



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ



**Мр Биљана Д. Матејевић**

**МОДЕЛ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ  
ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЦЕСА  
БЕТОНИРАЊА**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Ниш, 2016.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND  
ARCHITECTURE



**M.Sc Biljana D. Matejević**

**MODEL FOR PREDICTING OF THE  
PRODUCTIVITY OF THE CONCRETING  
PROCESS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2016.

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор: Др Милорад Златановић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет

Наслов: Модел за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања

Резиме: Мерење продуктивности рада у грађевинарству, као врло сложен и дуготрајан процес због специфичности грађевинске производње, није довољно само по себи; потребно је извршити и испитивање и оцењивање утицаја различитих фактора на остварену продуктивност. Бетонски радови, при изградњи грађевинског објекта, имају велики значај са становишта количина и трошкова, посебно ако је код објеката високоградње примењен скелетни систем грађења. За овакве објекте, бетонски радови представљају кључне активности у динамичком плану извођења радова. Због тога је важно извршити реално планирање извођења ових радова добрим усклађивањем свих утицаја и обезбеђењем потребне продуктивности. У нашој пракси, планирање процеса бетонирања, углавном се своди на искуство и без разматрања фактора који имају утицај на продуктивност овог процеса. Предмет научног истраживања ове докторске дисертације је анализа продуктивности извођења бетонских радова при изградњи грађевинских објеката и развој регресионих и симулационих модела за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања. Технологија извођења бетонских радова, који су предмет разматрања у раду, подразумева справљање бетона у фабрици бетона, транспорт миксерима до градилишта, транспорт ауто-бетонском пумпом до места уграђивања и уграђивање первивраторима. У раду је извршено истраживање процеса извођења бетонских радова, као циклочног процеса у грађевинарству, на реалним и актуелним пројектима у циљу добијања стварних података. Ови подаци сакупљени су снимањем процеса бетонирања, увидом у техничку и пројектну документацију и из разговора са техничким и радним особљем директно укљученим у процес, на осам градилишта објеката високоградње и послужили су за развој регресионих и симулационих модела за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања. Спроведена је анализа продуктивности процеса бетонирања вертикалних (стубови, зидови, зидна платна, лифтовски оквири) и хоризонталних елемената грађевинских објеката (греде, плоче, међуспратне конструкције, контра плоче). Применом емпиријске, статистичке, регресионе и симулационе методе, формиран су модели за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања. Предложени модели могу бити корисни у фази планирања и омогућити тачније прогнозирање трајања активности при извођењу бетонских радова и тако корисно утицати на доношење одлука, прогнозирање тока радова и боље управљање процесом бетонирања са циљем повећања

	продуктивности, скраћења трајања и смањења трошкова.
Научна област:	Грађевинарство
Научна дисциплина:	Прогнозирање и симулација стохастичких процеса
Кључне речи:	Прогнозирање, продуктивност, трајање, процес бетонирања, вишеструка линеарна регресија, симулација
УДК:	693.54(043.3)
CERIF класификација:	T 002 Грађевинска технологија
Тип лиценце Креативне заједнице:	<b>CC BY-NC-ND</b>

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: D.Sc Milorad Zlatanović, full professor, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture

Title: Model for predicting of the productivity of the concreting process

Abstract:

Measuring of the productivity of work in civil engineering, as a very complex and long lasting process because of the peculiarities of construction activity is not sufficient per se; it is necessary to examine and assess the impact of various factors on the realized productivity. Concreting works, in construction of an engineering structure, have a great importance from the viewpoint of quantities and costs, especially if frame construction system has been implemented in building construction. For such buildings, concrete works represent key activities in the dynamic plan of construction works. For this reason it is important to perform realistic planning of construction works by good coordination of all factors and by providing the required productivity. In our practice, planning of concreting process, mostly boils down to experience without considering the factors which affect the productivity of the process. The subject matter of scientific research of this doctoral dissertation is the analysis of productivity of performing concreting works when constructing engineering structures and development of regression and simulation models for concreting process productivity prediction. Concrete works technology which is the subject of dissertation analysis comprises making of concrete in concrete factory, transport using mixer trucks to the construction site, transport with concrete pump to the placing location and placing using poker vibrators. In the dissertation the process of concrete works performance was researched as a cyclic process in civil engineering, on actual and ongoing projects for the purpose of obtaining actual data. The data were acquired by recording the concreting process, by studying technical and design documents and from interviews with technical and working personnel directly engaged in the process, on eight building construction sites and they were used for development of regression and simulation models for predicting the concreting process productivity. The analysis of the productive of concreting process of vertical (columns, walls, bearing walls, elevator shafts) and horizontal elements of engineering structures (beams, slabs, floor structures, foundation slabs) has been conducted. By implementing empirical, statistic, regression and simulation methods, the models for concreting process productivity prediction were formed. The proposed models can be useful in the planning phase and provide for a more accurate predict of activity duration in the concreting process and thus be beneficial for the decisions making, predicting of the course of works and for a better management of concreting process with a goal of increasing productivity, shortening works duration and reduction of costs.

Scientific Field:	Civil Engineering
Scientific Discipline:	Predicting and simulation of stochastic processes
Key Words:	Prediction, productivity, duration, concreting process, multiple linear regression, simulation
UDC:	693.54(043.3)
CERIF Classification:	T 002 Building technology
Creative Commons License Type:	<b>CC BY-NC-ND</b>

## ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. **Др Милорад Златановић**, редовни професор  
Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш  
Председник Комисије, ментор
2. **Др Велимир Дутина**, редовни професор  
Факултет Техничких наука, Косовска Митровица  
Члан Комисије
3. **Др Љубо Марковић**, ванредни професор  
Факултет Техничких наука, Косовска Митровица  
Члан Комисије

Датум одбране докторске дисертације:

---

## ***Захвалност аутора***

*Захваљујем се ментору, професорима и колегама коју су помогли при изради ове докторске дисертације, као и грађевинским предузећима која су ми омогућила вишемесечни боравак на градилиштима. Посебну захвалност дугујем својој породици и пријатељима на несебичној моралној подршци, разумевању и толеранцији.*



## САДРЖАЈ

<b>1. Увод</b> .....	1
1.1 Дефинисање, опис и предмет научног истраживања .....	1
1.2 Образложење о потребама истраживања .....	4
1.3 Циљ истраживања .....	6
1.4 План истраживања .....	7
1.5 Основне хипотезе .....	8
1.6 Примењене научне методе .....	8
1.7 Применљивост резултата истраживања .....	9
1.8 Преглед досадашњих истраживања .....	10
<b>2. Продуктивност процеса бетонирања</b> .....	13
2.1 Уопште о продуктивности .....	13
2.2 Продуктивност у грађевинарству .....	14
2.3 Значај бетонских радова .....	15
2.4 Технологија процеса бетонирања .....	16
2.5 Продуктивност процеса бетонирања .....	23
<b>3. Прикупљени подаци</b> .....	27
3.1 Опис истраживања .....	27
3.1.1 Преглед података из узорка <i>MK</i> .....	28
3.1.2 Преглед података из узорка <i>SZ</i> .....	31
3.2 Статистичка обрада прикупљених података .....	33
3.2.1 Статистичка анализа - узорак <i>MK</i> .....	34
3.2.2 Статистичка анализа - узорак <i>SZ</i> .....	37

<b>4. Регресиони модели за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања</b> .....	40
4.1 Увод .....	40
4.2 Уопште о регресионој анализи .....	41
4.3 Израда регресионих модела – узорак <i>MK</i> .....	43
4.3.1 Регресиона анализа .....	43
4.3.2 Модел за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања армиранобетонских плоча – модел <i>RegModel P(MK)</i> .....	47
4.3.3 Модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања армиранобетонских плоча – модел <i>RegModel T(MK)</i> .....	53
4.3.4 Дискусија предложених модела .....	56
4.4 Израда регресионих модела – узорак <i>SZ</i> .....	65
4.4.1 Регресиона анализа .....	65
4.4.2 Модел за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања армиранобетонских стубова и зидова – модел <i>RegModel P(SZ)</i> .....	68
4.4.3 Модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања армиранобетонских стубова и зидова – модел <i>RegModel T(SZ)</i> .....	73
4.4.4 Дискусија предложених модела .....	76
<b>5. Симулациони модели за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања</b> .....	83
5.1 Увод .....	83
5.2 Подела симулационих модела .....	89
5.2.1 Монте Карло симулација .....	90
5.2.2 Континуална симулација .....	90
5.2.3 Симулација дискретних догађаја .....	91
5.2.4 Мешовита симулација .....	93
5.3 Технике у симулационим моделима .....	94
5.3.1 Системска динамика .....	95
5.3.2 Дискретни догађаји .....	95
5.3.3 Системи засновани на агентима .....	97
5.3.4 Динамички системи .....	98

5.4	Однос између техника у симулационим моделима .....	98
5.5	Програмски пакет за симулацију <i>AnyLogic</i> .....	99
5.6	Израда симулационог модела .....	104
5.6.1	Опште .....	104
5.6.2	Припрема улазних података .....	106
5.6.3	Опис симулационог модела процеса бетонирања .....	121
5.6.4	Анализа излазних података симулационог експеримента .....	129
5.6.5	Дискусија предложених модела .....	130
<b>6.</b>	<b>Упоредна анализа модела .....</b>	<b>139</b>
6.1	Увод .....	139
6.2	Анализа и поређење модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча .....	142
6.3	Анализа и поређење модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова .....	146
6.4	Поређење свих модела .....	149
<b>7.</b>	<b>Закључна разматрања .....</b>	<b>151</b>
7.1	Закључна разматрања .....	151
7.2	Закључци .....	155
7.3	Препоруке за примену у пракси .....	156
7.4	Правци даљих истраживања .....	157
<b>8.</b>	<b>Литература .....</b>	<b>161</b>
<b>9.</b>	<b>Прилози .....</b>	<b>169</b>
	<b>Биографија аутора .....</b>	<b>185</b>

## СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 3.1	Просечна количина бетона, трајање и остварена продуктивност на градилиштима)-просечне вредности по једном бетонирању .....	29
Табела 3.2	Снимљени подаци (број миксера, количина бетона по миксеру, чекање миксера на градилишту)-просечне вредности по једном бетонирању .....	30
Табела 3.3	Снимљени подаци (чекање пумпе, позиционирање, прање, остали просечне застоји)-вредности по једном бетонирању .....	30
Табела 3.4	Трошкови чекања миксера и пумпе-просечне вредности по једном бетонирању .....	31
Табела 3.5	Просечна количина бетона, трајање и остварена продуктивност на градилиштима)-просечне вредности по једном бетонирању .....	32
Табела 3.6	Снимљени подаци (број миксера, количина бетона по миксеру, чекање миксера на градилишту)-просечне вредности по једном бетонирању .....	32
Табела 3.7	Снимљени подаци (чекање пумпе, позиционирање, прање, остали застоји)-просечне вредности по једном бетонирању .....	33
Табела 3.8	Трошкови чекања миксера и пумпе-просечне вредности по једном бетонирању .....	33
Табела 3.9.	Дескриптивна статистика за узорак МК без изузетака .....	35
Табела 3.10	Теоријске расподеле вероватноћа за остварену продуктивност .....	36
Табела 3.11	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull (3) расподеле .....	36
Табела 3.12	Параметри Weibull (3) расподеле вероватноћа .....	36
Табела 3.13	Дескриптивна статистика за узорак SZ без изузетних вредности ....	38
Табела 3.14	Теоријске расподеле вероватноћа за остварену продуктивност .....	38
Табела 3.15	Тест слагања емпиријске и теоријске Гамма (2) расподеле .....	38
Табела 3.16	Параметри Гамма (2) расподеле вероватноћа .....	38
Табела 4.1	Корелациона матрица између свих варијабила .....	48
Табела 4.2	Shadock-ова скала за процену репрезентативности регресионе зависности .....	48
Табела 4.3	Фактор пораста варијансе – VIF .....	48
Табела 4.4	Параметри модела RegModel P(МК) (први корак).....	49

Табела 4.5	Параметри модела $RegModel P(MK)$ (коначан модел).....	50
Табела 4.6	Оцена квалитета модела $RegModel P(MK)$ .....	52
Табела 4.7	Оцена значајности модела $RegModel P(MK)$ .....	52
Табела 4.8	Параметри модела $RegModel T(MK)$ (први корак) .....	54
Табела 4.9	Параметри модела $RegModel T(MK)$ (други корак) .....	54
Табела 4.10	Параметри модела $RegModel T(MK)$ (коначни модел) .....	54
Табела 4.11	Оцена квалитета модела $RegModel T(MK)$ .....	55
Табела 4.12	Оцена значајности модела $RegModel T(MK)$ .....	55
Табела 4.13	Подела процеса бетонирања према $APE$ и оствареној продуктивности .....	59
Табела 4.14	Подела процеса бетонирања према $APE$ и оствареном трајању .....	60
Табела 4.15	Корелациона матрица између свих варијабила .....	68
Табела 4.16	Фактор пораста варијансе – $VIF$ .....	69
Табела 4.17	Параметри модела $RegModel P(SZ)$ (први корак) .....	69
Табела 4.18	Параметри модела $RegModel P(SZ)$ (коначан модел) .....	70
Табела 4.19	Оцена квалитета модела $RegModel P(SZ)$ .....	72
Табела 4.20	Оцена значајности модела $RegModel P(SZ)$ .....	72
Табела 4.21	Корелациона матрица између свих варијабила .....	73
Табела 4.22	Фактор пораста варијансе - $VIF$ .....	73
Табела 4.23	Параметри модела $RegModel T(SZ)$ (први корак) .....	74
Табела 4.24	Параметри модела $RegModel T(SZ)$ (коначни модел) .....	74
Табела 4.25	Оцена квалитета модела $RegModel T(SZ)$ .....	74
Табела 4.26	Оцена значајности модела $RegModel T(SZ)$ .....	75
Табела 4.27	Подела процеса бетонирања према $APE$ и оствареној продуктивности .....	78
Табела 4.28	Подела процеса бетонирања према $APE$ и оствареном трајању .....	79
Табела 5.1	Теоријске расподеле вероватноћа за остварену брзину превоза кроз град .....	107
Табела 5.2	Тестирање слагања емпиријске и теоријске $Beta4$ расподеле .....	107
Табела 5.3	Параметри $Beta4$ расподеле вероватноћа .....	107
Табела 5.4	Теоријске расподеле вероватноћа за остварену брзину превоза ван града .....	108
Табела 5.5	Тестирање слагања емпиријске и теоријске $Beta4$ расподеле .....	108
Табела 5.6	Параметри $Beta4$ расподеле вероватноћа .....	108
Табела 5.7	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време позиционирања на градилишту .....	110
Табела 5.8	Тестирање слагања емпиријске и теоријске $Weibull(3)$ расподеле.....	110

Табела 5.9	Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	110
Табела 5.10	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време позиционирања са улице .....	111
Табела 5.11	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Log-normalне расподеле .....	111
Табела 5.12	Параметри Log-normalне расподеле вероватноћа .....	111
Табела 5.13	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време истовара миксера .....	113
Табела 5.14	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле .....	113
Табела 5.15	Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	113
Табела 5.16	Параметри модела Is(SZ) (први корак) .....	114
Табела 5.17	Оцена квалитета модела Is(SZ) .....	114
Табела 5.18	Параметри модела Is(SZ) .....	114
Табела 5.19	Оцена значајности модела Is(SZ) .....	114
Табела 5.20	Оцена квалитета модела Is(MK) .....	116
Табела 5.21	Параметри модела Is(MK) .....	116
Табела 5.22	Оцена значајности модела Is(MK) .....	116
Табела 5.23	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време застоја .....	117
Табела 5.24	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Gamma(2) расподеле .....	117
Табела 5.25	Параметри Gamma(2) расподеле вероватноћа .....	117
Табела 5.26	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време премештања пумпе .....	118
Табела 5.27	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Beta4 расподеле .....	118
Табела 5.28	Параметри Beta4 расподеле вероватноћа .....	118
Табела 5.29	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време прања миксера .....	120
Табела 5.30	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле .....	120
Табела 5.31	Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	120
Табела 5.32	Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време чишћења миксера .....	121
Табела 5.33	Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле .....	121
Табела 5.34	Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	121
Табела 5.35	Подела процеса бетонирања према APE и оствареној продуктивности (SimModel(MK)) .....	132
Табела 5.36	Подела процеса бетонирања према APE и оствареној продуктивности (SimModel(SZ)) .....	133
Табела 5.37	Подела процеса бетонирања према APE и оствареној продуктивности (SimModel(SZ1)) .....	134

<i>Табела 6.1</i>	<i>Формирани модели за пргнозирање продуктивности и трајања бетонирања .....</i>	<i>139</i>
<i>Табела 6.2</i>	<i>МАРЕ свих модела за цео узорак и случајеве када фабрика опсужује и трећа лица .....</i>	<i>140</i>
<i>Табела 6.3</i>	<i>Упоредна оцена регресионих модела .....</i>	<i>140</i>

## СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1	Продуктивност .....	14
Слика 2.2	Бетонирање АВ стубова .....	20
Слика 2.3	Бетонирање АВ зидова .....	20
Слика 2.4	Бетонирање пуне АВ плоче .....	21
Слика 2.5	Бетонирање „ферт“ плоче .....	21
Слика 2.6	Фазе од производње до уграђивања бетона .....	22
Слика 3.1	Изузетне вредности (outliers) – узорак МК .....	35
Слика 3.2	Фреквенције остварене продуктивности и теоретских вредности Weibull (3) расподеле вероватноћа .....	36
Слика 3.3	Хистограм расподеле вероватноћа остварене продуктивности и теоријских вредности Weibull (3) расподеле .....	37
Слика 3.4	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене продуктивности .....	37
Слика 3.5	Изузетне вредности (outliers) – узорак SZ .....	37
Слика 3.6	Фреквенције остварене продуктивности и теоријских вредности Gamma (2) расподеле .....	39
Слика 3.7	Хистограм расподеле вероватноћа остварене продуктивности и теоријских вредности Gamma (2) расподеле .....	39
Слика 3.8	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене продуктивности .....	39
Слика 4.1	Корелација између укупног броја миксера и укупне количине бетона ...	48
Слика 4.2	Слагање остварене и прогнозиране продуктивности .....	53
Слика 4.3	Стандардизовани резидуали модела RegModel P(MK) .....	53
Слика 4.4	Слагање оствареног и прогнозираног трајања бетонирања .....	56
Слика 4.5	Стандардизовани резидуали модела RegModel T(MK) .....	56
Слика 4.6	Остварена $P(MK)_{ostv}$ и прогнозирана $P(MK)_{prog}$ продуктивност .....	58
Слика 4.7	Остварено $T(MK)_{ostv}$ и прогнозирано $T(MK)_{prog}$ трајање .....	58
Слика 4.8	Хистограм остварене продуктивности према APE .....	59
Слика 4.9	Хистограм оствареног трајања према APE .....	60



Слика 4.10	Процентуална грешка код модела <i>RegModel P(MK)</i> .....	61
Слика 4.11	Процентуална грешка код модела <i>RegModel T(MK)</i> .....	62
Слика 4.12	Повећање продуктивности са повећањем количине бетона .....	63
Слика 4.13	Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона .....	64
Слика 4.14	Остварено и прогнозирано трајање у односу на количине бетона .....	64
Слика 4.15	Слагање остварене и прогнозиране продуктивности .....	72
Слика 4.16	Стандардизовани резидуали модела <i>RegModel P(SZ)</i> .....	72
Слика 4.17	Слагање оствареног и прогнозираног трајања бетонирања.....	75
Слика 4.18	Стандардизовани резидуали модела <i>RegModel T(SZ)</i> .....	76
Слика 4.19	Остварена $P(SZ)_{ostv}$ и прогнозирана $P(SZ)_{prog}$ продуктивност .....	77
Слика 4.20	Остварено $T(SZ)_{ostv}$ и прогнозирано $T(SZ)_{prog}$ трајање .....	77
Слика 4.21	Хистограм остварене продуктивности према <i>APE</i> .....	78
Слика 4.22	Хистограм оствареног трајања према <i>APE</i> .....	79
Слика 4.23	Процентуална грешка код модела <i>P(SZ)</i> .....	80
Слика 4.24	Процентуална грешка код модела <i>T(SZ)</i> .....	81
Слика 4.25	Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона .....	81
Слика 4.26	Остварено и прогнозирано трајање у односу на количине бетона .....	82
Слика 5.1	Методологија истраживања у процесу моделирања .....	83
Слика 5.2	Реалан систем и модел .....	84
Слика 5.3	Рачунарска симулација .....	85
Слика 5.4	Развојни процес симулације .....	88
Слика 5.5	Механизми помака времена у симулацији дискретних догађаја .....	92
Слика 5.6	Извршавање истовремених догађаја .....	93
Слика 5.7	Редослед извршавања догађаја .....	93
Слика 5.8	Нивои апстракције .....	94
Слика 5.9	Графички приказ модела системске динамике .....	95
Слика 5.10	Графички приказ модела дискретних догађаја .....	96
Слика 5.11	Моделирање засновано на агентима .....	97
Слика 5.12	Неки модели засновани на мулти-методи .....	99
Слика 5.13	Фреквенције остварене брзине и теоријских вредности <i>Beta4</i> расподеле вероватноћа .....	107
Слика 5.14	Хистограм расподеле вероватноћа остварене брзине и теоријских вредности <i>Beta4</i> расподеле .....	108

Слика 5.15	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене брзине .....	108
Слика 5.16	Фреквенције остварене брзине и теоријских вредности $Beta4$ расподеле вероватноћа .....	108
Слика 5.17	Хистограм расподеле вероватноћа остварене брзине и теоријских вредности $Beta4$ расподеле .....	109
Слика 5.18	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене брзине .....	109
Слика 5.19	Фреквенције оствареног времена позиционирања и теоријских вредности $Weibull(3)$ расподеле вероватно .....	110
Слика 5.20	Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена позиционирања и теоријских вредности $Weibull(3)$ расподеле .....	111
Слика 5.21	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена позиционирања .....	111
Слика 5.22	Фреквенције оствареног времена позиционирања и теоријских вредности $Log-normalne$ расподеле вероватноћа .....	111
Слика 5.23	Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена позиционирања и теоријских вредности $Log-normalne$ расподеле .....	112
Слика 5.24	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена позиционирања .....	112
Слика 5.25	Фреквенције оствареног времена истовара и теоријских вредности $Weibull(3)$ расподеле вероватноћа .....	113
Слика 5.26	Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена истовара и теоријских вредности $Weibull(3)$ расподеле .....	113
Слика 5.27	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена истовара .....	113
Слика 5.28	Слагање оствареног и прогнозираног времена истовара $Is(SZ)$ .....	115
Слика 5.29	Слагање оствареног и прогнозираног времена истовара $Is(MK)$ .....	116
Слика 5.30	Фреквенције оствареног времена застоја и теоријских вредности $Gamma(2)$ расподеле вероватноћа .....	117
Слика 5.31	Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена застоја и теоријских вредности $Gamma(2)$ расподеле .....	117
Слика 5.32	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена застоја .....	117
Слика 5.33	Фреквенције оствареног трајања премештања пумпе и теоријских вредности $Beta4$ расподеле вероватноћа .....	118
Слика 5.34	Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена премештања пумпе и теоријских вредности $Beta4$ расподеле .....	119
Слика 5.35	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена премештања пумпе .....	119

Слика 5.36	Фреквенције оствареног трајања прања миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	120
Слика 5.37	Хистограм расподеле вероватноћа остварено времена прања миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле .....	120
Слика 5.38	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена прања миксера .....	120
Слика 5.39	Фреквенције оствареног трајања чишћења миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа .....	121
Слика 5.40	Хистограм расподеле вероватноћа остварено времена чишћења миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле .....	121
Слика 5.41	Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена чишћења миксера .....	121
Слика 5.42	Дијаграм процеса – модел процеса бетонирања .....	122
Слика 5.43	Дијаграм процеса – модел процеса бетонирања .....	125
Слика 5.44	Модел процеса бетонирања – 2D приказ .....	126
Слика 5.45	Модел процеса бетонирања – 3D приказ .....	126
Слика 5.46	Дијаграми за прказ различитих стања током симулације – модел процеса бетонирања .....	127
Слика 5.47	Хистограми за прказ различитих стања током симулације – модел процеса бетонирања .....	127
Слика 5.48	Модел процеса бетонирања – дефинисање улазних параметара на почетку симулације .....	128
Слика 5.49	Дијаграм процеса и 2D приказ током трајања симулације .....	128
Слика 5.50	Остварена $P(MK)_{ostv}$ и прогнозирана $P(MK)_{prog}$ продуктивност (SimModel(MK)) .....	130
Слика 5.51	Остварена $P(SZ)_{ostv}$ и прогнозирана $P(SZ)_{prog}$ продуктивност (SimModel(SZ)) .....	131
Слика 5.52	Остварена $P(SZ)_{ostv}$ и прогнозирана $P(SZ)_{prog}$ продуктивност (SimModel(SZ1)) .....	131
Слика 5.53	Хистограм остварене продуктивности према APE (SimModel(MK)) .....	132
Слика 5.54	Хистограм остварене продуктивности према APE (SimModel(SZ)) .....	133
Слика 5.55	Хистограм остварене продуктивности према APE (SimModel(SZ1)) .....	134
Слика 5.56	Процентуална грешка код модела (SimModel(MK)) .....	135
Слика 5.57	Процентуална грешка код модела (SimModel(SZ)) .....	136
Слика 5.58	Процентуална грешка код модела (SimModel(SZ1)) .....	136
Слика 5.59	Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (SimModel(MK)) .....	137

Слика 5.60	Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (SimModel(SZ)) .....	137
Слика 5.61	Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (SimModel(SZ1)) .....	138
Слика 6.1	МАРЕ за сваки модел за цео узорак .....	141
Слика 6.2	МАРЕ за сваки модел за узорак без случајева када фабрика опсужује и трећа лица .....	142
Слика 6.3	Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за цео узорак .....	143
Слика 6.4	Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за узорак без случајева када фабрика опсужује и трећа лица .....	143
Слика 6.5	Хистограм остварене продуктивности према АРЕ за све моделе (МК) за цео узорак .....	145
Слика 6.6	Хистограм остварене продуктивности према АРЕ за све моделе (МК) за узорак узорак без случајева када фабрика опсужује и трећа лица .....	145
Слика 6.7	Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за цео узорак .....	146
Слика 6.8	Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за узорак без случајева када фабрика опсужује и трећа лица .....	147
Слика 6.9	Хистограм остварене продуктивности према АРЕ за све моделе (SZ) за цео узорак .....	148
Слика 6.10	Хистограм остварене продуктивности према АРЕ за све моделе (SZ) за узорак без случајева када фабрика опсужује и трећа лица .....	148

## 1. УВОД

### 1.1 Дефинисање, опис и предмет научног истраживања

Проблеми у грађевинарству добро су познати: продуктивност заостаје у односу на друге привредне гране због већег удела мануфактурног начина производње, заштита на раду је знатно лошија у поређењу са осталом индустријом, квалитет изградње није на задовољавајућем нивоу, и сл.

Продуктивност је кључни покретач економског раста и просперитета у било којој земљи и једна од кључних компоненти успеха било ког пословања, па се директно везује са уштедама и профитабилношћу. Извођачи радова могу имати добитке или губитке у зависности од тога колико добро, продуктивношћу предузећа, одговарају на конкуренцију. Грађевинска предузећа могу да стекну предност над својом конкуренцијом побољшањем продуктивности и смањењем трошкова. Било да је у питању извођење радова на малим или великим пројектима, задатак је исти - извршити посао брже, тачније и уз мање трошкове при ангажовању механизације и радне снаге.

Најједноставније, продуктивност се може објаснити као однос између постигнуте производње и средстава уложених у њу. То значи да ако се више производи са истом количином уложених средстава, постоји повећање продуктивности. У грађевинској производњи, продуктивност рада најчешће је изражена као количина извршене производње у јединици времена. За продуктивност се може рећи да је то мера колико ће ресурси бити искоришћени у добијању излаза (*output-a*), односно, производа, или се може дефинисати као ефикасност у коришћењу улаза (*input-a*) у оквиру неког процеса.

На повећање продуктивности може се утицати на различите начине, на пример: повећавањем броја смена, смањењем нерадних дана, побољшавањем дисциплине рада, одн. борба против свих видова расипања и губитака радног времена, побољшавањем

опслуживања радних места, повећавањем квалификација радника, побољшавањем и осавремењавањем технике са којом се ради, спровођењем специјализације рада, оспособљавањем радника за рад на више радних операција и машина, устаљивањем радника на радним местима, побољшавањем одржавања и оправки машина и опреме, бољом снабдевношћу енергијом, спречавањем флукуације радника, усавршавањем и осавремењавањем технолошких процеса, елиминисањем прековременог рада итд.

Мерење продуктивности рада у грађевинарству, као врло сложен и дуготрајан процес због специфичности грађевинске производње, није довољно само по себи; потребно је извршити и испитивање и оцењивање утицаја различитих фактора на остварену продуктивност. Бројни су фактори који имају утицај на величину и динамику продуктивности, али треба истаћи да није сваки фактор потпуно независан од осталих, нити се може утицати на све факторе.

Предмет овог научног истраживања је анализа продуктивности извођења бетонских радова при изградњи грађевинских објеката и развој модела за прогнозирање продуктивности. Разматра се процес бетонирања, где технологија извођења бетонских радова подразумева справљање бетона у фабрици бетона, транспорт ауто-бетонским мешалицама (миксерима) до градилишта, транспорт ауто-бетонском пумпом до места уграђивања и уграђивање первибраторима. Спроведена је анализа продуктивности процеса бетонирања вертикалних (стубови, зидови, зидна платна, лифтовски оквири) и хоризонталних елемената грађевинских објеката (греде, плоче, међуспратне конструкције, контра плоче). У раду је представљен приступ за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања. Приступ подразумева квантитативно истраживање са циљем идентификације главних утицајних фактора на продуктивност и предлог модела за прогнозирање и контролу продуктивности.

Као и многи други процеси у грађевинарству, и овај процес је стохастичке природе. Због свог случајног карактера овај систем није могуће моделирати на детерминистички начин, користећи просечне податке као улаз, јер би продуктивност, трајање па самим тим и коштање радова, добијени на овај начин били нетачни, због неузимања у обзир било каквих ефеката од догађаја случајног карактера (нпр. време долазака миксера не дешава се у једнаким временским интервалима, време истовара бетона није увек исто за исту количину, итд.). Очекивано је чекање миксера у реду, јер мало је вероватно да

следећи миксер стигне у тренутку одласка претходног. Ако миксер стиже касније продужава се процес, долази до чекања пумпе и радника. Према томе, процес бетонирања је систем стохастичког карактера чије се понашање не може са сигурношћу унапред предвидети, али се могу одредити вероватноће промене његовог стања. Са друге стране, процес бетонирања може се посматрати као систем чија се стања мењају дисконтинуално у времену, тј. у појединим временским тренуцима, тзв. дискретни систем.

Моделирање динамичких система стохастичке природе погодено је извршити применом симулационих метода и техника. Рачунарска симулација подразумева предвиђање и одређивања будућих стања реалног система на основу проучавања рачунарског модела тог система. Другим речима, рачунарска симулација заснива се на идеји експериментисања са моделом реалног система на рачунару, током времена. Симулациони експерименти најчешће се изводе са циљем да се прикупе одређене информације, чије би добијање путем експеримента над самим реалним системом било непрактично, неизводљиво или сувише скупо. Те информације касније служе за доношење одлука значајних за управљање реалним системом. Циљ симулације је проучавање понашања система који је предмет симулације, али и анализа како би се исти систем понашао када би на њега деловао неки други скуп променљивих околности (улазних величина и параметара). Симулација даје утолико боље резултате уколико је удео машинског рада у процесу већи, јер се такве операције једноставније моделирају у односу на операције које захтевају претежно ручно извођење.

Симулација дискретних догађаја (*discrete event simulation*) је метода симулационог моделирања код које се дискретне промене стања у систему догађају дисконтинуално у времену. Модел се извршава у корацима, где следеће стање система зависи од тренутног стања и од тренутног утицаја околине. Углавном се користи за анализу динамичких система са стохастичким карактеристикама.

У новије време за моделирање система у дисконтинуалном времену користи се метода заснована на агентима (*agent based simulation*). Агенти су индивидуални објекти који могу имати интеракцију међусобно у одговарајућем окружењу. Ова метода омогућава да се помоћу агената добију модели који боље осликавају понашање реалних система у односу на моделирање помоћу дискретних догађаја. Зависност између објеката

представља се финије и тиме добијају прецизнији резултати. Алати за агентно моделирање могу се користити и за оптимизацију модела и тестирање стабилности модела.

За прецизније и свеобухватније моделе може се посматрати могућност комбиновања ових техника (*multi-method*) изградом тзв. хибридних модела. У моделима дискретних догађаја већ се налазе појединачни ентитети што олакшава укључивање и примену модела са агентима. Скуп правила дефинисаних у блоковима дијаграма код методе дискретних догађаја може се представити дијаграмима стања агената.

## 1.2 Образложење о потребама истраживања

Бројна истраживања показују да у последњих неколико деценија, у већини земаља, продуктивност у грађевинарству не прати раст продуктивности у осталим индустријским гранама. У неким од водећих економски развијених земаља света чак је забележен и пад продуктивности у грађевинарству: у раздобљу од 1990. до 2005. у САД пад стопе продуктивности у грађевинарству износио је 0.84% годишње, а у Немачкој и Јапану 1.77%, односно 1.91%. ([www.euklems.net/](http://www.euklems.net/)).

Међу земљама чланицама ЕУ који имају расположиве податке за јануар 2009. године грађевинарство бележи пораст у три, а пад у осам држава. Повећање је регистровано у Пољској (+9.1%), Румунији (+7.0%) и Шведској (+1.2%). Највећи пад је регистрован у Немачкој (-25.6%), Словенији (-20.7%) и Мађарској (-16.0%) ([www.makroekonomija.org](http://www.makroekonomija.org)).

Некада једна од најекспанзивнијих и најпропулзивнијих извозних привредних грана, профитабилно и високо акумулативно српско грађевинарство, данас дели судбину укупне привредне ситуације у земљи ([www.pks.rs/PrivredaSrbije](http://www.pks.rs/PrivredaSrbije)).

Као разлози за непримерен раст продуктивности у грађевинарству и препреке за њено даље унапређење наводе се: сегментирани и недовољно повезани процеси планирања, финансирања, пројектовања, инжењеринга, набавке, изградње и одржавања, велики број разноврсних учесника, недовољна заступљеност нових технологија, неодговарајући квалитет и оспособљеност радне снаге, рад на отвореном простору, подложност променама, недовољна улагања у истраживања, и др.



Разумљиво је да продуктивност има значајан и директан утицај на трошкове изградње инвестиционог објекта. Већа продуктивност смањује трошкове грађења и обрнуто. Наиме, повећавањем обима производње и смањивањем уложеног рада, по оба основа долази до промене трошкова у правцу њиховог смањивања. Супротна тенденција смањења продуктивности има за последицу повећавање трошкова уз смањивање обима производње и исто или веће ангажовање рада.

Многа истраживања показала су да радници на извођењу грађевинских објеката половину времена изгубе на непродуктиван рад, а неке студије показују да је трећина времена проведеног у чекању резултат утицаја менаџмента. Подаци из истраживања у Великој Британији показују да процена заснована на искуству у планирању процеса бетонирања има следећи резултат: ресурси на градилишту (пумпа за бетон и радници) у просеку 12% времена проведу у чекању, тј. ово су губици који изазивају трошкове од 14% од укупних трошкова везаних за бетонске радове. Такође, миксери остају у стању чекања у просеку 25% од укупног трајања операција на бетонирању (*Graham* и други, 2006). Чекање миксера, према истраживањима у Немачкој и Хонг Конгу, износи 11%, у Пекингу 16.3%, а у Сингапуру 16.1% (*Wang* и други, 2001).

Време и продуктивност уско су повезани; подаци о продуктивности користе се за одређивање трајања активности, стога, пад продуктивности може довести до кашњења радова. Изградња је динамичан процес и тешко је изоловати један фактор који има утицај на продуктивност. Многе студије се концентришу на ефекат неког фактора при мерењу продуктивности, а занемарују ефекте других фактора који постоје или се њихов утицај покрива коефицијентима ризика.

Због свог значаја, продуктивност у грађевинарству заслужује посебну пажњу за разматрање и проучавање. Фактори који утичу на продуктивност уопште, као и на нивоу градилишта, али и њихова квантификација представљају актуелну и интересантну област за истраживање.

Бетонски радови, при изградњи грађевинског објекта, имају велики значај са становишта количина и трошкова, посебно ако је код објекта високоградње примењен скелетни систем грађења. За овакве објекте, бетонски радови представљају кључне (критичне) активности у динамичком плану извођења радова. Због тога је важно

извршити реално планирање извођења ових радова добрим усклађивањем свих утицаја и обезбеђењем потребне продуктивности.

У нашој пракси, планирање процеса бетонирања, углавном се своди на искуство и без разматрања фактора који имају утицај на продуктивност овог процеса. Због тога долази до застоја и чекања, или више миксера чека у реду, или пумпа чека долазак миксера, што, подразумева се, има негативан финансијски утицај.

Поред осталог, и подаци прикупљени за израду овог рада, указују на постојање потребе и простора за проучавање и побољшање процеса планирања и извођења бетонских радова, чиме се намеће потреба додатних истраживања што оправдава предмет и циљ овог рада.

### **1.3 Циљ научног истраживања**

Основни циљ научног истраживања је развој модела за прогнозирање продуктивности процеса извођења бетонских радова. До циља се долази кроз анализу постојећег стања и проверу продуктивности, као и идентификовање, дефинисање и квантификовање фактора који имају доминантан утицај и истраживање разлога због којих се приликом реализације бетонских радова одступа од планираних вредности. Реализација циља научног истраживања спроведена је израдом модела применом метода вишеструке регресије и симулационих метода: симулације дискретних догађаја и симулације засноване на агентима.

У раду је извршено истраживање процеса извођења бетонских радова, као цикличног процеса у грађевинарству, на реалним и актуелним пројектима у циљу добијања стварних података. Ови подаци сакупљени су сталним праћењем радова и снимањем процеса бетонирања (методом мерења рада-фотопреглед), увидом у техничку и пројектну документацију и из разговора са техничким и радним особљем директно укљученим у процес, на осам градилишта објеката високоградње и послужили су за развијање регресионих и симулационих модела за прогнозирање продуктивности.

Суштина проблема при формирању модела је одабир најутицајнијих параметара и њихова комбинација, као и квантификација њиховог утицаја. Моделирање производног система (процеса бетонирања) врши се у циљу испитивања интеракција између

операција, одређивања неискоришћених ресурса, лоцирања уских грла, елиминисања проблема који се јављају, прогнозирање времена трајања процеса и продуктивности.

Подаци сакупљени снимањем процеса на градилиштима, обрађени и представљени одговарајућим расподелама вероватноћа постају улазни подаци за израду модела. За израду регресионог модела коришћен је програмски додатак за *Excel – XLStat 2014*, а симулациони модел је израђен у програмском пакету за моделирање *AnyLogic 7.2.0* који ради у објектно орјентисаном окружењу *JAVA*. Предност овог пакета је та што нуди могућност израде модела комбинацијом метода: дискретних догађаја (*discrete event simulation*), системске динамике (*system dynamics*) и методе засноване на агентима (*agent based simulation*). За моделирање система користи се мулти-метода: метода дискретних догађаја у комбинацији са методом заснованом на агентима.

Још један циљ овог рада је открити погодности коришћења симулационих модела за представљање динамичких система, као што је процес бетонирања, као и могућност примене мулти-метода за израду симулационог модела.

## 1.4 План истраживања

У складу са свим што је претходно наведено, методолошки посматрано, спроведен је следећи план истраживања:

- Прикупљање, преглед, систематизација и проучавање литературе;
- Теоријска анализа, према доступној литератури;
- Спровођење квантитативног истраживања са циљем идентификације параметара који имају утицај на продуктивност извођења бетонских радова у грађевинарству;
- Прикупљање података снимањем процеса бетонирања на градилиштима;
- Формирање базе података;
- Статистичка обрада података;
- Анализа, систематизација и интерпретација добијених резултата истраживања;
- Припрема података за формирање модела;
- Формирање регресионих модела;
- Формирање симулационих модела;
- Извођење закључака;

- Дефинисање препорука за примену модела у пракси и правци даљих истраживања.

## 1.5 Основне хипотезе истраживања

У раду су примењене следеће хипотезе истраживања:

- Могуће је идентификовати факторе који имају значајан утицај на продуктивност и извршити њихово квантификавање;
- Могуће је формирати модел извођења бетонских радова са предложеним утицајним факторима;
- Модел служи за прогнозу продуктивности процеса бетонирања, а самим тим и побољшање управљања и повећање продуктивности;
- Повећање продуктивности утиче на смањење трошкова;
- Извођач радова са нижим трошковима је конкурентан на тржишту.

## 1.6 Примењене научне методе

У предложеном истраживању су, поред општих научних метода, примењене и:

- Емпиријска метода – метода квантитативног истраживања (прикупљање података снимањем на градилиштима, разговор са шефовима, инжењерима и радницима на градилиштима, у циљу прикупљања информација, увид у техничку документацију, попуњавање одређених образаца);
- Методе мерења рада (метода фотопрегледа);
- Статистичке методе у обради и приказу резултата квантитативног истраживања;
- Методе вишеструке регресионе анализе;
- Симулационе методе;
- Методе дискретних догађаја;
- Методе засноване на агентима.

## 1.7 Применљивост резултата истраживања

На основу свега реченог, значајног места продуктивности у грађевинској пракси, утицаја на рокове и трошкове извођења радова, као и значаја бетонских радова при изградњи објеката, истраживање у овој области заслужује оправданост са научне стране.

На основу предмета и циља истраживања, очекивани резултати су:

- Анализа и оцена продуктивности при извођењу бетонских радова;
- Поређење са постојећим нормама и стандардима;
- Идентификација губитака и њихових узрока;
- Откривање уских грла;
- Утврђивање и дефинисање фактора који утичу на продуктивност процеса бетонирања;
- Израда модела за прогнозирање продуктивности процеса извођења бетонских радова са узимањем у обзир најзначајнијих утицајних фактора;
- Израда модела за прогнозирање трајања бетонирања појединих елемената конструкција;
- Мере за побољшање продуктивности.

Резултати добијени у овом истраживању могли би наћи своју примену у извођачким грађевинским предузећима и фабрикама бетона. На основу предложених модела и поређењем са постојећим методама, могло би се корисно утицати на доношење одлука, прогнозирање тока радова и боље управљање процесом бетонирања са циљем повећања продуктивности, скраћења трајања и смањења трошкова.

Такође, модел треба да покаже да процеси везани за извођење радова у грађевинарству могу бити успешно представљени симулационим моделима и да се ови модели могу применити и у условима домаћег грађевинарства. Рачунарска симулација је важан алат при проучавању радних процеса јер пружа могућност анализе ресурса укључених у процес и израдом различитих сценарија омогућава истраживање различитих решења уз избор оптималног. Модел заснован на комбинацији, већ добро познате методе дискретних догађаја и релативно нове методе базиране на агентима показале могућност примене мулти-метода и предности моделирања хибридном техникама.

## 1.8 Преглед досадашњих истраживања

Истраживање у области продуктивности у грађевинарству није нова тема, али је увек актуелна и значајна. Са развојем науке и технологије, развијају се и нове методе које се примењују у проучавању продуктивности. У даљем тексту дат је кратак предлед, истраживања у овој области, на основу доступне литературе.

У многим радовима набрајани су и анализирани фактори који имају утицај на продуктивност у грађевинарству. Према (*Horner-у*, 1989) најважнији фактори који утичу на продуктивност радне снаге у Британском грађевинарству су: вештина и способност радне снаге, квалитет надзора, методе рада, подстицајни план, план градилишта, вештине и састав радне бригаде, дужина радног времена, доступност алата, изостајање са посла, укупан број радника на градилишту, удео подизвођача. *Herbsman*, (1990) наводи две основне групе фактора: технолошки и административни фактори. Технолошки фактори везани су за план објекта, док се административни односе на управљање грађењем. У својој докторској дисертацији, (*Talhouni*, 1990) дели утицајне факторе на четири групе: фактори везани за менаџмент, за градилиште, за пројекат и атмосферске прилике. Важна област која је била предмет многих истраживача јесу и људски фактори, као нпр. односи у управљању, подстицаји за зараде, физички умор, мотивација радне снаге, и др.

Одређен број научних радова посвећен је и прогнозирању продуктивности у грађевинарству применом различитих метода (*Panas и Pantouvakis*, 2010). *Thomas* и *Zavrski* (1999) представили су теоријску основу за мерење продуктивности радника при извођењу зидарских радова, на основу истраживања на узорку од двадесетак градилишта у САД-у, Бразилу, Турској и Хрватској. Добијени резултати упоређени су са постојећим резултатима везаним за: оплату на основу 8 пројеката и арматуру на основу 12 пројеката. Потврђена је хипотеза да сложенији дизајн утиче на смањење продуктивности, као и да већи коефицијент варијације указује на већу варијабилност управљања људским потенцијалима у грађевинарству (*Thomas и Zavrski*, 1999). *Dunlop* и *Smith* анализирају продуктивност бетонирања на основу података сакупљених на узорку од 202 бетонирања на три градилишта постројења за отпадне воде у Шкотској. Снимљени подаци се односе на плоче, зидове и стубове и добијена је средња остварена продуктивност  $13,6 \text{ m}^3/\text{h}$  за просечно по елементу. Предложен је регресиони модел за

прогнозирање продуктивности за све елементе плоче, стубови, зидови (*Dunlop и Smith, 2003*). На основу снимљених 418 бетонирања стубова, зидова, плоча и греда формиран је регресиони модел за прогнозирање продуктивности у Египту. Пренос бетона је вршен краном, снимљени су подаци на 10 градилишта, средња количина бетона износила је  $35,24 \text{ m}^3$ , а остварена продуктивност  $11 \text{ m}^3/\text{h}$  (*Abd и други, 2014*). У Нигерији је истраживана продуктивност радника ( $\text{h}/\text{m}^3$ ) на основу узорка од 26 бетонирања темељних зидова, стубова, плоча и греда, за превоз бетона дамперима. Овакав вид транспорта, иако ограничен на бетонирање темеља, у овој земљи је веома популаран због маневарских могућности ових возила и начина истовара и користи се на 50% градилишта. Просечна количина бетона износила је  $17,17 \text{ m}^3$ , а остварена продуктивност  $8,53 \text{ m}^3/\text{h}$  (*Olaoluwa и други, 2015*). *Anson и Wang (1998)* анализирају продуктивност бетонирања у Хонг Конгу за различите технологије извођења радова: краном, пумпом, колицима и левком. На узорку од 154 бетонирања зидова, стубова, плоча и греда, добијени резултати о продуктивности:  $17,50 \text{ m}^3/\text{h}$ , за пренос бетона краном,  $30,40 \text{ m}^3/\text{h}$ , за пренос бетона пумпом и  $17,30 \text{ m}^3/\text{h}$ , за превоз бетона колицима (*Anson и Wang 1998*).

Данас су често у употреби методе вештачке интелигенције за у прогнозирању. *Portas и Abourizk* су формирали модел за процену продуктивности израде оплате за плоче, стубове и зидове. Модел је заснован на Методи вештачких неуронских мрежа (*Artificial Neural Networks-ANN*) (*Portas и Abourizk, 1997*). Ова метода је примењена и при истраживању продуктивности рада крана; формиран су модели методом вишеструке линеарне регресије и вештачких неуронских мрежа и извршено је поређење (*Leung и други, 2001*). У Великој Британији су примењене неуронске мреже за прогнозирање продуктивности бетонирања готовим бетоном (*Graham и други, 2006*). *Song и AbouRizk* применили су неуронске мреже за развој модела за прогнозирање продуктивности извођења челичних конструкција (*Song и AbouRizk, 2008*).

Примењене су и друге релативно нове методе, Метода генетских алгоритама (*Genetic Algorithm-GA*) (*Lu и Lam, 2005*), Метода закључивања на основу случајева (*Case Based Reasoning-CBR*) (*Graham и Smith, 2004*), Фази логика (*Fuzzy Logic*) (*Hanna и други, 2002; Pan 2005*).

Рачунарска симулација у грађевинарству у примени је више од четири декаде. Поред могућности примене на сложеним процесима, популарност симулације расте и због развоја рачунара. Истраживања у Великој Британији, Словачкој, Русији, Грчкој, Хрватској и још неким земљама указују на све већу примену симулационих метода у области грађевинарства. Један од првих специјално намењених симулационих језика био је *CYCLONE* (*CYCLic Operations NEtwork*) развијен од стране *Halpin-a* (1973). Десетак година касније развијена је верзија *MicroCYCLONE* заснована на графичкој интерпретацији и једноставнија за разумевање. Међутим, иако је ова метода наишла на добар одзив у науци, није у потпуности примењена у пракси. Све касније развијене симулационе технике за решавање проблема цикличних процеса у грађевинарству заснивају се на моделу *CYCLONE*. *Ioannou* и *Martinez* (1999) развили су симулациони програм *STROBOSCOPE* и *EZStrobe*, заснован на дискретним догађајима (*discrete event simulation*), за примену у грађевинарству (*Ioannou* и *Martinez*, 1999). Узимајући предности метода *CYCLONE* и *STROBOSCOPE* изграђен је *SimEarth*, симулациони програм за специјалне потребе моделирања операција на извођењу земљаних радова (*Marzouk* и *Mosehli*, 2004). *Park* и други, (2011) користе системску динамику (*system dynamics*) као методу за израду симулационог модела за снабдевање готовим бетоном (*Park* и други, 2011). У раду *Labban-a* (2013) обрађена је метода дискретних догађаја за приказ процеса асфалтирања (*Labban* и други, 2013). *Zankoul* и *Khoury* (2013) истражују могућност комбинације методе дискретних догађаја и методе засноване на агентима (*agent based simulation*) за симулацију извођења земљаних радова (*Zankoul* и *Khoury*, 2013). Продуктивност радника проучавана је методом агената (*Watkins* и други, 2009).



## 2. ПРОДУКТИВНОСТ ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА

### 2.1 Уопште о продуктивности

Мера која изражава стопу по којој је извршен рад назива се продуктивност. Први пут реч продуктивност поменута је у чланку француског математичара *Quesnay-a* 1766. године, а век касније, 1883, *Littre* је дефинисао продуктивност као „*faculty to produce*“ што значи „способност да се произведе“. На почетку 20. века продуктивност је прецизније дефинисана као однос између излаза и средстава коришћених за добијање излаза. Формална дефиниција продуктивности уведена је 1950. године (*Organization for European Economic Cooperation*): Продуктивност је однос између постигнуте производње (*output*) и средстава уложених у ту производњу (*input*) према изразу (2.1), где уложена средства могу бити: рад, материјал, финансије, итд.

$$\text{Продуктивност (Productivity)} = \frac{\text{Излаз (Output)}}{\text{Улаз (Input)}} \quad (2.1)$$

Термин продуктивност често се меша са другим терминима као што су производња (*production*) и брзина (*speed*). Ово се дешава из разлога што се претпоставља да, уколико дође до повећања производње или брзине, долази до повећања продуктивности, што може али не мора да важи. Продуктивност је везана за ефикасно искоришћење ресурса (*input-a*) у производњи (*output-y*), а производња (*production*) се бави делатношћу у стварању нечега, другим речима, производња је мера произведене количине без обзира на улаз који је коришћен при томе. Као резултат, производња може бити велика, али продуктивност не мора обавезно бити висока. Са друге стране брзина показује излаз произведен у јединици времена без разматрања коришћених ресурса. Опет, брзина може бити велика, али не обавезно и продуктивност.

На слици 2.1 на интересанатан начин је објашњена продуктивност: Треба радити праве ствари на прави начин како би производња/процес/рад/... био продуктиван. Уколико се

раде праве ствари на погрешан начин, постаје се неефективан, или погрешне ствари на прави начин – неефикасан. У крајњем случају, радити погрешне ствари на погрешан начин, може се сматрати непомишљеношћу.



Слика 2.1 – Продуктивност ([www.savjetnik.ba/sta-je-productivnost/](http://www.savjetnik.ba/sta-je-productivnost/))

## 2.2 Продуктивност у грађевинарству

Продуктивност је један од најзначајнијих фактора који имају утицај на укупне перформансе сваког градилишта, било оно мало или велико. Производња (излаз) најчешће је исказана кроз јединицу мере (кубатура, површина, тежина, и др.), а улаз је углавном временска јединица (сати, смена, радник-дан, машино-дан, итд.). Не постоји универзални нити стандардни начин за дефинисање продуктивности грађевинских процеса, али у суштини, продуктивност рада у грађевинарству, најчешће је изражена као извршена производња у јединици времена.

Постоји неколико начина за изражавање и мерење продуктивности у грађевинарству. Продуктивност може бити изражена као однос између остварене количине производа и утрошка радне снаге. Може се и знатно шире посматрати, не само у односу на радну снагу, већ и на било који други улазни елемент. У односу на посматрани ниво, постоји неколико типова продуктивности. Уколико је продуктивност везана за једну активност (једну позицију рада) где постоји једна врста оствареног производа, па самим тим и

једна једница мере, реч је о појединачном фактору продуктивности (*single factor productivity*). Продуктивност, посматрана на вишем нивоу, у односу на више од једне активности, или нпр. једне групе радова, изражава се вишеструким фактором (*multi factor productivity*). И продуктивност која је изражена на нивоу целокупног градилишта, где су укључене све активности, дефинише укупни фактор продуктивности (*total factor productivity*). Мерење и проучавање продуктивности има велики утицај на: скраћење рокова и смањење трошкова пројекта, повећање квалитета, омогућавање ефикасне контроле извођења радова, пружање повратних информација, повећање добити, и др.

### 2.3 Значај бетонских радова

Бетон као грађевински материјал има веома широку примену у грађевинској индустрији и зато је посебан предмет проучавања. Своју огромну примену заслужује из разлога релативно јефтених природних материјала: цемента и агрегата, који су саставни делови бетонске мешавине. Додавањем воде и одређивањем праве размере компоненти утиче се на захтеване физичко-механичке карактеристике бетона. Унапређене технологије бетона засноване су на додавању адитива који у одређеној мери утичу на отпорност бетона на спољашње утицаје. За справљање и уграђивање бетона доступне су разноврсне технологије. Процес бетонирања, почев од справљања бетона у фабрици бетона, преко његовог транспорта до градилишта, до уграђивања у конструкцију, заједнички је процес при изградњи великог броја широког спектра грађевинских објеката. Може се са пуним правом рећи да је данас то најраспрострањенији, најзаступљенији и најчешће примењиван материјал при изградњи грађевинских објеката. Према неким подацима из 2006. године укупна производња бетона у свету била је око 6 милијарди кубних метара, што представља око 1 кубни метар по становнику планете ([www.sr.wikipedia.org](http://www.sr.wikipedia.org)). Због специфичности овог грађевинског материјала и различитих утицаја (прекиди, застоји, неправилности, итд.), који се јављају при бетонирању, веома је важно посветити посебну пажњу при планирању и извођењу ових радова.

Бетонски радови чине важан и већи део радова при изградњи, како инжењерских, тако и објеката високоградње. Код стамбених објеката, у скелетном систему грађења, значајан је удео бетонских радова са аспекта количина и трошкова. На пример, оквирно

просечна количина бетона која се угради у стамбени објекат спратности  $P_0+P+5+P_k$ , бруто површине око  $400 \text{ m}^2$  по етажи, у скелетном систему грађења, износи око  $1\,250 \text{ m}^3$ , од тога око  $860 \text{ m}^3$  у плоче ( $9\,400\,000$  рсд),  $220 \text{ m}^3$  у вертикалне елементе - стубови, зидови, лифтовски оквири ( $2\,750\,000$ ) и  $170 \text{ m}^3$  у остале мање елементе - надпрозорници, надвратници, тротоари, ограде, подови, и др. ( $2\,150\,000$  рсд). Укупна цена бетонских радова  $14\,500\,000$  динара представља око 38 % од укупне цене грубих грађевинских радова. За овакве објекте, бетонски радови представљају кључне (критичне) активности у динамичком плану извођења радова. Због тога је важно извршити реално планирање извођења ових радова добрим усклађивањем свих утицаја и обезбеђењем потребне продуктивности.

Један од значајнијих развојних пројеката Републике Србије је изградња стамбеног простора који је егзистенцијална потреба на целој територији Србије. Потреба за изградњом станова и решавање стамбеног проблема евидентна је последица кретања становништва, формирање нових младих домаћинстава, као и замена дотрајалог и стамбеног фонда лошег квалитета. Према извршеним анализама тржишта некретнинама и других показатеља, број потребних станова годишње, у Србији је изнад 25.000, а тренутно је преко 300.000 домаћинстава која немају решено стамбено питање ([www.pks.rs/PrivredaSrbije](http://www.pks.rs/PrivredaSrbije)).

## 2.4 Технологија процеса бетонирања

Данас се производња свежег бетона, у условима савремених технологија и све веће поделе рада, све више одвија у погонима за производњу бетона – фабрикама бетона (бетонским базама). Бетонске базе обично опслужују већи број градилишта, уколико су стационарног типа, или су постављене циљано за опслуживање једног градилишта, када су полустационарног или мобилног типа.

Технолошки систем једног бетонског постројења састоји се од бункера или силоса за агрегат, силоса за цементе, дозатора воде и дозатора адитива. Опционо је да овакво постројење садржи и додатне силосе у којима се могу сместити филер, микросилика или неки други додаци бетону. Поступак дозирања зависи од произвођача бетонског постројења и веома се разликује од произвођача до произвођача.

Квалитет бетона одређује се на основу пројекта конструкције, односно техничких услова за извођење бетонских радова. У пројекту конструкције дефинише се потребна марка бетона (МВ) као и остала својства бетона која условљавају трајност конструкције (отпорност на дејство мраза, мраза и соли, водонепропустљивост, итд.). У пројектној документацији наводи се класа бетона за одређени део објекта или позицију која садржи или марку бетона или марку бетона и друга захтевана својства.

Контрола квалитета састоји се од контроле производње и контроле сагласности са условима пројекта конструкције и пројекта бетона. Контролом квалитета бетона проверава се да ли су за одређену партију бетона постигнута захтевана марка бетона и друга прописана својства. На основу критеријума о преузимању одлучује се да ли се одређена партија прихвата или одбацује.

Контрола квалитета произведеног бетона врши се у производњи бетона и на градилишту (на месту уграђивања бетона), у складу са прописима и одговарајућим члановима *PBAB-a*. Произвођач у фабрици бетона испитује чврстоћу при притиску на узорку који се узима за сваку врсту бетона, и то сваки дан када се бетон производи или на сваких 50 m<sup>3</sup>, односно на сваких 75 мешавина. Уколико је производња бетона у периоду оцењивања већа од 2000 m<sup>3</sup>, узорци за испитивање бетона узимају се на сваких 100 m<sup>3</sup>, односно на сваких 150 мешунга. Поред чврстоће на притисак, у фабрици бетона врши се контрола: гранулометријског састава и влажности агрегата, конзистенције свежег бетона, почетак и крај везивања, цемента и адитива.

За бетон допремљен из фабрике бетона, на месту уградње бетона, узима се најмање један узорак за сваки дан бетонирања или на сваких 100 m<sup>3</sup> уграђеног бетона или на сваких 150 мешавина. На градилишту треба вршити и испитивање конзистенције бетона, као и обрадљивости.

Посебну пажњу треба посветити транспорту бетона и доброј координацији између фабрике бетона и градилишта, како не би дошло до непожељних промена у својствима свежег бетона. Готов бетон мора бити допремљен на градилиште у одговарајућем (уградљивом) стању, с обзиром на то да има ограничено време уграђивања, па је потребно добро испланирати и организовати његов транспорт. Најчешћи и најприкладнији начин транспорта свежег бетона од фабрике бетона до градилишта је ауто-бетонским мешалицама (миксерима), које сталним умереним ротирањем бубња

приликом транспорта одржавају бетон у истом стању. Како су они углавном различитог капацитета (5 – 12 m<sup>3</sup>), потребно је добро усклађивање потребног броја са потребама допреме по количинама и по времену. Транспорт свежег бетона представља врло деликатну операцију у склопу целокупне технологије извођења бетонских радова, из следећих разлога: могућност сегрегације, исцуривање цементне пасте из возила, испаравање воде при дужем транспорту (нарочито у летњем периоду), време транспорта у функцији почетка везивања цемента у бетону и одржавања конзистенције (нарочито у летњем периоду) – примена адитива ретардера, промена конзистенције временом при употреби адитива пластификатора или суперпластификатора. При транспорту бетона мора се водити рачуна о томе да: температура бетона у току транспорта не прелаци дозвољене границе, крупне фракције не смеју мрвити ситније јер долази до промене гранулометријског састава, може доћи до сегрегације бетона, итд. У суштини, транспорт треба организовати тако да не долази до чекања и застоја приликом убацивања у оплату. Према *SRPS U.MI.045/87* бетонска мешавина мора да буде изручена из транспортног возила у времену од највише 2 сата, рачунајући од момента кад је дозирана вода у фабрици бетона ако се транспорт одвија возилом са уређајем за узбуркивање бетонске мешавине, односно у времену највише 1 сат ако се транспорт обавља возилом без уређаја за узбуркивање бетонске мешавине. Дуже време може бити одговарајуће ако је време хладно и влажно и кад је коришћен успоривач као додатак бетону. Краће време може бити одговарајуће ако је време топло а бетон справљен са већом количином цемента или када је коришћен убрзивач.

Испорука сваке количине бетона утоварене у транспортно средство документује се пропратним листом који издаје радник у бетонској бази. Пропратни лист – отпремница састоји се из два примерка од којих један остаје на градилишту, а други потписан од заступника градилишта, враћа се фабрици бетона. Подаци који треба да буду уписани на отпремници су: име произвођача бетона, датум испоруке, име купца, назив градилишта, назив објекта, врста и марка, посебна својства бетона, испоручена количина, врста употребљеног агрегата и цемента, време завршетка пуњења транспортног средства, конзистенција бетона, температура бетона, време доласка транспортног средства на градилиште, време почетка и краја истовара.

Постоји више начина градилишног транспорта и уграђивања бетона, али један од најчешће примењиваних је помоћу пумпи за бетон, нарочито мобилних (ауто-пумпи за бетон). Ауто-пумпе имају склопиву телескопску стрелу чиме је омогућена флексибилна уградња бетона на различитим местима објекта, хоризонтално, у висину или на дубину. Данас је пумпани бетон постао важна карика у ланцу савременог грађевинарства, а пумпе за бетон су врста специјалних машина са највећим развојем и око четвртина од укупних количина бетона уграђује се на овај начин. Рад са пумпом је једноставан и ангажује мали број радника, а бетон који се уграђује пумпом мора да има одговарајуће карактеристике, као што су количина финих честица, облик зрна агрегата, конзистенција, количина увученог ваздуха и др. Уграђивање бетона пумпом омогућава брзу градњу, висок квалитет и већу економску добит. Постављен је светски рекорд, 2008. године у висини на којој је пумпан бетон – 606 m, на небодеру Бурџ Калифа (*Burj Khalifa*) у Дубаију ([www.wikipedia.org/wiki/Burj\\_Khalifa](http://www.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa)).

Под уграђивањем бетона подразумева се: разастирање свежег бетона или пуњење оплате пумпом за бетон, збијање бетона вибраторима (компактирање) и завршна обрада горњих површина елемената. Пре уграђивања бетона потребно је преконтролисати постављену оплату и уграђену арматуру. Оплата мора бити добро урађена и осигурана како не би дошло до њеног попуштања и цурења бетона. Основни принцип при уграђивању је да уграђивање бетона мора да се заврши пре почетка везивања цемента. Време везивања зависи од врсте и количине цемента, као и додатака бетону па је неопходно да се у том времену бетон угради у оплату и добро збије вибраторима. Најповољније време за уграђивање бетона је на температури ваздуха од +14° C до +20° C. Уграђивање на спољним температурама испод +5° C и изнад +30° C сматра се бетонирањем под посебним условима када је неопходно применити посебне мере заштите бетона. Уграђивање бетона важно је колико и правилан транспорт и производња. Овим поступком осигурава се хомогена збијена структура без шупљина у бетону што доприноси његовој водонепропусности и трајности, као и добијању одговарајуће марке бетона. Бетон треба уградити и збити тако да се сва арматура добро обухвати бетоном и осигура заштитни слој бетона унутар прописаних толеранција. Посебну пажњу треба посветити уградњи и збијању бетона на местима промене димензија пресека (нпр. сужења пресека), уз отворе, на местима малог размака арматуре и прекида бетонирања. Нормална дебљина слоја не би смела бити већа од

висине урођеног вибратора, а вибрирање треба изводити вертикалним урањањем вибратора тако да се површина доњег слоја ревибрира. Код дебљих слојева, ревибрирање површинског слоја препоручљиво је и ради избегавања пластичног слегања бетона испод горњих шипки арматуре. Брзина уградње и збијања бетона треба бити довољно велика да се избегну хладне спојнице и довољно ниска да се избегну претерана слегања или преоптерећење оплате и скеле.

Поступци бетонирања зависе од типа конструкције, врсте елемената који се бетонирају, врсте бетона, и др. Бетонирање стубова (слика 2.2) треба изводити без прекида до предвиђене висине. Висина слободног пада бетона не сме бити већа од 1.5 m због спречавања појаве сегрегације бетона.



*Слика 2.2 – Бетонирање АВ стубова  
(снимила: аутор рада)*

Пуне плоче се бетонирају у тракама одређене ширине (слика 2.4), а код плоча „ферт“ конструкције са подвлакама и серклажима, прво треба бетонирати подвлаке и серклаже па онда плочу (слика 2.5).



*Слика 2.3 – Бетонирање АВ зидова  
(снимила: аутор рада)*





Слика 2.4 – Бетонирање пуне АВ плоче  
(снимила: аутор рада)



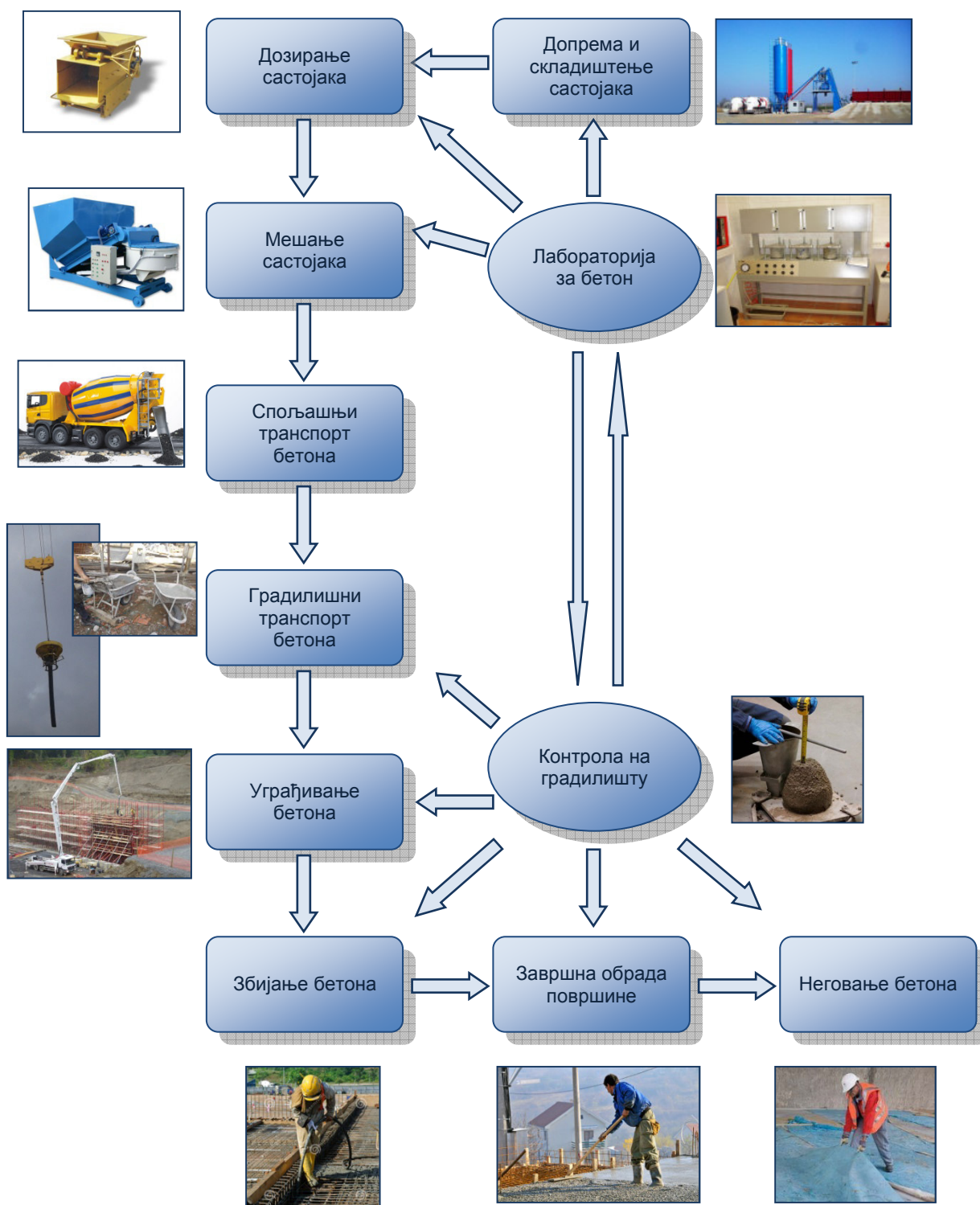
Слика 2.5 – Бетонирање „ферт“ плоче  
(снимила: аутор рада)

Процес бетонирања завршава се негом бетона која може бити различита у зависности од врсте бетона и атмосферских прилика. Поступак неговања бетона подразумева заштиту бетона од спољашњих утицаја (високих и ниских температура, јаког ветра, агресивних утицаја, механичких оштећења, итд.). У пракси се обично не посвећује довољна пажња неговању бетона, што може довести до тешких последица нарочито у погледу својстава трајности површинског слоја бетона. Спречавање брзог губљења воде из површинског слоја може се обезбедити поливањем бетона водом или покривањем разним материјалима, премазивањем или прскањем у циљу стварања мембрана.

На крају процеса бетонирања даје се завршна оцена квалитета бетона на основу документације о преузимању бетона, визуелног прегледа и прегледом градилишне документације. Завршна оцена квалитета бетона доказује сигурност и трајност конструкције.

На слици 2.6 дате су фазе процеса бетонирања од производње бетона до уграђивања у конструкцију.

Технологија извођења бетонских радова разматраних у овом раду подразумева справљање бетона у фабрици бетона, транспорт миксерима до градилишта, транспорт и уграђивање ауто-бетонском пумпом и збијање первибраторима.



Слика 2.6 - Фазе од производње до уграђивања бетона

## **2.5 Продуктивност процеса бетонирања**

Постоји велики број фактора који имају мањи или већи значај и утицај при проучавању продуктивности извођења бетонских радова. На основу претходних разматрања продуктивности уопште и бетонских радова, може се закључити да продуктивност процеса бетонирања изражена као однос између уграђене количине бетона и времена потребног за добијање јединице мере, у највећој мери, зависи од следећих фактора:

- Снабдевања бетоном (мешалица на градилишту, полигона фабрика бетона, бетонска база, капацитет, удаљеност, ...);
- Објекта (димензије објекта, приступачност за уграђивање-положај градилишта, елементи објекта у којима се уграђује бетон: темељи, плоче, греде, стубови, зидови, ...);
- Технологије бетонирања (ауто-пумпа, стационарна пумпа, кран, дизалица, колица, директно из миксера, ..., вибратори, и др.);
- Механизације која се користи (стање, капацитет, расположивост, ...);
- Карактеристика радне бригаде ангажоване на уграђивању (број радника, способности, вештине, уиграност радне бригаде, мотивисаност, стручна спрема, радно искуство, ...);
- Атмосферских услова (доба године, температура ваздуха, падавине, ...);
- Управљања градилиштем, и др.

### **Снабдевање бетоном**

Бетон се производи у бетонским постројењима различитог капацитета са аутоматским или полуаутоматским управљањем. За ниже марке од МВ 25, за бетоне прве категорије (В.І) и мање количине бетона, дозвољено је ручно или машинско справљање бетона на градилишту без претходних испитивања. Дакле, начин справљања и практични учинак фабрике бетона/мешалице имају директан утицај на продуктивност бетонирања на градилишту. Положај фабрике бетона у односу на градилиште (удаљеност, транспортни услови: градски, ванградски саобраћај, и др.) расположив број миксера и њихов капацитет имају утицај на синхронизацију са потребама градилишта, што је директно повезано са потребним временом и продуктивношћу. Такође, истовремено снабдевање

више градилишта истом бетонском базом доводи до неминовних застоја и смањења продуктивности.

### **Објекат**

Бетонирање различитих елемената конструкције повлачи и остваривање веће или мање продуктивности. Није исто уграђивање бетона у масивније конструкције, веће дебљине, са већом количином бетона по јединици мере у односу на елементе са малом дебљином, као што су нпр. зидови или плоче или уграђивање бетона у неке елементе сложених пресека, итд. Такође, утицај има и врста бетонског елемента (армирани или неармирани), врста и марка бетона, састав бетона, количина бетона, количина арматуре и начин армирања, врста оплате, и др. Уколико је елемент густо армиран теже ће бити и убацивање бетона у оплату и збијање бетона. Висина објекта на којој се врши бетонирање (могућност дохвата цевним водом пумпе, додавање наставака итд, радијус дејства крана, и др.) као и положај градилишта (приступачност за прилаз нпр. бетонске пумпе, скучени градски услови, ...) имају значајан утицај на продуктивност.

### **Технологија бетонирања**

У зависности од примењене технологије извођења бетонских радова освариваће се различита продуктивност. Јасно је да је знатно краће време потребно за уграђивање јединице мере бетона ако се бетон транспортује ауто-пумпом у односу на нпр. стационарну пумпу. Још дуже ће бетонирање трајати ако је ангажован кран на преносу бетона, нека друга дизалица или колица и биће потребан знатно већи број радника. Начин збијања бетона исто има утицај на трајање процеса. Уграђивање первибраторима, оплатним вибраторима или вибро-летвама и вибро-плочама утицаће и на ангажовање различитог броја радника и на остварење различите продуктивности.

### **Механизација**

Механизација у великој мери утиче на продуктивност процеса бетонирања, с обзиром на то да је њено учешће углавном у већем проценту. Подразумевано је да већи учинак машине у великој мери може да повећа и продуктивност целог процеса. Старост машине, као и стање у коме се налази с обзиром на одржавање, доприносе бољој или лошијој искоришћености (кварови, поправке, искључења из процеса, итд.). Распоживост механизације, такође има утицај на континуални ток радова, тј.

избегавају се прекиди и застоји. У случају кварова увек на располагању треба имати резервну механизацију. Распоживост може да се односи и на заузетост машине неким другим процесом услед чега долази до чекања на ослобађање (нпр. фабрика бетона врши справљање бетона за више градилишта у исто време или кран је ангажован на преносу још неких материјала осим бетона, итд.)

### **Карактеристика радне бригаде ангажоване на уграђивању бетона**

На повећање продуктивности може се утицати планирањем довољног броја радника, одговарајуће стручне спреме и квалификације. Јасно је да способности радника, мотивација и адекватне вештине које поседују за извођење бетонских радова имају директан утицај на квалитет радова и остварену продуктивност. Потребно је да радници имају и довољног искуства, као и мотивацију за извођење разматраних радова. Формирана радна бригада, уколико је добро уиграна, радници имају смисао за групни рад, послови се обављају веома брзо, нема застоја због неразумевања и различитости у погледу вештина међу радницима. Све ове особине имају утицај на продуктивност и односе се како на физичке раднике и раднике тако и на раднике руковооце механизацијом.

### **Атмосферски услови**

Како се бетонски радови изводе углавном на отвореном, као и већина радова у грађевинарству, значајан утицај на продуктивност могу имати временске прилике. Бетонирање се по правилу изводи, као што је већ поменуто, на температурама 5-30°C. Међутим, уз додавање разних адитива, могуће је изводити радове и на нижим и вишим температурама од предвиђених без последица по квалитет бетона. У тим случајевима високе или ниске температуре могу имати негативне утицаје на радну способност радника а самим тим и на оствариву продуктивност. Падавине, такође утичу на процес, на начин да се бетонирање мора прекинути у случају јаке кише или пљускова, док је рад по ситној киши могућ али уз утицај на продуктивност. Доба године, јасно је какав утицај има, везано за температуру ваздуха, али и краће трајање дана у касним јесењим и зимским месецима. У последње време, како су зиме мање хладне и касније пада снег, сезона траје знатно дуже. Доба дана, тј. смена у којој се изводе радови, као и дужина смене, имају утицаја на остварену продуктивност. Рад ноћу и дуже трајање смене, као и

рад недељом или за време празника негативно утичу на раднике због умора и мање мотивисаности, у случају кварова механизације, теже је отклањање квара, итд.

### **Управљање градилиштем**

На продуктивност процеса бетонирања значајан утицај имају и односи и атмосфера међу самим учесницима укљученим у процес. Професионалан, коректан однос и поверење између руководилаца на градилиштима и радника је веома битан фактор за квалитетну и правовремену реализацију циљева. Значајно је, наравно искуство и стручност шефова у вођењу градилишта и извођењу радова на сличним објектима, мотивисаност у раду, утицајност, озбиљно схватање обавеза, итд.

### 3. ПРИКУПЉЕНИ ПОДАЦИ

#### 3.1 Опис истраживања

Сprovedено је истраживање о продуктивности процеса бетонирања праћењем бетонских радова на градилиштима на територији града Ниша. Сакупљени су подаци снимањем процеса рада на осам градилишта (четири стамбена објекта  $Po+P+VI$ , два стамбена објекта  $Po+P+5+Pk$ , једног студентског дома  $Po+P+II+Pk$  и једног објекта здравствене заштите  $Po+P+5+Pk$ ). Сви објекти изведени су у скелетном систему грађења. У трајању од 20 месеци извршено је 141 снимање бетонирања контра плоча, међуспратних конструкција и греда, стубова и зидова. Укупна уграђена количина бетона је  $12\,799\text{ m}^3$  и укупно утрошено време 617 часова рада.

Снимање процеса обављено је методом фотопрегледа, бележењем одговарајућих података у за то припремљене обрасце (прилог 1 и 2). На градилиштима мерена су и бележена следећа времена, догађаји и остали значајни параметри: почетак бетонирања, долазак миксера на градилиште, позиционирање миксера у положај за истовар, почетак истовара, прање левка миксера после истовара, одлазак миксера са градилишта, чекање пумпе уколико нема бетона на градилишту, чекање миксера у реду, разни оправдани и неоправдани застоји (пауза за оброк, квар механизације, временске неприлике, застој организационе природе, итд.), број радника на бетонирању, уиграност радне бригаде, број миксера у циклусу, укупан број миксера, време између долазака миксера, количина уграђеног бетона, број премештања пумпе у други положај и време потребно за премештање, чекање пумпе на последњи миксер (тзв. чекање на допуну).

Са отпремница миксера преузимани су следећи подаци: број отпремнице, врста и марка бетона, количина бетона по миксеру, време поласка миксера из бетонске базе, удаљеност бетонске базе од градилишта.

Подаци сакупљени из бетонских база (из разговора са инжењерима у истим) су: карактеристике бетонске базе (запремина мешалице, трајање циклуса, начин справљања бетона, начин утовара миксера), карактеристике ауто-бетонских пумпи (теоретски учинак, дужина цевног вода, број секција, дужина црева, могућност повећања димензија наставцима, број наставака, дужина наставака, запремина пријемног силоса, година производње).

Сви ови подаци послужили су за сагледавање процеса бетонирања на појединим градилиштима, оцену остварене продуктивности, као и формирање репрезентативних узорака за статистичку обраду. За потребе овог рада, у циљу добијања репрезентативнијих модела због хомогености података, целокупни узорак подељен је на два дела:

- Бетонирање армиранобетонских контра плоча и међуспратних конструкција типа: пуних армиранобетонских плоча, пуних армиранобетонских плоча са гредама и „ферт“ међуспратних конструкција (у даљем тексту у ознаци *МК*);
- Бетонирање армиранобетонских стубова и зидова (у ознаци *SZ*).

На основу прикупљених података, најпре је урађена њихова статистичка обрада, а онда су одабрани одређени подаци који ће представљати утицајне параметре при формирању модела за прогнозирање продуктивности.

### **3.1.1 Преглед података из узорка *МК***

Узорак који чине плоче – *МК*, састоји се од података снимљених на осам градилишта и то укупно 81 бетонирање (7 контра плоча и 74 међуспратних конструкција) са количином уграђеног бетона од 11 951 m<sup>3</sup> (93% од укупне количине у целом узорку) где је укупно утрошено време 503 часова рада. Средња вредност остварене продуктивности износи 22.48 m<sup>3</sup>/h (min 9,54 m<sup>3</sup>/h, max 45,01 m<sup>3</sup>/h). Једну четвртину узорка чине количине бетона мање од 69 m<sup>3</sup> и трајање бетонирања краће од 3.7 сати, а једну четвртину количине веће од 178 m<sup>3</sup> и трајање дуже од 7 сати. Просечна количина бетона по једној плочи износи 147.5 m<sup>3</sup>, а просечно трајање бетонирања је 6.21 h. Количине мање од 100 m<sup>3</sup> уграђеног бетона у плочи јављају се у 56% случајева, од 100 до 200 m<sup>3</sup> у 20% и преко 200 m<sup>3</sup> у 15% случајева. Просечна остварена продуктивност на сваком од осам градилишта приказана је у табели 3.1, где се може запазити да је



остварена продуктивност прилично уједначена на градилиштима са изузетком градилишта број 6 и 8.

Приликом извођења бетонских радова, запажено је да се у великом броју случајева јављају неоправдани застоји као што су чекање пумпе због недостатка бетона на градилишту, или дуже чекање миксера у реду (понекад дуже и од дозвољеног). Прикупљени подаци показују да бетонска пумпа проведе у стању чекања на бетон, приликом једног бетонирања, у просеку 68 минута или 23 % од укупног времена трајања бетонирања, што повлачи трошкове чекања од око 1.4 €/m<sup>3</sup> уграђеног бетона. Сви миксери ангажовани на једном бетонирању проведу у просеку 213 минута или 53 % од укупног времена трајања бетонирања чекајући у реду на градилишту, што чини додатне трошкове од око 0.8 €/m<sup>3</sup> уграђеног бетона. Појединачно миксер остаје у стању чекања, за истовар бетона, на градилишту у просеку 13 минута. Подаци о чекању миксера, пумпе, као и трошкови које повлаче ови застоји дати су просечно по градилиштима у табелама 3.2 – 3.4.

Табела 3.1 Просечна количина бетона, трајање и остварена продуктивност на градилиштима) - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Број бетонирања	Спрат	Количина бетона (m <sup>3</sup> )	Трајање бетонирања (min)	Остварена продуктивност P <sub>ostv</sub> (m <sup>3</sup> /h)
1 (N)	10	T – VI	102.37	336	19.59
2 (SD)	3	V – VII	182.67	608	18.49
3 (VT)	9	Po – TAV (VII)	66.11	228	18.46
4 (GBJ)	5	II – VI	89.80	308	18.02
5 (MP)	8	Po – VI	71.13	216	21.36
6 (L6)	4	III – Pk	65.66	341	11.72
7 (L5)	8	Po – Pk	69.75	213	20.50
8 (KC)	34	T – V	233.69	488	27.42
средња вредност (по градилишту)			110.15	342.25	19.45

Табела 3.2 Снимљени подаци (број миксера, количина бетона по миксеру, чекање миксера на градилишту) - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Број миксера	Број миксера у циклусу	Количина бетона по миксеру (m <sup>3</sup> /miks)	Укупно чекање миксера (min)	Укупно чекање миксера (%)	Чекање миксера по миксеру (min/ miks)
1 (N)	12.70	5.10	8.02	65.90	18.94	5.75
2 (SD)	22.00	5.00	8.31	687.67	113.04	31.43
3 (VT)	8.22	4.67	8.08	123.22	53.16	15.52
4 (GBJ)	11.60	4.60	7.75	232.00	75.42	15.48
5 (MP)	9.00	4.13	7.93	54.50	25.26	6.03
6 (L6)	8.00	3.75	8.21	40.25	11.67	5.03
7 (L5)	9.00	4.25	7.80	80.88	37.99	9.34
8 (KC)	28.62	5.29	8.08	417.43	85.08	13.76
средња вредност (по градилишту)	13.64	4.60	8.02	212.73	52.57	12.79

Табела 3.3 Снимљени подаци (чекање пумпе, позиционирање, прање, остали застоји) - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Укупно чекање пумпе (min)	Укупно чекање пумпе (%)	Позиционирање миксера (min)	Прање левка миксера (min)	Трајање застоја (min)
1 (N)	96.40	27.70	18.06	20.72	34.62
2 (SD)	33.33	5.48	36.08	37.96	79.60
3 (VT)	41.78	18.03	10.68	7.61	29.80
4 (GBJ)	48.00	15.60	11.46	14.51	36.24
5 (MP)	49.13	22.77	9.24	9.98	22.87
6 (L6)	155.50	45.07	10.81	13.43	40.95
7 (L5)	76.25	35.82	13.07	11.94	17.78
8 (KC)	46.82	9.54	29.43	16.68	71.52
средња вредност (по градилишту)	68.40	22.50	17.35	16.60	41.67

Табела 3.4 Трошкови чекања миксера и пумпе - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Трошкови чекања миксера (€)	Трошкови чекања миксера (€/m <sup>3</sup> )	Трошкови чекања пумпе (€)	Трошкови чекања пумпе (€/m <sup>3</sup> )
1 (N)	32.95	0.32	160.67	1.57
2 (SD)	343.84	1.88	55.55	0.30
3 (VT)	61.61	0.93	69.63	1.05
4 (GBJ)	116.00	1.29	80.00	0.89
5 (MP)	27.25	0.38	81.88	1.15
6 (L6)	20.13	0.31	259.17	3.95
7 (L5)	40.44	0.58	127.08	1.82
8 (KC)	208.72	0.89	78.03	0.33
средња вредност (по градилишту)	106.36	0.82	114.00	1.38

### 3.1.2 Преглед података из узорка SZ

Узорак који чине стубови и зидови – SZ, сачињен је снимањем података на седам градилишта. Снимљено је 60 бетонирања са количином уграђеног бетона од 848 m<sup>3</sup> и укупним временом бетонирања од 114 часова рада. Бетонирање стубова и зидова на градилишту број 4 (GBJ) није вршено пумпом за бетон већ краном, тако да подаци са овог градилишта нису прикупљени. Средња вредност остварене продуктивности износи 7.93 m<sup>3</sup>/h (min 2,43 m<sup>3</sup>/h, max 16,02 m<sup>3</sup>/h). Једну четвртину узорка чине количине бетона мање од 11 m<sup>3</sup> и трајање бетонирања краће од 1.4 сати, а једну четвртину количине веће од 17 m<sup>3</sup> и трајање дуже од 2.6 сати. Просечна количина бетона по једном бетонирању је 14.14 m<sup>3</sup>, а просечно трајање 1.9 сати. Просечна остварена продуктивност на сваком од седам градилишта приказана је у табели 3.5.

На основу података о бетонирању стубова и зидова уочава се да бетонска пумпа проведе у стању чекања на бетон у просеку 23 минута или око 18 % од укупног времена трајања бетонирања, што чини трошкове од око 2.8 €/m<sup>3</sup> уграђеног бетона. Миксери проведу у просеку 35 минута или око 27 % од укупног времена трајања бетонирања чекајући у реду на градилишту, што чини додатне трошкове од око 1.2 €/m<sup>3</sup> уграђеног бетона. Просечно чекање сваког миксера при бетонирању стубова и зидова износи 16

минута. Подаци о чекању миксера, пумпе, као и трошкови које повлаче дати су у просеку по градилиштима у табелама 3.5 – 3.8.

Табела 3.5 Просечна количина бетона, трајање и остварена продуктивност на градилиштима) - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Бр.бет.	Спрат	Количина бетона (m <sup>3</sup> )	Трајање бетонирања (min)	Остварена продуктивност P <sub>ostv</sub> (m <sup>3</sup> /h)
1 (N)	5	III –TAV (VII)	12.00	78.6	9.27
2 (SD)	8	V – VII	19.81	137.4	8.74
3 (VT)	13	Pr – VII	13.27	119.4	6.82
5 (MP)	8	Pr –TAV (VII)	18.63	136.2	8.37
6 (L6)	6	IV – VI	11.56	111.0	7.32
7 (L5)	19	Pr – VI	11.70	103.2	7.57
8 (KC)	1	Po	16.50	61.8	16.02
средња вредност (по градилишту)			14.78	106.89	9.16

Табела 3.6 Снимљени подаци (број миксера, количина бетона по миксеру, чекање миксера на градилишту) - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Број миксера	Број миксера у циклусу	Количина бетона по миксеру (m <sup>3</sup> /miks)	Укупно чекање миксера (min)	Укупно чекање миксера (%)	Чекање миксера по миксеру (min)
1 (N)	1.80	1.80	6.8	20.60	26.21	10.70
2 (SD)	2.62	2.50	7.6	38.25	24.80	15.63
3 (VT)	2.08	2.08	6.6	28.77	20.52	14.24
5 (MP)	2.62	2.38	7.6	41.00	26.86	16.27
6 (L6)	1.67	1.67	7.3	43.50	28.94	24.92
7 (L5)	1.79	1.79	6.8	16.37	11.64	10.82
8 (KC)	3.00	3.00	5.5	57.00	51.82	19.00
средња вредност (по градилишту)	2.23	1.66	6.89	35.07	27.26	15.94

Табела 3.7 Снимљени подаци (чекање пумпе, позиционирање, прање, остали застоји) -просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Укупно чекање пумпе (min)	Укупно чекање пумпе (%)	Позиционирање миксера (min)	Прање левка миксера (min)	Трајање застоја (min)
1 (N)	7.60	8.22	2.35	2.54	6.60
2 (SD)	15.50	10.05	3.71	4.55	14.25
3 (VT)	19.38	13.82	2.76	2.71	25.00
5 (MP)	10.25	6.72	2.39	2.98	18.13
6 (L6)	27.50	18.29	2.18	2.44	29.50
7 (L5)	39.16	27.84	2.59	2.81	21.63
8 (KC)	42.00	38.18	4.92	0.96	23.00
средња вредност (по градилишту)	23.06	17.59	2.99	2.71	19.73

Табела 3.8 Трошкови чекања миксера и пумпе - просечне вредности по једном бетонирању

Р. бр. градилишта и шифра	Трошкови чекања миксера (€)	Трошкови чекања миксера (€/m <sup>3</sup> )	Трошкови чекања пумпе (€)	Трошкови чекања пумпе (€/m <sup>3</sup> )
1 (N)	10.30	0.86	12.67	1.06
2 (SD)	19.13	0.97	25.83	1.30
3 (VT)	14.39	1.08	32.30	2.43
5 (MP)	20.50	1.10	17.08	0.92
6 (L6)	21.75	1.88	45.83	3.96
7 (L5)	8.19	0.70	65.27	5.58
8 (KC)	28.50	1.73	70.00	4.24
средња вредност (по градилишту)	17.54	1.19	38.43	2.78

### 3.2 Статистичка обрада прикупљених података

У циљу анализе прикупљених података и формирања модела за прогнозирање продуктивности, извршена је статистичка обрада података применом *XLSTAT 2014* програмског додатка *EXCEL-a*. Најпре су узорци тестирани на присуство изузетних вредности (*outlier-a*) помоћу Грубсовог теста (*Grubbs test for outliers*), а затим после

избацивања тих вредности, извршена је статистичка анализа. Дата је дескриптивна статистика за оба узорка и остварене продуктивности су представљене одговарајућим теоретским расподелама.

### 3.2.1 Статистичка анализа - узорак МК

Тестирање на присуство изузетних вредности помоћу Грубсовог теста дефинисано је статистиком према изразу (3.1):

$$G = \frac{\max_{i=1,\dots,N} |P_i - \bar{P}|}{s} \quad (3.1)$$

где је:

$P_i$  – остварена продуктивност

$\bar{P}$  – средња вредност остварене продуктивности

$s$  – стандардна девијација

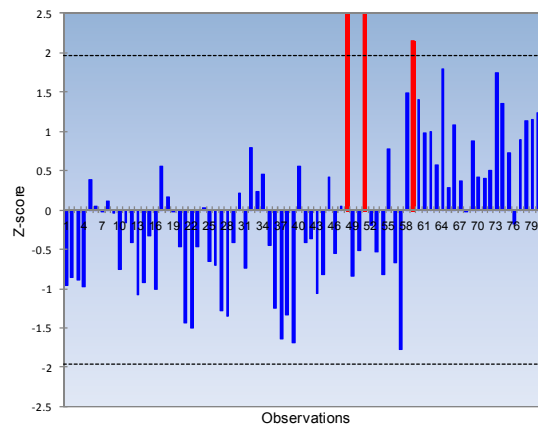
За двосмерни Грубсов тест, хипотеза да нема изузетних вредности се одбија на нивоу поверења  $\alpha$ , ако је  $G$  вредност према изразу (3.2):

$$G > \frac{N-1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{t_{\alpha/(2N), N-2}^2}{N-2 + t_{\alpha/(2N), N-2}^2}} \quad (3.2)$$

где  $t_{\alpha/(2N), N-2}$  означава горњу критичну вредност за  $t$  – расподелу са  $N - 2$  степени слободе на нивоу поверења  $\alpha/(2N)$ .

За узорак МК, где је  $N=81$ , на нивоу поверења 95%, добијена је критична вредност  $G=3.311$ . На слици 3.1 црвеном бојом приказане су три вредности које представљају изузетке. То су остварене продуктивности: 45.01; 41.01 и 38.22 m<sup>3</sup>/h, и оне су веће од горње границе према тесту. Продуктивности од 45.01 и 41.01 m<sup>3</sup>/h остварене су при бетонирању контра плоче на градилишту 8 (КС) где су количине за извршење биле 859 и 624 m<sup>3</sup>. Ово су и највеће количине бетона извршене у једном потезу у узорку. Због врсте бетонирања (контра плоча) и велике количине за уграђивање, истовремено је вршен истовар по два миксера, тако да је омогућена већа брзина пумпања бетона и уједно је постигнута и већа продуктивност. За трећи изузетак, остварена је продуктивност од 38.22 m<sup>3</sup>/h при бетонирању плоче изнад подрума на истом

градилишту. Претпоставља се да је овде утицај на већу продуктивност имала знатно боља организација у односу на сва остала бетонирања из узорка.



Слика 3.1 – Изузетне вредности (outliers) – узорак МК

После елиминисања изузетака узорак се смањило на величину од 78 елемената. За овакав узорак урађена је дескриптивна статистика (табела 3.9) где се види да је средња вредност остварене продуктивности  $21.76 \text{ m}^3/\text{h}$ , са стандардном девијацијом  $6.36 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Табела 3.9. Дескриптивна статистика  
за узорак МК без изузетака

Statistic	Ostvarena produktivnost - $P_{ostv}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
No. of observations	78
No. of missing values	0
Sum of weights	78
Minimum	9.541
Maximum	35.639
Range	26.098
1st Quartile	16.622
Median	21.757
3rd Quartile	26.099
Sum	1697.353
Mean	21.761
Variance (n)	40.402
Variance (n-1)	40.927
Standard deviation (n)	6.356
Standard deviation (n-1)	6.397
Variation coefficient	0.292

Коефицијент варијације (*variation coefficient*) износи 0.292 (29.2%) што указује на то да се узорак може употребити као репрезентативан. Постоји правило да уколико је вредност коефицијента варијације мања од 30% узорак се може сматрати хомогеним а аритметичка средина репрезентативном централном вредношћу (Флашар и други, 1985.).

Извршено је испитивање слагања емпиријске расподеле вероватноћа остварене продуктивности са теоријским кривама (табела 3.10) и на основу  $p$ -вредности ( $p$ -value) добијена је најбоља представа помоћу *Weibull*

(3) расподеле вероватноћа. Функција *Weibull* (3) расподеле дата је изразом:

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-c}{b}\right)^a\right\}, \quad x > c \quad (3.3)$$

где је:

$a$  ( $a > 0$ )– параметар облика,

$b$  ( $b > 0$ )– параметар скалирања,

$c$  ( $c \in R$ )– параметар локације

Тестирана је нулта хипотеза: разматрана емпиријска расподела има одлике *Weibull (3)* расподеле и алтернативна хипотеза: разматрана емпиријска расподела нема одлике *Weibull (3)*. На основу теста *Колмогоров-Смирнов-а* (табела 3.11), пошто је  $p$ -вредност 0.955 далеко већа од  $\alpha=0.05$ , прихвата се нулта хипотеза на нивоу поверења 95%. Ризик за одбијање нулте хипотезе ако је тачна износи 95.48%. У табели 3.12 дати су параметри *Weibull (3)* расподеле за остварену продуктивност.

Табела 3.10 Теоријске расподеле вероватноћа за остварену продуктивност

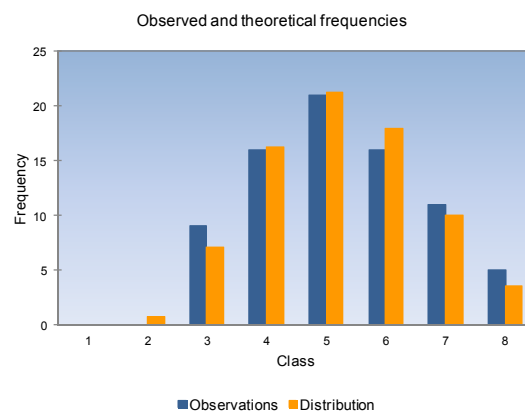
Табела 3.11 Тестирање слагања емпиријске и теоријске *Weibull (3)* расподеле

Табела 3.12 Параметри *Weibull (3)* расподеле вероватноћа

Distribution	p-value
Beta4	0.907
Chi-square	0.824
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.076
Gamma (1)	0.120
Gamma (2)	0.767
GEV	0.897
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.636
Logistic	0.774
Normal	0.777
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.753
<b>Weibull (3)</b>	<b>0.955</b>

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.057
p-value	0.955
alpha	0.05

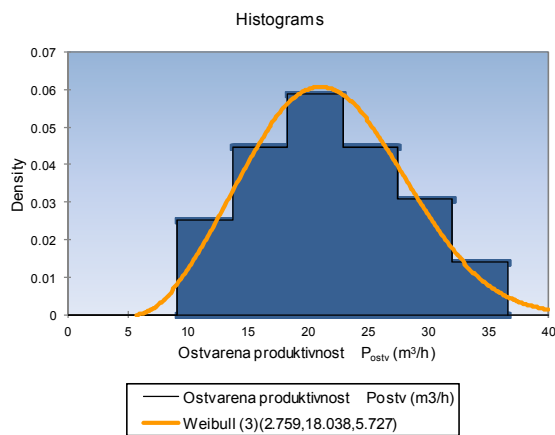
Parameter	Value	Standard error
a	2.759	0.210
b	18.038	0.206
c	5.727	0.692



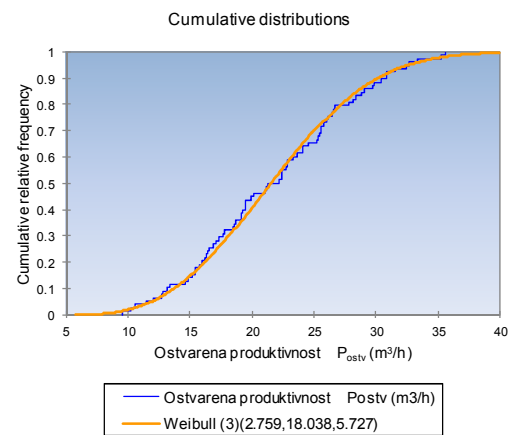
Слика 3.2 – Фреквенције остварене продуктивности и теоретских вредности *Weibull (3)* расподеле вероватноћа

На сликама 3.2 – 3.4 приказано је слагање емпиријских и теоријских вредности остварене продуктивности.





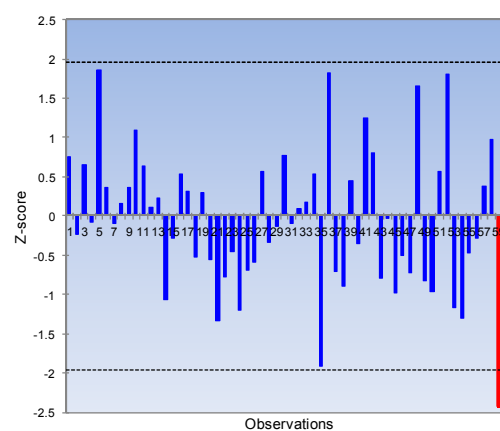
Слика 3.3 – Хистограм расподеле вероватноћа остварене продуктивности и теоријских вредности Weibull (3) расподеле



Слика 3.4 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене продуктивности

### 3.2.2 Статистичка анализа - узорак SZ

Тестирање на присуство изузетних вредности помоћу Грубсовог теста показало је да у узорку SZ постоје две изузетне вредности са оствареним продуктивностима: 2.43 и 16.02 m<sup>3</sup>/h. Најмања продуктивност у целом узорку од 2.43 m<sup>3</sup>/h остварена је на градилишту 5 (L5) при бетонирању стубова и зидова на VI спрату, због лошег квалитета бетона који је враћен па је дошло до дужег чекања на довоз нове количине. Највећа продуктивност од 16.02 m<sup>3</sup>/h, остварена је на градилишту 8 (КС), при бетонирању стубова и зидова у подруму. Ова вредност је изузетак јер је, уграђивање бетона у зидове који имају знатно већу дебљину од осталих из узорка, било могуће већом брзином, па је и остварена већа продуктивност.



Слика 3.5 – Изузетне вредности (outliers) – узорак SZ

После елиминисања изузетака узорак се смањио на величину од 58 бетонирања. За овакав узорак урађена је дескриптивна статистика (табела 3.13) где се види да је средња вредност остварене продуктивности  $7.88 \text{ m}^3/\text{h}$ , са стандардном девијацијом  $3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Коефицијент варијације (*variation coefficient*) у овом узорку износи 0.241 (24.1%) што, такође указује на то да је узорак репрезентативан.

Извршено је испитивање слагања емпиријске расподеле вероватноћа остварене продуктивности са теоријским кривама (табела 3.14) и на основу  $p$ -вредности ( $p$ -value) добијена је најбоља представа помоћу *Gamma (2)* расподеле вероватноћа. Функција *Gamma (2)* расподеле дата је изразом (3.4):

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \gamma\left(a, \frac{x}{b}\right), \quad x \geq 0 \quad (3.4)$$

где је:

$a$  ( $a > 0$ ) – параметар облика,

$b$  ( $b > 0$ ) – параметар скалирања,

$\Gamma$  – Гама функција,

$\gamma$  – непотпуна Гама функција.

Табела 3.13 Дескриптивна статистика за узорак *SZ* без изузетних вредности

Табела 3.14 Теоријске расподеле вероватноћа за остварену продуктивност

Табела 3.15 Тест слагања емпиријске и теоријске *Gamma (2)* расподеле

Табела 3.16 Параметри *Gamma (2)* расподеле вероватноћа

Statistic	Ostvarena produktivnost $P_{ostv}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
No. of observations	58
No. of missing values	0
Sum of weights	58
Minimum	3.591
Maximum	12.150
Range	8.558
1st Quartile	6.422
Median	7.715
3rd Quartile	9.144
Sum	457.139
Mean	7.882
Variance (n)	3.598
Variance (n-1)	3.662
Standard deviation (n)	1.897
Standard deviation (n-1)	1.914
Variation coefficient	0.241
Harmonic mean	7.409

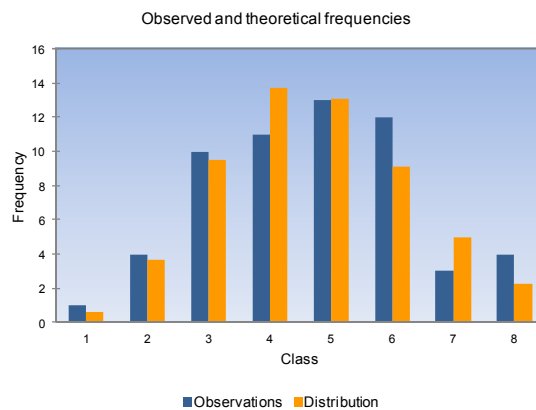
Distribution	p-value
Beta4	0.353
Chi-square	0.004
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.400
Gamma (1)	0.308
<b>Gamma (2)</b>	<b>0.998</b>
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.969
Logistic	0.969
Normal	0.981
Normal (Standard	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.988
Weibull (3)	0.996

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.050
p-value	0.998
alpha	0.05

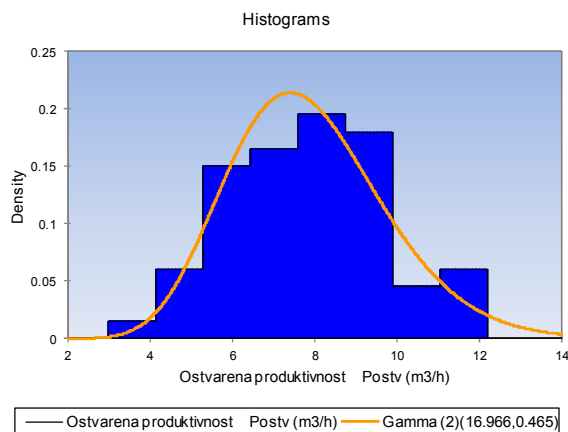
Parameter	Value
a	16.966
b	0.465

Тестирана је нулта хипотеза: разматрана емпиријска расподела има одлике  $\text{Gamma}(2)$  расподеле и алтернативна хипотеза: разматрана емпиријска расподела нема одлике  $\text{Gamma}(2)$ . На основу теста *Колмогоров-Смирнов-а* (табела 3.15), пошто је  $p$  - вредност 0.998 далеко већа од  $\alpha=0.05$ , прихвата се нулта хипотеза на нивоу поверења 95%. Ризик за одбијање нулте хипотезе ако је тачна износи 99.81%. У табели 3.16 дати су параметри  $\text{Gamma}(2)$  расподеле за остварену продуктивност.

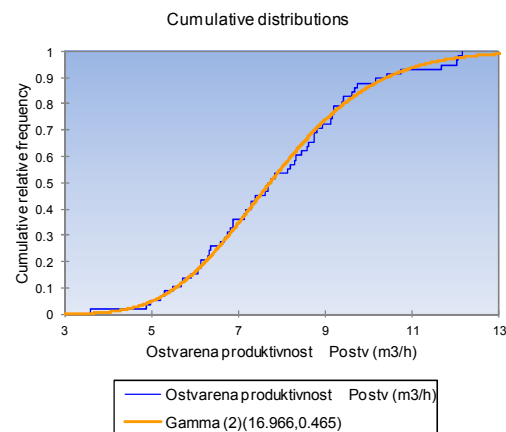
На сликама 3.6 – 3.8 приказано је слагање емпиријских и теоретских вредности остварене продуктивности.



Слика 3.6 – Фреквенције остварене продуктивности и теоријских вредности  $\text{Gamma}(2)$  расподеле



Слика 3.7 – Хистограм расподеле вероватноћа остварене продуктивности и теоријских вредности  $\text{Gamma}(2)$  расподеле



Слика 3.8 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене продуктивности

## **4. РЕГРЕСИОНИ МОДЕЛИ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА**

### **4.1 Увод**

Израда регресионих модела за предвиђање продуктивности подразумева сагледавање и анализу свих фактора који имају утицај, како позитиван, тако и негативан. Јасно је да постоји веома велики број утицајних фактора, али свакако, немају сви подједнак значај у предвиђању и треба уочити и издвојити оне најзначајније. Регресиона анализа омогућава издвајање свих параметара који имају, како позитиван, тако и негативан утицај на остварење продуктивности. Факторе који су имали позитиван утицај на продуктивност треба потенцирати и искористити, а оне који су имали негативно деловање на остварење продуктивности рада, треба елиминисати, контролисати или открити могућности преусмеравања њиховог дејстава у позитивном смеру утицаја. Познавањем свих фактора који утичу на продуктивност, омогућују се тачније процене рокова и трошкова пројекта.

Без обзира на то што је сваки пројекат уникат и што параметри који имају утицај на продуктивности могу да варирају, неке сличности ипак постоје, тако да научене лекције у превазилажењу проблема на једном пројекту могу бити корисно средство за побољшање продуктивности на другом пројекту.

Сарадња између извођача радова и фабрике бетона мора бити у сагласности са условима уграђивања бетона због чега треба извршити добро планирање и синхронизацију. Међутим, извођач мора наручити довољну количину бетона, довољно дуго пре уграђивања, како би се обезбедило циљ постизања максималне продуктивности на градилишту, са једне стране, док са друге стране, бетонска база покушава да испоручи бетон за више пројеката у исто време и повећа своју продуктивност. Ово балансирање између две стране није увек лако оствариво због

природе бетона, усклађености учинка базе и учинка пумпе, ограниченог броја миксера, различитих запремина миксера и др.

Лоше управљање процесом испоруке и коришћења бетона могло би довести до прекорачења рока његове употребљивости, недовољне искоришћености постројења, механизације и радне снаге, а самим тим и до додатних трошкова.

Фактори који имају утицај на продуктивност процеса бетонирања могу се поделити на три групе у зависности од места деловања: фактори који делују на процес справљања бетона (место бетонске базе), фактори који имају утицај на транспорт (транспортна даљина од базе до градилишта) и фактори утицаја на уграђивање (градилиште).

## 4.2 Уопште о регресионој анализи

Односи међу појавама могу бити детерминистички (функционални, егзактни) и стохастички (статистички). Док је код детерминистичких односа излаз тачно дефинисан функцијом улазних података (једној вредности независне променљиве одговара само једна, тачно одређена вредност зависне променљиве), код стохастичких односа постоји одређена случајност (једној вредности независне променљиве одговара низ могућих вредности зависне променљиве). У пракси је далеко већи број појава у којима владају стохастички односи. Једна од метода коју је могуће применити за анализу података стохастичких процеса је вишеструка (мултипла) регресија. Ова метода је погодна у случајевима када треба решавати проблем где постоји једна зависна и више независних променљивих. Ако је веза између података линеарна, случај се своди на вишеструки линеарни модел.

Основни облик вишеструког линеарног регресионог модела дат је једначином (4.1):

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

где је:

$Y$  - зависна променљива

$X_1, X_2, \dots, X_p$  - независне променљиве

$b_0, b_1, \dots, b_p$  - регресиони коефицијенти

$\varepsilon_i$  – случајна грешка

Задатак регресионе анализе је утврђивање облика везе (зависности) између посматраних појава, што се постиже израдом одговарајућег регресионог модела. До овог циља се долази у неколико корака:

- Испитивање постојања везе између независних променљивих и зависне променљиве;
- Одређивање јачине везе (који део варијабилитета зависне променљиве може бити објашњен независним варијаблама);
- Одређивање математичке форме те везе (формирање модела);
- Предвиђање зависне променљиве на основу добијеног модела.

На основу претходног, може се укратко рећи да регресиона анализа, у практичним истраживањима, омогућава опис, предвиђање и контролисање зависне променљиве на основу једне или више независних променљивих.

Да би била могућа примена вишеструке линеарне регресионе анализе на одређеном скупу података морају бити испуњене одређене претпоставке:

- Облик зависности између свих променљивих је линеаран, поготово је важно за однос независних променљивих са зависном променљивом;
- Нормалност (случајне грешке  $\varepsilon_i$  имају нормалну расподелу);
- Хомоскедастичност (све случајне грешке имају једнаке варијансе);
- Нема аутокорејације (не постоји линеарна веза између било која два члана  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$ );
- Број података у узорку мора бити најмање три пута већи од броја променљивих (у супротном би регресиони коефицијенти били непоуздани);
- Мултиколинеарност између променљивих не постоји.

За добијање регресионог модела најчешће је коришћена метода најмањих квадрата која се заснива на минимизирању квадрата одступања свих емпиријских тачака од регресионе линије. Постоји неколико начина за укључивање променљивих у модел мултипле регресије:

- *Enter* – стандардна регресија (симултана) – уводе се све променљиве одједном;
- *Хијерархијска регресија* – на основу теоријског модела унапред одређен редослед уноса променљивих једна по једна или по блоковима;

- *Stepwise* регресија (корак по корак) – редослед уноса променљивих на основу статистичког критеријума (*F-test*);
- *Forward* – унос променљивих једна по једна;
- *Backward* – уносе се све променљиве у почетни модел, а затим се једна по једна избацују променљиве које имају најмањи допринос моделу;
- *Stepwise selection* – комбинација претходне две процедуре.

После израде модела треба извршити оцену његовог квалитета и репрезентативности у описивању зависности између разматраних појава. У ту сврху користи се анализа варијансе (*Analysis of Variance - ANOVA*) која, као моћан алат за анализу квалитета модела, израчунава мере репрезентативности као што су: коефицијент корелације (*multiple R*), коефицијент детерминације -  $R^2$  (*R Square*), стандардна девијација регресије (*Standard Error*) и F-тест (*F ratio*).

### 4.3 Израда регресионих модела за узорак МК

#### 4.3.1 Регресиона анализа

У овом раду предлаже се израда регресионог модела који ће служити за прогнозирање продуктивности, на основу које се једноставно може израчунати трајање бетонирања и модела који ће директно служити за прогнозирање трајања бетонирања. Упоредном анализом оба модела биће указано на предности и недостатке сваког од њих и предложен бољи за примену.

Како су продуктивност и време у обрнуто пропорционалној вези, уколико је позната вредност једне варијабле, могуће је једноставно израчунавање друге на основу израза (4.2):

$$P = \frac{Q}{T} \quad (m^3/h) \quad (4.2)$$

где је:

$P$  – продуктивност процеса бетонирања ( $m^3/h$ ),

$Q$  – количина бетона ( $m^3$ ),

$T$  – трајање бетонирања (h).

За потребе овог рада, најпре су предложени утицајни фактори, а затим је спроведена регресиона анализа и формиран су одговарајући модели. На основу прикупљених података и стеченог искуства на градилиштима, предложене су следеће варијабле (зависне и независне променљиве) за регресиону анализу на основу узорка *МК*:

*A* – зависне варијабле:

1. Продуктивност процеса бетонирања –  $P(MK)$  ( $m^3/h$ )

Представља количину уграђеног бетона у плочу у току једног часа рада; израчунава се као количник између укупне количине уграђеног бетона и укупног потребног времена. Укупно потребно време укључује време чистог рада заједно са свим чекањима и застојима.

2. Трајање бетонирања –  $T(MK)$  (h)

Представља време потребно за уграђивање потребне количине бетона у плочу, мерено од почетка до завршетка бетонирања. За почетак бетонирања узето је време почетка истовара првог миксера, а за завршетак бетонирања време завршетка обраде горње површине плоче.

*B1* – независне квантитативне варијабле:

1. Количина бетона –  $Q$  ( $m^3$ )

Количина која је дата предмером радова. Често се дешава да срачуната вредност у предмеру радова није или не може бити прецизна због чега се наручује приближна количина, а онда на крају допуна на основу процене или премеравањем и израчунавањем преостале потребне количине. Због тога се јавља чекање последњег миксера и продужење трајања радова. Немогућност израчунавања прецизне количине бетона за уграђивање у плоче може се објаснити тиме што одређена количина бетона улази у шупљине ферт пуниоца, а код пуних плоча веће површине, уколико се не постигне прецизна захтевана дебљина, долази до потребе за већом или мањом количином бетона.

2. Потребан укупан број миксера –  $B_{mi}$  (комада)

Укупан број миксера који допрема укупну количину бетона. Добија се на основу расположивости миксера и њихових капацитета и укупне количине бетона.

3. Број миксера у циклусу –  $B_{mc}$  (комада/циклус)



Пошто је процес цикличне природе иста возила долазе на градилиште одређен број пута (у циклусима). Број возила у једном циклусу зависи од учинка базе, транспортне даљине до градилишта, капацитета миксера. Треба одредити оптималан број возила тако да увек има довољних количина бетона на градилишту, али и да се чекање миксера сведе на најмању меру.

4. Просечна количина бетона по миксеру –  $Q_{pr.m}$  ( $m^3$ /миксеру)

Због различитих капацитета миксера, просечна количина бетона по миксеру представља количник између укупне количине и укупног броја миксера.

5. Број радника –  $B_r$  (број)

Број радника ангажованих на бетонирању. Код бетонирања плоча пумпом уобичајено је да се радна бригада састоји од 7 до 9 радника. Два радника су потребана за држање и усмеравање црева пумпе, обично један или два радника врше уграђивање первибратором (у зависности од броја первибратора), два до три радника раде на разастирању бетона и један до два на равнању и обради горње површине плоче. У посебним условима када је домет пумпе недовољан, па је црево ослоњено на ногаре, скеле или се помоћу коруба врши решавање тог проблема, може бити потребан и већи број радника.

6. Теоретски учинак пумпе –  $U_{t,p}$  ( $m^3/h$ )

Због учешћа неколико различитих пумпи, потребно је увести овај фактор. Предлаже се теоретски учинак којим ће бити исказана способност пумпе.

7. Старост пумпе –  $SP$  (година)

Представља број година од производње пумпе до тренутка употребе. Са повећањем старости механизације, повећава се истрошеност и дотрајалост делова, па је машина подложнија кваровима и постизању мањег учинка.

8. Домет пумпе –  $DP$  (m)

Дометом пумпе је исказана дужина стреле (4 или 5 секција) заједно са гуменим цревом на крају. Повећање домета је могуће додавањем наставака који су исти као црево на крају и имају дужине 4 до 5 m.

9. Премештање пумпе –  $PP$  (број)

У зависности од домета пумпе, димензија објекта, висине на којој се врши бетонирање, приступачности за прилаз пумпе до објекта, некада је потребно у

току бетонирања извршити постављање пумпе у више положаја. Број премештања је означен са 0 ако се бетонирање врши из само једног (почетног) положаја пумпе, са 1 уколико постоји једно премештање пумпе (два положаја) и 2 ако се пумпа два пута премешта (има три положаја).

10. Висина на којој се врши бетонирање –  $V$  (m)

Представља висину објекта у тренутку бетонирања плоче; преузете висине су из пројеката.

11. Дебљина плоче –  $dp$  (m)

Код плоча је дата дебљина плоче, а код плоча које садрже и греде са већом висином дата је просечна дебљина срачуната на основу процентуалног површинског учешћа.

12. Удаљеност бетонске базе од градилишта –  $L_{b-g}$  (km)

Растојање од бетонске базе до градилишта изражено у километрима.

13. Учинак бетонске базе –  $U_{pr,b}$  ( $m^3/h$ )

На основу трајања циклуса и запремине мешалица израчунати су практични учинци база.

$V_2$  – независне квалитативне варијабле:

14. Тип плоче –  $TP$

У разматраном узорку јављају се пуне АБ плоче, АБ плоче заједно са гредама и „ферт“ међуспратне конструкције. Подела је извршена на две групе: само плоче означене са  $P$  и другу групу чине плоче које садрже греде и „ферт“ међуспратне конструкције у ознаци  $PG$ .

15. Распоживот бетонске базе –  $RasB$

Уколико база у исто време испоручује бетон за већи број градилишта или врши справљање бетона за своје потребе (нпр. производња монтажних елемената, и др.) то може довести до чекања на бетон. Према редоследу отпремница може се закључити да ли је снабдевање само разматраног градилишта (означено је са 0), или снабдевање трећих лица (означено је са 1).

Претпоставља се линеарни однос између варијабли: међусобно између свих независних и између независних са зависним. Број података у узорку (величина узорка) је  $N=78$  а број независних варијабли узетих у почетно разматрање је 15, тако да је испуњен услов

о потребном броју података. У даљем раду спроведена је корелациона анализа и израђени регресиони модели за прогнозирање продуктивности (модел *RegModel P(MK)*) и прогнозирање трајања бетонирања плоча (модел *RegModelT(MK)*) са истим почетним улазним варијаблама .

#### 4.3.2 Модел за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања армиранобетонских плоча – модел *RegModel P(MK)*

Најпре је извршена корелациона анализа: одређен је Пирсонов (*Pearson*) коефицијент корелације између свих парова независних варијабли. У табели 4.1, која представља корелациону матрицу може се уочити да постоји јака корелациона веза (коэф. корелације: 0,994), према *Chadock-ovoj* скали (табела 4.2), између варијабли: количина бетона -  $Q$  и укупан број миксера -  $B_{mi}$ . У оваквим случајевима, уколико се употребе обе независне варијабле за израду модела, јавља се проблем мултиколинеарности која доприноси да оцене регресионих коефицијената буду непрецизне и нестабилне, а грешке параметара буду високе. Мултиколинеарности се може потврдити и на основу слике 4.1 која указује на постојање јаке корелационе везе између ових варијабли, на основу коефицијента детерминације:  $R^2=0,987$ , тачке су уско поређане око праве. У циљу избегавања овог проблема треба још на почетку елиминисати једну од ових двеју варијабли, тако да је у даљем раду изостављена варијабла: укупан број миксера -  $B_{mi}$ .

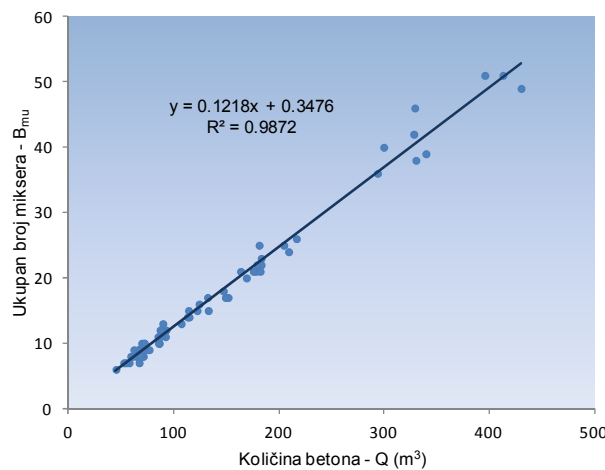
За формирање модела за прогнозирање продуктивности примењена је *backward* метода (корак по корак уназад), где су у првом кораку у регресиону анализу уведене све варијабле. После анализе варијансе (*ANOVA*) може се уочити да не постоји проблем мултиколинеарности (табела 4.3) на основу фактора пораста варијансе — *VIF* (*Variance Inflation Factor*), где важи правило да уколико је  $VIF > 10$  онда постоји проблем мултиколинеарности. Како је у табели *VIF* свих варијабли мањи од 10, анализа је настављена. После првог корака *backward* регресијом добијени су параметри модела за прогнозирање продуктивности (табела 4.4). На основу  $P_r$  вредности и параметра  $t$ , може се закључити да поједине варијабле нису статистички значајне (уколико је  $P_r > 0,05$  и  $|t| < t_{kr}$ ) и треба их елиминисати из даљег разматрања. За узорак величине:  $N=78$ , број варијабли:  $p=14$  и број степени слободе (*Degrees of freedom*),  $DF=n-p-1=63$ , из таблица Студентовог распореда,  $t_{kr}=2,00$  (Статистичке таблице [www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika](http://www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika)).

Табела 4.1 Корелациона матрица између свих варијабли

Var.	dp	V	Br	Bmc	Bmu	Qpr.m	Ut.p	SP	DP	PP	Upr.b	Lb-g	RasB	Q	TP-P	TP-PG
dp	1.000															
V	-0.568	1.000														
Br	-0.217	0.192	1.000													
Bmc	-0.006	0.066	0.030	1.000												
Bmu	0.361	-0.131	-0.019	0.359	1.000											
Qpr.m	0.058	0.167	-0.156	-0.115	0.085	1.000										
Ut.p	-0.396	0.292	0.119	0.175	-0.163	-0.068	1.000									
SP	0.158	-0.252	-0.143	-0.035	0.045	0.031	-0.650	1.000								
DP	-0.441	0.324	0.037	0.227	-0.020	0.140	0.843	-0.423	1.000							
PP	0.006	0.182	0.089	0.200	0.511	0.186	-0.024	-0.076	0.089	1.000						
Upr.b	0.028	-0.199	0.034	0.131	0.356	-0.068	-0.162	0.016	-0.037	0.153	1.000					
Lb-g	0.040	-0.111	-0.101	-0.206	-0.224	0.056	0.046	0.053	0.066	-0.095	-0.603	1.000				
RasB	-0.073	0.028	0.003	-0.191	-0.025	-0.176	-0.122	0.136	-0.108	-0.036	-0.074	0.066	1.000			
Q	0.359	-0.123	-0.028	0.353	0.994	0.175	-0.149	0.033	0.010	0.525	0.345	-0.214	-0.051	1.000		
TP-P	0.194	0.002	-0.103	0.093	0.485	0.158	0.021	0.016	0.119	0.155	-0.086	0.182	-0.015	0.491	1.000	
TP-PG	-0.194	-0.002	0.103	-0.093	-0.485	-0.158	-0.021	-0.016	-0.119	-0.155	0.086	-0.182	0.015	-0.491	-1.000	1.000
P(MK)ostv	-0.076	0.068	0.064	0.445	0.493	0.175	0.189	-0.269	0.256	0.083	0.389	-0.488	-0.425	0.508	0.405	-0.405

Табела 4.2 Chadock-ova скала за процену репрезентативности регресионе зависности

Коеф. детерминације R <sup>2</sup>	Коеф. корелације  r	Јачина везе
0	0	нема везе
0-0,25	0-0,5	слаба
0,25-0,64	0,5-0,8	средње јака
0,64-1	0,8-1	чврста
1	1	потпуна



Слика 4.1 – Корелација између укупног броја миксера и укупне количине бетона

Табела 4.3 Фактор пораста варијансе - VIF

Statistic	Q	dp	V	Br	Bmc	Qpr.m	Ut.p	SP	DP	PP	Upr.b	Lb-g	RasB	TP-P	TP-PG
Tolerance	0.321	0.430	0.467	0.878	0.694	0.675	0.122	0.438	0.160	0.619	0.413	0.482	0.867	0.608	0.608
VIF	3.112	2.326	2.139	1.138	1.442	1.482	8.205	2.285	6.265	1.615	2.423	2.074	1.154	1.644	1.644

Табела 4.4 Параметри модела RegModel P(MK) (први корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	21.684	6.643	3.264	0.002	8.421	34.946
Q	0.026	0.005	4.840	< 0.0001	0.015	0.036
dp	-19.106	3.084	-6.195	< 0.0001	-25.264	-12.949
V	-0.122	0.041	-2.983	0.004	-0.203	-0.040
Br	0.000	0.000				
Bmc	1.404	0.337	4.172	< 0.0001	0.732	2.076
Qpr.m	1.763	0.583	3.026	0.004	0.600	2.926
Ut,p	-0.038	0.022	-1.704	0.093	-0.082	0.006
SP	-0.719	0.152	-4.727	< 0.0001	-1.023	-0.415
DP	0.000	0.000				
PP	-3.071	0.621	-4.942	< 0.0001	-4.311	-1.830
Upr,b	0.000	0.000				
Lb-g	-0.422	0.051	-8.340	< 0.0001	-0.524	-0.321
RasB	-4.511	0.707	-6.376	< 0.0001	-5.923	-3.098
TP-P	4.854	0.736	6.591	< 0.0001	3.384	6.324
TP-PG	0.000	0.000				

Варијабле које нису статистички значајне (осенчене у табели 4.4) су: број радника, домет пумпе, практични учинак базе и тип плоче – *PG*, док теоретски учинак пумпе има недовољан значај пошто је  $|t| = 1,704 < t_{kr}$ .

Претпоставља се да варијабла број радника нема утицаја због тога што је увек радна бригада била формирана са одговарајућим, довољним бројем радника за процес, тј. нису се јављали застоји и смањење продуктивности из тих разлога. Варијабла домет пумпе није статистички значајна из разлога што је немогућност дохвата појединих делова плоча решавана адекватним премештањем пумпе или формирањем наставака помоћу гумених црева или коруба што није додатно значајно утицало на продуктивност. Такође, практични учинак базе и тип плоче са гредама нису имали утицаја на промену продуктивности.

После елиминације наведених варијабли, спроведен је други корак анализе и добијен коначни облик регресионог модела за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања плоча. У табели 4.5 (све варијабле су статистички значајне:  $P_r < 0,05$ ) дати су регресиони коефицијенти (*value*), а математички облик модела формулом (4.3).

Табела 4.5 Параметри модела RegModel P(MK) (коначан модел)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	14.533	5.223	2.783	0.007	4.109	24.957
dp	-17.307	2.939	-5.890	< 0.0001	-23.172	-11.441
V	-0.118	0.041	-2.855	0.006	-0.201	-0.036
Bmc	1.255	0.330	3.808	0.000	0.597	1.913
Qpr.m	1.764	0.591	2.985	0.004	0.584	2.943
SP	-0.548	0.116	-4.729	< 0.0001	-0.779	-0.317
PP	-2.998	0.629	-4.769	< 0.0001	-4.253	-1.743
Lb-g	-0.432	0.051	-8.451	< 0.0001	-0.534	-0.330
RasB	-4.453	0.717	-6.213	< 0.0001	-5.883	-3.022
Q	0.026	0.005	4.957	< 0.0001	0.016	0.037
TP-P	4.675	0.739	6.324	< 0.0001	3.199	6.150

Коначан модел има десет независних променљивих и гласи:

$$P(MK)_{prog} = 14.533 - 17.307dp - 0.118V + 1.255B_{mc} + 1.764Q_{pr.m} - 0.548SP - 2.998PP - 0.432L_{b-g} - 4.453RasB + 0.026Q + 4.675TP.P \quad (4.3)$$

$(m^3/h)$

где је:

$P(MK)_{prog}$  – прогнозирана продуктивност ( $m^3/h$ ),

$dp$  – дебљина плоче (m),

$V$  – висина на којој се врши бетонирање (m),

$B_{mc}$  – број миксера у циклусу,

$Q_{pr.m}$  – просечна количина бетона по миксеру ( $m^3/miks$ ),

$SP$  – старост пумпе (год),

$PP$  – премештање пумпе (број),

$L_{b-g}$  – удаљеност бетонске базе од градилишта (km),

$RasB$  – расположивост базе,

$Q$  – количина бетона за уграђивање ( $m^3$ ),

$TP.P$  – тип плоче (пуна АБ плоча).

Променљиве које имају позитивне регресионе коефицијенте утичу на повећање продуктивности и то су: број миксера у циклусу, просечна количина бетона по миксеру, количина бетона и тип плоче -  $P$ . Већи број миксера у циклусу утиче на бољу снабдевеност градилишта бетоном (нема или је мање чекање пумпе), па је остварива већа количина уграђивања. Исто тако, веће количине бетона по миксеру утичу на мање губитке времена потребног за позиционирање миксера у положај за истовар, као и прање левка после истовара.

Уграђивање бетона у плоче једнаке дебљине (тип плоче -  $P$ ) захтева мање времена у односу на плоче са ребрима и гредама, где су сложенији и теже приступачни пресеци, па је продуктивност већа. Ово су и очекивани резултати, међутим показало се да повећање количине за уграђивање повећава и продуктивност: сваких  $10 \text{ m}^3$  бетона утиче на повећање продуктивности за  $0,26 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Остале променљиве имају негативан утицај, тј. утичу на смањење продуктивности. Разумљиво је да се са порастом висине на којој се врши уграђивање смањује постигнута продуктивност, као и да старост пумпе, њено премештање и уколико база опслужује и друга градилишта долази до застоја и смањења продуктивности.

На основу добијеног модела (4.3), може се закључити да значајнији утицај на промену продуктивности имају варијабле: дебљина плоче, премештање пумпе, расположивост базе и тип плоче. Уколико се све остале варијабле држе константним, а дебљина плоче повећа за  $10 \text{ cm}$ , продуктивност опада за  $1,73 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ово није очекивани утицај, с обзиром на то да уграђивање бетона у елементе са већом количином бетона по јединици мере -  $\text{m}^3$ , требало би да има краће трајање па и већу продуктивност. Међутим, на ову појаву могло је да има утицаја то што плоче већих дебљина (већих од  $20 \text{ cm}$ ) нису бетонирани у слојевима од по  $15 \text{ cm}$ , како је предвиђено Нормативима и стандардима рада у грађевинарству, па је било потребно и дуже време за пуњење и вибрирање. Свако премештање пумпе смањује продуктивност за око  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , односно, уколико се врши бетонирање АБ пуне плоче без греда продуктивност је већа за око  $4,7 \text{ m}^3/\text{h}$ , ако база у исто време опслужује и друга градилишта продуктивност опада за  $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , итд.

Проверу квалитета овог модела могуће је извршити преко коефицијента детерминације  $R^2$  који износи  $0,857$  (табела 4.6) што значи да је  $85,7\%$  варијабилитета зависне променљиве  $P(MK)$  објашњено са предложених десет независних променљивих. Овај коефицијент има доста високу вредност што указује на добар квалитет модела. Већи коефицијент детерминације значи већу снагу модела у објашњавању регресионе функције и бољу предикцију зависне променљиве. У истој табели, вредност статистике *Durbin-Watson*,  $DW=1,733$  потврђује испуњен услов о непостојању аутокорељације. Вредност статистике  $DW$  креће се у границама  $0 - 4$  са средином  $2$ . Уколико је вредност

око 2 или мања од 2 то значи да не постоји линеарна веза између било која два члана  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$  (Mendenhall, 2011).

Табела 4.6 Оцена квалитета модела RegModel P(MK)

Observations	78.000
Sum of weights	78.000
DF	67.000
R <sup>2</sup>	0.857
Adjusted R <sup>2</sup>	0.836
MSE	6.706
RMSE	2.590
DW	1.733

Да би примена регресионе једначине била оправдана приликом прогнозирања, треба утврдити да ли су објашњавајуће променљиве значајне за понашање зависне променљиве. Тестира се нулта хипотеза да су сви коефицијенти независних варијабли (коефицијенти нагиба) једнаки нули и алтернативна хипотеза да су коефицијенти различити од нуле. Коефицијент нагиба може бити једнак нули само у случају када између појава не постоји никаква квантитативна веза или постоји нелинеарна функционална веза. За ово тестирање користи се  $F$  тест (4.4):

$$F = \frac{R^2(n - p - 1)}{(1 - R^2)p} \quad (4.4)$$

Уколико је  $F > F_{kr}$ , коефицијенти су различити од нуле, одбације се нулта хипотеза и прихвата алтернативна хипотеза. Из табеле за  $F$  - тест, на нивоу поверења 99%,  $F_{kr(0,01)} = 2,35$  ([www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika](http://www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika)) и пошто је  $F = 40,313$  (табела 4.7) веће од  $F_{kr}$ , може се закључити да је оправдана примена предложеног модела за прогнозирање продуктивности.

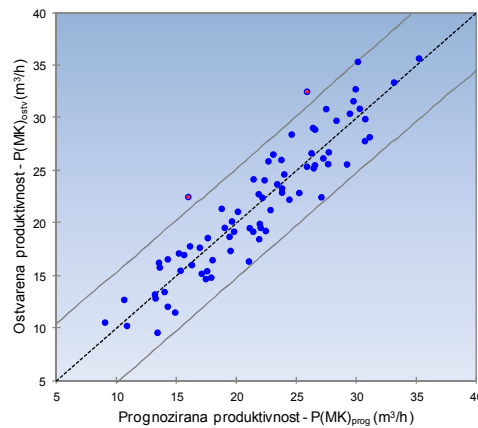
Табела 4.7 Оцена значајности модела RegModel P(MK)

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	10	2703.562	270.356	40.313	< 0.0001
Error	67	449.333	6.706		
Corrected Total	77	3152.896			

На дијаграму (слика 4.2) приказано је слагање остварених вредности продуктивности и прогнозираних вредности на основу предложеног модела. Дијаграм распршености показује да се већина тачака налази око праве 1:1 (*Fitted line*) у оквиру интервала

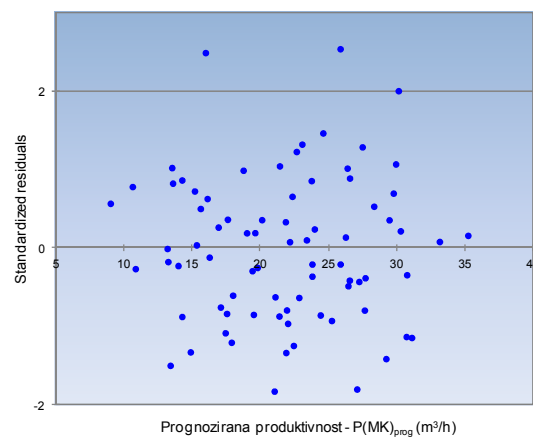


поверења од 95%. Може се уочити да су само три тачке ван или на граници што чини свега 3,8% од укупног броја тачака.



Слика 4.2 – Слагање остварене и прогнозиране продуктивности

Ако је тачна претпоставка да је варијанса константна, тада резидуали имају нормалну расподелу. За формираног модел стандардизовани резидуали прогнозиране продуктивности формирају случајан распоред, што потврђује дијаграм на слици 4.3.



Слика 4.3 – Стандардизовани резидуали модела *RegModel P(MK)*

#### 4.3.3 Модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања армиранобетонских плоча – модел *RegModel T(MK)*

На исти начин као и за модел за прогнозирање продуктивности (модел *RegModel P(MK)*), спроведена је анализа и израђен модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања плоча (модел *RegModel T(MK)*). *Backward* регресијом после три корака (табеле 4.8 – 4.10) елиминисањем варијабли које нису статистички значајне, добијен је

модел дат изразом (4.5). Како је поступак исти, као и коментари, даље су дати само резултати кроз табеле и графике.

Табела 4.8 Параметри модела RegModel T(МК) (први корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	1.810	2.283	0.793	0.431	-2.751	6.372
Q	0.034	0.002	19.611	< 0.0001	0.030	0.037
dp	6.151	1.026	5.996	< 0.0001	4.102	8.201
V	0.042	0.014	3.056	0.003	0.015	0.069
Br	0.000	0.000				
Bmc	-0.399	0.105	-3.788	0.000	-0.610	-0.189
Qpr.m	-0.377	0.196	-1.918	0.060	-0.769	0.016
Ut.p	0.027	0.013	2.109	0.039	0.001	0.053
SP	0.227	0.051	4.457	< 0.0001	0.125	0.328
DP	-0.115	0.058	-1.984	0.052	-0.231	0.001
PP	0.935	0.193	4.856	< 0.0001	0.551	1.320
Upr,b	-0.015	0.008	-2.043	0.045	-0.031	0.000
Lb-g	0.083	0.020	4.137	0.000	0.043	0.122
RasB	1.202	0.220	5.456	< 0.0001	0.762	1.643
TP-P	-1.039	0.229	-4.530	< 0.0001	-1.497	-0.581
TP-PG	0.000	0.000				

Табела 4.9 Параметри модела RegModel T(МК) (други корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	-0.301	0.991	-0.304	0.762	-2.279	1.677
dp	6.020	1.000	6.019	< 0.0001	4.023	8.016
V	0.029	0.014	2.037	0.046	0.001	0.057
Bmc	-0.331	0.106	-3.137	0.003	-0.542	-0.121
Ut.p	0.000	0.000				
SP	0.153	0.038	4.060	0.000	0.078	0.229
PP	0.888	0.206	4.310	< 0.0001	0.477	1.299
Upr,b	-0.021	0.008	-2.731	0.008	-0.036	-0.006
Lb-g	0.068	0.021	3.327	0.001	0.027	0.109
RasB	1.322	0.229	5.779	< 0.0001	0.865	1.779
Q	0.032	0.002	17.959	< 0.0001	0.029	0.036
TP-P	-1.045	0.244	-4.281	< 0.0001	-1.532	-0.558
TP-PG	0.000	0.000				

Табела 4.10 Параметри модела RegModel T(МК) (коначни модел)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	-0.301	0.991	-0.304	0.762	-2.279	1.677
dp	6.020	1.000	6.019	< 0.0001	4.023	8.016
V	0.029	0.014	2.037	0.046	0.001	0.057
Bmc	-0.331	0.106	-3.137	0.003	-0.542	-0.121
SP	0.153	0.038	4.060	0.000	0.078	0.229
PP	0.888	0.206	4.310	< 0.0001	0.477	1.299
Upr,b	-0.021	0.008	-2.731	0.008	-0.036	-0.006
Lb-g	0.068	0.021	3.327	0.001	0.027	0.109
RasB	1.322	0.229	5.779	< 0.0001	0.865	1.779
Q	0.032	0.002	17.959	< 0.0001	0.029	0.036
TP-P	-1.045	0.244	-4.281	< 0.0001	-1.532	-0.558

Табела 4.11 Оцена квалитета модела RegModel  $T(MK)$ 

Observations	78.000
Sum of weights	78.000
DF	67.000
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.943</b>
Adjusted R <sup>2</sup>	0.935
MSE	0.722
RMSE	0.850
<b>DW</b>	<b>2.166</b>

Коефицијент детерминације  $R^2$  износи 0,943 (табела 4.11) што значи да је 94,3% варијабилитета зависне променљиве  $T(MK)$  објашњено са предложених десет независних променљивих.

Табела 4.12 Оцена значајности модела RegModel  $T(MK)$ 

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	10	803.634	80.363	111.266	< 0.0001
Error	67	48.392	0.722		
Corrected Total	77	852.026			

Тестирање значајности регресионог модела дато је у табели 4.12. Статистика  $F$  теста показује оправданост примене предложеног модела за прогнозирање трајања бетонирања.

$$\begin{aligned}
 T(MK)_{prog} = & -0.301 + 6.02dp + 0.029V - 0.031B_{mc} + 0.153SP + 0.888PP \\
 & - 0.021U_{pr.b} + 0.068L_{b-g} + 1.322RasB + 0.032Q \\
 & - 1.045TP.P
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

где је:

$T(MK)_{prog}$  – прогнозирано трајање бетонирања (h),

$dp$  – дебљина плоче (m),

$V$  – висина на којој се врши бетонирање (m),

$B_{mc}$  – број миксера у циклусу,

$SP$  – старост пумпе (год),

$PP$  – премештање пумпе (број),

$L_{b-g}$  – удаљеност бетонске базе од градилишта (km),

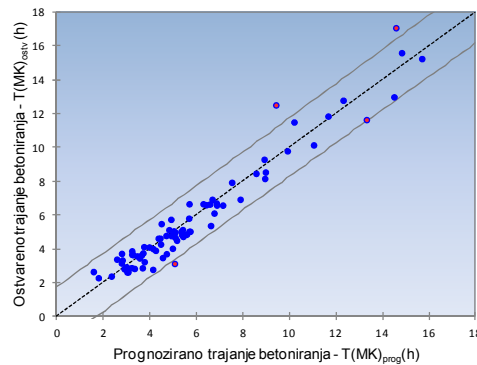
$U_{pr.b}$  – практични учинак бетонске базе ( $m^3/h$ ),

$RasB$  – расположивост базе,

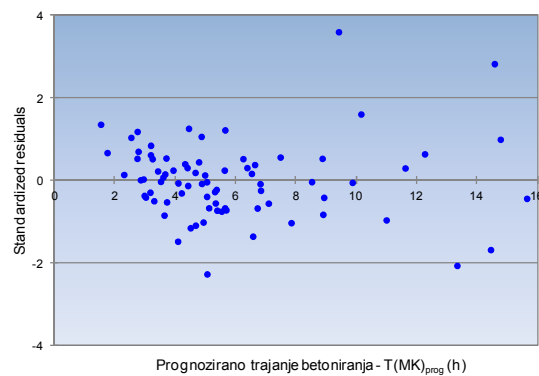
$Q$  – количина бетона за уграђивање ( $m^3$ ),

$TP.P$  – тип плоче (пуна АБ плоча).

На дијаграму (слика 4.4) приказано је слагање оствареног и прогнозираног трајања. Дијаграм распршености показује да се већина тачака налази око праве 1:1 (*Fitted line*) у оквиру интервала поверења од 95%. Може се уочити да су само четири тачке ван или на граници што чини свега 5,1% од укупног броја тачака.



Слика 4.4 – Слагање оствареног и прогнозираног трајања бетонирања



Слика 4.5 – Стандардизовани резидуали модела *RegModel T(MK)*

#### 4.3.4 Дискусија предложених модела

Предложени модели имају исти број статистички значајних независно променљивих са скоро истом њиховом комбинацијом. Разлика се односи само на варијабле: просечна количина бетона по миксеру  $Q_{pr.m}$  која се јавља код модела за прогнозирање продуктивности али не и код модела за прогнозирање трајања бетонирања. Варијабла практични учинак бетонске базе  $U_{pr.b}$  јавља се код модела *RegModel T(MK)*, а не јавља се код модела *RegModel P(MK)*. Коефицијенти детерминације  $R^2$  имају доста високе вредности што указује на квалитет модела. С обзиром на то да је нешто већа вредност овог коефицијента код модела *RegModel T(MK)*, што се види и на дијаграму на слици 4.4, може се говорити о бољој моћи предикције овог модела у односу на претходни.

Наиме, тачке на овом дијаграму распршености су много уже распоређене око регресионе линије, као и на основу статистике  $F$  - теста, где је  $F$  веће код модела *RegModel T(MK)* у односу на модел *RegModel P(MK)*. За оба модела извршена је оцена и на основу средње апсолутне грешке између остварених и прогнозираних вредности *MAPE* (*Mean Absolute Percentage Error*), на основу израза (4.6) и (4.7):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P(MK)_{ostv} - P(MK)_{prog}}{P(MK)_{ostv}} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (4.6)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T(MK)_{ostv} - T(MK)_{prog}}{T(MK)_{ostv}} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (4.7)$$

где је:

$N$  – број елемената у узорку,

$P(MK)_{ostv}$  – остварена продуктивност ( $m^3/h$ ),

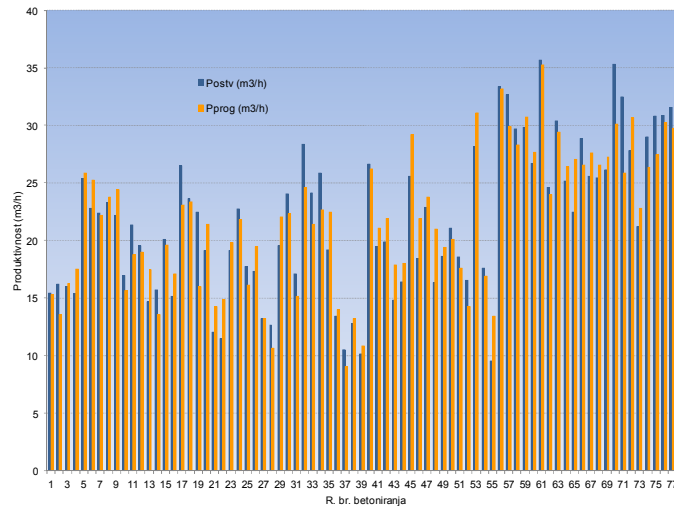
$P(MK)_{prog}$  – прогнозирана продуктивност ( $m^3/h$ ),

$T(MK)_{ostv}$  – остварено време бетонирања (h),

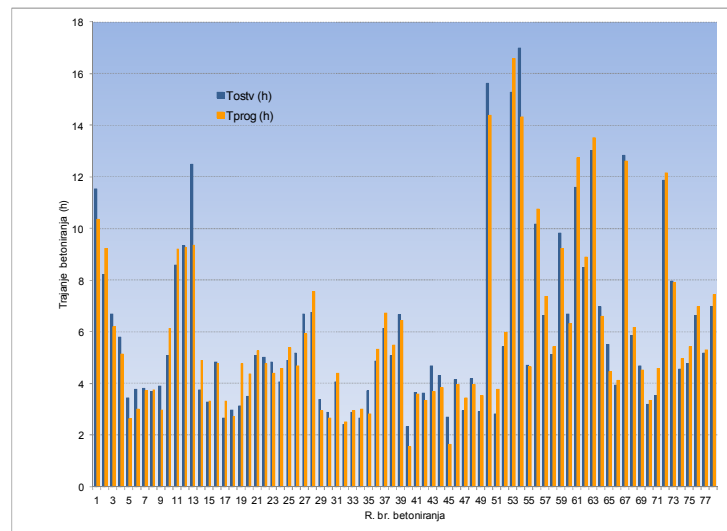
$T(MK)_{prog}$  – прогнозирано време бетонирања (h).

Према (4.6) добијено је за модел *RegModel P(MK)*,  $MAPE=9,69\%$ , а према (4.7) за модел *RegModel T(MK)*,  $MAPE=11,20\%$ . Иако је коефицијент детерминације за модел *RegModel T(MK)* већи, јавља се већи проценат средње апсолутне грешке.

Слика 4.6 показује поређење остварених продуктивности (плава боја) и прогнозираних продуктивности (наранџаста боја), а слика 4.7 на сличан начин поређења оствареног и прогнозираног трајања бетонирања.



Слика 4.6 – Остварена  $P(MK)_{ostv}$  и прогнозирана  $P(MK)_{prog}$  продуктивност



Слика 4.7 – Остварено  $T(MK)_{ostv}$  и прогнозирано  $T(MK)_{prog}$  трајање

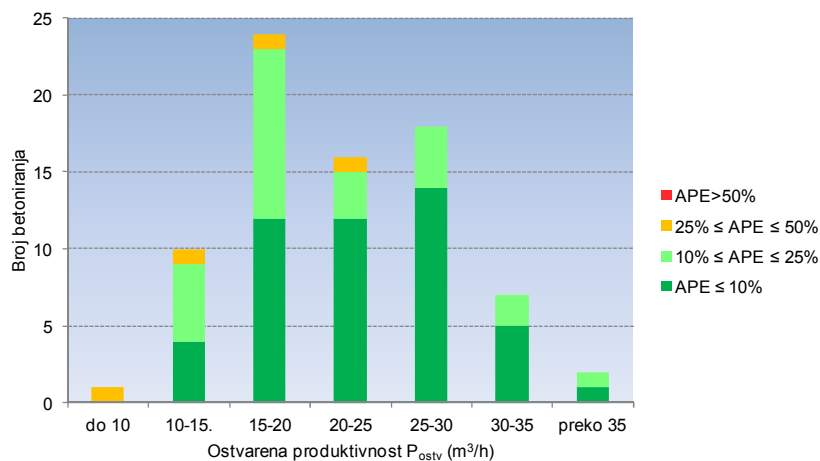
Због даље анализе добијених модела, извршено је сортирање резултата (табела 4.13) на основу апсолутне процентуалне грешке –  $APE$  (*Absolute Percentage Error*), према изразу (4.8) и класификације бетонирања према оствареној продуктивности. Снимљени процеси бетонирања подељени су у седам група према оствареној продуктивности и то: процеси са оствареном продуктивношћу до 10, 10–15; 15–20; 20–25; 25–30; 30–35 и преко 35 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.

$$APE = \left| \frac{P(MK)_{ostv} - P(MK)_{prog}}{P(MK)_{ostv}} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (4.8)$$

Табела 4.13 показује да 62% резултата има апсолутну грешку при прогнозирању продуктивности мању од 10%, односно 95% од свих резултата је прогнозирано са грешком до 25%. Већа одступања јавила су се у само 5% резултата и то са грешком до 50%. Грешке између остварене и прогнозиране продуктивности веће од 50% нису се јавиле. На основу овога, може се рећи да модел *RegModel P(MK)* има бољу моћ прогнозирања за продуктивности које имају вредност већу од 20 m<sup>3</sup>/h, јер је ту *APE* углавном у граници до 10%.

Табела 4.13 Подела процеса бетонирања према *APE* и оствареној продуктивности

P <sub>ostv</sub> (m <sup>3</sup> /h)	do 10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	preko 35	suma
APE ≤ 10%	0	4	12	12	14	5	1	48
10% ≤ APE ≤ 25%	0	5	11	3	4	2	1	26
25% ≤ APE ≤ 50%	1	1	1	1	0	0	0	4
APE > 50%	0	0	0	0	0	0	0	0
suma	1	10	24	16	18	7	2	78
APE ≤ 10%	0%	5%	15%	15%	18%	6%	1%	62%
10% ≤ APE ≤ 25%	0%	6%	14%	4%	5%	3%	1%	33%
25% ≤ APE ≤ 50%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	5%
APE > 50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
suma	1%	13%	31%	21%	23%	9%	3%	100%



Слика 4.8 – Хистограм остварене продуктивности према *APE*

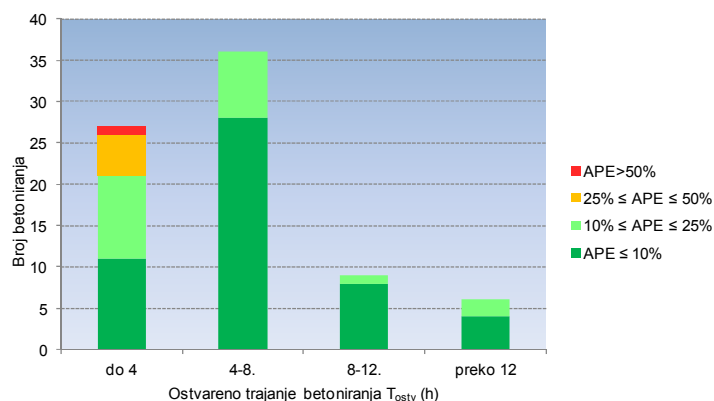
И за модел *RegModel T(MK)* извршено је сортирање резултата (табела 4.14) на основу апсолутне процентуалне грешке – *APE* (*Absolute Percentage Error*), према изразу (4.9) и класификације бетонирања према оствареном трајању. Снимљени процеси бетонирања подељени су у четири групе према оствареном трајању и то: процеси са трајањем до 4;

4–8; 8–12 и преко 12 h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.

$$APE = \left| \frac{T(MK)_{ostv} - T(MK)_{prog}}{T(MK)_{ostv}} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (4.9)$$

Табела 4.14 Подела процеса бетонирања према APE и оствареном трајању

T <sub>ostv</sub> (h)	do 4	4-8	8-12	preko 12	suma
APE ≤ 10%	11	28	8	4	49
10% ≤ APE ≤ 25%	10	8	1	2	23
25% ≤ APE ≤ 50%	5	0	0	0	5
APE > 50%	1	0	0	0	1
	27	36	9	6	78
APE ≤ 10%	14%	36%	10%	5%	65%
10% ≤ APE ≤ 25%	13%	10%	1%	3%	27%
25% ≤ APE ≤ 50%	6%	0%	0%	0%	6%
APE > 50%	1%	0%	0%	0%	1%
	35%	46%	12%	8%	100%



Слика 4.9 – Хистограм оствареног трајања према APE

На основу дате поделе, за модел  $T(MK)$ , може се констатовати да је 93% резултата прогнозирано са грешком до 25% (65% са грешком до 10%, и 27% са грешком 10-25%), свега 6% резултата има грешку преко 25% и 1 резултат је са грешком од 53%. Модел *RegModel*  $T(MK)$  даје боље резултате за трајања бетонирања преко 4 сата. Све грешке преко 25% јавиле су се у случају трајања бетонирања краће од 4 сата.

Извршена је анализа квалитета модела у односу на количине бетона. У том циљу ради лакшег сагледавања количина бетона за које је прецењена или потцењена продуктивност (трајање) срачуната је процентуална грешка *PE* (*Percentage Error*) према изразима (4.10) и (4.11). На сликама 4.10 и 4.11 дато је процентуално одступање

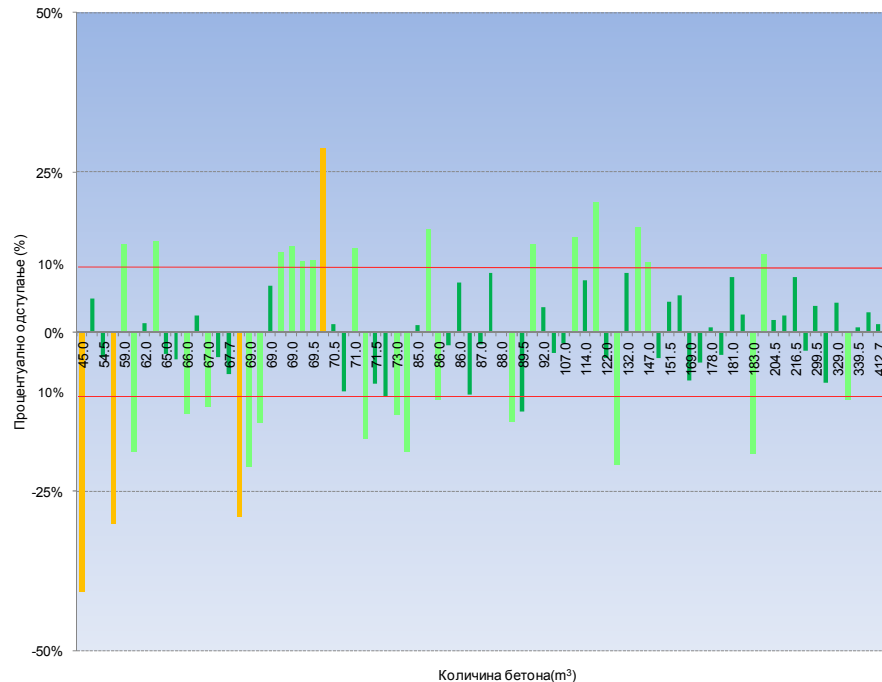


остварених и прогнозираних продуктивности, односно трајања бетонирања сортираних у односу на количине бетона у растућем низу.

$$PE = \frac{P(MK)_{ostv} - P(MK)_{prog}}{P(MK)_{ostv}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.10)$$

$$PE = \frac{T(MK)_{ostv} - T(MK)_{prog}}{T(MK)_{ostv}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.11)$$

Случајеви код којих се јавило веће одступање остварене продуктивности у односу на прогнозирану (жута боја на дијаграму) су углавном са неким застојима који нису узети у обзир при формирању модела. Јављало се спорије бетонирање због незавршене оплате, арматуре или враћеног лошег бетона. У овим случајевима прогнозирана продуктивност је наравно већа од остварене,  $PE$  има негативне вредности на дијаграму (слика 4.10). Продуктивност са позитивним  $PE=+28,79\%$  јавила се за случај бетонирања по снегу. Пошто временски услови нису узети у обзир при регресионој анализи, овде је утицај снега, очигледно, имао позитиван ефекат на продуктивност, рад је био бржи у циљу ранијег завршетка.

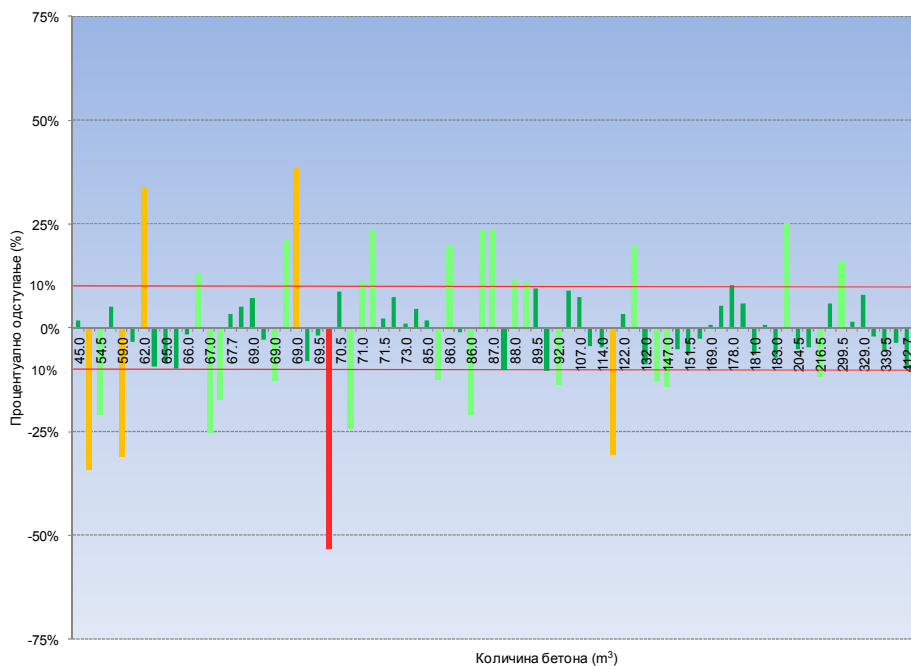


Слика 4.10 – Процентуална грешка код модела  $RegModel P(MK)$

На слици 4.10, такође, може се запазити да се јављају мања одступања између остварених и прогнозираних продуктивности за веће количине бетона, нарочито за количине преко  $100 \text{ m}^3$ .

Код прогнозирања трајања, за разлику од прогнозирања продуктивности, случајеви са већом грешком су углавном они где је прогнозирано трајање веће у односу на остварено, тј. услед боље организације и без непотребних застоја, бетонирање је остварено за краће време. У овим случајевима где је прогнозирано трајање веће од оствареног,  $PE$  има негативне вредности на дијаграму (слика 4.11). Највеће одступање,  $PE=-53,04\%$  јавља се за исти случај бетонирања по снегу.

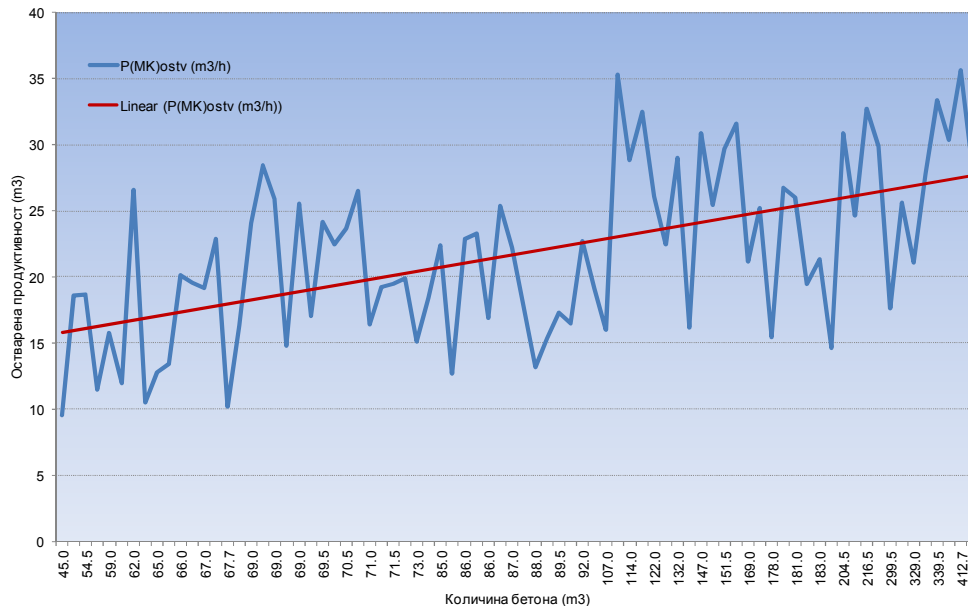
Као и код прогнозирања продуктивности, и код прогнозирања трајања (слика 4.11) мања су одступања између остварених и прогнозираних вредности за веће количине бетона, нарочито за количине преко  $100 \text{ m}^3$ . И овај модел је бољи у прогнозирању трајања за веће количине бетона, преко  $100 \text{ m}^3$ .



Слика 4.11 – Процентуална грешка код модела RegModel T(MK)

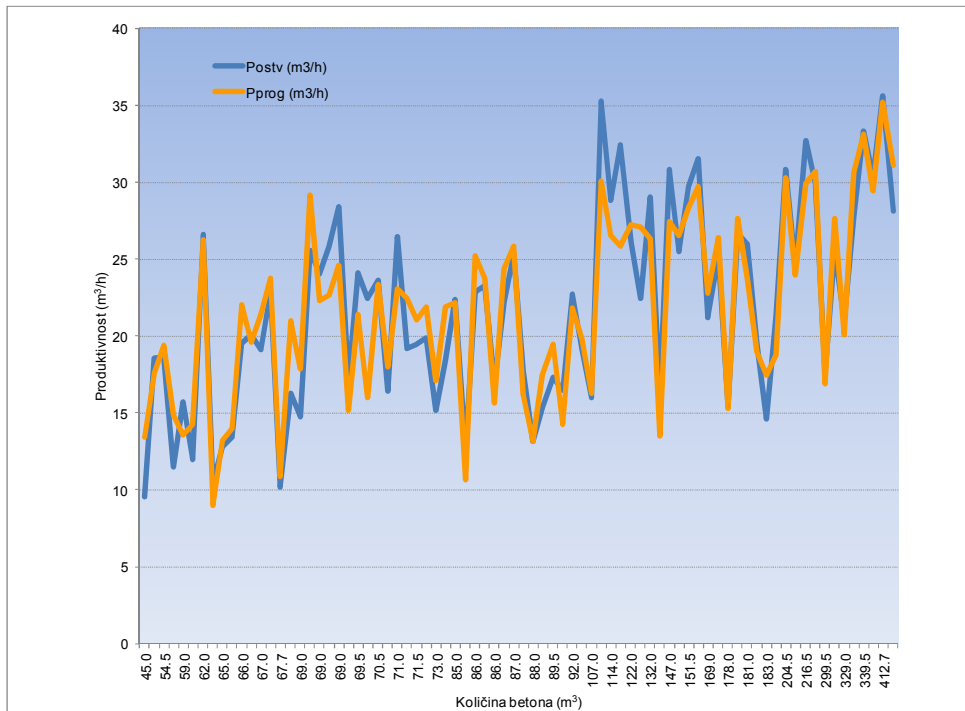
Уочено је се да су за веће количине бетона, преко  $200 \text{ m}^3$ , оствариване веће продуктивности процеса бетонирања. Ова појава може се приписати томе да за веће количине радова, пошто је потребно и дуже време, рад се схвата озбиљније, база справља бетон само за дато градилиште па је мање чекања на бетон. Због дужег

очекиваног времена, рад је бржи, без застоја и у циљу бржег завршетка продуктивност је већа. На слици 4.12 може се запазити тренд повећања продуктивности са повећањем количина бетона.

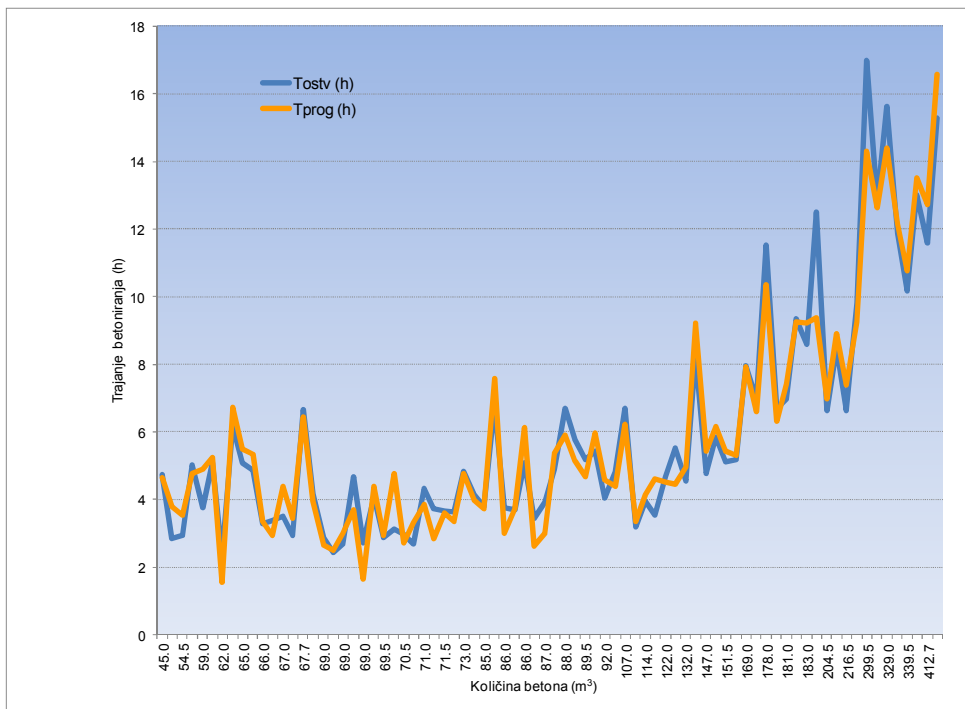


Слика 4.12 – Повећање продуктивности са повећањем количине бетона

На следећим сликама приказане су упоредне вредности остварене и прогнозиране продуктивности (слика 4.13) и оствареног и прогнозираног трајања (слика 4.14) у односу на количине бетона. Уочава се да су за веће количине бетона од  $100 \text{ m}^3$  углавном прогнозиране мање продуктивности од остварених (у 22 случајева од 32), односно дужа трајања од остварених.



Слика 4.13 – Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона



Слика 4.14 – Остварено и прогнозирано трајање у односу на количине бетона

## 4.4 Израда регресионих модела за узорак *SZ*

### 4.4.1 Регресиона анализа

Као и у претходном потпоглављу, и за узорак *SZ*, израђена су два модела: за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања стубова и зидова и модела за прогнозирање трајања ових радова. Упоредном анализом оба модела, такође је указано на предности и недостатке сваког од њих и предложен бољи за примену.

И за узорак *SZ* предложени су утицајни фактори, а затим је спроведена регресиона анализа и формиран су одговарајући модели. Следеће варијабле (зависне и независне променљиве) узете су у разматрање за регресиону анализу:

A – зависне варијабле:

1. Продуктивност процеса бетонирања –  $P(SZ)$  ( $m^3/h$ )

Представља количину уграђеног бетона у стубове и/или зидове у току једног часа рада; израчунава се као количник између укупне количине уграђеног бетона и укупног потребног времена. Укупно потребно време укључује време чистог рада заједно са свим чекањима и застојима.

2. Трајање бетонирања –  $T(SZ)$  (h)

Представља време потребно за уграђивање потребне количине бетона у стубове и/или зидове, мерено од почетка до завршетка бетонирања. За почетак бетонирања узето је време почетка истовара првог миксера, а за завршетак бетонирања време завршетка обраде горње површине елемената.

B1 – независне квантитативне варијабле:

1. Количина бетона –  $Q$  ( $m^3$ )

Количина која је дата предмером радова. У односу на срачунату количину бетона за плоче, која није увек довољно прецизна, код стубова и зидова та количина је у већини случајева тачно одређена прорачуном. То се објашњава тиме што је обично мања количина у питању, као и димензијама и обликом елемената.

2. Висина на којој се врши бетонирање –  $V$  (m)

Представља висину са које се пуне елементи; преузете висине су из пројеката.

3. Број елемената (стубова и/или зидова) –  $B_{el}$  (комада)  
Број стубова и/или зидова који се бетонирају: Већи број елемената повлачи већи број припрема за бетонирање (премештање скеле, радника первибратора и стреле са цевним водом пумпе).
4. Број радника –  $B_r$  (број)  
Број радника ангажованих на бетонирању. За бетонирање стубова и зидова уобичајено је да се радна бригада састоји од 2 до 3 радника. Један радник држи цево пумпе, један врши уграђивање первибратором и један радник пушта и искључује первибратор. У случају када је домет пумпе недовољан, или у неким другим посебним условима ангажован је и већи број радника.
5. Потребан укупан број миксера –  $B_{mi}$  (комада)  
Укупан број миксера који допрема укупну количину бетона. Добија се на основу расположивости миксера и њихових капацитета и укупне количине бетона. Због релативно малих количина за уграђивање, укупан број миксера био је највише три.
6. Број миксера у циклусу –  $B_{mc}$  (комада/циклусу)  
Пошто је процес цикличне природе иста возила долазе на градилиште одређен број пута (циклуса). Број возила у једном циклусу зависи од учинка базе, транспортне даљине до градилишта, капацитета миксера. За разлику од бетонирања плоча, време истовара миксера при бетонирању стубова и зидова је знатно дуже, па је врло често број миксеру у циклусу и једнак укупном броју миксера.
7. Просечна количина бетона по миксеру –  $Q_{pr.m}$  ( $m^3$ /миксеру)  
Због различитих капацитета миксера, просечна количина бетона по миксеру представља количник између укупне количине и укупног броја миксера.
8. Теоретски учинак пумпе –  $U_{t,p}$  ( $m^3/h$ )  
Због учешћа неколико различитих пумпи, потребно је увести овај фактор. Предлаже се теоретски учинак којим ће бити исказана способност пумпе.
9. Старост пумпе –  $SP$  (година)  
Представља број година од производње пумпе до тренутка употребе. Са повећањем старости механизације, повећава се истрошеност и дотрајалост делова, па је машина подложнија кваровима и постизању мањег учинка.

10. Домет пумпе –  $DP$  (m)

Дометом пумпе је исказана дужина стреле са цевним водом (4 или 5 секција) заједно са гуменим цревом на крају. Повећање домета је могуће додавањем наставака који су исти као црево на крају и имају дужине 4 до 5 m.

11. Удаљеност бетонске базе од градилишта –  $L_{b-g}$  (km)

Растојање од бетонске базе до градилишта изражено у километрима.

12. Учинак бетонске базе –  $U_{pr,b}$  ( $m^3/h$ )

На основу трајања циклуса и запремине мешалица израчунати су практични учинци база.

V2 – независне квалитативне варијабле:

13. Уиграност радне бригаде –  $U_{rb}$ 

Уочено је да утицај радника и њихових способности има значајан утицај код бетонирања стубова и зидова. Уиграност радне бригаде оцењивана је бројевима од 1 до 3 на основу упитника (прилог 3). Оцена 3 значи да је група веома уиграна (послови се обављају веома брзо, нема застоја због неразумевања и различитости у погледу вештина међу радницима, способност и смисао за групни рад). Оцена 2 – група је средње уиграна (послови се спорије обављају због застоја који настају услед неразумевања и различитости у погледу вештина међу радницима, мања способност рада у групи). Оцена 1 – група није уиграна (веома споро обављање послова, чести застоји, мала способност радника за групни рад).

14. Распоживот бетонске базе –  $RasB$ 

Уколико база у исто време испоручује бетон за већи број градилишта или врши справљање бетона за своје потребе (нпр. производња монтажних елемената, и др.) то може довести до чекања на бетон. Према редоследу отпремница може се закључити да ли је вршено снабдевање само разматраног градилишта (означено је са 0), или снабдевање и трећих лица (означено је са 1).

Претпоставља се линеарни однос између варијабли: међусобно између свих независних и између независних са зависним. Број података у узорку је 58 а број независних варијабли узетих у почетно разматрање је 14, што значи да је испуњен услов о

потребној величини узорка. Најпре је спроведена корелациона анализа, а затим су формиран регресиони модели за прогнозирање продуктивности (модел *RegModel P(SZ)*) и прогнозирање трајања бетонирања стубова и/или зидова (модел *RegModel T(SZ)*) са истим почетним улазним варијаблама.

#### 4.4.2 Модел за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања армиранобетонских стубова и зидова – модел *RegModel P(SZ)*

На основу корелационе анализе и *Pearson-овог* коефицијента корелације између свих парова независних варијабли, у табели 4.15, која представља корелациону матрицу, може се уочити да постоји јака корелациона веза, према *Chaddock-овој* скали између следећих варијабли: количина бетона –  $Q$  и укупан број миксера –  $B_{mu}$  (коэф. корелације: 0,817); количина бетона –  $Q$  и број миксера у циклусу –  $B_{mc}$  (коэф. корелације, 0,773); дomet пумпе –  $DP$  и теоретски учинак пумпе –  $U_{t,p}$  (коэф. корелације, 0,982); удаљеност базе од градилишта –  $L_{b-g}$  и практичног учинка базе –  $U_{pr,b}$  (коэф. корелације, -0,867). Због могуће мултиколинеарности елиминисане су варијабиле из сваког пара, које имају мању корелацију са зависном варијабилном  $P(SZ)$ .

За даљу анализу остају следеће варијабиле: количина бетона –  $Q$ , висина бетонирања –  $V$ , број елемената –  $B_{el}$ , број радника –  $B_r$ , уиграност радне бригаде –  $U_{rb}$ , просечна количина бетона по миксеру –  $Q_{pr,m}$ , теоретски учинак пумпе –  $U_{t,p}$ , старост пумпе –  $SP$ , практични учинак базе –  $U_{pr,b}$  и расположивост базе –  $RasB$ .

Табела 4.15 Корелациона матрица између свих варијабли

Variables	P(SZ)ostv	T(SZ)ostv	Q	V	Bel	Br	Urb	Bmc	Bmu	Qpr.m	Ut.p	SP	DP	Upr.b	Lb-g	RasB
P(SZ)ostv	1															
T(SZ)ostv	-0.484	1														
Q	0.190	0.721	1													
V	0.102	0.117	0.246	1												
Bel	-0.082	0.341	0.354	0.154	1											
Br	0.110	0.116	0.188	-0.049	0.315	1										
Urb	0.236	0.023	0.228	0.096	0.437	0.201	1									
Bmc	0.044	0.660	0.773	0.058	0.218	0.153	0.112	1								
Bmu	0.065	0.675	0.817	0.140	0.285	0.190	0.186	0.947	1							
Qpr.m	0.158	-0.088	0.068	0.072	-0.003	0.040	0.075	-0.463	-0.476	1						
Ut.p	-0.057	-0.158	-0.115	-0.318	0.070	0.065	-0.089	0.003	-0.027	-0.130	1					
SP	0.060	-0.046	-0.150	-0.255	-0.273	0.095	0.006	-0.150	-0.168	0.154	-0.660	1				
DP	-0.031	-0.174	-0.125	-0.410	0.029	0.098	-0.063	0.007	-0.031	-0.115	0.982	-0.521	1			
Upr.b	-0.171	0.116	0.083	-0.094	-0.082	-0.110	0.190	0.009	0.060	0.069	-0.287	0.075	-0.287	1		
Lb-g	0.028	-0.084	-0.160	0.008	0.245	0.268	-0.118	-0.062	-0.103	-0.071	0.262	-0.007	0.281	-0.867	1	
RasB	-0.269	0.451	0.186	-0.322	-0.142	0.026	-0.136	0.405	0.351	-0.261	0.036	0.105	0.067	-0.034	0.047	1

За формирање модела за прогнозирање продуктивности примењена је *backward* метода (корак по корак уназад), где су у првом кораку у регресиону анализу уведене све



варијабле. После анализе варијансе (*ANOVA*) може се уочити да не постоји проблем мултиколинearности (табела 4.16) на основу фактора пораста варијансе – *VIF* (*Variance Inflation Factor*). После првог корака *backward* регресијом добијени су параметри модела за прогнозирање продуктивности (табела 4.17). На основу  $P_r$  вредности и параметра  $t$ , може се закључити да поједине варијабле нису статистички значајне (уколико је  $P_r > 0,05$  и  $|t| < t_{kr}$ ) и треба их елиминисати из даљег разматрања. За узорак величине:  $N=58$ , број варијабли:  $p=10$  и број степени слободe (*Degrees of freedom*),  $DF=n-p-1=47$ , из таблица Студентовог распореда,  $t_{kr}=2,01$ .

Табела 4.16 Фактор пораста варијансе - *VIF*

Statistic	Q	V	Bel	Br	Urb	Qpr.m	Ut,p	SP	Upr,b	RasB
Tolerance	0.672	0.359	0.640	0.722	0.750	0.865	0.201	0.212	0.687	0.694
VIF	1.488	2.783	1.563	1.384	1.333	1.156	4.966	4.725	1.455	1.441

Табела 4.17 Параметри модела *RegModel P(SZ)* (први корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	5.243	0.920	5.697	< 0.0001	3.396	7.090
Q	0.129	0.044	2.926	0.005	0.040	0.217
V	0.000	0.000				
Bel	-0.134	0.032	-4.153	0.000	-0.199	-0.069
Br	0.000	0.000				
Urb	1.790	0.297	6.021	< 0.0001	1.194	2.387
Qpr.m	0.000	0.000				
Ut,p	0.000	0.000				
SP	0.000	0.000				
Upr,b	-0.019	0.011	-1.744	0.087	-0.040	0.003
RasB	-2.000	0.487	-4.105	0.000	-2.977	-1.022

Варијабле које немају било какву статистичку значајност (осенчене у табели 4.17) су: висина на којој се бетонира, број радника, просечна количина бетона по миксеру, теоретски учинак пумпе и старост пумпе, док практични учинак базе има недовољан значај пошто је  $|t| = 1,744 < t_{kr}=2,01$ .

Претпоставља се да варијабла број радника нема утицаја због тога што је радна бригада увек била формирана са одговарајућим, довољним бројем радника за процес, тј. нису се јављали застоји и смањење продуктивности из тих разлога. Варијабла домет пумпе није статистички значајна из разлога што је пумпа постављана тако да је омогућен довољан домет. У неколико случајева, на вишим спратовима, немогућност дохвата појединих

елемената, решавана је бетонирањем ручним начином. Вршен је истовар бетона на плочу одакле су радници колицима и лопатама избацивали бетон на скелу и у оплату. Ови делови процеса нису снимани и разматрани. Остале варијабиле нису значајне због мале количине бетона и мање брзине бетонирања које су карактеристичне за овај процес.

После елиминације наведених варијабли, спроведен је други корак анализе и добијен коначни облик регресионог модела за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања стубова и зидова. У табели 4.18 (све варијабле су статистички значајне:  $P_r < 0,05$ ) дати су регресиони коефицијенти (*value*), а математички облик модела формулом (4.12).

Табела 4.18 Параметри модела RegModel P(SZ) (коначан модел)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	4.389	0.794	5.528	< 0.0001	2.796	5.981
Q	0.117	0.044	2.642	0.011	0.028	0.206
Bel	-0.129	0.033	-3.923	0.000	-0.194	-0.063
Urb	1.859	0.300	6.190	< 0.0001	1.257	2.462
RasB	-1.933	0.495	-3.907	0.000	-2.926	-0.941

Коначан модел има четири независне променљиве и гласи:

$$P(SZ)_{prog} = 4.389 + 0.117Q - 0.129B_{el} + 1.859U_{rb} - 1.933RasB \quad (m^3/h) \quad (4.12)$$

где је:

$P(SZ)_{prog}$  – прогнозирана продуктивност ( $m^3/h$ ),

$Q$  – количина бетона за уграђивање ( $m^3$ ),

$B_{el}$  – број елемената (стубова и/или зидова),

$U_{rb}$  – уиграност радне бригаде,

$RasB$  – расположивост базе.

Променљиве које имају позитивне регресионе коефицијенте утичу на повећање продуктивности и то су: количина бетона и уиграност радне бригаде. Исто као код продуктивности бетонирања плоча, и у овом случају, показало се да повећање количине

за уграђивање још више повећава продуктивност: сваки  $1 \text{ m}^3$  бетона утиче на повећање продуктивности за  $0,117 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Остале две променљиве имају негативан утицај, тј. утичу на смањење продуктивности. Разумљиво је да се са повећањем броја елемената, повећава се и време потребно за премештање слеке, первибратора, стреле пумпе и радника, па се и постигнута продуктивност смањује, као и да, уколико база опслужује и друга градилишта, долази до застоја и смањења продуктивности.

На основу добијеног модела (4.12), може се закључити да већи утицај на промену продуктивности имају варијабле: уиграност радне бригаде и расположивост базе. Уколико се све остале варијабле држе константним, а број елемената повећа за 1, продуктивност опада за  $0,129 \text{ m}^3/\text{h}$ ; исто тако, ако база у исто време опслужује и друга градилишта продуктивност опада за  $1,9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Уколико се уиграност радне бригаде повећа за 1, доћиће до повећања продуктивности за  $1,86 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Проверу квалитета овог модела могуће је извршити преко коефицијента детерминације  $R^2$  који износи 0,529 (табела 4.19) што значи да је 52,9% варијабилитета зависне променљиве  $P(SZ)$  објашњено са предложене четири независне променљиве. У истој табели, вредност статистике *Durbin-Watson*,  $DW=2,092$  потврђује испуњен услов о непостојању аутокорељације.

Табела 4.19 Оцена квалитета модела *RegModel P(SZ)*

Observations	58.000
Sum of weights	58.000
DF	53.000
$R^2$	0.529
Adjusted $R^2$	0.493
MSE	1.855
RMSE	1.362
DW	2.092

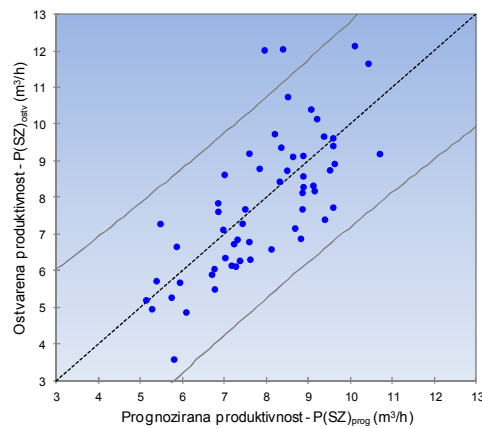
Да би примена регресионе једначине била оправдана приликом прогнозирања, треба утврдити да ли су објашњавајуће променљиве значајне за понашање зависне променљиве. Тестирање се врши, као што је раније објашњено, на основу  $F$  теста. Из табеле за  $F$  - тест, на нивоу поверења 99%,  $F_{kr(0,01)} = 2,80$  и пошто је  $F = 14,872$  (табела 4.20) веће од  $F_{kr}$ , може се закључити да је оправдана примена предложеног модела за прогнозирање продуктивности.

Табела 4.20 Оцена значајности модела *RegModel P(SZ)*

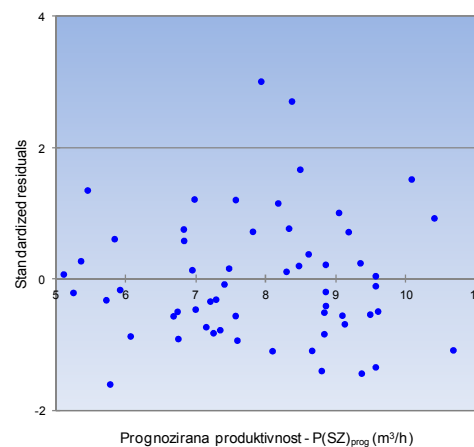
Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	4	110.372	27.593	14.872	< 0.0001
Error	53	98.336	1.855		
Corrected Total	57	208.708			

На дијаграму (слика 4.15) приказано је слагање остварених вредности продуктивности и прогнозираних вредности на основу предложеног модела. Дијаграм распршености показује да се већина тачака налази око праве 1:1 (*Fitted line*) у оквиру интервала поверења од 95%. Може се уочити да су само две тачке ван границе што чини свега 3,4% од укупног броја тачака.

На основу претпоставке да је варијанса константна, резидуали имају нормалну расподелу, што се потврђује случајним распоредом стандардизованих резидуала прогнозиране продуктивности, као на слици 4.16.



Слика 4.15 – Слагање остварене и прогнозиране продуктивности

Слика 4.16 – Стандардизовани резидуали модела *RegModel P(SZ)*

#### 4.4.3 Модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања армиранобетонских стубова и зидова – модел *RegModel T(SZ)*

На исти начин као и за модел за прогнозирање продуктивности (модел *RegModel P(SZ)*), спроведена је анализа и израђен модел за прогнозирање трајања процеса бетонирања стубова и зидова (модел *RegModel T(SZ)*). На основу корелационе анализе (табела 4.21), и циљу избегавања мултиколинеарности, због мало другачије корелације са зависном променљивом  $T(SZ)$  изостављене су следеће варијабиле: укупан број миксера, број миксера у циклусу, теоретски учинак пумпе и удаљеност базе од градилишта.

Табела 4.21 Корелациона матрица између свих варијабиле

Variables	P(SZ)ostv	T(SZ)ostv	Q	V	Bel	Br	Urb	Bmc	Bmu	Qpr.m	Ut.p	SP	DP	Upr.b	Lb-g	RasB
P(SZ)ostv	1															
T(SZ)ostv	-0.484	1														
Q	0.190	0.721	1													
V	0.102	0.117	0.246	1												
Bel	-0.082	0.341	0.354	0.154	1											
Br	0.110	0.116	0.188	-0.049	0.315	1										
Urb	0.236	0.023	0.228	0.096	0.437	0.201	1									
Bmc	0.044	0.660	0.773	0.058	0.218	0.153	0.112	1								
Bmu	0.065	0.675	0.817	0.140	0.285	0.190	0.186	0.947	1							
Qpr.m	0.158	-0.088	0.068	0.072	-0.003	0.040	0.075	-0.463	-0.476	1						
Ut.p	-0.057	-0.158	-0.115	-0.318	0.070	0.065	-0.089	0.003	-0.027	-0.130	1					
SP	0.060	-0.046	-0.150	-0.255	-0.273	0.095	0.006	-0.150	-0.168	0.154	-0.660	1				
DP	-0.031	-0.174	-0.125	-0.410	0.029	0.098	-0.063	0.007	-0.031	-0.115	0.982	-0.521	1			
Upr.b	-0.171	0.116	0.083	-0.094	-0.082	-0.110	0.190	0.009	0.060	0.069	-0.287	0.075	-0.287	1		
Lb-g	0.028	-0.084	-0.160	0.008	0.245	0.268	-0.118	-0.062	-0.103	-0.071	0.262	-0.007	0.281	-0.867	1	
RasB	-0.269	0.451	0.186	-0.322	-0.142	0.026	-0.136	0.405	0.351	-0.261	0.036	0.105	0.067	-0.034	0.047	1

На основу анализе варијансе (*ANOVA*) уочава се да не постоји проблем мултиколинеарности (табела 4.22).

Табела 4.22 Фактор пораста варијансе - *VIF*

Statistic	Q	V	Bel	Br	Urb	Qpr.m	SP	DP	Upr.b	RasB
Tolerance	0.678	0.381	0.641	0.734	0.751	0.868	0.329	0.292	0.728	0.693
VIF	1.474	2.625	1.559	1.363	1.332	1.152	3.036	3.424	1.373	1.443

Од преосталих десет варијабила, *backward* регресијом у два корака (табеле 4.23 и 4.24) елиминисањем варијабли које нису статистички значајне, добијен је модел дат изразом (4.13). Због сличности поступка са претходним, већ урађеним, даље су дати само резултати кроз табеле и графике.

Табела 4.23 Параметри модела RegModel T(SZ) (први корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	0.280	0.261	1.074	0.288	-0.243	0.803
Q	0.089	0.011	8.186	< 0.0001	0.067	0.111
V	0.011	0.006	1.762	0.084	-0.002	0.024
Bel	0.035	0.008	4.446	< 0.0001	0.019	0.051
Br	0.000	0.000				
Urb	-0.416	0.073	-5.708	< 0.0001	-0.562	-0.270
Qpr.m	0.000	0.000				
SP	0.035	0.013	2.699	0.009	0.009	0.062
DP	0.000	0.000				
Upr,b	0.000	0.000				
RasB	0.709	0.124	5.698	< 0.0001	0.459	0.959

Варијабле које немају статистичку значајност (осенчене у табели 4.23) су: висина на којој се бетонира, број радника, просечна количина бетона по миксеру, домет пумпе и практични учинак базе. Објашњења су иста као у претходном делу.

Табела 4.24 Параметри модела RegModel T(SZ) (коначни модел)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	0.439	0.249	1.761	0.084	-0.061	0.940
Q	0.094	0.011	8.904	< 0.0001	0.073	0.116
Bel	0.034	0.008	4.235	< 0.0001	0.018	0.050
Urb	-0.406	0.074	-5.476	< 0.0001	-0.554	-0.257
SP	0.030	0.013	2.331	0.024	0.004	0.057
RasB	0.627	0.118	5.326	< 0.0001	0.391	0.864

Табела 4.25 Оцена квалитета модела RegModel T(SZ)

Observations	58.000
Sum of weights	58.000
DF	52.000
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.781</b>
Adjusted R <sup>2</sup>	0.760
MSE	0.104
RMSE	0.323
<b>DW</b>	<b>2.249</b>

Коефицијент детерминације  $R^2$  износи 0,781 (табела 4.25) што значи да је 78,1% варијабилитета зависне променљиве T(SZ) објашњено са предложених пет независних променљивих.

Табела 4.26 Оцена значајности модела RegModel T(SZ)

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	5	19.366	3.873	37.136	< 0.0001
Error	52	5.424	0.104		
Corrected Total	57	24.790			

Тестирање значајности регресионог модела дато је у табели 4.26. Статистика  $F$  теста показује оправданост примене предложеног модела за прогнозирање трајања бетонирања.

$$T(PZ)_{prog} = 4.389 + 0.094Q + 0.034B_{el} - 0.406U_{rb} + 0.03SP + 0.627RasB \quad (h) \quad (4.13)$$

где је:

$T(SZ)_{prog}$  – прогнозирано трајање бетонирања (h),

$Q$  – количина бетона за уграђивање ( $m^3$ ),

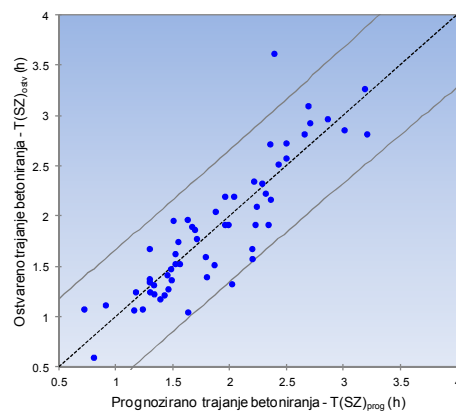
$B_{el}$  – број елемената (стубова и/или зидова),

$U_{rb}$  – уиграност радне бригаде,

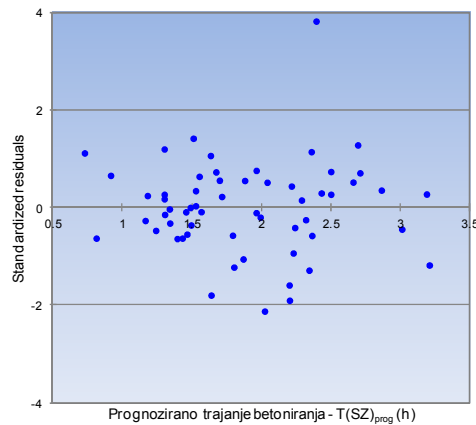
$SP$  – старост пумпе (год),

$RasB$  – расположивост базе.

На дијаграму (слика 4.17) приказано је слагање оствареног и прогнозираног трајања. Дијаграм распршености показује да се већина тачака налази око праве 1:1 (*Fitted line*) у оквиру интервала поверења од 95%. Може се уочити да су само две тачке ван границе што чини свега 3,4% од укупног броја тачака. Нормалност резидуала потврђена је случајним распоредом стандардизованих резидуала прогнозиране продуктивности, као на слици 4.18.



Слика 4.17 – Слагање оствареног и прогнозираног трајања бетонирања



Слика 4.18 – Стандардизовани резидуали модела *RegModel T(SZ)*

#### 4.4.4 Дискусија предложених модела

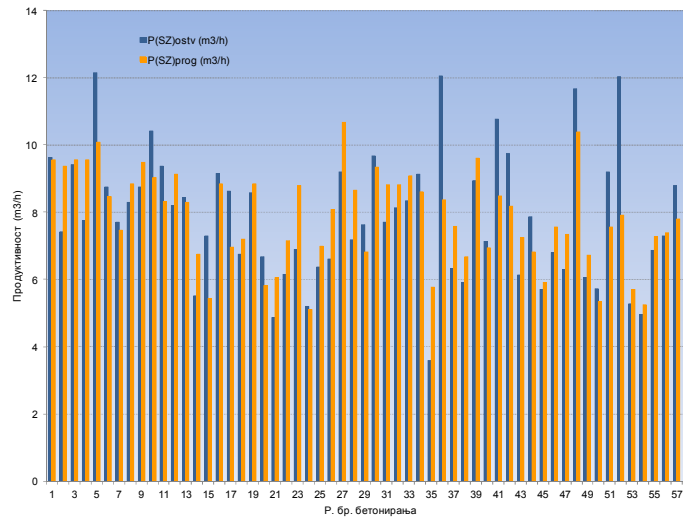
Предложени модели имају сличан број статистички значајних независно променљивих са истом њиховом комбинацијом. Разлика се односи само на варијабле: старост пумпе *SP* која се јавља код модела за прогнозирање трајања али не и код модела за прогнозирање продуктивности бетонирања. Пошто је коефицијент детерминације већи код модела *RegModel T(SZ)*, што се види и на дијаграму на слици 4.17, може се говорити о бољој моћи предикције овог модела у односу на претходни. Тачке на дијаграму распршености много су уже распоређене око регресионе линије, као и на основу статистике *F* - теста, где је *F* веће код модела *RegModel T(SZ)* у односу на модел *RegModel P(SZ)*. За оба модела извршена је оцена и на основу средње апсолутне грешке између остварених и прогнозираних вредности *MAPE* (*Mean Absolute Percentage Error*).

Добијене вредности су: за модел *P(SZ)*,  $MAPE=13,27\%$ , а за модел *T(SZ)*,  $MAPE=13,10\%$ . Коефицијент детерминације за модел *RegModel T(SZ)* је већи и проценат средње апсолутне грешке је мањи.

На слици 4.19 приказано је поређење остварених продуктивности (плава боја) и прогнозираних продуктивности (наранџаста боја), а слика 4.20, на сличан начин, приказује поређења оствареног и прогнозираног трајања бетонирања.

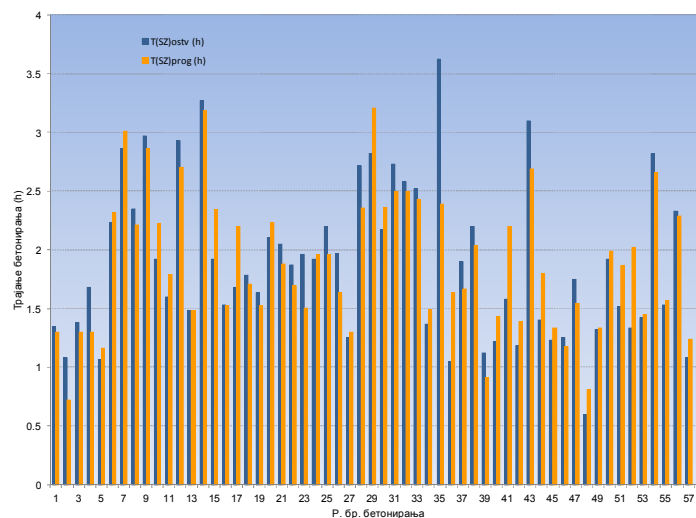
Сортирани су резултати (табела 4.27) на основу апсолутне процентуалне грешке – *APE* (*Absolute Percentage Error*) и класификације бетонирања према оствареној продуктивности.





Слика 4.19 – Остварена  $P(SZ)_{ostv}$  и прогнозирана  $P(SZ)_{prog}$  продуктивност

Снимљени процеси бетонирања подељени су у четири групе према оствареној продуктивности и то: процеси са оствареном продуктивношћу до 4, 4–7; 7–10 и преко 10 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.



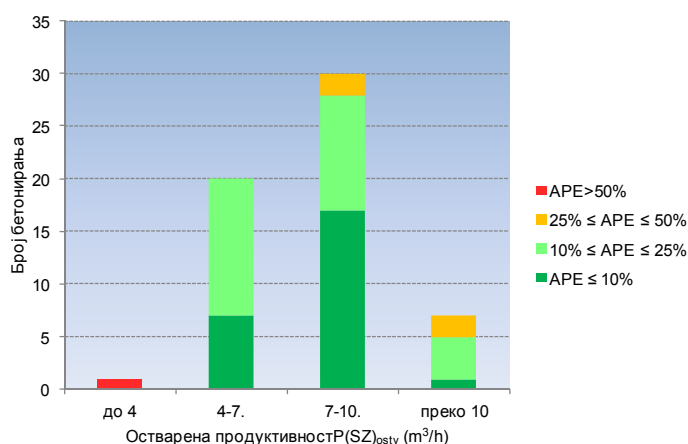
Слика 4.20 – Остварено  $T(SZ)_{ostv}$  и прогнозирано  $T(SZ)_{prog}$  трајање

Табела 4.27 показује да 43% резултата има апсолутну грешку при прогнозирању продуктивности мању од 10%, односно 91% од свих резултата је прогнозирано са грешком до 25%. Већа одступања јавила су се у само 9% резултата и то са грешком до 50%, у 7% случајева и грешке између остварене и прогнозиране продуктивности веће од 50% јавиле су се у 2% случајева.

У истој табели, као и на слици 4.21 може се запазити да модел *RegModel P(SZ)* има бољу моћ прогнозирања за продуктивности које у распону 4-10 m<sup>3</sup>/h, јер је ту *APE* углавном у граници до 25%.

Табела 4.27 Подела процеса бетонирања према *APE* и оствареној продуктивности

$P(SZ)_{\text{ostv}}$ (m <sup>3</sup> /h)	до 4	4-7.	7-10.	преко 10	сума
$APE \leq 10\%$	0	7	17	1	25
$10\% \leq APE \leq 25\%$	0	13	11	4	28
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0	0	2	2	4
$APE > 50\%$	1	0	0	0	1
сума	1	20	30	7	58
$APE \leq 10\%$	0%	12%	29%	2%	43%
$10\% \leq APE \leq 25\%$	0%	22%	19%	7%	48%
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0%	0%	3%	3%	7%
$APE > 50\%$	2%	0%	0%	0%	2%
сума	2%	34%	52%	12%	100%

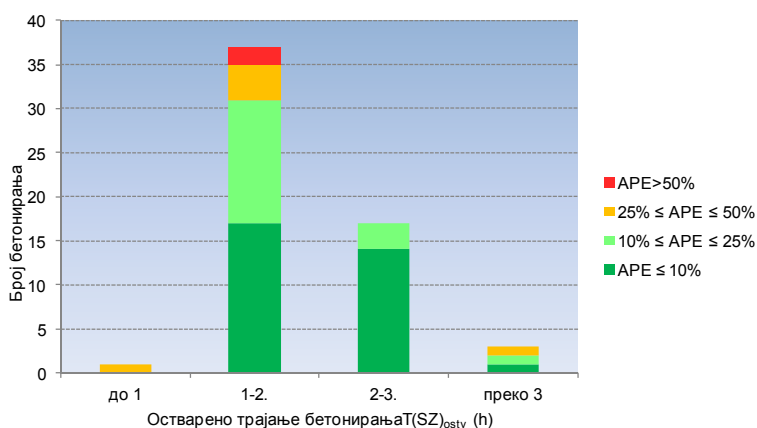


Слика 4.21 – Хистограм остварене продуктивности према *APE*

И за модел *RegModel T(SZ)* извршено сортирање резултата (табела 4.28) на основу апсолутне процентуалне грешке – *APE* (*Absolute Percentage Error*) и класификације бетонирања према оствареном трајању. Снимљени процеси бетонирања подељени су у четири групе према оствареном трајању и то: процеси са трајањем до 1; 1–2; 2–3 и преко 3 h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.

Табела 4.28 Подела процеса бетонирања према APE и оствареном трајању

$T(SZ)_{ostv}$ (h)	до 1	1-2.	2-3.	преко 3	сума
$APE \leq 10\%$	0	17	14	1	49
$10\% \leq APE \leq 25\%$	0	14	3	1	23
$25\% \leq APE \leq 50\%$	1	4	0	1	6
$APE > 50\%$	0	2	0	0	2
сума	1	37	17	3	58
$APE \leq 10\%$	0%	29%	24%	2%	55%
$10\% \leq APE \leq 25\%$	0%	24%	5%	2%	31%
$25\% \leq APE \leq 50\%$	2%	7%	0%	2%	10%
$APE > 50\%$	0%	3%	0%	0%	3%
сума	2%	64%	29%	5%	100%



Слика 4.22 – Хистограм оствареног трајања према APE

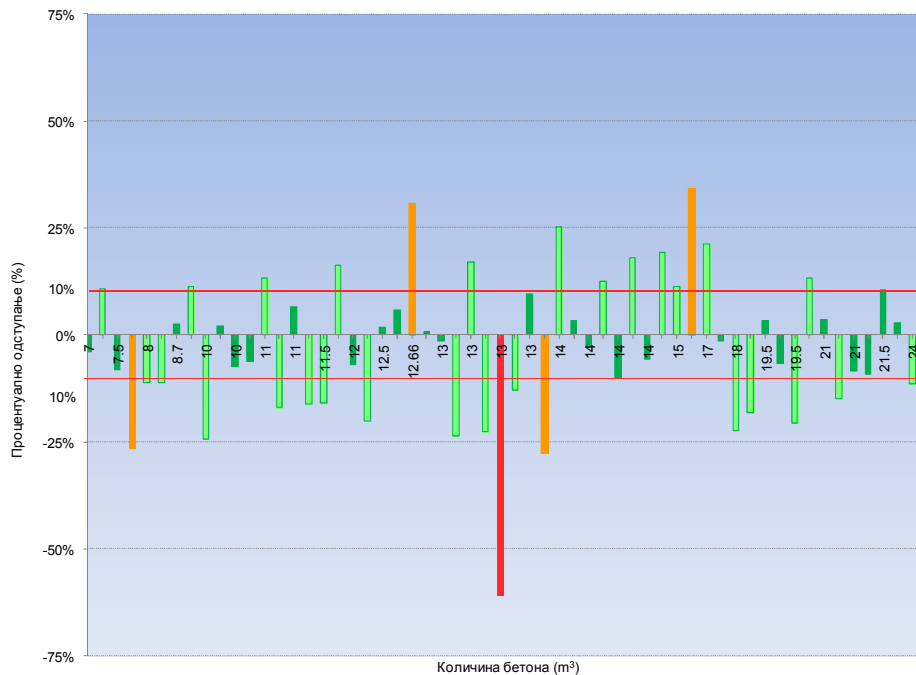
На основу дате поделе, за модел *RegModel T(SZ)*, може се констатовати да је 86% резултата прогнозирано са грешком до 25% (55% са грешком до 10%, и 31% са грешком 10-25%), 10% резултата има грешку преко 25% и 2 резултата су са грешком преко 50%. Модел *RegModel T(SZ)* даје боље резултате за трајања бетонирања од 2 до 3 сата.

Извршена је анализа квалитета модела у односу на количине бетона. У том циљу ради лакшег сагледавања количина бетона за које је прецењена или потцењена продуктивност (трајање) срачуната је процентуална грешка *PE (Percentage Error)*. На сликама 4.23 и 4.24 дато је процентуално одступање остварених и прогнозираних продуктивности, односно трајања бетонирања сортираних у односу на количине бетона у растућем низу.

У три случаја прогнозирана продуктивност је прецењена са већим одступањем (жута и црвена боја на дијаграму, слика 4.23, *PE* негативно) где су се јављали дужи застоји (дужи од 1 сата) због чекања пумпе на бетон. Продуктивност са позитивним  $PE = +31\%$

и  $PE=+34\%$  где је остварена знатно већа продуктивност у односу на прогнозирану у ова два случаја се јавља из разлога знатно лошијег квалитета изведених радова без посвећене потребне пажње и уз већи растур бетона, па је и трајање било краће.

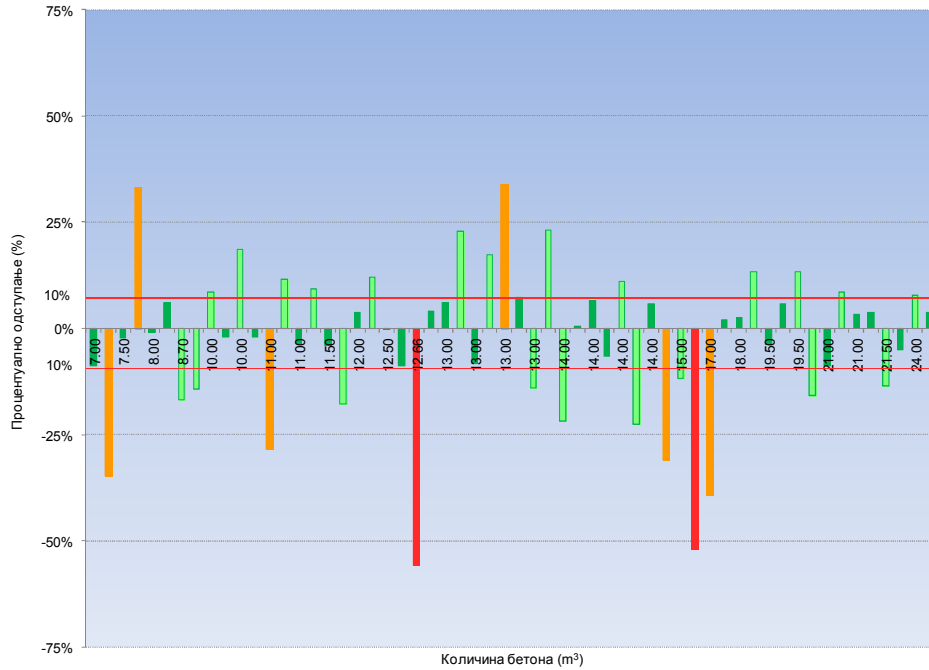
На слици 4.23, са становишта количина, може се запазити да се јављају мања одступања између остварених и прогнозираних продуктивности за количине бетона до  $12.50 \text{ m}^3$  и преко  $16 \text{ m}^3$ .



Слика 4.23 – Процентуална грешка код модела  $P(SZ)$

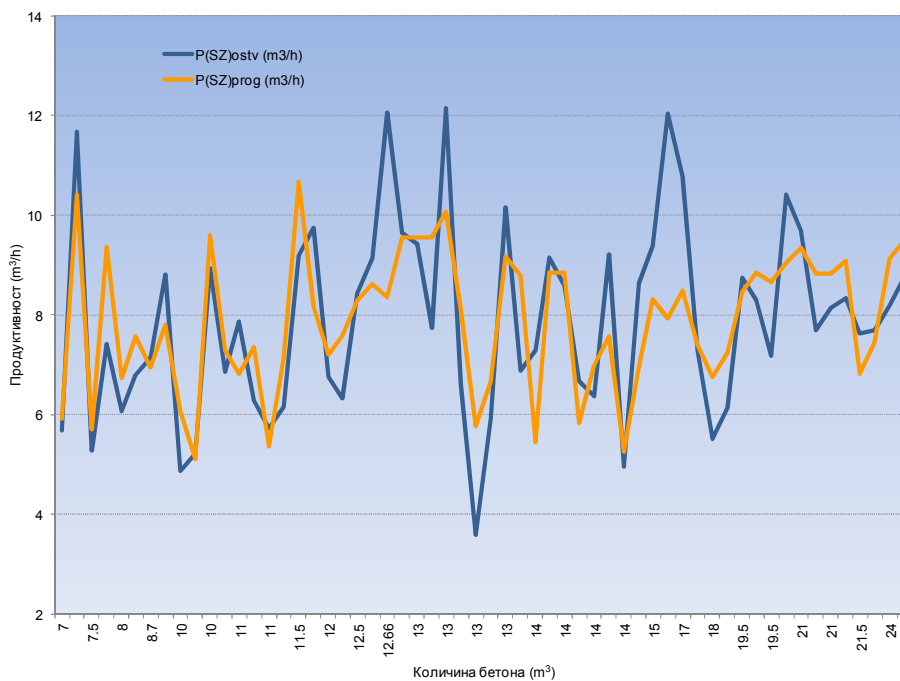
Код прогнозирања трајања, за разлику од прогнозирања продуктивности, случајеви са већом грешком су углавном они где је прогнозирано трајање веће у односу на остварено, тј. услед боље организације и без непотребних застоја, бетонирање је остварено за краће време. У овим случајевима где је прогнозирано трајање веће од оствареног,  $PE$  има негативне вредности на дијаграму (слика 4.24). Највећа одступање,  $PE=-56\%$  и  $PE=-52\%$  јављају се за исте случајеве бетонирања уз лошији квалитет извођења радова.

Код прогнозирања трајања (слика 4.24) мања су одступања између остварених и прогнозираних вредности за количине преко  $17 \text{ m}^3$ .

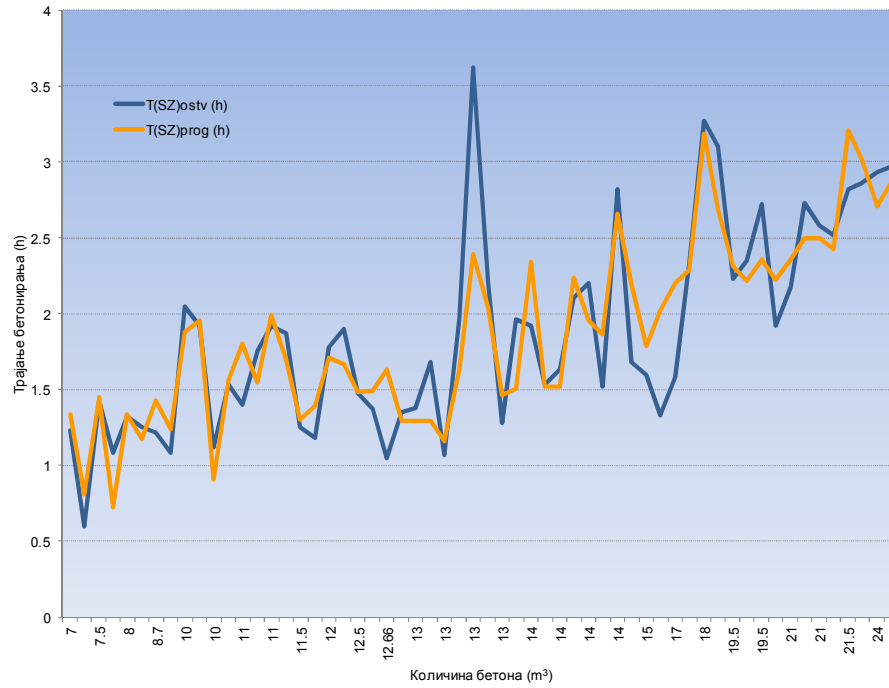


Слика 4.24 – Процентуална грешка код модела  $T(SZ)$

На следећим сликама приказане су упоредне вредности остварене и прогнозиране продуктивности (слика 4.25) и оствареног и прогнозираног трајања (слика 4.26) у односу на количине бетона.



Слика 4.25 – Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона

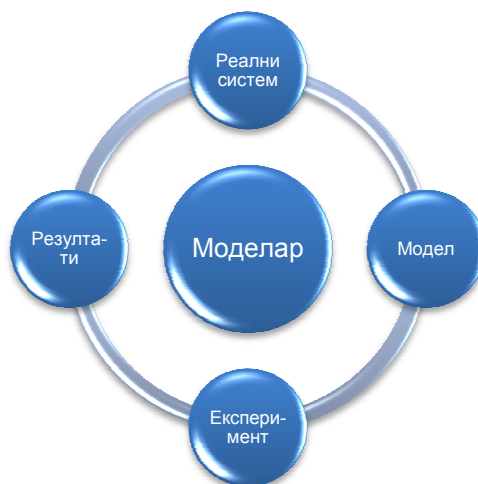


Слика 4.26 – Остварено и прогнозирано трајање у односу на количине бетона

## 5. СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛИ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА

### 5.1 Увод

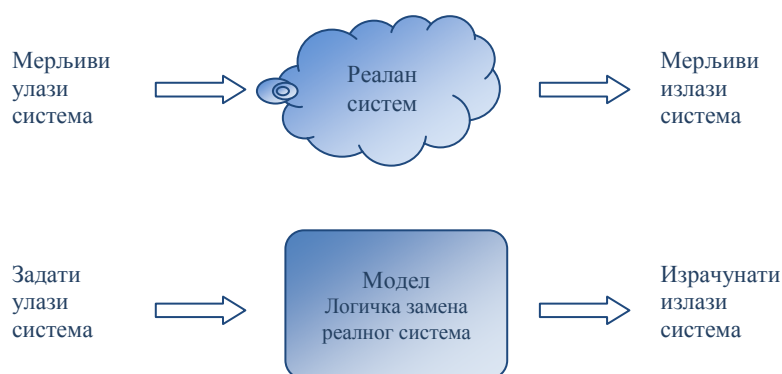
Моделирање је један од начина решавања проблема из стварног света; то је у ствари превођење реалног система у модел. Моделирање пружа могућност за уочавање правила - образаца, интерпретацију значења, процењивање и предвиђање, управљање процесима и објектима, итд. Модел је апстракција реалности; то је опис реалног система са свим потребним карактеристикама за посматрано проучавање. Модел се може посматрати као резултат упрошћавања стварности са циљем обезбеђивања њеног разумевања. Модел може бити образац, план, представа, опис и др., створен са циљем да прикаже структуру или начин функционисања неког објекта, система или концепта.



Слика 5.1 – Методологија истраживања у процесу моделирања

Да ли је модел добар или не, ствар је процене, а да ли је тачан или не, може се сазнати у процесу његовог коришћења током времена. У развоју модела увек мора да постоји нека врста нагодбе и дилеме: шта укључити у модел а шта не, али најбитније је изабрати одговарајући модел у мноштву потенцијалних. У процесу моделирања није

најважније направити свеобухватни модел, већ је много корисније направити најпростији модел који садржи есенцијалне елементе реалног система који се моделира. То значи да у процесу моделирања треба уочити и издвојити оне елементе и карактеристике система који су битни за дато истраживање и њих обухватити моделом, док остале елементе треба занемарити. Због тога, модел не садржи само објекте и атрибуте реалног система већ и одређене претпоставке о условима његове валидности. Сувише сложени модели, чак иако су оствариви, најчешће су прескupi и неадекватни за експериментисање, али и сувише поједностављени модели не осликавају на прави начин посматрани систем па резултати добијени њиховом применом могу бити неадекватни или погрешни. Зато пажљиво треба одабрати ниво апстракције тако да резултујући модел што верније представља посматрани систем.



Слика 5.2 – Реалан систем и модел

Методe моделирања усавршаване су развојем примењене математике, математичке статистике, операционих истраживања, експерименталних и информатичких метода.

Симулационо моделирање је једна од водећих савремених метода моделирања уз помоћ рачунара. Ова метода омогућује опис, разумевање и квантитативну анализу сложених динамичких система у различитим областима: производње, транспорта, економије, масовног опслуживања, рачунарства, итд.

Симулациони модели су модели који се везују за динамичке системе, тј. системе који се мењају у времену. Типични примери ових система су: редови чекања, производни процеси, складиштење, транспорт, и др. Данас се симулација широко примењује у многим областима, као на пример у управљању организацијом и пословним системима,



инжењерству, војној индустрији, медицини, рачунарским наукама, биологији, школама, али све више и у друштвеним наукама.

Савремено моделирање незамисливо је без примене рачунара који уз различите методе и програмске алате омогућују добар простор за стварање сложених модела и ефикасан рад са њима. Рачунарска симулација је извођење експеримената над моделом реалног система, током одређеног времена, који се изводи на рачунару (слика 5.3).



Слика 5.3 – Рачунарска симулација

Брзина рада савремених рачунара омогућила је примену метода симулације за решавање бројних сложених проблема у најразличитијим областима људског рада и практично допринела наглom развоју и све већој примени симулације. Симулација је манипулација моделом на такав начин да делује на простор и/или време сажимајући их, омогућавајући тако уочавање интеракције које иначе не би биле јасне због њихове временске и/или просторне одвојености.

Графички приказ система који се моделира (нпр. приказ производног процеса) и анимација рада система током извођења симулационих експеримената омогућује лакше вредновање логике и динамике рада симулационих модела те лакше праћење развоја модела у времену (Черић, 1993.).

Постоји неколико типова модела и начина решавања проблема:

- Аналитичко моделирање:

Модели су у аналитичком облику (нпр. системи једначина), па су и решења у аналитичком облику (функционалне везе зависних и независних променљивих). На овај начин се формирају модели једноставнијих проблема помоћу математичке анализе, метода алгебре, теорије вероватноће и сл.

- Нумеричко моделирање:

Модели су у аналитичком облику, али због немогућности налажења аналитичког решења, проблем се решава нумеричким методама (налажењем парова вредности независних и зависних променљивих које задовољавају задате једначине). Овим поступком се решавају сложенији проблеми и то најчешће различитим итеративним поступцима.

- Симулационо моделирање:

Због немогућности приказа сложених динамичких система у аналитичком облику, модели су задати у процедуралном облику којим се приказује начин рада система. Проблем се решава нумерички, спровођењем експеримента моделом који опонашају развој система у времену. Овим начином решавају се проблеми дискретних система и континуалних система са повратном спрегом.

Животни циклус симулације представља низ корака који описују поједине фазе решавања проблема. Број фаза и редослед њиховог извршавања зависи од конкретне ситуације. Основне фазе симулационог процеса су следеће:

1. Дефиниција циља симулационе студије - представља дефинисање проблема који треба решити;
2. Идентификација система - опис компоненти система, интеракција компоненти, начин рада, везе с околином, формални приказ система;
3. Прикупљање података о систему и њихова анализа - прикупљање и мерење релевантних података о систему, анализа тих података (избор расподела независних случајних променљивих, оцена вредности параметара расподела);
4. Изградња симулационог модела - стварање концептуалног модела који адекватно описује систем и омогућава решавање задатог проблема;
5. Изградња симулационог програма - избор програмског језика или пакета и стварање симулационог програма писањем програма или аутоматским генерисањем програма на основу концептуалног модела;
6. Верификација симулационог програма - тестирање симулационог програма према поставкама симулационог модела. Уколико верификација програма није дала задовољавајуће резултате, потребан је повратак на корак 5;

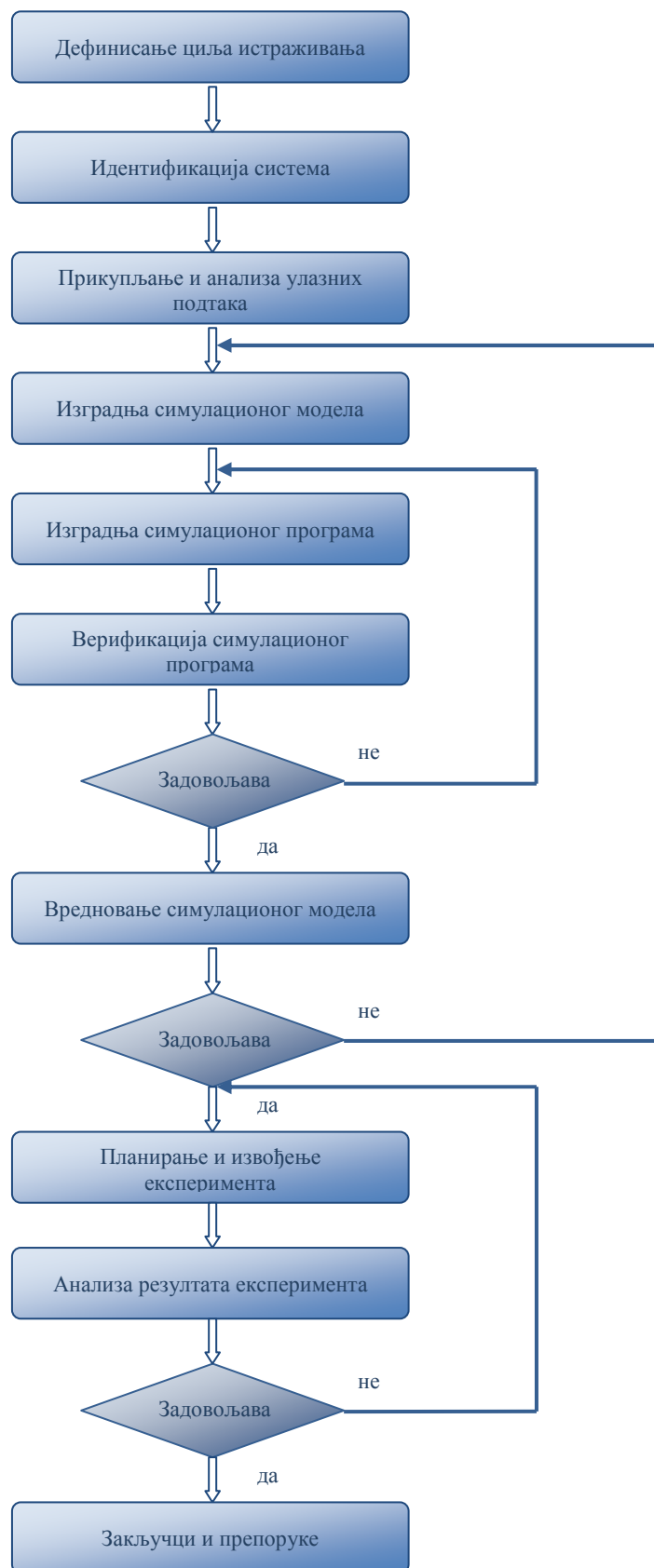
7. Вредновање (валидација) симулационог модела - испитивање да ли симулациони модел адекватно представља стварни систем анализом резултата. Уколико вредновање модела није успешно, потребно је вратити се на тачку 4 и направити измене у моделу;
8. Планирање симулационих експеримената и њихово извођење - планирање и извођење према усвојеном плану ради омогућавања испуњења циља студије (нпр., план промене параметара модела, понављање експеримента због анализе утицаја случајних променљивих, итд.);
9. Анализа резултата експеримената - током анализе резултата може се показати потреба за допуном фазе 8, тј. да се изведу додатни експерименти;
10. Закључци и препоруке.

На слици 5.4 дијаграмом је представљен развој симулационог процеса.

### **Предности и недостаци симулације**

Симулациона метода, као и свака друга метода, одликује се одређеним предностима, али има и неке недостатке. Основне предности коришћења симулације су:

- Опис и решавање сложених динамичких проблема са случајним варијабилама који су недоступни математичком моделирању;
- Решавање проблема који се појављују код одлучивања (избор алтернатива, предвиђање);
- Услови експериментисања су под контролом;
- Анимација рада модела олакшава вредновање логике и динамике рада;
- Једном изграђени модел може се вишеструко користити за анализу предложених планова;
- Симулационе методе могу се користити као помоћ код анализе, чак и ако су улазни подаци на неки начин непотпуни;
- Симулациони подаци се често могу много јефтиније добити од сличних података из реалног система;
- Симулационе методе лакше је применити него аналитичке методе;
- Симулациони модели не захтевају више поједностављених претпоставки које их чине математички прилагодљивим;



Слика 5.4 – Развојни процес симулације

- Код симулационих модела генерисани подаци могу да се користе за процену било које схватљиве и мерљиве карактеристике;
- Симулација је једино средство за решавање одговарајућег проблема у неким случајевима.

Основни недостаци коришћења симулације су:

- Симулациони модели за дигиталне рачунаре могу бити скупи и могу захтевати значајно време за изградњу и валидацију;
- Због статистичког карактера симулације потребно је извођење већег броја симулационих експеримената како би се добио одговарајући узорак резултата симулације, а већ и појединачно извођење експеримента може захтевати доста времена и меморије рачунара;
- Не добијају се зависности излазних променљивих од улазних променљивих модела нити оптимална решења;
- За исправно коришћење симулационог моделирања потребно је познавање више различитих метода и алата;
- Вредновање модела је доста сложено и захтева додатне експерименте.

## 5.2 Подела симулационих модела

Симулациони модели могу бити подељени према различитим принципима. Постоји неколико подела:

1. Према врсти променљивих у моделу:

- *Детерминистички модели* су они чије се понашање може предвидети, односно у којима је ново стање система у потпуности одређено претходним стањем;
- *Стохастички модели* су они чије се понашање не може унапред предвидети, али се могу одредити вероватноће промена стања система. Дакле, за стохастичке моделе је карактеристично случајно понашање, односно постојање случајних променљивих у систему.

2. Према начину на који се стање у моделу мења у времену:

- *Дискретни модели* су они у којима се стање система мења само у појединим тачкама у времену (нема континуалне промене стања). Такве промене се

називају догађаји;

- *Континуални модели* где се стања мењају континуално у времену.

3. Према приступу моделирању и класи проблема који се решава:

- Монте Карло (*Monte Carlo*) симулација;
- Континуална симулација;
- Симулација дискретних догађаја;
- Мешовита, континуално-дискретна симулација.

### **5.2.1 Монте Карло симулација**

Монте Карло симулација повезана је са случајним феноменима. Она је статички тип симулације код које се у решавању проблема користи стварање узорака из расподела случајних променљивих. При томе, проблеми могу бити било детерминистичког, било стохастичког карактера. Разликујемо следеће типове примене Монте Карло симулације:

- *Детерминистички проблеми које је тешко или скупо решавати*

Типичан пример овога типа је рачунање вредности одређених интеграла који се не могу решити аналитички.

- *Сложени феномени који нису довољно познати*

За њих је карактеристично да није познат начин узајамног деловања између елемената већ су познате само вероватноће његовог исхода.

- *Статистички проблеми који немају аналитичка решења*

Процене критичних вредности или тестирање нових хипотеза.

### **5.2.2 Континуална симулација**

Континуална симулација се користи за динамичке проблеме код којих се променљиве стања мењају континуално у времену. Постоје две основне класе проблема који се решавају овом методом.

У првој класи су релативно једноставни проблеми који су описани детаљно и код којих су промене "глатке" и природно се описују диференцијалним једначинама. То су типично проблеми из физике, биологије и инжењерства. У другој класи су проблеми који настају описом веома сложених система у агрегираном облику, у којем се низ елемената система редукује на мањи број компоненти и промене у систему се

апроксимирају константним брзинама промене. Разликујемо три основна типа континуалних симулационих модела

- *Модели који се описују обичним диференцијалним једначинама (системи обичних диференцијалних једначина)*

Проблеми у вези са разним процесима као што су, на пример, разни облици кретања и многи физички, хемијски, биолошки и други процеси где се ради о једној непознатој функцији једне независно променљиве ( $t$ ), изражавају се математички једначинама у којима се, поред независно променљиве и непознате функције, јављају (обавезно) и изводи те функције.

- *Модели који се описују системима парцијалних диференцијалних једначина*

Парцијалне диференцијалне једначине садрже више од једне независне променљиве по којима се траже изводи зависне променљиве.

Типични примери су проблеми аеродинамике, хидродинамике и метеорологије.

- *Модели системске динамике (System Dynamics)*

Системска динамика је методологија истраживања, моделирања и симулације сложених динамичких система. Системи са повратном везом су основни тип система који се моделирају системском динамиком. Модел са повратном везом користе се најчешће за моделирање инжењерских, биолошких, друштвених и економских система.

### 5.2.3 Симулација дискретних догађаја

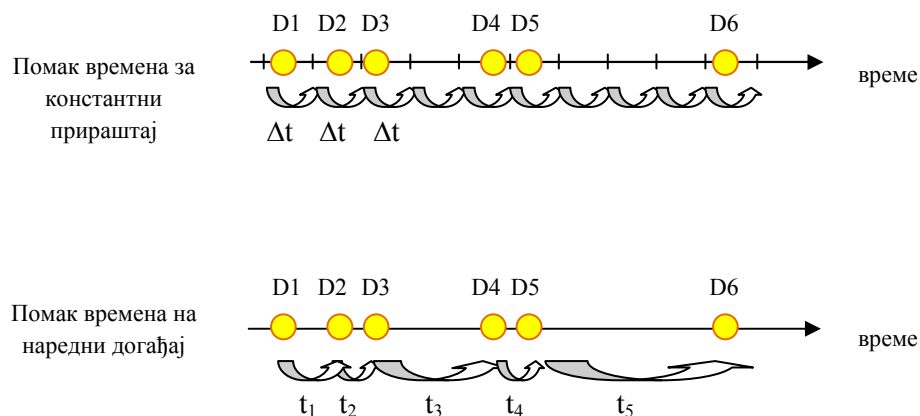
Симулација дискретних догађаја (*Discrete Event Simulation - DES*) је метода симулационог моделирања система у којима се промене стања дешавају дисконтинуално у времену, тј. само у неким временским тренуцима. Системи који се моделирају на овај начин су динамички и готово редовно стохастички.

Модел садрже објекте одређених својстава, који својим међуделовањем узрокују промене стања система у времену (Черић, 1993.). Дискретни догађај је апстракција реалног система где се у обзир узимају само битне промене у континуалном процесу.

Модел се извршава у корацима, где следеће стање система зависи од тренутног стања и од тренутног утицаја околине. Симулација описује сваки дискретни догађај, крећући се од једног догађаја до другог при чему настаје помак (прираст) времена симулације. Један од кључних елемената развоја симулације дискретних догађаја је механизам

помака времена. Користе се два основна механизма: помак времена за константни прираштај и помак времена на наредни догађај.

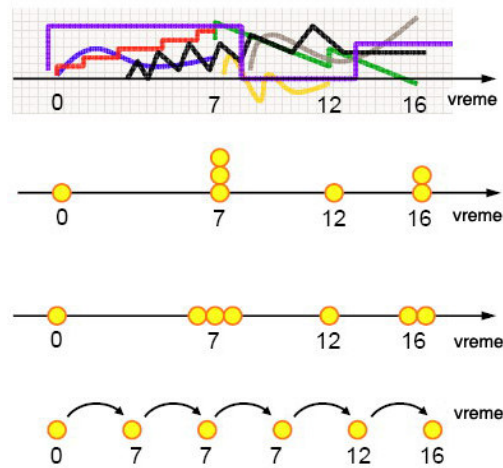
**Помак времена за константни прираштај** подразумева промену времена у симулационом моделу тако да се увек додаје једнак прираштај  $\Delta t$  (слика 5.5). Након сваког помака времена, односно ажурирања вредности симулационог сата, испитује се да ли је у претходном интервалу времена требало да дође до наступања неких догађаја. Уколико јесте, тада се ти догађаји планирају за крај интервала. Овакав помак времена има недостатак јер се померањем догађаја на крај временског интервала уводи грешка у симулацију. Догађаји који нису истовремени у овом се приступу приказују као истовремени, а потом се одређује редослед њиховог извођења (који се може разликовати од стварног редоследа). Смањењем временског прираста те се грешке смањују, али се повећава време које се троши на извођење симулације као и пораст броја временских интервала у којима нема догађаја.



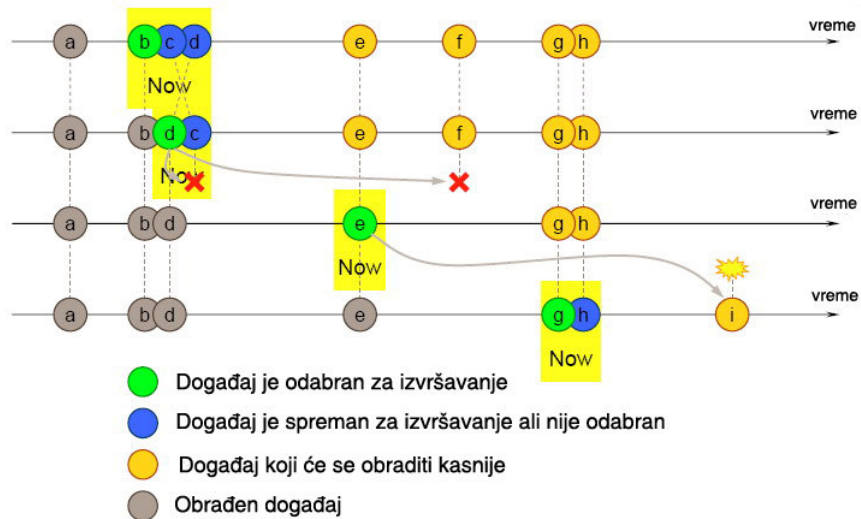
Слика 5.5 – Механизми помака времена у симулацији дискретних догађаја

**Помак времена на наредни догађај** подразумева померање симулационог сата на време у ком ће наступити први наредни догађај или више њих (слика 5.5). Ако су догађаји задати тако да се извршавају истовремено, извршиће се серијски (слика 5.6). Симулација се завршава када нема више догађаја или када је задовољен неки унапред дефинисан услов завршетка симулације. На овај начин се избегава грешка у времену извођења догађаја а уједно се прескачу интервали у којима нема догађаја. Овај принцип је сложенији али и ефикаснији па сви кључни симулациони језици користе овај механизам.





Слика 5.6 – Извршавање истовремених догађаја ([www.model.u-szeged.hu](http://www.model.u-szeged.hu))



Слика 5.7 – Редослед извршавања догађаја ([www.model.u-szeged.hu](http://www.model.u-szeged.hu))

### 5.2.4 Мешовита симулација

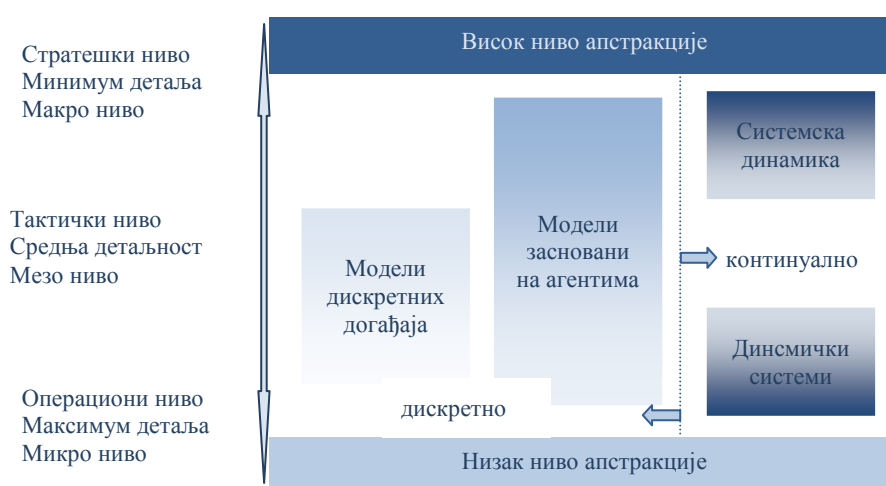
Код појединих врста система, континуална симулација као и симулација дискретних догађаја, не могу у потпуности да опишу начин рада система. То су они системи који садрже процесе који теку континуално и догађаје који доводе до дисконтинуитета у понашању система. Да би се такви системи моделирали и симулирали, развијена је мешовита симулација која омогућава интегрисање континуалних и дискретних елемената система. Веза између дискретног и континуалног приступа постиже се увођењем два типа догађаја. Временски догађаји су догађаји које генерира механизам управљања догађајима, какав постоји у симулацији дискретних догађаја. Они могу да

изазову тренутну промену стања континуалне променљиве. С друге стране, догађаји стања су они догађаји које активира механизам помака времена са константним прирастом, чији је временски интервал мали, а који је карактеристичан за континуалну симулацију. Ови догађаји могу да активирају догађаје дискретног дела модела.

### 5.3 Технике у симулационим моделима

Главни приступи и технике које се користе при изради симулационих модела су: системска динамика, дискретни догађаји, системи засновани на агентима и динамички системи.

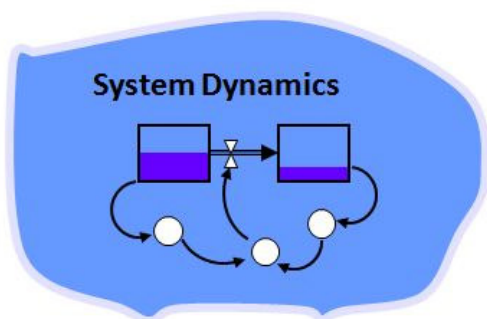
Системска динамика и дискретни догађаји су традиционалан приступ креирању модела, док су системи засновани на агентима развијени релативно скоро. Већина модела заснованих на агентима могу се развити из постојећих модела системске динамике и модела дискретних догађаја, при чему се добија боља реализација сложеног понашања објеката. Модели засновани на агентима, као и модели дискретних догађаја углавном се примењују у дискретном времену, док су системска динамика и динамички системи применљиви у континуалном времену. У односу на ниво апстракције, област примене динамичких система је низак ниво апстракције, а на високом нивоу апстракције користи се системска динамика. Модели дискретних догађаја користе се на средњем и ниском нивоу, док су модели засновани на агентима применљиви на свим нивоима апстракције (слика 5.8).



Слика 5.8 – Нивои апстракције

### 5.3.1 Системска динамика

Системска динамика (*System Dynamics* - *SD*) приказује динамику промена у комплексним системима. Ову методу развио је инжењер Џ. В. Форестер (*Jay W. Forrester*) 1960. године прошлог века. Област примене овог приступа је моделирање популационих, социјалних, еколошких и економских система. Дешавања у реалном свету приказана су кроз скупове (нпр. материјала, новца, људи, знања, итд.), токове између скупова и информација које одређују вредности токова. Како су модели системске динамике на веома високом нивоу апстракције, занемарује се понашање појединачних објеката при дефинисању понашања одређеног скупа.



Слика 5.9 – Графички приказ модела системске динамике ([www.anylogic.com](http://www.anylogic.com))

Системска динамика се користи за моделирање искључиво континуалних система, који имају углавном сложено понашање због повратних утицаја (*feedback*) који се у њима јављају (слика 5.9). Повратна петља се односи на ситуацију где  $X$  утиче на  $Y$ , али и  $Y$  истовремено утиче на  $X$  кроз различите узроке и последице. Анализа ових повратних петљи даје увид у могућа понашања система и оне могу бити са позитивним или негативним утицајем. Позитивна повратна петља је са парним бројем негативних утицаја, а негативна повратна петља има непаран број негативних утицаја. Математички модел системске динамике по правилу се посматра као систем диференцијалних једначина. Познати комерцијално доступни програмски пакети за симулацију модела системске динамике су: *VenSim*, *PowerSim*, *iThink*, *ModelMaker*, *Any Logic*, и др.

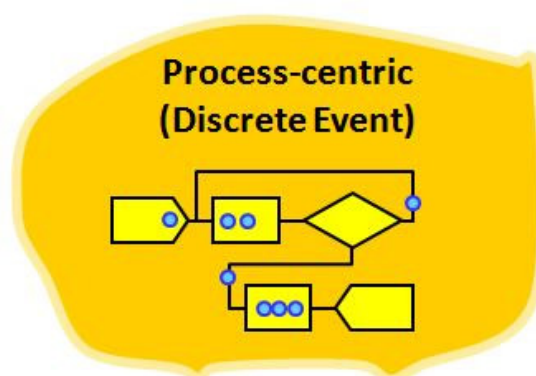
### 5.3.2 Дискретни догађаји

Принципи симулације дискретних догађаја дати су укратко у тачки 5.2.3. Овде се даје преглед основних појмова који се користе при њеној примени.

*Модел*, као апстрактни приказ система, даје опис објеката и њихову интеракцију, и најчешће садржи математичке и логичке релације које описују структуру и начин

функционисања система. *Ентитети (објекти)* су компоненте система и могу бити стални (они који остају у систему) и привремени (они који пролазе кроз систем). *Атрибути* описују својства ентитета; сваки ентитет може имати већи број атрибута. *Класе ентитета* су групе ентитета истог типа, а *скупови ентитета* су групе ентитета поједине класе који имају нека заједничка обележја. *Стање система (модела)* је скуп свих информација потребних за опис система. Зависи од ентитета присутних у датом тренутку и вредностима њихових атрибута. Под *догађајем* се подразумева дискретна промена стања ентитета система. Догађај наступа у одређеном тренутку времена, односно дискретне промене стања у систему догађају се дисконтинуално у времену. Између два узастопна догађаја стање система се не мења. *Активност* је међудејство одређених ентитета које траје одређено време. Почетак активности, обично се везује за неке услове, а крај наступа након протока одређеног времена трајања активности. *Процес* је низ логички повезаних узастопних догађаја. На слици 5.10 дат је графички приказ процеса дискретних догађаја.

Област примене модела дискретних догађаја је велика, као нпр. на системима масовног опслуживања и производним процесима. Креирање модела заснива се на концепту објеката, ресурса и дијаграма који описују кретање објеката и дељење ресурса. Метод је развио Ц. Гордон (*Geoffrey Gordon*) шездесетих година прошлог века. Он је у сарадњи са *IBM-ом* креирао први симулациони језик по називом *GPSS (General Purpose Simulation System)*.



Слика 5.10 – Графички приказ модела дискретних догађаја ([www.anylogic.com](http://www.anylogic.com))

Данас бројни програми користе модерну верзију *GPSS* –а. Највећи број комерцијано доступних софтвера који подржава креирање модела дискретних догађаја развијен је за општу употребу, али постоје и програми који су развијени за посебну примену у нпр. медицини или техници. Познати софтвери за моделирање система дискретних догађаја су: *Arena*, *Extend*, *SimProcess*, *AutoMod*, *Any Logic*, итд. Тренд у развоју софтвера за дискретну симулацију иде ка креирању графичких окружења за моделирање, при чему

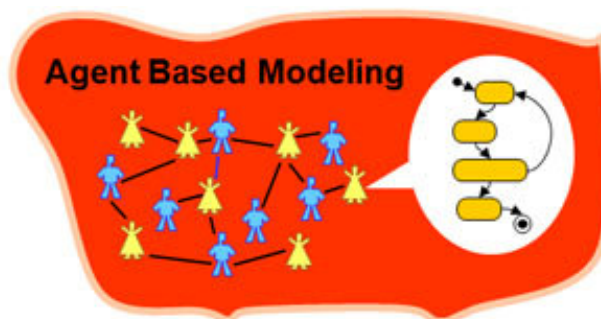
није потребно учити посебне програмске језике, па је могућа примена од стране ширег круга стручњака, не само информатичке струке.

### 5.3.3 Системи засновани на агентима

У новије време за моделирање система у дисконтинуалном времену користи се метода заснована на агентима (*Agent-Based Modeling - ABM*). Агенти су индивидуални објекти који могу имати интеракцију међусобно у одговарајућем окружењу. Саставни делови модела заснованог на агентима су скуп агената и њихових стања, правила која уређују интеракције агената и околина унутар које се агенти налазе. На темељу других агената, стања и правила, агент ће извести (или неће) неку акцију, која може утицати на друге агенте, његово стање или правило и околину (Хоџић, 2014).

Појава агентног моделирања везује се за познатог математичара Џ. Конвеја (*John Conway*) који је деведесетих година прошлог века креирао „Игру живота“ - први агентни модел. Игра живота садржи основне принципе моделирања заснованог на агентима и састоји се од појединачних објеката за које су дефинисана једноставна и прецизна правила. Објекти утичу једни на друге на основу чега се добија понашање система у дефинисаном простору.

Ова метода омогућава да се помоћу агената добију модели који боље осликавају понашање реалних система у односу на моделирање помоћу дискретних догађаја. Зависност између објеката представља се финије и тиме добијају прецизнији резултати.



Слика 5.11 – Моделирање засновано на агентима ([www.anylogic.com](http://www.anylogic.com))

Дакле, циљ моделирања овом методом је обликовање модела који су довољно једноставни како би се функционисање система могло разумети, а ипак довољно детаљни како би могли показати реално понашање. Области примене модела заснованих на агентима су логистика и оптимизација производње, моделирање понашања потрошача, социјална симулација, симулација саобраћаја и сл. Алати за агентно моделирање могу се користити и за оптимизацију модела и тестирање стабилности модела.

Доскоро није постојао комерцијално досупан софтвер за моделирање система заснованих на агентима. Све што је постојало биле су библиотеке за *C++* или *JAVA* програмски језик које су развијане експериментално у оквиру академских институција. Са спознајом могућности агентног моделирања повећава се и број комерцијално доступних алата. Како су агентни модели сложени и углавном захтевају добро познавање програмирања и програмских језика, све већи број компанија које производе софтвер за агентно моделирање нуде и услуге креирања модела на захтев клијената. Неки од софтвера су: *Any Logic*, *Swarm*, *MASON*, *NetLogo*, *Repast*.

#### **5.3.4 Динамички системи**

Модел динамичких система (*Dynamics System - DS*) налазе се на ниском нивоу апстракције који омогућава блискост реалном систему који се моделира. Стање динамичког система описано је скупом реалних бројева, а правила понашања система описују следеће стање које систем заузима на основу тренутног стања. Сва правила су детерминистичка и у датом временском интервалу могуће је само једно будуће стање након тренутног стања система. Релације између стања описане су диференцијалним једначинама. У поређењу са системском динамиком, разлика је у томе што променљиве код динамичких система представљају физичке особине објеката (нпр. брзина, убрзање, маса итд.). Доступни софтвери за решавање проблема динамичких система су: *MATLAB Simulink*, *VisSim*, *LabView*, *Easy5* и др.

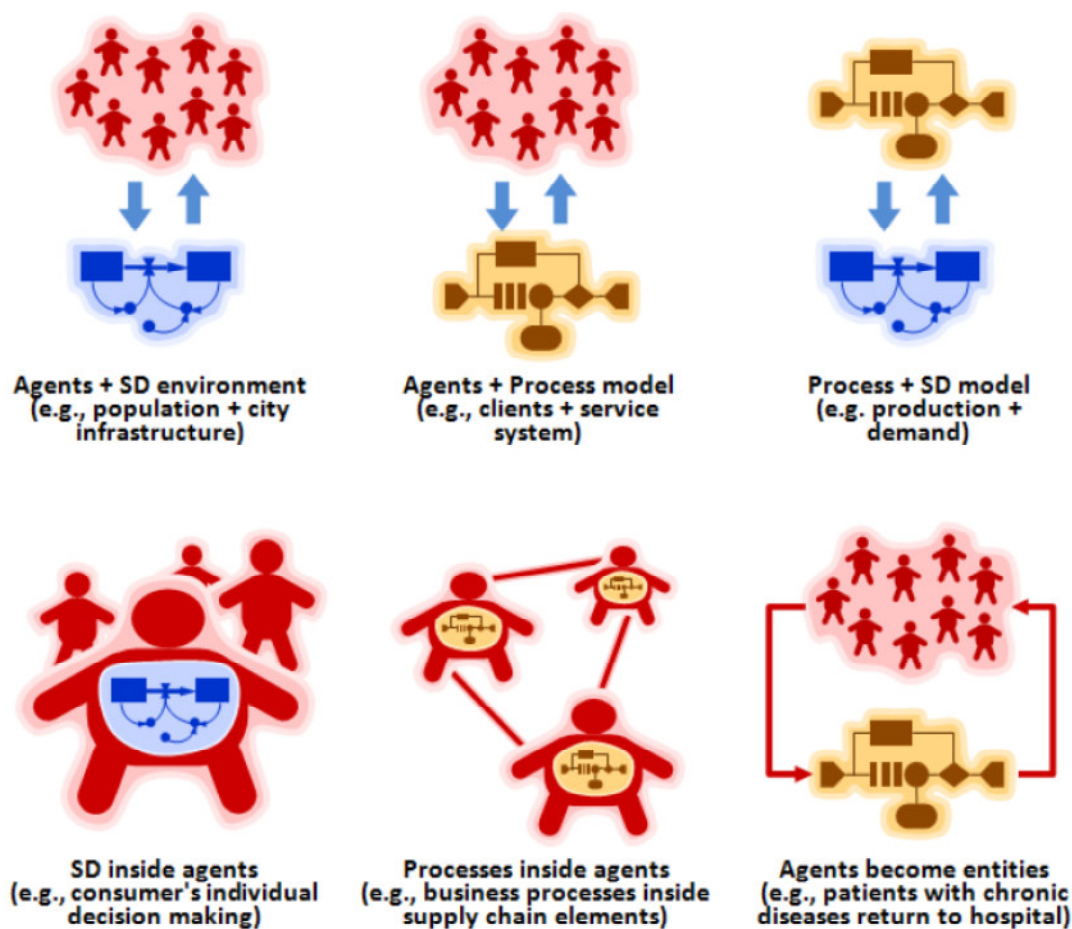
### **5.4 Однос између техника у симулационим моделима**

Конструкција прецизнијег модела са агентима на основу модела системске динамике могућа је помоћу дијаграма стања где се дефинише понашање агента. Агент може имати више дијаграма стања кроз која пролази током свог постојања, а који раде паралелно и постоји интеракција између њих. Модел системске динамике посматра се као низ скупова и токова између њих, где правила одлучивања контролишу токове између скупова.

У моделима дискретних догађаја већ се налазе појединачни ентитети што олакшава укључивање и примену модела са агентима - ентитети постају агенти. Скуп правила дефинисаних у блоковима дијаграма код методе дискретних догађаја може се

представити дијаграмима стања агената. Коришћење моделирања са агентима омогућава добијање модела ближих реалном систему у односу на моделирање системском динамиком или дискретним догађајима.

За прецизније и свеобухватније моделе може се посматрати могућност комбиновања поменутих техника (*Multi Method*) израдом тзв. хибридних модела (слика 5.12). Бројни су примери који се решавају хибридним моделима и већина реалних проблема захтева комбиновање техника.



Слика 5.12 – Неки модели засновани на мулти-методи (Borshchev, 2013)

## 5.5 Програмски пакет за симулацију - *Any logic*

*Any logic* је софтверски пакет развијен од групе научника и програмера које се не баве моделирањем и зато није коришћен ниједан специфичан приступ креирању модела. Тежило се креирању алата које ће моћи да се користи за моделирање сложених реалних

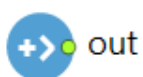
проблема. Како је *Any logic* објектно-орјентисан алат, могуће је доста лако креирање поузданих модела у визуелном окружењу, али је остављена могућност коришћења *JAVA* језика за дефинисање и имплементацију специфичних структура.

*Any logic* је јединствен софтвер за симулацију који подржава три методе симулационог моделирања: системску динамику, дискретне догађаје и агентно моделирање, али пружа и могућност комбиновања ових метода креирањем хибридних модела. Израда модела у овом програму брза је и једноставна у визуелном окружењу због могућности коришћења специфичних библиотека, флексибилности, 3D анимације. *JAVA* окружење пружа неограничене могућности проширења функционалности модела, а 3D анимација обезбеђује ефикасну комуникацију резултата пројекта и боље разумевање детаља. На крају, *Any logic* модели могу да се користе као потпуно самосталне функционалне *JAVA* апликације које могу бити покренуте било где без инсталираног *Any logic* софтвера.

За формирање модела методом дискретних догађаја у *Any logic* програмском пакету користе се блокови који описују одређено стање у процесу. Постоји велики број различитих блокова у библиотеци софтвера, као и неколико специјално намењених библиотека за решавање специфичних проблема, као што су проблем пешака (*Pedestrian Library*), железнички саобраћај (*Rail Library*), проблем флуида (*Fluid Library*). Блокови су међусобно повезани конекторима (*connectors*). У сваком блоку, у зависности од врсте, дефинисане су потребне особине, као што су нпр: име (*name*), тип (*type*), трајање (*delay time*), капацитет (*capacity*), максимални капацитет (*maximum capacity*), локација агента (*agent location*), акције у различитим тренуцима (*action: on enter, on at exit, on exit, on remove, ...*), тип агента (*agent type*), итд.

У овом раду је формиран модел комбинацијом методе дискретних догађаја и методе засноване на агентима. Коришћене су и карте стања (*state charts*) за приказ понашања појединих делова система.


У даљем тексту приказани су и укратко описани блокови коришћени у моделу (*Process Modeling Library Blocks*).





*Source* (извор) је блок који се користи најчешће за почетак процеса, он генерише агенте и има само излазни порт. Агенти могу бити стандардни или било који други тип, а исто тако могу бити и ресурси. Дефинише се да ли је у питању појединачни агент или популација агената. У овом блоку додељују се





параметри агенту и наводи акција која мора бити извршена пре изласка агента из овог блока. Више је начина за дефинисање када и како ће агенти бити генерисани: временом међудолазака, одређеним темпом, тачним распоредом времена и количина или позивањем одређене функције. Може се подесити број агената у сваком доласку и ограничити укупан број долазака. У неким случајевима има смисла користити два или више *source* блокова који раде паралелно како би омогућили сложене шеме долазака.

 *Sink* (излаз) је блок који се користи искључиво као крајња тачка процеса и има само улазни порт. Као и код извора могуће је дефинисати акције које морају бити извршене на улазу.

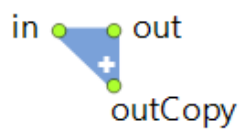
 *Delay* (задржавање) задржава агента за одређено време које се динамички процењује и може бити и стохастичко или зависити од агената или неких других услова. Има улазни и излазни порт у којима се могу дефинисати разне акције. Постоји могућност ограничавања капацитета.

 *Queue* (ред чекања) је блок који се користи да прикаже чекање агената на прихватање у наредни блок у дијаграму процеса или генерално за складиштење агената. Агенти напуштају ред по је једном од принципа: *FIFO* (*First-in; First-out*), *LIFO* (*Last-in; Last-out*), на основу приоритета или поређења агената. Поред улазног и излазног порта, овај блок има још два порта: у случају да је ред пун, агент може изаћи из реда преко *outPreempted* порта, или ако је искоришћено максимално време чекања, агент напушта ред преко *outTimeout* порта. На улазу и излазу могу се задати различите акције које описују понашање агената. Капацитет реда може бити ограничен или се може динамички мењати.

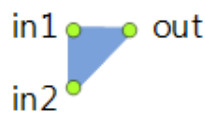
 *SelectOutput* (избор излаза) омогућава агенту да изабере излаз између два понуђена у зависности од услова који могу бити детерминистички или пробабилистички. Услови могу зависити од агената или неких других фактора. Агент проводи нула времена у овом блоку. Има један улазни и два излазна порта: *outT*, уколико је услов тачан и *outF*, уколико је услов погрешан.

 Блок *Hold* (држање) служи за блокирање кретања агената према појединим блоковима. *Hold* не држи агенте унутар (осим за време

једнако нула) и може се третирати као продужење улазног или излазног порта суседних блокова.



Блок *Split* (раздвајање) има функцију да за сваки улазни агент („оригинал“) креира један или више агената и шаље их кроз *outCopy* порт. Нови, креирани агенти могу бити копија улазних агената или произвољног типа. Број нових агената може бити променљив динамички. Цела операција не троши време у моделу; не постоји задржавање у овом блоку. Могу бити задате различите акције за извршавање, на улазном порту, на излазу оригинала, као и копије.



Насупрот претходном, блок *Combine* (спајање) ума улогу да изврши спајање два агента произвољног типа који улазе кроз улазне портове 1 и 2, и изврши формирање потпуно новог агента или већ постојећег оригиналног са потребним модификацијама. Нови агент излази кроз излазни порт и нема задржавања у овом блоку. Овај блок може бити коришћен у различите сврхе, нпр. као место синхронизације (дозвола да агент иде даље тек када стигне други агент), за придруживање копије агената формираних у *Split* блоку, итд.



*ResourcePool* (ресурс) блок дефинише ресурсе који могу бити коришћени од стране агената у појединим блоковима у дијаграму процеса. Могућа су три типа ресурса: статички или стационарни (*static*), мобилни (*moving*) и преносиви (*portable*). Статички ресурси су везани за одређену локацију и не могу да се крећу или да буду померени. Мобилни ресурси могу сами да се крећу, као што су радници, возила, и др. Преносиви ресурси могу бити померани, премештани од стране агената или мобилних ресурса, као нпр. материјал, опрема, уређаји, итд. Сваки ресурс може бити неактиван (*idle*) или заузет (*busy*). Обај блок прикупља статистику искоришћености ресурса, као проценат заузетих јединица.

*outPreempted* *outTimeout*



*Service* (сервис) блок представља комбинацију блокова *Seize* (прихватање ресурса) *Delay* (задржавање) и *Release* (ослобађање ресурса). Има један улазни и три излазна порта. После улазног порта постоји ред чекања који може да има ограничење у капацитету. Излаз из реда је могућ у случају да је ред пун, преко *outPreempted* порта, или ако је искоришћено максимално време чекања, агент напушта ред преко *outTimeout*

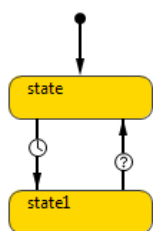
порта. Трећи случај је задржавање ради извршења потребног рада и излаз преко *out* порта. Као и код осталих блокова, и код *service* блока могућа је примена различитих параметара и извршавање различитих акција.



*TimeMeasureStart* (почетак мерења времена) је блок који се поставља на место у дијаграму процеса од кога почиње мерење времена које агент проведе у систему.



*TimeMeasureEnd* (крај мерења времена) је блок који се поставља на место у дијаграму процеса где се завршава мерење времена које агент проведе у систему. Важно је да ова два блока морају бити коришћена у пару, тј када агент прође кроз *TimeMeasureStart* блок, обавезно мора проћи и кроз блок *TimeMeasureEnd*. Статистика о времену проведеном у систему између ова два блока приказује се у облику хистограма или у облику података табеларно.



*Statecharts* (карте стања) служе за дефинисање сложеног понашања објеката које није могуће исказати догађајима или динамичким догађајима. Ови дијаграми стања састоје се од блока стања (*state*) и прелаза или транзиција (*tranzitions*). Прелази могу бити изазвани условима које корисник дефинише: временским тренуцима (*Timeout*), темпом (*Rate*), порукама (*Message*), Буловим условима (*Boolean conditions*), итд. Извршавање транзиција може да доведе до промене стања где нови сет прелаза постаје активан. Коришћењем ових дијаграма може се приказати широк спектар дискретних понашања, као што су: заузет/слободан, отворено/затворено, и др.





*Parameters* (параметри) се често користе за приказ неких карактеристика (особина) објеката који се моделирају. Агенти могу да имају параметре који описују њихове особине. Параметри могу бити статички (на горњој слици), динамички (на доњој слици) или се може дефинисати акција која се извршава на промену параметра. Углавном су параметри константне вредности у појединачним симулацијама и могу се мењати онда када се жели подешавање модела. Сви параметри су видљиви и могуће их је мењати и током трајања симулације.



*Variables* (променљиве) се генерално користе за чување резултата симулације или за моделирање неких података или карактеристика објеката, који се мењају током симулације. Променљивој се додељује почетна вредност, а уколико је потребно да се

променљива мења по некој алгебарској формули треба користити динамичке променљиве (*Dynamic Variable*).

 *Functions* (функције) омогућују детаљније и тачније описивање процеса који се моделира. Функција враћа вредност израза сваки пут када буде позвана у моделу. Корисне су када постоји потреба за поновним коришћењем исте функције на више места у моделу. Писање функција у *JAVI* пружа све предности тог језика, као што су условни и циклични оператери, гране и још много тога.

 *Event* (догађај) је најједноставнији начин приказа неке акције у моделу. Могу бити изазвани на три начина: неким одређеним временским тренутком (*Timeout triggered event*), условом (*Condition triggered event*) и током независних догађаја (*Rate triggered event*).

## 5.6 Изгада симулационог модела

### 5.6.1 Уопште

Са појавом рачунара појавила се могућност једноставне примене симулација грађевинских процеса при решавању проблема везаних за њихову стохастичност. На тај начин симулација је постала важан алат за планирање и проучавање радних процеса. Она омогућује анализу интеракције појединих ресурса који остварује сам радни процес и уочавање подручја где би се могли појавити проблеми. Идентификују се кључни чиниоци који диктирају понашање система, а израдом различитих сценарија могуће је истраживати различите комбинације технолошких и организационих решења и одабрати оптимално решење.

Као и многи други процеси у грађевинарству, и процес бетонирања, који је предмет проучавања у овом раду, је стохастичке природе. Због свог случајног карактера овај систем није могуће моделирати на детерминистички начин, користећи просечне податке као улаз, јер би продуктивност и трајање добијени на овај начин били нетачни, због неузимања у обзир било каквих ефеката од догађаја случајног карактера. На пример, време трајања циклуса миксера варира у одређеним границама у зависности од различитих услова, као што су: техничка оспособљеност возила, квалификације возача, временски услови, услови и стање пута итд., трајање утовара миксера мења се у

зависности од запремине коша (није увек могуће радити са возилима исте запремине коша), техничке оспособљености бетонске базе и др., оствариви учинак пумпе зависи од врсте и димензија елемената који се бетонира, техничких карактеристика пумпе, вештина руковаоца, старости пумпе итд. Очекивано је чекање миксера у реду, јер је мало вероватно да следећи миксер стигне у тренутку одласка претходног; ако миксер стиже касније продужава се процес, долази до чекања пумпе и радника. Према томе, процес бетонирања је систем стохастичког карактера чије се понашање не може са сигурношћу унапред предвидети, али се могу одредити вероватноће промене његовог стања. Са друге стране, процес бетонирања може се посматрати као систем чија се стања мењају дисконтинуално у времену тј. у појединим временским тренуцима – дискретни систем.

Симулациони експерименти најчешће се изводе са циљем да се прикупе одређене информације, чије би добијање путем експеримента над самим реалним системом било непрактично, неизводљиво или сувише скупо. Те информације касније служе за доношење одлука значајних за управљање реалним системом. Циљ симулације је проучавање понашања система који је предмет симулације, али и анализа како би се исти систем понашао када би на њега деловао неки други скуп променљивих околности (улазних величина и параметара).

Да би симулациони модел био примењив са аспекта грађевинарства, он треба да буде представљен графички. Према мишљењу стручњака из праксе, системи који су претежито аналитички и теоријски немају своју практичну примену. Из тог разлога симулациони системи треба да буду приказани сликовито или шематски, са наглашеним улазним и излазним параметрима. Симулација даје утолико боље резултате уколико је удео машинског рада у процесу већи, јер се такве операције једноставније моделирају у односу на операције које захтевају претежно ручно извођење. Симулациони модел заснован на дискретним догађајима најбоље се показује у случају комплексних грађевинских процеса и операција, док је у случају релативно једноставних процеса бесмислено спроводити анализу помоћу симулације.

### 5.6.2 Припрема улазних података

Квалитет симулационог процеса зависи од квалитета формираног модела и квалитета улазних података. Припрема улазних података подразумева:

- Сакупљање улазних података;
- Постављање хипотезе о расподели вероватноћа улазних података;
- Процена вредности параметара одабране расподеле;
- Тестирање слагања одабране расподеле са улазним подацима.

За потребе овог дела рада – формирање симулационог модела, прикупљени подаци на градилиштима статистички су обрађени помоћу *XLSTAT 2014* програмског додатка *EXCEL-a*. После тестирања узорак на присуство изузетних вредности (*outlier-a*) применом Грубсовог теста (*Grubbs test for outliers*), на основу израза (3.1) и (3.2) који су дати у поглављу 3, извршена је статистичка анализа и дате одговарајуће расподеле вероватноћа. Све добијене расподеле вероватноћа приказане су као вредности одговарајућих параметара у моделу који су коришћени самостално или за формирање одговарајућих функција или су параметри расподела коришћени директно за приказ трајања појединих процеса и операција.

#### **Брзина кретања миксера при превозу бетона до градилишта**

Подаци о трајању превоза бетона од фабрике бетона до градилишта, сакупљени снимањем процеса, подељени су у две групе у зависности од трасе транспорта: превоз кроз град и превоз ван града. Примећено је да се постижу различите средње брзине за ова два начина; мање брзине су оствариване, наравно у првом случају, због утицаја семафора, раскрсница, градске гужве, итд. На основу удаљености одговарајуће фабрике бетона од посматраног градилишта и постигнутог времена транспорта, израчунате су брзине кретања миксера, сортиране у односу на трасу превоза и добијене одговарајуће теоријске функције расподела вероватноћа.

За превоз бетона до градилишта у случају градске вожње добијено је да је брзину кретања најбоље представити функцијом *Beta4* расподеле, која је дата густином функције:

$$g(x) = \frac{1}{B(a, b)} \frac{(x - c)^{a-1} (d - x)^{b-1}}{(d - c)^{a+b-1}}, \quad c \leq x \leq d \quad (5.1)$$

где је:

$a, b$  ( $a > 0, b > 0$ ) – параметри облика,

$c, d$  ( $c, d \in R, c < d$ ) – најмања и највећа вредност случајне променљиве.

*Beta4* функција служи за описивање разних појава које се карактеришу случајним величинама чије су вредности у коначном интервалу.

Тестирана је нулта хипотеза: разматрана емпиријска расподела има одлике *Beta4* расподеле и алтернативна хипотеза: разматрана емпиријска расподела нема одлике *Beta4*. На основу теста *Колмогоров-Смирнов-а* (табела 5.2), како је  $p$ -вредност 0.834 далеко већа од  $\alpha=0.05$ , прихвата се нулта хипотеза на нивоу поверења 95%. Ризик за одбијање нулте хипотезе ако је тачна износи 83.36%. У табели 5.3 дати су параметри *Beta4* расподеле за остварену брзину кретања.

Табела 5.1 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварену брзину превоза кроз град

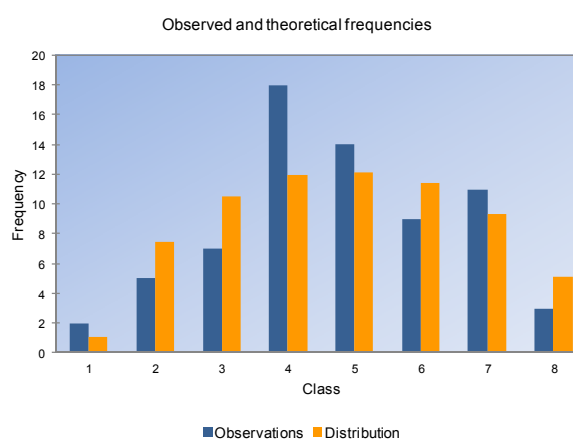
Табела 5.2 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске *Beta4* расподеле

Табела 5.3 – Параметри *Beta4* расподеле вероватноћа

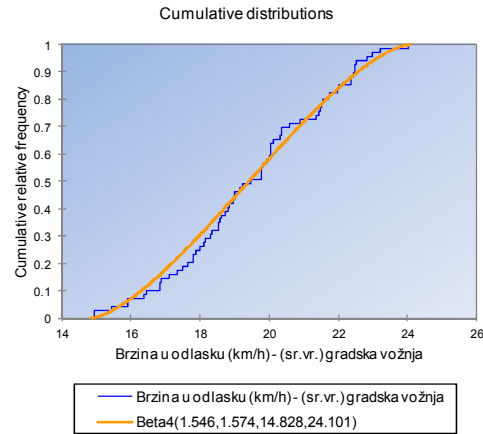
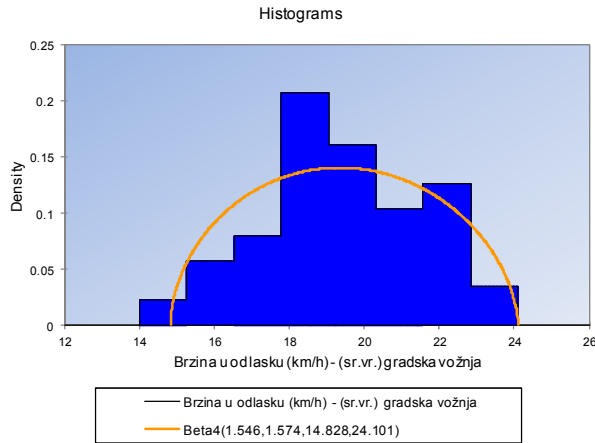
Distribution	p-value
<b>Beta4</b>	<b>0.834</b>
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.062
Gamma (1)	0.012
Gamma (2)	0.696
GEV	0.823
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.723
Logistic	0.630
Normal	0.738
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.715
Weibull (3)	0.782

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.074
p-value	0.834
alpha	0.05

Parameter	Value	Standard error
a	1.546	0.247
b	1.574	0.252
c	14.828	0.314
d	24.101	0.000



Слика 5.13 – Фреквенције остварене брзине и теоријских вредности *Beta4* расподеле вероватноћа



Слика 5.14 – Хистограм расподеле вероватноћа остварене брзине и теоријских вредности Beta4 расподеле

Слика 5.15 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене брзине

За случај ванградске возње добијено је да је брзину кретања најбоље представити, такође функцијом *Beta4* расподеле, са мало другачијим вредностима параметара (табела 5.6).

Табела 5.4 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварену брзину превоза ван града

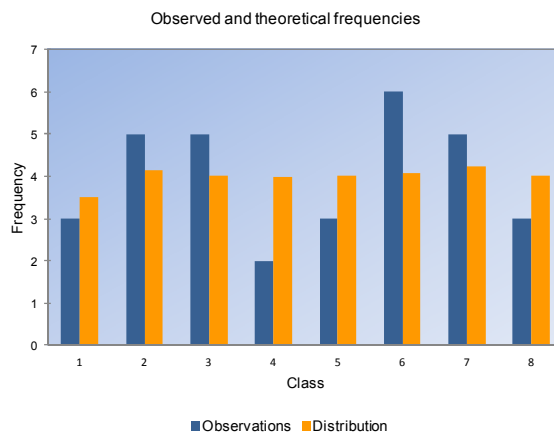
Табела 5.5 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Beta4 расподеле

Табела 5.6 – Параметри Beta4 расподеле вероватноћа

Distribution	p-value
<b>Beta4</b>	<b>0.887</b>
Chi-square	0.240
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.096
Gamma (1)	0.033
Gamma (2)	0.389
GEV	0.612
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.395
Logistic	0.538
Normal	0.548
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.644
Weibull (3)	0.465

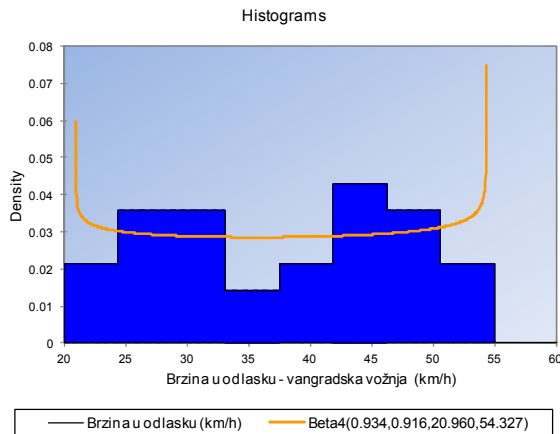
Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.100
p-value	0.887
alpha	0.05

Parameter	Value	Standard error
a	0.934	0.216
b	0.916	0.211
c	20.960	1.516
d	54.327	0.000

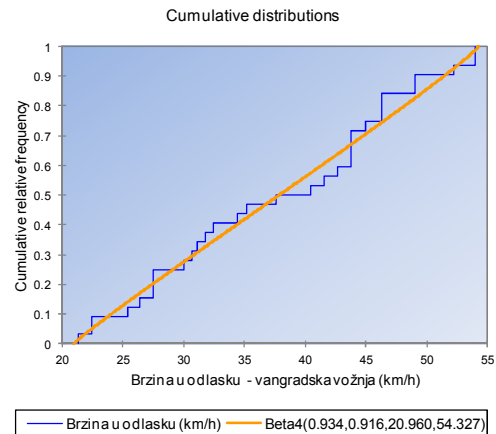


Слика 5.16 – Фреквенције остварене брзине и теоријских вредности Beta4 расподеле вероватноћа





Слика 5.17 – Хистограм расподеле вероватноћа остварене брзине и теоријских вредности Beta4 расподеле



Слика 5.18 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности остварене брзине

Како није било могућности праћења кретања миксера у повратку (од градилишта до фабрике бетона) узете су исте функције и исти параметри у моделу за приказ брзине и кретања у повратку.

### Позиционирање миксера

Време потребно за позиционирање (паркирање) миксера у положај за истовар бетона у кош пумпе представљено је одговарајућим расподелама вероватноћа у зависности од приступа за паркирање: паркирање у оквиру градилишта и паркирање са улице. На градилишту је углавном омогућен простор за несметано кретање миксера при позиционирању. Са друге стране, уколико је скучен простор градилишта и положај објекта је такав да се пумпа налази на улици или тротоару, па је потребно и да миксер буде на улици, његово маневрисање и постављање у одговарајући положај зависиће од тренутног стања саобраћаја (чекање на пролаз возила и пешака, и др.). Сва мерена времена позиционирања миксера подељена су у две групе у зависности од приступа и добијене су различите функције расподела вероватноћа. За позиционирање миксера у оквиру градилишта, време је представљено функцијом *Weibull* (3) датом изразом (5.2):

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-c}{b}\right)^a\right\}, \quad x > c \quad (5.2)$$

где је:

$a$  ( $a > 0$ ) – параметар облика,

$b$  ( $b > 0$ ) – параметар скалирања,  
 $c$  ( $c \in R$ ) – параметар локације

За позиционирање миксера са улице, време је представљено функцијом *Log-normalne* расподеле дате изразом за густину функције:

$$g(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad x > 0 \quad (5.3)$$

где је:

$m$  ( $m \in R$ ) – параметар облика,  
 $\sigma$  ( $\sigma > 0$ ) – параметар скалирања

Табела 5.7 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време поз. на градилишту

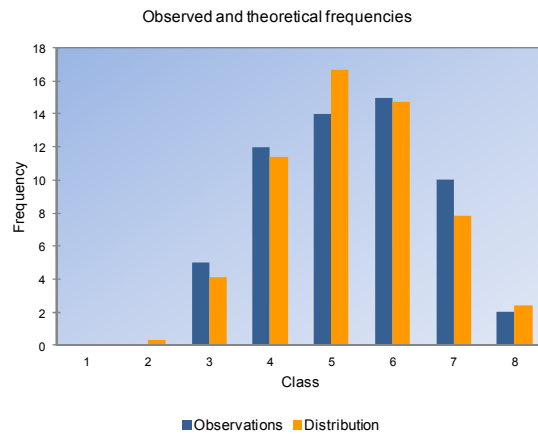
Табела 5.8 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле

Табела 5.9 – Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа

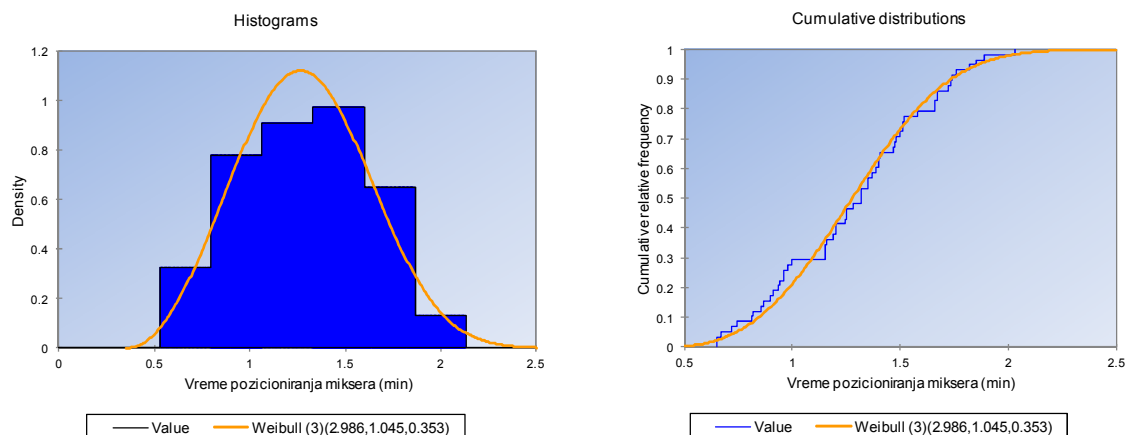
Distribution	p-value
Beta4	0.396
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.016
Gamma (1)	< 0.0001
Gamma (2)	0.696
GEV	0.790
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.426
Logistic	0.655
Normal	0.779
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.779
<b>Weibull (3)</b>	<b>0.808</b>

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.083
p-value	0.808
alpha	0.05

Parameter	Value	Standard error
a	2.986	0.271
b	1.045	0.008
c	0.353	0.046



Слика 5.19 – Фреквенције оствареног времена позиционирања и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа



Слика 5.20 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена позиционирања и теоријских вредности Weibull(3) расподеле

Слика 5.21 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена позиционирања

Табела 5.10 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време позиционирања са улице

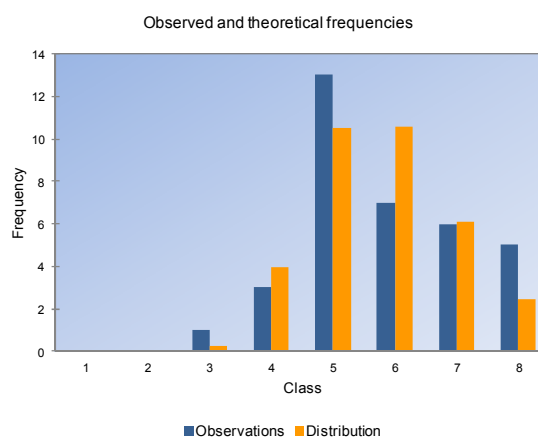
Табела 5.11 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Log-нормалне расподеле

Табела 5.12 – Параметри Log-нормалне расподеле вероватноћа

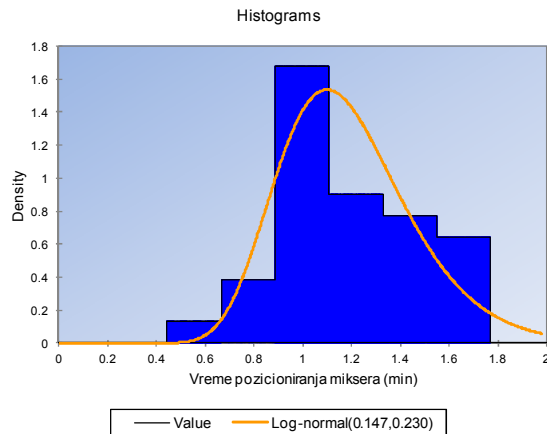
Distribution	p-value
Beta4	0.755
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.792
Gamma (1)	< 0.0001
Gamma (2)	0.921
GEV	0.781
Gumbel	< 0.0001
<b>Log-normal</b>	<b>0.950</b>
Logistic	0.768
Normal	0.717
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.598
Weibull (3)	0.745

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.086
p-value	0.950
alpha	0.05

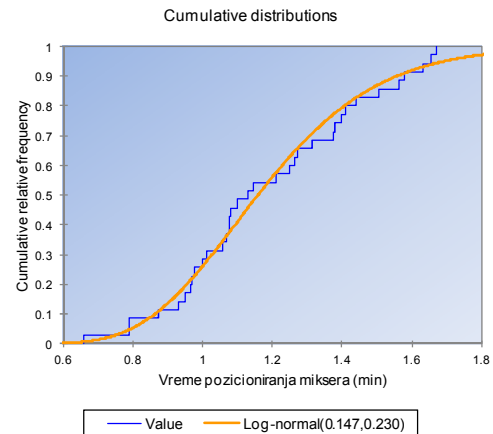
Parameter	Value	Standard error
m	0.147	0.414
sigma	0.230	0.030



Слика 5.22 – Фреквенције оствареног времена позиционирања и теоријских вредности Log-нормалне расподеле вероватноћа



Слика 5.23 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена позиционирања и теоријских вредности *Log-normal*не расподеле



Слика 5.24 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена позиционирања

### Истовар миксера

Време потребно да се изврши истовар миксера зависи од више различитих утицаја. Посматран је истовар миксера посебно при бетонирању стубова и/или зидова и посебно при бетонирању плоча, при чему је бетонирање плоча подељено у две групе: бетонирање пуних равних АБ плоча и бетонирање АБ плоча са гредама (пуне плоче и греде и „ферт“ међуспратне конструкције). Снимљена времена истовара појединих миксера у појединим наведеним случајевима сведена су на време истовара у минутима по једном метру кубном истовареног и уграђеног бетона. На овај начин добијена је функција расподеле вероватноћа при бетонирању стубова и зидова *Weibull* (3), која је искоришћена за формирање једног симулационог модела за прогнозирање продуктивности бетонирања стубова и/или зидова. За други симулациони модел за прогнозирање продуктивности бетонирања стубова и/или зидова време истовара миксера представљено је изразом (5.4) добијеним регресионом анализом.

При регресионој анализи у разматрање узете су следеће варијабиле: висина на којој се врши бетонирање стубова и зидова, број радника, старост пумпе, дOMET пумпе, уиграност радне бригаде и број елемената (стубова и зидова) који се бетонирају. У првом кораку регресије добијено је да су варијабле које немају било какву статистичку значајност (осенчене у табели 5.16): висина на којој се врши бетонирање стубова и зидова, број радника, старост пумпе и дOMET пумпе.

Табела 5.13 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време истовара миксера

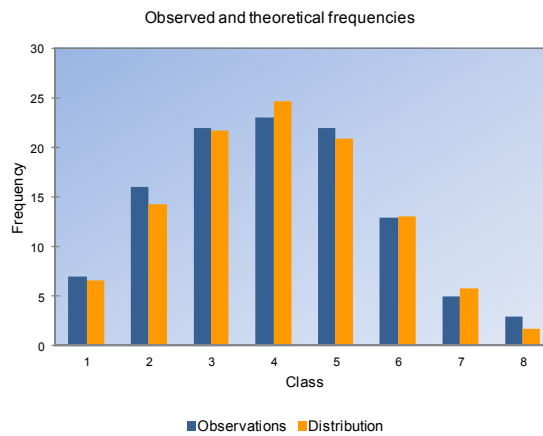
Табела 5.14 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле

Табела 5.15 – Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа

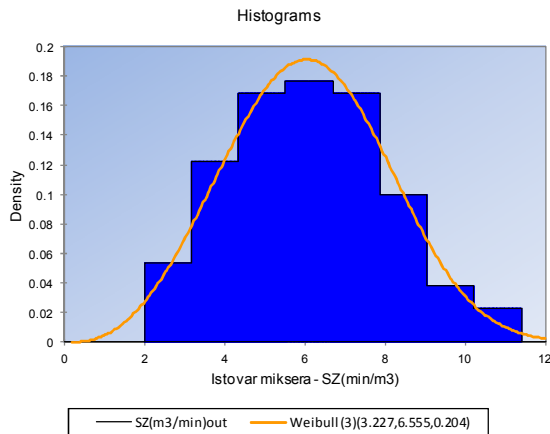
Distribution	p-value
Beta4	0.851
Chi-square	0.003
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.029
Gamma (1)	0.542
Gamma (2)	0.549
GEV	0.931
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.310
Logistic	0.821
Normal	0.907
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.982
<b>Weibull (3)</b>	<b>0.986</b>

Kolmogorov-Smimov test:	
D	0.043
p-value	0.986
alpha	0.05

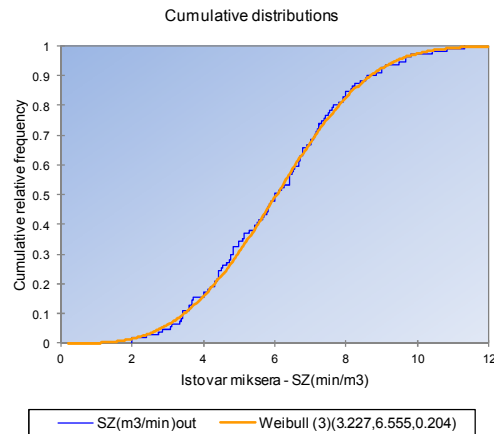
Parameter	Value	Standard error
a	3.227	0.205
b	6.555	0.092
c	0.204	0.211



Слика 5.25 – Фреквенције оствареног времена истовара и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа



Слика 5.26 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена истовара и теоријских вредности Weibull(3) расподеле



Слика 5.27 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена истовара

Варијабиле: уиграност радне бригаде и број елемената (стубова и зидова) који се бетонирају јесу статистички значајне јер је  $ItI > t_{kr}=2.01$ .

Објашњење за незначајност поменутих варијабила је исто као што је дато у потпоглављу 4.2. После елиминације наведених варијабли, спроведен је други корак анализе и добијен коначни облик регресионог модела за прогнозирање трајања истовара миксера по јединици мере ( $m^3$ ) при бетонирању стубова и зидова. У табели 5.18 (све варијабле су статистички значајне:  $P_r < 0,05$ ) дати су регресиони коефицијенти (*value*), а математички облик модела формулом (5.4).

Табела 5.16 Параметри модела  $Is(SZ)$  (први корак)

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	9.127	0.953	9.574	< 0.0001	7.216	11.037
V	0.000	0.000				
Br	0.000	0.000				
SP	0.000	0.000				
DP	0.000	0.000				
Urb	-1.619	0.408	-3.971	0.000	-2.436	-0.802
Bel	0.084	0.041	2.021	0.048	0.001	0.167

$$Is(SZ)_{prog} = 9.12673 - 1.61862U_{rb} + 0.08383B_{el} \quad (min/m^3) \quad (5.4)$$

где је:

$Is(SZ)_{prog}$  – прогнозирано време истовара миксера ( $min/m^3$ ),

$U_{rb}$  – уиграност радне бригаде,

$B_{el}$  – број елемената (стубова и/или зидова).

Табела 5.17 Оцена квалитета модела  $Is(SZ)$ 

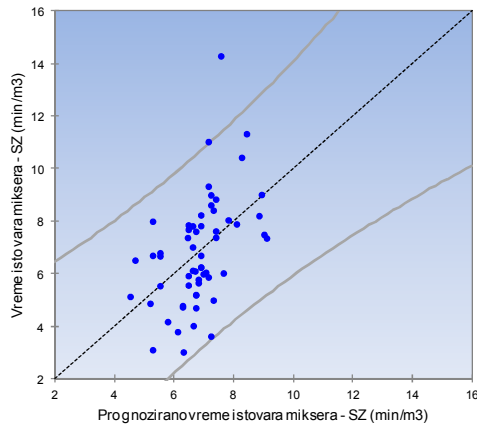
Goodness of fit statistics:	
Observations	58.000
Sum of weights	58.000
DF	55.000
R <sup>2</sup>	0.231
Adjusted R <sup>2</sup>	0.203
MSE	3.472
RMSE	1.863
DW	1.550

Табела 5.18 Параметри модела  $Is(SZ)$ 

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	9.127	0.953	9.574	< 0.0001	7.216	11.037
Urb	-1.619	0.408	-3.971	0.000	-2.436	-0.802
Bel	0.084	0.041	2.021	0.048	0.001	0.167

Табела 5.19 Оцена значајности модела  $Is(SZ)$ 

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	57.425	28.712	8.271	0.001
Error	55	190.933	3.472		
Corrected Total	57	248.358			



Слика 5.28 – Слагање оствареног и прогнозираног времена истовара  $Is(SZ)$

интервала поверења од 95%. Може се уочити да су само две тачке ван границе што чини свега 3,4% од укупног броја тачака.

За прогнозирање времена истовара миксера при бетонирању плоча, такође је спроведена регресиона анализа и добијен израз (5.5). При регресионој анализи показало се да су све варијабиле узете у разматрање статистички значајне. Испуњени су сви услови при регресионој анализи, као што је о томе детаљно објашњено у поглављу 4, и коначан модел са шест независних променљивих гласи:

$$Is(MK)_{prog} = 1.81013 + 1.295dp + 0.01986V + 0.00889U_{t,p} + 0.07231SP - 0.07121DP - 0.54425TP.P \quad (min/m^3) \quad (5.5)$$

где је:

$Is(MK)_{prog}$  – прогнозирано време истовара миксера ( $min/m^3$ ),

$dp$  – дебљина плоче (m),

$V$  – висина на којој се врши бетонирање (m),

$U_{t,p}$  – теоретски учинак пумпе ( $m^3/h$ ),

$SP$  – старост пумпе (год),

$DP$  – домет пумпе (m),

$TP.P$  – тип плоче (пуна АБ плоча).

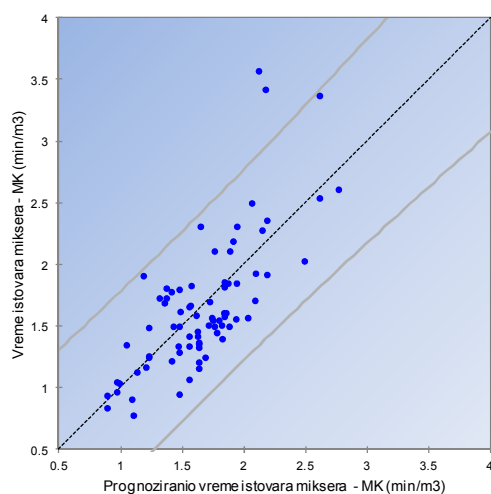
Оцена модела дата је кроз табеле 5.20 и 5.22, као и на дијаграму на слици 5.29.

Табела 5.20 Оцена квалитета модела  $I_s(MK)$ 

Goodness of fit statistics:	
Observations	78.000
Sum of weights	78.000
DF	71.000
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.536</b>
Adjusted R <sup>2</sup>	0.497
MSE	0.147
RMSE	0.384
DW	1.122

Табела 5.21 Параметри модела  $I_s(MK)$ 

Source	Value	Standard error	t	Pr >  t	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)
Intercept	1.810	0.737	2.456	0.016	0.341	3.280
dp	1.295	0.451	2.873	0.005	0.396	2.194
V	0.020	0.006	3.450	0.001	0.008	0.031
Ut,p	0.009	0.005	1.727	0.088	-0.001	0.019
SP	0.072	0.023	3.123	0.003	0.026	0.118
DP	-0.071	0.023	-3.069	0.003	-0.117	-0.025
TP-P	-0.544	0.093	-5.867	< 0.0001	-0.729	-0.359
TP-PG	0.000	0.000				

Табела 5.22 Оцена значајности модела  $I_s(MK)$ 

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	6	12.088	2.015	<b>13.684</b>	<b>&lt; 0.0001</b>
Error	71	10.453	0.147		
Corrected Total	77	22.541			

Слика 5.29 – Слагање оствареног и прогнозираног времена истовара  $I_s(MK)$ 

### Застоји при бетонирању

При извођењу радова, неминовно долази до различитих предвидивих и непредвидивих застоја. Већи застоји, као што су нпр. квар механизације, атмосферске прилике (јака киша при којој се прекидају радови, и сл.), застоји због накнадних радова (нпр. цурење бетона због попуштања лоше постављене оплате, и сл.) итд. нису предмет разматрања овог дела рада. Овде се, на основу свих мерених времена појединачних операција и процеса и укупног времена трајања бетонирања, као разлика јавља време које је узето у разматрање као застоји. У ово време урачунати су краћи застоји из различитих разлога, као на пример: чекање због потписивања отпремнице, краће поправљање и утезање оплате, поправљање намештене арматуре, намештање црева за наставак цевног вода пумпе, краћи одмори радника, узимање узорака бетона за контролу, чекање на одлуке, подмазивање пумпе, краће чекање због алата, итд. Уочено је да укупно време оваквих



застоја расте са порастом количине бетона па је у том смислу сведено су на метар кубни уграђеног бетона.

Табела 5.23 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време застоја

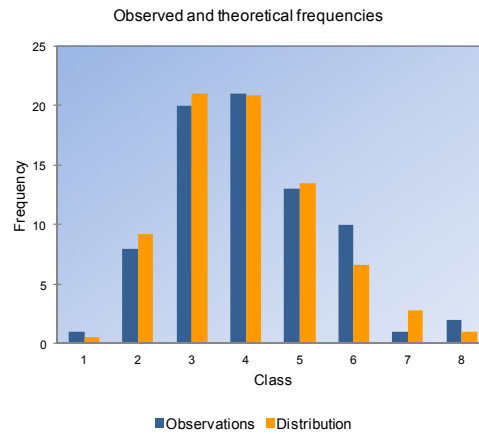
Табела 5.24 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Гамма(2) расподеле

Табела 5.25 – Параметри Гамма(2) расподеле вероватноћа

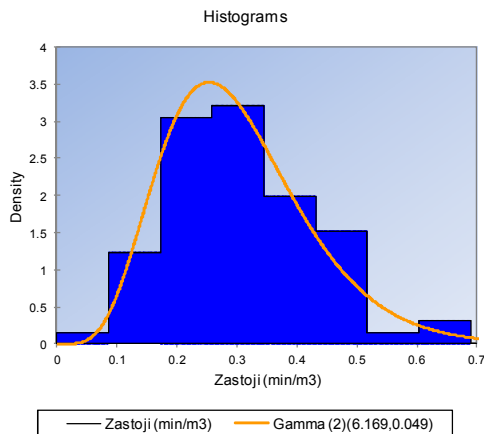
Distribution	p-value
Beta	0.968
Beta4	0.345
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.856
Gamma (1)	< 0.0001
Gamma (2)	0.999
<b>GEV</b>	<b>1.000</b>
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.498
Logistic	0.907
Normal	0.929
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.940
Weibull (3)	0.703

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.041
p-value	0.999
alpha	0.05

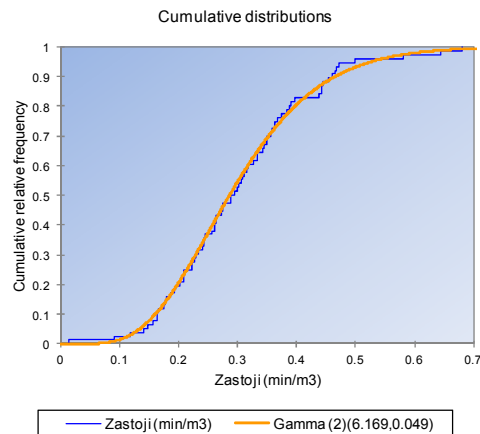
Parameter	Value
a	6.169
b	0.049



Слика 5.30 – Фреквенције оствареног времена застоја и теоријских вредности Гамма(2) расподеле вероватноћа



Слика 5.31 – Хистограм расподеле вероватноћа остварено времена застоја и теоријских вредности Гамма(2) расподеле



Слика 5.32 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена застоја

Узимање у обзир овог времена при изради симулационог модела доводи до боље и реалније прогнозе продуктивности. На основу израчунатих података извршена је статистичка обрада и добијено најбоље слагање са функцијом *GEV* (*Generalized Extreme Value*), табела 5.23. Међутим, како ова функција служи углавном за представљање екстремних вредности, функција *Gamma(2)* узета је као сасвим одговарајућа ( $p=0,999$ ) за приказ расподеле вероватноћа трајања застоја при бетонирању. Математички облик *Gamma(2)* функције већ је поменут у поглављу 3 где је дат изразом (3.4).

**Премештање пумпе у нови положај**

Чест је случај да пумпа не може да буде постављена у такав положај да изврши бетонирање свих потребних елемената са једног места. На то имају утицај многи фактори, од којих су најзначајнији: расположив простор градилишта, висина објекта у тренутку бетонирања и дOMET пумпе. После бетонирања одређеног дела објекта са једног места, врши се премештање пумпе на ново радно место.

Табела 5.26 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време премештања пумпе

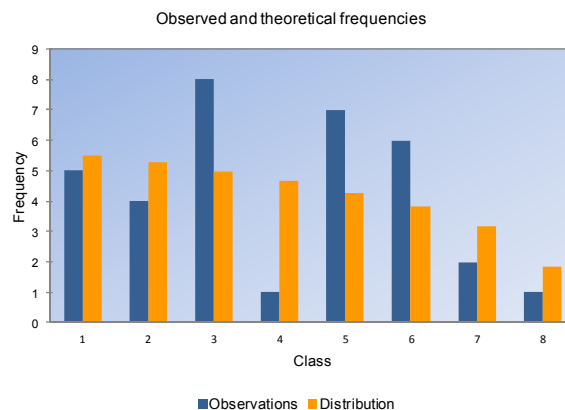
Табела 5.27 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Beta4 расподеле

Табела 5.28 – Параметри Beta4 расподеле вероватноћа

Distribution	p-value
<b>Beta4</b>	<b>0.869</b>
Binomial	< 0.0001
Negative binomial (1)	< 0.0001
Negative binomial (2)	0.057
Chi-square	0.159
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.127
Gamma (1)	0.017
Gamma (2)	0.422
GEV	0.684
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.437
Logistic	0.606
Normal	0.639
Normal (Standard)	< 0.0001
Poisson	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.714
Weibull (3)	0.687

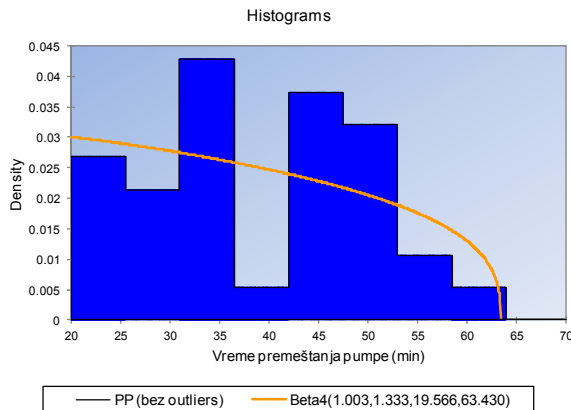
Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.100
p-value	0.869
alpha	0.05

Parameter	Value	Standard error
a	1.003	0.221
b	1.333	0.309
c	19.566	2.336
d	63.430	0.000

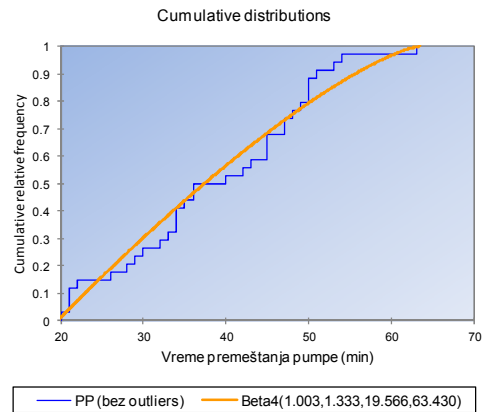


Слика 5.33 – Фреквенције оствареног трајања премештања пумпе и теоријских вредности Beta4 расподеле вероватноћа

Снимана времена потребна за премештање пумпе обухватају: време склапања пумпе, време померања на ново радно место и време расклапања пумпе и припреме да наставак бетонирања. На основу снимљених података добијено је да се ово време може представити функцијом *Beta4* расподеле вероватноћа датом изразом (5.1).



Слика 5.34 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена премештања пумпе и теоријских вредности *Beta4* расподеле



Слика 5.35 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена премештања пумпе

### Прање левка миксера

После извршеног истовара бетона на градилишту, приступа се прању левка миксера водом или само чишћењу преосталог бетона на левку лопатом. Такође, после утовара бетона у фабрици бетона врши се прање левка миксера. Пошто су на градилишту снимана ова времена, за случајеве: прање левка на градилишту и чишћење левка лопатом, извршена је статистичка обрада измерених времена. За случај прања левка, добијено најбоље слагање са функцијом *GEV*, табела 5.29. Из већ поменутог разлога функција *Weibull* (3) је узета за приказ расподеле вероватноћа времена прања миксера ВОДОМ.

На основу снимљених података о времену потребном за чишћење левка миксера лопатом добијено је задовољавајуће слагање са *Weibull*(3) расподелом.

Табела 5.29 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време прања миксера

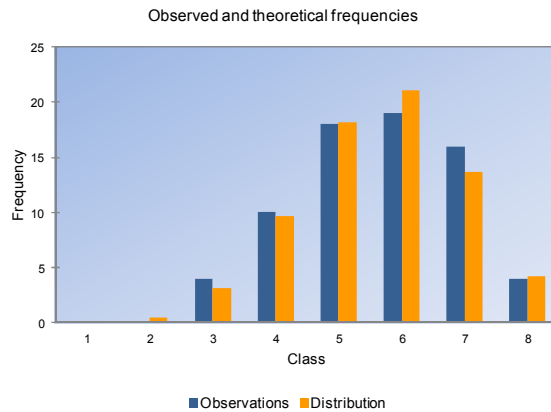
Табела 5.30 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле

Табела 5.31 – Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа

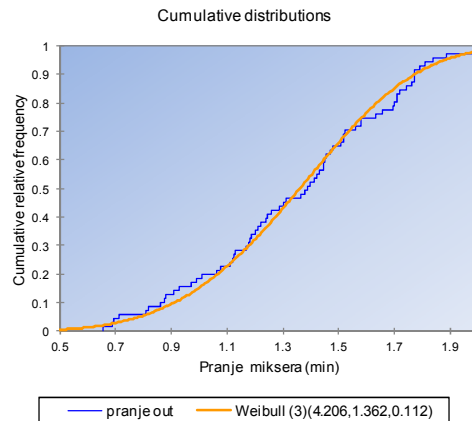
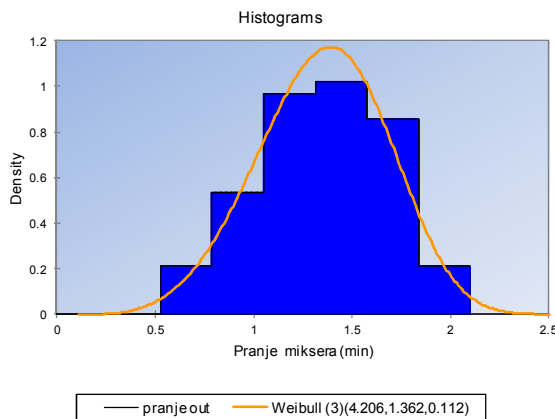
Distribution	p-value
Beta4	0.863
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	0.018
Gamma (1)	< 0.0001
Gamma (2)	0.567
<b>GEV</b>	<b>0.961</b>
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.388
Logistic	0.877
Normal	0.865
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.848
<b>Weibull (3)</b>	<b>0.845</b>

Kolmogorov-Smimov test:	
D	0.072
p-value	0.845
alpha	0.05

Parameter	Value	Standard error
a	4.206	0.358
b	1.362	0.032
c	0.112	0.050



Слика 5.36 – Фреквенције оствареног трајања прања миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа



Слика 5.37 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена прања миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле

Слика 5.38 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена прања миксера

Прање левка миксера у фабрици бетона није снимано, али због израде што реалнијег модела, на основу података добијених из базе, узета је иста функција за приказ овог трајања али са параметрима који показују двоструко дуже трајање овог процеса: Weibull(3) (4,437; 2,862; 0,090).

Табела 5.32 – Теоријске расподеле вероватноћа за остварено време чишћења миксера

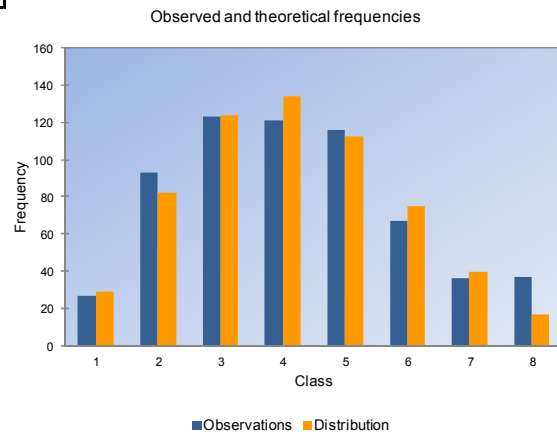
Табела 5.33 – Тестирање слагања емпиријске и теоријске Weibull(3) расподеле

Табела 5.34 – Параметри Weibull(3) расподеле вероватноћа

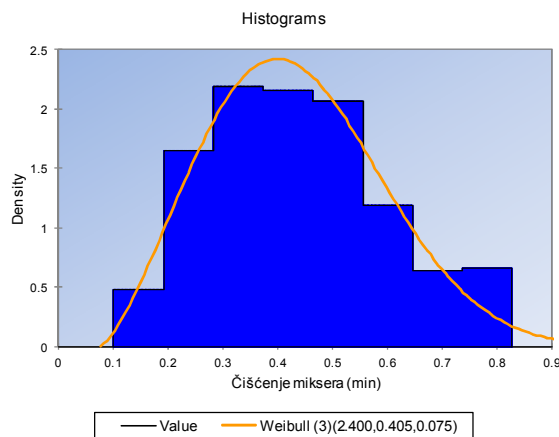
Distribution	p-value
Beta	0.057
Beta4	0.000
Chi-square	< 0.0001
Erlang	< 0.0001
Exponential	< 0.0001
Fisher-Tippett (1)	< 0.0001
Fisher-Tippett (2)	< 0.0001
Gamma (1)	< 0.0001
Gamma (2)	0.021
GEV	0.093
Gumbel	< 0.0001
Log-normal	0.000
Logistic	0.094
Normal	0.046
Normal (Standard)	< 0.0001
Student	< 0.0001
Weibull (1)	< 0.0001
Weibull (2)	0.112
<b>Weibull (3)</b>	<b>0.250</b>

Kolmogorov-Smirnov test:	
D	0.041
p-value	0.250
alpha	0.05

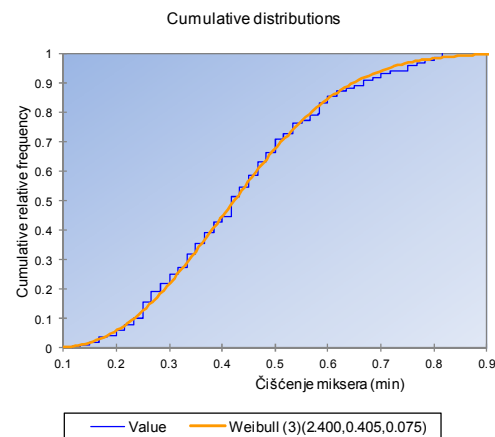
Parameter	Value	Standard error
a	2.400	0.063
b	0.405	0.004
c	0.075	0.005



Слика 5.39 – Фреквенције оствареног трајања чишћења миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле вероватноћа



Слика 5.40 – Хистограм расподеле вероватноћа оствареног времена чишћења миксера и теоријских вредности Weibull(3) расподеле



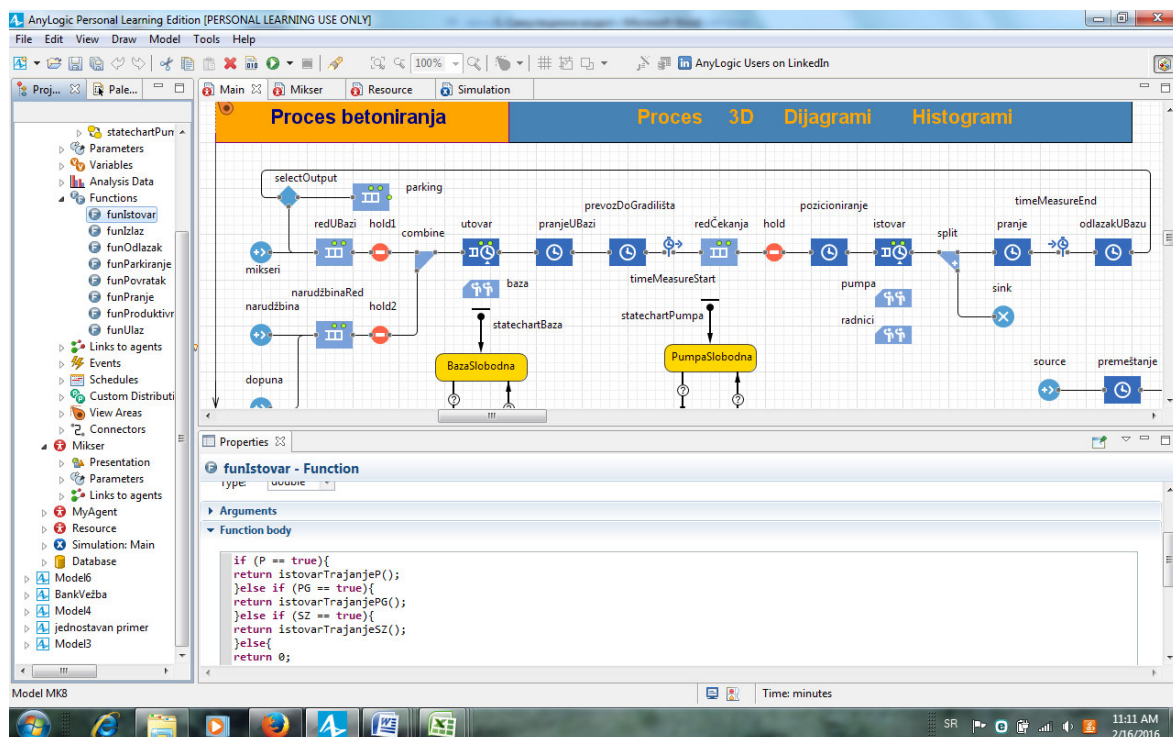
Слика 5.41 – Кумулативни приказ слагања емпиријских и теоријских вредности оствареног времена чишћења миксера

### 5.6.3 Опис симулационог модела процеса бетонирања

На основу искуства са градилишта о извођењу бетонских радова и прикупљених података о овом процесу, применом програмског пакета за симулацију Any logic

формирани су модели процеса бетонирања. Коришћени су напред описани блокови за представљање одређених процеса и операција при бетонирању. Модел у фази израде (писања функција *JAVA* методама, дефинисање параметара и варијабила, одређивање начина за презентацију излазних података, итд.) приказан је на слици 5.42.

Израда модела почиње дефинисањем блокова *source* (миксери, наруџбина, допуна) који омогућују генерисање агената. Блок, миксери генерише агента – миксере за превоз бетона, који су дефинисани популацијом миксера (*population: mikseri*), а доласци су дефинисани временом између долазака (*Interarrival time*) које може бити задато пре почетка симулације. Популација миксера, односно, параметри: број и капацитет миксера у једном циклусу дефинисани су у бази података (*Set agents parameters from DB*), у посебној *excel* табели која се ажурира при сваком покретању симулације. Блок, наруџбина, служи за генерисање агената који представљају количину бетона која треба да буде справљена. То је постигнуто на тај начин што је ограничен број долазака (*max number of arrivals*) параметром: број наруџбина који је дефинисан тако да има величину једнаку количнику између задате количине бетона (потребна количина бетона за справљање и уграђивање) и средње вредности запремине миксера у једном циклусу.



Слика 5.42 – Дијаграм процеса – модел процеса бетонирања

Ова средња вредност запремине миксера у једном циклусу добијена је дељењем количине бетона превезене у једном циклусу са бројем возила у једном циклусу. Трећи *source* блок на почетку – допуна, представља количину бетона коју још треба справити уколико недостаје. Генерише агента помоћу функције убризгавања, убацивања (*Call of inject() function*) што је регулисано догађајима *eventDopuna*.

После улазних блокова дефинисани су блокови који представљају редове чекања (*queue*): *redUBazi* и *narudzbinaRed*. Агенти се задржавају у овом блоковима док не буду испуњени услови за следеће извршавање. Излаз из ових блокова је могућ при испуњењу услова који су дефинисани у карти стања (*statechartBaza*) о спремности базе за нови утовар. Регулисање кретања агената, излазак из блока или останак у блоку врши се помоћу блокова *hold1* и *hold2*.

Блок *combine* служи за спајање, комбиновање агената: миксери и наруцбина, пре него што јединствени агент уђе у *service (utovar)* блок где се врши справљање бетона и утовар у бубањ миксера. Овом блоку додељен је блок ресурса: *resource (baza)*, статичног типа (*resource type: static*). Време потребно за утовар миксера дефинисано је кроз практични учинак базе и запремину бубња миксера, као детерминистичко, јер није било могућности за истовремено снимање и прикупљање података о раду базе у циљу стохастичког приказа и овог дела процеса. Међутим, и овај део је представљен на неки начин као стохастички увођењем претпостављених застоја при раду базе (припрема за нови циклус, разна краћа чекања, и сл.). Ови застоји су дефинисани одговарајућом расподелом вероватноћа и представљени динамичким параметром.

После утовара, а пре одласка миксера на градилиште, потребно је извршити прање левка миксера од растуреног бетона приликом утовара. Овај део процеса представљен је блоком *delay (prnjeUBazi)* где је за трајање операције узето време претпостављено расподелом вероватноћа *Weibull(3)* функцијом.

Даље следи превоз бетона до градилишта који је представљен блоком *delay (prevozDoGradilišta)* где се за време извршења користи податак о удаљености базе од градилишта, као и функције (*funOdlazak*) којом је дефинисана брзина кретања миксера у зависности од трасе (у граду или ван града). Просечне брзине превоза градом, као и за случај ванградске вожње, представљене су *Beta4* расподелом вероватноћа одговарајућим динамичким параметрима.

---

Следећи блок *timeMeasureStart*, као и блок *timeMeasureEnd*, после прања миксера на градилишту убачени су у циљу мерења времена проведеног на градилишту.

По доласку миксера на градилиште, уколико је пумпа заузета, што је дефинисано картом стања (*statechartPumpa*), миксери одлазе у ред чекања (*redČekanja*). Блок *hold* спречава излазак агента из реда док за то не буду испуњени услови: да су блокови *pozicioniranje*, *istovar* и *pranje* слободни, што омогућује поменута карта стања. Излазак миксера из блока дефинисан је принципом *FIFO (First-in; First-out)* - први дошао први изашао.

Позиционирање миксера у положај за истовар представљено је блоком *delay (pozicioniranje)* где је трајање ове операције дато функцијом (*funParkiranje*) која користи динамичке параметре са одговарајућим расподелама вероватноћа: *Weibull(3)* за случај паркирања миксера у оквиру градилишта и *Log-normal* расподелу за случај паркирања са улице.

Након позиционирања агент улази у *service (istovar)* блок где се врши истовар бетона из миксера и уграђивање пумпом. Време потребно за истовар миксера дефинисано је производом запремине миксера и функцијом (*funIstovar*) која помоћу параметара у зависности од елемената који се бетонирају користи: расподелу *Weibull(3)* за случај бетонирања стубова и зидова - за прву варијанту, односно израз (5.4) - за другу варијанту, или у случају бетонирања АБ плоча или АБ плоча са гредама користи израз (5.5). Овом блоку додељени су блокови ресурса: *resource (pumpa)*, статичног типа (*resource type: static*) и *resource (radnici)*, мобилног типа (*resource type: moving*).

Посебан дијаграм процеса: *source1 – delay (početakGradilište) – sink2*, искоришћен је због рачунања времена посебно од тренутка доласка миксера на градилиште. Ово време је потребно за израчунавање остварене продуктивности и оствареног трајања бетонирања. У блоку (*source1*) дефинисано је генерисање агента само једном (при доласку првог миксера на градилиште) помоћу догађаја *eventPočetakBetoniranja* и функције (*Call of inject() function*).

Прање левка миксера после извршеног истовара представљено је блоком *delay (pranje)* где је трајање ове операције дато функцијом (*funPranje*) која користи динамичке параметре са одговарајућим расподелама вероватноћа: *Weibull(3)* за оба случаја прања



левка водом или само чишћења лопатом, са различитим параметрима расподела, о чему је у делу 5.6.2 детаљно објашњено.

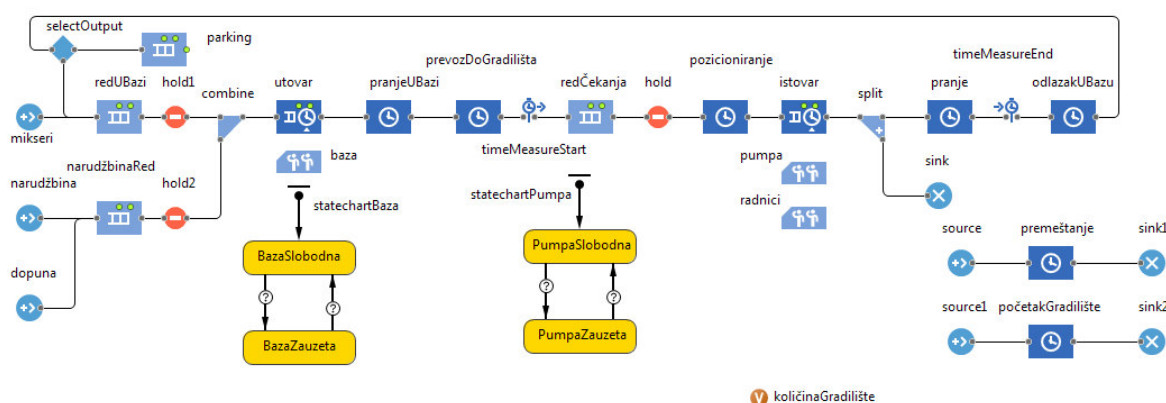
Након чишћења левка миксера од преосталог бетона следи његов повратак у базу: блок *delay (odlazakUBazu)* који за време извршења користи податак о удаљености базе од градилишта, као и функције (*funPovratak*) којом је дефинисана брзина кретања миксера у зависности од трасе (у граду или ван града). Просечне брзине превоза градом, као и за случај ванградске вожње, узете су исте као и брзине у одласку, што је из већ образложеног разлога објашњено.

Када миксер дође у базу наилази на блок *selectOutput* који омогућује избор излаза између понуђена два: уколико нема више наруџбина или их има онолико колико миксера чека у реду у бази, агент (миксер) одлази у ред (*parking*), односно, уколико је супротно, прикључује се реду чекања у бази.

Посебним дијаграмом процеса: *source – delay (premeštanje) – sink1*, представљено је премештање пумпе. У блоку (*premeštanje*) дефинисано је трајање премештања пумпе расподелом вероватноћа *Beta4*.

Симулација је подешена методом *finishSimulation* тако да се заврши када буде испуњен услов да блок (*parking*) буде заузет бројем возила у циклусу.

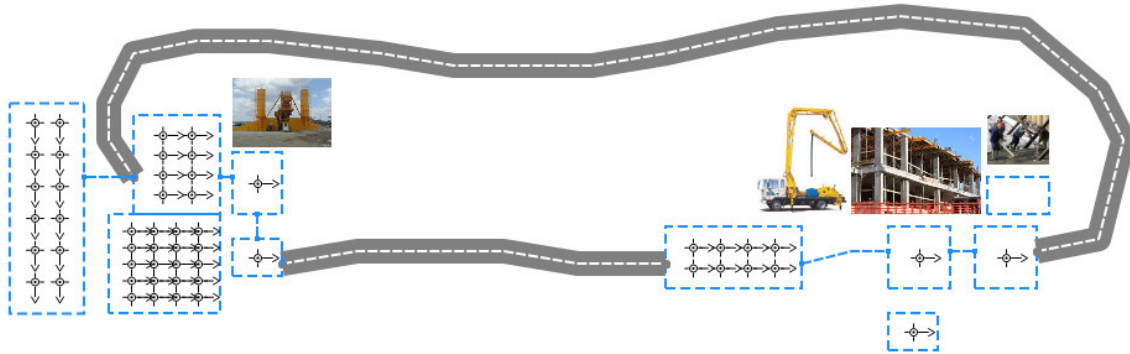
Процес бетонирања приказан је дијаграмом процеса на слици 5.43.



Слика 5.43 – Дијаграм процеса – модел процеса бетонирања

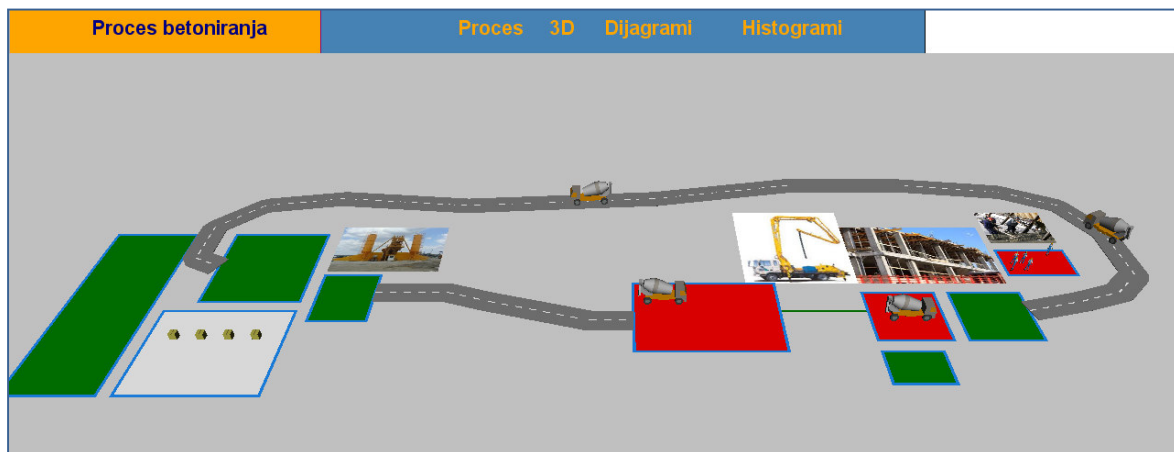
На основу свега реченог, коначно су формирана три различита симулациона модела: модел за симулацију бетонирања плоча (*SimModel(MK)*), модел за симулацију бетонирања стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено

*Weibull(3)* расподелом вероватноћа (*SimModel(SZ)*) и модел за симулацију бетонирања стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено регресионом једначином зависном од уиграности радне бригаде и броја стубова и/или зидова (*SimModel(SZ1)*).



Слика 5.44 – Модел процеса бетонирања – 2D приказ

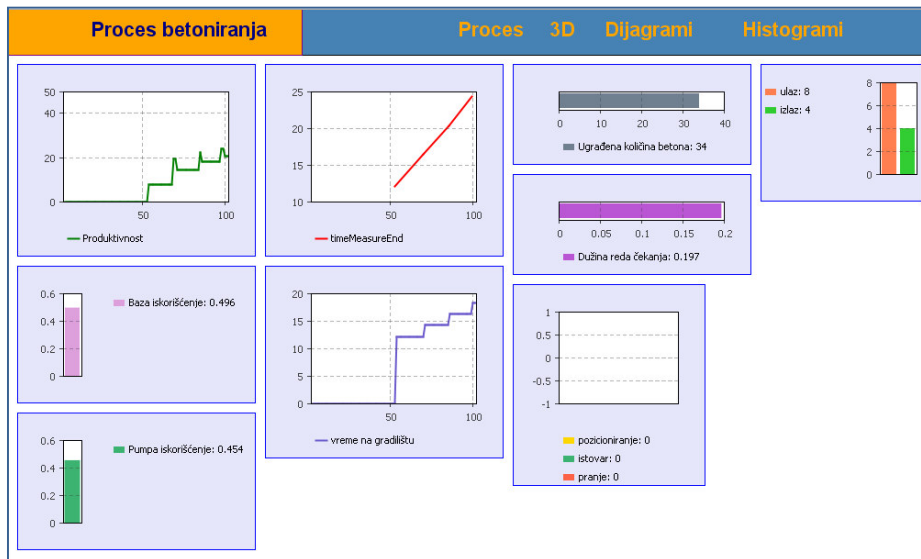
Поред логичког (слика 5.43) и 2D (слика 5.44) приказа, могућ је и 3D приказ сумулационог модела (слика 5.45).



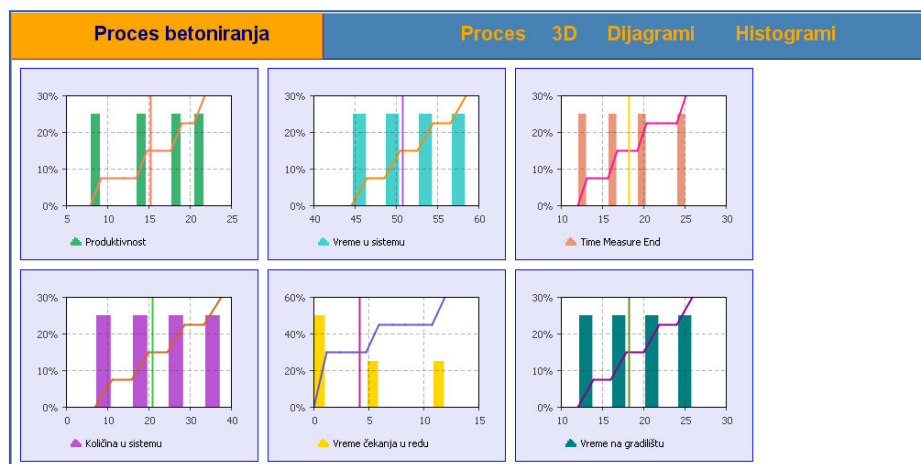
Слика 5.45 – Модел процеса бетонирања – 3D приказ

Бројним дијаграмима (слика 5.46), хистограмима (слика 5.47) и варијабилама омогућено је сагледавање промена различитих стања, величина и параметара током симулације. Може се пратити искоришћење базе и пумпе, дужина реда чекања, справљена и уграђена количина бетона, преостала количина бетона за справљање, као и за уграђивање, остварена продуктивност после сваког миксера, укупна остварена продуктивност по завршетку бетонирања, трајање бетонирања, заузетост појединих блокова, време проведено на градилишту, време проведено у систему, број возила која

су ушла у систем, као и број возила која су изашла из система, итд.



Слика 5.46 – Дијаграми за приказ различитих стања током симулације – модел процеса бетонирања



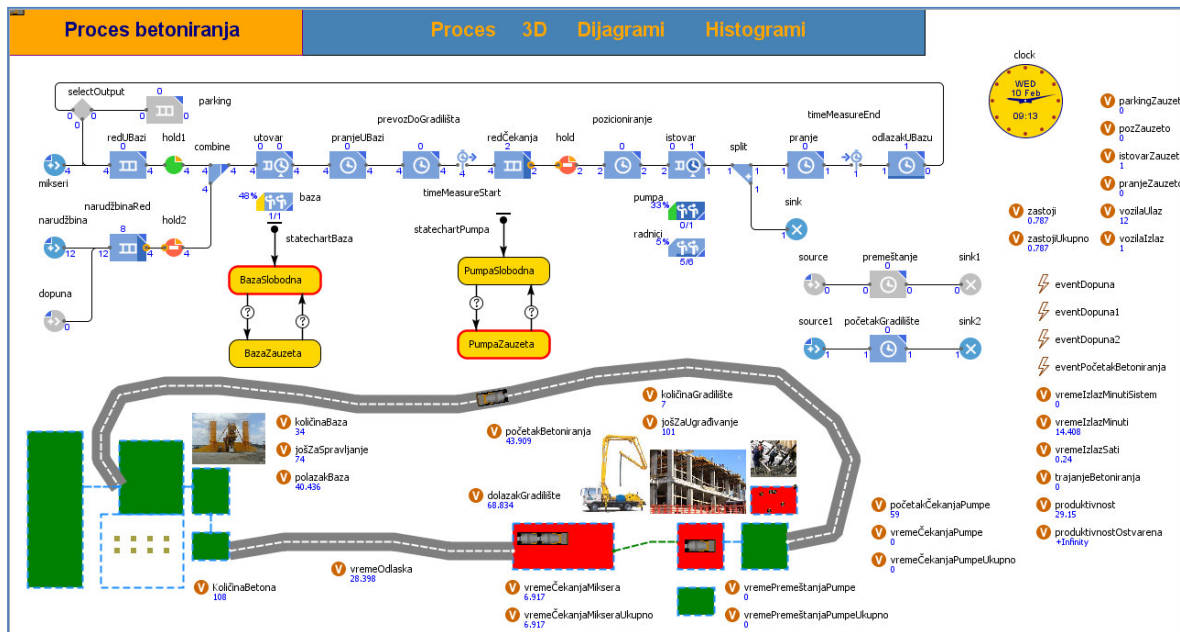
Слика 5.47 – Хистограми за приказ различитих стања током симулације – модел процеса бетонирања

При покретању симулације за предложени модел, креиран је прозор (слика 5.48) са параметрима које треба дефинисати (одабрати или унети потребне податке) а који су карактеристични за разматрани процес. Тако, потребно је одабрати од понуђених или уписати одговарајућу карактеристику: бира се елемент који се бетонира (плоча, плоча и греде или стубови и зидови), уноси се количина бетона, број радника, време између долазака миксера, количина бетона у једном циклусу, практични учинак базе, удаљеност базе од градилишта, број стубова и/или зидова, уиграност радне бригаде, дебљина плоче која се бетонира, висина на којој се врши бетонирање, теоретски учинак

пумпе, старост пумпе, дOMET пумпе, број премештања пумпе, бира се начин паркирања миксера, траса превоза, као и начин чишћења левка миксера.



Слика 5.48 – Модел процеса бетонирања – дефинисање улазних параметара на почетку симулације



Слика 5.49 – Дијаграм процеса и 2D приказ током трајања симулације

Пре уноса свих ових података потребно је дефинисати број миксера и одговарајуће запремине бубња миксера који су укључени у циклус, у посебној табели у excel формату.

На слици 5.49 приказан је процес у току симулације. Црвеним пољима приказује се заузетост појединх блокова, док су зеленим пољима приказани слободни блокови. Нпр. на слици 5.49 ред на градилишту је заузет (два миксера чекају у реду) и блок истовар је заузет (врши се истовар бетона у посматраном тренутку симулације).

#### 5.6.4 Анализа излазних података симулационог експеримента

У циљу добијања излазних података симулационог експеримента и верификације израђеног модела, вршено је експериментисање за све случајеве који су прикупљени на градилишту. Због постојања случајних варијабила потребно је извести већи број експеримената са различитим низовима случајних бројева и направити статистичку анализу излазних варијабила. На основу резултата симулације при пробном експериментисању, вршене су ситне корекције модела у неколико наврата како би модел реалније осликавао стварно стање и резултати били вернији. Експериментисано је у три потеза (за три различита модела): бетонирање плоча (*SimModel(MK)*), бетонирање стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено *Weibull(3)* расподелом вероватноћа (*SimModel(SZ)*) и бетонирање стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено регресионом једначином зависном од уиграности радне бригаде и броја стубова и/или зидова (*SimModel(SZ1)*). У зависности од расипања резултата, израчунат је потребан број симулација, па је тако изведено по 14 симулација за свако бетонирање плоча – укупно 1092 симулациона експеримента, по 20 симулација за бетонирања стубова и/или зидова за модел (*SimModel(SZ)*) – укупно 1160 и по 10 симулација за бетонирања стубова и/или зидова за модел (*SimModel(SZ1)*) – укупно 580 симулационих експеримената.

Приликом сакупљања резултата на основу симулационих експеримената запажено је да се, у случајевима када је фабрика бетона опслуживала и трећа лица (на посматраном градилишту јављало се дуже чекање на допрему бетона), прогнозирана продуктивност веома разликује од остварене продуктивности. Ова појава је и очекивана јер при изради симулационог модела није узет у разматрање и овај податак зато што је детаљно снимање процеса вршено само на градилишту. Како би скуп био хомогенији разматрани су само случајеви када је база радила само за посматрано градилиште и на тај начин од 78 првобитно анализираних бетонирања плоча, за симулациони

експеримент је анализирано 61 бетонирање. Из истог разлога узорак за симулацију бетонирања стубова и зидова је смањен са 58 на 51.

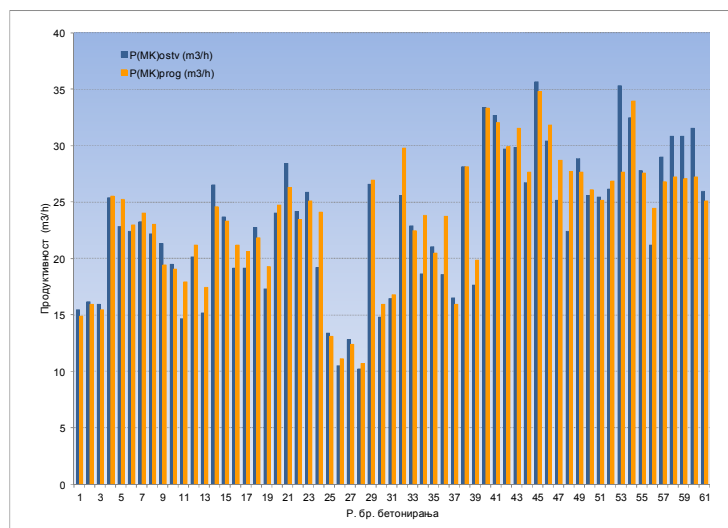
После извођења одређеног броја симулационих експеримената, резултати су статистички анализирани, сортирани по одређеним критеријумима и представљени одговарајућим хистограмима и дијаграмима, о чему ће бити речи у даљем тексту.

### 5.6.5 Дискусија предложених модела

И за симулационе моделе, као и за регресионе, извршена је оцена на основу средње апсолутне грешке између остварених и прогнозираних вредности  $MAPE$  (*Mean Absolute Percentage Error*), на основу већ поменутих израза (4.6) и (4.7).

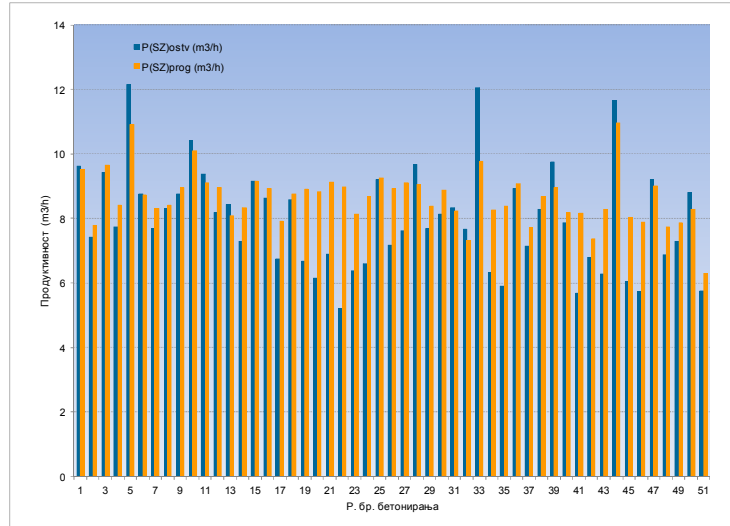
Према (4.6) добијено је за модел  $SimModel(MK)$  да је средња апсолутна грешка,  $MAPE=16,28\%$ , за цео узорак (78 бетонирања), односно  $MAPE=7,29\%$ , за смањен узорак (61 бетонирање). За моделе:  $SimModel(SZ)$ ,  $MAPE=21,99\%$ , за цео узорак (58 бетонирања) односно  $MAPE=14,30\%$ , за смањен узорак (51 бетонирање) и  $SimModel(SZ1)$ ,  $MAPE=14,62\%$  за цео узорак (58 бетонирања) односно  $MAPE=9,20\%$ , за смањен узорак (51 бетонирање)

На сликама 5.50, 5.51 и 5.52 приказано је поређење остварених продуктивности (плава боја) и прогнозираних продуктивности (наранџаста боја), за сва три симулациона модела, за узорке са мањим средњим апсолутним грешкама.



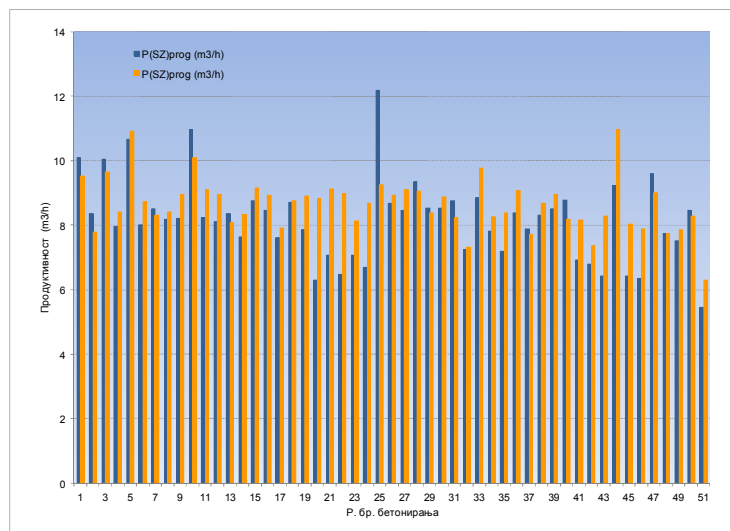
Слика 5.50 – Остварена  $P(MK)_{ostv}$  и прогнозирана  $P(MK)_{prog}$  продуктивност ( $SimModel(MK)$ )

Као и код регресионих модела, извршено је сортирање резултата на основу апсолутне процентуалне грешке – *APE* (*Absolute Percentage Error*), према раније већ коришћеном изразу (4.8) и класификације бетонирања према оствареној продуктивности.



Слика 5.51 – Остварена  $P(SZ)_{ostv}$  и прогнозирана  $P(SZ)_{prog}$  продуктивност ( $SimModel(SZ)$ )

Сортирани резултати за модел  $SimModel(MK)$  дати су у табели 5.35. Снимљени процеси бетонирања подељени су у шест група према оствареној продуктивности и то: процеси са оствареном продуктивношћу до 15; 15–20; 20–25; 25–30; 30–35 и преко 35 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.

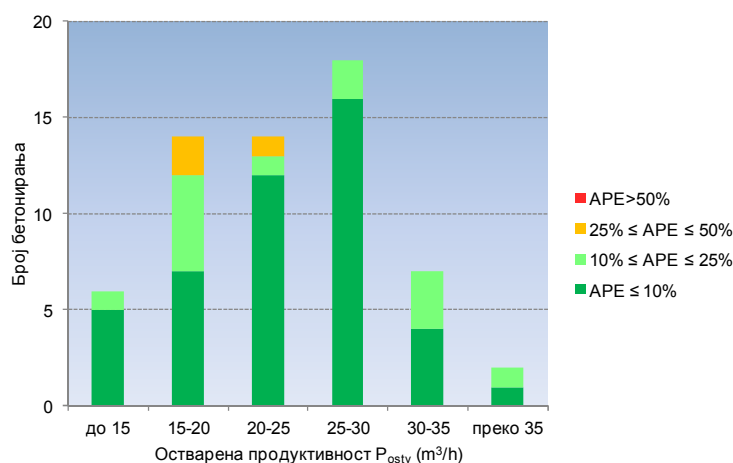


Слика 5.52 – Остварена  $P(SZ)_{ostv}$  и прогнозирана  $P(SZ)_{prog}$  продуктивност ( $SimModel(SZ1)$ )

У табели 5.35 може се видети да 74% резултата има апсолутну грешку при прогнозирању продуктивности симулацијом, мању од 10%, односно 95% од свих резултата је прогнозирано са грешком до 25%. Већа одступања јавила су се у само 5% резултата и то са грешком до 50%. Грешке између остварене и прогнозиране продуктивности веће од 50% нису се јавиле. На основу табеле, може се запазити да модел *SimModel(MK)* има најбољу моћ прогнозирања за продуктивности које имају вредност у распону од 25 до 30 m<sup>3</sup>/h, јер је ту *APE* углавном у граници до 10%. За продуктивности које су веће од 30 m<sup>3</sup>/h резултати су углавном уједначени са апсолутном грешком до 10% и 10 - 25%. За продуктивности које су мање од 25 m<sup>3</sup>/h највћи број резултата је са грешком до 10%, али има и резултата са грешком већом од 25%.

Табела 5.35 Подела процеса бетонирања према *APE* и оствареној продуктивности (*SimModel(MK)*)

$P_{ostv}$ (m <sup>3</sup> /h)	до 15	15-20	20-25	25-30	30-35	преко 35	сума
$APE \leq 10\%$	5	7	12	16	4	1	45
$10\% \leq APE \leq 25\%$	1	5	1	2	3	1	13
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0	2	1	0	0	0	3
$APE > 50\%$	0	0	0	0	0	0	0
сума	6	14	14	18	7	2	61
$APE \leq 10\%$	8%	11%	20%	26%	7%	2%	74%
$10\% \leq APE \leq 25\%$	2%	8%	2%	3%	5%	2%	21%
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0%	3%	2%	0%	0%	0%	5%
$APE > 50\%$	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
сума	10%	23%	23%	30%	11%	3%	100%



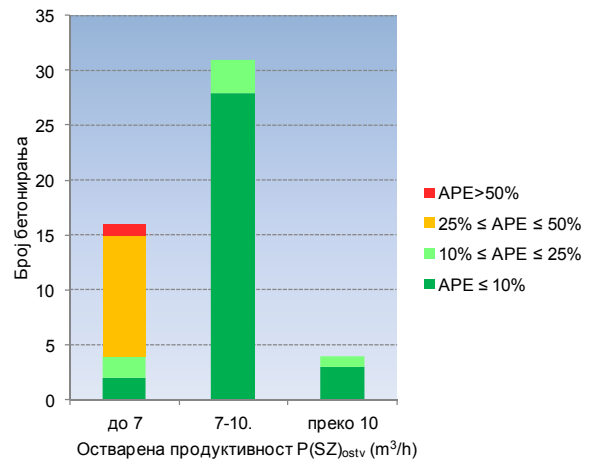
Слика 5.53 – Хистограм остварене продуктивности према *APE* (*SimModel(MK)*)



Сортирани су резултати и за моделе *SimModel(SZ)* и *SimModel(SZ1)* у табелама 5.36 и 5.37, на основу апсолутне процентуалне грешке – *APE (Absolute Percentage Error)* и класификације бетонирања према оствареној продуктивности. Снимљени процеси бетонирања подељени су у три групе према оствареној продуктивности и то: процеси са оствареном продуктивношћу до 7; 7–10 и преко 10 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке су подељене у четири групе: до 10; 10–25; 25–50 и преко 50%.

Табела 5.36 Подела процеса бетонирања према *APE* и оствареној продуктивности (*SimModel(SZ)*)

P(SZ) <sub>ostv</sub> (m <sup>3</sup> /h)	до 7	7-10	преко 10	сума
APE ≤ 10%	2	28	3	33
10% ≤ APE ≤ 25%	2	3	1	6
25% ≤ APE ≤ 50%	11	0	0	11
APE > 50%	1	0	0	1
сума	16	31	4	51
APE ≤ 10%	4%	55%	6%	65%
10% ≤ APE ≤ 25%	4%	6%	2%	12%
25% ≤ APE ≤ 50%	22%	0%	0%	22%
APE > 50%	2%	0%	0%	2%
сума	31%	61%	8%	100%



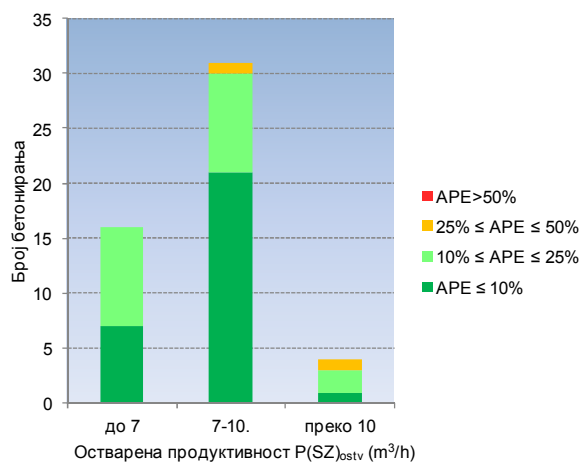
Слика 5.54 – Хистограм остварене продуктивности према *APE (SimModel(SZ))*

Табела 5.36 показује да 65% резултата има апсолутну грешку при прогнозирању продуктивности мању од 10%, односно 77% од свих резултата је прогнозирано са грешком до 25%. Већа одступања јавила су се у 22% резултата са грешком до 50% и у 2% случајева и грешке између остварене и прогнозиране продуктивности веће од 50%. У истој табели, као и на слици 5.54 може се запазити да модел *SimModel(SZ)* има бољу моћ прогнозирања за продуктивности које су веће од 7 m<sup>3</sup>/h, јер је ту највећи проценат резултата са грешком до 10%. Веће грешке прогнозирања, 25 - 50%, као и преко 50%, јавиле су се код продуктивности у групи до 7 m<sup>3</sup>/h.

Код другог модела за прогнозирање продуктивности бетонирања стубова и зидова, резултати су знатно бољи. Табела 5.37 показује да 57% резултата има апсолутну грешку при прогнозирању продуктивности мању од 10%, односно 96% од свих резултата је прогнозирано са грешком до 25%. Већа одступања јавила су се у само 4% резултата и то са грешком до 50%.

Табела 5.37 Подела процеса бетонирања према  $APE$  и оствареној продуктивности ( $SimModel(SZ1)$ )

$P(SZ)_{ostv}$ (m <sup>3</sup> /h)	до 7	7-10	преко 10	сума
$APE \leq 10\%$	7	21	1	29
$10\% \leq APE \leq 25\%$	9	9	2	20
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0	1	1	2
$APE > 50\%$	0	0	0	0
сума	16	31	4	51
$APE \leq 10\%$	14%	41%	2%	57%
$10\% \leq APE \leq 25\%$	18%	18%	4%	39%
$25\% \leq APE \leq 50\%$	0%	2%	2%	4%
$APE > 50\%$	0%	0%	0%	0%
сума	31%	61%	8%	100%

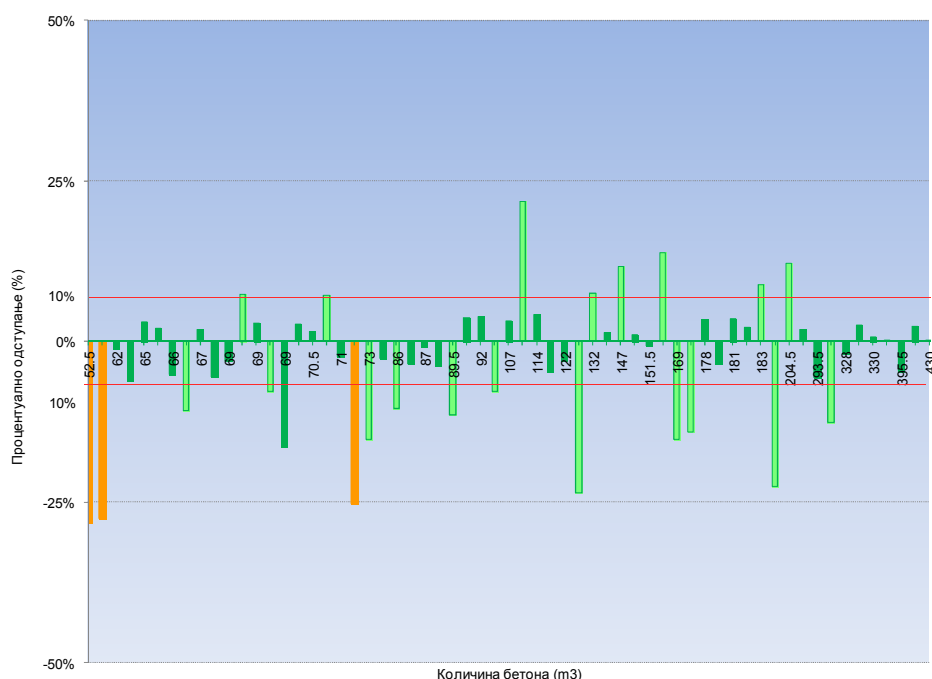
Слика 5.55 – Хистограм остварене продуктивности према  $APE$  ( $SimModel(SZ1)$ )

Може се запазити да модел  $SimModel(SZ1)$  има бољу моћ прогнозирања за продуктивности које имају вредност до 10 m<sup>3</sup>/h, јер је ту највећи проценат резултата (55%) са границом  $APE$  до 10%. За величине продуктивности преко 10 m<sup>3</sup>/h узорак има мали број бетонирања, свега четири, али су ту заступљене и грешке 10 – 25%, као и 25 – 50%.

У другом делу анализе резултата, исто као и код регресионих модела, извршена је анализа квалитета модела у односу на количине бетона. У том циљу, ради лакшег сагледавања количина бетона за које је прецењена или потцењена продуктивност, срачуната је процентуална грешка  $PE$  (*Percentage Error*) према изразу (4.10). На сликама 5.56, 5.57 и 5.58 дато је процентуално одступање остварених и прогнозираних продуктивности симулацијом, сортираних у односу на количине бетона у растућем низу.

Случајеви код којих се јавило веће одступање остварене продуктивности у односу на прогнозирану (жута боја на дијаграму) за модел  $SimModel(MK)$  су углавном са неким застојима који нису узети у обзир при формирању модела. Јављало се спорије бетонирање због незавршене оплате и арматуре у прва два случаја на графику на слици 5.56, односно изузетно хладно време са честим прекидима због кише, код случаја где је

$PE=-23\%$  и изузено неприступачан простор за бетонирање плоче изнад VI спрата, са  $PE=-25\%$ .

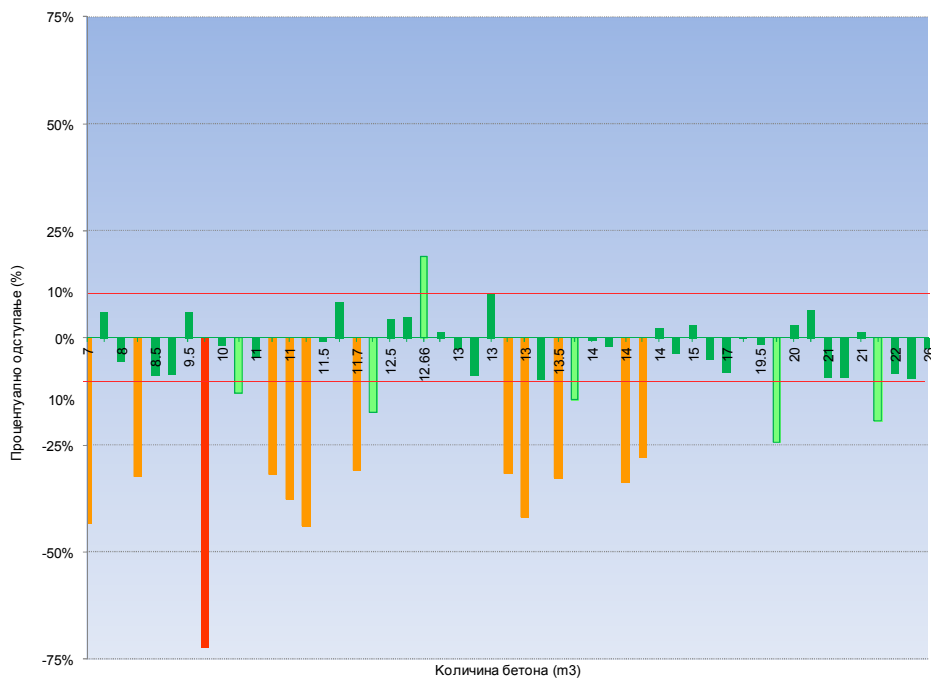


Слика 5.56 – Процентуална грешка код модела (*SimModel(MK)*)

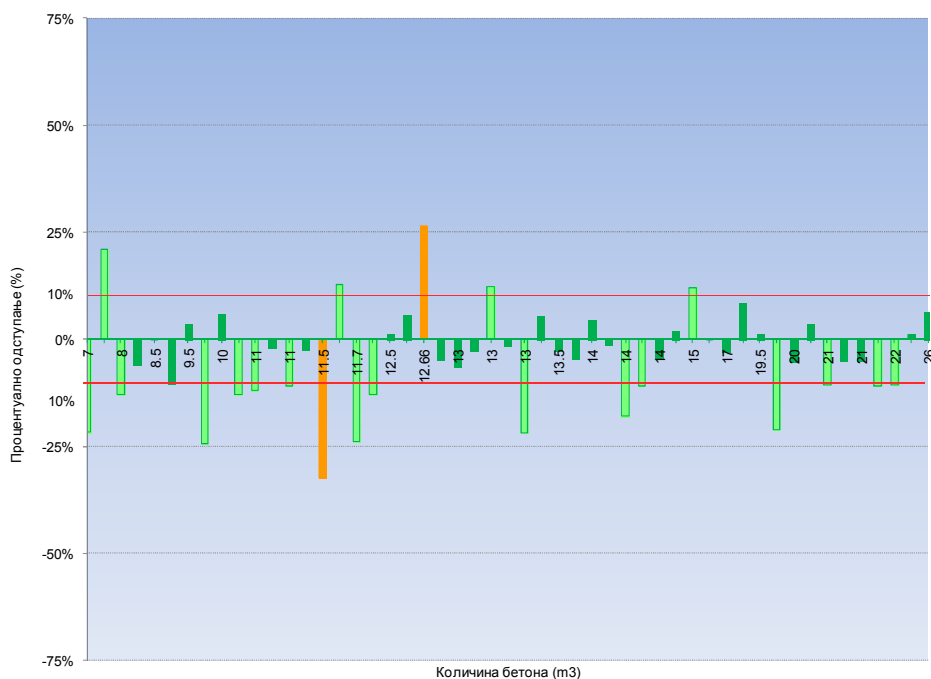
Код модела *SimModel P(SZ)* симулирана продуктивност је углавном прецењена са већим одступањем (жута и црвена боја на дијаграму, слика 5.57, већа одступања  $PE$  су негативна). Продуктивност са већим позитивним  $PE=+19\%$  где је остварена нешто већа продуктивност у односу на прогнозирану јавила се у случају знатно лошијег квалитета изведених радова без посвећене потребне пажње и уз већи растур бетона, па је и трајање било краће.

На слици 5.57, са становишта количина, може се запазити да се јављају мања одступања између остварених и симулацијом прогнозираних продуктивности за количине бетона веће од  $14 \text{ m}^3$ , док је за количине бетона мање од  $14 \text{ m}^3$  модел мање поуздан.

Код модела *SimModel(SZ1)* симулирана продуктивност је такође углавном прецењена, али са много мање одступања између симулираних и остварених вредности. Овде су се јавила само два већа одступања и то за случај лошег квалитета радова  $PE=+26\%$  и за случај где су бетонирани само зидови па је и остварена мања продуктивност,  $PE=-32\%$ .



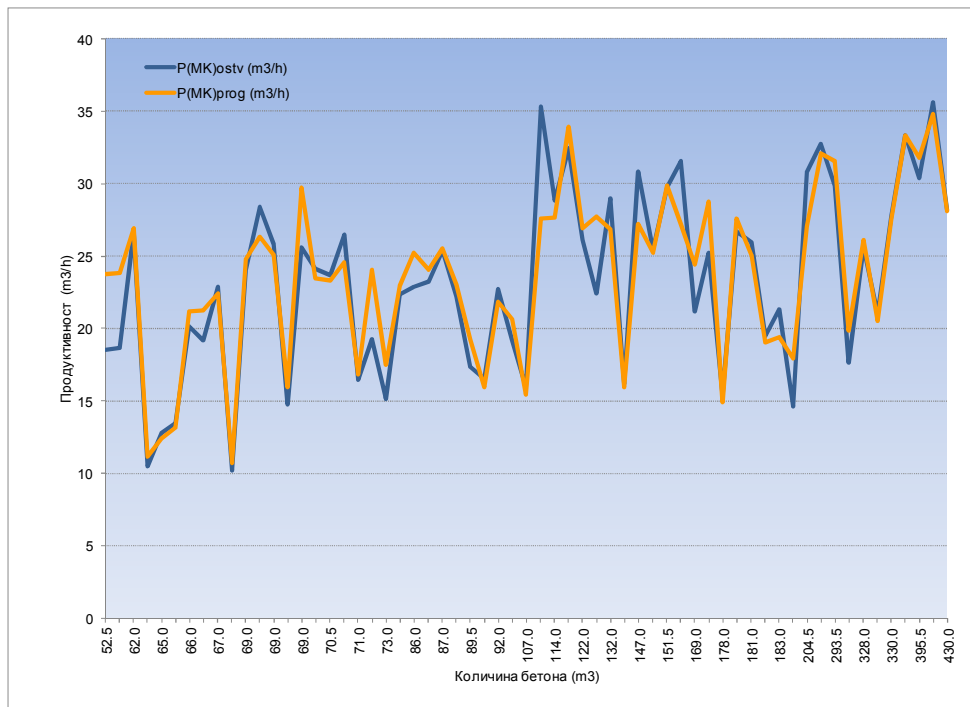
Слика 5.57 – Процентуална грешка код модела (SimModel(SZ))



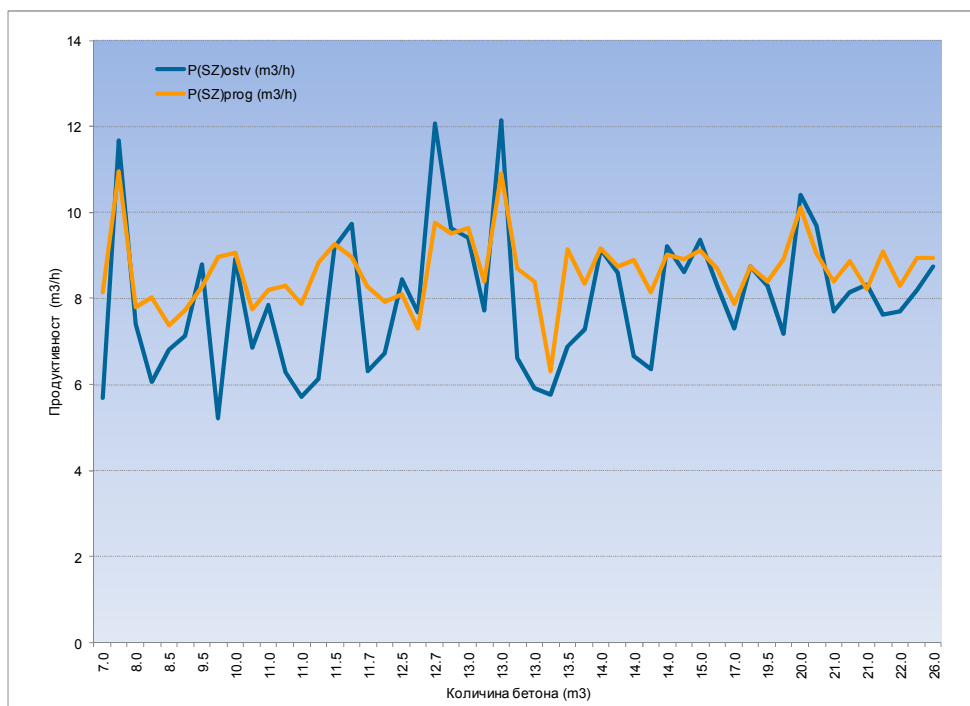
Слика 5.58 – Процентуална грешка код модела (SimModel(SZ1))

На сликама 5.59 – 5.61 приказане су упоредне вредности остварене и прогнозиране продуктивности у односу на количине бетона. Уочава се да су углавном мања

одступања прогнозираних продуктивности у односу на остварене за све количине бетона при бетонирању плоча (слика 5.59).

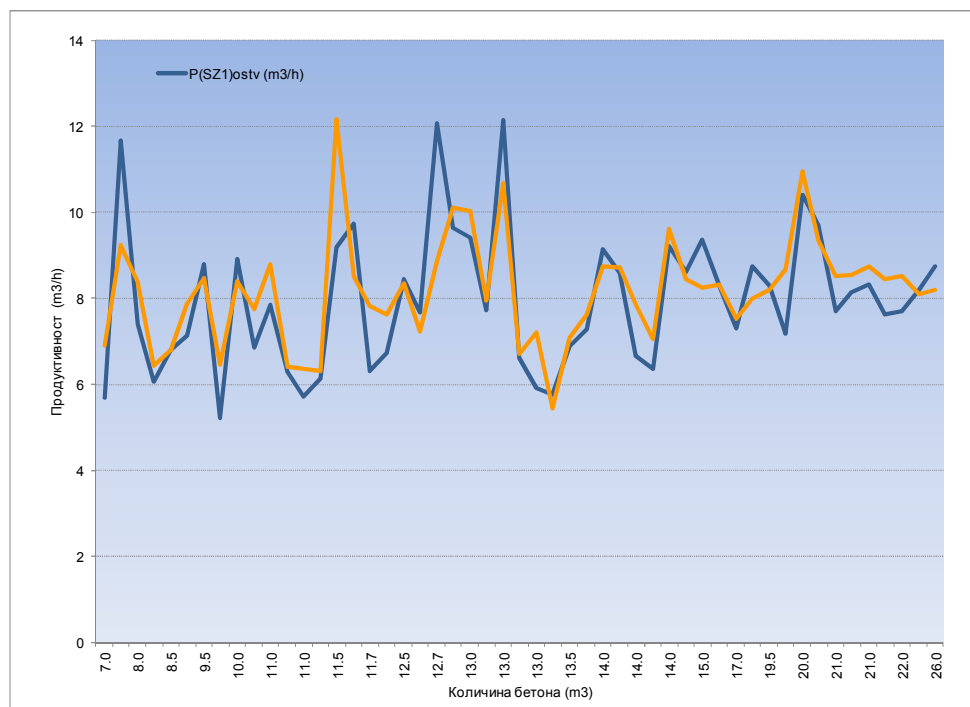


Слика 5.59 – Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (SimModel(MK))



Слика 5.60 – Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (SimModel(SZ))

При бетонирању стубова и зидова, модел *SimModel(SZ)* поузданији је, као што је већ поменуто за количине бетона веће од  $14 \text{ m}^3$ , док модел *SimModel(SZ1)* даје боље резултате за количине испод  $11 \text{ m}^3$  и изнад  $13 \text{ m}^3$ .



Слика 5.61 – Остварена и прогнозирана продуктивност у односу на количине бетона (*SimModel(SZ1)*)

## 6. УПОРЕДНА АНАЛИЗА ФОРМИРАНИХ МОДЕЛА

### 6.1 Увод

У поглављима 4 и 5 овог рада развијени су модели за прогнозирање продуктивности и трајања процеса бетонирања плоча (пуних армиранобетонских плоча, армиранобетонских плоча са гредама, међуспратних „ферт“ конструкција) и армиранобетонских стубова и зидова. Развијено је укупно седам модела приказаних у табели 6.1:

Табела 6.1 Формирани модели за пргнозирање продуктивности и трајања бетонирања

Р. бр.	Модел	Примењена метода	Модел прогнозира
1	RegModel P(MK)	Вишеструка линеарна регресија	Продуктивност
2	RegModel T(MK)	Вишеструка линеарна регресија	Трајање
3	RegModel P(SZ)	Вишеструка линеарна регресија	Продуктивност
4	RegModel T(SZ)	Вишеструка линеарна регресија	Трајање
5	SimModel (MK)	Симулација	Продуктивност/Трајање
6	SimModel (SZ)	Симулација	Продуктивност/Трајање
7	SimModel (SZ1)	Симулација	Продуктивност/Трајање

Како су добијени различити регресиони модели за прогнозирање продуктивности и прогнозирање трајања бетонирања (имају различите улазне варијабиле), то је у називу модела поред *RegModel* додато *P* (продуктивност) или *T* (трајање). Код симулационих модела, један исти модел служи за прогнозирање оба параметра, па је назив модела само *SimModel*, али при даљој анализи, ако је симулацијом прогнозирана продуктивност, модел има назив *SimModelP*, односно ако је симулирано трајање, *SimModelT*.

Поред спроведених анализа, већ при развоју модела, овде ће бити приказана и анализа свих модела на различитој величини узорка. Наиме, варијабила расположивост базе (*RasB*) која је уведена у регресиону анализу за формирање свих модела, дефинисана је на доста уопштен начин. Узето је да је варијабила једнака нули, уколико база врши справљање бетона само за посматрано градилиште и да је варијабила једнака јединици, у супротаном случају. Међутим, уколико је заступљена производња бетона и за трећа лица то није прецизно дефинисано у којој је мери (није исто ако је то мања количина или већа, као ни да ли база има капацитет да производњом бетона не угрози снабдевање градилишта, или не, итд.). У зависности од тога, на градилишту су се јављали застоји различитих трајања, услед неблаговременог снабдевања бетоном. Из тог разлога, за даљу анализу и поређење модела, испитано је слагање вредности добијених на основу модела са оствареним вредностима, преко процентуалне и средње апсолутне процентуалне грешке, одвојено на целом узорку и на узорку који искључује случајеве када је фабрика бетона опслуживала и трећа лица.

У табели 6.2 приказане су вредности средње апсолутне грешке (*MAPE*) за све моделе за обе величине узорка, као и на сликама 6.1 и 6.2 за све моделе и одвојено за обе величине узорка. У табели 6.3 дате су упоредне оцене само регресионих модела на основу статистичких показатеља  $R^2$  и  $F$  за ову врсту модела. Ови показатељи се односе на цео узорак јер је регресија и спроведена на целом узорку. Види се да су регресиони модели за прогнозирање код плоча бољи у односу на моделе за стубове/зидове.

Табела 6.2 *MAPE* свих модела за цео узорак и случајеве када фабрика опслужује и трећа лица

Р. бр.	Модел	MAPE	
		Цео узорак	Узорак без RasB
1	RegModel P(MK)	9.69%	7.94%
2	RegModel T(MK)	11.20%	10.94%
3	RegModel P(SZ)	13.27%	11.69%
4	RegModel T(SZ)	13.10%	12.58%
5	SimModel P(MK)	16.28%	7.29%
6	SimModel T(MK)	12.89%	6.86%
7	SimModel P(SZ)	21.99%	14.30%
8	SimModel T(SZ)	15.19%	11.75%
9	SimModel P(SZ1)	14.62%	9.20%
10	SimModel T(SZ1)	11.49%	8.79%

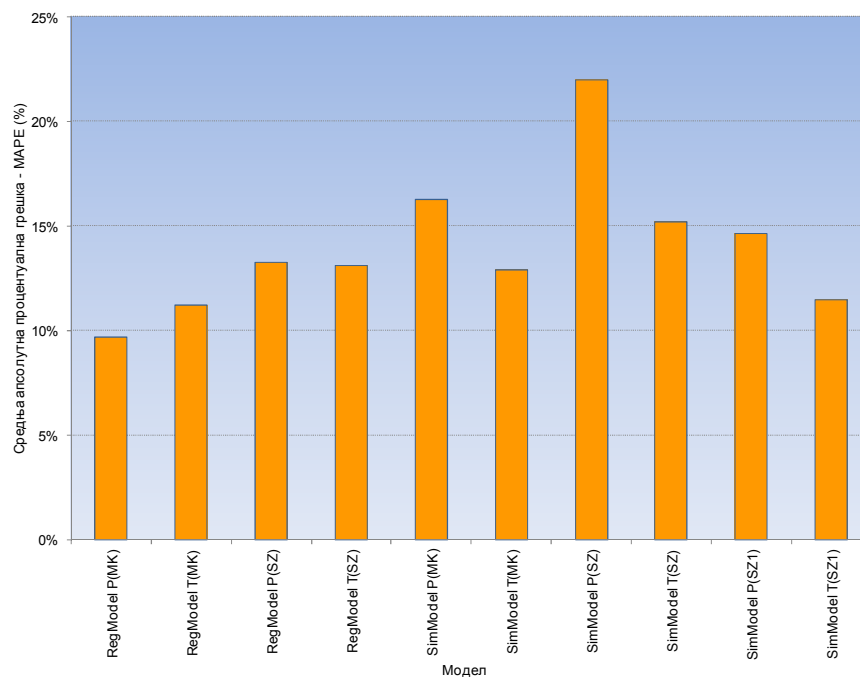
Табела 6.3 Упоредна оцена регресионих модела

Р. бр.	Модел	$R^2$	F
1	RegModel P(MK)	0.857	40.313
2	RegModel T(MK)	0.943	111.266
3	RegModel P(SZ)	0.529	14.872
4	RegModel T(SZ)	0.781	37.136

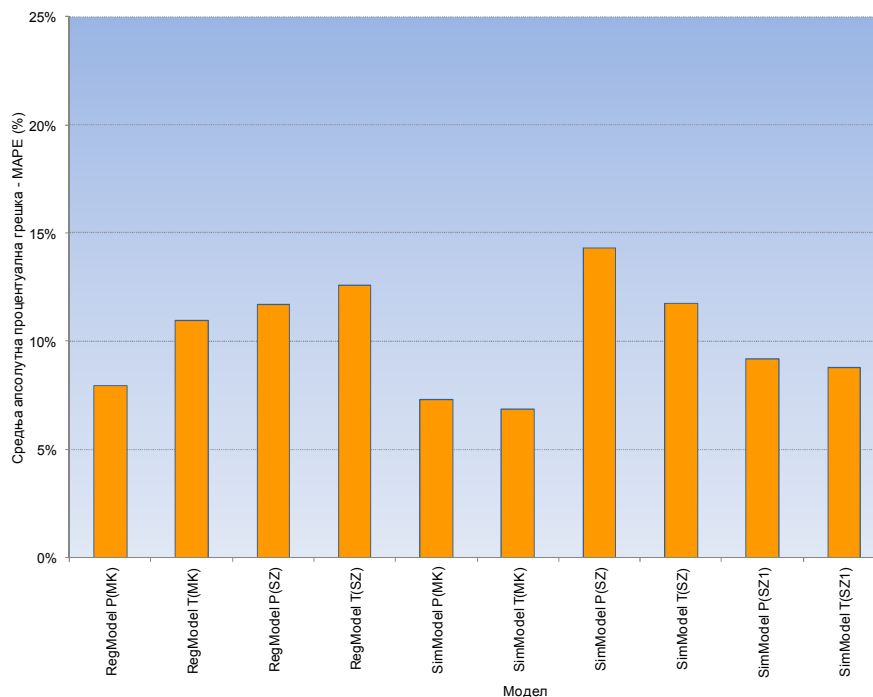


Уочљиво је да сви модели имају мању грешку на узорку који искључује снабдевање и трећих лица фабриком бетона и да симулациони модели, тестирани на овом узорку, углавном имају мању грешку у односу на регресионе моделе.

Регресиони модели формирани су тако да прогнозирају продуктивност или трајање бетонирања одређених елемената, али јасно је да се применом једног од модела може прогнозирати једна зависна варијабила (нпр. трајање) а на основу ње израчунати она друга (нпр. продуктивност). Пошто су улазне променљиве различите, са различитом грешком се врши прогнозирање, нпр. ако се искористи модел *RegModel P(MK)* за прогнозирање продуктивности бетонирања плоча, средња апсолутна грешка износи 9.69%, а уколико се прогнозира трајање моделом *RegModel T(MK)* и на основу тих вредности израчуна продуктивност добиће се тачност прогнозиране продуктивности од 11.20%.



Слика 6.1 – MAPE за сваки модел за цео узорак



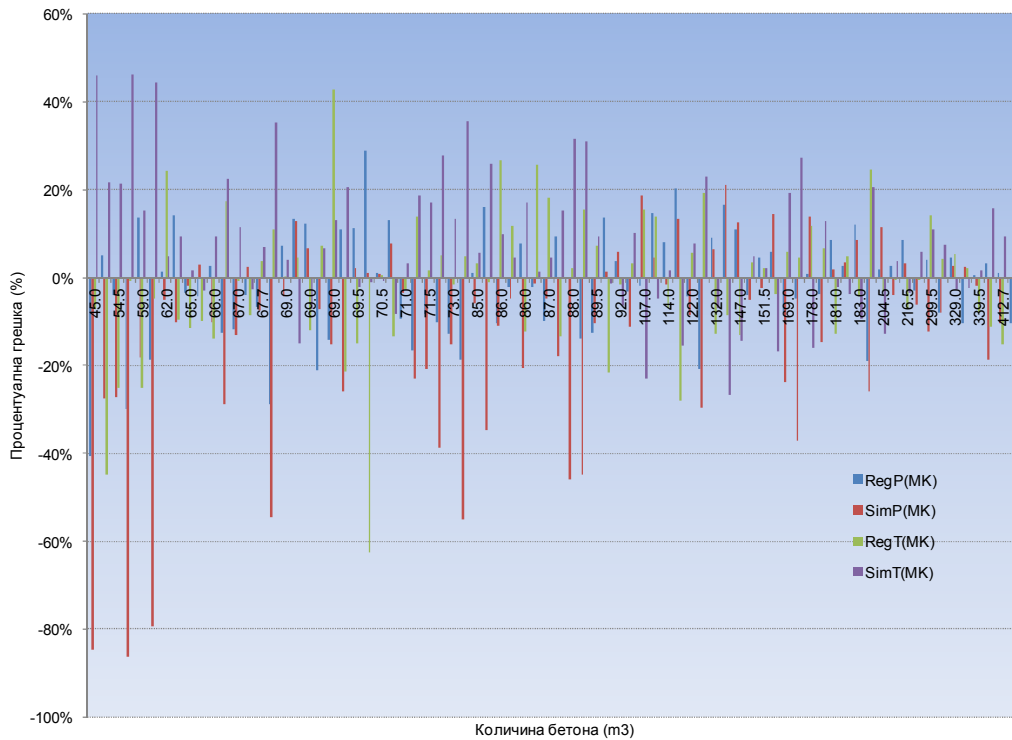
Слика 6.2 – MAPE за сваки модел за узорак без случајева када фабрика опслужује и трећа лица

## 6.2 Анализа и поређење модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча

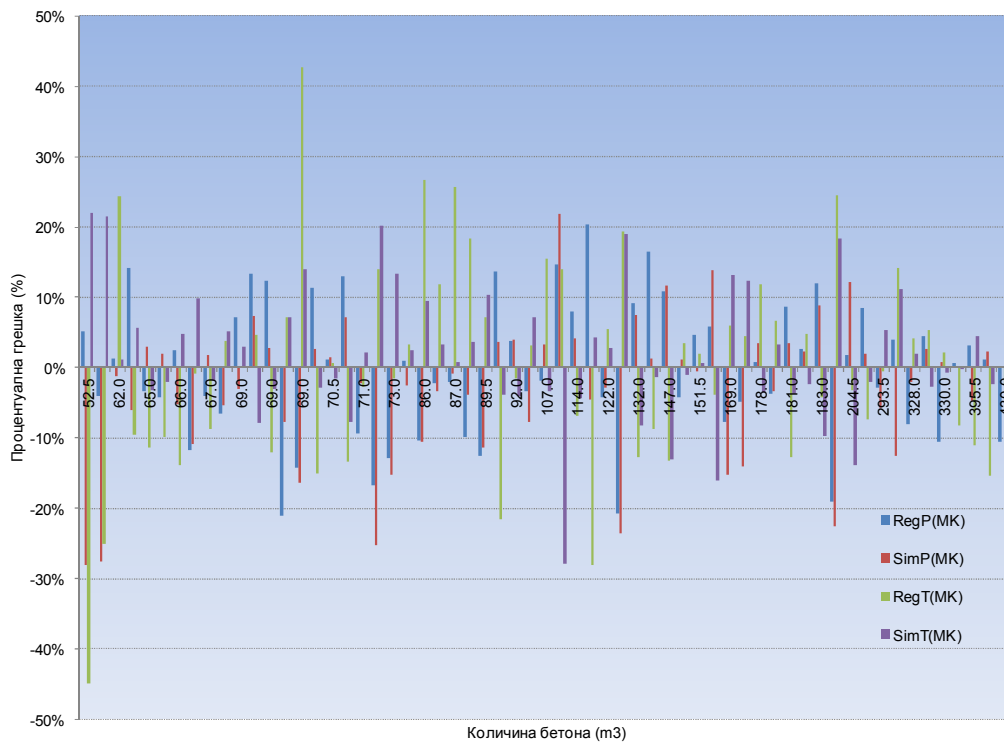
У табелама у прилогу (прилог 5 и 6) приказане су процентуалне грешке при прогнозирању применом сваког од модела за прогнозирање процеса бетонирања плоча и то на целом узорку и на узорку без случајева када је фабрика бетона вршила производњу и за трећа лица. На основу тих табела приказане су упоредо процентуалне грешке за све моделе на сликама 6.3 и 6.4. Процентуално одступање прогнозираних у односу на остварене вредности различитих модела означено је различитим бојама, а грешке су приказане у односу на количине бетона дате у растућем низу.

На слици 6.3 види се да су грешке прогнозирања различитим моделима углавном мање од 10% и сличније за веће количине бетона, оквирно преко 100 m<sup>3</sup>. Слика 6.4 показује да је грешка добијена свим моделима углавном уједначена за све количине бетона.

За упоредну анализу модела у односу на остварену продуктивност, сортирани су резултати на основу свих модела за плоче, према апсолутној процентуалној грешки – *APE* (*Absolute Percentage Error*), и класификацији бетонирања према оствареној продуктивности.



Слика 6.3 – Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за цео узорак



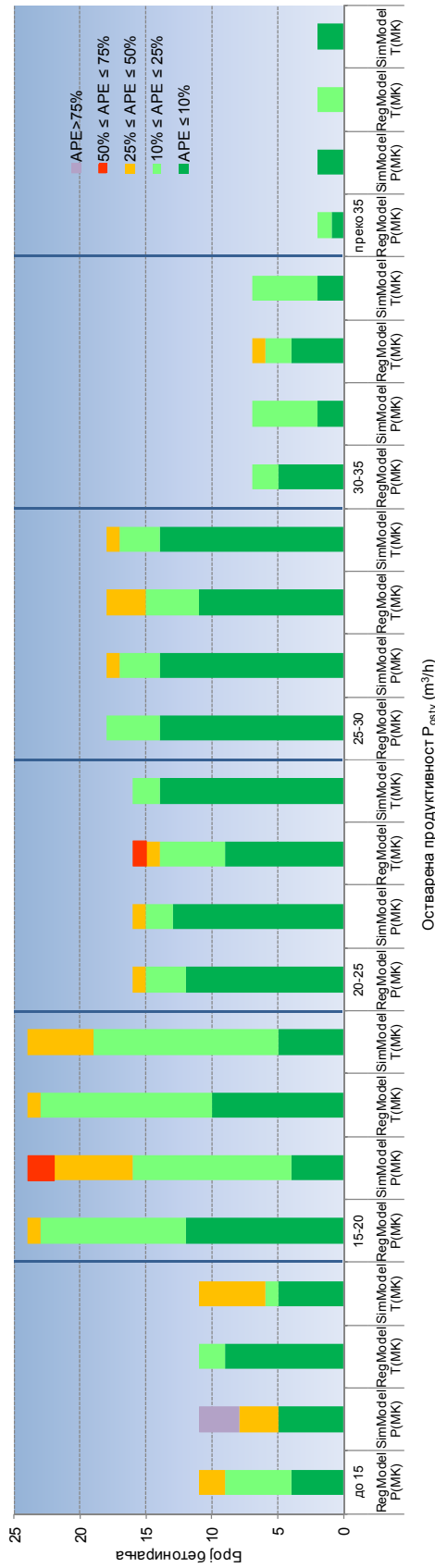
Слика 6.4 – Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за узорак без случајева када фабрика опслужује и трећа лица

Снимљени процеси бетонирања подељени су у шест група према оствареној продуктивности и то: процеси са оствареном продуктивношћу до 15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35 и преко 35 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке подељене су у пет група: до 10, 10–25, 25–50, 50–75 и преко 75%.

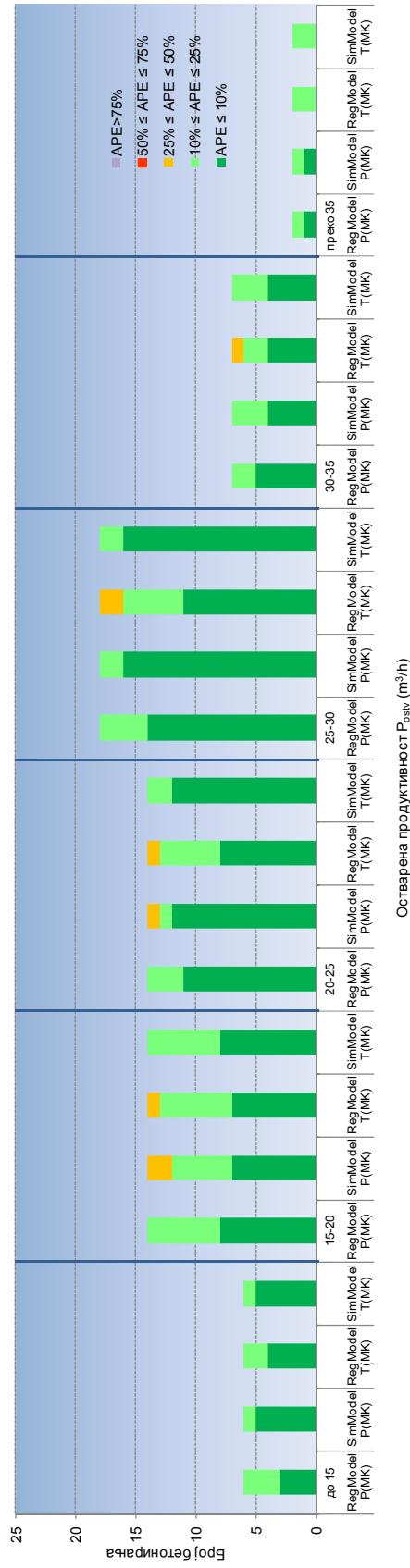
На сликама 6.5 и 6.6 приказани су хистограми остварене продуктивности према *APE* за све моделе за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за оба узорка. Када се ради о целом узорку (хистограм на слици 6.5), за продуктивности до 30 m<sup>3</sup>/h, симулациони модели имају већи број бетонирања где су одступања остварених и прогнозираних вредности већа, у односу на регресионе моделе. Ово је разумљиво из већ образложеног разлога неузимања у обзир расположивости базе при развоју симулационих модела.

Како је раније (у поглављу 4) установљен тренд повећања продуктивности, при бетонирању плоча, са повећањем количине за уграђивање, може се рећи да је за прогнозирање продуктивности при уграђивању мањих количина бетона (оквирно мањих од 100 m<sup>3</sup>), погодније користити регресионе моделе. Код остварених продуктивности већих од 30 m<sup>3</sup>/h нема великих грешака у прогнозирању било којим моделом, на шта је утицало то што су за све случајеве у овом опсегу продуктивности, базе опслуживале само посматрана градилишта.

Код другог узорка (хистограм на слици 6.6), све прогнозиране продуктивности имају углавном грешку до 25%, односно нема грешака преко 50%.



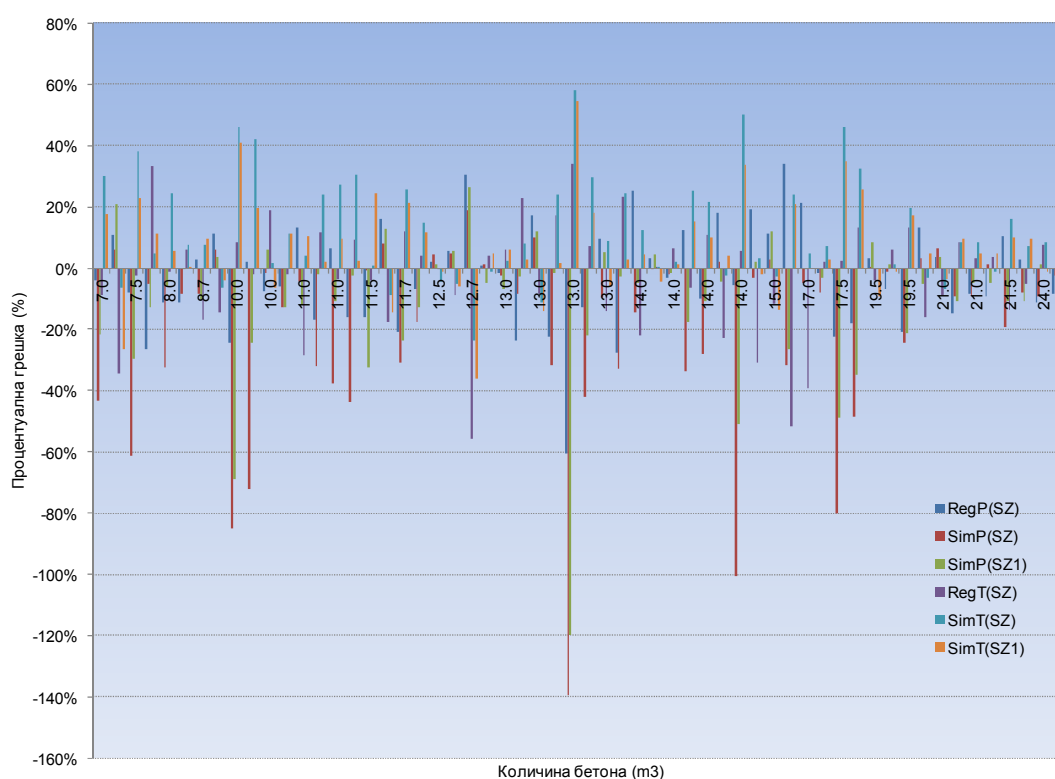
Слика 6.5 – Хистограм остварене продуктивности према APE за све моделе (МК) за цео узорак



Слика 6.6 – Хистограм остварене продуктивности према APE за све моделе (МК) за узорак без случајева када фабрика опслужује и трећа лица

### 6.3 Анализа и поређење модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова

У табелама у прилогу (прилог 7 и 8) приказане су процентуалне грешке при прогнозирању применом сваког од модела за прогнозирање процеса бетонирања стубова/зидова на целом узорку и на узорку без случајева када је фабрика бетона вршила производњу и за трећа лица. На основу тих табела приказане су упоредо процентуалне грешке за све моделе на сликама 6.7 и 6.8. Процентуално одступање прогнозираних у односу на остварене вредности различитих модела означено је различитим бојама, а грешке су приказане у односу на количине бетона дате у растућем низу.

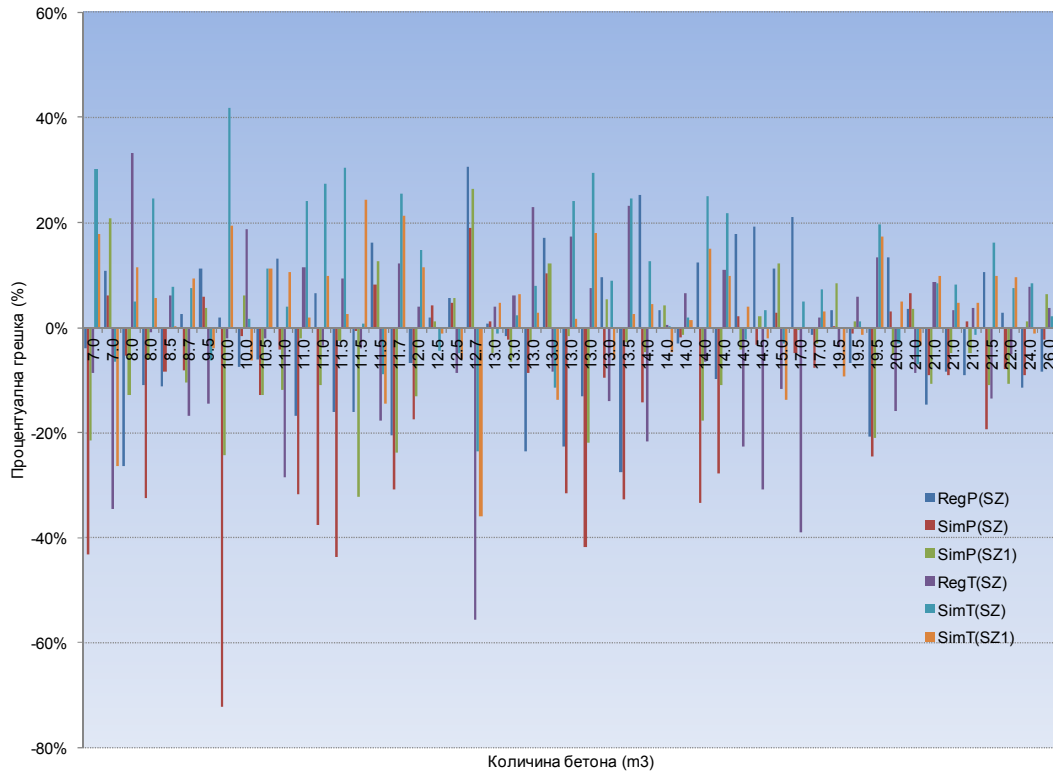


Слика 6.7 – Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за цео узорак

На сликама 6.7 и 6.8 види се да су грешке прогнозирања различитим моделима углавном уједначене око 10% за количине бетона веће од око 19 m<sup>3</sup>.

За упоредну анализу модела у односу на остварену продуктивност, сортирани су резултати на основу свих модела за стубове/зидове, према апсолутној процентуалној грешки – *APE* (*Absolute Percentage Error*), и класификацији бетонирања према

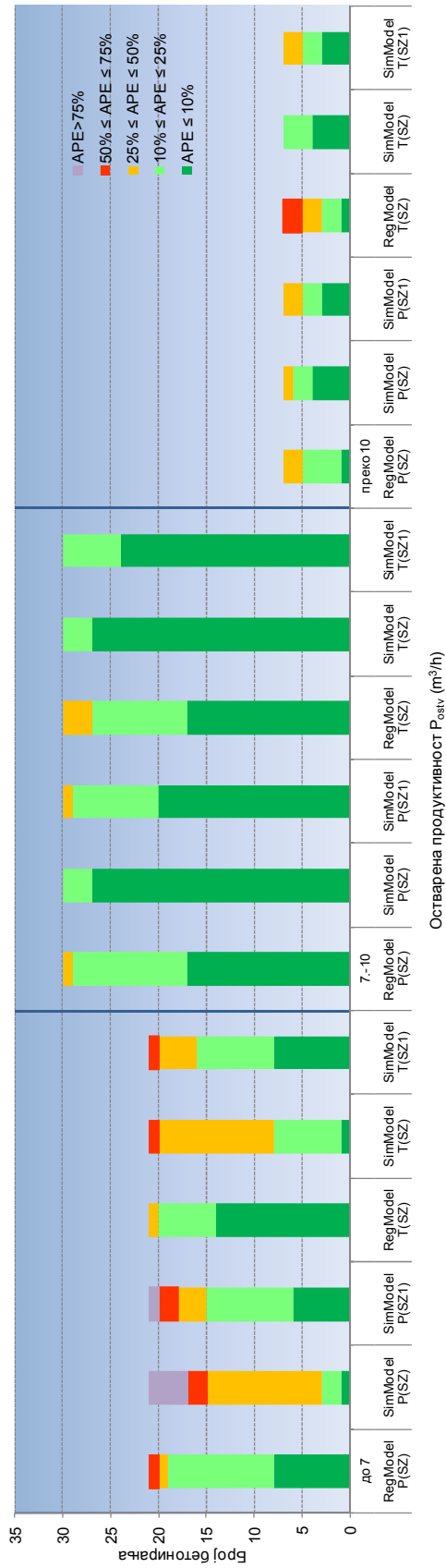
оствареној продуктивности. Снимљени процеси бетонирања подељени су у три групе према оствареној продуктивности: процеси са оствареном продуктивношћу до 7, 7–10 и преко 10 m<sup>3</sup>/h. Апсолутне грешке су подељене у пет група: до 10, 10–25, 25–50, 50–75 и преко 75%.



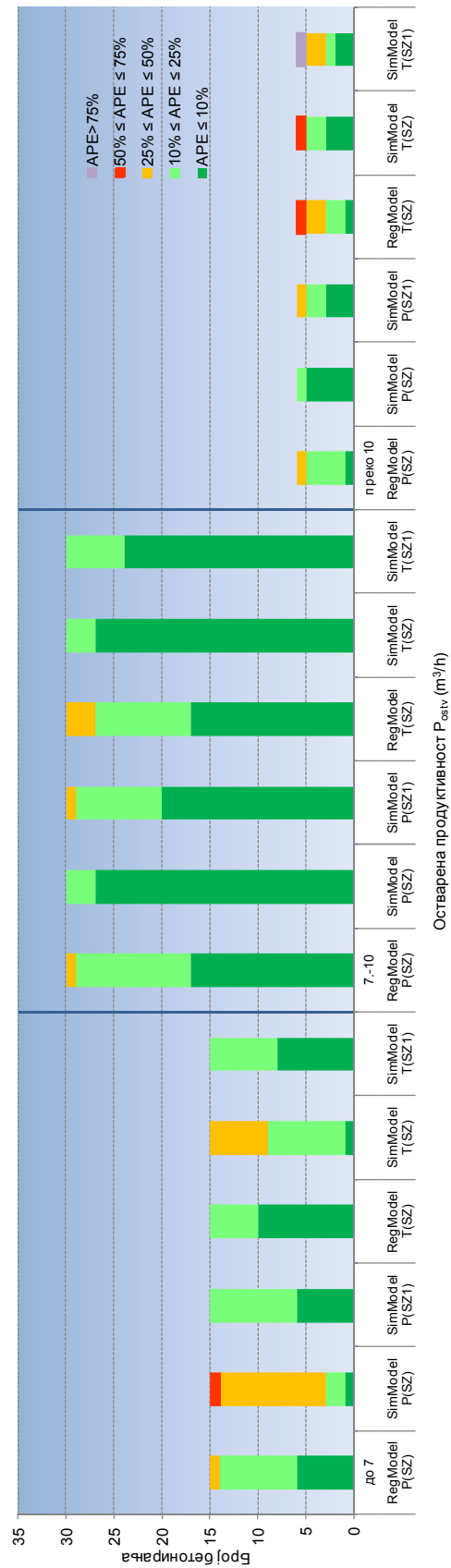
Слика 6.8 – Процентуална грешка за сваки модел за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за узорак без случајева када фабрика опслужује и трећа лица

На сликама 6.9 и 6.10 приказани су хистограми остварене продуктивности према *APE* за све моделе за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за оба узорака. Када се ради о целом узорку (хистограм на слици 6.9), за продуктивности у распону 7–10 m<sup>3</sup>/h, сви модели имају бољу моћ прогнозирања.

Код узорака где су базе опслуживале само посматрана градилишта (хистограм на слици 6.10) за продуктивности до 7 m<sup>3</sup>, као и 7–10 m<sup>3</sup> симулациони модели дају боље резултате.



Слика 6.9 – Хистограм остварене продуктивности према APE за све моделе (SZ) за цео узорак



Слика 6.10 – Хистограм остварене продуктивности према APE за све моделе (SZ) за узорак без случајева када фабрика опслужује и трећа лица



## 6.4 Поређење свих модела

Прогнозирање продуктивности/трајања бетонирања развијеним моделима може се вршити уз средњу апсолутну грешку у распону од око 8% до 22%. На основу спроведених упоредних анализа, може се уочити да сви модели врше бољу прогнозу уколико фабрика бетона врши справљање само за посматрано градилиште. И у том случају остварива је боља прогноза моделима за плоче у односу на моделе за стубове и зидове првенствено из разлога већег учешћа машинског рада при бетонирању плоча, већих количина бетона, па је и устаљеност операција већа. Процес је стабилнији, облик елемената (плоча) не варира много.

Код стубова и зидова најреалније би било посматрати ове елементе одвојено, али како објекат углавном садржи и једне и друге и бетонирају се у истом потезу, то је теже увести у разматрање. Можда је могућ такав приступ да се уведе проценат стубова и проценат зидова у односу на укупну количину и на тај начин ближе прогнозира продуктивност. Такође, код бетонирања стубова и зидова утицај рада радника има значајну улогу. Врло је тешко оценити карактеристике радне бригаде: уиграност, способности, вештине, мотивација, итд.

Постигнути су бољи резултати применом симулационих модела у односу на регресионе (само за узорак када база снабдева само посматрано градилиште) из разлога детаљнијег и свеобухватнијег приказа процеса симулацијом. Разлог за боље прогнозирање помоћу модела *SimModel (SZ1)* у односу на *SimModel (SZ)* може се објаснити значајним утицајем варијабиле уиграност радне бригаде ( $U_{r,br}$ ) и бројем елемената који се бетонирају ( $B_{el}$ ), које су узете у разматрање у овом моделу.

Уколико се врши прогнозирање продуктивности/трајања бетонирања плоче а фабрика бетона врши справљање бетона и за трећа лица, најпогоднији је модел *RegModel P(MK)* ( $MAPE=9,69\%$ ), а уколико је справљање бетона само за дато градилиште, онда је најповољнији модел *SimModel T(MK)* ( $MAPE=6,86\%$ ).

Уколико се врши прогнозирање продуктивности/трајања бетонирања стубова/зидова а фабрика бетона врши справљање бетона и за трећа лица, најпогоднији је модел *SimModel T(SZ1)* ( $MAPE=11,49\%$ ), а уколико је справљање бетона само за дато

градилиште, онда је опет најповољнији исти модел али са мањом грешком прогнозирања, *SimModel T(SZ1)* ( $MAPE=8,79\%$ ).

За прогнозирање бетонирања плоча постигнута је задовољавајућа тачност прогнозе ( $MAPE \leq 10\%$ ) за овакве процесе у организацији грађења грађевинских објеката. Код прогнозе бетонирања стубова/зидова, задовољавајућа тачност може се постићи само моделима *SimModel (SZ1)*.

## **7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА**

### **7.1 Закључна разматрања**

За успешну реализацију грађевинског пројекта један од битних фактора је добро планирање радова и постизање што веће продуктивности на градилишту. Бетонски радови представљају и трошковно и количински значајне позиције при изградњи било ког објекта у класичној градњи. Такође, најчешће су ово и критичне активности у динамичком плану извођења радова, па је потребно обратити посебну пажњу на одређивање трајања ових активности и њихово усклађивање са осталим активностима.

Главни циљ научног истраживања у овом раду био је развој модела за прогнозирање продуктивности процеса извођења бетонских радова. Прогнозирана продуктивност даје директно и податак о трајању ових радова. Најпре је анализирана доступна литература која се бави овом проблематиком. Затим је осмишљено, планирано и спроведено квантитативно истраживање снимањем процеса бетонирања стубова и зидова, као и плоча и међуспратних конструкција на градилиштима објеката високоградње на територији града Ниша. Снимање рада спроведено је методом фотопрегледа бележењем одговарајућих података у наменски припремљене формуларе. Подаци који су били потребни за израду модела, а нису могли директно бити снимљени, прикупљани су путем упитника, из пројектне документације, као и из разговора са надлежним органима. На основу свих ових података формирана је база података која је служила као основа за израду модела за прогнозирање продуктивности и трајања процеса бетонирања. У овом раду развијени су оригинални модели за прогнозирање и анализу продуктивности и трајања бетонирања различитих елемената (АБ стубови, АБ зидови, АБ плоче) објекта, готовим бетоном, помоћу пумпи за бетон.

Статистичка обрада података извршена је у програмском додатку за *Excel – XLStat 2014*. Након тога спроведена је вишеструка регресиона анализа за коју је коришћен исти програм. Одабране су независне варијабиле које су уведене у регресиону анализу и постепеном елиминацијом дошло се до статистички значајних варијабила које су послужиле за формирање одговарајућих модела.

Формирана су четири модела применом вишеструке линеарне регресије, за плоче и за стубове/зидове: модел *RegModel P(MK)*, за прогнозирање продуктивности бетонирања плоча, модел *RegModel T(MK)*, за прогнозирање трајања бетонирања плоча, *RegModel P(SZ)* за прогнозирање продуктивности бетонирања стубова/зидова и *RegModel T(SZ)*, за прогнозирање трајања бетонирања стубова/зидова.

У вишеструкој линеарној регресији, за почетне независне варијабиле при формирању модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча, разматране су следеће варијабиле: количина бетона –  $Q$ , потребан укупан број миксера –  $B_{mu}$ , број миксера у циклусу –  $B_{mc}$ , просечна количина бетона по миксеру –  $Q_{pr.m}$ , број радника –  $B_R$ , теоретски учинак пумпе –  $U_{l.p}$ , старост пумпе –  $SP$ , дomet пумпе –  $DP$ , премештање пумпе –  $PP$ , висина на којој се врши бетонирање –  $V$ , дебљина плоче –  $dp$ , удаљеност бетонске базе од градилишта –  $L_{b-g}$ , практични учинак бетонске базе –  $U_{pr.b}$ , тип плоче –  $TP$  и расположивост бетонске базе –  $RasB$ . После извршене корелационе анализе, због постојања јаке корелационе везе између варијабли: количина бетона -  $Q$  и укупан број миксера -  $B_{mu}$ , настављена је анализа без варијабиле укупан број миксера -  $B_{mu}$ . За формирање модела за прогнозирање примењена је *backward* метода (корак по корак уназад), где су у првом кораку у регресиону анализу уведене све варијабле. После анализе варијансе (*ANOVA*) и констатације да не постоји проблем мултиколинеарности, у неколико корака добијени су параметри модела. Коначне варијабиле за модел *RegModel P(MK)* су:  $dp$  – дебљина плоче,  $V$  – висина на којој се врши бетонирање,  $B_{mc}$  – број миксера у циклусу,  $Q_{pr.m}$  – просечна количина бетона по миксеру,  $SP$  – старост пумпе,  $PP$  – премештање пумпе,  $L_{b-g}$  – удаљеност бетонске базе од градилишта,  $RasB$  – расположивост базе,  $Q$  – количина бетона за уграђивање и  $TP.P$  – тип плоче. Коначне варијабиле за модел *RegModel T(MK)* су:  $dp$  – дебљина плоче,  $V$  – висина на којој се врши бетонирање,  $B_{mc}$  – број миксера у циклусу,  $SP$  – старост пумпе,  $PP$  – премештање пумпе,  $L_{b-g}$  – удаљеност бетонске базе од градилишта,  $U_{pr.b}$  – практични учинак бетонске

базе,  $RasB$  – расположивост базе,  $Q$  – количина бетона за уграђивање и  $TP.P$  – тип плоче (пуна АБ плоча).

Као почетне независне варијабиле при формирању модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова, разматране су следеће варијабиле: количина бетона –  $Q$ , висина на којој се врши бетонирање –  $V$ , број елемената (стубова и/или зидова) –  $B_{el}$ , број радника –  $B_R$ , потребан укупан број миксера –  $B_{mu}$ , број миксера у циклусу –  $B_{mc}$ , просечна количина бетона по миксеру –  $Q_{pr.m}$ , теоретски учинак пумпе –  $U_{t,p}$ , старост пумпе –  $SP$ , дOMET пумпе –  $DP$ , удаљеност бетонске базе од градилишта –  $L_{b-g}$ , практични учинак бетонске базе –  $U_{pr,b}$ , уиграност радне бригаде –  $U_{rb}$  и расположивост бетонске базе –  $RasB$ . На исти начин као и у претходном случају, добијени су параметри модела и учешће следећих независних варијабила: за модел *RegModel P(SZ)*:  $Q$  – количина бетона за уграђивање,  $B_{el}$  – број елемената,  $U_{rb}$  – уиграност радне бригаде и  $RasB$  – расположивост базе, а за модел *RegModel T(SZ)*:  $Q$  – количина бетона за уграђивање,  $B_{el}$  – број елемената,  $U_{rb}$  – уиграност радне бригаде,  $SP$  – старост пумпе и  $RasB$  – расположивост базе.

Симулациони модели израђени су у програмском пакету за моделирање *AnyLogic 7.2.0* који ради у објектно орјентисаном окружењу *JAVA*. За моделирање разматраног процеса коришћена је мулти-метода: метода дискретних догађаја (*Discrete Event Simulation - DES*) у комбинацији са методом заснованом на агентима (*Agent-Based Modeling - ABM*). Подаци сакупљени снимањем процеса на градилиштима, обрађени и представљени одговарајућим расподелама вероватноћа постали су улазни подаци за израду модела. Процес је представљен врло детаљно, почев од справљања бетона у фабрици, преко његовог транспорта и уграђивања на градилишту, до поновног повратка миксера у фабрику бетона. Одређени параметри и функције у моделу представљени су одговарајућим расподелама вероватноћа. Формирана су три различита симулациона модела: модел за симулацију бетонирања плоча (*SimModel (MK)*), модел за симулацију бетонирања стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено *Weibull(3)* расподелом вероватноћа (*SimModel (SZ)*) и модел за симулацију бетонирања стубова и/или зидова где је време истовара миксера представљено регресионом једначином зависном од уиграности радне бригаде и броја стубова и/или зидова (*SimModel(SZ1)*).

На основу свих спроведених анализа сваког од развијених модела, као и њихових поређења, показало се да су грешке прогнозирања различитим моделима у релативно уском опсегу (min 7,94%, max 21,99%). Сви модели за прогнозирање бетонирања плоча дају боље резултате у односу на моделе за стубове/зидове. Разлог томе је значајнији утицај карактеристика радне бригаде (способности, уиграност, и др.) при бетонирању стубова и зидова. Важна је усклађеност и синхронизација радника који држи црево пумпе, радника који вибрира бетон и радника који пушта вибратор у погон, како не би долазило до честих застоја. Већи број стубова/зидова захтева већи број премештања радне бригаде, па самим тим и више времена потрошеног на непродуктиван рад.

Такође, модели за плоче врше боље прогнозирање за количине бетона веће од око 100 m<sup>3</sup>. Ово се може објаснити тиме да већа количина захтева и дуже време па је организација процеса боља и мање је застоја и непотребних губитака. Велике количине за уграђивање вероватније ће бити детљније и темељније планиране и припремљене од стране извођача радова. Снабдевачи бетоном углавном наручене велике количине посматрају озбиљније, што може смањити кашњења у снабдевању. Услед ограниченог трајања смене, радници теже да раде брже и марљивије како би активности завршили у оквиру нормалног трајања смене. Такође, већа продуктивност се може постићи због чињенице, да се током дужег трајања процеса могу надокнадити нека мања, појединачна кашњења и друга ометања, које би могло настати у току дужег радног процеса.

Уочено је да су за веће количине бетона, оствариване веће продуктивности процеса бетонирања плоча. Ова појава може се приписати томе да за веће количине радова, је потребно и дуже време, рад се схвата озбиљније, база справља бетон само за дато градилиште па је мање трајање застоја због чекања на бетон. Због дужег очекиваног времена, рад је бржи, без непотребних застоја и у циљу бржег завршетка продуктивност је већа. Такође, већа продуктивност се може постићи због чињенице, да се током дужег трајања процеса могу надокнадити нека мања, појединачна кашњења и друга ометања, које би могло настати у току дужег радног процеса.

Постигнути су бољи резултати применом симулационих модела у односу на регресионе (само за узорак када база снабдева само посматрано градилиште) из разлога детаљнијег и свеобухватнијег приказа процеса симулацијом.

## 7.2 Закључци

На основу спроведеног истраживања, развијених модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања и извршених анализа у овом раду, могу се извести следећи закључци:

- При бетонирању плоча са повећањем количине долази до повећања остварене продуктивности;
- При бетонирању стубова и зидова карактеристике радне бригаде имају значајан утицај на продуктивност;
- Доказане су полазне хипотезе да је могуће идентификовати факторе који имају значајан утицај на продуктивност, извршити њихово квантификовање и развити модел за прогнозирање продуктивности извођења бетонских радова са предложеним утицајним факторима;
- Сви развијени модели боље прогнозирају продуктивност и време у случају да фабрика бетона врши снабдевање бетоном само посматрано градилиште;
- Сви развијени модели боље прогнозирају продуктивност и време при бетонирању плоча у односу на бетонирање стубова/зидова;
- Регресиони модели пружају довољну тачност за прогнозирање и имају бољу примену код прогнозирања продуктивности и трајања бетонирања плоча мањих количина (оквирно до 100 m<sup>3</sup>);
- Симулациони модели врше боље прогнозирање, али имају примену само уколико се не планира снабдевање трећих лица истом фабриком бетона или и у случајевима ако се планира, али тако да уопште не постоји угрожавање разматраног градилишта;
- Симулациони модели имају могућност различитих анализа и варијација параметара, оптимизације различитих циљева по различитим критеријумима;
- Симулациони модел свеобухватније представља процес бетонирања, реалније осликава стварно стање и пружа визуелно сагледавање процеса у две и три димензије;

- Предложени модели могу бити корисни у фази планирања и омогућити тачније прогнозирање трајања активности при извођењу бетонских радова и тако корисно утицати на доношење одлука, прогнозирање тока радова и боље управљање процесом бетонирања са циљем повећања продуктивности, скраћења трајања и смањења трошкова;
- У случају тоталне расположивости фабрике бетона и бетонирања плоче, најповољније прогнозирање је моделом *SimModel T(MK)*;
- У случају снабдевања и трећих лица и прогнозирања при бетонирању плоче, најповољнија је примена модела *RegModel P(MK)*;
- У случају тоталне расположивости фабрике бетона и бетонирања стубова/зидова, најповољније прогнозирање је моделом *SimModel T(SZ1)*;
- У случају снабдевања и трећих лица и прогнозирања при бетонирању стубова/зидова, најповољнија је примена модела *SimModel T(SZ1)*;
- Са довољном тачношћу предложеним моделима може се вршити прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања.

### 7.3 Препоруке за примену у пракси

Формирани регресиони и симулациони модели могу бити корисно средство и помоћ руководиоцима и инжењерима на градилишту у планирању извођења радова. Са сасвим довољном тачношћу, ови модели омогућују релативно брзо прогнозирање продуктивности и трајања процеса бетонирања одређених елемената.

За примену регресионих модела, потребно је у одговарајући израз за израчунавање продуктивности или времена трајања процеса, убацити дефинисане варијабиле и једноставним сабирањем/одузимањем и множењем израчунати тражену вредност. Добијена вредност продуктивности или трајања процеса је тачна са одређеном вероватноћом, у зависности од изабраног модела.

Симулациони модел је много детаљнији у односу на регресионе и захтева мало више ангажовања за добијање траженог решења. При покретању формиране апликације потребно је изабрати одговарајуће параметре од понуђених, уписати одговарајуће



карактеристике процеса и покренути симулацију. Све ово захтева, поред основног знања рада на рачунару, знање рада у *excel*-у (убацивање запремина планираних миксера у *excel* табелу) и инсталацију *AnyLogic* софтвера.

По покретању симулације, процес је могуће пратити визуелно у 2D и 3D, као и путем различитих варијабила, хистограма и дијаграма. Симулацију је могуће убрзати или успорити, променити различите параметре и испробати различите комбинације и сценарије у циљу добијања најповољнијих са одговарајућих аспеката.

И овај модел, наравно, даје резултате са одговарајућом вероватноћом, што је и својствено стохастичким процесима.

Пример је показао да се симулационо моделирање процеса извођења бетонских радова може успешно применити у условима домаћег грађевинарства. Планирање процеса бетонирања помоћу симулације вредан је алат за оперативно планирање радова на градилиштима, а на дискретним догађајима заснован систем могао би бити од помоћи шефовима градилишта у доношењу правилних одлука, као и у довољно тачном прогнозирању тока радова за сам процес бетонирања.

Развијени оригинални модели могу послужити, како градилиштима за планирање извођења бетонских радова, тако и фабрикама бетона за планирање производње бетона и синхронизацију свог рада са процесом бетонирања на градилишту.

## **7.4 Правци даљих истраживања**

Спроведеним истраживањима, извршеним анализама и развијеним моделима у овом раду, свакако није заокружена једна широка и врло значајна проблематика у области организације извођења радова, као што је продуктивност. Планирају се даља истраживања и развој нових модела за прогнозирање продуктивности процеса бетонирања, али и неких других процеса у извођењу радова, као што су армирачки и тесарски радови.

У даљим истраживањима најпре се треба фокусирати на проширењу базе података снимањем процеса на већем броју градилишта. Повећањем величине узорка за анализу, добио би се хомогенији узорак и повећала би се и тачност добијених резултата, односно постигло би се боље прогнозирање. База података се може проширити и у смислу

локације: садашњи подаци везани су искључиво за територију града Ниша, а нов и проширен узорак могао би да обухвати одређену ширу територију, нпр. Нишавски округ и сл.

Стечена искуства аутора овог рада при снимању процеса указују на то да је врло тешко или у неким случајевима немогуће било праћење радова на више места истовремено. Стога, као што је већ објашњено у ранијим поглављима, неки подаци везани за рад фабрике бетона добијани су као информације, а неки су претпостављени. Праћењем рада фабрике бетона имао би се увид у време потребно за справљање бетона и утовар у возила, као и у то да ли и колико је база ангажована за производњу бетона за трећа лица, да ли због тога долази до застоја у бетонирању на градилишту и у којој мери. У одређеним случајевима, где прегледност на градилишту то није дозвољавала, тешко је било истовремено пратити долазак миксера и уграђивање бетона у стубове и зидове. Како уграђивање бетона у ове елементе траје релативно кратко (неколико минута) то је потребно брзо бележење података и усредсређеност само на тај део снимања. У циљу избегавања ових недостатака и што бољег прогнозирања продуктивности, ангажовањем већег броја учесника у реализацији снимања процеса бетонирања, треба спровести истовремено снимање рада:

- У фабрици бетона;
- На градилишту на месту допреме бетона (место за паркирање и чекање миксера);
- На градилишту на месту уграђивања бетона (на плочи).

Овакво свеобухватно снимање омогућило би реалније сагледавање целокупног процеса и сакупљање квалитетнијих улазних података.

Укључивање нових варијабли, такође се планира у дањем истраживању. Анализа и испитивање њиховог утицаја, може допринети изради тачнијих и прецизнијих модела за прогнозирање продуктивности. Планира се увођење нових варијабила, као што су: карактеристике радника, утицај оплате, утицај арматуре, атмосферске прилике, управљање на градилишту, итд. Неки подаци везани за карактеристике радника већ су прикупљани, али не у довољној мери, па је у разматраним моделима уведена само уиграност радне бригаде. При сакупљању ових података, пре свега, потребно је створити одговарајуће поверење са особама које треба да дају такве податке. Такође,

битна је и искреност при давању ових података и објективност у процени неких од параметара. По мишљењу аутора рада, подаци о радницима битнији су при прогнозирању продуктивности бетонирања стубова и зидова у односу на бетонирање плоче. Неоправдани застоји које су производили радници због својих вештина, уиграности, мотивисаности и сл., имали су много мањи утицај на продуктивност при бетонирању плоча. Врста оплате треба да буде једна од варијабила при даљим истраживањима, као и утицај арматуре кроз количину арматуре по јединици мере. Треба испитати да ли различити типови оплате могу да имају утицај на остварену продуктивност. Већа количина арматуре по јединици мере и сложенији начини армирања могу довести до утицаја на продуктивност процеса бетонирања. Утицај атмосферских прилика може се увести кроз, на пример, годишње доба, просечну температуру ваздуха или описом, као нпр. хладно, топло, кишно, итд. Управљање на градилишту, такође би могло да буде једна од варијабила које треба анализирати. Добрим управљањем, координацијом и организовањем рада смањују се непотребни застоји и чекања на благовремене одлуке, снабдевање материјалом, почетак рада, припрему и др.

Симулациони модел је могуће проширити и детаљније представити процес и увођењем континуалности процеса у појединим деловима (нпр. кретање бетона кроз цевни вод пумпе, и сл.) применом системске динамике (*SD*). У библиотеци *AnyLogic-a* постоје блокови за описивање кретања флуида (*Fluid Library*) што је погодно искористити и проширити комбинацију дискретних догађаја и методе агената. Како симулациони модел пружа могућност оптимизације, треба формирати одговарајуће функције циља и спровести оптимизацију по одговарајућим критеријумима.

Анализе у овом раду су се углавном базирале на прогнозирању продуктивности, и самим тим и времена, односно трајања бетонских радова. У даљим анализама треба увести и трошкове који се јављају при процесу и тиме употпунити прогнозе. Овај приступ би могао да наиђе на одређене потешкоће у прибављању тачних података, јер су трошкови углавном тајна предузећа и врло је тешко добити реално стање. Функција циља за поменути оптимизацију би, дакле, требало да буде везана за минимизацију трошкова, као једног од најважнијих фактора у било којој производњи.

У даљим истраживањима планира се примена поред већ анализираних, још неких метода за прогнозирање и упоређивање добијених резултата. Последњих деценија, методе вештачке интелигенције постале су веома популарне у проучавању прогнозирања, процене, предвиђања, у различитим областима науке. Прогнозирање је могуће извршити применом низа различитих метода, као што су методе вештачке интелигенције: Метода неуронских мрежа (*Neural Network*), Метода генетских алгоритама (*Genetic Algorithm*) и Метода носећих вектора (*Support Vector Machine*), затим, Закључивање на основу случајева (*Case Based Reasoning*) и сл.

На основу свега изложеног, може се констатовати да има простора и смисла за даље бављење истраживањима у овој области.

---

## 8. ЛІТЕРАТУРА

- [1] Abdel-Razek, R. H, Abd Elshakour M, H, Abdel-Hamid, M: *Labor productivity: benchmarking and variability in Egyptian projects*, International Journal of Project Management, 25 (2007) 2, 189-197
- [2] Abd, S. M, Abd M, A, Zain, M, ismail, A: *Development of productivity assessment methodology for concreting process*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 5 (2008) 3, 1-7
- [3] Abd-El H.: *Predicting the Production Rate of Pouring Ready Mixed Concrete Using Regression Analysis*, Journal of Civil Engineering and Science **3** (2014) 4, pp.219-234.
- [4] Akhavian, R, Behzadan, A. H: *Dynamic simulation of construction activities using real time field data collection*, In Proceedings of the 2011 eg-ice Workshop, University of Twente, The Netherlands, (2011, July), 6-8
- [5] Alinaitwe, H, Mwakali, J. A, Hansson, B: *Efficiency of craftsmen on building site studies in Uganda*, First International Conference on Advances in Engineering and Technology, 2006, 60-267
- [6] Ailland, K, Bargstädt, H. J, Hollermann, S: *Construction process simulation in bridge building based on significant day-to-day data*, In Proceedings of the Winter Simulation Conference, (2010, December), 3250-3261
- [7] Alkoc, E, Erbatur, F: *Productivity improvement in concreting operations through simulation models*, Building Research & Information, 25 (1997) 2, 82-91
- [8] Al-Sudairi, A. A, Diekmann, J. E, Songer, A. D, Brown, H. M: *Simulation of construction processes: traditional practices versus lean principles*, In Proceedings IGLC, 7 (1999), 39-51
- [9] Anson, M, Wang, S. Q: *Performance of concrete placing in Hong Kong buildings*, Journal of construction Engineering and Management, 124 (1998) 2, 116-124
- [10] Attar, A. A, Gupta, A. K, Desai, D. B: *A study of various factors affecting labour productivity and methods to improve It*, Journal of Mechanical and Civil Engineering, Second International Conference on Emerging Trends in Engineering, 11-14
- [11] Asbach, L, Dorndorf, U, Pesch, E: *Analysis, modeling and solution of the concrete delivery problem*, European Journal of Operational Research 193 (2009) 3, 820–835
- [12] Borshchev, A: *Multi-method modeling*, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, (2013), 4089-4100

- 
- [13] Chapman, R. E, Butry, D. T: *Measuring and improving the productivity of the U.S. construction industry: Issues, challenges, and opportunities*, National Institute of Standards and Tehnology, July 17, 2008.
- [14] Chang, C. Y, Wi, S: *A Case study on productivity analysis and methods improvement for masonry work*, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 13 (2013) 4, 372-381
- [15] Chan, P, Kaka, A: *Construction productivity measurement: A comparison of two case studies*, 20th Annual ARCOM Conference, 1-3 September 2004, Heriot Watt University, Association of Researchers in Construction Management, Vol. 1, 3-12.
- [16] Crawford, P, Vogl, B: *Measuring productivity in the construction industry*, Building Research & Information, 34 (2006) 3, 208-219
- [17] Cristian, J, Hachey, D: *Effect of delay timens on production rates in construction*, Journal of Construction Engineering and Management 121 (1995) 1, 20-26
- [18] Čerić, V: *Simulacijsko modeliranje*, Školska knjiga, Zagreb, 1993
- [19] Dai, J, Goodrum, P. M, Maloney, W. F: *Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 135 (2009) 3, 217–226
- [20] Dunlop, P, Smith, S. D: *Estimating key characteristics of the concrete delivery and placement process using linear regression analysis*, Civil Engineering and Environmental Systems, 4 (2003) 20, 273-290
- [21] Dunlop, P, Smith, S. D: *Planning, estimation and productivity in the lean concrete pour. Engineering*, Construction and Architectural Management, 11 (2004) 1, 55-64
- [22] Dunlop, P, Smith, S: *Stochastic modelling of concrete operations*, 16th Annual ARCOM Conference. 2000. p. 6-8.
- [23] Ђорић, Д, Јевремовић, В, Малишић, Ј, Николић-Ђорић, Е: *Атлас расподела*, Грађевински факултет, Београд, 2007
- [24] Економске анализе, Србија, окружење и међународна економија ([www.makroekonomija.org](http://www.makroekonomija.org))
- [25] Elazouni, A, Ali, A.E, Abdel-Razek, R. H: *Estimating the acceptability of new formwork systems using neural networks*, Journal of Construction Engineering and Management, 131 (2005) 1, 33–41
- [26] Enshassi, A, Mohamed, S, Mayer, P, Abed, K: *Benchmarking masonry labor productivity*, International Journal of Productivity and Performance, 56 (2007) 4, 358-368
- [27] EU KLEMS Growth and Productivity Accounts ([www.euklems.net/](http://www.euklems.net/))
- [28] Ezeldin, A. Samer, and Lokman M. Sharara: *Neural networks for estimating the productivity of concreting activities*, Journal of construction engineering and management 132 (2006) 6, 650-656
- [29] Факултет Организационих Наука Београд ([master.fon.bg.ac.rs/](http://master.fon.bg.ac.rs/) )
-

- 
- [30] Farnad N, Pouya N: *Dynamic modeling of labor productivity in construction projects*, International Journal of Project Management 31 (2013) 6, 903–911
- [31] Флашар, А: Проучавање технолошких процеса у грађевинарству, Факултет Техничких наука, Нови Сад, 1985
- [32] Goodrum, P. M, Zhai, D, Yasin, M. F: *Relationship between changes in material technology and construction productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 135 (2009) 4, 278-287
- [33] Gouett, M. C, Haas, C. T, Goodrum, P. M, Caldas, C.H: *Activity Analysis for Direct-Work-Rate Improvement in Construction*, Journal of Construction Engineering and Management, 137 (2011) 12, 1117-1124
- [34] Graham, D., Simon S.: *Estimating the productivity of cyclic construction operations using case-based reasoning*, Advanced Engineering Informatics 18 (2004) 1, 17-28.
- [35] Graham, L. D, Forbes, R.D, Smith, D. S: *Modeling the ready mixed concrete delivery system with neural networks*, Automation in Construction, 15 (2006) 5, 656-663
- [36] Grau, D, Caldas, C. H, Haas, C. T, Goodrum, P. M, Gong, J: *Impact of Fast Automated Tracking of Construction Components on Labor Productivity*, In Procs 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), 2009
- [37] Graham, D, Smith, S. D: *Estimating the productivity of cyclic construction operations using case-based reasoning*, Advanced Engineering Informatics, 18 (2004) 1, 17-28
- [38] Graham, D, Smith, S. D, Tommelein, I. D: *Cost of concrete placement for contractors*, In 21st Annual ARCOM Conference, (2005, September), 7-9
- [39] Hajjar, D, AbouRizk, S. M: *Unified modeling methodology for construction simulation*, Journal of Construction Engineering and Management, 128 (2002) 2, 174-185
- [40] Hammad, M. S, Omran, A, Pakir, A. H. K: *Identifying ways to improve productivity at the construction industry*, Acta Technica Corvininesis-Bulletin of Engineering, 4 (2011) 4, 47-50
- [41] Han, S, Hao, P: *Lessons learned from schedule estimation using real-time data in a concreting operation*, 886-891
- [42] Hanna, A. S, Taylor, C. S, Sullivan, K. T: *Impact of extended overtime on construction labor productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 131(2005) 6, 734-739
- [43] Hanna, A. S, Chang, C. K, Sullivan, K. T, Lackney, J. A: *Impact of shift work on labor productivity for labor intensive contractor*, Journal of Construction Engineering and Management, 134 (2008) 3, 197-204
- [44] Herbsman, Zohar, and Ralph Ellis. "Research of factors influencing construction productivity." *Construction Management and Economics* 8.1 (1990): 49-61.
- [45] Herman, V, Petričević, A: *Utjecaj uvjeta rada na radnu produktivnost*, Ekonomski vjesnik, 24 (2011) 2, 314-324
- [46] Hodžić, E., Hodžić, E: *Modeliranje i simulacija struktura kompleksnih proizvodnih sistema*, Tehnički glasnik, 8 (2014) 2, 150-156
-

- 
- [47] Horner, R. M. W., Talhouni, B. T., & Thomas, H. R. (1989). Preliminary results of major labour productivity monitoring programme. In *Proceedings of the 3rd Yugoslavian Symposium on Construction Management, Cavtat* (pp. 18-28).
- [48] Hwang, B. G, Thomas, S. R, Haas, C. T, Caldas, C. H: *Measuring the impact of rework on construction cost performance*, Journal of Construction Engineering and Management, 135 (2009) 3, 187-198
- [49] Hwang, S, Liu, Y. L: *Contemporaneous time series and forecasting methodologies for predicting short-term productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 136 (2010) 9, 1047–1055
- [50] Ibbs, W, Liu, M: *Improved measured mile analysis technique*, Journal of construction engineering and management, 131 (2005) 12, 1249-1256
- [51] Ioannou, P. G, Martinez, J. C: *Simulation of complex construction processes*, In Proceedings of the 28th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society, (1996, November),1321-1328
- [52] Ioannou, P. G, Martinez, J. C: Scalable simulation models for construction operations. In Proceedings of the 28th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society, (1996, November), 1329-1336
- [53] Ioannou, P. G, Martinez, J. C: *Comparison of construction alternatives using matched simulation experiments*, Journal of construction engineering and management, 122 (1996) 3, 231-241
- [54] Jakovčević, K, Andrašić, J: *Methods of expression and measuring productivity in agricultural company*, Traktori i pogonske mašine, 16 (2011) 4, 32-41.
- [55] Jang, H, Kim, K, Kim, J, Kim, J: *Labour productivity model for reinforced concrete construction projects*, Construction Innovation: Information, Process, Management, 11 (2011) 1, 92-113
- [56] Jarkas, A. M: *Analysis and Measurement of Buildability Factors Affecting Edge Formwork Labour Productivity*, Journal of Engineering Science and Technology Review 3 (2010) 1, 142-150
- [57] Jarkas, A. M: *Buildability Factors Influencing Concreting Labor Productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 138 (2012) 1, 89–97
- [58] Jarkas, A. M: *The effects of buildability factors on rebar fixing labour productivity of beamless slabs*, Australasian Journal of Construction Economics and Building, 10 (2010) 1/2, 16-35
- [59] Jun, D. H, El-Rayes, K: *Optimizing the utilization of multiple labor shifts in construction projects*, Automation in Construction, 19 (2010) 2, 109-119
- [60] Kaming, P. F, Holt, G. D, Kometa, S. T, Olomolaiye, P. O: *Severity diagnosis of productivity problems reliability analysis*, International Journal of Project Management, 16 (1998) 2, 107-113
- [61] Kinable, J, Wauters, T, Vanden Berghe, G: *The Concrete Delivery Problem*, Computers & Operations Research, 2014
-



- [62] Klepac, J: Proučavanje rada u građevinarstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Građevinskih znanosti u Zagrebu, Zagreb, 1980
- [63] Labban, R, AbouRizk, S, Haddad, Z, Elserly, A: *A discrete event simulation model of asphalt paving operations*, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, (2013), 3215-3223
- [64] Lebcir, R, Choudrie, J: *A Dynamic Model of the Effects of Project Complexity on Time to Complete Construction Projects*, International Journal of Innovation, Management and Technology, 2 (2011) 6, 477-483
- [65] Lee, S. H, Diekmann, J. E, Songer, A. D, Brown, H: *Identifying waste: applications of construction process analysis*, In Proceedings of the Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 1999, 63-72)
- [66] Lee, D. E, Yi, C. Y, Lim, T. K, Arditi, D: *Integrated simulation system for construction operation and project scheduling*, Journal of Computing in Civil Engineering, 24 (2010) 6, 557-569
- [67] Leung, A, Tam, C.M, Liu, D. K: *Comparative study of artificial neural networks and multiple regression analysis for predicting hoisting times of tower cranes*, Building and Environment 36 (2001) 4, 457-467
- [68] Li, Y, Taylor, T. R: *The impact of design rework on construction project performance*, In Proceedings of the 29th Annual International Conference of the System Dynamics Society, 2011
- [69] Love, P. E. D, Holt, G. D, Shen, L. Y, Li, H, Irani, Z: *Using systems dynamics to better understand change and rework in construction project management systems*, International Journal of Project Management, 20 (2002) 6, 425-436.
- [70] Marović, I, Car-Pušić, D, Završki, I: *Application of Chronometry Method Towards Calculation of Regulation*, 8th International Conference: Organization, Technology and Management in Construction, Umag, Hrvatska, 17-20. 09. 2008.
- [71] Martinez, J. C, Ioannou, P. G: *General-purpose systems for effective construction simulation*, Journal of construction engineering and management, 125 (1999) 4, 265-276
- [72] Martinez, J. C: *Methodology for conducting discrete-event simulation studies in construction engineering and management*, Journal of Construction Engineering and Management, 136 (2009) 1, 3-16
- [73] Marx, A, Erlemann, K, König, M: *Simulation of construction processes considering spatial constraints of crane operations*, In Proceedings of the 13th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE-XIII), Nottingham, (2010, June)
- [74] Matematika es szamitogeppel segitett modellezes ([www.model.u-szeged.hu](http://www.model.u-szeged.hu))
- [75] Mawdesley, M. J, Al-Jibouri, S: *Modelling construction project productivity using systems dynamics approach*, International Journal of Productivity and Performance Management, 59 (2009) 1, 18-36.
- [76] Mendenhall, W: *A Second Course in Statistic Regression Analysis*, University of Florida, 2012

- 
- [77] Miller, S, Dorée, A: *Improving logistics in the asphalt paving process-what can we learn from the planner's logic*, 2008
- [78] Mohamed, A. N: *Knowledge based approach for productivity adjusted construction schedule*, Expert Systems with Applications, 21 (2001) 2, 87-97
- [79] Mohamed, S, Srinavin, K: *Forecasting labor productivity changes in construction using the PMV index*, International Journal of Industrial Ergonomics, 35 (2005) 4, 345-351
- [80] Mohamed, A. W, Bernard, V: *Trends of productivity growth in the construction industry across Europe, US and Japan*, Construction Management and economics, 29 (2011) 6, 635-644
- [81] Moselhi, O, Assem, I, El-Rayes, K: *Change Orders Impact on Labor Productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 131, (2005) 3, 354–359
- [82] Multimethod Simulation Software ([www.anylogic.com](http://www.anylogic.com))
- [83] Naso, D, Surico, M, Turchiano, B, Kaymak, U: *Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete*, European Journal of Operational Research, 177 (2007) 3, 2069-2099
- [84] Navon, R, Goldman, A: *On-site labour-input data collection for comparison between housing-construction methods*, International Journal of Project Management, 15 (1997) 2, 79-83
- [85] Nga, S. T, Skitmoreb, R. M, Lamc, K, C, Poona, A: *Demotivating factors influencing the productivity of civil engineering projects*, International Journal of Project Management, 22 (2004) 2, 139–146
- [86] Olatunde, O, Okunola, O. S, Abiodun, A, D: *Assesing the imapct of delays on the productivity of concrete placement by cranes in Nigeria*, Journal of Construction Project Management and Innovation, 1 (2011) 2, 80–104
- [87] Panas, A, Pantouvakis, J. P: *Evaluating research methodology in construction productivity studies*, The Built & Human Environment Review, 3 (2010) 1, 63-85
- [88] Park, H-S, Thomas, S.R, Tucker, R. L: *Benchmarking of Construction Productivity*, Journal of Construction Engineering and Management, 131 (2005) 7, 772–778
- [89] Park, H-S: *Conceptual framework of construction productivity estimation*, KSCE Journal of Civil Engineering, 10 (2006) 5, 311-317
- [90] Park, M, Kim, W-Y, Lee, H-S, Han, S: *Supply chain management model for ready mixed concrete*, Automationh in Construction, 20 (2011), 44-55
- [91] Pei-Chun L, Jenhung W, Shan-Huen H, Yu-Ting W: *Dispatching ready mixed concrete trucks under demand postponement and weight limit regulation*, Automation in Construction 19 (2010) 6, 798–807
- [92] Pinsky, M, Karlin, S: *An introduction to stochastic modeling*, Academic press, 2010
- [93] Prabhu, P. G, Ambika, D: *Study on behaviour of workers in construction industry to improve production efficiency*, International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD), 5 (2013), 59-66
-

- 
- [94] Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон – БАБ 87
- [95] Привредна комора Србије ([www.pks.rs](http://www.pks.rs))
- [96] Rodrigues, A, Bowers, J: *The role of system dynamics in project management*, International Journal of Project Management, 14 (1996) 4, 213-220
- [97] Salem, O, Solomon, J, Genaidy, A, Luegring, M: *Site implementation and assessment of lean construction techniques*, Lean Construction Journal, 2 (2005) 2, 1-21
- [98] Salem, O, Solomon, J, Genaidy, A, Minkarah, I: *Lean construction: from theory to implementation*, Journal of management in engineering, 22 (2006) 4, 168-175
- [99] Sertić, J, Završki, I: *Discussion of IC efficiency and organizational performance in construction industry*, CIB Joint International Symposium on Building Economics, Organization and Management in Construction Dubrovnik, Hrvatska, 27-30.09.2009.
- [100] Schmid, V, Doerner, K. F, Hartl, R. F, Salazar-González, J. J: *Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems*, Computers & Operations Research, 37(2010) 3, 559-574
- [101] Shehata, M. E, El-Gohary, K. M: *Towards improving construction labor productivity and projects' performance*, Alexandria Engineering Journal, 50 (2011) 4, 321-330
- [102] Soham, M, Rajiv, B: *Critical factors affecting labour productivity in construction projects: case study of south gujarat region of India*, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2 (2013) 4, 583-591
- [103] Soekiman, A, Pribadi, K. S, Soemardi, B. W, Wirahadikusumah, R. D: *Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia*, Procedia Engineering, 14 (2001), 865-873
- [104] Softconsulting ([www.savjetnik.ba/šta-je-produktivnost/](http://www.savjetnik.ba/šta-je-produktivnost/))
- [105] Song, L, AbouRizk, S. M: *Measuring and modeling labor productivity using historical data*, Journal of Construction Engineering and Management, 134 (2008) 10, 786-794
- [106] Sonmez, R: *Impact of occasional overtime on construction labor productivity: quantitative analysis*, Canadian Journal of Civil Engineering, 34 (2007) 7, 803-808
- [107] Статистичке таблице ([www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika](http://www.ef.uns.ac.rs/Download/statistika))
- [108] Стефановић, А: *Истраживања у области грађевинске механизације*, Издавачка јединица Универзитета у Нишу, Ниш, 1984
- [109] TALHOUNI, Bassam TK: *Measurement and analysis of construction labour productivity*, PhD Thesis, University of Dundee, 1990
- [110] Технички услови за транспортвани бетон СРПС У.М1.045
- [111] Thomas, H. R, Riley, D. R, Sanvido, V. E: *Loss of labor productivity due to delivery methods and weather*, Journal of Construction Engineering and Management, 125 (1999) 1, 39-46.
- [112] Thomas, H. R, Zavrski, I: *Construction baseline productivity: Theory and practice*, Journal of Construction Engineering and Management, 125 (1999) 5, 295-303
-

- 
- [113] Thomas, H. R., Horman, M. J., de Souza, U. E. L., Završki, I: *Closure to “Reducing Variability to Improve Performance as a Lean Construction Principle” by H. Randolph Thomas, Michael J. Horman, Ubiraci Espinelli Lemes de Souza, and Ivica Zavrski*, Journal of Construction Engineering and Management, 130 (2004) 2, 300-301
- [114] Трајковић, Д: *Организација грађења I*, Грађевински факултет, Ниш, 1995
- [115] Трбојевић, Б: *Организација грађевинских радова*, Грађевинска књига, Београд, 1988
- [116] University of Kentucky, College of Engineering ([www.engr.uky.edu](http://www.engr.uky.edu))
- [117] Vanegas, J, Chinowsky, P: *Animation of complex construction simulation models*, Arbor, 1001, 48109-2125
- [118] Vliet, M: *DACE Labor productivity norms –The new “Gulf Coast”?*, 2011 AACE INTERNATIONAL TRANSACTIONS EST.517
- [119] Wang, S.Q, Ofori, G: *Productivity of Ready Mixed Concrete Placing in Singapore*, Journal of Construction Research 2 (2001) 1, 57-66
- [120] Westover, J. H, Andrew R. W, Westover, L. A: *Enhancing long-term worker productivity and performance*, International Journal of Productivity and Performance Management 59 (2010) 4, 372-387
- [121] William, I, McEniry, G: *Evaluating the cumulative impact of changes on labor productivity*, Cost Engineering, 50 (2008) 12, 23-29
- [122] Watkins, M, Mukherjee, A, Onder, N, Mattila, K: *Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions*, Journal of Construction Engineering and Management, 135 (2009) 7, 657-667
- [123] Winch, G, Carr, B: *Benchmarking on-site productivity in France and the UK: a CALIBRE approach*, Construction Management and Economics 19 (2001) 6, 577-590
- [124] Zankoul, E, Khoury, H: *Evaluation of Agent-Based and Discrete-Event Simulation for Modeling Construction Earthmoving Operations*, Conference paper, june 2015
- [125] Zayed, T.M, Nosair, I. A: *Cost management for concrete batch plant using stochastic mathematical models*, Journal of Civil Engineering 33 (2006), 1065–1074
- [126] Zayed, T. M, Halpin, D. W, Basha, I. M: *Productivity and delays assessment for concrete batch plant-truck mixer operations*, Construction Management and Economics, 23 (2005) 8, 839-850
- [127] Zayed, T. M, Minkarah, I: *Resource allocation for concrete batch plant operation: Case study*, Journal of construction engineering and management, 130 (2004) 4, 560-569
- [128] Златановић, М: *Управљање транспортним процесима изградње саобраћајница*, Грађевинско-Архитектонски факултет, Ниш, 1999
- [129] Yi, W, Chan, A: *Critical review of labor productivity research in construction journals*, Journal of Management in Engineering, 2013
-

## 9. ПРИЛОЗИ

## Прилог 1 – Лист за снимање извођења бетонских радова (бетонирање стубова и зидова)

Градилиште: _____					Извођач радова: _____								
Датум: __. __. 201__.			Почетак снимања: ____ Завршетак снимања: ____			Временске прилике: _____							
Спрат: ____		Стубови: Такт: ____ ук. број: ____ Лифтовски оквир, број: ____ Зидна платна: ____ ук. број: ____			Степениште: ____ Греде: __ ук. број: ____ Међуспратна конструкције: ____			Укупна количина бетона ____ (m <sup>3</sup> )					
Фабрика бетона: _____ Капацитет: ____ m <sup>3</sup> /h Удаљеност од градилишта ____ km				Аутопумпа: _____ Домет ____ m Време доласка: _____ Време одласка: _____				Вибратор: _____ Снага ____ kW Број радника: ____					
Време рада миксера на градилишту													
Број миксера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Количина бетона (m <sup>3</sup> )													
Долазак миксера (време)													
Чекање у реду (min)													
Позиционирање (min)													
Прање (min)													
Одлазак миксера (време)													
Време уграђивања бетона (рад пумпе, вибратора и радника)													
Ред. Бет.	Позиција елемента	Почетак (време)	Припрема (трајање)	Рад пумпе (трајање)	Рад вибратора (трајање)	Застој (врста и време)	Губици (врста и време)	Завршетак (време)					
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													

15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

**Прилог 2 – Лист за снимање извођења бетонских радова (бетонирање плоча)**

Градилиште: _____						Извођач радова: _____						
Датум: ____ . ____ . 201_ .			Почетак снимања: ____ Завршетак снимања: ____			Временске прилике: _____						
Спрат: ____		Стубови: Такт: ____ ук. број: ____ Лифтовски оквир, број: ____ Зидна платна: ____ ук. број: ____			Степениште: ____ Греде: __ ук. број: ____ Међуспратна конструкције: ____			Укупна количина бетона ____ (m <sup>3</sup> )				
Фабрика бетона: _____ Капацитет: ____ m <sup>3</sup> /h Удаљеност од градилишта ____ км				Аутопумпа: _____ Домет ____ m Време доласка: _____ Време одласка: _____				Вибратор: _____ Снага ____ kW Број радника: ____				
<b>Време рада миксера, пумпе, вибратора и радника</b>												
Р. бр. микс	Рег. број	Бр. отпр.	m <sup>3</sup>	Полазак из базе	Долазак на градилиште	Чекање у реду	Позиц.	Застоји и губици	Почетак истовара	Крај истовара	Прање	Одлазак у базу
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

---

26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48												
49												
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58												
59												
60												
61												



### Прилог 3 – Упитник за оцену карактеристика радника и радних бригада на извођењу бетонских радова

Објекат \_\_\_\_\_; Извођач радова \_\_\_\_\_;

Датум: \_\_\_\_\_

Молим Вас да попуните овај упитник тачним подацима. Одговори ће се користити у циљу проучавања продуктивности у грађевинарству кроз израду докторске дисертације. Ваши подаци неће бити изнети у јавност. Унапред хвала, мр Биљана Матејевић, ГАФ Ниш.

Р.бр.	Име и презиме	Старост (год)	Стручна спрема	Радно искуство (год)	Вештине (оцена од 1 до 3)	Уиграност радне групе (оцена од 1 до 3)	Мотивисаност (оцена од 1 до 3)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

Објашњење за попуњавање је дато на другој страни листа

## **ОБЈАШЊЕЊЕ:**

У поља уписати одговарајућу скраћеницу, оцену или године

### Стручна спрема

основна школа (ОС), средња школа – III степен (СIII), средња школа – IV степен (СIV), виша школа (ВШ), факултет (Ф)

### Радно искуство

Број година проведених на пословима бетонирања

### Вештине

3 – велика (радник је способан за обављање датог посла, стручан је и радове изводи квалитетно)

2 – средња (радник је средње способан за обављање датог посла, стручан је и радове изводи квалитетно)

1 – мала (радник је мање способан за обављање датог посла, посао не обавља стручно и радове нису задовољавајућег квалитета)

### Уиграност радне групе

Дати оцену уиграности радне групе:

3 - група је веома уиграна (послови се обављају веома брзо, нема застоја због неразумевања и различитости у погледу вештина међу радницима, способност и смисао за групни рад)

2 – група је средње уиграна (послови се спорије обављају због застоја који настају услед неразумевања и различитости у погледу вештина међу радницима, мања способност рада у групи)

1 – група није уиграна (веома споро обављање послова, чести застоји, мала способност радника за групни рад)

### Мотивисаност

3 – радник је веома мотивисан (воли посао који обавља, задовољан је зарадом и атмосфером међу запосленима)

2 – радник је средње мотивисан (није у потпуности задовољан зарадом, послом и атмосфером међу запосленима)

1 – радник није мотивисан (не воли посао који обавља, није задовољан зарадом и атмосфером међу запосленима)

## Прилог 4 – Део листинга симулационог модела

```

{
// Parameters

public
double medudolazak;

/**
 * Returns default value for parameter <code>medudolazak</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public double _medudolazak_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0.0;
}

public void set_medudolazak( double medudolazak ) {
    if (medudolazak == this.medudolazak) {
        return;
    }
    double _oldValue_xjal = this.medudolazak;
    this.medudolazak = medudolazak;
    onChange_medudolazak_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**
 * Calls "On change" action for parameter medudolazak.<br>
 * Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
 * (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>
 * Please call <code>set_medudolazak()</code> method instead.
 */
protected void onChange_medudolazak() {
    onChange_medudolazak_xjal( medudolazak );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_medudolazak_xjal( double oldValue ) {
    int index;

    {
        com.anylogic.libraries.processmodeling.Source<Mikser> self = mikseri;
        double _value;
        _value = -medudolazak
;
        _value = MINUTE.convertTo( _value, SECOND );
        mikseri.set_startTime( _value );
    }
}

public
int brojRadnika;

/**
 * Returns default value for parameter <code>brojRadnika</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public int _brojRadnika_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0;
}

public void set_brojRadnika( int brojRadnika ) {
    if (brojRadnika == this.brojRadnika) {
        return;
    }
    int _oldValue_xjal = this.brojRadnika;
    this.brojRadnika = brojRadnika;
    onChange_brojRadnika_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**
 * Calls "On change" action for parameter brojRadnika.<br>
 * Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
 * (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>

```

```

* Please call <code>set_brojRadnika()</code> method instead.
*/
protected void onChange_brojRadnika() {
    onChange_brojRadnika_xjal( brojRadnika );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_brojRadnika_xjal( int oldValue ) {
    int index;
    {
        com.anylogic.libraries.processmodeling.ResourcePool<Resource> self = radnici;
        int _value;
        _value = brojRadnika
;
        radnici.set_capacity( _value );
    }
}

public
double praktičniUčinakBaze;

/**
 * Returns default value for parameter <code>praktičniUčinakBaze</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public double _praktičniUčinakBaze_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0.0;
}

public void set_praktičniUčinakBaze( double praktičniUčinakBaze ) {
    if (praktičniUčinakBaze == this.praktičniUčinakBaze) {
        return;
    }
    double _oldValue_xjal = this.praktičniUčinakBaze;
    this.praktičniUčinakBaze = praktičniUčinakBaze;
    onChange_praktičniUčinakBaze_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**
 * Calls "On change" action for parameter praktičniUčinakBaze.<br>
 * Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
 * (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>
 * Please call <code>set_praktičniUčinakBaze()</code> method instead.
 */
protected void onChange_praktičniUčinakBaze() {
    onChange_praktičniUčinakBaze_xjal( praktičniUčinakBaze );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_praktičniUčinakBaze_xjal( double oldValue ) {
}

public
double udaljenostGradilišta;

/**
 * Returns default value for parameter <code>udaljenostGradilišta</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public double _udaljenostGradilišta_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0.0;
}

public void set_udaljenostGradilišta( double udaljenostGradilišta ) {
    if (udaljenostGradilišta == this.udaljenostGradilišta) {
        return;
    }
    double _oldValue_xjal = this.udaljenostGradilišta;
    this.udaljenostGradilišta = udaljenostGradilišta;
    onChange_udaljenostGradilišta_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**

```

```

* Calls "On change" action for parameter udaljenostGradilišta.<br>
* Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
* (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>
* Please call <code>set_udaljenostGradilišta()</code> method instead.
*/
protected void onChange_udaljenostGradilišta() {
    onChange_udaljenostGradilišta_xjal( udaljenostGradilišta );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_udaljenostGradilišta_xjal( double oldValue ) {
}

public
double brzinaUOdlaskuGrad( ) {
    final Main self = this;
    return
    beta(1.546, 1.574, 14.828, 24.101)
;
}

public
double brzinaUPovratkuGrad( ) {
    final Main self = this;
    return
    beta(1.546, 1.574, 14.828, 24.101)
;
}

public
double pozTrajanjeGrad( ) {
    final Main self = this;
    return
    weibull(2.986, 1.045, 0.353)
;
}

public
boolean SZ;

/**
 * Returns default value for parameter <code>SZ</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public boolean _SZ_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return false;
}

public void set_SZ( boolean SZ ) {
    if (SZ == this.SZ) {
        return;
    }
    boolean _oldValue_xjal = this.SZ;
    this.SZ = SZ;
    onChange_SZ_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**
 * Calls "On change" action for parameter SZ.<br>
 * Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
 * (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>
 * Please call <code>set_SZ()</code> method instead.
 */
protected void onChange_SZ() {
    onChange_SZ_xjal( SZ );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_SZ_xjal( boolean oldValue ) {
}

public
double istovarTrajanjeSZ( ) {
    final Main self = this;
    return
    weibull(3.227, 6.555, 0.204)

```

```

;
}

public
int brojVozilaUCiklusu;

/**
 * Returns default value for parameter <code>brojVozilaUCiklusu</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public int _brojVozilaUCiklusu_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0;
}

public void set_brojVozilaUCiklusu( int brojVozilaUCiklusu ) {
    if (brojVozilaUCiklusu == this.brojVozilaUCiklusu) {
        return;
    }
    int _oldValue_xjal = this.brojVozilaUCiklusu;
    this.brojVozilaUCiklusu = brojVozilaUCiklusu;
    onChange_brojVozilaUCiklusu_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

/**
 * Calls "On change" action for parameter brojVozilaUCiklusu.<br>
 * Note that 'oldValue' in that action will be unavailable if this method is called by user
 * (current parameter value will be passed as 'oldValue').<br>
 * Please call <code>set_brojVozilaUCiklusu()</code> method instead.
 */
protected void onChange_brojVozilaUCiklusu() {
    onChange_brojVozilaUCiklusu_xjal( brojVozilaUCiklusu );
}

@AnyLogicInternalCodegenAPI
protected void onChange_brojVozilaUCiklusu_xjal( int oldValue ) {
    int index;

    {
        com.anylogic.libraries.processmodeling.Source<Mikser> self = mikseri;
        long _value;
        _value = brojVozilaUCiklusu
;
        mikseri.set_maxArrivals( _value );
    }
    {
        com.anylogic.libraries.processmodeling.Queue<Mikser> self = redUBazi;
        int _value;
        _value = brojVozilaUCiklusu
;
        redUBazi.set_capacity( _value );
    }
}

public
double količinaBetonaUCiklusu;

/**
 * Returns default value for parameter <code>količinaBetonaUCiklusu</code>.
 * <i>This method should not be called by user</i>
 */
@AnyLogicInternalCodegenAPI
public double _količinaBetonaUCiklusu_DefaultValue_xjal() {
    final Main self = this;
    return 0.0;
}

public void set_količinaBetonaUCiklusu( double količinaBetonaUCiklusu ) {
    if (količinaBetonaUCiklusu == this.količinaBetonaUCiklusu) {
        return;
    }
    double _oldValue_xjal = this.količinaBetonaUCiklusu;
    this.količinaBetonaUCiklusu = količinaBetonaUCiklusu;
    onChange_količinaBetonaUCiklusu_xjal( _oldValue_xjal );
    onChange();
}

```

**Прилог 5 – Процентуалне грешке модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за цео узорак**

Количина бетона (м3)	Модел			
	RegP(МК)	SimP(МК)	RegT(МК)	SimT(МК)
45.00	-41%	-85%	-7%	46%
52.50	5%	-28%	-45%	22%
54.50	-4%	-27%	-25%	21%
57.50	-30%	-86%	-1%	46%
59.00	14%	-18%	-25%	15%
61.00	-19%	-79%	-5%	44%
62.00	1%	-5%	24%	5%
64.60	14%	-10%	-9%	9%
65.00	-3%	-2%	-11%	2%
65.30	-4%	3%	-10%	-3%
66.00	3%	-10%	-14%	9%
66.00	-13%	-29%	17%	22%
67.00	-12%	-13%	-1%	12%
67.00	-4%	3%	-9%	-3%
67.70	-7%	-7%	4%	7%
68.00	-29%	-55%	11%	35%
69.00	7%	-4%	0%	4%
69.00	13%	13%	5%	-15%
69.00	12%	7%	-12%	-7%
69.00	-21%	-7%	7%	7%
69.00	-14%	-15%	43%	13%
69.50	11%	-26%	-21%	21%
69.50	11%	2%	-15%	-2%
70.00	29%	1%	-62%	-1%
70.50	1%	1%	1%	-1%
71.00	13%	8%	-13%	-8%
71.00	-9%	-3%	-3%	3%
71.50	-17%	-23%	14%	19%
71.50	-8%	-21%	2%	17%
72.00	-10%	-39%	5%	28%
73.00	-13%	-15%	-2%	13%
76.50	-19%	-55%	5%	35%
85.00	1%	-6%	3%	5%
85.50	16%	-35%	-1%	26%
86.00	-10%	-11%	27%	10%
86.00	-2%	-5%	12%	4%
86.00	8%	-21%	-12%	17%

87.00	-2%	-1%	26%	1%
87.00	-10%	-5%	18%	5%
87.00	9%	-18%	-13%	15%
88.00	0%	-46%	2%	31%
89.00	-14%	-45%	16%	31%
89.50	-13%	-10%	7%	9%
89.50	14%	1%	-22%	-1%
92.00	4%	6%	-2%	-6%
92.50	-3%	-11%	3%	10%
107.00	-2%	19%	15%	-23%
113.00	15%	5%	14%	-5%
114.00	8%	-2%	-7%	2%
114.50	20%	13%	-28%	-15%
122.00	-4%	-8%	6%	8%
124.00	-21%	-30%	19%	23%
132.00	9%	7%	-13%	-7%
132.70	16%	21%	-9%	-27%
147.00	11%	13%	-13%	-15%
149.00	-4%	-5%	3%	5%
151.50	5%	-2%	2%	2%
163.50	6%	14%	-4%	-17%
169.00	-8%	-24%	6%	19%
175.50	-5%	-37%	5%	27%
178.00	1%	14%	12%	-16%
179.00	-4%	-15%	7%	13%
181.00	9%	2%	-13%	-2%
182.00	3%	4%	5%	-4%
183.00	12%	9%	-4%	-9%
183.00	-19%	-26%	25%	21%
204.50	2%	11%	-3%	-13%
209.10	3%	-4%	0%	4%
216.50	9%	3%	-7%	-3%
293.50	-3%	-6%	-1%	6%
299.50	4%	-12%	14%	11%
328.00	-8%	-8%	4%	8%
329.00	4%	3%	5%	-3%
330.00	-10%	2%	2%	-2%
339.50	1%	-2%	-8%	2%
395.50	3%	-19%	-11%	16%
412.70	1%	-10%	-15%	9%
430.00	-10%	0%	-2%	0%
<b>MAPE</b>	<b>9.69%</b>	<b>16.28%</b>	<b>11.20%</b>	<b>12.89%</b>

**Прилог 6 – Процентуалне грешке модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања плоча за узорак без случајева када је фабрика бетона вршила производњу и за трећа лица**

Количина бетона (м3)	Модел			
	RegP(МК)	SimP(МК)	RegT(МК)	SimT(МК)
52.50	5%	-28%	-45%	22%
54.50	-4%	-28%	-25%	22%
62.00	1%	-1%	24%	1%
64.60	14%	-6%	-9%	6%
65.00	-3%	3%	-11%	-3%
65.30	-4%	2%	-10%	-2%
66.00	3%	-5%	-14%	5%
67.00	-12%	-11%	-1%	10%
67.00	-4%	2%	-9%	-2%
67.70	-7%	-5%	4%	5%
69.00	7%	-3%	0%	3%
69.00	13%	7%	5%	-8%
69.00	12%	3%	-12%	-3%
69.00	-21%	-8%	7%	7%
69.00	-14%	-16%	43%	14%
69.50	11%	3%	-15%	-3%
70.50	1%	2%	1%	-2%
71.00	13%	7%	-13%	-8%
71.00	-9%	-2%	-3%	2%
71.50	-17%	-25%	14%	20%
73.00	-13%	-15%	-2%	13%
85.00	1%	-3%	3%	3%
86.00	-10%	-10%	27%	9%
86.00	-2%	-3%	12%	3%
87.00	-2%	-1%	26%	1%
87.00	-10%	-4%	18%	4%
89.50	-13%	-11%	7%	10%
89.50	14%	4%	-22%	-4%
92.00	4%	4%	-2%	-4%

92.50	-3%	-8%	3%	7%
107.00	-2%	3%	15%	-3%
113.00	15%	22%	14%	-28%
114.00	8%	4%	-7%	-4%
114.50	20%	-5%	-28%	4%
122.00	-4%	-3%	6%	3%
124.00	-21%	-23%	19%	19%
132.00	9%	8%	-13%	-8%
132.70	16%	1%	-9%	-1%
147.00	11%	12%	-13%	-13%
149.00	-4%	1%	3%	-1%
151.50	5%	-1%	2%	1%
163.50	6%	14%	-4%	-16%
169.00	-8%	-15%	6%	13%
175.50	-5%	-14%	5%	12%
178.00	1%	3%	12%	-4%
179.00	-4%	-3%	7%	3%
181.00	9%	4%	-13%	-4%
182.00	3%	2%	5%	-2%
183.00	12%	9%	-4%	-10%
183.00	-19%	-23%	25%	18%
204.50	2%	12%	-3%	-14%
216.50	9%	2%	-7%	-2%
293.50	-3%	-6%	-1%	5%
299.50	4%	-13%	14%	11%
328.00	-8%	-2%	4%	2%
329.00	4%	3%	5%	-3%
330.00	-10%	1%	2%	-1%
339.50	1%	0%	-8%	0%
395.50	3%	-5%	-11%	4%
412.70	1%	2%	-15%	-2%
430.00	-10%	0%	-2%	0%
<b>MAPE</b>	<b>7.94%</b>	<b>7.29%</b>	<b>10.94%</b>	<b>6.86%</b>



**Прилог 7 – Процентуалне грешке модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за цело узорак**

Количина бетона (m3)	Модел					
	RegP(SZ)	SimP(SZ)	SimP(SZ1)	RegT(SZ)	SimT(SZ)	SimT(SZ1)
7.00	-4%	-43%	-22%	-9%	30%	18%
7.00	11%	6%	21%	-35%	-6%	-26%
7.50	-8%	-61%	-30%	-2%	38%	23%
8.00	-26%	-5%	-13%	33%	5%	11%
8.00	-11%	-32%	-6%	-1%	25%	6%
8.50	-11%	-8%	0%	6%	8%	0%
8.70	3%	-8%	-10%	-17%	8%	9%
9.50	11%	6%	4%	-14%	-6%	-4%
10.00	-24%	-85%	-69%	9%	46%	41%
10.00	2%	-72%	-24%	-2%	42%	20%
10.00	-7%	-2%	6%	19%	2%	-6%
10.50	-6%	-13%	-13%	-2%	11%	11%
11.00	13%	-4%	-12%	-28%	4%	11%
11.00	-17%	-32%	-2%	12%	24%	2%
11.00	7%	-38%	-11%	-4%	27%	10%
11.50	-16%	-44%	-3%	9%	30%	2%
11.50	-16%	-1%	-32%	-4%	1%	24%
11.50	16%	8%	13%	-18%	-9%	-15%
11.70	-21%	-31%	-24%	12%	26%	21%
12.00	-7%	-17%	-13%	4%	15%	11%
12.50	2%	4%	1%	0%	-4%	-1%
12.50	6%	5%	6%	-9%	-5%	-6%
12.66	31%	19%	26%	-56%	-23%	-36%
13.00	1%	1%	-5%	4%	-1%	5%
13.00	-2%	-2%	-7%	6%	2%	6%
13.00	-24%	-9%	-3%	23%	8%	3%
13.00	17%	10%	12%	-8%	-11%	-14%
13.00	-23%	-32%	-2%	17%	24%	2%
13.00	-61%	-140%	-120%	34%	58%	54%
13.00	-13%	-42%	-22%	7%	30%	18%
13.00	10%	-10%	5%	-14%	9%	-6%
13.50	-28%	-33%	-3%	23%	25%	3%
14.00	25%	-14%	-5%	-22%	13%	4%
14.00	3%	0%	4%	0%	0%	-5%
14.00	-3%	-2%	-1%	7%	2%	1%
14.00	13%	-33%	-18%	-6%	25%	15%
14.00	-10%	-28%	-11%	11%	22%	10%
14.00	18%	2%	-4%	-23%	-2%	4%
14.00	-6%	-101%	-51%	6%	50%	34%
14.50	19%	-3%	2%	-31%	3%	-2%
15.00	11%	3%	12%	-12%	-3%	-14%

16.00	34%	-31%	-26%	-52%	24%	21%
17.00	21%	-5%	0%	-39%	5%	0%
17.00	-1%	-8%	-3%	2%	7%	3%
17.50	-22%	-80%	-49%	3%	46%	35%
19.00	-18%	-48%	-35%	13%	33%	26%
19.50	3%	0%	9%	-4%	0%	-9%
19.50	-7%	-1%	1%	6%	1%	-1%
19.50	-21%	-24%	-21%	13%	20%	17%
20.00	13%	3%	-5%	-16%	-3%	5%
21.00	3%	6%	3%	-9%	-7%	-4%
21.00	-15%	-9%	-11%	9%	8%	10%
21.00	-8%	-9%	-5%	3%	8%	5%
21.00	-9%	1%	-5%	4%	-1%	5%
21.50	10%	-19%	-11%	-14%	16%	10%
22.00	3%	-8%	-11%	-5%	7%	10%
24.00	-11%	-9%	1%	8%	8%	-1%
26.00	-8%	-2%	6%	4%	2%	-7%
<b>MAPE</b>	<b>13.27%</b>	<b>21.99%</b>	<b>14.62%</b>	<b>13.10%</b>	<b>15.19%</b>	<b>11.75%</b>

**Прилог 8 – Процентуалне грешке модела за прогнозирање продуктивности и трајања бетонирања стубова/зидова за узорак без случајева када је фабрика бетона вршила производњу и за трећа лица**

Количина бетона (м3)	Модел					
	RegP(SZ)	SimP(SZ)	SimP(SZ1)	RegT(SZ)	SimT(SZ)	SimT(SZ1)
7.00	-4%	-43%	-22%	-9%	30%	18%
7.00	11%	6%	21%	-35%	-6%	-26%
8.00	-26%	-5%	-13%	33%	5%	11%
8.00	-11%	-32%	-6%	-1%	25%	6%
8.50	-11%	-8%	0%	6%	8%	0%
8.70	3%	-8%	-10%	-17%	8%	9%
9.50	11%	6%	4%	-14%	-6%	-4%
10.00	2%	-72%	-24%	-2%	42%	20%
10.00	-7%	-2%	6%	19%	2%	-6%
10.50	-6%	-13%	-13%	-2%	11%	11%
11.00	13%	-4%	-12%	-28%	4%	11%
11.00	-17%	-32%	-2%	12%	24%	2%
11.00	7%	-38%	-11%	-4%	27%	10%
11.50	-16%	-44%	-3%	9%	30%	2%
11.50	-16%	-1%	-32%	-4%	1%	24%
11.50	16%	8%	13%	-18%	-9%	-15%
11.70	-21%	-31%	-24%	12%	26%	21%
12.00	-7%	-17%	-13%	4%	15%	11%
12.50	2%	4%	1%	0%	-4%	-1%
12.50	6%	5%	6%	-9%	-5%	-6%
12.66	31%	19%	26%	-56%	-23%	-36%
13.00	1%	1%	-5%	4%	-1%	5%
13.00	-2%	-2%	-7%	6%	2%	6%
13.00	-24%	-9%	-3%	23%	8%	3%
13.00	17%	10%	12%	-8%	-11%	-14%
13.00	-23%	-32%	-2%	17%	24%	2%
13.00	-13%	-42%	-22%	7%	30%	18%
13.00	10%	-10%	5%	-14%	9%	-6%
13.50	-28%	-33%	-3%	23%	25%	3%
14.00	25%	-14%	-5%	-22%	13%	4%
14.00	3%	0%	4%	0%	0%	-5%
14.00	-3%	-2%	-1%	7%	2%	1%
14.00	13%	-33%	-18%	-6%	25%	15%
14.00	-10%	-28%	-11%	11%	22%	10%
14.00	18%	2%	-4%	-23%	-2%	4%
14.50	19%	-3%	2%	-31%	3%	-2%
15.00	11%	3%	12%	-12%	-3%	-14%
17.00	21%	-5%	0%	-39%	5%	0%
17.00	-1%	-8%	-3%	2%	7%	3%

19.50	3%	0%	9%	-4%	0%	-9%
19.50	-7%	-1%	1%	6%	1%	-1%
19.50	-21%	-24%	-21%	13%	20%	17%
20.00	13%	3%	-5%	-16%	-3%	5%
21.00	3%	6%	3%	-9%	-7%	-4%
21.00	-15%	-9%	-11%	9%	8%	10%
21.00	-8%	-9%	-5%	3%	8%	5%
21.00	-9%	1%	-5%	4%	-1%	5%
21.50	10%	-19%	-11%	-14%	16%	10%
22.00	3%	-8%	-11%	-5%	7%	10%
24.00	-11%	-9%	1%	8%	8%	-1%
26.00	-8%	-2%	6%	4%	2%	-7%
<b>MAPE</b>	<b>11.69%</b>	<b>14.30%</b>	<b>9.20%</b>	<b>12.58%</b>	<b>11.49%</b>	<b>8.79%</b>

## БИОГРАФИЈА АУТОРА



**Мр Биљана Матејевић**, рођена је 04.02.1976. године у Алексинцу. Основну школу завршила је у Суботинцу са одличним успехом (Вукова Награда). Средњу грађевинско-техничку школу, смер нискоградња, завршила је у Нишу, такође са одличним успехом. Грађевински факултет у Нишу, смер саобраћајно-конструкторски, уписала је школске 1995/96, а дипломирала 2000. године, са просечном оценом 9,58.

Добитник је више награда у току школовања за постигнут најбољи успех, као и Повеле Универзитета у Нишу за најбољег дипломираног студента на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу. Последипломске студије из области Организације и технологије грађења уписала је школске 2001/02, на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу, а магистарски рад под називом: Примена динамичких планова у грађевинарству, одбранила је 2010.

Први радни однос засновала је на Грађевинском факултету у Нишу 2000. године као студент демонстратор на предметима Земљани радови и тунели и Подземне грађевине. Од 2001. радила је као приправник истраживач преко тржишта рада и стручни сарадник Грађевинског факултета у Нишу на предметима Организација грађења и Основи саобраћајница, а 2003. први пут је бирана у звање асистента приправника за поменуте предмете. У звање асистента бирана је 2011. године.

Задужена је за извођење вежби на предметима: Технологија и организација грађења, Менаџмент у архитектури, Организација грађења I, Организација грађења II, Технологија грађења са грађевинском механизацијом, Методе планирања у грађевинарству, Управљање пројектима у грађевинарству, Основи саобраћајница.

Објавила је, као аутор или коаутор, више научних радова у часописима, на конференцијама и симпозијумима. Коаутор је две збирке решених задатака.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

### МОДЕЛ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА

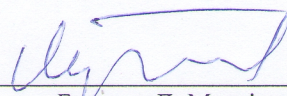
која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 31.05.2016.

Потпис аутора дисертације:



---

Билјана Д. Матејевић

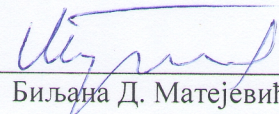
**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: **МОДЕЛ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ ПРОДУКТИВНОСТИ  
ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 31.05.2016.

Потпис аутора дисертације:



---

Биљана Д. Матејевић

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

### **МОДЕЛ ЗА ПРОГНОЗИРАЊЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОЦЕСА БЕТОНИРАЊА**

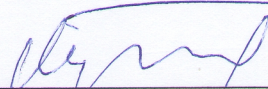
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 31.05.2016.

Потпис аутора дисертације:



---

Билјана Д. Матејевић