مدل‌سازی ریاضی زمانبندی فعالیت‌ها با درنظرگرفتن هزینه‌های اضافه‌کاری و جریمه‌ی دیرکرد برای استخراج بلوک معدن سنگ آهن چغارت

حسن بخشنده امنیه[1,*]، هادی مختاری[2]، میثم حکیمیان[3] و سعید دهنوی آرانی[4]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۰

واژگان کلیدی:
توالی و زمانبندی،
مدل ریاضی،
نرم افزار GAMS،
استخراج بلوک،
معدن چغارت.

چکیده

توالی و زمانبندی فعالیت‌های پروژه با منابع محدود یکی از مسائل مهم مربوط به حوزه‌ی کنترل پروژه است که با مدیریت صحیح آن می‌توان هزینه‌های گزاف پروژه‌ها و زمان مورد نیاز برای اجرای آن‌ها را کاهش داد. یکی از پروژه‌هایی که می‌توان به آن اشاره کرد، پروژه‌ی استخراج یک بلوک از معدن سنگ آهن چغارت واقع در استان یزد است. در این مقاله با شناسایی دقیق فعالیت‌های مربوط به آن پروژه، نمودارهای WBS و AOA به همراه روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها و زمان و منابع مورد نیاز آن‌ها تعیین شده است. مدل ریاضی مسئله با هدف کمینه کردن هزینه‌های اضافه‌کاری و تأخیر، توسعه داده شده است. مدل ریاضی توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS.9 اجرا شده و نتایج مربوط به توالی و زمانبندی بهینه‌ی فعالیت‌ها محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای استخراج یک بلوک از معدن سنگ آهن چغارت ۵ منبع بهینه مورد نیاز است.

۱-مقدمه

زمانبندی، یکی از مسائل مهم در مرحله‌ی برنامه‌ریزی پروژه است. زمانبندی پروژه، تعیین زمان شروع هر یک از فعالیت-ها با توجه به محدودیت‌ها و رسیدن به یک یا چند هدف خاص می‌باشد [۱]. از دهه‌ی ۱۹۶۰، توسط محققین موضوع زمانبندی پروژه در محیط‌های مطمئن و نامطمئن مطالعه و بررسی شده است. کلی [۲] ارتباط میان هزینه‌ی پروژه و مدت زمان فعالیت را بیان کرده و نظریه‌ای در مورد نوع مسئله‌ی زمانبندی پروژه با هدف کاهش کل هزینه، ارائه نمود. با این وجود، با توجه به ابهام در زمان و مدت فعالیت، عدم اطمینان همواره در مسئله‌ی زمانبندی پروژه وجود دارد. فریمن [۳] ابتدا در سال ۱۹۶۰ نظریه‌ی احتمال را در مسئله‌ی زمانبندی پروژه معرفی کرد. چارنس و همکاران [۴] زمانبندی پروژه را از طریق برنامه‌ریزی با محدودیت احتمالی بررسی کردند، به طوری‌که بیش‌ترین زمان تکمیل با محدودیت احتمالی کاهش یابد. همچنین در زمینه‌ی مدل‌هایی که با درنظرگرفتن منابع مالی و جریان نقدی یک طرح توسعه داده شده‌اند، می‌توان به تحقیقات میکا و دیگران [۵] اشاره کرد. ایشان الگوریتم زمانبندی بر اساس انواع روش‌های پرداخت با استفاده از شبیه‌سازی جستجوی تابو و آنیلینگ را ارائه کردند. کاوالاک و همکاران [۲] طی یک تحقیق در خصوص مدل مشهور کارفرما-پیمانکار با منابع تجدیدپذیر اثر دو روش پرداخت بر اساس پیشرفت کار و رسیدن به نقاط مشخص شده را در هزینه‌های یک پروژه با استفاده از شبیه‌سازی آنیلینگ و الگوریتم ژنتیک ارائه کردند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hbakhshandeh@ut.ac.ir
۱. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۳. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۴. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، گروه صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چن و همکاران [۶] با استفاده از الگوریتم خانه‌ی مورچگان مسئله‌ی زمانبندی را در یک مدل با درنظرگرفتن جریان ورودی و خروجی منابع مالی مورد بررسی قرار دادند. همچنین رضا اکبری و همکاران [۷] با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی مدل را حل نموده و عملکرد آن را با سایر الگوریتم‌ها مقایسه کردند. در مدل‌های ذکر شده که برای زمانبندی انجام فعالیت‌ها با درنظرگرفتن محدودیت منابع تلاش کرده‌اند، موارد مربوط به زمان فعالیت‌ها به صورت قطعی دیده شده است [۸]. مدل‌های دیگر زمانبندی دریافت منابع مالی را درنظرگرفته‌اند. فعالیت‌ها در خصوص این دسته از مدل‌ها کمتر از موارد قبلی است. از جمله تلاش‌های اخیر در این زمینه می‌توان به تحقیقات هی و زو [۹] برای تعیین یک روش پرداخت در طرح‌ها با درنظرگرفتن جرائم، پاداش‌ها و روش‌های مختلف اجرای یک فعالیت اشاره کرد که برای حل مسئله و مشخص کردن زمان پرداخت و نحوه‌ی اجرای فعالیت از دو الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ استفاده شده است. هی و همکاران [۱۰] مسئله‌ی زمانبندی پرداخت‌ها با درنظرگرفتن روش‌های اجرایی مختلف برای هر فعالیت به صورت پیوسته جهت دستیابی به بیشترین ارزش خالص فعلی با استفاده از شبیه‌سازی آنیلینگ و جستجوی ممنوعه ارائه داده‌اند. در این مدل‌ها مسئله‌ی زمانبندی به همراه تأثیر آن بر روش‌های مختلف اجرای یک فعالیت بررسی شده است. هدف مسئله، یافتن یک تخصیص بهینه می‌باشد. هر چند تأثیر زمان و هزینه بر یکدیگر در اجرای هر فعالیت می‌تواند مورد نظر باشد ولی درنظرگرفتن عدم قطعیت‌های طبیعی در اجرای یک فعالیت به خصوص برای پروژه‌های تأثیرپذیر از این مسئله می‌تواند زمینه‌ی کار مناسب‌تری باشد.

سالیانه تعداد بسیار زیادی پروژه در ایران وجود دارد. هر پروژه شامل تعدادی فعالیت می‌باشد که با اتمام تمامی فعالیت‌ها، پروژه به پایان می‌رسد. لازم به ذکر است که در شرایط واقعی، برای انجام هر فعالیت تعداد محدودی منبع در دسترس است که منابع شامل نیروی انسانی، ماشین-آلات و غیره بوده و برای انجام فعالیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد فعالیت‌ها، زمان‌های مربوط به هریک از آنها، تعیین تعداد منبع مورد نیاز برای هر فعالیت و در نهایت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها توسط کارفرما از قبل برای هر پروژه تخمین زده می‌شود. با این شرایط، مسئله‌ای تحت عنوان زمانبندی پروژه مطرح می‌شود که هدف آن تعیین نقاط زمانی شروع و پایان هر فعالیت با توجه به روابط پیش‌نیازی موجود می‌باشد. مسئله زمانبندی پروژه در ادبیات، گونه‌های مختلفی دارد. به عنوان مثال تخصیص منابع به صورت صحیح به هر فعالیت برای کاهش زمان تکمیل پروژه، تسطیح منابع به طوری‌که باعث کمینه کردن تغییرات منابع در بازه‌های متفاوت شود (کمینه کردن هزینه‌های مربوط به اخراج و استخدام نیروی انسانی یا استفاده و عدم استفاده‌ی ماشین‌آلات و غیره)، کم کردن اختلاف زمانی بین تکمیل پروژه‌ی مورد نظر و زمانی که کارفرما برای تکمیل آن درنظر دارد، کم کردن هزینه‌های مربوط به اضافه‌کاری و کم‌کاری در طی پروژه و چندین مسئله‌ی دیگر، نمونه‌هایی از این‌گونه مسائل می‌باشند [۱۱].

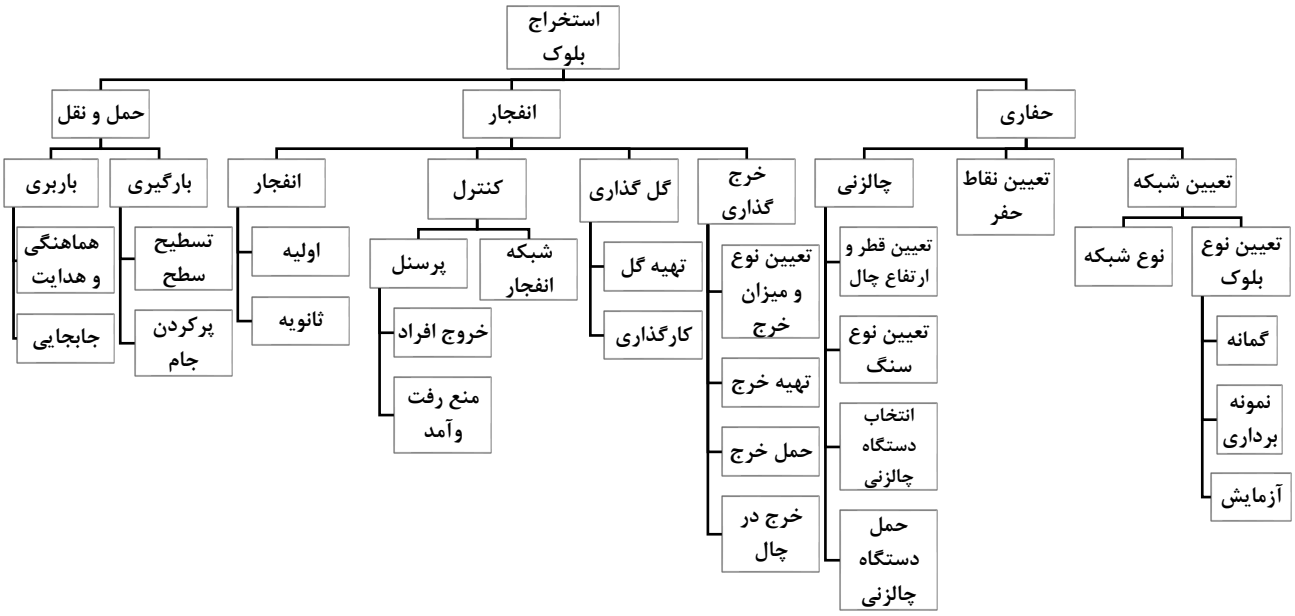
معدن چغارت یکی از بزرگ‌ترین معادن سنگ آهن ایران می‌باشد که سالیانه هشت میلیون تن ماده‌ی معدنی از آن استخراج می‌گردد. عمل استخراج در این معدن به صورت روباز و بلوکی صورت می‌گیرد. با توجه به تعریف پروژه، بهره‌برداری از معادن، پروژه محسوب نمی‌شود اما استخراج یک یا تعداد محدودی از بلوک‌ها در محدوده‌ی پروژه قرار می‌گیرند و می‌توان مسائل مربوط به زمانبندی پروژه را برای آنها درنظرگرفت. بنابراین استخراج یکی از بلوک‌های این معدن درنظرگرفته شده است. همچنین نمودار WBS[1] مربوط به این پروژه، زمان، منبع و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها (آخرین سطح نمودار WBS) در ادامه بیان شده است.

۲- نمودار WBS پروژه‌ی استخراج یک بلوک

ساختار شکست کار (WBS)، یک تجزیه‌ی سلسله مراتبی با محوریت تحویل شدنی از کاری است که باید توسط تیم پروژه، در راستای اهداف پروژه و ایجاد تحویل شدنی‌های مورد نیاز، اجرا گردد که در آن، هر سطح پایین‌تر WBS بیانگر تعاریف تفصیلی‌تری از کار پروژه است. ایجاد WBS، فرآیند تقسیم تحویل شدنی‌ها و کار پروژه به اجزای کوچک‌تر با قابلیت مدیریت بیشتر است. فعالیت در اجزای

[1] Work Breakdown Structure

WBS در پایین‌ترین سطح که به آنها بسته‌های کاری می‌گویند قرار می‌گیرد. یک بسته‌ی کاری می‌تواند زمانبندی، برآورد هزینه، نظارت و کنترل گردد. بنابراین اگر ساختار شکست کار برای هر پروژه ترسیم شود، احتمال نادیده گرفتن برخی فعالیت‌ها پایین می‌آید و پروژه به صورت کامل‌تر بررسی می‌شود [۱۲]. نمودار WBS مربوط به پروژه‌ی درنظرگرفته شده در این مقاله در شکل (۱) بیان شده است. در این شکل، کل پروژه‌ی مورد نظر تا کوچک‌ترین کارها تقسیم‌بندی و نشان داده شده‌اند، بنابراین WBS ارائه شده، محدوده‌ی پروژه‌ی مورد نظر را تعیین می‌نماید.



شکل ۱-نمودار WBS مربوط به استخراج بلوک

۳- نمودار AOA مربوط به استخراج

نمودار WBS مربوط به مسئله که در شکل (۱) ترسیم شد هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد زمان، منبع مورد نیاز، روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی (سری و موازی بودن ریزکارها) را در نظر نمی‌گیرد و این یکی از معایب بزرگ نمودار WBS می‌باشد. در نتیجه برای بررسی مسئله، نیاز به نموداری است که بتواند اطلاعات ذکر شده را دربرگیرد. برای نشان دادن این‌گونه اطلاعات از نمودار AOA استفاده شده است [۱۳]. نمودار AOA در شکل (۲) و اطلاعات مربوط به آن در جدول شماره ۱ بیان شده است. در این نمودار، کمان‌ها به همراه شماره‌های روی آن، نشان دهنده‌ی ریزکارها یا فعالیت‌های تعریف شده برای پروژه می‌باشد و گره‌ها نیز مقاطع زمانی شروع و پایان فعالیت‌ها را نمایش می‌دهد. خط‌چین‌ها، فعالیت‌های مجازی می‌باشد که شماره و مدت زمان اجرا ندارند.

۴- شرح مسئله

فعالیت‌ها و اطلاعات مربوط به معدن چغارت در جدول ۱ نشان داده شد. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تنها منبع درنظرگرفته شده، نیروی انسانی است و از بقیه‌ی منابع مورد استفاده صرف نظر شده است. با توجه به تعداد کارگران محدودی که برای استخراج مواد معدنی در این معدن به‌کارگرفته شده‌اند، اتمام پروژه در زمانی بسیار بیش‌تر از زمان تعیین شده توسط کارفرما صورت می‌گیرد. البته باید توجه داشت که کارفرما به ازای هر ساعت دیرکرد، جریمه‌ای تعیین نموده است، اما مسئولین فنی معدن می‌توانند با اضافه‌کاری ساعتی و پرداخت دستمزد به کارگران از تأخیرات اضافی جلوگیری نمایند. مسئله این است که فعالیت‌ها به چه ترتیبی انجام شوند که تابع هدف یعنی کمینه کردن هزینه‌ها محقق گردد. مسئولین فنی، اضافه‌کاری را سیاست خود قرار می‌دهند یا

اجازه می‌دهند برخی فعالیت‌ها حتی زمانی بعد از زمان تعیین شده انجام شود.

۵- مدل ریاضی مربوط به مسئله‌ی مورد نظر

مجموعه‌ها:

I: مجموعه‌ی کارهای یک پروژه

***T*:** مجموعه‌ی زمانی درنظرگرفته شده

پارامترها :

$P_{ii'}$: ۱ درصورتی که i پیش نیاز i' باشد. ۰ در غیر این صورت

R_i: منبع مورد نیاز برای فعالیت i ام

d_i: مدّت زمان انجام دادن کار i ام

AR_t: منبع در دسترس در واحد زمانی t ام

n: تاریخ تحویل یک بلوک از معدن (تاریخ مقرر شده)

c: هزینه‌ی اضافه‌کاری برای هر نفر به ازای هر واحد اضافه-کاری

c': هزینه‌ی تأخیر به اندازه یک واحد زمانی برای تحویل پروژه

M: یک عدد بسیار بزرگ

متغیرها :

x_{it}: ۱ اگر کار i در زمان t ام شروع شود ۰ در غیر این صورت

y_{it}: ۱ اگر کار i در زمان t ام ادامه داشته باشد ۰ در غیر این صورت

S_i: زمان شروع کار i ام

W_t : کل منبع مورد نیاز در واحد زمانی t ام

U_t: اضافه‌کاری مورد نیاز در واحد زمانی t ام

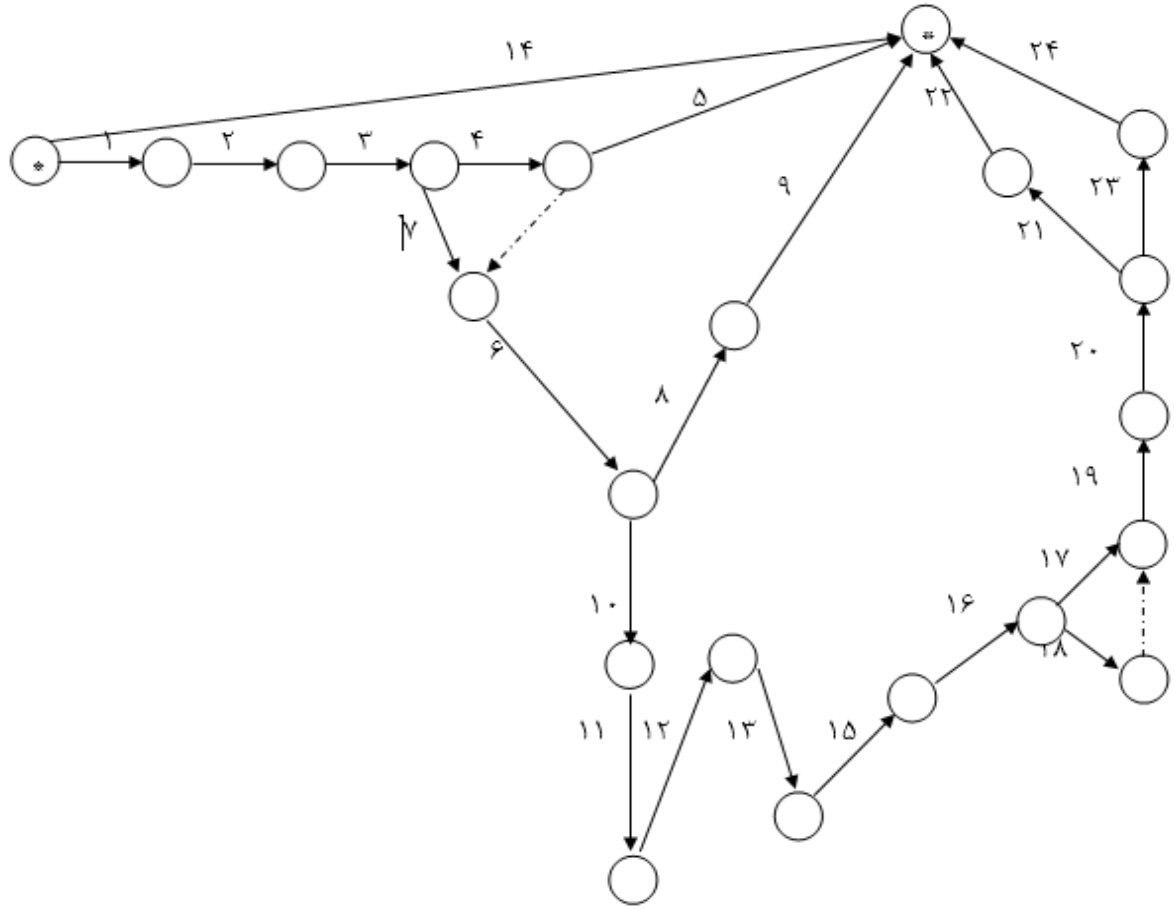
k': زمان خاتمه‌ی کل کارها (تاریخ محقق شده‌ی اتمام پروژه)

k: زمان تأخیر پروژه

L: کل اضافه‌کاری مورد نیاز به کارکنان برحسب واحد زمان

جدول ۱- اطلاعات مربوط به فعالیت‌های پروژه

شماره فعالیت	نوع فعالیت	پیش نیازی	مدت (ساعت)	منبع (نفر)	شماره فعالیت	نوع فعالیت	پیش نیازی	مدت (ساعت)	منبع (نفر)
۱	گمانه زدن	----	۲۴	۵	۱۳	قراردادن خرج در چال	۱۲	۳	۱۰
۲	نمونه‌برداری	۱	۱۲	۳	۱۴	تهیه‌ی گل سر چال	----	۳	۵
۳	آزمایش نمونه‌ها	۲	۱۲	۳	۱۵	کارگذاری گل در چال	۱۳	۲	۱۰
۴	تعیین نوع شبکه	۳	۳	۱	۱۶	طراحی شبکه‌ی انفجار	۱۵	۱	۲
۵	تعیین نقاط حفر چال	۴	۲	۲	۱۷	خروج افراد	۱۶	۱	۱
۶	تعیین قطر و ارتفاع چال	۴و۷	۲	۲	۱۸	منع رفت و آمد	۱۶	۱	۱
۷	تعیین نوع سنگ	۳	۲	۱	۱۹	انفجار اولیه	۱۷و۱۸	۱	۲
۸	انتخاب دستگاه چالزنی	۶ و۷	۱	۱	۲۰	انفجار ثانویه	۱۹	۱	۳
۹	حمل دستگاه چالزنی	۸	۲	۳	۲۱	تسطیح سطح	۲۰	۸	۲
۱۰	تعین نوع و میزان خرج چال	۶ و۷	۱	۲	۲۲	پر کردن جام ماشین	۲۱	۲۴	۲
۱۱	تهیه‌ی خرج چال	۱۰	۸	۳	۲۳	هماهنگی و هدایت ماشین‌ها	۲۰	۲	۱
۱۲	حمل خرج چال	۱۱	۴	۵	۲۴	جابجایی مواد	۲۳	۲۴	۱۰



شکل ۲- نمودار AOA مربوط به استخراج بلوک

مدل:

$$Min \quad (c \times l) + (c' \times k) \qquad (۱)$$

$$W_t = \sum_{i \in I} y_{it} \times R_i \qquad \forall\, t \in T \qquad (۲)$$

$$U_t \geq W_t - AR_t \qquad \forall\, t \in T \qquad (۳)$$

$$U_t \geq 0 \qquad \forall\, t \in T \qquad (۴)$$

$$L = \sum_{t \in T} U_t \qquad (۵)$$

$$S_i = \sum_{t \in T} t \times x_{it} \qquad \forall\, i \in I \qquad (۶)$$

$$k \geq k' - n \qquad (۷)$$

$$k \geq 0 \qquad (۸)$$

$$k' \geq S_i + d_i - 1 \qquad \forall\, i \in I \qquad (۹)$$

$$\sum_{t \in T} x_{it} = 1 \qquad \forall\, i \in I \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{t'=t}^{t+d_i-1} y_{it'} \geq d_i \times x_{it} \qquad \forall i \in I,\ t \in T \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{t \in T} y_{it} = d_i \qquad \forall\, i \in I \qquad (۱۲)$$

$$(S_{i'} + d_{i'}) \times P_{ii'} \leq S_i \qquad \forall i, i' \in I, i' \neq i \qquad (۱۳)$$

نکته‌ی قابل توجه این است که برای مدل کردن مسئله، درنظرگرفتن زمان به صورت پیوسته کارایی چندانی نخواهد داشت و مدل‌سازی را با چالش مواجه خواهد نمود. به همین

جهت در این مدل، زمان‌ها به صورت گسسته درنظرگرفته شده‌اند. معادله‌ی شماره‌ی ۱، تابع هدف مسئله را بیان می‌کند. تابع هدف مسئله، مجموع هزینه‌های اضافه‌کاری و هزینه‌های تأخیر پروژه را کمینه می‌سازد. معادله شماره‌ی ۲، تعداد منبع مورد نیاز برای کل فعالیت‌ها در هر واحد زمانی را مشخص می‌نماید. به عبارت دیگر در سمت راست معادله، مجموع کل منابع مورد نیاز برای تمامی فعالیت‌هایی که در لحظه‌ی t مشغول انجام هستند را به دست آورده و این برابر با کل منبع مورد نیاز در لحظه t، در سمت چپ معادله می‌گردد. معادله شماره‌ی ۳، نیاز به اضافه‌کاری در هر واحد زمانی را تعیین می‌نماید. همان‌طور که در این معادله مشاهده می‌شود پس از به دست آمدن تفاضل منبع مورد نیاز از منبع در دسترس در هر واحد زمانی، اضافه‌کاری مورد نیاز در هر واحد زمانی به دست خواهد آمد. نکته قابل توجه دیگر این است که اگر تفاضل به دست آمده مثبت باشد، شرایط مدل ریاضی به گونه‌ای است که U_t مقداری برابر با همان عدد مثبت خواهد گرفت و کاملاً منطقی است، در حالی‌که اگر منفی به دست آید، آن‌گاه U_t نیز عددی منفی خواهد شد و منفی بودن U_t برای این مسئله معنادار نیست. در نتیجه معادله شماره‌ی ۴ تعریف می‌گردد تا از منفی شدن U_t جلوگیری نماید. در کل، معادله‌های ۳ و ۴ مقدار اضافه‌کاری را برابر با بیشینه بین عدد به دست آمده‌ی تفاضل و عدد صفر، قرار می‌دهد. این مقدار همواره از صفر بزرگ‌تر است. معادله‌ی شماره‌ی ۵، مجموع اضافه‌کاری‌های مورد نیاز در تمام واحدهای زمانی پروژه را محاسبه می‌نماید. معادله‌ی شماره ۶، زمان شروع هر فعالیت را نشان می‌دهد. در اصل این زمان، لحظه‌ای است که فعالیت i شروع به کار می‌کند. معادله‌ی شماره‌ی ۷ و ۸ نیز مشابه معادله‌های ۴ و ۵ هستند، معادله‌ی ۷، زمان تأخیر کل پروژه را بزرگ‌تر مساوی تفاضل زمان محقق شده‌ی پروژه و زمان مقرر شده، قرار می‌دهد. اما حتماً با توجه به تابع هدف از نوع کمینه‌سازی، مقدار تأخیر کل برابر با مقدار تفاضل خواهد شد. نکته‌ی قابل توجه این است که اگر مقدار تفاضل، عددی منفی شود یا به عبارت دیگر پروژه زودتر از تاریخ مقرر شده به پایان برسد، این عدد منفی در تابع هدف نقش سود را خواهد داشت که این با مفروضات مسئله‌ی ما مطابقت ندارد. زیرا در مسئله‌ی ما دیرکرد، هزینه دارد اما زودکرد، سود ندارد. برای رفع چنین مشکلی معادله‌ی ۸ تعریف می‌شود تا زمان تأخیر منفی برای پروژه حذف شود و مقدار ماکزیمم تفاضل بین زمان محقق شده‌ی پروژه و زمان مقرر شده و عدد صفر به عنوان تأخیر کلی پروژه لحاظ گردد. معادله‌ی شماره‌ی ۹، نشان می‌دهد که اتمام پروژه، زمان نهایی آخرین فعالیتی است که انجام می‌شود. معادله شماره‌ی ۱۰ نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی درنظرگرفته شده برای پروژه، هر فعالیت می‌تواند یک‌بار شروع شود. به عبارت دیگر، یک فعالیت حق ندارد بیش‌تر از یک‌بار امکان شروع شدن داشته باشد. معادله شماره‌ی ۱۱، بیان می‌نماید که هر فعالیت به اندازه‌ی طول زمان اجرای آن، واحدهای زمانی را اشغال می‌کند. یعنی این‌که، هر فعالیت باید دقیقاً به اندازه‌ی مدت زمان انجام آن (نه کمتر و نه بیشتر) بعد از زمان شروع آن، اجرا شود. توجه شود که در این مسئله، فعالیت‌ها مجاز به شکست نیستند. یعنی نمی‌توان قسمتی از فعالیت را انجام داد و سپس رها کرد و در زمان دیگری ادامه‌ی آن را انجام داد، بلکه باید آن فعالیت به صورت پیوسته و بدون شکست اجرا گردد. معادله شماره‌ی ۱۲ مجموع زمان‌هایی که یک فعالیت مشغول انجام شدن است را برابر با مقدار مدت زمان همان فعالیت قرا می‌دهد. یعنی فرض شده که هیچ فعالیتی را نمی‌توان زودتر یا دیرتر از مدت زمان تعیین شده، حتی با صرف هزینه برای آن انجام داد. معادله شماره‌ی ۱۳، شرایطی را ایجاد می‌نماید که روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها رعایت شود. این معادله اجازه نمی‌دهد فعالیت i که پس‌نیاز فعالیت i' است تا قبل از اتمام زمان انجام فعالیت پیش‌نیاز آن (یعنی فعالیت i') شروع شود که این کار باعث رعایت پیش‌نیازی می‌گردد.

۶- مطالعه‌ی موردی

استخراج یک بلوک از معدن چغارت دارای ۲۴ فعالیت با روابط پیش‌نیازی، مدت زمان انجام و منبع مورد نیاز برای هر فعالیت مطابق جدول ۱ می‌باشد. انواع مختلفی از توالی و زمانبندی فعالیت‌ها می‌تواند انجام پذیرد که این کار با صرف هزینه‌های متفاوت همراه است. اما مسئولان فنی این معدن درنظر دارند استخراج بلوک با توجه به امکان اضافه‌کاری و تأخیر پروژه در کم‌ترین هزینه‌ی ممکن صورت پذیرد. زمانی‌که برای اتمام پروژه درنظرگرفته شده است ۹۶ ساعت می‌باشد که اگر پروژه از این مقدار تجاوز کند به ازای هر ساعت ۵۰ هزار تومان جریمه صورت می‌گیرد. این جریمه طبق نظر کارفرما شامل هزینه‌هایی همچون خراب شدن ماده منفجره، اتلاف منابع مورد استفاده، کاهش اعتبار

تیم پیمانکاری و غیره می‌باشد. همچنین هزینه اضافه‌کاری به ازای هر ساعت به تمام کارگران در دسترس که ۴ کارگر می‌باشند برابر با ۴۰ هزار تومان می‌باشد. این هزینه با توجه به درصد افزایش دستمزدها نسبت به مقدار دستمزد در وقت عادی در معدن مورد مطالعه به دست آمده است که این درصد طبق نظر کارفرما معادل ۵۰ درصد می‌باشد. مدل ریاضی مربوط به این معدن با فرض M۱۰۰۰۰ = در نرم-افزار GAMS.9 اجرا شده و نتایج در جدول ۲ بیان شده است. همراه با نتایج به دست آمده در جدول ۲، با توجه به تعداد ۴ نیروی انسانی در دسترس در بلوک انفجاری و همچنین هزینه‌های اضافه‌کاری و تأخیر ذکر شده، مقدار بهینه‌ی تابع هدف برابر با ۸۲۵۰۰۰۰ تومان به دست آمد. همچنین پروژه در زمان ۱۲۵ ساعت به پایان می‌رسد، یعنی ۲۹ ساعت تأخیر در انجام پروژه وجود دارد و ۱۷۰ ساعت اضافه‌کاری به کارکنان داده می‌شود.

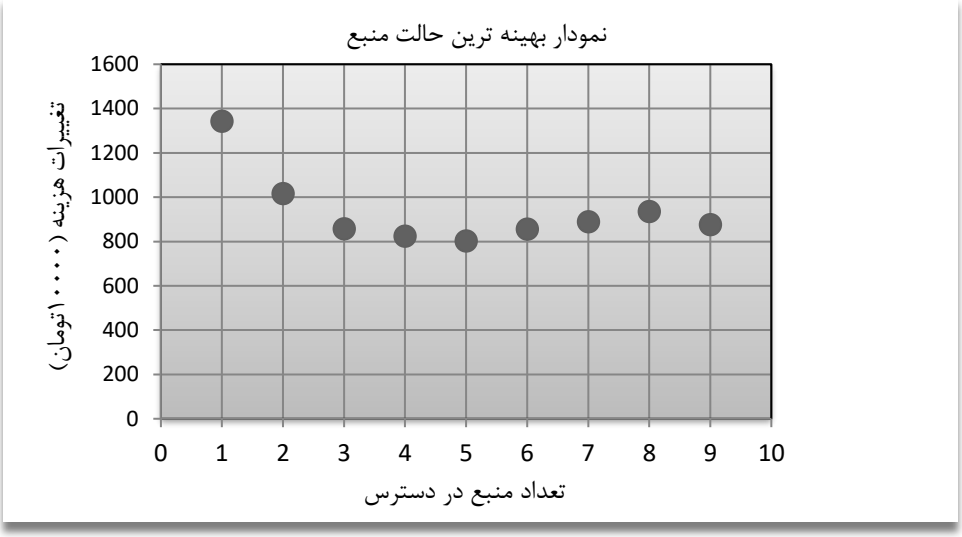
با توجه به اطلاعات به دست آمده از نرم‌افزار، با استفاده از روش تحلیل حساسیت می‌توان تعداد بهینه‌ی کارگر را در این معدن برای استخراج یک بلوک به دست آورد. باید توجه داشت که هزینه‌ی اضافه نمودن یک کارگر برای انجام پروژه برابر با ۱۵۰۰۰۰۰ تومان می‌باشد و کم کردن یک منبع نیز سودی به همین مقدار به همراه دارد. اکنون، در جدول شماره ۳ هزینه‌های مربوط به تأخیر، اضافه‌کاری، منبع و همچنین هزینه‌های مرتبط با اضافه نمودن منبع جدید آورده شده است. البته توجه شود که اعداد مثبت به دو معنای افزایش تعداد منبع و به دست آوردن سود و اعداد منفی به دو معنای کاهش تعداد منبع و از دست دادن سود می‌باشد. همچنین در ستون آخر اندازه تغییرات هزینه (میزان هزینه‌ای که برای پروژه ایجاد می‌شود) آورده شده است. به عنوان مثال در سطر دوم در جدول شماره ۳، برای انجام پروژه انفجار بلوک معدن از ۲ نیروی انسانی استفاده می‌شود. در این صورت لازم است تا ۲ نیروی انسانی از مجموع ۴ نفر اخراج شوند که این کار از یک طرف باعث افزایش سود (عدم پرداخت دستمزد به ۲ نیروی انسانی اخراج شده) به میزان ۳۰۰۰۰۰۰=۱۵۰۰۰۰۰×۲ تومان و از طرف دیگر باعث کاهش سود به میزان ۱۳۱۷۰۰۰۰ تومان به دلیل اضافه‌کاری و تأخیر می‌شود. در نتیجه به میزان ۱۰۱۷۰۰۰۰=۱۳۱۷۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰۰ تومان هزینه به پروژه تحمیل می‌شود. پس از آن با توجه به شکل (۳) از اطلاعاتی همچون تغییرات هزینه در مقابل تغییرات منبع، می‌توان بهینه‌ترین نقطه‌ی منبع را پیدا نمود. همان-طور که از شکل (۳) ملاحظه می‌شود تعداد ۵ منبع در دسترس، کم‌ترین هزینه را در بین دیگر تعداد منابع دارد.

جدول ۲- توالی و زمانبندی بهینه فعالیت های پروژه

زمان شروع (ساعت)	فعالیت	زمان شروع (ساعت)	فعالیت	زمان شروع (ساعت)	فعالیت	زمان شروع (ساعت)	فعالیت
۶۶	۱۹	۵۹	۱۳	۴۴	۷	۱	۱
۶۷	۲۰	۶۵	۱۴	۹۱	۸	۱۳	۲
۶۸	۲۱	۶۰	۱۵	۱۰۰	۹	۲۶	۳
۷۶	۲۲	۶۱	۱۶	۴۸	۱۰	۳۸	۴
۱۰۰	۲۳	۶۴	۱۷	۴۹	۱۱	۶۱	۵
۱۰۲	۲۴	۶۴	۱۸	۵۷	۱۲	۴۶	۶

جدول ۳- انواع هزینه‌ها و تغییرات آن با توجه به میزان منابع

میزان تغییرات هزینه (تومان)	هزینه اضافه‌کاری و تأخیر (تومان)	هزینه ثابت تغییرات منبع (تومان)	تغییرات منبع (نیروی انسانی)	منبع در دسترس (نیروی انسانی)
۱۳۴۴۰۰۰۰	-۱۷۹۴۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰۰	-۳	۱
۱۰۱۷۰۰۰۰	-۱۳۱۷۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	-۲	۲
۸۵۸۰۰۰۰	-۱۰۰۸۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰	-۱	۳
۸۲۵۰۰۰۰	-۸۲۵۰۰۰۰	۰	۰	۴
۸۰۳۰۰۰۰	-۶۵۳۰۰۰۰	-۱۵۰۰۰۰۰	۱	۵
۸۵۷۰۰۰۰	-۵۵۷۰۰۰۰	-۳۰۰۰۰۰۰	۲	۶
۸۹۱۰۰۰۰	-۴۴۱۰۰۰۰	-۴۵۰۰۰۰۰	۳	۷
۹۳۷۰۰۰۰	-۳۳۷۰۰۰۰	-۶۰۰۰۰۰۰	۴	۸
۸۷۸۰۰۰۰	-۱۲۸۰۰۰۰	-۷۵۰۰۰۰۰	۵	۹



شکل ۳- تعیین میزان منبع

۷- نتیجه‌گیری

تعیین توالی و زمانبندی فعالیت‌های هر پروژه موضوع بسیار مهمی است که اگر به درستی اجرا شود می‌تواند از هزینه-های گزاف پروژه کاسته و پروژه را با کم‌ترین هزینه‌ی ممکن و بالاترین کارایی انجام دهد. از طرفی در بسیاری از معادن ایران بدون توجه به بررسی‌های اقتصادی و بهینه‌سازی در زمینه‌ی عملیات انفجار، برنامه‌ریزی انفجار صورت می‌گیرد که بیشتر بر مبنای تجربه‌ی پیمانکار می‌باشد و این باعث اتلاف بیش از حد سرمایه‌ی معدن می‌شود. بنابراین در این پروژه با بررسی دقیق فعالیت‌های موجود برای استخراج یک بلوک از معدن چغارت، بهترین ترتیب کارها به روش بهینه-سازی برای این معدن تعیین شد و هزینه‌های موجود در استخراج به کم‌ترین حالت ممکن رسید. با توجه به ۱۷۰ ساعت که برای اضافه‌کاری به دست آمد، مشخص می‌شود که تعداد کارکنان فعلی این معدن بسیار پایین است و می-توان استخدام یک یا چند کارگر جدید را به مسئولان فنی پیشنهاد کرد. حال با توجه به بررسی تعداد منابع مختلف و مقایسه‌ی هزینه‌های آنها می‌توان دریافت که تعداد ۵ منبع (نیروی انسانی)، کم هزینه‌ترین نقطه برای تعداد منبع در دسترس برای معدن می‌باشد. بنابراین می‌توان به مسئولان فنی پیشنهاد افزایش یک کارگر در معدن را داشت.

۸- مراجع

[1] E. Demeuemeester, and W. Herroelen, Project Scheduling: A Research, Kluwer Academic Publisher, Boston, 2002.

[۲] حسن شوندی، نظریه مجموعه‌های فازی و کاربرد آن در مهندسی صنایع و مدیریت، انتشارات گسترش، ایران، ۱۳۸۵.

[3] R. J. Freeman, "A Generalized Network Approach to Project Activity Sequencing", IRE Transactions on Engineering Management, Vol. *3*, September 1960, pp. 103 – 107.

[4] J. Author1, B. Author2, and K. Author3, "A network interpretation and a direct sub-dual algorithm for critical path scheduling", Operations Research, Vol. *12*, NO. *3*, June 1964, pp. 460 – 470.

[5] M. Mika, G. Waligora, and J. Weglarz, "Simulated annealing and tabu search for mulyi-mode resource constrained project scheduling with positive discounted cath flows and different payment model", European Journal of Operational Research, Vol. *164*, NO. *3*, 2005, pp. 639 – 668.

[6] W. N. Chen, J. Zhang, H. S. H. Chung, and R. Huang, "Optimizing Discounted Cash Flows in Project Scheduling-An Ant Colony Optimization Approach", Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Application and Reviews, IEEE Transactions on, Vol. *40*, NO. *1*, January 2010, pp. 64 – 77.

[7] R. Akbari, A. Mohammadi, and K. Ziarati, "A novel bee swarm optimization algorithm for numerical function optimization", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. *15*, NO. *10*, October 2010, pp. 3142 – 3155.

[8] D. S. Yamashita, V. A. Armentano, and M. L. Laguna, "Scatter Search for Project Scheduling with Resource Availability Cost", European Journal of operational Research, Vol. *169*, NO. *2*, March 2006, pp. 623 – 637.

[9] Z. He, and Y. Xu, "Multi-mode project payment scheduling problems with bonus–penalty structure", European Journal of operational Research, Vol. *189*, NO. *3*, September 2008, pp. 1191 – 1207.

[10] Z. He, N. Wang, T. Jia, and Y. Xu, "Simulated annealing and tabu search for multi-mode project payment scheduling", European Journal of operational Research, Vol. *198*, NO. *3*, November 2009, pp. 688 – 696.

[۱۱] علی حاج شیر محمدی، مدیریت و کنترل پروژه، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۳۸۸.

[۱۲] مجید سبزه پرور، کنترل پروژه، ویرایش هفتم، چاپ سیزدهم، انتشارات ترمه، تهران ، ایران، ۱۳۹۰.

[۱۳] سید محمد سید حسینی، اقتصاد مهندسی و آنالیز تصمیم‌گیری، انتشارات دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران، ۱۳۸۹.