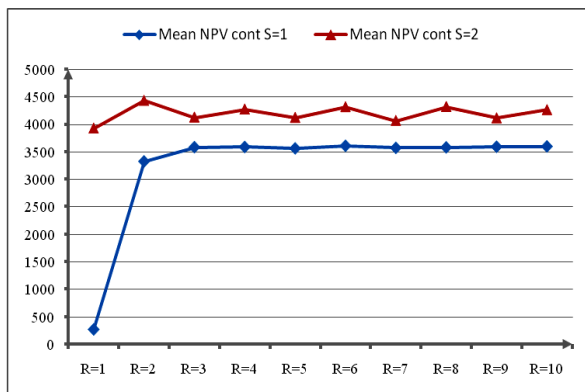
۵۴۰ مسأله در طی اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا دهم مشاهده می‌گردد. در جدول (۳) نیز میانگین متغیرهای روش پیشنهادی در هدف کارفرما، در حل ۵۴۰ مسأله در طی تکرارهای اول تا دهم وجود دارد.



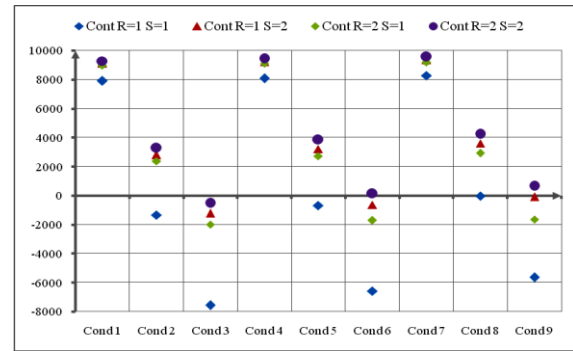
شکل (۱۳): میانگین تغییر در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار با اجرای مرحله دوم در حل ۶۰ مسأله منتخب در تکرارهای اول تا سوم ۹ حالت



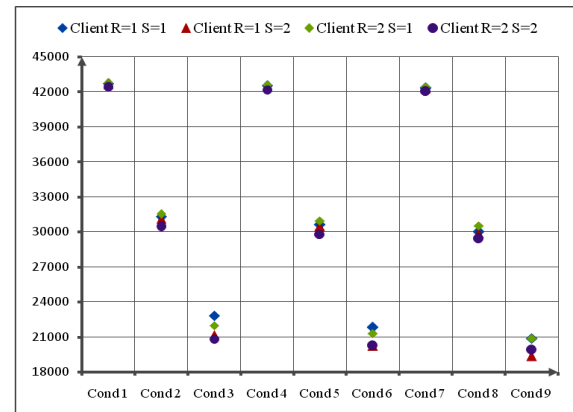
شکل (۱۴): میانگین تغییر در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول کارفرما با اجرای مرحله دوم در حل ۶۰ مسأله منتخب در تکرارهای اول تا سوم ۹ حالت



شکل (۱۵): روند تغییرات میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا دهم در حل ۵۴۰ مسأله



شکل (۱۱): میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در اجرای مرحله اول و دوم تکرار اول و دوم ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت

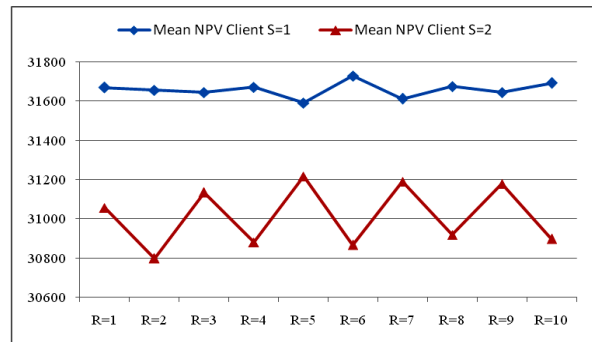


شکل (۱۲): میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در اجرای مرحله اول و دوم تکرار اول و دوم ۶۰ مسأله منتخب در ۹ حالت

هر چند اجرای  $S=2$  بهبود زیادی را در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار ایجاد می‌کند، اما چون زمان بندی پرداختها توسط کارفرما تعیین می‌گردد، در بعضی مسائل حتی اجرای  $S=2, R \geq 2$  نیز نمی‌تواند مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار را مثبت نماید که مترادف با عدم توجیه اقتصادی انجام پروژه است. به عنوان مثال در حالت ۳ در شکل (۱۱)، که تعداد پرداختها ۸ و نرخ تنزیل ۷٪ است، اجرای  $S=2, R=2$  نیز نتوانسته به‌طور میانگین مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار را مثبت نماید.

همانند هدف پیمانکار، اجرای  $S=2, R=1$  حاوی مقدار زیادی بهبود در مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار است و چون مرحله اول با هدف کارفرما اجرا می‌شود، اجرای مرحله دوم مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار را به‌شدت افزایش می‌دهد. در اشکال (۱۳) و (۱۴) به ترتیب میانگین تغییر در مقادیر ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار و کارفرما با اجرای مرحله دوم، در حل ۶۰ مسأله منتخب، در تکرارهای اول تا سوم ۹ حالت و در اشکال (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار و کارفرما در حل

تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب‌الاجل به تفکیک ۹ حالت در حل ۶۰ مسأله منتخب در طی ده تکرار نشان داده شده است در جدول (۴) کاهش تعداد پرداخت‌ها و افزایش نرخ تنزیل باعث افزایش زمان ختم پروژه شده است و این غیر منتظره است که در نرخ تنزیل ۰/۷٪ - که نرخ تنزیل بالایی است - چرا پیمانکار ترجیح داده تا پروژه در اجرای  $S=2, R \geq 1$  به تاخیر بیفتد؛ در حالی که دریافت هر چه زودتر پرداخت آخر برای جبران هزینه‌ها لازم به نظر می‌رسد. با بررسی مثال‌هایی با نرخ تنزیل ۰/۷٪ معلوم گردید که علت اصلی این‌گونه زمان‌بندی فعالیت‌ها، زمان‌بندی پرداخت خروجی از  $S=1, R \geq 1$  است. کارفرما در  $S=1, R \geq 1$  با سوق دادن پرداخت‌ها به ابتدا یا انتهای پروژه [۴]، مقدار ارزش خالص فعلی خود را بیشینه می‌سازد؛ به طوری که پرداخت‌ها هزینه تعداد فعالیت‌های کمی را در بر بگیرد. در نتیجه هنگام اجرای  $S=2, R \geq 1$  پیمانکار با شرایطی روبروست که پرداخت‌ها یا به ابتدا و یا به انتهای پروژه تمایل دارند. او ابتدا سعی می‌کند فعالیت‌ها را، خصوصاً آنهایی که خروجی نقدی زیادی داشته و در مسیر بحرانی نیز قرار ندارند، تا جایی که می‌شود به تعویق بیندازد؛ سپس پرداخت‌هایی را که ورودی نقدی بیشتری دارند در جای خود نگه دارد. از سوی دیگر، حتی این امکان نیز وجود دارد که با به تاخیر انداختن فعالیت‌هایی که بر روی مسیر بحرانی قرار دارند، با وجود کاهش مقدار پرداخت آخر، در افزایش مقدار ارزش خالص فعلی خود سعی نماید؛ فرآیند پیچیده‌ای که در نهایت موجب افزایش مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار و افزایش زمان ختم پروژه می‌شود.



شکل (۱۶): روند تغییرات میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در اجرای مرحله اول و دوم تکرارهای اول تا دهم در حل ۵۴۰ مسأله

به‌طور میانگین در شکل (۱۵) بیشترین مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار در اجرای  $S=2, R=2$  حاصل شده است، که مترادف با کمترین مقدار ارزش خالص فعلی کارفرما در شکل (۱۶) است. همچنین بیشترین مقدار ارزش خالص فعلی برای کارفرما در اجرای  $S=2, R=5$  حاصل می‌گردد. از سوی دیگر حرکت زیگزوگی میانگین ارزش خالص فعلی در  $S=2, R \geq 1$  در هر دو شکل (۱۵) و (۱۶) نشان می‌دهد که اجرای روش با هدف کارفرما، به سبب تفاوت در اهداف دو مرحله، باعث همگرایی در مقادیر ارزش خالص فعلی نمی‌شود. در جدول (۳) مشخص است که اگر چه اجرای مرحله دوم تاثیر زیادی بر بهبود مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار دارد، اما تنها درصد اندکی از مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول کارفرما را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین در جدول (۳) میانگین استفاده از ضرب‌الاجل و تعداد مسائل استفاده کننده از آن در حل ۵۴۰ مسأله در طی تکرارهای اول تا دهم ملاحظه می‌شود، اما در جدول (۴) میانگین زمان استفاده و

جدول (۳): میانگین متغیرهای مختلف روش پیشنهادی، با هدف کارفرما، در حل ۵۴۰ مسأله در طی تکرارهای اول تا دهم

متغیرهای مسأله تکرارها	میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در مرحله اول (۵۴۰ مسأله)	میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در مرحله دوم (۵۴۰ مسأله)	درصد بهبود ارزش	میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در مرحله دوم (۵۴۰ مسأله)	میانگین ارزش خالص فعلی کارفرما در مرحله اول (۵۴۰ مسأله)	درصد بهبود ارزش	میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در مرحله دوم (۵۴۰ مسأله)	میانگین ارزش خالص فعلی پیمانکار در مرحله اول (۵۴۰ مسأله)	تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب‌الاجل
۱	۲۷۰/۸	۳۹۲۶/۳	۱۳۰/۱۳	۳۱۶۶۶/۸	۳۱۰۵۵/۱	-۱/۹۳	۷/۲۷	۱۹۱	
۲	۳۳۲۶/۶	۴۴۳۰/۴	۳۳/۱۸	۳۱۶۵۴/۸	۳۰۷۹۸/۰	-۲/۷۱	۵/۰۵	۳۰۳	
۳	۳۵۸۵/۵	۴۱۲۵/۶	۱۵/۰۶	۳۱۶۴۲/۹	۳۱۱۳۳/۱	-۱/۶۱	۵/۷۲	۲۵۳	
۴	۳۵۸۸/۳	۴۲۷۲/۷	۱۹/۰۷	۳۱۶۷۰/۴	۳۰۸۷۹/۷	-۲/۵۰	۵/۷۴	۲۹۰	
۵	۳۵۶۳/۴	۴۱۲۱/۷	۱۵/۶۷	۳۱۵۸۹/۰	۳۱۲۱۵/۷	-۱/۱۸	۵/۶۱	۲۲۱	
۶	۳۶۰۹/۹	۴۳۱۵/۷	۱۹/۵۵	۳۱۷۲۷/۵	۳۰۸۶۶/۸	-۲/۷۱	۵/۴۶	۳۱۲	
۷	۳۵۷۲/۷	۴۰۶۶/۲	۱۳/۸۱	۳۱۶۰۹/۸	۳۱۱۸۸/۷	-۱/۲۳	۶/۱۳	۲۲۲	
۸	۳۵۸۱/۴	۴۳۱۸/۹	۲۰/۵۹	۳۱۶۷۳/۵	۳۰۹۱۷/۵	-۲/۳۹	۵/۳۳	۲۹۱	
۹	۳۵۹۲/۹	۴۱۱۲/۱	۱۴/۴۵	۳۱۶۴۳/۵	۳۱۱۷۸/۱	-۱/۴۷	۵/۸۲	۲۴۱	
۱۰	۳۵۹۹/۲	۴۲۶۲/۳	۱۸/۴۲	۳۱۶۹۱/۱	۳۰۸۹۶/۷	-۲/۵۱	۵/۶۹	۲۹۹	

جدول (۴): میانگین زمان استفاده از ضرب الاجل و میانگین تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب الاجل در حل ۶۰ مسأله منتخب در طی ده تکرار

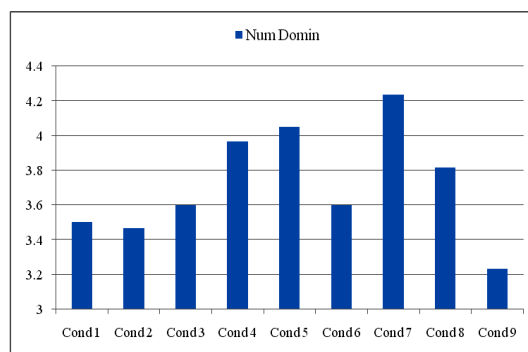
نرخ تنزیل	تعداد پرداختها	۸	۱۲	۱۶
٪/۱۰	میانگین استفاده از ضرب الاجل	۴/۴۸	۴/۰۹	۴/۱۶
	تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب الاجل	۱۸/۰۰	۲۰/۴۰	۱۸/۷۰
٪/۴۰	میانگین استفاده از ضرب الاجل	۴/۷۸	۴/۴۹	۴/۴۸
	تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب الاجل	۱۹/۸۰	۲۱/۶۰	۲۰/۳۰
٪/۷۰	میانگین استفاده از ضرب الاجل	۹/۱۱	۸/۶۱	۷/۸۵
	تعداد مسائل استفاده کننده از ضرب الاجل	۵۱/۵۰	۴۸/۱۰	۴۵/۹۰

فعالیتها، زمان بندی پرداختها تعیین می‌گردد و در مرحله دوم با تثبیت مکان و مقدار پرداختها، با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار، فعالیتها دوباره زمان بندی می‌شوند و این دو مرحله تا زمان رسیدن به جوابهای ایده آل تکرار می‌گردند. در تعیین زمان بندی پرداختها در مرحله اول، دو رویکرد مد نظر قرار گرفت: بیشینه کردن ارزش خالص فعلی پیمانکار و بیشینه کردن ارزش خالص فعلی کارفرما، نیز دو الگوریتم فرا ابتکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی ارائه گردید. جواب مرحله دوم نیز به صورت بهینه به دست آمد. پس از تنظیم پارامتر دو الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی و مقایسه آنها در دو هدف با استفاده از مسائل استاندارد، مشخص شد که در هدف پیمانکار الگوریتم شبیه سازی ذوب و انجماد تدریجی و در هدف کارفرما الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری را حاصل می‌کند.

نتایج اجرای روش پیشنهادی نشان داد که در هر دو هدف، مرحله دوم باعث بهبود مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار می‌گردد و مرحله دوم تکرار اول، حاوی بیشترین مقدار بهبود است؛ به گونه ای که در اهداف پیمانکار و کارفرما، به ترتیب بیش از ۲ و ۱۳۵۰ درصد مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول پیمانکار بهبود یافته است. گر چه اجرای مرحله دوم تاثیر زیادی بر بهبود مقدار ارزش خالص فعلی پیمانکار دارد، تنها درصد اندکی از مقدار ارزش خالص فعلی مرحله اول کارفرما راحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین حضور تکرارهای مختلف موجب بهبود جوابها و یافتن جوابهای ناچیره می‌گردد؛ به طوری که در روش پیشنهادی با اهداف پیمانکار و کارفرما، به ترتیب به طور میانگین ۱/۳ و ۳/۷۲ جواب ناچیره در حل ۵۴۰ مسأله به دست آمد.

چون مدل ارائه شده تاکنون بر روی شبکه های گره ای ملاحظه نشده بود، از رویکردهای آتی، بررسی سایر الگوریتم های فرا ابتکاری در مساله زمان بندی پرداخت است. همچنین با اضافه کردن محدودیت منابع و موازنه های

با بررسی کلی جوابهای دو هدف، معلوم گردید که روش پیشنهادی در طول تکرارهای متوالی، قادر به یافتن جوابهای ناچیره است؛ به طوری که در اجرای روش با هدف پیمانکار، در ۱۳۴ مسأله از ۵۴۰ مسأله، ۲ جواب ناچیره و در ۱۱ مسأله ۳ جواب ناچیره به دست آمد که میانگین ۱/۳ جواب ناچیره را حاصل می‌نماید. اما در اجرای روش با هدف کارفرما، چون روش پیشنهادی به صورت متداخل و رفت و برگشت اهداف پیمانکار و کارفرما را در نظر می‌گیرد، نتایج بهتری به دست آمد و در ۵۲۵ مسأله بیش از یک جواب پیدا شد؛ به طوری که تعداد جوابهای ناچیره در این مسائل بین ۲ تا ۹ جواب با میانگین ۳/۷۲ جواب ناچیره در نوسان است. با این جوابها گزینه های بیشتری برای مذاکره در مورد قرارداد در دسترس پیمانکار و کارفرما قرار می‌گیرد. در شکل (۱۷) تعداد جوابهای ناچیره ییافت شده در اجرای روش پیشنهادی با هدف کارفرما به تفکیک حالت وجود دارد.



شکل (۱۷): تعداد جوابهای ناچیره پیدا شده در اجرای روش پیشنهادی با هدف کارفرما تحت حالت ۹

## ۵- خلاصه، نتایج و رویکردهای آتی

در این مقاله یک روش ابتکاری دو مرحله ای تکرار شونده به منظور تعیین همزمان مکان، زمان و مقدار پرداختها در مسائل زمان بندی پروژه با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی جریانهای نقدی پیمانکار و کارفرما به صورتی جداگانه، ارائه گردید. در مرحله اول روش پیشنهادی، با تثبیت زمان بندی

مد نظر قرار داد تا حالتی را برای حصول توافق میان پیمانکار و کارفرما ایجاد نماید.

منبع- زمان می‌توان مدل ارائه شده را منطقی‌تر نمود. از تغییرات ساختاری نیز می‌توان تغییر تابع هدف مرحله اول را

## ۶- مراجع

- [۹] Kirkpatrick, S.; Gelatt, Jr.; Vecchi, M.P.; "Optimization by simulated annealing", Science 220, 671-680, 1983.
- [۱۰] Kolisch, R.; Sprecher, A.; Drexel, A.; "Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems", Management Science 41, 1693-1703, 1995.
- [۱۱] Mika M.; Waligora G.; Weglarz J.; "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, 2005.
- [۱۲] Pollack-Johnson, B.; Liberatore, M.; "Project management software usage and patterns and suggested research directions for future development", Project Management Journal 29(2), 19-28, 1998.
- [۱۳] Russell, AH.; "Cash Flows in networks", Management Science, 16(5), 357-373, 1970.
- [۱۴] Talbot, FB.; "Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: the nonpreemptive case". Management Science, 28(10), 1197-1210, 1982.
- [۱۵] Vanhoucke M.; Demeulemeester E.; Herroelen W.; "Progress payments in project scheduling problems", European Journal of Operational Research, Volume 148, 604-620, 2003.
- [۱] Dayanand, N.; Padman, R.; "Payments in projects: a contractor's model", Technical Report, The Heinz School, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, (1993).
- [۲] Dayanand, N.; Padman, R.; "On modeling payments in project networks", Journal of the Operational Research Society, 48, 906-918, 1997.
- [۳] Dayanand, N.; Padman, R.; "A two stage search heuristic for scheduling payments in projects", Annals of Operations Research, 102, 197-220, 2001.
- [۴] Dayanand, N.; Padman, R.; "Project contracts and payment schedules: the client's problem", Management Science, 47(12), 1654-1667, 2001.
- [۵] Grinold, RC.; "The payment scheduling problem", Naval Research Logistics Quarterly, 19(1), 123-36, 1972.
- [۶] Goldberg, D.E.; "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley Publishing Co, 1989.
- [۷] He, Z.; Xu, Y.; "Multi-mode project payment scheduling problems with bonus-penalty structure", European Journal of Operational Research (2007), doi:10.1016/j.ejor.2006.07.053.
- [۸] Holland, J.H.; "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence", MIT Press, Cambridge, (2nd edition in 1992) 1975.

## ۷- زیر نویس ها

- <sup>۱</sup> Net Present Value (NPV)
- <sup>۲</sup> Activity On Arc (AOA)
- <sup>۳</sup> Deadline
- <sup>۴</sup> Activity On Node (AON)
- <sup>۵</sup> Simulated Annealing (SA)
- <sup>۶</sup> Genetic Algorithm (GA)
- <sup>۷</sup> Crossover
- <sup>۸</sup> Mutation
- <sup>۹</sup> Roulette Wheel
- <sup>۱۰</sup> Candidate Pool
- <sup>۱۱</sup> Tournament
- <sup>۱۲</sup> C#.Net 2005
- <sup>۱۳</sup> AMD 64 X2 Dual
- <sup>۱۴</sup> GAMS/Cplex Solver

