سیستم‌های فازی و کاربردها
شاپای چاپی: ۲۷۱۷-۴۴۰۹
سال چهارم، شماره دوم (پائیز و زمستان ۱۴۰۰)
شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۹۸۴
صص. ۴۳ تا ۶۸
DOI:10.22034/JFSA.2022.317490.1105

موازنه هزینه، زمان، کیفیت در زمانبندی پروژه با کیفیت فازی

ناصر شهسواری پور*،شهلا حیدربیگی و فاطمه نصرالهی

دانشکده‌ی اقتصاد و مدیریت دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان. ایران
موسسه عالی آموزش پژوهش مدیریت و برنامه ریزی. ایران
دانشکده‌ی اقتصاد و مدیریت دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان. ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

چکیده

مدیران پروژه اغلب با اهداف مختلف و گاهاً متضاد در بهینه‌سازی منابع پروژه‌ها روبرو هستند. در سال‌های اخیر نیز تقاضای ذینفعان پروژه، مبنی بر کاهش هزینه‌های کل پروژه هم‌زمان با کاهش مدت‌زمان و افزایش کیفیت آن تشدید شده است. لذا موازنه زمان، هزینه و کیفیت از اهداف اساسی پروژه محسوب می‌شوند. این موضوعات پژوهشگران را به‌سوی توسعه مدل‌هایی که عامل کیفیت را به مدل‌های قبلی موازنه هزینه زمان می‌افزاید، هدایت می‌کند. این پژوهش مدلی برای موازنه هزینه، زمان، کیفیت، در حالت گسسته ارائه می‌دهد. البته ازآنجاکه عامل کیفیت مانند عوامل هزینه و زمان یک عامل کمی نیست و در دنیای واقعی پروژه‌ها، کیفیت یک متغیر زبانی است و ازنظر اشخاص خبره به دست می‌آید.

عبارات و کلمات کلیدی: مدیریت پروژه، نظریه فازی، کیفیت، هزینه

Email(s): .

Mathematics Subject Classification:

۱ مقدمه

در اواخر دهه ۱۹۵۰، روش مسیر بحرانی (CPM) معرفی شد [۱۱] و از دهه ۱۹۶۰ در پروژه‌های ساختمانی و در همه انواع پروژه این روش مورداستفاده قرارگرفت. این روش رایج‌ترین سیستم مورداستفاده در ایالات‌متحده و بریتانیا برای برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌ها است [۲۲] و با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی ریاضی دقیق و یا روش‌های اکتشافی تقریبی نمایش داده می‌شود [۱۱]. روش مسیر بحرانی یک ابزار حیاتی برای برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های پیچیده است. اجرای موفقیت‌آمیز CPM نیاز به دسترسی به مدت‌زمان مشخصی برای هر فعالیت دارد. بااین‌حال، در موقعیت‌های عملی، موارد بسیاری وجود دارند که در آن‌ها مدت‌زمان فعالیت را نمی‌توان به روش دقیق ارائه کرد [۱۷]. این ابزار شامل تعیین مسیر بحرانی، فعالیت‌های بحرانی و وقایع بحرانی در شبکه پروژه‌ها، با در نظر گرفتن زودترین زمان ممکن جهت اتمام پروژه‌ها می‌باشد. اصول محاسبات به‌کاررفته شده در این روش بر مبنای قطعی بودن زمان انجام فعالیت‌ها استوار است ولی در عمل هیچ‌گاه مدت‌زمان انجام فعالیت‌ها دارای قاطعیت نیستند. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند ناشی از ناکامل، ناکافی، ناقص و یا مبهم بودن داده‌ها و اطلاعات باشد [۲]. درروش مسیر بحرانی آنچه اهمیت ویژه‌ای داشته باشد، توجه بیشتر به فعالیت‌های مسیر بحرانی است که اگر زمان انجام آن‌ها با تأخیر همراه شود، کل پروژه را تحت تأثیر قرار خواهد داد و آن را با تأخیر مواجه می‌کند [۵] در برخی از موارد لازم می‌شود که پروژه زودتر از زمان برنامه‌ریزی‌شده به اتمام برسد برای دستیابی به زمان تکمیل زودتر باید زمان تعدادی از فعالیت‌ها را کاهش داد. این کاهش زمان همراه با افزایش منابع کاری یا تغییر در نحوه‌ی اجرای آن فعالیت‌ها و صرف هزینه می‌باشد [۳] در اینجا به این نکته توجه شود که کاهش زمان اجرای فعالیت از زمان معمول موردنیاز برای اجرا به زمانی کوتاه‌تر همواره با صرف هزینه همراه است [۲۴]، از طرفی در زمان‌بندی پروژه هر دو معیار زمان و هزینه تومان باید محاسبه [۴] و کنترل شوند اما صرف توجه به این دو عامل کافی نبوده و تضمین‌کننده کسب موفقیت در انجام پروژه نیست. از دهه ۱۹۹۰محققان به‌تدریج دریافتند که اجرای پروژه در زمان مناسب با کمترین هزینه بدون در نظر گرفتن کیفیت اجرا، منطقی نیست. از آن زمان، تعادل زمان–هزینه–کیفیت مطرح شد [۱۹] شایان‌ذکر است که زمان، هزینه و کیفیت از دغدغه‌های اصلی مدیریت پروژه محسوب می‌شود [۱۸] ازاین‌رو در نظر گرفتن

عامل دیگری همانند کیفیت اجرای فعالیت‌ها می‌تواند در مدیریت پروژه اثرگذار باشد [۲۳]. از طرفی کیفیت این فعالیت‌ها کیفیت کل پروژه تغییر می‌کند. مثلث زمان، هزینه، کیفیت به‌طور مستمر در طول چرخه عمر پروژه، به‌وسیله مدیران پروژه، دنبال می‌شود. انتظارات متفاوت ذینفعان پروژه و اتفاقاتی که در طول پروژه رخ می‌دهد، ممکن است مدیر را مجبور به ایجاد تغییری در این اهداف کند. طبق مثلث زمان، هزینه، کیفیت، تغییر اعمال‌شده بر روی زمان و فشرده کردن آن، قطعاً منجر به تغییراتی بر هزینه و کیفیت خواهد شده [۱۶]. ازآنجاکه هدف اصلی یک پروژه تکمیل کارهای برنامه‌ریزی‌شده در زمان، هزینه و کیفیت مطلوب است [۱۳].

هدف موازنه زمان، هزینه، کیفیت [۱] انتخاب مجموعه‌ای از فعالیت‌ها برای فشرده‌سازی است، بطوریکه هزینه کل اجرای پروژه مینیمم و کیفیت کل پروژه ماکزیمم شود. در بیشتر مدل‌ها موازنه هزینه ،زمان، رابطه کاهش زمان فعالیت با افزایش هزینه فعالیت به‌صورت یک تابع خطی فرض شده است و هدف این است که پروژه در تاریخ موردنظر با مینیمم کردن کل هزینه‌ها [۲] تحویل داده شود. برای حل این مدل خطی روش‌های متعددی مطرح‌شده است. ازجمله مدل‌هایی که برای توابع هزینه در نظر گرفته‌شده است می‌توان به تابع هزینه مقعر [۳] [۱۲] و تابع هزینه فعالیت مستمر [۴] [۱۵] اشاره نمود. برعکس مدل‌های خطی روی مسئله DTCTP [۵] خیلی کم‌کار شده است. درصورتی‌که هرگونه رابطه هزینه، زمان به‌صورت گسسته به دنیای واقعی پروژه‌ها نزدیک‌تر است. چرا که منابع و روش‌های اجرا و نوع فنّاوری در دنیای واقعی پروژه‌ها به‌صورت گزینه‌های گسسته هستند. مسئله معامله زمان و هزینه (DTCTP) توسط هاروی و پترسون (۱۹۷۹) هندلنگ و موث (۱۹۷۹) معرفی شد و موضعی مهم در نظریه برنامه‌ریزی پروژه و کاربردهای آن می‌باشد [۸] زمان، هزینه و کیفیت از جنبه‌های مهم و متناقض در مدیریت پروژه محسوب می‌شوند و بهینه‌سازی مبادله بین مدت‌زمان (زمان) پروژه ، هزینه پروژه و کیفیت پروژه در محدوده پروژه برای افزایش سود کلی پروژه عمرانی ضروری است [۲۰]

[1] Time Cost Quality Trade off

[2] Direct and Indirect Cost

[3] Concave cost function

[4] Continuous activity cost function

[5] Discrete Time-cost Trade-off Problem

روش‌های حل DTCTP به دودسته دقیق [۶] و ابتکاری [۷] تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های دقیق [۸]با استفاده از الگوریتم‌های شمارش [۹] [۱۰] برنامه‌نویسی پویا [۱۰] [۲۱] و تجزیه شبکه پروژه [۱۱] [۶] حل‌شده‌اند. هیچ‌کدام از روش‌های دقیق نمی‌توانند مسائل بزرگ و با تعداد فعالیت زیاد را حل کنند. در حقیقت DTCTP به‌عنوان NP-hard شناخته می‌شود، [۹] در الگوریتم‌ها و روش‌های حل دقیق موردی پیدا نشد که کارایی لازم را برای حل مسئله DTCTP داشته باشد. با توجه به اینکه در مسائل NP-hard پیچیدگی وجود دارد و امکان حل دقیق مسئله وجود ندار، [۲۵] درنتیجه استفاده از روش‌های دقیق و نرم‌افزارهای مدیریت پروژه برای حل این مسئله در ابعاد بزرگ توجیه‌پذیر نبوده و بشدت کارایی خود را از دست می‌دهد. لذا برای حل این مسائل از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری کمک گرفته می‌شود [۱].

برخی از محققان اذعان دارند که کیفیت کل پروژه از فشرده‌سازی شبکه پروژه، تأثیرپذیر است. پس لازم است عامل کیفیت وارد مسئله موازنه هزینه زمان شود. شایان ذکر است که محصولات باکیفیت سهم مهمی در درآمد و سودآوری بلندمدت دارند و شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا شهرت و وفاداری مشتریان خود را حفظ کنند [۱۴] که درواقع همان مشکل مبادله زمان، هزینه، کیفیت [۱۲] می‌شود این مسئله در حالت گسسته با DTCQTP نشان داده می‌شود در مسئله DTCQTP هر فعالیت پروژه می‌تواند در یک روش از چندین روش اجرایی به اجرا درآید. حالت‌های اجرای هر فعالیت مربوط به منابع، روش‌های اجرا و فنّاوری اجرای آن فعالیت است. برای هر روش اجرا فعالیت یک ترکیب سه‌تایی (t, c, q) وجود دارد که مشخص‌کننده‌ی زمان، هزینه و کیفیت آن فعالیت خاص در آن روش اجرا است به‌طوری‌که $t \in Z, c \in Z, ۰ \langle q \in Z \langle ۱۰۰$.

در ادبیات به این نوع مسائل، حالت اجرایی چندگانه گفته می‌شود و بهترین حالت اجرای (t, c, q) از فعالیت‌ها، بهینه‌سازی یک هدف در معرض برخی از محدودیت‌ها می‌باشد.

---

[6] Exact
[7] Heuristic
[8] Exact Models
[9] Enumeration Algorithms
[10] Dynamic programming
[11] Project network decomposition
[12] Time Cost quality Trade off Problem

در این تحقیق اندازه‌گیری کیفیت هر فعالیت و همچنین اندازه‌گیری کیفیت کل پروژه با استفاده از متغیرهای زبانی و تئوری اعداد فازی انجام می‌شود.

نظریه مجموعه‌های فازی در بسیاری از زمینه‌هایی که نیاز به مدیریت داده‌های نامشخص و مبهم دارند به کار گرفته می‌شود. چنین حوزه‌هایی شامل استدلال تقریبی، تصمیم‌گیری، بهینه‌سازی و کنترل است. اعداد فازی نوع خاصی از مجموعه فازی هستند که معمولی و محدب هستند. اگرچه می‌توان این اعداد را با استفاده از روش‌ها و شکل‌های خاص توصیف کرد، اما اشکال مثلثی و ذوزنقه‌ای به‌طور گسترده‌ای برای حل برنامه‌های کاربردی، کاربرد دارند. برش α یک روش متداول برای اتصال اصول مجموعه‌های فازی با مجموعه‌ای از مجموعه‌های واضح است که به‌نوبه خود می‌توانند در اکثر دستگاه‌های موجود تغذیه شوند. مجموعه سطح $\alpha - cut$ یا سطح α سطح A مجموعه است.

$$A_\alpha = \left\{ (x, \mu_A(x)) \geq \alpha : xX \right\} \forall \ \alpha \in [۰, ۱]$$

$$X = \text{محدوده مقادیر ممکن}$$

$$\mu_A(x) = \text{تابع عضویت با گرفتن مقادیر از } [۰, ۱]$$

و x متعلق به مجموعه فازی A است.

هدف مسئله بهینه‌سازی موازنه هزینه زمان کیفیت اتمام پروژه در حداقل زمان با حداقل هزینه و حداکثر کیفیت است. برای این مسئله بهینه‌سازی تحقیقات اندکی انجام‌شده است [۲۵] [؟]

با حذف بعضی از فرضیات غیرواقعی می‌توان روش‌های حل جدید و واقعی‌تر را مطرح کرد. این تحقیق برای حذف رابطه خطی بین زمان، هزینه و زمان کیفیت مسئله را در حالت گسسته DTCQTP [۱۳] مطرح می‌کند و برای لحاظ کردن عدم قطعیت در اندازه‌گیری کیفیت و لحاظ کردن میزان ریسک‌پذیری مدیر پروژه، از تئوری اعداد فازی استفاده می‌شود.

این مقاله در مقایسه با تحقیقات انجام‌شده، [۲۶]، [۷] علاوه بر تفاوت در مدل‌سازی دارای دو تفاوت اساسی است. اول استفاده از اعداد فازی برای بیان عدم قطعیت عامل

[13] Discreet Time ,Cost, Quality Trade-off Problem

کیفیت و دوم معرفی NHGA برای حل مدل.

استفاده از تئوری فازی برای بیان عدم قطعیت عامل کیفیت: با توجه به اینکه عامل کیفیت مانند عوامل هزینه و زمان یک عامل کمی نیست و در دنیای واقعی پروژه‌ها، کیفیت یک متغیر زبانی است و از نظرات اشخاص خبره به دست می‌آید لذا در این پژوهش کیفیت فعالیت‌ها به‌صورت اعداد فازی نشان داده می‌شود و همچنین کیفیت کل پروژه هم یک عدد فازی خواهد شد که با کیفیت مجاز پروژه که آن‌هم یک عدد فازی است مقایسه می‌شود.

با استفاده از روش $\alpha - cut$ مدیر پروژه می‌تواند درصد ریسک‌پذیری خود را در به دست آوردن جواب بهینه وارد کند. هنگامی‌که مدیر پروژه نخواهد ریسک کند α را برابر با صفر قرار می‌دهد که درنتیجه کیفیت فعالیت‌ها و کیفیت کل پروژه دارای بازه تغییرات زیادی خواهد بود و تمامی پراکندگی نظر شخص خبره لحاظ شده است. هنگامی‌که مدیر پروژه ۱۰۰ درصد ریسک کند α را برابر با ۱ قرار می‌دهد و کیفیت فعالیت‌ها و کیفیت کل پروژه از یک عدد فازی تبدیل به یک عدد crisp می‌شود و عملاً دیگر از نظرات خبره در تخمین کیفیت چشم‌پوشی می‌گردد. تعیین میزان در بازه ۰ تا ۱ میزان ریسک‌پذیری مدیر پروژه را از ۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌دهد. بدیهی است استفاده از αهای مختلف و پذیرش درصد ریسک‌های مختلف سبب تشکیل جواب‌های متفاوت خواهد شد.

نوآوری در حل مدل: در این پژوهش برای حل مدل یک الگوریتم ابتکاری به نام الگوریتم ژنتیک ترکیبی جدید (NHGA) [۱۴] معرفی می‌شود که در مقایسه با الگوریتم‌های متاهیوریستیک دیگر ازجمله الگوریتم ژنتیک [۱۵] برای حل این مدل از کارایی بسیار بالاتری برخوردار است. سرعت‌بالای این الگوریتم و همگرا شدن سریع جواب‌ها، این مدل و الگوریتم حل آن را، برای پروژه‌های بزرگ و با تعداد فعالیت‌های زیاد مناسب معرفی می‌کند.

[14] 2 Novel Hybrid Genetic Algorithm
[15] Genetic Algorithm

۲ مدل‌سازی مسئله

در این تحقیق یک پروژه به‌وسیله یک گراف جهت دار بدون دور $G = (V, E)$ [۱۶] تعریف‌شده است. که $V^{۲}$ [۱۷] مجموعه گره‌ها [۱۸]، E [۱۹] مجموعه کمان‌ها است. کمان‌ها [۲۰] نشان‌دهنده فعالیت‌ها [۲۱]و گره‌ها معرف رویدادها [۲۲] هستند. G(V,E) به‌صورت یک ماتریس A_{mxn} نشان داده شد که m تعداد گره‌ها و n تعداد کمان است.

ماتریس A_{mxn} ماتریس بروز گره-کمان برای گراف $G(V, E)$ نامیده می‌شود. ماتریس A برای هر گره شبکه یک سطر و برای هر کمان یک ستون دارد. هر ستون A شامل دو ضریب دقیق غیر صفر است: "+۱" و "-۱".

ستونی که مرتبط به کمان j شده است، شامل "+۱"، اگر i گره شروع کمان j باشد. و شامل "-۱" اگر i گره انتهایی کمان j باشد و در غیر این صورت صفر است.

$$A = [a_{ij}]$$

$$a_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} ۱ & \text{اگر } i \text{ گره شروع کمان } j \text{ باشد.} \\ -۱ & \text{اگر } i \text{ گره انتهایی کمان } j \text{ باشد} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{array} \right\}$$

$$i = ۱, \ldots\ldots\ldots\ldots m \qquad j = l, \ldots\ldots\ldots\ldots, n$$

هر فعالیت پروژه (E_j) دارای مدهای مختلف اجرائی M_j است که هر $k \in M_j$ شامل زمان t_{jk} و هزینه c_{jk} و کیفیت $\widetilde{q}_{jk}$ فعالیت j است. فرض می‌شود که اگر k و r دو مد برای فعالیت j باشند و $k < r$ باشد آنگاه $t_{jk} > t_{jr}$ و $c_{jk} < c_{jr}$ و $\widetilde{q}_{jk} \neq \widetilde{q}_{jr}$. هرچند در تحقیقات انجام شده فرض بر این است که کاهش زمان فعالیت باعث کاهش کیفیت فعالیت می‌شود، ولی لازم به ذکر است که در دنیای واقعی پروژه‌ها، کاهش زمان

[16] Directed acyclic graph
[17] Vertex
[18] Nodes
[19] Edge
[20] Arcs
[21] Activities
[22] Events

فعالیت همیشه موجب کاهش کیفیت فعالیت نخواهد شد به‌عنوان‌مثال: برای کاهش زمان یک فعالیت از یک فنّاوری جدیدتر استفاده شود می‌تواند کاهش زمان به همراه افزایش کیفیت و افزایش هزینه باشد.

هدف یافتن ترکیب بهینه $(t_{jk}, c_{jk}, \widetilde{q}_{jk})$ هر فعالیت، برای فشرده‌سازی شبکه پروژه بود بطوریکه با کاهش زمان کل پروژه، هزینه‌های کل پروژه (هزینه مستقیم + هزینه‌های غیرمستقیم) به حداقل ممکن برسد و کیفیت کل پروژه از حد مطلوب کمتر نشود. برای مدل‌سازی این مسئله DTCQTP از برنامه‌ریزی عدد صحیح [۲۳] استفاده شد.

$$Min \cdot C_t = \left(\sum_{j=1}^{n} \sum_{k \in M_j} c_{jk} * y_{jk} \right) + C_{Id} * T^k_{cpm}$$

$$Min \cdot T_t = T^k_{cpm}$$

$$St:$$

$$\sum_{j=1}^{n} w_j \sum_{k \in M_j} \widetilde{q_{jk}} * y_{jk} \geq \tilde{Q}_{allow}$$

$$\sum_{k \in M_j} y_{jk} = 1 \qquad j = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, n$$

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$$

$$y_{jk} = 0 \quad or \quad 1 \qquad \forall\, j, k$$

مسئله CPM می‌تواند به‌عنوان معکوس مسئله کوتاه‌ترین مسیر شبکه در نظر گرفته شود

[23] Integer programming

پس T^k_{cpm} با توجه به ماتریس شبکه A_{mxn} به‌صورت زیر فرمول‌بندی شد

$$T^k_{cpm} = Max \sum_{j=۱}^{n} x_j \sum_{k \in M_j} t_{jk} * y_{jk}$$

$$St:$$

$$\sum_{j=۱}^{n} a_{ij} * x_j = b_i \qquad i = ۱, ۲, \ldots\ldots\ldots, m$$

$$x_j = ۰ \; or \; ۱$$

$$b_i = \left\{ \begin{array}{ll} ۱ & \text{اگر } i = ۱ \\ -۱ & \text{اگر } i = m \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{array} \right\}$$

C_t هزینه کل پروژه (هزینه‌های مستقیم + هزینه‌های غیرمستقیم)

T_t زمان کل پروژه

C_{Id} هزینه غیرمستقیم پروژه در واحد زمان

c_{jk} هزینه مستقیم فعالیت j هنگام اجرای kامین مد اجرایی.

t_{jk} مدت‌زمان فعالیت j هنگام اجرای kامین مد اجرایی

$\widetilde{q}_{jk}$ کیفیت فازی فعالیت j هنگام اجرای kامین مد اجرایی

yik متغیر باینری فعالیت j هنگامی‌که kامین مد اجرایی اجرا می‌شود. اگر $y_{jk} = ۱$ باشد یعنی فعالیت j برای اجرا مود Kام را انجام می‌دهد. درحالی‌که $y_{jk} = ۰$ به معنای خیر است.

x_j متغیر باینری فعالیت j است. اگر $x_j = ۱$ فعالیت j در مسیر بحرانی است. درحالی‌که $x_j = ۰$ به این معنی است که فعالیت j در مسیر بحرانی نیست.

a_{ij} ماتریس شبکه است

b_i عرضه موجود در گره i_{th}

M_j مجموعه‌ای از حالت‌های اجرایی موجود برای هر فعالیت j

w_j وزن کیفی فعالیت j نسبت به سایر فعالیت‌های پروژه

$\tilde{Q}_{allow}$ کران پایین برای کیفیت فازی پروژه

۳ روش حل

در مسئله DTCQTP برای هر فعالیت تعدادی مد اجرایی برای انتخاب وجود دارد اگر تعداد فعالیت‌های پروژه n باشد و هر فعالیت k مد اجرائی برای انتخاب داشته باشد آنگاه K^n سری جواب موجه وجود دارد. که بیانگر فضای بسیار بزرگ جستجو برای حل مسئله است. بنابراین برای حل مسئله و رسیدن به جواب یا جواب‌های بهینه، لازم است از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شود.

در این تحقیق برای حل مسئله یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید به نام (NHGA) معرفی‌شده است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس در بخش ؟؟ این مقاله می‌توان گفت که این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک از کارایی بسیار بالاتری برخوردار است سرعت‌بالای آن و همگرا شدن سریع جواب‌ها، این الگوریتم را برای حل مسئله فوق (که دارای k^n سری جواب موجه هست) مفید ساخته است.

NHGA با انجام اصلاحاتی در GA پدید آمد. (شکل ۱) این اصلاحات شامل موارد ذیل هستند :

اضافه شدن الگوریتم تپه نوردی

کاهش نرخ الگوریتم تپه نوردی با معرفی یک تابع جدید

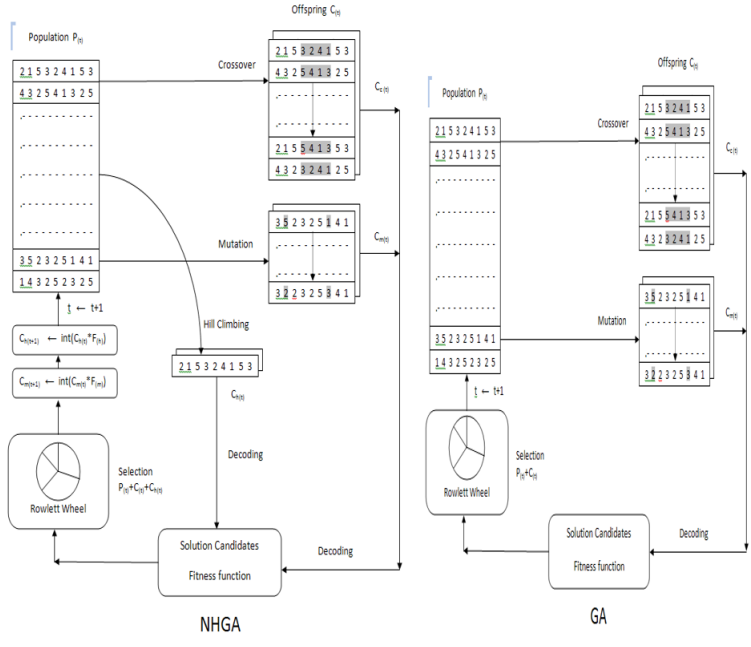
کاهش نرخ اپراتور جهش در نسل‌های بعدی با استفاده از یک تابع

یک کروموزوم مجموعه‌ای از مقادیر صحیح (Gens) است که حالت انتخاب شده برای هر فعالیتی که بین ۱ و تعداد حالت‌های تعریف شده برای آن فعالیت است را نشان می‌دهد.

$$[m_1, m_2, \ldots\ldots m_n] : m_j \in [1, m_j]$$

در هر کروموزوم، برای هر فعالیت فقط یک مد انتخاب می‌شود که منجر به معلوم شدن ترکیب $(t, c, \tilde{q})$ برای اجرای هر فعالیت می‌شود. هنگامی‌که خواندن اعداد تمام ژن‌های یک کروموزوم به پایان برسد آنگاه برای تمام فعالیت‌های پروژه، مدی برای اجرا انتخاب شده است. و یک کروموزوم با ژن‌های موجه تولید شده است.

مراحل اجرای NHGA برای حل مسئله مورد تحقیق به شرح زیر است:



شکل ۱: *فلوچارت الگوریتم‌های GA و NHGA*

مرحله اول: ابتدا داده‌های مسئله خوانده می‌شود سپس N کروموزوم با ژن‌های موجه به‌صورت تصادفی به‌عنوان جواب‌های اولیه تولید می‌شود. داده‌های مسئله شامل داده‌های پروژه و پارامترهای $NHGA$ می‌باشند.

داده‌های پروژه شامل موارد زیر است:

ماتریس شبکه پروژه $(Amxn = [aij])$

حالت‌های اجرایی موجود برای هر فعالیت j و تأثیر مورد انتظار آن‌ها بر هزینه فعالیت، مدت‌زمان و کیفیت فازی. $(Mj(cjk, tjk, q\tilde{j}k))$

وزن فعالیت j نسبت به سایر فعالیت‌های پروژه. (Wj)

درجه ریسکی که مدیران آماده پذیرش آن هستند (α)

(IC) هزینه غیرمستقیم پروژه در واحد زمان

کران پایین برای کیفیت فازی پروژه. $(\tilde{Q}allow)$

پارامترهای موردنیاز NHGA عبارت‌اند از:

۱. اندازه رشته (n)

۲. تعداد نسل (G).

۳. اندازه جمعیت (N).

۴. نرخ تپه نوردی

۵. وزن تابع EXP. (Wexp)

۶. وزن تابع خطی. (Wlin)

۷. نرخ اپراتوربرش

۸. نرخ اپراتور جهش.

مرحله دوم: برای تک‌تک N کروموزوم تولیدشده، هزینه مستقیم کل $DC_{(s)}$ و زمان کل پروژه $T_{(s)}^{cpm}$ و کیفیت کل پروژه $\tilde{Q}_{(s)}$ به ترتیب زیر محاسبه می‌گردد.
هزینه مستقیم پروژه: مجموع هزینه مستقیم تمامی فعالیت‌های پروژه

$$DC_{(s)} = \sum_{j=1}^{n} c_{sj} \qquad s = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, N$$

زمان کل پروژه: مجموع زمان فعالیت‌های موجود در مسیر بحرانی

$$T_s^{cpm} = Max \sum_{j=1}^{n} x_j * t_{sj}$$

$$St:$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} * x_j = b_i \qquad i = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, m$$

$$x_j = 0 \ or \ 1$$

کیفیت کل پروژه: مجموع موزون کیفیت‌های فازی فعالیت‌ها

$$\tilde{Q}_{(s)} = \sum_{j=1}^{n} w_j * \tilde{q}_{sj} \qquad s = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, N$$

در این مدل کیفیت هر فعالیت به‌صورت یک عدد مثلثی فازی است و محاسبات ضرب و جمع اعداد فازی با استفاده از $\alpha - cut$ به‌صورت ذیل است:

$$\tilde{q}_{sj} = (q_{sj})_\alpha = \left[{q_{sj}}_\alpha^{l} \quad , \ {q_{sj}}_\alpha^{c} \quad {q_{sj}}_\alpha^{u} \right]$$

$$w_j * \tilde{q}_{sj} = (q_{sj} * w_j)_\alpha = \left[{q_{sj}}_\alpha^{l} * w_j \quad , \ {q_{sj}}_\alpha^{c} * w_j \quad {q_{sj}}_\alpha^{u} * w_j \right]$$

$$\sum_{j=1}^{n} w_j * \tilde{q}_{sj} = \sum_{j=1}^{n} \left(w_j * q_{sj} \right)_\alpha$$

$$= \left[\sum_{j=1}^{n} w_j * {q_{sj}}_\alpha^{l} \ , \ \sum_{j=1}^{n} w_j * {q_{sj}}_\alpha^{c} \ , \ \sum_{j=1}^{n} w_j * {q_{sj}}_\alpha^{u} \right] \forall \alpha \in [0, 1]$$

هرچند که طراحی کروموزوم طوری انجام‌شده است که در تولید تصادفی کروموزوم، کروموزوم‌ها دارای ژن‌های موجه باشند و هر فعالیت فقط مدهای اجرائی مربوط به خود را بتواند انتخاب کند، ولی در این مرحله باید چک شود که کیفیت محاسبه‌شده برای هر کروموزوم $\widetilde{Q}_s$ از کیفیت مجاز $\widetilde{Q}_{allow}$ کمتر نباشد، تا کروموزم موجه باشد.لذا در این پژوهش برای مقایسه اعداد فازی با استفاده از $\alpha - cut$ به‌صورت محافظه‌کارانه به روش ذیل عمل شده است.

$$(Q_s)_\alpha = \left[{q_s}_\alpha^{l} \ , {q_s}_\alpha^{c}, {q_s}_\alpha^{u} \ \right]$$

$$(Q_{allow})_\alpha = \left[{q_{allows}}_\alpha^{l} \ , {q_{allows}}_\alpha^{c}, {q_{allow}}_\alpha^{u} \ \right]$$

$$\left({q_s}_\alpha^{l} \geq {q_{allow}}_\alpha^{l} \ \wedge \ {q_s}_\alpha^{u} \geq {q_{allow}}_\alpha^{u} \right) \Rightarrow (Q_s)_\alpha \geq (Q_{allow})_\alpha \forall \ \alpha \ \in [0, 1]$$

مرحله سوم: تعیین تابع برازندگی $(Fitness\ Function)$ و احتمال انتخاب p_s برای هر

یک از کروموزوم‌های والد s با استفاده از فرمول‌های ذیل :

$$F_{(s)} = DC_{(s)} + IC * T_s^{cpm} - (DC_{min} + IC * T_{min}^{cpm}) + ۱ + Int\left(W_t * DC_{min}/T_{min}^{cpm}\right) * ((T_s^{cpm} - T_{min}^{cpm})/(DC_s - DC_{min}(۱۱)))$$

$$P_{(s)} = \frac{\frac{\sum_{s=۱}^{N} F_{(s)}}{F_{(s)}}}{\sum_{s=۱}^{N} \frac{\sum_{s=۱}^{N} F_{(s)}}{F_{(s)}}} \qquad (۲)$$

DC_{min} کمترین هزینه مستقیم هر جمعیت جواب

T_{min}^{cpm} کمترین زمان انجام پروژه هر جمعیت جواب

اگر $((DC_{min} + IC * T_{min}^{cpm}))$ در رابطه (۱) نباشد، آنگاه f_sها اعداد بزرگی می‌شوند و به دنبال آن P_sها خیلی به هم نزدیک می‌شوند و نهایتاً فرآیند انتخاب کارایی لازم را از دست می‌دهد.

اگر F_s برابر با صفر می‌شد آنگاه محاسبه P_s غیرممکن می‌شد پس در رابطه اول $+۱$ وجود دارد.

با توجه به اینکه کروموزوم‌هایی که دارای F_s کمتری می‌باشند، بهتر هستند، پس باید P_s طوری باشد که هر چه F_s کمتر می‌شود، احتمال انتخاب کروموزوم s یعنی P_s بیشتر شود پس رابطه (۲) برای P_s حاصل شد.

مرحله چهارم: تولید کروموزوم‌های فرزند [۲۴] از کروموزوم‌های والد برای ورود به نسل بعد در این مرحله انجام می‌شود. قبل از انجام عملگرهای برش و جهش ابتدا تعداد کمی از $(c_{(h)})$ از بهترین والدها مستقیماً به نسل بعدی منتقل می‌شود (تپه نوردی) اما این تعداد $(c_{(h)})$ از هر نسل به نسل بعدی کاهش می‌یابد. تابع نرخ کاهش، ترکیبی از یک تابع خطی و یک تابع‌نمایی با وزن مشخص هست.

$$F_{HillRate} = \frac{w_{exp} * \left(۱ - \left(e^{(n_G - G)}\right)\right) + w_{line} * \left(۱ - \frac{n_G}{G}\right)}{w_{exp} + w_{line}} \qquad (۳)$$

[24] offspring

که در آن:

W_{exp} : وزن تابع‌نمایی G : تعداد نسل‌ها

W_{line} : وزن تابع خطی n_G : شماره نسل‌ها

انتقال مستقیم بهترین والدین به نسل بعدی با نرخ کاهش تابع (۳) یک ابتکار جدید در بهبود GA برای این مسئله بود که باعث افزایش کارایی الگوریتم گردید. بعد از الگوریتم تپه نوردی، برای تولید بقیه فرزندان $(C_{(t)})$ نوبت به اجرای عملگرهای برش $(C_{c(t)})$ [۲۵] وجهش $(C_{m(t)})$ [۲۶] می‌رسد. اپراتورها طوری طراحی شدند که بعد از اجرا، بازهم ژن‌های کروموزوم‌ها موجه باشند. در این مسئله اگر تعداد فعالیت‌ها از ۵۰ تا کمتر باشد از عملگر برش دونقطه‌ای و اگر از ۵۰ تا بیشتر باشد از عملگر برش یکنواخت استفاده شد. برای عملگر برش هم با توجه به تعداد فعالیت‌ها از عملگر جهش یک نقطه‌ای تا چندنقطه‌ای استفاده شد. به‌عنوان‌مثال در یک پروژه با ۹ فعالیت دوکروموزم تصادفی با ژن‌های موجه می‌تواند مطابق زیر باشد.

$$Parent_۱ = [۲, ۱, ۵, ۳, ۲, ۴, ۱, ۵, ۳]$$
$$Parent_۲ = [۴, ۳, ۲, ۵, ۴, ۱, ۳, ۲, ۵]$$

در این مثال چون تعداد فعالیت‌ها کم است. اپراتورها برش دو نقطه‌ای و عملگر جهش یک نقطه‌ای استفاده شده است. فرزندان تولید شده از والدین فوق در اثر اجرای اپراتورها به شکل زیر هستند.

$$TwoPointCrossoverWithRandomPoint(E_۱ = ۴, E_۲ = ۷)$$
$$Offspring_۱ = [۲, ۱, ۵, ۵, ۴, ۱, ۳, ۵, ۳]$$
$$Offspring_۲ = [۴, ۳, ۲, ۳, ۲, ۴, ۱, ۲, ۵]$$
$$OnepointmutationwithRandompoint(E = ۶)$$
$$Offspring_۱ = [۲, ۱, ۵, ۵, ۴, ۲, ۳, ۵, ۳]$$

[25] Crossover

[26] Mutation

لازم به ذکر است که نرخ عملگر برش هم کاهشی و از تابع ۴ استفاده می‌کند. به طوری‌که در نسل آخر نرخ عملگر جهش صفر خواهد شد.

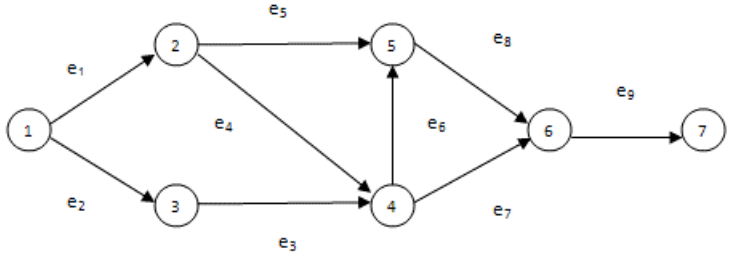
$$F_{MuRate} = ۱ - \frac{n_G}{G}$$

مرحله پنجم: تکرار مراحل ۲ تا ۴ تا زمانی که کروموزوم‌ها از یک نسل به نسل بعدی تغییری نکنند.

کلیه مراحل کار NHGA در شکل ۱ خلاصه شده است.

۴ مثال کاربردی

در این بخش به‌عنوان مثال یک پروژه شامل ۹ فعالیت مطرح می‌شود. (شکل ۲). ماتریس شبکه مطابق جدول ۱ است. هر فعالیت مدهای مختلفی برای اجرا دارد. هر مد دارای زمان، هزینه، کیفیت هر فعالیت است که در جدول ۲ آمده است و کیفیت هر فعالیت به‌صورت یک عدد مثلثی فازی است. وزن تأثیر هر فعالیت در کیفیت کل (w_j) هم در جدول ۲ لحاظ شده است.



شکل ۲: شبکه پروژه

جدول ۱: *ماتریس شبکه*

	$e_۱$	$e_۲$	$e_۳$	$e_۴$	$e_۵$	$e_۶$	$e_۷$	$e_۸$	$e_۹$
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	−۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۳	۰	−۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۰	−۱	−۱	۰	۱	۱	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	−۱	−۱	۰	۱	۰
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	−۱	−۱	۱
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	−۱

جدول ۲: *مدهای اجرایی فعالیت‌ها*

Mode	۱			۲			۳			۴			۵			۶			
Activity	T	C	$\tilde{Q}$	T	C	$\tilde{Q}$	T	C	$\tilde{Q}$	T	C	$\tilde{Q}$	T	C	$\tilde{Q}$	T	C	$\tilde{Q}$	W_{qj}
e_1	۷	۱۶۰	۸۸ ۹۰ ۹۴	۶	۱۸۰	۸۲ ۸۵ ۸۷	۵	۱۹۰	۷۵ ۸۰ ۸۳	۴	۲۰۰	۶۸ ۷۰ ۷۴	۳	۲۳۰	۸۴ ۸۵ ۸۷				۰/۱
e_2	۸	۱۴۰	۸۲ ۸۵ ۸۷	۷	۱۵۰	۸۰ ۸۲ ۸۳	۶	۱۷۰	۷۷ ۸۰ ۸۲	۵	۱۸۰	۷۱ ۷۵ ۷۷	۴	۲۰۰	۷۸ ۸۰ ۸۴				۰/۱
e_3	۸	۱۱۰	۸۶ ۹۰ ۹۲	۷	۱۲۰	۸۴ ۸۵ ۸۷	۶	۱۴۰	۸۲ ۸۴ ۸۵	۵	۱۵۰	۷۹ ۸۰ ۸۲	۴	۱۷۰	۸۸ ۹۰ ۹۲				۰/۱۴
e_4	۱۰	۱۰۰	۸۵ ۸۸ ۹۰	۹	۱۳۰	۸۹ ۹۰ ۹۲	۸	۱۴۰	۸۲ ۸۵ ۸۷	۷	۱۵۰	۷۴ ۷۵ ۷۸	۶	۱۶۵	۷۹ ۸۰ ۸۲				۰/۱۱
e_5	۱۴	۱۶۰	۹۰ ۹۲ ۹۳	۱۳	۱۷۰	۸۶ ۹۰ ۹۲	۱۲	۱۸۰	۸۵ ۸۶ ۸۸	۱۱	۲۰۰	۶۹ ۷۰ ۷۵	۱۰	۲۲۰	۷۸ ۸۰ ۸۴	۹	۲۴۰	۸۹ ۹۰ ۹۲	۰/۱۲
e_6	۸	۱۳۰	۸۴ ۸۵ ۸۷	۷	۱۴۰	۸۱ ۸۲ ۸۳	۶	۱۵۰	۷۸ ۸۰ ۸۲	۵	۱۷۰	۸۲ ۸۵ ۸۶	۴	۱۹۰	۸۹ ۹۰ ۹۲				۰/۱۵
e_7	۱۱	۱۵۰	۸۵ ۸۷ ۹۰	۱۰	۱۸۰	۸۸ ۹۰ ۹۳	۹	۱۹۰	۸۱ ۸۵ ۸۸	۸	۲۰۰	۸۸ ۹۰ ۹۳							۰/۰۸
e_8	۱۱	۱۴۰	۹۰ ۹۱ ۹۴	۱۰	۱۵۰	۸۵ ۸۸ ۹۰	۹	۱۶۰	۸۲ ۸۵ ۸۶	۸	۱۷۰	۷۴ ۷۵ ۷۸	۷	۲۶۵	۸۴ ۸۵ ۸۸				۰/۱۲
e_9	۱۱	۱۵۰	۸۸ ۹۰ ۹۳	۱۰	۱۷۰	۸۵ ۸۸ ۸۹	۹	۱۸۰	۸۲ ۸۵ ۸۷	۸	۲۰۰	۸۹ ۹۰ ۹۳							۰/۰۸

کد نویسی مدل در محیط اکسل و با استفاده از Visual Basic Application (VBA) نوشته شده است. داده‌های پروژه شامل جدول ۱ و جدول ۲ و $IC = ۲۰$ و $\widetilde{Q}_{allow} = [۷۴, ۷۵, ۷۶]$ در شیت ۱ و ۲ وارد شده است. در این مثال ۱۵۰۰۰۰۰ سری جواب وجود دارد. برای دستیابی به جواب بهینه از مدل پیشنهادی استفاده شد. در این مثال چون تعداد فعالیت‌ها کم است اپراتورها؛ برش دونقطه‌ای و جهش یک نقطه‌ای استفاده شده است.

پارامترهای NHGA مطابق ذیل مقدار دهی شده‌اند:

$$G = ۵۰,\ N = ۲۰,\ CrossoverRate = ۰/۸,\ MutationRate = ۰/۲,$$
$$HillclimbingRate = ۰/۱,\ W_{exp} = ۰/۸,\ W_{line} = ۰/۲$$

برنامه اجرا شد و کرموزوم [۲, ۱, ۵, ۳, ۲, ۴, ۱, ۵, ۳] و زمان؛ هزینه و کیفیت متناظر آن به عنوان خروجی حاصل شد ($\widetilde{Q} = [۷۴, ۷۵, ۷۶]$ ،$DC = ۱۲۵۰$ ،$T = ۳۰$) و $CT = ۱۸۵۰$.

در ادامه حل مسئله مدیر پروژه می تواند با استفاده از αهای مختلف و پذیرش درصد ریسک‌های مختلف و با افزایش $\tilde{Q}_{allow}$ نقاط بهینه دیگری پیدا کرد که نتایج در جدول (۳) آمده است

جدول ۳: *خروجی نهایی برنامه*

α	$\bar{Q}_L$			$\bar{Q}$			C	T	C_d	Solution Chromosome
۱/۰	۸۲	۸۳	۸۴	۸۲/۹	۸۴/۵	۸۶/۷	۲۱۲۰	۳۴	۱۴۴۰	۴ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۲ ۴
۱/۰	۸۳	۸۴	۸۵	۸۲/۹	۸۴/۵	۸۶/۷	۲۱۲۰	۳۴	۱۴۴۰	۴ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۲ ۴
۱/۰	۸۳	۸۴	۸۷	۸۲/۹	۸۴/۵	۸۶/۷	۲۱۲۰	۳۴	۱۴۴۰	۴ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۲ ۴
۰/۸	۸۳	۸۴	۸۷	۸۲/۹	۸۴/۵	۸۶/۷	۲۱۲۰	۳۴	۱۴۴۰	۴ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۲ ۴
۰/۲	۸۳	۸۴	۸۷	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۲ ۴
۰/۰	۸۳	۸۴	۸۷	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۱/۰	۸۳	۸۵	۸۷	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۰/۸	۸۳	۸۵	۸۷	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۰/۰	۸۳	۸۵	۸۷	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۱/۰	۸۳	۸۶	۸۷	۸۴/۷	۸۷/۰	۸۹/۱	۲۱۲۰	۳۶	۱۴۰۰	۲ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۴	۸۷	۸۸	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۴	۸۷	۸۸	۸۴/۷	۸۷/۰	۸۹/۱	۲۱۲۰	۳۶	۱۴۰۰	۲ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۴	۸۷	۸۸	۸۴/۷	۸۷/۰	۸۹/۱	۲۱۲۰	۳۶	۱۴۰۰	۲ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۵	۸۶	۸۹	۸۳/۸	۸۶/۲	۸۸/۳	۲۱۲۰	۳۵	۱۴۲۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۰/۶	۸۵	۸۶	۸۹	۸۴/۷	۸۷/۰	۸۹/۱	۲۱۲۰	۳۶	۱۴۰۰	۲ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۵	۸۶	۸۹	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۵	۸۷	۸۹	۸۵/۳	۸۷/۵	۸۹/۸	۲۱۲۰	۳۷	۱۳۸۰	۱ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۵	۸۷	۸۹	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۵	۸۷	۸۹	۸۵/	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۵	۸۸	۸۹	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۵	۸۸	۸۹	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۵	۸۸	۸۹	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۶	۸۷	۹۰	۸۴/۸	۸۷/۴	۸۹/۳	۲۱۳۰	۳۶	۱۴۱۰	۳ ۴ ۱ ۵ ۱ ۱ ۲ ۱ ۴
۰/۶	۸۶	۸۷	۹۰	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۶	۸۷	۹۰	۸۶/۳	۸۸/۷	۹۰/۸	۲۱۳۰	۳۸	۱۳۷۰	۱ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۶	۸۸	۹۰	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۶	۸۸	۹۰	۸۶/۳	۸۸/۷	۹۰/۸	۲۱۳۰	۳۸	۱۳۷۰	۱ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۶	۸۸	۹۰	۸۶/۳	۸۸/۷	۹۰/۸	۲۱۳۰	۳۸	۱۳۷۰	۱ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۶	۸۹	۹۰	۸۶/۷	۸۹/۲	۹۱/۳	۲۱۴۰	۳۹	۱۳۶۰	۱ ۲ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۸	۸۶	۸۹	۹۰	۸۶/۷	۸۸/۹	۹۱/۱	۲۱۵۰	۳۹	۱۳۷۰	۲ ۱ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۶	۸۹	۹۰	۸۶/۳	۸۸/۷	۹۰/۸	۲۱۳۰	۳۸	۱۳۷۰	۱ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۷	۸۸	۹۱	۸۵/۷	۸۸/۲	۹۰/۱	۲۱۳۰	۳۷	۱۳۹۰	۲ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۷	۸۸	۹۱	۸۶/۳	۸۸/۷	۹۰/۸	۲۱۳۰	۳۸	۱۳۷۰	۱ ۳ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۷	۸۸	۹۱	۸۷/۵	۸۹/۶	۹۲/۰	۲۱۸۰	۴۰	۱۳۸۰	۱ ۴ ۲ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۷	۸۹	۹۱	۸۶/۷	۸۹/۰	۹۱/۳	۲۱۴۰	۳۹	۱۳۶۰	۱ ۲ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۷	۸۹	۹۱	۸۷/۳	۸۹/۴	۹۱/۸	۲۱۵۰	۴۰	۱۳۵۰	۱ ۱ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۰	۸۷	۸۹	۹۱	۸۷/۳	۸۹/۴	۹۱/۸	۲۱۵۰	۴۰	۱۳۵۰	۱ ۱ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۷	۹۰	۹۱							واب‌ج موجه ندارد:
۰/۲	۸۷	۹۰	۹۱	۸۷/۳	۸۹/۴	۹۱/۸	۲۱۵۰	۴۰	۱۳۵۰	۱ ۱ ۱ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۴
۱/۰	۸۸	۸۹	۹۰	۸۶/۷	۸۹/۰	۹۱/۳	۲۱۴۰	۳۹	۱۳۶۰	۱ ۱ ۱ ۱ ۵ ۱ ۲ ۱ ۴
۰/۸	۸۸	۸۹	۹۰	۸۷/۳	۸۹/۴	۹۱/۸	۲۱۵۰	۴۰	۱۳۵۰	۱ ۱ ۱ ۱ ۵ ۱ ۱ ۱ ۴
۰/۶	۸۸	۸۹	۹۰							واب‌ج موجه ندارد:
۰/۰	۸۸	۸۹	۹۰							واب‌ج موجه ندارد:

مدیر پروژه می‌تواند با استفاده از جدول (۳) و تجزیه و تحلیل شرایط داخلی و خارجی پروژه اقدام به تصمیم‌گیری نماید. برای مدیر پروژه در شرایط محیطی مختلف، اهمیت کیفیت پروژه فرق می کند. اگر مدیر پروژه قصد داشته باشد کفیت مجاز پروژه را افزایش دهد و ریسک‌پذیری خود را هم تغییر دهد آنگاه هزینه و زمان اتمام پروژه چقدر تغییر می کنند؟ جواب به این سوال در جدول (۳) داده می‌شود به عنوان مثال در ردیف اول جدول فوق، مدیر پروژه کیفیت مجاز پروژه را از $[۷۴, ۷۵, ۷۶]$ به $[۸۲, ۸۳, ۸۴]$ افزایش دهد و همچنین α را برابر با ۱ فرض کند آنگاه هر چند کیفیت کل پروژه به $[۸۲/۹, ۸۴/۵, ۸۶/۷]$ افزایش می یابد ولی هزینه کل پروژه از ۱۸۵۰ به ۲۱۲۰ افزایش و زمان کل پروژه از ۳۰ به ۳۴ افزایش می‌یابد در این صورت باید فعالیت ۱ را با مد اجرایی

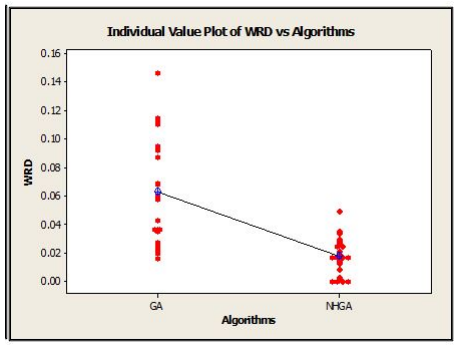
۴ و فعالیت ۲ را با مد ۲ و فعالیت ۳ را با مد ۲ و فعالیت ۴ را با مد ۱ و فعالیت ۵ را با مد ۱ و فعالیت ۶ را با مد ۵ و غعالیت ۷ را با مد ۱ و فعالیت ۸ را با مد ۴ و فعالیت ۹ را با مد ۴ اجرا کند. بنابراین مدیر با تغییر کیفیت مجاز و همچنین تغییر α که همان ریسک‌پذیری مدیر پروژه است می‌تواند به جواب‌های جدیدی دست یابد و با توجه به شرایط پروژه تصمیم‌گیری کند. ممکن است شرایط پروژه طوری باشد که مدیر تصمیم بگیرد که کفیت پروژه افزایش یابد هر چند که هزینه و زمان پروژه افزایش می یابد.

برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک، مسئله فوق ۵۰ بار با الگوریتم پیشنهادی NHGA حل شود و ۵۰ بار با الگوریتم ژنتیک حل شد و برای هر بار اجرای برنامه، شاخص انحراف نسبی وزندار [۲۷] محاسبه شد نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای دو الگوریتم در شکل (۳) آورده شده است که نشان می‌دهد جواب‌های الگوریتم پیشنهادی NHGA نسبت به الگوریتم ژنتیک نه تنها بهتر است بلکه پراکندگی جواب‌ها در اجراهای مختلف کمتر است.

C_{alg} و T_{alg} به ترتیب هزینه کل و زمان کل پروژه که هر الگوریتم محاسبه می‌کند.

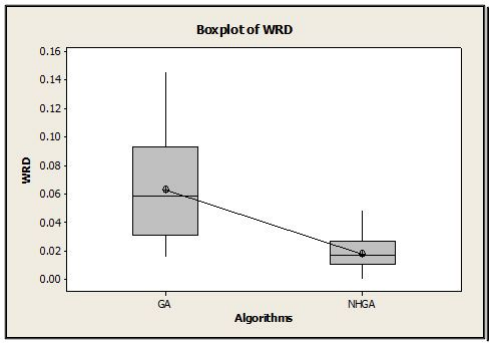
C_{min} و T_{min} به ترتیب کمترین هزینه و کمترین زمان که در تمام ۵۰ بار اجراهای هر الگوریتم مشاهده شده است.

$$WRD = \left(\frac{C_{alg} - C_{min}}{C_{min}} + \frac{T_{alg} - T_{min}}{T_{min}} \right)$$



شکل ۳: *مقایسه الگوریتم‌های GA و NHGA*

[27] Weighted relative deviation



شکل ۴: *مقایسه الگوریتم‌های GA و NHGA*

۵ نتیجه‌گیری

تعداد زیادی از مدیران پروژه فشرده‌سازی پروژه را با هدف کاهش هزینه‌های کل هم‌زمان با دستیابی به کیفیت مطلوب انجام می‌دهند مدلی که در این مقاله ارائه گردید خاص همین مسئله واقعی بود برای اینکه مدل به واقعیت نزدیک شود مسئله در حالت گسسته (DTCQTP) مطرح شد از طرفی عامل کیفیت مانند عوامل هزینه و زمان یک عامل کمی نیست و در دنیای واقعی پروژه‌ها، کیفیت یک متغیر زبانی است و از نظرات اشخاص خبره به دست می‌آید لذا در این پژوهش کیفیت فعالیت‌ها به‌صورت اعداد فازی نشان داده شد. در این مسئله هر فعالیت پروژه می‌تواند در یک مد از چندین مد، به اجر درآید. پس مسئله این بود که هر فعالیت در چه مدی از مدهای موجود خود اجرا گردد که ضمن کاهش زمان پروژه هزینه کل پروژه حداقل شود و کیفیت پروژه از کیفیت مجاز کمتر نشود. با استفاده از خاصیت $\alpha - cut$ مدیر پروژه می‌تواند درصد ریسک‌پذیری خود را در به دست آوردن جواب بهینه وارد کند. حل مدل منتج به دستیابی به یک نقطه بهینه در فضای سه‌بعدی شامل زمان هزینه و کیفیت پروژه شد که کیفیت پروژه به‌صورت یک عدد فازی است. مدیر پروژه می‌تواند با تغییر میزان ریسک‌پذیری و تغییر مقدار کیفیت مطلوب و اجرای مجدد برنامه به نقطه بهینه دیگری دست یابد. با داشتن این نقاط بهینه تصمیم‌گیری برای مدیران پروژه مقدور خواهد بود.

در این پژوهش برای حل مدل NHGA معرفی شد که در مقایسه با GA نه‌تنها NHGA در زمان بسیار کمتری به جواب رسید بلکه از دقت بسیار بیشتری نسبت به GA برخوردار

بود.

مثال مورد نظر این پژوهش با یک کامپیوتر یک‌بار با GA و بار دیگر با NHGA حل شد هنگامی که مثال با GA اجرا شد برای رسیدن به جواب به ناچار $N \geq ۱۰۰, G \geq ۵۰$ به‌عنوان پارامترهای GA وارد شدند. در اجراهای مجدد برنامه جواب‌های نهایی نزدیک به هم بودند ولی دقیقاً یکی نبودند هنگامی که همان مثال با همان کامپیوتر با NHGA اجرا شد برای رسیدن به جواب $G = ۵۰, N = ۲۰$ کفایت کرد. در اجراهای مجدد برنامه؛ جواب‌ها بیانگر دقت بسیار بالای این الگوریتم بودند به‌طوری‌که در ۵۰ بار اجرا برنامه ۴۸ بار دقیقا یکی بودند سرعت بالای و دقت این مدل و همگرا شدن سریع جواب‌ها این مدل را برای پروژه‌های بزرگ و با تعداد فعالیت‌های زیاد مناسب معرفی کرد. این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در هر یک از عوامل زمان، هزینه کیفیت و حتی عدم قطعیت هم‌زمان این عوامل، قابل توسعه است و آن را به واقعیت نزدیکتر می‌کند.

مراجع

[۱] حسن پور ،ح.، دانش پایه، ح.، امیرخان. م.(۱۳۹۳). زمانبندی پروژه با داده‌های فازی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید. *مدیریت تولید و عملیات* ۵۷-۷۴.

[۲] درفشان، ی.، موسوی، س.م. (۱۳۹۵) توسعه روش تصمیم‌گیری مورا در محیط فازی بازهای برای تعیین مسیر بحرانی پروژه‌ها با در نظر گرفتن معیارهای زمان، هزینه، کیفیت و ریسک. *دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها (ICISE ۲۰۱۶)*.

[۳] نظری، ا.، شادنوش، ن.، سهرابی، ط. (۱۳۹۸). مدیریت پرتفوی هزینه پروژه‌ها در مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت و تعیین اقتصادی‌ترین ترکیب کاهش زمان فعالیت‌ها در شبکه‌های مبتنی بر مسیر بحرانی .(CPM) *مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار*.۱۹۲-۲۱۱.

[4] Alkass, S., Mazerolle, M., & Harris, F. (1996). Construction delay analysis techniques. *Construction Management & Economics*, ***14***(5), 375-394.

[5] Amiri, M., & Golozari, F. (2011). Application of fuzzy multi-attribute decision making in determining the critical path by using time, cost, risk, and quality criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **54***(1), 393-401.

[6] Azaron, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2007). Multi-objective time–cost trade-off in dynamic PERT networks using an interactive approach. *European Journal of Operational Research*, **180**(3), 1186-1200.

[7] Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European journal of operational research*, **88**(2), 320-327.

[8] Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Shahraki, A., Malkhalifeh, M. R., & Ahmadizadeh, S. S. R. (2021). Optimization of environmental impacts of construction projects: a time–cost–quality trade-off approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **18**(3), 631-646.

[9] Daisy, X.M. (2005). Applying parato ranking and niche formation to GA based multi objective time-cost optimization. *J.Consr.Eng.Manage*, **131**(1): 81-91.

[10] De, P., Dunne, E. J., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1997). Complexity of the discrete time-cost tradeoff problem for project networks. *Operations research*, **45**(2), 302-306.

[11] Effendi, Y. A., & Sarno, R. (2017, October). Non-linear optimization of critical path method. In *2017 3rd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)* (pp. 90-96). IEEE.

[12] Fulkerson, D. R. (1961). A network flow computation for project cost curves. *Management science*, **7**(2), 167-178.

[13] Isikyildiz, S., & Akcay, C. (2020). Multi-objective optimization of time-cost-quality in construction projects using genetic algorithm. *Revista de la construcci□n*, **19**(3), 335-346.

[14] Jeunet, J., & Orm, M. B. (2020). Optimizing temporary work and overtime in the Time Cost Quality Trade-off Problem. *European Journal of Operational Research*, **284**(2), 743-761.

[15] Kapur, K. C. (1973). An algorithm for project cost-duration analysis problem with quadratic and convex cost functions. *AIIE Transactions*, **5**(4), 314-322.

[16] Kerzner, H. (2017). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.

[17] Kurij, K. V., Milaji و, A. V., & Beljakovi و, D. D. (2014). Analysis of construction dynamic plan using fuzzy critical path method. *Tehnika*, **69**(2), 209-215.

[18] Liu, G. Y., Lee, E. W. M., & Yuen, R. K. K. (2020). Optimising the time-cost-quality (TCQ) trade-off in offshore wind farm project management with a genetic algorithm (GA). *HKIE Transactions,* **27**(1), 1-12.

[19] Lotfi, R., Yadegari, Z., Hosseini, S. H., Khameneh, A. H., Tirkolaee, E. B., & Weber, G. W. (2020). A robust time-cost-quality-energy-environment trade-off with resource-constrained in project management: A case study for a bridge construction project. *Journal of Industrial & Management Optimization.*

[20] Luong, D.-L., Tran, D.-H., & Nguyen, P. T. (2018). Optimizing multi-mode time-cost-quality trade-off of construction project using opposition multiple objective difference evolution. *International Journal of Construction Management, 1–13*.

[21] Moder, J.J., Phillips, C.R., Davis, E.W. (1983). Project Management with CPM, PERT and precedence diagramming. *third ed., Van Nostrand Reinhold Company*.

[22] Olivieri, H., Seppنnen, O., Alves, T. D. C., Scala, N. M., Schiavone, V., Liu, M., & Granja, A. D. (2019). Survey comparing critical path method, last planner system, and location-based techniques. *Journal of construction engineering and management*, **145**(12), 04019077.

[23] PMI. (2013). A guide to the project management body of knowledge: PMBOK Guide. 5th ed. USA: Project Management Institute Inc.

[24] Sonmez, R., & Bettemir, .ض H. (2012). A hybrid genetic algorithm for the discrete time–cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, **39**(13), 11428-11434.

[25] Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F. R., Eshtehardian, E., & Abessi, O. (2017). Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing (RESEARCH NOTE). *International Journal of Engineering*, **30**(5), 627-635.

[26] Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2007). A solution procedure for the discrete time, cost and quality tradeoff problem using electromagnetic scatter search. *Applied mathematics and computation*, **190**(2), 1136-1145.

[27] Zheng, D. X., Ng, S. T., & Kumaraswamy, M. M. (2004). Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization. *Journal of Construction Engineering and management*, **130**(2), 168-176.