

بهینه‌سازی زمانبندی در پروژه‌های راهسازی بر اساس تفکر ناب

سعید حسامی^۱ و زهرا مولایی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تفکر ناب، پروژه‌های خطی-تکراری، انقطاع کاری، مودا، رویکرد NSGAI، رویکرد فازی.</p>	<p>پروژه‌های راهسازی، به دلیل تکرار متناوب بسیاری از فعالیتها و ابنیه در طول فرآیند اجرا، به عنوان پروژه‌های خطی-تکراری شناخته می‌شوند. در این نوع پروژه‌ها وجود انقطاع کاری و بیکاری منابع، اتلاف زمان و هزینه را در بر خواهد داشت. بنابراین تنظیم برنامه زمانبندی، به گونه‌ای که باعث کاهش اتلاف، در زمان و هزینه پروژه شود، اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌یابد. روش ارائه شده در این پژوهش برای بهینه‌سازی زمانبندی در پروژه‌های راهسازی، مبتنی بر یکی از اصول تفکر ناب در حذف اتلافها (مودا) است، و از الگوریتم ژنتیک و رویکرد NSGAI برای حل مسئله زمانبندی استفاده شده است. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در شرایط اجرای پروژه، نمی‌توان زمان و هزینه فعالیتها را به طور قطعی تعیین کرد، از دیدگاه فازی نیز به مسئله پرداخته شده است. ویژگی بارز روش پیشنهادی این است که، به واسطه توجه ویژه‌ای که به پیوستگی کاری بین بخش‌ها و واحدهای مختلف شده، انقطاع کاری و بیکاری منابع به حداقل میزان ممکن کاهش می‌یابد و به این ترتیب با کاهش اتلافها می‌توان پروژه را یک قدم به نابسازی نزدیک‌تر کرد.</p>

۱- مقدمه

هزینه‌های پروژه شود. تفکر ناب نگرش جدید مدیریتی در عرصه صنعت و ساخت و ساز است، که در صدد حذف و از بین بردن هر فرآیند اضافی است که ارزش افزوده‌ای را ایجاد نمی‌کند [۱]. این اتلافها در اصطلاح "مودا" نامیده می‌شوند، و بالغ بر ۸۰ درصد فعالیتها را در یک فرآیند ساخت‌وساز تشکیل می‌دهند. کاهش این فعالیتها می‌تواند باعث بهبود عمده‌ای در عملکرد سیستم شود [۲]. یکی از انواع مصادیق مودا، توقف و انتظار منابع برای انجام یک فعالیت کاری به دلیل انجام نگرفتن به موقع فعالیت‌های پیش‌نیاز آن است [۳]. این نوع از مودا در پروژه‌های راهسازی بسیار نمود پیدا می‌کند. به عنوان مثال در یک پروژه راهسازی که عمدتاً دارای بخش‌های مختلف و فعالیت‌های متعددی است، بسیار اتفاق می‌افتد که به

طرح‌های راهسازی به عنوان پروژه‌های زیرساخت و زیربنایی، لازمه رشد و توسعه اقتصادی در کشورها می‌باشند. و سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهند. اما علی‌رغم توجهات بسیار، کماکان نقصهایی به لحاظ کیفی و کمی در این حوزه وجود دارد. به نظر می‌رسد بهره‌گیری از رویکرد سیستمی و شیوه‌های نوین می‌تواند تا حد زیادی باعث کاهش و حذف اتلافها، افزایش بهره‌وری، کاهش مدت زمان ساخت، و کنترل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zahramolae@mce@gmail.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی طبری

تکراری ارائه کرد [۶]. با توسعه الگوریتمهای فراکاوشی برای حل مسائل بهینه‌سازی، در طول سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ Hegazy و Wassef [۵] و همچنین Hegazy و Kamarah [۱۶]، Leu و Hwang [۱۷]، EL-Rayes و Hyari [۱۸]، از الگوریتم ژنتیک برای کمینه کردن زمان و هزینه بهره گرفتند. Ohsato و Long در سال ۲۰۰۹، روشی برای زمانبندی پروژه‌های ساختمانی خطی-تکراری با در نظر گرفتن چند تابع هدف مختلف مثل زمان پروژه، هزینه پروژه یا هر دو ارائه کردند. موازنه زمان-هزینه در مدل آن‌ها با استفاده از تابعی غیرخطی از متغیرهای زمان-هزینه تعریف شده بود که با دادن وزن‌هایی به این متغیرها بر اساس نظر مدیر پروژه، اهمیت این دو عامل در زمانبندی می‌توانست متفاوت باشد [۵]. در سال ۲۰۱۰، Cho, Hyun و Hong زمانبندی پروژه و هزینه ساخت را در یک مدل ترکیبی و با استفاده از اطلاعات منابع، برای موازنه زمان و هزینه در یک فرآیند ساخت تکراری بکار گرفتند [۱۹]. در سال ۲۰۱۱، Pantouvakis و Maravas تئوری مجموعه فازی را با RSM ترکیب کرده و از آن برای ارائه یک برنامه زمانبندی فازی (F-RSM) برای تامین و حفظ پیوستگی منابع مصرفی بین فعالیت‌های مشابه در واحدهای مختلف بهره جستند [۲۰]. Fan, Sun, Wan نیز در سال ۲۰۱۲ با استفاده از منطق نرم، یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های پروژه و کوتاه کردن مدت زمان ساخت در پروژه‌های تکراری، بر اساس تغییر ترتیب کاری بین نواحی مختلف، ارائه دادند [۲۱].

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل ارائه شده توسط Ohsato و Long و بهره‌گیری از الگوریتم NSGAI به بهینه‌سازی زمان و هزینه در پروژه‌های راهسازی پرداخته می‌شود. و یک مثال به عنوان مطالعه موردی، با دو رویکرد قطعی و فازی بررسی می‌شود. نکته قابل توجه در این پژوهش این است که با بکارگیری الگوریتم NSGAI مجموعه‌ای از پاسخهای بهینه یا نزدیک به بهینه، در اختیار تصمیم‌گیران پروژه قرار می‌گیرد و قدرت انتخاب

دلیل تمام نشدن بسیاری از فعالیت‌ها در یک بخش، مثل اتمام یک پل یا آبرو، فعالیت‌های بعدی شامل روسازی و اجرای رویه نمی‌تواند در آن بخش شروع شود و این در حالی است که این فعالیتها در بخش قبل به اتمام رسیده‌اند. بنابراین منابع و گروه‌های کاری این فعالیتها، باید در بخش مورد نظر منتظر باقی بمانند تا فعالیت‌های پیش‌نیاز آنها به پایان برسد. از اینرو کاهش و حذف انقطاع کاری اهمیت زیادی داشته و موجب صرفه‌جویی‌های قابل توجهی در زمان و هزینه کلی پروژه می‌شود [۴]. این بدان معنی است که برنامه‌ریزی در این نوع پروژه‌ها باید بگونه‌ای انجام شود که ضمن کاهش زمان و هزینه کلی پروژه، مدت زمان بیکاری منابع و اتلاف آنها نیز به حداقل برسد. تاکنون روشهای مختلفی برای اینکار ارائه شده است، که از جمله آن می‌توان به روش CPM اشاره کرد. اما به دلیل ناکارآمدی و ناتوانی آن در ارائه برنامه مناسب [۷ و ۵]، روشهای دیگری از جمله تکنیک خط تعادل (LOB) در سال ۱۹۷۴ [۸]، روش زمانبندی خطی (LSM) [۲] در سال ۱۹۸۱ [۹]، روش زمانبندی تکراری (RSM) [۳] در سال ۱۹۹۸ [۱۰]، روش برنامه‌ریز پروژه‌های تکراری (RPP) [۴] در سال ۲۰۰۲ [۱۱]، ارائه شد. و پس از آن روش برنامه‌نویسی خطی (LP) [۱۲] در سال ۱۹۸۳ و ۱۹۹۰ [۱۲]، مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۸۰، Selinger، روش برنامه‌نویسی پویا (DP) [۱۳] را ارائه داد. Caselton و Russel این تحقیقات را با ارائه یک مدل پویای N مرحله‌ای ادامه دادند [۱۴]. در سال ۱۹۹۳ EL-Rayes و Moselhi مدلی بر مبنای DP و با لحاظ فاکتور هزینه در فرآیند بهینه‌سازی ارائه کردند [۱۵]. Ipsilandis در سال ۲۰۰۷ یک موازنه بین هزینه‌های ناشی از تاخیرهای پروژه و هزینه‌های مربوط به وقفه‌های کاری منابع را با ارائه یک مدل برنامه‌نویسی خطی چند منظوره برای زمانبندی پروژه‌های خطی-

1. Line Of Balance(LOB)
2. Linear Scheduling Method(LSM)
3. Repetitive Scheduling Method(RSM)
4. Repetitive Project Planner
5. Linear Programming(LP)
6. Dynamic Programming(DP)

گام ۸- تولید جمعیت Q_{t+1} : مجدداً با بکار بستن استراتژی انتخاب دو تایی تورنمنت، اپراتور تقاطع و جهش بر روی جمعیت P_{t+1} اعمال شده و جمعیت Q_{t+1} تولید می‌شود. و این فرآیند تا تحقق شرایط خاتمه ادامه می‌یابد [۲۲ و ۲۳].

۳- تئوری فازی

اصولاً تئوری فازی در شرایطی بکار برده می‌شود که به علت دقیق و قطعی نبودن اطلاعات نمی‌توان از مفاهیم ریاضیات کلاسیک بهره جست. در این پژوهش به دلیل لحاظ شرایط عدم قطعیت در مسئله، مفاهیم فازی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷]. برای نمایش اعداد از تابع عضویت مثلثی و برای مقایسه اعداد فازی از روش Soper و Okada [۲۸ و ۲۹ و ۳۰] استفاده شده است.

۴- عملکرد روش و فرآیند اجرای الگوریتم

در پروژه‌های بزرگ، مانند پروژه‌های راهسازی، که دارای فعالیت‌های متعدد است و تخصیص‌های متنوعی را می‌طلبد، واگذاری این فعالیتها به پیمانکاران جزء امری اجتناب‌ناپذیر است، معمولاً برای اجرای هر فعالیت، گزینه‌های مختلفی از پیمانکاران جزء وجود دارند که با زمان‌ها و هزینه‌های متفاوت می‌توانند آن فعالیت را انجام دهند. انتخاب از بین گزینه‌های مختلف و ترکیب و چیدمان آنها در کنار یکدیگر، زمان و هزینه کلی پروژه را تعیین خواهد کرد. پس از انتخاب گزینه مناسب از منابع و گروه‌های کاری (پیمانکاران)، آنها باید در طول پروژه از یک واحد به واحد دیگر حرکت کنند و فعالیت مشابهی را در تمام واحدها انجام دهند. برای شروع هر فعالیت در هر واحد دو شرط لازم است: اولاً این فعالیت در واحد قبلی به اتمام رسیده باشد. ثانیاً تمام فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت مزبور، در واحد مورد نظر انجام شده باشند. عملکرد روش ارائه شده در این تحقیق، به این صورت است که ابتدا گزینه مناسب برای انجام هر فعالیت انتخاب می‌شود و سپس بر اساس رابطه بین فعالیت‌ها و زمان و هزینه اجرای هر

آنها را در گزینش پاسخ مناسب بر اساس شرایط موجود، افزایش می‌دهد.

۲- الگوریتم ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی

غیر مغلوب^۱ NSGAI

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، که همزمان چند تابع هدف ماکزیمم‌سازی یا مینیمم‌سازی می‌شوند، یکی از پرکاربردترین روش‌ها، استفاده از رویکرد رتبه‌بندی غیرپست (NSGAI) و ارائه مجموعه جواب پارتو است.

فرآیند این الگوریتم به صورت زیر است.

گام ۱- تولید جمعیت اولیه: جمعیت تصادفی P با N کروموزوم تولید می‌گردد.

گام ۲- رتبه‌بندی جواب‌ها: تمامی جواب‌ها به وسیله الگوریتم Fast Non Dominated به سطوح غیرمغلوب مختلف تخصیص می‌یابند.

گام ۳- ارزیابی: به هر جواب مقدار برازندگی برابر با سطح غیرمغلوب آن جواب تخصیص داده می‌شود.

گام ۴- تولید جمعیت Q : با استفاده از استراتژی انتخاب دو تایی تورنمنت و اپراتورهای تقاطع و جهش جواب‌هایی که جمعیتی به نام Q را با N کروموزوم تشکیل می‌دهند، تولید می‌شود.

گام ۵- ترکیب جمعیت والد P و جمعیت Q : از ترکیب جمعیت والد P و جمعیت Q جمعیت جدید به نام R تشکیل می‌شود، که شامل $2N$ کروموزوم است.

گام ۶- رتبه‌بندی جواب‌های جمعیت R_t : در این مرحله مرتبه همه جواب‌های این جمعیت جدید تعیین می‌گردد و تمام جواب‌ها به سطوح غیرمغلوب تخصیص می‌یابند.

گام ۷- تولید جمعیت P_{t+1} : جمعیت جدید P_{t+1} برای تکرار بعدی تولید می‌شود. برای تولید جمعیت P_{t+1} ابتدا از اولین سطح غیرمغلوب جمعیت R_t استفاده می‌گردد، و در صورت لزوم جواب‌های سطوح دیگر نیز بکار برده می‌شوند.

1. Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

فعالیت، زمان کلی اتمام پروژه و هزینه نهایی آن محاسبه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی به لحاظ توانمندی خاصی که دارد و تکنیکی که در آن بکار برده شده است، قادر است در چینش فعالیتها، روشی را اعمال کند که انقطاع کاری و بیکاری منابع به حداقل میزان ممکن کاهش پیدا کند. البته این به معنای پیوستگی مطلق نیست. زیرا انقطاع کاری صفر در مواردی منجر به افزایش زمان و هزینه پروژه خواهد شد، که این خود، با اهداف تفکر ناب و اصول مدیریت تناقض دارد. محاسبه زمان و هزینه نهایی به دفعات توسط الگوریتم تکرار می‌شود، این مراحل تا جایی ادامه می‌یابد که شرایط خاتمه عملیات تحقق پیدا کند. معیار توقف الگوریتم، ماکزیمم تعداد تکرارهاست. تعداد دفعات تکرار فرایند، می‌تواند بر اساس نوع و پیچیدگی مسئله توسط کاربر تعیین شود. در این مثال به دلیل کوچکی ابعاد مسئله، حداکثر ۱۰۰ تکرار لحاظ شده است. در پایان این مرحله مجموعه‌ای از پاسخهای بهینه به عنوان مجموعه جوابهای پارتو ارائه می‌شود، که طیف نسبتاً گسترده‌ای از جوابهای مختلف را در بر می‌گیرد و تصمیم‌گیران پروژه قادر خواهند بود مناسب‌ترین گزینه را بر اساس شرایط و اولویتهای خود انتخاب کنند. نکته قابل توجه این است که در عموم پروژه‌های عمرانی به دلیل عدم قطعیت‌هایی که در اجرای پروژه‌ها وجود دارد، مانند شرایط آب‌وهوایی، مهارت‌های کارگران، خطاهای اجرایی، خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات، تغییر قیمت مصالح و ... معمولاً نمی‌توان زمان و هزینه اجرای فعالیت-ها را دقیقاً تعیین نمود. در این شرایط می‌توان اطلاعات و داده‌های غیرقطعی را در قالب اعداد فازی بیان کرد.

۴-۱- مدل ریاضی مسئله

مدل مطرح شده در این پژوهش، از مدل ارائه شده توسط Long و Ohsato در سال ۲۰۰۹ اقتباس شده است [۵]. این مدل برای یک پروژه با M فعالیت که بصورت متناوب در

1. Unit
2. Rate
3. Activities allow interruption
4. Activities don't allow interruption

واحد از فعالیت i برای گزینه k ام، در صورتی که آن گزینه انتخاب شود.

در واقع می‌توان گفت d_i به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود و $C_{i,j}, D_{i,j}, C_i$ تابعهایی از d_i هستند. همچنین $S_{i,j}$ و $F_{i,j}$ نیز به مقادیر $D_{i,j}$ بستگی خواهند داشت. در مدل مذکور C_0 : هزینه اولیه، B : هزینه غیر مستقیم روزانه، $W_{i,j}$: مقدار کار فعالیت i در واحد j و $lag_{i,i}$: زمان تاخیر بین فعالیت پیش نیاز t و فعالیت i ، به عنوان پارامترهای مسئله هستند.

همچنین بر اساس رویکرد فازی، با در نظر گرفتن مقادیر d_i و c_i به عنوان اعداد فازی با تابع عضویت مثلثی، مقادیر lag ، $F_{i,j}$ ، $S_{i,j}$ ، $C_{i,j}$ ، $D_{i,j}$ نیز تبدیل به مقادیر فازی خواهند شد. اما مقادیر کاری ($W_{i,j}$)، هزینه اولیه (C_0) و هزینه بالاسری روزانه (B) همچنان به عنوان مقادیر قطعی در نظر گرفته می‌شوند. با لحاظ این تغییرات مدل قطعی مسئله به یک مدل فازی تبدیل می‌شود.

۵- مطالعه موردی

در پروژه‌های راهسازی، عموماً ابنیه، از جمله پل دارای ماهیت تکرار شونده است. بنابراین در این پژوهش برای ارزیابی و سنجش عملکرد برنامه، از مثال یک پل بتنی سه دهانه استفاده می‌شود که توسط Long و Ohsato ارائه شده است. دلیل استفاده از این مثال مقایسه روش ارائه شده در این تحقیق با روش محققان مذکور و اثبات برتری‌های این روش، نسبت به روش قبلی است. این مثال یکبار با رویکرد قطعی و یکبار با رویکرد فازی حل شده است. این پل شامل پنج فعالیت است که در چهار بخش تکرار می‌شود. هر فعالیت توسط یک گروه که از یک مکان به مکان دیگر حرکت می‌کند، بدون تاخیر زمانی (lag) انجام می‌شود. و همه فعالیت‌های این پروژه از نوع قابل انقطاع (B) هستند. برای انجام هر فعالیت چندین گزینه از گروه‌های کاری (منابع) وجود دارد. زمان و هزینه تکمیل هر واحد از هر فعالیت معین به صورت یک زوج

۲- فعالیت پیش‌نیاز i یعنی t در واحد j تمام شده باشد. در صورت وجود زمان تاخیر (lag) می‌توان این زمان را نیز به زمان t اضافه کرد.

$$\begin{aligned} \text{MIN } T_p \\ T_p = \text{Max}(F_{i,j}) = \text{Max}(S_{i,j} + D_{i,j}) \\ i = 1, 2, \dots, M \quad j = 1, 2, \dots, Q \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{MIN } C_p \\ C_p = C_D + C_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q C_{i,j} + (C_0 + B \cdot T_p) \end{aligned} \quad (2)$$

Subject to:

$$D_{i,j} = d_i \cdot W_{i,j} \quad (3)$$

$$C_{i,j} = c_i \cdot W_{i,j}$$

$$d_i = d_i^k \cdot B_i^k \quad \sum_{k=1}^K B_i^k = 1 \quad (4)$$

$$c_i = c_i^k \cdot B_i^k \quad \sum_{k=1}^K B_i^k = 1$$

$$S_{i,j} + D_{i,j} + lag_{t,i} \leq S_{i,j} \quad t \in \{P\} \quad (5)$$

If activity : type A (6)

$$S_{i,j} + D_{i,j} = S_{i,j+1}$$

$$F_{i,j} = S_{i,j} + D_{i,j}$$

If activity : type B (7)

$$S_{i,j} + D_{i,j} \leq S_{i,j+1}$$

$$F_{i,j} = S_{i,j} + D_{i,j}$$

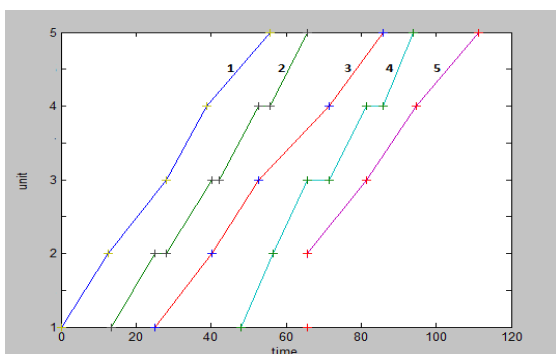
در این مدل، T_p : زمان کل پروژه، C_p : هزینه کل پروژه، C_D : هزینه مستقیم، C_1 : هزینه غیر مستقیم است. d_i : زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i ، $D_{i,j}$: زمان مورد نیاز برای تکمیل فعالیت i در واحد j ، C_i : هزینه مستقیم مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i ، $C_{i,j}$: هزینه مورد نیاز برای تکمیل فعالیت i در واحد j ، $S_{i,j}$: زمان شروع فعالیت i در واحد j ، $F_{i,j}$: زمان پایان فعالیت i در واحد j ، B_i^k : عدد باینری ۰ یا ۱ برای انتخاب گزینه k ام، در صورتی که آن گزینه انتخاب شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است. d_i^k : زمان مورد نیاز برای تکمیل هر واحد از فعالیت i برای گزینه k ام، در صورتی که آن گزینه انتخاب شود. c_i^k : هزینه مورد نیاز برای تکمیل هر

در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به فعالیتها و گروههای کاری در جدول ۱ آمده است.

مرتب برای هر گروه کاری مشخص است. هزینه مستقیم روزانه برای این پروژه $5000\$/d$ و هزینه اولیه $120000\ \$$

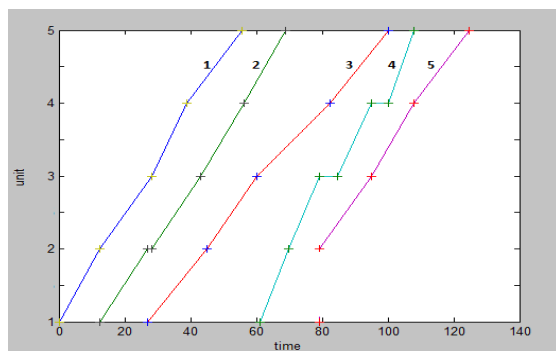
جدول ۱- اطلاعات پروژه پل بتنی سه دهانه

فعالیت	W_{ij}				$d_i(\text{day/work unit}), c_i(\text{usd/work unit})$			
	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴
خاکبرداری	۶۰۰	۷۵۰	۵۲۰	۸۰۰	(۰/۰۲۰۸و۵۰)	-	-	-
فونداسیون	۹۲۰	۹۶۰	۸۴۰	۸۰۰	(۰/۰۱۲۵و۸۰)	(۰/۰۱۵۶و۷۰)	(۰/۰۲۰۸و۶۰)	-
ستون	۱۴۵۰	۱۲۰۰	۱۸۰۰	۱۴۰۰	(۰/۰۱۲۵و۷۰)	(۰/۰۱۰۴و۸۰)	(۰/۰۰۸۹و۱۰۰)	-
تیر	۴۸۰	۵۲۰	۵۷۰	۴۵۰	(۰/۰۱۷۸و۶۵)	(۰/۰۲۰۸و۷۰)	(۰/۰۲۵۰و۸۰)	(۰/۰۳۱۲و۹۰)
دال	۰	۱۱۴۰	۹۴۰	۱۲۰۰	(۰/۰۱۳۸و۵۵)	(۰/۰۱۵۶و۶۵)	-	-



شکل ۳- نمودار گرافیکی زمان انجام فعالیتها در واحدهای متوالی

برای زمان ۱۱/۲۷ روز

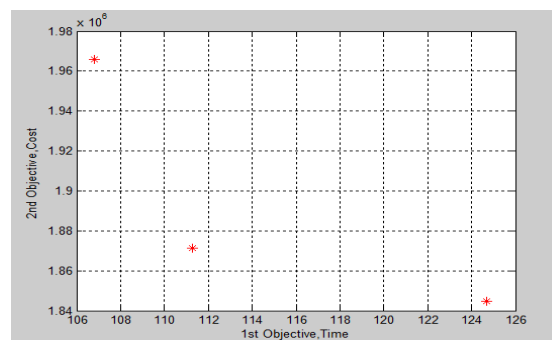


شکل ۴- نمودار گرافیکی زمان انجام فعالیتها در واحدهای متوالی

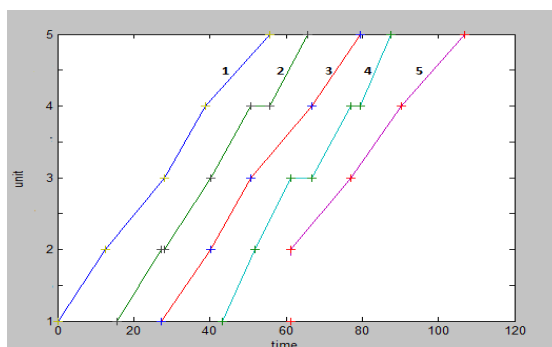
برای زمان ۱۲/۷ روز

در شکل‌های ۲ تا ۴، نمودارها به ترتیب، روند انجام فعالیت‌های ۱ تا ۵ را در واحدهای اول تا چهارم نشان می‌دهد. پیوستگی نمودار نشانگر پیوستگی انجام آن فعالیت در تمام واحدها و شکستگی در نمودار نشانگر وجود انقطاع کاری است.

با اجرای الگوریتم NSGAI، با ویژگی‌های: تعداد تکرار: ۱۰۰، تعداد جمعیت اولیه: ۲۰، احتمال (نرخ) تلفیق: ۰/۷، احتمال (نرخ) جهش: ۰/۴، نحوه انتخاب والدین: انتخاب رقابتی (Tournament Selection)، نوع عملیات تلفیق: تلفیق تک‌نقطه‌ای، نتایج زیر به دست آمده است.



شکل ۱- نتیجه اجرای الگوریتم NSGAI برای داده‌های قطعی



شکل ۲- نمودار گرافیکی زمان انجام فعالیتها در واحدهای متوالی

برای زمان ۱۰۶/۸۱ روز

بنابراین آنها می‌توانند بر اساس شرایط خود و اولویت‌های مورد نظرشان، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمایند. یک معیار برای ارزیابی و سنجش درستی پاسخ‌های بدست آمده، مقایسه آنها با پاسخ‌های تحقیقات گذشته است. با مقایسه این جواب‌ها با جواب‌های بدست آمده در روش Long و Ohsato می‌توان دریافت پاسخ‌های اول و سوم انطباق کامل با پاسخ‌های Long و Ohsato دارد. جواب‌های حاصله علاوه بر اینکه صحت و درستی روش پیشنهاد شده در حل مسئله را نشان می‌دهد، مزیت دیگر این روش را بر روش پیشنهاد شده Ohsato و Long آشکار می‌سازد، و آن اینکه این روش قادر است تمامی جواب‌های مناسب و برتر موجود را با یکبار اجرای برنامه و در مدت بسیار کوتاه چند ثانیه‌ای در اختیار مجری قرار دهد. این جواب‌ها طیف نسبتاً گسترده‌ای را بر اساس وزن‌های مختلفی که به‌طور خودکار به توابع هدف داده می‌شود، ارائه می‌کند، این در حالیست که در روش Ohsato و Long در هر مرحله باید وزن متغیرهای زمان و هزینه بر اساس اولویت‌های موجود تنظیم شود.

البته باید توجه داشت که در این مسئله، به دلیل محدود بودن تعداد فعالیت‌ها و گزینه‌های انتخابی، جواب‌ها از تنوع زیادی برخوردار نیستند. در صورتی که ابعاد مسئله گسترده‌تر باشد، می‌توان انتظار داشت که گزینه‌های متنوع و متعددی از پاسخ‌های نهایی در اختیار مجری قرار گیرد.

برای حل مسئله با رویکرد فازی، زمان و هزینه هر فعالیت در هر گزینه، از یک عدد قطعی به یک عدد فازی مثلثی تبدیل شده است. مقدار میانی اعداد فازی، برابر همان مقدار قطعی آنهاست.

در این مثال با تغییر مقادیر قطعی گزینه‌ها به مقادیر فازی، جدول به صورت زیر تبدیل می‌شود.

Long و Ohsato با استفاده از الگوریتم ژنتیک و وزن‌دهی به توابع هدف بر اساس میزان اولویت، زمان ۱۰۶/۸ روز با ۱۳/۹۲ روز انقطاع کاری را محاسبه کردند. آنها همچنین با اولویت دادن به تابع هزینه و در نظر گرفتن شرایطی که هزینه پروژه حداقل مقدار ممکن را داشته باشد، زمان ۱۲۴/۷ روز و هزینه ۱۸۴۴۶۱۲ دلار را به دو روش برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک بدست آوردند [۵].

جدول ۲- مجموعه جواب‌های پارتو

ردیف	زمان	هزینه	زمان بیکاری منابع	گزینه‌های انتخابی برای انجام فعالیتها
۱	۱۰۶/۸۱	۱۹۶۵۹۰۰	۱۳/۹۲	۱ و ۳ و ۱ و ۱
۲	۱۱۱/۲۷	۱۸۷۱۲۰۰	۱۸/۱۶	۱ و ۲ و ۱ و ۱
۳	۱۲۴/۷۰	۱۸۴۴۶۰۰	۱۱/۹۲	۱ و ۱ و ۲ و ۱

بر اساس نتایج جدول ۲، همانطور که ملاحظه می‌شود برای این مسئله سه پاسخ بهینه، تحت عنوان جواب‌های پارتو بدست آمده است. پاسخ پیشنهادی اول در بین پاسخ‌های ارائه شده، دارای کمترین زمان و بیشترین مقدار هزینه و پاسخ پیشنهادی سوم دارای بیشترین زمان و کمترین هزینه است. زمان و هزینه پاسخ پیشنهادی دوم مقداری ما بین پاسخ‌های اول و سوم دارد، اما مدت زمان انقطاع کاری برای پاسخ سوم کمترین مقدار و برای پاسخ دوم بیشترین مقدار و برای پاسخ اول مقداری مابین پاسخ دوم و سوم است. این اختلاف، از انتخاب گزینه‌های متفاوت برای اجرای فعالیت‌های مختلف ناشی می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت با انتخاب ترکیب‌های متفاوتی از گزینه‌های موجود برای انجام فعالیت‌ها، مقادیر متفاوتی از زمان و هزینه اتمام پروژه و مدت زمان انقطاع کاری بدست خواهد آمد. و به این ترتیب گزینه‌های مختلفی برای مدیران و تصمیم‌گیران پروژه وجود خواهد داشت.

جدول ۳- اطلاعات فازی شده مثال پل بتنی سه‌دهانه

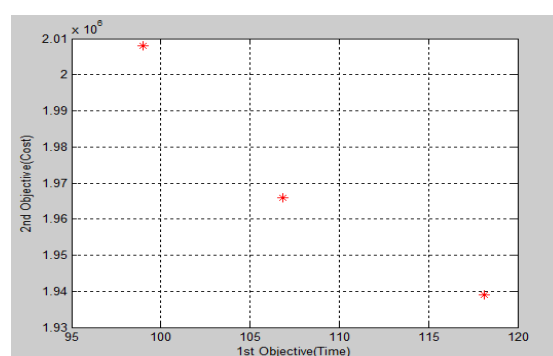
گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴
(۰/۰۱۸۵ و ۵۳)، (۰/۰۲۰۸ و ۵۰)، (۰/۰۲۵۰ و ۴۶)	-	-	-

(۰/۰۱۱۷و۸۵)،(۰/۰۱۲۵و۸۰)،(۰/۰۱۳۳و۷۵)	(۰/۰۱۳۸و۷۲)،(۰/۰۱۵۶و۷۰)،(۰/۰۱۶۶و۶۶)	(۰/۰۱۹۲و۶۳)،(۰/۰۲۰۸و۶۰)،(۰/۰۲۳۸و۵۸)	-
(۰/۰۱۱۹و۷۴)،(۰/۰۱۲۵و۷۰)،(۰/۰۱۳۵و۶۴)	(۰/۰۱۰۰و۸۵)،(۰/۰۱۰۴و۸۰)،(۰/۰۱۱۱و۷۷)	(۰/۰۰۸۴و۱۰۶)،(۰/۰۰۸۹و۱۰۰)،(۰/۰۰۹۳و۹۵)	-
(۰/۰۱۶۶و۶۷)،(۰/۰۱۷۸و۶۵)،(۰/۰۲۰۰و۶۲)	(۰/۰۲۰۰و۷۶)،(۰/۰۲۰۸و۷۰)،(۰/۰۲۵۰و۶۶)	(۰/۰۲۱۷و۸۴)،(۰/۰۲۵۰و۸۰)،(۰/۰۲۷۷و۷۸)	(۰/۰۲۶۳و۹۴)،(۰/۰۳۱۲و۹۰)،(۰/۰۳۵۷و۸۴)
(۰/۰۱۳۹و۶۰)،(۰/۰۱۳۸و۵۵)،(۰/۰۱۴۹و۴۹)	(۰/۰۱۴۲و۶۹)،(۰/۰۱۵۶و۶۵)،(۰/۰۱۶۶و۶۰)	-	-

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدلی برای بهینه‌سازی زمانبندی، در پروژه‌های تکرارشونده، مانند راهسازی ارائه شده، که مبتنی بر یکی از اصول تفکر ناب، و حذف یکی از مصادیق اتلافها (مودا) است. نکته قابل توجه در این روش کاربرد تکنیک مناسب در انتخاب و ترکیب و چیدمان درست گزینه‌ها، و در نهایت تنظیم برنامه زمانبندی برای کاهش مدت زمان توقف منابع در بین واحدهاست. در واقع به این ترتیب یکی از مصادیق مودا کاهش یافته و در صورت امکان حذف می‌شود. کاهش و حذف مدت زمان انتظار و بیکاری منابع باعث صرفه‌جویی‌های زیادی در زمان و هزینه کلی پروژه‌ها می‌شود. میزان این صرفه‌جویی در پروژه‌های بزرگ مانند راهسازی به دلیل حجم بالای منابع، ماشین‌آلات و تجهیزات بسیار قابل توجه خواهد بود. ویژگی برتر این روش در آن است که، با استفاده از رویکرد NSGAI در حل مسائل چند هدفه، طیفی از پاسخ‌های بهینه، به کاربر پیشنهاد می‌شود. و تصمیم‌گیران پروژه قادر خواهند بود از میان راه‌حل‌های ارائه شده، گزینه مناسبی را که بیشترین هماهنگی را با شرایطشان دارد، انتخاب کنند. مزیت دیگر روش ارائه شده، بهره‌مندی از رویکرد فازی در حل مسائل زمانبندی است. این موضوع از این جهت دارای اهمیت است که، اغلب پروژه‌های عمرانی به دلیل ماهیتشان با عدم قطعیت‌هایی مواجه هستند و برای تحقق شرایط واقعی ناگزیر باید بتوان از همین اطلاعات تقریبی و غیر قطعی استفاده کرد. قابلیت روش ارائه شده در استفاده از اطلاعات فازی برای حل مسئله زمانبندی، امکان نزدیک شدن به حالت واقعی را برای کاربر فراهم می‌کند. در نهایت، برای حصول اطمینان

با اجرای الگوریتم NSGAI، یک زمان فازی مثلثی به عنوان زمان کلی اتمام پروژه به دست آمده است، که حدود بالا و پایین آن به ترتیب ۱۱۸/۱۱ و ۹۹/۰۱ و حد میانی آن ۱۰۶/۸۱ با درجه عضویت ۱ می‌باشد.



شکل ۵- نتیجه اجرای الگوریتم NSGAI برای داده‌های فازی

البته علی‌رغم انتظاری که از الگوریتم NSGAI، برای ارائه جواب‌های متعدد به عنوان مجموعه جواب پارتو وجود دارد، تنها یک جواب فازی بدست آمده است، دلیل آن ابعاد کوچک مسئله است. به دلیل تعداد محدود فعالیت‌ها و گزینه‌ها، جواب‌ها تنوع زیادی ندارند و تنها یک جواب غیرمغلوب فازی برای این مسئله بدست آمده است. در پاسخ حاصل شده با افزایش زمان، هزینه کاهش می‌یابد. اما هیچ قانون کلی در مورد ارتباط زمان کلی پروژه و مدت زمان انقطاع کاری وجود ندارد و این موضوع بیشتر به انتخاب گزینه‌ها و ترکیب و چیدمان آنها وابسته است.

جدول ۴- جوابهای به دست آمده برای شرایط فازی

زمان فازی	۹۹/۰۱، ۱۰۶/۸۱، ۱۱۸/۱۱
هزینه فازی	۲۰۰۰۰۰۰، ۱۹۶۵۹۰۰، ۱۹۳۹۱۰۰
زمان توقف و بیکاری منابع	۱۱/۹۳، ۱۳/۹۲، ۲۲/۵۲

می‌رساند. و بنابراین می‌توان آن را در کنار سایر روشهای نوین برنامه‌ریزی و زمانبندی در پروژه‌های تکرارشونده مورد استفاده قرار داد.

از کارایی روش پیشنهاد شده، مثالی ارائه و با دو رویکرد قطعی و فازی حل شده و نتایج قابل قبولی در مقایسه با پاسخهای محاسبه شده توسط محققان پیشین به دست آمده است، که عملکرد مناسب و کارآیی این روش را به خوبی نشان می‌دهد و ویژگی‌های مثبت آن را به اثبات

۷- مراجع

- [۱] بانکی، م، ارومچی، ه، زویچی، الف، (۱۳۸۸) "ناب سازی ساخت‌وساز فلسفه نوین مدیریت طرح‌های عمرانی"، دومین کنفرانس مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۲] ووماک، ج، دانیل، تی، (۱۳۸۷) "تفکر ناب، ریشه کن کردن اتلاف و ارزش آفرینی در سازمانها"، ترجمه راد نژاد، الف، نشر آموزه، ویرایش ۲۰۰۳، چاپ دوم.
- [۳] بانکی، م، زویچی، الف، (۱۳۸۸) "نقدی بر برنامه ریزی رایج در طرح‌های عمرانی با استفاده از فلسفه ساخت‌وساز ناب"، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه.
- [۴] مرتهب، م، توسلی، ع، (۱۳۸۷) "بررسی بکارگیری روش ساخت ناب در ایران و پیشنهاد نحوه عملکرد کارگاهی با در نظر گرفتن این روش"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه.
- [5] Long, L.D., & Ohsato, A. (2009), "A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects". *Journal of Automatic in Construction*, 18, PP 499-511.
- [6] Ipsilandis, P.G. (2007), "Multi objective linear programming model for scheduling linear repetitive project". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 133(6), PP 417-424.
- [7] Carr, R.I., & Meyer, W.L. (1974), "Planning construction of repetitive building units". *Journal of Construction Division, ASCE*, 100(3), PP 403-412.
- [8] Suhail, S.A., & Neale, R.H. (1994), "CPM/LOB: new methodology to integrate CPM and line of balance". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 120(3), PP 667-684.
- [9] Johnston, D.W. (1981), "Linear scheduling method for highway construction". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 107(CO2), PP 247-260.
- [10] Harris, R.B., & Ioannou, P.G. (1998), "scheduling projects with repeating activities". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 124(4), PP 269-278.
- [11] Yang, I. (2002). "Repetitive project planner resource-driven scheduling for repetitive construction projects", PH.D Dissertation, University of Michigan, Ann, Arbor, MI.
- [12] Perera, S. (1980), "Linear programming solution to network compression". *Journal of Construction Division, ASCE*, 106(CO2), PP 315-326.
- [13] Selinger, S. (1980), "Construction planning for linear projects". *Journal of Construction Division, ASCE*, 106(CO2), PP 195-205.
- [14] Caselton, W.F., & Russel, A.D. (1988), "Extensions to liner scheduling optimization". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 114(1), PP 36-52.
- [15] Moselhi, O., & EL-Rayes, K. (1993), "Scheduling of repetitive projects with cost optimization". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 119(2), PP 681-697.
- [16] Hegazy, T., & Kamarah, E., "Efficient repetitive scheduling for high-rise construction". *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 134(4), (2008), PP 253-264.
- [17] Leu, S. & Hwang, S., "GA-based resource-constrained flow-shop scheduling model for mixed precast production". *Journal of Automation in Construction*, 11, (2002), PP 439-452.

- [18] Hyari,K &EL-Rayes,K,"Optimal planning and scheduling for repetitive construction projects". Journal of Construction Engineering and Management,ASCE,22(1,(2006),PP 11-19.
- [19] Cho,K, Hony,T & Hyun,C,"Integrated schedule and cost model for repetitive construction process".Journal of Construction Engineering and Management,ASCE 26(2),(2010),PP 78-88.
- [20] Maravas,A, & Pantouvakis,J,"Fuzzy repetitive scheduling method for projects with repeating activities".Journal of Construction Engineering and Management,ASCE ,137(7),(2011),PP 561-564.
- [21] Fang,Su, Sun,K, & Wang,Y. (2012),"GA optimization model for repetitive projects with soft logic", Journal of Automation in Construction,21, PP 253-261.
- [22] Eshtehardian,E. Afshar,A, & Abbasnia,R. (2009),"Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time cost trade-off problem". Journal of Automation in Construction,18, PP 692-701.
- [23] Zahraie,B,&Tavakolan,M. (2009),"Stochastic time-cost resource utilization optimization using nondominated sorting genetic algorithm and discrete fuzzy sets", Journal of Construction Engineering and Management,ASCE ,135(11), PP 1162-1171.
- [۲۴] شوندی، ح. (۱۳۸۹) "نظریه مجموعه‌های فازی و کاربرد آن در مهندسی صنایع و عمران"، انتشارات گسترش علوم پایه.
- [۲۵] کیا، سید مصطفی، (۱۳۸۹) "منطق فازی در MATLAB"، خدمات نشر کیان رایانه سبز.
- [26] Bellman,R.E,&Zadeh,L.A.(1970),"Decision-making in a fuzzy environment",Management Science,171,PP 41-164.
- [27] Ke,H, & Liu,B,"fuzzy project scheduling and its hybrid intelligent algorithm". (2010), Journal of Applied mathematical modeling,34, PP 301-308.
- [28] Okado,S, & Soper,T,"A shortest path problem on a network with fuzzy arc lengths". (2000), Journal of Fuzzy Sets and Systems,109, PP 129-140.
- [29] Mahdavi,I.Nourifar,R.Heidarzade,A,& Mahdavi-Amiri,N. (2009), "A dynamic programming approach for finding shortest chains in a fuzzy network", journal of Applied Soft Computing,9 (2), PP 503-511.
- [30] Okado,S, & Soper,T. (2000),"A shortest path problem on a network with fuzzy arc lengths". Journal of Fuzzy Sets and Systems,109, PP 129-140.