نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

# پیاده‌سازی و استمرار ساخت ناب با استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته در یک مطالعه موردی

شاهین دبیریان[1*]، سید روح‌الله قرشی[2]

۱- استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت،گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، ایران

## چکیده

صنعت ساخت ازلحاظ حجم سرمایه و تعداد نیروی انسانی درگیر، ازجمله مهم‌ترین صنایع هر کشور محسوب می‌گردد. با توجه به اهمیت صنعت ساخت در توسعه زیرساخت‌های یک کشور و نیاز به کاهش زمان تحویل پروژه‌ها، ضرورت ایجاد تحول در شیوه‌های مدیریتی موجود بیشتر احساس می‌شود. محققین صنعت ساخت روش‌های بسیاری را برای مدیریت پروژه‌های عمرانی معرفی نموده‌اند. یکی از این روش‌ها ساخت ناب می‌باشد، که از یک تئوری موفق در تولید به نام تولید ناب الهام گرفته‌شده است. اساس این تئوری بر پایه‌ی حذف یا به حداقل رساندن اتلاف در تمامی فازهای پروژه می‌باشد. یکی از مفاهیم اصلی تئوری تولید ناب تعقیب کمال نام دارد؛ بدین معنی که تلاش برای کاهش اتلاف در تمامی مراحل تولید حدی نداشته و بهبود به وجود آمده از طریق پیاده‌سازی اصول ناب همواره باید حفظ و ارتقاء یابد. هدف اصلی این مقاله به‌کارگیری اصل تعقیب کمال در تئوری ساخت ناب هست. به‌گونه‌ای که با به‌کارگیری این اصل می‌توان به استمرارِ بهبودِ حاصل از به‌کارگیری اصول دیگر تئوری ساخت ناب که عبارت‌اند از: توجه به جریان کاری، ارزش‌آفرینی، تحویل به‌موقع و تلاش برای خطاناپذیر کردن چرخه فعالیت‌ها، اهتمام ورزید. برای تحقق این هدف و بررسی نتایج از شبیه‌سازی پیشامد گسسته برای ساخت مدل چرخه فعالیت موردبررسی، استفاده گردیده است. موردمطالعه در این پژوهش فرآیند فوم‌بتن‌ریزی در فاز اجرا می‌باشد. داده‌های موردنیاز برای ساخت مدل شبیه‌سازی از طریق تکنیک مطالعه کار و زمان جمع‌آوری گردیده است. نتایج اولیه، نشان‌دهنده پتانسیل بالای چرخه فعالیت موردبررسی جهت ناب‌سازی می‌باشند. نتایج حاصل از اعمال اصول ناب نشان‌دهنده افزایش کارایی چرخه‌ی فوم‌بتن‌ریزی تا 21 درصد، افزایش بهره‌وری تا ۴۲ درصد و کاهش زمان تا ۴۰ درصد می‌باشد.

**کلمات کلیدی : ساخت ناب، اصول ناب، تفکر ناب، بهره‌وری، کارایی، شبیه‌سازی پیشامد گسسته، تعقیب کمال**

| سابقه مقاله: | | | | | شناسه دیجیتال: |
|---|---|---|---|---|---|
| دریافت | بازنگری | پذیرش | انتشار آنلاین | چاپ | 10.22065/jsce.2017.84607.1196 |
| ۱۳۹۶/۰۳/۲۳ | ۱۳۹۶/۰۸/۲۳ | ۱۳۹۶/۰۹/۰۷ | ۱۳۹۶/۰۹/۰۷ | ۱۳۹۷/۱۰/۳۰ | doi: 10.22065/jsce.2017.84607.1196 |

*نویسنده مسئول: شاهین دبیریان

پست الکترونیکی: sh.dabirian@aui.ac.ir

# Implementation and Continuation of Lean Construction by Using Discrete Event Simulation in a Case Study

Dabirian Shahin [1*], Ghorashi Seyed. Rohollah [2]

*1- Dept. of architectural engineering, Architecture and Urban Design School, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.*
*2- Student MS Civil Engineering - Engineering & Construction Management, Engineering & Construction Management, Islamic Azad University, Isfahan Branch (Khorasgan), Iran*

## ABSTRACT

*The success of lean principles in manufacturing and the benefits arising from its use is one of the main motivations for adopting lean principles in construction .The lean construction strives for the same goals as lean production, namely to eliminate waste and to maximize value. One of the basic concepts in lean construction is called "perfection", meaning that efforts made to decrease waste in every single phase of the projects has no limit and the enhancements resulted from implementation of lean principles must always be retained and improved. This paper pays attention to application of lean thinking in one of construction fields as a case study. Another aim could be mentioned as continuity of resulted enhancements caused by application of the theory by following perfection principle. To achieve and investigate the results, discrete event simulation for making activity under-study cycle model has been used. The case study in this research is foam concrete process in execution phase. The required data for building the simulation model has been collected using work and time study technique. Primary results show that different kinds of waste in a construction process can be reduced via adopting lean construction principles using computer simulation. The results obtained from applying lean principles demonstrate enhancement in performance of foam concrete cycle up to 15% and decrease in time up to 36%.*

## ARTICLE INFO

Received: 13/06/2017
Revised: 14/11/2017
Accepted: 28/11/2017

**Keywords:**
*Lean construction,*
*lean principles,*
*lean thinking,*
*Discrete event,*
*perfection,*
*computer simulation*

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

**doi: 10.22065/jsce.2018.84003.116**

*Corresponding author: Dabirian Shahin
Email address: *sh.dabirian@aui.ac.ir*

## ۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر صنعت ساخت در تمامی ابعاد همچنان این صنعت از وجود مشکلاتی مانند کیفیت پایین محصول، بهره-وری پایین، تخطی از بودجه و وجود حوادث و اتلاف‌های بسیار در پروژه‌های بزرگ، رنج می‌برد[۱].

به‌طورکلی، هر عاملی که سبب افزایش مدت‌زمان پروژه و ایجاد تأخیر در پروژه گردد، هزینه پروژه در نقطه تکمیل را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. یکی از مهم‌ترین این عوامل وجود اتلاف در چرخه‌های ساخت می‌باشد. در این راستا نظریه‌ای بانام ساخت ناب در سال ۱۹۹۰ معرفی گردید. این نظریه که از یک تئوری تولید موفق به نام تولید ناب سرچشمه می‌گیرد، حاصل به‌کارگیری تئوری ناب در صنعت ساخت می‌باشد. مطالعات بسیاری در زمینه ساخت ناب انجام‌شده است و آن‌ها ثابت می‌کنند که این نظریه پتانسیل قابل‌توجهی را از طریق کاهش اتلاف برای بهبود در پروژه‌های ساخت به وجود می‌آورد، به‌عبارت‌دیگر و به‌عنوان یک تعریف جامع می‌توان گفت تئوری ساخت ناب با به‌کارگیری قواعد و ابزار خود بدون استفاده از تکنولوژی جدید، رسیدن به نیازهای مصرف‌کننده نهایی را باهدف حداقل استفاده از منابع، حداقل اتلاف و بیشترین میزان بهره‌وری دنبال می‌کند[۲].

بااین‌حال بررسی در ادبیات موضوع نشان می‌دهد که بسیاری از تحقیقات در فاز برنامه‌ریزی و کنترل انجام‌شده است و تعداد کمی از تحقیقات به بررسی ساخت ناب در فاز اجرا پرداخته‌اند و در همین موارد محدود نیز به‌محض دست یافتن به اولین بهبود در چرخه فعالیت‌های پروژه، استمرار در اعمال اصول ناب برای رسیدن به بهبود بیشتر متوقف گردیده است، به‌عبارت‌دیگر یکی از مهم‌ترین اصولی که در تئوری تولید ناب، در چرخه‌های تولید به آن توجه می‌گردد که همان اصل تعقیب کمال می‌باشد، در پژوهش‌های مربوط به پیاده‌سازی تئوری ساخت ناب در چرخه فعالیت‌های عمرانی به فراموشی سپرده‌شده است. ازجمله این موارد می‌توان به هاول و بالارد [۳] ،تاملین [۴]، السودیری [۵] و همچنین وانگ و همکاران [۶] اشاره نمود، که با استفاده از اصول ناب به بهبود فرآیندهای موردنظر خود پرداخته‌اند. علاوه بر این مائو و ژانگ [۷]، از طریق ارزش‌آفرینی در چرخه با استفاده از مهندسی مجدد و اجرای اصول ناب به بهره‌وری بیشتر در مورد مطالعات موردنظرشان رسیده‌اند، همچنین عباسیان حسینی و همکاران [۲]، با استفاده از سه اصل کشش، تولید ارزش و توجه به جریان کاری پروژه به افزایش بهره‌وری و کارایی در موردمطالعه‌ی موردنظر خود رسیده‌اند. درصورتی‌که پس از انجام اصول ناب، همه‌ی افراد درگیر در پروژه درخواهند یافت که کاهش میزان کار، زمان، فضا، هزینه و اشتباهات، حدی ندارد و می‌توان محصولی را عرضه کرد که مشتری هر چه بیشتر و بیشتر واقعاً خواهان آن است، که این همان مفهوم اصل تعقیب کمال نام دارد، به‌عبارت‌دیگر برای تحقق این اصل استمرار در اعمال اصول ناب تا رسیدن به نقطه‌ای با بهینه‌ترین حالت زمان و هزینه در چرخه فعالیت‌های ساخت می‌باشد[۸]. درصورتی‌که تمامی چرخه فعالیت‌های ساخت بهبود یابد نقطه تکمیل پروژه نیز تحت تأثیر کاهش زمان و هزینه آن‌ها به بهینه‌ترین حالت خود خواهد رسید. شبیه‌سازی یکی از بهترین و کارآمدترین ابزارهایی است که با استفاده از نتایج آن مدیران می‌توانند با کم‌ترین ریسک ممکن، اقدام به اتخاذ تصمیم نمایند[۹]. ازآنجایی‌که کلیه‌ی اقدامات ساخت رابطه‌ی مستقیم و تأثیرپذیری بازمان در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها دارد. بنابراین اطلاعات مربوط به زمان فعالیت‌ها تأثیر غیرقابل‌انکاری بر واکنش مدیران و تصمیمات آن‌ها جهت مدیریت بهتر پروژه خواهد داشت. تمرکز اصلی سیستم شبیه‌سازی‌شده بر اساس تئوری ساخت ناب، بر روی کاهش زمان چرخه فعالیت‌های ساخت، تجزیه تحلیل آن‌ها و بهبود و افزایش کارایی و بهره‌وری در فرآیندهای ساخت می‌باشد.

## ۲- اهداف تحقیق

۱- آشنایی با مفاهیم اصلی تئوری ناب و چگونگی به‌کارگیری این تئوری در صنعت ساخت
۲- شناسایی پتانسیل چرخه فعالیت‌های ساختمانی جهت ناب سازی
۳- استفاده از شبیه‌سازی پیشامد گسسته برای ناب‌سازی چرخه فعالیت‌های ساخت
۴- مقایسه و ارزیابی چرخه فعالیت ساختمانی قبل و بعد از ناب سازی
۵- ارائه‌ی یک‌راه کار برای بهبود مستمر در چرخه فعالیت‌های ساختمانی و پیاده‌سازی اصل تعقیب کمال در چرخه فعالیت‌های ساخت
۶- شناسایی آسیب‌پذیری استفاده مستمر از تئوری ساخت ناب در چرخه فعالیت‌های ساخت

## ۳- روش تحقیق

در این پژوهش سعی بر آن است تا از شبیه‌سازی پیشامد گسسته برای ناب‌سازی چرخه فعالیت‌های ساختمانی استفاده گردد. برای این منظور ابتدا با بهره‌گیری از مشاهدات میدانی به تهیه و ترسیم روند چرخه فعالیت ساخت موردنظر پرداخته شد، سپس از طریق به‌کارگیری نمودار فرآیند عملیات[1](OPC) و نمودار فرآیند جریان[2](FPC)، جریان ارزش چرخه فعالیت ساخت موردبررسی، ترسیم شد، بعد از ترسیم جریان ارزش به ثبت داده‌های مربوط به زمان فعالیت‌ها پرداخته شد و در مرحله‌ی بعد نحوه‌ی بدست آوردن توزیع احتمال برای زمان هر فعالیت شرح داده‌شده است و در گام بعد مدل چرخه فعالیت موردبررسی در محیط نرم‌افزار آرنا شبیه‌سازی‌شده و پس از منطق سنجی و اعتبارسنجی به اعمال اصول چهارگانه ناب بر مدل پایه و تجزیه تحلیل اطلاعات بدست آمده از مدل ناب شده پرداخته می‌شود، و در پایان با در نظر گرفتن سه فاکتور زمان چرخه، کار آیی و بهره‌وری به اعمال دوباره اصول ناب چهارگانه (تا حدی که امکان بهبود در مدل وجود داشته باشد) به مدل ناب شده پرداخته‌شده است تا از این طریق اصل پنجم تئوری ناب که همان اصل تعقیب کمال است، نیز در چرخه فعالیت موردبررسی پیاده‌سازی گردد.

## ۴- معرفی ساخت ناب

در دوره زمانی بین ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ میلادی شرکت‌های خودروسازی در ایالات‌متحده آمریکا و دیگر شرکت‌های تولیدی شروع به پژوهش در مورد تفکر ناب که توسط شرکت تویوتا موتور ابداع‌شده بود کردند و سپس تحت‌فشار رقابت جهانی به اتخاذ دستورالعمل‌ها و ابزار تفکر ناب پرداختند. به علت موفقیت این تفکر (ناب) در صنعت تولید، از حدود دهه‌ی ۱۹۹۰، صنعت ساخت به فکر کاربرد تولید ناب در محدوده خود شد[۲]. در طول سال‌های اخیر تعداد زیادی از پژوهشگران تلاش‌های بسیاری در این راستا نموده و پس از بررسی و استفاده از تجربیات افراد در صنعت تولید، فلسفه جدیدی در صنعت ساخت با استفاده از الهامات بدست آمده از تولید ناب در سطح کارخانه‌ای را پیشنهاد نموده‌اند. کاسکلا در سال۱۹۹۲ ایده‌ی ساخت ناب را با در نظر گرفتن هر سه روش تولیدی دستی، انبوه و ناب پایه‌گذاری نمود. ووماک و جونز در سال ۱۹۹۶ اصول تفکر ناب را معرفی کردند و گروه بین‌المللی ساخت ناب[3] نیز پژوهش‌هایی را در کاربرد تکنیک‌های ناب در صنعت ساخت انجام داده و روش‌هایی برای برنامه‌ریزی،کنترل و بهبود مؤثر، تعریف نموده است.

### ۴-۱- تحقق ساخت ناب در فرآیندهای ساخت

عباسیان حسینی و همکاران [۲]، نظریه اصلی تفکر ناب که مرتبط با چرخه فعالیت‌های ساخت می‌باشد را به چهار دسته تقسیم‌بندی نمودند؛ ۱- توجه به جریان کاری در چرخه فعالیت‌های ساخت ۲- ارزش‌آفرینی در چرخه فعالیت‌های مربوطه ۳- تحویل به‌موقع (مفهوم کشش) ۴- تلاش برای خطاناپذیر کردن چرخه فعالیت‌ها. علاوه بر موارد ذکرشده جهت تکمیل پیاده‌سازی تئوری ناب در صنعت ساخت پیشنهاد می‌گردد اصل تعقیب کمال نیز بر دسته‌بندی بالا اضافه گردد تا روند بهبود در چرخه‌های ساخت به‌وسیله این اصل به‌گونه‌ای مستمر دنبال شود. بامطالعه دلایل موفقیت تئوری ناب در صنایع تولیدی می‌توان به این حقیقت دست‌یافت که نقش این اصل در بهبود چرخه‌های تولیدی و درنتیجه بهبود کیفیت محصولات نهایی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد، زیرا به‌واسطه‌ی این اصل است که بهبودهای مقطعی و اتفاقی در یک چرخه جای خود را به بهبودهای هدفمند و یکپارچه (مادامی‌که تولید یک محصول در جریان باشد) می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جهت ایجاد بهبود پایدار در یک چرخه فعالیت ساختمانی علاوه بر اصول چهارگانه ذکرشده در بالا به پیاده‌سازی اصل تعقیب کمال نیز باید اقدام نمود. در ادامه به معرفی پنج اصل تئوری ساخت ناب پرداخته‌شده است.

## ۵- معرفی اصول ساخت ناب:

### ۵-۱ - توجه به جریان کاری در چرخه فعالیت‌های ساخت

بر اساس دیدگاه تبدیل، فرض بر این است که روند ساخت یک فرآیند تبدیل ورودی به خروجی‌هاست [۱۰]. بنابراین بر اساس این دیدگاه سنتی تنها راه‌حل بهبود، تمرکز بر بهبود فرآیندهای تبدیلی می‌باشد. از مباحث اصلی ساخت ناب می‌توان دریافت که نیاز فرآیندها نه‌تنها

1 -Operation process Chart
2 -Flow Process chart
3 -International Group Of Lean Construction

توجه به تبدیل‌هاست، بلکه توجه به تجزیه تحلیل این تبدیل‌ها و نگاه ویژه به جریان تولید و ایجاد ارزش نیز می‌باشد [۹]. تفکر ناب تلاش می‌کند که به جریان پیوسته‌ای دست یابد که هیچ‌گونه اتلاف، صف و انقطاعی در آن وجود نداشته باشد، و همچنین زمان انتظار نیروی کاری، پایین و کار آیی و بهره‌وری بالا باشد. برای رسیدن به چنین هدفی ابتدا بایستی فعالیت‌ها، جریان کار میان آن‌ها، روابط و منابع آن‌ها را شفاف نشان داد. در حقیقت روشی برای درک یک چرخه فعالیت و ملزوماتش موردنیاز می‌باشد. در سیستم‌های ناب، دیدگاه جریانی در مورد چرخه فعالیت‌ها به جابجایی اولیه، اطلاعات و تجهیزات مرتبط می‌شود. در حقیقت در دیدگاه جریانی نه‌تنها چرخه فعالیت‌ها شامل عملیات تبدیلی می‌باشند، بلکه شامل بازرسی، انتظار و جابجایی اطلاعات، مواد اولیه و تجهیزات نیز خواهند بود به‌گونه‌ای که این موضوع باعث فراهم آمدن فرصت‌هایی برای ایجاد بهبود در چرخه فعالیت موردنظر می‌شود. لازم به ذکر است که دیدگاه جریانی در چرخه فعالیت-های ساخت پیش‌نیاز به‌کارگیری قوانین تفکر ناب است [۱۱]. السودیری [۵]، در این رابطه معتقد است که می‌توان روابط میان منابع، فعالیت‌ها و جریان مواد و اطلاعات موجود در هر چرخه از فعالیت ساختمانی را با نقشه‌ی جریان ارزش نمایش داد. نقشه جریان ارزش، ابزار مفیدی است که با تصویرسازی فعالیت‌ها و روابط آن‌ها کمک می‌کند تا بتوان جریان مواد اولیه چرخه فعالیت‌های ساخت را مطالعه و درک کرد. با استفاده از این ابزار می‌توان جریان ارزشی منتهی به محصول نهایی را به‌صورت شفاف نشان داده و حرکت آن را ترسیم نمود، در این راستا در بخش ۶ این مقاله به تریسم جریان ارزش چرخه فعالیت موردمطالعه که از طریق مشاهده عینی و مصاحبه با خبرگان بدست آمده است، پرداخته‌شده است.

## ۵-۲- ارزش‌آفرینی در چرخه فعالیت‌های مربوطه

یکی دیگر از جنبه‌های اساسی تفکر ناب توجه ویژه به ارزشی است که به محصول نهایی منتقل می‌گردد. ازنقطه‌نظر تفکر ناب، فعالیت‌های موجود در جریان کار به دودسته فعالیت‌های ارزش‌آفرین و غیر ارزش‌آفرین تقسیم می‌شوند. فعالیت‌های ارزش‌آفرین آن دست از فعالیت‌ها هستند که مستقیماً برای محصول نهایی ارزش‌افزوده ایجاد می‌کنند و دیگر فعالیت‌ها در گروه فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین جای می‌گیرند [۱۲]. فعالیت‌های ارزش‌آفرین، ارزشی را که مشتری انتظار دارد یا درخواست کرده است را ایجاد می‌کند. درصورتی‌که فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین فعالیت‌هایی هستند که این ارزش را ایجاد نمی‌کنند [۹]. برخی محققین، مدعی‌اند که وجود برخی فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین، اجتناب‌ناپذیر است [۷]، لذا در این موارد تمرکز اصلی باید بر کمینه کردن این‌گونه فعالیت‌ها باشد. وجود درصد بالای فعالیت-های غیر ارزش‌آفرین، بیانگر پتانسیل بالای ناب‌سازی در چرخه فعالیت‌های ساخت می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، در بررسی پانزده شرکت ساختمانی در شرق کانادا مشخص شد که آن‌ها تنها ۴۶ درصد زمان کاری را صرف فعالیت‌های ارزش‌آفرین می‌کنند. یا در تحقیق دیگری میزان زمان صرف شده کارکنان پروژه نگهداری خطوط فاضلاب، بر فعالیت‌هایی که به پروژه ارزش اضافه می‌کنند، تنها ۳۲ درصد از مجموع زمان به‌دست‌آمده می‌باشد [۷]. پس از بررسی در قسمت‌های قبل مشخص شد که توجه به جریان کاری در چرخه فعالیت‌های ساخت، می-تواند به شفاف‌سازی فعالیت‌ها و تشخیص فعالیت‌های ارزش‌آفرین و غیر ارزش‌آفرین کمک کند. پس از مشخص نمودن جریان کاری باید به ایجاد حداکثر ارزش در یک چرخه فعالیت پرداخته شود. ارزش‌آفرینی در یک چرخه با توجه به سه رویکرد، به شرح زیر به یک چرخه فعالیت ساخت اعمال می‌گردد [۱]:

الف) ارزش‌آفرینی در چرخه از طریق طراحی چرخه به صورتی که فعالیت‌های ارزش‌آفرین به‌طور یکپارچه در جریان باشند.

ب) ارزش‌آفرینی در چرخه از طریق کاهش فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین که خود به‌وسیله دو ابزار ساده‌سازی چرخه و استفاده بهینه از نیروی انسانی در یک چرخه قابل پیاده‌سازی است.

ج) ارزش‌آفرینی در چرخه از طریق مهندسی مجدد چرخه فعالیت

## ۵-۳- تحویل به‌موقع (مفهوم کشش)

یکی دیگر از مشکلات مرسوم در صنعت ساخت در انتظار نگه‌داشتن کارگران در اثر به‌موقع نرسیدن مصالح، یا انتظار برای بارگیری، حمل و انتقال مصالح موردنیاز به‌پای کار می‌باشد. مجموع زمان‌های تلف‌شده در موارد بالا باعث کاهش بهره‌وری و کار آیی در طی انجام یک پروژه می‌شود. حالت دیگری که ممکن است در یک کارگاه ساخت ایجاد شود رسیدن مواد و مصالح زودتر از موعد مقرر می‌باشد. که این موجودی غیرضروری در کارگاه باعث ایجاد هزینه‌های اضافی و حمل بیهوده مصالح می‌شود. بنابراین اصل کشش به معنای به‌موقع رسیدن مصالح موردنیاز می‌باشد [۲]. تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهد که در اثر نبودن مصالح به میزان کافی در پای‌کار، کارگران به‌طور ناخودآگاه، سرعت کار کردن خود را کاهش می‌دهند [۱۳]. برای پیاده‌سازی مفهوم کشش، یکی از ابزارها و راه‌های مناسب می‌تواند ایجاد یک برنامه‌کاری حساب‌شده بین پیمانکار و تأمین‌کننده باشد تا مصالح درست و به‌موقع به‌پای کار برسد [۷].

### ۵-۴- تلاش برای خطاناپذیر کردن چرخه فعالیت‌ها (پوکایوکه)

پوکایوکه با حذف کارهای تکراری و فعالیت‌هایی که وابسته به حافظه انسان است از اتلاف و اشتباهاتی که منجر به تولید محصول معیوب می‌گردد جلوگیری می‌نماید. پوکایوکه به‌عنوان یک ابزار بازرسی نقش مهمی دررسیدن به عیوب صفر را دارد. مفهوم پوکایوکه مدت‌ها پیش به گونه‌های مختلفی وجود داشته است، یک مهندس ژاپنی به نام شی جو شینگو نظریه‌ای را برای رسیدن به عیوب صفر و حذف بازرسی‌های کنترل کیفی توسعه داد [۱]. اساس پوکایوکه به ذکاوت و هوش کارکنان مبتنی است. پوکایوکه با حذف کارهای تکراری و فعالیت‌هایی که وابسته به حافظه و احتیاط هستند، وقت و فکر کارکنان را آزاد نموده تا ایشان بتوانند وقت خود را به انجام فعالیت‌های ارزش‌آفرین اختصاص دهند. در محیط پیچیده کاری، ممکن است بعضی از کارها اشتباه انجام شوند و هرروز این امکان وجود دارد که این اشتباهات منجر به تولید محصول معیوب گردند. عیوب، اتلاف محسوب خواهند شد و اگر شناسایی نشوند، انتظارات کیفی مشتریان برآورده نمی‌شوند، پوکایوکه بر این اعتقاد استوار است که نباید حتی تعداد کمی کالای معیوب تولید گردد [۲]. عیوب پیش‌آمده در کارهای ساختمانی، همواره جزئی از مهم‌ترین دغدغه‌های افراد مسئول در صنعت ساخت بوده است. زمانی که عیبی به وجود می‌آید و سپس اصلاح شود، کار مجدد انجام‌شده است. منظور از کار مجدد، کاری اضافه بر برنامه است که درنتیجه درست انجام ندادن کار و به وجود آمدن عیب در آن کار باید دوباره انجام شود [۱۴]. هدف پوکایوکه جلوگیری از ایجاد نقص، خطا و دوباره‌کاری قبل از روی دادن این موارد می‌باشد. تا در صورت حذف دوباره‌کاری‌ها حجم بازرسی‌ها و نظارت‌ها نیز که خود غیر ارزش‌آفرین هستند کاهش یابد [۹].

### ۵-۵ - تعقیب کمال

چنانچه ووماک و جونز [۱۵]، تأکید می‌کند: پس از انجام اصول ناب پیشین، همه‌ی افراد درگیر درخواهند یافت که کاهش میزان کار، زمان، فضا، هزینه و اشتباهات، حدی ندارد و می‌توان هر چه بیشتر محصولی را عرضه کرد که مشتری هر چه بیشتر و بیشتر واقعاً خواهان آن است، منظور از مشتری در اینجا می‌تواند افراد شاغل در بالادست یا حتی کاربر نهایی ساختمان باشد. این همان اصل تعقیب کمال نام دارد. مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش نیز اضافه نمودن این اصل از تولید ناب به تئوری ساخت ناب می‌باشد. جهت پیاده‌سازی این اصل در چرخه‌های ساخت جهت بهبود مستمر جریان ارزش هر محصول با برداشتن مجدد گام‌های قبل (اصول چهارگانه) برای درک بهتر ارزش از نگاه مشتری، تجزیه‌وتحلیل دقیق‌تر جریان ارزش برای شناسایی اتلاف‌های بیشتر و ایجاد یک حرکت پیوسته‌تر و تعمیم آن به بخش‌هایی که هنوز از طریق حرکت پیوسته به یکدیگر متصل نشده‌اند و سرانجام تعمیم سیستم کششی به جریان ارزش گسترده‌تر انجام می‌پذیرد.

## ۶- ترسیم جریان ارزش

در این پژوهش چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی در یک ساختمان ۹ طبقه موردبررسی قرارگرفته است. تیم فوم بتن‌ریزی در این پروژه از یک نیروی کاری برای هدایت پمپ و اختلاط ( مایع فوم، سیمان و آب) و دو نفر کارگر جهت حمل شلنگ در طبقات و پخش مایع فوم بتن در واحدها و یک مهندس که وظیفه بررسی دقت فوم‌بتن‌ریزی در طبقات و مشخص کردن شاخص ارتفاعی را بر عهده دارد، تشکیل‌شده است. بر اساس نقشه‌های طراحی، برای تکمیل هر طبقه از مجتمع مسکونی ۹ طبقه بتنی، تقریباً ۵۰ مترمکعب مایع فوم بتن لازم است که از این

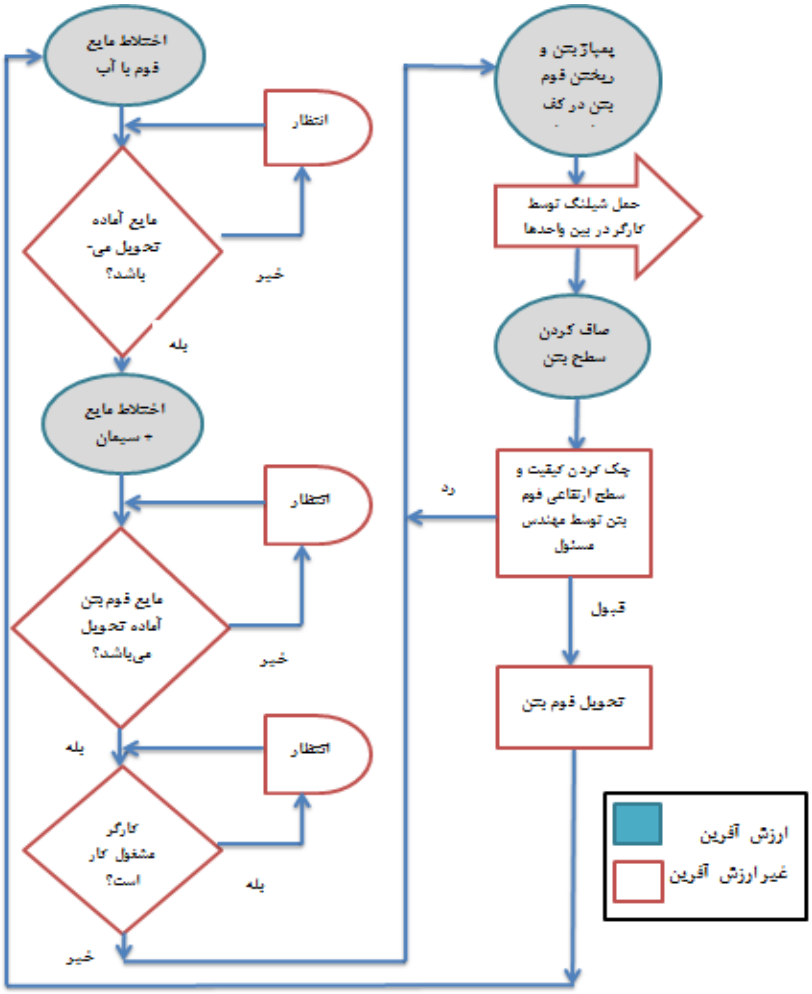
مقدار حدود ۴۰ مترمکعب صرف کف واحدها و ۱۰ مترمکعب صرف راهروها و راه‌های ارتباطی بین واحدهای یک طبقه‌ی مجتمع خواهد شد.

ارتباط و تعامل میان منابع، فعالیت و جریان اطلاعات موجود در هر چرخه فعالیت ساخت را می‌توان با ترسیم جریان ارزش آن روند ساخت نمایش داد. نمودار فرآیند عملیات و نمودار فرآیند جریان، نشان‌دهنده کلیه مراحل ساخت قطعات یک محصول از ماده اولیه تا محصول نهایی و چگونگی اتصال این قطعات به یکدیگر و جریان کاری بین آن‌ها می‌باشد. همچنین فعالیت‌هایی که به‌صورت مستقیم در ارزش-آفرینی برای محصول نقش داشته‌اند (فعالیت‌های ارزش‌آفرین) از دیگر فعالیت‌ها متمایز خواهند شد. در شکل ۱ جریان ارزش چرخه فوم-بتن‌ریزی نشان داده‌شده است، به‌گونه‌ای که سعی شد هر آنچه در حقیقت به وقوع می‌پیوندد در ترسیم جریان ارزش نیز قابل‌مشاهده باشد. ذکر این مورد ضروری است که بر اساس تجزیه‌وتحلیل جریان ارزش چرخه فعالیت موردنظر مشخص گردید که در طول جریان ارزش سه نوع فعالیت صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از:

الف) فعالیت‌هایی که آشکارا ارزش‌آفرین هستند (مانند پمپاژ مایع فوم بتن و ریختن آن در کف واحدها )

ب) فعالیت‌هایی که ارزش‌آفرین نیستند ولی به دلیل دانش فنی و ماهیت خود اجتناب‌ناپذیر هستند که این فعالیت‌ها اتلاف نوع اول نامیده می‌گردند (مانند بازرسی سطح توسط مهندس مسئول)

ج) فعالیت هایی‌که هیچ ارزشی نمی‌آفرینند و بی‌درنگ قابل‌حذف هستند که این فعالیت‌ها اتلاف نوع دوم نامیده می‌شوند (مانند زمان‌های انتظار).




**شکل ۱: ترسیم جریان ارزش برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی پروژه موردمطالعه**

## ۷- زمان‌سنجی

زمان‌سنجی یک فعالیت نمونه‌برداری از کار است. باید نمونه‌های کافی از جمعیت قطعات تولیدی انتخاب کرد. هر چه دفعات زمان‌سنجی کم باشد، انحراف معیار نتایج بیشتر است و برعکس هرچه تعداد مشاهدات زیاد باشد، انحراف کم خواهد بود، میانگین نمونه باید در حد منطقی نزدیک به میانگین جمعیت باشد. بنابراین تحلیل‌گر بایستی به‌اندازه کافی مشاهده داشته باشد. روش‌های مختلفی برای تعیین دفعات لازم برای زمان‌سنجی وجود دارد، یکی از این روش‌ها، روش آماری– توزیع نرمال می‌باشد. در این روش چنان چه طول زمانی هر عنصر کاری، بیش از ۲ دقیقه باشد ۵ بار مشاهده‌ی اولیه، در غیر این صورت ۱۰ مشاهده‌ی اولیه برداشت خواهد شد. برای فاصله اطمینان ۹۵٪ و خطای ۵٪ +- معادله تعداد مشاهدات موردنیاز به‌صورت زیر خواهد بود به‌گونه‌ای که:

n= تعداد مشاهدات اولیه

N= تعداد مشاهده‌های موردنیاز

x= هرکدام از زمان‌های برداشت‌شده

(۱) روش آماری_ توزیع نرمال

$$N= \left( \frac{40\sqrt{n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}}{\sum x} \right)^2$$

پس از محاسبه تعداد مشاهده‌های موردنیاز اگر این مقدار از n بیشتر بود به تعداد N-n بار دیگر به مشاهدات قبلی اضافه خواهد شد.

## ۸- توابع توزیع مربوط به زمان فعالیت‌ها

ورودی‌ها عواملی هستند که در یک مدل شبیه‌سازی بر نتایج آن، که خروجی خوانده می‌شوند، تأثیر می‌گذارند. متغیرهای تصادفی در کوتاه‌مدت رفتار مشخصی را از خود نشان نمی‌دهند ولی در درازمدت می‌توان به رفتارهای اساسی آن‌ها پی برد. برای درک رفتار بلندمدت متغیرها بهترین روش به دست آوردن تابع توزیع احتمال متغیرها می‌باشد. برای بدست آوردن توابع توزیع احتمال زمان فعالیت‌ها، از نرم‌افزار Input Analyzer استفاده‌شده است. برای انتخاب مناسب‌ترین توابع توزیع، از آزمون‌های نیکویی برازش[۴] (آزمون کلموگرف اسمیرنف[۵] ، آزمون خی دو[۶] و آزمون آندرسون دارلینگ[۷]) استفاده‌شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی نتایج برازش توزیع‌های مربوط به فعالیت موردی تحقیق را نشان می‌دهد.

4 -Goodness-of-fit tests
5 -Kolmogorov-Smirnov test
6 -Chi-square test
7 -Anderson Darling test

جدول ۱: نتایج برازش توزیع‌های مربوط به چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی

| فعالیت | واحد جریان | توزیع | پارامترهای توزیع |
|---|---|---|---|
| اختلاط مایع فوم و آب | میکسر (۱,۷) مکعبی | Beta | β= 0.78<br>α= 0.66 |
| اختلاط مایع با سیمان | میکسر (۱,۷) مکعبی | Triangular | max= 7.61<br>min=6.29<br>value=7.6 |
| پمپاژ بتن و ریختن فوم بتن در کف واحدها | مترمکعب | Beta | β= 0.993<br>α= 0.87 |
| حمل شیلنگ در بین واحدها توسط کارگر | متر | Lognormal | β= 0.6<br>α= 0.426 |
| تسطیح | مترمربع | Weibull | β= 0.692<br>α= 0.2.34 |
| بازرسی | مترمکعب | Gamma | β= 0.209<br>α= 0.3.76 |

## ۹- شبیه‌سازی پیشامد گسسته

صنعت ساخت، از قدیم نشان داده است که در بسیاری از زمینه‌ها به‌ندرت تغییری در خود اعمال می‌کند [۱۶]. درواقع، وقتی نتیجه اعمال یک روش و رویکرد جدید، از ابتدا به‌طور کامل مشخص نیست، توجیه مدیران و دست‌اندرکاران پروژه‌ها برای به‌کارگیری آن روش کاری بسیار دشوار به نظر می‌رسد. به‌کارگیری تئوری و قوانین ناب در روندهای ساخت، نیز از این قاعده مستثنی نیست. در این رابطه شبیه‌سازی کامپیوتری محیط و شرایط ایده آلی را برای اعمال و آزمایش رویکردهای جدید پدید می‌آورد [۱۷]. شبیه‌سازی سیستم‌های پیشامد گسسته عبارت است از مدل‌سازی سیستم‌هایی که متغیر حالت در آن‌ها تنها در مجموعه‌ای از مقاطع گسسته‌ی زمان تغییر می‌کند. در یک مدل پیوسته، وضعیت سیستم می‌تواند در طول زمان به‌صورت پیوسته تغییر کند. به‌عبارت‌دیگر سیستم پیشامد پیوسته[۸]، سیستمی است که متغیرهای آن به‌طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کنند، درحالی‌که در یک سیستم پیشامد گسسته[۹] تغییرات فقط در نقاط گسسته‌ای از زمان رخ می‌دهند. هرچند یک سیستم تماماً گسسته یا تماماً پیوسته در واقعیت وجود ندارد، اما سیستمی که خصوصیات غالبش، پیوستگی را نشان ندهد، پیشامد گسسته تعریف می‌گردد و بالعکس. به‌هرحال، مروری بر ادبیات حاکی از آن دارد که شبیه‌سازی به‌صورت پیشامد گسسته، مناسب‌ترین و مؤثرترین نوع برای مدل‌سازی چرخه فعالیت‌های ساخت به شمار می‌رود. برای نمونه چندین مقاله معتبر که در آن‌ها از شبیه‌سازی پیشامد گسسته جهت شبیه‌سازی چرخه فعالیت‌های ساخت استفاده‌شده است عبارت‌اند از السودیری، [۵]؛ حسن و گرابر، [۱۷]؛ عباسیان حسینی و همکاران، [۲]؛ نیک اختر و همکاران، [۹]. شبیه‌سازی چه به‌صورت دستی چه به‌صورت کامپیوتری، تقلیدی از عملکرد سیستم واقعی باگذشت زمان است که به ایجاد ساختگی تاریخچه سیستم و بررسی آن به‌منظور دستیابی به نتیجه‌گیری در مورد ویژگی‌های عملکرد واقعی آن می‌پردازد. شبیه‌سازی اصولاً به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به

عملکرد سیستم در چارچوب رابطه‌های ریاضی و منطقی می‌باشد. شبیه‌سازی یکی از پرکاربردترین ابزار موجود علم تحقیق در عملیات است که:

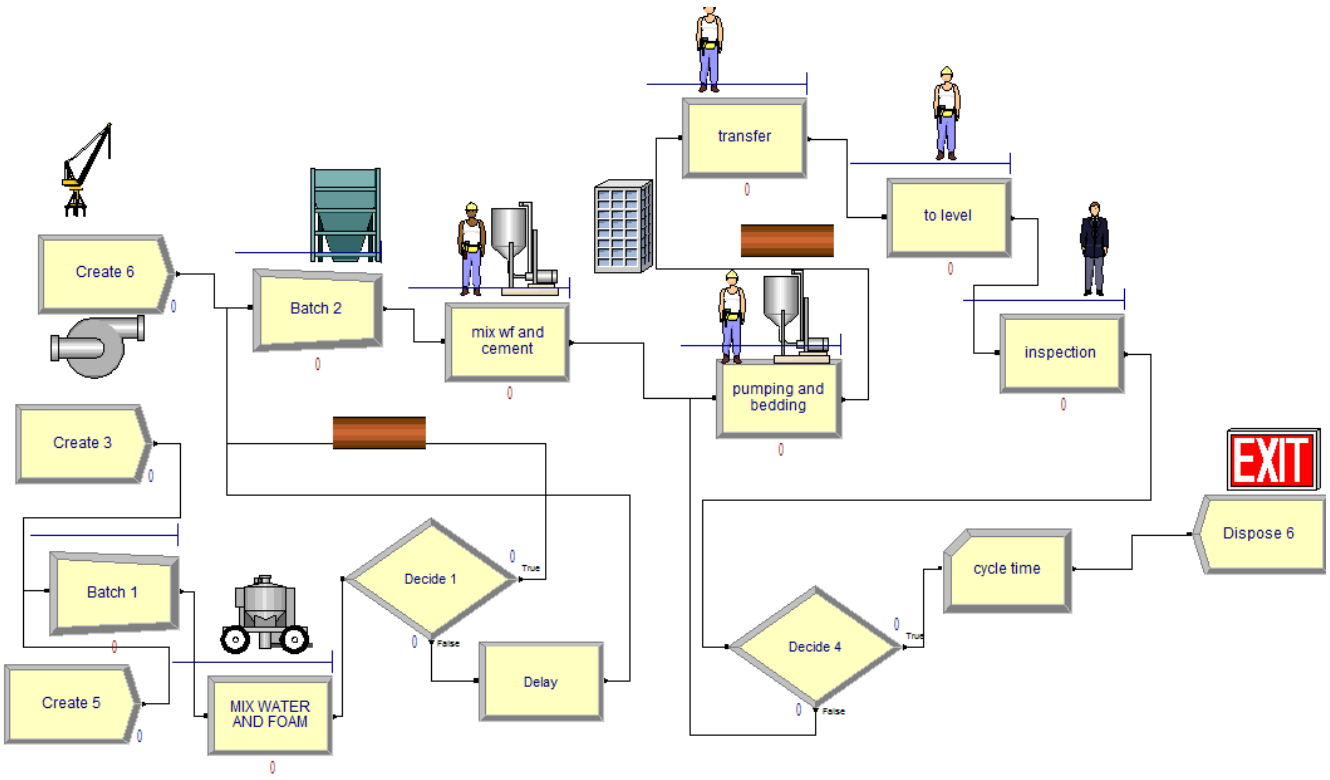
- اجازه ارزیابی عملکرد سیستم را پیش از پدید آمدن می‌دهد.
- مقایسه گزینه‌های گوناگون را بدون ایجاد اختلال در سیستم واقعی میسر می‌سازد.

3-Continues-event
9 -Discrete-events

- فشرده‌سازی زمان را به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های به‌موقع انجام می‌دهد.
- آشکارسازی کمبودهای مربوط به طراحی یک سیستم را انجام می‌دهد.
- در برجسته کردن فرصت‌ها برای بهبود عملکرد سیستم مؤثر می‌باشند.

## ۱۰- ساخت مدل شبیه‌سازی پایه در نرم‌افزار Arena

نرم‌افزار ارنا با محیا کردن یک محیط شبیه‌سازی تشکیل‌شده از انواع ماژول‌های الگو (که بر اساس زبان SIMAN نوشته‌شده است و با اشکال گرافیکی نمایش داده می‌شود)، ابزار تحلیل نتایج و نیز انواع گزارش‌گیری از مدل، امکان شبیه‌سازی چرخه فعالیت‌های ساخت را با انعطاف‌پذیری زیاد به وجود می‌آورد. برای ساخت مدل‌های شبیه‌سازی علاوه بر توابع توزیع، از جریان ارزش ترسیم‌شده برای چرخه‌های ساخت که قبلاً به آن اشاره شد، استفاده می‌شود. شکل ۲ مدل شبیه‌سازی‌شده چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی را پس از منطق سنجی و اعتبار سنجی نشان می‌دهد. ازاین‌پس مدل مذکور مدل پایه نام‌گذاری می‌گردد.




**شکل۲: مدل شبیه‌سازی پایه برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی**

## ۱۱- منطق سنجی مدل شبیه‌سازی‌شده

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد برای دستیابی به مدل پایه، ابتدا مدل شبیه‌سازی‌شده اولیه برای چرخه فعالیت موردبررسی ساخته شد. سپس، اصلاحات فراوانی صورت گرفت تا این مدل منطق و نتایجی مشابه با واقعیت داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر مدل‌ساز از طریق منطق سنجی، به بررسی منطق حاکم بر مدل ساخته‌شده می‌پردازد. این امر بدین منظور صورت می‌گیرد که مدل هیچ‌گونه خطای منطقی نداشته و همان‌گونه که از آن انتظار می‌رود عمل کند. در این مقاله برای منطق سنجی مدل اولیه از تکنیک پیگیری رفتار یک‌نهاد مشخص در مدل استفاده‌شده است، به‌گونه‌ای که در این مرحله نیاز است منطق داخلی مدل، از طریق دنبال کردن حرکت یک‌نهاد مشخص (که می‌تواند حرکت یک مترمکعب فوم بتن در مدل باشد)، در مدل بررسی و نحوه مواجهه آن با ماژول‌های مختلف تحت نظر قرار بگیرد. برای نمونه،

نحوه بررسی حرکت یک مترمکعب فوم بتن را در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی و در عبور از یکی از ماژول‌های اصلی (تسطیح سطح فوم بتن، پمپاژ و ریختن فوم بتن و حمل شلنگ) توضیح داده‌می‌شود. برای این منظور، خروجی حاصل از این فعالیت با خروجی متناظر با کل چرخه، آن‌گونه که در زیر توضیح داده می‌شود، مقایسه می‌گردد تا صحت آن مشخص شود. همان‌گونه که در نقشه جریان نیز مشخص است، این فعالیت توسط نیروی انسانی تحت عنوان "کارگر ۱" انجام‌شده است. بنابراین از نتایج حاصل از اجرای مدل، بر روی کارکرد این منبع متمرکزشده و همان‌گونه که در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود میزان میانگین درصد زمانی که فرد کارگر ۱ مشغول کار بوده است برابر عدد ۰,۸۱۱۱ است. به‌عبارت‌دیگر این فرد در ۸۱ درصد از زمان یک سیکل فوم‌بتن‌ریزی که در جدول ۲ نشان داده‌شده است، مشغول به کار بوده است (قبل از اجرای فرآیند شبیه‌سازی به دلیل فشار کاری بالای کارگر مذکور در سایت کارگاهی و کمبود نیروی انسانی در این چرخه فعالیت این نتیجه پیش‌بینی می‌شد). بنابراین با توجه به این‌که این منبع (کارگر شماره ۱) به‌طور میانگین برای یک مترمکعب فوم بتن حدود ۱۳,۴۸دقیقه زمان صرف می‌کند (طبق تابع توزیع مربوطه)، مجموع مترمکعب فوم بتنی که او اجرا کرده است طبق محاسبات ساده زیر به دست می‌آید:

میزان زمان (به دقیقه)که کارگر ۱ مشغول بوده است =۰,۸۱۱۱×زمان کل سیکل

.۸۱۱۱ × ۲۷,۷۱۸۸=۲۲,۴۵۲۲ دقیقه

حال ازآنجاکه زمان کل کار، کارگر۱ برای اجرای یک مترمکعب فوم بتن در سه مرحله حمل‌ونقل، پمپاژ و حمل شلنگ ۱۳,۴۸ دقیقه می‌باشد، حجم خروجی کاری این منبع در یک سیکل کاری با میانگین زمان ۲۷,۷۱۸۸ دقیقه برابر است با:

$$\frac{\text{22.4522 دقیقه} \times 1 \text{ مترمکعب}}{\text{13.48 دقیقه}} = \text{۱,۶۶۵ مترمکعب}$$

از طرفی حجم فوم‌بتن در نظر گرفته‌شده برای این چرخه حجم مخزن پمپ می‌باشد، که برابر ۱,۷ مترمکعب بود و درواقع مدل بر مبنای آن ایجاد گردید. درنتیجه اختلاف میان این دو، در حدود ۳ درصد است که این امر نیز قابل‌قبول است. بر این اساس عملکرد تمام ماژول‌ها، منابع و تصمیم‌گیری‌ها طبق این روند پیگیری و بررسی شد. سپس مشکلات احتمالی موجود در عملکرد ماژول برطرف شد تا مدل برای اعتبارسنجی محیا گردد.

**جدول ۲ : متوسط زمان چرخه فوم بتن‌ریزی**

| | میانگین | بازه میانگین | کمترین میانگین | بیشترین میانگین | کمترین مقدار |
|---|---|---|---|---|---|
| زمان چرخه | ۲۷,۷۱۸۸ | ۲,۰۳ | ۱۹,۳۵۲۰ | ۴۷,۰۲۴۵ | ۲,۹۳۷۶ |

**جدول ۳: نتایج مربوط به درصد مشغول بودن منابع در اجرای مدل برای ۱,۷ مترمکعب فوم بتن‌ریزی**

| درصد مشغول بودن | میانگین | بازه میانگین | کمترین میانگین | بیشترین میانگین |
|---|---|---|---|---|
| مهندس | ۰,۲۸۳۱ | ۰,۰۱ | ۰,۲۴۶۴ | ۰,۳۱۳۲ |
| اپراتور | ۰,۶۶۰۶ | ۰,۰۲ | ۰,۵۶۰۶ | ۰,۷۵۷۷ |
| کارگر۲ | ۰,۶۹۹۹ | ۰,۰۱ | ۰,۶۲۴۸ | ۰,۷۴۸۱ |
| کارگر ۱ | ۰,۸۱۱۱ | ۰,۰۱ | ۰,۷۳۰۰ | ۰,۸۳۳۳ |

از مقایسه زمان یک سیکل در واقعیت با آنچه در خروجی مدل به دست می‌آید، میزان معتبر بودن مدل موردسنجش قرار می‌گیرد. اما عموماً برای مقایسه خروجی‌های مدل و واقعیت باید مدل را بیش از یک‌بار اجرا کرد ([۱۷]؛[۶]). با استفاده از معادله ۲ تعداد دفعات مورد-نیاز اجرای مدل برای مدل ساخته‌شده، عدد ۲۹ بدست آمد.

(۲)- محاسبه تعداد تکرار مدل

$$N(m)=\frac{s.m.(t_{m-1},1-\frac{\alpha}{2})}{\bar{X}(m)\varepsilon}$$

$N(m)$ : تعداد اجرای موردنیاز مدل ( m تعداد اجرای اولیه مدل است؛ مدل را چندی بار اجرا می‌کنیم، مثلاً ۵ بار)

$\bar{X}(m)$ : میانگین m بار اجرای اولیه مدل

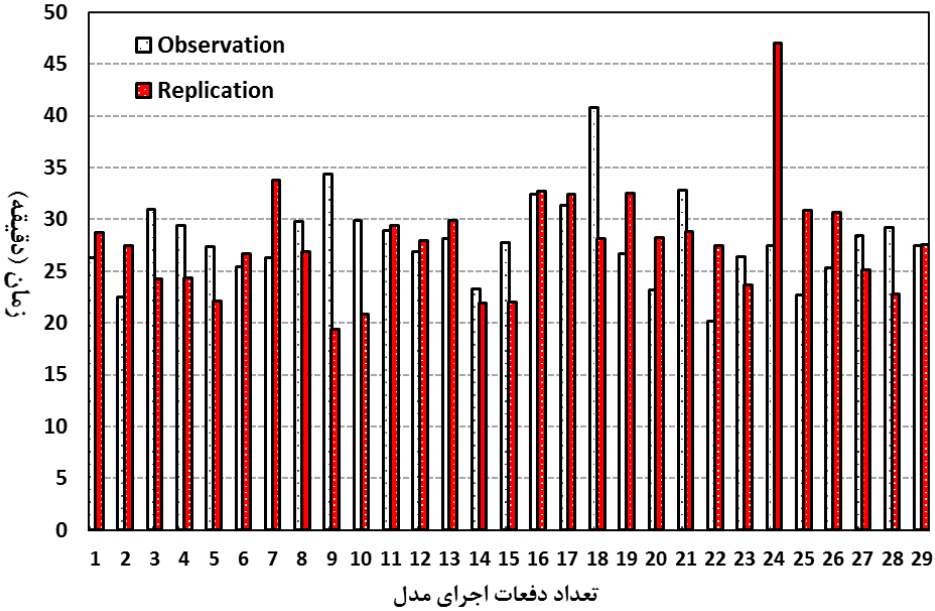
$S$ : انحراف معیار m بار اجرای اولیه‌ی مدل

α : سطح اطمینان (۹۵٪ فرض می‌شود)

ε : خطای مجاز (۵٪ فرض می‌شود)

$t_{m-1},1-\frac{\alpha}{2}$ : مقدار استخراج‌شده از توزیع t با توجه به سطح اطمینان

قیاس برای اعتبارسنجی بدین‌صورت انجام می‌شود که میانگین زمان چرخه‌های مشاهده‌شده در واقعیت با نتایج حاصل از ۲۹ بار اجرای مدل مقایسه می‌شود و اختلاف اندازه‌گیری خواهد شد (این روش در مقاله‌های معتبری نظیر حسن و گرابر، [۱۷] ؛ عباسیان حسینی و همکاران [۲] و وانگ و همکاران [۶]؛ استفاده‌شده است). نتایج حاصل از اعتبار سنجی برای مدل ساخته‌شده در شکل ۳ قابل‌مشاهده می-باشد.




شکل۳: نتیجه نهایی اعتبار سنجی مدل چرخه فوم بتن‌ریزی

با توجه به شکل ۳ بیشترین میزان زمان چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی در ۲۹ بار اجرای مدل و مشاهدات به ترتیب برابر ۴۷ و ۴۱ دقیقه می‌باشند. همچنین کم‌ترین مقدار در دو حالت بالا به ترتیب ۱۹ و ۲۰ دقیقه می‌باشد، درصورتی‌که میانگین زمان برای ۲۹ بار اجرای چرخه در مدل و همین تعداد مشاهده‌ی واقعی به ترتیب برابر ۲۷,۷۱ و ۲۸ دقیقه محاسبه‌شده است. همان‌گونه که در شکل‌های بالا نمایان است، میزان اختلاف نتایج زمانی در یک سیکل چرخه فعالیت‌های ساختمانی بین مدل و واقعیت کم‌تر از ۵ درصد می‌باشد که این مورد بر اساس ادبیات موجود در این زمینه قابل‌قبول است (فرار و همکاران [۱۶]؛ حسن و گرابر [۱۷]؛ وانگ و همکاران [۶]).

## ۱۳- اعمال مفاهیم ناب به چرخه‌ها

پس از آماده شدن مدل‌های پایه زمان آن است که مفاهیم ناب شرح داده‌شده در بخش چهارم را به آن‌ها اعمال کرده و نتایج آن تجزیه‌وتحلیل شود. لازم به توضیح است، همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، بهبود در هر چرخه ساخت، به‌طور سنتی با به‌کارگیری روش‌ها و تجهیزات جدید، اضافه کردن نیروهای کاری و استفاده از متخصصان بیشتر همراه بوده که این امر نیز هزینه‌هایی را به همراه دارد و حتی در بعضی مواقع مقرون‌به‌صرفه نیست. اما تفکر ناب هیچ‌گاه هدف بهبود چرخه فعالیت‌ها را از طریق افزایش هزینه دنبال نخواهد کرد، بلکه می‌کوشد تا با همان امکانات، تجهیزات و نیروی کاری موجود و به‌کارگیری یک سری اصول ساده و کم‌هزینه، چرخه فعالیت مربوطه را در جهت ناب‌سازی پیش ببرد. فرآیند فوم‌بتن‌ریزی فرآیندی است که، وجود اتلاف‌های فیزیکی در آن بسیار کم می‌باشد و خود به‌نوعی یک فرآیند بهینه برای اجرای پوشش تأسیسات کف ساختمان محسوب می‌شود. قبل از اعمال مفاهیم ناب به مدل پایه برای چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی، نیاز است تا پتانسیل‌های موجود در این چرخه ارزیابی شود. درواقع، هدف این است تا با بررسی دقیق این چرخه و تحلیل نتایج ناشی از اجرای مدل ساخته‌شده، ابتدا ضعف‌ها و نقاط تأثیرگذار آن مشخص‌شده و موقعیت‌های بهبود در چرخه فعالیت نمایان شود. درنتیجه می‌توان دید بهتری برای انتخاب صحیح و مناسب اصول ناب مؤثر و مرتبط داشت. بدین منظور، فعالیت‌های چرخه فوم‌بتن‌ریزی که یا ارزش‌آفرین و یا غیر ارزش‌آفرین‌اند به تفکیک مشخص‌شده و مدت‌زمانی که کارگران صرف این فعالیت می‌کنند باهم جمع می‌شوند تا میزان کار غیر ارزش‌آفرین از ارزش‌آفرین تمییز داده شود. فعالیت‌هایی نظیر "اختلاط مایع فوم و آب" ،"اختلاط مایع کف و سیمان" و" پمپاژ بتن و ریختن فوم بتن در کف واحدها" از فعالیت‌هایی هستند که ارزش محصول نهایی را افزایش می‌دهند، درحالی‌که فعالیت‌هایی نظیر "انتظار کشیدن"،"انتقال شلنگ" و "بازرسی" و "کار مجدد" به محصول نهایی ارزشی اضافه نمی‌کنند و غیر ارزش‌آفرین محسوب می‌گردند. جدول ۴، میزان کار کل ،کار ارزش‌آفرین و کار غیر ارزش‌آفرین را به تفکیک برای چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی نشان می‌دهد. لازم به توضیح است به دلیل سهم پررنگی که زمان‌های انتظار در میزان کار افراد دارد، زمان انتظار در کارهای غیر ارزش‌آفرین به‌عنوان دسته‌ای جداگانه معرفی‌شده است.

**جدول ۴: میزان کار کل،کار ارزش‌آفرین و کار غیر ارزش‌آفرین برای چرخه فعالیت فوم بتن ریزی در حالت پایه**

| | زمان چرخه(دقیقه) | بهره‌وری(نفر-ساعت/مترمکعب) | کل کار انجام‌شده | کار ارزش‌آفرین | کار غیر ارزش‌آفرین | کار زمان انتظار |
|---|---|---|---|---|---|---|
| میانگین | ۲۷,۷۱۸۸ | ۲,۲۵ | ۳,۸۳ | ۰,۶۵۴ | ۰,۷۶۶ | ۲,۴۱ |
| درصد از کل | --- | --- | ۱۰۰٪ | ۱۷٪ | ۲۰٪ | ۶۳٪ |

لازم به ذکر است که واحد کلیه کارهای بدست آمده در این مقاله برحسب نفر-ساعت محاسبه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ۸۳ درصد از کاری که انجام می‌شود، صرف کارهایی می‌شود که غیر ارزش‌آفرین هستند. و تنها حدود ۱۷ درصد از کار انجام‌شده در چرخه

فوم‌بتن‌ریزی ارزش‌آفرین می‌باشند. این نشان از پتانسیل بالای این چرخه (باوجود اتلاف فیزیکی بسیار پایین) برای بهبود و ناب سازی دارد، درصورتی‌که در ابتدای این امر توقع چنین نتیجه‌ای نمی‌رفت. با توجه به اصول ناب که در بخش ۵ توضیح داده‌شده است برای پیاده‌سازی این اصول اقدامات زیر صورت گرفته است:

- **ارزش‌آفرینی در چرخه (طراحی چرخه به صورتی که ارزش به جریان درآید)**

همان‌گونه که در بخش ۶، در نقشه جریان چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی مشاهده شد، به‌صورت کلی این چرخه فعالیت بدین‌صورت است که ابتدا اختلاط آب و سیمان و مایع فوم بتن با یکدیگر صورت می‌گیرد، سپس در صورت آماده بودن کارگر شماره‌ی ۱ مایع فوم بتن حاصل به محل پای‌کار از طریق پمپ، به طبقات پمپاژ می‌گردد و سپس عملیات نهایی انجام می‌شود. این نوع عملیات باعث توقف حرکت فوم‌بتن در چرخه مربوطه می‌گردد، زیرا زمانی که فوم بتن پمپاژ خواهد شد که تمامی کارهای قبل آن انجام‌شده باشد به‌عبارت‌دیگر اپراتور زمانی مشغول به آماده کردن مایع فوم‌بتن می‌کند که اطمینان حاصل یابد که کارگر سیکل کاری قبلی را به پایان رسانده است. در یک جمله می‌توان گفت که یکپارچگی در چرخه وجود ندارد و کار مرحله‌به‌مرحله پیش می‌رود. این مسأله، از عوامل تأثیرگذار در غیریکنواخت بودن میزان مشغولیت اکیپ کاری همان‌گونه که جدول ۳ نشان می‌دهد، در مدل می‌باشد، چراکه هنگامی‌که یک فعالیت انجام می‌شود، تنها یک فرد می‌تواند درگیر شود و این مسأله باعث می‌شود بقیه‌ی اکیپ کاری تا زمانی که قسمت کار خود فرارسد در حالت انتظار به سر ببرند. همچنین این امر سبب می‌شود که در پایان هر چرخه فعالیت مقداری مایع فوم بتن به‌صورت اضافه‌تولید شود که این امر، ازنظر هزینه‌ای مطلوب پیمانکار نخواهد بود. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، "تفکر ناب" همیشه بر این اصل تأکید دارد که فعالیت‌ها و عملیات به‌گونه‌ای پیوسته جریان داشته باشند. درواقع برای ایجاد ارزش بیشتر در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی مذکور به‌گونه‌ای عمل می‌شود که پس از آماده شدن مایع فوم بتن، عملیات اجرای فوم‌بتن و بازرسی به‌طور پیوسته انجام شود به‌گونه‌ای که کلیه‌ی کارهای ارزش‌آفرین تا حد ممکن به‌طور پیوسته و بدون انقطاع صورت‌پذیرند، در غیر این صورت سعی می‌گردد با کاهش فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین نظیر حمل، جابه‌جایی و انتظار به‌وسیله‌ی اصل کشش به یک جریان یکپارچه دست‌یافت. پس‌ازاینکه امکان رسیدن به یک جریان یکپارچه بین فعالیت‌های ارزش‌آفرین میسر گردید در گام بعد جهت افزایش ارزش در چرخه به بررسی عملکرد کارکنان شاغل در چرخه پرداخته می‌شود تا با برقراری تعادل بین سهم زمان‌های کاری افراد شاغل در چرخه به بهینه‌سازی استفاده از نیروی انسانی از طریق کاهش زمان‌های انتظار دست‌یافته شود. با یک مهندسی مجدد نیز، بر اساس حرکت مایع فوم‌بتن در چرخه و اولویت دادن به فعالیت‌هایی که مایع فوم‌بتن در آن‌ها نقش نهاد را ایفا می‌کند باعث به حرکت درآمدن ارزش در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی می‌توان شد.

- **پیاده کردن مفهوم کشش**

همان‌گونه که اشاره شد یکی دیگر از مفاهیم اصلی ناب، مفهوم"کشش" است. درواقع مفهوم کشش در تعریف کلی بر این باور است که افراد و گروه‌های کاری در بالادست، تنها محصولی را به پایین‌دست جریان دهند که پایین‌دست به آن محصول نیاز دارد. درواقع هدف تفکر کششی آن است که محصولی که در بالادست تهیه می‌شود در صورتی به پایین‌دست ارسال شود که پایین‌دست منتظر آن باشد.

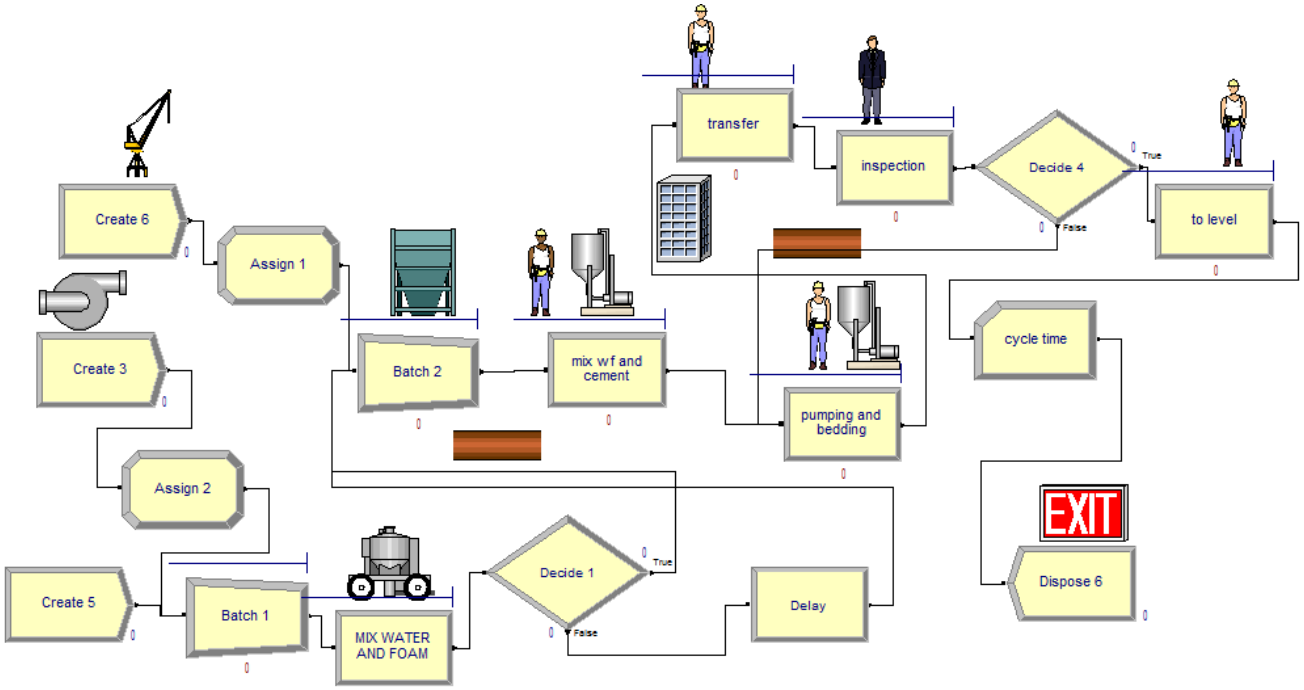
در اینجا سه محصول سیمان، آب و مایع فوم بتن نقش نهاد[10]یا محصول را بازی می‌کند به صورتی که ابتدا فوم وارد چرخه فعالیت می‌شود و سپس آب اضافه می‌گردد و در آخر سیمان وارد می‌گردد. ( برای بررسی کلیت چرخه بهتر است که مایع فوم در نظر گرفته شود). فرستادن بیش‌ازاندازه فوم بتن موردنیاز یک طبقه یا تأخیر در ارسال فوم بتن، ازجمله عواملی است که می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری و اتلاف فوم‌بتن گردد. برای تحقق اصل کشش با یک ارتباط مناسب بین اپراتور و کارگر ۱ در پای‌کار، فوم بتن لازم از بالادست به پایین‌دست یا پای‌کار ارسال می‌گردد. این مسأله در مدل با تغییر کلی‌ای که در برنامه زمانی ورودی دو نهاد سیمان و آب، داده شد تحقق یافت. به گونه

10 -Entity

ای‌که بر اساس ماژول Assign از ورود بیش‌ازاندازه‌ی این دو نهاد که در بالادست موردنیاز می‌باشد جلوگیری می‌گردد. برای هر دو نهاد همین تغییر طبق روال بالا انجام گرفت. علاوه بر موارد فوق ایجاد جریان پیوسته که در قسمت قبل انجام گرفت به پیاده‌سازی اصل کشش کمک خواهد کرد. ضمن اینکه اولویت کارهایی را که در انتها قرار دارند را افزایش داده تا در یک انتخاب برابر ، نیروی کاری، فعالیتی را که در چرخه فعالیت نهایی‌تر است را ابتدا به انجام رساند. به بیان واضح‌تر با این عمل کار به‌جای اینکه از ابتدا به سمت انتها فشرده شود از انتها کشیده می‌شود.

- **پوکایوکه:کاهش امکان بروز خطاها(تا حد ممکن)**

در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی پروژه موردمطالعه، تنها خطایی که ممکن است صورت گیرد، خطای ضخامت پوشش فوم بتن می‌باشد. به‌گونه‌ای که ضخامت فوم‌بتن ریخته شده کمتر یا بیشتر از سطح شاخص ارتفاعی تعیین‌شده باشد. از علل بروز این خطا می‌توان به عدم دقت کارگر (۱) در موقع ریختن فوم بتن با شلنگ، عدم توجه کارگر (۲) به سطح ارتفاعی تعیین‌شده در هنگام تسطیح سطح فوم‌بتن و عدم نظارت دقیق مهندس مسئول را نام برد. درواقع سردرگمی که در مراحل مختلف در پی حجم یکجا و بسیار بالای کار برای کارگر پیش می‌آید به‌راحتی می‌تواند ذهن کارگر را خسته، و او را دچار اشتباه و خطا کند. پوکایوکه تلاش می‌کند تا بارها کردن ذهن کارگر از کارهای پرحجم و دشوار، تمرکز لازم را برای جلوگیری از بروز هرگونه خطابه وجود آورد. بنابراین زمانی که چرخه به‌صورت یکپارچه دنبال می‌شود، حجم جریان یافته در هر قسمت کمتر می‌شود درنتیجه کارگر کمتر دچار خطا می‌گردد. از پیامدهای بارز دیگر خطاها، این است که میزان فوم‌بتنی که در پایان یک چرخه، ریخته شده است کم‌تر از مقدار تعیین‌شده باشد، که در این صورت تبعات زیادی خواهد داشت، به‌گونه‌ای که در فاز بعدی کف‌سازی حجم زیادی از ملات باید جایگزین این خطا گردد. برای این‌گونه جایگزینی مقدار بسیار زیادی زمان و هزینه صرف حمل ملات به‌پای کار، جابه‌جایی کارگران، زمان انتظار، دوباره‌کاری و... به این چرخه فعالیت تحمیل خواهد شد. درنتیجه نقص در این چرخه نه‌تنها موجب دوباره‌کاری‌ها و افزایش زمان و هزینه در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی خواهد شد، بلکه در چرخه فعالیت‌های بعدی (نظیر کف سازی) نیز اثر سوء خواهد داشت. این خطا نیز با یک پیوستگی و هماهنگی کافی بین افراد پایین‌دست و بالادست و نیز افزایش دقت در بازرسی در حین کار، می‌تواند تا حد زیادی کاهش یابد. پوکایوکه معتقد است که همواره می‌توان از وقوع این دسته از خطاهای انسانی غیرعمدی و ساده جلوگیری نمود. همان‌گونه که بیان شد یکی از شرایط مستعد خطا در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی به‌ویژه برای کارگران کم‌تجربه اشتباه در ضخامت فوم بتن ریخته شده می‌باشد. این خطا، در کارگران باتجربه در اثر کاهش تمرکز ناشی از فشار کار نیز وجود دارد. برای برطرف کردن و یا جلوگیری از به وجود آمدن این‌گونه خطاها از تعداد شاخص‌های ارتفاعی بیشتر و بازرسی همزمان مهندس مسئول هنگام فوم بتن‌ریزی (نه بعد از فوم بتن‌ریزی که در مدل پایه انجام می‌شد)، استفاده نمود. با فرض به‌کارگیری تمامی ابزاری که منجر به خطاناپذیری در مدل پایه می‌گردد، مدلی ایجاد می‌شود که در آن امکان بروز اشتباه توسط نیروی کاری به حداقل رسیده است. مدل ناب ساخته‌شده برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی در شکل ۴ قابل‌مشاهده است.




**شکل ۴: مدل ناب ساخته‌شده برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی**

پس از اعمال مفاهیم تفکر ناب به مدل پایه و ساخت مدل ناب، به بررسی تأثیر به‌کارگیری این مفاهیم در چرخه فعالیت موردنظر پرداخته می‌شود. بدین منظور مقایسه‌ای بین عملکرد و نتایج مدل پایه و مدل ناب ارائه می‌گردد. جدول ۵ نشان‌دهنده‌ی نتایج اجرای مدل ناب هست. لازم به ذکر است که این نتایج پس از ۲۹ بار اجرای مدل به‌دست‌آمده است. تعداد اجرای مدل از فرمول ۲ به‌دست‌آمده است. یکی از پارامترهای اصلی برای ارزیابی اعمال تفکر ناب در چرخه فعالیت‌های ساخت زمان چرخه می‌باشد که در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی در دو حالت پایه و ناب به ترتیب ۲۷,۷۱۸۸ و ۲۲,۴۸۹۱ می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود ۱۹ درصدی در کاهش زمان چرخه می‌باشد. این میزان بهبود نتیجه پیوستگی و به جریان انداختن ارزش در چرخه فعالیت مربوطه می‌باشد.

**جدول۵: میزان کار کل،کار ارزش‌آفرین و کار غیر ارزش‌آفرین برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی در حالت ناب اولیه**

| کار زمان انتظار | کار غیر ارزش‌آفرین | کار ارزش‌آفرین | کل کار انجام‌شده | بهره‌وری (نفر – ساعت/مترمکعب) | زمان چرخه(دقیقه) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲,۳۲ | ۱,۸۶ | ۱,۵۵ | ۵,۷۳ | ۳,۳۷۵ | ۲۲,۴۸۹۱ | میانگین |
| ۴۰٪ | ۳۲٪ | ۲۷٪ | ۱۰۰٪ | -- | -- | درصد از کل |

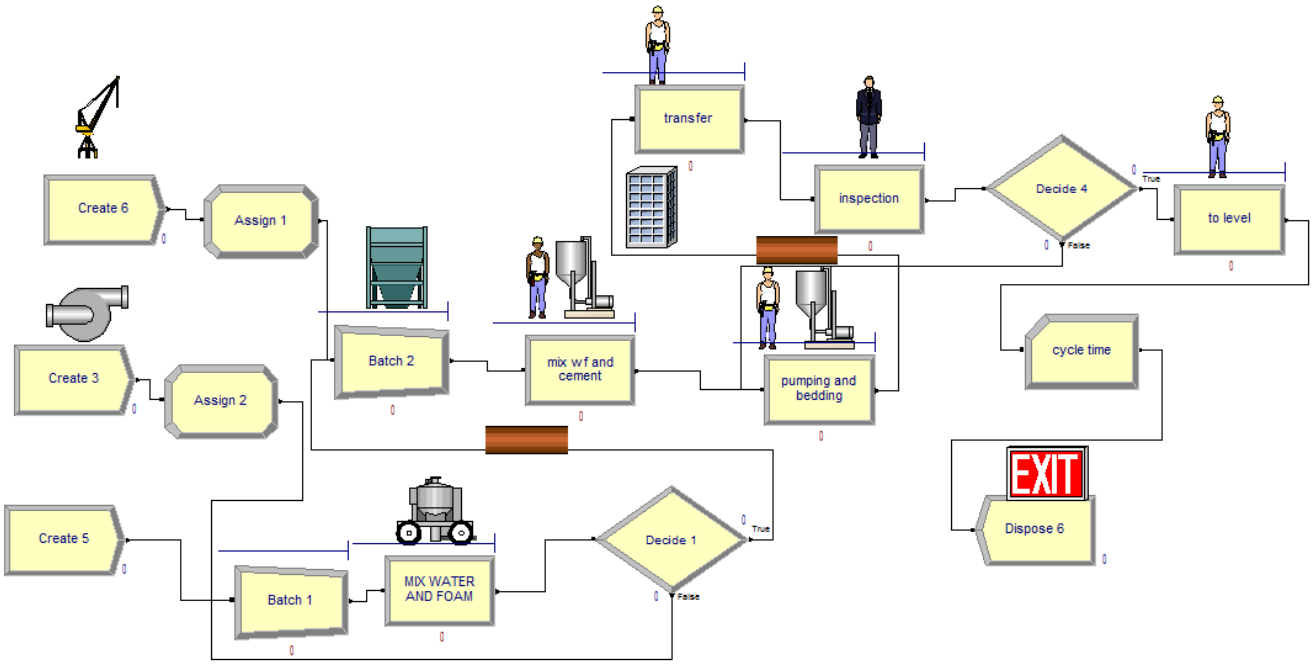
علاوه بر کاهش زمان چرخه، افزایش میزان زمان نیروی کاری بر روی کارهای ارزش‌آفرین نشان‌دهنده‌ی افزایش کارایی (میزان کارهای ارزش‌آفرین بر کل کار) می‌باشد، به‌گونه‌ای که میانگین کارایی نیروهای کاری درگیر در دو حالت پایه و ناب به ترتیب ۱۷ و ۲۷ درصد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی افزایش ۱۰ درصدی کارایی در چرخه فعالیت موردنظر می‌باشد. بااین‌حال می‌توان به رشد ۵۰ درصدی بهره‌وری به‌عنوان بارزترین بهبود در این مرحله از ناب سازی اشاره نمود. همان‌گونه که بیان شد طبق اصل پیگیری کمال کاهش اتلاف و روند بهبود در چرخه فعالیت‌ها حدی ندارد و با پیاده‌سازی مجدد اصول ناب در چرخه فعالیت ناب می‌توان به افزایش بهبود و کاهش زمان بیشتری در چرخه فعالیت فوم‌بتن‌ریزی دست‌یافت. پس از یک مرحله ناب سازی به این مسأله می‌توان پی برد که زمان‌های انتظار همچنان سهم بالایی

از زمان چرخه را در اختیاردارند بنابراین با استفاده از دو اصل کشش و به جریان انداختن ارزش به کاهش زمان انتظار چرخه اقدام می‌گردد. پس از اعمال مفاهیم تفکر ناب به مدل ناب اولیه و ساخت مدل ناب ثانویه که در شکل ۵ نشان داده‌شده است، به بررسی تأثیر به‌کارگیری استمرار در اعمال اصول ناب در چرخه فعالیت موردنظر پرداخته می‌شود. بدین منظور مقایسه‌ای بین عملکرد و نتایج مدل ناب اولیه و مدل ناب ثانویه ارائه می‌گردد. جدول ۶ نشان‌دهنده‌ی نتایج استمرار در پیاده‌سازی مجدد اصول ناب در مدل ناب اولیه را نشان می‌دهد.

**جدول۶: میزان کار کل،کار ارزش‌آفرین و کار غیر ارزش‌آفرین برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی در حالت ناب ثانویه**

| | زمان چرخه(دقیقه) | بهره‌وری(نفر – ساعت/مترمکعب) | کل کار انجام‌شده | کار ارزش‌آفرین | فعالیت‌های غیر ارزش‌آفرین | زمان انتظار |
|---|---|---|---|---|---|---|
| میانگین | ۱۶,۴۶۷۰ | ۳,۲ | ۵,۵ | ۲,۱ | ۱,۸ | ۱,۶ |
| درصد از کل | -- | -- | ۱۰۰ | ۳۸٪ | ۳۲٪ | ۳۰٪ |

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد کاهش زمان چرخه نسبت به حالت پایه برابر ۴۰ درصد، و نسبت به حالت ناب اولیه برابر ۲۶,۷۴ درصد می‌باشد. همچنین کارایی در این حالت برابر ۳۸ درصد است که نسبت به حالت پایه افزایش ۲۱ درصدی و نسبت به حالت ناب اولیه ۱۱ درصد افزایش داشته است. دیگر فاکتور مهم موردبررسی در این مرحله بهره‌وری می‌باشد، بااینکه این مقدار نسبت به حالت پایه ۴۲ درصد افزایش بهره‌وری را نشان می‌دهد ولی کاهش ۵ درصدی نسبت به حالت ناب اولیه نشان‌دهنده آسیب‌پذیری تئوری ساخت ناب در استفاده پی‌درپی از این تئوری در چرخه فعالیت‌های ساخت می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر می‌توان نتیجه گرفت با چشم‌پوشی از ۵ درصد کاهش در بهره-وری، تا دو مرحله ناب‌سازی می‌تواند بهبودهای مناسبی را در این چرخه فعالیت ایجاد کند، اما این کاهش نشانگر توقف در اعمال اصول ناب در این مرحله می‌باشد.




**شکل ۵: مدل ناب ثانویه ساخته‌شده برای چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی**

## ۱۴- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که اشاره شد، هدف از این تحقیق بررسی نتایج کاربرد و استمرار تئوری ساخت ناب درروند اجرایی یک چرخه فعالیت ساخت می‌باشد. توجه به ارزشی که به محصول در طول چرخه فعالیت افزوده می‌شود، نگاه جریانی داشتن به چرخه فعالیت‌های ساخت، استفاده از تفکر کششی به‌جای فشاری و نیز خطاناپذیر کردن چرخه‌های ساخت از مهم‌ترین قوانین برای دستیابی به یک‌روند ناب هستند. که در این مقاله موردتوجه قرارگرفته‌اند. نتایج حاصل‌شده از ناب سازی چرخه فعالیت‌های مذکور را می‌توان از ابعاد مختلف مانند کارایی، میزان کار ارزش‌آفرین و غیر ارزش‌آفرین، میزان زمان انتظار و زمان چرخه فعالیت بررسی کرد. نتایج ناب سازی در چرخه فعالیت فوم بتن‌ریزی، پس از دو مرحله ناب سازی نشان می‌دهد، به جریان انداختن فعالیت‌ها در یک چرخه، و استفاده از اصل کشش و استمرار در پیاده‌سازی اصول ناب، تا حد قابل‌توجهی می‌تواند عملکرد را در این چرخه فعالیت افزایش دهد. این بهبود به‌منزله‌ی ۲٫۵ ساعت صرفه‌جویی زمان کاری در هرروز می‌باشد. افزایش ۲۱ درصدی کارایی و ۴۲ درصدی بهره‌وری از دیگر بهبودهای حاصل برای چرخه فوم‌بتن‌ریزی است. از نکات دیگری که در مورد استمرار در کاربرد مفاهیم ناب در چرخه فعالیت‌ها باید مدنظر قرار گیرد، آسیب‌پذیری این تئوری می‌باشد به‌گونه‌ای که می‌توان گفت تا زمانی امکان به‌کارگیری اصل تعقیب کمال به استمرار در اعمال اصول ناب در چرخه فعالیت‌های ساخت وجود دارد که تمامی فاکتورهای عملکردی (نظیر بهره‌وری و کارایی) به سمت بهبود سوق داده شوند؛ بنابراین زمانی که کارکنان تمرکز بیش‌تری بر روی کارهای ارزش‌آفرین پیدا می‌کنند، باعث افزایش کارایی می‌گردد و این افزایش کارایی تا جایی که بهره‌وری افراد را کاهش ندهد برای چرخه فعالیت بهبود را به ارمغان خواهد آورد. زیرا توجه بیش‌ازاندازه کارکنان شاغل در چرخه، به تشخیص اینکه یک فعالیت ارزش‌آفرین یا غیر ارزش‌آفرین است، می‌تواند باعث کاهش بهره‌وری این افراد و درنتیجه کاهش بهره‌وری کل چرخه گردد.

## مراجع:


[1]Gao, S. and S.P. Low, Lean Construction Management. 2014: Springer.
[2]Abbasian-Hosseini, S. A.. andNikakhtar, A.. andGhoddousi, P. (2014). Verification of lean construction benefits through simulation modeling: A case study of bricklaying process. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(5), 1248-1260 .
[3]Ballard, H. G. (2000). The last planner system of production control. University of Birmingham .
[4]Tommelein, I. D. (1997). Models of lean construction processes: example of pipe-spool materials management.
[5]Al-Sudairi, A. A. (2007). Evaluating the effect of construction process characteristics to the applicability of lean principles. Construction Innovation, 7(1), 99-121 .
[6]Wang, P.. andMohamed, Y.. andAbourizk, S. M.. andRawa, A. T. (2009). Flow production of pipe spool fabrication: Simulation to support implementation of lean technique. Journal of Construction Engineering and Management, 135(10), 1027-1038 .
[7]Mao, X.. andZhang, X. (2008). Construction process reengineering by integrating lean principles and computer simulation techniques. Journal of Construction Engineering and Management, 134(5), 371-381 .
[8]Yang, G.. andXu, X.. andWang, Z.. andZhou, L. (2013). Vulnerability Analysis and Optimal Design of Lean Construction System ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability (pp. 366-376.(
[9]Nikakhtar, A.. andHosseini, A. A.. andWong, K. Y.. andZavichi, A. (2015). Application of lean construction principles to reduce construction process waste using computer simulation: a case study. International Journal of Services and Operations Management, 20(4), 461-480 .
[10]Koskela, L. (1999). Management of production in construction: a theoretical view .
[11]Kim, D. (2002). Exploratory study of lean construction: Assessment of lean implementation .
[12]Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction (Vol. 72): Stanford university Stanford, CA.
[13]Thomas, H. R.. andHorman, M. J.. andde Souza, U. E. L.. andZavřski, I. (2002). Reducing variability to improve performance as a lean construction principle. Journal of Construction Engineering and Management, 128(2), 144-154 .
[14] Love, P. E.. andSmith, J. (2003). Benchmarking, benchaction, and benchlearning: rework mitigation in projects. Journal of Management in Engineering, 19(4), 147-159 .
[15]Womack, J. P.. andJones, D. T.. andRoos, D. (1990). Machine that changed the world: Simon and Schuster.

[16]Farrar, J. M.. andAbouRizk, S. M.. andMao, X. (2004). Generic implementation of lean concepts in simulation models. Lean Construction Journal, 1(1), 1-23 .
[17]Hassan, M. M.. andGruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on Interstate-74. Journal of Construction Engineering and Management, 134(1), 2-9 .