چکیده

مسـئله زمانبندی پروژه در حالت چند وضـعیتی با محدودیت منابع یکی از مسـایل زمانبندی می باشـد که مورد توجه محققان در سـال های اخیر به دلایل راهبردی و کاربردی بودن این مسـایل در ابعاد عملی و تئوری قرار گرفته اسـت. در این پژوهش زمانبندی پروژه در حالت محدودیت منابع از هر دو نوع تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر ضـمن اینکه به دنبال کمینه کردن زمان و هزینه های اتمام پروژه که برگرفته از هزینه های متاثر از زمان تحویل فعالیت ها و منابع مصـرفی می باشـد به دنبال افزایش پایداری شـبکه زمانبندی پروژه نیز می باشـد تا با بهینه شـدن زمان و هزینه پروژه فعالیت ها نیز با بیشـترین پایداری ممکن برنامه ریزی و اجرا شـوند. این مدل های ریاضـی از نوع مسـایل NP-Hard (دمیولمسـتر و هرلن، ۲۰۰۲) به حسـاب می آید و برای حل آن از الگوریتم های فراابتکاری از جمله ژنتیک۲ و الگوریتم فاخته اسـتفاده شده است و با آزمایشات تاگوچی به عنوان یک روش بهینه سازی آماری برای تنظیم پارامتر های ژنتیک۲ و فاخته مورد اسـتفاده قرار گرفته و سـپس الگوریتم های مورد اشاره با استفاده از آزمون t با یکدیگر مقایسه و نتایج آن مورد بحث و تصمیم گیری قرار گرفته است.

کلید واژه:

زمان بندی پروژه با محدودیت منابع، زمانبندی پایدار، انقطاع فعالیت، موعد تحویل فعالیت، جریمه دیرکرد و زودکرد، الگوریتم NSGA II، الگوریتم فاخته،

مقدمه

مسایل زمانبندی پروژه به سال ۱۹۵۰ با تدوین روش زمانبندی پرت و روش مسیر بحرانی پروژه توسط مال کوم و همکاران در سال ۱۹۵۹ و کلی در سال ۱۹۶۳ بر میگردد. در روش مسیر بحرانی مورد بحث به یافتن کمترین مدت زمان پروژه بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع پروژه پرداخته میشد. اما با گذشت زمان و ایجاد محدودیت ها در منابع از قبیل نیروی انسانی، زمین، تجهیزات و ماشین آلات محققان شروع به تحقیق و پژوهش در خصوص مسایل زمانبندی با محدودیت منابع پرداختند. جانسون برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ از عبارت مشکلات زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در تحقیقات خود استفاده کرد و تحقیقات دیگر از قبیل تخصیص منابع در شبکه های زمانبندی داویس در سال ۱۹۶۶، تخصیص منابع در برنامه ریزی پروژه پترویچ در سال ۱۹۶۸ و زمانبندی پروژه با محدودیت منابع توسط بالاس در سال ۱۹۷۱ اشاره نمود. بعد از توجه پژوهشگران به مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع وگلارز و همکاران در سال ۲۰۱۱ عمده ترین مباحث قابل توسعه در خصوص مسایل زمانبندی با محدودیت منابع را به موارد زیر طبقه بندی کرد:

- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع چند حالته*
- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع کلی*

حل مساله زمانبندی پروژه در حالت پایدار با محدودیت منابع و موعد تحویل بازه ای

روزبه عزیزمحمدی(نویسنده مسئول)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران،ایران
rozbeh@pnu.ac.ir
شبنم پندآموز
کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

میثم جعفری اسکندری
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران،ایران
meisam_jafari@pnu.ac.ir
نوید هشترودی
کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با پیشنیازی های GPC*
- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با منابع متغییر در طول زمان*
- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع چند شاخصه*
- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با انقطاع فعالیت ها*
- *مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع پویا*

دمیل مستر و هرولن در سال ۱۹۹٦ نشان دادند که در مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع انقطاع فعالیت ها امکان کاهش مدت زمان اتمام فعالیتها و پروژه را فراهم میکنند اما اهمیت روشهای حل و محاسبات این موضوع بیشتر می شود.

باداک اولسومسری و کیم در سال ۲۰۰٦ و ۲۰۰۷ نشان دادند که در مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع، انقطاع فعالیتها در کاهش مدت زمان اتمام فعالیتها و در نهایت پروژه با در نظر گرفتن منابع در دسترس متغیر در زمان و تعطیلات منابع، کمک میکند. شو و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مطالعه ای با عنوان بهینه سازی گروه ذرات هیبرید برای زمان بندی پروژه نیز تاثیر مجاز بودن انقطاع فعالیت‌ها در مسایل زمانبندی را بررسی کرده است. برای بررسی انقطعاع فعالیت‌ها در مسایل زمانبندی پروژه ژان ژیان شنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مطالعه ای در خصوص مسایل زمانبندی پروژه چند حالته با محدودیت منابع و انقطاع فعالیت ضمن تشریح تفاوت بین انقطاع فعالیت‌ها برای کاهش زمان اتمام پروژه و انقطاع فعالیت-ها با توجه به محدودیت‌ها موجود در پروژه از قبیل تعطیلات و یا محدودیت منابع اقدام به تعریف یک طبقه بندی با عنوان مسایل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع (تک حالته یا چند حالته) که امکان انقطاع فعالیت های پروژه فقط تحت شرایطی که کمبود منابع در آن مقطع زمانی وجود دارد، مجاز می باشد ارائه نمودند. هشترودی در سال ۱۳۹۵ این دسته از مسایل را با دو هدف همزمان کاهش مدت زمان اتمام پروژه و کاهش هزینه‌ها جریمه دیرکرد و زود کرد فعالیت‌ها تحت شرایطی که موعدهای تحویل برای فعالیت‌ها بصورت بازه‌ای تعریف شده بودند بررسی و با روش‌های فراابتکاری مدلی برای حل این مسایل ارئه نمودند.

امروزه یکی از مشکلات رایج در انجام پروژه‌ها عدم قطعیت‌ها می‌باشد که افزایش این عدم قطعیت‌ها باعث بوجود آمدن عوامل غیر قابل کنترل در پروژه می‌باشد که منجر به افزایش مدت زمان اتمام و افزایش هزینه های بالاسری پروژه ها و همچنیم جریمه‌های دیرکرد تحویل فعالیت‌های پروژه می‌شود. علاوه بر این، باعث متضرر شدن همبندان پروژه نیز می‌گردد. (***Wang et al.,2016***).

بر اساس ادبیات موضوع، بیشینه سازی پایداری پروژه به معنی بیشینه سازی شناوری کلی است که ضمن رعایت کمینه سازی زمان تکمیل پروژه باید تحقق یابد. الفوزان و همکاران در سال ۲۰۰۵ شاخص‌های جدید پایداری، برای پاسخ به یکی دیگر از نیازهای سازمان‌ای پروژه محور دادند. حسن پور و همکاران در سال ۱۳۹۵ در زمینه زمانبندی پایدار با عنوان ارائه زمانبندی استوار پروژه با منابع محدود و حل آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بهینه سازی انبوه ذرات نمودن که این مدل مطالعه موردی نیز در پالایشگاه میعانات گازی بندرعباس نیز داشت. در این پژوهش مدل ارائه شده در مسایل زمانبندی با محدودیت منابع و مجاز بودن اتقطاع فعالیت در شرایط محدودیت منابع با در نظر گرفتن مدل زمانبندی پایداری پروژه توسعه یافته است.

۲-تشریح مساله و مدل ریاضی

در شبکه زمانبندی $G(N,A)$ که تعداد گره‌ها (N) نشان دهنده تعداد فعالیت‌ها و بردارها (A) نمایش دهنده پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها پروژه می‌باشد. کلیه پیش‌نیازی‌ها از نوع پایان به شروع فعالیت‌ها با اختلاف زمانی صفر در نظر گرفته شده است. فعالیت اول و فعالیت آخر بعنوان فعالیت مجازی شروع و فعالیت مجازی پایان در نظر گرفته شده است تا شبکه زمانبندی معلق نباشد. هر فعالیت قابلیت انجام به یک تا چند روش را دارا می‌باشد که هر فعالیت‌ها با توجه به روش اجرایی مشخص دارای مدت زمان انجام قطعی می‌باشند و به ازای هر فعالیت زمان‌های بازه‌ای تحت عنوان بازه موعد تحویل نرم و سخت تعیین شده است. شبکه زمانبندی مساله دارای دونوع منبع تجدید پذیربه تعداد (R^r) و تجدید ناپذیر به تعداد (R^n) می‌باشد که هر فعالیت با توجه به روش اجرایی انتخابی مقدار مورد نیاز از هر کدام از این منابع را شامل می‌شود. برای هر کدام از منابع نیز میزان در دسترس تجدید پذیر (uu_{zt}) در طول افق زمان پروژه و تجدید ناپذیر (u_k) تعیین شده است. هر کدام از منابع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر در صورت بکارگیری با توجه به روش اجرای انتخابی دارای هزینه مستقل بکارگیری هزینه منابع تجدید پذیر (cot_z) و هزینه منابع تجدید ناپذیر (co_k) می‌باشند. متغییر ها و پارامترهای مورد استفاده در مساله به شرح جدول۱ می‌باشد.

شانه	شرح
N	تعداد فعالیت
I, J	شمارنده فعالیت
K , Z	شمارنده منابع تجدید ناپذیر و تجدید پذیر
m	شمارنده تعداد روش اجرای هر فعالیت
M	عدد بزرگ
t	شمارنده زمان
o_{it} q_{it}	متغییر های کمکی
y_i^m	نشانده انتخاب روش اجرای m برای فعالیت i
EE_i	میزان زودکرد فعالیت i نسبت به موعد تحویل
e_i و ta_i	میزان جریمه زودکرد و دیرکرد فعالیت i
cot_z و co_k	هزینه استفاده از منبع تجدید ناپذیر و تجدید پذیر k
uu_{zt}	میزان منابع در دسترس از منبع تجدید پذیر kk در زمان t
rr_{iz}^m و r_{ik}^m	میزان منابع مورد نیاز فعالیت i از منبع تجدید ناپذیر و تجدیدپذیر k به روش اجرای m
x_{it}^m	فعالیت I به روش اجرای m در زمان t
$R^n R^r$	مجموعه منابع تجدید پذیر
Fd_i و sd_i	کران پایین و بالای بازه موعد تحویل در بازه نرم
Fd_i و ld_i	کران پایین بازه موعد تحویل در بازه سخت
s_i	شروع و پایان فعالیت i
c_j	پایان فعالیت j
p_i^m	مدت زمان فعالیت I به روش اجرای m
u_k	میزان منابع در دسترس از منبع تجدید ناپذیر k

جدول ۱ – جدول متغییرها و پارامترهای مدل

۲-۱ مدل ریاضی تحقیق

$$Objective\ 1: min\ s_{|N|+1} \quad (1)$$

$$Objective\ 2: min\ \sum_{i\,\epsilon\,N}(e_i * EE_i + ta_i * TT_i) + \sum_{k\,\epsilon\,R^n}\sum_{i\,\epsilon\,N}\sum_{m\,\epsilon\,Mod_i}(r_{ik}^m * y_i^m * co_k) + \sum_{z\,\epsilon\,R^r}\sum_{i\,\epsilon\,N}\sum_{m\,\epsilon\,Mod_i}(rr_{iz}^m * y_i^m * cot_z) \quad (2)$$

$$Objective\ 3: max\ TF \quad (3)$$

$$=1, \forall i \epsilon N \sum_{m \epsilon Modi} y_i^m \quad (4)$$

$$\{0,1\}, \forall i \epsilon N, m \epsilon Mod_i\ y_i^m \epsilon \quad (5)$$

$$\forall i\epsilon N \ , \sum_{t=1}^{T} x_{it}^{m} = p_i^m * \ y_i^m \quad \forall m\epsilon Mod\ i \qquad (۶)$$

$$\forall\ (j, i)\ \epsilon Ac_j \leq s_i - 1 \qquad (۷)$$

$$c_i \geq 0 \qquad (۸)$$

$$\forall i\epsilon N \ , s_{i\leq x_{it}^{m} * t + M(1 - x_{it}^{m})} \quad m\epsilon Mod_i \ , t=1,2,\ldots..,T \qquad (۹)$$

$$s_i \geq 0 \qquad (۱۰)$$

$$\forall i\epsilon N, m\epsilon Mod_i, \ c_i \geq x_{it}^{m} * t \quad t=1,2,\ldots..,T \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i\epsilon N} \sum_{m\epsilon Modi} rr_{iz}^{m} * x_{it}^{m} <= uu_{zt} \ , \forall z\epsilon R^r \ , t=1,2,\ldots..,T \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i\epsilon N} \sum_{m\epsilon Modi} r_{ik}^{m} * \ x_{it}^{m} <= u_k \ , td\forall k\epsilon R^n \qquad (۱۳)$$

$$w_{izt}^{m} = := \begin{cases} 1 \ if \ r_{iz}^{m} \epsilon [0 \ uu_{zt}] \ \forall t \\ 0 \end{cases} 1_{[0 \ uu_{zt}]}(r_{iz}^{m}) \qquad (۱۴)$$

$$\forall \ i\epsilon \ No_{it} = \begin{cases} 1 & if\ t \leq c_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (۱۵)$$

$$\forall \ i\epsilon \ Nq_{it} = \begin{cases} 1 & if\ t \geq s_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (۱۶)$$

$$\{0,1\}, 1\forall i\epsilon N \ , t=1,2,\ldots..,To_{it}\epsilon \qquad (۱۷)$$

$$\{0,1\}, 1\forall i\epsilon N \ , t=1,2,\ldots..,Tq_{it}\epsilon \qquad (۱۸)$$

$$\forall i\epsilon N \ , M * \ o_{it} \ \geq c_i - t + 1 \quad t=1,2,\ldots..,T \qquad (۱۹)$$

$$\forall i\epsilon N \ , M * (1 - o_{it}) \geq t - c_i \quad t=1,2,\ldots..,T \qquad (۲۰)$$

$$\forall i\epsilon N \ , M * q_{it} \geq t - s_i + 1 \quad t=1,2,\ldots..,T \qquad (۲۱)$$

$$\forall i\epsilon N \ , M * (1 - q_{it}) \geq s_i - t \quad t=1,2,\ldots..,T \qquad (۲۲)$$

$$x_{it}^{m} \geq y_{i}^{m} + w_{ikt}^{m} + o_{it} + q_{it} - \quad (۲۳)$$
$$, \forall i \epsilon N , ۳$$
$$t=1,2,.....,T, m \epsilon Mod_i, \forall k \epsilon R^n$$

$$۴ * x_{it}^{m} \leq y_{i}^{m} + w_{ikt}^{m} + o_{it} + \quad (۲۴)$$
$$, \forall i \epsilon N , q_{it}$$
$$t=1,2,.....,T, m \epsilon Mod_i, \forall k \epsilon R^n$$

$$, \forall i \epsilon NTT_i \geq c_i - fd_i \quad (۲۵)$$

$$c_i \geq ld_i \quad (۲۶)$$

$$c_i \leq Fd_i \quad (۲۷)$$

$$EE_i \geq ۰ \quad (۲۸)$$

$$TT_i \geq ۰ \quad (۲۹)$$

$$sd_i \geq ۰ \quad (۳۰)$$

$$fd_i \geq ۰ \quad (۳۱)$$

$$ld_i \geq ۰ \quad (۳۲)$$

$$Fd_i \geq ۰ \quad (۳۳)$$

$$, \forall j=۱،۲,...,nTF_j = LF_j - EF_j \quad (۳۴)$$

$$TF = \sum_{j=۱}^{n} TF_j \quad (۳۵)$$

$$ES_۱ = S_۱ \quad (۳۶)$$

$$EF_j = ES_j + \sum p_j^m * \quad (۳۷)$$
$$, \forall j=۱،۲,...,n y_j^m$$

$$, \forall i \in ES_j = max\{EF_i\} \quad (۳۹)$$
$$P_i \ j =۱،۲,....n$$

$$LF_n = C_{|N|+۱} \quad (۴۰)$$

$$LS_j = LF_j - \sum p_j^m * y_j^m \quad \forall j=1,2,...,n \qquad (41)$$

$$S_i = min\{LS_i\} \quad \forall i \in LF_j, \ \forall j=1,2,...,n \qquad (42)$$

۲-۲- توابع هدف مدل ریاضی

اول مدل ریاضی (رابطه اول) به دنبال کمینه کردن مدت زمان اتمام پروژه با کمینه شدن فعالیت مجازی اتمام می‌باشد. تابع هدف دوم (رابطه دوم) به دنبال کمینه کردن هزینه اتمام پروژه می‌باشد که این هزینه ها از سه قسمت، (۱) کمینه کردن میزان جریمه زودکرد و دیرکرد قسمت (۲) و (۳) کمینه کردن هزینه میزان در اختیار داشتن منابع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر با توجه به روش اجرایی انتخابی برای هر کدام از فعالیت‌ها می‌باشد. رابطه سوم مدل ریاضی ، پایداری پروژه با شناوری فعالیت‌ها دارای ارتباط مستقیم است. در واقع شناوری حداکثر زمانی است که یک فعالیت را می توان به تاخیر انداخت بدون اینکه کل پروژه دچار تاخیر شود بنابراین تابع هدف سوم، بیشینه سازی درجه شناوری کل را با رعایت حداقل زمان تکمیل است.

۲-۳- محدودیت‌های مدل ریاضی

رابطه (٤) برای اطمینان از انتخاب صرفاً یک روش اجرایی برای هر فعالیت می‌باشد. رابطه (٦) برای اطمینان اینکه اگر روش اجرایی m برای فعالیت i انتخاب شد مدت زمان اجرای فعالیت i برابر با مدت زمان فعالیت (p_i^m) متناسب با روش اجرایی انتخاب شده باشد رابطه‌های (۷ تا ۱۱) پیش‌نیازی‌های فعالیت‌های پروژه می‌باشند. عدد (-۱) (رابطه ٦) برای داشتن زمان های صحیح می‌باشد بعنوان مثال فرض بر اینکه فعالیت ششم پیش‌نیازش فعالیت چهارم باشد و روز دهم فعالیت ششم شروع شود در نتیجه فعالیت چهارم می‌بایست دقیقاً روز نهم و یا قبل از روز چهارم به اتمام برسدرابطه‌های (۱۲ و ۱۳) برای در دسترس بودن هر دو منبع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر می‌باشد. رابطه‌های (١٤ تا ٢٢) با استفاده از متغییرهای کمکی تعریف شده به دنبال ایجاد محدودیت در انقطاع فعالیت‌ها می‌باشد که انقطاع فعالیت صرفاً در زمان‌هایی امکان پذیر باشد که منابع مورد نیاز فعالیت در دسترس نباشند. رابطه‌های (۲۵ و ۲٦) برای بدست آوردن مدت زمان دیرکرد و زودکرد هر کدام از فعالیت‌های پروژه متناسب با موعد تحویل بازه‌ای تعیین شده در بازه نرم می‌باشد. رابطه‌های (۲۷ و ۲۸) برای اطمینان از عدم به اتمام رسیدن هر یک از فعالیت‌ها خارج از بازه موعد تحویل تعیین شده در بازه سخت می‌باشد. رابطه‌های (۳۵ تا ٤۲) به دنبال محاسبه شناوری کل پروژه و فعالیت‌های مدل می‌باشد.

۳-الگوریتم حل مساله

مهندسان و تصمیم گیرندگان، با مسائلی روبرو هستند که پیچیدگی آنها روز به روز افزایش پیدا می‌کند، این مسائل در زمینه‌های مختلفی نظیر تحقیق در عملیات، طراحی سیستم‌های مکانیکی و سایر موارد ایجاد می‌شوند. در تمامی این زمینه‌ها می توان مساله به صورت یک مسالهی بهینهسازی بیان کرد(یقینی،۱۳۹۰). مسائل بهینهسازی به دو دستهی مسائل بهینه‌سازی ترکیبی و پیوسته تقسیمبندی می‌شوند. در زمینه مسائل پیوسته روشهای کلاسیک بسیاری برای بهینه سازی سراسری ارائه شده است. اما این تکنیکها در صورتی که تابع هدف دارای ویژگیهای مشخصی نباشد، معمولا کارایی ندارند. روشهای حل مسائل بهینه سازی پیوسته، به دو دستهی روشهای بهینهسازی خطی و غیرخطی تقسیم بندی میشوند. روشهای حل مسائل بهینهسازی ترکیبی را نیز میتوان به دو قسمت الگوریتمهای دقیق و الگوریتمهای ابتکاری تقسیم بندی کرد. بیشتر مسایل بهینه سازی ترکیبی، در کلاس مسائل ***NP-Hard*** قرار میگیرند، بنابراین برای حل آنها باید از روشهای تقریبی که جواب‌های نزدیک به بهینه را در زمانی قابل قبول به دست می‌آورند استفاده کرد.

الگوریتمهای فراابتکاری با معرفی اصول سیستماتیک برای خارج شدن از بهینههای محلی یا جلوگیری از قرارگرفتن در

از معیارهای مختلفی برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود که یکی از این طبقه بندیها بر اساس مبتنی بر یک جواب و مبتنی بر جمعیت میباشند. الگوریتمهای مبتنی بر جمعیت از قبیل بهینه سازی کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، الگوریتم ژنتیک، برنامه ریزی تکاملی، استراتژی تکاملی، بهینه سازی گروهی ذرات و فاخته می‌باشد که در این پژوهش روشهای الگوریتم ژنتیک ۲ به دلیل کاربرد فراوان این الگوریتم در تحقیقات و پژوهشهای صورت گرفته در گذشته مسایل زمانبندی پروژه و الگوریتم جستجوی فاخته به دلیل ویژگی خاص این الگوریتم در صرف زمان کمتر در حل و یافتن جواب بهینه میباشد، انتخاب شدهاند. این دو الگوریتم انتخابی توسط نرم افزار کدنویسی و سپس توسط روشهای آماری، تنظیم پارامترها صورت گرفته و سپس عملکرد دو الگوریتم مقایسه شدهاند

۳-۱ جمعیت تصادفی اولیه

اولین مرحله در الگوریتم‌های ژنتیک و فاخته، ایجاد یک جمعیت اولیه از روش تولید تصادفی می‌باشد. هر کروموزوم یا به عبارتی هر فاخته (موقعیت فاخته) در نرم افزار متلب بوسیله دوتا آرایه که شامل دو ردیف و ستون به تعداد فعالیت‌های پروژه می‌باشند تعریف شده است(شکل ۱).

به تعداد فعالیت های پروژه شرح

شماره فعالیت												
شماره روش اجرایی فعالیت												

شکل ۱

برای نمایش زمان شروع و پایان فعالیت از یک ارایه دوم بهره گرفته شده است(شکل ۲).

به تعداد فعالیت های پروژه شرح

شروع فعالیت											
پایان فعالیت											

شکل ۲

پس از تولید جواب‌های اولیه، برای هر یک از جواب‌های تولید شده، مقدار توابع هدف بدست آمده و در گام بعدی هر یک از جواب‌های تولید شده، از نظر تابع هدف با یکدیگر مقایسه و رتبه بندی می‌شوند. رتبه‌بندی جمعیت اولیه با روش سریع مرتب سازی نامغلوب بدست آمده و آن جوابی که در رتبه یک قرار می‌گیرد بعنوان جواب پارتو محاسبه و ذخیره می‌شوند (۱۳).

۳-۲- تقاطع در الگوریتم ژنتیک

در الگووریتم ژنتیک ایجاد کروموزوم‌های فرزندان از طریق دو عملگر جهش و تقاطع انجام می‌شود. که در این عملگرد انتخاب اعضای والد به صورت تصادفی می‌باشد. بعد از انتخاب کروموزوم والد، یک نقطه برش بصورت تصادفی بین فعالیت اول تا فعالیت آخر انتخاب می‌شود و عمل تقاطع بر روی کروموزوم‌های والد برای ایجاد کروموزوم فرزند مانند شکل (۳) بر روی آرایه نمایش داده شده در شکل (۱) ایجاد می‌گردد.

۱	۲	٤	۷	۳	٥	۱۰	٦	۸	۹	۱۱	۱۲
۱	٤	۲	۳	۲	٥	٤	۱	۳	۳	۱	۳

والد اول

۱	۲	۳	٥	٦	٤	۸	۱۰	۷	۹	۱۱	۱۲
۱	۱	٥	۱	٤	۲	٤	٤	۲	٤	۳	۲

والد دوم

۱	۲	۳	٥	٦	٤	۸	۷	۱۰	۹	۱۱	۱۲
۱	۱	٥	۱	٤	۲	٤	۳	۳	۳	۱	۳

فرزند جدید

شکل ۳

۳-۳ جهش در الگوریتم ژنتیک

هدف از جهش، بیان یک خاصیت ژنتیکی است که باعث افزایش تنوع در جواب‌های جمعیت می‌شود. این عملگر در کروموزوم‌های متفاوت تغییرات تصادفی برنامه‌ریزی نشده ایجاد می‌کند و ژن‌هایی را که در جمعیت اولیه وجود نداشته‌اند را وارد جمعیت می‌کند. عملگر جهش در الگوریتم پیشنهادی این پژوهش با انتخاب تصادفی یکی از کروموزوم‌های جمعیت آغاز می‌شود و بعد از تولید یک عدد تصادفی بین صفر تا یک به دو روش زیر عمل جهش صورت می‌گیرد. در روش اول یک کروموزوم از دو کروموزوم انتخابی تصادفی در جواب پارتو

با توجه به فاصله ازدحامی انتخاب می‌گردد و دو فعالیت بصورت تصادفی تقدم اجرای آن‌ها با یکدیگر تغییر می‌کند و در روش دوم به صورت تصادفی دو تا از فعالیت‌ها روش انجام فعالیت به صورت تصادفی تغییر می‌کند.

۳-٤ حرکت تعالی در الگوریتم فاخته

برای ایجاد جواب جدید دو نوع حرکت به ازای هر فاخته صورت می‌گیرد که یک حرکت، جهش به سمت فاخته بهتر می‌باشد. البته حرکت باید با یک شعاع و گام مشخص تعریف شود تا دقیقاً بر روی جواب قدیم منتقل نشود به دلیل اینکه به دنبال جواب‌های جدید برای دست یافتن به بهترین جواب‌ها می‌باشیم. برای انجام این کار می‌بایست با پارامترهای تعریف شده در الگوریتم برای هر کدام از فاخته‌ها گام حرکت محاسبه شود که از رابطه ۳٤ زیر بدست می‌آید (۱٤) :

- $nest_i^{(t+1)} = nest_i^{(t)} + \alpha * S * r * (nest_i^{(t)} - nest_{best}^{(t)})$ (۳٤)
- $\alpha = ۰.۰۱$
- $S = \frac{U}{v^{1/\beta}}$
- $u \sim N(۰, \sigma_u^۲)$
- $v \sim N(۰, \sigma_v^۲)$
- $r \sim N(۰, \sigma^۲)$
- $\sigma_v = ۱$
- $\sigma_u = \left\{\frac{\tau(۱+\beta)\sin(\pi\beta/۲)}{\tau[(۱+\beta)/۲]\beta ۲^{(\beta-۱)/۲}}\right\}^{1/\beta}$

- $nest_{best}^{(t)}$: به صورت تصادفی از جواب‌های رتبه اول بدست آمده انتخاب می‌شود
- $nest_i^{(t)}$: موقعیت قبلی فاخته

۳-٥ حرکت تصادفی الگوریتم فاخته

حرکت تصادفی با الگوی خاص در حقیقت یه کشف جدید می‌باشد که این حرکت با استفاده از رابطه (۳٥) می‌باشد.

$$= \boldsymbol{nest_i^{(t)} + P * Snest_i^{(t+1)}} \quad (۳٥)$$

$\boldsymbol{S}$ در رابطه ۳٥ فاصله دو فاخته تصادفی انتخاب شده که از رابطه ۳٦ بدست می‌آید.

$$\boldsymbol{S = rand * (nest^{i1} - nest^{i2})} \quad (۳٦)$$

$$\boldsymbol{P_{ij} = \begin{cases} 1 & if\ rand < pa \\ 0 & if\ rand > pa \end{cases}}$$

٤-تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها

سیستم های مورد مطالعه همواره تحت تاثیر عوامل قابل و غیر قابل کنترل قرار داردکه چندین پاسخ را شامل می‌شود. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم فاخته و الگوریتم ژنتیک از روش طراحی تاگوچی و نرم‌افزار مینی تب ۱۷,۳,۱ در این پژوهش استفاده شده است. در استفاده از طراحی تاگوچی و تنظیم پارامترهای الگوریتم برای بدست آوردن متغییر پاسخ از رابطه ۳۷ برای بی مقیاس سازی معیارهای تعداد جواب های بهینه پارتو۱، بیشترین گسترش۲، فاصله گذاری۳، فاصله از جواب ایده‌آل٤ و زمان اجرای الگوریتم استفاده شده است. (۳۷)

$$\boldsymbol{RDI = |Method\ sol - Best\ Sol| \times 100/|Max\ Sol - Min\ Sol|}$$

تنظیم پارامتر هر دو الگوریتم مساله با توجه به طبقه بندی مسایل زمانبندی به سه دسته ابعاد کوچک (حداکثر ده فعالیت) ، متوسط(حداکثر سی فعالیت) و بزرگ (بیش از شصت فعالیت) تقسیم کرده‌ایم و نوع طراحی انتخاب شده برای الگوریتم ها شامل سه سطح و چهار فاکتور به شرح جدول ۲ می‌باشد

جدول۲ – سطوح فاکتورها

ردیف	نماد فاکتور	شرح فاکتور	مقادیر سطوح فاکتور			
الگوریتم فاخته						
۱	Nnest	تعداد جواب جمعیت اولیه	۱۵۰	۱۰۰	۶۰	
۲	Maxit	تعداد تکرار هر الگوریتم	۱۰۰	۶۰	۴۰	
۳	Pa	نرخ کشف تخم مرغ بیگانه / احتمال حرکت تصادفی	۰,۷۵	۰,۵	۰,۲۵	
۴	beta	شعاع حرکتی/پرواز فاخته	۱,۵	۱	۰,۵	

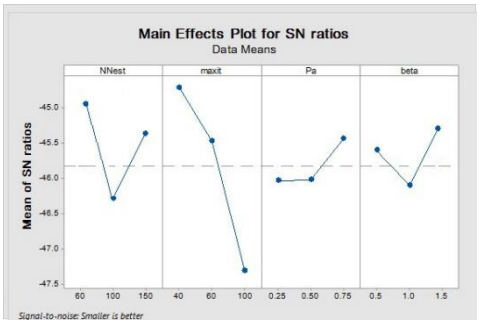
الگوریتم ژنتیک					
۱	Npop	تعداد جواب جمعیت اولیه	۱۵۰	۱۰۰	۶۰
۲	Maxit	تعداد تکرار هر الگوریتم	۱۰۰	۶۰	۴۰
۳	Pm	نرخ جهش	۰,۴	۰,۳	۰,۲
۴	Pc	نرخ تقاطع	۰,۹	۰,۸	۰,۷

نتایج حاصل از آزمایش تاگوچی برای هر دو الگوریتم به شرح جدول (۳) می‌باشد و برای الگوریتم فاخته مسال ابعاد بزرگ برای نمونه شکل (٤) درج شده است.

جدول ۳

شرح مساله	Nnest	maxit	pa	Beta
الگوریتم فاخته				
ابعاد کوچک	۱۵۰	۱۰۰	۰,۲۵	۱
ابعاد متوسط	٦۰۰	٦۰	۰,۷۵	۰,۵
ابعاد بزرگ	٦۰	٤۰	۰,۷۵	۱,۵

	Npop	maxit	Pm	Pc
الگوریتم ژنتیک				
ابعاد کوچک	۱۰۰	٤۰	۰,۳	۰,۷
ابعاد متوسط	۱۵۰	٦۰	۰,۳	۰,۹
ابعاد بزرگ	۱۰۰	۱۰۰	۰,٤	۰,۷



شکل ۴

۵-مقایسه نتایج روش‌های دقیق

مدل ریاضی ارایه شده با استفاده از نرم‌افزار گمز نسخه ***GAMSIDE build 41462/41464*** و روش اهداف حددار مدلسازی شده و با بیست مساله در ابعاد مسایل کوچک با حداقل شش فعالیت و داشتن حداقل سه روش اجرایی با خروجی های دو الگوریتم ژنتیک۲ و فاخته، مقایسه و اعتبار الگوریتم‌ها بررسی شده است.

٦-تحلیل آماری دو الگوریتم پیشنهادی

در این پژوهش بعد از ارزیابی مدل ریاضی و الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار گمز و همچنین تنظیم پارامتر انجام شده در سه ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ سی نمونه مسایل حل و برای تحلیل آماری نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک ۲ و فاخته با مرتب سازی نامغلوب با توجه به شاخص‌های تعداد جواب پارتو، معیار بیشترین گسترش، فاصله گذاری، فاصله از جواب ایده‌آل و معیار زمان اجرای الگوریتم از آزمون t استفاده می‌شود. با استفاده از این آزمون فرض می‌توان بررسی کرد آیا بین میانگین‌های دو جمعیت مختلف و مستقل از هم که توزیع نرمال دارند، اختلافی وجود دارد یا نه (رابطه ۳۸)

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 \\ H_1 : \mu_1 \neq \mu_{2_1} \end{cases} \quad (۳۸)$$

برای انجام آزمون t از نرم افزار مینی تب ۱۷ استفاده شده است. نتایج بدست آمده از آزمون t در خصوص معیارهای در جدول ۵ الف (ابعاد کوچک)، ب (ابعاد متوسط) و ج (ابعاد بزرگ) نمایش داده شده است.

جدول ۵- خروجی آزمون t

جدول ۵-الف

الگوریتم	تعداد داده ها	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندار میانگین	p-value
تعداد جواب های پارتو					
ژنتیک ۲	۳۰	۲۹,۹	۱۰,۱	۱,۸	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۹,۷	۳,۵۵	۰,۶۵	
بیشترین گسترش					
ژنتیک ۲	۳۰	۵۳۱۴	۳۱۰۹	۵۶۸	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۳۷۱	۲۰۳۲	۲۷۵۱	
فاصله گذاری					
ژنتیک ۲	۳۰	۱۶۱	۱۰۵	۱۹	۰,۰۳۱
فاخته	۳۰	۲۵۱	۱۹۲	۳۵	
فاصله از جواب ایده ال					
ژنتیک ۲	۳۰	۲,۳۶	۱,۲۸	۰,۲۳	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۴,۰۳	۱,۴۹	۰,۲۷	
زمان اجرای الگوریتم					
ژنتیک ۲	۳۰	۷۸,۹۷	۴,۶۶	۰,۸۵	۰,۸۶۲
فاخته	۳۰	۷۹,۱۴	۲,۳۷	۰,۴۳	

جدول ۵- ب

الگوریتم	تعداد داده ها	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندار میانگین	p-value
تعداد جواب های پارتو					
ژنتیک ۲	۳۰	۱۰۸,۸	۲۷,۸	۵,۱	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۱۹,۱۰	۳,۶	۰,۶۶	
بیشترین گسترش					
ژنتیک ۲	۳۰	۳۳۴۷۵	۴۱۱۲	۷۵۱	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۱۹۱۸۹	۳۴۶۳	۶۳۲	
فاصله گذاری					
ژنتیک ۲	۳۰	۲۲۲	۱۰۳	۱۹	۰,۰۳۷
فاخته	۳۰	۱۷۵۵	۳۸۳۴	۷۰۰	
فاصله از جواب ایده ال					

ژنتیک ۲	۳۰	۲,۷۵	۰,۳۷۷	۰,۰۶۹	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۳,۸۷۱	۰,۶۶۶	۰,۱۲	
زمان اجرای الگوریتم					
ژنتیک ۲	۳۰	۱۰۷,۵۹	۶,۳۶	۱,۲	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۲۱۴,۲	۱۲,۲	۲,۲	

جدول ۵ – ج

الگوریتم	تعداد داده ها	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندار میانگین	p-value
تعداد جواب های پارتو					
ژنتیک ۲	۳۰	۷۶,۵	۳۳,۱	۶	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۱۳,۵۳	۴,۲۹	۰,۷۸	
بیشترین گسترش					
ژنتیک ۲	۳۰	۳۷۱۴۳	۳۱۱۸۳	۵۶۹۳	۰,۱۳۵
فاخته	۳۰	۲۶۰۷۸	۲۴۹۹۴	۴۵۶۳	
فاصله گذاری					
ژنتیک ۲	۳۰	۵۵۶	۶۶۸	۱۲۲	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۱۸۹۲	۱۷۵۱	۳۲۰	
فاصله از جواب ایده ال					
ژنتیک ۲	۳۰	۳۲,۳	۱۴,۹	۲,۷	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۲۱	۵,۰۶	۰,۹۲	
زمان اجرای الگوریتم					
ژنتیک ۲	۳۰	۲۳۴,۴	۵۳,۳	۹,۷	۰,۰۰۰
فاخته	۳۰	۴۰۶	۱۱۳	۲۱	

نتیجه گیری

در نتایج حاصله کاملاً مشهود است که در اکثر شاخص‌های مورد استفاده ارزیابی عملکرد دو الگوریتم، الگوریتم ژنتیک ۲ نتایج بهتری نسبت به الگوریتم فاخته داشته است.

جدول ۶- آزمون t

	تعداد جواب ها	بیشترین گسترش	فاصله گذاری	فاصله از جواب ایده‌آل	زمان اجرا
ابعاد کوچک	NSGA	NSGA	NSGA	NSGA	–
ابعاد متوسط	NSGA	NSGA	NSGA	NSGA	NSGA
ابعاد بزرگ	NSGA	–	NSGA	cuckoo	NSGA

منابع

۱. *Malcolm, DG, RoseboomJH, ClarkCE, FazarW, (۱۹۵۹), Application of a technique for research and development program evalution, oper Res 1959; 7:646–69.*

۲. *Kelley, J. E. J. the Critical Path Method: Resource Planning and Scheduling. New Jersey : Prentice Hall, ۱۹۶۳.*

۳. *Johnson, T. J. R. An algorithm for the resource constrained project scheduling Problem. Massachusett : Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1967.*

۴. *Davis, E. W., (۱۹۶۶), Resource allocation in project network models - A Survey, The Journal of Industrial Engineering 17, 177-188..*

۵. *Petrović, R., (۱۹۶۸), Optimization of resource allocation in project planning, Operations Research, ۱۶, ۵۵۹-۵۶۸.*

۶. *Balas, E. Project scheduling with resource constraints, In Anonymous Applications of Mathematical Programming (E.M.L. Beale Ed.). s.l. : The English Universities Press London., 1971.*

۷. Herroelen, W., De Reyck, B, and Demeulemeester, E., (۱۹۹۸), Resource-constrained Project scheduling: a survey of recent developments, Computers & Operations Research, 25, 279-302.

۸. Cheng, J, Fowler, J, Kempf, K, Scott. (۲۰۱۵), Multi-mode resource-constrained project scheduling Problems

۹. Demeulemeester,E,l & Herroelen,W.S, (۲۰۰۲), Project scheduling, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, NEW YORK, BOSTON, DORDRECHT, LONDON, MOSCOW,0-306-48142-1.

۱۰. Shadrokh,S, Kianfar,F,(۲۰۰۷), A genetic algorithm for resource investment project scheduling problem, tardiness permitted with penalty.European Journal of Operational Research 181.

۱۱. Khoshjahan, Y, Najafi, AA, Afshar-Nadjafi,B,(۲۰۱۳),Resource constrained project scheduling problem with discounted earliness–tardiness penalties: Mathematical modeling and solving procedure , Computers & Industrial Engineering, Volume 66, 293-300.

۱۲.bashiri.m(۲۰۱٤),Genetic algorithm in single and multi-objective ,shahed university publishers.

۱۳.Tavakkoli moqaddam r,(۲۰۱۳),meta-heuristic algorithms theory and implementation in matlab,islamic azad university-south tehran branch.

۱٤. Rajabion R,(۲۰۱۱), Cuckoo optimization Algorithm,Applied Soft computing,۵۵۰۸-۵۵۱۸.

۱۵. Afshar-Najafi, B., Shadrokh, Sh., (۲۰۱۰), An Algorithm for the weighted Earliness-Tardiness unconstrained project scheduling program, Journal of Applied Sciences, 1651-1659.

۱٦. Ballestin F, Valls V, Quintanilla S., (۲۰۰۹), scheduling projects with limited number of Preemptions, Computers & Operations Research 36, 2913-2925.

۱۷. Cheng MY,Tran D, (۲۰۱٤), Using a fuzzy clustering chaotic-based differential with serial method to solve resource-constrained project scheduling problems, automation in construction ,volume 37 page 88-97.

۱۸. Ghoddousi, P, Eshtehardian, E, Jooybanpour, S, Javanmardi, A., (۲۰۱۳), Multi-mode resource-constrained discrete time–cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm, Automation in Construction 30 216–227.

۲۰. Koulinas, G, Kotsikas, L, Anagnostopoulos, K.,(۲۰۱٤), A particle swarm optimization based hyper-heuristic algorithm for the classic resource constrained project scheduling problem, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace, 12 Vas. Sofias st, 671 00 Xanthi, Greece

۲۱. Moukrim, A,Quilliotb, A,Toussaint, H., (۲۰۱۵), An effective branch-and-price algorithm for the preemptive resource constrained project scheduling problem based on minimal interval order enumeration, European journal of operational research 244,360-368

۲۲. Ranjbar, M, Hosseinabadi, S, Abasian, F., (۲۰۱۳), Minimizing total weighted late work in the resource-constrained project scheduling problem, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, P.O. Box, 91775-1111, Iran.

۲۳. Ranjbar,M, Khalilzadeh, M, Kianfar, F, Etminani, K ,(۲۰۱۲), An optimal procedure for minimizing total weighted resource tardiness penalty costs in the resource-constrained project scheduling problem , Computers & Industrial Engineering, Volume 62, Issue 1, February ,Pages 264-270

۲٤. Shahsavar M, Niaki, Najafi A.A,(۲۰۱۰), An efficient genetic algorithm to maximize net present value of project payments under inflation and bonus-penalty policy in resource investment problem. Advances in Engineering Software, 41, 1023-1030.

۲۵. Tavana, M, Abtahi, A R, Khalili-Damghani, K., (۲۰۱٤) , A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems, Expert Systems with Applications 41, 1830–۱۸٤٦.

پی نوشت:

۱ *Number of the pareto solutions (NPS)*
۲ *Maximum Spread or Diversity (DVR)*
۳ *Spacing*
٤ *Mean Ideal Distance*