

## یک روش ابتکاری نوین برای مسئله هزینه - زمان پروژه‌ها، با احتساب ارزش زمانی پول

مسعود ربانی\*، کامران رضائی\* و نسیم صیدفروش لاهیجی\*\*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۲/۳/۱۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۳/۲۴)

**چکیده** - مسئله تعادل بین هزینه و زمان، یکی از مهمترین مباحث در مدیریت پروژه و مورد علاقه پیمانکاران پروژه هاست. هدف مسئله تعادل بین هزینه و زمان، تحلیل حساسیت هزینه‌های پروژه، نسبت به تغییرات مدت زمان انجام فعالیتها به منظور به دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیتها به نحوی است که مجموع هزینه‌های پروژه مینیمم شود. در الگوریتمهای ابتکاری ارائه شده در این زمینه، تصمیم‌گیری در زمینه کاهش زمان فعالیتها، بر مبنای مینیمم شیب هزینه فشرده سازی فعالیت صورت می‌گیرد. اما از آنجایی که پروژه‌ها دارای بازه‌های زمانی طولانی‌اند، می‌توان گفت که نرخ بهره بر آنها تأثیرگذار است. در این مقاله، یک روش ابتکاری نوین به منظور به دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیتها با احتساب نرخ بهره و با هدف مینیمم کردن ارزش فعلی هزینه‌های پروژه ارائه شده است.

واژگان کلیدی: کوتاه سازی زمان پروژه‌ها، تعادل بین هزینه و زمان، ارزش زمانی پول، نرخ بهره، ارزش فعلی

## A New Heuristic Algorithm for Time-cost Trade-off Problem Taking into Account Monetary Value

M. Rabbani, K. Rezaie and N. Seid Foroush Lahiji

Industrial Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Tehran

**Abstract:** Time-cost trade-off is one of the most important subjects in project management and of interest to contractors. The goal of time-cost trade-off is sensitivity analysis of project costs to changes in activity duration in order to obtain the best combination of activity duration decrease, in a way that the sum of project costs is minimized. In the heuristics presented in this area, time crashing is on the base of the minimum cost slope of activities. But since projects are usually performed over

\* - استادیار      \*\* - کارشناسی ارشد

long periods, they can be affected by interest rate. In this paper, a new heuristic algorithm is presented in order to obtain the best combination of activity duration decrease while the monetary value is taken into account, with the goal of minimizing the sum of present value of project costs.

**Keywords:** Time crashing Time-cost trade-off, Monetary value, Rate of interest, Present Value

## فهرست علائم

<p>هزینه های مستقیم فعالیت <math>i</math> به ازای تغییر یک واحد زمانی)</p> <p><math>R_{ij}</math> (الگوریتم کلی و پیشنهادی) مجموع <math>R_{ij}</math> های موجود در ترکیب فعالیتهای منتخب در صورت وجود چند مسیر بحرانی</p> <p><math>\Delta t_{ij}</math> (الگوریتم کلی و پیشنهادی) حداکثر زمانی که می توان فعالیت <math>i</math> را کاهش داد تا مسیرهای زیر بحرانی در آستانه بحرانی شدن قرار گیرند طوری که <math>\Delta t_{ij} \leq D_{ij} - d_{ij}</math></p> <p><math>\Delta t_{ij}(com)</math> (الگوریتم کلی و پیشنهادی) مینیمم <math>\Delta t_{ij}</math> فعالیتهای موجود در ترکیب در صورت وجود چند مسیر بحرانی</p> <p><math>T</math> (مدل ۱ و مدل ۲) زمان تحویل پروژه</p> <p><math>y_{ij}</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) زمان واقعی انجام فعالیت <math>i</math> پس از فشرده سازی</p>	<p><math>C_{ij}</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) هزینه مستقیم مورد نیاز برای اجرای فعالیت <math>i</math> در زمان معمولی اجرای فعالیت</p> <p><math>d_{ij}</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) زمان فشرده اجرای فعالیت <math>i</math></p> <p><math>D_{ij}</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) زمان معمولی اجرای فعالیت <math>i</math></p> <p><math>E_i</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) زمان شروع از گره <math>i</math> (زمان عملی وقوع واقعه <math>i</math>)</p> <p><math>H</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) هزینه بالاسری یک دوره</p> <p><math>K_x</math> (مدل ۲ و رابطه ۲) نرخ بهره</p> <p><math>n</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) تعداد فعالیتهای</p> <p><math>NPV\ COST</math> (مدل ۲ و رابطه ۲) ارزش فعلی هزینه ها</p> <p><math>NPV\ COST_{ij}</math> (الگوریتم پیشنهادی) ارزش فعلی هزینه ها در صورت فشرده سازی فعالیت <math>i</math></p> <p><math>R_{ij}</math> (مدل ۱ و ۲- رابطه ۱ و ۲) شیب هزینه فعالیت <math>i</math> (افزایش</p>
---	--

## ۱- مقدمه

از منابع و در نتیجه انجام پروژه ها به صورت موازی و افزایش درآمدهای پروژه ها دانست [۲-۵].

در محاسبات زمان بندی پروژه<sup>۴</sup>، معمولاً زودترین زمان تکمیل آخرین فعالیت به عنوان تاریخ تحویل<sup>۵</sup> پروژه در نظر گرفته می شود. از سوی دیگر، زمان تکمیل پروژه، بر اساس یک سری از محدودیتهای یا نیازهای داخلی و خارجی تعیین می شود که در اکثر مواقع، زمان تکمیل تعیین شده بر اساس محدودیتهای، طولانی تر از تاریخ تحویل محاسبه شده در زمان بندی پروژه است. در چنین شرایطی، زمان تکمیل پروژه را می توان به روشهای زیر کاهش داد:

۱- کوتاه سازی زمان تکمیل پروژه از طریق بازنگری منطق

کوتاه سازی زمان پروژه ها<sup>۱</sup> یک مقوله جدید در مدیریت پروژه نبوده و می توان مطرح شدن این مسئله را همزمان با مطرح شدن سی. پی. ام<sup>۲</sup> و پرت<sup>۳</sup> دانست. البته در طی این سالها نظریات و روشهای نوینی در این زمینه ارائه شده است [۱]. از مهمترین دلایل توجه به این زمینه را می توان تغییر ضرورت و اولویت پروژهها و طرحها (به دلایل تغییر وضعیت سیاسی، اقتصادی و اجتماعی، تغییر دیدگاههای مدیریت ارشد سازمان یا کارفرمای پروژه، تغییر امکانات و منابع اجرایی سازمان)، کاهش زیانهای ناشی از دیرکرد در تحویل پروژه، استفاده بهینه

St:

$$E_j - E_i \geq y_{ij}$$

$$d_{ij} \leq y_{ij} \leq D_{ij} \quad (\text{مدل ۱})$$

$$E_n - E_1 \leq T$$

$$E_j, E_i, y_{ij} \geq 0$$

همان طور که ملاحظه می‌شود، تابع هدف این مدل ترکیبی از مجموع هزینه‌های مستقیم پایه (هزینه مستقیم در زمان معمولی)، افزایش هزینه‌های مستقیم به دلیل فشرده سازی و هزینه‌های بالاسری بوده و محدودیتهای آن بیانگر قواعد پیش‌نیازی شبکه و مدت زمان فعالیتهاست. همچنین ارتباط بین شیب هزینه و زمان کوتاه سازی در مدل به صورت خطی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این مدل بیشتر در شبکه‌های کوچک با تعداد محدودی گره، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در شبکه‌های بزرگ، به دلیل افزایش متغیرها و در نتیجه پیچیده شدن مدل، معمولاً از الگوریتمهای ابتکاری استفاده می‌شود.

تاکنون مدل‌های ریاضی و الگوریتمهای ابتکاری زیادی در بحث تعادل بین هزینه و زمان پروژه‌ها، به منظور مدل بندی هزینه‌های پروژه و حل این مدلها برای به دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیتها، ارائه شده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه، مسئله کاهش زمان را از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار داده‌اند. همانند رویکرد برنامه ریزی خطی ارائه شده توسط «کلی» در دهه ۶۰، کارهای مشابه ارائه شده در دهه ۷۰ توسط «گویال» و «زیمنس» [۹] و تحقیقات انجام شده برای ایجاد مدلها، رویه‌ها و راه‌حلها برای ترکیب یک ارتباط غیر خطی بین هزینه و زمان انجام فعالیتها در این دو دهه، توسط «برمن»، «فالك»، «فالكرسون»، «شافر»، «میر»، «بوچر»، «فوندال»، «اوپولوس» [۸] انجام شده است. «لیو»، «چن» و «یانگ» [۸] در مقاله خود روشی جدید که اثرات غیر قطعی بودن زمان فعالیتها را همزمان با بحث تعادل بین هزینه و زمان در نظر می‌گیرد، با کمک نظریه مجموعه فازی و الگوریتم ژنتیک ارائه داده‌اند. مدل‌هایی نیز برای زمان بندی پروژه‌ها، تحت شرایط عدم قطعیت توسط «آنگ»، «آهوجا»، «آنوآچالام»، «پادایلا»، «کار»

شبکه (اجرای برخی از فعالیتهای بحرانی به صورت موازی) ۲- کوتاه سازی مدت زمان اجرای فعالیتهای بحرانی با صرف هزینه‌های بیشتر یا فشرده‌سازی [۲، ۳ و ۴].

کوتاه سازی یا فشرده سازی زمان پروژه به معنای کاهش زمان انجام فعالیتهای مسیر بحرانی با سرمایه گذاری و صرف هزینه‌های بیشتر به منظور دستیابی به منابع اضافی و یا منابع با کارایی بالاتر (شامل نیروی انسانی، مواد اولیه، تجهیزات و ماشین آلات و سرمایه) است [۱-۶].

در زمان بندی پروژه‌ها، چون فعالیتهای پروژه، معمولاً بر اساس منابع در دسترس زمان بندی می‌شوند، می‌توان مدت زمان انجام فعالیتها را به عنوان تابعی از منابع در دسترس، مورد توجه قرار داد. از سوی دیگر، هزینه‌های پروژه در قالب تابعی از زمان پروژه و در نتیجه زمان انجام فعالیتهای آن بیان می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که تغییر در منابع موجب تغییر در زمان اجرای فعالیتها و همچنین هزینه‌های پروژه می‌شود. از این رو، در صورت نیاز به کوتاه سازی یا فشرده سازی زمان پروژه و استفاده از منابع اضافی یا منابع با کارایی بالاتر، تخمین زمانی دیگری نیز با عنوان زمان فشرده یا زمان کوتاه شده در زمان بندی ارائه می‌شود که این تخمین به معنای مینیمم زمان حقیقی مورد نیاز برای انجام فعالیتهای پروژه است که معمولاً شامل تخمینی برای مینیمم هزینه مورد نیاز برای دستیابی به این زمان نیز می‌باشد [۱ و ۸]. در بحث تعادل بین هزینه و زمان پروژه، یک تحلیل حساسیت هزینه، نسبت به تغییرات مدت زمان انجام فعالیتها انجام می‌شود که هدف آن به دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیتها به گونه‌ای است که مجموع هزینه‌های پروژه مینیمم شده و بین هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم پروژه، تعادل ایجاد شود.

به منظور به دست آوردن بهترین ترکیب کاهش زمانی فعالیتها، از مدل ریاضی کلاسیک زیر (مدل ۱) استفاده می‌شود:

$$\text{Min} z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij}) + H * (E_n - E_1)$$

و «گنگ» ارائه شده است که بر مبنای نظریه احتمالات است [۸]. همچنین «شاو» و «فنگ» ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و رویکرد پارتو را برای ایجاد راه حل برای مسایل تعادل بین هزینه و زمان در حالت قطعی ارائه کرده‌اند [۸]. «سورش» و «بابو» [۹]، با دخالت دادن کیفیت در بحث فشرده سازی زمان، یک مدل برنامه ریزی خطی را برای مسئله تعادل بین هزینه، زمان و کیفیت<sup>۸</sup> ارائه کردند و «توتک» و «گوموسگلو» [۱۰]، از ارتباط اولیه- ثانویه<sup>۹</sup> برای فشرده سازی زمان پروژه استفاده کرده‌اند. «لیو»، «فنگ» و «بارنس» [۱۱]، در مقاله خود یک رویکرد ترکیبی از تکنیکهای شبیه سازی و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسایل تعادل بین هزینه و زمان تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. «عباسی» و «موکاتاش» [۱۲]، در مقاله خود رویکرد جدیدی را به کمک یک مدل ریاضی که در قالب سرمایه گذاری اضافی بیان شده، برای فشرده سازی زمان بد بینانه در شبکه‌های پرت معرفی کردند که نشان می‌دهد که مینیمم کردن زمان بدبینانه، مدت زمان انجام پروژه و واریانس آن را همزمان کاهش می‌دهد. در همین زمینه، «جورج» و «شو» قوانین کارایی را در شبکه‌های پرت به منظور تسریع در انتخاب فعالیت‌هایی که باید فشرده شوند ایجاد کردند و «سامان» الگوریتم ابتکاری را برای حل این مسایل پیشنهاد کرد [۱۲].

«لی»، «کاو» و «لاو» [۱۳]، در مقاله خود یک روش ترکیبی از یادگیری ماشینی<sup>۱۰</sup> و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسایل تعادل بین هزینه و زمان ارائه کرده‌اند. «فنگ»، «لیو» و «بارنس» [۱۴]، با طرح نامناسب بودن متدهای موجود تجزیه و تحلیل مسایل تعادل بین هزینه برای حل شبکه‌های بزرگ سی.پی.ام، الگوریتمی را بر پایه قوانین الگوریتم ژنتیک، برای بهینه سازی مسایل تعادل بین هزینه و زمان معرفی کردند. همچنین آنها در مقاله دیگری [۱۵]، یک الگوریتم جدید را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح برای به دست آوردن تعداد بهینه منابع که زمان و هزینه پروژه را مینیمم می‌کند، ارائه کرده‌اند. «ردا» و «کار» [۱۶]، با طرح وابستگی بین برنامه ریزی فعالیت‌های پروژه و تأثیر خصوصیات زمان بندی و تخصیص

منابع یک فعالیت بر سایر فعالیتها، عنوان کرده اند که تکنیکهای رایانه‌ای به دلیل مستقل در نظر گرفتن فعالیتها، برای پروژه‌های ساخت و ساز مناسب نیستند.

«گاردینر» و «استوارت» [۱۷]، ارتباط بین بودجه، جریان نقدی، کنترل هزینه و زمان بندی پروژه و اثر نظریه‌وار که هر کدام می‌توانند بر ارزش فعلی خالص<sup>۱۱</sup> بگذارند را مورد بررسی قرار داده و استفاده از تکنیکهای سرمایه گذاری مانند ارزش فعلی خالص را برای کنترل مستمر سلامت پروژه پیشنهاد داده‌اند. «سوند» و «لیشتنبرگ» [۱۸]، در مقاله خود یک روش ابتکاری را برای تعیین، اقتصادی ترین ترکیب فعالیتها با هدف ماکزیمم کردن ارزش فعلی خالص پروژه‌ها که منابع، زمان و هزینه‌ها را متعادل می‌کند ارائه کرده‌اند.

در تحلیلها و الگوریتم‌هایی که تاکنون در زمینه تعادل بین هزینه و زمان ارائه شده، مسئله ارزش زمانی پول چندان در نظر گرفته نشده است. اما از آنجایی که پروژه‌ها، به خصوص پروژه‌های دولتی، معمولاً در یک بازه زمانی طولانی تعریف می‌شوند، می‌توان گفت که نرخ بهره می‌تواند یک عامل تأثیر گذار بر پروژه‌ها بوده و در تصمیم گیری به منظور انتخاب فعالیتها برای فشرده سازی مؤثر باشد. در مقاله حاضر، عامل نرخ بهره به عنوان یک عامل تأثیر گذار در مسایل تعادل بین هزینه و زمان معرفی شده و با بررسی الگوریتم کلاسیک مسئله هزینه- زمان و دخالت نرخ بهره، تأثیر این عامل در تصمیم‌گیری برای انتخاب فعالیتها به منظور فشرده‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایتاً یک الگوریتم ابتکاری در این زمینه با هدف حداقل کردن مجموع ارزش فعلی هزینه‌ها ارائه شده است.

## ۲- الگوریتم هزینه- زمان با احتساب ارزش زمانی پول

در الگوریتم کلاسیک حل مسایل تعادل بین هزینه و زمان، تصمیم گیری در مورد فشرده‌سازی فعالیت‌های مسیر بحرانی برپایه شیب هزینه آنها صورت می‌گیرد. شیب هزینه یک فعالیت در قالب تغییر هزینه‌های مستقیم یک فعالیت به ازای تغییر یک

واحد زمانی (دوره) که می‌تواند بر حسب روز، هفته، ماه یا سال باشد، تعریف می‌شود. در این الگوریتم در هنگام تصمیم‌گیری در مورد فشردن سازی فعالیتها، هزینه‌های مستقیم اجرای فعالیت در زمان معمولی به دلیل ثابت بودن و هزینه‌های بالاسری طرح در نظر گرفته نشده و تنها معیار تصمیم‌گیری، حداقل شیب هزینه فعالیت‌های مسیر بحرانی است. الگوریتم کلاسیک مسئله هزینه-زمان را می‌توان به صورت ذیل در قالب ۲ دستورالعمل بیان کرد [۲ و ۳]:

دستورالعمل ۱: یک مسیر بحرانی در شبکه وجود داشته باشد:

۱- فعالیت‌های مسیر بحرانی مشخص شده،  $R_{ij}$  و  $\Delta t_{ij}$  هر فعالیت تعیین می‌شود.

۲-  $R_{ij}$  فعالیت‌های مسیر بحرانی با یکدیگر مقایسه شده و فعالیتی که دارای کمترین شیب هزینه است، انتخاب شده و مدت زمان آن به میزان  $\Delta t_{ij}$  کاهش می‌یابد، در صورتی که  $R_{ij}$  چند فعالیت مسیر بحرانی با یکدیگر برابر باشد، فعالیتی که دارای کمترین  $\Delta t_{ij}$  است انتخاب می‌شود.

دستورالعمل ۲: چند مسیر بحرانی در شبکه وجود داشته باشد:

۱- مسیرهای بحرانی و فعالیت‌های هر مسیر مشخص می‌شود.

۲- فعالیت‌های مسیر بحرانی به دو مجموعه تقسیم می‌شوند:

مجموعه A: فعالیت‌های مشترک در مسیرهای بحرانی و مجموعه B: فعالیت‌های غیر مشترک در مسیرهای بحرانی

۳- برای فعالیت‌های مجموعه A،  $R_{ij}$  و  $\Delta t_{ij}$  مشخص شده و از بین فعالیت‌های این مجموعه، فعالیتی که دارای کمترین  $R_{ij}$  است، انتخاب می‌شود.

۴- در بین فعالیت‌های مجموعه B، ترکیب‌های مناسبی از فعالیت‌ها، که بتوانند به طور همزمان، زمان همه مسیرهای بحرانی را تقلیل دهند، مشخص شده، مقدار  $R'_{ij}$  که مجموع  $R_{ij}$ ‌های موجود در ترکیب فعالیت‌هاست، به عنوان شیب هزینه هر ترکیب محاسبه می‌شود. همچنین  $\Delta t_{ij}$  فعالیت‌های موجود در ترکیب با یکدیگر مقایسه شده و مینیمم  $\Delta t_{ij}$  فعالیت‌ها به عنوان  $\Delta t_{ij}(com)$  ترکیب در نظر گرفته می‌شود. از بین ترکیبات مشخص شده، ترکیبی که دارای کمترین  $R'_{ij}$  است، به عنوان منتخب

فشردن سازی این مجموعه انتخاب می‌شود.

۵- فعالیت انتخاب شده برای فشردن سازی مجموعه A با کاندید فشردن سازی مجموعه B، بر اساس معیار شیب هزینه مقایسه شده و فعالیت یا ترکیبی که دارای شیب کمتری است، انتخاب شده و به میزان  $\Delta t_{ij}$  یا  $\Delta t_{ij}(com)$  کاهش می‌یابد. در صورتیکه  $R_{ij}$  چند ترکیب یا فعالیت با هم برابر باشد، فعالیت یا ترکیبی که دارای کمترین  $\Delta t_{ij}$  است انتخاب می‌شود.

با پیاده سازی مراحل الگوریتم در روی شبکه نهایتاً یک مجموعه جواب برای زمان اجرای فعالیت‌های پروژه به دست می‌آید که بر اساس این مجموعه جواب می‌توان مجموع هزینه‌های پروژه را به صورت زیر محاسبه کرد:

مجموع هزینه‌های پروژه = هزینه بالاسری پروژه + مجموع هزینه‌های فشردن سازی + مجموع هزینه‌های مستقیم پایه که می‌توان آن را در قالب (رابطه ۱) بیان کرد:

(۱):

$$Cost = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij}) + H * (E_n - E_1)$$

حال در صورت طولانی بودن بازه زمانی پروژه، مسئله ارزش زمانی پول که در اثر وجود نرخ بهره به وجود می‌آید، اهمیت یافته و می‌تواند به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر تصمیم‌گیری در مورد فشردن سازی فعالیت‌ها در مسایل تعادل بین هزینه و زمان مد نظر قرار گیرد. در این حالت به دلیل وجود نرخ بهره، اثر هزینه‌های مستقیم انجام فعالیت‌ها، دیگر ثابت نبوده و می‌بایست به عنوان یکی از عوامل تصمیم‌گیری در مورد فشردن سازی فعالیت‌ها در نظر گرفته شود. همچنین در صورتی که فعالیت‌ها به یک میزان کاهش داده نشوند، هزینه‌های بالاسری نیز یک عامل تأثیرگذار بر تصمیم‌گیری تبدیل می‌شود. بنابراین معیار تصمیم‌گیری می‌بایست تغییر یابد که این مسئله را می‌توان در قالب لم ۱ بیان کرد:

لم ۱: در هنگام وجود نرخ بهره، با فرض تحقق هزینه فعالیت  $ij$  در انتهای زمان اجرای فعالیت، معیار تصمیم‌گیری در

مورد فشرده سازی فعالیتها از مینیمم شیب هزینه به مینیمم

ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها تغییر می‌یابد:

اثبات: فرض می‌شود که دو فعالیت  $kl$  و  $mp$  در روی مسیر بحرانی یک شبکه قرار داشته و کاندید فشرده سازی اند و فعالیت  $mp$  از لحاظ ترتیبی و پیش نیازی قبل از فعالیت  $kl$  در شبکه واقع شده است. مشخصات این دو فعالیت در جدول (۱) درج شده است. همچنین نرخ بهره برابر با  $K_x$  است.

در صورتی که فشرده سازی بر مبنای شیب هزینه صورت گیرد، اگر  $R_{mp} > R_{kl}$  باشد، فعالیت  $kl$  برای فشرده سازی انتخاب می‌شود و در صورتی که  $R_{mp} < R_{kl}$  باشد، فعالیت  $mp$  برای فشرده سازی انتخاب می‌شود و انتخاب فعالیتها بدون توجه به میزان  $\Delta t_{mp}$  و  $\Delta t_{kl}$  صورت می‌گیرد. اما در صورت دخالت نرخ بهره،  $\Delta t$  یعنی میزان زمان فشرده سازی برای محاسبه ارزش فعلی، اهمیت می‌یابد. در صورتی که فرض شود که  $\Delta t_{kl} = \Delta t_{mp} \Rightarrow D_{kl} - y_{kl} = D_{mp} - y_{mp}$  است، ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی فعالیتها، در صورت فشرده کردن فعالیت  $kl$  و فعالیت  $mp$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij})}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij})}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp})}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

که در این عبارات، عبارت  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij})}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}}$  بیانگر ارزش فعلی هزینه‌های فشرده سازی تا این مرحله است که در دو عبارت با هم برابرند.

حال در صورتی که  $R_{kl} < R_{mp}$  باشد،

$$R_{kl} < R_{mp} \Rightarrow R_{kl} * \Delta t_{kl} < R_{mp} * \Delta t_{mp} \quad (2)$$

با توجه به اینکه فعالیت  $kl$  در شبکه بعد از فعالیت  $mp$  واقع شده و  $1 + K_x > 1$  است، نتیجه می‌شود:

$$(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}} > (1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \frac{1}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} \quad (3)$$

با توجه به مثبت بودن عبارات و ضرب طرفین عبارت (۲) و

(۳) در یکدیگر نتیجه می‌شود:

$$\frac{R_{kl} * \Delta t_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \frac{R_{mp} * \Delta t_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

اما در صورتی که  $R_{kl} > R_{mp}$  باشد،

$$R_{kl} > R_{mp} \Rightarrow R_{kl} * \Delta t_{kl} > R_{mp} * \Delta t_{mp} \quad (4)$$

$$E_k + y_{kl} > E_m + y_{mp} \wedge 1 + K_x > 1 \Rightarrow (1 + K_x)^{E_k + y_{kl}} > (1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \frac{1}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} \quad (5)$$

با ضرب دو عبارت (۴) و (۵) در یکدیگر، نتیجه می‌شود:

$$\frac{R_{kl} * \Delta t_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \text{or} > \frac{R_{mp} * \Delta t_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

در واقع با توجه به میزان  $R_{kl}$  و  $R_{mp}$  و میزان فاصله بین دو فعالیت  $mp$  و  $kl$  بر روی مسیر بحرانی که موجب اختلاف در  $E_k + y_{kl}$  و  $E_m + y_{mp}$  می‌شود، می‌توان در مورد علامت  $>$  یا  $<$  اظهار نظر کرد. نکته قابل توجه در این مسئله این است، که حتی با وجود کوچکتر بودن  $R_{kl}$  از  $R_{mp}$  در صورت در نظرگیری نرخ بهره و محاسبه ارزش فعلی، ممکن است فعالیت  $kl$  به منظور فشرده سازی انتخاب شود. از طرف دیگر در صورت عدم وجود نرخ بهره، هزینه‌های معمولی انجام پروژه که به صورت  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}$  بیان می‌شوند، به علت ثابت بودن، تأثیری در تصمیم گیری ندارند. اما در صورت وجود نرخ بهره می‌توان این هزینه‌ها را نیز در قالب ارزش فعلی بیان کرد که در صورت فشرده سازی دو فعالیت  $kl$  و  $mp$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

ارزش فعلی هزینه های معمولی در صورت فشرده سازی فعالیت  $mp$ :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{C_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

$$+ \frac{C_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(mp)}{(1 + K_x)^{E_i(m_p) + y_{ij}(mp)}}$$

که در آن اولین عبارت، ارزش فعلی هزینه‌های معمولی کلیه

جدول ۱- مشخصات دو فعالیت mp و kl

فعالیت	داده‌ها	mp	kl
زمان عادی فعالیت		Dmp	Dkl
زمان فشرده فعالیت		dmp	dkl
زمان واقعی انجام فعالیت پس از فشرده سازی		ymp	ykl
حداکثر زمان فشرده سازی فعالیت به طوری که مسیرهای زیر بحرانی در آستانه بحرانی شدن قرار گیرند، به طوری که $\Delta t = D - y$		$\Delta t_{mp}$	$\Delta t_{kl}$
شیب هزینه فعالیت		Rmp	Rkl
هزینه معمولی انجام فعالیت		Cmp	Ckl

به دو قسمت فعالیت‌های میانی mp و kl و فعالیت‌های بعد از kl نتیجه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(A)_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(A)_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}}$$

چون میزان فشرده‌سازی فعالیتها به یک میزان است، بنابراین می‌توان گفت که میزان زمان انتهایی فعالیت‌های بعد از kl در صورت فشرده سازی فعالیت mp یا kl برابرند، در حالی که در صورت فشرده سازی فعالیت mp و مقایسه آن با حالت فشرده سازی فعالیت kl نتیجه می‌شود:

زمان انتهایی بین فعالیت‌های بین mp و kl کاهش می‌یابد  $\Rightarrow$  در صورت فشرده سازی فعالیت mp زمان انتهایی بین فعالیت‌های بین mp و kl بدون تغییر می‌ماند  $\Rightarrow$  در صورت فشرده سازی فعالیت kl

$$\Rightarrow E_{i(mp)} + y_{ij}(mp) < E_{i(kl)} + y_{ij}(kl)$$

با توجه اینکه  $1 + K_x > 1$  است

$$\Rightarrow (1 + K_x)^{E_{i(mp)} + y_{ij}(mp)} < (1 + K_x)^{E_{i(kl)} + y_{ij}(kl)}$$

و پس از معکوس

فعالیت‌های قبل از فعالیت mp در شبکه و آخرین عبارت، ارزش فعلی هزینه های معمولی کلیه فعالیت‌های بعد از mp در شبکه به جز فعالیت kl است.  $\gamma$  ارزش فعلی هزینه های معمولی در صورت فشرده سازی فعالیت kl:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{(1+K_x)^{E_{i}+y_{ij}}} + \frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E_m+y_{mp}}} + \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E_{*k}+y_{*kl}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}}$$

که در آن اولین عبارت، ارزش فعلی هزینه های معمولی کلیه فعالیت‌های قبل از فعالیت mp در شبکه و آخرین عبارت، ارزش فعلی هزینه های معمولی کلیه فعالیت‌های بین mp و kl و بعد از kl در شبکه می باشد. در دو رابطه، عبارت‌های

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{(1+K_x)^{E_{i}+y_{ij}}}$$

mp و kl در شبکه پشت سر هم قرار داشته باشند، مقدار عبارات

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}} \text{ و } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}}$$

نیز با یکدیگر برابرند و در غیر این صورت نتیجه زیر حاصل می‌شود:

با تقسیم عبارت

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}} \text{ و } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}}$$

کردن، ضرب  $C'(B)_{ij}(mp)$  در طرفین و گرفتن  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n$ ، نتیجه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{ij}(mp)+y_{ij}(mp)}} > \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{ij}(kl)+y_{ij}(kl)}} \quad (6)$$

از طرف دیگر با مقایسه عبارات، نتیجه می‌شود:

در صورت فشرده سازی فعالیت  $mp$  زمان انتهایی فعالیت  $mp$  کمتر از زمان غیر فشرده است.

$$E * mp + y * mp < E_m + y_{mp} \Rightarrow (1+K_x)^{E * mp + y * mp} < (1+K_x)^{E_m + y_{mp}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{(1+K_x)^{E * mp + y * mp}} > \frac{1}{(1+K_x)^{E_m + y_{mp}}} \Rightarrow \frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E * mp + y * mp}} > \frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

به این معنی که با فشرده سازی، میزان ارزش فعلی هزینه‌ها، نسبت به حالت غیر فشرده افزایش می‌یابد.

به همین ترتیب

$$\frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E * k + y * kl}} \quad (8)$$

در صورت جمع عبارات (6)، (7) و (8) زیر با یکدیگر:

$$\frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E * m + y * mp}} + \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E_k + y_{kl}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i}(mp)+y_{ij}(mp)}} < \text{or } >$$

$$\frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E_m + y_{mp}}} + \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E * k + y * kl}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'(B)_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i}(kl)+y_{ij}(kl)}}$$

در واقع با توجه به میزان فاصله بین دو فعالیت  $mp$  و  $kl$  در روی مسیر بحرانی که موجب اختلاف در  $E_k + y_k$  و  $E_m + y_{mp}$  می‌شود، می‌توان در مورد علامت  $>$  یا  $<$  اظهار نظر کرد.

بنابراین ملاحظه می‌شود که علاوه بر ارزش فعلی شیب هزینه، ارزش فعلی هزینه‌های معمولی نیز یک عامل تأثیرگذار بر تصمیم‌گیری است. اما چون فشرده سازی زمان برای دو فعالیت یکسان است، میزان ارزش فعلی هزینه‌های بالاسری با هم برابر است و بنابراین در تصمیم‌گیری بی‌تأثیر است.

$$\Delta tk_l = \Delta t_{mp} \Rightarrow E_n(mp) - E_l(mp) = E_n(kl) - E_l(kl) \\ (1+K_x)^{E_n(mp)-E_l(mp)} = (1+K_x)^{E_n(kl)-E_l(kl)} \\ \Rightarrow \frac{H * (E_n(mp) - E_l(mp))}{(1+K_x)^{E_n(mp)-E_l(mp)}} = \frac{H * (E_n(kl) - E_l(kl))}{(1+K_x)^{E_n(kl)-E_l(kl)}}$$

بنابراین با توجه به اثبات، ملاحظه می‌شود که معیار تصمیم‌گیری برای تعیین فعالیت به منظور فشرده سازی، باید از حداقل شیب هزینه، به حداقل مجموع ارزش فعلی هزینه‌های معمولی و ارزش فعلی هزینه‌های فشرده سازی تغییر یابد. و در صورتی که فشرده‌سازی فعالیتها به یک میزان صورت نگیرد، ارزش فعلی هزینه‌های بالاسری را نیز باید به عنوان یک عام تأثیرگذار در نظر گرفت. بنابراین معیار تصمیم‌گیری از حداقل شیب هزینه به حداقل مجموع هزینه‌ها که به دلیل وجود نرخ بهره در قالب ارزش فعلی بیان می‌شود، تغییر می‌یابد، که می‌توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

ارزش فعلی مجموع هزینه‌های پروژه =

مجموع ارزش فعلی هزینه‌های مستقیم اجرای طرح در زمان معمولی + ارزش فعلی هزینه‌های بالاسری + مجموع ارزش فعلی هزینه‌های فشرده‌سازی فعالیتها

با داشتن نرخ بهره  $(K_x)$ ، می‌توان ارزش فعلی هزینه‌ها  $NPVCOST$  را در قالب فرمول ریاضی زیر، معادله (9) بیان کرد:

$$NPVCOST = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{(1+k_x)^{E_i+y_{ij}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - d_{ij})}{(1+k_x)^{E_i+y_{ij}}} + \frac{H * (E_n - E_l)}{(1+K_x)^{E_n - E_l}} \quad (9)$$

مدل ریاضی این مسئله را می‌توان در قالب مدل ۲ بیان کرد:



مجموعه A: فعالیتهای مشترک در مسیرهای بحرانی و مجموعه B: فعالیتهای غیر مشترک در مسیرهای بحرانی

۳-  $\Delta t_{ij}$  فعالیتهای مجموعه A مشخص می شوند.

۴- در بین فعالیتهای مجموعه B، ترکیبهای مناسبی از فعالیتها که بتوانند به طور همزمان، زمان همه مسیرهای بحرانی را تقلیل دهند، مشخص می شوند. همچنین  $\Delta t_{ij}$  فعالیتهای موجود در ترکیب با یکدیگر مقایسه شده و مینیمم  $\Delta t_{ij}$  فعالیتها به عنوان  $\Delta t_{ij}(com)$  ترکیب در نظر گرفته می شود.

۵- به ازای کاهش زمان به میزان  $\{\Delta t_{ij} \text{ فعالیتهای مسیر بحرانی}\}$   $T = \min \Delta t_{ij} : \Delta t_{ij} \in$  ارزش فعلی هزینه های مستقیم اجرای طرح در زمان معمولی، ارزش فعلی هزینه های بالاسری و ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی و مجموع ارزش فعلی هزینه ها برای هر کدام از فعالیتها و ترکیبات موجود در مجموعه های A و B محاسبه شده و به عنوان NPVCOST آن فعالیت یا ترکیب در نظر گرفته می شود.

۶- NPVCOST فعالیتها و ترکیبات با یکدیگر مقایسه شده، فعالیت یا ترکیبی که کمترین NPVCOST را دارا باشد، انتخاب شده به میزان T واحد زمانی کاهش می یابد. در صورتی که NPVCOST چند فعالیت یا چند ترکیب با هم برابر باشند، یک فعالیت به دلخواه انتخاب می شود.

همان طور که ملاحظه می شود، در الگوریتم پیشنهادی، معیار ارزیابی از شیب هزینه به حداقل مجموع ارزش فعلی هزینه ها تغییر یافته است، که این مسئله منجر به واقعی تر شدن نتایج فشرده سازی در هر مرحله از اجرای الگوریتم می شود. همچنین به دلیل وجود نرخ بهره، در نظرگیری قاعده ای برای میزان کاهش زمان در هر مرحله از اجرای الگوریتم ضروری به نظر می رسد که این مسئله منجر به یکسان بودن کلیه شرایط فشرده سازی برای کلیه فعالیتهای منتخب برای فشرده سازی در روی مسیر بحرانی می شود. ذکر این نکته ضروری است که کاهش زمان به میزان یک واحد در هر مرحله از اجرای الگوریتم به جای قاعده پیشنهادی، نتایج یکسانی را با این الگوریتم ایجاد می کند و تنها مراحل اجرای الگوریتم و دستیابی

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{(1+kx)^{E_i+y_{ij}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - d_{ij})}{(1+kx)^{E_i+y_{ij}}} + \frac{H * (E_n - E_1)}{(1+Kx)^{E_1+Y_{ij}}}$$

St:

$$E_j - E_i \geq y_{ij}$$

$$d_{ij} \leq y_{ij} \leq D_{ij}$$

مدل (۲)

$$E_n - E_1 \leq T$$

$$E_j, E_i, y_{ij} \geq 0$$

بنابراین همان طور که ملاحظه می شود، ایجاد تغییرات لازم در الگوریتم کلی مسایل هزینه- زمان به گونه ای که عامل نرخ بهره را به عنوان یک عامل تأثیرگذار در تصمیم گیری به منظور فشرده سازی فعالیتها در نظر بگیرد، ضروری به نظر می رسد. برای این منظور الگوریتم ذیل که همانند الگوریتم کلاسیک در قالب دو دستورالعمل بیان می شود، پیشنهاد می شود:

**دستورالعمل ۱: در صورتی که تنها یک مسیر بحرانی در شبکه وجود داشته باشد:**

۱- فعالیتهای مسیر بحرانی را همراه با  $\Delta t_{ij}$  مربوط به هر کدام مشخص کرده، به ازای کاهش زمان به میزان

$$T = \min \Delta t_{ij} : \Delta t_{ij} \in \{\Delta t_{ij} \text{ فعالیتهای مسیر بحرانی}\}$$

برای فعالیتهای مسیر بحرانی، ارزش فعلی هزینه های مستقیم اجرای طرح در زمان معمولی، ارزش فعلی هزینه های بالاسری و ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی و مجموع ارزش فعلی هزینه ها NPVCOST<sub>ij</sub>، محاسبه می شود.

۲- NPVCOST<sub>ij</sub> فعالیتهای مسیر بحرانی با یکدیگر مقایسه می شود و فعالیتی که دارای کمترین ارزش فعلی مجموع هزینه هاست، انتخاب شده و زمان آن به میزان T کاهش می یابد. در صورتیکه NPVCOST چند فعالیت با هم برابر باشند، یک فعالیت به دلخواه انتخاب می شود.

**دستورالعمل ۲: در صورتی که چند مسیر بحرانی در شبکه وجود داشته باشد:**

۱- مسیرهای بحرانی و فعالیتهای هر مسیر مشخص می شود.

۲- فعالیتهای مسیر بحرانی به دو مجموعه تقسیم می شوند:

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij})}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} + \frac{H * (E_n(kl) - E_l(kl))}{(1 + K_x)^{E_n(kl) - E_l(kl)}}$$

در صورت مقایسه عبارات نابرابر در دو رابطه نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta t_{kl} > \Delta t_{mp} \Rightarrow D_{kl} - y_{kl} > D_{mp} - y_{mp} \quad (10)$$

$$E_n(kl) - E_l(kl) < E_n(mp) - E_l(mp)$$

$$E_n(kl) - E_l(kl) < E_n(mp) - E_l(mp) \wedge 1 + K_x > 1 \Rightarrow (1 + K_x)^{E_n(kl) - E_l(kl)} < (1 + K_x)^{E_n(mp) - E_l(mp)} \quad (11)$$

$$(10) \wedge (11) \Rightarrow \frac{(E_n(mp) - E_l(mp))}{(1 + K_x)^{E_n(mp) - E_l(mp)}} < \text{or} > \frac{(E_n(kl) - E_l(kl))}{(1 + K_x)^{E_n(kl) - E_l(kl)}}$$

با فرض  $E_n(kl) - E_l(kl) = b$  و  $E_n(mp) - E_l(mp) = a$  و  $1 + K_x = k$  نتیجه می‌شود:

$$a > b \wedge k > 1 \Rightarrow k^a > k^b \Rightarrow \frac{a}{k^a} < \text{or} > \frac{b}{k^b}$$

چون  $a > b$  است و زمانها به صورت عدد صحیح بیان می‌شوند، می‌توان گفت:  $a = b + \Delta x$

$$\frac{a}{k^a} - \frac{b}{k^b} = \frac{b + \Delta x}{k^{b + \Delta x}} - \frac{b}{k^b} = \frac{b + \Delta x - b k^{\Delta x}}{k^{b + \Delta x}} = \frac{b * (1 - k^{\Delta x}) + \Delta x}{k^{b + \Delta x}}$$

$$k > 1 \Rightarrow k^{\Delta x} > 1 \Rightarrow$$

$$1 - k^{\Delta x} < 0 \Rightarrow b * (1 - k^{\Delta x}) < 0$$

حال در صورتی که  $b * (1 - k^{\Delta x}) + \Delta x < 0$  شود، نتیجه می‌شود که افزایش فشرده سازی، موجب افزایش ارزش فعلی هزینه های بالاسری می‌گردد که این مسئله به سه عامل زمان انتهایی شبکه، تفاوت بین دو مقدار فشرده سازی و نرخ بهره بستگی دارد. در واقع هر چه نرخ بهره بالاتر و زمان انتهایی شبکه بیشتر و اختلاف بین دو مقدار فشرده سازی کمتر باشد، این عبارت منفی تر و هر چه نرخ بهره پایین تر و زمان انتهایی شبکه کمتر و اختلاف بین دو مقدار فشرده سازی بیشتر باشد، این عبارت مثبت تر است. بنابراین در صورتی که فعالیتها به

به جواب نهایی را طولانی تر می‌کند. از طرف دیگر در صورتی که کاهش زمان در هر مرحله، به میزان  $\Delta t_{ij}$  (حداکثر زمانی که می‌توان فعالیت  $ij$  را کاهش داد تا مسیرهای زیر بحرانی در آستانه بحرانی شدن قرار گیرند) صورت گیرد، به دلیل عدم کاهش زمان فعالیتها به یک میزان، معیار حداقل مجموع ارزش فعلی هزینه ها معیار درستی برای مقایسه فعالیتها نبوده و منجر به ایجاد مجموعه جواب متفاوت با این الگوریتم می‌شود که این مسئله را می‌توان در قالب لم ۲ بیان کرد:

**لم ۲:** در صورتی که دو فعالیت به یک میزان فشرده نشوند، معیار مینیمم ارزش فعلی هزینه‌ها معیار درستی برای مقایسه فعالیتها نیست:

**اثبات:** فرض می‌شود که دو فعالیت  $kl$  و  $mp$  در روی مسیر بحرانی یک شبکه قرار داشتند و کاندید فشرده سازی می‌باشند و فعالیت  $mp$  از لحاظ ترتیبی و پیش‌نیازی، قبل از فعالیت  $kl$  در شبکه واقع شده است.

در صورتی که این دو فعالیت دارای مشخصات عنوان شده در لم ۱ باشد و فرض شود که میزان فشرده‌سازی فعالیت  $kl$  بیشتر از میزان فشرده‌سازی فعالیت  $mp$  است  $(\Delta t_{kl} > \Delta t_{mp} \Rightarrow D_{kl} - y_{kl} > D_{mp} - y_{mp})$  ارزش فعلی هزینه‌ها در صورت فشرده سازی فعالیتهای  $kl$  و  $mp$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NPV_{\cos t}(mp) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}(mp)}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{C_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

$$+ \frac{C_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(mp)}{(1 + K_x)^{E_i(mp) + y_{ij}(mp)}}$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij} * (D_{ij} - y_{ij})}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp})}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

$$+ \frac{H * (E_n(mp) - E_l(mp))}{(1 + K_x)^{E_n(mp) - E_l(mp)}}$$

$$NPV_{\cos t}(kl) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}(kl)}{(1 + K_x)^{E_i + y_{ij}}} + \frac{C_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}}$$

$$+ \frac{C_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C'_{ij}(kl)}{(1 + K_x)^{E_i(kl) + y_{ij}(kl)}}$$

یک میزان فشرده نشوند، در مورد ارزش فعلی هزینه‌های بالاسری، نمی‌توان نظر قطعی را ابراز کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عدم فشرده سازی فعالیتها به یک میزان، موجب تبدیل ارزش فعلی هزینه های بالاسری به یک عامل مؤثر می‌شود.

در صورت مقایسه ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی، دو حالت زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

$$R_{mp} > R_{kl} \quad \text{حالت ۱-}$$

در این حالت، شرایط زیر را باید مورد بررسی قرار داد:  
الف:

$$R_{mp} * \Delta t_{mp} > R_{kl} * \Delta t_{kl} \quad (12)$$

$$\Rightarrow R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp}) > R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})$$

چون فعالیت mp در شبکه قبل از فعالیت kl قرار دارد  $(E_m + y_{mp} < E_k + y_{kl})$  و  $(1 + K_x > 1)$  و رابطه

(۱۲) نتیجه می‌شود:

$$\frac{R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp})}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} > \frac{R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} \quad (13)$$

ب:

$$R_{mp} * \Delta t_{mp} = R_{kl} * \Delta t_{kl} \Rightarrow R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp}) = R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl}) \quad (14)$$

به همین ترتیب

$$\frac{R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp})}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} > \frac{R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} \quad (15)$$

ج:

$$R_{mp} * \Delta t_{mp} < R_{kl} * \Delta t_{kl} \Rightarrow R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp}) < R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl}) \quad (16)$$

به همین ترتیب

$$\frac{R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp})}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} < \text{or} > \frac{R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl})}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} \quad (17)$$

در این حالت بسته به میزان  $R_{kl}$ ،  $R_{mp}$ ،  $\Delta t_{mp}$  و  $\Delta t_{kl}$  و فاصله بین دو فعالیت در روی مسیر بحرانی، می‌تواند دو حالت > یا < ایجاد شود.

$$R_{mp} \leq R_{kl}$$

$$D_{mp} - y_{mp} < D_{kl} - y_{kl} \Rightarrow R_{mp} * \Delta t_{mp} < R_{kl} * \Delta t_{kl} \Rightarrow R_{mp} * (D_{mp} - y_{mp}) < R_{kl} * (D_{kl} - y_{kl}) \quad \text{حالت ۲-}$$

که همانند حالت (ج) اظهار نظر قطعی، بسته به میزان  $R_{mp}$ ،  $R_{kl}$ ،  $\Delta t_{mp}$  و  $\Delta t_{kl}$  و همچنین فاصله بین دو فعالیت در روی مسیر بحرانی است. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عدم فشرده سازی فعالیتها به یک میزان موجب تغییر در رفتار ارزش فعلی هزینه‌های فشرده سازی می‌شود.

در بررسی و مقایسه ارزش فعلی هزینه‌های معمولی، موارد قابل توجه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{C_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} > \frac{C_{mp}}{(1 + K_x)^{E_m + y_{mp}}} \quad \text{و}$$

$$\frac{C_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}} < \frac{C_{kl}}{(1 + K_x)^{E_k + y_{kl}}}$$

در مورد فعالیتهای بعد از kl و بین دو فعالیت mp و kl نتیجه می‌شود:

۱- فعالیتهایی که تغییری در زمان انتهایشان به وجود نیامده، ثابت‌اند.

۲- در صورت فشرده سازی فعالیت mp، مجموع ارزش فعلی هزینه های معمولی این فعالیتها بیشتر از زمانی است که فعالیت kl فشرده شود.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C(B)_{ij}(mp)}{(1 + K_x)^{E_i(mp) + y_{ij}(mp)}} > \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C(B)_{ij}(kl)}{(1 + K_x)^{E_i(kl) + y_{ij}(kl)}}$$

۳- در مورد فعالیتهای پس از kl خواهیم داشت:

$$D_{mp} - y_{mp} < D_{kl} - y_{kl} \Rightarrow E_i(A)(mp) + y_{ij}(A)(mp) > E_i(A)(kl) + y_{ij}(A)(kl)$$

با توجه اینکه  $1 + K_x > 1$  است:

$$(1 + K_x)^{E_i(A)(mp) + y_{ij}(A)(mp)} > (1 + K_x)^{E_i(A)(kl) + y_{ij}(A)(kl)}$$

پس از معکوس کردن و ضرب  $C_{ij}(A)$  در طرفین رابطه و

گرفتن  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n$  نتیجه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}(A)(mp)}{(1 + K_x)^{E_i(A)(mp) + y_{ij}(A)(mp)}} < \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}(A)(kl)}{(1 + K_x)^{E_i(A)(kl) + y_{ij}(A)(kl)}}$$

و این در حالی است که در صورت فشرده سازی زمانها به یک میزان، این دو عبارت مساوی بودند. بنابراین

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij(A)}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(A)}(mp)+y_{ij(A)}(mp)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C(B)_{ij}(mp)}{(1+K_x)^{E_{i(mp)}+y_{ij}(mp)}} + \frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E^*_{m+y^*mp}}} + \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E_{k+y_{kl}}}} < \text{or} >$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij(A)}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(A)}(kl)+y_{ij(A)}(kl)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{C(B)_{ij}(kl)}{(1+K_x)^{E_{i(kl)}+y_{ij}(kl)}} + \frac{C_{mp}}{(1+K_x)^{E_{m+y_{mp}}}} + \frac{C_{kl}}{(1+K_x)^{E^*_{k+y^*kl}}}$$

که لزوماً نمی توان نتیجه گرفت که در صورت افزایش زمان فشرده سازی، میزان ارزش فعلی هزینه های معمولی افزایش می یابد.

همانطور که ملاحظه می شود، در صورت عدم فشرده سازی فعالیتها به یک میزان، به دلیل مؤثر بودن ارزش فعلی هزینه های بالاسری، تغییر در رفتار ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی و تغییر در رفتار ارزش فعلی هزینه های معمولی، لزوماً نمی توان رفتار فعالیتها را همانند حالتی دانست که فشرده سازی زمانها به یک میزان صورت می گیرد.

#### ۴- نتایج عددی و ارزیابی مقایسه ای

به منظور بررسی بهتر نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم و مقایسه آن با الگوریتم کلاسیک مسایل تعادل بین هزینه و زمان و مدل ریاضی ارائه شده (مدل ۲)، ۶ مثال که اطلاعات اولیه، در جدول (۳) آمده است، در این زمینه ارائه شده، که نتایج آنها در جدول (۲) نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در کلیه این مسایل میزان نرخ بهره، ۱۴٪ در نظر گرفته شده است. در این جدول ستون سمت راست، بیانگر نتایج به دست آمده از حل مدل ریاضی ارائه شده (مدل ۲)، ستون وسط، بیانگر حل مسئله و کاهش مدت زمان فعالیتها به روش الگوریتم پیشنهادی و تعیین مجموعه جواب و ارزش فعلی هزینه ها و ستون سمت چپ، بیانگر حل مسئله، کاهش مدت زمان فعالیتها

و تعیین مجموعه جواب به کمک الگوریتم کلاسیک مسایل تعادل بین هزینه و زمان و سپس محاسبه ارزش فعلی هزینه ها با در نظرگیری نرخ بهره ۱۴٪، بر اساس نتایج به دست آمده از الگوریتم کلاسیک است.

با مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم کلاسیک مسائل تعادل هزینه - زمان نکات قابل توجه زیر حاصل می شود:

۱- اساس کار الگوریتم پیشنهادی همانند الگوریتم کلاسیک مسئله تعادل بین هزینه و زمان بر مبنای حرکت بر روی مسیر بحرانی و کاهش زمان فعالیتها آن به منظور کاهش زمان کل پروژه بوده و تنها معیار تصمیم گیری متفاوت است.

۲- معیار تصمیم گیری در الگوریتم پیشنهادی، به دلیل وجود نرخ بهره، حداقل ارزش فعلی مجموع هزینه ها (مجموع ارزش فعلی هزینه های مستقیم اجرای طرح در زمان معمولی، ارزش فعلی هزینه های بالاسری و ارزش فعلی هزینه های فشرده سازی) است.

۳- الگوریتم پیشنهادی مجموع ارزش فعلی هزینه های کمتری نسبت به حالتی است که نرخ بهره، تنها در انتهای الگوریتم کلاسیک مسئله تعادل بین هزینه و زمان دخالت داده شود، ایجاد می کند.

۴- مجموعه جواب ایجاد شده توسط الگوریتم پیشنهادی متفاوت با مجموعه جواب ایجاد شده توسط الگوریتم کلاسیک مسئله تعادل بین هزینه و زمان است.

۵- به دلیل وجود نرخ بهره و در نتیجه کمتر بودن مجموع ارزش فعلی هزینه های ایجاد شده برای فعالیتهای انتهایی شبکه، تمایل الگوریتم پیشنهادی به فشرده سازی فعالیتهای انتهایی مسیر بحرانی بیشتر است.

۶- در صورت تغییر نرخ بهره، تغییری در مجموعه جواب به دست آمده حاصل نمی شود. اما به دلیل تغییر مقدار  $1+K_x$  مقدار ارزش فعلی هزینه ها تغییر می کند. در این حالت به دلیل قرار گرفتن  $1+K_x$  در مخرج، هر چه مقرر نرخ بهره افزایش یابد، ارزش فعلی هزینه ها کمتر و هر چه نرخ بهره کاهش یابد،

جدول ۲- ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم پیشنهادی با روشهای کلاسیک

شماره مسئله	الگوریتم کلاسیک حل مسایل تعادل بین هزینه و زمان	الگوریتم پیشنهادی	مدل ریاضی (مدل ۲)	
۱	$y_{12}=16$ $y_{24}=7$ $y_{36}=10$ $y_{13}=11$ $y_{25}=16$ $y_{45}=9$ $y_{14}=12$ $y_{34}=12$ $y_{56}=12$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل =0.9806 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل =0.0028 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل =1.2571 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل =2.2404	$y_{12}=17$ $y_{24}=6$ $y_{36}=10$ $y_{13}=11$ $y_{25}=15$ $y_{45}=9$ $y_{14}=12$ $y_{34}=12$ $y_{56}=12$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی = 0.9730 ارزش فعلی هزینه بالاسری =0.0028 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی =1.1283 ارزش فعلی مجموع هزینه ها =2.1041	$y_{12}=17$ $y_{24}=6$ $y_{36}=10$ $y_{13}=11$ $y_{25}=15$ $y_{45}=9$ $y_{14}=12$ $y_{34}=12$ $y_{56}=12$ ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها =2.1041	
۲	$y_{12}=6$ $y_{25}=13$ $y_{56}=6$ $y_{13}=11$ $y_{34}=3$ $y_{57}=9$ $y_{78}=5$ $y_{23}=5$ $y_{36}=11$ $y_{67}=3$ $y_{24}=7$ $y_{45}=5$ $y_{68}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل =1.8371 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل =0.0087 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل =2.6468 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل =4.4927	$y_{12}=7$ $y_{25}=12$ $y_{56}=8$ $y_{13}=11$ $y_{34}=3$ $y_{57}=9$ $y_{78}=5$ $y_{23}=4$ $y_{36}=11$ $y_{67}=1$ $y_{24}=7$ $y_{45}=5$ $y_{68}=6$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی = 1.7446 ارزش فعلی هزینه بالاسری =0.0087 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی =2.5938 ارزش فعلی مجموع هزینه ها =4.3471	$y_{12}=7$ $y_{25}=12$ $y_{56}=8$ $y_{13}=11$ $y_{34}=3$ $y_{57}=9$ $y_{78}=5$ $y_{23}=4$ $y_{36}=11$ $y_{67}=1$ $y_{24}=7$ $y_{45}=5$ $y_{68}=6$ ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها =4.3471	
۳	$y_{12}=14$ $y_{34}=7$ $y_{57}=4$ $y_{13}=13$ $y_{36}=12$ $y_{67}=5$ $y_{24}=6$ $y_{45}=8$ $y_{25}=10$ $y_{46}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل =0.7768 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل =0.0097 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل =0.9349 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل =1.7214	$y_{12}=14$ $y_{34}=6$ $y_{13}=14$ $y_{36}=12$ $y_{57}=4$ $y_{24}=6$ $y_{45}=8$ $y_{67}=3$ $y_{25}=10$ $y_{46}=9$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی =0.7379 ارزش فعلی هزینه بالاسری =0.0097 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی =0.8129 ارزش فعلی مجموع هزینه ها =1.5605	$y_{12}=14$ $y_{34}=6$ $y_{13}=14$ $y_{36}=12$ $y_{57}=4$ $y_{24}=6$ $y_{45}=8$ $y_{67}=3$ $y_{25}=10$ $y_{46}=9$ ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها =1.5605	
۴	$y_{12}=11$ $y_{23}=5$ $y_{36}=10$ $y_{14}=17$ $y_{24}=6$ $y_{45}=6$ $y_{16}=11$ $y_{35}=7$ $y_{56}=4$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل =0.8601 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل =0.0157 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل =1.3302 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل =2.2060	$y_{12}=11$ $y_{23}=6$ $y_{36}=10$ $y_{14}=17$ $y_{24}=6$ $y_{45}=6$ $y_{16}=11$ $y_{35}=6$ $y_{56}=4$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی =0.8628 ارزش فعلی هزینه بالاسری =0.0157 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی =1.2828 ارزش فعلی مجموع هزینه ها =2.1613	$y_{12}=11$ $y_{23}=6$ $y_{36}=10$ $y_{14}=17$ $y_{24}=6$ $y_{45}=6$ $y_{16}=11$ $y_{35}=6$ $y_{56}=4$ ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها =2.1613	
۵	$y_{12}=8$ $y_{23}=5$ $y_{36}=12$ $y_{13}=13$ $y_{34}=3$ $y_{45}=4$ $y_{14}=12$ $y_{35}=7$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل =1.1517 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل =0.0157 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل =2.0723 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل =3.2397	$y_{12}=9$ $y_{23}=4$ $y_{36}=12$ $y_{13}=13$ $y_{34}=4$ $y_{45}=3$ $y_{14}=12$ $y_{35}=7$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی = 1.1004 ارزش فعلی هزینه بالاسری =0.0157 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی =1.8773 ارزش فعلی مجموع هزینه ها =2.9935	$y_{12}=9$ $y_{23}=4$ $y_{36}=12$ $y_{13}=13$ $y_{34}=4$ $y_{45}=3$ $y_{14}=12$ $y_{35}=7$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی مجموع هزینه‌ها =2.9935	

ادامه جدول ۲ -

شماره مسئله	الگوریتم کلاسیک حل مسایل تعادل بین هزینه و زمان	الگوریتم پیشنهادی	مدل ریاضی (مدل ۲)
۶	$y_{12}=8$ $y_{34}=4$ $y_{13}=10$ $y_{35}=10$ $y_{57}=13$ $y_{14}=12$ $y_{46}=13$ $y_{67}=7$ $y_{25}=12$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی پس از حل = 1.2248 ارزش فعلی هزینه بالاسری پس از حل = 0.0079 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی پس از حل = 1.4640 ارزش فعلی مجموع هزینه ها پس از حل = 2.6968	$y_{12}=8$ $y_{34}=5$ $y_{13}=11$ $y_{35}=9$ $y_{57}=13$ $y_{14}=12$ $y_{46}=11$ $y_{67}=7$ $y_{25}=12$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی هزینه مستقیم معمولی = 1.1623 ارزش فعلی هزینه بالاسری = 0.0079 ارزش فعلی هزینه فشرده سازی = 1.4253 ارزش فعلی مجموع هزینه ها = 2.5955	$y_{12}=8$ $y_{34}=5$ $y_{13}=11$ $y_{35}=9$ $y_{57}=13$ $y_{14}=12$ $y_{46}=11$ $y_{67}=7$ $y_{25}=12$ $y_{56}=7$ ارزش فعلی مجموع هزینه ها = 2.5955

جدول ۳- اطلاعات و داده‌های اولیه مثالهای حل شده

شماره مسئله	فعالیت	Dij	dij	Cij	Rij
۱	1-2	18	16	0.5	1.5
	1-3	16	11	1.4	0.5
	1-4	12	8	1.5	0.8
	2-4	8	6	1.2	1.1
	2-5	17	15	0.8	1.6
	3-4	15	12	1.3	1.2
	3-6	10	7	2	2.1
	4-5	11	9	0.7	1.2
	5-6	14	12	1.1	0.9
۲	1-2	8	6	1	0.5
	1-3	12	11	1.1	0.4
	2-3	7	4	1.5	0.9
	2-4	7	6	1.1	1.5
	2-5	14	12	1.3	0.4
	3-4	7	3	1	1.5
	3-6	11	9	1.4	1.2
	4-5	8	5	1.2	1
	5-6	10	6	1	1.4
	5-7	10	9	0.9	1.4
	6-7	6	1	1.3	1.7
	6-8	7	6	0.8	0.5
7-8	7	5	1.1	2	
۳	1-2	16	14	0.8	0.5
	1-3	14	9	1.2	0.8
	2-4	8	6	1.5	1
	2-5	10	7	0.7	1.2
	3-4	7	5	2	1.1
	3-6	12	10	1	0.7
	4-5	11	8	1.2	2.3
	4-6	10	7	1.1	1.8
	5-7	8	4	1.6	2.5
	6-7	5	3	1.4	2
۴	1-2	14	11	1	0.6
	1-4	18	15	1.1	0.2
	1-6	11	10	0.3	1.6
	2-3	7	5	1.2	0.7
	2-4	8	6	0.7	1.5
	3-5	7	6	1.5	1
	3-6	10	9	1.1	1.7
	4-5	9	6	1.8	1.8
	5-6	6	4	1.3	2.1

ادامه جدول ۳-

شماره مسئله	فعالیت	Dij	dij	Cij	Rij
۵	1-2	10	8	0.7	0.9
	1-3	14	13	0.5	0.7
	1-4	12	11	1	1
	2-3	7	4	1.1	1.2
	3-4	6	3	1.4	1.1
	3-5	8	7	1.2	1.8
	3-6	12	10	0.8	0.5
	4-5	6	3	0.9	1.5
	5-6	9	7	1.8	2.1
۶	1-2	10	8	1.2	0.8
	1-3	12	10	1	0.5
	1-4	12	9	0.5	1
	2-5	14	12	1.1	1.5
	3-4	6	4	0.8	0.3
	3-5	11	9	1.7	1.4
	4-6	13	11	0.6	1.2
	5-6	9	7	1.8	2.3
	5-7	13	12	0.9	1.5
	6-7	10	7	1.5	2.4

ارزش فعلی هزینه ها افزایش می یابد.

۷- در صورت وجود محدودیت برای ارزش فعلی سرمایه، اجرای مراحل الگوریتم تا زمان رسیدن به آستانه محدودیت انجام می شود. در این حالت در صورتی که زیاد بودن نرخ بهره، به دلیل کمتر شدن ارزش فعلی هزینه ها، مراحل الگوریتم برای فشرده سازی فعالیتها بیشتر تکرار می شود.

۸- نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی ارائه شده (مدل ۲)، یکسان است که دلیل این مسئله را می توان مقدار یکسان فشرده سازی دو فعالیت، همانند روش الگوریتمهای کلاسیک حل مسایل برنامه ریزی غیرخطی موجود، برای انتخاب فعالیتها برای فشرده سازی دانست.

### ۵- جمع بندی

با توجه به الگوریتمها و مدلهای ریاضی ارائه شده، مشخص می شود که مسئله ارزش زمانی پول می تواند تا حد زیادی بر تصمیم گیریهای مربوط به کاهش زمان پروژه و انتخاب فعالیتها در هر مرحله جهت فشرده سازی، مؤثر باشد. با مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم کلی مسئله تعادل بین هزینه و

زمان، می توان گفت که این الگوریتم به دلیل در نظر گرفتن نرخ بهره به عنوان یک عامل تأثیر گذار بر تصمیم گیری و تغییر معیار تصمیم گیری به مجموع ارزش فعلی هزینه ها به دلیل تغییر هزینه های مستقیم و بالاسری با زمان، وضعیت واقعیتری را نشان داده و اطلاعات کاملتری را در هر مرحله از فشرده سازی زمان فعالیتها در اختیار مدیران قرار می دهد. از طرفی چون عامل نرخ بهره در هر مرحله از مراحل الگوریتم دخالت داده می شود، می توان ملاحظه کرد که مراحل این الگوریتم، کاملاً با مراحل الگوریتم کلاسیک مسایل تعادل بین هزینه و زمان متفاوت بوده و به دلیل تمایل به فشرده سازی فعالیتهای انتهایی مسیر بحرانی، نتایج کاملاً متفاوت با الگوریتم کلاسیک مسایل تعادل بین هزینه و زمان را در هر مرحله ارائه می دهد. این مسئله به خصوص در مواقعی که محدودیت ارزش فعلی سرمایه در دسترس برای هزینه های مستقیم و فشرده سازی وجود دارد و فشرده سازی زمان بر طبق محدودیت سرمایه و نه محدودیت شبکه انجام می شود، بسیار حائز اهمیت است. همچنین ملاحظه می شود که هر چه شبکه بزرگتر شده و بازه زمانی طولانیتر شود، نتایج متفاوت تری از

با نتایج به دست آمده از مدل ریاضی آن یکسان است. در انتها می‌توان گفت که این الگوریتم و مدل ریاضی آن، می‌تواند با ارائه اطلاعات کامل و واقعی به خصوص در کشورهایی که نرخ بهره بالاست، در هنگام زمان بندی و فشردگی پروژه‌ها، ابزار مفیدی برای مدیران و برنامه ریزان پروژه‌ها باشد.

الگوریتم کلاسیک مسایل تعادل بین هزینه و زمان به دست می‌آید و هر چه نرخ بهره افزایش یابد، تمایل به فشردگی سازی بیشتر و ارزش فعلی هزینه‌ها کمتر می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده از این الگوریتم به دلیل تطابق با روش الگوریتمهای کلاسیک حل مسایل برنامه ریزی غیرخطی موجود،

## واژه‌نامه

1. time crashing
2. CPM
3. PERT
4. scheduling
5. due date
6. time crashing

7. time-cost trade-off
8. time-cost-quality trade-off
9. primal-dual
10. machine learning
11. NPV

## مراجع

1. Focken, T. "Review of the Development of Project Management Technology," University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February 2002
۲. حاج شیر محمدی، ع. مدیریت و کنترل پروژه، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۷۵.
۳. نادری پور، م. برنامه ریزی و کنترل پروژه، انتشارات سازمان برنامه و بودجه، تهران، ۱۳۷۶.
4. Keeling, R. "Project Management: An International Perspective," Palgrave MacMillan, November 2000.
5. Levin, Richard L. & Kirkpatrick, Charles A., *Planning and Control with PERT/CPM*, McGraw Hill Text, June 1966.
6. Goodman, Louis J. & Love, Ralph N., *Project Planning and Management; an Integrated Approach*, Published in cooperation with the East-West center, Hawaii [by programon press, 1980
7. Etuyre, V., "Linear Programming Methods to Shorten Project Duration," University of Houston, 2002.
8. Leu, Sou-Sen & Chen, An Ting & Yang, Chung-Huei, "A GA-Based Fuzzy Optimal Model f Construction Time-Cost Trade-Off," *International Journal of Project Management*, Vol. 19, No. 1, P. 47-58, Jan. 2001.
9. Babu, A. J. G. & Suresh, N., "Theory and Methodology Project Management with Time, Cost and Quality Consideration," *Journal of Operational Research*, Vol. 88, No. 2, P. 320- 327, Jan. 1996.
10. Gümüşoglu, Sevkina Z. & Tütek, H. "An Analysis Method in Project Management, Using Primal - Dual Relationships," *International Journal of Project Management*, Vol. 16, No. 5, P. 321-327, Oct. 1998.
11. Feng, Chung-Wei, Liu, Liang & Burns, Scott A., "Stochastic Construction Time-cost Trade-off," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, P. 117-126, Apr. 2000.
12. Abbasi, Ghaleb Y., & Mukattash, Adnan M., "Crashing PERT Networks Using Mathematic Programming," *International Journal of Project Management*, Vol. 19, No. 3, P. 181-188, Apr. 2001.
13. Li, Heng, Cao, J.-N. & Love, P.E.D., "Using Machine Learning and GA to Solve Time-Cost Trade-off Problems," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 125, No. 5, 347-353. Sep/Oct 1999.
14. Feng, Chung-Wei, Liu, Liang & Burns, Scott A., "Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-off Problems," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, 184-189. July 1997.
15. Feng, Chung-Wei, Liu, Liang & Burns, Scott A., "Construction Time-Cost Trade-off Analysis Using LP/IP Hybrid Method," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 121, No. 4, P. 446-454. Dec. 1995.
16. Reda, Rehab & Carr, Robert I., "Time Cost Trade-off Among Related Activity," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 115, No. 3, P. 475-486, Sep 1989.
17. Gardiner, Paul D. & Stewart, Kenneth, "Revisiting the Golden Triangle of Cost, Time and Quality, the Role of NPV in Project Control Success and Failure," *International journal of project management*, Vol. 18, No. 4, P. 251-256, Aug 2000.
18. Sunde, L., & Lichtenberg, "Net Present Value Cost-Time Trade-off," *International Journal of Project Management*, Vol. 13, No. 1, P. 45 49, Feb 1998



