نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحه ۶۰ تا ۷۴

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

# به کارگیری روش زنجیره بحرانی در مدیریت پروژه‌های خطی-تکراری نظیر راهسازی با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و ریسک

محمدجواد طاهری امیری [۱]، فرشیدرضا حقیقی [۲*]، احسان اله اشتهاردیان [۳]، میلاد همتیان [۴]، مائده جواهری بارفروشی [۵]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۲- استادیار گروه عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۳- استادیار گروه مدیریت پروژه و ساخت دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴-دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه علوم وفنون مازندران، بابل، ایران
۵-دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

## چکیده

*امروزه دیدگاه‌های سنتی به تنهایی قادر به پاسخگویی نیازهای مدیریت پروژه‌های عمرانی نیست. بنابراین استفاده از رویکردهای نوین مدیریتی می‌تواند تا حد زیادی راهگشا باشد. اولین گام برای رسیدن به این هدف شناخت انواع پروژه‌ها از نظر نوع خطی یا شبکه‌ای بودن، تفاوت مدیریت یک پروژه با مدیریت چند پروژه و روش‌های مدیریت و اجرای پروژه است. در این تحقیق از روش مدیریت زنجیره بحرانی به جای روش مسیر بحرانی برای ارائه برنامه زمانی عملی‌تر به کار گرفته شده است. برای غلبه بر عدم قطعیت، روش ارائه شده از اعداد فازی بر حسب زمان قطعی انجام فعالیت و دانش کارشناسان، برای مدل کردن عدم قطعیت در مدت زمان فعالیت‌ها استفاده می‌کند. روش ارائه شده، به‌جای جایگزین کردن برنامه زمان‌بندی قطعی اولیه توسط برنامه زمانی مبتنی بر مجموعه فازی، باز هم برنامه زمانی قطعی را نگه می‌دارد و به سادگی بافر پروژه را برای مقابله با عدم قطعیت می‌افزاید. اندازه بافر پروژه با استفاده از محاسبات روی اعداد فازی تعیین می‌شود. همچنین به منظور غلبه بر ریسک در مطالعه موردی این پژوهش، یک ضریب ریسک متوسط را برای پاسخگویی به ریسک‌ها برای بافر پروژه در نظر می‌گیرد. به هر حال تغییر ضریب ریسک در حالت‌های مختلف ریسک بالا، متوسط و پایین تأثیر کمی روی اندازه بافر خواهد گذاشت. همچنین در این تحقیق به منظور ارزیابی مدل ارائه شده در این تحقیق، چند پروژه خطی-تکراری راهسازی به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و برنامه‌ریزی شده است.*

**کلمات کلیدی: مدیریت زنجیره بحرانی، زمان فازی، زمان‌بندی چند پروژه‌ای، اندازه بافر، عدم قطعیت، ریسک**

| سابقه مقاله: | | | | | شناسه دیجیتال: |
|---|---|---|---|---|---|
| دریافت | بازنگری | پذیرش | انتشار آنلاین | چاپ | 10.22065/jsce.2018.121553.1492 |
| ۱۳۹۶/۱۲/۱۴ | ۱۳۹۷/۰۴/۱۸ | ۱۳۹۷/۰۶/۱۱ | ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ | ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ | doi: 10.22065/jsce.2018.121553.1492 |

*نویسنده مسئول: فرشیدرضا حقیقی

پست الکترونیکی: Haghighi@nit.ac.ir

# Implementing the critical chain method for managing linear-repetitive projects such as road construction, taking into account the conditions of uncertainty and risk

**Mohammad Javad Taheri Amiri[1] , Farshidreza Haghighi[2], Ehsan Eshtehardian[3], Milad Hematian[4], Maedeh Javaheri Barforooshi**

*1- Ph.D. Candidate of Construction Engineering and Management, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran*
*2- Assistant professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran*
*3- Assistant Professor, Department of Project and Construction Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran*
*4-Ph.D student in industrial engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran*
*5- Ph.D. Candidate of Construction Engineering and Management, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran*

## ABSTRACT

*Nowadays traditional point of view is not able to meet the needs of construction project management. Therefore, the use of modern management approaches can be greatly helpful. The first step to reach this goal is to identify and verification variety of projects in terms of linear or network types, the difference in project and multi-project management, management and execute methods. In this research, critical chain management method is used instead of critical path method to provide more practical schedule. The proposed method solves a scheduling problem with time/resource tradeoff to provide a minimum-makespan deterministic schedule which will generally be a good starting point for project execution. Also to overcome the risk in the case, schedulers have a medium risk coefficient based on cognitive style. Anyway, the change of parameter β will give a little change in project duration. The proposed method is useful for both project planning and execution. The methods is simple, practical and can be easily computerized. It should be noted that although the advances in the field of computers and computing speed and information processing it is done, we still need to project manager and human using engineering vision, experience and knowledge can choose the best algorithm for each project to be felt.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 05 March 2018
**Revise Date:** 09 July 2018
**Accept Date:** 02 September 2018

**Keywords:**
*Critical chain method,*
*Fuzzy duration ,*
*Multi-project scheduling,*
*Buffer size,*
*Uncertainty,*
*Risk*

**All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.**

**doi: 10.22065/jsce.2018.121553.1492**

*Corresponding author: Farshidreza Haghighi
Email address: Haghighi@nit.ac.ir

## ۱- مقدمه

علم مدیریت پروژه با بهره‌گیری از تمامی ابزارها سعی در کنترل و استفاده بهینه از منابع دارد[۱]. به درازا کشیدن زمان اجرای پروژه‌ها نسبت به برنامه‌ریزی اولیه و عدم به کار بستن تکنیک‌های مدیریت پروژه موجب بروز خسارت‌های زیادی می‌گردد [۲]. کنترل پروژه یکی از عوامل مهم در جلوگیری از بوجود آمدن تاخیرات در پروژه می‌باشد که با استفاده از روش‌های نوین برنامه‌ریزی و کنترل موجب بهبود عملکرد پروژه می‌گردد[۳]. یکی از فاکتورهایی که در برنامه‌ریزی پروژه باید به آن توجه شود، عدم قطعیت‌های موجود در پروژه است. این عدم قطعیت‌ها موجب ایجاد تاخیرهای پیش‌بینی نشده و در نتیجه افزایش زمان اتمام پروژه می‌شود[۴]. یکی از روشهای معمول برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری برنامه‌ریزی ابتدایی پروژه که در این تحقیق نیز از آن استفاده شد، در نظر گرفتن بافر زمانی برای پروژه می‌باشد.که این امر با استفاده از روش زنجیره بحرانی قابل اجرا خواهد بود. مدیریت پروژه به روش زنجیره بحرانی (CCPM)[1] توسعه‌ای از تئوری محدودیت‌هاست که ویژه مدیریت پروژه می‌باشد که شامل محاسبات زمانبندی پروژه براساس تخمین‌های کوتاه شده مدت فعالیت‌هاست[۵]. در بعضی از پروژه‌های عمرانی مانند راه‌سازی، بلند مرتبه‌سازی(برج‌سازی)، سدسازی و حتی ساختمان‌های مسکونی متعارف فعالیت‌های تکراری وجود دارد که جهت زمان‌بندی بهتر این پروژه‌ها نمی‌توان از روش‌های متداول مانند CPM و یا PERT به علت تکراری بودن مراحل و البته گستردگی شبکه و همچنین سختی کنترل آن استفاده نمود [۶]. آمارها نشان می‌دهد که در کشور ما ۹۵٪ پروژه‌های عمرانی با افزایش در هزینه‌ها و یا زمان تکمیل روبه‌رو هستند. بنابراین مجهز گردیدن به ابزاری مناسب در جهت مقابله با این مشکلات و رسیدن به اهداف پروژه ضروری به نظر می‌رسد. این ابزار می‌تواند از مجموعه‌ای از فن‌های محاسباتی تا یک فلسفه جدید مدیریت را در خود داشته باشد. «روش زنجیره بحرانی» [2] ( CCM) می‌تواند هدف کلی پروژه‌ها را به نحو بهتری بهینه‌سازی کند و نرخ تکمیل به موقع را افزایش دهد [۷]. هدف اصلی مدیر پروژه به هنگام انتخاب روش اندازه‌گیری بافر باید به گونه‌ای باشد که برنامه‌ای با زمان تکمیل کوتاه‌تر که به احتمال زیاد می‌تواند برآورده شود را انتخاب کند.

فاکتور دیگری که باید در برنامه‌ریزی پروژه‌ها به آن توجه کرد، عدم قطعیت‌های موجود در پروژه می‌باشد. در برنامه‌ریزی پروژه‌ها، منابع مختلف عدم قطعیت وجود دارد که باعث ایجاد زمان بیکاری در پروژه و عدم استفاده از منبع مورد نیاز می‌گردد. این عدم‌قطعیت‌ها می‌توانند منجر به تاخیرهای پیش‌بینی نشده و افزایش زمان اتمام پروژه گردند. در این صورت، برنامه‌ریزی که در عمل اتفاق می‌افتد، متفاوت از برنامه‌ریزی انجام شده در ابتدای پروژه می‌باشد. از اینرو، برنامه‌ریزی ابتدایی باید انعطاف‌پذیری لازم را داشته تا از اختلاف زیاد بین برنامه‌ریزی پیش‌بینی شده و اجرایی، جلوگیری شود. بنابراین در نظر گرفتن جزییات مرتبط با منابع عدم قطعیت امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. عوامل مختلفی می‌توانند منجر به ایجاد شرایط عدم قطعیت در اجرای پروژه‌های عمرانی گردند، که برخی از این عوامل در ادامه معرفی شده‌اند:

۱- تغییرات ایجاد شده در طراحی پروژه
۲- تغییرات اعمال شده توسط کارفرما در طول پروژه
۳- برنامه‌ریزی نامناسب پروژه
۴- وقوع اختلالاتی همچون خرابی ماشین‌آلات
۵- افزایش قیمت مصالح مورد نیاز و کمبودهای مرتبط با آن
۶- عدم تخمین صحیح هزینه‌ها
۷- مدیریت ضعیف پیمانکاران جز و عدم تکمیل پروژه در زمان مقرر
۸- کمبود کارگران ماهر

[1] -Critical Chain Project Management
[2] Critical Chain Method

۹- عدم هماهنگی میان ارکان پروژه

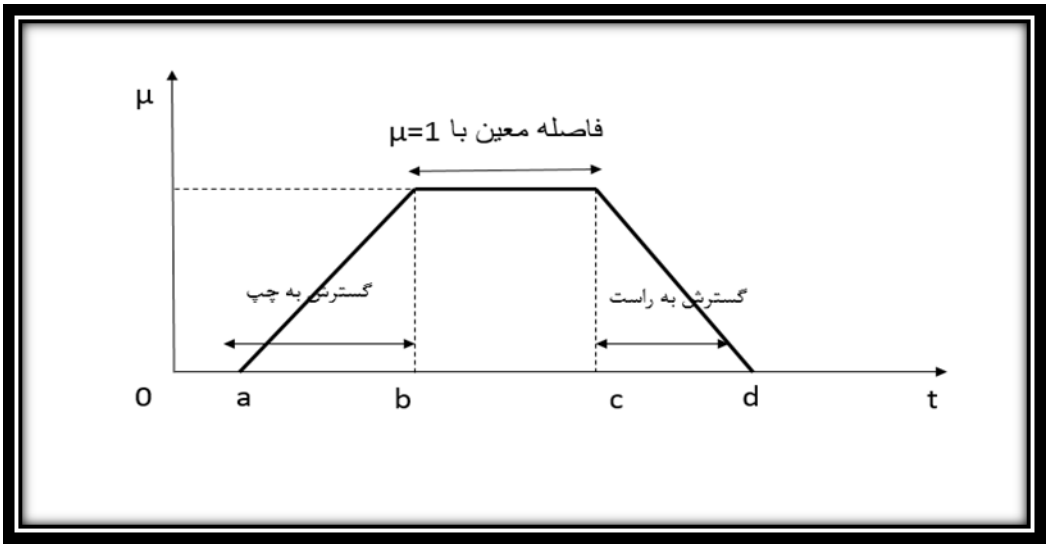
برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پروژه، رویکردهای مختلفی وجود دارد، یکی از روشهای معمول برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری برنامه‌ریزی ابتدایی پروژه، در نظر گرفتن بافر زمانی برای پروژه می‌باشد[۱۸-۸] که این امر با استفاده از روش زنجیره بحرانی قابل اجرا خواهد بود. همچنین روش دیگر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در پروژه، قطعی نبودن زمان و هزینه‌های مربوط به فعالیت‌های پروژه می‌باشد. یکی از راهها برای نشان دادن عدم قطعیت زمان و هزینه انجام فعالیت‌ها استفاده از رویکرد تئوری فازی می‌باشد. به نظر می‌رسد که روش فازی یک انتخاب خوب برای رسیدن به این هدف است. به ویژه در محیط پروژه‌ای که عدم قطعیت بالاست[۱۹]. تحقیقات بسیار زیادی طی این سالها در رابطه با روش زنجیره بحرانی انجام شده است[۲۹-۲۰]، اما در هیچیک از این تحقیقات به بحث عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های عمرانی پرداخته نشده است، بنابراین در این تحقیق روش زنجیره بحرانی فازی در پروژه‌های راهسازی که فعالیت‌های خطی-تکراری دارند مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به اینکه در روش زنجیره بحرانی فازی بافرها به صورت فازی در نظر گرفته می‌شوند در ادامه به توضیح در رابطه با روش اندازه‌گیری بافر فازی در مدیریت زنجیره بحرانی پرداخته خواهد شد.

## ۲- روش تحقیق

از آنجاییکه در این مطالعه از روش زنجیره بحرانی به منظور زمانبندی پروژه استفاده شده است، در این بخش روش اندازه‌گیری بافر فازی در مدیریت زنجیره بحرانی مطرح می‌شود. روش ارائه شده از اعداد فازی ذوزنقه‌ای (a,b,c,d) برای تخمین عدم قطعیت در مدت زمان انجام فعالیت‌ها استفاده می‌کند. تابع عضویت $\mu$ در معادله (۱) مقادیری در بازه [0,1] دارد و آن برای بیان مقدار متغیر زمان t متعلق به یک مجموعه فازی استفاده می‌شود. تابع عضویت $\mu$ به قضاوت کارشناسان در مورد میزان دسترسی به کارگران، مصالح، تخصص و غیره وابسته است. با توجه به این برآورد، هر متغیر زمان t کوچک‌تر از a و بزرگ‌تر از d ممکن نیست رخ دهد، درحالی‌که همه متغیرهای t مابین b و c بالاترین امکان وقوع (مثل ۱) را دارند. حالتی از عدد فازی که $\mu=1$ است، در عدد فازی ذوزنقه‌ای یک بازه معین [b,c] با $\mu=1$ وجود دارد، درحالی‌که در مورد عدد ذوزنقه‌ای که b=c باشد یک حالت منحصربه‌فرد داریم[۳۰].

$$\mu(t)=\begin{cases}(t-a)/(b-a) & for\ t\epsilon[a.b]\\ 1 & for\ t\epsilon[b.c]\\ (d-t)/(d-c) & for\ t\epsilon[c.d]\\ 0 & for\ t\notin[a.d]\end{cases} \quad (1)$$

یک زنجیره در روش زنجیره بحرانی دنباله‌ای از فعالیت‌ها تحت اولویت و وابستگی فعالیت‌هاست. در روش ارائه شده، زنجیره بحرانی بلندترین زنجیره است و مدت‌زمان پروژه را تعیین خواهد کرد. اگر تعداد زیادی زنجیره بحرانی وجود داشته باشد، زنجیره بحرانی با بزرگ‌ترین عدم قطعیت انتخاب خواهد شد. روش ارائه شده با اضافه کردن یک بافر پروژه در انتهای زنجیره بحرانی انتخاب شده با عدم قطعیت مقابله می‌کند. بافرهای تغذیه،که به عنوان جنبه‌های بحث‌برانگیز CCPM سنتی در نظر گرفته شدند[۳۱، ۳۲]، در روش ارائه شده استفاده نمی‌شوند. دلیل این است که درگیری‌های منابع اغلب در حین انتقال اطلاعات واقعی از فعالیت‌های روی زنجیره تا پایان زنجیره اتفاق می‌افتند.




شکل ۱- نمایش عدد فازی ذوزنقه‌ای

شاخص سازگاری AI(A,B) در معادله ۲ برای اندازه‌گیری امکان بین دو رویداد فازی با اندازه‌گیری شرایط دو رویداد فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. AI در ابتدا توسط کافمن و گوپتا [۳۳] معرفی شد. AI در روش‌های مدیریت دیگر نیز استفاده می‌شود. (برای مثال برنامه‌ریزی پروژه توسط لوتر پانگ و همکاران[۳۴]، مسئله کوله‌پشتی توسط شینکو [۳۵].)

(۲)

$$AI(A.B) = Area(A \cap B)/Area(A)$$

که در آن

$$Area(A) = \int \mu_A(t)d_t \qquad \text{و} \qquad Area(A \cap B) = \int \mu_{A \cap B} \cdot dt$$

شاخص سازگاری AI نشان می‌دهد چند درصد از رویداد فازی A در داخل مرزهای رویداد فازی B است. همچنین نشان‌دهنده سطح رضایت فعالیت فازی (A) زمانی که فعالیت فازی(A) با فعالیت فازی دیگر (B) مقایسه می‌شود، است. AI همواره کمتر از ۱ (۱۰۰٪) است و فعالیت A کاملا" سازگار با فعالیت B است، زمانی که AI(A,B)=1 است. از نقطه‌نظر عملی، شاخص شرایط یک شاخص بسیار خوبی است زیرا به اندازه کافی شکل رویدادهای فازی را در نظر گرفته است[۳۳]. به‌هرحال، این عملگرها خاصیت جابجایی ندارد چون سطح رضایت (درصد) از A به B در متن دو رویداد فازی متفاوت است از سطح رضایت (درصد) از B به A.

مفهوم "زمان با سازگاری بیشتر" به مفهوم شاخص سازگاری که در این روش معرفی شده است، مرتبط است. این مفهوم برای جایگزین کردن مدت‌زمان فازی به جای مدت‌زمان قطعی استفاده می‌شود. برای اینکه مطمئن شویم که فعالیت با مدت‌زمان فازی به موقع به پایان خواهد رسید، روش ارائه شده فرض می‌کند که برنامه‌ریز مدت‌زمان (th) با شاخص سازگاری بیشتر (AI=0.9) برای برآورد مدت‌زمان فعالیت را استفاده خواهد کرد. مقدار th در معادله (۳) تعیین شده است، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن رویداد محاسبه شده A توسط چهارتایی (a(j), b(j),c(j),d(j)) نشان داده شده است و فعالیت مورد انتظار B توسط چهارتایی (0,0,th,th) نشان داده می‌شود، به عنوان مثال، اگر مدت زمان فعالیت با چهارتایی (4,6,8,12) نشان داده شود، بنابراین برنامه‌ریز مدت زمان دست بالا th را ۱۰ روز تعیین خواهد کرد. برای اطمینان از اینکه فعالیت در ۱۰ روز به پایان برسد AI=0.9 است.

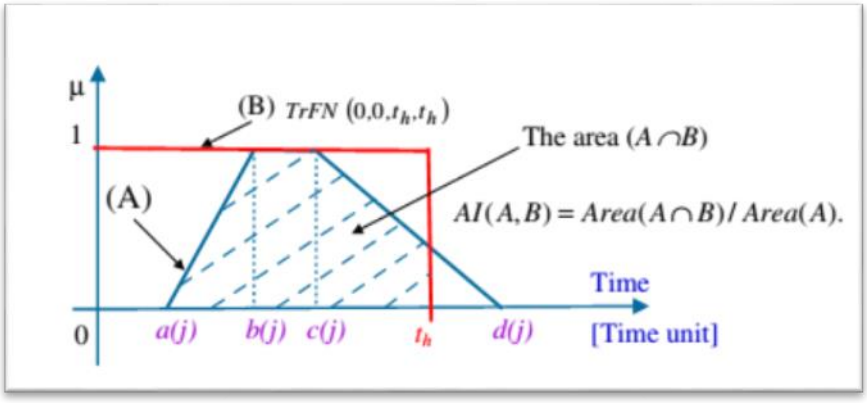
(۳)

$$AI(A.B) = \frac{(c(j) - b(j) + d(j) - a(j))/۲ - (d(j) - th)(d(j) - th)/(۲ \times (d(j) - c(j))}{(c(j) - b(j) + d(j) - a(j))/۲}$$

$$AI(A.B) = ۰.۹$$

$$\leftrightarrow = \frac{(c(j) - b(j) + d(j) - a(j))/۲ - (d(j) - th)(d(j) - th)/(۲ \times (d(j) - c(j))}{(c(j) - b(j) + d(j) - a(j))/۲} = ۰.۹$$

پارامتر $t\eta$, 0.9 نشان‌دهنده زمان برآورد تکمیل به موقع پروژه زمانی که پارامتر AI =0/9 است می‌باشد. پارامتر $t\eta$, 0.5 نشان‌دهنده زمان تکمیل به‌موقع پروژه زمانی که AI=0.5 است هست.




شکل ۲- مدت‌زمان فعالیت ($t\eta$) با شاخص سازگاری بیشتر (AI = ۰,۹)

برای هر فعالیت بحرانی(k) در زنجیره بحرانی می‌توان $t\eta$ را در اهرم‌های مختلف AI محاسبه کرد. سپس، برآورد ایمن برای هر فعالیت (Δt)و PB (بافر پروژه) را به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد.

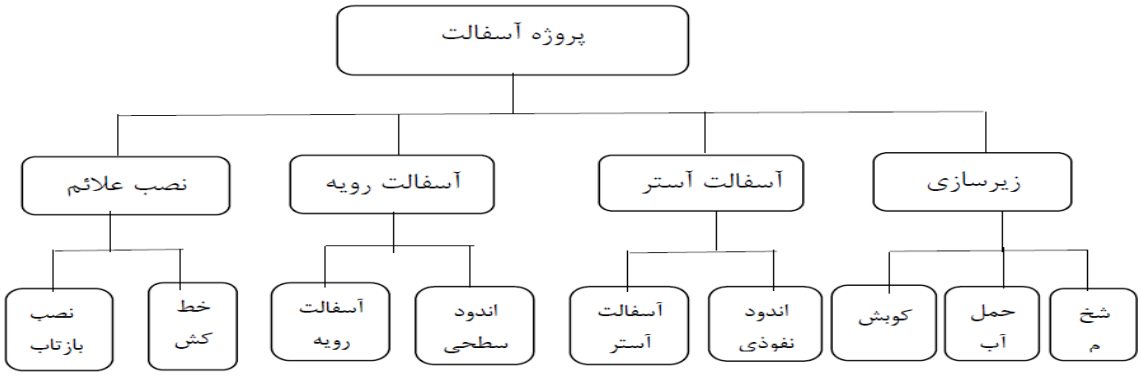
$$\Delta t = t_{h۰.۹} - t_{h۰.۵} \quad (۴)$$

$$PB = \beta\sqrt{\sum_{k\epsilon p}(\Delta t)^۲} \quad (۵)$$

## ۳- نتایج و تفسیر

### ۳-۱-برنامه‌ریزی در محیط تک پروژه‌ای با استفاده از رویکرد زنجیره بحرانی فازی

اولین قدم مهم در فرآیند برنامه‌ریزی، تهیه ساختار شکست کار (WBS) می‌باشد. ساختار شکست کار به سازمان‌دهی و برنامه‌ریزی کلیه مراحل پروژه کمک می‌کند. مدیریت پروژه و کلیه افرادی که در اجرای عملیات و مدیریت و کنترل هستند، در مراحل مختلف اجرای کار به اطلاعات دقیق و مفید نیاز دارند. یک ساختار شکست کار خوب طراحی‌شده، مبنایی برای تنظیم مناسب سیستم اطلاعاتی برای کنترل پروژه در اجرای عملیات را فراهم می‌کند.




شکل ۳- طراحی WBS

پس از مشخص شدن ساختار WBS، منابع مربوط به هر فعالیت به فعالیت مورد نظر تخصیص داده می‌شود. در این تحقیق برنامه‌ریزی بر روی منابع تجدیدپذیر مدنظر می‌باشد. به بیان‌دیگر فرض می‌گردد دسترسی به منابع تجدید ناپذیر (مصرفی) نامحدود است. منابع مورد استفاده در فعالیت‌های پروژه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- منابع مورداستفاده در فعالیت‌های پروژه

| شماره فعالیت | نام فعالیت | منابع موردنیاز |
|---|---|---|
| ۱ | شخم زدن | گریدر، بولدوزر، مباشر عملیات خاکی، کارگر ساده و سرکارگر |
| ۲ | حمل آب | تانکر آب‌پاش |
| ۳ | کوبیدن بستر | غلتک استاتیکی، غلتک ویبره، تانکر آب‌پاش |
| ۴ | اندود نفوذی | نقشه‌بردار، کارگر نقشه‌برداری، کارگر ساده، کارگر آسفالت، قیر پاش،تانکر حمل قیر |
| ۵ | آسفالت آستر | متصدی کارخانه آسفالت، کارگر ساده، ماله کش آسفالت، کارگر آسفالت، فینیشر، کامیون کمپرسی، لودر، غلتک استاتیکی، غلتک چرخ لاستیکی |
| ۶ | اندود سطحی | نقشه‌بردار، کارگر نقشه‌برداری، کارگر ساده، کارگر آسفالت، قیر پاش،تانکر حمل قیر |
| ۷ | آسفالت رویه | متصدی کارخانه آسفالت، کارگر ساده، ماله کش آسفالت، کارگر آسفالت، فینیشر، کامیون کمپرسی، لودر، غلتک استاتیکی، غلتک چرخ لاستیکی |
| ۸ | خط‌کشی | راننده ماشین خط‌کشی آسفالت، نقاش خط‌کشی، مکانسین خط‌کشی، کارگر پیاده کننده مسیر خط‌کشی، ماشین خط‌کشی آسفالت |
| ۹ | نصب بازتاب | یک نفر سرپرست گروه، یک نفر راننده، یک دستگاه وسیله نقلیه مناسب(وانت)، کارگر |

با توجه به شکل نقشه اجرایی و برحسب دانش کارشناسان مدت زمان قطعی انجام فعالیت مشخص شده و برای غلبه بر عدم قطعیت از اعداد فازی استفاده شده است (در این بخش منابع ذکرشده در گام قبل، با علائم اختصاری در نظر گرفته شده‌اند). جدول ۲ مدت زمان فازی مربوط به هر فعالیت و منابع مورد نیاز آن مشخص شده است.

جدول ۲- زمان و منابع مورداستفاده در فعالیت‌های پروژه

| فعالیت | منبع موردنیاز | مدت‌زمان فازی(روز) |
|---|---|---|
| ۱ | $A_1,A_2 , A_3 , A_4 , A_5$ | [۰٫۵ ۱ ۱٫۵ ۲] |
| ۲ | B | [۱ ۱٫۵ ۲ ۲٫۵] |
| ۳ | $C_2,C_3,C_4,C_5$ | [۰٫۵ ۱ ۱٫۵ ۲] |
| ۴ | $D_1,D_2,D_3,D_4,D_7,D_8$ | [۴ ۵ ۶ ۷] |
| ۵ | $E_1,E_2,E_3,E_4,E_5,E_6,E_7,E_8,E_9$ | [۴ ۵ ۶ ۷] |
| ۶ | $D_1,D_2,D_3,D_4,D_7,D_8$ | [۱ ۲ ۳ ۴] |
| ۷ | $E_1,E_2,E_3,E_4,E_5,E_6,E_7,E_8,E_9$ | [۳ ۵ ۷ ۹] |
| ۸ | $H_1,H_2,H_3,H_4,H_5$ | [۰٫۵ ۱ ۱٫۵ ۲] |
| ۹ | $I_1, I_2, I_3, I_4$ | [۰٫۵ ۱ ۱٫۵ ۲] |

بعد از تعیین مقادیر پیش‌بینی‌شده برای هر یک از فعالیت‌ها، در این قسمت با در نظر گرفتن میزان سازگاری ۰/۹ و ۰/۵ مقادیر th مدت‌زمان با سازگاری بیشتر برای هر یک از فعالیت‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود. محاسبات مربوط به فعالیت ۱ در ادامه آمده است، که برای تمامی فعالیت‌ها به همین صورت انجام می‌شود. در نهایت براساس زمان‌های به‌دست‌آمده با توجه به معادله (۵)، مقدار بافر پروژه تعیین می‌شود.

هر عدد قطعی در مبنای ده را می‌توان به‌صورت زیر به عدد فازی تبدیل کرد. برای مثال عدد ۲ به‌صورت زیر به شکل فازی ذوزنقه‌ای قابل‌بیان می‌باشد:

۲=[۰ ۰ ۲ ۲]

بنابراین داریم؛

th =[۰ ۰ th th]

فعالیت ۱ دارای مقدار فازی به‌صورت[2 1/5 1 0/5] می‌باشد، برای تبدیل به شکل قطعی آن، به کمک معادله (۳) یک‌بار میزان سازگاری را ۰/۹ و بار دیگر آن را ۰/۵ در نظر گرفته و به ترتیب $t\eta 0.9$ و $t\eta 0.5$ حاصل می‌شوند

A=[۰٫۵ ۱ ۱٫۵ ۲]
B =[ ۰ ۰ th th]

$$AI(A,B)=\frac{(c(j)-b(j)+d(j)-a(j))/۲)-(d(j)-th)(d(j)-th)/(۲.\big(d(j)-c(j)\big))}{(c(j)-b(j)+d(j)-a(j))/۲}$$

$$\mathrm{AI}(A,B)=0.9 \quad \rightarrow$$

$$۰.۹=\frac{\frac{۲-۱.۵+۲-۰.۵}{۲}-\frac{(۲-\mathrm{th})*(۲-\mathrm{th})}{۲}/۲*(۲-۱.۵)}{\frac{۲-۱.۵+۲-۰.۵}{۲}}$$

$$۰.۹=۱-(۲-\mathrm{th})^{۲}$$

از حل معادله به‌دست‌آمده دو مقدار ۲/۳۱۶ و ۱/۶۸ به دست می‌آید که مقدار ۱/۶۸ در بازه قرار دارد و مورد قبول می‌باشد. سپس با قرار دادن AI=0.5 معادله روبرو حاصل می‌شود:

$$۰.۵=۱-(۲-\mathrm{th})^{۲}$$

که از حل معادله بالا دو مقدار ۲/۷۰۷ و ۱/۲۹ برای $t\eta 0.5$ به دست می‌آید، که مقدار ۱/۲۹ قابل‌قبول است. برای سایر فعالیت‌ها نیز بدین ترتیب مقادیر $t\eta 0.9$ و $t\eta 0.5$ محاسبه شده که نتایج به صورت جدول زیر گردآوردی شده است.

جدول ۳- اندازه‌گیری بافر پروژه به روش ابداعی لانگ و اهاتسو

| فعالیت بحرانی | $t\eta 0.9$(day) | $t\eta 0.5$ (day) | Δt(day) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱/۶۸ | ۱/۲۹ | ۰/۳۹ |
| ۲ | ۲/۱۹ | ۱/۷۹ | ۰/۴ |
| ۳ | ۱/۶۸ | ۱/۲۹ | ۰/۳۹ |
| ۴ | ۶/۳۷ | ۵/۵۹ | ۰/۷۸ |
| ۵ | ۶/۳۷ | ۵/۵۹ | ۰/۷۸ |
| ۶ | ۳/۳۷ | ۲/۵۹ | ۰/۷۸ |
| ۷ | ۷/۷۴ | ۶/۱۷ | ۱/۵۷ |
| ۸ | ۱/۶۸ | ۱/۲۹ | ۰/۳۹ |
| ۹ | ۱/۶۸ | ۱/۲۹ | ۰/۳۹ |
| PB(day) | | | ۲/۲۵ |

به‌منظور مقایسه رویکردهای مختلف در تعیین اندازه بافر، نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری هر یک از آنان در جدول زیر گردآوری شده است. قابل‌ذکر است که در روش ابداعی لانگ و اوهساتو ضریب β=۰,۵ برای محیطی با ریسک متوسط مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۴- نتایج حاصل‌شده به منظور محاسبه بافر پروژه در روشهای مختلف

| فعالیت بحرانی | زمان میانگین درروش برش و چسباندن | زمان میانگین درروش ریشه مربعات خطا(RSEM) | زمان میانگین درروش ابداعی لانگ و اهاتسو (β=۰,۵) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱/۲۵ | ۱/۲۵ | ۱/۲۹ |
| ۲ | ۱/۷۵ | ۱/۷۵ | ۱/۷۹ |
| ۳ | ۱/۲۵ | ۱/۲۵ | ۱/۲۹ |
| ۴ | ۵/۵ | ۵/۵ | ۵/۵۹ |
| ۵ | ۵/۵ | ۵/۵ | ۵/۵۹ |
| ۶ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵۹ |
| ۷ | ۶ | ۶ | ۶/۱۷ |
| ۸ | ۱/۲۵ | ۱/۲۵ | ۱/۲۹ |
| ۹ | ۱/۲۵ | ۱/۲۵ | ۱/۲۹ |
| PB(day) | ۱۳/۱۳ | ۲/۵۴ | ۱/۱۲۴ |
| PD(day) | ۳۹/۳۸ | ۲۸/۷۹ | ۲۸ |

نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف در جدول ۳ گزارش شده است. اگر از روش بریدن و چسباندن گلدرات ارزیابی صورت گیرد، زمان ۳۹/۳۸روز به دست می‌آید که به این معنی است که مدت‌زمان پروژه به‌طور آشکار برنامه پروژه را طولانی کرده است. روش RSEM یک نتیجه نسبتا" منطقی با زمان ۲۸/۷۹ روز می‌دهد. استفاده از روش ارزیابی ابداعی ارائه شده برای محاسبه اندازه بافر پروژه با این فرض که پارامتر β برابر ۰/۵ است، که این به معنی است که بر اساس روش‌شناختی ریسک یک ضریب ریسک متوسط در نظر گرفته شده است، برنامه‌ریزی قطعی مطلوبی حاصل شده است که در آن مدت زمان پروژه ۲۸ روز است. به‌هرحال تغییر پارامتر β تغییر کمی در مدت زمان پروژه ایجاد می‌کند. اگر برنامه‌ها ریسک را در پی داشته باشند، مقادیر کمتر β را خواهند گرفت و بالعکس. نتایج حاصل از روش بریدن و چسباندن و ریشه مربعات خطا مستقل از ریسک محیط بوده و برای تمام حالات یک مقدار را محاسبه می‌کند.

### ۲-۳- برنامه‌ریزی در محیط چند پروژه‌ای با استفاده از رویکرد زنجیره بحرانی فازی

تا اینجا به برنامه‌ریزی یک پروژه پرداخته شد. برنامه‌ریزی چند پروژه به روش مدیریت زنجیره بحرانی دارای گام‌هایی می‌باشد که در این قسمت برای یافته‌های این پژوهش به کار بسته می‌شوند. فرض کنید سازمان مورد بررسی بایستی همزمان ۹ پروژه آسفالت را به انجام برساند، که منابع سازمان به‌طور مشترک مورد استفاده قرار خواهند داد. در چنین شرایطی زمان‌بندی یک پروژه، بدون در نظر گرفتن

سایر پروژه‌ها، کاری اشتباه خواهد بود. همان‌طور که مشخص است، یکی از عوامل هدر رفتن منابع، چندکاره کردن[3] آن‌ها است. در روش پیشنهادی مدیریت پروژه به روش زنجیره بحرانی، تا حد ممکن، از چندکاره بودن منابع جلوگیری شده است. بنابراین برای افزایش ظرفیت با توجه به محدودیت منابع، تا زمانی که منبع در دسترس نباشد، دستور شروع پروژه بعدی صادر نخواهد شد.

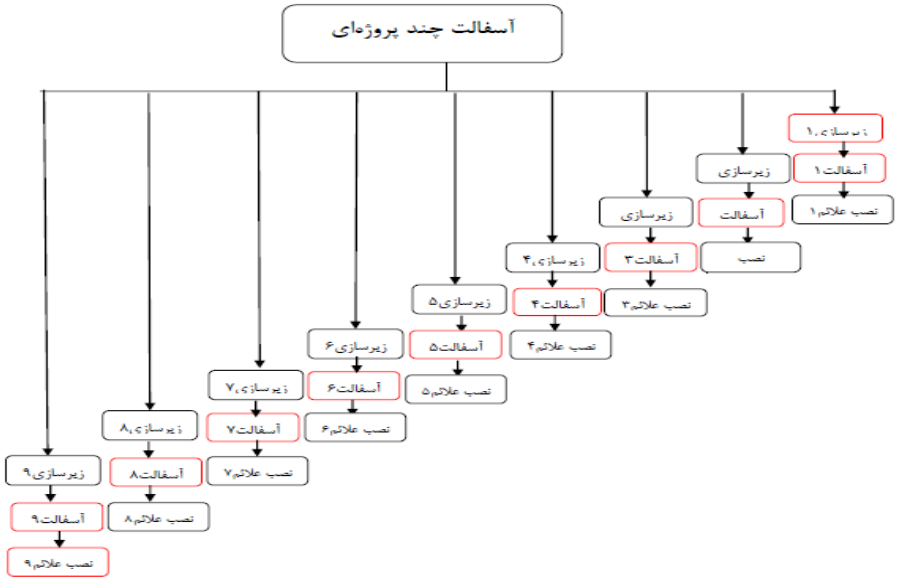
در روش زنجیره بحرانی، یکی از بخشهای دیگری که وجود دارد زمان‌بندی فعالیت‌ها در دیرترین زمان ممکن می‌باشد. برخلاف باور رایج، شروع دیرتر یک پروژه همیشه منجر به تأخیر در خاتمه آن نخواهد شد. برای غلبه بر این مشکل کلیه فعالیت‌ها با توجه به محدودیت‌های پیش‌نیازی تا حد ممکن به سمت جلو جابه‌جا می‌شوند. برای مثال در این پروژه فعالیت ۸ ، ۹ ، ۱ ، ۲ و۳ پروژه‌های دوم تا هشتم، به اندازه شناوری خود به جلو رانده شده‌اند.

پس از انتقال فعالیت‌ها به دیرترین زمان ممکن خود، باید از به وجود آمدن تداخل میان منابع جلوگیری کرد. با توجه به محدودیت منابع در انجام چند پروژه، این گام یکی از مهم‌ترین مراحل برای امکان‌پذیر کردن برنامه است. از آنجایی‌که منابع مربوط به مراحل زیرسازی و نصب علائم در مرحله آسفالت مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. در این صورت دو راه پیش رو می‌باشد:

-مرحله زیرسازی در هر پروژه در بازه زمانی شروع آسفالت پروژه قبلی تا اتمام آن به انجام برسد تا بلافاصله پس از انجام آن مرحله اجرای آسفالت آغاز شود.

-مرحله نصب علائم که پس از مرحله آسفالت انجام می‌شود تا زمان اتمام آسفالت پروژه بعدی می‌تواند به تعویق بیفتد.

به همین ترتیب تا پروژه نهم برنامه‌ریزی ادامه پیدا خواهد نمود. با توجه به این‌که مراحل زیرسازی به‌صورت موازی با مرحله آسفالت پروژه قبلی و همچنین مرحله نصب علائم و تجهیزات در هر پروژه به صورت موازی با آسفالت پروژه بعدی انجام می‌پذیرند، به صورت غیر بحرانی‌اند. بنابراین زنجیره بحرانی پروژه شامل زیرسازی پروژه اول، اجرای آسفالت پروژه ۱ تا ۹و نصب علائم در پروژه نهم خواهد بود که در شکل ۴ نشان داده شده است. زنجیره بحرانی این پروژه‌ها شامل فعالیت‌هایی که با رنگ قرمز مشخص‌شده است، می‌باشد.




شکل ۴- طراحی WBS چند پروژه‌ای

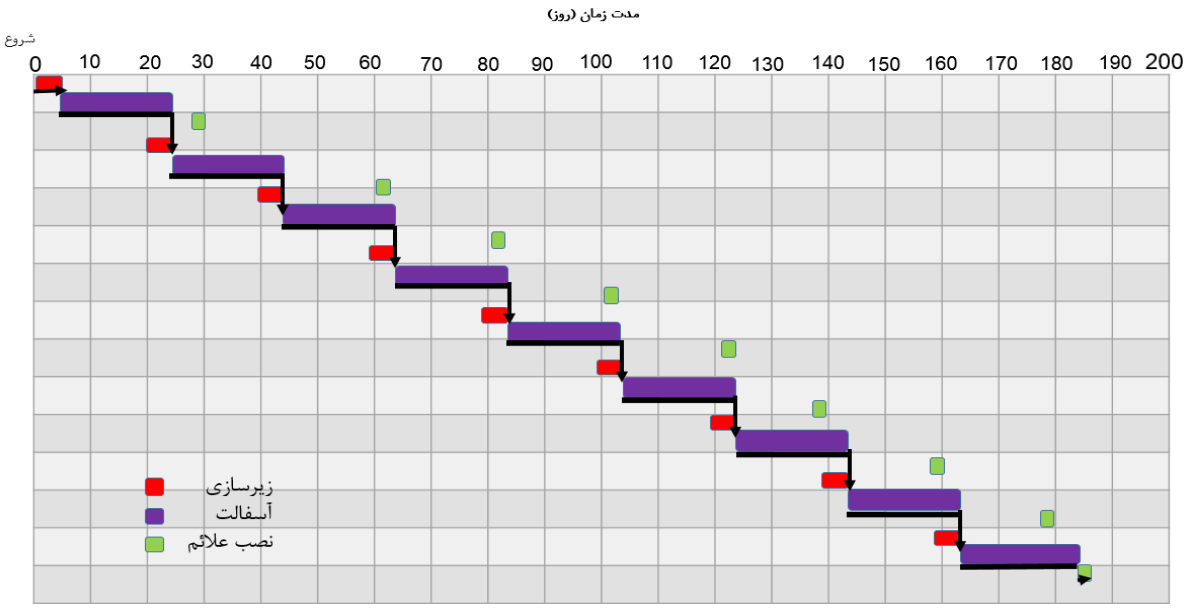
[3] -MultiTasking

با توجه به طراحیWBS ، از داده‌های زمان‌بندی به دست‌آمده، برنامه زمانی قطعی ۹ پروژه به شرح زیر ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج محاسبه شده‌ی ۹ پروژه

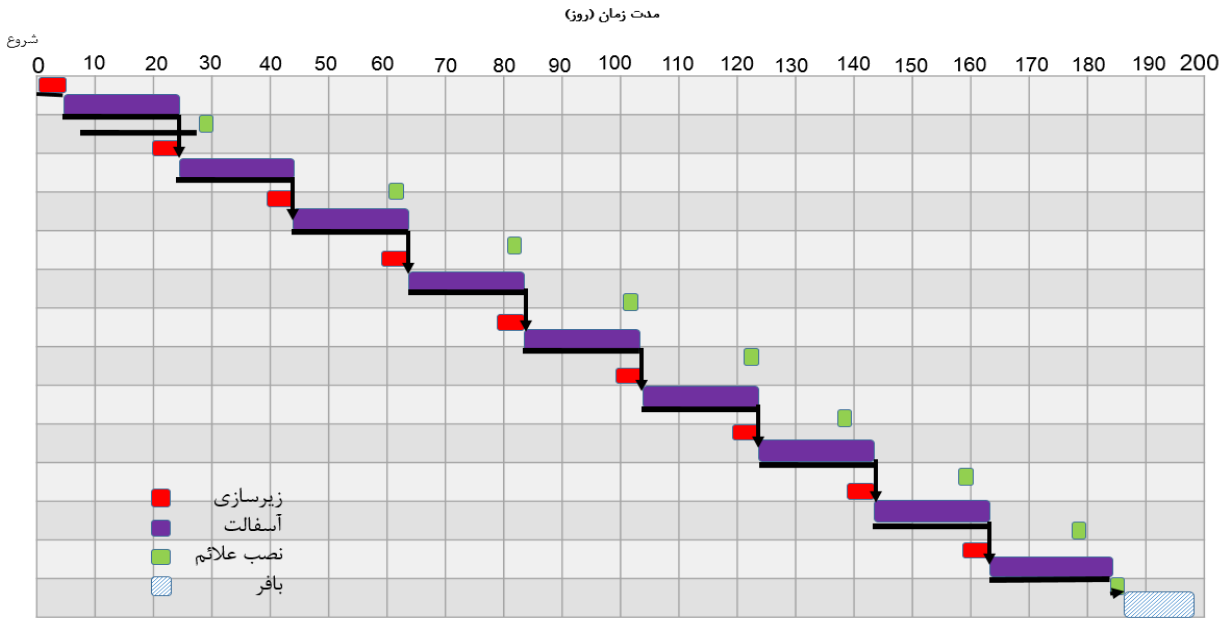
| شماره فعالیت بحرانی | فعالیت موجود در زنجیره بحرانی | زمان میانگین درروش ابداعی لانگ و اهاتسو ($\beta$=۰,۵) | پیش‌نیاز |
|---|---|---|---|
| **۱** | زیرسازی پروژه اول | ۴/۳۷ | - |
| **۲** | آسفالت پروژه اول | ۱۹/۹۳ | ۱ |
| **۵** | آسفالت پروژه دوم | ۱۹/۹۳ | ۲و۴ |
| **۸** | آسفالت پروژه سوم | ۱۹/۹۳ | ۵و۷ |
| **۱۱** | آسفالت پروژه چهارم | ۱۹/۹۳ | ۸و۱۰ |
| **۱۴** | آسفالت پروژه پنجم | ۱۹/۹۳ | ۱۱و۱۳ |
| **۱۷** | آسفالت پروژه ششم | ۱۹/۹۳ | ۱۴و۱۶ |
| **۲۰** | آسفالت پروژه هفتم | ۱۹/۹۳ | ۱۷و۱۹ |
| **۲۳** | آسفالت پروژه هشتم | ۱۹/۹۳ | ۲۰و۲۲ |
| **۲۶** | آسفالت پروژه نهم | ۱۹/۹۳ | ۲۳و۲۵ |
| **۲۷** | نصب علائم پروژه نهم | ۲/۵۸ | ۲۶ |
| **PB** | | ۱۰/۱۲۴ | |
| **PD** | | ۱۹۶/۴۴ | |

مدل زمان‌بندی چند پروژه‌ای و زنجیره بحرانی در شکل ۶ به صورت شماتیک نشان داده شده است.




شکل ۶- ترسیم مدل پس از شروع فعالیت‌ها در دیرترین زمان ممکن

در شکل فوق هر مستطیل نمایه یک بخش و طول آن نمایه مدت‌زمان انجام آن و رنگ آن نمایه منابع مورد استفاده آن است. به ترتیب مستطیل قرمز اول، نمایه مرحله زیرسازی پروژه اول، مستطیل بنفش اول، نمایه بخش روسازی پروژه اول و مستطیل سبز اول، مربوط به مرحله نصب علائم پروژه اول است. خطوط مشکی نمایه زنجیره بحرانی است. زمان اتمام پروژه بدون در نظر گرفتن بافرها حدود ۱۸۶ روز می‌باشد که در شکل فوق نیز نشان داده شده است. با مرتفع شدن تضاد منابع و مشخص شدن زنجیره بحرانی، اکنون نوبت قرار دادن بافرها در شبکه است.




شکل ۷- ترسیم مدل به روش زنجیره بحرانی و وارد نمودن بافرها

همان‌طور که اشاره شد، بافرها دارای زمان کافی برای جذب تغییرات و اشکالات به وجود آمده در مدت زمان اجرای پروژه هستند. بنابراین از برنامه‌ریزی مجدد، که گاهی هفته‌ها به طول می‌انجامد، جلوگیری می‌کنند. حفاظت پروژه در برابر مسائل غیرقابل‌پیش‌بینی، که ممکن است برای منابع کلیدی رخ دهد، از دیگر مزایای این روش است. لذا در اینجا نیز هر پروژه بافر مخصوص به خود را دارا است که در شکل فوق با مستطیل آبی به طول ۱۰/۱۲۴ روز در پایان زنجیره بحرانی در نظر گرفته شده است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به وجود عدم قطعیت در پروژه‌ها، از رویکرد تئوری فازی استفاده شده است. با توجه به اینکه در روش زنجیره بحرانی، عدم قطعیت از زمان اجرایی فعالیت‌ها حذف شده و به بافر پروژه منتقل می‌شود، بدین منظور بافرهای پروژه به صورت فازی در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی بافر فازی ارائه شده در پروژه‌های ساخت، مثالی در دو حالت تک پروژه و چند پروژه در نظر گرفته شده است و بافرها در سه حالت فازی، روش بریدن و چسباندن و روش مجموع مربعات خطا در نظر گرفته شده است و نتایج بدست آمده از سه حالت با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین در محیط واقعی مدیریت پروژه، اتمام کار بعد از تاریخ مقرر باعث تحمیل خسارت می‌شود. زمان محاسبه شده پروژه با استفاده از روش زنجیره بحرانی فازی ۱۹۶/۴۴ روز، با تأخیری حدود دو هفته نسبت به زمان تعهد شده می‌باشد. این مدت زمان انجام پروژه با توجه به این‌که پروژه موردنظر با محدودیت منابع برنامه‌ریزی شد، می‌تواند زمان قابل قبولی باشد. پروژه با ضریب ریسک متوسط در نظر گرفته شد. تغییر ضریب ریسک در روش ارائه شده، تاثیر چندانی روی زمان نهایی به دست آمده نداشته است؛ محدودیت‌های استفاده از روش زنجیره بحرانی در کشور ایران، عدم وجود نرم‌افزارهای مورد نیاز این روش در کشور می‌باشد. درس‌های مرتبط با این روش در دانشگاههای محدودی در کشور تدریس شده و به صورت فراگیر تدریس نمی‌گردد. همچنین افراد درگیر در پروژه نیز با این روش آشنا نیستند.

## مراجع


[۱]. سبزه‌پرور، م.(۱۳۸۵). *کنترل پروژه*. انتشارات ترمه. کرج.

[۲]. معاونت امور فنی، دفتر نظارت و ارزیابی طرحها، گزارش نظارتی پروژه های عمرانی ملی سال ۱۳۸۵ :عملکرد مالی پروژههای عمرانی تا اول. مرداد ماه سال ۱۳۸۶، تهران :ریاست جمهوری، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، مرکز مدارک علمی، موزه ها و انتشارات، ۱۳۸۶

[3]. Leach, L, (2000). "*Critical chain project management improves project performance*", Advanced Project Institute.

[4]. Bushuyev S, Sochnev S. (1999). *Entropy measurement as a project control tool*. International Journal of Project Management ,17:343–50.

[5]. Leach, L. (1999), "*Critical chain project management improves project performance*", International journal of project management,30(2): 39-51.

[۶]. شمسایی، علی و حسینعلی پور، سید مجتبی، (۱۳۸۸). *مقایسه تطبیقی و پیشنهاد الگوریتمی مناسب برای روش‌های تسطیح منبع در زمان‌بندی‌های خطی*، مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی،سال دوم، شماره یک،۵۲-۴۱.

[۷]. ایرانمنش، حسین و همکاران،(۱۳۹۰). *راهنمای جامع پیاده‌سازی مدیریت پروژه بر مبنای مدیریت زنجیره بحرانی*، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی.

[8]. Gao H. Building Robust Schedules using Temporal Protection—an Empirical Study of Constraint Based Scheduling under Machine Failure Uncertainty. Master's Thesis. Department of Industrial Engineering. University of Toronto; 1995.

[9]. Mehta SV and Uzsoy RM. Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1998;14(3):365–78.

[10]. Mehta SV and Uzsoy RM. Predictive scheduling of a single machine subject to breakdowns. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 1999;12(1):15–38.

[11]. Newbold RC. Project Management in the Fast Lane — Applying the Theory of Constraints. Boca Raton: The St. Lucie Press; 1998.
[12]. Van de Vonder S, Demeulemeester EL, Herroelen WS, and Leus R. The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling. International Journal of Production Research 2006;44(2):215–36.
[13]. Leus R. The Generation of Stable Project Plans. Ph.D. Dissertation. Department of applied economics. Katholieke Universiteit Leuven. Belgium; 2003.
[14]. Leus R, and Herroelen WS. The complexity of machine scheduling for stability with a single disrupted job. Operational Research Letters 2005;33:151–6.
[15]. Van de Vonder S, Demeulemeester E, and Herroelen W. Proactive Heuristic Procedures for Robust Project Scheduling: An Experimental Analysis European. Journal of Operational Research 2007;189(3):723–33.
[16]. Nazarian E and Ko J. Robust manufacturing line design with controlled moderate robustness in bottleneck buffer time to manage stochastic inter-task times. Journal of Manufacturing Systems 2013;32(2):382–91.
[17]. Shannon CE. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal 1948;27:379–423, 623–56.
[18]. Bushuyev S, Sochnev S. Entropy measurement as a project control tool. International Journal of Project Management 1999;17:343–50.
[19]. Zhang Min, Chen Rongqiu, ,(2008). Buffer Sized Technique in Critical Chain Management: A Fuzzy Approach, 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. , Dalian, China
[20]. Abdul Razaque, Bach,C, Salama, N, Alotaibi, A, (2012) " Fostering Project Scheduling and Controlling Risk Managemen", International Journal of Business and Social Science, Vol. 3, No. 14, 118-127.
[21]. Huang, C,L, Chen, H,C, Li, R,K, Tsai, C,H, (2012) " A Comparative Study of the Critical Chain and PERT Planning Methods: No Bad Human Behaviors Involved", International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, Vol. 2, No. 8, 379-394.
[22]. Pawiński, G, Sapiecha, K, (2012), "Resource Allocation Optimization in Critical Chain Method",Annales UMCS Informatica, AI XII, 1 ,17–29.
[23]. Georgy, M,E, Marzook, A,A, Ibrahim, M,E, (2013) "Applicability of Critical Chain Scheduling in Construction Projects: An Investigation in the Middle East", The 19th Cib World Building Congress, Queensland University of Technology, 1-13.
[24]. Tulasi, CH, Rao,A.R, (2014) "Multi-Objective Resource Constrained Project Scheduling Using Critical Chain Project Management Approach", International Journal of Innovative Research in Science,Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 7, 14345-14352
[25]. Ghoddousi, P., Ansari, R. & Makui, A., "A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management", KSCE Journal of Civil Engineering, (2016), 1-13, doi:10.1007/s12205-016-0039-y.
[26]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", International Journal of Engineering, Vol 30, No 5, pp. 705-713, Doi: 10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.00.
[27]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Hematian, M, Kordi, H, (2017), "Optimization of Time and Costs in Critical Chain Method Using Genetic Algorithm ", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol 12, No 4, 871-876, Doi: 10.3923/jeasci.2017.871.876.
[۲۸]. طاهری امیری،م، ج.، حقیقی، ف، ر.، اشتهاردیان، ا.، عابسی، ع، (۱۳۹۶)،" موازنه زمان-هزینه-کیفیت در روش زنجیره بحرانی با فعالیت‌های چندحالته با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات"، انجمن مهندسی سازه ایران(مجله علمی-پژوهشی سازه و ساخت)،Doi: 10.22065/JSCE.2017.92752.1265
[29]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2018), "Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints", KSCE Journal of Civil Engineering (in press)
[30]. Long, Ohatso, (2008), *Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty*, International Journal of Project Management, pp 688-698.
[31]. Herroelen WS, Leus R, Demeulemeester EL.(2002), *Critical chain project scheduling: do not oversimplify*. Project Manage J;33(4):48–60.
[32]. Herroelen WS, Leus R. (2001), *On the merits and pitfalls of critical chain scheduling*. J Operat Manage;19(5):559–77.
[33]. Kaufman A,(1985), *Gupta MM. Introduction to fuzzy, theory and application*. Van Nostrand Reinhold; 351p.
[34]. Lorterapong P, Moselhi O.(1996), *Project network analysis using fuzzy sets theory*. J Constr Eng Manage ASCE;122(4):308–17.
[35]. Shinkoh O, Mitsuo G.(1994), *Fuzzy multiple choice knapsack problem. Fuzzy Sets Syst*;67(1):71–80.