



به نام خدا



شماره: ۲۳۰۰/۲۵۱۴

پژوهشگر گرامی

بدینوسیله کواچی می شود مقاله شما بعنوان "مدل سازی و مل سازه تابلو نشان، هزینه و کیفیت با اولگر فنن جریه صدم استفاده از منابع تجدید پذیر دوره " با نوبتی " منصور قله نوی، رضائی تیلندی و ابراهیم رضائی نیک " در دومین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت که توسط دانشگاه صنعتی شریف در نوژن دوم دسیمبر سال ۱۳۹۶ در این دانشگاه برگزار شد شرکت نموده و از سوی کمیته واداران به صورت "ارائه شفاهی" مورد پذیرش نهایی قرار گرفت است. لازم به ذکر است مقاله مذکور در پایگاه مرجع دانش (Civilica) و پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISCI) نمایه خواهد شد.

پژوهشگر محترم ضامن  
دانشگاه صنعتی شریف  
پایگاه کنفرانس  
عالم  
مقام



# دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - اسفند ۱۳۹۶



## مدلسازی و حل مسأله تبادل زمان، هزینه و کیفیت با در نظر گرفتن جریمه عدم استفاده از منابع تجدیدپذیر در پروژه

رضا شایسته بیلندی<sup>1</sup>، منصور قلعه نوی<sup>2\*</sup>، ابراهیم رضایی نیک<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار و عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

3- استادیار و عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی سجاد مشهد، [rezaeenik@sadjad.ac.ir](mailto:rezaeenik@sadjad.ac.ir)

### خلاصه

منابع لازم برای اجرای فعالیت‌های پروژه معمولاً به صورت محدود در دسترس هستند. به همین دلیل استفاده و تخصیص منابع به فعالیت‌ها باید به صورت بهینه انجام شود. در این پژوهش با استفاده از تکنیک موازنه زمان، هزینه و کیفیت و تعریف کردن رابطه‌ای برای محاسبه مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر بازه زمانی از زمان اجرای پروژه، تأثیر تخصیص دادن هزینه جریمه برای مقادیر استفاده نشده از هر نوع منبع تجدیدپذیر و همچنین تأثیر افزایش دادن هزینه جریمه، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو آزمایش با بیست و یک حالت مختلف تعریف گردید و یک مسأله نمونه سه بار برای هر حالت با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسخه NSGA II حل شد. نتایج نشان داد اعمال هزینه جریمه برای هر واحد از منابع باقیمانده در بازه‌های زمانی و استفاده از تکنیک موازنه باعث می‌شود تخصیص منابع به صورت بهینه‌تر انجام گیرد و زمان اجرای پروژه بهبود یابد.

**کلمات کلیدی:** موازنه زمان هزینه و کیفیت، زمان‌بندی پروژه، منابع تجدیدپذیر، الگوریتم ژنتیک NSGA II، بهینه‌سازی، هزینه جریمه

### 1. مقدمه

منابعی که در پروژه‌ها استفاده می‌شوند را به سه دسته کلی می‌توان طبقه بندی کرد. اولین دسته منابع تجدیدپذیر هستند که تابع زمان اجرای پروژه می‌باشند و به تعداد مشخصی در هر بازه زمانی (ماه، روز، هفته و یا ساعت) برای فعالیت‌های پروژه تعریف می‌شوند و در هر بازه زمانی، مجموع مقدار استفاده فعالیت‌ها از هر منبع تجدیدپذیر نمی‌تواند از حداکثر مقدار مشخصی که برنامه‌ریزی شده بیشتر باشد. نیروی انسانی (نفر در واحد زمان) و ماشین آلات (تعداد در واحد زمان) از جمله این منابع هستند. منابع تجدیدناپذیر دسته دوم منابع می‌باشند که برای کل پروژه به مقدار حداکثر مشخصی تعریف می‌شوند. لذا تابع زمان اجرای پروژه و فعالیت‌های آن نیستند و مجموع مقدار مصرف آن‌ها توسط همه فعالیت‌های پروژه نباید

\* Email: [ghalehnovi@um.ac.ir](mailto:ghalehnovi@um.ac.ir)

از مقدار حداکثر در نظر گرفته شده برای کل پروژه بیشتر شود. مقدار مصالح مصرفی و بودجه پروژه نمونه‌هایی از منابع تجدیدناپذیر می‌باشند. آخرین دسته منابع دوگانه نامیده می‌شوند که مقدار استفاده از این منابع علاوه بر اینکه در هر بازه زمانی دارای محدودیت می‌باشد در کل پروژه هم محدود است [1].

مدیران و برنامه‌ریزان پروژه‌ها با توجه به محدودیت‌های منابع، محدودیت‌های روابط پیشنیازی بین فعالیت‌های پروژه و محدوده تعریف شده برای چگونگی انجام پروژه، به دنبال استفاده از روش‌هایی هستند که بهینه‌ترین ترکیب را بین سه هدف مهم زمان، هزینه و کیفیت ایجاد نمایند؛ که برای دستیابی به این هدف می‌توانند از تکنیک موازنه استفاده کنند. با استفاده از این روش می‌توان مقدار زمان، هزینه، کیفیت و مقدار منابعی که باید به فعالیت‌ها تخصیص داده شود را به صورت بهینه تعیین کرد تا در نهایت هزینه کل و مدت زمان تکمیل پروژه مینیمم و کیفیت اجرای آن حداکثر شود [2]. مسائل موازنه به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم‌بندی می‌شوند که نوع گسسته آن کاربرد بیشتری دارد. در مسائلی که به صورت گسسته مدل‌سازی می‌شوند روابط بین زمان، هزینه و کیفیت به صورت مجزا می‌باشد و برای هر فعالیت در پروژه روش‌های اجرای مختلفی تعریف می‌گردد. هر روش اجرا دارای مقدار زمان، هزینه و کیفیت متفاوتی می‌باشد و از طریق موازنه بین اهداف پروژه، یکی از روش‌های اجرا برای هر فعالیت انتخاب می‌شود. در واقع در این روش، مدیر پروژه با گزینه‌های مختلفی برای اجرای هر فعالیت با زمان، هزینه و کیفیت متفاوت مواجه است و برای بهینه‌کردن اهداف مسئله می‌تواند گزینه‌ای را برای هر فعالیت انتخاب کند که در نهایت پروژه با کمترین زمان و هزینه و بالاترین کیفیت انجام شود [3].

در تعداد زیادی از پژوهش‌های منتشر شده درباره مسائل زمان‌بندی پروژه و با هدف بهینه‌سازی استفاده از منابع، بخشی از هزینه کل به صورت مجموع هزینه استفاده هر فعالیت از هر واحد منبع (تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر) مدل‌سازی شده است و همچنین در برخی هزینه جریمه برای، تاخیر در اتمام پروژه [4]، بیشتر شدن مجموع هزینه‌ها از مقدار بودجه و یا به علت استفاده بیشتر از منابع پروژه، در تابع هدف هزینه تعریف شده است. ویست [5] در سال 1967 مدلی برای تخصیص منابع محدود به فعالیت‌ها در پروژه‌های بزرگ ارائه داد. برای محاسبه هزینه کل دستمزد نیروی انسانی در کارگاه، دو رابطه تعریف کرد. یکی براساس تخصیص نیروی انسانی به تعداد حداکثر مورد نیاز کارگاه و دیگری براساس مقدار بهینه نیروی انسانی مورد نیاز بود که در رابطه دوم جریمه‌ای برای هنگامی که تعداد مورد نیاز نیروی انسانی از تعداد بهینه بیشتر می‌شد تعریف کرد. بوکتور و همکاران [6] در سال 2016 برای مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و چند حالت اجرا برای فعالیت‌ها، مدلی برای تسطیح و تخصیص منابع فعالیت‌های پروژه ارائه دادند که هدف آن مینیمم کردن مجموع هزینه‌های استفاده از منابع و هزینه‌های بالاسری بود. الکاراز و همکاران [7] در سال 2003 الگوریتم ژنتیک بهبود داده شده‌ای به همراه رابطه‌ای برای محاسبه هزینه جریمه، با هدف جلوگیری از مصرف بیشتر از حد مجاز منابع تجدیدناپذیر تعریف شده در مسئله، ارائه کردند. جوزفوسکا و همکاران [8] در سال 2001 برای مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را با دو نسخه یکی با در نظر گرفتن هزینه جریمه و دیگری بدون در نظر گرفتن هزینه جریمه ارائه دادند. آن‌ها برای محاسبه انحراف منابع تجدیدناپذیر از حداکثر مقدار مجاز آن در مسئله، رابطه‌ای برای الگوریتم تعریف کردند. نتایج آزمایش محاسباتی برای چند مسئله نمونه، کارایی بیشتر نسخه اول (نسخه با هزینه جریمه) را نشان داد. بالوکا و همکاران [9] در سال 2016 مدلی ریاضی برای موازنه زمان، هزینه و ارزش پروژه در مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و چند حالت اجرا برای فعالیت‌ها ارائه دادند که منظور از ارزش پروژه سه مورد، کیفیت، سود و عملکرد فنی پروژه بود. همچنین برای جلوگیری از تجاوز مجموع هزینه‌ها از حد ماکزیمم تعریف شده برای آن، رابطه‌ای برای تخصیص جریمه به مدل اضافه کردند و با طراحی الگوریتم ژنتیک بهبود داده شده‌ای و حل مسئله نمونه، کارایی مدل را ارزیابی کردند.

این پژوهش قصد دارد با ارائه مدلی برای موازنه زمان، هزینه و کیفیت در مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع تجدیدپذیر محدود و چند حالت اجرا برای فعالیت‌ها، تأثیر اعمال هزینه جریمه برای هر واحد از هر نوع منبع تجدیدپذیر که

در هر پریرود زمانی از پروژه استفاده نشده باقی می‌ماند و همچنین تأثیر افزایش یافتن هزینه جریمه بر مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده را مورد تحلیل و بررسی قرار دهد. بدین منظور روابطی برای محاسبه مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده، تعریف گردید و دو آزمایش با بیست و یک حالت و با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسخه NSGA II انجام شد. در ادامه مقاله، در بخش دوم درباره مدل پیشنهادی و روابط آن، فرضیات مدل، الگوریتم ژنتیک مطالبی آورده شده است. در بخش سوم، توضیحاتی برای مسأله نمونه استفاده شده بیان گردیده و مقادیر پارامترهای مربوط به آن بوسیله تعدادی جدول نشان داده شده است. چگونگی انجام آزمایش‌ها، نرم‌افزارهای مورد استفاده و روش محاسبه مقادیر نوشته شده در جدول‌های مربوط به نتایج، از دیگر موضوعاتی است که در این بخش بیان گردیده است. درباره نتایج دو آزمایش در بخش چهارم بحث شده و سرانجام در قسمت نتیجه‌گیری مقاله یعنی بخش پنجم، خلاصه‌ای از این پژوهش و نتایج آن ارائه شده است.

## 2. مدل‌سازی

برخی روابط مربوط به مدل موازنه سه هدفه که در این بخش از آن‌ها استفاده شده است در مقالات مرتبط با زمان‌بندی پروژه، برای هدف‌های مختلفی بکار برده شده‌اند. مقالاتی مانند [9]، [10]، [11]، [2]، [12]، [13] از جمله این موارد هستند. اما تفاوت این مدل‌ها در تعریف کردن برخی روابط جدید، ارائه روش و الگوریتم‌های جدید برای بدست آوردن جواب‌های مدل، در نظر گرفتن شرایط قطعی یا عدم قطعیت برای مدل و غیره می‌باشد. از آنجایی که هدف این پژوهش بهینه کردن استفاده از منابع تجدیدپذیر از طریق اعمال جریمه برای مقادیر استفاده نشده هر نوع منبع است در مدل‌سازی، ضمن استفاده از روابط مشابه با برخی از پژوهش‌ها، سه رابطه (5)، (12)، (13) برای دستیابی به هدف اشاره شده، در مدل تعریف شده است.

### 1.2. تعریف ریاضی مدل

شبکه فعالیت‌های مسأله به شکل گراف جهت‌دار بدون حلقه  $G=(J,E)$  و به صورت فعالیت بر روی گره (AON) تعریف شده که در آن  $J$  مجموعه گره‌ها و  $E$  مجموعه کمان‌ها است. پروژه دارای  $n$  فعالیت حقیقی و دو فعالیت مجازی می‌باشد. هر فعالیت به صورت  $j=1,2,\dots,n+2$  شماره‌گذاری شده است. فعالیت‌های  $(j=1)$  و  $(j=n+2)$  فعالیت‌های مجازی هستند که به ترتیب نشان‌دهنده رویدادهای شروع و پایان پروژه می‌باشند که مدت زمان اجرا، مقدار منبع و هزینه تخصیص یافته به آن‌ها برابر صفر است. روابط پیشنیازی در بین فعالیت‌های پروژه به صورت پایان به شروع می‌باشد. هر فعالیت دارای  $m$  حالت اجرا است. اگر فعالیت با روش  $m$  اجرا شود مدت زمان انجام آن به صورت  $d_j^m$  و مجموع هزینه‌های آن به غیر از هزینه‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر به صورت  $c_j^m$  نشان داده می‌شود.

#### نمادها

$j \in N$ : شماره هر فعالیت در شبکه فعالیت‌ها

$m \in M$ : تعداد روش‌های اجرا برای هر فعالیت

$k \in K$ : نوع منبع تجدیدپذیر برای فعالیت‌ها

$u_j \in U$ : نشان‌دهنده شاخص کیفی نوع  $u$  برای فعالیت  $j$

$t$ : واحد زمان پروژه است که معادل یک روز کاری فرض می‌شود همچنین هر پریرود زمانی  $t$  به صورت  $[t-1, t]$  می‌باشد.

### مجموعه‌ها

$$N = \{1, 2, \dots, n + 2\}$$

$$M = \{1, 2, \dots, m_j\}$$

$$K = \{1, 2, \dots, k\}$$

$$R_{kt}^p = \{1, 2, \dots, r_{jk}\}$$

$$U = \{1, 2, \dots, u_j\}$$

$E_{FS}$ : مجموعه‌ای شامل اندیس‌های فعالیت‌های پروژه به صورت زوج‌های  $(i, j)$  است که بین آن‌ها رابطه پیشنیازی از نوع FS (Finish to Start) برقرار است.

$A(t)$ : مجموعه‌ای شامل فعالیت‌هایی می‌باشد که در پیوند زمانی  $t$  در حال اجرا هستند.

### پارامترها

$n$ : تعداد فعالیت‌های حقیقی پروژه

$T$ : حداکثر زمان در نظر گرفته شده برای اتمام پروژه

$$t \in \{1, 2, \dots, T\}$$

$S_j$ : زمان شروع فعالیت  $j$

$F_j$ : زمان پایان فعالیت  $j$

$d_j^m$ : مدت زمان انجام فعالیت  $j$  وقتی با روش  $m$  اجرا شود.

$c_{jk}$ : هزینه استفاده از منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  برای فعالیت  $j$

$pe_k$ : هزینه جریمه برای هر واحد منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  که در هر پیوند زمانی بدون استفاده باقی می‌ماند.

$R_{k_{unused}}^p(t, k)$ : مجموع مقادیر استفاده نشده از منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  در بازه زمانی  $t$  از اجرای پروژه

$R_{used}^p(t, k)$ : مجموع مقادیر استفاده شده از منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  در بازه زمانی  $t$  از اجرای پروژه

$R_{kt}^p$ : مقدار کل منبع تجدیدپذیر در دسترس نوع  $k$  در پیوند زمانی  $t$  برای همه فعالیت‌ها

$r_{jk}^m \in R_{kt}^p$ : مقدار منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  که برای اجرای فعالیت  $j$  با روش  $m$  مورد نیاز است.

$l_{ij}$ : زمان تاخیر (Lag Time) یا زمان تعجیل (lead Time) بین دو فعالیت  $i$  و  $j$  که بین آن‌ها رابطه پیشنیازی وجود دارد

$q_{ju}^m$ : عملکرد شاخص کیفی  $u$  وقتی فعالیت  $j$  با روش  $m$  اجرا می‌شود.

$w_j$ : وزن فعالیت  $j$  در بین  $n$  فعالیت حقیقی موجود در پروژه

$w_{ju}$ : وزن شاخص کیفی  $u$  برای فعالیت  $j$

### متغیرها

$x_j^m$ : اگر فعالیت  $j$  با روش  $m$  اجرا شود مقدارش یک در غیر این صورت مقدارش صفر است.

$y_{jt}^m$ : اگر فعالیت  $j$  در پیوند زمانی  $t$  با روش  $m$  اجرا شود مقدارش یک و در غیر این صورت مقدارش صفر است.

$$\text{Min } Z_1 = F_{n+2} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{m=1}^{m_j} (c_j^m \cdot x_j^m) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T ((\sum_{j=1}^{n+2} \sum_{m=1}^{m_j} (c_{jk} \cdot r_{jk}^m \cdot y_{jt}^m)) + (pe_{R_k} \cdot R_{k_{unused}}^\rho(t, k))) \quad (2)$$

$$\text{Max } Z_3 = \sum_{j=1}^{n+2} w_j \cdot (\sum_{m=1}^{m_j} \sum_{u=1}^{u_j} (w_{ju} \cdot q_{ju}^m \cdot x_j^m)) \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A(t)} \sum_{m=1}^{m_j} (r_{jk}^m \cdot y_{jt}^m) \leq R_{kt}^\rho \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4)$$

$$R_{k_{unused}}^\rho(t, k) = f(t, k, R_{kt}^\rho) \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (5)$$

$$s_i + \sum_{m=1}^{m_i} (d_i^m \cdot x_i^m) + l_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E_{FS} \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^{m_j} x_j^m = 1 \quad \forall j \in N \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^{m_j} \sum_{t=1}^T y_{jt}^m = 1 \quad \forall j \in N \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n+2} w_j = 1 \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$\sum_{u=1}^{u_j} w_{ju} = 1 \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$x_j^m, y_{jt}^m \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N, \forall t \in T, \forall m_j \in M \quad (11)$$

رابطه (1) تابع هدف اول مسأله است که با مینیمم کردن زمان اتمام آخرین فعالیت پروژه، باعث مینیمم شدن زمان کل پروژه می‌گردد. تابع هدف دوم در رابطه (2) به صورت مینیمم کردن هزینه کل پروژه است جمله اول، شامل مجموع هزینه‌های اجرای فعالیت‌های پروژه به غیر از هزینه‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر می‌باشد. جمله دوم دو بخش دارد. بخش اول مربوط به محاسبه مجموع هزینه‌های استفاده از هر منبع تجدیدپذیر برای فعالیت‌ها در هر بازه زمانی  $t$  است و بخش دوم هزینه‌های جریمه برای هر نوع از منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر پریود زمانی  $t$  را محاسبه می‌کند. که روش محاسبه در بخش 2.2 توضیح داده شده است. رابطه (3) تابع هدف سوم مسأله است که به منظور ماکزیمم کردن کیفیت کل پروژه تعریف شده است. رابطه (4) محدودیتی برای فعالیت‌ها در هر بازه زمانی  $t$  در استفاده از هر منبع تجدیدپذیر

نوع  $k$  ایجاد می‌کند. بدین صورت که در پیوند زمانی  $t$  مجموع مقادیر استفاده شده از منبع نوع  $k$  باید کمتر از  $R_{kt}^p$ ، یعنی حداکثر مقدار مجاز قابل استفاده از منبع  $k$  باشد. رابطه (5) مقادیر استفاده نشده از منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  در بازه زمانی  $t$  را برای اعمال هزینه جریمه در تابع هدف اول، باتوجه به فرضیات مطرح شده در بخش 2.2 و با استفاده از روابط (12) و (13) محاسبه می‌کند. رابطه (6) محدودیت روابط پیشنیازی از نوع پایان به شروع بین فعالیت‌های پروژه را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که فعالیت  $j$  زمانی می‌تواند شروع شود که تمام فعالیت‌های پیشنیازی آن به پایان رسیده باشند. روابط (7) و (8) تضمین می‌کنند که هر فعالیت پروژه فقط با یک مد، انجام خواهد شد. روابط (9) و (10) به ترتیب بیان می‌کنند که مجموع وزن فعالیت‌های پروژه و مجموع وزن شاخص‌های کیفیت مربوط به هر فعالیت، برابر یک می‌باشد و رابطه (11) شرط صفر و یک بودن متغیرهای مسأله را نشان می‌دهد.

## 2.2. روش محاسبه هزینه جریمه

در این پژوهش، دو فرض مهم برای اعمال هزینه جریمه برای منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود. فرض اول بدین صورت است که در هر پیوند زمانی  $t$  از اجرای پروژه، از هر نوع منبع تجدیدپذیر به میزان حداکثری که در جدول شماره پنج آورده شده است، قابل تأمین و در دسترس می‌باشد. فرض دوم بیان می‌کند که هزینه جریمه، زمانی به واحدهای استفاده نشده هر منبع در هر پیوند زمانی  $t$  تخصیص داده خواهد شد که در آن پیوند، حداقل یک واحد از آن نوع منبع استفاده شده باشد رابطه (12) که بعد از توضیحات این بخش آورده شده است برای بدست آوردن مجموع مقادیر استفاده شده از منبع نوع  $k$  در پیوند زمانی  $t$  می‌باشد. تابع  $f(t, k, R_{kt}^p)$  در رابطه (5) مدل، مجموع مقادیر استفاده نشده از منبع تجدیدپذیر نوع  $k$  را در پیوند زمانی  $t$  با رعایت فرض دوم اشاره شده، محاسبه می‌کند. این تابع دو ضابطه دارد که در رابطه (13) آورده شده است. دو شرط برای مقدار خروجی یا برد تابع در سمت راست رابطه سیزده برای رعایت فرض مربوط به چگونگی محاسبه هزینه جریمه برای منبع  $k$  در پیوند زمانی  $t$  تعریف شده است. اگر مقدار بدست آمده از رابطه دوازده صفر باشد یعنی از منبع نوع  $k$  استفاده‌ای در زمان  $t$  نشده باشد باتوجه به فرض دوم برای آنکه هزینه جریمه برابر صفر شود مقدار خروجی تابع  $f$  صفر خواهد شد و اگر مقدار رابطه دوازده مخالف صفر باشد برای آنکه به مقادیر باقیمانده و استفاده نشده از منبع  $k$  در زمان  $t$  جریمه تعلق بگیرد؛ مقادیر باقیمانده بوسیله ضابطه اول تابع محاسبه می‌شود و از طریق رابطه (5) به تابع هدف برای اعمال هزینه جریمه وارد می‌گردد.

برای مثال در مسأله مطالعه موردی این مقاله، در تمام پیوندهای زمانی  $t$  چهار واحد از منبع شماره یک تخصیص داده شده است. اگر در روز پنجم ( $t=5$ ) هیچ فعالیتی، از منبع شماره یک استفاده نکند هزینه جریمه برای این چهار واحد در نظر گرفته نمی‌شود زیرا در زمان  $t=5$  مقدار  $R_{kused}^p(5,1) = 0$  است. اما اگر حداقل یک واحد از چهار واحد توسط حداقل یک فعالیت در این روز استفاده شود برای سایر مقادیری از این منبع که در روز پنجم استفاده نشده باقی می‌مانند هزینه جریمه تخصیص داده می‌شود. یعنی اگر در روز پنجم یک واحد از منبع شماره یک مصرف شود برای سه واحد دیگر از این منبع، هزینه جریمه باتوجه به مقادیر جدول شماره چهار تعلق می‌گیرد. برای سایر منابع هم در این روز به صورت مستقل این فرض بررسی می‌شود و در صورت مصرف شدن حداقل یک واحد از هر نوع، به منابع باقیمانده آن‌ها هم جریمه‌ای بر اساس جدول شماره چهار تخصیص داده می‌شود.

$$R_{k_{used}}^{\rho}(t, k) = \sum_{j \in A(t)} \sum_{m=1}^{m_j} (r_{jk}^m \cdot y_{jt}^m) \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (12)$$

$$f(t, k, R_{k_{used}}^{\rho}) = \begin{cases} R_{kt}^{\rho} - R_{k_{used}}^{\rho}(t, k) & \text{if } (R_{k_{used}}^{\rho}(t, k) \neq 0 \quad \forall k \in K, \forall t \in T) \\ 0 & \text{if } (R_{k_{used}}^{\rho}(t, k) = 0 \quad \forall k \in K, \forall t \in T) \end{cases} \quad (13)$$

### 3.2. فرضیات مدل

- 1- دو فعالیت اول و آخر در شبکه فعالیت‌ها، از نوع مجازی هستند.
- 2- روابط پیشنیازی بین فعالیت‌ها از نوع پایان به شروع است.
- 3- مقدار زمان تاخیر یا تعجیل بین دو فعالیت که رابطه پیشنیازی دارند صفر فرض می‌شود ( $l_{ij} = 0$ ).
- 4- هر فعالیت پروژه در مدت زمانی که اجرا می‌شود فقط با یک روش از چند روش ممکن که برای اجرای آن تعریف شده است می‌تواند انجام شود.
- 5- سطح منابع موردنیاز هر فعالیت در هر پریود زمانی  $t$  مقداری مشخص است که در جدول شماره سه نشان داده شده است.
- 6- اگر همه منابع تجدیدپذیر موردنیاز یک فعالیت در لحظه‌ای از زمان اجرای پروژه برای تمام بازه زمانی لازم جهت اجرای بدون وقفه آن موجود باشد، اجرای فعالیت می‌تواند با رعایت محدودیت روابط پیشنیازی در آن لحظه زمانی شروع شود.
- 7- چنانچه فعالیتی مدتی بعد از شروع برای اجرا متوقف شود و کار ناتمام باقی بماند مجاز به شروع مجدد برای ادامه دادن کار باقیمانده نمی‌باشد یعنی Preemption مجاز نمی‌باشد.
- 8- در مسأله نمونه این پژوهش برای همه فعالیت‌ها، یک شاخص و به صورت یکسان به منظور محاسبه کیفیت فرض می‌شود. یعنی وزن شاخص برای هر فعالیت برابر با عدد یک است ( $w_{ju} = 1, u_j = 1$ ).

### 4.2. الگوریتم فراابتکاری ژنتیک

مسائل زمان بندی پروژه با منابع محدود و چند حالت اجرا برای فعالیت‌ها (MRCPSP) در حالت گسسته از نوع مسائل ریاضی NP-hard می‌باشند [3]. هنگامی که تعداد فعالیت‌ها و یا تعداد مدهای اجرای آن‌ها زیاد باشد، روش‌های حل دقیق کارایی لازم برای بدست آوردن جواب‌های این نوع از مسائل بهینه سازی را نخواهند داشت، زیرا با افزایش یافتن پیچیدگی محاسبات، زمان حل بسیار طولانی خواهد شد. به همین دلیل استفاده از روش‌های فراابتکاری که سرعت بالایی برای حل این نوع مسائل را دارند در مقالات و پژوهش‌های مختلف پیشنهاد شده است.

الگوریتم ژنتیک یک روش حل برای جستجو جواب و بهینه‌سازی مسائل پیچیده در علوم مختلف است که از اصول تکامل طبیعی که در بین موجودات وجود دارد پیروی کرده و مراحل تکامل موجودات زنده را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم توسط پژوهشگری به نام هلند در سال 1975 با انتشار کتابی با نام سازگاری سیستم‌های مصنوعی و طبیعی برای استفاده در علوم مختلف معرفی شد [14]. در سال 1997 فنگ و همکاران [15] برای اولین بار از الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسأله زمان بندی پروژه با روش موازنه بین زمان و هزینه استفاده کردند. از ویژگی‌های مهم الگوریتم ژنتیک می‌توان به سرعت همگرایی بالا و تولید جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه در مسائلی که دارای تعداد زیادی فعالیت و چند حالت اجرا برای



فعالیت‌ها هستند؛ بخصوص در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه اشاره کرد. در این پژوهش با توجه به چند هدفه بودن مدل و مطالعاتی که در زمینه مسائل زمان‌بندی پروژه انجام گرفت، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA II برای انجام آزمایشها و بدست آوردن جواب‌های مدل انتخاب شد.

### 3. آزمایش‌های محاسباتی

#### 1.3. تعریف پارامترهای مسأله نمونه

برای انجام پژوهش، از مسأله نمونه‌ای با هجده فعالیت و پنج حالت اجرا برای فعالیت‌ها که مربوط به مطالعه موردی پروژه ساخت بزرگراه بود، استفاده شد (جدول شماره یک و دو). این مسأله توسط فنگ و همکاران [15] در سال 1997 در مقاله‌ای برای نشان دادن کاربرد الگوریتم ژنتیک در حل مسائل موازنه ارائه گردید و در سال‌های بعد بدون تغییر و یا با انجام تغییراتی، توسط پژوهشگران مختلف در مقالاتی مانند [16]، [17]، [18]، به عنوان مسأله نمونه از آن استفاده شد. مانگل و همکاران [18] برای بررسی و ارائه نتایج پژوهش خود، عامل کیفیت را برای فعالیت‌های پروژه به این مسأله اضافه کردند و به هر فعالیت برای نشان دادن میزان تأثیرگذاری آن در کیفیت کل پروژه، وزنی تخصیص دادند.

در این مقاله ضمن استفاده از برخی تغییرات ارائه شده توسط مانگل و همکاران در مسأله، برای هر یک از فعالیت‌ها، چهار نوع مختلف، منبع تجدیدپذیر با حداکثر پنج حالت انتخاب برای هر فعالیت، تعریف شده که در جدول شماره سه آورده شده است. همچنین برای تمام حالت‌های هر نوع منبع مورد نیاز فعالیت‌ها، هزینه یکسانی به ازای هر واحد استفاده، تعریف گردیده که مقادیر آن در جدول شماره دو آمده است. جدول شماره چهار مربوط به مقدار هزینه جریمه تخصیص داده شده برای هر واحد از منابع تجدیدپذیر استفاده نشده می‌باشد و جدول شماره پنج حداکثر مقدار منابع تجدیدپذیری که در هر پرورد زمانی از پروژه موجود و قابل استفاده است را نشان می‌دهد.

جدول 1- مقادیر پارامترهای مسأله نمونه

فعالیت‌ها	حالت اجرای اول			حالت اجرای دوم			حالت اجرای سوم			حالت اجرای چهارم			حالت اجرای پنجم		
	تعداد	هزینه	کیفیت	تعداد	هزینه	کیفیت	تعداد	هزینه	کیفیت	تعداد	هزینه	کیفیت	تعداد	هزینه	کیفیت
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	14	2400	0.1	15	2150	0.9	16	1900	0.86	21	1500	0.75	24	1200	0.63
3	15	3000	0.98	18	2400	0.87	20	1800	0.81	23	1500	0.77	25	1000	0.6
4	15	4500	0.1	22	4000	0.8	33	3200	0.62	-	-	-	-	-	-
5	12	45000	0.99	16	35000	0.74	20	30000	0.59	-	-	-	-	-	-
6	22	20000	0.1	24	17500	0.93	28	15000	0.77	30	10000	0.61	-	-	-
7	14	40000	0.95	18	32000	0.76	24	18000	0.59	-	-	-	-	-	-
8	9	30000	0.97	15	24000	0.7	18	22000	0.61	-	-	-	-	-	-
9	14	220	0.95	15	215	0.83	16	200	0.75	21	208	0.68	24	120	0.61
10	15	300	0.1	18	240	0.97	20	180	0.61	23	150	0.71	25	100	0.63
11	15	450	0.94	22	400	0.79	33	320	0.81	-	-	-	-	-	-
12	12	450	0.96	16	350	0.72	20	300	0.61	-	-	-	-	-	-

فعالیت ها	حالت اجرای اول			حالت اجرای دوم			حالت اجرای سوم			حالت اجرای چهارم			حالت اجرای پنجم		
	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت
13	22	2000	0.99	24	1750	0.89	28	1500	0.7	30	1000	0.62	-	-	-
14	14	4000	0.99	18	3200	0.73	24	1800	0.6	-	-	-	-	-	-
15	9	3000	0.1	15	2400	0.79	18	2200	0.63	-	-	-	-	-	-
16	16	3500	0.1	16	3500	0.1	16	3500	0.1	16	3500	0.1	16	3500	0.1
17	20	3000	0.97	22	2000	0.89	24	1750	0.81	28	1500	0.72	30	1000	0.67
18	14	4000	0.98	18	3200	0.73	24	1800	0.62	-	-	-	-	-	-
19	9	3000	0.98	15	2400	0.75	18	2200	0.63	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول 2- هزینه استفاده از هر واحد منبع تجدیدپذیر برای هر فعالیت، وزن اهمیت کیفی و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها

فعالیت	روابط پیش‌نیازی	$w_j$ وزن فعالیت	هزینه استفاده از منبع 1	هزینه استفاده از منبع 2	هزینه استفاده از منبع 3	هزینه استفاده از منبع 4
1	-	0	-	-	-	-
2	1FS	0.055	19	18	17	20
3	1FS	0.051	16	18	19	17
4	1FS	0.056	35	32	34	31
5	1FS	0.056	445	469	440	447
6	2FS	0.056	49	45	48	48
7	2FS	0.056	292	287	291	299
8	6FS	0.056	316	324	338	332
9	7FS	0.056	3	3	2	4
10	7FS	0.056	6	2	5	6
11	3FS,7FS	0.056	2	4	5	4
12	8FS,9FS	0.056	7	4	6	5
13	6FS,10FS,11FS	0.056	8	7	5	9
14	4FS	0.056	26	28	32	26
15	5FS,11FS	0.056	39	33	32	34
16	13FS	0.056	40	45	40	48
17	14FS,15FS	0.056	8	11	11	10
18	12FS,15FS,16FS	0.055	27	33	25	33
19	17FS,18FS	0.055	32	34	38	33
20	19FS	0	-	-	-	-

جدول 3- مقدار منبع تجدیدپذیر مورد نیاز برای هر فعالیت با توجه به حالت‌هایی که می‌تواند انجام شود

شماره فعالیت ها	حالت اجرای شماره 1				حالت اجرای شماره 2				حالت اجرای شماره 3				حالت اجرای شماره 4				حالت اجرای شماره 5			
	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	3	1	1	3	5	4	2	1	2	4	2	2	2	1	3	1	3	1	2
3	1	2	3	2	3	4	3	2	2	1	4	1	1	1	2	3	2	2	3	3
4	3	4	2	3	2	4	1	1	2	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	1	4	3	1	2	1	1	4	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4	4	3	1	1	5	4	2	2	2	3	2	1	3	3	1	0	0	0	0
7	1	1	4	2	4	3	1	1	4	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	2	4	2	1	2	2	3	1	3	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0
9	2	4	2	3	4	5	1	3	2	1	3	2	1	2	2	2	1	5	4	1
10	1	4	3	1	3	5	4	3	1	5	4	3	4	5	1	1	1	1	2	1
11	2	1	1	3	4	3	3	2	1	5	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	5	1	2	1	4	3	2	4	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
13	4	4	3	2	2	3	2	1	3	1	4	1	2	4	1	1	0	0	0	0
14	2	3	3	1	1	2	1	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	3	3	2	2	4	2	3	3	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	3	4	2	1	3	1	3	4	3	1	2	2	2	2	2	3	2	1	3
17	3	2	3	1	4	2	1	1	3	2	2	2	1	3	2	3	3	4	1	1
18	2	3	3	2	4	5	3	2	2	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0
19	3	3	4	1	4	1	1	1	3	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول 4- مقدار هزینه جریمه برای هر واحد از منابع تجدیدپذیر که در هر بازه زمانی (روز) بدون استفاده باقی می‌ماند ( $pe_k$ )

هزینه جریمه برای هر واحد منبع تجدیدپذیر	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4
		10	15	20

جدول 5- مقدار منابع تجدیدپذیری که در هر بازه زمانی (روز) به پروژه تخصیص داده می‌شود ( $R_{kt}^D$ )

حداکثر مقدار منابع تجدیدپذیر در هر روز (واحد در روز)	منبع 1	منبع 2	منبع 3	منبع 4
		4	5	4

### 2.3. روش انجام آزمایش‌ها

برای بررسی تأثیر تخصیص هزینه جریمه به منابع تجدیدپذیر در پروژه دو آزمایش انجام شد. آزمایش اول دارای دو مرحله بود. در مرحله اول، هفت حالت مختلف برای اجرای الگوریتم ژنتیک با تعداد تکرار و تعداد اعضای جمعیت متفاوت در نظر گرفته شد (در جدول شماره شش تفاوت بین حالت‌ها مشاهده می‌شود). در این مرحله هزینه جریمه برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر پریود زمانی صفر بود. الگوریتم ژنتیک برای هر حالت سه بار اجرا شد. یعنی بیست و یک بار الگوریتم برای مرحله اول اجرا گردید. برای مرحله دوم آزمایش نیز هفت حالت با تعداد تکرار و تعداد جمعیتی مانند قبل تعریف شد. اما در این

مرحله هزینه جریمه (با توجه به مقادیر جدول شماره چهار) برای هر واحد از منابع استفاده نشده در هر پریود زمانی از زمان اجرای پروژه تعریف شده بود. مشابه مرحله قبل برای هر حالت، الگوریتم ژنتیک سه بار اجرا شد. آزمایش دوم، مشابه مرحله دوم از آزمایش اول بود. با این تفاوت که در این آزمایش مقادیر هزینه جریمه برای هر واحد از منابع استفاده نشده نسبت به آزمایش اول دو برابر تعریف شد (مقادیر جدول شماره چهار دو برابر در نظر گرفته شد). در این آزمایش هم برای هر حالت سه بار الگوریتم اجرا گردید. در هر دو آزمایش برای هر حالت، به غیر از هزینه جریمه، تعداد تکرارها و تعداد اعضای جمعیت، بقیه پارامترها برای اجرای الگوریتم ژنتیک یکسان تعریف شده بودند. برای انجام آزمایش‌ها، کدنویسی الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab R2015a انجام گرفت و برای تحلیل نتایج و محاسبات، نرم‌افزار Excel 2013 بکاربرده شد. بدین منظور از کامپیوتری با مشخصات Intel(R) Core(TM) i3 CPU M350@2.27GHz, RAM 4GB استفاده گردید.

جدول 6- مشخصات حالت‌های اجرای آزمایش‌ها

شماره حالت مربوط به آزمایش‌ها	1	2	3	4	5	6	7
تعداد تکرارهای الگوریتم	40	50	80	80	100	120	180
تعداد اعضای جمعیت تعریف شده	80	100	80	120	200	80	150
تعداد دفعات اجرای الگوریتم برای هر حالت	3	3	3	3	3	3	3

### 3.3. محاسبه مقادیر بدست آمده از آزمایش شماره یک

جدول شماره هفت مربوط به نتایج آزمایش شماره یک است که برای هر پارامتر منبع، هزینه، زمان و کیفیت پروژه دارای دو ستون می باشد. ستون دوم هر پارامتر مربوط به مرحله اول از آزمایش شماره یک و ستون اول، مربوط به مرحله دوم این آزمایش است. اعداد داخل همه ستون‌ها مانند هم محاسبه شده‌اند. به همین دلیل فقط سه ستون مربوط به منبع تجدیدپذیر شماره یک توضیح داده می‌شود.

در ستون‌های مربوط به منابع هر عدد بیانگر مقدار متوسط جواب‌های حاصل از سه بار اجرای الگوریتم ژنتیک در هر حالت است. برای مثال عدد 451 در ردیف مربوط به حالت شماره یک و زیر ستون مربوط به منبع شماره یک بعد از اجرای سه بار الگوریتم با چهل بار تکرار و تولید حداکثر هشتاد جواب در هر بار بدست آمده است. بدین صورت که، کل مقادیر استفاده نشده از منبع تجدیدپذیر شماره یک در سه بار اجرای الگوریتم با هم جمع شد و سپس بر تعداد آنها تقسیم گردید و نتیجه یعنی مقدار میانگین حسابی  $\bar{R}_1$  در ردیف شماره یک از ستون اول منبع شماره یک آورده شده است. همچنین نتایج حاصل از مرحله دوم آزمایش اول که برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده، هزینه جریمه تعریف شده بود؛ در ستون‌های سمت راست مربوط به نتایج مرحله اول نوشته شده است. روش محاسبه مقادیر این ستون‌ها هم مانند مرحله اول می‌باشد. در ستون‌هایی که در بالای آن‌ها روابطی مانند  $\bar{R}_2 - \bar{R}_1$  دیده می‌شود، نتایج محاسبه اختلاف متوسط مقادیر استفاده نشده از منبع شماره یک، بین مراحل اول و دوم را برای هر حالت نشان می‌دهد. در آخرین ردیف زیر هر ستون، مقدار متوسط اعداد آن ستون از طریق تقسیم حاصل جمع آنها بر عدد هفت بدست آمده است. مقادیر مربوط به ستون‌های متوسط هزینه، زمان و کیفیت هم به روشی که برای منابع استفاده نشده توضیح داده شد، محاسبه شده‌اند.

جدول 7- نتایج بدست آمده از آزمایش شماره یک

حالت اجرای آزمایش	مقدار استفاده نشده از منبع 1		$\bar{R}_1 - \bar{R}_2$	مقدار استفاده نشده از منبع 2		$\bar{R}_1 - \bar{R}_2$	مقدار استفاده نشده از منبع 3		$\bar{R}_1 - \bar{R}_2$	مقدار استفاده نشده از منبع 4		$\bar{R}_1 - \bar{R}_2$
	با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه	
	$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$		$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$		$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$		$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$	
1	451	508	57	522	544	22	395	443	48	287	294	7
2	497	520	23	572	568	-4	388	445	57	286	302	16
3	437	499	62	533	527	-6	352	404	52	269	293	24
4	451	521	70	478	559	81	372	408	36	294	301	7
5	478	502	24	517	542	25	333	395	62	280	289	9
6	458	517	59	510	558	48	331	410	79	265	316	51
7	460	478	18	506	518	12	321	380	59	266	282	16
			45			25			56			19
	462	506		520	545		356	412		278	297	
حالت اجرای آزمایش	متوسط زمان اتمام پروژه (روز)		$\bar{T}_1 - \bar{T}_2$	متوسط هزینه کل اجرای پروژه		$\bar{C}_1 - \bar{C}_2$	متوسط کیفیت کل اجرای پروژه (درصد)		$\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2$	متوسط زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)		
	با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه		با عمل جریمه	بدون عمل جریمه	
	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$		$\bar{C}_2$	$\bar{C}_1$		$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_1$				
1	282	294	12	342611	307473	35138	81	80	1	113	119	
2	291	291	0	351380	301352	50028	84	79	5	190	200	
3	282	286	4	339894	301458	38436	82	80	2	204	203	
4	280	285	5	327853	308600	19253	81	81	0	395	386	
5	275	283	8	341279	309218	32061	85	82	3	1203	1120	
6	275	288	13	338372	306192	32180	85	81	4	312	320	
7	270	274	4	337374	305268	32106	85	83	2	1315	1260	
			7			34172			2			
	279	286		339823	305652		83	81				

### 4.3. محاسبه مقادیر بدست آمده از آزمایش شماره دو

برای بررسی تأثیر افزایش دادن مقدار هزینه جریمه در استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر و همچنین در پارامترهای زمان، هزینه و کیفیت کل اجرای پروژه، آزمایش دیگری انجام شد. برای مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج مرحله دوم آزمایش شماره یک، مقادیر پارامترهای آن‌ها در دو ستون در جدول شماره هشت آورده شده است. ستون اول هر پارامتر (زمان، هزینه، کیفیت، منابع) مربوط به آزمایش شماره دو و ستون دوم مربوط به مرحله دوم آزمایش شماره یک است. اختلاف نتایج هم در ستون سمت راست آنها آورده شده است. روش محاسبه و بدست آوردن مقادیر نوشته شده در این جدول به همان صورتی است که برای جدول شماره هفت از آزمایش شماره یک، شرح داده شد.

جدول 8- نتایج مربوط به آزمایش شماره دو

حالت اجرای آزمایش	مقدار استفاده نشده از منبع 1		$\bar{R}_2 - \bar{R}_1$	مقدار استفاده نشده از منبع 2		$\bar{R}_2 - \bar{R}_1$	مقدار استفاده نشده از منبع 3		$\bar{R}_2 - \bar{R}_1$	مقدار استفاده نشده از منبع 4		$\bar{R}_2 - \bar{R}_1$		
	هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است
	$\bar{R}_2$	$\bar{R}_1$		$\bar{R}_2$	$\bar{R}_1$		$\bar{R}_2$	$\bar{R}_1$		$\bar{R}_2$	$\bar{R}_1$		$\bar{R}_2$	$\bar{R}_1$
1	471	451	20	544	522	22	381	395	-14	298	287	11		
2	443	497	-54	504	572	-68	398	388	10	297	286	11		
3	428	437	-9	465	533	-68	322	352	-30	250	269	-19		
4	454	451	3	501	478	23	293	372	-79	271	294	-23		
5	419	478	-59	476	517	-41	332	333	-1	259	280	-21		
6	443	458	-15	481	510	-29	332	331	1	273	265	8		
7	448	460	-12	482	506	-24	295	321	-26	269	266	3		
			-18			-26			-20			-4		
	444	462		493	520		336	356		274	278			
حالت اجرای آزمایش	متوسط زمان اتمام پروژه (روز)		$\bar{T}_2 - \bar{T}_1$	متوسط هزینه کل اجرای پروژه		$\bar{C}_2 - \bar{C}_1$	متوسط کیفیت کل اجرای پروژه (درصد)		$\bar{Q}_2 - \bar{Q}_1$	متوسط زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)				
	هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است		هزینه جریمه	دوبرابر است			
	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_1$		$\bar{C}_2$	$\bar{C}_1$		$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_1$		$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_1$			
1	286	282	4	376097	342611	33486	80	81	-1	124	113			
2	282	291	-9	367926	351380	16546	81	84	-3	236	190			
3	275	282	-7	362381	339894	22487	82	82	0	212	204			
4	280	280	0	355567	327853	27714	85	81	4	404	395			
5	275	275	0	369124	341279	27845	85	85	0	1155	1203			
6	278	275	3	355676	338372	17304	83	85	-2	316	312			
7	274	270	4	362223	337374	24849	86	85	1	1261	1315			
			-1			24319			0					
	279	279		364142	339823		83	83		530	533			

#### 4. بحث درباره نتایج

##### 1.4. آزمایش شماره 1

هدف از انجام این آزمایش، بررسی و تحلیل تأثیر تخصیص هزینه جریمه به هر واحد استفاده نشده از منابع تجدیدپذیر در هر پریود زمانی از زمان اجرای پروژه، در برنامه زمان‌بندی پروژه و تخصیص منابع به فعالیت‌ها است. به همین دلیل پارامترهای زمان اتمام پروژه، هزینه نهایی پروژه، کیفیت نهایی پروژه و مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر پریود زمانی از پروژه، در دو حالت یعنی در شرایطی که مقدار هزینه جریمه صفر است و زمانی که هزینه جریمه صفر نیست محاسبه و با هم

مقایسه شدند. در ستون‌هایی از جدول شماره هفت که مربوط به تفاضل مقادیر متوسط منابع باقیمانده در حالت اعمال جریمه از حالت عدم تخصیص جریمه است؛ مشاهده می‌شود که به غیر از دو مورد بقیه مقادیر مثبت هستند. این بدین معنا است که در نظر گرفتن جریمه برای منابع استفاده نشده منجر به استفاده بهینه‌تر از آنها در هر بازه زمانی شده است. از طرفی دیگر در جدول شماره هفت مقادیری که در ستون مربوط به تفاضل مقدار متوسط زمان کل اجرای پروژه در حالت با تخصیص جریمه از حالت بدون تخصیص جریمه آورده شده است؛ همگی مثبت هستند. یعنی تخصیص جریمه منجر به کاهش زمان اتمام پروژه شده است.

با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که به علت تخصیص دادن جریمه به منابع باقیمانده، طبیعتاً هزینه کل پروژه افزایش می‌یابد. لذا برای کاهش یافتن افزایش هزینه کل، استفاده از تکنیک موازنه و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، موجب شده منابع مورد نیاز هر فعالیت به صورت بهینه‌تر انتخاب و تخصیص داده شوند و با رعایت محدودیت روابط پیشنیازی ترتیب اجرای فعالیت‌ها بگونه‌ای انجام گیرد تا در هر پرپود زمانی کمترین تعداد از هر منبع بدون استفاده باقی بماند که این دو موضوع منجر به افزایش یافتن تعداد فعالیت‌هایی شده است که در هر پرپود در حال اجرا و استفاده از منابع هستند. این تخصیص بهینه در هر بازه زمانی همچنین منجر به کاهش تعداد بازه‌های زمانی لازم برای مصرف هر منبع گردید که در نهایت باعث شد زمان کل پروژه کاهش یابد؛ اما به علت عدم استفاده از برخی منابع در پرپودهای مختلف، هزینه کل پروژه افزایش یافت که در جدول شماره هفت، مقادیر مثبت در ستون مربوط به تفاضل مقدار متوسط هزینه‌ها نشان‌دهنده این موضوع است. همچنین مقادیر مربوط به ستون تفاضل متوسط کیفیت کل پروژه، در دو حالت، با هزینه جریمه و بدون هزینه جریمه، با اختلاف کم مثبت می‌باشند که نشان‌دهنده آن است که علی‌رغم کاهش زمان اجرای پروژه به منظور تخصیص بهینه‌تر منابع به فعالیت‌ها، کیفیت کل پروژه بهتر شده است.

## 2.4. آزمایش شماره 2

هدف از انجام این آزمایش بررسی و تحلیل تأثیر افزایش دادن هزینه جریمه برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر بازه زمانی از مدت زمان اجرای پروژه، در برنامه زمان‌بندی پروژه و تخصیص منابع به فعالیت‌ها است. بدین منظور پارامترهای زمان اتمام پروژه، هزینه نهایی پروژه، کیفیت نهایی پروژه و مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در شرایطی که مقدار هزینه جریمه مانند مرحله دوم از آزمایش شماره یک بود با حالتی که هزینه‌های جریمه به دو برابر حالت قبل برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده، افزایش یافته بود مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیری که در ستون‌های تفاضل منابع تجدیدپذیر جدول شماره هشت آمده است در اکثر موارد منفی هستند. این مقادیر حاصل تفاضل مقدار متوسط منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در شرایط بدون تغییر هزینه جریمه از مقدار متوسط منابع باقیمانده در شرایطی که هزینه جریمه دو برابر شده می‌باشند. همچنین میانگین حسابی مقادیر ستون اختلاف متوسط زمان اتمام پروژه و میانگین حسابی ستون اختلاف متوسط کیفیت کل پروژه در دو حالت مورد مقایسه، به ترتیب منهای یک و صفر هستند.

لذا می‌توان گفت که با افزایش یافتن جریمه به میزان دو برابر، استفاده از تکنیک موازنه و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، باعث شده که منابع تجدیدپذیر در هر بازه زمانی از زمان اجرای پروژه به صورتی تخصیص داده شوند که کمترین تعداد منبع در هر بازه باقی بماند تا هزینه کل پروژه کاهش یابد. برای این کار با رعایت محدودیت روابط پیشنیازی، بیشترین تعداد از فعالیت‌ها برای مصرف بیشتر منابع اختصاص داده شده است که موجب شده تا میانگین حسابی مربوط به اختلاف متوسط زمان کل اجرای پروژه در بیست و یک اجرا الگوریتم، منفی یک شود. یعنی با بهینه‌تر شدن استفاده از منابع در پرپودهای زمانی (تخصیص بهینه‌تر منابع به فعالیت‌ها در پروژه)، متوسط زمان اتمام پروژه تقریباً تغییر نکرده است. همچنین

میانگین حسابی مربوط به اختلاف متوسط کیفیت‌ها، برای هفت حالت برابر صفر شده است که می‌توان گفت متوسط کیفیت کل پروژه در دو وضعیتی که هزینه جریمه دو برابر شده نسبت به حالتی که مقدار جریمه تغییر نکرده تقریباً به هم نزدیک می‌باشد. همان طور که در جدول شماره هشت دیده می‌شود علی‌رغم اینکه میانگین حسابی اختلاف متوسط منابع استفاده نشده منفی است (عدد منفی هجده در سطر آخر ستون مربوط به اختلاف منابع استفاده نشده)، اما به علت استفاده نشدن منابع در برخی از پیوندهای زمانی در آزمایش شماره دو و همچنین دو برابر شدن هزینه‌های جریمه، در ستون مربوط به تفاضل متوسط هزینه کل در شرایطی که جریمه بدون تغییر بوده از متوسط هزینه کل در وضعیتی که جریمه دو برابر شده است، همه اعداد مثبت هستند که این به دلیل افزایش یافتن مقدار هزینه جریمه به دو برابر برای هر واحد از منابع در آزمایش شماره دو می‌باشد.

## 5. نتیجه گیری

به دلیل محدودیت‌هایی که برای تأمین منابع مورد نیاز اجرای فعالیت‌ها در پروژه‌ها وجود دارد و برای صرفه جویی در هزینه‌ها، از منابع تخصیص داده شده به فعالیت‌ها، حداکثر استفاده باید انجام گیرد. استفاده نکردن بهینه از منابع، منجر به افزایش هزینه نهایی پروژه می‌شود و حتی ممکن است باعث طولانی‌تر شدن زمان اتمام پروژه گردد. از این رو باید برنامه‌ریزی پروژه به صورتی انجام گیرد تا رابطه‌ای بهینه بین استفاده از منابع و پارامترهای عامل موفقیت پروژه یعنی زمان، هزینه و کیفیت ایجاد شود. در این پژوهش با استفاده از تکنیک موازنه سه هدفه زمان، هزینه و کیفیت و با تعریف رابطه‌ای برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده در هر پیوند زمانی از زمان اجرای پروژه، دو آزمایش انجام شد. برای انجام آن‌ها از الگوریتم ژنتیک نسخه NSGA II و یک مسأله نمونه پرکاربرد در مقالات منتشرشده مرتبط با زمان‌بندی پروژه استفاده گردید. در مرحله اول از آزمایش شماره یک برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده، مقدار هزینه جریمه برابر صفر و در مرحله دوم هزینه جریمه مخالف صفر فرض شد و در آزمایش شماره دو، هزینه جریمه دو برابر مرحله دوم آزمایش شماره یک در نظر گرفته شد. مقادیر عددی بدست آمده از آزمایش‌ها بعد از انجام یک سری محاسبات آماری در دو جدول به صورت مجزا نشان داده شدند. نتایج آزمایش اول نشان داد که با تخصیص دادن هزینه جریمه، متوسط مقادیر منابع استفاده نشده در هر پیوند زمانی و همچنین متوسط زمان اتمام پروژه کاهش پیدا کرده است و متوسط کیفیت پروژه هم با بهبود همراه بوده است؛ اما هزینه کل پروژه به علت تخصیص هزینه جریمه برای منابع استفاده نشده افزایش پیدا کرده بود. در آزمایش شماره دو با مقایسه نتایج دو برابر شدن هزینه جریمه با نتایج مرحله دوم آزمایش شماره یک مشاهده شد که دو برابر کردن هزینه جریمه باعث شده متوسط مقدار منابع تجدیدپذیر استفاده نشده کاهش یابد؛ همچنین زمان و کیفیت متوسط پروژه هم تقریباً بدون تغییر باقی بماند. با نتایج بدست آمده می‌توان گفت که استفاده از تکنیک موازنه به همراه الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و تخصیص دادن هزینه جریمه برای منابع تجدیدپذیر استفاده نشده باعث گردیده، استفاده از منابع در هر بازه زمانی به صورت بهینه‌تر انجام گیرد که این منجر به کاهش یافتن تعداد بازه‌های زمانی، برای استفاده از هر نوع منبع تجدیدپذیر پروژه شده، که در نهایت کاهش زمان اتمام پروژه را به همراه داشته است.

## 6. مراجع

I. Węglarz, J., Józefowska, J., Mika, M. and Waligóra, G. (2011), "Project Scheduling with Finite or Infinite Number of Activity Processing Modes-A Survey," *European Journal of Operational Research*, **208** (3), pp 177-205.





# دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - اسفند ۱۳۹۶



2. Jebaseeli, ME. and Dhayabaran, DP. (2015), "Integer Programming Model for Fuzzy Time Cost and Quality Trade off Problem," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, **4** (3), pp.
3. Tavana, M., Abtahi, A-R. and Khalili-Damghani, K. (2014), "A New Multi-Objective Multi-Mode Model for Solving Preemptive Time-Cost-Quality Trade-Off Project Scheduling Problems," *Expert Systems with Applications*, **41** (4), pp 1830-1846.
4. رضایی نیک، ا. و هژبر لطف آبادی، م. (1394)، "مدل سازی و حل مسأله زمان بندی پروژه چند هدفه-چند حالت با محدودیت منابع با پارامترهای احتمالی (مطالعه موردی پروژه راه سازی گذرگاه طالقانی مشهد)"، دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.
5. Wiest, JD. (1967), "A Heuristic Model for Scheduling Large Projects with Limited Resources," *Manage Sci*, **13** (6), pp 359-377.
6. Boctor, FF. and Kadri, RL. (2016), "The Generalized Resource Allocation and Leveling Problem in Project Scheduling," *Cirrelt*, pp.
7. Alcaraz, J., Maroto, C. and Ruiz, R. (2003), "Solving the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Genetic Algorithms," *Journal of the Operational Research Society*, **54** (6), pp 614-626.
8. Józefowska, J., Mika, M., Różycki, R., Waligóra, G. and Węglarz, J. (2001), "Simulated Annealing for Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling," *Annals of Operations Research*, **102** (1), pp 137-155.
9. Balouka, N., Cohen, I. and Shtub, A. (2016), "Extending the Multimode Resource-Constrained Project Scheduling Problem by Including Value Considerations," *IEEE Transactions on Engineering Management*, **63** (1), pp 4-15.
10. Ghalehnovi, M., Zargar, M. and Nik, E. (2016), "Modeling and Solving Time-Cost Trade-Off Problem in the Fuzzy Environment (Case Study)," *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, **8** (2S), pp 102-112.
11. Chakraborty, RK., Sarker, RA. and Essam, DL. (2017), "Resource Constrained Project Scheduling with Uncertain Activity Durations," *Computers & Industrial Engineering*, pp.
12. Xu, J. and Feng, C. (2014), "Multimode Resource-Constrained Multiple Project Scheduling Problem Under Fuzzy Random Environment and Its Application to A Large Scale Hydropower Construction Project," *The Scientific World Journal*, pp 20.
13. Eydi, A., Farughi, H. and Abdi, F. (2016), "A Hybrid Method Based on Fuzzy AHP and Vikor for the Discrete Time-Cost-Quality Trade-off Problem," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, **9** (19), pp 105-116.
14. Mitchell, M. (1999), "An Introduction to Genetic Algorithms", MIT Press, 158.
15. Feng, C., Liu, L. and Burns, S. (1997), "Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems," *Journal of Computing in Civil Engineering*, **11**, pp 184.
16. Xiong, Y. and Kuang, Y. (2008), "Applying an Ant Colony Optimization Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Trade-Off," *Journal of Construction Engineering and Management*, **134** (2), pp 153-156.
17. اشتهااردیان، ا.ا.، عباس نیا، ر. و افشار، ع. (1387)، "موازنه هزینه - زمان با در نظر گرفتن زمانبندی غیرقطعی"، اولین کنفرانس بین المللی مدیریت استراتژیک پروژه ها، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.



دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در  
مهندسی سازه و مدیریت ساخت  
دانشگاه صنعتی شریف - اسفند ۱۳۹۶



18.Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y-J. and Tiwari, M. (2013),“A Fuzzy Clustering-Based Genetic Algorithm Approach for Time-Cost-Quality Trade-Off Problems: A Case Study of Highway Construction Project,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, **26** (8), pp 1953-1966.