



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО  
И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ

Владан Р. Грковић

**РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ИНТЕГРАЦИЈУ СИСТЕМА  
ОДЛУЧИВАЊА У ПРОЦЕС КОНФИГУРАЦИЈЕ  
СЛОЖЕНИХ ПРОИЗВОДА**

Докторска дисертација

Краљево, 2020.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING  
IN KRALJEVO

Vladan R. Grković

**MODEL DEVELOPMENT FOR DECISION SYSTEM  
INTEGRATION IN THE COMPLEX PRODUCT  
CONFIGURATION PROCESS**

Doctoral Dissertation

Kraljevo, 2020.

## ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

I. АУТОР	
Име и презиме:	<b>Владан Грковић</b>
Датум и место рођења:	2.4.1987. године, Ужице, Србија
Садашње запослење:	Асистент на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу
II. ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА	
Наслов:	<b>Развој модела за интеграцију система одлучивања у процес конфигурације сложених производа</b>
Број страница:	213
Број слика:	118
Број библиографских података:	158
Установа и место где је рад израђен:	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК):	Производно машинство (621.7); Теорија одлучивања (519.816); Развој производа (001.892); Оптимизациони модели (519.863)
Ментор:	<b>др Милан Коларевић</b> , редовни професор Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
III. ОЦЕНА И ОДБРАНА	
Датум пријаве теме:	19.06.2015. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	IV-04-529/II 14.10.2015. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<b>др Драган Д. Милановић</b> , редовни професор Машински факултет у Београду
	<b>др Љубомир Лукић</b> , редовни професор Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	<b>др Милан Коларевић</b> , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	<b>др Миомир Вукићевић</b> , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	<b>др Мирко Ђапић</b> , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	<b>др Драган Д. Милановић</b> , редовни професор Машински факултет у Београду
	<b>др Зоран Анишић</b> , редовни професор Факултет техничких наука у Новом Саду
	<b>др Мирко Ђапић</b> , ванредни професор Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Датум одбране дисертације:	<b>др Александра Петровић</b> , доцент Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	<b>др Мишо Бјелић</b> , доцент Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву

## ПРЕДГОВОР

Ова докторска дисертација представља резултат вишегодишњег научног и стручног усавршавања и урађена је на Катедри за производно машинство, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу.

Највећу захвалност дугујем, свом ментору, професору др Милану Коларевићу на људским и стручним саветима, поверењу, подршци и огромној енергији коју ми је пружио у току свих фаза дефинисања и израде ове дисертације.

Захваљујем се свим члановима комисије за оцену и одбрану докторске дисертације: проф. др Драгану Д. Милановићу, проф. др Зорану Анишићу, проф. др Мирку Ђапићу, доц. др Александри Петровић и доц. др Мишу Бјелићу чије сугестије су допринеле да ова дисертација буде садржајнија и квалитетнија.

Посебну захвалност желим да искажем проф. др Љубомиру Лукићу на многобројним саветима и предлозима који су значајно утицали на повећање квалитета дисертације.

Такође желим да се захвалим колегама са Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу а посебно колегама са Катедре за производно машинство, који су својом помоћи, саветима и сугестијама допринели у мом досадашњем професионалном раду.

Захваљујем се својој породици, нарочито супруги Наташи и мајци Драгици, на стрпљењу, подршци и разумевању у току израде ове дисертације.

Краљево, март 2020.

*Владан Грковић*

## РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ИНТЕГРАЦИЈУ СИСТЕМА ОДЛУЧИВАЊА У ПРОЦЕС КОНФИГУРАЦИЈЕ СЛОЖЕНИХ ПРОИЗВОДА

### Резиме

Доминација захтева купца на савременом тржишту је наметнула високе стандарде по питању квалитета, времена испоруке и варијабилности производа. Да би били конкурентни на глобалном тржишту, од произвођача се захтева да су флексибилни при обликовању производа, да брзо реагују на захтеве купца и да су способни да развијају производе према индивидуалним захтевима купца. У складу са овим трендовима, произвођачи развијају нове интегрисане и кориснички оријентисане системе за развој производа, технолошких процеса и производње.

Полазна фаза истраживања се односи на сагледавање постојећег нивоа знања у области развоја производа. Посебан акценат је на тренутно актуелној стратегији *Mass Customization* која представља ефикасно решење за прилагођавање производње и укључивање купаца у процес креирања производа као и на процес конфигурисања производа са посебним освртом на архитектуру, платформе и конфигураторе производа.

Главни део дисертације се односи на развој општег модела за аутоматско конфигурисање оптималне варијанте сложених производа, заснован на системима за подршку одлучивању, модуларној платформи производа и интеграцији пројектовања производа, пројектовања технолошких процеса и планирања производње. Модел се састоји од девет модула од којих већина може представљати посебан конфигуратор за одређену област а заједно интегрисани у једну целину представљају аутоматски конфигурациони систем на основу којег је могуће добити конфигурациону варијанту производа која задовољава индивидуалне захтеве купца и која је економски најповољнија за произвођача. Предложени модел има висок степен флексибилности и универзалности, може се даље надограђивати и могуће га је интегрисати у пословни систем предузећа.

За верификацију и валидацију предложеног модела је развијен програмски систем *ИАКС МОДУЛПРИМ*. Верификација и валидација модела је изведена на осам примера модуларних трезорских просторија из асортимана сигурносне опреме и показала је да постоје велике могућности за побољшање ефикасности и ефективности у процесу развоја производа, као и да се добија конфигурација производа са знатно унапређеним квалитетом.

**Кључне речи:** развој производа, *Mass Customization*, аутоматски конфигурациони систем, САД конфигуратор, вишекритеријумско одлучивање, регресиона анализа, архитектура производа, платформа производа, фамилија производа, модуларне трезорске просторије.

## MODEL DEVELOPMENT FOR DECISION SYSTEM INTEGRATION IN THE COMPLEX PRODUCT CONFIGURATION PROCESS

### Abstract

The dominance of customer requirements in the modern market has imposed high standards in terms of quality, delivery time and product variability. In order to be competitive in the global market, manufacturers are required to be flexible in product design, to respond quickly to customer requirements and to be able to develop products according to individual customer requirements. In line with these trends, manufacturers are developing new integrated and customer-oriented systems for product development, technological processes and production.

The initial stage of the research is to look at the existing level of knowledge in the field of product development. Emphasis is placed on the current Mass Customization strategy, which is an effective solution for customizing production and customer involvement in the product creation process, as well as the product configuration process, with particular reference to product architecture, platforms and configurators.

The main part of the dissertation deals with the development of a general model for automatic configuration of the optimal variant of complex products, based on decision support systems, modular product platform and integration of product design, technological process design and production planning. The model consists of nine modules, most of which can be a specific configurator for a particular area, and together integrated into one unit, they are an automatic configuration system that allows to obtain a product configuration that meets the individual requirements of the customer and is economically most favorable to the manufacturer. The proposed model has a high degree of flexibility and versatility, can be further upgraded and can be integrated into the enterprise business system.

*IAKS MODULPRIM* software system was developed for verification and validation of the proposed model. The verification and validation of the model was performed on eight examples of modular strongrooms from the range of safety equipment and showed that there are great opportunities to improve efficiency and effectiveness in the product development process, as well as to obtain a product configuration with significantly improved quality.

**Keywords:** product development, mass customization, automatic configuration system, CAD configurator, multicriteria decision making, regression analysis, product architecture, product platform, product family, modular strongrooms.

## СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1	Секвенцијални развој производа .....	9
Слика 2.2	Концептуални модел симултаног инжењерства за глобалну производњу ..	10
Слика 2.3	Фазно орјентисан развој на супрот еволуционалном развоју производа.....	11
Слика 2.4	<i>CAD/CAE/CAM</i> приступ фокусиран на компоненте и <i>DMU/FVP/VPS</i> приступ фокусиран на систем.....	11
Слика 2.5	Четири нивоа индустријске производње на којима се заснива <i>MC</i> .....	13
Слика 2.6	Позиција производне стратегије у односу на обим производње и варијантност производа.....	15
Слика 2.7	Приказ места укључења купца у процес производње код различитих производних стратегија .....	16
Слика 2.8	Пет типова модуларности .....	19
Слика 2.9	Поља и извори сложености.....	29
Слика 2.10	Аспекти и параметри сложености производа.....	30
Слика 3.1	Општа структура предложеног модела <i>AKC</i> .....	36
Слика 3.2	Структура концептуалног конфигуратора производа <i>KKP</i> .....	38
Слика 3.3	Интеграција <i>ANP</i> и <i>SAW</i> методе – дијаграм тока.....	40
Слика 3.4	Декомпозиција (структурирање) проблема одлучивања .....	41
Слика 3.5	Структура модула за оптимизацију .....	50
Слика 3.6	Методe пројектовања технолошких процеса .....	52
Слика 3.7	Структура <i>PTP</i> конфигуратора .....	53
Слика 3.8	Структура <i>OPP</i> конфигуратора .....	55
Слика 3.9	Структура <i>CAD</i> конфигуратора .....	57
Слика 3.10	Структурна шема Продајног конфигуратора .....	58
Слика 4.1	Хипотетички приказ трезорске просторије и околине у банкарској установи .....	61
Слика 4.2	Модуларна трезорска просторија .....	63
Слика 4.3	Подаци потребни за конфигурисање <i>MTP</i> типа <i>МОДУЛПРИМ</i> .....	68
Слика 4.4	Изглед и положај типова модула у <i>MTP</i> .....	70
Слика 4.5	Структурна шема модула <i>A</i> .....	70
Слика 4.6	Конструкциона шема модула <i>A</i> приказана <i>3D</i> моделом .....	71
Слика 4.7	Различити типови модула са њиховим основним параметрима .....	73
Слика 4.8	Веа између модула <i>A-A</i> , <i>A-E</i> и <i>D-D</i> .....	74
Слика 4.9	Веа између модула <i>A-B</i> .....	74
Слика 4.10	Веа између модула <i>D-A</i> и модула <i>D-E</i> .....	74
Слика 4.11	Веа између модула <i>D-C</i> .....	74
Слика 4.12	Веа између модула <i>Cz-D</i> .....	75
Слика 4.13	Веа између модула <i>A-B-C</i> и <i>A-B-Cz</i> на угловима <i>MTP</i> .....	75
Слика 4.14	Шема поступка конфигурације <i>MTP</i> .....	76
Слика 4.15	Структура и параметри предњег зида <i>MTP</i> .....	77
Слика 4.16	Структура и параметри бочног зида <i>MTP</i> .....	79
Слика 4.17	Структура и параметри задњег зида <i>MTP</i> .....	80
Слика 4.18	Структура и параметри плафона (пода) <i>MTP</i> .....	81
Слика 4.19	Шема новог поступка конфигурације <i>MTP</i> .....	83

Слика 4.20	3D приказ растављеног предњег зида МТП .....	84
Слика 4.21	Структура и параметри предњег зида МТП .....	84
Слика 4.22	3D приказ растављеног бочног зида МТП.....	86
Слика 4.23	Структура и параметри бочног зида МТП.....	86
Слика 4.24	3D приказ растављеног задњег зида МТП.....	87
Слика 4.25	Структура и параметри задњег зида МТП.....	88
Слика 4.26	3D приказ растављеног плафона МТП .....	89
Слика 4.27	Структура и параметри плафона МТП.....	89
Слика 5.1	Алгоритам за генерисање алтернатива за предњи зид.....	96
Слика 5.2	Алгоритам за генерисање алтернатива за бочне зидове .....	97
Слика 5.3	Алгоритам за генерисање алтернатива за задњи зид.....	98
Слика 5.4	Алгоритам за генерисање алтернатива за под и плафон.....	99
Слика 5.5	MATLAB програмски код за генерисање алтернатива за зидове.....	100
Слика 5.6	MATLAB програмски код за генерисање алтернатива за под и плафон.....	102
Слика 5.7	Структура укупног времена израде и монтаже МТП.....	104
Слика 5.8	Генерални изглед стабла претраге .....	115
Слика 5.9	Алгоритам израде стабла претраге.....	117
Слика 5.10	Box-Cox дијаграм трансформисаног линеарног модела.....	123
Слика 5.11	3D дијаграм одзивне површине броја грешака $G_i = f(b, l)$ за модуле А и В. ....	124
Слика 5.12	Box-Cox дијаграм трансформисаног квадратног модела .....	127
Слика 5.13	3D дијаграм одзивне површине броја грешака $G_i = f(b)$ за модуле С, Cz и D. ....	128
Слика 5.14	Box-Cox дијаграм за одабрани математички модел .....	132
Слика 5.15	3D дијаграм одзивне површине $R_{\max} = f(b, l)$ а модуле А и В.....	132
Слика 5.16	Box-Cox дијаграм за одабрани математички модел .....	135
Слика 5.17	3D дијаграм одзивне површине $R_{\max} = f(d, L)$ а модуле С, Cz и D.....	136
Слика 6.1	Интеграција вештачке интелигенције и CAD система.....	140
Слика 6.2	Имплементација корисничких параметара за контролу геометрије 3D модела .....	146
Слика 6.3	Имплементација корисничких параметара и математичких зависности за контролу геометрије 3D модела .....	147
Слика 6.4	Стратегије повезивања параметара у окружењу CAD склопова .....	148
Слика 6.5	Профил омотача модула А са основним димензионим параметрима.....	152
Слика 6.6	Приказ геометријских ограничења у 2D скици.....	152
Слика 6.7	Приказ повезивања параметра дужине омотача .....	153
Слика 6.8	Приказ параметара компоненте и њихових веза .....	153
Слика 6.9	Кориснички параметри увезени у Inventor.....	154
Слика 6.10	Правило за оријентацију подних и плафонских модула у iLogic окружењу .....	155
Слика 6.11	Повезивање корисничких параметара при умножавању модула .....	156
Слика 6.12	Приказ зависности појединих параметара склопа МТП од корисничких параметара .....	156
Слика 6.13	iLogic програмски код за аутоматско укључење/искључење модула из склопа МТП.....	157



<b>Слика 6.14</b>	<i>iLogic</i> програмски код за аутоматски извоз 3D PDF склопа МТП.....	158
<b>Слика 6.15</b>	3D PDF склопа МТП.....	159
<b>Слика 6.16</b>	<i>iLogic</i> програмски код за аутоматску промену размере и позиције пројекција и пресека склопног цртежа МТП .....	159
<b>Слика 6.17</b>	Технички цртеж омотача модула А .....	160
<b>Слика 6.18</b>	<i>iLogic</i> програмски код за аутоматско снимање цртежа у PDF формат.....	160
<b>Слика 6.19</b>	Склопни цртеж модула А.....	161
<b>Слика 6.20</b>	Склопни цртеж МТП .....	161
<b>Слика 6.21</b>	Алгоритам конфигурисања МТП у Inventor-у .....	162
<b>Слика 7.1</b>	Модификовани дијаграм тока интеграције АНР и SAW методе.....	167
<b>Слика 7.2</b>	Хијерархијска структура проблема одлучивања.....	168
<b>Слика 7.3</b>	Апликација у Excel-у за примену АНР методе.....	168
<b>Слика 7.4</b>	Провера конзистентности.....	169
<b>Слика 7.5</b>	Приказ важности појединачних критеријума у моделу.....	169
<b>Слика 7.6</b>	MATLAB програмски код за избор најповољније алтернативе.....	170
<b>Слика 7.7</b>	Дијаграм укупног времена за све зидне модуле по алтернативама .....	173
<b>Слика 7.8</b>	Дијаграм укупног броја табли лима за све зидне модуле по алтернативама .....	173
<b>Слика 7.9</b>	Дијаграм трошкова за све зидне модуле по алтернативама.....	173
<b>Слика 7.10</b>	Дијаграм укупног број грешака на свим зидним модулима по алтернативама .....	174
<b>Слика 7.11</b>	Дијаграм укупног збира максималних грешка равности површине зидних модула по алтернативама .....	174
<b>Слика 7.12</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула по алтернативама са позицијама изведене и оптималне алтернативе.....	174
<b>Слика 7.13</b>	Дијаграм укупног времена за све подне/плафонске модуле по алтернативама .....	175
<b>Слика 7.14</b>	Дијаграм укупног броја табли лима за све подне/плафонске модуле по алтернативама .....	175
<b>Слика 7.15</b>	Дијаграм трошкова за све подне/плафонске модуле по алтернативама ....	175
<b>Слика 7.16</b>	Дијаграм укупног број грешака на свим подним/плафонским модулима по алтернативама .....	176
<b>Слика 7.17</b>	Дијаграм укупног збира максималних грешка равности површине подних/плафонских модула по алтернативама .....	176
<b>Слика 7.18</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула по алтернативама са позицијама изведене и оптималне алтернативе.....	176
<b>Слика 7.19</b>	Изглед ГКИ предложеног модела за МТП.....	177
<b>Слика П.1</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 2 .....	208
<b>Слика П.2</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 2 ...	208
<b>Слика П.3</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 3 .....	209
<b>Слика П.4</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 3 ...	209
<b>Слика П.5</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 4 .....	209
<b>Слика П.6</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 4....	210
<b>Слика П.7</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 5 .....	210
<b>Слика П.8</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 5 ....	210

---

<b>Слика П.9</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 6 .....	211
<b>Слика П.10</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 6 .....	211
<b>Слика П.11</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 7 .....	211
<b>Слика П.12</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 7 ....	212
<b>Слика П.13</b>	Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 8 .....	212
<b>Слика П.14</b>	Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 8 .....	212

## СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1	Класификација основних параметара сложености техничког производа	32
Табела 3.1	<i>Saaty</i> -јева скала значајности (важности)	42
Табела 3.2	Табела поређења парова критеријума	42
Табела 3.3	Табела поређења парова критеријума	43
Табела 3.4	Нормализована табела поређења парова критеријума	44
Табела 3.5	Индекс случајности	46
Табела 3.6	Матрица одлучивања	47
Табела 3.7	Нормализована матрица одлучивања	48
Табела 3.8	Финални изглед матрице	49
Табела 4.1	Класификација трезорских просторија и трезорских врата према EN 1143 – 1	64
Табела 4.2	Сертификовани модели МТП компаније „Примат“ а.д. Марибор	65
Табела 4.3	Класификација модула	69
Табела 4.4	Прорачун коефицијената $k_i$ и $m_i$ за предњи зид	77
Табела 4.5	Усвојене алгебарске једначине за прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за предњи зид МТП	78
Табела 4.6	Прорачун коефицијената $k_i$ и $m_i$ за бочни зид	79
Табела 4.7	Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за бочни зид МТП	80
Табела 4.8	Прорачун коефицијената $k_i$ и $m_i$ за задњи зид	80
Табела 4.9	Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за задњи зид МТП	81
Табела 4.10	Прорачун коефицијената $k_i$ и $m_i$	82
Табела 4.11	Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за под и плафон МТП	82
Табела 5.1	Нормативи времена по операцијама и машинама	104
Табела 5.2	Коефицијенти сложености сечења на НМ за омотач	106
Табела 5.3	Коефицијенти сложености савијања на NСАР	107
Табела 5.4	Коефицијенти сложености заваривања закључница	109
Табела 5.5	Матрица стабла претраге	118
Табела 5.6	Класификација грешака у процесу израде МТП МОДУЛПРИМ	120
Табела 5.7	Подаци о бројности грешака у зависности од $b$ и $l$ за модуле А и В	121
Табела 5.8	Табела збирних статистичких података	122
Табела 5.9	ANOVA анализа за линеарни модел	122
Табела 5.10	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	122
Табела 5.11	ANOVA анализа за трансформисани линеарни модел	123
Табела 5.12	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	123
Табела 5.13	Подаци о бројности грешака у зависности од $b$ и $l$ за модуле С, Cz и D	125
Табела 5.14	Табела збирних статистичких података	125
Табела 5.15	ANOVA анализа за редуковани квадратни модел	126
Табела 5.16	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	126
Табела 5.17	ANOVA анализа за трансформисани линеарни модел	126
Табела 5.18	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	127

Табела 5.19	Подаци о измереним вредностима $R_{\max}$ за модуле А и В.....	129
Табела 5.20	Табела збирних статистичких података .....	131
Табела 5.21	ANOVA анализа.....	131
Табела 5.22	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела .....	131
Табела 5.23	Подаци о измереним вредностима $R_{\max}$ за модуле С, С <sub>z</sub> и D.....	133
Табела 5.24	Табела збирних статистичких података .....	134
Табела 5.25	ANOVA анализа за линеарни модел.....	134
Табела 5.26	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела .....	135
Табела 7.1	Основне димензије МТП МОДУЛПРИМ 5 за одабране примере .....	165
Табела 7.2	Процењене релативне тежине критеријума .....	169
Табела 7.3	Вредности појединачних и збирне функције циља за зидове МТП из примера бр. 1.....	171
Табела 7.4	Параметри оптималне алтернативе за зидове МТП примера бр. 1.....	171
Табела 7.5	Вредности појединачних и збирне ф-је циља за под/плафон МТП за пример бр. 1.....	172
Табела 7.6	Параметри оптималне алтернативе за под/плафон МТП за пример бр. 1.....	172
Табела 7.7	Изведена решења зидова за све примере .....	178
Табела 7.8	Изведена решења пода/плафона за све примере .....	178
Табела 7.9	Вредности оптималних решења за зидове .....	179
Табела 7.10	Вредности оптималних решења за под/плафон.....	179
Табела 7.11	Анализа броја модула за зид.....	180
Табела 7.12	Анализа броја модула за под/плафон.....	180
Табела 7.13	Упоредни приказ добијених резултата са побољшањима за све примере.....	181

## СПИСАК АКРОНИМА

<b>Акроним</b>	<b>Енглески назив</b>	<b>Српски назив</b>
<i>AHP</i>	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	Аналитички хијерархијски процес
<i>AI</i>	<i>Artificial Intelligence</i>	Вештачка интелигенција
<i>ANOVA</i>	<i>Analysis of Variance</i>	Анализа варијансе
<i>API</i>	<i>Application Programming Interface</i>	Апликациони програмски интерфејс
<i>ATO</i>	<i>Assemble-To-Order</i>	Монтажа према наруџбини
<i>B2C</i>	<i>Business-to-Consumer</i>	Модел електронског пословања између пословних организација и крајњих корисника
<i>BA<sub>SAW</sub></i>	<i>Best Alternative in Simple Additive Weighting</i>	Најбоља алтернатива у SAW методу
<i>BOM</i>	<i>Bill of Materials</i>	Саставница материјала
<i>C.I.</i>	<i>Confidence Interval</i>	Интервал поузданости
<i>CAA</i>	<i>Computer Aided Analysis</i>	Рачунаром подржане анализе
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>	Рачунаром подржано пројектовање производа
<i>CAE</i>	<i>Computer Aided Engineering</i>	Рачунаром подржано инжењерство
<i>CAM</i>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	Рачунаром подржана производња
<i>CAPP</i>	<i>Computer Aided Process Planning</i>	Рачунаром подржано пројектовање технолошких процеса
<i>CE</i>	<i>Concurrent Engineering</i>	Конкурентно инжењерство
<i>CI</i>	<i>Consistency Index</i>	Индекс конзистенције
<i>CNC</i>	<i>Computer Numerical Control</i>	Нумеричко управљање применом рачунара
<i>CODP</i>	<i>Customer Order Decoupling Point</i>	Тачка наручивања/укључења купца
<i>CR</i>	<i>Consistency Ratio</i>	Коефицијент конзистенције
<i>CRs</i>	<i>Customer Requests</i>	Захтеви купца
<i>CV</i>	<i>Consistency Vector</i>	Вектор конзистенције
<i>DFX</i>	<i>Design for Excellence</i>	Пројектовање за изврност
<i>DMP</i>	<i>Decisions Making Process</i>	Процес доношења одлуке
<i>DMU</i>	<i>Digital Mock-Up</i>	Дигитални тродимензионални солид модел (дигитална макета)
<i>ERP</i>	<i>Enterprise Resource Planning</i>	Планирање ресурса предузећа
<i>ES</i>	<i>Expert Systems</i>	Експертски системи
<i>ETO</i>	<i>Engineer-To-Order</i>	Пројектовање (инжењеринг) према наруџбини

<b>FVP</b>	<i>Functional Virtual Prototyping</i>	Функционални виртуелни прототип
<b>KB</b>	<i>Knowledge Base</i>	База знања
<b>KBE</b>	<i>Knowledge Based Engineering</i>	Инжењерство засновано на знању
<b>KBS</b>	<i>Knowledge Based Systems</i>	Системи засновани на знању
<b>MADM</b>	<i>Multiple Attribute Decision Making</i>	Вишеатрибутивно одлучивање
<b>MC</b>	<i>Mass Customization</i>	
<b>MCDA</b>	<i>Multi Criteria Decision-Analysis</i>	Анализа вишекритеријумског одлучивања
<b>MCDM</b>	<i>Multi Criteria Decision-Making</i>	Вишекритеријумско доношење одлука
<b>MODM</b>	<i>Multiple Objective Decision Making</i>	Вишециљно одлучивање
<b>MP</b>	<i>Mass Production</i>	Масовна производња
<b>MTO</b>	<i>Make-To-Order</i>	Производња према наруџбини
<b>MTS</b>	<i>Make-To-Stock</i>	Производња за залихе
<b>PC</b>	<i>Product Complexity</i>	Сложеност производа
<b>PCS</b>	<i>Product Configuration System</i>	Систем за конфигурацију производа
<b>PDM</b>	<i>Product Data Management</i>	Управљање подацима о производу
<b>PLM</b>	<i>Product Lifecycle Management</i>	Управљање животним циклусом производа
<b>RI</b>	<i>Index Random Consistency</i>	Индекс случајне конзистенције
<b>RPD</b>	<i>Rapid Product Development</i>	Брзи развој производа
<b>RSM</b>	<i>Response Surface Methodology</i>	Методологија одзивне површине
<b>RU</b>	<i>Resistant Unit</i>	Јединица отпорности
<b>SAW</b>	<i>Simple Additive Weighting Method</i>	Методе једноставних адитивних тежина
<b>SE</b>	<i>Simultaneous Engineering</i>	Симултано инжењерство
<b>V&amp;V</b>	<i>Verification and Validation</i>	Верификација и валидација
<b>VFS</b>	<i>Virtual Factory Simulation</i>	Виртуелна симулација фабрике
<b>WSV</b>	<i>Weighted Sum Vector</i>	Пондерисани вектор суме тежина
<b>ГКИ</b>		Графички кориснички интерфејс
<b>ИТ</b>		Информационе технологије
<b>ККП</b>		Концептуални конфигуратор производа
<b>МТП</b>		Модуларна трезорска просторија
<b>ОПП</b>		Оперативна припрема производње
<b>ПуП</b>		Производи и процеси
<b>ПТП</b>		Пројектовање технолошких процеса

## САДРЖАЈ

<b>1. УВОД .....</b>	<b>1</b>
1.1. Предмет истраживања .....	2
1.2. Циљеви истраживања .....	3
1.3. Основне хипотезе .....	4
1.4. Методологија истраживања .....	4
1.5. Структура докторске дисертације .....	5
<b>2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>7</b>
2.1. Развој производа .....	8
2.1.1. Секвенцијални развој производа .....	8
2.1.2. Конкурентно/Симултано инжењерство.....	9
2.1.3. Брзи развој производа.....	10
2.2. Mass Customization .....	12
2.2.1. Појам и дефиниција МС.....	12
2.2.2. Четири нивоа Mass Customization .....	13
2.2.3. Производне стратегије.....	14
2.3. Архитектура производа и фамилије производа .....	17
2.3.1. Архитектура производа.....	17
2.3.2. Фамилија производа .....	19
2.4. Конфигурисање производа.....	20
2.4.1. Конфигурабилни производи .....	20
2.4.2. Платформа производа .....	21
2.4.3. Конфигуратори производа .....	23
2.5. Сложени технички производи.....	26
2.5.1. Шта је комплексност?.....	26
2.5.2. Класификација техничких система у односу на сложеност.....	28
2.5.3. Аспекти и параметри сложености производа.....	30
2.5.4. Дефиниција сложеног техничког производа .....	33
2.5.5. Конфигурисање сложеног техничког производа и МС .....	33
<b>3. РАЗВОЈ МОДЕЛА ИНТЕГРИСАНОГ АУТОМАТСКОГ КОНФИГУРАЦИОНОГ СИСТЕМА.....</b>	<b>34</b>
3.1. Развој модела.....	35
3.2. Графички кориснички интерфејс.....	36
3.3. Концептуални конфигурактор производа.....	37

3.4. Модул за оптимизацију.....	39
3.4.1. Вишекритеријумско одлучивање.....	39
3.4.2. Интеграција <i>AHP</i> и <i>SAW</i> методе.....	40
3.4.3. Структура модула за оптимизацију.....	49
3.5. <i>ПТП</i> конфигурактор.....	51
3.6. <i>ОПП</i> конфигурактор.....	53
3.7. <i>CAD</i> конфигурактор производа.....	56
3.8. Продајни конфигурактор.....	57
3.9. Екстерни интерфејс.....	58
3.10. Платформа производа.....	58
<b>4. МОДУЛАРНЕ ТРЕЗОРСКЕ ПРОСТОРИЈЕ „МОДУЛПРИМ“.....</b>	<b>60</b>
4.1. Модуларне трезорске просторије.....	61
4.1.1. Трезорске просторије.....	61
4.1.2. Модуларне трезорске просторије.....	62
4.1.3. Степен отпорности трезорске просторије.....	64
4.1.4. Фамилија <i>МТП</i> типа <i>МОДУЛПРИМ</i> .....	64
4.1.5. Процес конфигурисања <i>МТП</i> .....	65
4.2. Платформа за аутоматско конфигурисање <i>МТП</i> .....	66
4.2.1. Скуп захтева и ограничења.....	66
4.2.2. Скуп модула.....	69
4.2.3. Спајање модула.....	72
4.2.4. Поступак конфигурисања <i>МТП</i> .....	75
4.2.5. Прорачун основних параметара модула.....	76
4.3. Развој нове платформе за аутоматско конфигурисање <i>МТП</i> .....	82
4.3.1. Нови поступак за конфигурисање <i>МТП</i> .....	83
4.3.2. Прорачун основних параметара модула и производа.....	84
4.4. Зашто модуларне трезорске просторије?.....	91
<b>5. ГЕНЕРИСАЊЕ АЛТЕРНАТИВА И ДЕФИНИСАЊЕ КРИТЕРИЈУМСКИХ ФУНКЦИЈА.....</b>	<b>94</b>
5.1. Генерисање алтернатива.....	95
5.2. Критеријумске функције.....	103
5.2.1. Прорачун времена израде и монтаже <i>МТП</i> .....	103
5.2.2. Прорачун укупних производних трошкова.....	III
5.2.3. Оптимизација плана сечења материјала.....	III



5.2.4. Математички модел за прорачун укупног броја грешака .....	119
5.2.5. Укупан збир максималних грешка равности површине модула .....	128
5.2.6. Функције циља .....	136
<b>6. CAD КОНФИГУРАТОР МТП .....</b>	<b>138</b>
6.1. Напредни CAD системи засновани на знању .....	139
6.1.1. Параметарско CAD моделирање .....	140
6.1.2. Повезивање и управљање параметара .....	145
6.1.3. Правила пројектовања .....	149
6.1.4. Интелигентни шаблони/обрасци .....	150
6.2. CAD конфигурактор МТП .....	151
6.2.1. Пројектовање интелигентних 3D шаблона компоненти .....	151
6.2.2. Пројектовање интелигентних 3D шаблона склопова модула и МТП .....	154
6.2.3. Пројектовање шаблона 2D техничке документације .....	158
6.2.4. Алгоритам рада CAD конфигуратора .....	162
<b>7. ВЕРИФИКАЦИЈА И ВАЛИДАЦИЈА МОДЕЛА .....</b>	<b>163</b>
7.1. Верификација и валидација .....	164
7.2. Верификација модела .....	165
7.2.1. Тестирање модула за оптимизацију .....	166
7.2.2. Тестирање главног кода .....	177
7.3. Валидација модела .....	178
<b>8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА .....</b>	<b>183</b>
8.1. Анализа остварених резултата .....	184
8.2. Закључци .....	186
8.3. Правци даљег истраживања .....	187
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>189</b>
<b>ПРИЛОЗИ .....</b>	<b>201</b>
Прилог 1 - MATLAB програмски код за оптимизацију плана сечења и прорачун свих критеријума за зидове .....	202
Прилог 2 - MATLAB програмски код за оптимизацију плана сечења и прорачун свих критеријума за под и плафон .....	205
Прилог 3 - Дијаграми збирних ф-ја циља .....	208
Прилог 4 - MATLAB главни програмски код за повезивање и аутоматизацију свих модула .....	213

ПОГЛАВЉЕ

1

---

УВОД

Доминација захтева купаца на савременом тржишту је наметнула високе захтеве по питању квалитета, времена испоруке и варијабилности производа. Све више је модерних купаца који су високо образовани. Они захтевају производе према сопственој спецификацији и желе могућност да на сајту произвођача сами конфигуришу производ, прилагоде га својим захтевима, виде 3D приказ одабране конфигурације и пошаљу налог за куповину производа директно са свог рачунара, таблета или мобилног телефона.

Да би били конкурентни на глобалном тржишту, од произвођача се захтева да буду флексибилни при обликовању производа, да брзо реагују на захтеве купца и да су способни да развијају производе према индивидуалним захтевима купца. То подразумева мултидисциплинарни приступ и иновативни концепт у процесу развоја производа, заснован на интеграцији развоја производа и процеса, подршке производњи и употреби производа, као и примену савремених информационих технологија, нових организационих форми, међусобну сарадњу свих одељења, побољшање токова комуникација и брзу размену информација.

У складу са овим трендовима, произвођачи развијају нове интегрисане и кориснички оријентисане системе за развој производа, технолошких процеса и система на нивоу производног процеса. Ови системи, засновани на примени савремених CAD/CAE/CAPP/CAM програмских пакета, омогућују висок степен аутоматизације у процесима развоја производа, пројектовања производа и технолошких процеса, планирања производње, израде и монтаже производа.

## 1.1. Предмет истраживања

Нагли развој информационих технологија довео је до стварања специјализованих софтверских система за конфигурисање сложених производа који су данас доступни на тржишту. Ови пакети пружају велике могућности графичке визуелизације и оптимизације прорачуна појединачних компоненти производа. Међутим, у случајевима када је могуће урадити више различитих конфигурација производа, које задовољавају захтеве купца, у процес избора оптималне варијанте производа је неопходно укључити и систем одлучивања на основу којег је могуће одабрати оптималну конфигурацију. Процес одлучивања треба да садржи аспекте трошкова, квалитета и времена израде производа али и ограничења по питању расположиве технологије, машинских и људских ресурса и производних капацитета.

*Полазна фаза истраживања* се односи на сагледавање постојећег нивоа знања у области варијабилности производа, конфигурације сложених производа и система за подршку одлучивању. То је предуслов за дефинисање платформе производа и *разраду модела за аутоматско конфигурисање сложених производа*, заснованог на интеграцији пројектовања производа и технолошких процеса, и избор оптималне конфигурације производа како са аспекта купца тако и са аспекта произвођача.

У *практичном делу*, истраживања су усмерена, на верификацију и валидацију предложеног модела на примерима модуларних трезорских просторија из асортимана сигурносне опреме. Ови производи имају сложену структуру и свака нова трезорска

просторија је у принципу нова конфигурација производа који се састоји од модула чије се димензије мењају у зависности од захтеваног степена сигурности и димензија расположивог простора у које је потребно сместити овакав производ.

## 1.2. Циљеви истраживања

*Научни циљ дисертације* је развој интегрисаног модела за аутоматско конфигурисање оптималне варијанте сложених производа у индустрији прераде метала са аспекта трошкова, квалитета и времена израде производа. То подразумева брзу и тачну конфигурацију производа високог квалитета и што вишег степена технологичности у циљу рационализације производње и задовољења индивидуалних захтева купца.

*Развијени модел* треба да омогући да се генеришу технички изводљиве конфигурације производа и да се на основу дефинисаних функција циља одабере оптимална конфигурација производа. За одабрану конфигурацију производа модел треба да аутоматски генерише:

- 3D моделе и конструкциону документацију производа, модула и компоненти.
- Технолошке процесе и нормативе материјала и рада за постојеће услове производње и расположиву опрему.
- Производну документацију са спецификацијама материјала, стандардне робе, додатног и потрошног материјала, стандардних и специјалних алата и др.
- Понуду тј. продајну документацију са детаљном калкулацијом цене производа, трошкова транспорта и датумом испоруке.
- Оперативни план производње, испоруке и монтаже.

Модел треба да је базиран на платформи модуларних производа која у себи садржи правила спајања модула, правила конфигурисања производа, димензионе параметре модула и техничка и конструкциона ограничења. Осим тога, модел треба да је заснован на интеграцији пројектовања производа, пројектовања технолошких процеса и планирања производње.

Очекивани ниво сазнања треба да допринесе фундаменталном бogaћењу науке у области производног машинства и има посебан значај, јер се бави проблемима управљања и одлучивања у процесу конфигурације сложених производа.

Практични циљеви истраживања су:

- Развој интегрисаног модела за аутоматско конфигурисање производа који је научно заснован а погодан за коришћење у пракси.
- Допринос повећању степена аутоматизације, а тиме и ефикасности процеса пројектовања производа и технолошких процеса.
- Смањење трошкова и времена пројектовања, уштеде у процесу производње и скраћење времена испоруке производа.

- Откривање нових резерви за ревитализацију и повећање успешности домаћих привредних друштава која се баве развојем нових производа.
- Упознавање производног окружења са досадашњим резултатима истраживања и могућим путевима за повећање конкурентности произвођача на тржишту.

Због свега наведеног, истраживање предложеног проблема је сложен задатак како са научног тако и са практичног становишта.

### 1.3. Основне хипотезе

При дефинисању почетних хипотеза, пошло се од става да су постојећи методи развоја производа, у домаћој индустрији прераде метала, још увек недовољно ефикасни и да произвођачима не обезбеђују компаративне предности на савременом глобалном тржишту.

Основне хипотезе од којих се полази у истраживању су:

**H1:** *Могуће је развићи модел за аутоматско конфигурисање оптималне варијанте сложених производа, заснован на модуларној илајформи производа и интелекцији пројектовања производа, пројектовања технолошких процеса и планирања производње.*

**H2:** *Модел ће бити вишеструко ефикаснији и ефектнији од постојећих приступа, заснованих на примени комерцијалних CAD програма, са аспекта квалитета производа, времена израде и мониторинга и трошкова производње.*

Провера постављених хипотеза биће извршена кроз процес верификације и валидације предложеног модела на одабраним примерима сложеног производа у индустрији прераде метала.

### 1.4. Методологија истраживања

Методологија примењена у овој дисертацији је конципирана на теоријским и експерименталним истраживањима и садржи следеће фазе:

- дефинисање проблема истраживања,
- утврђивање циљева истраживања,
- формулисање основних хипотеза,
- проучавање актуелног стања у посматраној области,
- формирање модела интегрисаног аутоматског конфигурационог система,
- избор погодне методе за решење проблема оптимизације,
- рачунарску симулацију,
- верификацију и валидацију предложеног модела,
- анализу резултата и
- закључна разматрања.

За реализацију наведене методологије истраживања била је неопходна примена општих и посебних научних метода.

Од *ојшћих научних мейода* коришћене су:

- методе анализе и синтезе,
- методе апстракције и конкретизације,
- методе генерализације и специјализације и
- методе системске анализе.

Од осталих *научно-исћраживачких мейода* највише су заступљене следеће:

- математичко-статистичке методе,
- методе вишекритеријумског одлучивања,
- методе моделирања и
- методе симулације.

Из групе математичко-статистичких метода коришћена је *рећресациона анализа* (метод одзивне површине) за добијање стохастичких модела квалитета на основу статистичке обраде прикупљених квантитативних података о грешкама које се појављују у процесу израде сложеног производа који је одабран као репрезент.

За решење проблема вишекритеријумског одлучивања, у процесу избора оптималне конфигурације производа, коришћене су *мейода аналићичких хијерархијских ћроцеса (АНР)* и *мейода једносћавних адићивних ћежина (SAW)*.

За развој модела су коришћене *мейоде маћематћичкоћ моделирања и мейоде сисћемско-сћрукћурноћ моделирања објекта и ћроцеса*, а за верификацију и валидацију модела су коришћене *мейоде симулације*.

## 1.5. Структура докторске дисертације

Текст докторске дисертације је организован у 8 поглавља која чине одређене логичке целине.

У уводном, *ћрвом* поглављу укратко је описан предмета истраживања, представљени су основни циљеви истраживања, дефинисане су основне хипотезе и приказана методологија истраживања са прегледом коришћених научних метода.

*Друћо* поглавље обухвата теоријску основу и тренутно стање у областима развоја производа. Посебан акценат је на тренутно актуелној стратегији *Mass Customization* која представља ефикасно решење за прилагођавање производње и укључивање купаца у процес креирања производа као и на *ћроцес конфићурисања* производа са посебним освртом на архитектуру, платформе и конфигураторе сложених производа.

У *ћпрећем* поглављу представљена је структура општег *модела унићећрисаноћ аућћомаћскоћ конфићурационоћ сисћема* модуларних производа. Описано је и

структурно приказано, свих девет модула од који се састоји предложени модел. Посебно је обрађен модул за оптимизацију који на макро плану врши избор оптималне конфигурације. Дате су теоријске основе метода вишекритеријумског одлучивања, предложен је алгоритам за решење проблема и приказана његова структура.

**Модуларне трезорске просторије** које су одабране као репрезент за примену и проверу предложеног модела су приказане у поглављу **чешири**. Приказан је процес конфигурисања производа заснован на постојећој платформи производа и дат предлог нове унапређене платформе за аутоматско конфигурисање одабраног производа.

На бази усвојене платформе производа, у **ћеиом** поглављу, за одабрани производ, приказан је **јосиуиак јенерисања алијернаиива** са припадајућим алгоритмима. Дефинисане су четири **кријеријумске функције** за избор најповољније конфигурације производа:  $f_1$  - укупно време израде и монтаже,  $f_2$  - укупни производни трошкови,  $f_3$  - укупан број грешака у процесу израде и  $f_4$  - збир максималних грешака равности површина свих модула. Њихови математички модели су дати у зависности од основних параметара производа а оптимизацијом је предвиђена минимизација сва четири критеријума. Функције  $f_1$  и  $f_2$  су приказане у алгебарском облику и рачунају се на основу података који се добијају из модула за пројектовање технолошких процеса, док функције квалитета  $f_3$  и  $f_4$  представљају стохастичке моделе добијене уз помоћ **мејодолоије одзивне јовршине** на основу података добијених у процесу статистичке контроле квалитета производних процеса.

**Шесџо** поглавље садржи теоријску основу **најредних САД сисџема заснованих на знању**, са освртом на начине пројектовања и управљања виртуелним производом. Након тога је приказан поступак практичне примене САД система заснованих на знању за пројектовање и **развој аујомайизованој САД конфијурайџора** модуларних трезорских просторија.

**Верификација и валидација** предложеног модела аутоматског конфигурационог система названог ИАКС МОДУЛПРИМ је приказана у поглављу **сеџам**. Одабрано је осам примера модуларних трезорских просторија типа МОДУЛПРИМ 5. У оквиру верификације модела тестирани су: а) оптимизациони модул, б) САД конфигуратор и в) збирни код. Валидација модела заснованог на унапређеној платформи је показала да модел реално осликава стварни систем и да је знатно ефектнији од постојећег поступка конфигурисања модуларних трезорских просторија.

Анализа остварених резултата, закључна разматрања и правци даљег истраживања су приказани у последњем - **осмом** поглављу.

На крају дисертације, као два нумерисана поглавља, дати су: **јрејлед лијерайуре** коришћене у истраживању и **јрайећи јрилози**.

ПОГЛАВЉЕ

2

---

**ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ  
ИСТРАЖИВАЊА**



## 2.1. Развој производа

Историјат развоја људске цивилизације прати и развој нових производа и технологија који су резултат жеље човека да живи боље, сигурније и комфорније. Константан техничко-технолошки развој и растућа глобализација тржишта, данас, постављају све строжије захтеве произвођачима. Да би произвођачи били конкурентни на глобалном тржишту потребно је да су способни да у кратком року развију квалитетне и јефтине производе који су прилагођени индивидуалним захтевима купца.

Зато произвођачи, данас, треба да [1]:

- су оријентисани на стално иновирање и креирање нових производа,
- користе нове методе и алате за скраћење периода иновације и развоја производа,
- обезбеде флексибилну производњу са малим производним серијама и мањим степеном коришћења производних капацитета,
- обезбеде висок квалитет производа,
- рационализују производњу и смање трошкове развоја како би обезбедили конкурентну цену производа и
- одговоре на индивидуалне захтеве купца и све краће рокове испоруке.

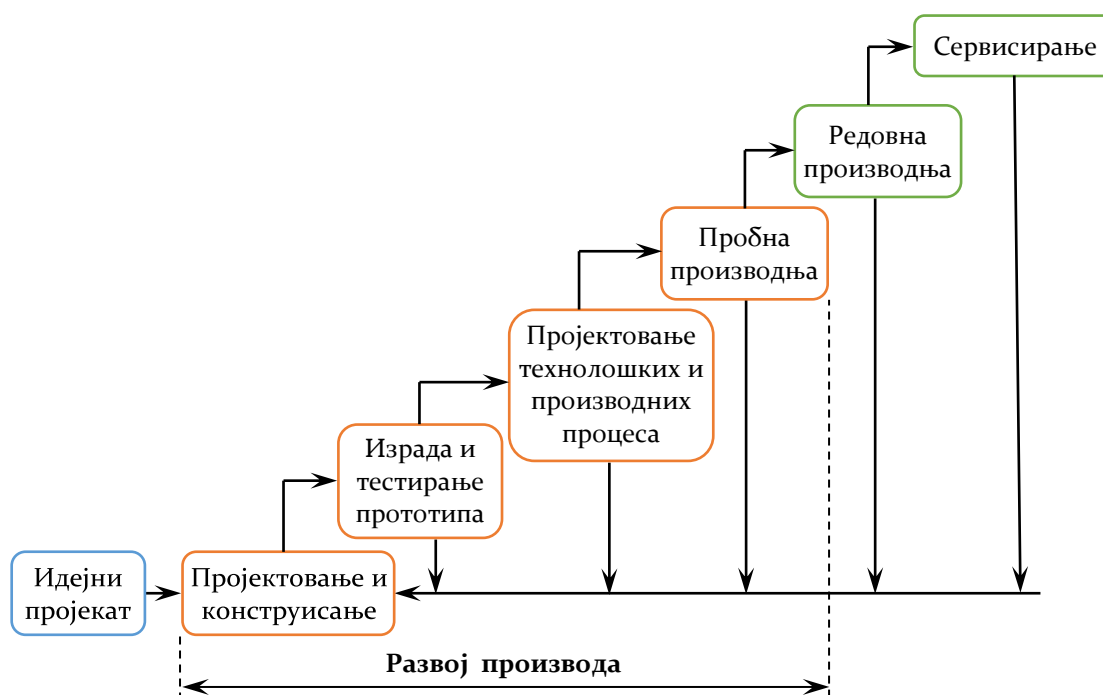
Процес развоја сложених производа је комплексан подухват који је скопчан са ризиком и неизвесношћу јер захтева велики број активности и ангажовање огромних материјалних, кадровских и финансијских ресурса. У тежњи да се удовољи тржишту и процес развоја сложених производа је имао различите приступе који су се временом мењали у складу са променом тржишних захтева али и у складу са сталним технолошким напретком и проширењем нових сазнања а нарочито развојем информационих технологија.

### 2.1.1. Секвенцијални развој производа

Секвенцијални развој производа (слика 2.1) је карактеристичан за традиционални приступ који се састоји од више узастопних етапа које су међусобно јасно разграничене [1,2]:

- пројектовање и конструисање производа,
- израда и тестирање прототипа,
- пројектовање производних и технолошких процеса и
- пробна производња.

У оквиру секвенцијалног приступа, функционалне целине предузећа (одељења) су међусобно просторно и временски раздвојене и нема међусобне интеракције између одељења. У процесу развоја производа свако одељење самостално разрађује свој део задатка и предаје га следећем одељењу. Сваки недостатак који се уочи у одређеној фази захтева да се процес развоја врати назад на фазу пројектовања. Резултат таквог приступа ствара велике временске и новчане губитке и кашњење са увођењем производа на тржиште. С друге стране, убрзање процеса доводи до угрожавања квалитета производа.



Слика 2.1 – Секвенцијални развој производа (прилагођено од [1])

Развој рачунарске технике и рачунарских алата за подршку пројектовања производа и процеса је помогао да се аутоматизују рутински послови и добије квалитетнија документација.

### 2.1.2. Конкурентно/Симултано инжењерство

Концепт конкурентног (*CE*)/симултаног (*SE*) инжењерства се појавио 80-тих година прошлог века са циљем да обезбеди конкурентни дизајн производа и њему припадајућих процеса. Овај приступ је симултано интегрисао широк спектар захтева како би се повећала ефикасност пројектовања производа, смањио временски циклус као и трошкови развоја производа [1,2]. Основна карактеристика конкурентног инжењерства је интеграција и кооперација знања која се остварује тимским радом експерата различитих профила. Тиме се постиже да се производ сагледа са различитих аспеката још у раној фази развоја производа.

Основне карактеристике концепта конкурентног/симултаног инжењерства су [1,2]:

- интеграција развојних процеса и различитих погледа на производ,
- паралелизација (симултано одвијање) активности са јаким логичким везама,
- усмеравање на потребе купаца,
- усвајање нових технологија,
- стандардизација процеса,
- функционални тимови,
- брза и аутоматизована размена информација и
- брзи развој прототипа производа.



Слика 2.2 – Концептуални модел симултаног инжењерства за глобалну производњу [2]

Иако су концепти *CE* и *SE* веома слични, неки аутори праве разлику истичући, пре свега, предност *CE* у смањењу броја модификација дизајна производа и времена укупног развоја производа [3]. Они су резултат ангажовања мултидисциплинарних тимова чиме се у раној фази дизајна укључују сви параметри који су релевантни за комплетан живтни циклус производа.

Конкурентно инжењерство је пратио и интензивни развој информационих технологија тако да се процес пројектовања производа и процеса изводио уз примену великог броја међусобно повезаних али недовољно интегрисаних алата. У склопу конкурентног инжењерства је развијен и читав низ техника које су подржане рачунаром и познате су под називом *DFX*.

Појам *CE* се данас више не користи али се овај концепт и даље интензивно изучава и практикује под различитим називима [4].

### 2.1.3. Брзи развој производа

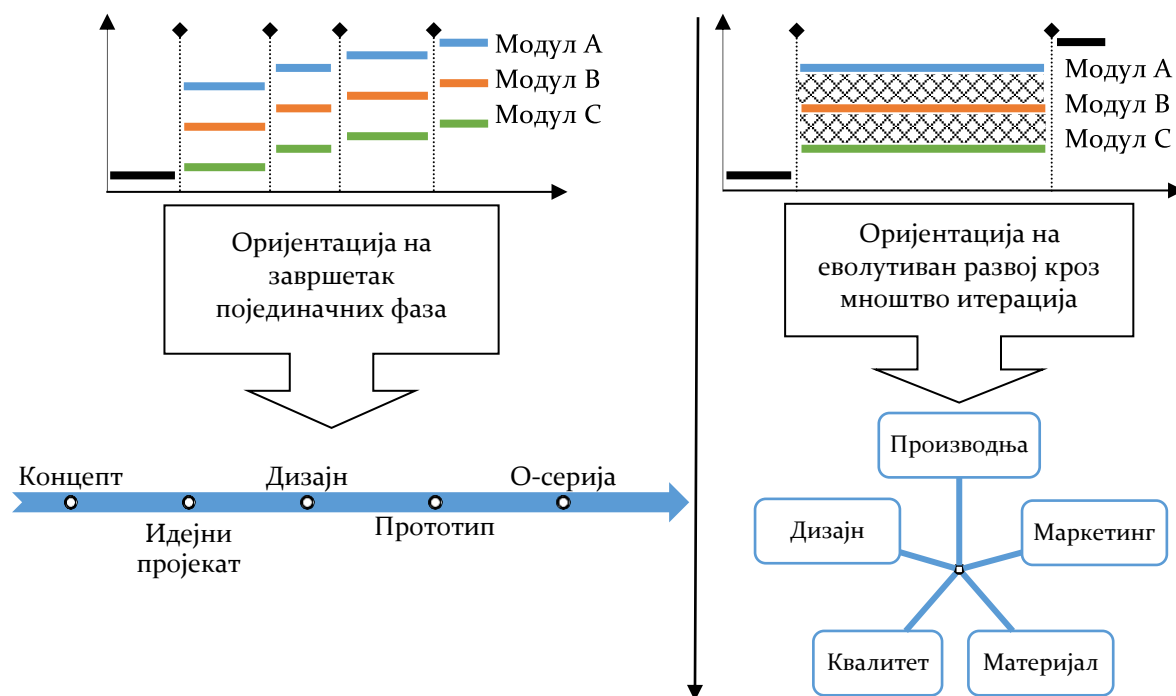
У даљој тежњи да се унапреди процес развоја нових производа и задовоље захтеви купаца, почетком 90-тих година прошлог века развијен је концепт познат под називом „Брзи развој производа“ (*RPD*). Концепт је заснован на идеји **евоуционоі циклуса пројектовања** који подразумева искуствени приступ са мноштвом циклуса пројектовања [5–7].

Основне компоненте брзог развоја производа (*RPD*) су: а) прототипови, б) комуникација и кооперација и в) презентација знања [6]. Посебан значај заузимају виртуелни прототипови који поред визуелног приказа геометријских особина производа имају задатак да моделирају и комплексно физичко понашање производа у виртуелној

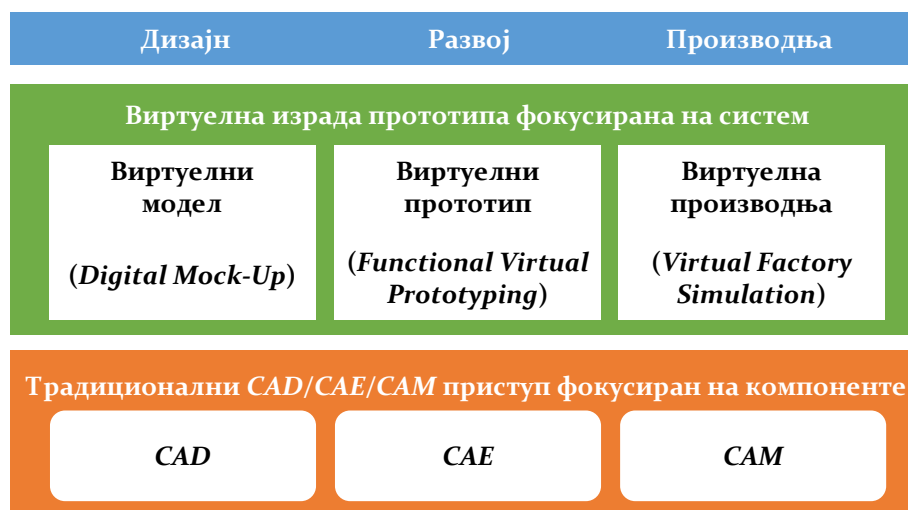
околини. Тиме се смањује број физичких прототипова које треба направити и тестирати што увелико смањује и трошкове развоја производа.

Уместо традиционалног *CAD/CAE/CAM* приступа фокусираног на компоненте уводи се нови *DMU/FVP/VPS* приступ фокусиран на систем, при чему је:

- *DMU* - дигитални тродимензионални солид модел (дигитална макета),
- *FVP* - функционални виртуелни прототип и
- *VFS* - виртуелна симулација фабрике.



Слика 2.3 – Фазно орјентисан развој наспрот еволуционалном развоју производа [5]



Слика 2.4 – *CAD/CAE/CAM* приступ фокусиран на компоненте и *DMU/FVP/VPS* приступ фокусиран на систем (прилагођено од [8])

Данас постоји огроман број *ИТ* алата који се користе у процесу развоја новог производа, а који се могу сврстати у неколико главних група [2]:

- алати базирани на знању,
- системи за управљање релационим базама података,
- алати за аутоматизацију тока рада,
- системи за управљање развојним циклусом производа,
- системи за подршку одлучивању и
- системи за планирање ресурса предузећа.

Већина програмских алата је развијена за помоћ у реализацији појединачних фаза развоја производа. Зато су главни напори данас усмерени на интеграцију алата за подршку и управљање развојним циклусом производа.

## 2.2. Mass Customization

Масовна производња (MP) идентичних производа је пословни модел прошлости. Идеја је била да се производи „роба конзистентног квалитета и приступачне цене“ [9]. Производи су били стандардизовани, производили су се у великим серијама и са најнижим могућим трошковима. У таквим околностима није било економски исплативо задовољити потребе индивидуалних купаца чак иако су за такав прилагођени производ били спремни да плате знатно вишу цену. Овај задатак је зато био препуштен занатској производњи.

Конкуренција на глобалном тржишту је све већа и од производа се данас захтева да испуњава низ међусобно супротстављених захтева: да је прилагођен захтевима и потребама купца, да је функционалан, квалитетан, економичан у процесу експлоатације, еколошки подобан и да је произведен у што краћем времену. С друге стране, савремени развој науке, технике и технологије и развој флексибилних, рачунаром потпомогнутих производних система омогућавају остварење ових захтева што је довело до увођења нове стратегије познате као *Mass Customization* (MC) [10–15].

### 2.2.1. Појам и дефиниција MC

У литератури се са овим појмом први пут срећемо код *Toffler*-а [16], док је *Davis* [17] касније увео назив „*Mass Customization*“. Једну од првих дефиниција за MC је дао *Pine* [12] који каже да MC има циљ да испоручи производе који задовољавају индивидуалне потребе сваког купца по ниској цени. Поред ове дефиниције за MC постоји и мноштво других, а једна од њих је да су то „технологије и системи за испоруку робе и услуга које задовољавају потребе појединачних купаца са ефикасношћу приближном као код масовне производње“ [11]. Анализом многих дефиниција, може се рећи да је MC приступ заснован на идеји производње високо варијабилних производа који задовољавају индивидуалне захтеве купца уз услов да је цена производа блиска цени производа створеног у процесу масовне производње [18,19]. Дакле, MC омогућује флексибилан и брз одзив на турбулентним и сложеним тржиштима, где се људи, процеси, технологија и јединице реконфигуришу како би купцима пружили управо оно што желе [15]. У истраживачком пољу MC се обично представља као веома ефикасно решење за компаније које производе прилагођене потрошачке производе.

Глобално тржиште је створило и глобалног, образованог и модерног купца. Да би се задовољили индивидуални захтеви савремених купаца, неопходно је успоставити одговарајуће односе са њима [20]. У складу са применом *МС* мења се и пословна стратегија компанија од прилагођавања процеса и производа до укључивања купца у креирање производа [21] тако да купац постаје активан партнер у процесу развоја производа [22,23].

У домаћој литератури је учињен покушај да се појам *Mass Customization* преведе на српски језик. Анишић и група аутора [22] као предлог дају неколико синтакси:

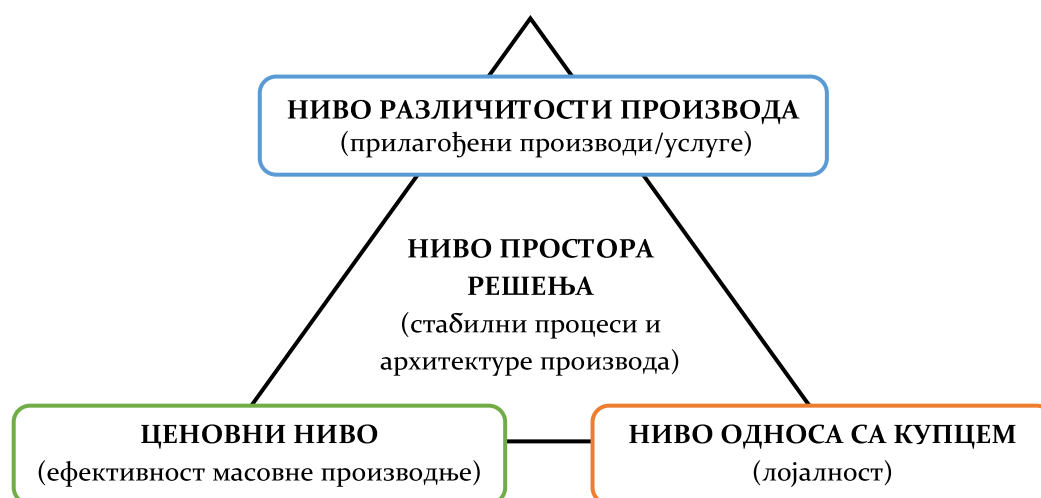
- прилагођена производња,
- масовна производња по потреби купца,
- масовна производња прилагођена купцу,
- масовна производња према индивидуалним захтевима купца и
- кастомизована индустријска производња.

Међутим, с обзиром да је у домаћој литератури већ широко прихваћен енглески назив *Mass Customization* и скраћеница *МС* то је у овој дисертацији задржан овај назив у свом изворном облику.

### 2.2.2. Четири нивоа *Mass Customization*

Да би се остварио концепт *МС* неопходно је, дакле, спојити предности које даје масовна индустријска производња по питању ефикасности и занатска производња по питању прилагођавања производа индивидуалним захтевима купца. Стога, *МС* представља савремени вид индустријске производње који се дефинише са четири нивоа [22]:

- ниво различитости производа,
- ценовни ниво,
- ниво простора решења и
- ниво односа са купцем.



Слика 2.5 – Четири нивоа индустријске производње на којима се заснива *МС* (прилагођено од [21])

### 2.2.3. Производне стратегије

Данас се у пословном свету сусрећемо са мноштвом класификација производних и индустријских система. Са становишта места и нивоа залиха у производном процесу, као и степена учешћа купца у процесу производње, тј. прилагођавања индустријске производње индивидуалним захтевима купца, производне стратегије могу бити [24,25]:

- Производња за залихе (*MTS*),
- Монтажа (склапање) према наруџбини (*ATO*),
- Производња према наруџбини (*MTO*) и
- Пројектовање (инжењеринг) према наруџбини (*ETO*).

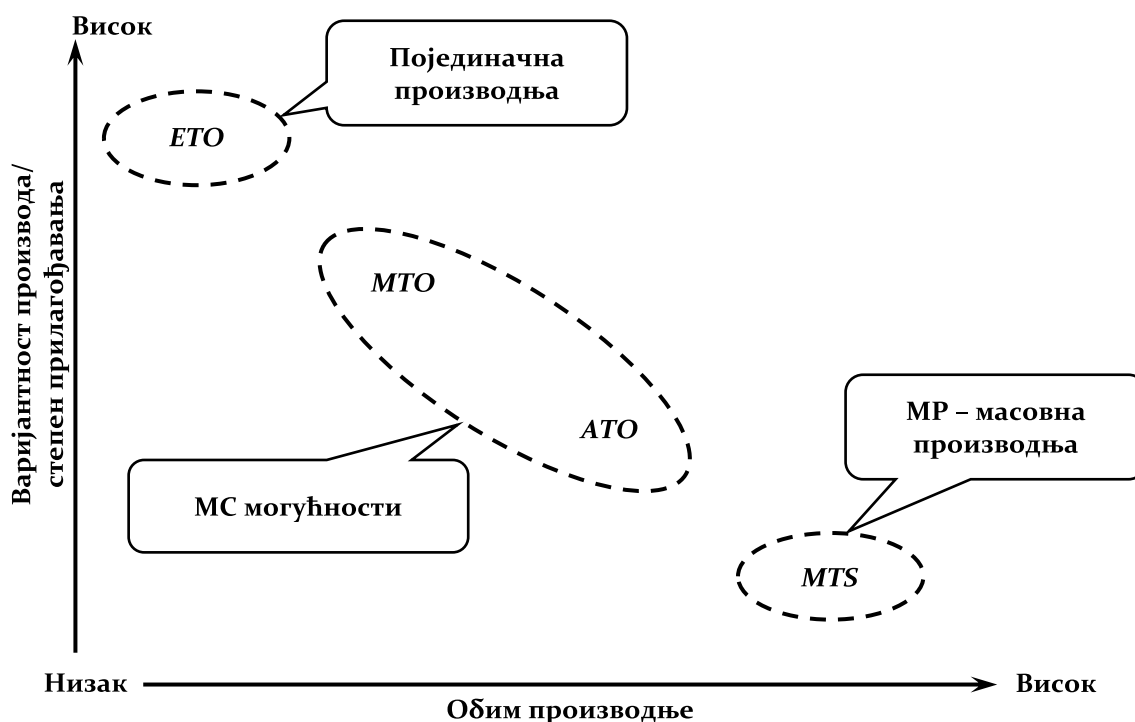
***MTS* сѝраѝеѝја** је типична за компаније које управљају системом масовне производње [24–26]. Она подразумева израду и складиштење велике количине готових производа на залихе који се, након поруџбине, испоручују купцима. Користи се код устаљених производа који имају фиксни број варијанти и за које се може предвидети потражња на основу праћења продаје у прошлости. Предности примене ове стратегије је кратко време од наруџбине до испоруке производа које се своди само на паковање и испоруку. Недостаци су низак утицај купца на карактеристике производа и велики трошкови складиштења производа.

Код ***ATO* сѝраѝеѝје** готови производи се склапају од унапред произведених компоненти (модуларни делови и подсклопови) према захтевима купца и испоручују након пријема поруџбине. Ово подразумева израду одређених компоненти и њихово држање на залихама. *ATO* стратегија се примењује у случајевима када се потражња не може тачно предвидети а купци су укључени на крају процеса производње (у продајном процесу) кроз омогућено дефинисање производа комбиновањем ограниченог броја стандардних компоненти. Време испоруке је мало до средње у зависности од доступности главних подсклопова и делова [24–26].

***MTO* сѝраѝеѝја** се користи код производа који се састоје од стандардних компоненти и од компоненти које треба прилагодити и израдити према спецификацији купца. Не раде се предвиђања потреба купаца а производња започиње након пријема наруџбине купца тако да за разлику од *MTS* стратегије, не постоје залихе произведених компоненти. Купац, дакле, има велики утицај на процес производње производа а времена испоруке крећу се од средњих до дугих јер захтевају време потребно за проверу, прилагођавање, производњу, склапање и испоруку производа. С друге стране, време од поруџбине до испоруке је у директној зависности од техничких могућности произвођача [24,26].

***ETO* сѝраѝеѝја** је проширење *MTO* стратегије са инжењерским пројектовањем производа према захтевима купца. Купац дефинише захтеве (спецификацију и функционалност производа), а компаније на основу тих захтева пројектују и производе прилагођен производ. За разлику од других стратегија (*MTO*, *ATO* или *MTS*), *ETO* послују као пројектне организације и испоручују сложеније високо прилагођене производе у малом обиму. Ниво укључености купца у процес израде производа је висок,

али су време реализације и трошкови пројектовања велики јер готов производ као и највећи број компоненти и склопова никада раније нису рађени [26–28].

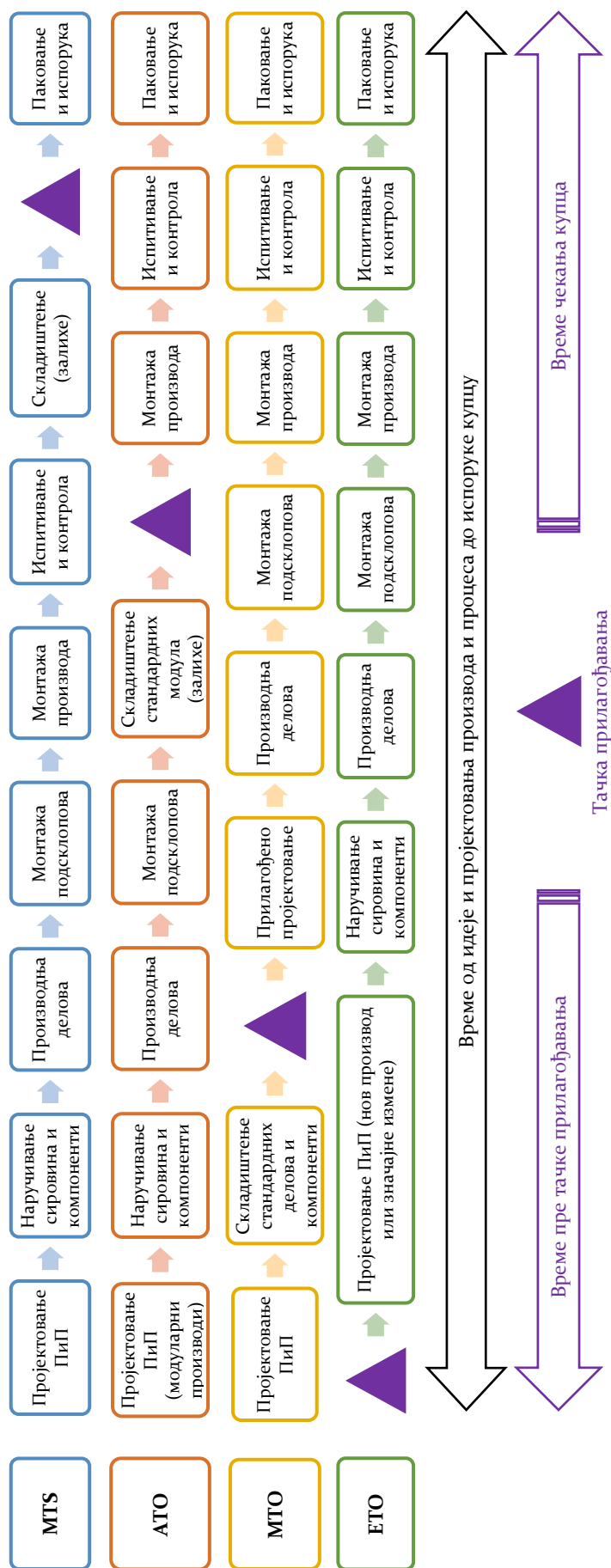


Слика 2.6 – Позиција производне стратегије у односу на обим производње и варијантност производа (прилагођено од [31–33])

Слична подела и опис производних стратегија примећена је код *Rudberg* и *Wikner* [29] који уводе и тачку наручивања/укључења купца (*CODP*) у процес пројектовања и производње. Концепт означава тачку у којој је производ повезан са наруџбином купца у процесу производње [30]. Она представља тренутак наручивања производа и укључења купца у процес производње, а може се назвати и „тачка прилагођавања“. Основне разлике за наведене стратегије и положај поменуте тачке у временској координати су приказани на слици 2.7.

Код *MTS* стратегије низак је утицај купца на карактеристике производа па се тачка прилагођавања налази на самом крају циклуса, пре испоруке производа. Код *ATO* стратегије ова тачка представља и тачку складиштења/наручивања коју је могуће поставити на најефикасније место у структури производа. Знатно већи утицај на структуру и функционалност производа имају купци код *MTO* стратегије, где се ова тачка налази на почетку циклуса, одмах након пројектовања производа и процеса и складиштења стандардних компоненти. Највећи утицај на структуру и функционалност производа имају купци код *ETO* стратегије, код које комплетан циклус започиње тек након ове тачке и зависи од захтева купца. Време након те тачке (десно од ње) представља време испоруке производа (тј. време које прође од наручивања до испоруке производа), а време пре (лево од ње) представља време потребно за реализацију активности на које купац и наруџбина немају никакав утицај (тј. активности се могу одвијати неvezано за наруџбину купца). Приметно је да се времена знатно разликују код свих стратегија.





Слика 2.7 - Приказ места укључења купца у процес производње код различитих производних стратегија (прилагођено од [25])

Са слика 2.6 и 2.7 може се уочити да се на путу од *MTS* ка *ETO* повећава број варијанти производа и степен утицаја купца на карактеристике производа и процес производње, као и на сам процес пројектовања производа и процеса. Истовремено обим производње се креће од високог (масовног) ка појединачној производњи.

Мали број производних система припада једној одређеној категорији с обзиром на облик производног система и стратегију у производњи. Већина компанија се може класификовати као хибридна. На пример, компанија може да буде хибрид *MTS* и *МТО*, што подразумева да поседује складиште готових производа за које постоји сталан захтев, али такође, има могућност да обликује производ за потребе клијената када је то потребно [24].

## 2.3. Архитектура производа и фамилије производа

### 2.3.1. Архитектура производа

*Ulrich* и *Eppinger* [34] **архијектуру производа** дефинишу као шему по којој су функционални елементи производа распоређени у физичке целине (модуле) и према којој целине међусобно делују. Модули се састоје од скупа компоненти (физичких елемената) и служе за имплементацију функције производа.

*Hölttä-Otto* у својој докторској дисертацији дефинише **архијектуру система** као апстрактан опис ентитета система и релација (односа) између тих ентитета и шема по по којој су ти ентитети мапирани у веће физичке или нефизичке подсистеме система [35].

За разлику од њих, Министарство одбране САД у дефиницију архитектуре уводи животни циклус производа: „Структура компоненти, њихови односи и принципи и смернице за управљање њиховим дизајном и развојем током времена“ [36].

Битно је напоменути да већина аутора разликује појмове архитектуре производа и структуре производа. **Архијектура производа** подразумева структуру елемената и њихових веза помоћу којих се дефинише фиктивни производ док **сјруктура производа** подразумева хијерархијску структуру компоненти од којих се састоји стварни (физички) производ који се формира на основу прихваћене архитектуре производа [37].

#### 2.3.1.1. Типови архитектуре

Разликују се два типа архитектуре: интегрална и модуларна [38–40].

Код **интегралне архијектуре** једна функција је садржана у више елемената (однос 1:М) или је неколико функција садржано у више елемената (однос N:М) [41]. Производ има фиксну архитектуру са класичним оптималним приступом дизајну при чему промене једне компоненте утичу на промене других компоненти [42]. Његово пројектовање укључује сложене односе (везе, релације) између компоненти и функција, и сложене интерфејсе за повезивање компоненти. Овакви производи су намењени серијској производњи. Састоје се из мањег броја делова, структура производа је поједностављена,

користи се мањи број стандардних делова, мање је време монтаже чиме се смањују укупни трошкови производње и монтаже, трошкови набавке и складиштења стандардних делова али су зато компоненте комплексније а време пројектовања дуже [43].

Код *модуларне архитџектуре* обично је једна функција садржана у једном модулу/компоненти (однос 1:1) или је неколико функција садржано у једном модулу/компоненти (однос N:1) [44]. Модуларни приступ обезбеђује флексибилност, разноврсност и брзо стварање нових производа из фонда расположивих модула [45–47]. Веза (интерфејс) између компоненти је таква да промена на једној компоненти не доводи до промена у другим компонентама (у функционалном и физичком смислу).

Треба напоменути да су у стварности веома ретке потпуно модуларне или потпуно интегралне архитектуре производа и да се најчешће производи остварују комбинацијом ова два приступа [35].

### 2.3.1.2. Модул, модуларност и модуларизација

Концепт модуларности, који данас привлачи све више пажње, уопште није нов. Изворно, термин *модул* потиче од латинске речи *modulus* која је означавала меру за дужину и представљао је стандардну меру за обезбеђење тачних пропорција у архитектури. Сам концепт је настао почетком двадесетог века у архитектури и био је синоним за грађевинске/градивне блокове (*Baukasten*) који су представљали стандардне функционалне јединице (кухиње, дневне собе, спаваће собе и др.) у зградама у циљу рационалније градње зграда. У машинском инжењерству овај концепт је разрађен 60-тих година прошлог века. Градивни блокови су представљали физичке, типично машинске склопове чијом се комбинацијом остваривала варијантност производа [48].

Данас се изворна реч *модул* користи за градивни блок коме је придодата функционалност у односу на конструкцију чији је саставни део, при чему модул представља физичку реализацију одређене функције производа. Интензивним развојем ИТ технологија и софтвери прихватају идеју модула тако да данас све већи значај имају *софтверски модули* који нису физички и чији се интерфејси не могу описати геометријом.

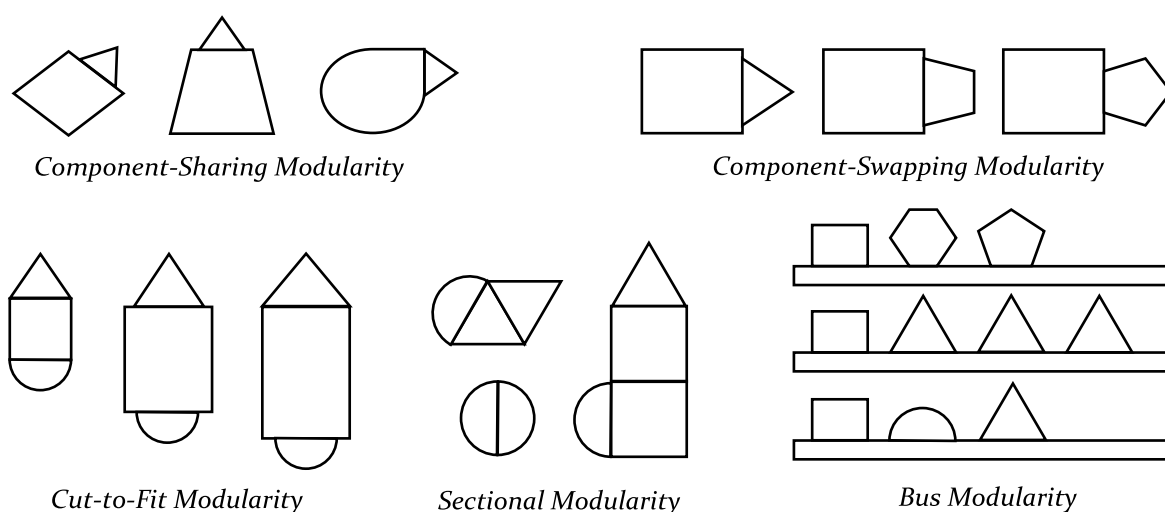
Зато *Miller* и *Elgård* предлажу следеће дефиниције које важе како за материјалне тако и за нематеријалне производе [48]:

- *Модул* је суштинска и самостална функционална јединица у односу на производ чији је део. Модул има стандардизоване *интерфејсе* и *интеракције* који омогућавају композицију производа комбинацијом модула.
- *Модуларносћ* је атрибут система који се односи на структуру и функционалност.
- *Модуларна сјруктура* је структура која се састоји од самосталних функционалних јединица (модула) са стандардизованим интерфејсима и интеракцијама. Замена једног модула другим ствара нову варијанту производа.
- *Модуларизација* је активност у којој се одвија структурирање у модуле.

### 2.3.1.3. Типови модуларности

У циљу обезбеђења стандардизације компоненти и разноврсности материјалних производа *Ulrich* и *Tung* [49] први дефинишу 5 категорија модуларности (слика 2.8):

- Модуларност на принципу дељења компоненти (енг. *Component-Sharing Modularity*),
- Модуларност на принципу замене компоненти (енг. *Component-Swapping Modularity*),
- Модуларност на принципу „израде по мери“ (енг. *Cut-to-Fit Modularity*),
- Модуларност типа сабирнице (енг. *Bus Modularity*) и
- Секцијска модуларност (енг. *Sectional Modularity*).



Слика 2.8 – Пет типова модуларности (прилагођено од [49])

*Pine* [12] додаје и шести тип: **мешовитиу модуларности** (енг. *Mix Modularity*) која се често среће у сликарству и хемијској индустрији.

### 2.3.2. Фамилија производа

Појам фамилије производа није једнозначно одређен у литератури. Међутим, већина аутора потенцира да је то група (скуп) сродних производа који деле заједничке карактеристике, компоненте и подсистеме и задовољавају различите сегменте тржишта [50,51] при чему сваки производ има своје јединствене спецификације [52].

Савремене компаније све више улажу у развој [53] и пројектовање фамилија производа у циљу обезбеђења све веће варијантности производа са перформансама које испуњавају захтеве различитих сегмената тржишта у што краћем року, остварујући при том економичност индустријске производње великог обима [51,53–56].

*Simpson* и др [57] су идентификовали два начина за увођење разноврсности у фамилије производа:

- Конфигурабилна фамилија производа заснована на модулима (енг. *Module-Based Configurable Product Family*), где се варијанте производа израђују додавањем, заменом и/или уклањањем једног или више функционалних модула из платформе [58–61], и
- Параметарска фамилија производа базирана на прилагођавању (скалирању) (енг. *Scale-Based Parametric Product Family*), при чему се једна или више променљивих употребљава за „истезање“ или „смањивање“ (“*stretch*” или “*shrink*”) платформе производа у једној или више димензија [46,51,62].

## 2.4. Конфигурисање производа

Један од главних праваца за решење проблема прилагођавања производа захтевима купца је развој конфигурабилних производа [63] а конфигурисање производа је данас постало кључно средство за имплементацију МС [64].

### 2.4.1. Конфигурабилни производи

Конфигурисање производа представља ефикасан начин структурисања производа, састављеног од стандардизованих делова, и представљања производа потрошачима [65].

Конфигурабилни производи се први пут појављују крајем седамдесетих година прошлог века. *McDermott* [66] је објавио пионирски рад где је приказао програм под називом RI (касније назван *XCON*) који је служио за конфигурисање *VAX-II/780* рачунарских система, и који је имплементиран у *Digital Equipment Corporation*. Од тада је конфигурација производа привлачила све већу пажњу од стране академске заједнице, што доказују бројне дисертације и научни чланци, као и велико интересовање индустрије где су многе компаније усвојиле конфигураторе производа [67–70].

Примена конфигурацијских решења производа је данас присутна у скоро свим гранама индустрије као што су: авиони, рачунари, аутомобили, телекомуникације, бицикле, намештај, потрошачка електроника, медицински системи, индустријски производи и др. [69,71].

Као архитектура конфигурабилних производа најчешће се користи модуларна архитектура. Производ се декомонује на функционалне модуле чијим избором и комбиновањем се могу конфигурисати варијанте производа у оквиру фамилије производа [72] ради задовољења различитих захтева купаца.

#### 2.4.1.1. Процес конфигурисања производа

Процес конфигурисања производа је „активност којом се одређује, до одређеног нивоа, структура варијанте производа прилагођене захтевима наручиоца, унутар ограничења која су постављена архитектуром производа” [44].

Задатак процеса конфигурисања производа се своди на избор елемената производа, из унапред дефинисаног скупа компоненти, ради формирања варијанте производа која задовољава тражене захтеве, уз поштовање скупа претходно дефинисаних ограничења и конфигурацијских знања [69,73–76].

Процес конфигурисања производа започиње са листом захтева купца, наставља се формирањем једне или више варијанти производа из задатог скупа компоненти и модула и завршава се избором оптималне варијанте која задовољава тражене захтеве.

#### 2.4.1.2. Карактеристике конфигурабилних производа

Савремени конфигурабилни производи имају следеће карактеристике [63]:

- свака варијанта испуњава индивидуалне захтеве купца,
- производ је унапред дефинисан како би задовољио широк опсег различитих захтева купаца,
- производ има модуларну архитектуру и
- свака варијанта производа је одређена комбинацијом расположивих компоненти и модула.

#### 2.4.1.3. Конфигурацијска знања

Конфигурацијска знања обухватају знања о: модулима (компонентама), везама између модула (интерфејс), атрибутима и ограничењима компоненти [13]. Конфигурацијско знање се може описати и као скуп конфигурацијских правила и ограничења потребних за дефинисање начина избора, спајања и комбиновања компоненти, као и за развој и одржавање конфигурабилних производа [77].

За аутоматизацију рутинског посла, као што је детаљно пројектовање производа и израда документације, који је могуће описати одређеним правилима и ограничењима, користе се модели засновани на знању (*KBE*) који подржавају аутоматизацију кроз параметарско моделирање [78]. *KBE* се примењује за аутоматизацију понављајућих пројектантских задатака и прикупљање и поновну употребу дизајнерског знања, чиме се постиже значајна уштеда времена пројектовања [79]. *KBE* се налази на пресеку различитих фундаменталних дисциплина, попут вештачке интелигенције (*AI*), рачунарски подржаног пројектовања (*CAD*) и рачунарског програмирања [80].

#### 2.4.2. Платформа производа

Стратегија дизајна фамилије производа заснована на платформи производа је веома ефикасан алат за имплементацију *Mass Customization* у различитим сегментима тржишта [52]. Ради обезбеђења довољне варијантности производа и остваривања економичне производње, компаније све више улажу у пројектовање и развој фамилија конфигурабилних производа односно, групе сродних производа изведених из заједничке производне платформе [54–56,81].

Бројни аутори различито дефинишу платформу фокусирајући се пре свега на сам производ:

- Скуп правила о компонентама и односима од којих ће бити састављена варијанта производа [82].
- Скуп подсистема (модула, подмодула или компоненти) и интерфејса који чине заједничку структуру из које се могу ефикасно развити и произвести варијанте производа [52,83,84].
- Скуп заједничких модула, подмодула или компоненти из којег се може ефикасно креирати и лансирати производња низа производа [52].
- Релативно велики скуп компоненти производа које су физички повезане као стабилни подсклоп и заједнички су различитим коначним моделима [39,85].
- Скуп компоненти, подсистема, спојева (интерфејса) и производних процеса који се деле између скупа производа [52].
- Заједнички скуп физичких или нефизичких модула из којих се могу извести вишеструки производи [35].

Други аутори имају уопштеније дефиниције платформе:

- Колекција ресурса (компоненти, процеса, знања и људи и односа) које дели група производа [81].
- Колекција заједничких елемената (не само физичких компоненти), базираних на технологијама, која се примењује на различитим производима [86].
- Скуп заједничких параметара, карактеристика и/или компоненти који остају константни од производа до производа унутар одређене фамилије производа [51].
- Скуп заједничких елемената (компоненти, процеса, секвенци и сл.) који деле основно језгро технологије на темељу којег се ток изведених производа може ефикасније развијати и покренути [87].

За разлику од потрошача којима су интересантне варијанте (фамилије) производа које нуде произвођачи да би задовољили њихове потребе, са становишта произвођача је битна платформа производа на основу које се развијају варијанте производа за задовољење потреба потрошача [44]. Зато је потребно, поред модуларне архитектуре и међусобних веза, посебно истаћи и трећи аспект платформе производа који је веома важан за произвођача а то су правила одлучивања (конфигурацијска знања) на основу којих се брзо и ефикасно развијају варијанте производа [88].

*Zamirowski* и *Otto* [89] разликују три типа платформе производа:

- Модуларне платформе (енг. *Modular Platforms*),
- Скалиране - прилагодљиве по димензијама (енг. *Scalable Platforms*) и
- Генерацијске платформе (енг. *Generational Platforms*).

**Модуларне њлајформе** се користе за креирање варијанти производа кроз конфигурацију постојећих модула [52] и могу донети уштеде трошкова и омогућити увођење више варијанти производа држе него без платформи [35].

**Скалиране њлајформе** се користе за креирање производа истих функција а различитог капацитета [90].

**Генерациске њлајформе** користе животни циклус производа како би се омогућило брзи развој и варијације следеће генерације производа [58,90].

### 2.4.3. Конфигуратори производа

Као основни алат за подржавање парадигме *МС* компаније развијају системе за конфигурацију производа (*PCS*), такође познате и као конфигуратори производа [91–93]. Системи за конфигурацију, омогућавају приказивање варијантности конфигурираних производа креирањем и управљањем конфигурацијским моделима и подршком корисницима у извршавању процеса конфигурације [94] и олакшавају процес претпродаје и продаје тако што подржавају процес доношења одлуке (*DMP*) према захтевима купаца [18].

#### 2.4.3.1. Појам и историјат конфигуратора производа

Конфигуратор производа представља рачунарски алат (програм) заснован на експертним системима (*ES*) или системима заснованим на знању (*KBS*) који омогућава прилагођавање производа спровођењем процеса конфигурације производа [65,95,96]. Улога конфигуратора производа је да на брз начин премости јаз између захтева купаца и крајњег производа [97], тј. да пружи подршку купцима (потребну количину информација) у процесу прикупљања и превођења захтева купаца (*CRs*) у исправне и изводљиве спецификације производа или модуле [98]. Осим тога може помоћи компанијама при представљању разноврсности производа [65] али и купцима кроз обезбеђење брзих, исправних и потпуних информација о производу путем наруџбеница које садрже цену, саставницу материјала (*BOM*), време реализације и изглед производа [21,68].

У самом почетку већина конфигурацијских система били су пројектовани као каталошки системи који су одређивали само својства производа [13]. Њихов недостатак био је немогућност приказивања производа у *3D* и интерактивна измена производа, тј. немогућност повезивања конфигурацијског и *CAD* система. Убрзани напредак *CAD* система доводи до све учесталије интеграције конфигурацијског система у *CAD* системе. На тај начин се долази до комплетне подршке процесу конфигурације кроз **аутоматизоване конфигурацијске системе** који су у могућности да на основу захтева купца аутоматски изврше комплетан процес конфигурације [99]. Последњих 10-так година значајно поље истраживања је развој и примена програмабилних веб интерфејса као подршка корисницима да самостално конфигуришу производ који одговара њиховим жељама и потребама [18,100,101].



Према Анишићу [22] конфигуратори су интерактивне платформе које се састоје од три главне компоненте:

- **Софтвер за конфигуравање** расположивих варијанти који кроз постављање питања води корисника кроз процес конфигуравања и нуди му одговарајуће опције.
- **Систем за презентовање повраћених информација** о конфигурацији која се обликује.
- **Алати за анализу** помоћу којих се врши коначно дефинисање дате поруџбине.

Детаљније праћење конфигуратора производа почиње 2007. године када је покренута база постојећих конфигуратора која је у почетку обухватала око 600 веб-конфигуратора В2С производа. *Blažek* и остали [71] представили су детаљну анализу доступних конфигуратора до 2015. године, када се количина конфигуратора у бази повећала на 1034. Те конфигураторе су користиле компаније лоциране у 28 различитих земаља, а највише конфигуратора користе компаније које се налазе у Немачкој 487 (47%) и САД 355 (35%). У различитим индустријама могу се пронаћи различите врсте производа који се прилагођавају, али је анализом доказано да су најчешћи производи који се конфигуришу аутомобили и одећа [71].

#### 2.4.3.2. Поделе конфигуратора

У референтној литератури постоји мноштво подела конфигуратора [97,99,102], а једна од најуопштенијих подела конфигуратора је на [93]:

1. Конфигураторе производа (енг. *Product Configurators*),
2. Конфигураторе продаје (енг. *Sale Configurator*),
3. Конфигураторе производње (енг. *Production Configurators*) и
4. Конфигураторе за пројектовање производа (енг. *Design Configurators*).

**Конфигурајор производа** има основну функцију да трансформише захтеве купаца у исправну спецификацију производа, тј. да води купца кроз процес избора варијанти из асортимана производа, тако да онемогући купца да одабере непостојећу или немогућу варијанту производа или његових карактеристика. Поред тога компанијама може послужити за детаљније представљање асортимана производа [103].

**Конфигурајор продаје** има задатак да, у реалном времену, купцу обезбеди продајне спецификације као што су информације о цени, времену испоруке, детаљним карактеристикама и додатним варијантама производа и тако повезује продајну службу са купцима. Најчешће налазе примену код производа са мање прилагођавања али при масовној производњи, тј. при *MTS* стратегији, а у неким случајима и *ATO* стратегији [102]. Корисници конфигуратора производа/продаје су службеници продаје, а у случају мрежног (*web*) конфигуратора производа/продаје корисник је крајњи купац [93].

**Конфигурајор производње**, поред прикупљања и трансформације захтева купаца у продајну спецификацију, омогућује спецификацију производње (листа потребних

материјала и производне секвенце) потребну за израду одабране варијанте производа коју захтева купац [104]. Конфигуратор производње обично делује као веза између окружења система управљања производним циклусом производа *PDM/PLM* и система за планирање ресурса предузећа *ERP*, у којем конфигурактор користи сталну структуру производа за конструкцију детаља о производу [93,102]. Нема директног контакта са купцем, већ се улазни подаци у конфигурактор могу уносити аутоматски на основу података из конфигурактора производа/продаје (у случају интеграције у један конфигурактор), или овај процес контролише продајно или техничко особље компаније [93,102]. Користе се код компанија оријентисаних ка *MTO* и *ATO* стратегијама пословања [102].

**Конфигураџор за пројектовање производа**, поред прикупљања и трансформације захтева купца у спецификацију производа, има додатне активности које трансформишу спецификацију производа у детаљан *3D* модел и техничку документацију са саставницом помоћу рачунарски потпомогнутих програма у оквиру *CAD*, *PLM* и *ERP* система [93,102]. На овај начин се, као резултат конфигурисања, добија виртуелни *3D CAD* приказ одабране варијанте производа, који значајно помаже купцу при разумевању одабране варијанте, али такође помаже и компанији јер се аутоматски добија исправна комплетна документација производа. Ова врста конфигурактора, такође позната и као ***CAD* конфигураџор производа**, има способност да ажурира, мења или креира нове компоненте и модуле [105]. Овај тип конфигурактора повезује купца са процесом пројектовања, и помаже при проширењу *MC* идеологије на *ETO* активности аутоматизацијом процеса генерисања наруџбина и процеса пројектовања производа, што га чини различитим у односу на друге типове конфигурактора [102].

Функционалности свих наведених врста конфигурактора, у неким случајевима, могу се интегрисати у један тотални конфигурактор производа, или се могу реализовати као посебни конфигурактори [93].

Ради остварења комплетне подршке процесу конфигурисања све више се развијају **ауџомаџизовани конфигурациони сисџеми** који су у могућности да на основу захтева купца аутоматски изврше комплетан процес конфигурисања [99]. Ново поље истраживања је развој и примена програмабилних веб интерфејса као подршка корисницима да самостално конфигуришу (енг. *Co-Design*) производ који одговара њиховим жељама и потребама преко интернета [18,100,101].

#### 2.4.3.3. Предности примене конфигурактора

Применом конфигурактора производа и конфигурабилних производа остварује се низ предности, као што су [18,69,73,93,95,104,106–108]:

1. краћи рокови за генерисање производа као и време израде понуде, а самим тим краће је и време реализације и изласка на тржиште,
2. оптималан дизајн производа,
3. боље управљање варијантама производа,

4. понуда веће разноликости производа и могућност задовољавања већег броја захтева купца,
5. краћи циклуси испоруке варијанте производа и побољшан квалитет спецификације производа кроз поуздану документацију без грешки,
6. успешно имплементирање *МС*,
7. смањење трошкова,
8. очување знања,
9. број обрађених наруџбеница је већи,
10. мање коришћење ресурса при изради документације,
- II. мање рутинских радова,
12. краћи период обуке нових радника,
- III. поједностављивање активности прикупљања и реализација налога и
14. интегрисање корисника у процес дизајнирања, итд.

Конфигуратори производа у спрези са *CAD/CAM* системима и флексибилном аутоматизацијом (*e-фабрике будућности*) представљају кључну карику за обезбеђење управљања подацима и остварење крајњег циља, а то је брзи развој производа прилагођен индивидуалним захтевима купца.

## 2.5. Сложени технички производи

Што више расте људско знање, све више напредују техника и технологија, постојећи системи постају све сложенији а организације се налазе у све сложенијим окружењима. Упоредо са глобализацијом тржишта, инжењерски системи се повећавају у обиму, сложености и свестраности. Одговарајућа реакција захтева мултидисциплинаран приступ за решење сложене ситуације. Зато **сложени системи**, последњих година, привлаче све веће интересовање. Многе дефиниције сложеност система изражавају кроз бројност елемената у систему и бројност односа између елемената. Међутим, оно што се види као једноставно или сложено у датом тренутку је релативно и мења се са временом.

Да би се дефинисао **сложен производ** неопходно је прво разјаснити појам комплексности тј. сложености.

### 2.5.1. Шта је комплексност?

Реч **комплексан** (енг. *Complexity*) долази од латинског „*complexus*“ што значи сложен, састављен од делова повезаних међу собом [109]. При том треба разликовати реч **компликован** (енг. *Complicated*) која потиче од латинске речи „*complicare*“ која значи „сложен, заплетен, замршен, због неспретности учинити нешто тежим него што јесте“ [109]. Тако се термин "компликовани систем" користи да опише субјективне потешкоће у интеракцији са техничким системима које често зависе од личних способности [110] указујући при том да идентичне ситуације могу бити компликоване за једну особу, али не и за другу.

У циљу разјашњења феномена сложености, *Weaver* [111] је 1948. године дефинисао два облика комплексности: неорганизовану комплексност и организовану комплексност. Према његовом мишљењу, феномени „**неорјанизоване комјлексносѝ**“ се јављају код система који имају веома велики број делова и интеракције између делова се могу посматрати као претежно случајне, те се својства система у целини могу разумети применом метода вероватноће и математичке статистике. Супротно томе, „**орјанизована комјлексносѝ**“ се бави феноменима који се састоје од великог броја фактора „који су међусобно повезани у органску целину“ при чему се његово понашање може разумети и моделирати.

У оквиру инжењерских дисциплина не постоји јединствена дефиниција комплексности, пре ђи се могло рећи да постоји мноштво специфичних гледишта на овај проблем. Ипак, сви покушаји да се дефинише комплексност се вежу за појам „система“. Тако *Ehrlenspiel* [112], разликује „комплексност техничких система“ и „комплексност објеката“. Комплексност **ѝехничких сисѝема**, по њему, зависи од броја различитих елемената и њихове повезаности и посматра је као мерљиву карактеристику система.

За разумевање комплексности производа неопходно је, дакле, разумевање појма систем. Постоји мноштво дефиниција система али, за потребе ове дисертације, акценат је дат на следеће две. Према *Милѝеновићу* [113] „**Сисѝем** се састоји од већег броја елемената (парцијалних система) одговарајућих карактеристика међусобно повезаних одговарајућим везама. Систем је у односу на околну средину ограничен и са њом је у вези преко одговарајућих улазних и излазних величина. Функција система одређена је функцијом циља и може се описати преко разлике његових улазних и излазних величина.“

Према *Lindemann-у* [110] „**Сисѝем** је креиран од компатибилних и међусобно повезаних делова који формирају системску структуру, поседују појединачна својства и доприносе испуњењу сврхе система. Системи су ограничени системском границом и повезани са њиховим окружењем улазима и излазима. Промене делова система могу се окарактерисати динамичким ефектима и резултирати специфичним понашањем система.“

По питању комплексности, у расположивој литератури се разматрају 4 типа комплексности [110]:

- комплексност техничких система,
- комплексност објеката,
- комплексност производа или система и
- комплексност процеса,

при чему је за ову анализу најважнија **комјлексносѝ ѝехничких сисѝема**.

Према *Ођановићу* [114] „**Технички сисѝем** је материјализовани производ људског знања и људског рада односно, трансформисани облик знања и рада намењен

извршавању одређених функција за потребе људи. Под појмом система подразумева се хијерархијска (условљена) структура у којој се остварују функције или процеси“.

Милџеновић [13] даје следећу дефиницију: „**Технички сисџеми** су вештачки настали геометријско-материјални објекти који испуњавају дату функцију. То су стварни системи који се често називају **џехнички џроизводи**. Ови производи имају низ карактеристика према којима се разматрају и које им одређују употребну вредност. У процесу конструисања карактеристике производа дефинишу захтеве које он треба испунити.“

Из напред наведеног се може закључити да се **комџлексни џехнички џроизводи** могу сматрати **техничким системима** те је у духу српског језика сасвим оправдано користити реч „**сложен џехнички џроизвод**“.

### 2.5.2. Класификација техничких система у односу на сложеност

На основу претходно реченог, може се констатовати да се сложеност јавља као једна од главних особина система. Зато су чињени напори да се ова особина квантитативно изрази. Већина аутора дефинише сложеност производа у зависности од броја и различитости елемената од којих се он састоји као и од броја и врста релација којима су елементи међусобно повезани.

Милџеновић [13] класификује техничке системе према сложености у зависности „од броја саставних делова и релација између њих“ на следећи начин:

- машински елемент, са бројем делова 1÷100,
- једноставније машине, са бројем делова до 1.000,
- агрегати (нпр. аутомобил) са бројем делова до 10.000 и
- техничка постројења (нпр. брод, процесна постројења) са бројем делова до 100.000.

Bashir и Thomson [15], сложеност производа (PC) дефинишу преко функционалне декомпозиције производа на подфункције добијајући тако функционалну структуру производа у виду функционалног стабла. Сложеност производа се дефинише следећим изразом:

$$PC = \sum_{j=1}^k F_j \cdot j, \quad (2.1)$$

где су:

- $F_j$  – број функција на  $j$ -том нивоу и
- $k$  – број нивоа.

Међутим, иако функционална структура производа представља његов главни атрибут она није довољна за исказивање сложеност производа.

Weber [116] дели сложеност на пет димензија и повезује их са „компонентама техничке стратегије компанија које развијају и израђују техничке производе или системе“. Димензије сложености Weber класификује у две групе: сложеност производа и сложеност процеса. **Сложеносћ̄ производа** обухвата:

- **нумеричку сложеносћ̄** која се односи на број компоненти у производу или систему,
- **релациону сложеносћ̄** која се односи на број зависности између компоненти, и
- **варијациону сложеносћ̄** која описује број варијанти производа или система.

**Сложеносћ̄ процеса** према Weber-у обухвата:

- **дисциплинску сложеност** која се односи на број укључених дисциплина у развој производа и
- **организациону сложеност** која се односи на расподелу односно, количину уложеног рада.

Међутим, велики број аутора аспекте сложености класификује на основу порекла (извора настанка) на спољашње (егзогене) и унутрашње (ендогене) [117–119].

**Спољашњи елементи сложеносћ̄и** у суштини представљају разлоге за активно стварање унутрашње сложености у компанијама. Компанија може реаговати на повећање сложености спољашњег тржишта (нпр. због веће диверзификације потреба купаца) повећањем унутрашње сложености свог производног програма (нпр. повећањем различитих понуђених варијанти производа). За разлику од спољашњих извора сложености, **унутрашња сложеносћ̄** се односи на сложеност производа, процеса и организациону сложеност тј. атрибуте сложености посматрано из перспективе предузећа.

Конкретно, *Schuh* и *Schwenk* [119] дефинишу 4 основна поља (аспекта) сложености и два основна извора сложености (слика 2.9).

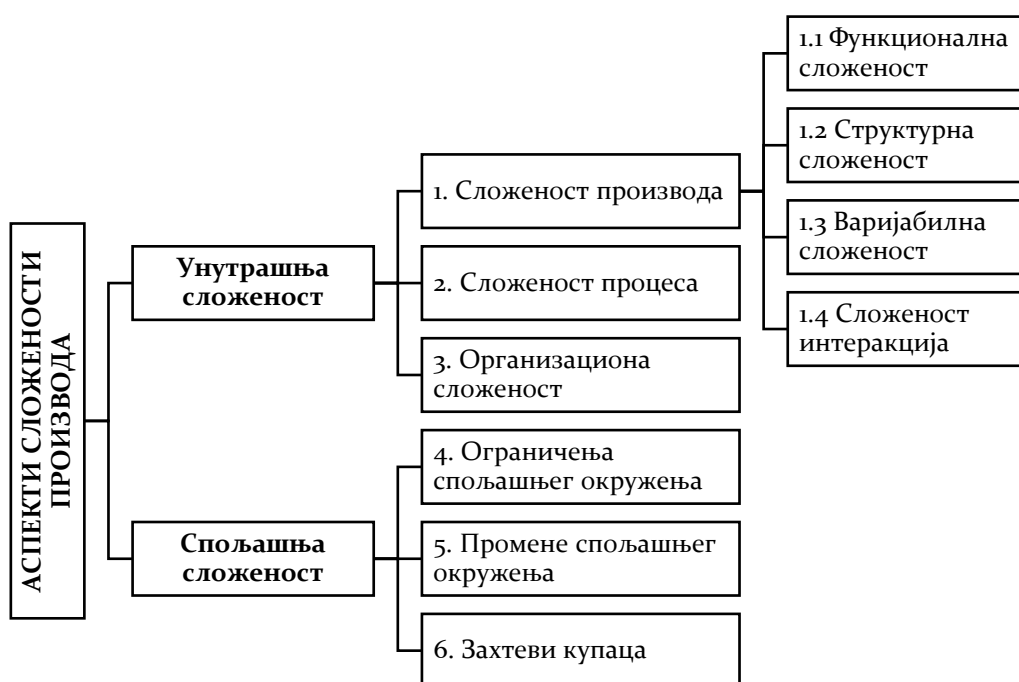


Слика 2.9 – Поља и извори сложености (прилагођено од [119])

### 2.5.3. Аспекти и параметри сложености производа

За потребе ове дисертације усвојен је модел који сложеност техничког производа посматра са аспекта унутрашњих и спољашњих извора сложености (слика 2.10) док су основни параметри разврстани у шест категорија:

1. Сложеност производа,
2. Сложеност процеса,
3. Организациона сложеност,
4. Ограничења спољашњег окружења,
5. Промена спољашњег окружења и
6. Захтеви купца.



Слика 2.10 – Аспекти и параметри сложености производа

Иако сложеност техничког производа може бити резултат унутрашњих или спољашњих фактора треба имати у виду да се може активно управљати само унутрашњим параметрима. За конфигурисање производа је свакако најзначајнији параметар који се односи на сложеност самог производа (параметар I). Овај параметар се састоји од четири главна атрибута: функционална сложеност, структурна сложеност, сложеност интеракције и варијабилна сложеност.

**Функционална сложеност** се односи на:

- Број функционалних својстава које производ треба да задовољи као што су: услови експлоатације (ефикасност, поузданост, безбедност, отпорност на атмосферске утицаје, ергономска својства), дужину животног века производа, могућност рециклаже и др.

- Сложеност функција коју производ треба да задовољи.
- Сложене интеракције између различитих функција производа.
- Важност нематеријалних функција производа (естетска својства, стил, укус).
- Економска својства производа (цена производа, економичност експлоатације).
- Усклађеност са законима и стандардима (сертификација производа, еколошка својства производа у складу са законским ограничењима).

**Структурна сложеност** обухвата:

- број елемената (компоненти, модула и склопова) у производу,
- разноврсност елемената,
- разноврсност материјала,
- величина производа (димензије, маса...),
- ниво иновативности производа и
- заменљивост компоненти, модула и склопова.

**Сложеност интеракција** између елемената обухвата:

- степен повезаности (број веза) између елемената,
- разноликост типова веза и
- сложеност веза (интеракција) између елемената.

**Варијабилна сложеност (разноликост)** производа обухвата:

- асортиман производа,
- број различитих варијанти унутар одређене групе или фамилије производа,
- распон величина производа у оквиру једне групе производа и
- могућност конфигурације према индивидуалним захтевима купца.

У табели 2.1 је дата класификација аспеката и параметара сложености техничког производа са припадајућим елементима.



Табела 2.1 – Класификација основних параметара сложености техничког производа

Аспекти сложености	Параметри/атрибути сложености	Елементи сложености	
УНУТРАШЊА СЛОЖЕНОСТ	1. Сложеност производа	1.1 Функционална сложеност	Број функционалних својстава које производ треба да задовољи
			Сложеност функције које производ треба да задовољи
			Сложене интеракције између различитих функција
			Важност нематеријалних функција производа
			Економска својства производа
			Усклађеност са законима и стандардима
		1.2 Структурна сложеност	Број елемената (компоненти) у производу
			Разноврсност елемената
			Разноврсност материјала
			Величина производа (димензије, маса...)
			Ниво иновативности производа
			Заменљивост делова, склопова и модула
	1.3 Сложеност интеракција између елемената	Степен повезаности (број веза) између елемената	
		Разноликост типова веза	
		Сложеност веза (интеракција) између елемената	
		Асортиман производа	
	1.4 Варијабилна сложеност (разноликост)	Број различитих варијанти производа у оквиру групе производа	
		Распон величина производа у оквиру једне групе производа	
		Конфигурације према индивидуалним захтевима купца	
		Број различитих домена који су укључени у развој производа (вишедимензионалност)	
	2. Сложеност процеса	Број подржаних технологија	
		Ниво технолошке сложеност технологија	
		Број нових (иновативних) технологија	
		Управљање комплексним подацима о производу	
Потребан број ресурса организације (инжењери, алати, опрема...)			
3. Организациона сложеност	Расположивост потребних технологија		
	Сложеност производње		
	Сложеност монтаже производа		
	Место уградње (монтаже) производа		
	Дужина производног циклуса		
	Ниво расположивог знања		
	Сложеност комуникације између учесника		
	Величина серије		
СПОЉАШЊА СЛОЖЕНОСТ	4. Ограничења спољашњег окружења	Комуникациона инфраструктура	
		Расположивост сировина	
		Расположивост енергената	
		Расположивост радне снаге	
		Расположиви ниво добављача	
		Патентна заштита производа	
	5. Промене спољашњег окружења	Промене постојећих закона, прописа и стандарда	
		Промене тржишних услова	
		Промене политичког окружења	
	6. Захтеви купца	Промена потреба корисника	
		Степен двосмислености захтева купца	
		Доступност производа	
		Услови и рок испоруке	
		Рок плаћања	
		Гаранције, сервис и техничка подршка и пратећа документација	
	Обука купаца-корисника		
	Лични захтеви купца (боја, орнаменти, графички симболи...)		

#### 2.5.4. Дефиниција сложеног техничког производа

За потребе овог истраживања усвојена је радна дефиниција сложености техничког производа:

*Сложен технички производ је материјални производ који представља сложен технолошки систем намењен за извршавање одређених функција за употребе људи. Састоји од веће броја елемената међусобно повезаних одговарајућим везама у хијерархијску структуру при чему сваки елемент поседује јојединачна својства која доприносе испуњењу функције система. Систем је повезан са окружењем преко улазно-излазних величина при чему постоји динамичка веза између делова и њихова система.*

У овом тренутку, тешко је предложити адекватну методологију за квантитативну оцену сложености техничког производа на основу усвојених параметара али се ови параметри могу користити за квалитативно поређење сложености два или више производа који се налазе у истој групи. С обзиром на тенденцију да савремени производи теже да задовоље индивидуалне захтеве купаца свака конкретна ситуација захтева другачији облик решавања те је фокус у овој дисертацији на развоју модела за решење таквих проблема.

#### 2.5.5. Конфигурисање сложеног техничког производа и МС

На основу претходне анализе може се констатовати да **сложен технички производ** поседује све карактеристике **савременог конфигурабилног производа** које су дефинисали *Tiihonen* и *Soinin* [63] а које су наведене у делу 2.4.1.2.

Како је конфигурисање сложених производа постало предуслов за прилагођавање производа захтевима купца а тиме и за имплементацију МС то је неопходно развијати **аутоматске конфигурационе системе** засноване на виртуелним моделима за симулацију и оптимизацију производа и производних процеса како би се анализирао што већи број могућих конфигурација а уједно смањили трошкови израде и монтаже сложеног производа.

Зато је задатак овог истраживања био да предложи **интегрисани аутоматски конфигурациони систем** за избор оптималне конфигурације сложеног производа са аспекта времена, трошкова и квалитета.

ПОГЛАВЉЕ

# 3

---

## РАЗВОЈ МОДЕЛА ИНТЕГРИСАНОГ АУТОМАТСКОГ КОНФИГУРАЦИОНОГ СИСТЕМА

За проучавање и боље разумевање понашања реалног система неопходно је развијати моделе реалног објекта и његове симулације на рачунару. *Модел* неког објекта је „скуп организованих информација које дају одређену представу о том објекту“. Модел у суштини служи за проверу теорије којом се објашњава и предвиђа понашање реалног система [120].

Најчешћи циљеви моделирања су [120]:

- анализа и потпуније проучавање објекта како би се добила поуздана знања о објекту,
- провера постављених хипотеза,
- програмирање или предикција стања и понашања објекта,
- оптимизација разноврсних објеката и
- управљање датим објектом у простору и времену.

Савремена рачунарска техника омогућује да се изведе симулација мноштва варијанти производа и да се одређеним методама вишекритеријумске анализе изабере најбоља међу њима. У овом делу дисертације је приказан *Модел инџејрисаној ауџомајској конфџиурационој сисџема (ИАКС)* модуларних производа који обједињује поступке генерисања могућих варијанти производа, избор оптималне варијанте и детаљно пројектовање производа и технолошких поступака.

### 3.1. Развој модела

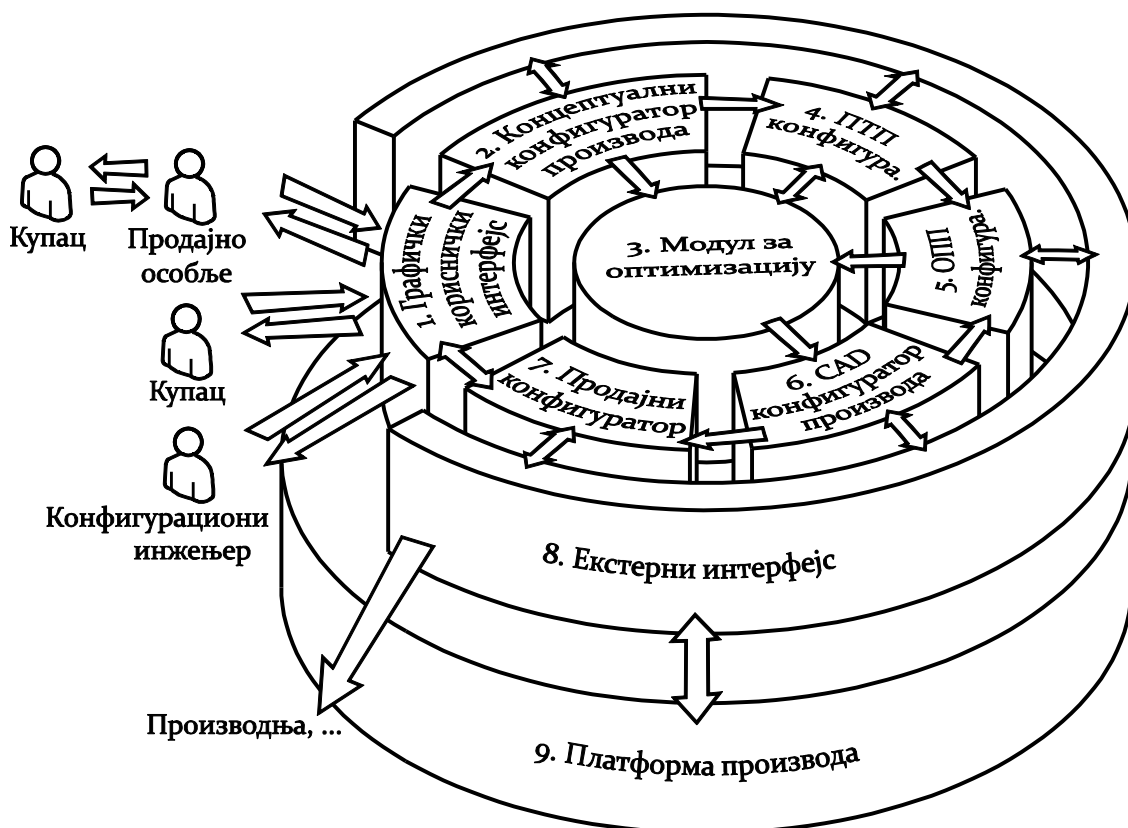
Основна идеја развијеног модела *ИАКС* за аутоматско конфигурисање сложеног модуларног производа се састоји у следећем:

- На основу захтева купца а на бази развијене платформе производа, генерише се скуп могућих конфигурационих варијанти производа.
- Критеријуми избора треба да одражавају карактеристике производа како са аспекта купца (квалитетан и јефтин производ урађен за што краће време) тако и са аспекта произвођача (јефтина и брза производња са што мање грешака).
- Критеријумске функције циља се дефинишу унапред и задају се у параметарском облику тј. у зависности од сета параметара дефинисаних платформом производа.
- Избор оптималне конфигурације производа се изводи применом неке од метода вишеатрибутивног одлучивања.
- Одабрана алтернатива даље се користи за детаљно пројектовање производа и технолошких поступака, израду оперативног плана реализације производа и дефинисање понуде која се путем продајног конфигуратора и корисничког интерфејса доставља купцу.
- Наведени поступци су међусобно интегрисани и аутоматизовани.

Структура модела за подршку одлучивању у процесу избора оптималне конфигурације сложеног модуларног производа, која је развијена у дисертацији, је приказана на слици

3.1. Модел се састоји од 9 модула, који су логички и функционално повезани у једну целину, а то су:

1. Графички кориснички интерфејс,
2. Концептуални конфигурактор производа,
3. Модул за оптимизацију,
4. ПТП конфигурактор,
5. ОПП конфигурактор,
6. САД конфигурактор производа,
7. Продајни конфигурактор,
8. Екстерни интерфејс и
9. Платформа производа.



Слика 3.1 – Општа структура развијеног модела ИАКС

Комуникација између модула је аутоматизована док је процес уноса захтева купца мануелан. Опис, структура и задатак појединачних модула детаљно су описани у наставку.

### 3.2. Графички кориснички интерфејс

Графички кориснички интерфејс (ГКИ) представља модул који је задужен за комуникацију корисника са предложеним системом. Учесници у комуникацији су:

- крајњи корисник (купац),

- продајно особље и
- конфигурациони инжењер.

**Крајњи корисник** има могућност да уз помоћ овог модула директно дефинише своје захтеве, унесе улазне податке и чињенице о производу и захтева објашњења коначног решења. *ГКИ* је прилагођен корисницима тако да није потребна обука за његово коришћење. Приликом уноса захтева *ГКИ* помаже кориснику да на правилан и једноставан начин, путем питања и одговора, дефинише своје захтеве а да систем добије информације у њему познатом формату. Крајњи резултат процеса конфигурисања помоћу развијеног модела, из угла корисника, је понуда која се добија из модула 7 (Продајни конфигуратор) а прослеђује се купцу преко *ГКИ*.

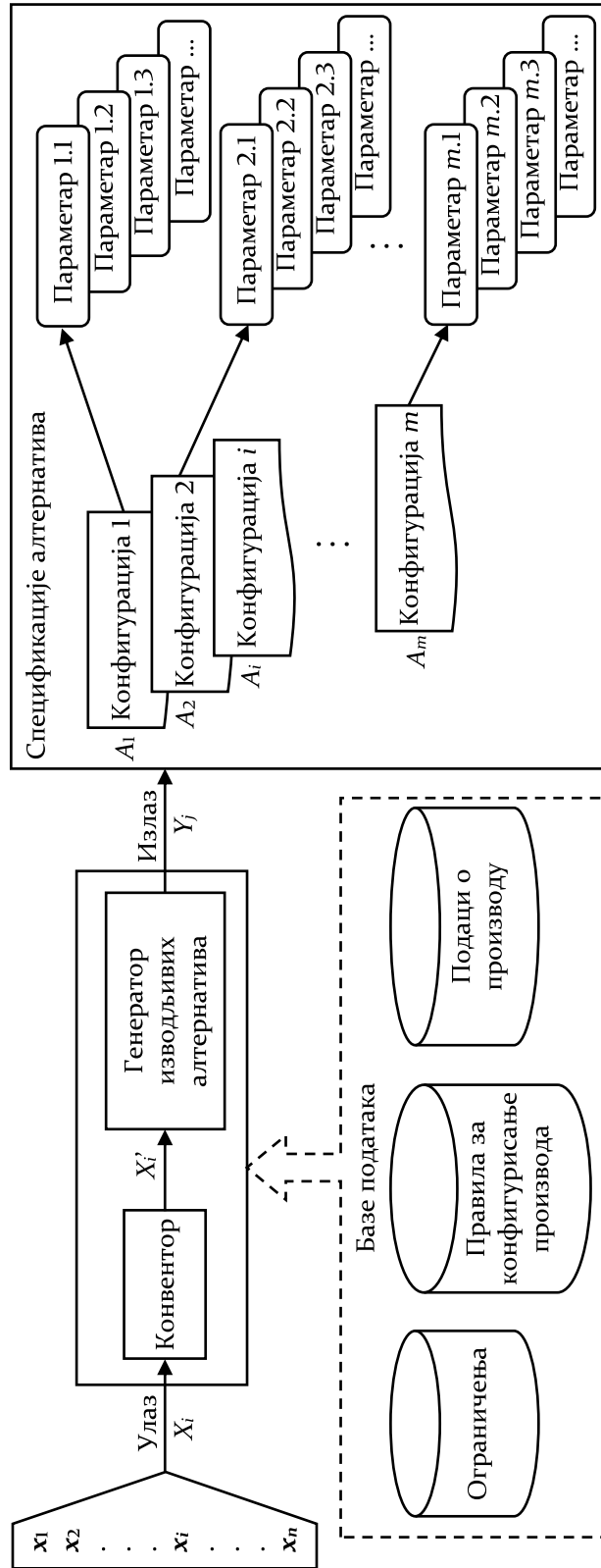
Уколико купац није способан или заинтересован за директан унос података преко *ГКИ* то уместо њега може урадити **продајно особље**. Осим тога, продајно особље купцу званично доставља понуду и потребну документацију и по потреби даје додатна објашњења.

**Конфигурациони инжењер** је инжењер из области конфигурације производа који преко интерфејса анализира и процењује конфигурационе варијанте, анализира оптимално решење и коначне извештаје који се прослеђују купцу и производњи.

### 3.3. Концептуални конфигуратор производа

Задатак концептуалног конфигуратора производа, чија је структура приказана на слици 3.2, је да, на основу захтева купца, аутоматски генерише могуће конфигурационе варијанте производа. Он се састоји од конвертора и генератора изводљивих алтернатива производа. **Конвертор** трансформише податке из поруџбине (захтеве купца) у техничке податке на основу којих је могуће конфигурисати производ. Конфигурациони задатак овог модула је да на бази правила за конфигурисање производа и базе података о производу, његовим модулима и компонентама и уз поштовање дефинисаних ограничења, конфигурише све могуће концептуалне варијанте производа које задовољавају индивидуалне захтеве купца. Овај део се реализује у **генератору изводљивих алтернатива**. Базе података о правилима, модулима и ограничењима се налазе у платформи производа (Модул 9) и приступа им се преко екстерног интерфејса (модул 8).

Израз из овог модула је спецификација параметара којима се дефинише конфигурација производа, модула, компоненти, готових компоненти, материјала и сл.



Слика 3.2 – Структура концептуалног конфигурационог система производа ККП

### 3.4. Модул за оптимизацију

При пројектовању, односно конфигурирању, новог производа оптимизација представља једну од кључних етапа у процесу. Са аспекта производа, оптимизација се може посматрати као унутрашња (микро) и спољашња (макро). Како је напред наглашено, развијени модел се односи на модуларне производе тј. производе који се састављају коришћењем стандардних модула. Модуларни систем производа такође подразумева производњу делова и модула у довољно великим серијама, производњу са прихватљивим бројем технологија, алата и прибора, смањен број информација и сл. [120]. Стога се претпоставља да су конструкције расположивих модула и њихових компоненти већ оптимизовани, да су технолошки процеси израде и монтаже стандардизовани и оптимизовани са аспекта режима обраде, трошкова, времена обраде и сл. тако да се тај део оптимизације у овом раду не разматра.

Задатак модула за оптимизацију је да на макро плану уради аутоматско вишекритеријумско вредновање производа са аспекта трошкова, квалитета и времена израде и решава се методама вишекритеријумског одлучивања.

#### 3.4.1. Вишекритеријумско одлучивање

Вишекритеријумско одлучивање (*ВКО*) припада области теорије одлучивања и развијено је са циљем да пружи подршку доносиоцима одлуке код сложених проблема када је потребно наћи оптимално компромисно решење између више различитих, често супротстављених, критеријума. Америчка „верзија“ ове методе је позната као вишекритеријумско доношење одлука (*MCDM*) док је европска „верзија“ позната као анализа вишекритеријумског одлучивања (*MCDA*).

У литератури се методе *MCDM(A)* најчешће класификују у две основне групе [121–125]:

- Методе вишеатрибутивног одлучивања (*MADM*) које се користе за решење проблема дискретног простора и свде се на избор најприхватљивије алтернативе из коначног броја алтернатива на основу више критеријума (атрибута).
- Методе вишециљног одлучивања (*MODM*) које се користе за решење проблема континуалног простора при чему се на основу више експлицитно дефинисаних функција циља решава проблем са веома великим или бесконачним бројем алтернатива.

С обзиром на природу проблема који се решава, из мноштва расположивих метода у наставку је извршена интеграција *AHP* метода и *SAW* метода из групе метода вишеатрибутивног одлучивања.



### 3.4.2. Интеграција АНР и SAW методе

Како је у процесу вишекритеријумског одлучивања веома битно одређивање значаја (релативне тежине) критеријума, то је за његово одређивање одабрана АНР метода. С друге стране, проблем често садржи велики број могућих алтернатива чије се перформансе могу квантитативно изразити те је било сврсисходно изабрати SAW методу за избор најповољније алтернативе.

Алгоритам за примену интеграције ове две методе (слика 3.3) се састоји из 10 корака који ће бити објашњени у наставку.



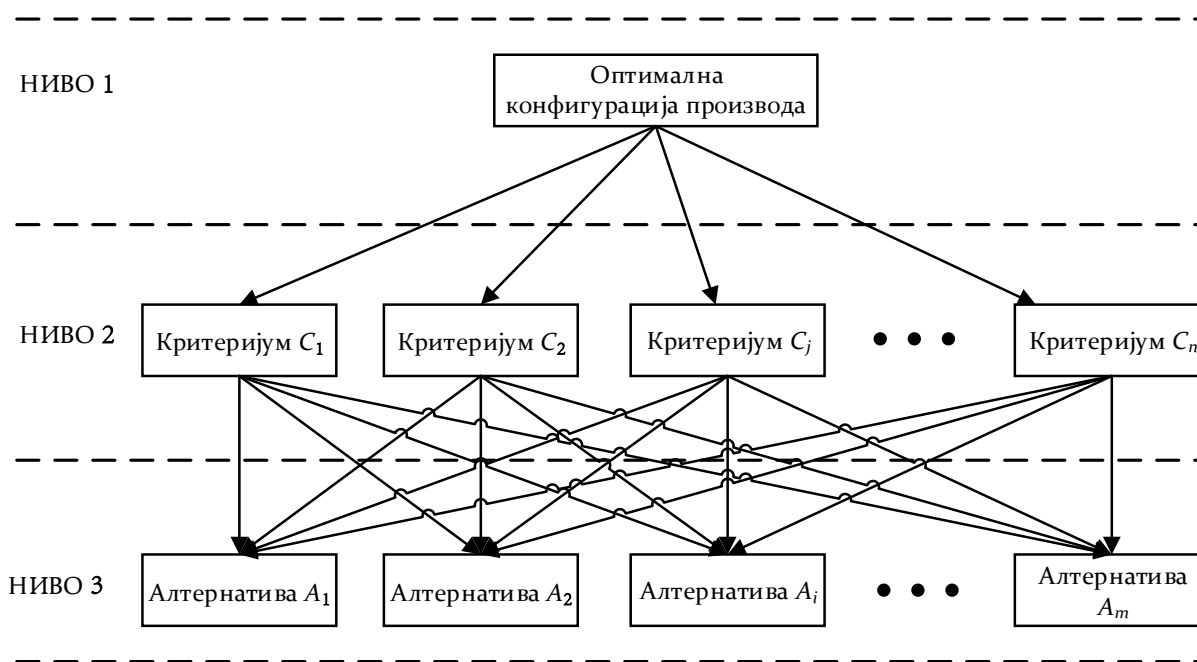
Слика 3.3 – Интеграција АНР и SAW методе – дијаграм тока

#### 3.4.2.1. Корак 1: Дефинисање проблема и циља одлучивања

Први корак се односи на јасно дефинисање проблема који треба решити и одговарајућег циља који треба постићи. У овом случају, основни циљ је да конфигурација производа буде оптимална како са аспекта купца тако и са аспекта произвођача. Проблем се своди на избор најповољније алтернативе из коначног скупа могућих алтернатива, које се генеришу у претходном модулу.

## 3.4.2.2. Корак 2: Структурирање проблема одлучивања и графичко представљање

Структурирање проблема одлучивања се своди на декомпоновање проблема према хијерархији на минимално три нивоа [121,126–131]. На највишем хијерархијском нивоу је циљ одлуке. Средњи ниво хијерархије представљају критеријуми на основу којих се врши рангирање алтернатива. Код сложених проблема критеријуми се могу разложити на више нивоа тј. подкритеријума на следећем нивоу. Најнижи хијерархијски ниво садржи скуп алтернатива које је потребно међусобно поредити (слика 3.4).



Слика 3.4 – Декомпозиција (структурирање) проблема одлучивања

## 3.4.2.3. Корак 3: Конструисање матрице парног поређења критеријума

Да би се утврдили приоритети критеријума тј. значај сваког критеријума у односу на главни циљ, АНР метода користи упоређивање парова [125–131]. За ову намену се формира **матрица поређења** (квадратна матрица  $n \times n$ ) у којој се сваки критеријум у реду пореди са сваким критеријумом у колони на сваком нивоу хијерархијске структуре. За поређење се користи Saaty-јева скала релативне важности (табела 3.1). Нумеричке вредности су у распону од 1-9 и деле се на 5 основних степени интензитета (1, 3, 5, 7 и 9) и 4 међустепена (2, 4, 6 и 8).

Матрица поређења парова критеријума је дата табелом 3.2. Упоређивање критеријума  $i$  са критеријумом  $j$  је у табели означено са  $a_{ij}$ .

Табела 3.1 - Saaty-јева скала значајности (важности) [126,129]

Нумеричка оцена	Дефиниција	Реципрочна вредност
<b>1</b>	<b>Једнака значајност</b>	<b>1</b>
2	Слаба	1/2
<b>3</b>	<b>Умерена значајност</b>	<b>1/3</b>
4	Умерена плус	1/4
<b>5</b>	<b>Јака значајност</b>	<b>1/5</b>
6	Јака плус	1/6
<b>7</b>	<b>Врло јака или доказана значајност</b>	<b>1/7</b>
8	Врло, врло јака	1/8
<b>9</b>	<b>Екстремна значајност</b>	<b>1/9</b>

Табела 3.2 - Табела поређења парова критеријума

		Критеријуми					
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	...	C <sub>j</sub>	...	C <sub>n</sub>
Критеријуми	C <sub>1</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	...	a <sub>1j</sub>	...	a <sub>1n</sub>
	C <sub>2</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	...	a <sub>2j</sub>	...	a <sub>2n</sub>
	...	...	...	...	...	...	...
	C <sub>i</sub>	a <sub>i1</sub>	a <sub>i2</sub>	...	a <sub>ij</sub>	...	a <sub>in</sub>
	...	...	...	...	...	...	...
	C <sub>n</sub>	a <sub>n1</sub>	a <sub>n2</sub>	...	a <sub>nj</sub>	...	a <sub>nn</sub>

Табела поређења парова критеријума се у матричном облику може записати:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Ако се приоритет критеријума  $i$  обележи са  $p_i$  а приоритет критеријума  $j$  са  $p_j$  онда се поређење критеријума  $i$  са критеријумом  $j$  може написати као:

$$a_{ij} = \frac{p_i}{p_j}, \quad (3.2)$$

те се матрица поређења  $A$  може написати у облику:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{p_1}{p_1} & \dots & \frac{p_1}{p_j} & \dots & \frac{p_1}{p_n} \\ \frac{p_1}{p_1} & \dots & \frac{p_1}{p_j} & \dots & \frac{p_1}{p_n} \\ \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_i}{p_1} & \dots & 1 & \dots & \frac{p_i}{p_n} \\ \frac{p_i}{p_1} & \dots & \frac{p_i}{p_j} & \dots & \frac{p_i}{p_n} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \frac{p_n}{p_1} & \dots & \frac{p_n}{p_j} & \dots & \frac{p_n}{p_n} \\ \frac{p_n}{p_1} & \dots & \frac{p_n}{p_j} & \dots & \frac{p_n}{p_n} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Да би матрица  $A$  била конзистентна потребно је да задовољи услове транзитивности (једначина 3.4) и реципроцитета (једначина 3.5):

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}, \quad (3.4)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \quad (3.5)$$

где су  $i, j$  и  $k$  било који критеријуми матрице.

У складу са једначином (3.5) матрица поређења се може написати као:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1j}} & \dots & 1 & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \dots & \frac{1}{a_{in}} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Из матрице  $A$  (једначина 3.6) се види да је укупан број могућих упоређивања  $n \times n = n^2$ . Од овог броја се одузима  $n$  поређења која представљају број поређења критеријума самих са собом. Ове вредности су једнаке 1 и налазе се на главној дијагонали матрице. Како је матрица реципрочна то је довољно урадити само половину поређења тј. довољно је урадити поређења у горњем троуглу матрице а вредности у доњем троуглу матрице се рачунају као реципрочне вредности горњег троугла матрице (једначина 3.5).

Дакле, уколико има  $n$  критеријума, онда је број потребних упоређивања:

$$\frac{n^2 - n}{2}. \quad (3.7)$$

Након процене парова критеријума, вредности поређења се уписују у табелу и додаје ред на дну табеле у ком се сабирају вредности по колонама  $\sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$  (табела 3.3).

Табела 3.3 - Табела поређења парова критеријума

		Критеријуми					
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
Критеријуми	$C_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1j}$	...	$a_{1n}$
	$C_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2j}$	...	$a_{2n}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$C_i$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	...	$a_{ij}$	...	$a_{in}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$C_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	...	$a_{nj}$	...	$a_{nn}$
$\Sigma a_{ij}$		$\Sigma a_{i1}$	$\Sigma a_{i2}$		$\Sigma a_{ij}$		$\Sigma a_{in}$

## 3.4.2.4. Корак 4: Нормализација података матрице поређења

Нормализација података матрице поређења  $A$  се изводи тако што се сваки унос у колони дели са сумом одговарајуће колоне да би се добио нормализовани резултат:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.8)$$

Нормализована матрица поређења парова критеријума се сада може написати у облику:

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \dots & \frac{a_{1j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{i1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \dots & \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} & \dots & \frac{a_{in}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \dots & \frac{a_{nj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^* & \dots & a_{1j}^* & \dots & a_{1n}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^* & \dots & a_{ij}^* & \dots & a_{in}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}^* & \dots & a_{nj}^* & \dots & a_{nn}^* \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Уколико се проблем решава табеларно суме колона приказане у последњем реду табеле треба да су =1 (табела 3.4)

Табела 3.4 - Нормализована табела поређења парова критеријума

		Критеријуми					
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
Критеријуми	$C_1$	$a_{11}^*$	$a_{12}^*$	...	$a_{1j}^*$	...	$a_{1n}^*$
	$C_2$	$a_{21}^*$	$a_{22}^*$	...	$a_{2j}^*$	...	$a_{2n}^*$
	...	...	...	...	...	...	...
	$C_i$	$a_{i1}^*$	$a_{i2}^*$	...	$a_{ij}^*$	...	$a_{in}^*$
	...	...	...	...	...	...	...
	$C_n$	$a_{n1}^*$	$a_{n2}^*$	...	$a_{nj}^*$	...	$a_{nn}^*$
$\sum a_{ij}^*$		<b>1</b>	<b>1</b>	...	<b>1</b>	...	<b>1</b>

## 3.4.2.5. Корак 5: Анализа конзистентности (доследности)

Одређивање значаја критеријума се добија применом израза:

$$w_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^*}{n}; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.10)$$

где су:

- $n$  – број критеријума и
- $a_{ij}^*$  – нормализована вредност матрице поређења парова.

У матричном облику се вектор приоритета ( $W_i$ ) може написати:

$$W = \frac{1}{n} \cdot \begin{bmatrix} a_{11}^* & \dots & a_{1j}^* & \dots & a_{1n}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^* & \dots & a_{ij}^* & \dots & a_{in}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}^* & \dots & a_{nj}^* & \dots & a_{nn}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_i \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Да би се уочиле могуће контрадикторности између поређених парова, потребно је урадити проверу конзистентности. *AHP* метода дозвољава неконзистентност од 10% у односу на неконзистентност 500 случајно попуњених матрица [126,129].

Прво се рачуна пондерисани вектор суме тежина ( $WSV$ ) као производ матрице  $A$  и вектора приоритета ( $W_i$ ):

$$WSV = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_i \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sv_1 \\ \dots \\ Sv_i \\ \dots \\ Sv_n \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Затим се рачуна вектор конзистенције ( $CV$ ) који се добија дељењем чланова вектора  $WSV$  са члановима вектора приоритета  $W$ :

$$CV_i = \frac{Sv_i}{W_i}; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.13)$$

односно:

$$CV = \begin{bmatrix} \frac{Sv_1}{W_1} \\ \dots \\ \frac{Sv_i}{W_i} \\ \dots \\ \frac{Sv_n}{W_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CV_1 \\ \dots \\ CV_i \\ \dots \\ CV_n \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

У следећем кораку се рачуна највећа карактеристична вредност матрице  $\lambda_{\max}$  као средња вредност вектора конзистенције:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n CV_i}{n} ; j=1,2,\dots,n, \quad (3.15)$$

где је  $n$  – број критеријума односно, величина матрице.

Индекс конзистенције ( $CI$ ) се рачуна помоћу израза:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (3.16)$$

Последњи корак је прорачун коефицијента конзистенције ( $CR$ ). Рачуна се као количник индекса конзистенције и индекса случајне конзистенције ( $RI$ ):

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (3.17)$$

Индекс случајне конзистенције ( $RI$ ) представља просечан индекс конзистенције 500 случајно попуњених матрица. Вредности за  $RI$  су дате у табели 3.5 у зависности од броја критеријума  $n$  и примењује се само за  $n \geq 3$ .

Табела 3.5 - Индекс случајности [126,129]

Бр. елемената $n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

#### 3.4.2.6. Корак 6: Усвајање нивоа значаја сваког критеријума

Ако је испоштован услов да је неконзистентност мања од 10% ( $CR \leq 0,10$ ) процене релативних важности критеријума се сматрају прихватљивим те се могу усвојити вредности добијене помоћу једначине 3.11. Уколико није испуњен услов конзистентности потребно је урадити поново преиспитивање (ревизију) поређења парова критеријума.

За избор најповољније алтернативе је одабран **метод једносавних агиивних ѡежина** ( $SAW$ ).  $SAW$  метод је вероватно најпознатија, најпопуларнија и најчешће коришћена метода вишеатрибутивног одлучивања [121,123,130,131]. Овај метод додељује тежинске коефицијенте сваком од критеријума. Да би се избегло субјективно додељивање тежинских фактора од стране доносиоца одлуке коришћен је  $AHP$  метод описан у претходним корацима.

#### 3.4.2.7. Корак 7: Конструисање матрице одлучивања

Проблем вишеатрибутивног одлучивања се може изразити сажето у матричном облику:

$$\begin{aligned}
 A &= \{A_i | i=1,2,3,\dots,m\}, \\
 C &= \{C_j | j=1,2,3,\dots,n\}, \\
 W &= \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_n\}, \\
 X &= \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \tag{3.18}
 \end{aligned}$$

где су:  $A_1, A_2, \dots, A_m$  изводљиве алтернативе,  $C_1, C_2, \dots, C_n$  критеријуми,  $x_{ij}$  вредност  $i$ -те алтернативе у односу на  $j$ -ти критеријум а  $W_j$  тежински коефицијент (значај)  $j$ -тог критеријума.

Матрица  $X$  је  $(m \times n)$  матрица и зове се *матрица одлучивања*.

Проблем вишеатрибутивног одлучивања се може представити и табеларно (табела 3.6).

Табела 3.6 - Матрица одлучивања [123]

		Критеријуми					
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
		max/min	max/min		max/min		max/min
		$W_1$	$W_2$	...	$W_j$	...	$W_n$
Алтернативе	$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$
	$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$
	...			...		...	
	$A_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{in}$
	...			...		...	
	$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

Критеријуми ( $C_j$ ) могу бити максимизационог (**max**) или минимизационог (**min**) типа.

#### 3.4.2.8. Корак 8: Нормализовање матрице одлучивања

Да би се рангирале алтернативе,  $SAW$  метод захтева нормализацију података у матрици одлучивања. За нормализацију се користи *линеарна скала* трансформације [121,123,132,133].

Код критеријума типа *max* елемент линеаризоване матрице се добија тако што се актуелна вредност  $i$ -те алтернативе у односу на  $j$ -ти критеријум ( $x_{ij}$ ) подели са максималном вредношћу свих алтернатива у односу на критеријум  $C_j$ :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})}. \tag{3.19}$$



За критеријум типа *min* елемент линеаризоване матрице се добија тако што се минимална вредност свих алтернатива у односу на критеријум  $C_j$  подели са актуелном вредношћу  $x_{ij}$ :

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}}. \quad (3.20)$$

Овим поступком се добијају вредности  $r_{ij}$  које се крећу у интервалу (0,1) и резултат је повољнији уколико је вредност  $r_{ij}$  ближе јединици. Нормализована матрица одлучивања је означена са  $X^*$ .

$$X^* = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ r_{i1} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ r_{m1} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

У табеларном облику нормализована матрица одлучивања је приказана у табели 3.7.

Табела 3.7 - Нормализована матрица одлучивања

		Критеријуми					
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
		max/min	max/min		max/min		max/min
		$W_1$	$W_2$	...	$W_j$	...	$W_n$
Алтернативе	$A_1$	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1j}$	...	$r_{1n}$
	$A_2$	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2j}$	...	$r_{2n}$
	...			...		...	
	$A_i$	$r_{i1}$	$r_{i2}$	...	$r_{ij}$	...	$r_{in}$
	...			...		...	
	$A_m$	$r_{m1}$	$r_{m2}$	...	$r_{mj}$	...	$r_{mn}$

#### 3.4.2.9. Корак 9: Прорачун резултата за сваку алтернативу

Резултати (*score*) за сваку алтернативу се рачунају као сума производа: елемента реда нормализоване матрице са релативном тежином одговарајућег елемента колоне матрице тј. на основу израза:

$$S_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot W_j \quad ; \quad i=1,2,\dots,m. \quad (3.22)$$

#### 3.4.2.10. Корак 10: Избор најбоље алтернативе

За најбољу алтернативу се бира алтернатива која има најбољи резултат [I21,I23,I30,I33]:

$$BA_{SAW} = \max S_i = \max_i \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot W_j, \quad (3.23)$$

односно:

$$BA_{SAW} = \left\{ A_i \left| \max_i \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot W_j \right. \right\}, \quad (3.24)$$

где је  $BA_{SAW}$  – најбоља алтернатива у  $SAW$  методу.

Финални изглед табеле одлучивања са збирним оценама алтернатива је приказан у табели 3.8.

Табела 3.8 - Финални изглед матрице

		Критеријуми						Резултат	Ранг
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$		
		max/min	max/min		max/min		max/min		
		$W_1$	$W_2$	...	$W_j$	...	$W_n$		
Алтернативе	$A_1$	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1j}$	...	$r_{1n}$	$S_1$	
	$A_2$	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2j}$	...	$r_{2n}$	$S_2$	
	...	...	...	...	...	...	...	...	
	$A_i$	$r_{i1}$	$r_{i2}$	...	$r_{ij}$	...	$r_{in}$	$S_i$	
	...	...	...	...	...	...	...	...	
	$A_m$	$r_{m1}$	$r_{m2}$	...	$r_{mj}$	...	$r_{mn}$	$S_m$	

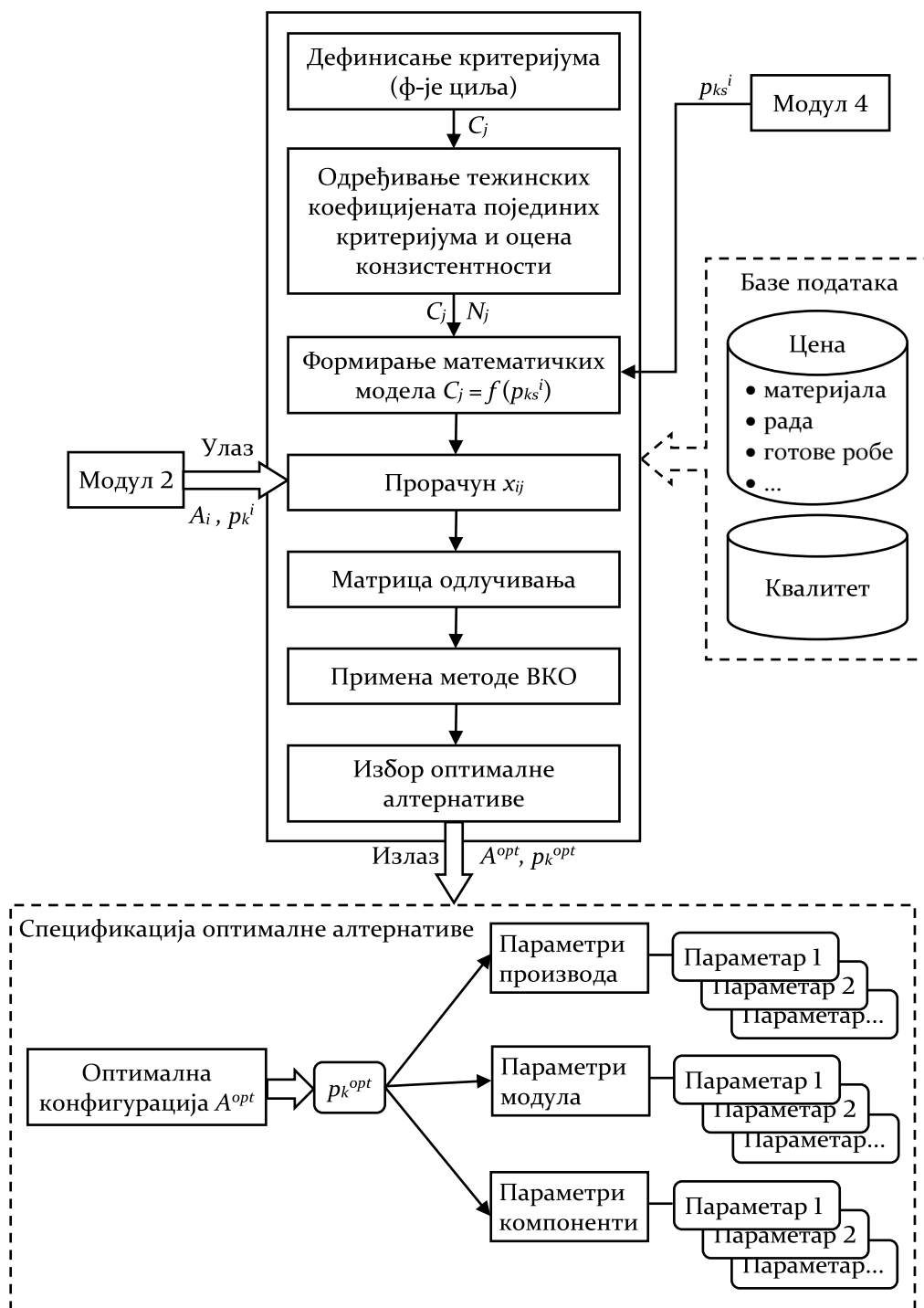
### 3.4.3. Структура модула за оптимизацију

Улазни подаци за овај модул су алтернативе које су генерисане у модулу 2 са припадајућим параметрима који дефинишу производ, његове модуле и компоненте. Модул већ садржи дефинисане критеријуме тј. функције циља. Помоћу *ANP* метода се одређују тежински коефицијенти критеријума и проверава оцена њихове конзистентности.

На основу података из модула 4 (*ПТП* конфигурактор) као што су времена израде и монтаже за све потребне операције, података о ценама материјала, рада и готове робе из базе података о ценама и података о квалитету производа тј. зависностима параметара квалитета производа од производних параметара формирају се математички модели критеријумских функција.

Вредности критеријумских функција односно вредности  $x_{ij}$  (вредности  $i$ -те алтернативе за  $j$ -ти критеријум) у матрици одлучивања се рачунају на основу ових модела за сваку алтернативу. Након нормализације података се рачуна збирна оцена за алтернативе у матрици приоритета и бира оптимална алтернатива тј. конфигурација производа.

Изаз из овог модула је податак о изабраној конфигурацији производа и спецификација припадајућих параметара (слика 3.5).



Слика 3.5 – Структура модула за оптимизацију

Избором оптималне конфигурације производа излазне спецификације из овог модула се прослеђују модулу 6 (CAD конфигуратор производа) ради детаљног пројектовања оптималне конфигурације производа.

Треба истаћи да је **модул за оптимизацију кључна карика развијеног модела ИАКС**. Код сложених производа, где је могуће генерисати мноштво различитих конфигурација, добијају се и веома комплексни математички модели функција циља па логички није могуће одабрати најповољнију конфигурацију. Главна предност развијеног модела је што

на мултидисциплинарној основи из скупа могућих конфигурација аутоматски врши избор оптималне конфигурације.

### 3.5. ПТП конфигуратор

Пројектовање технолошких процеса (ПТП) обухвата активности у којима пројектант доноси одлуку о начину економичне и конкурентне трансформације полазног материјала или припремка у готов део или групу делова, склопова и комплетног производа, уз потребну промену облика, димензија, естетског изгледа, унутрашњих својстава материјала обратка и контролу обраде [2,25].

Неки од основних улазних података код ПТП-а су [25]: информације о производу, расположиви производни ресурси, обим производње као и други техно-економски захтеви. **Информације о производу**, претежно се изражавају у виду 2D цртежа и/или 3D модела производа, обезбеђују информације о геометрији, топологији, димензијама, толеранцијама, материјалима, квалитету обрађених површина и друге информације потребне за израду, монтажу и контролу производа. **Расположиви производни ресурси** обухватају основне информације о припремцима, обрадним системима, алатима, приборима, мерилима, итд. који су расположиви у посматраном производном систему.

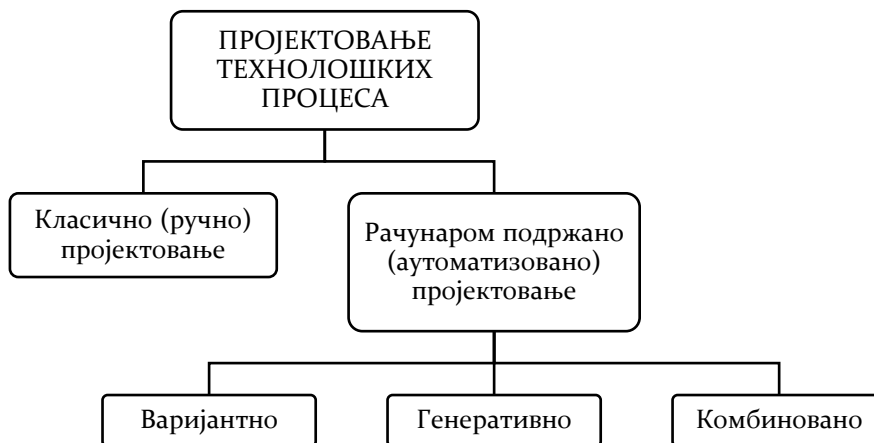
Као резултат процеса ПТП-а добија се технолошка документација и информације, неопходне за планирање, управљање и реализацију процеса производње, међу којима могу бити [25]: спецификације припремака, садржај технолошких процеса, карте операција, карте тока процеса, прорачунати трошкови и времена производње, спецификације производних ресурса и остало.

У општем случају постоји мноштво задатака који се решавају у оквиру ПТП-а, као што су [2,25]:

- анализа конструкционе документације производа,
- анализа технологичности производа/дела,
- одређивање врсте и облика припремака,
- препознавање и издвајање типских технолошких облика,
- дефинисање захвата и њихово груписање у операције обраде,
- дефинисање операција израде и редоследа њиховог извођења,
- избор потребних машина, алата и прибора,
- одређивање података за обраду и одговарајућих толеранција захвата,
- дефинисање и избор параметара обраде за сваки захват,
- дефинисање норматива материјала и времена,
- одређивање времена и трошкова обраде,
- избор технолошких база и одговарајућих прибора,
- избор метода мерења и одговарајућих мерила,
- техноекономска оптимизација појединих активности, и
- многи други задаци.

У зависности од облика производње, методе за пројектовање технолошких процеса могу бити (слика 3.6) [24,25]:

- Класично (ручно) пројектовање и
- Рачунаром подржано (аутоматизовано) пројектовање.



Слика 3.6 – Методе пројектовања технолошких процеса (прилагођено од [24,25])

Код **класичног пројектовања** пројектант на основу свог искуства и рационалном анализом улазних података, узимајући у обзир расположивост и стање производних ресурса, доноси одлуке о свим параметрима технолошког процеса. Квалитет решења добијеног оваквом методом ПТП-а у највећој мери зависи од искуства и интуиције пројектанта што неминовно доводи до непотребне разноликости технолошких процеса, великих времена и трошкова при пројектовању, спорог ажурирања информација о ресурсима, недостатка информационе везе између одељења пројектовања и одељења припреме производње и немогућности оптимизације.

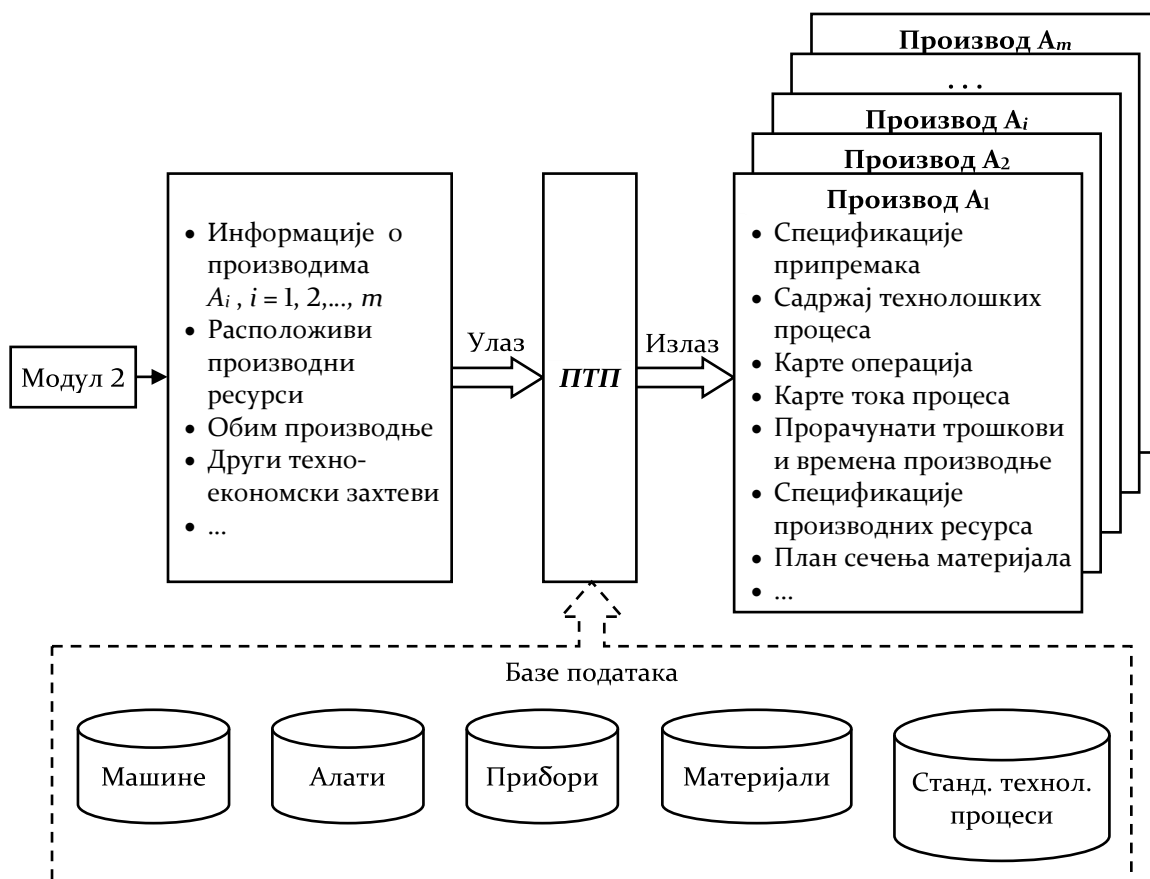
**Рачунаром подржано пројектовање** технолошких процеса ослобађа пројектанта од рутинских и временски захтевних операција што му омогућава знатно већу посвећеност при доношењу најважнијих одлука приликом пројектовања технолошког процеса, као што су дефинисање операција, захвата и редоследа обраде, избор машина, алата, прибора и параметара обраде. Тиме се значајно доприноси смањењу времена и трошкова пројектовања, уједначењу нивоа квалитета, продуктивнијим и економичнијим технолошким поступцима и повећању производности.

Развојем рачунаром подржаног пројектовања технолошких процеса и применом напредних информационих технологија, данас су развијене три основне врсте рачунаром подржаног ПТП: варијантно, генеративно и комбиновано [2].

Основни циљ примене рачунара у интегрисаном пројектовању производа и процеса јесте интеграција CAD, CAE, CAM и CAPP система, чиме се омогућује интегрисано пројектовање производа и технологија.

Код аутоматизованих система излаз из фазе *ПТП* су генерисане управљачке информације/програми за обрадне, монтажне, мерне, транспортне, складишне и друге технолошке системе [25].

Структура *ПТП* конфигураатора је приказана на слици 3.7. Треба напоменути да, поред осталих улазних података, у *ПТП* конфигураатор улазе информације које садрже податке о свим изводљивим алтернативама (конфигурацијама) производа генерисаним у модулу 2. Пројектовање *ПТП* се изводи за свих  $m$  алтернатива производа а излазни подаци се користе у Модулу за оптимизацију за прорачун вредности функција циља за све генерисане алтернативе.



Слика 3.7 – Структура *ПТП* конфигураатора (прилагођено од [25])

Након избора оптималне конфигурације производа излазне спецификације из *ПТП* конфигураатора за одабрану конфигурацију се прослеђују модулу 5 на основу којих се спроводи планирање, управљање и реализација производње.

### 3.6. ОПП конфигураатор

Производни системи су свакако најкомплекснији део пословног система. Најзахтевнији инжењерски ресурси у оквиру производних система се ангажују на пројектовању производа, пројектовању технолошких процеса и планирању и управљању производњом. У класичним производним системима ова целина се зове *техничка њрипрема њроизводње* и најчешће обухвата [134,135]:

- Конструкцијско-пројектантску припрему производње,
- Технолошку припрему производње,
- Оперативну припрему производње и
- Радионичку припрему производње.

**Конструкцијско-пројектантска припрема** производње се у савременим производним системима односи на пројектовање производа и у овом моделу је обухваћена модулима 2 и 6. **Технолошка припрема** се односи на концептуално и детаљно пројектовање технолошких процеса, симулацију технолошких и производних процеса и генерисање управљачких информација/програма за технолошке системе и обухваћена је модулом 4. **Радионичка припрема** производње има задатак да распоређује послове по радним местима, да их снабдева материјалом, алатом и документацијом, да прати извршење оперативног плана и да прима завршене послове. Директно је везана за производњу и није интересантна за проблем који се решава у овој дисертацији.

**Оперативна припрема производње** се односи на оперативно планирање и снабдевање производње и обухвата следеће активности [135]:

1. Планирање ресурса:

- Планирање производних капацитета.
- Планирање сировина, полупроизвода, помоћног материјала, алата, прибора.
- Планирање потребних људских ресурса.

2. Fino планирање (терминирање) производње:

- Израда месечних и декадних планова производње.
- Fino планирање операција по радним местима.
- Контрола извршења послова.

3. Лансирање производње:

- Припрема потребне документације (радионички цртежи, операциона листа, радни налог, радна листа, требовање материјала итд.).
- Дистрибуција (лансирање) пратеће документације по радним местима.
- Прикупљање и унос повратних информација са радних места.

4. Расподела посла:

- Спровођење основних планова производње.
- Анализа и провера капацитета.
- Дистрибуција радних налога и радних листа.
- Контрола спровођења плана.
- Обрада и анализа повратних информација.

Структура **конфигурајора за оперативно планирање производње** (ОПП конфигурактор) је приказана на слици 3.8.

Улазни подаци у модул су: 3D модели и 2D цртежи производа, модула и компоненти производа, саставница производа, карте операција, карте тока процеса, управљачки програми за CNC машине, нормативи времена израде и монтаже, спецификација производних ресурса, план сечења материјала, план контроле и др. Ове информације се добијају из модула 4 и 6 након избора оптималне конфигурације производа.



Слика 3.8 – Структура ОПП конфигуратора

Да би се генерисао оперативни план производње неопходни су подаци из база података о расположивим производним ресурсима (машине, алати, прибори, радна снага, мерни алати и прибори, расположиве залихе материјала, готове робе и др.) које су саставни део платформе производа (модул 9) али и уговорени рок испоруке производа, подаци о времену потребном за набавку материјала и готове робе којих нема на залихама и сл.



На основу ових информација се спроводи оперативно планирање производње. Излаз из модула су: оперативни план производње, план ресурса, план контроле, план набавке материјала и готове робе и свакако документација која је неопходна за снабдевање радних места у производњи а која је прослеђена овом модулу из модула 4 и 6.

### 3.7. CAD конфигуратор производа

CAD конфигуратор производа има задатак да помоћу рачунарски потпомогнутих програмских система аутоматски трансформише спецификацију одабране оптималне конфигурације производа у детаљне 3D моделе, цртеже и саставнице. На овај начин се аутоматски добија исправна комплетна техничка документација са виртуелним прототипом производа што значајно помаже произвођачу, али и купцу при разумевању прилагођеног производа.

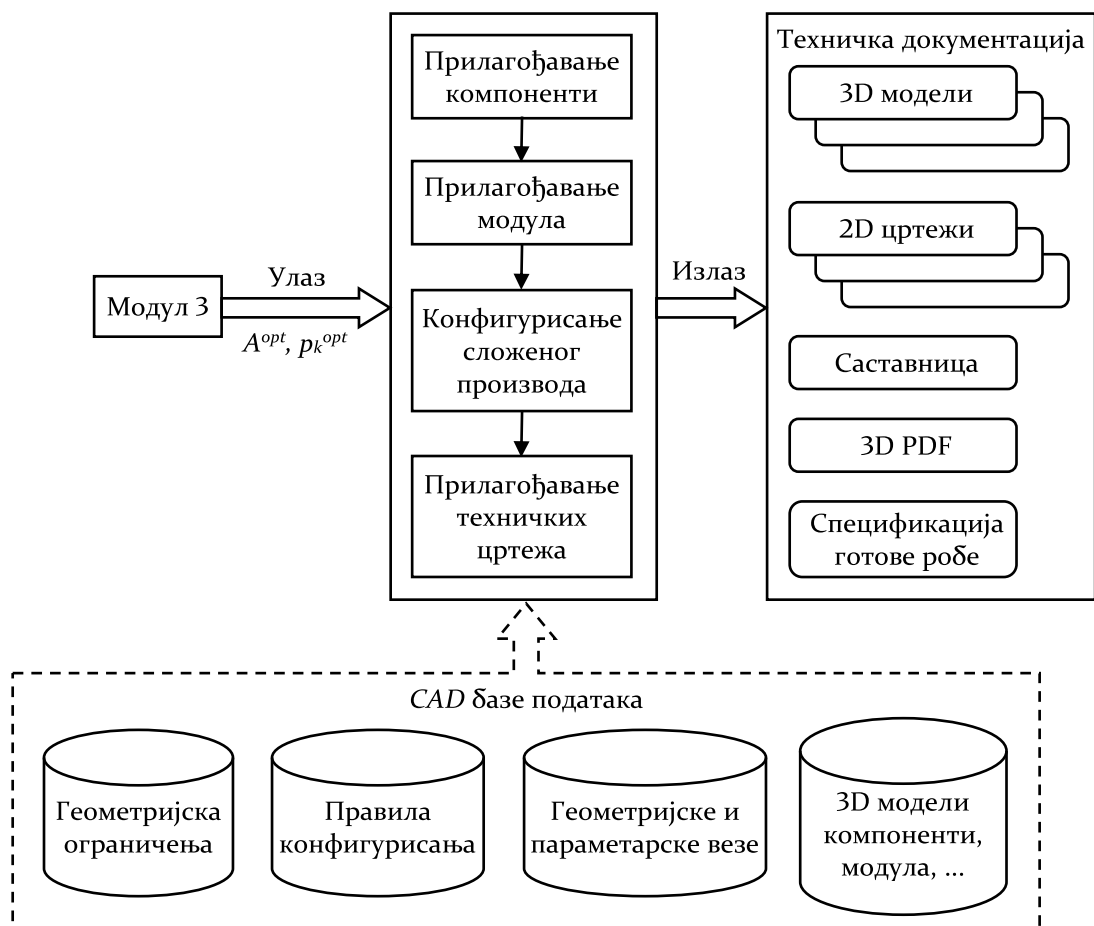
Савремени CAD системи, при пројектовању компоненти и склопова, ослањају се на параметарско пројектовање, што омогућује олакшано управљање геометријом модела производа. Осим тога поседују и додатке који омогућују имплементацију инжењерског знања у виду правила пројектовања, што доводи до могућности пројектовања аутоматских конфигуратора.

Структура CAD конфигуратора је приказана на слици 3.9. Овај модул као улаз користи параметре оптималне конфигурације добијене од модула 3 и на основу ограничења, правила, веза и 3D модела детаљно пројектује (конфигурише) производ са захтеваним карактеристикама.

Комплетан процес конфигурисања одвија се комбинујући и прилагођавајући унапред дефинисане 3D моделе компоненти, модула и целог производа. Сви унапред дефинисани параметри, ограничења, везе, правила и 3D модели потребни за конфигурисање модуларног производа смештени су у CAD базе података.

Излаз из овог модула, су детаљни 3D модели и техничка документација производа, свих припадајућих модула и компоненти, као и спецификација материјала и спецификација готове робе. Ови излазни подаци су уједно и улазни подаци за модуле 5 и 7.

Виртуелни модел производа који се формира у CAD конфигуратору омогућује кориснику да унапред види тродимензионални модел производа што је веома драгоцено код изузетно сложених производа где је израда физичког модела изузетно скупа као што је то случај у аутомобилској и ваздухопловној индустрији.



Слика 3.9 – Структура CAD конфигуратора

Детаљан опис пројектовања и рада CAD конфигуратора дат је у поглављу 7.

### 3.8. Продајни конфигуратор

Задатак **продајног конфигуратора** је да на основу информација које добије из модула 4, 5 и 6 и информација о ценама припреми понуду за купца. Улазни подаци у Продајни конфигуратор су:

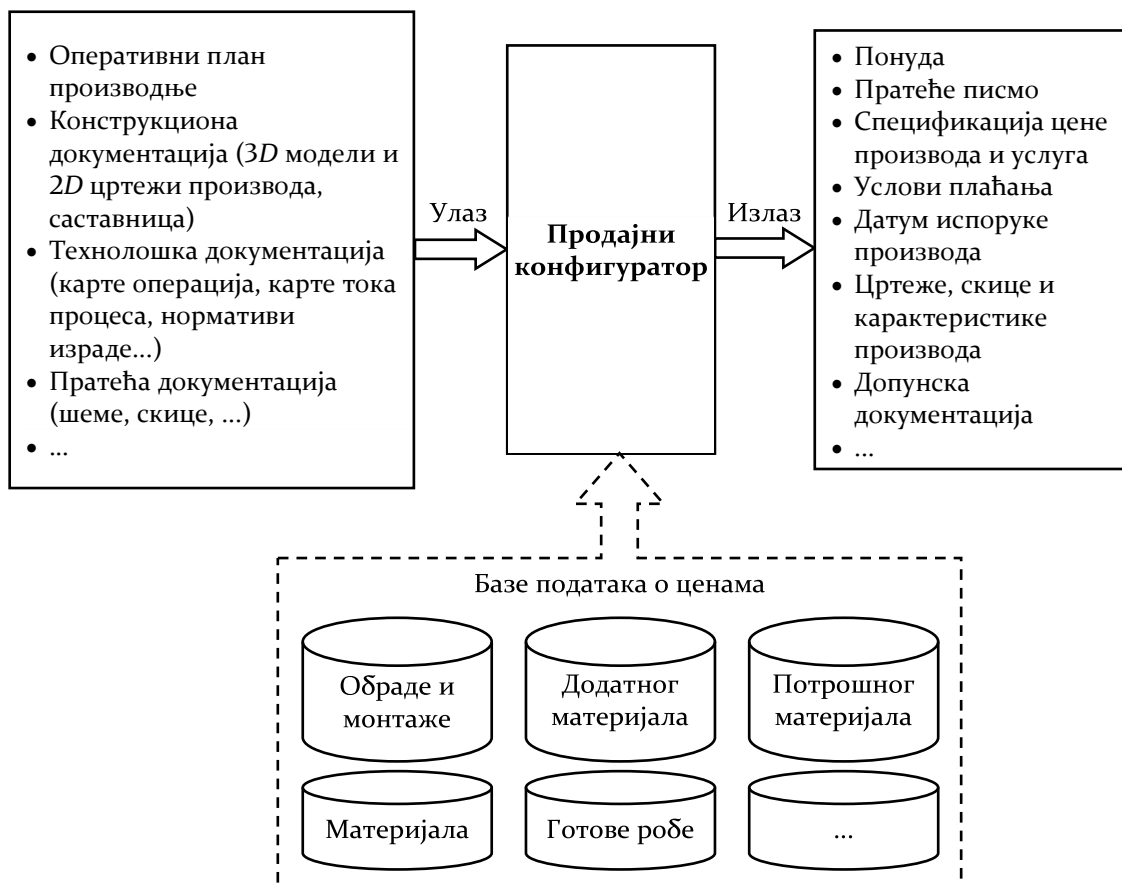
- оперативни план производње,
- конструкциона документација,
- технолошка документација и
- пратећа документација о производу.

На основу података о ценама: материјала, обраде и монтаже, готове робе, потрошног и додатног материјала, у продајном конфигуратору се генерише следећа документација за купца:

- понуда,
- пратеће писмо,
- спецификација цене производа и услуга,
- услови плаћања,

- датум испоруке производа,
- цртежи, скице и карактеристике производа и
- допунска документација.

Структурна шема продајног конфигураатора је приказана на слици 3.10.



Слика 3.10 – Структурна шема Продајног конфигураатора

Понуда се са осталом документацијом прослеђује графичком корисничком интерфејсу преко којег купац може видети виртуелни изглед производа и податке о цени, року, условима испоруке и др. како би могао да потврди да ли жели да купи предложени производ.

### 3.9. Екстерни интерфејс

*Екстерни интерфејс* омогућује аутоматизовану размену информација свих модула са *платформом производа* и производним системом али и са другим целинама пословног система (набавка, продаја, финансије и др.).

### 3.10. Платформа производа

Као што је већ напоменуто у поглављу 2, основни предуслов за развој фамилије конфигурабилних производа је да имају заједничку платформу производа. У овом раду *платформа производа* се посматра у најширем смислу и обухвата:

*скућ модула, њодмодула и комјоненћи њроизвода, инћерфејсе за њихово њовезивање, скућ захћева и оћраничења, њравила за конфигурисање, ћехнолоћје, њроцесе, људске и ћехничке ресурсе, базе њодаћака, базе знања и др. на основу којих се брзо и ефикасно развијају варијанће њроизвода које задовољавају њоћреде њоћрошача.*

Сви модули предложеног модела се преко екстерног интерфејса повезују са платформом производа и из ње узимају знање и податке који су неопходни за конфигурисање оптималне варијанте производа који задовољава индивидуалне захтеве купца.

ПОГЛАВЉЕ

# 4

---

## **МОДУЛАРНЕ ТРЕЗОРСКЕ ПРОСТОРИЈЕ „МОДУЛПРИМ“**

За практичну верификацију и валидацију предложеног модела одабрана је **модуларна њрезорска њросѝорија** (МТП) МОДУЛПРИМ 5 из производног програма компаније „Примат“ а.д. Марибор која се производи у привредном друштву „Примат опрема“ д.о.о. Баљевац на Ибру.

Производ је сложен и техничко технолошки веома захтеван. Пројектује се по индивидуалном захтеву купца који бира степен отпорности просторије по стандарду EN П43-1 и дефинише расположиве димензије простора у који је потребно сместити овакав производ. Архитектура производа је модуларног типа и конфигурисање се остварује комбинацијом стандардних модула чији се број и димензије морају прилагодити у сваком новом пројекту.

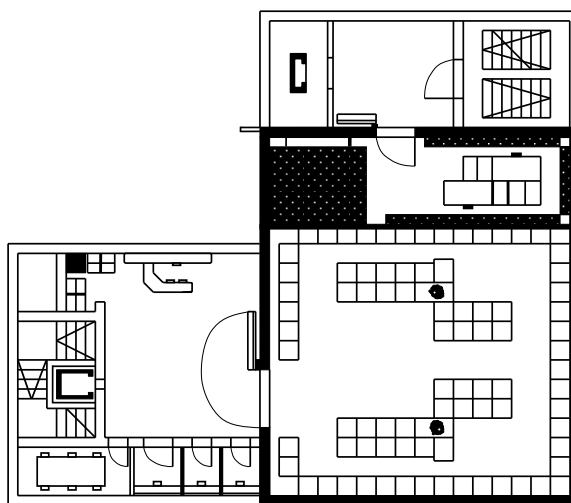
У протеклој декади је развијена платформа за конфигурисање постојећих варијанти МТП типа МОДУЛПРИМ [136]. У овој дисертацији је приказан новоразвијени модел ИАКС за конфигурисање МТП типа МОДУЛПРИМ, са унапређеном платформом заснованом на интеграцији пројектовања производа и процеса, који у себи има уграђен модел избора оптималне конфигурације помоћу вишекритеријумског одлучивања.

## 4.1. Модуларне трезорске просторије

### 4.1.1. Трезорске просторије

**Трезорска њросѝорија** је просторија са посебним сигурносним карактеристикама и намењена је за чување новца, драгоцености, вредносних папира, поверљивих докумената и сл. Корисници трезорских просторија су: банкарске институције, поште, Владе и државне службе, војне и полицијске организације, фармацеутске компаније, индустријска предузећа и др.

Основна функција трезорских просторија је да испуњавају сигурносне карактеристике тј. да су отпорне према нападима са провалним алатима (**ѝроѝивѝровална сиѝурносѝ**). Ништа мање није значајна ни противпожарна сигурност, сигурност од различитих зрачења као и сигурност од поплава односно продора воде.



Слика 4.1 - Хипотетички приказ трезорске просторије и околине у банкарској установи [137]

Трезорска просторија обично има четири зида, под и плафон. Као и свака друга просторија има врата, обично једна, а у изузетним случајевима двоја или више. Осим отвора за врата, у зиду (поду и плафону) има и других отвора: за природно или вештачко проветравање, за електричне проводнике, за телекомуникацијско и рачунарско повезивање, за проводнике противпровалних уређаја и за аутоматизован унос и/или износ ствари [137].

Данас су уобичајене следеће изведбе трезорских просторија [137,138]:

- трезорске просторије у масивној градњи,
- трезорске просторије у модуларној градњи и
- трезорске просторије у комбинованој градњи.

#### 4.1.2. Модуларне трезорске просторије

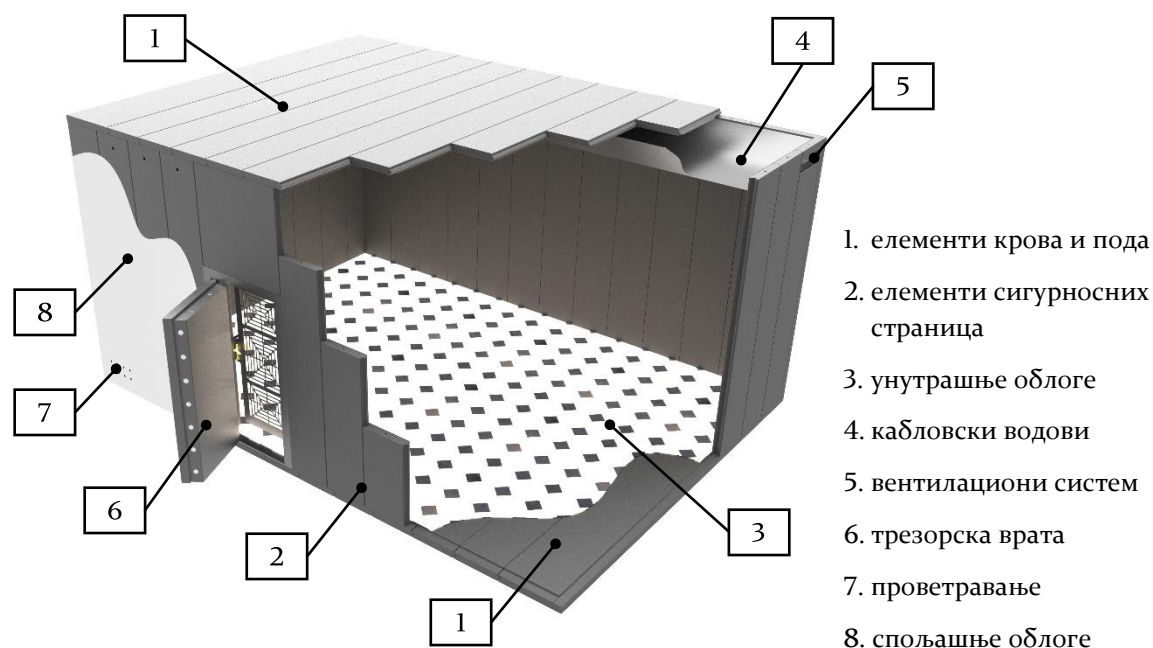
С обзиром да је класичан начин градње трезорских просторија скуп и дуго траје, систем градње трезорских просторија који је заснован на модуларној структури, на основу индивидуалних захтева купца, све више добија на значају. **Модуларне њрезорске њпросторије** имају низ предности у односу на систем масивне градње трезорских просторија [137]:

- Танки зидови осигуравају велику корисну запремину и мању тежину комплетне конструкције.
- Могућност постављања трезорских просторија у вишим етажама новоградње или преуређивање већ постојећих просторија у трезорску просторију.
- Модули трезорске просторије се при монтажи међусобно спајају заваривањем, што даје објекту компактност.
- Кратко време изградње трезорске просторије.

Модуларна градња трезорских просторија је систем градње од индустријски произведених модула који се састављају на месту коришћења. Појединачни модули (зидни, подни и плафонски) се у целости израђују код произвођача сигурносних уређаја, транспортују се на место употребе где се од њих саставља трезорска просторија. Завршни део трезорске просторије у модуларној градњи чине врата трезорске просторије уграђена у оквир врата. Врата са оквиром се такође израђују код произвођача сигурносних уређаја и обично су иста као при масивној градњи. Изглед и основни елементи модуларне трезорске просторије су приказани на слици 4.2. [139].

**Елементи њода и њлафона.** Под и плафон се обично раде од сигурносних модула али нису обавезни елементи модуларне трезорске просторије. Максималне дужине зависе од оптерећења и технолошких могућности израде. За веће распоне је неопходна израда носеће подконструкције.

**Компоненти (елементи) сигурносних страница (зидова).** Израђују се у виду модула са кућиштем од металних плоча и пуњени су специјалним материјалима у зависности од захтеваног степена отпорности.



Слика 4.2 - Модуларна трезорска просторија [136,139,140]

**Унутрашње облоге.** Модули трезорске просторије су обојени примарном бојом ради заштите металних лимова од корозије. Подне облоге се могу накнадно додати лепљењем на подне модуле. Зидне облоге (гипсане плоче, дрвене или металне ламеле) и кровне облоге или спуштени плафон се причвршћују на наменски припремљене профиле.

**Кабловски водови.** Остављају се у зидним панелима ради једноставне монтаже каблова (проводника) за осветљење, снабдевање електричном енергијом, телекомуникацијско и рачунарско повезивање.

**Вентилациони систем.** У зидним модулима се остављају отвори за уградњу сертифицираних система за вентилацију или за повезивање са спољашњим вентилационим системом.

**Трезорска врата.** Раде се независно од трезорске просторије у захтеваном степену отпорности, са различитим типовима брава. По захтеву купца на њих се могу монтирати дневна решеткаста врата.

**Проветравање.** У зависности од унутрашње запремине трезорске просторије у зидне модуле се могу уградити одговарајући отвори за проветравање.

**Спољашње облоге.** Спољашње облоге се по потреби могу накнадно додати на постојеће зидове у зависности од захтева купца.

**Противпровални алармни системи.** Избор противпровалног алармног система којим ће бити опремљена трезорска просторија врши купац.

**Унутрашња опрема.** Унутрашња опрема се прилагођава потребама и захтевима купца. Обухвата: механичке или електронске кутије за изнајмљивање, ормаре или регалске системе, дискретне кабине за странке и др.



Трезорске просторије у модуларној градњи најчешће имају правоугаони облик јер су најједноставније за израду. Међутим, правоугаони облици нису и једини [137,140]. Често се реализују облици састављени од више правоугаоника док просторије са закошеним или заобљеним странама нису пожељне.

#### 4.1.3. Степен отпорности трезорске просторије

Основна функција коју треба да испуне странице трезорске просторије (зид, под и плафон) и трезорска врата је противпровална отпорност тј. да су отпорни према нападима са провалним алатима. Није нужно, да су зидови посебно дебели или врата посебно масивна већ је потребно обезбедити разноврсне материјале који различитим провалним алатима пружају што већи отпор.

Европски стандард EN 1143 – 1 [141] предвиђа распон степена отпорности трезорских просторија од 0 до XIII мерено јединицама отпорности (*RU*). Опција *CD* – напад алатима са плочицама од тврдог метала није предвиђена за степене отпорности од 0 до V ни код трезорских просторија ни код трезорских врата док опција *EX* – напад са експлозивом није предвиђена у сигурносном степену 0 и I. Према овом стандарду, није предвиђена израда врата трезорске просторије у сигурносном степену XIII (табела 4.1.).

Табела 4.1 – Класификација трезорских просторија и трезорских врата према EN 1143 – 1 [141]

Степен сигурности за трезорске просторе	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Степен сигурности за трезорска врата	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	x
Опција EX	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Опција CD	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Јединица отпорности (RU)	30	50	80	120	180	270	400	600	825	1050	1350	2000	3000	4500

#### 4.1.4. Фамилија МТП типа МОДУЛПРИМ

„Примат“ а.д. Марибор производи МТП типа МОДУЛПРИМ. Просторије су тестиране у акредитованој лабораторији *Verband der Schadenversicherer Köln* (Немачка) и поседују потребне сертификате. Трезорска просторија МОДУЛПРИМ поседује знак квалитета – таблицу *VdS*, која потврђује, да је производ квалитетан, тестиран и да је производња контролисана. У табели 4.2. су приказани сертифицирани модели МТП компаније „Примат“ а.д. Марибор.

Табела 4.2 – Сертификовани модели МТП компаније „Примат“ а.д. Марибор [139]

Модел	Степен отпорности по EN 143 – 1	Дебљина зида [mm]	Тежина по m <sup>2</sup> [kg]	Мах. распон [mm] при оптерећењу од	
				100 dN/m <sup>2</sup>	300 dN/m <sup>2</sup>
МОДУЛПРИМ 0	0 / 30 RU	55	60	6000	3000
МОДУЛПРИМ 1	I / 50 RU	55	70	6000	3000
МОДУЛПРИМ 2	II / 80 RU	75	210	6000	3000
МОДУЛПРИМ 3	III / 120 RU	75	210	6000	3000
МОДУЛПРИМ 4	IV / 180 RU	75	210	6000	3000
МОДУЛПРИМ 5	V / 270 RU	100	295	6000	5000
МОДУЛПРИМ 6	VI / 400 RU	100	310	6000	5000
МОДУЛПРИМ 7	VII / 600 RU	100	320	5000	4600
МОДУЛПРИМ 8	VIII / 825 RU	135	480	6700	6000
МОДУЛПРИМ 9	IX / 1050 RU	150	530	7400	6400

Сви модули се при склапању међусобно спајају заваривањем. У статичком смислу је то веома погодно. Прорачун се ради тако да трезорски плафон у модуларној градњи, поред своје тежине, мора носити додатно површинско оптерећење до 300 daN/m<sup>2</sup> на распону између зидова од 3,0 до 6,4 m, без посебне потконструкције или додатних носећих греда. То је неопходно у случајевима када се трезорска просторија накнадно поставља у канцеларијске сале односно банкарске холове.

Дебљина зида, пода и плафона МТП је, у просеку, за два до пет пута мања од дебљине зида трезорске просторије у масивној градњи. Сходно томе сразмерно су мање и масе (тежине) МТП.

#### 4.1.5. Процес конфигурисања МТП

Процес конфигурисања МТП започиње дефинисањем листе захтева која се формира на основу захтева купца. Задатак процеса конфигурисања је да из задатог скупа модула и компоненти, користећи позната правила и ограничења међу одабраним елементима, одреди варијанту производа која ће задовољити задате захтеве.

Процес конфигурисања треба да изврши следеће задатке [44]:

- одређивање веза између захтева и техничких карактеристика производа,
- избор модула према листи захтева,
- одређивање веза између модула,
- одређивање инстанци модула према листи захтева,
- провера некомпатибилности инстанци модула и
- провера потпуности конфигурације.

Чест је случај да резултат процеса конфигурисања није само једна конфигурација, већ их може бити и више. Такође, процес конфигурисања је и итеративни поступак који се често понавља све док се не добије конфигурација која у потпуности задовољава све постављене захтеве [142].

У наставку је дат приказ постојеће платформе [136] и нове развијене платформе за аутоматско конфигурисање фамилије *МТП* типа МОДУЛПРИМ.

## 4.2. Платформа за аутоматско конфигурисање *МТП*

С обзиром да је платформа производа основа за развој конфигурабилних производа то је циљ да се развије платформа на основу које се може дефинисати *модел конфигурације* фамилије *МТП* који треба да има следећа својства [77]:

- Производ треба да има унапред дизајнирану општу структуру за целу фамилију производа.
- Производ треба да је осмишљен да задовољи различите захтеве купца унутар одређеног распона.
- Сваки појединачни производ се формира из скупа већ осмишљених компоненти и модула њиховим комбиновањем и димензионим прилагођавањем.
- Сваки појединачни производ је прилагођен индивидуалним захтевима купца.

У оквиру развоја платформе за конфигурисање *МТП* дефинисани су: скуп захтева и ограничења, скуп модула, везе између модула, правила за конфигурисање и прорачун броја и димензија модула.

Постојећа платформа за конфигурисање *МТП*, развијена у протеклој декади, обухвата:

- скуп захтева и ограничења,
- скуп модула, подмодула и компоненти,
- правила спајања модула,
- правила конфигурисања *МТП* и
- прорачун параметара модула.

### 4.2.1. Скуп захтева и ограничења

Да би се извршило конфигурисање трезорске просторије неопходно је испоштовати:

1. захтеве купца и
2. правила конфигурисања трезорске просторије.

Купац у свом захтеву дефинише:

- степен отпорности трезорске просторије,
- облик и расположиве димензије у које је потребно сместити трезорску просторију,
- димензије, степен отпорности и смер отварања трезорских врата и
- посебне захтеве као што су: потреба за вентилацијом, проветравањем, додатним инсталацијама.

Захтеви купца у највећој мери одређују и основна правила за конфигурисање *МТП*.

Избором *сйейена оййорносйи* трезорске просторије према EN 1143-1 [141] дефинисани су дебљина зида трезорске просторије, унутрашња структура и начин испуне модула.

Најчешћа потреба је за *йравоујаоним обликом йрезорске йросйорије*. Међутим, у неким ситуацијама купац може, у зависности од расположивог простора у који жели поставити трезорску просторију, захтевати и сложеније облике.

У зависности од *односа дужине и ширине йрезорске йросйорије* дефинише се и правац постављања подних и плафонских модула. Уколико је предњи зид трезорске просторије, на којој се постављају трезорска врата, краћи од бочног зида, подни и плафонски модули се постављају и спајају паралелно са предњим зидом, у супротном се постављају и спајају паралелно са бочним зидовима МТП. У оба случаја је потребно водити рачуна да ли дужина кровних модула може издржати захтевано површинско оптерећење или је потребно урадити посебну потконструкцију или додати носеће греде. За трезорске просторије већих димензија код којих се захтевају дужине модула веће од  $b_{\min}$  је обавезна носећа потконструкција.

У ретким случајевима купац захтева да се у трезорску просторију угради више од једних трезорских врата. Степен отпорности трезорских врата је обично усклађен са степеном отпорности трезорске просторије али купац може захтевати и уградњу трезорских врата различитог степена отпорности. Трезорска врата се наручују независно од трезорске просторије. Међутим, за конфигурисање МТП су битне димензије трезорских врата, њихово позиционирање на трезорској просторији и смер отварања. У зависности од *смера ойварања йрезорских врата* (улево или удесно) разликује се и начин повезивања модула а тиме и смер у коме се врши формирање целе просторије (с лева удесно или супротно).

У зависности од посебних захтева купца се дефинише број и положај отвора за уградњу додатних инсталација у модулима трезорске просторије.

За потребе ове дисертације, разматрана су *йтехничко йтехнолошка ойраничена* за МТП које су најчешће у примени, а то су правоугаоне трезорске просторије са једним трезорским вратима и без додатне носеће потконструкције. За конфигурисање су усвојена следећа ограничења:

- правоугаони облик трезорске просторије,
- највећа могућа дужина модула коју је могуће добити класичним поступцима савијања на пресама је  $l_{\max}$ ,
- минимална ширина модула коју је могуће остварити је  $b_{\min}$ ,
- максимална дозвољена ширина модула (изузев модула Е) због манипулације и могућности савијања омотача је  $b_{\max}$ ,
- стандардна ширина модула  $b_{std}^1$ ,
- минимално растојање трезорских врата од леве ивице предњег зида МТП је  $D_{\min} = b_{\min}$ ,

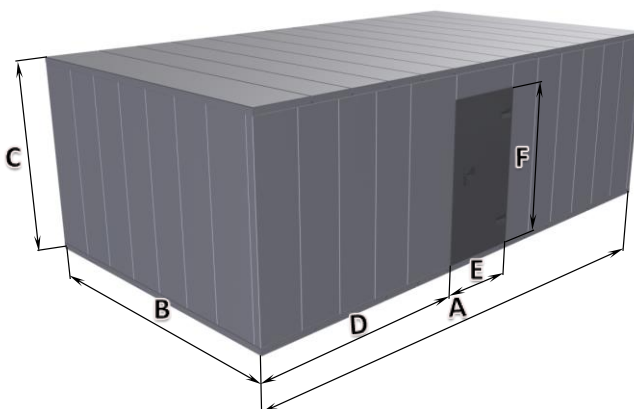
<sup>1</sup> Код постојеће платформе  $b_{std} = 550 \text{ mm}$

- правац подних и плафонских модула зависи од односа дужине предњег и бочног зида. Ако је  $A \geq B$  модули се постављају управно у односу на предњи зид, а ако је  $B > A$  модули се постављају паралелно са предњим зидом,
- висина МТП треба да испуњава услов  $C_{min} < C < C_{max}$ ,
- висина трезорских врата не може бити већа од висине МТП умањеног за две дебљине крајева подних и плафонских модула  $F \leq C - 2 \cdot (d - d_p)$ ,
- смер отварања трезорских врата одређује и смер формирања трезорске просторије од модула. Ако су врата десна формирање зидова МТП се врши с лева удесно почев од модула VI. Ако је потребно уградити лева трезорска врата конфигурисање се врши симетрично и почиње од десне стране улево.

Захтеви купца који су неопходни за конфигурисање МТП се у суштини свODE на дефинисање следећих података (слика 4.3):

- Степен отпорности (EN 1143-1),
- $A$  – дужина трезорске просторије,
- $B$  – ширина трезорске просторије,
- $C$  – висина трезорске просторије,
- Смер отварања трезорских врата,
- $D$  – растојање трезорских врата од леве ивице просторије,
- $E$  – ширина трезорских врата и
- $F$  – висина трезорских врата.

UNETI PODATKE			
Stepen otpornosti (EN 1143-1)			VI
Dimenzije МТП	Dužina	A=	7050 [mm]
	Širina	B=	3800 [mm]
	Visina	C=	3000 [mm]
Trezorska vrata	Smer otvaranja vrata		Desni
	Rastojanje od ivice	D=	1800 [mm]
	Širina vrata	E=	1400 [mm]
	Visina vrata	F=	2200 [mm]



Слика 4.3 – Подаци потребни за конфигурисање МТП типа МОДУЛПРИМ [136,140]

При чему морају бити испоштована и ограничења улазних података:

$$C_{min} \leq C \leq C_{max}, \quad (4.1)$$

$$D \geq b_{min}, \quad (4.2)$$

$$F \leq C, \quad (4.3)$$

$$A, B, C, D, E, F = \text{int}. \quad (4.4)$$

#### 4.2.2. Скуп модула

Најважнија карактеристика платформе *МТП* је њена модуларност. Фамилија ових производа се креира из заједничког скупа компоненти тј. **модула** који имају низ заједничких карактеристика. Модуларност трезорских просторија се остварује по принципу секцијске модуларности (*Sectional Modularity*) и модуларности прилагођавања (*Cut-to-Fit Modularity*) [12,38,65,143]. Секцијска модуларност се користи за формирање структуре производа повезивањем модула преко идентичних интерфејса (веза). Сви модули су дефинисани параметарски тако да се променом димензија модула остварује прилагођавање производа задатим димензијама.

##### 4.2.2.1. Класификација модула

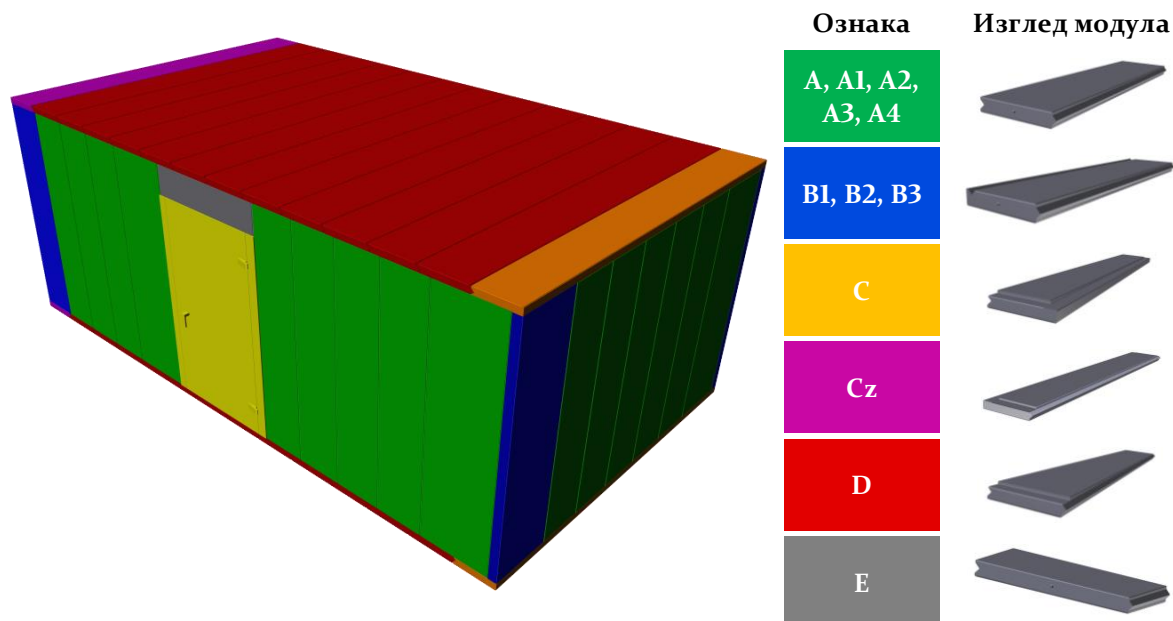
Класификација основних модула за конфигурисање *МТП* је извршена на основу следећих критеријума (табела 4.4.):

- **Према функцији** коју имају, модули се деле на основне модуле и модуле за спајање. Основни модули су модули од којих се формирају зидови, под и плафон *МТП*. Повезивање основних модула у заједничку конфигурацију се изводи помоћу модула за спајање.
- **Према облику**, модули се деле на пет типова означених словима **A, B, C, D** и **E**. Основни тип модула од којих се формирају зидови *МТП* је означен са **A**, док се за формирање пода и плафона користи модул типа **D**. Модули који служе за повезивање зидова су означени са **B**, а модули који служе за међусобно повезивање подних и плафонских модула са модулима од којих су састављени зидови су означени са **C**. Предњи зид се састоји из две целине тј. део лево од трезорских врата и део десно од трезорских врата. Ове две целине се међусобно спајају трезорским вратима и модулом типа **E** (слика 4.14).
- **Према ширини**, модули се класификују на **сѿандардне (СТ)** и **несѿандардне (НС)**.

Табела 4.3 – Класификација модула [136,140]

Критеријум поделе		Врста модула						
I	Функција	Основни модули			Модули за повезивање			
II	Облик (Тип)	A		D	B	C		E
III	Ширина	СТ	НС	СТ	НС	НС	НС	НС
Ознака		A	A1, A2, A3, A4	D	B1, B2, B3	C	Cz	E

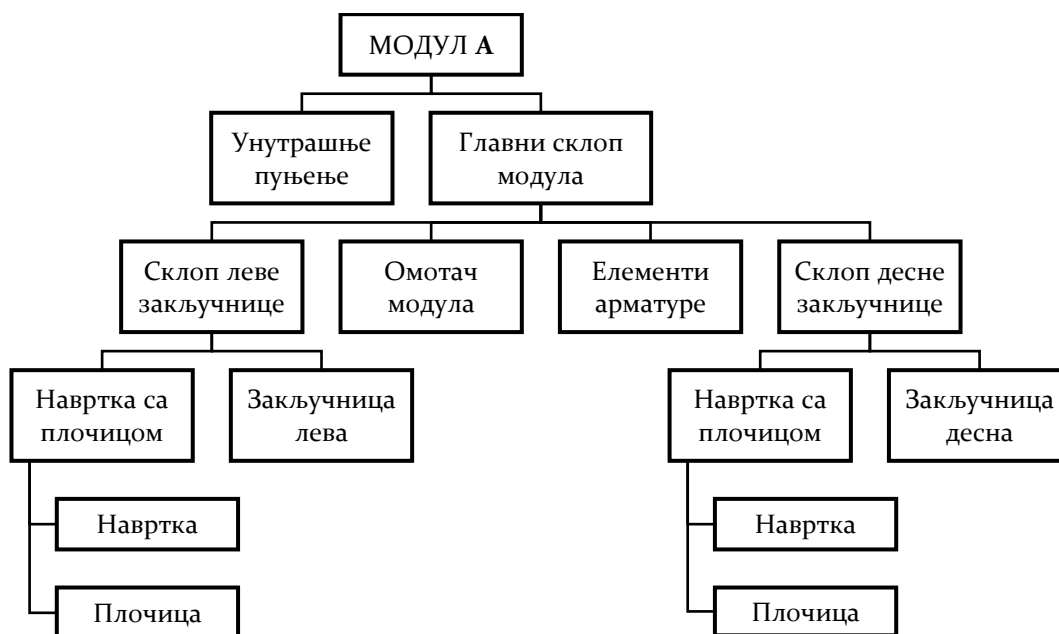
Постоје и **дојунски критеријуми** на основу којих се модули даље разврставају према томе да ли у себи садрже отворе за инсталације (вентилација, проветравање и пролаз кабловских водова) што због обима дисертације неће бити разматрано. Изглед и положај модула у *МТП* према горе усвојеној класификацији је приказан на слици 4.4.



Слика 4.4 – Изглед и положај типова модула у МТП [136]

## 4.2.2.2. Структура модула

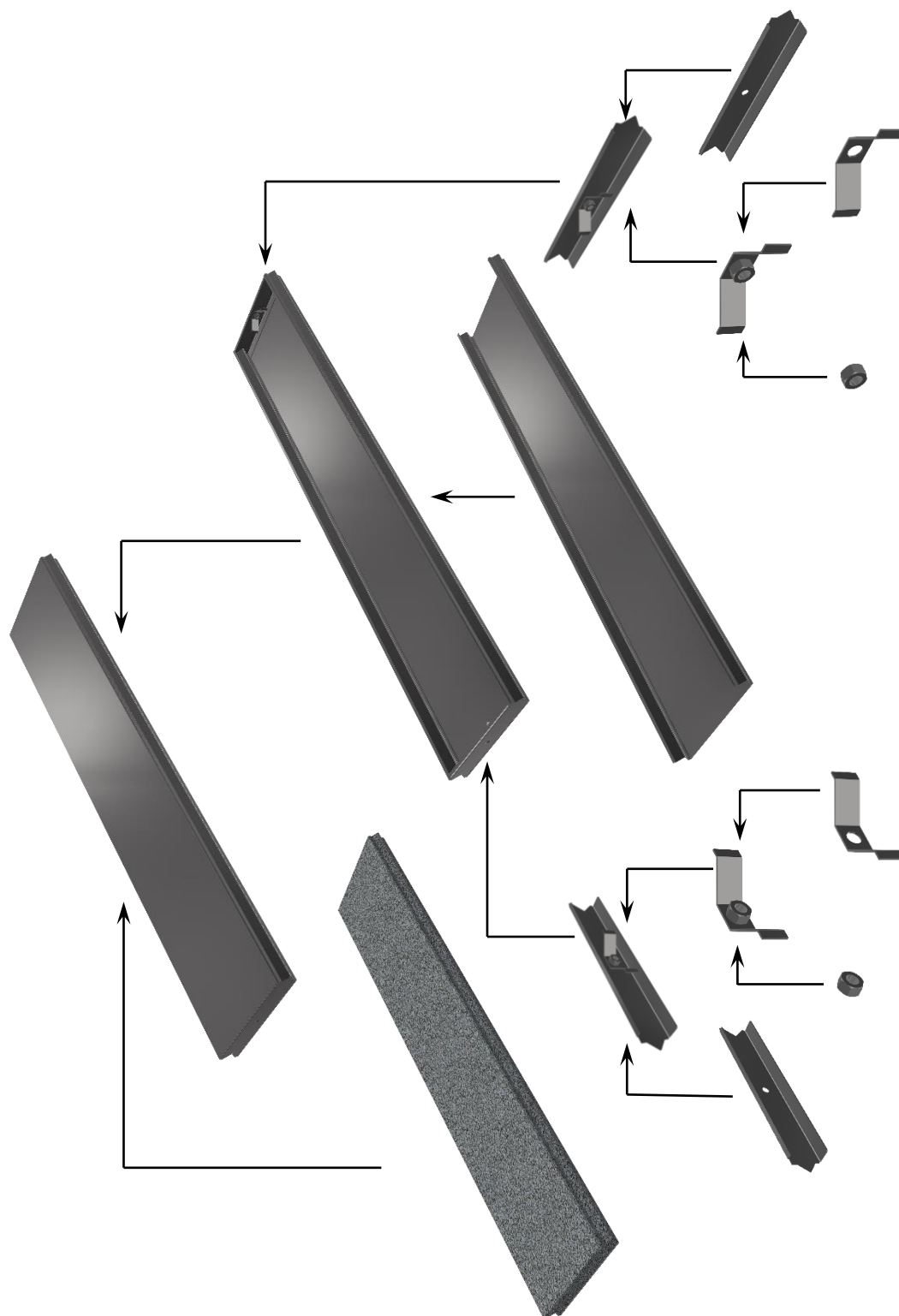
Структура модула МТП се састоји од спољашњег омотача направљеног од лима и унутрашње испуне са припадајућим ојачањима, која зависи од степена отпорности трезорске просторије, која обезбеђује стварну противпровалну заштиту [143]. Сви модули имају сличну структуру а на слици 4.5. је приказана структура модула А.



Слика 4.5 – Структурна шема модула А

Конструкциона шема модула А, без детаљног приказа елемената унутрашње арматуре<sup>2</sup>, у форми 3D модела приказана је на слици 4.6.

<sup>2</sup> Облик и структура унутрашње арматуре и састав испуне модула је пословна тајна произвођача



Слика 4.6 – Конструкциона шема модула А приказана 3D моделом



#### 4.2.2.3. Основни параметри модула

Основни параметри модула, од којих зависе сви остали параметри и димензије, које је потребно израчунати за сваки модул су:

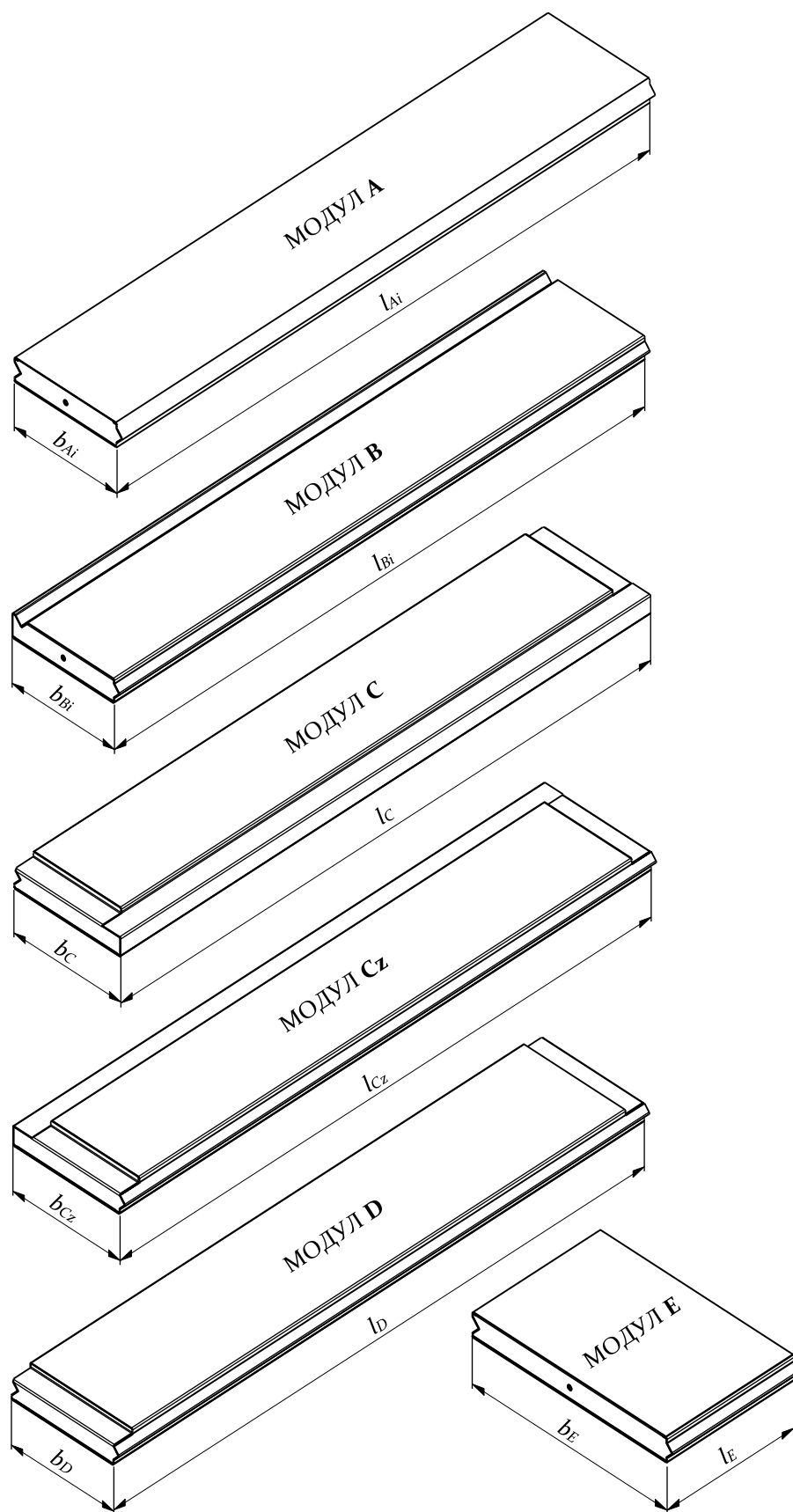
- број модула по страницама –  $n$ ,
- ширина модула –  $b$ ,
- дужина модула –  $l$  и
- дебљина модула –  $d$ .

Дебљина модула је параметар који директно зависи од захтеваног степена отпорности *МТП* док је остале основне параметре потребно израчунати на основу захтеваних димензија *МТП*. На основу дужине, ширине и дебљине модула даље се прорачунавају сви геометријски параметри потребни за добијање *3D* модела сваке саставне компоненте појединачних типова модула. Изглед и облик модула са основним параметрима су приказани на слици 4.7.

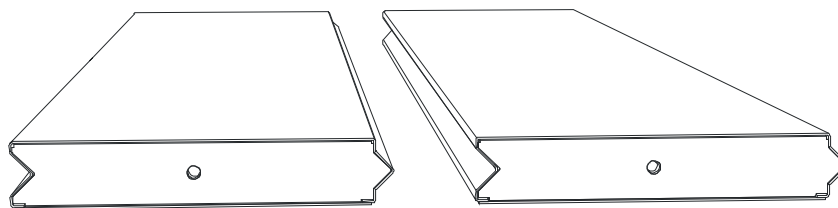
#### 4.2.3. Спајање модула

За конфигурисање *МТП* развијене су и добро осмишљене везе (интерфејси) за међусобно спајање модула. Једна од основних разлика међу модулима је облик и положај жлебова за спајање модула као и основне димензије модула. Сви појединачни модули се континуалним заваривањем спајају са осталим модулима са којима су у додиру чиме се остварује нерастављива веза која даје додатну крутост *МТП* и додатно се обезбеђује противпровална отпорност. Стандардизовано је шест различитих варијанти спајања модула а то су:

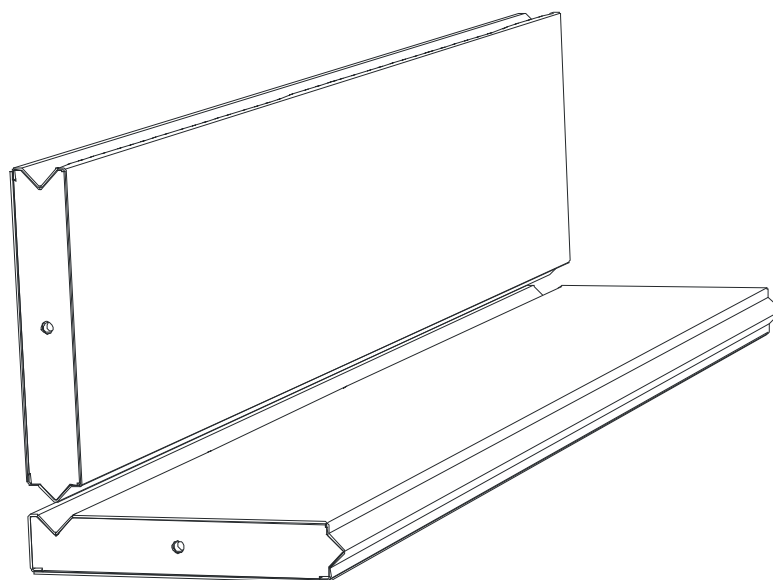
- Подужно спајање модула **A-A**, **A-E** и **D-D** (слика 4.8). Користи се код спајања модула који формирају зидове, као и код спајања стандардних модула који формирају под и плафон *МТП*.
- Угаоно спајање модула **A-B** (слика 4.9). Обезбеђује везу између зидова *МТП*.
- Угаоно-степенасто спајање модула **D-A** и модула **D-E** (слика 4.10). Користи се код спајања подних и плафонских модула са свим зидовима *МТП*.
- Подужно спајање модула **D-C** (слика 4.11). Обезбеђује везу између стандардног и нестандардног подног/плафонског модула *МТП*.
- Подужно спајање модула **Cz-D** (слика 4.12). Обезбеђује везу између стандардног и нестандардног подног/плафонског модула *МТП*.
- Спајање модула **A-B-C** и модула **A-B-Cz** на угловима *МТП* (слика 4.13). Обезбеђује везу бочних страница са подом/плафоном *МТП*.



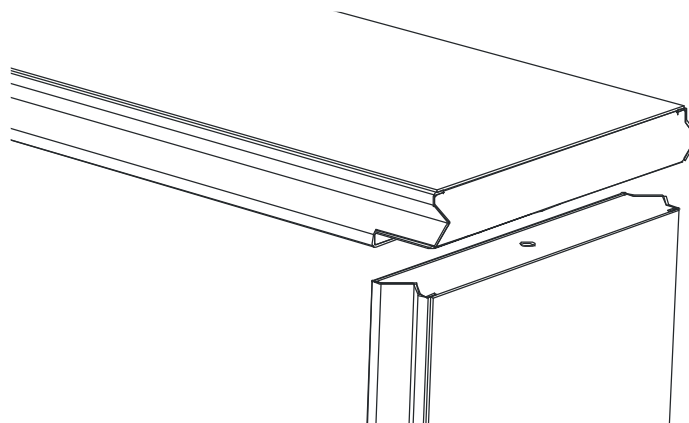
Слика 4.7 – Различити типови модула са њиховим основним параметрима



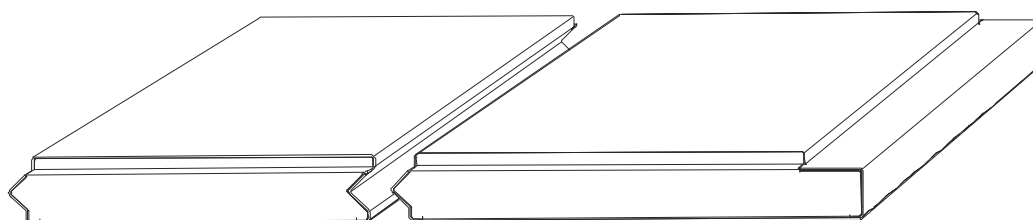
Слика 4.8 – Веза између модула А-А, А-Е и D-D



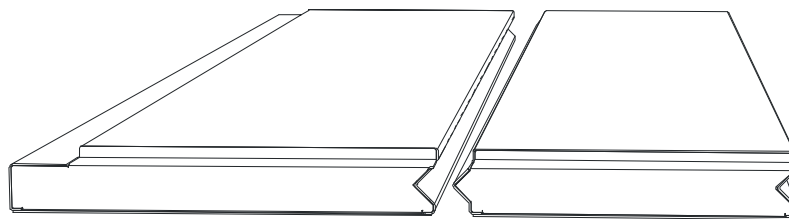
Слика 4.9 – Веза између модула А-В



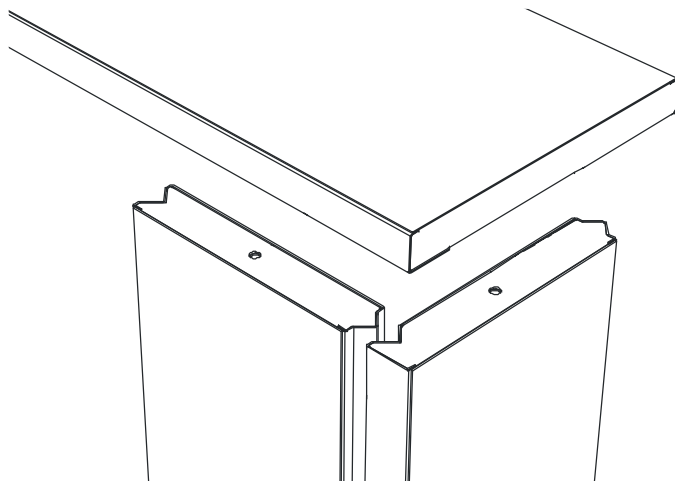
Слика 4.10 – Веза између модула D-A и модула D-E



Слика 4.11 – Веза између модула D-C



Слика 4.12 – Веза између модула Cz-D

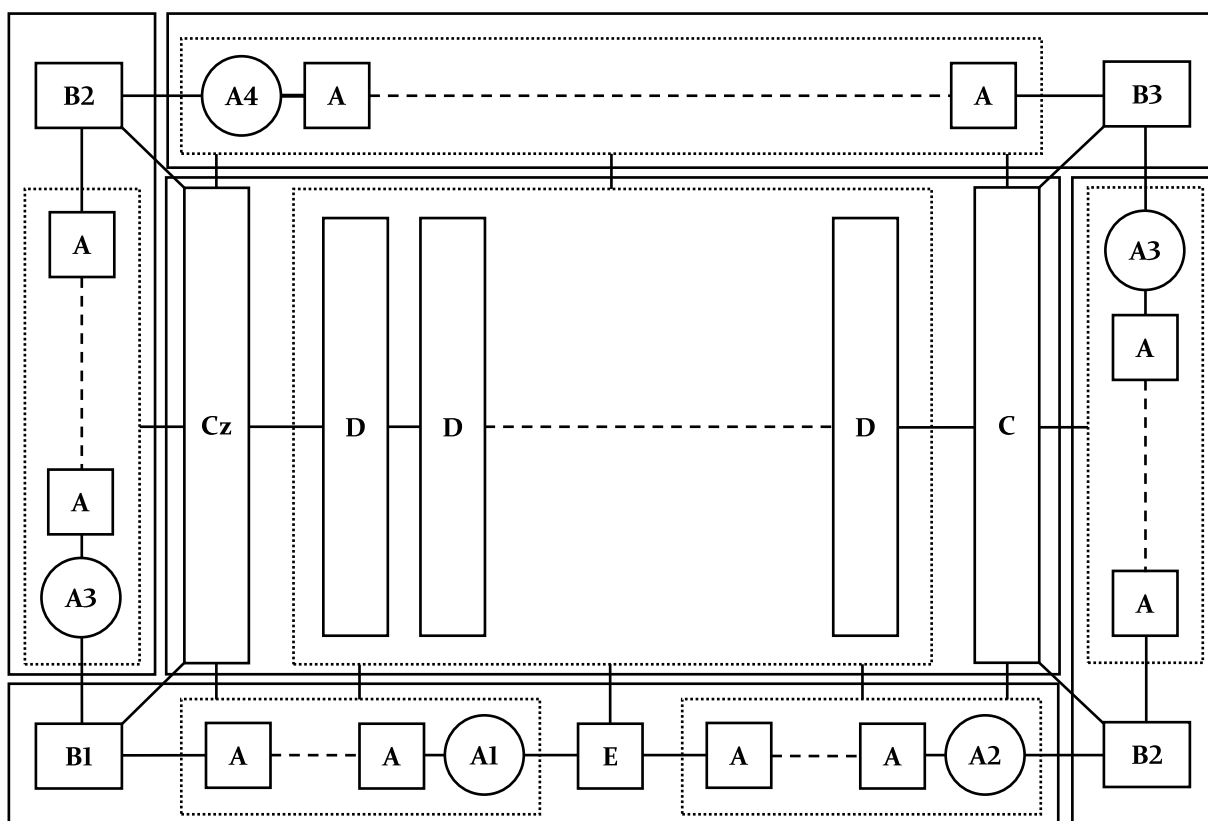


Слика 4.13 – Веза између модула A-B-C и A-B-Cz на угловима МТП

#### 4.2.4. Поступак конфигурисања МТП

Конфигурација МТП се састоји од 6 страница: предњи зид, задњи зид, бочни зидови (леви и десни), под и плафон. При том су бочни зидови (леви и десни) исти тј. формирају се од истог броја и типова модула. Исто је и са подом и плафоном. На слици 4.14 је приказан поступак конфигурисања МТП са једним „десним“ трезорским вратима, који се састоји од следећих фаза:

1. Формирање **џога** од модула Cz, D и C;
2. **Предњи зид** се формира од три целине: а) **део лево од њрезорских вратића** који се састоји од модула B1, A и A1, б) **централни део** који се састоји од трезорских врата и модула E, и в) **део десно од њрезорских вратића** који се састоји од модула A и A2. Предњи зид је са бочним зидовима спојен модулима B1 и B2 а за под је спојен са свим подним модулима.
3. **Десни бочни зид** се формира од модула B2, A и A3. Са предњим и задњим зидом повезује се модулима B2 и B3 док се за под спаја помоћу модула C.
4. **Задњи зид** се формира од модула B3, A и A4. Са бочним зидовима се повезује модулима B3 и B2 а за под је спојен са свим подним модулима.
5. **Левни бочни зид** је идентичан као и десни. Са предњим и задњим зидовима повезује се модулима B1 и B2 док се за под спаја помоћу модула Cz.
6. **Плафон** се формира на крају од истих модула као и **џог**: Cz, D и C и повезује се са свим зидним модулима МТП.



Слика 4.14 – Шема поступка конфигурације МТП

#### 4.2.5. Прорачун основних параметара модула

Најзахтевнији и најодговорнији задатак при конфигурисању МТП је прорачун димензија појединачних модула као и број и распоред истих [136,138,140,144]. У постојећој платформи, за прорачун параметара модула, коришћен је *MS Excel* због једноставности израчунавања и могућности уграђивања логичких функција.

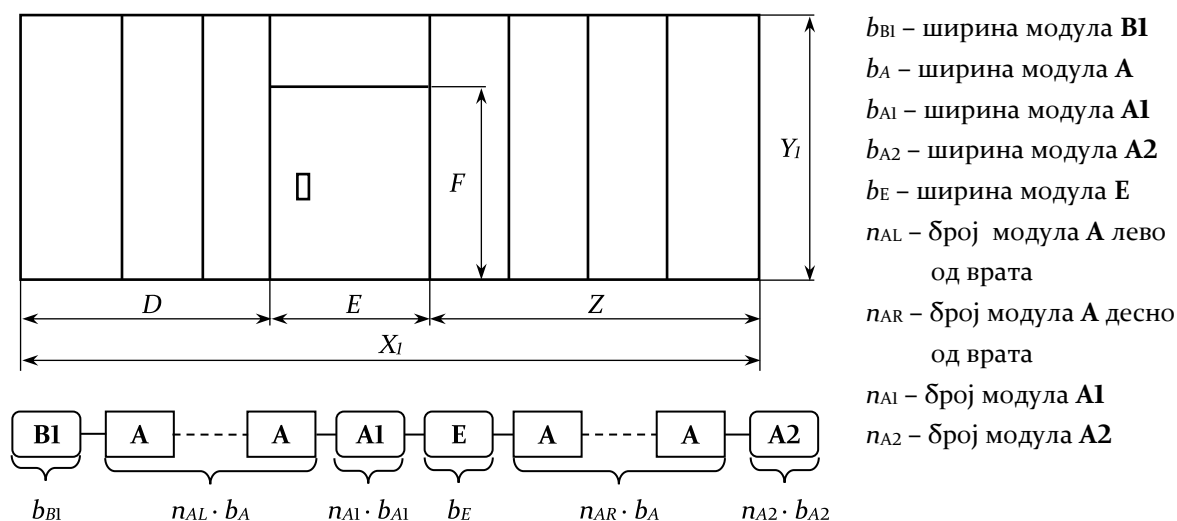
У *MS Excel*-у се уносе основне димензије МТП ( $A, B, C, D, E, F$ ), степен отпорности према стандарду EN 1143-1 и смер отварања трезорских врата (слика 4.3). На основу ових података се помоћу уграђених логичких функција израчунавају основни параметри за моделирање МТП: потребан број одређене врсте модула и димензије свих модула од којих се формира МТП [136,140].

Приликом дефинисања правила за конфигурисање МТП треба водити рачуна да буде минимални број модула од којих се врши конфигурисање и што мањи број модула који су сложеније структуре. У том циљу су анализирани могуће комбинације модула при формирању сваке странице МТП и извршен је избор најповољније комбинације са аспекта технологичности. Ширина стандардних модула ( $A$  и  $D$ ) у овом случају је константна ( $b_{std} = b_A = b_D$ ).

##### 4.2.5.1. Прорачун параметара модула за предњи зид

Основне димензије и структура модула од којих се састоји предњи зид су приказани на слици 4.15. Усвојене алгебарске једначине за прорачун димензија и потребног броја

модула за формирање предњег зида, лево и десно од трезорских врата, су приказане у табели 4.5.



Слика 4.15 – Структура и параметри предњег зида МТП

Основне димензије предњег зида су:

$$X_1 = A - d, \quad (4.5)$$

$$Y_1 = C - 2 \cdot (d - d_p), \quad (4.6)$$

$$Z = X - D - E, \quad (4.7)$$

где су:

- $X_1$  – дужина предњег и задњег зида,
- $Y_1$  – висина свих зидова,
- $d_p$  – преклапање подних/плафонских модула са зидним модулима и
- $Z$  – дужина зида десно од трезорских врата.

Како би се одредили основни параметри модула који формирају предњи зид, уводи се целобројни коефицијент  $k_i$  који представља максималан број модула са стандардном ширином који може бити распоређен на предњи зид (лево и десно од врата). Поред њега уведен је и коефицијент  $m_i$  који представља вредност остатка добијеног након распоређивања максималног број модула са стандардном ширином (лево и десно од врата). Прорачун помоћних коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  је дат у табели 4.4.

Табела 4.4 – Прорачун коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за предњи зид

Коефицијент	Једначина	
	Лево од врата	Десно од врата
$k_i$	$= \text{INT}(D/b_{std})$	$= \text{INT}(Z/b_{std})$
$m_i$	$= (D/b_{std} - k_i) \cdot b_{std}$	$= (Z/b_{std} - k_i) \cdot b_{std}$

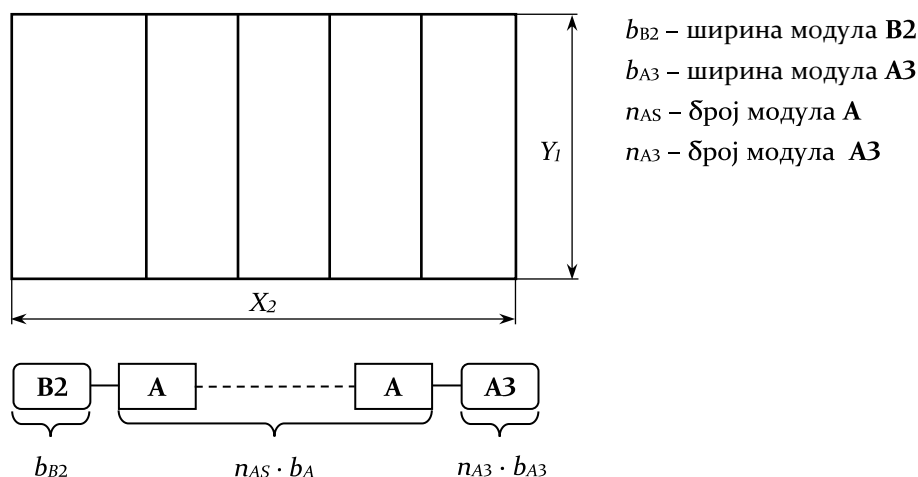
Табела 4.5 – Усвојене алгебарске једначине за прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за предњи зид МТП

ЦЕЛИНА	МОДУЛ	ДИМЕНЗИЈА	ОБЛАСТ							ЈЕДНАЧИНЕ
			$D(Z) \leq b_{max}$				$D(Z) > b_{min} + 2 \cdot b_{std}$			
			$b_{min} < D(Z) \leq b_{max}$	$b_{max} < D(Z) \leq b_{min} + b_{std}$	$b_{min} + b_{std} < D(Z) \leq b_{max} + b_{std}$	$b_{max} + b_{std} < D(Z) \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}$	$m \leq b_{max} - b_{std}$	$b_{max} - b_{std} < m \leq b_{min}$	$m > b_{min}$	
ЛЕВО ОД ВРАТА	В1	$b_{B1}$	$D$	$D/2$	$b_{std}$	$b_{std}$	$b_{std}$	$(b_{std} + m)/2$	$m$	$= \text{IF}(D \leq b_{max}; D; \text{IF}(D \leq b_{min} + b_{std}; D/2; \text{IF}(D \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; b_{std}; \text{IF}(m \leq b_{max} - b_{std}; b_{std}; \text{IF}(m \leq b_{min}; (b_{std} + m)/2; m))))))$
		$l_{B1}$	$Y_1$							$= Y_1$
		$n_{B1}$	1							$= 1$
	А	$b_A$	$b_{std}$							$= b_{std}$
		$l_A$	$Y_1$							$= Y_1$
		$n_{A1}$	0	0	0	0	$k-2$	$k-1$	$k$	$= \text{IF}(D \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; 0; \text{IF}(m \leq b_{max} - b_{std}; k-2; \text{IF}(m \leq b_{min}; k-1; k)))$
	А1	$b_{A1}$	0	$D/2$	$D - b_{std}$	$(D - b_{std})/2$	$b_{std} + m$	$(b_{std} + m)/2$	0	$= \text{IF}(D \leq b_{max}; 0; \text{IF}(D \leq b_{min} + b_{std}; D/2; \text{IF}(D \leq b_{max} + b_{std}; D - b_{std}; \text{IF}(D \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; (D - b_{std})/2; \text{IF}(m \leq b_{max} - b_{std}; b_{std} + m; \text{IF}(m \leq b_{min}; (b_{std} + m)/2; 0))))))$
		$l_{A1}$	$Y_1$							$= Y_1$
		$n_{A1}$	0	1	1	2	1	1	0	$= \text{IF}(D \leq b_{max}; 0; \text{IF}(D \leq b_{max} + b_{std}; 1; \text{IF}(D \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; 2; \text{IF}(m \leq b_{min}; 1; 0))))$
ИЗНАД ВРАТА	Е	$b_E$	$E$							$= E$
		$l_E$	$Y_1 - F$							$= Y_1 - F$
		$n_E$	1							$= 1$
ДЕСНО ОД ВРАТА	А	$b_A$	$b_{std}$							$= b_{std}$
		$l_A$	$Y_1$							$= Y_1$
		$n_{AR}$	0	0	1	1	$k-1$	$k-1$	$k$	$= \text{IF}(Z \leq b_{min} + b_{std}; 0; \text{IF}(Z \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; 1; \text{IF}(m \leq b_{min}; k-1; k)))$
	А2	$b_{A2}$	$Z$	$Z/2$	$Z - b_{std}$	$(Z - b_{std})/2$	$b_{std} + m$	$(b_{std} + m)/2$	$m$	$= \text{IF}(Z \leq b_{max}; Z; \text{IF}(Z \leq b_{min} + b_{std}; Z/2; \text{IF}(Z \leq b_{max} + b_{std}; Z - b_{std}; \text{IF}(Z \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; (Z - b_{std})/2; \text{IF}(m \leq b_{max} - b_{std}; b_{std} + m; \text{IF}(m \leq b_{min}; (b_{std} + m)/2; m))))))$
		$l_{A2}$	$Y_1$							$= Y_1$
		$n_{A2}$	1	2	1	2	1	2	1	$= \text{IF}(Z \leq b_{max}; 1; \text{IF}(Z \leq b_{min} + b_{std}; 2; \text{IF}(Z \leq b_{max} + b_{std}; 1; \text{IF}(Z \leq b_{min} + 2 \cdot b_{std}; 2; \text{IF}(m \leq b_{max} - b_{std}; 1; \text{IF}(m \leq b_{min}; 2; 1))))))$

ЛЕГЕНДА:  $b_i$  – ширина  $i$ -тог типа модула;  $l_i$  – дужина  $i$ -тог типа модула;  $n_i$  – број  $i$ -тог типа модула

## 4.2.5.2. Прорачун параметара модула за бочне зидове

Како се код једног МТП јављају два идентична бочна зида (леви и десни) даље ће бити приказан прорачун за један бочни зид. Основне димензије и структура модула од којих се састоји један бочни зид су приказани на слици 4.16. Усвојене алгебарске једначине за прорачун димензија и потребног броја модула за формирање бочног зида су приказане у табели 4.7.



Слика 4.16 – Структура и параметри бочног зида МТП

Основне димензије бочног зида ( $X_2$  и  $Y_1$ ) добијају се као:

$$X_2 = B - d, \quad (4.8)$$

$$Y_1 = C - 2 \cdot (d - d_p), \quad (4.9)$$

где је  $X_2$  - дужина бочног зида.

И у овом случају потребно је увести целобројни коефицијент  $k_i$  који представља максималан број модула са стандардном ширином који може бити распоређен на један бочни зид и коефицијент  $m_i$  који представља вредност остатка добијеног након распоређивања максималног броја модула са стандардном ширином. Прорачун помоћних коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за бочни зид је дат у табели 4.6.

Табела 4.6 – Прорачун коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за бочни зид

Коефицијент	Једначина
$k_i$	$= \text{INT}(X_2/b_{std})$
$m_i$	$= (X_2/b_{std} - k_i) \cdot b_{std}$

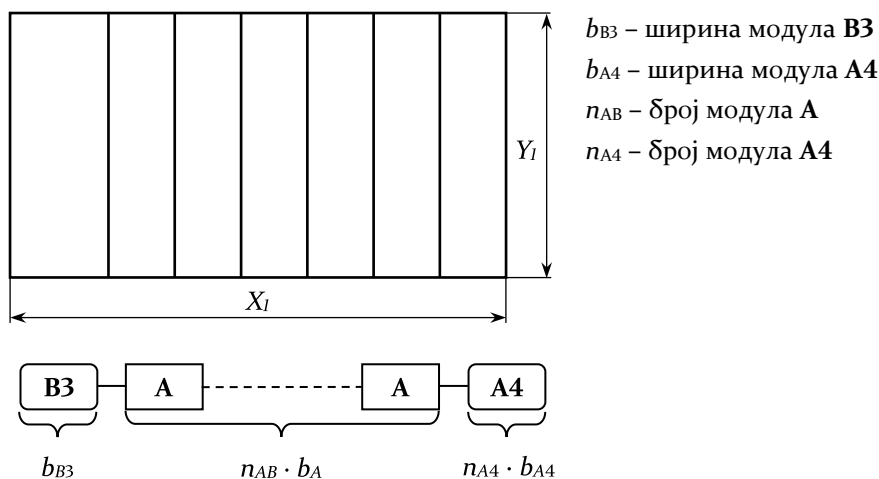


Табела 4.7 – Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за бочни зид МТП

МОДУЛ	ДИМЕНЗИЈА	$m \leq b_{max} - b_{std}$	$b_{max} - b_{std} < m \leq b_{min}$	$m > b_{min}$	ЈЕДНАЧИНА
В2	$b_{B2}$	$b_{std} + m$	$(2 \cdot b_{std} + m) / 2$	$m$	$= IF(m \leq b_{max} - b_{std}; b_{std} + m; IF(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std} + m) / 2; m))$
	$l_{B2}$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{B2}$	1			$= 1$
А	$b$	$b_{std}$			$= b_{std}$
	$l_A$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{A5}$	$k-1$	$k-2$	$k$	$= IF(m \leq b_{max} - b_{std}; k-1; IF(m \leq b_{min}; k-2; k))$
А3	$b_{A3}$	0	$(2 \cdot b_{std} + m) / 2$	0	$= IF(m \leq b_{max} - b_{std}; 0; IF(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std} + m) / 2; 0))$
	$l_{A3}$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{A3}$	0	1	0	$= IF(m \leq b_{max} - b_{std}; 0; IF(m \leq b_{min}; 1; 0))$

## 4.2.5.3. Прорачун параметара модула за задњи зид

Основне димензије и структура модула од којих се састоји задњи зид су приказани на слици 4.17. Усвојене алгебарске једначине за прорачун димензија и потребног броја модула за формирање задњег зида су приказане у табели 4.9.



Слика 4.17 – Структура и параметри задњег зида МТП

Основне димензије задњег зида ( $X_1$  и  $Y_1$ ) добијају се исто као и код предњег зида (једначине 4.5 и 4.6). Прорачун помоћних коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за задњи зид је дат у табели 4.8.

Табела 4.8 – Прорачун коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за задњи зид

Коефицијент	Једначина
$k_i$	$= INT(X_1 / b_{std})$
$m_i$	$= (X_1 / b_{std} - k_i) \cdot b_{std}$

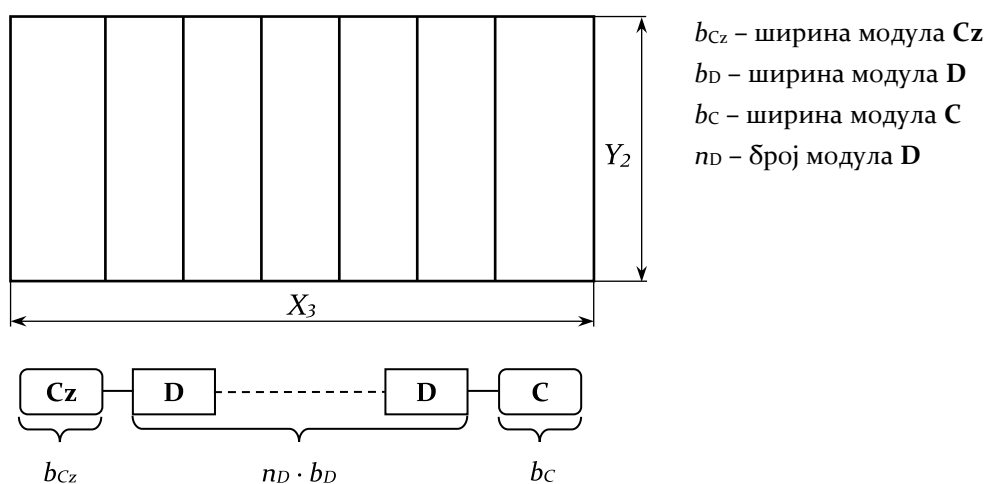
Табела 4.9 – Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за задњи зид МТП

МОДУЛ	ДИМЕЗИЈА	$m \leq b_{max}-b_{std}$	$b_{max}-b_{std} < m \leq b_{min}$	$m > b_{min}$	ЈЕДНАЧИНА
ВЗ	$b_{B3}$	$b_{std}+m$	$(2 \cdot b_{std}+m)/2$	$m$	$= IF(m \leq b_{max}-b_{std}; b_{std}+m; IF(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std}+m)/2; m))$
	$l_{B3}$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{B3}$	1			$= 1$
А	$b$	$b_{std}$			$= b_{std}$
	$l_A$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{AB}$	$k-1$	$k-2$	$k$	$= IF(m \leq b_{max}-b_{std}; k-1; IF(m \leq b_{min}; k-2; k))$
А4	$b_{A4}$	0	$(2 \cdot b_{std}+m)/2$	0	$= IF(m \leq b_{max}-b_{std}; 0; IF(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std}+m)/2; 0))$
	$l_{A4}$	$Y_1$			$= Y_1$
	$n_{A4}$	0	1	0	$= IF(m \leq b_{max}-b_{std}; 0; IF(m \leq b_{min}; 1; 0))$

Од могућих комбинација при формирању бочних страница и задње странице МТП за избор је од пресудног утицаја такође био што мањи број нестандартних модула ВЗ и А4 и што већи број стандардних модула А.

#### 4.2.5.4. Прорачун параметара модула за под и плафон

Како су под и плафон симетрични и састоје се од идентичног броја и врсте модула, приказаше се прорачун само за плафон. Основне димензије и структура модула од којих се састоји плафон су приказани на слици 4.18. Усвојене алгебарске једначине за прорачун димензија и потребног броја модула за формирање плафона су приказане у табели 4.11.



Слика 4.18 – Структура и параметри плафона (пода) МТП

Како је усвојено правило да се подни и плафонски модули својом дужином постављају у правцу краћег зида МТП прорачун основних димензија ( $X_3$  и  $Y_2$ ) се добија као:

$$X_3 = \begin{cases} A; & IF(B \leq A) \\ B; & \text{у осталим случајима} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$Y_2 = \begin{cases} B; \text{IF}(B \leq A) \\ A; \text{у осталим случајима} \end{cases} \quad (4.11)$$

Прорачун помоћних коефицијената  $k_i$  и  $m_i$  за под и плафон је дат у табели 4.10.

Табела 4.10 – Прорачун коефицијената  $k_i$  и  $m_i$

Коефицијент	Једначина
$k_i$	$= \text{INT}(X_3/b_{std})$
$m_i$	$= (X_3/b_{std} - k_i) \cdot b_{std}$

Табела 4.11 – Прорачун параметара (ширине, дужине и броја модула) за под и плафон МТП

МОДУЛ	ДИМЕНЗИЈА			ЈЕДНАЧИНА
		$m \leq b_{min}$	$m > b_{min}$	
Cz	$b_{Cz}$	$(2 \cdot b_{std} + m)/2$	$(b_{std} + m)/2$	$= \text{IF}(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std} + m)/2; (b_{std} + m)/2))$
	$l_{Cz}$	$Y_2$		$= Y_2$
	$n_{Cz}$	1		$= 1$
D	$b_D$	$b_{std}$		$= b_{std}$
	$l_D$	$Y_2$		$= Y_2$
	$n_D$	$k-2$	$k-1$	$= \text{IF}(m \leq b_{min}; k-2; k-1)$
C	$b_C$	$(2 \cdot b_{std} + m)/2$	$(b_{std} + m)/2$	$= \text{IF}(m \leq b_{min}; (2 \cdot b_{std} + m)/2; (b_{std} + m)/2))$
	$l_C$	$Y_2$		$= Y_2$
	$n_C$	1		$= 1$

С обзиром да при формирању пода и плафона МТП треба урадити укупно по два модула Cz и C одређење је да се они раде са истом ширином а не једна стандардна а друга ужа или шира како би се избегла могућност грешке при изради и монтажи ових модула.

### 4.3. Развој нове платформе за аутоматско конфигурисање МТП

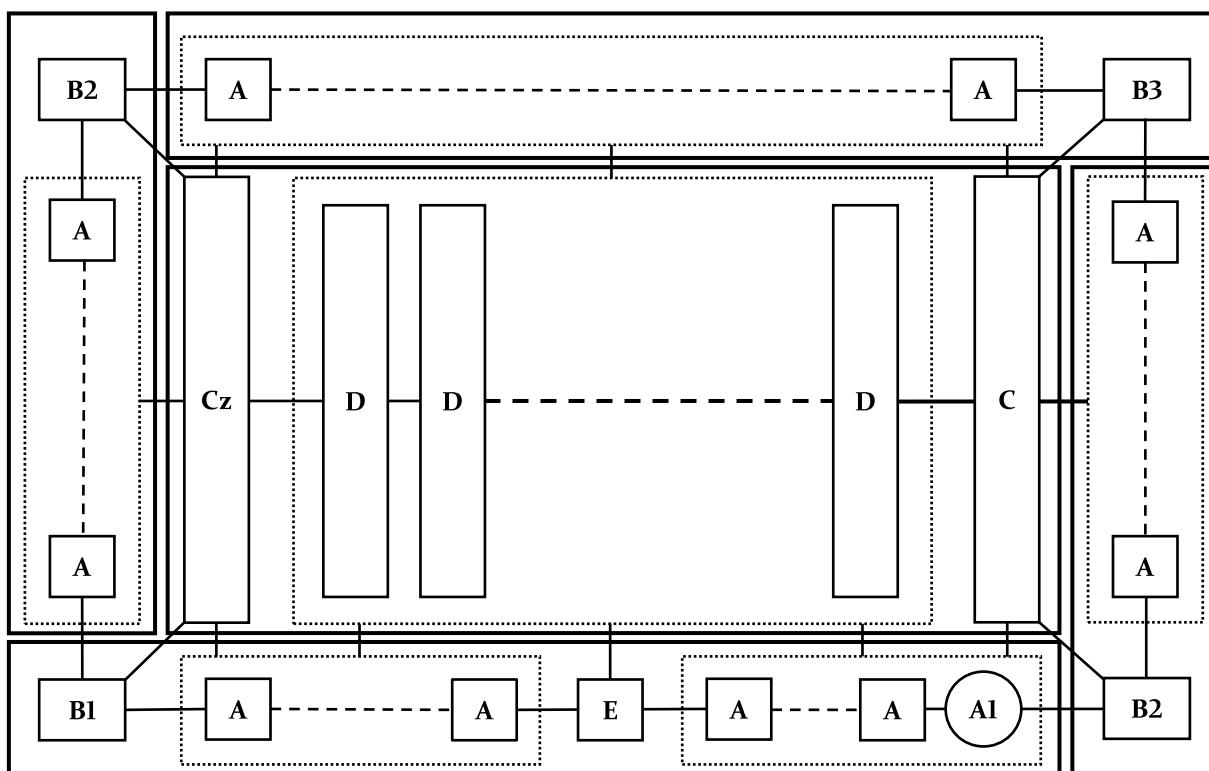
За разлику од постојеће платформе на основу које је било могуће конфигурирати само једну варијанту МТП, нова платформа омогућује конфигурисање мноштва варијанти МТП које задовољавају захтеве купца. Циљ је да се елиминишу нестандардни модули А2, А3 и А4 из конфигурације МТП чиме се смањује број различитих модула а да се за стандардне модуле А и D одреди оптимална вредност ширине са аспекта рационализације времена и трошкова израде и монтаже и остварења бољег квалитета у процесу израде МТП.

Главна разлика унапређене платформе у односу на платформу приказану у поглављу 4.2, је у поступку конфигурисања МТП и прорачуну основних параметара модула.

### 4.3.1. Нови поступак за конфигурисање МТП

Шема новог поступка конфигурисања МТП је приказана на слици 4.19. Развијени поступак се састоји од следећих фаза:

1. Ова фаза је иста као код претходне платформе (формирање *ћога* од модула Cz, D и C);
2. *Предњи зид* се формира од три целине: а) *део лево од ћрезорских вратића* који се састоји од модула B1 и A, б) *централни део* који се састоји од трезорских врата и модула E, и в) *део десно од ћрезорских вратића* који се састоји од модула A и A1. Као и у претходној варијанти, лева страна предњег зида се модулом B1 спаја са модулом A левог бочног зида а десна страна предњег зида се модулом A1 спаја са модулом B2 десног бочног зида. Предњи зид се целом дужином спаја са свим подним модулима.
3. *Десни бочни зид* се формира од модула B2 и A. Са предњим и задњим зидом повезује се модулима B2 и B3 док се за под спаја помоћу модула C.
4. *Задњи зид* се формира од модула B3 и A. Са бочним зидовима се повезује модулима B3 и B2 а за под је спојен са свим подним модулима.
5. *Леви бочни зид* је идентичан као и десни. Са предњим и задњим зидовима повезује се модулима B1 и B2 док се за под спаја помоћу модула Cz.
6. Ова фаза је иста као код претходне платформе (*ћлафон* се формира од истих модула као и *ћог*: Cz, D и C и повезује се са свим модулима од којих су направљени зидови МТП).



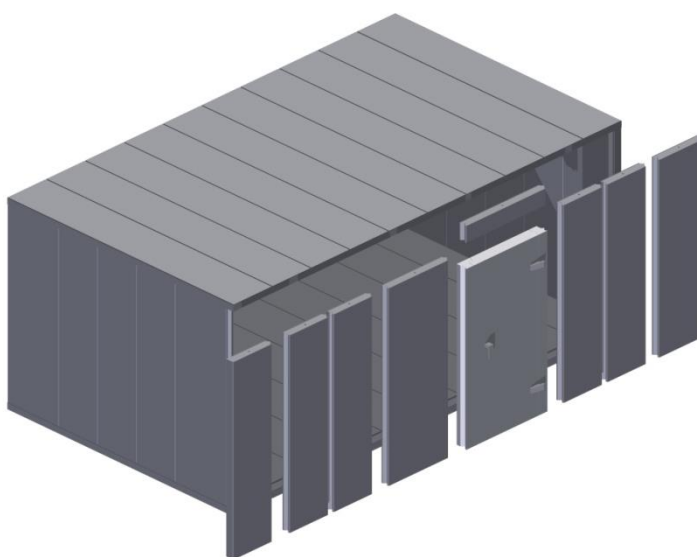
Слика 4.19 – Шема новог поступка конфигурације МТП

### 4.3.2. Прорачун основних параметара модула и производа

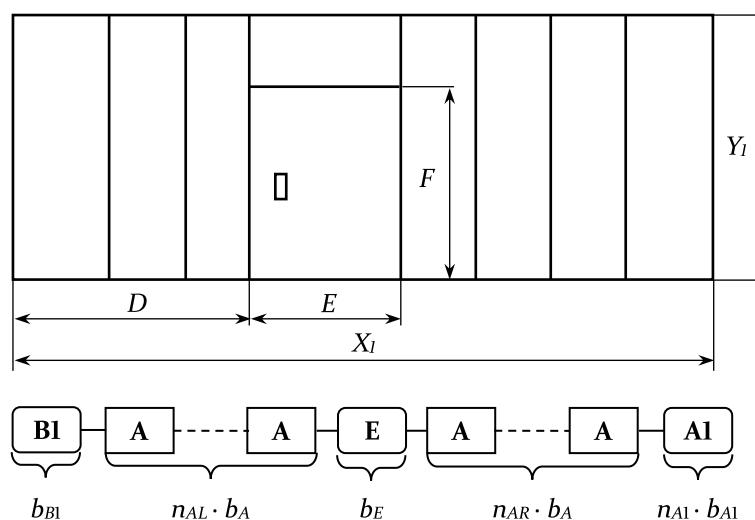
У односу на претходну платформу, више се не користи фиксна стандардна ширина модула  $A$  и  $D$  већ се рачуна оптимална ширина сваког модула. На основу предложене методологије у наставку се даје прорачун основних параметара свих модула за све странице  $МТП$ .

#### 4.3.2.1. Прорачун параметара модула за предњи зид

Основни параметри предњег зида и структура модула од којих се састоји предњи зид су приказани на сликама 4.20. и 4.21.



Слика 4.20 – 3D приказ растављеног предњег зида  $МТП$



Слика 4.21 – Структура и параметри предњег зида  $МТП$

Неки од параметара предњег зида добијају се директно из захтева купца ( $E$ ,  $F$ ,  $D$  и  $d$ ), док је остале параметре потребно израчунати помоћу следећих израза:

$$X_1 = A - d, \quad (4.12)$$

$$Y_1 = C - 2 \cdot (d - d_p), \quad (4.13)$$

$$b_E = E, \quad (4.14)$$

$$l_A = l_{A1} = l_{B1} = Y_1, \quad (4.15)$$

$$l_E = Y_1 - F, \quad (4.16)$$

$$n_{B1} = 1, \quad (4.17)$$

где су:

- $b_A$  - ширина модула **A**,
- $b_{A1}$  - ширина модула **A1**,
- $b_{B1}$  - ширина модула **B1**,
- $n_{AL}$  - број модула **A** са леве стране у односу на врата и модул **E**,
- $n_{AR}$  - број модула **A** са десне стране у односу на врата и модул **E**,
- $n_{A1}$  - број модула **A1**,
- $n_{B1}$  - број модула **B1** (обавезан модул који спаја предњи зид и леви бочни зид) ,
- $l_A = l_{A1} = l_{B1}$  - дужине модула **A**, **A1**, и **B1**,
- $X_1$  - дужина предњег и задњег зида и
- $Y_1$  - висина свих зидова.

Ограничења која се при том морају испунити су:

$$D + E + n_{AR} \cdot b_A + n_{A1} \cdot b_{A1} = A - d, \quad (4.18)$$

$$b_{B1} + n_{AL} \cdot b = D, \quad (4.19)$$

$$b_{\min} \leq b_A \leq b_{\max}, \quad (4.20)$$

$$b_{\min} \leq b_{A1} \leq b_{\max}, \quad (4.21)$$

$$b_{\min} \leq b_{B1} \leq b_{\max}, \quad (4.22)$$

$$n_{AL} \geq 0, \quad (4.23)$$

$$n_{AR} \geq 0, \quad (4.24)$$

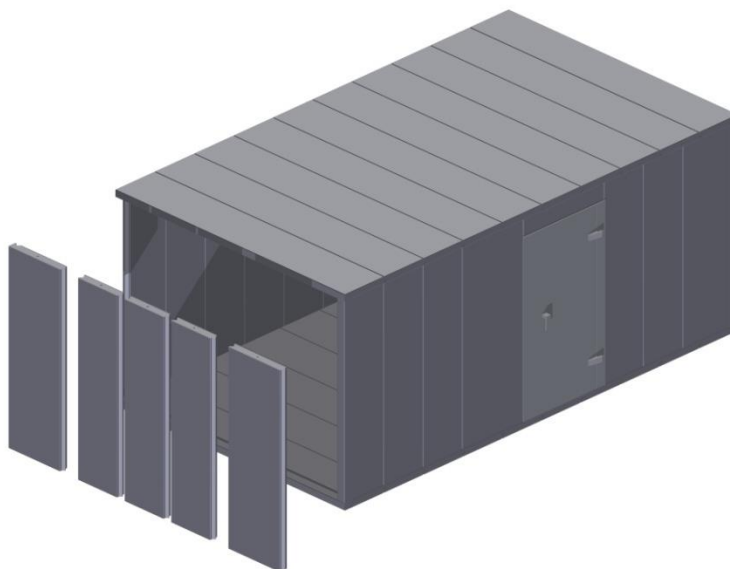
$$0 \leq n_{A1} \leq 1, \quad (4.25)$$

$$n_i = \text{int}, \quad (4.26)$$

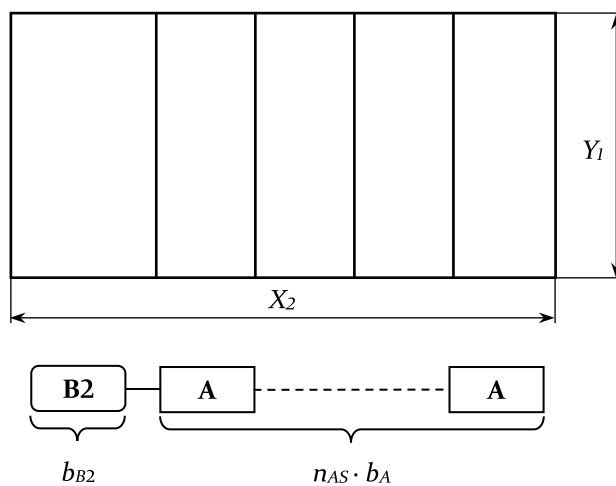
$$b_i = \text{int}[\text{mm}]. \quad (4.27)$$

## 4.3.2.2. Прорачун параметара модула за бочне зидове

Основни параметри бочног зида и структура модула од којих се он састоји су приказани на сликама 4.22. и 4.23.



Слика 4.22 – 3D приказ растављеног бочног зида МТП



Слика 4.23 – Структура и параметри бочног зида МТП

За потпуно дефинисање бочног зида потребно је прорачунати параметре помоћу следећих израза:

$$X_2 = B - d, \quad (4.28)$$

$$l_A = l_{B2} = Y_1, \quad (4.29)$$

$$n_{B2} = 1, \quad (4.30)$$

где су:

- $b_{B2}$  – ширина модула **B2**,
- $n_{AS}$  – број модула **A** на једном бочном зиду,
- $n_{B2}$  – број модула **B2** (обавезан модул који спаја предњи зид и десни бочни зид, и задњи зид и леви бочни зид),
- $l_{B2}$  – дужина модула **B2** и
- $X_2$  – дужина једног бочног зида.

Ограничења су дефинисана следећим изразима:

$$b_{B2} + n_{AS} \cdot b = B - d, \quad (4.31)$$

$$b_{\min} \leq b_A \leq b_{\max}, \quad (4.32)$$

$$b_{\min} \leq b_{B2} \leq b_{\max}, \quad (4.33)$$

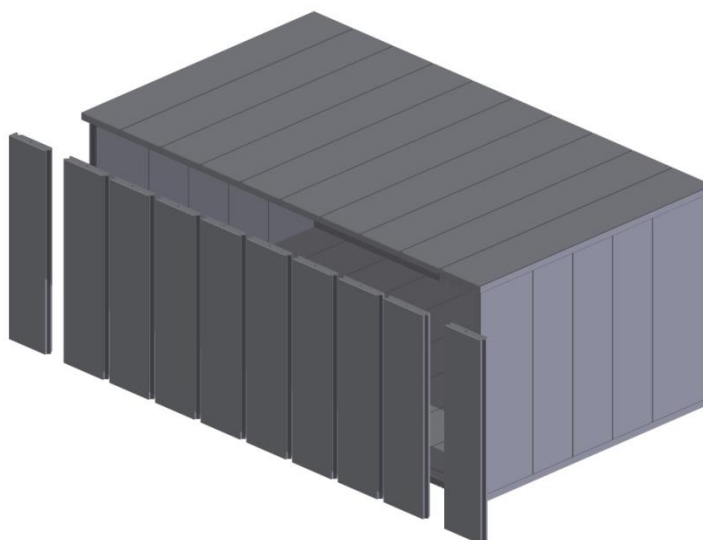
$$n_{AS} \geq 0, \quad (4.34)$$

$$n_i = \text{int}, \quad (4.35)$$

$$b_i = \text{int}[\text{mm}]. \quad (4.36)$$

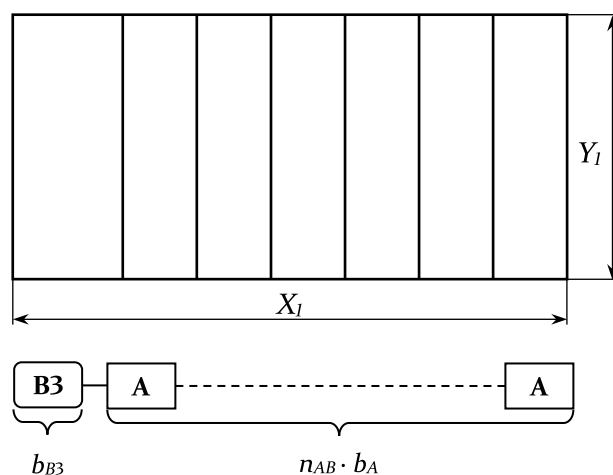
#### 4.3.2.3. Прорачун параметара модула за задњи зид

Основни параметри задњег зида и структура модула од којих се он састоји су приказани на сликама 4.24. и 4.25.



Слика 4.24 – 3D приказ растављеног задњег зида МТП





Слика 4.25 – Структура и параметри задњег зида МТП

Основне димензије задњег зида ( $X_1$  и  $Y_1$ ) одређују се на исти начин као и код предњег зида (једначине 4.12 и 4.13). За потпуно дефинисање задњег зида потребно је дефинисати следеће:

$$l_A = l_{B3} = Y_1, \quad (4.37)$$

$$n_{B3} = 1, \quad (4.38)$$

где су:

- $b_{B3}$  – ширина модула **ВЗ**,
- $n_{AB}$  – број модула **А** на задњем зиду,
- $n_{B3}$  – број модула **ВЗ** (обавезан модул који спаја задњи зид и леви бочни зид) и
- $l_{B3}$  – дужина модула **ВЗ**.

Ограничења која се при том морају испунити су:

$$b_{B3} + n_{AB} \cdot b_A = A - d, \quad (4.39)$$

$$b_{\min} \leq b_A \leq b_{\max}, \quad (4.40)$$

$$b_{\min} \leq b_{B3} \leq b_{\max}, \quad (4.41)$$

$$n_{AB} \geq 0, \quad (4.42)$$

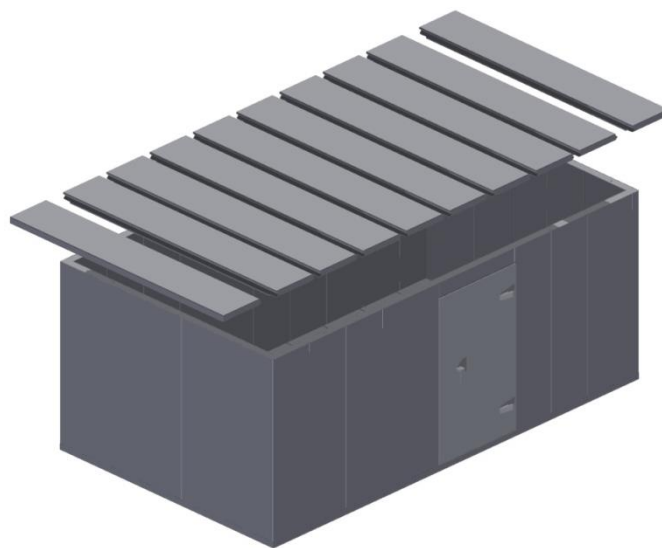
$$n_i = \text{int}, \quad (4.43)$$

$$b_i = \text{int}[\text{mm}]. \quad (4.44)$$

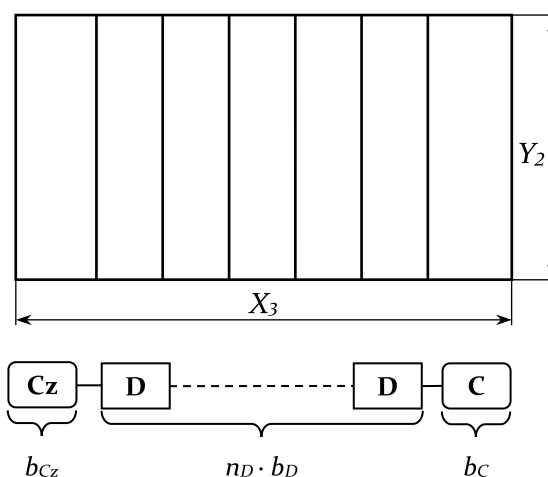
#### 4.3.2.4. Прорачун параметара модула за под и плафон

Иако је процес конфигурисања пода/плафона исти као и код претходне платформе, више се не користи фиксна стандардна ширина модула **D** већ се рачуна њена оптимална

ширина због чега је неопходно применити нови прорачун. Како су стране пода и плафона идентичне приказаће се прорачун само за плафон. Основне димензије и структура модула од којих се састоји плафон су приказани на сликама 4.26. и 4.27.



Слика 4.26 – 3D приказ растављеног плафона МТП



Слика 4.27 – Структура и параметри плафона МТП

Задржано је правило да се подни и плафонски модули својом дужином постављају у правцу краћег зида МТП те је прорачун параметара, потребних за потпуно дефинисање пода и плафона, следећи:

$$X_3 = \begin{cases} B; \text{ IF}(B \leq A \text{ и } A \leq C_{\max}) \\ A; \text{ IF}(B \leq A) \text{ или } \text{IF}(A < B \text{ и } B \leq C_{\max}), \\ B; \text{ у осталим случајима} \end{cases} \quad (4.45)$$

$$Y_2 = \begin{cases} A; \text{ IF}(B \leq A \text{ и } A \leq C_{\max}) \\ B; \text{ IF}(B \leq A) \text{ или } \text{IF}(A < B \text{ и } B \leq C_{\max}), \\ A; \text{ у осталим случајима} \end{cases} \quad (4.46)$$

$$l_D = l_C = l_{Cz} = Y_2, \quad (4.47)$$

$$n_C = n_{Cz} = 1, \quad (4.48)$$

где су:

- $b_D$  – стандардна ширина модула **D**,
- $b_C$  – ширина модула **C**,
- $b_{Cz}$  – ширина модула **Cz**,
- $n_D$  – број модула **D** на плафону (исти број је и на поду),
- $n_C$  – број модула **C** (обавезани модул који спаја плафон са осталим зидовима),
- $n_{Cz}$  – број модула **Cz** (обавезани модул који спаја плафон са осталим зидовима),
- $l_D = l_C = l_{Cz}$  – дужина модула **D**, **C** и **Cz**,
- $X_3$  – дужина плафона и
- $Y_2$  – ширина плафона.

Ограничења која се при том морају испунити су:

$$b_C + n_D \cdot b_D + b_{Cz} = X_3, \quad (4.49)$$

$$b_{\min} \leq b_D \leq b_{\max}, \quad (4.50)$$

$$b_{\min} \leq b_C \leq b_{\max}, \quad (4.51)$$

$$b_{\min} \leq b_{Cz} \leq b_{\max}, \quad (4.52)$$

$$n_D \geq 0, \quad (4.53)$$

$$n_i = \text{int}, \quad (4.54)$$

$$b_i = \text{int}[\text{mm}]. \quad (4.55)$$

#### 4.3.2.5. Укупан број модула за формирање *МТП*

Како је већ наглашено да се поједине странице појављују више пута (два идентична бочна зида, као и идентични под и плафон) то се бројеви модула од којих се формирају те странице морају дуплирати. С обзиром да се модул **A** налази на свим зидовима његов укупан број се добија као збир броја модула потребних за формирање сваког зида.

Укупни бројеви модула потребни за формирање целог *МТП* су:

$$N_A = n_{AL} + n_{AR} + 2 \cdot n_{AS} + n_{AB}, \quad (4.56)$$

$$N_{A1} = n_{A1}, \quad (4.57)$$

$$N_{B1} = n_{B1}, \quad (4.58)$$

$$N_{B2} = 2 \cdot n_{B2}, \quad (4.59)$$

$$N_{B3} = n_{B3}, \quad (4.60)$$

$$N_C = 2 \cdot n_C, \quad (4.61)$$

$$N_{Cz} = 2 \cdot n_{Cz}, \quad (4.62)$$

$$N_D = 2 \cdot n_D, \quad (4.63)$$

$$N_E = n_E, \quad (4.64)$$

где су:

- $N_A$  – укупан број модула **A**,
- $N_{A1}$  – укупан број модула **A1**,
- $N_{B1}$  – укупан број модула **B1**,
- $N_{B2}$  – укупан број модула **B2**,
- $N_{B3}$  – укупан број модула **B3**,
- $N_C$  – укупан број модула **C**,
- $N_{Cz}$  – укупан број модула **Cz**,
- $N_D$  – укупан број модула **D** и
- $N_E$  – укупан број модула **E**.

Применом унапређене платформе сада је могуће извршити оптимизацију конфигурације производа. Проблем се своди на израчунавање параметара модула *МТП* којима се остварује оптимално решење. Иако се располагало експлицитно дефинисаним функцијама циља избегнута је примена метода вишециљног одлучивања са бесконачним бројем алтернатива јер би такво решење било практично неизводљиво. Зато је проблем решен методама вишеатрибутивног одлучивања где су променљиве дефинисане дискретно а проблем сведен на избор оптималне конфигурационе варијанте из коначног броја алтернатива.

#### 4.4. Зашто модуларне трезорске просторије?

На крају овог поглавља је упутно образложити зашто су модуларне трезорске просторије одабране као репрезент сложеног производа на коме је извршена верификација и валидација развијеног модела.

Пре свега, *МТП* испуњава све критеријуме које треба да има један производ да би се сматрао сложеним техничким производом а то су:

- Испуњава основну функцију за коју је намењен а то је противпровална сигурност. Осим тога, *МТП* испуњава и допунске функције: опремање противпровалним

алармним системима, видео надзором, вентилацијом, осветљењем и унутрашњом опремом за смештај драгоцености. Конструкциона решења су усклађена са стандардом EN 1143-1 а *МТП* може имати и посебне функције као што су противпожарна сигурност, заштита од продора воде и различитих врста зрачења те се с правом може сматрати да поседује **функционалну сложеност**.

- То је **структурно сложен систем** који се састоји се од великог броја делова, склопова и модула. Формира се од 6 основних типова модула али изведене варијанте имају по неколико десетина уграђених модула а код појединих изведених решења овај број често буде и троцифрен. Структура је модуларна а модули су повезани одговарајућим типовима веза. Користи се велики број разноврсних материјала као што су различити челици, иверица, корунд бетон и др. Производ је великих димензија, модули су масивни а геометријска конфигурација је често изузетно сложена. Саставни део *МТП* чине и трезорска врата која се посебно наручују и која могу бити у сасвим другом степену отпорности што додатно усложњава структуру *МТП*.
- Компактност објекта се остварује међусобним заваривањем модула при чему постоји шест основних типова веза. Трезорска врата која се уграђују у *МТП* имају додатне везе које је потребно остварити. Међутим, постоји и мноштво других веза у зависности од додатних захтева купца (унутрашње и спољашње облоге, вентилација, грејање...) а за обимније објекте се мора радити носећа потконструкција која додатно усложњава међусобне везе компоненти производа те се може констатовати да постоји и **сложеност интеракција између елемената**.
- Сертификовани *МТП* МОДУЛПРИМ имају десет различитих модела (раде се у степену отпорности од 0 до IX) унутар којих постоје додатне конструкционе подваријанте. Облик трезорске просторије се прилагођава расположивом простору уградње тако да је број различитих варијанти производа практично неограничен. Често се захтева да *МТП* има више трезорских врата што додатно повећава **варијабилну сложеност производа**.
- Осим сложености производа **сложени су и разноврсни процеси** израде и монтаже, велики је број подржаних технологија са различитим нивоом сложености почев од мануелних радова на склапању, бетонирању, фарбању и паковању до *CNC* обраде на ласеру, роботског заваривања, справљења смеша за испуну модула по специјалним рецептурама па до уградње најсавременијих противпровалних алармних система. Самим тим је знатна и **организациона сложеност** која треба да обезбеди и координира рад различитих врста ресурса.

С друге стране, *МТП* се раде по индивидуалним захтевима купца тако да су идеалан представник на коме се може демонстрирати стратегија примене *МС*.

За *МТП* се не исплати израда физичког прототипа јер је свака нова *МТП* другачија и захтева другачију комбинацију модула и њихових димензија. Дигитална/виртуелна

верификација путем моделирања и симулације је боље решење и знатно смањује трошкове израде и монтаже.

Применом нове развијене платформе производа могуће је додатно разрадити **велики број различитих конфигурација МТП** које задовољавају дефинисане захтеве. То је додатна могућност да се осмисли модел оптимизације односно, избора конфигурације из мноштва могућих решења која је оптимизована са аспекта времена, трошкова и квалитета.

И свакако последњи, али не мање значајан, разлог је што Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву има дугогодишњу плодну сарадњу са привредним друштвом „Примат опрема“ доо, Бањевац која је обезбедила приступ документацији, конструкционим решењима и увид у коришћене технологије и процесе израде и монтаже.

ПОГЛАВЉЕ

# 5

---

## **ГЕНЕРИСАЊЕ АЛТЕРНАТИВА И ДЕФИНИСАЊЕ КРИТЕРИЈУМСКИХ ФУНКЦИЈА**

Најкомплекснији задатак развијеног модела је генерисање могућих конфигурација производа тј. алтернатива и дефинисање критеријумских функција. Зато су у овом поглављу детаљно обрађена оба поступка на примеру МТП МОДУЛПРИМ.

## 5.1. Генерисање алтернатива

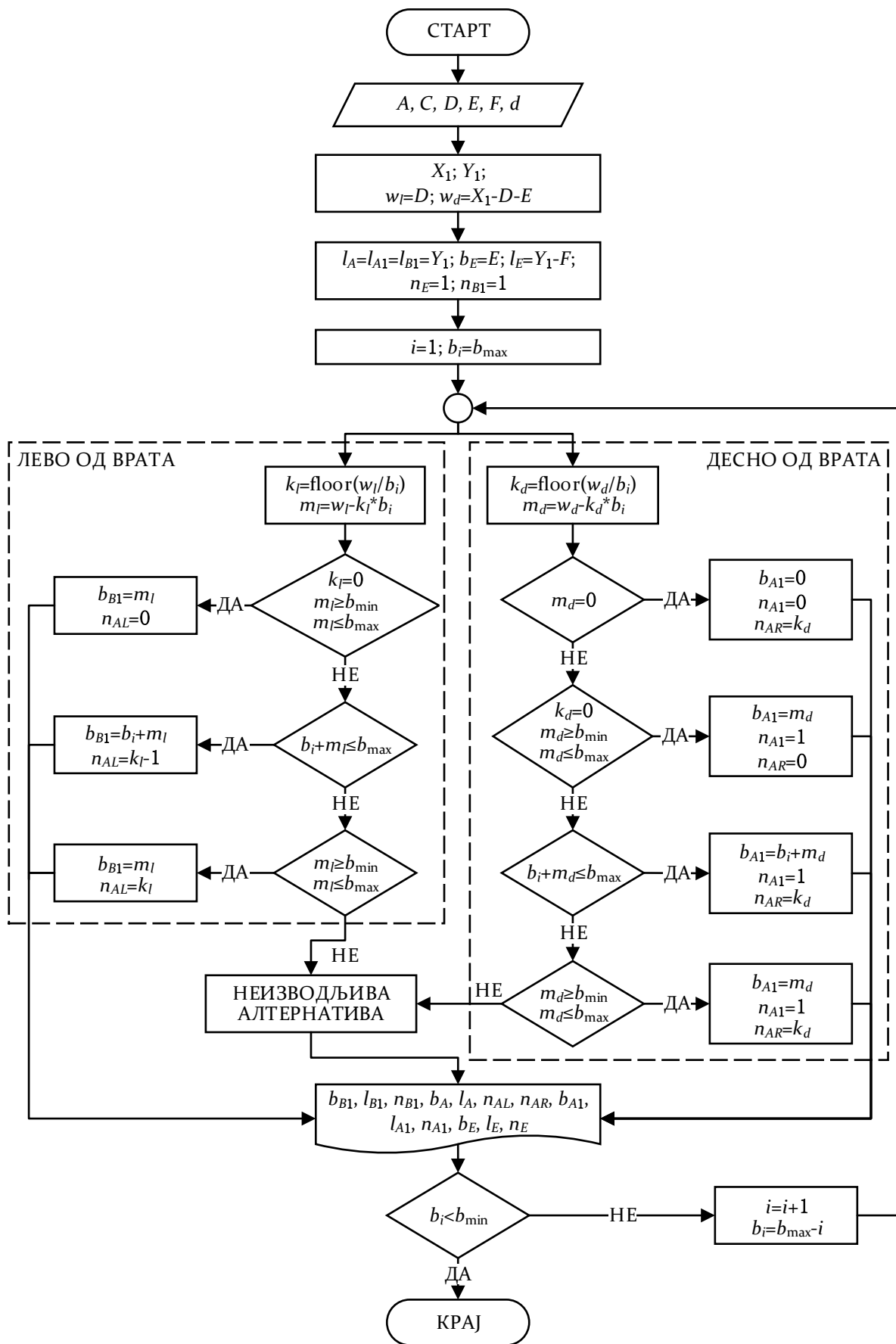
Генерисање изводљивих алтернатива са припадајућим параметрима на основу којих је могуће пројектовати производ, његове модуле и компоненте у модулу 6 као и технолошке процесе за израду и монтажу у модулу 4, је задатак концептуалног конфигуратора (модул 2). На основу приказане шеме конфигурисања и ограничења производа, представљених у оквиру унапређене платформе за конфигурисање МТП (Поглавље 4.3), развијени су алгоритми за генерисање изводљивих алтернатива за све зидове, под и плафон.

Техничким ограничењима је дефинисано да се ширина модула мора налазити у интервалу од 400 mm ( $b_{\min}$ ) до 850 mm ( $b_{\max}$ ), да је максимална дужина модула 6000 mm ( $l_{\max}$ ), да се висина МТП налази у интервалу од 2000 mm ( $C_{\min}$ ) до 2950 mm ( $C_{\max}$ ) и да преклапање подних/плафонских модула са зидним модулима износи 20 mm ( $d_p$ ). Да би се израчунала оптимална ширина стандардног модула (код зидова то је модул А а код пода/плафона модул D) испитају се све вредности у распону од  $b_{\min}$  до  $b_{\max}$  са кораком од 1 mm (како би се добиле целобројне вредности у mm). Максималан број технички изводљивих алтернатива за сваки зид се добија помоћу израза  $i=b_{\max}-b_{\min}+1$ , што у овом случају износи 451 алтернатива. Исти максималан број алтернатива је могуће генерисати и за под и плафон.

Како се цео МТП састоји из 4 комплетно различите странице (предњи зид, бочни зидови, задњи зид и под и плафон) то је за сваку страницу развијен посебан алгоритам.

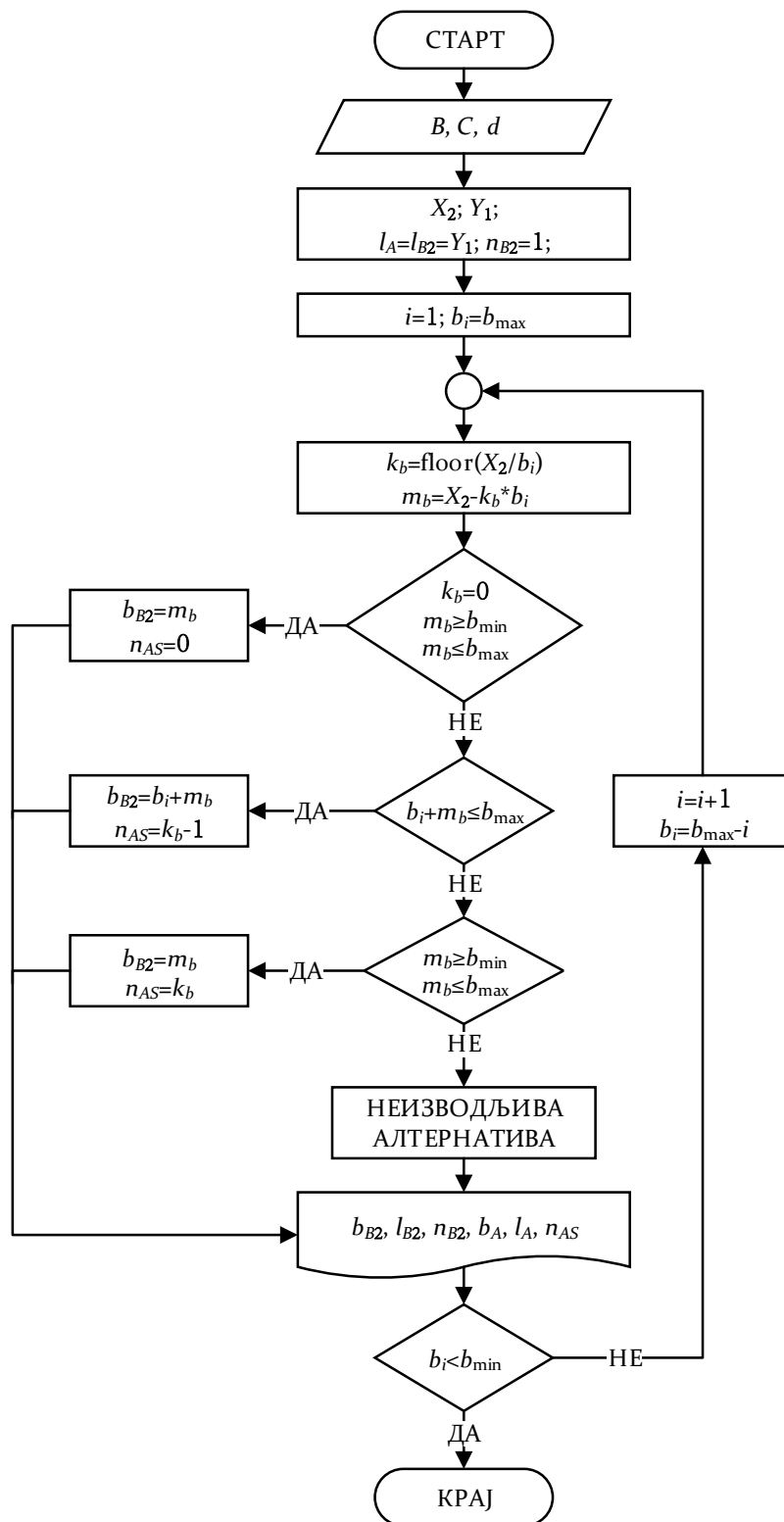
На основу формула и ограничења наведених у поглављу 4.3, формиран је алгоритам за генерисање алтернатива за предњи зид (слика 5.1). На основу улазних података одређују се основне димензије предњег зида неопходне за даљи прорачун. Након тога се генерише ширина модула А за прву алтернативу ( $i=1$ ;  $b_i=b_{\max}$ ). Како се предњи зид дели на два дела: лево од врата и десно од врата, уведени су параметри: ширина зида лево од трезорских врата ( $w_l$ ) и ширина зида десно од трезорских врата ( $w_d$ ). Даље се рачуна максималан број ( $k_l$  и  $k_d$ ) модула А, ширине  $b_i$ , који се може распоредити на ширине  $w_l$  и  $w_d$ , као и остатак при њиховом распоређивању ( $m_l$  и  $m_d$ ). На основу претходних параметара прорачунава се структура алтернативе и изводљивост исте. Након снимања изводљиве алтернативе генеришу се нове ширине ( $i=i+1$ ;  $b_i=b_{\max}-i$ ) и понавља се поступак све док не буде  $b_i < b_{\min}$ .





Слика 5.1 – Алгоритам за генерисање алтернатива за предњи зид

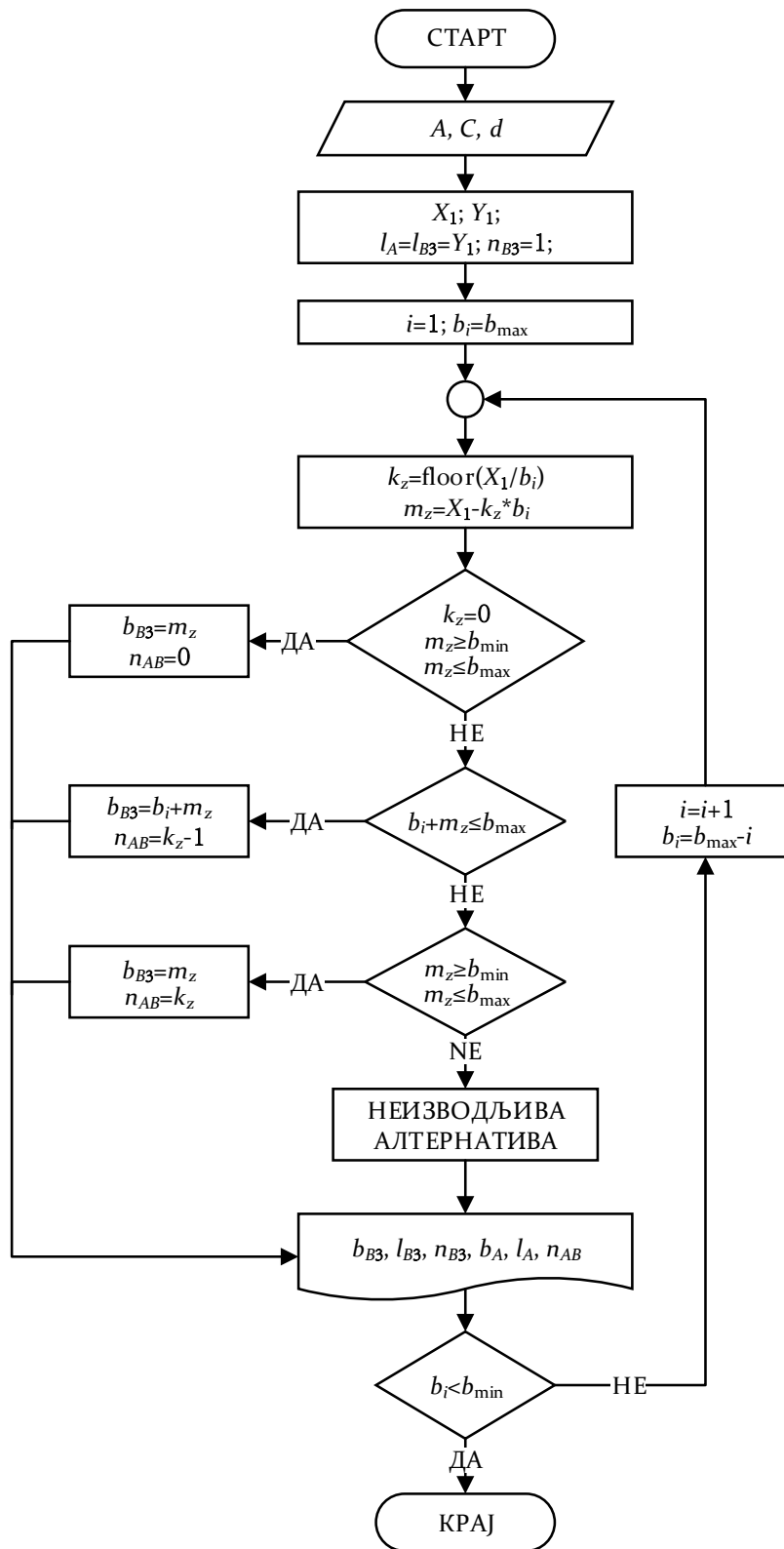
На основу формула и ограничења наведених у поглављу 4.3, формиран је алгоритам за генерисање алтернатива за бочне зидове (слика 5.2).



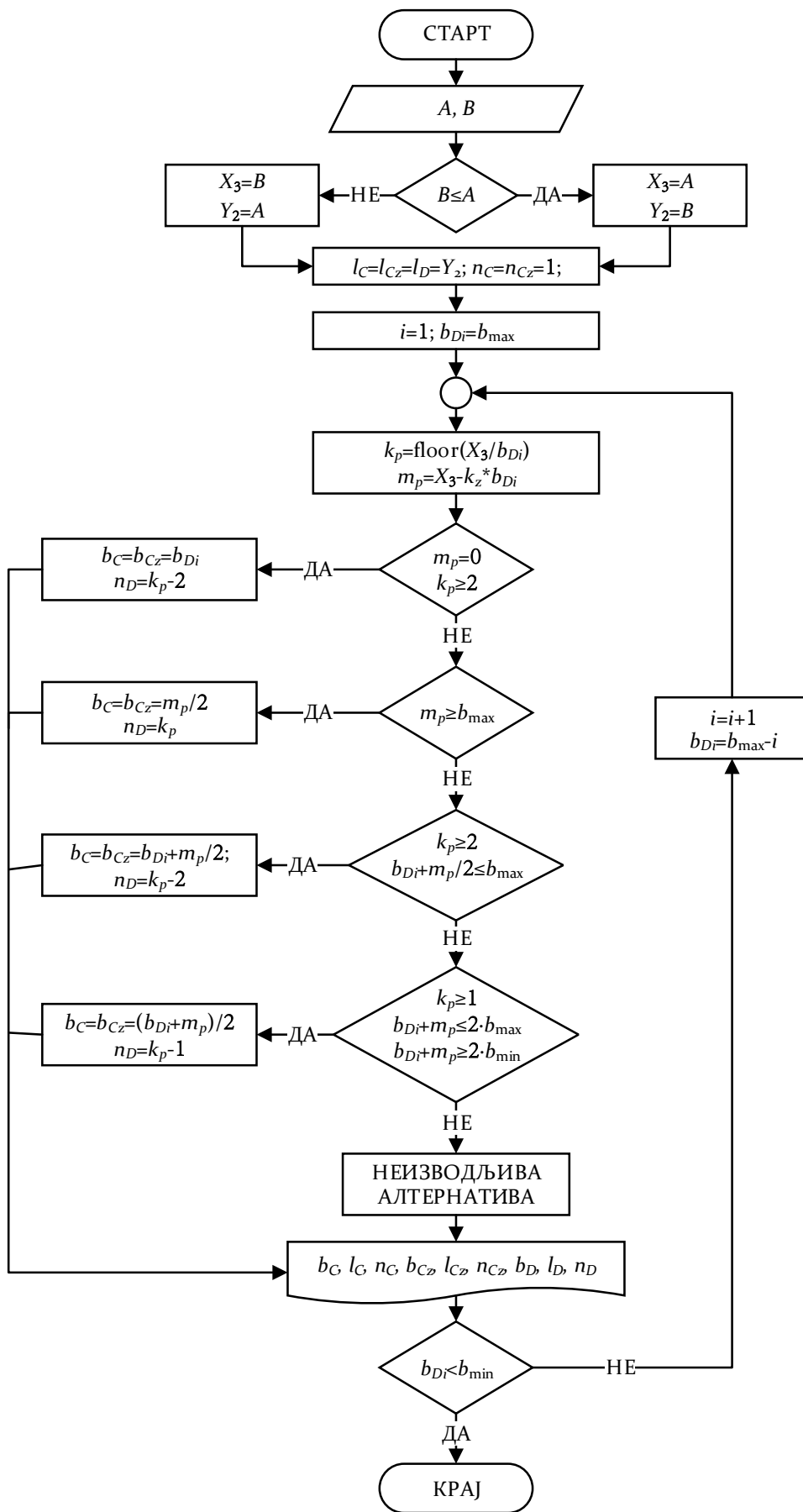
Слика 5.2 – Алгоритам за генерисање алтернатива за бочне зидове

На основу улазних података одређују се основне димензије бочног зида неопходне за даљи прорачун. Након тога се генерише ширина модула  $A$  за прву алтернативу ( $i=1$ ;  $b_i=b_{\max}$ ). Даље се рачуна максималан број ( $k_b$ ) модула  $A$ , ширине  $b_i$ , који се може

распоредити на ширину бочног зида ( $X_2$ ), као и остатак при њиховом распоређивању ( $m_b$ ). На основу тих параметара прорачунава се структура алтернативе и њена изводљивост. Након снимања изводљиве алтернативе прелази се на генерисање нове ширине ( $i=i+1$ ;  $b_i=b_{\max}-i$  [mm]) и понавља се поступак све док  $b_i$  не буде  $b_i < b_{\min}$ .



Слика 5.3 – Алгоритам за генерисање алтернатива за задњи зид



Слика 5.4 – Алгоритам за генерисање алтернатива за под и плафон

Поступак генерисања алтернатива за задњи зид, под и плафон је сличан као и код бочних зидова и алгоритми приказани на сликама 5.3 и 5.4 су такође формирану на основу формула и ограничења дефинисаних у поглављу 4.3.

При имплементацији предложених алгоритама, у софтверском пакету *MATLAB*, алгоритми за све зидове су реализовани у склопу једног кода. Изглед кода за генерисање алтернатива за зидове је дат на слици 5.5., а за под и плафон на слици 5.6.

```
function [podaci_zid,Lz,LE]=alternative_ZID(A,B,C,D,E,F,d)
Lz=C-2*(d-20);
LE=Lz-F;
Wl=D;
Wd=A-d-D-E;
Wb=B-d;
Wz=A-d;
b=850;
podaci_zid=zeros(451,10);
for ii=1:451
    kl=floor(Wl/b);kd=floor(Wd/b);kb=floor(Wb/b);kz=floor(Wz/b);
    ml=Wl-kl*b;md=Wd-kd*b;mb=Wb-kb*b;mz=Wz-kz*b;
    switch true
        case (kl==0 && ml>=400 && ml<=850)
            bB1=ml; nAL=0;
            podaci_zid(ii,[1 3 6])=[b bB1 nAL];
        case (b+ml<=850)
            bB1=b+ml; nAL=kl-1;
            podaci_zid(ii,[1 3 6])=[b bB1 nAL];
        case (ml>=400 && ml<=850)
            bB1=ml; nAL=kl;
            podaci_zid(ii,[1 3 6])=[b bB1 nAL];
        otherwise
            podaci_zid(ii,1)=0;
    end
    switch true
        case (md==0)
            bA1=0; nA1=0; nAR=kd;
            podaci_zid(ii,[2 7 10])=[bA1 nAR nA1];
        case (kd==0 && md>=400 && md<=850)
            nA1=1; bA1=md; nAR=0;
            podaci_zid(ii,[2 7 10])=[bA1 nAR nA1];
        case (b+md<=850)
            nA1=1; bA1=b+md; nAR=kd-1;
            podaci_zid(ii,[2 7 10])=[bA1 nAR nA1];
        case (md>=400 && md<=850)
            nA1=1; bA1=md; nAR=kd;
            podaci_zid(ii,[2 7 10])=[bA1 nAR nA1];
        otherwise
            podaci_zid(ii,1)=0;
    end
    switch true
        case (kb==0 && mb>=400 && mb<=850)
            bB2=mb; nAS=0;
            podaci_zid(ii,[4 8])=[bB2 nAS];
        case (b+mb<=850)
            bB2=b+mb; nAS=2*(kb-1);
            podaci_zid(ii,[4 8])=[bB2 nAS];
        case (mb>=400 && mb<=850)

```

Слика 5.5 – *MATLAB* програмски код за генерисање алтернатива за зидове

```
        bB2=mb; nAS=2*kb;
        podaci_zid(ii, [4 8])=[bB2 nAS];
    otherwise
        podaci_zid(ii,1)=0;
end
switch true
    case (kz==0 && mz>=400 && mz<=850)
        bB3=mz; nAB=0;
        podaci_zid(ii, [5 9])=[bB3 nAB];
    case (b+mz<=850)
        bB3=b+mz; nAB=kz-1;
        podaci_zid(ii, [5 9])=[bB3 nAB];
    case (mz>=400 && mz<=850)
        bB3=mz; nAB=kz;
        podaci_zid(ii, [5 9])=[bB3 nAB];
    otherwise
        podaci_zid(ii,1)=0;
end
b=850-ii;
podaci_zid(podaci_zid(:, 1)== 0, :)= [];
end
```

**Слика 5.5** – *MATLAB* програмски код за генерисање алтернатива за зидове (наставак)

```

function [podaci_pod, Lp, OPP]=Alternative_POD(A,B,C,D,E,F,d)
if B<=A
    if A>2950
        Wp=A;
        Lp=B;
        OPP=1;
    else
        Wp=B;
        Lp=A;
        OPP=0;
    end
else
    if B>2950
        Wp=B;
        Lp=A;
        OPP=0;
    else
        Wp=A;
        Lp=B;
        OPP=1;
    end
end
bD=850;
podaci_pod=zeros(451,4);
for ii=1:451
    kp=floor(Wp/bD);
    mp=Wp-kp*bD
    switch true
        case (mp==0 && kp>=2)
            bC=bD; bCz=bD; nD=2*(kp-2);
            podaci_pod(ii,1:4)=[bC bCz bD nD];
        case (mp>=800)
            bC=mp/2; bCz=mp/2; nD=2*kp;
            podaci_pod(ii,1:4)=[bC bCz bD nD];
        case (bD+mp/2<=850 && kp>=2)
            bC=bD+mp/2; bCz=bD+mp/2; nD=2*(kp-2);
            podaci_pod(ii,1:4)=[bC bCz bD nD];
        case (bD+mp<=1700 && bD+mp>=800 && kp>=1)
            bC=(bD+mp)/2; bCz=(bD+mp)/2; nD=2*(kp-1);
            podaci_pod(ii,1:4)=[bC bCz bD nD];
        otherwise
            podaci_pod(ii,1:4)=zeros(1,4);
    end
    if mod(podaci_pod(ii,1:2), 1) > 0
        podaci_pod(ii,1:2)=zeros(1,2);
    else
        podaci_pod(ii,1:2)=podaci_pod(ii,1:2);
    end
    bD=850-ii;
end
podaci_pod(podaci_pod(:, 1)== 0, :)= [];
end

```

Слика 5.6 – MATLAB програмски код за генерисање алтернатива за под и плафон

## 5.2. Критеријумске функције

За *МТП* типа МОДУЛПРИМ су усвојени следећи критеријуми на основу којих треба одабрати најповољнију конфигурацију производа:

1. укупно време израде и монтаже *МТП*,
2. укупни производни трошкови и
3. параметри квалитета *МТП*:
  - укупан број грешака на свим модулима и
  - укупан збир максималних грешака одступања од равности површине свих модула.

Критеријумске функције за укупно време израде и монтаже и укупне производне трошкове се дефинишу у модулу 4 (*ПТП* конфигуратор) на основу:

- параметара производа (димензије модула и компоненти, обима и површина) и спецификације материјала из модула 2,
- стандардних технолошких поступака обраде, норматива времена и цене материјала и рада и
- прорачуна потребног броја табли лима за израду свих позиција модула на основу посебног алгорита и програма развијеног у софтверском пакету *MATLAB*.

Сви елементи функција циља се израчунавају параметарски у зависности од димензија модула, димензија компоненти и броја модула.

### 5.2.1. Прорачун времена израде и монтаже *МТП*

Укупно време израде и монтаже *МТП* ( $T_{UK}$ ) које је меродавно за оптимизацију се одређује као:

$$T_{UK} = T_{SE\check{C}} + T_{SAV} + T_{SKL} + T_{BI\check{C}} + T_{MFR} + T_{PAL} + T_{PAK} + T_{MON} \text{ [h]}, \quad (5.1)$$

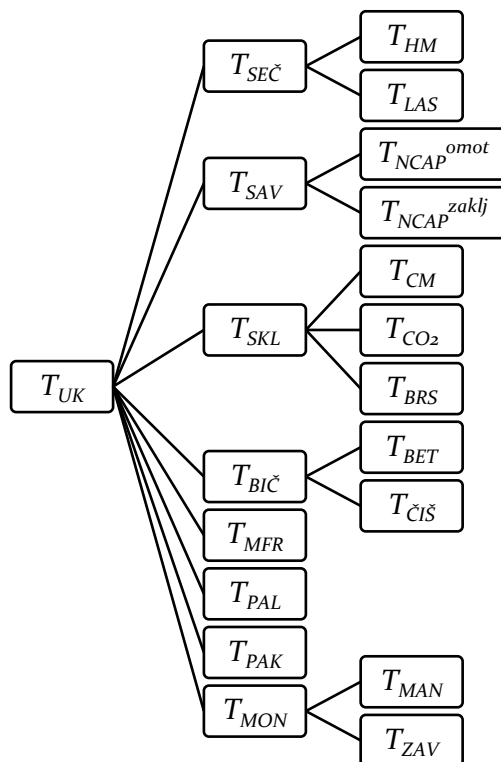
где су:  $T_{SE\check{C}}$  - укупно време сечења,  $T_{SAV}$  - укупно време савијања,  $T_{SKL}$  - укупно време склапања,  $T_{BI\check{C}}$  - укупно време бетонирања и чишћења,  $T_{MFR}$  - укупно време одмашћивања и фарбања,  $T_{PAL}$  - укупно време израде палета,  $T_{PAK}$  - укупно време паковања и  $T_{MON}$  - укупно време монтаже.

Структура укупног времена израде и монтаже *МТП* је приказана на слици 5.7. и дефинисана је на основу стандардних операционих листа и карте тока процеса израде и монтаже *МТП*.

#### 5.1.1.1. Нормативи времена за израду и монтажу *МТП*

Детаљан прорачун времена према операцијама и машинама/радним местима урађен је на основу норматива рада приказаног у табели 5.1.





Слика 5.7 – Структура укупног времена израде и монтаже МТП

Табела 5.1 – Нормативи времена по операцијама и машинама

Ознака	Машина – радно место	Операција	Припремно завршно време $t_{pz}^i$ [h]	Комадно време $t_k^i$
HM	Хидрауличке маказе	Сечење на HM	$t_{pz}^{HM} = 0,46$	$t_k^{HM} = 0,07$ [h/m <sup>2</sup> ]
LAS	CNC машина за сечење ласером	CNC сечење	$t_{pz}^{LAS} = 0,15$	$t_k^{LAS} = \frac{1}{v}$ [h/m]
NCAP	NC преса	Савијање омотача	$t_{pz-omot}^{NCAP} = 0,2$	$t_k^{NCAP-omot} = 0,253$ [h/m <sup>2</sup> ]
		Савијање закључнице	$t_{pz-zaklj}^{NCAP} = 0,35$	$t_k^{NCAP-zaklj} = 0,0281$ [h/m <sup>2</sup> ]
CM	Црна монтажа	Склапање модула	-	$t_k^{CM} = 0,53$ [h/m <sup>2</sup> ]
CO <sub>2</sub>	Заваривање	Заваривање модула	-	$t_k^{CO_2} = 0,55$ [h/m]
BRS	Брушење	Брушење заварених спојева	-	$t_k^{BRS} = 0,26$ [h/m]
BIČ	Бетонирање и чишћење	Бетонирање	-	$t_k^{BET} = 0,8$ [h/m <sup>2</sup> ]
		Вађење модула и чишћење	-	$t_k^{CIS} = 0,12$ [h/m <sup>2</sup> ]
MFR	Фарбање	Одмашћивање и фарбање	-	$t_k^{MFR} = 0,32$ [h/m <sup>2</sup> ]
PAL	Палетарница	Израда палета	-	$t_k^{PAL} = 0,12$ [h/m <sup>2</sup> ]
PAK	Паковање	Паковање модула	-	$t_k^{PAK} = 0,13$ [h/m <sup>2</sup> ]
MON	Монтажа	Манипулација	-	$t_k^{MAN} = 1,98$ [h/m <sup>2</sup> ]
		Заваривање МТП	-	$t_k^{ZAV} = 0,55$ [h/m]

Као што се види из табеле 5.1, већина норматива зависи од дужине (сечења, заваривања, брушења) или површине трезорске просторије тј. збира површина свих модула *МТП*. Зато је неопходно дефинисати зависност укупне површине ( $P_{TP}$ ) свих модула *МТП* од геометријских параметара модула.

#### 5.1.1.2. Укупна површина свих модула *МТП*

Укупну површина ( $P_{TP}$ ) свих модула *МТП*, се добија помоћу израза:

$$P_{TP} = \sum_{i=1}^j P_i \cdot N_i \text{ [m}^2\text{]}, \quad (5.2)$$

где је:

- $j$  - укупан број различитих типова модула,
- $N_i$  - укупан број  $i$ -тог типа модула,
- $P_i$  - површина  $i$ -тог типа модула која се рачуна као:

$$P_i = \frac{l_i \cdot b_i}{10^6} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (5.3)$$

- $l_i$  [mm] – дужина  $i$ -тог типа модула и
- $b_i$  [mm] – ширина  $i$ -тог типа модула.

#### 5.1.1.3. Прорачун времена сечења материјала

Прва производна операција је сечење материјала (лима) која се изводи на две машине: хидрауличким макама - НМ (за сечење квадратних и правоугаоних делова) и CNC машини за сечење ласером (за сечење делова сложеног облика). Укупно време сечења материјала је:

$$T_{SEC} = T_{HM} + T_{LAS} \text{ [h]}, \quad (5.4)$$

где су:

- $T_{HM}$  [h] - укупно време сечења на НМ и
- $T_{LAS}$  [h] - укупно време сечења на ласеру.

Позиције које је потребно исећи (према шеми са слика 4.5 и 4.6) су:

- омотач модула,
- закључница лева и
- закључница десна.

Позиција која се сече на НМ је омотач модула. Како модули имају различиту геометрију потребно је увести коефицијент сложености сечења (табела 5.2.).

Табела 5.2 – Коефицијенти сложености сечења на НМ за омотач

Модул	Коефицијент сложености сечења омотача – $k_{HM}^i$
A	$k_{HM}^A = 1$
B	$k_{HM}^B = 1$
C	$k_{HM}^C = 1,5$
Cz	$k_{HM}^{Cz} = 1,5$
D	$k_{HM}^D = 1$
E	$k_{HM}^E = 1$

Укупно време потребно за сечење омотача на хидрауличким маказама је:

$$T_{HM} = t_{pz}^{HM} + t_k^{HM} \cdot \sum_{i=1}^j P_i \cdot N_i \cdot k_{HM}^i \quad [h], \quad (5.5)$$

где је  $k_{HM}^i$  - коефицијент сложености сечења на НМ за  $i$ -ти тип модула.

Због сложене спољашње контуре, закључнице модула (лева и десна) се секу на машини за сечење ласером. Облик закључнице зависи од типа модула при чему закључнице истог модула имају исти развијен облик, али се разликују у операцији савијања. Зато је потребно одредити дужине сечења за закључнице сваког модула, тј. одредити обим развијеног облика сваке закључнице.

Укупна дужина потребна за сечење свих закључница добија се као укупан обим закључница свих модула потребних за формирање МТП. Укупан обим свих закључница се добија као:

$$O_Z^{UK} = \sum_{i=1}^j n_i^{zaklj} \cdot O_Z^i \cdot N_i \quad [m], \quad (5.6)$$

где су:

- $n_i^{zaklj} = 2$  - број закључница  $i$ -тог типа модула по једном модулу (за све модуле је исти) и
- $O_Z^i [m]$  - обим развијене површине закључнице  $i$ -тог типа модула.

Укупно време потребно за сечење свих закључница на машини за сечење ласером се добија као:

$$T_{LAS} = t_{pz}^{LAS} + t_k^{LAS} \cdot O_Z^{UK} = t_{pz}^{LAS} + \frac{1}{v} \sum_{i=1}^j n_i^{zaklj} \cdot O_Z^i \cdot N_i \quad [h], \quad (5.7)$$

где је  $v [m/h]$  - брзина сечења CNC машине за сечење ласером.

Укупно време сечења за све позиције МТП се добија као збир једначина (5.5) и (5.7):

$$T_{SEC} = t_{pz}^{HM} + t_k^{HM} \cdot \sum_{i=1}^j P_i \cdot N_i \cdot k_{HM}^i + t_{pz}^{LAS} + \frac{1}{v} \sum_{i=1}^j n_i^{zaklj} \cdot O_Z^i \cdot N_i \text{ [h]}. \quad (5.8)$$

#### 5.1.1.4. Прорачун времена савијања

Следећа производна операција је савијање омотача и закључница која се изводи на нумерички управљаној хидрауличној преси за савијање (NCAP). Укупно време савијања се добија као:

$$T_{SAV} = T_{NCAP}^{omot} + T_{NCAP}^{zaklj} \text{ [h]}, \quad (5.9)$$

где су:

- $T_{NCAP}^{omot}$  [h] - укупно време савијања омотача и
- $T_{NCAP}^{zaklj}$  [h] - укупно време савијања закључница.

Због различитог броја савијања и сложености истих, код различитих омотача и различитих закључница, уведен је коефицијент сложености савијања (табела 5.3).

**Табела 5.3** – Коефицијенти сложености савијања на NCAP

Модул	Коефицијенти сложености савијања	
	$k_{SO}^i$ – омотач	$k_{SZ}^i$ – закључница
<b>A</b>	$k_{SO}^A = 1$	$k_{SZ}^A = 1$
<b>B</b>	$k_{SO}^B = 1,2$	$k_{SZ}^B = 1$
<b>C</b>	$k_{SO}^C = 0,8$	$k_{SZ}^C = 1,5$
<b>Cz</b>	$k_{SO}^{Cz} = 0,8$	$k_{SZ}^{Cz} = 1,5$
<b>D</b>	$k_{SO}^D = 1$	$k_{SZ}^D = 1,5$
<b>E</b>	$k_{SO}^E = 1$	$k_{SZ}^E = 1$

Укупно време потребно за савијање свих омотача добија се помоћу израза:

$$T_{NCAP}^{omot} = t_{pz-omot}^{NCAP} + t_{k-omot}^{NCAP} \cdot \sum_{i=1}^j k_{SO}^i \cdot P_i \cdot N_i \text{ [h]}. \quad (5.10)$$

Укупно време потребно за савијање свих закључница:

$$T_{NCAP}^{zaklj} = t_{pz-zaklj}^{NCAP} + t_{k-zaklj}^{NCAP} \cdot \sum_{i=1}^j k_{SZ}^i \cdot P_i \cdot N_i \text{ [h]}. \quad (5.11)$$

Сада се може написати да је укупно време савијања омотача и закључница свих модула МТП:

$$T_{SAV} = t_{pz-omot}^{NCAP} + t_{k-omot}^{NCAP} \cdot \sum_{i=1}^j k_{SO}^i \cdot P_i \cdot N_i + t_{pz-zaklj}^{NCAP} + t_{k-zaklj}^{NCAP} \cdot \sum_{i=1}^j k_{SZ}^i \cdot P_i \cdot N_i \text{ [h]}. \quad (5.12)$$

## 5.1.1.5. Прорачун времена склапања

После сечења и савијања се изводи операција склапања омотача модула, која се односи на спајање омотача са закључницама код сваког модула и састоји се из три подоперације: формирање омотача модула у прибору, заваривање и брушење заварених спојева. Формирање модула се изводи у помоћном прибору за који се омотач модула причвршћује заваривањем.

Укупно време склапања свих модула  $МТП$  је:

$$T_{SKL} = T_{CM} + T_{CO_2} + T_{BRS} \text{ [h]}, \quad (5.13)$$

где су:

- $T_{CM}$  [h] - укупно време потребно за формирање омотача свих модула,
- $T_{CO_2}$  [h] - укупно време потребно за заваривање и
- $T_{BRS}$  [h] - укупно време потребно за брушење свих заварених спојева.

Укупно време потребно за формирање омотача модула је дефинисано изразом:

$$T_{CM} = t_k^{CM} \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.14)$$

При склапању свих модула потребно је заварити закључнице за омотач и одговарајућу арматурну испуну унутар модула. Поред тога код подних и плафонских модула потребно је додатно заварити специјалне Z профиле.

Укупно време потребно за заваривање се добија као збир свих времена заваривања:

$$T_{CO_2} = T_{CO_2}^{zaklj} + T_{CO_2}^{arm} + T_{CO_2}^{ploče} + T_{CO_2}^{Zprof} = t_k^{CO_2} \cdot (L_{zav}^{zaklj} + L_{zav}^{arm} + L_{zav}^{ploče} + L_{zav}^{Zprof}) = t_k^{CO_2} \cdot L_{zav}^{UK} \text{ [h]}, \quad (5.15)$$

где је  $L_{zav}^{UK}$  - укупна дужина заваривања и добија се као:

$$L_{zav}^{UK} = L_{zav}^{zaklj} + L_{zav}^{arm} + L_{zav}^{Zprof} \text{ [m]}, \quad (5.16)$$

где су:

- $L_{zav}^{zaklj}$  [m] – укупна дужина заваривања свих закључница за  $МТП$ ,
- $L_{zav}^{arm}$  [m] – укупна дужина заваривања арматурне мреже на свим модулима  $МТП$  и
- $L_{zav}^{Zprof}$  [m] – укупна дужина заваривања Z профила код свих модула  $МТП$ .

И код процеса заваривања закључница за омотач уводи се коефицијент сложености заваривања закључница ( $k_{CO_2}^i$ ).

Табела 5.4 – Коефицијенти сложености заваривања закључница

Модул	Коефицијент сложености заваривања закључница
A	$k_{CO_2}^A = 1$
B	$k_{CO_2}^B = 1$
C	$k_{CO_2}^C = 0,9$
Cz	$k_{CO_2}^{Cz} = 0,9$
D	$k_{CO_2}^D = 0,9$
E	$k_{CO_2}^E = 1$

Укупна дужина заваривања свих закључница *МТП* добија се као:

$$L_{zav}^{zaklj} = \sum_{i=1}^j l_{i-zav}^{zaklj} \cdot N_i \cdot k_{CO_2}^i \text{ [m]}, \quad (5.17)$$

где је  $l_{i-zav}^{zaklj}$  – дужина заваривања закључница једног комада *i*-тог типа модула, и добија се као:

$$l_{i-zav}^{zaklj} = \left( 2 \cdot 4 \cdot 0,01 + \eta_{i-zav}^{zaklj} \cdot \frac{b_i}{1000} \right) \cdot n_i^{zaklj} = n_i^{zaklj} \cdot (0,08 + \eta_{i-zav}^{zaklj} \cdot b_i \cdot 10^{-3}) \text{ [m/kom]}, \quad (5.18)$$

где је  $\eta_{i-zav}^{zaklj}$  [%] – процентулна дужина заваривања закључница код *i*-тог модула.

Укупна дужина заваривања арматурне мреже на свим модулима *МТП* се добија као:

$$L_{zav}^{arm} = \sum_{i=1}^j l_{i-zav}^{arm} \cdot N_i \text{ [m]}, \quad (5.19)$$

где је  $l_{i-zav}^{arm}$  [m/kom] – дужина заваривања арматурне мреже једног комада *i*-тог типа модула.

Укупна дужина заваривања Z профила (ојачања) се рачуна само за модуле C и Cz. За остале модуле ова дужина је једнака нули јер не садрже Z профил.

$$L_{zav}^{Zprof} = \sum_{i=1}^2 l_{i-zav}^{Zprof} \cdot N_i \text{ [m]}, \quad (5.20)$$

где је  $l_{i-zav}^{Zprof}$  [m/kom] – дужина заваривања Z профила једног комада *i*-тог типа модула.

Након заваривања закључница, арматуре и Z профила за омотач, потребно је обрусити све заварене спојеве. Укупно време брушења свих заварених спојева је:

$$T_{BRS} = t_k^{BRS} \cdot L_{zav}^{UK} \text{ [h]}. \quad (5.21)$$

Збирни израз за прорачун укупног времена склапања свих модула *МТП* је:

$$T_{SKL} = T_{CM} + T_{CO_2} + T_{BRS} = t_k^{CM} \cdot P_{TP} + t_k^{CO_2} \cdot L_{zav}^{UK} + t_k^{BRS} \cdot L_{zav}^{UK} \text{ [h]}. \quad (5.22)$$

#### 5.1.1.6. Прорачун времена бетонирања и чишћења

Када се формира омотач модула са унутрашњим ојачањима, потребно је испунити унутрашњост модула бетоном чија се смеша прави по посебној рецептури. У току бетонирања модул остаје у помоћном прибору. Након сушења бетона, које траје 48 сати, модул се вади из помоћног прибора а након тога се чисти. Укупно време потребно за реализацију ових операција се добија као:

$$T_{BIC} = T_{BET} + T_{CIS} \text{ [h]}, \quad (5.23)$$

где су:

- $T_{BET}$  - укупно време бетонирања свих модула *МТП* и
- $T_{CIS}$  - укупно време чишћења свих модула *МТП*.

Времена бетонирања и чишћења, свих модула потребних за конфигурисање *МТП*, се рачунају у зависности од површине *МТП*:

$$T_{BET} = t_k^{BET} \cdot P_{TP} \text{ [h]}, \quad (5.24)$$

$$T_{CIS} = t_k^{CIS} \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.25)$$

Укупно време ове две операције је:

$$T_{BIC} = T_{BET} + T_{CIS} = (t_k^{BET} + t_k^{CIS}) \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.26)$$

#### 5.1.1.7. Прорачун времена одмашћивања и фарбања

Након бетонирања и чишћења модула потребно је детаљно одмастити све спољашње површине модула и заштити их од корозије основном бојом. Укупно време потребно за одмашћивање и фарбање свих модула потребних за конфигурисање *МТП* је:

$$T_{MFR} = t_k^{MFR} \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.27)$$

#### 5.1.1.8. Прорачун времена израде палета

За безбедан транспорт модула до места монтаже праве се специјалне палете. Укупно време израде палета се добија као:

$$T_{PAL} = t_k^{PAL} \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.28)$$

#### 5.1.1.9. Прорачун времена паковања

Укупно време паковања свих модула *МТП*, ради транспорта до места монтаже, је:

$$T_{PAK} = t_k^{PAK} \cdot P_{TP} \text{ [h]}. \quad (5.29)$$

## 5.1.1.10. Прорачун времена монтаже МТП

Завршна монтажа МТП представља спајање свих модула заваривањем у одређеном редоследу према шеми монтаже на месту уградње МТП. Укупно време монтаже се састоји од времена манипулације са модулима и времена потребног за њихово међусобно заваривање:

$$T_{MON} = (T_{MAN} + T_{ZAV}) \cdot k_d \text{ [h]}, \quad (5.30)$$

где су:

- $k_d$  - коефицијент додатног времена због услова рада,
- $T_{MAN}$  - укупно време манипулације при монтажи МТП и
- $T_{ZAV}$  - укупно време заваривања при монтажи МТП.

Изрази за прорачун укупних времена потребних за манипулацију и заваривање при монтажи МТП су:

$$T_{MAN} = t_k^{MAN} \cdot P_{TP} \text{ [h]}, \quad (5.31)$$

$$T_{ZAV} = t_k^{ZAV} \cdot L_{MON} \text{ [h]}, \quad (5.32)$$

где су:

- $L_{MON} = 2 \cdot \eta_{MON}^{ZAV} \cdot \sum_{i=1}^j l_i \cdot N_i \text{ [m]}$  - укупна дужина заваривања при монтажи МТП и
- $\eta_{MON}^{ZAV} \text{ [%]}$  - процентулна дужина заваривања модула при монтажи МТП.

Збирни израз за прорачун укупног времена монтаже се може написати у следећем облику:

$$T_{MON} = (T_{MAN} + T_{ZAV}) \cdot k_d = (t_k^{MAN} \cdot P_{TP} + t_k^{ZAV} \cdot L_{MON}) \cdot k_d \text{ [h]}. \quad (5.33)$$

Укупно време потребно за израду и монтажу МТП (једначина 5.1) се добија као збир једначина (5.8), (5.12), (5.22), (5.26), (5.27), (5.28), (5.29) и (5.33).

## 5.2.2. Прорачун укупних производних трошкова

Укупни производни трошкови, меродавни за оптимизацију, се добијају као збир укупне цене материја ( $C_{mat}$ ) и укупне цене рада ( $C_{rad}$ ):

$$C_{UK} = C_{mat} + C_{rad} \text{ [€]}. \quad (5.34)$$

У цену материјала су урачунати само трошкови директног материјала. Цена помоћног (индиректног) материјала као што су: боје, жица и  $CO_2$  гас за заваривање, даска за палете, електрична енергија, компримовани ваздух и други потрошни материјал није



посебно разматрана јер су ови трошкови укључени кроз цену норма часа за поједине врсте обраде.

#### 5.2.2.1. Укупна цена директног материјала

Директни материјал који се користи за израду појединачних модула *МТП* је хладно ваљани лим и арматурна мрежа тако да се укупна цена директног материјала може исказати изразом:

$$C_{mat} = C_{LIM} + C_{ARM} \text{ [€]}, \quad (5.35)$$

где су:

- $C_{LIM}$  [€]- укупна цена лима и
- $C_{ARM}$  [€] - укупна цена арматуре.

За израду компоненти омотача модула се користи хладно ваљани лим у таблама димензија 1500x3000 mm. У процесу сечења материјала, посебно у случају сечења омотача модула, остаје део табле који се делимично користи за израду ситнијих делова из овог или другог производног програма (за израду дистанцера, омега профила и других позиција<sup>3</sup>), тако да у укупну цену лима, поред површине исечених позиција, треба урачунати и део остатка након сечења који се сматра отпадом. На основу дугогодишњег искуства у производњи *МТП* процењено је да се 50% од остатка може користити за друге позиције а 50% се може сматрати отпадом. Циљ је да се овај некорисни остатак тј. отпад сведе на минимум. Зато је укупна цена лима израчуната као збир цене лима исечених позиција и цене отпада који остане од сечења:

$$C_{LIM} = \left( \sum_{i=1}^j Q_{LIM}^i \cdot N_i + Q_{OST} \cdot \eta_{OST} \right) \cdot w_{C1} \text{ [€]}, \quad (5.36)$$

где су:

- $w_{C1}$  [€/kg] – јединична цена лима,
- $Q_{LIM}^i$  [kg] – потребна количина лима за производњу једног комада *i*-тог типа модула,
- $Q_{OST}$  [kg] – тежина остатка табле лима након сечења према оптималном плану сечења и
- $\eta_{OST}$  [%] – процентуални део остатка који представља отпад.

<sup>3</sup> Остале позиције које су саставни део испуне модула нису детаљно обрађене и приказане због пословне тајне произвођача

Тежина остатка табле лима се рачуна помоћу израза:

$$Q_{OST} = Q_t \cdot N_t - \sum_{i=1}^j Q_{LIM}^i \cdot N_i \text{ [kg]}, \quad (5.37)$$

где су:

- $Q_t$  [kg] – тежина једне табле лима и
- $N_t$  – укупан број потребних табли лима за задату алтернативу распореда модула.

Укупан број потребних табли лима ( $N_t$ ) добија се из оптималног плана сечења. Детаљан поступак оптимизације плана сечења је приказан у потпоглављу 5.2.3.

Друга компонента у укупној цени материјала је укупна цена арматурне мреже:

$$C_{ARM} = w_{C2} \cdot \sum_{i=1}^j Q_{ARM}^i \cdot N_i \text{ [€]}, \quad (5.38)$$

где су:

- $w_{C2}$  [€/kg] – јединична цена арматурне мреже и
- $Q_{ARM}^i$  [kg/kom] – потребна количина арматурне мреже за производњу једног комада  $i$ -тог типа модула.

#### 5.2.2.2. Укупна цена рада

Друга компонента у укупним производним трошковима је цена рада која се добија као:

$$C_{rad} = T_{UK} \cdot w_{rs} \text{ [€]}, \quad (5.39)$$

где је  $w_{rs}$  [€/h] – цена норма часа.

Укупни производни трошкови израде и монтаже *МТП* (једначина 5.34) се добија као збир једначина (5.36), (5.38) и (5.39).

### 5.2.3. Оптимизација плана сечења материјала

#### 5.2.3.1. Дефинисање проблема

Ради прорачуна трошкова материјала неопходно је за сваку изводљиву варијанту, распореда и димензија модула при конфигурисању *МТП*-а, одредити оптималан план сечења где се као резултат добија потребан број табли за израду свих позиција од лима за целу *МТП*.

Због могућих неравнина по ивицама табле и обезбеђења управности суседних страница врши се опсецање табле са свих страна по 25 mm, тако да се након опсецања добијају димензије табле 1,45×2,95 m које су меродавне за оптимизацију плана сечења. Из ових

табли је потребно исећи омотаче свих типова модула неопходних за конфигурисање захтеваног МТП.

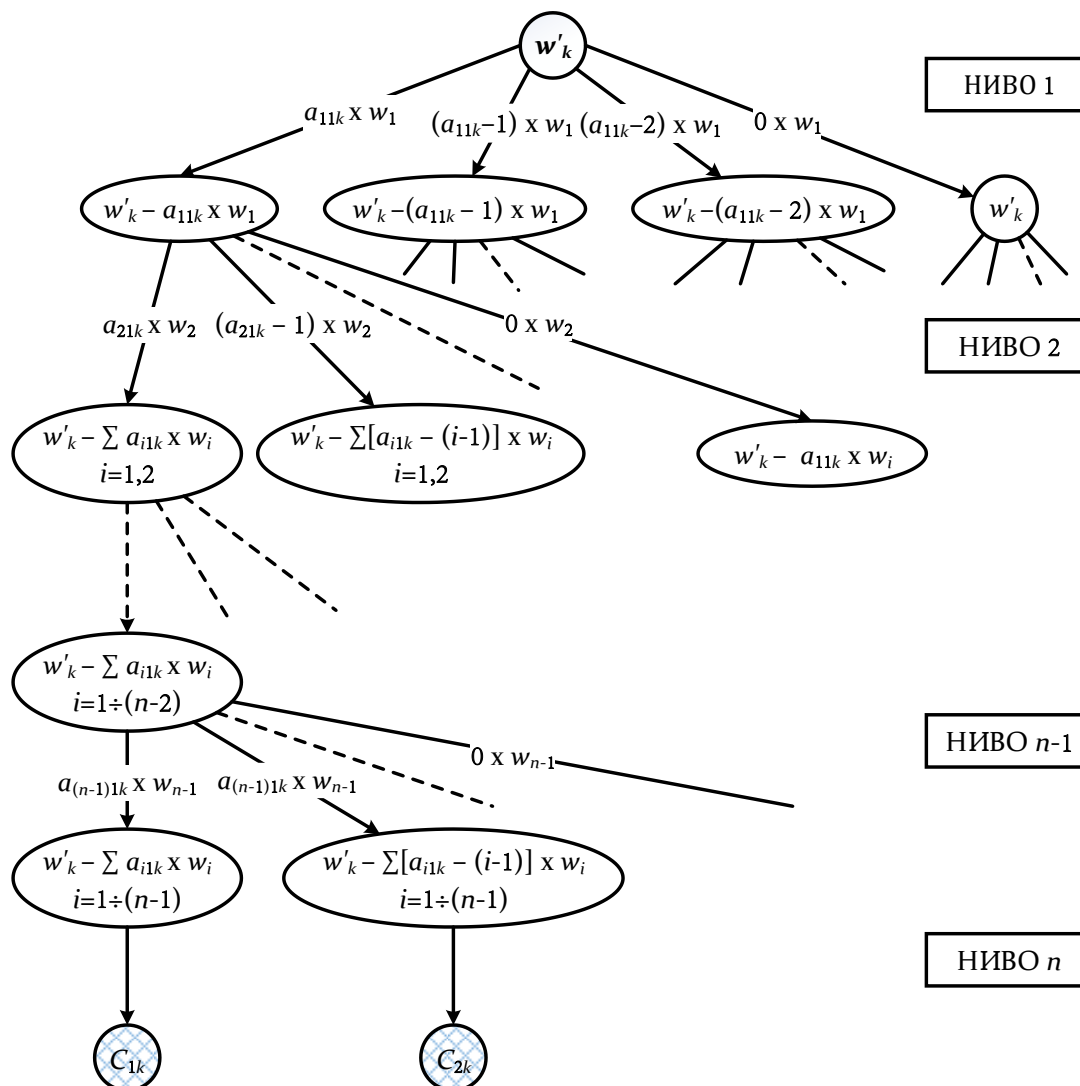
Како су у развијеном моделу разматране МТП са минималном висином од 2 m то ће дужина модула увек бити већа од ширине табле (1,45 m) па није могуће ротирање предмета сечења при изради шема сечења. Другим речима већа димензија предмета сечења (омотача модула) се увек окреће у правцу веће димензије објекта сечења (дужине табле), па се овај проблем може свести на једнодимензиони проблем оптимизације сечења.

Поступак генерисања изводљивих шема сечења, за једнодимензиони проблем оптимизације сечења, уз помоћ стабла претраге представио је *Suliman* [145]. Исти поступак је коришћен у овој дисертацији и детаљније је описан у наставку. Након генерисања свих изводљивих шема сечења потребно је одабрати оптималан план сечења који задовољава функцију циља. За избор оптималног плана сечења у овој дисертацији је коришћен *модел линеарној пројирамирања*.

#### 5.2.3.2. Стабло претраге

Генерисање изводљивих шема сечења постиже се кроз стабло претраге. Нивои стабла представљају захтеване ширине које су сложене у опадајућем редоследу са највећом величином на првом нивоу, док је најмања величина на последњем нивоу стабла. Број нивоа једнак је броју различитих предмета који се секу ( $n$ ). Почетни чвор на првом нивоу приказује ширину  $k$ -тог објекта сечења ( $w_k$ ) који се користи за генерисање шема. Уколико постоје објекти различитих ширина потребно је за сваки користити одвојено стабло претраге при генерисању шема. Грана  $i$ -тог нивоа стабла претраге приказује производ броја јединица тражене ширине  $i$  које су исечене према  $j$ -тој шеми и потребне ширине  $w_i$  (тј.  $a_{ijk} \cdot w_i$ ). Овај производ представља укупну ширину која се сече из објекта  $k$  да би се задовољила тражена ширина  $w_i$ . Почетни чвор нивоа  $i$  представља расположиву ширину након задовољења спецификације сечења одређене претходним  $i-1$  гранама. Крајњи чворови, на највећем нивоу, показују остатке при сечењу ( $C_{jk}$ ), који настају као резултат различитих шема сечења [145].

Конструкција стабла претраге започиње у првом нивоу и даље се одвија ка последњем (највећем) нивоу тако што у сваком чвору додаје расположиве ширине које преостају након задовољења спецификација сечења одређених претходним гранама. Док се креће дуж одређеног пута на стаблу претраживања, одрживост тог пута се постиже обезбеђивањем позитивног крајњег чвора. Путања од почетног до крајњег чвора стабла представља изводљиву шему сечења чије компоненте  $a_{ijk}$  означавају број јединица сваке ширине ( $w_i$ ) које се заједно комбинују [145].



Слика 5.8 – Генерални изглед стабла претраге [145]

Као што је илустровано на слици 5.8, број грана на сваком чвору (на било ком нивоу) једнак је максималном броју јединица које се могу исећи од преостале ширине приказане у том чвору, тј.  $a_{ijk}$ . Крајња лева грана показује укупну ширину која је додељена  $a_{ijk}$ , док следеће гране са лева на десно показују укупне ширине које су додељене  $a_{ijk} - 1$ ,  $a_{ijk} - 2$ , ...,  $2$ ,  $1$ , респективно. На крају са десне стране додаје се додатна грана која представља шему сечења у којој неће бити укључен захтевани предмет  $i$ -тог нивоа (тј.  $a_{ijk} = 0$ ).

Решења стабла претраге представљају све изводљиве шеме сечења, приказане у форми матрице, која се добијају реализацијом алгоритма који је развио *Suliman* [145] и који је приказан и објашњен у наставку.

### 5.2.3.3. Алгоритам и процедура израде листе шема сечења

Како су захтеване ширине сложене у опадајућем низу то је  $w_1 > w_2 > w_3 > \dots > w_n$ . За сваки различит објекат сечења  $k$ , одређена је матрица  $[a_{ijk}]$ , облика  $n \times m_k$  елемената. Први елемент матрице се добија као:

$$a_{11k} = \text{int} \left( \frac{w_k'}{w_1} \right). \quad (5.40)$$

Други елемент прве колоне се добија као:

$$a_{21k} = \text{int} \left( \frac{w_k' - a_{21k} \cdot w_1}{w_2} \right). \quad (5.41)$$

Сваки  $i$ -ти елемент прве колоне се добија као:

$$a_{i1k} = \text{int} \left( \frac{w_k' - \sum_{z=1}^{i-1} a_{z1k} \cdot w_z}{w_i} \right). \quad (5.42)$$

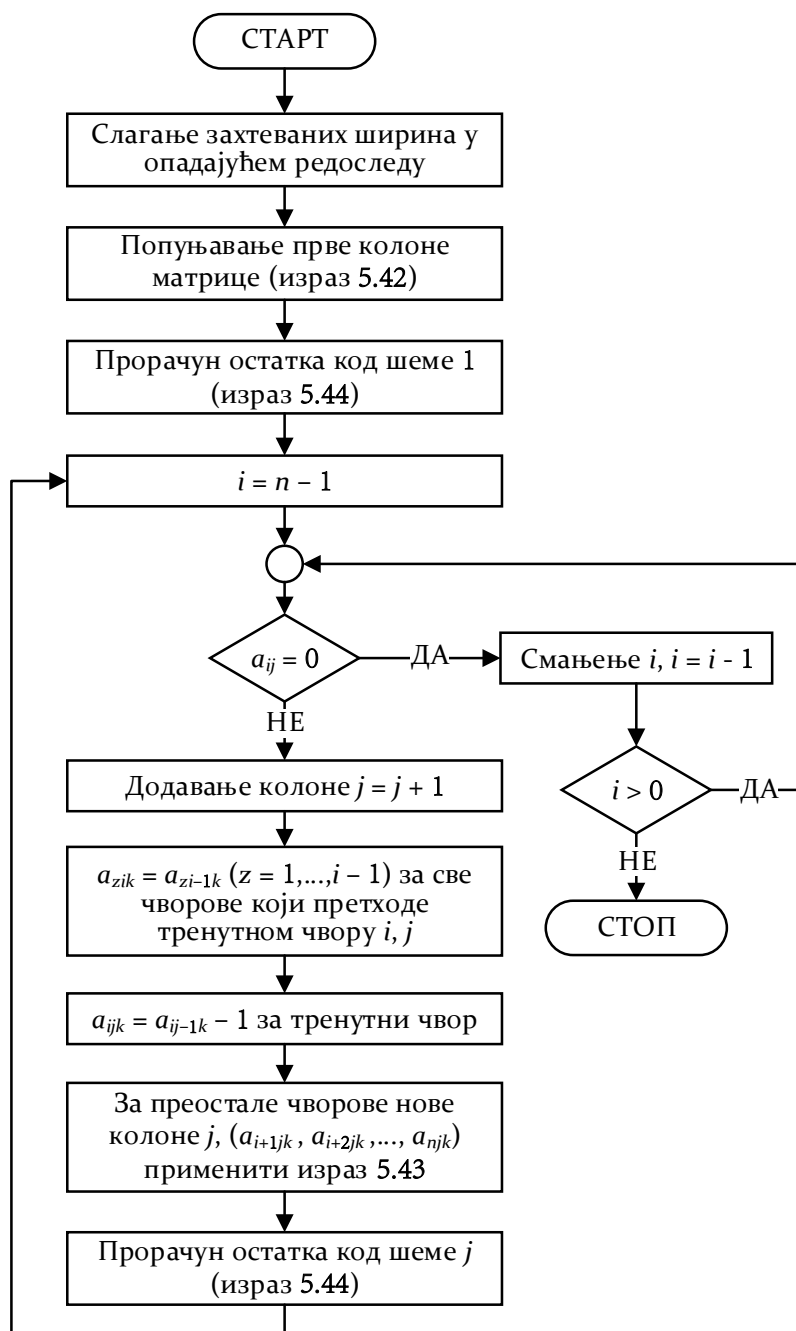
Уопштена формула за одређивање сваког елемента матрице је:

$$a_{ijk} = \text{int} \left( \frac{w_k' - \sum_{z=1}^{i-1} a_{zjk} \cdot w_z}{w_i} \right). \quad (5.43)$$

Након одређивања елемената матрице  $[a_{ijk}]$ , тј. шема резања, остатак табле добијен након сечења  $j$ -те шеме се одређује као:

$$c_{jk} = w_k' - \sum_{i=1}^n a_{ijk} \cdot w_i. \quad (5.44)$$

Да би се одредила матрица  $[a_{ijk}]$   $k$ -те табле ( $k = 1$  за ширину  $w_1'$ ,  $2$  за ширину  $w_2'$ , ...,  $h$  за ширину  $w_h'$ ), користи се следећи алгоритам приказан на слици 5.9.



Слика 5.9 – Алгоритам израде стабла претраге (прилагођено од [145])

## 5.2.3.4. Математички модел оптимизације плана сечења

Према претходно објашњеној процедури генерисања стабла претраге потребно је, за сваку генерисану варијанту распореда и димензија модула по зидовима, поду и плафону МТП, пронаћи могуће шеме сечења, потребан број табли и њихов остатак. Након тога потребно је одабрати оптималан план сечења свих омотача за сваку изводљиву конфигурацију МТП.

Резултат алгоритма стабла претраге је матрица стабла претраге (табела 5.5) за једну варијанту распореда модула по зидовима и поду/плафону, и таква матрица се формира за сваку изводљиву варијанту (алтернативу).

Табела 5.5 – Матрица стабла претраге

$w_1$	$n_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1j}$	...	$a_{1P}$
$w_2$	$n_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2j}$	...	$a_{2P}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$w_i$	$n_i$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	...	$a_{ij}$	...	$a_{iP}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$w_p$	$n_p$	$a_{p1}$	$a_{p2}$	...	$a_{pj}$	...	$a_{pP}$
		$x_1$	$x_2$	...	$x_j$	...	$x_P$

Ознаке коришћене у претходној табели су:

- $w_i$  – потребна ширина  $i$ -тог предмета (ширина развијеног облик омотача модула),
- $a_{ij}$  – максималан број  $i$ -тог елемента на табли према  $j$ -тој шеми,
- $n_i$  – потребан број  $i$ -тог елемента,
- $p$  – број различитих елемената које је потребно исећи,
- $P$  – максималан број шема сечења и
- $x_j$  – број табли лима према  $j$ -тој шеми.

За избор оптималног плана сечења, функција циља је минималан укупан број табли лима ( $N_t$ ) потребних за сечење омотача свих модула неопходних за сваку генерисану конфигурацију МТП.

$$\min N_t = \sum_{j=1}^P x_j. \quad (5.45)$$

Ограничења која се при том морају испоштовати су:

$$\sum_{j=1}^P x_j \cdot a_{ij} \geq n_i \quad i = 1, \dots, p, \quad (5.46)$$

$$x_j \geq 0 \text{ и целобројна вредност,} \quad (5.47)$$

$$a_{ij} \geq 0 \text{ и целобројна вредност,} \quad (5.48)$$

$$n_i \geq 0 \text{ и целобројна вредност.} \quad (5.49)$$

Избором оптималног плана сечења добија се скуп свих различитих шема сечења са њиховим фреквенцијама потребним за резање свих предмета, као и укупан број потребних табли лима.

Алгоритам оптимизације плана сечења је имплементиран у софтверском пакету *MATLAB*, а његов програмски код је написан заједно са кодом за прорачун критеријумских функција, и дат је у прилозима 1 и 2.

#### 5.2.4. Математички модел за прорачун укупног броја грешака

У складу са менаџментом система квалитета ISO 9001 у производњи се константно прати бројност грешака помоћу атрибутивних и нумеричких контролних карти квалитета како би се управљало побољшањем квалитета ових производа.

За МТП типа МОДУЛПРИМ степена отпорности VS, V; VI; VII; VIII и IX контролним планом су дефинисане 23 грешке које треба контролисати 100%. Оне обухватају фазе склапања, бетонирања и фарбања модула (табела 5.6).

У току 2018. године урађено је 6 модуларних трезорских просторија типа МОДУЛПРИМ 5. Свака модуларна трезорска просторија је имала различити број саставних модула. За анализу зависности укупног броја грешака од дужине и ширине модула, модули су груписани у две групе. *Група 1* обухвата зидне модуле **A** и **B** а *група 2* подне и плафонске модуле **C**, **Cz** и **D**. Групе су дефинисане на основу конструкционе и технолошке сличности модула. Модул **E** (модул изнад трезорских врата) није анализиран јер је његова ширина увек одређена ширином трезорских врата и обично се на МТП уграђују само једна трезорска врата па стога МТП има само један модул типа **E**.

##### 5.2.4.1. Анализа зависности броја грешака од дужине и ширине модула за групу 1

Анализа зависности је урађена на основу праћења бројности грешака у току 2018. године. У посматраном периоду је урађено 74 модула из ове групе. Подаци о укупном броју грешака по модулу и димензијама модула су приказани у табели 5.7.

Проблем се своди на изналажење функционалне зависности између укупног броја грешака  $\Sigma G_i$  као излазне перформансе процеса и улазних параметара: ширине модула  $b$  и дужине модула  $l$ . За квантификацију односа између независних улазних параметара и зависне променљиве процеса (одзива) је коришћена *методологија одзивне површине (RSM)* [146–151]. Добијени математички модел у виду полинома  $n$ -тог реда представља *функцију одзива* која се графички може приказати као *одзивна површина*.

Обрада података је урађена у софтверском пакету *Design Expert v.9.0.6.2*. Од математичких модела који су на располагању предложен је *линеарни модел*.



Табела 5.6 – Класификација грешака у процесу израде МТП МОДУЛПРИМ

Р. др.	Ознака	Карактеристика	Захтев/ толеранција	Узорковање		Мерна техника/алат
				вел.	фрекв.	
1	G1	Контролна мера: -Ширина -Дужина -Висина	$\pm 1 \text{ mm}$ $\pm 1 \text{ mm}$ $\pm 0,5 \text{ mm}$	1	100%	Тракасти метар и помично кљунасто мерило
2	G2	Завареност крајева арматуре	$\underline{\underline{3\Delta n \times 10}}$	1	100%	Визуелно/тракасти метар
3	G3	Завареност ојачивача кроз технолошке отворе и крајеве	$\underline{\underline{3\Pi 1 \times 15}}$	1	100%	Визуелно
4	G4	Завареност гнезда	Континуално	1	100%	Визуелно
5	G5	Завареност цеви $3/4" \times L \text{ mm}$	$\underline{\underline{3\Delta 2 \times 15 (27)}}$	1	100%	Визуелно/тракасти метар
6	G6	Завареност одстојника	$3\Delta n \times 10 (90)$	1	100%	Визуелно/тракасти метар
7	G7	Положај цеви према цртежу	Постављене према цртежу	1	100%	Тракасти метар
8	G8	Завареност закључница (споља и унутра)	$\underline{\underline{3\Delta n \times 15 (90)}}$	1	100%	Визуелно/тракасти метар
9	G9	Правост и угаоност омотача	$\pm 2 \text{ mm}/\pm 1^\circ$	1	100%	Лењир/угаоник/машински угломер
10	G10	Фина обрешеност завареног споја (споља)	Визуелно	1	100%	Визуелно
11	G11	Завареност везних трака	Присутност	1	100%	Визуелно
12	G12	Ознака модула (сигно ознака)	Присутност	1	100%	Визуелно
13	G13	Положај вентилационог склопа	Положај	1	100%	Тракасти метар
14	G14	Поравнатост закључнице са омотачем	Поравнатост	1	100%	Визуелно
15	G15	Бетонирање по рецептури	Број рецептуре 028/035	1	100%	Дневник бетонирања
16	G16	Попуњеност бетоном	+0/-1	1	100%	Лењир и мерни листићи
17	G17	Очишћеност од бетона	Без бетона	1	100%	Визуелно
18	G18	Очишћеност вентилационих отвора од бетона	Без бетона	1	100%	Визуелно
19	G19	Проходност навртке М20	Проходан навој	1	100%	Контролни вијак
20	G20	Офарбаност основном бојом	Равномерно нанесена боја по целој површини ламеле	1	100%	Визуелно
21	G21	Равност површина	$\pm 2 \text{ mm}$	1	100%	Лењир и мерни листићи
22	G22	Угаоност	$\pm 1^\circ$	1	100%	Машински угломер
23	G23	Сигно ознака модула (фломастером)	Сигно ознака	1	100%	Визуелно

Табела 5.7 – Подаци о бројности грешака у зависности од  $b$  и  $l$  за модуле А и В

Р. др	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	$\Sigma G_i$
1	А	550	2810	0
2	А	550	2810	0
3	А	550	2810	1
4	А	550	2810	0
5	А	550	2810	0
6	А	550	2810	1
7	А	550	2810	0
8	А	550	2810	0
9	А	550	2810	1
10	А	550	2810	0
11	А	550	2810	0
12	А	540	2810	0
13	А	400	2810	1
14	А	400	2810	1
15	В	520	2810	1
16	В	800	2810	1
17	В	800	2810	0
18	А	550	2440	0
19	А	550	2440	1
20	А	550	2440	1
21	А	550	2440	0
22	А	550	2440	2
23	А	550	2440	2
24	А	550	2440	0
25	А	550	2440	1
26	А	550	2440	1
27	А	550	2440	0
28	А	550	2440	0
29	А	540	2440	0
30	А	605	2440	0
31	А	605	2440	2
32	А	550	2440	1
33	А	505	2440	0
34	В	550	2440	2
35	В	550	2440	2
36	В	550	2440	1
37	В	575	2440	1
38	А	550	2500	1
39	А	550	2500	2
40	А	550	2500	0
41	А	550	2500	1
42	А	550	2500	0
43	А	550	2500	2
44	А	550	2500	2
45	А	550	2500	0
46	А	550	2500	2
47	А	550	2500	1
48	А	550	2500	0
49	А	550	2500	0
50	А	550	2500	1
51	А	550	2500	1
52	А	550	2500	1
53	А	550	2500	1
54	А	550	2500	0
55	А	550	2500	2
56	А	550	2500	1
57	А	670	2500	1
58	А	670	2500	2
59	А	430	2500	1
60	А	550	2500	1
61	А	480	2500	0
62	А	550	2500	1
63	А	550	2500	2
64	В	550	2500	2
65	В	500	2500	1
66	В	550	2500	0
67	В	550	2500	0
68	А	455	2120	2
69	А	455	2120	1
70	А	455	2120	2
71	В	600	2120	2
72	А	700	2120	2
73	А	800	2120	3
74	А	800	2120	2

Табела 5.8 – Табела збирних статистичких података

Model Summary Statistics						
Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0,71679	0,24534	0,22408	0,18886	39,20868	Suggested
2FI	0,71124	0,26744	0,23604	0,19113	39,09903	
Quadratic	0,71313	0,28459	0,23198	0,18043	39,61646	
Cubic	0,71481	0,32349	0,22835	0,09365	43,81087	
Quartic	0,72919	0,34000	0,19700	-11,46011	602,29477	Aliased

Након анализе варијанси (ANOVA) потврђена је адекватност предложеног математичког модела (табела 5.9).

Табела 5.9 – ANOVA анализа за линеарни модел

ANOVA for Response Surface Linear model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	11,85927	2	5,929636	11,541139	0,000046	significant
A-b	0,82963	1	0,829635	1,614758	0,207972	
B-l	10,15676	1	10,156757	19,768589	0,000032	
Residual	36,47857	71	0,513783			
Lack of Fit	6,23675	16	0,389797	0,708913	0,772842	not significant
Pure Error	30,24182	55	0,549851			
Cor Total	48,33784	73				

F вредност модела ( $F=11,541$ ) указује да је модел сигнификантан (значајан) и да постоји шанса од 0,01% да је вредност F последица шума. Ниска вредност вероватноће ( $p=0,000046 < 0,050$ ) потврђује да су параметри модела такође сигнификантни. Недостатак способности прилагођавања (*eng. Lack of Fit*) има вредност  $F=0,7089$  што указује да варијација вредности мерене величине код истоветних понављања није сигнификантна у односу на чисту грешку. Коефицијент детерминације (R-squared) и остале статистике имају добре вредности што потврђује оправданост избора математичког модела (табела 5.10).

Табела 5.10 – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,908	R-Squared	0,121
Mean	0,865	Adj R-Squared	0,096
C.V. %	105,034	Pred R-Squared	0,054
PRESS	63,062	Adeq Precision	6,350

Међутим, дијагноза статистичких својстава предложеног модела је показала да расподела остатака (резидуала) није нормална. Математички модел је трансформисан помоћу *Square Root* функције ( $y'=\sqrt{y+k}$ ) при чему је  $\lambda=0,5$ ,  $k=0,4$ . Поновна ANOVA анализа (табела 5.11) је потврдила адекватност трансформисаног модела.

Табела 5.11 – ANOVA анализа за трансформисани линеарни модел

ANOVA for Response Surface Linear model						
Transform: Square Root Constant: 0,4						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2,149944	2	1,074972	9,419727	0,000235	significant
A-b	0,089745	1	0,089745	0,786415	0,378180	
B-l	1,928547	1	1,928547	16,899408	0,000104	
Residual	8,102465	71	0,114119			
Lack of Fit	1,499330	16	0,093708	0,780530	0,699775	not significant
Pure Error	6,603135	55	0,120057			
Cor Total	10,252409	73				

Новe статистике модела су приказане у табели 5.12.

Табела 5.12 – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,33782	R-Squared	0,209701
Mean	1,08021	Adj R-Squared	0,187439
C.V. %	31,27304	Pred R-Squared	0,154295
PRESS	8,67051	Adeq Precision	11,453369

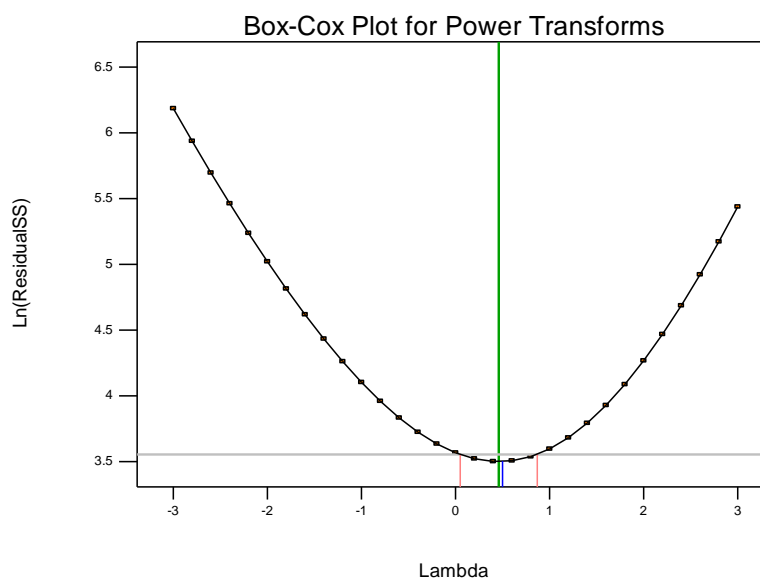
Поновна дијагноза статистичких својстава трансформисаног модела је показала да је расподела остатака (резидуала) нормална. Након примене *Box-Cox* процедуре вредност  $\lambda$  је 0,5 оптимална вредност  $\lambda$  је 0,46 а интервал поузданости од 95% за  $\lambda$  (доњи C.I.=0,05 а горњи C.I.=0,87) садржи вредност  $\lambda=0,46$  чиме је доказана оправданост трансформације модела.

Design-Expert® Software  
Sqrt(Ci + 0.40)

Lambda  
Current = 0.5  
Best = 0.46  
Low C.I. = 0.05  
High C.I. = 0.87

Recommend transform:  
Square Root  
(Lambda = 0.5)

k = 0.4  
(used to make  
response values  
positive)

Слика 5.10 – *Box-Cox* дијаграм трансформисаног линеарног модела

Коначна једначина трансформисаног математичког модела, са реалним коефицијентима, који адекватно описује зависност укупног броја грешака модула од ширине ( $b$ ) и дужине ( $l$ ) модула гласи:

$$\sqrt{G_i + 0,4} = 2,96288 + 4,76 \cdot 10^{-4} \cdot b_i - 8,53 \cdot 10^{-4} \cdot l_i, \quad (5.50)$$

односно:

$$G_i = (2,96288 + 4,76 \cdot 10^{-4} \cdot b_i - 8,53 \cdot 10^{-4} \cdot l_i)^2 - 0,4. \quad (5.51)$$

Графички приказ математичког модела описаног једначином (5.51) и распоред експерименталних тачака је дат на слици 5.11.

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Original Scale

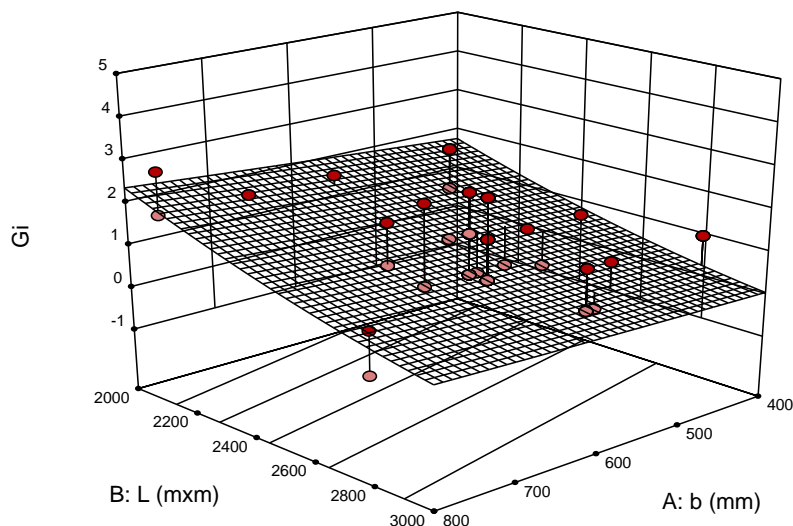
Ci

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

X1 = A: b

X2 = B: L



Слика 5.11 – 3D дијаграм одзивне површине броја грешака  $G_i = f(b, l)$  за модуле А и В.

#### 5.2.4.2. Анализа зависности броја грешака од дужине и ширине модула за групу 2

Анализа зависности је урађена на основу праћења бројности грешака у току 2018. године. У посматраном периоду је урађено 52 модула из ове групе. Подаци о броју грешака и димензијама модула су приказани у табели 5.13.

Иста методологија је примењена и у поступку добијања модела за групу 2. Од математичких модела који су на располагању предложен је **квадрантни модел** (табела 5.14).

Табела 5.13 – Подаци о бројности грешака у зависности од  $b$  и  $l$  за модуле C, Cz и D

Р. др	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	$\Sigma G_i$
1	C	470	1790	3
2	C	470	1790	2
3	Cz	470	1790	3
4	Cz	470	1790	3
5	D	550	1790	1
6	D	550	1790	1
7	D	550	1790	0
8	D	550	1790	1
9	D	650	1790	1
10	D	650	1790	0
11	D	650	1790	1
12	D	780	1790	0
13	D	780	1790	0
14	D	780	1790	0
15	C	550	2350	1
16	C	550	2350	1
17	Cz	550	2350	1
18	Cz	550	2350	1
19	D	550	2350	1
20	D	550	2350	0
21	D	550	2350	1
22	D	550	2350	1
23	D	550	2350	2
24	D	550	2350	1
25	D	550	2350	1
26	D	550	2350	1

Р. др	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	$\Sigma G_i$
27	D	550	2350	0
28	D	550	2350	1
29	C	750	2940	1
30	C	750	2940	1
31	Cz	750	2940	0
32	Cz	650	2940	0
33	D	650	2940	1
34	D	550	2940	2
35	D	550	2940	2
36	D	550	2940	0
37	D	550	2940	1
38	D	550	2940	2
39	D	550	2940	0
40	D	550	2940	2
41	D	550	2940	1
42	D	550	2940	1
43	D	550	2940	1
44	D	550	2940	0
45	D	550	2940	1
46	D	550	2940	2
47	D	550	2940	2
48	D	550	2940	1
49	D	550	2940	1
50	D	450	2940	3
51	D	450	2940	2
52	D	450	2940	2

Табела 5.14 – Табела збирних статистичких података

Model Summary Statistics						
Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0,69935	0,35763	0,33141	0,27045	27,21783	
2FI	0,69831	0,37261	0,33340	0,25441	27,81631	
Quadratic	0,60936	0,54217	0,49241	0,43604	21,03994	Suggested
Cubic	0,61003	0,56110	0,49128	0,39970	22,39572	Aliased

Примењена је ANOVA анализа и извршена је редукција несигнификантних (безначајних) чланова методом уназад (*Backward Elimination Regression with Alpha to Exit* = 0,100). Из даље анализе су искључени чланови чија је  $p$ -вредност већа од 0,10. У овом случају то су чланови B, AB и B<sup>2</sup>. Анализа варијанси за преостале чланове је приказана у табели 5.15.

Табела 5.15 – ANOVA анализа за редуковани квадратни модел

**ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic model**

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	18,3180	2	9,1590	23,6335	6,52533E-08	significant
A-b	17,9609	1	17,9609	46,3454	1,31716E-08	
A <sup>2</sup>	4,9813	1	4,9813	12,8535	0,00077	
Residual	18,9896	49	0,3875			
Lack of Fit	3,6236	6	0,6039	1,6900	0,14666	not significant
Pure Error	15,3661	43	0,3574			
Cor Total	37,3077	51				

F вредност модела ( $F=23,63$ ) указује да је модел сигнификантан. Ниска вредност вероватноће ( $p<0,05$ ) потврђује да су параметри модела такође сигнификантни. Грешка прилагођавања модела (*Lack of Fit*) има F-вредност 1,69 што указује да недостатак способности прилагођавања модела није сигнификантан. Коефицијент детерминације (R-squared) и остале статистике (табела 5.16) имају добре вредности што потврђује оправданост избора математичког модела.

Табела 5.16 – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,6225	R-Squared	0,4910
Mean	1,1154	Adj R-Squared	0,4702
C.V. %	55,8130	Pred R-Squared	0,4296
PRESS	21,2791	Adeq Precision	15,4855

Међутим, дијагноза статистичких својстава предложеног модела је показала да расподела остатака (резидуала) није нормална. Математички модел је трансформисан помоћу *Square Root* функције ( $y'=\sqrt{y+k}$ ) при чему је  $\lambda=0,5$  а  $k=2,5$ . Поновна ANOVA анализа (табела 5.17) је потврдила адекватност трансформисаног модела.

Табела 5.17 – ANOVA анализа за трансформисани линеарни модел

**ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic model**

Transform: Square Root      Constant: 2,5

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1,17722	2	0,58861	21,50883	1,97224E-07	significant
A-b	1,16621	1	1,16621	42,61537	3,57351E-08	
A <sup>2</sup>	0,27589	1	0,27589	10,08136	0,00259	
Residual	1,34093	49	0,02737			
Lack of Fit	0,22714	6	0,03786	1,46154	0,21420	not significant
Pure Error	1,11379	43	0,02590			
Cor Total	2,51815	51				

Статистике модела су побољшане и њихове вредности су приказане у табели 5.18.

**Табела 5.18** – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,16543	R-Squared	0,46749
Mean	1,88864	Adj R-Squared	0,44576
C.V. %	8,75903	Pred R-Squared	0,40658
PRESS	1,49431	Adeq Precision	14,84931

Поновна дијагноза статистичких својстава трансформисаног модела је показала да је расподела резидуала нормална. Након примене *Box-Cox* процедуре вредност  $\lambda$  је 0,5, оптимална вредност  $\lambda$  је 0,66 а интервал поузданости од 95% за  $\lambda$  (доњи С.И. = -0,46, горњи С.И. = 1,73) садржи вредност  $\lambda=0,46$  чиме је доказана оправданост трансформације модела.

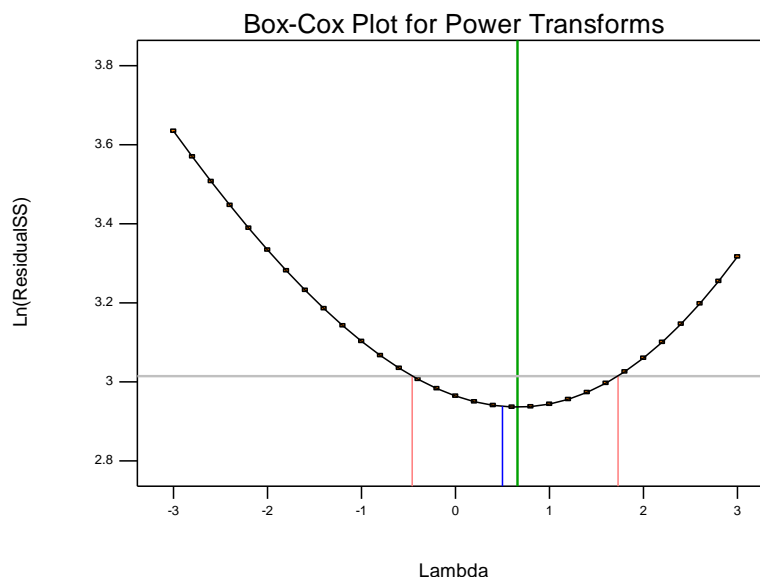
Како је параметар  $l$  (дужина модула) несигнификантан то значи да укупан број грешака зависи само од параметра  $b$  (ширина модула).

Design-Expert® Software  
Sqrt(Ci + 2.50)

Lambda  
Current = 0.5  
Best = 0.66  
Low C.I. = -0.46  
High C.I. = 1.73

Recommend transform:  
None  
(Lambda = 1)

k = 2.5  
(used to make  
response values  
positive)

**Слика 5.12** – *Box-Cox* дијаграм трансформисаног квадратног модела

Конечна једначина трансформисаног математичког модела, са реалним коефицијентима, који адекватно описује зависност укупног броја грешака модула од ширине ( $b$ ) модула гласи:

$$\sqrt{G_i + 2,5} = 6,00847 - 1,21627 \cdot 10^{-2} \cdot b_i + 8,4966 \cdot 10^{-6} \cdot b_i^2, \quad (5.52)$$

односно:

$$G_i = (6,00847 - 1,21627 \cdot 10^{-2} \cdot b_i + 8,4966 \cdot 10^{-6} \cdot b_i^2)^2 - 2,5. \quad (5.53)$$

Графички приказ математичког модела описаног једначином (5.53) и распоред експерименталних тачака је дат на слици 5.13.



Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

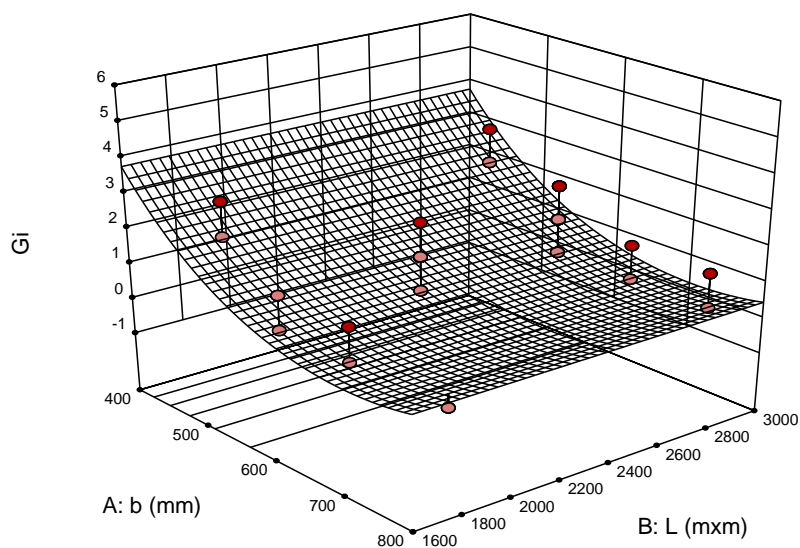
Original Scale

Ci

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value

X1 = A: b

X2 = B: L



Слика 5.13 – 3D дијаграм одзивне површине броја грешака  $G_i = f(b)$  за модуле C, Cz и D.

#### 5.2.4.3. Укупан број грешака

**Укупан број грешака** се добија сумирањем производа просечног броја грешака  $i$ -тог типа модула и броја комада  $i$ -тог типа модула:

$$G_{UK} = \sum_{i=1}^8 G_i \cdot N_i, \quad (5.54)$$

где је  $G_i$  – теоријски збир свих грешака  $i$ -тог типа модула на основу претходно добијених емпиријских модела.

#### 5.2.5. Укупан збир максималних грешка равности површине модула

Критичан параметар квалитета за монтажу МТП је **максимална грешка равности површине модула** ( $R_{max}$ ) мерена у сва три правца. За даљу анализу је неопходно добити емпиријске моделе зависности максималне грешке одступања од равности сваког модула у зависности од дужине и ширине модула.

Грешка **G21 – равност површине модула** је функционално најзначајнија грешка јер битно утиче на процес монтаже МТП. Контролним планом је предвиђена контрола равности по дужини, ширини и дијагонали модула. Као меродавно одступање од равности се узима највеће измерено одступање које не сме бити веће од  $\pm 2$  mm.

На основу измерених вредности одступања од равности површине и података о димензијама модула у наставку је установљена функционална зависност  $R_{max}$  од дужине ( $l$ ) и ширине ( $b$ ) модула. Због сличности облика и технологије израде, модули су као и у претходном случају груписани у две групе. **Група 1** обухвата зидне модуле **A** и **B** а **група 2** подне и плафонске модуле **C**, **Cz** и **D**.

5.2.5.1. Анализа зависности  $R_{\max}$  од дужине и ширине модула за групу I

Подаци за модуле из *групе I* су дати у табели 5.19.

Табела 5.19 – Подаци о измереним вредностима  $R_{\max}$  за модуле А и В

Р.бр.	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	Равност по дужини	Равност по ширини	Равност по дијагонали	$R_{\max}$
1	A	550	2440	1,2	0,5	1,5	1,5
2	A	550	2440	1,4	0,5	1,5	1,5
3	A	550	2440	1,4	0,5	1,6	1,6
4	A	550	2440	1,3	0,5	1,8	1,8
5	A	550	2440	1,2	0,5	1,6	1,6
6	A	550	2440	1,5	0,5	1,2	1,5
7	A	550	2440	1	0,5	1,3	1,3
8	A	550	2440	1,2	0,5	1,6	1,6
9	A	550	2440	1,3	0,5	1,6	1,6
10	A	550	2440	1,4	0,5	1,8	1,8
11	A	550	2440	1,2	0,5	1,5	1,5
12	A	605	2440	1,4	0,5	1,5	1,5
13	A	605	2440	1,4	0,5	1,6	1,6
14	A	630	2440	1,3	0,5	1,8	1,8
15	A	550	2440	1,2	0,5	1,6	1,6
16	A	505	2440	1,5	0,5	1,2	1,5
17	A	550	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
18	A	550	2500	1,4	0,5	1,5	1,5
19	A	550	2500	1,4	0,5	1,6	1,6
20	A	550	2500	1,3	0,5	1,8	1,8
21	A	550	2500	1,2	0,5	1,6	1,6
22	A	550	2500	1,5	0,5	1,2	1,5
23	A	550	2500	1	0,5	1,3	1,3
24	A	550	2500	1,2	0,5	1,6	1,6
25	A	550	2500	1,3	0,5	1,6	1,6
26	A	550	2500	1,4	0,5	1,8	1,8
27	A	550	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
28	A	550	2500	1,4	0,5	1,5	1,5
29	A	550	2500	1,4	0,5	1,6	1,6
30	A	550	2500	1,3	0,5	1,8	1,8
31	A	550	2500	1,2	0,5	1,6	1,6
32	A	550	2500	1,5	0,5	1,2	1,5
33	A	550	2500	1	0,5	1,3	1,3
34	A	670	2500	1,2	0,5	1,6	1,6
35	A	670	2500	1,3	0,5	1,6	1,6
36	A	430	2500	1,4	0,5	1,8	1,8
37	A	550	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
38	A	480	2500	1,4	0,5	1,5	1,5
39	A	550	2500	1,4	0,5	1,6	1,6
40	A	550	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
41	A	455	2320	1,2	0,4	1,4	1,4

Табела 5.19 – Подаци о измереним вредностима  $R_{\max}$  за модуле А и В (наставак)

Р.бр.	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	Равност по дужини	Равност по ширини	Равност по дијагонали	$R_{\max}$
42	А	455	2320	1,2	0,5	1,2	1,2
43	А	455	2320	1	0,3	1,3	1,3
44	А	465	2320	1,2	0,5	1,2	1,2
45	А	465	2320	1	0,5	1,3	1,3
46	А	465	2320	1,2	0,4	1,5	1,5
47	А	400	2810	1,2	0,5	1,5	1,5
48	А	400	2810	1,4	0,5	1,5	1,5
49	А	540	2810	1,4	0,5	1,6	1,6
50	А	550	2810	1,3	0,5	1,8	1,8
51	А	550	2810	1,2	0,5	1,6	1,6
52	А	550	2810	1,5	0,5	1,2	1,5
53	А	550	2810	1	0,5	1,3	1,3
54	А	550	2810	1,2	0,5	1,6	1,6
55	А	550	2810	1,3	0,5	1,6	1,6
56	А	550	2810	1,4	0,5	1,8	1,8
57	А	550	2810	1,2	0,5	1,5	1,5
58	А	550	2810	1,4	0,5	1,5	1,5
59	А	550	2810	1,4	0,5	1,6	1,6
60	А	550	2810	1,3	0,5	1,8	1,8
61	В	550	2440	1	0,5	1,3	1,3
62	В	550	2440	1,2	0,5	1,6	1,6
63	В	550	2440	1,3	0,5	1,6	1,6
64	В	575	2440	1,4	0,5	1,8	1,8
65	В	550	2500	1,4	0,5	1,5	1,5
66	В	500	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
67	В	550	2500	1,4	0,5	1,5	1,5
68	В	550	2500	1,2	0,5	1,5	1,5
69	В	465	2320	1,4	0,5	1,5	1,5
70	В	520	2810	1,4	0,5	1,6	1,6
71	В	620	2810	1,2	0,5	1,5	1,5
72	В	830	2810	1,2	0,4	1,4	1,4

Од математичких модела који су задовољили услове адекватности, предложен је линеарни модел (табела 5.20). С обзиром да полиномни модел другог реда има већи степен детерминације то је у овом случају за даљу анализу одабран **квадратни модел** (енг. *Quadratic Model*).

За изабрани модел је спроведена ANOVA анализа. Модел је редукован методом уназад (*Backward Elimination Regression with Alpha to Exit = 0,100*) тако што су из модела искључени несигнификантни чланови АВ и А<sup>2</sup> чија је *p*-вредносћ већа од 0,05. Анализа варијанси за преостале чланове је дата у табели 5.21.

Табела 5.20 – Табела збирних статистичких података

Model Summary Statistics						
Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0,136	0,200	0,177	0,134	1,385	Suggested
2FI	0,135	0,230	0,196	0,139	1,377	
Quadratic	0,134	0,263	0,207	0,123	1,403	
Cubic	0,130	0,342	0,247	-4,281	8,443	
Quartic	0,133	0,359	0,216	-1425,780	2281,065	Aliased

Табела 5.21 – ANOVA анализа

ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0,4151	3	0,1384	7,9493	0,0001	significant
A-b	0,0789	1	0,0789	4,5340	0,0369	
B-l	0,1658	1	0,1658	9,5279	0,0029	
B <sup>2</sup>	0,0956	1	0,0956	5,4950	0,0220	
Residual	1,1836	68	0,0174			
Lack of Fit	0,2361	14	0,0169	0,9612	0,5034	not significant
Pure Error	0,9475	54	0,0175			
Cor Total	1,5988	71				

F вредност модела ( $F=7,949$ ) указује да је модел сигнификантан. Ниска вредност вероватноће ( $p=0,0001 < 0,05$ ) потврђује да су параметри модела такође сигнификантни. F-вредност *Lack of Fit* износи 0,9612 што указује да грешка прилагођавања модела није сигнификантна у односу на чисту грешку. Коефицијент детерминације (R-squared) и остале статистике имају добре вредности што потврђује оправданост избора математичког модела (табела 5.22).

Табела 5.22 – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,1319	R-Squared	0,2596
Mean	1,5542	Adj R-Squared	0,2270
C.V. %	8,4890	Pred R-Squared	0,1827
PRESS	1,3066	Adeq Precision	13,5347

Коначна једначина математичког модела, са реалним коефицијентима, који адекватно описује зависност  $R_{\max}$  од ширине ( $b$ ) и дужине ( $l$ ) модула гласи:

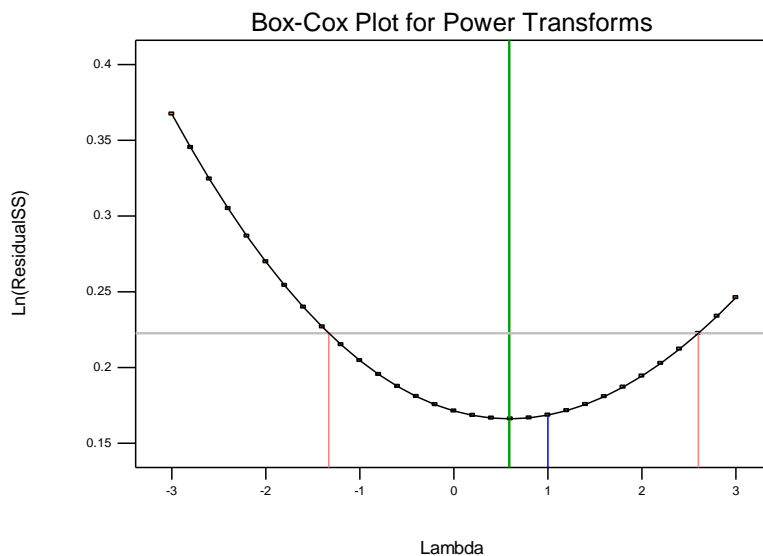
$$R_{\max} = -12,1894 + 6,198 \cdot 10^{-4} \cdot b_i + 1,0115 \cdot 10^{-2} \cdot l_i - 1,8968 \cdot 10^{-6} \cdot l_i^2. \quad (5.55)$$

Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, *Box-Cox* дијаграм и др.) показује да су резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистичке особине (сл. 5.14).

Design-Expert® Software  
Rmax

Lambda  
Current = 1  
Best = 0.59  
Low C.I. = -1.33  
High C.I. = 2.6

Recommend transform:  
None  
(Lambda = 1)



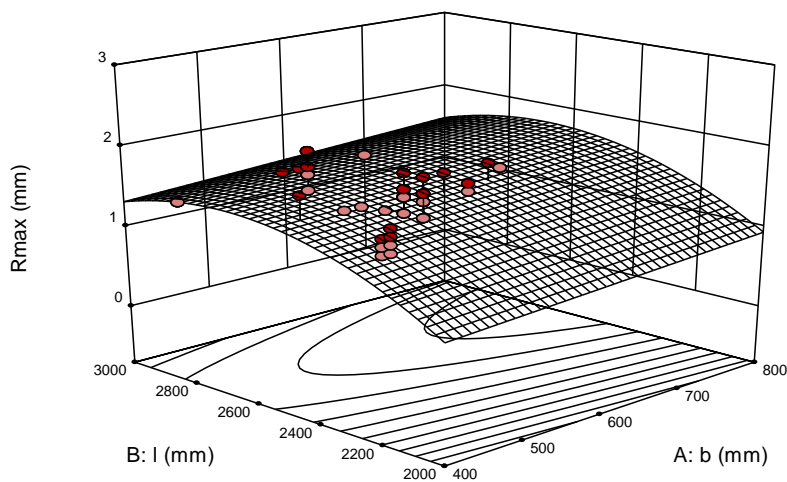
Слика 5.14 – Вох-Сох дијаграм за одабрани математички модел

Графички приказ математичког модела описаног једначином (5.55) је дат на слици 5.15.

Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Rmax (mm)

● Design points above predicted value  
● Design points below predicted value

X1 = A: b  
X2 = B: l



Слика 5.15 – 3D дијаграм одзивне површине  $R_{\max} = f(b, l)$  а модуле А и В.

5.2.5.2. Анализа зависности  $R_{\max}$  од дужине и ширине модула за групу 2

Подаци за модуле из *групе 2* су дати у табели 5.23.

Табела 5.23 – Подаци о измереним вредностима  $R_{\max}$  за модуле C, Cz и D

Р.бр.	Тип модула	$b$ (mm)	$l$ (mm)	Равност по дужини	Равност по ширини	Равност по дијагонали	$R_{\max}$
1	D	550	2350	1,4	0,5	1,5	1,5
2	D	550	2350	1,4	0,5	1,6	1,6
3	D	550	2350	1,2	0,5	1,5	1,5
4	D	550	2350	1,4	0,5	1,5	1,5
5	D	550	2350	1,2	0,5	1,5	1,5
6	D	550	2350	1,4	0,5	1,5	1,5
7	D	550	2350	1,4	0,5	1,6	1,6
8	D	550	2350	1,2	0,5	1,5	1,5
9	D	550	2350	1,4	0,5	1,5	1,5
10	D	550	2350	1,2	0,5	1,5	1,5
11	C	612	2350	1,4	0,5	1,5	1,5
12	C	612	2350	1,4	0,5	1,6	1,6
13	Cz	613	2350	1,3	0,5	1,8	1,8
14	Cz	613	2350	1,2	0,5	1,6	1,6
15	C	575	2940	1,2	0,5	1,5	1,5
16	C	575	2940	1,4	0,5	1,5	1,5
17	Cz	575	2940	1,4	0,5	1,6	1,6
18	Cz	575	2940	1,4	0,5	1,5	1,5
19	D	550	2940	1,4	0,5	1,6	1,6
20	D	550	2940	1,2	0,5	1,5	1,5
21	D	550	2940	1,4	0,5	1,5	1,5
22	D	550	2940	1,3	0,5	1,8	1,8
23	D	550	2940	1,2	0,5	1,6	1,6
24	D	550	2940	1,5	0,5	1,2	1,5
25	D	550	2940	1	0,5	1,3	1,3
26	D	550	2940	1,2	0,5	1,6	1,6
27	D	550	2940	1,3	0,5	1,6	1,6
28	D	550	2940	1,4	0,5	1,8	1,8
29	D	550	2940	1,2	0,5	1,5	1,5
30	D	550	2940	1,3	0,5	1,8	1,8
31	D	550	2940	1,2	0,5	1,6	1,6
32	D	550	2940	1,3	0,5	1,8	1,8
33	D	550	2940	1,2	0,5	1,6	1,6
34	D	550	2940	1,5	0,5	1,2	1,5
35	D	550	2940	1	0,5	1,3	1,3
36	D	550	2940	1,2	0,5	1,6	1,6
37	D	550	2940	1,3	0,5	1,6	1,6
38	D	550	2940	1,4	0,5	1,8	1,8
39	D	550	2940	1,2	0,5	1,5	1,5
40	D	550	2940	1,2	0,5	1,5	1,5
41	C	455	2320	1,3	0,5	1,2	1,3
42	C	570	1790	1,4	0,5	1,5	1,5
43	C	570	1790	1,4	0,5	1,6	1,6
44	Cz	570	1790	1,2	0,5	1,5	1,5

Табела 5.23 – Подаци о измереним вредностима  $R_{\max}$  за модуле C, Cz и D (наставкак)

Р.бр.	Тип	$b$ (mm)	$l$ (mm)	Равност по дужини	Равност по ширини	Равност по дијагонали	$R_{\max}$
45	Cz	570	1790	1,4	0,5	1,5	1,5
46	D	550	1790	1,2	0,5	1,5	1,5
47	D	550	1790	1,4	0,5	1,5	1,5
48	D	550	1790	1,4	0,5	1,6	1,6
49	D	550	1790	1,2	0,5	1,5	1,5
50	D	550	1790	1,4	0,5	1,5	1,5
51	D	550	1790	1,2	0,5	1,5	1,5
52	D	550	1790	1,4	0,5	1,5	1,5
53	D	550	1790	1,4	0,5	1,6	1,6
54	D	550	1790	1,2	0,5	1,5	1,5
55	D	550	1790	1,4	0,5	1,5	1,5

Од математичких модела који су задовољили услове адекватности, предложен је *линеарни модел* (табела 5.24).

Табела 5.24 – Табела збирних статистичких података

Model Summary Statistics						
Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0,106	0,134	0,101	0,024	0,661	Suggested
2FI	0,106	0,161	0,112	0,042	0,649	
Quadratic	0,107	0,172	0,087	-1,802	1,898	
Cubic	0,105	0,236	0,122		+	
Quartic	0,106	0,134	0,101	0,024	0,661	Aliased

Спроведена је ANOVA анализа (табела 5.25) којом је потврђена адекватност предложеног математичког модела.

Табела 5.25 – ANOVA анализа за линеарни модел

ANOVA for Response Surface Linear model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0,0907	2	0,0454	4,0193	0,0238	significant
A-b	0,0580	1	0,0580	5,1384	0,0276	
B-l	0,0371	1	0,0371	3,2864	0,0756	
Residual	0,5868	52	0,0113			
Lack of Fit	0,0688	5	0,0138	1,2495	0,3015	not significant
Pure Error	0,5179	47	0,0110			
Cor Total	0,6775	54				

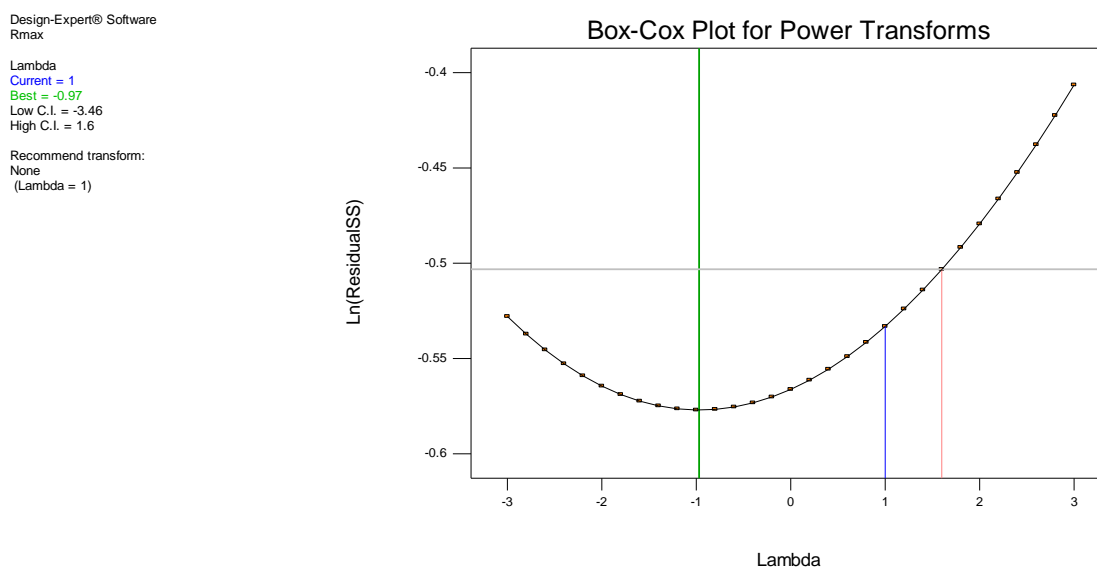
F вредност модела ( $F=4,02$ ) указује да је модел сигнификантан. Ниска вредност вероватноће ( $p=0,0238 < 0,05$ ) потврђује да су параметри модела такође сигнификантни. Грешка прилагођавања модела (*Lack of Fit*) има F-вредност 1,2495 што указује да недостатак способности прилагођавања модела није сигнификантан. Коефицијент

детерминације (R-squared) и остале статистике имају добре вредности што потврђује оправданост избора усвојеног математичког модела (табела 5.26).

**Табела 5.26** – Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0,1062	R-Squared	0,1339
Mean	1,5509	Adj R-Squared	0,1006
C.V. %	6,8492	Pred R-Squared	0,0243
PRESS	0,6610	Adeq Precision	9,4608

Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, *Box-Cox* дијаграм и др.) показује да су резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистичке особине (сл. 5.16).



**Слика 5.16** – *Box-Cox* дијаграм за одабрани математички модел

Конечна једначина математичког модела, са реалним коефицијентима, који адекватно описује зависност  $R_{\max}$  од ширине ( $b$ ) и дужине ( $l$ ) модула гласи:

$$R_{\max} = 0,59465 + 1,475 \cdot 10^{-3} \cdot b_i + 5,47 \cdot 10^{-5} \cdot l_i. \quad (5.56)$$

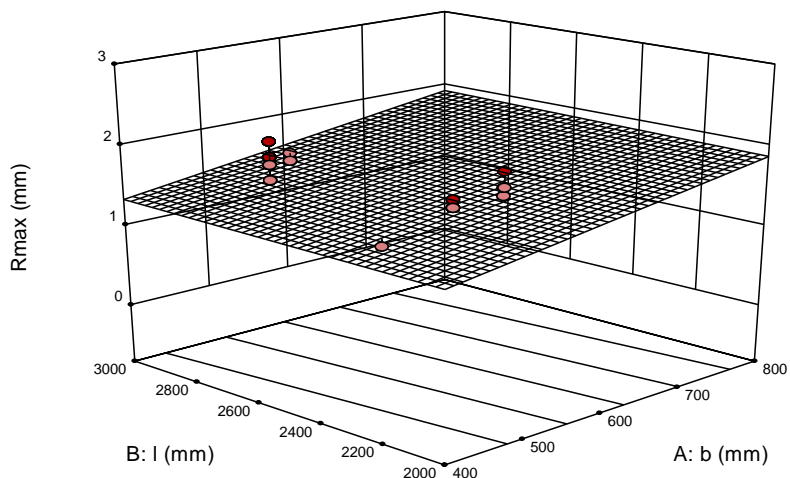
Графички приказ математичког модела описаног једначином (5.56) је дат на слици 5.17.



Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Rmax (mm)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value

X1 = A: b  
X2 = B: l



Слика 5.17 – 3D дијаграм одзивне површине  $R_{\max} = f(d, L)$  а модуле C, Cz и D.

### 5.2.5.3. Укупан збир максималних грешака равности

Као финална функција се дефинише укупан збир максималних одступања од равности сваког типа модула помножен са укупним бројем комада тог модула потребног за конфигурисање МТП:

$$R_{UK} = \sum_{i=1}^8 R_{\max i} \cdot N_i, \quad (5.57)$$

где је  $R_{\max i}$  – теоријски максимална грешка равности  $i$ -тог типа модула мерена у сва три правца у зависности од дужине и ширине модула, добијена на основу претходно развијених емпиријских модела.

### 5.2.6. Функције циља

Систем циљева који су разрађени за МТП на основу развијеног модела и платформе се може приказати следећим функцијама:

- $f_1$ : Минимизација укупног времена израде и монтаже МТП,
- $f_2$ : Минимизација укупних производних трошкова,
- $f_3$ : Минимизација укупног броја грешака на свим модулима и
- $f_4$ : Минимизација укупног збира максималних одступања од равности површине свих модула.

Односно:

$$1) \min T_{UK}, \quad (5.58)$$

$$2) \min C_{UK}, \quad (5.59)$$

$$3) \min G_{UK}, \quad (5.60)$$

$$4) \min R_{UK}. \quad (5.61)$$

За прорачун дефинисаних функција циља развијен је алгоритам и програмски код у софтверском пакету *MATLAB* приказан у прилозима 1 и 2.

ПОГЛАВЉЕ

# 6

---

**САД КОНФИГУРАТОР МТП**

Задатак CAD конфигуратора је да аутоматски трансформише захтеве купаца у 3D модел оптималне конфигурације производа, као и да генерише сву потребну техничку документацију.

Реализација CAD конфигуратора могућа је у комерцијалним CAD софтверима који поседују могућност увоза и прорачуна параметара као и имплементације знања уз чију помоћ управљају са карактеристикама 3D модела.

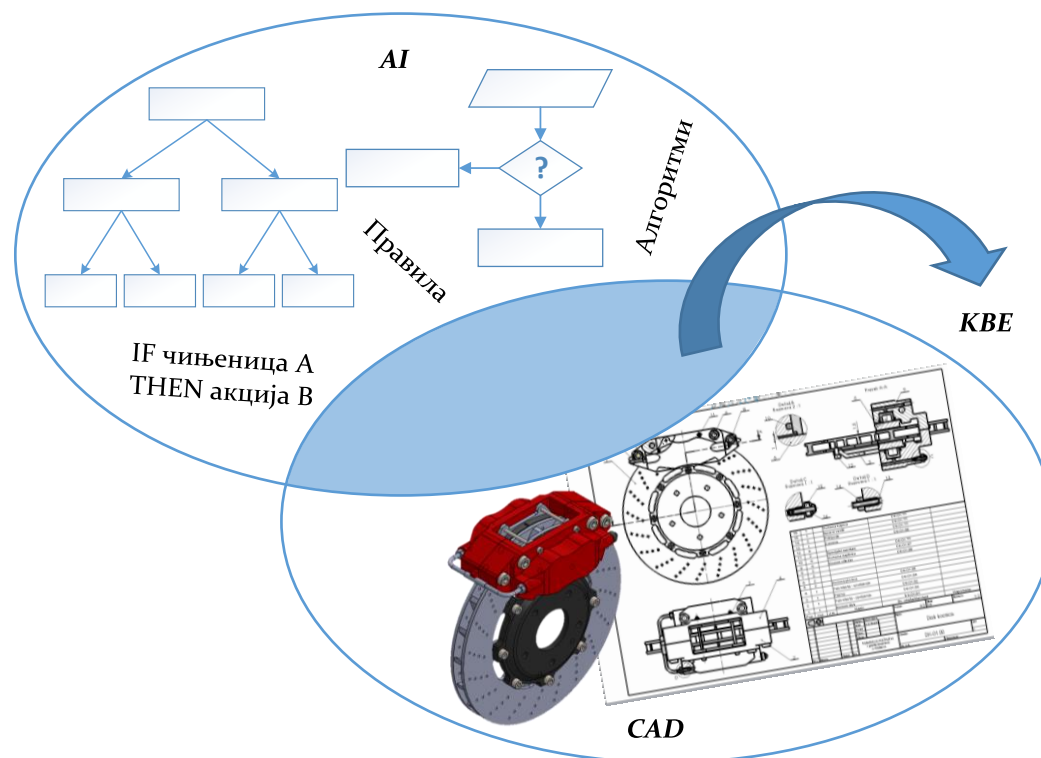
## 6.1. Напредни CAD системи засновани на знању

Системи засновани на знању (KBS) су рачунарски алати развијени да користећи складиштено знање решавају проблеме у одређеној области [80]. Функционишу по сличном принципу као и људски експерти, за добијање одговора на постављени проблем користе такозвани механизам закључивања. Процес закључивања се остварује на основу ограничене количине датих чињеница (које описују проблем) користећи специфична знања смештена у складиште, које се назива база знања (KB) и садржи сва потребна инжењерска знања свих стручњака који учествују у процесу (стручњаци за процесе и симулације, пројектанти, производни инжењери, ...) [80].

Већина инжењерских пројектантских задатака подразумева манипулацију геометријом, бави се генерисањем и управљањем сложеним конфигурацијама производа, доставља податке у различите врсте алата за специфичне анализе и зависи од резултата тих анализа. Такве инжењерске активности не омогућавају KBS системи, већ специјализовани CAD и САА алати. Потреба за спајањем могућности CAD и САА алата довела је до еволуције KBS и развоја посебног система за потребе инжењерског пројектовања производа и процеса на бази знања, названог инжењерство засновано на знању (KBE). KBE представља технологију засновану на употреби наменских софтверских алата, који омогућују складиштење и систематско коришћење претходно стеченог знања (искуства) о производима и процесима, са коначним циљем да смање време, грешке, трошкове и обим посла при развоју производа помоћу [79,80,152]:

- аутоматизације понављајућих и некреативних пројектантских задатака и
- подршке мултидисциплинарне оптимизације дизајна у свим фазама процеса дизајнирања.

Имплементација KBE система, могућа је директном уградњом у CAD системе или се може интегрисати као спољашње CAD језгро. Приметан је тренд веће примене директне интеграције знања у CAD систем [152]. KBE омогућује примену формализованог знања како би подржали пројектовање засновано на правилима (енг. *Rule-Based Design*), чиме се пројектанти ослобађају понављајућих активности у процесу инжењерског пројектовања. Омогућује и примену аналитичких поступака (нпр. рачунских алгоритама) и комуникације са екстерним САА алатима. Због тога се може сматрати да KBE системи удружују вештачку интелигенцију (AI) и CAD системе, што је приказано на слици 6.1 [80].



Слика 6.1 – Интеграција вештачке интелигенције и CAD система (прилагођено од [80])

Фокус конфигуратора за пројектовање производа је да помоћу *KBE* трансформише проблем пројектовања у конфигурациони проблем, нпр., применом формула за димензионисање, правила пројектовања или производних ограничења [153]. Употреба *KBE* система представља одличан алат за манипулацију геометријом и конфигурацијом производа, користећи мултидисциплинарно понављајуће пројектовање, према захтевима купца, уз помоћ правила [80].

Примена *KBE* система за аутоматизацију рутинског посла (као што је детаљно пројектовање производа и израда документације), који је могуће описати одређеним правилима и ограничењима, остварује се кроз параметарско 3D CAD моделирање [78]. Параметризација геометрије и структуре модела пружа важну основу за примену *KBE* метода и алата. Поред директног утицаја параметара на геометријске карактеристике, додатни параметри се могу применити за потребе разних прорачуна или структурирања [152]. Применом *KBE* могуће је створити различите врсте метода и алата за руковање специфичним задацима.

### 6.1.1. Параметарско CAD моделирање

Моделирање производа, у CAD системима, представља ИТ подршку стварања виртуелног модела кроз дефинисање његових карактеристика (геометријских, димензионих, физичких, тополошких, инжењерских, технолошких, производних, ...). Развојем CAD система кроз интегрисање геометријских информација, структуре производа и додатних података (нпр. димензије, толеранције, материјал и физичке особине), омогућена је шира примена модела у скоро свим дисциплинама у развоју

виртуелних производа и производње. Геометрија 3D виртуелног производа може се представљати као [2,152]:

- **Жичани модел** (енг. *Wireframe Model*) – дефинише 2D и 3D објекте уз помоћ тачки, правих и кривих линија. Користе се код стварања 2D, 3D скица и генерисања 2D радионичких цртежа.
- **Површински модел** (енг. *Surface Model*) – описује 3D објекте помоћу различитих врста (равних и закривљених) површина, и садрже само геометријске информације спољашњости објекта.
- **Запремински модел** (енг. *Solid Model*) – омогућује потпуно и компактно геометријско представљање 3D објекта у виртуелном окружењу.
- **Хибридни модел** (енг. *Hybrid Model*) – укључује комбинацију свих врста геометријског представљања објеката за дефинисање виртуелног производа.

У машинском инжењерству, при параметарском CAD моделирању 3D објеката, често се користе запремински модели, јер поред затворене спољашње геометрије поседују и информације о његовој запремини. Запремински модели омогућују аутоматски прорачун физичких особина (површина, запремина, тежина, центар маса, момент инерције,...), детекцију преклапања при склапању механизма, стварање пројекција, разних статичких и динамичких прорачуна и симулација као и за прорачуне путања код робота и нумерички управљаних машина алатки.

При развоју сложених геометријских облика, поготово у аутомобилској индустрији, користило се површинско моделирање због могућности дефинисања површине помоћу математичких израза, али мана овог типа моделирања је што нема запремину а самим тим ни могућност разних прорачуна и симулација. Због тога временом се увела комбинација жичаног, површинског и запреминског моделирања названог хибридно моделирање, код ког се користе предности свих врста моделирања, па се помоћу површина обично представља сложен геометријски облик модела (омотач) чијим попуњавањем се добија запремински модел који се даље користи за разне прорачуне и симулације.

Процес запреминског моделирања компоненти (енг. *Part*) заснива се на комбиновању унапред дефинисане 3D геометрије основних технолошких облика (нпр. коцка, квадар, цилиндар, лопта, конус, торус) уз помоћ оператора Булове алгебре (пресек, унија и разлика). Поред основних технолошких облика постоје и технике које уз помоћ 2D скице и корисничких операција (транслација, ротација) стварају запремински технолошки облик захтеваног геометријског облика. За креирање запреминских технолошких облика са сложенијим спољашњим површинама користе се напредне корисничке операције које захтевају више 2D скица на основу којих се добија захтевани модел [152].

Осим тога, честа је потреба за пројектовањем компоненти од лима које се добијају процесом савијања где је са аспекта производње веома битна документација која садржи развијен облик лима као и линије, углове и правце савијања. Савремени CAD системи поседују специјалан модул за делове од лима (енг. *Sheet Metal*) уз помоћ ког се пројектује

параметарски запремински 3D модел лима (компоненте) од кога се аутоматски добија таква документација.

Поред компоненти CAD системи омогућују и пројектовање 3D склопова (енг. *Assembly*) комбиновањем претходно формираних компоненти и/или стандардних компоненти (нпр. вијак, навртка, лежаји, зупчаници ...). Модел 3D CAD склопа омогућује структуру производа и све геометријске информације, које укључују позиционирање свих укључених компоненти у 3D CAD простор склопа. Структура производа представља логичан распоред модула и компоненти у 3D CAD простору склопа, управља везама и односима између њих, и пружа информације потребне за генерисање разних табела.

Организација структуре производа се састоји од неколико нивоа који укључују специфичне комбинације засебних или повезаних компоненти и модула. У CAD системима главни производ се састоји од компоненти, модула и подмодула који су распоређени унутар главног нивоа структуре производа. Компоненте углавном представљају засебне делове (3D објекте) који се даље не деле, попут ливених делова, обрађених делова или стандардних делова. У многим случајевима састављање компоненти резултира модулом, подмодулом или, у случају једноставног производа, главном структуром производа. Сложени производи састоје се од многобројних елемената, при чему се модули и подмодули добијају као одвојене конфигурације где се комбинују компоненте и подмодули у логичне конфигурације.

Примена параметарског пројектовања у CAD системима представља основу пројектовања производа заснованог на знању и пружа три главне предности [154,155]:

- аутоматско преношење промена у моделу,
- поновну употребу геометрије и
- уградњу знања о дизајну/производњи у геометрију.

Параметаризацијом виртуелног прототипа остварује се индивидуални опис геометрије модела, кроз примену унапред дефинисаних параметара и ограничења. Постоје четири основне врсте параметара које се примењују у савременим CAD софтверским системима, а то су [155,156]:

- **Геометријски параметри** – дефинишу облик компоненте или склопа. Њима припадају све врсте димензија и ограничења.
- **Параметри шиболоије** – представљају структурне параметре који могу контролисати, на пример, стање припадности (*suppression*) компоненте у склопу или карактеристике (*feature*) у моделу компоненте.
- **Физички параметри** – одређују физичка својства модела (материјал, тежина, запремина, површина,...).
- **Процесни или технолошки параметри** – садрже, нпр. ограничења израде као што су минимални радијуси савијања код делова од лима или угао нагиба код пројектовања калуца за ливење.

Најчешће коришћени геометријски параметри су димензиони, и имају примену при управљању величинама разних ентитета 3D модела. Поред њих, јако битан алат при параметарском пројектовању представљају геометријска ограничења, која се на различите начине могу применити на компоненте и склопове.

Код *параметарског пројектовања компоненти* често се примењују геометријска ограничења у 2D скици како би се омогућио правилан распоред ентитета у скици. Нпр. постављање две линије да буду међусобно паралелне или управне, везивање две тачке једне за другу, повезивање центра круга или почетне тачке линије за било коју постојећу тачку у скици или на моделу [152,155]. Њиховом применом се олакшава пројектовање модела смањењем броја потребних димензионих параметара чиме се упрошћује и убрзава процес прилагођавања.

Код *параметарског пројектовања склопова* геометријска ограничења налазе примену при позиционирању компоненти и модула унутар 3D радног простора, и представљају важан задатак у коришћењу 3D CAD система. Појединачне компоненте (или модули) или групе компоненти (или модула) могу се транслационо и ротационо померати у 3D виртуелном простору применом различитих врста функција, па је неопходно обезбедити њихово правилно геометријско позиционирање на неки од следећих начина [152]:

- директна ограничења између компоненти (модула),
- позиционирање помоћу модела костура и
- позиционирање помоћу главних координатних система.

Код *директног ограничења између компоненти* делови од којих се састоји производ међусобно се позиционирају уз помоћ основних геометријских ограничења, тако да ограничења подлежу параметарско-асоцијативним законима. Сва ограничења се дефинишу између ентитета компонента производа. Постоје различите врсте геометријских ограничења за позиционирање компоненти у склопу, а основна су ограничења преклапања (енг. *Coincidence*), која дефинишу подударно поравнање два геометријска елемента, и претежно се примењује на равне површине, линије и тачке, али се може применити и на концентричност два круга или коаксијалност две ротационе површине (ваљка), нпр. за постављање вијка у отвор. Ограничења преклапања могу довести два геометријска елемента на исту позицију, нпр. међусобним преклапањем две тачке, линије или две равни директно. Друга врста је ограничење одступања (енг. *Offset*), и представља паралелно позиционирање два геометријска елемента на јасно дефинисано међусобно растојање. Примењује се на тачке, равни или површине узимајући у обзир оријентационе векторе, који дефинишу правац растојања. Трећа врста су угаона ограничења, која остварују јасно дефинисану угловну позицију међу равнима, површинама или линијама. У случају две линије, потребно је осигурати да се одговарајуће линије секу у једној тачки. Поред наведених основних геометријских ограничења постоје и напредна: ограничења дужинског и угаоног кретања, симетричност, спрезање зупчаника, спрезање елемената са навојем, шарке, каишни пренос, универзални зглоб.



Како би се извршило правилно позиционирање делова и модула потребно је обезбедити минимум један референтни елемент (фиксни елемент у простору), који ће представљати основу за позиционирање осталих компоненти. Савремени CAD системи пружају специфичне функције за дефинисање статичких и динамичких склопова 3D модела, па се примењују када је потребно обезбедити кинематичку функционалност.

Код **позicionирања помоћу модела костура** процес позиционирања се постиже применом геометријских ограничења, али не на међусобне везе између компоненти (или модула), већ на везе компоненти и модула са моделом костура. Модел костура представља засебне геометријске елементе у структурама производа, у односу на који се позиционирају све компоненте и модули, и на тај начин омогућују ефикасно позиционирање и контролу других компоненти и модула. Било каква геометријска измена модела костура (нпр. дужина, угао или растојања) доводи до геометријске промене положаја компоненти у структури производа и, у посебним случајевима, може довести до модификације геометријских карактеристика самих делова. Модел костура углавном се састоји од тачака, линија, равни и координатних система, који дефинишу геометријске положаје свих делова и модула у структури производа.

За разлику од претходне две методе, код **позicionирања помоћу главних координатних система** се не користе геометријска ограничења, већ се позиција сваке компоненте остварује помоћу једног унапред дефинисаног главног координатног система који се налази у 3D CAD простору склопа. Процес склапања је аутоматски и одвија се једноставним читавањем одговарајућих делова у структуру производа и преклапањем њихових референтних елемената са главним координатним системом склопа. На тај начин све компоненте и модули аутоматски заузимају своје исправне положаје у 3D радном простору склопа. Као референтни елемент модел сваке компоненте и модула у себи садржи свој главни координатни систем, у односу на који се позиционира. Поред тога, могу имати и различите додатне координатне системе који су такође позиционирани у односу на главни координатни систем компоненте. Координатни системи се претежно постављају у равни симетрије компоненте, модула или производа.

Како је сваки елемент постављен у односу на главни координатни систем, нема потребе за посебним напорима за позиционирање, па је управљање компонентама и модулима у структури производа олакшано. На тај начин се ствара врло стабилна и сигурна структура података, којом се PDM системима може релативно лако управљати, што је значајна предност ове методе. Како не постоје геометријска ограничења или сложене структуре модела костура, ова метода омогућава лако склапање готово сваке жељене сложености структура производа. Проблеми могу настати при врло сложеном руковању у случају измена дизајна или каснијих геометријских промена, која се јавља код конфигуратора пројектовања. У таквим случајевима, сваки елемент структуре производа мора се преместити у своје ново место, што захтева значајан напор.

Све три методе позиционирања имају своје предности и недостатке, па савремени процеси развоја сложених производа (нпр. аутомобилска индустрија) комбинују све три методе позиционирања ради постизања оптималних конфигурација склопа. Потребно је

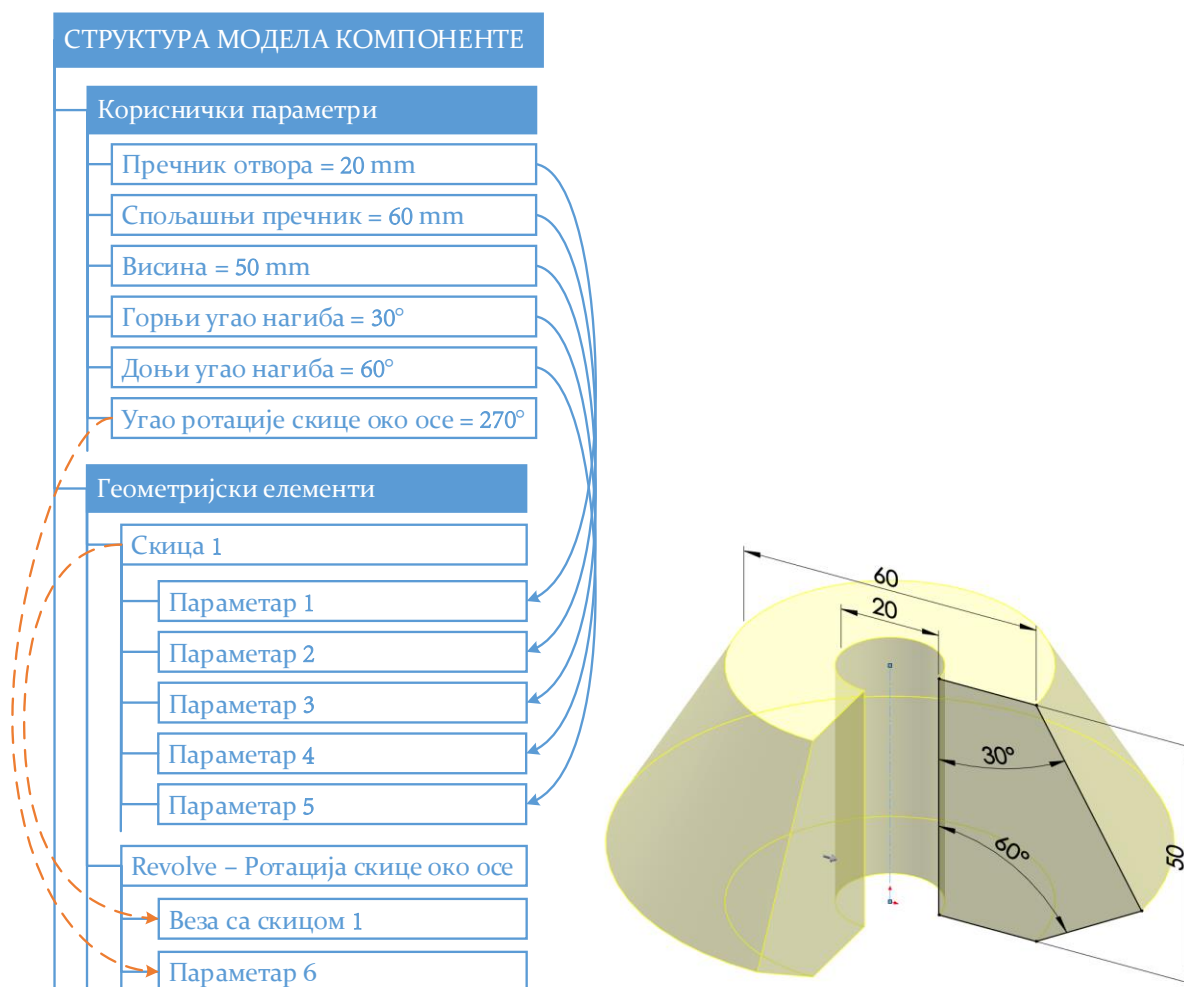
јасно дефинисати стратегије позиционирања компоненти и модула, током планирања пројекта, како би се избегли проблеми током процеса пројектовања.

### 6.1.2. Повезивање и управљање параметара

При повезивању параметара, код CAD система, разликују се улазни („водећи“) параметри и параметри који зависе од њих („вођени параметри“). Дефинисање математичких веза, између параметара, омогућују и имплементацију аритметичких или логичких геометријских зависности. На тај начин се у савремене CAD системе могу интегрисати формуле, везе, правила и реакције што омогућује преношење промена и аутоматско дефинисање и управљање геометријом 3D CAD модела [152] тако да при пројектовању параметарских модела пројектант не само да моделира геометрију, већ и планира концепт параметризације и конфигурисања. Предуслов је да CAD систем има могућност креирања корисничких параметара, не само димензионих (дужина или угао), већ да подржава њихово повезивање, управљање и обраду осталих врста параметара и ограничења [155].

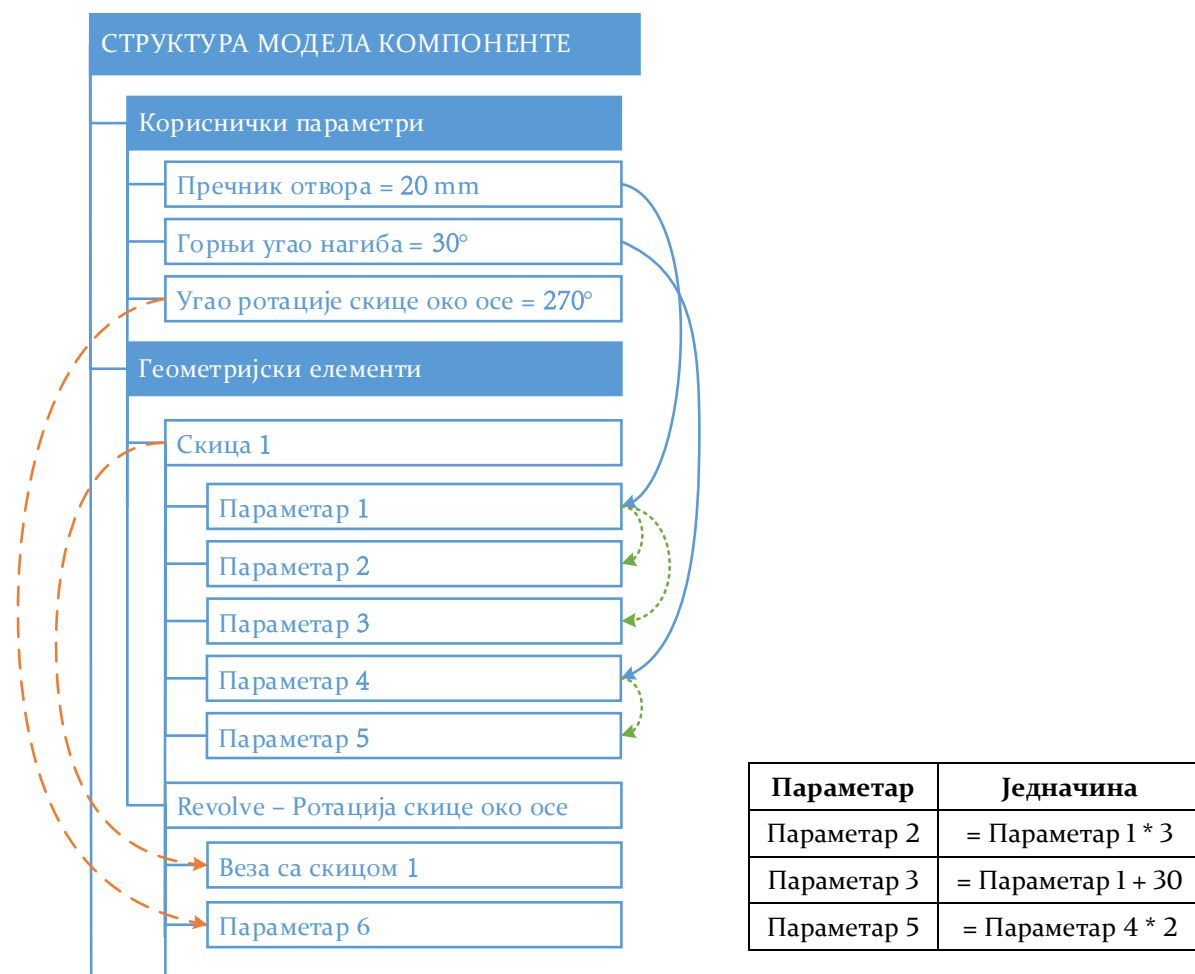
Међусобне везе параметара, на нивоу појединачне компоненте, повезују геометријске параметре (претежно димензије) како би остварили потпуну контролу и структурисање геометрије 3D модела компоненте. Ово се омогућује помоћу такозваних шаблона геометрије (шаблон компоненте), где је потребно све геометријске параметре 3D CAD модела повезати са улазним корисничким параметрима или са другим геометријским параметрима, како би се омогућило преношење промена. На тај начин је могуће да свака измена корисничких (улазних) параметара доводи до аутоматске измене осталих параметара као и комплетне 3D геометрије компоненте. Примена параметризације је могућа и на 2D скице и на операције за добијање 3D објеката [152].

Прост пример међусобног повезивања параметара, на нивоу компоненте, где сваки геометријски параметар зависи од једног улазног корисничког параметра је приказан на слици 6.2. Овај 3D објекат се добија уз помоћ једне скице и операције ротирања те скице око осе за одређени угао (270°). Плавом бојом су приказане директне везе улазних (корисничких) и геометријских параметара у 2D скици, док су наранџастом бојом (испрекидана линија) приказане везе које омогућују управљање операцијом за добијање 3D објекта (*Feature*).



Слика 6.2 – Имплементација корисничких параметара за контролу геометрије 3D модела (прилагођено од [152])

Поред овог приступа исти модел могуће је добити тако што ће неки од геометријских параметара зависити од улазних корисничких параметра, а други геометријски параметри могу међусобно зависити један од другог (слика 6.3). На овај начин могуће је управљати геометријом модела уз мање улазних корисничких параметара, али је потребно дефинисати јасне математичке везе између геометријских параметара (таблица на слици 6.3). Боје стрелица имају исто значење као и у претходном случају, али је додата и зелена стрелица (тачкице) која означава везу између геометријских параметара.



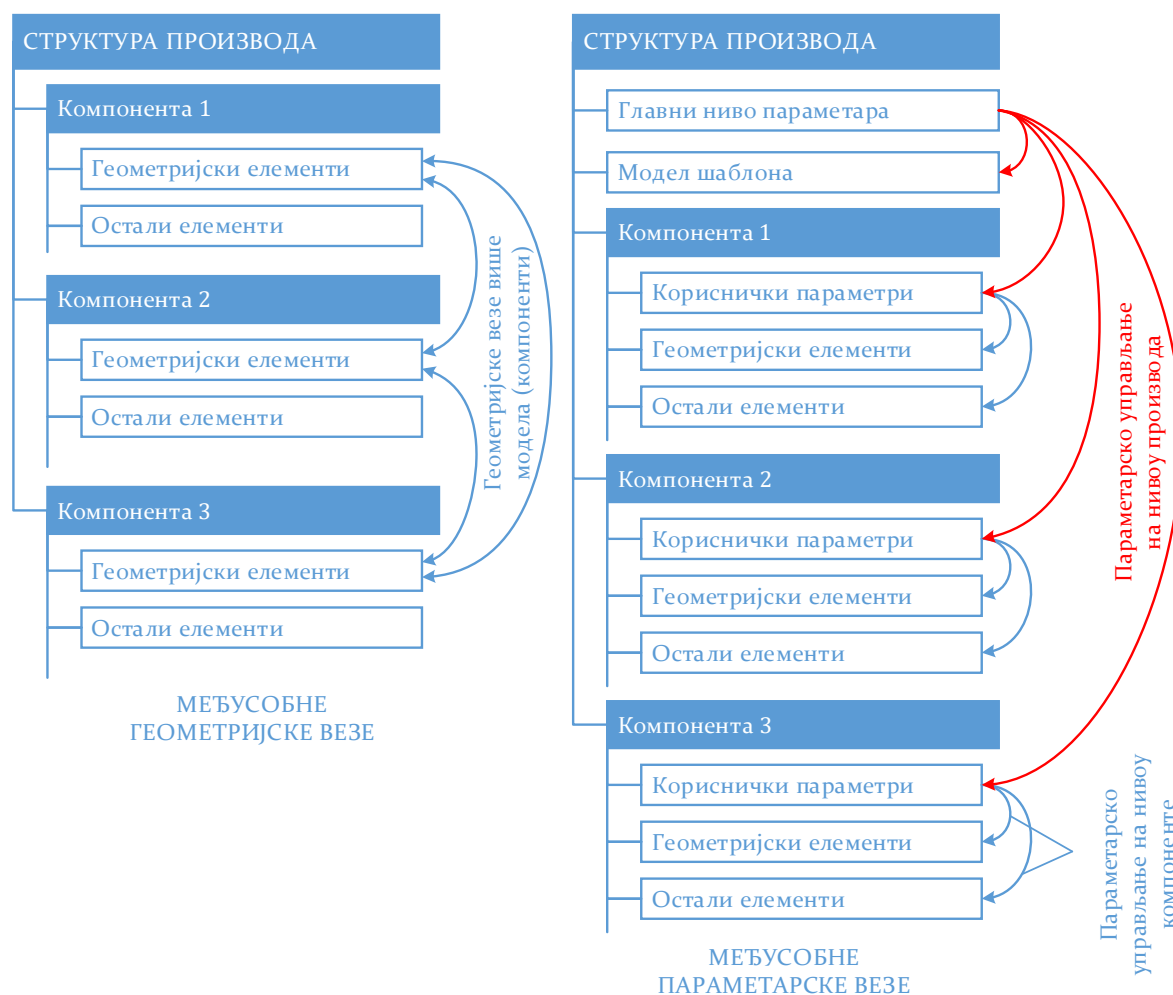
Слика 6.3 – Имплементација корисничких параметара и математичких зависности за контролу геометрије 3D модела (прилагођено од [152])

Поред параметризације CAD модела појединачних компоненти, паралелно структурирање склопова у комбинацији са применом различитих метода позиционирања и правила пројектовања, подржава стварање сложених шаблона структуре (шаблон склопова). Овакви свеобухватни шаблони могу се састојати од великог броја логички повезаних и прилагодљивих појединачних компоненти, и омогућују структурисање параметара на различитим нивоима. Такође, они обезбеђују да се неки од параметара, уз помоћ међусобних веза и правила пројектовања, могу преносити са највишег нивоа склопа до најнижег нивоа сваке компоненте, што успоставља трајну везу параметара.

Савремени CAD системи, при пројектовању склопова, нуде две различите стратегије стварања међусобних веза између параметара различитих компоненти и модула, а то су: међусобне геометријске везе и међусобне параметарске везе (слика 6.4) [152].

**Међусобне геометријске везе**, у CAD склоповима, заснивају се на директној повезаности геометријских елемената компоненти и/или модула, тако да измене на једној компоненти (модулу) резултирају аутоматским изменама на другим компонентама (модулима), према унапред дефинисаним међусобним везама. Могу да садрже различите врсте геометријских веза и могу се применити између свих

компоненти и модула који учествују у склопу. Модели шаблона структуре, сложене монтажне структуре производа, могу садржати бројне геометријске везе што може довести до збуњујућих и преоптерећених веза које је тешко разумети и репродуковати. Због тога је потребно да се дефинише јасна параметарска структура која ће омогућити лако руковање и поновну употребу модела шаблона.



Слика 6.4 – Стратегије повезивања параметара у окружењу CAD склопова (прилагођено од [152])

**Међусобне и параметарске везе**, у CAD склоповима, остварују се помоћу механизма за контролу параметара. Механизам за контролу параметара користи стратегију главног нивоа параметра, који испоручује специфичне корисничке параметре на ниво сваке компоненте, и на тај начин обезбеђује њихову параметризацију. Дакле, постоји главни ниво параметра који укључује скуп корисничких параметара и служи као улазни оквир. Кориснички параметри на главном нивоу повезани су са одговарајућим корисничким параметрима на нивоу модула или компоненте. У случају постојања модула или подмодула у склопу, кориснички параметри су на главном нивоу модула, повезани са одговарајућим корисничким параметрима компоненти од којих се модул састоји. На нивоу компоненте, параметризација је идентична као што је раније објашњено и приказано на сликама 6.2 или 6.3. Имплементација ове врсте веза остварује се применом сложених модела шаблона структуре, који могу да садрже ограничења и костурне

моделе, који служе за позиционирање или за дефинисање геометријских карактеристика компоненти и модула.

Стварање међусобних веза, код CAD система, могуће је уз помоћ примене неколико функција тако да свака промена почетних елемената води и ка адаптацији изведене геометрије. Постоје многе геометријске карактеристике производа које би се могле повезати, и чијим повезивањем би се повећала сложеност параметарско-асоцијативних CAD модела, што доводи до смањења њихове стабилности у случају модификација. Да би се избегли потенцијални проблеми због сложене међусобне повезаности геометријских карактеристика, неопходно је пажљиво планирање и управљање међусобним везама [152].

Претходно је представљено повезивање и управљање параметрима унутар CAD система, али поред тога, постоји и други начин а то је могућност екстерне контроле интерно коришћених параметара. На овај начин се екстерно (у неком другом софтверу) изврши прорачун и снимање вредности релевантних параметара, које се након тога увозе у 3D CAD систем и даље управљају параметрима 3D CAD модела. То се може остварити кроз увоз текстуалних датотека или везом са комерцијално доступним софтверима за табеларне прорачуне (нпр. *MS Excel*). Такви софтвери обично нуде додатне математичке и статистичке операције које нису имплементирани у самом CAD систему [152]. Такође важна чињеница је да се релевантни подаци за дефинисање и спецификацију компоненти могу сачувати на различитим радним листовима и затим повезати употребом матричних операција у *MS Excel*-у. Ове карактеристике омогућују стварање база података са параметрима релевантним за пројектовање.

### 6.1.3. Правила пројектовања

Правила пројектовања омогућују примену инжењерских знања и служе за остваривање и управљање међусобним везама, ограничењима као и другим параметрима (топологије, геометрије,...) унутар 3D CAD простора компоненти, модула и склопова. У основи, концепт правила је заснован на стаблу одлуке употребом *IF-THEN-ELSE* и *CASE* наредби као и *WHILE* петље. Правила се постављају процедурално и могу се користити за извршавање подређених правила и ограничења, или се привремено бришу из радне меморије [155].

Већина CAD система поседује сопствене модуле за имплементацију знања у виду правила пројектовања. Неки од система су способни да поставе и израчунају правила пројектовања у оквиру функционалности стандардне конфигурације, као нпр. *iLogic* код *Autodesk Inventor Professional*-а или *DriveWorks* код *SolidWorks*-а; док је код неких система потребно проширење попут *Knowledge Workbenches* за *CATIA* или *Knowledge Fusion* за *Siemens NX* [80]. При имплементацији правила пројектовања разликују се два приступа [155]:

- Правила се кроз програмски код имплементирају директно у CAD систем или у појединачне CAD моделе и цртеже помоћу посебних модула (*iLogic*, *DriveWorks*,...)

или макроа. Зависно о апликативном програмском интерфејсу (API) програмски код се имплементира на различите начине.

- Програмски код се може екстерно записати у неком другом софтверском пакету који затим на даљину покреће CAD систем. У њему се могу решити све функционалности.

Способност креирања макро наредби може бити од велике користи за омогућавање аутоматског низа функција и радњи [152].

#### 6.1.4. Интелигентни шаблони/обрасци

Интелигентни шаблон представља параметарски, надоградиви и поново употребљиви модул унутар дигиталног прототипа, и садржи сва потребна знања, правила и карактеристике потребне за пројектовање прилагођеног производа. Интелигентни шаблони могу подржати прикупљање експертског знања и интегрисати постојеће знање из претходно развојних пројеката у тренутни процес пројектовања [152].

Комбинацијом различитих шаблона (шаблона структуре, геометрије и функционалности) унутар једне структуре података, добија се интелигентан шаблон који омогућује генерисање ефикасних алата за развој производа. Због својих интегрисаних програмираних функција и алгоритама, такви алати су напредни носиоци знања (*Know-How*) и омогућују њихову поновну употребу. Тако добијени шаблон представља унапред дефинисане моделе компоненти или склопова (модула, подмодула или производа), који могу да садрже све структурне, геометријске и функционалне информације о производу и контролишу их уз помоћ улазних параметрима у процесу пројектовања. Могућност одвајања геометрије од основних параметара делова, омогућује дефинисање флексибилних модела код којих се варијантност компоненти остварује једноставном променом вредности улазних параметара. Поред варијантности компоненти, шаблони могу да обезбеде варијантност склопова, кроз управљање са њиховом (променљивом) структуром, користећи параметре топологије, међусобне везе међу параметрима, правила пројектовања и комбинације различитих метода позиционирања компоненти и модула. На овај начин се омогућује флексибилност у геометријским карактеристикама, као и у позиционирању и структурним конфигурацијама.

Процес стварања интелигентног шаблона састоји се из четири корака [155]:

- Одредити границе простора решења користећи претходно искуство.
- Преликати процес развоја производа у контекст шаблона.
- Развити генерички параметарски модел свих потребних производа, модула и компоненти.
- Преликати специфичне параметре модела у заједнички скуп параметара конфигурације.

## 6.2. CAD конфигуратор МТП

Реализација CAD конфигуратора извршена је у комерцијалном софтверском систему *Autodesk Inventor Professional*, који поседује модућност увоза екстерно прорачунатих параметара. Поред тога поседује и додатак *iLogic* који омогућава имплементацију знања у виду правила пројектовања која служе за управљање разним параметрима и ограничењима. Процес пројектовања аутоматског CAD конфигуратора МТП одвија се у три корака:

- пројектовање интелигентног 3D шаблона компоненти,
- пројектовање интелигентног 3D шаблона склопа модула и МТП и
- пројектовање шаблона 2D техничке документације.

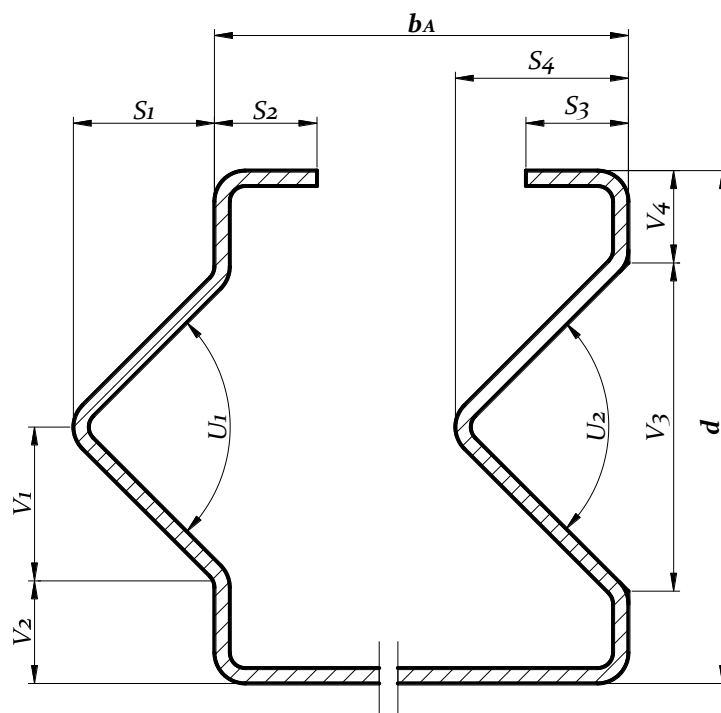
Основни параметри свих модула МТП и други подаци потребни за конфигурисање МТП прорачунати су и снимљени у табеларном облику (*Excel* фајл). Увозом тих параметара на ниво компоненте, модула и МТП добијају се кориснички параметари који су даље повезани са осталим параметрима у оквиру 3D модела. Параметри су директно повезани тако да свака промена вредности параметра у изворној табели (*Excel* табели) резултира аутоматском променом параметара у *Inventor*-у где се даље ажурирају сва ограничења и правила повезана са тим корисничким параметрима.

### 6.2.1. Пројектовање интелигентних 3D шаблона компоненти

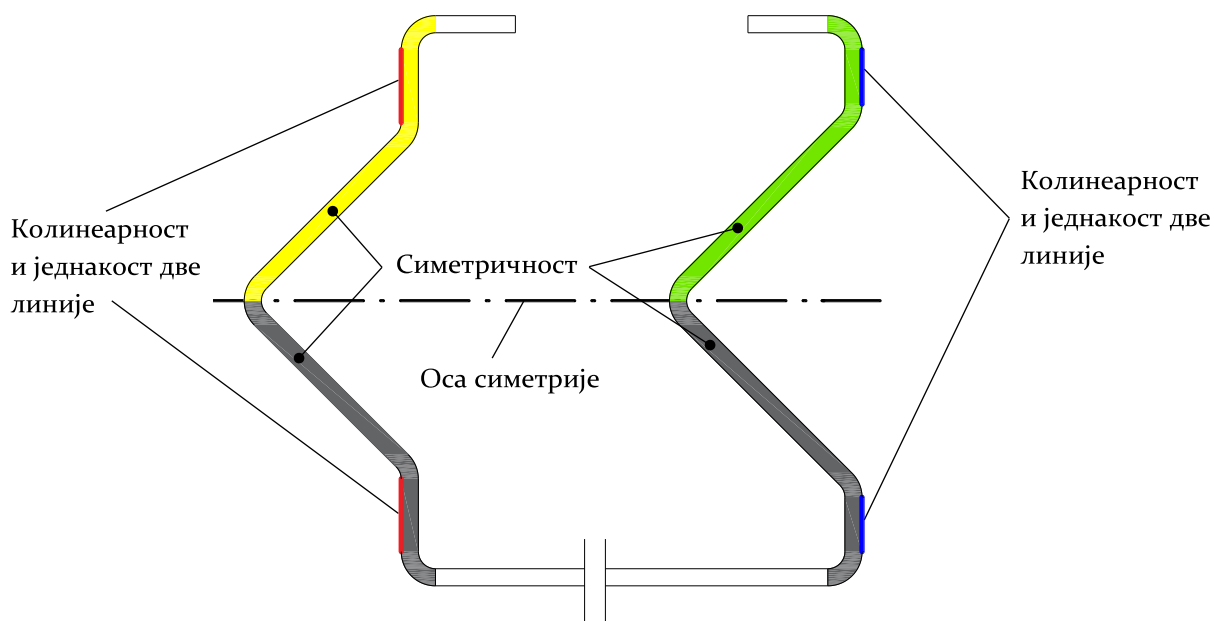
При пројектовању интелигентног шаблона компоненти, потребно је дефинисати корисничке (водеће) и вођене параметре. Поред тога неопходно је дефинисати јасне математичке или логичке зависности између корисничких и вођених параметара за сваку компоненту. Тако дефинисан шаблон ће помоћу корисничких параметара и параметарских веза аутоматски мењати вођене параметре а самим тим и прилагођавати компоненте.

Пример потребних димензионих параметара за прилагођавање 2D скице једне операције за формирање компоненте (профил омотача модула А) приказан је на слици 6.5 где су димензије  $b_A$  и  $d$  кориснички параметри а остале димензије су или фиксне или вођене (зависе од корисничких параметара). Поред параметара, дефинишу се и геометријска ограничења ради смањења потребних димензија као и лакшег и бржег процеса прилагођавања. У поменутом примеру омотача (слика 6.6) коришћена су геометријска ограничења симетричности (линије које ограничавају осенчене површине) као и колонеарност и једнакост (подебљане линије).



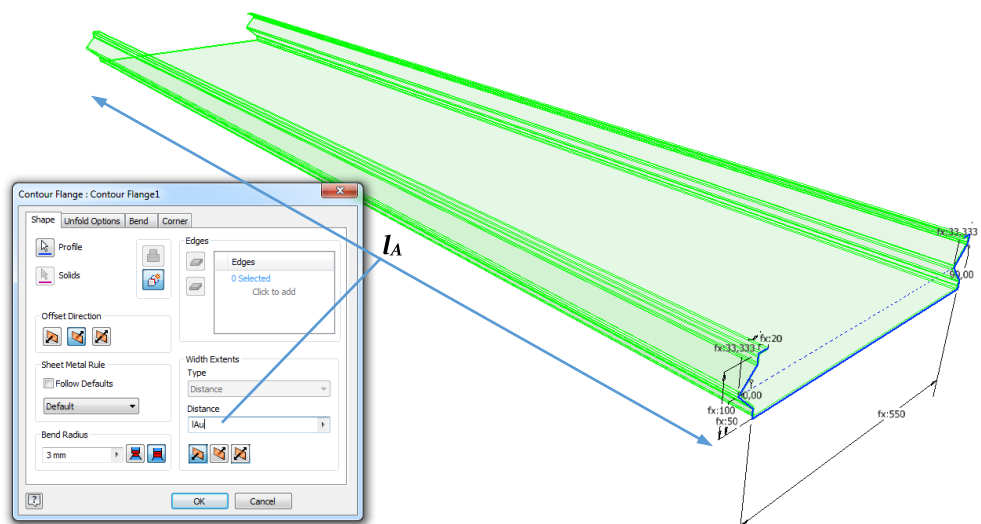


Слика 6.5 – Профил омотача модула А са основним димензионим параметрима



Слика 6.6 – Приказ геометријских ограничења у 2D скици

Дужина омотача одређује се корисничким параметром  $l_A$  чиме је потпуно дефинисан његов 3D модел (слика 6.7). Табеларни приказ повезивања неколико димензионих параметара са корисничким параметрима, на нивоу компоненте, је приказан на слици 6.8.



Слика 6.7 – Приказ повезивања параметра дужине омотача

Parameter Name	Consumed by	Unit/	Equation	Nominal Value	Tol.	Model Value	Key	Exp	Comment
<b>Model Parameters</b>									
d1		mm	BendReliefWidth	3,048000	●	3,048000			
d2		mm	BendReliefDepth	1,524000	●	1,524000			
d3		mm	MinimumRemnant	6,096000	●	6,096000			
d4		mm	TransitionRadius	3,048000	●	3,048000			
lA		mm	lAu			2800,000000			
d6	Contour Flange1	mm	3 mm			3,000000			
d7	Contour Flange1	mm	0 mm			0,000000			
d8		mm	Corr			12,192000			
d9		mm	Gap			3,048000			
R		mm	JacobIRa size	3,048000	●	3,048000			
bA	Sketch1	mm	bAu	550,000000	●	550,000000			Вођени параметри
S2	Sketch1	mm	dAu / 5 ul	20,000000	●	20,000000			
S3	Sketch1	mm	dAu / 5 ul	20,000000	●	20,000000			
d	Sketch1	mm	dAu	100,000000	●	100,000000			
V3	Sketch1	mm	dAu / 2 ul	50,000000	●	50,000000			
U1	Sketch1	deg	90 deg	90,000000	●	90,000000			
U2	Sketch1	deg	90 deg	90,000000	●	90,000000			
S1	Sketch1	mm	dAu / 3 ul	33,333333	●	33,333333			
S4	Sketch1	mm	dAu / 3 ul	33,333333	●	33,333333			
<b>Reference Parameters</b>									
d0	Contour Flange1	mm	Thickness	3,048000	●	3,048000			
<b>User Parameters</b>									
lAu	lA	mm	2800 mm	2800,000000	●	2800,000000			Кориснички параметри
bAu	bA	mm	550 mm	550,000000	●	550,000000			
dAu	S4, S1, V3, d, ...	mm	100 mm	100,000000	●	100,000000			

Слика 6.8 – Приказ параметара компоненте и њихових веза

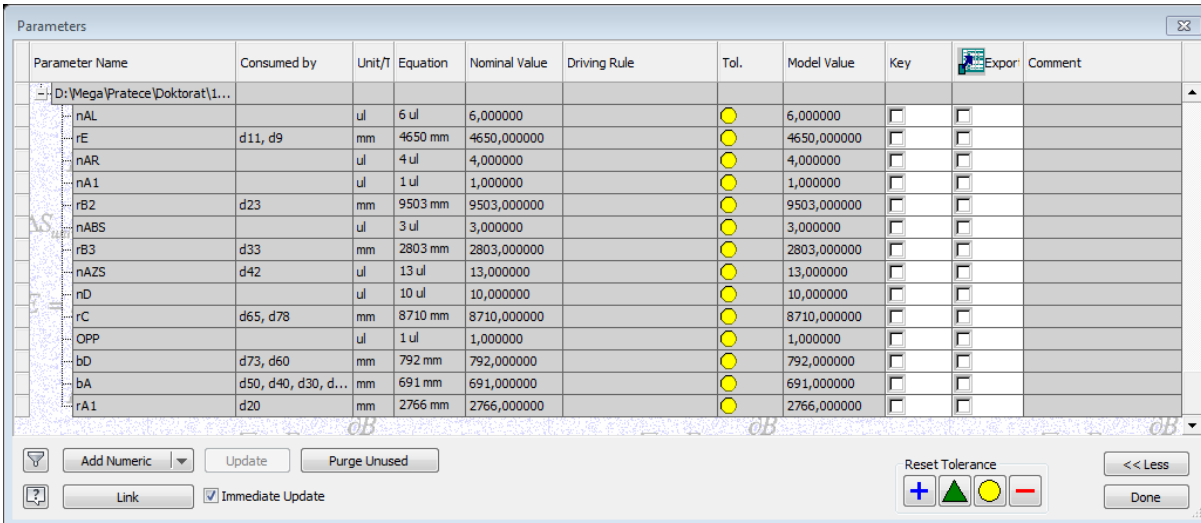
За потпуно дефинисан параметарски управљив 3D CAD модел компоненте дефинишу се све неопходне операције уз помоћ којих се додају или одузимају 3D геометријске форме. Оваква процедура мора се урадити за сваку компоненту.

## 6.2.2. Пројектовање интелигентних 3D шаблона склопова модула и МТП

Интелигентни шаблони склопова прво се користе за параметарско пројектовање свих типова модула тако што се све претходно пројектоване компоненте комбинују и позиционирају уз помоћ геометријских ограничења. Геометријско ограничење коришћено за потребе преклапања два елемента је *coincidence*, а за паралелно међусобно растојање елемената је *offset*. За дефинисање *offset* ограничења потребан је димензиони параметар, па су таква ограничења повезана са корисничким параметрима који су увезени у шаблон на исти начин као и код компоненти.

Претходно параметарски пројектоване компоненте и модули омогућују пројектовање интелигентног шаблона склопа МТП. Интелигентни шаблон склопа МТП садржи све претходно дефинисане 3D моделе (компоненте и модули) као и сва потребна знања (у виду правила пројектовања), везе и ограничења како би се аутоматски конфигурирао МТП. У оквиру шаблона, уз помоћ *iLogic*-а, написана су разна логичка правила пројектовања која омогућују аутоматско управљање са параметрима, ограничењима, везама и другим карактеристикама 3D модела.

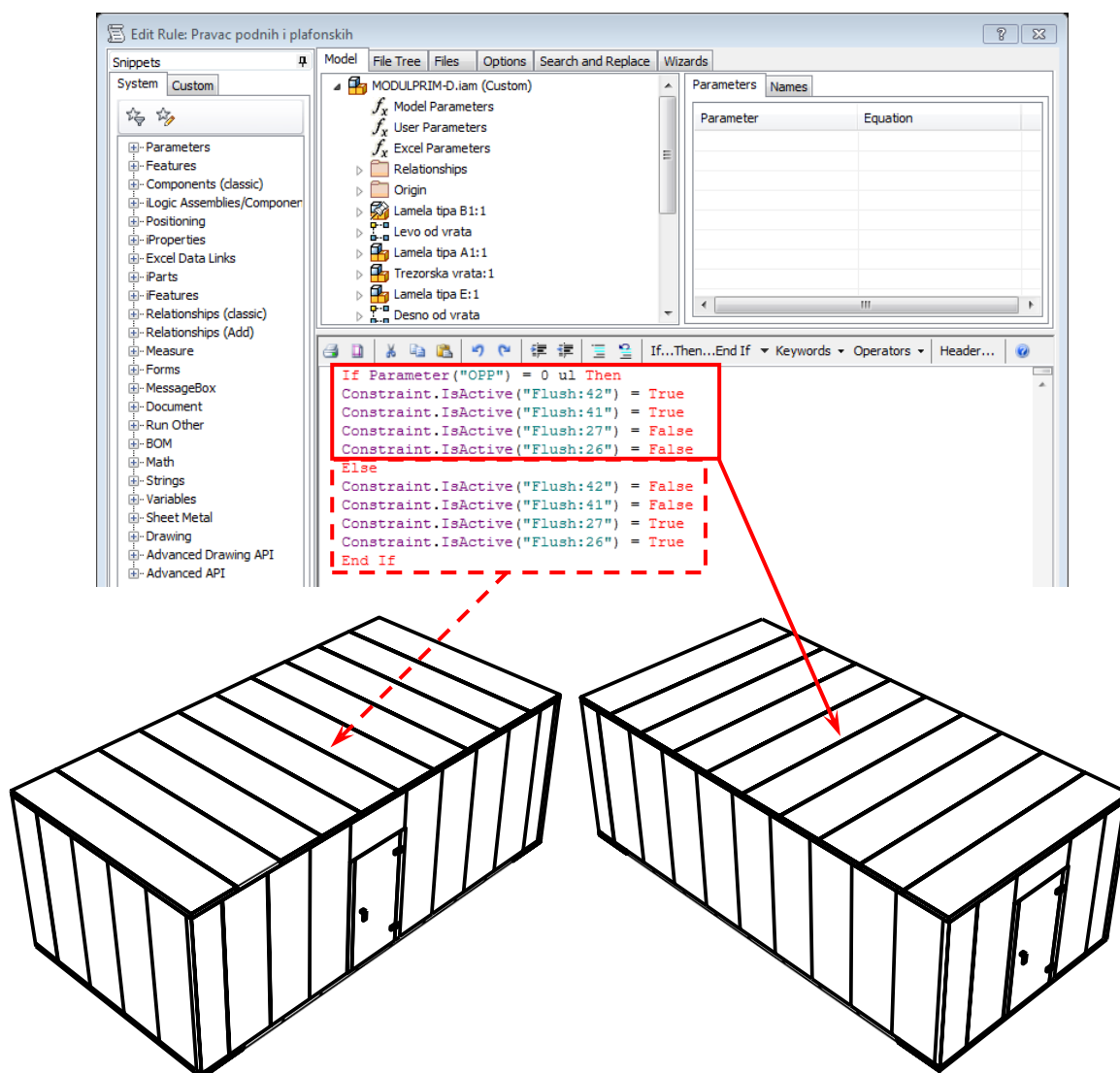
За потребе управљања интелигентним шаблоном при конфигурирању склопа МТП дефинисани су и у *Inventor* увезени кориснички параметри приказани на слици 6.9.



Parameter Name	Consumed by	Unit/T	Equation	Nominal Value	Driving Rule	Tol.	Model Value	Key	Expor	Comment
D:\Mega\Pratece\Doktorat\1...										
nAL		ul	6 ul	6,000000		●	6,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rE	d11, d9	mm	4650 mm	4650,000000		●	4650,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
nAR		ul	4 ul	4,000000		●	4,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
nA1		ul	1 ul	1,000000		●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rB2	d23	mm	9503 mm	9503,000000		●	9503,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
nABS		ul	3 ul	3,000000		●	3,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rB3	d33	mm	2803 mm	2803,000000		●	2803,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
nAZS	d42	ul	13 ul	13,000000		●	13,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
nD		ul	10 ul	10,000000		●	10,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rC	d65, d78	mm	8710 mm	8710,000000		●	8710,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
OPP		ul	1 ul	1,000000		●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
BD	d73, d60	mm	792 mm	792,000000		●	792,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
BA	d50, d40, d30, d...	mm	691 mm	691,000000		●	691,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rA1	d20	mm	2766 mm	2766,000000		●	2766,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Слика 6.9 – Кориснички параметри увезени у *Inventor*

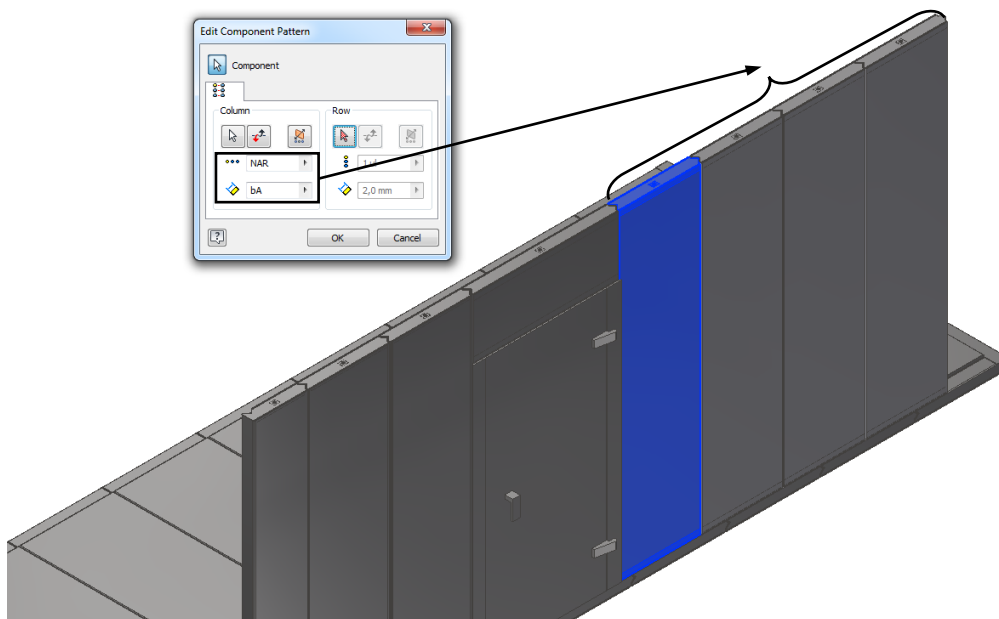
Након увезених корисничких параметара, у склоп су увезени сви модули који су затим позиционирани на основу геометријских ограничења и димензионих параметара. Коришћена су иста геометријска ограничења као и код позиционирања компоненти у модулу. Како оријентација подних и плафонских модула директно зависи од захтева купца (објашњено у потпоглављу 4.3.2.4), то је поред геометријских ограничења потребно дефинисати и правило пројектовања које ће аутоматски доносити одлуку о њиховој оријентацији. Ово логичко правило је реализовано у оквиру додатка за дефинисање и управљање правилима – *iLogic*, и приказано на слици 6.10. Улазни подаци за ово правило су захтеви купаца, тј. однос дужине и ширине захтеваног МТП.



Слика 6.10 – Правило за оријентацију подних и плафонских модула у *iLogic* окружењу

Анализом платформе производа закључује се, да се за различите примере број неких од модула (превасходно за модуле **A** и **D**) мења, па је након позиционирања свих модула потребно такве модуле линијски умножити. Умножавање модула изводи се директним повезивањем операције *Pattern* са потребним корисничким параметрима (број модула и међусобно растојање). Пример умножавања модула **A**, на предњој страни десно од врата, са претходно увезеним корисничким параметрима ( $n_{AR}$  и  $b_A$ ) је приказан на слици 6.11. Табеларни приказ, само једног дела, повезаних параметара потребних за умножавање и позиционирање модула приказан је на слици 6.12.

Осим тога, на основу платформе производа уочено је да неки од модула некада учествују а некада не (када је број модула = 0) у конфигурацији МТП. За такве модуле потребно је омогућити аутоматско укључивање/искључивање из 3D модела склопа МТП, што је омогућено увођењем новог правила пројектовања. Улазни параметри за ово правило су бројеви модула по страницама, на основу којих се доноси одлука о укључењу/искључењу посматраног модула из склопа МТП. Комплетан код за ово правило, за цео склоп МТП, дат је на слици 6.13.



Слика 6.11 – Повезивање корисничких параметара при умножавању модула

Parameter Name	Consumed by	Unit/1	Equation	Nominal Value	Driving Rule	Tol.	Model Value	Key	Exp	Comment
Model Parameters										
d0	Flush:1	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d1	Flush:2	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d2	Mate:1	mm	2 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d3	Levo od vrata	mm	2,0 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d4	Levo od vrata	mm	bA	691,000000		●	691,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d5	Levo od vrata	ul	1 ul	1,000000		●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d6	Levo od vrata	ul	NAL	6,000000		●	6,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d7	Flush:3	mm	-11 mm	-11,000000		●	-11,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d8	Flush:4	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d9	Flush:5	mm	rE	-4650,000000		●	-4650,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d10	Flush:6	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d11	Flush:7	mm	rE	4650,000000		●	4650,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d12	Flush:8	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d13	Flush:9	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d14	Mate:2	mm	2 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d15	Flush:10	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d16	Desno od vrata	mm	2,0 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d17	Desno od vrata	mm	bA	691,000000		●	691,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d18	Desno od vrata	ul	1 ul	1,000000		●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d19	Desno od vrata	ul	NAR	4,000000		●	4,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d20	Mate:3	mm	rA1	2766,000000		●	2766,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d21	Flush:11	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d22	Flush:12	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d23	Mate:14	mm	rB2	-9503,000000		●	-9503,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d24	Flush:13	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d25	Flush:14	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d26	Flush:15	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d27	Flush:16	mm	0,000 mm	0,000000		●	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d28	Mate:15	mm	2 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d29	Bocna strana-d...	mm	2,0 mm	2,000000		●	2,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d30	Bocna strana-d...	mm	bA	691,000000		●	691,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d31	Bocna strana-d...	ul	1 ul	1,000000		●	1,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d32	Bocna strana-d...	ul	NABS	3,000000		●	3,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d33	Mate:16	mm	rB3	-2803,000000		●	-2803,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Слика 6.12 – Приказ зависности појединих параметара склопа МТП од корисничких параметара

<pre> If Parameter("nAL") = 0 ul Then Component.IsActive("Umnozavanje-Levo od vrata") = False Component.IsActive("Modul A:4") = False NAL = 1 ul Else Component.IsActive("Umnozavanje-Levo od vrata") = True Component.IsActive("Modul A:4") = True NAL = nAL End If If Parameter("nA1") = 0 ul Then Component.IsActive("Modul A1:1") = False Else Component.IsActive("Modul A1:1") = True End If </pre>	Предња страна – избор модула лево од врата
<pre> If Parameter ("nAR") = 0 ul Then Component.IsActive("Umnozavanje-Desno od vrata") = False Component.IsActive("Modul A:5") = False NAR = 1 ul Else Component.IsActive("Umnozavanje-Desno od vrata") = True Component.IsActive("Modul A:5") = True NAR = nAR End If </pre>	Предња страна – избор модула десно од врата
<pre> If Parameter("nAS") = 0 ul Then Component.IsActive("Umnozavanje-Bocna strana-desna") = False Component.IsActive("Modul A:1") = False Component.IsActive("Umnozavanje-Bocna strana-leva") = False Component.IsActive("Modul A:3") = False NAS = 1 ul Else Component.IsActive("Umnozavanje-Bocna strana-desna") = True Component.IsActive("Modul A:1") = True Component.IsActive("Umnozavanje-Bocna strana-leva") = True Component.IsActive("Modul A:3") = True NAS = nABS End If </pre>	Бочна страна
<pre> If Parameter("nAB") = 0 ul Then Component.IsActive("Modul A:2") = False Component.IsActive("Umnozavanje-Zadnja strana") = False NAB = 1 ul Else Component.IsActive("Modul A:2") = True Component.IsActive("Umnozavanje-Zadnja strana") = True NAB = nAB End If </pre>	Задња страна
<pre> If Parameter("nD") = 0 ul Then Component.IsActive("Umnozavanje-Plafon") = False Component.IsActive("Modul D:1") = False Component.IsActive("Umnozavanje-Pod") = False Component.IsActive("Modul D:11") = False ND = 1 ul Else Component.IsActive("Umnozavanje-Plafon") = True Component.IsActive("Modul D:1") = True Component.IsActive("Umnozavanje-Pod") = True Component.IsActive("Modul D:11") = True ND = nD End If </pre>	Под и плафон

Слика 6.В – *iLogic* програмски код за аутоматско укључење/искључење модула из склопа МТП

Развој CAD софтвера донео је могућност интеграције 3D модела у PDF (познато као 3D PDF), како би корисници могли визуелно у три димензије да погледају 3D модел, а да при том не морају поседовати CAD софтвер већ само *Adobe Acrobat Reader*. *Inventor* омогућује снимање модела у 3D PDF формат, а правило за аутоматски извоз 3D PDF склопа МТП, је дато на слици 6.14. Изглед једног примера МТП снимљеног у 3D PDF формат је дат на слици 6.15.

```

Dim oPDFAddIn As ApplicationAddIn
Dim oAddin As ApplicationAddIn
For Each oAddin In ThisApplication.ApplicationAddIns
If oAddin.ClassIdString = "{3EE52B28-D6E0-4EA4-8AA6-C2A266DEBB88}" Then
oPDFAddIn = oAddin
Exit For
End If
Next
Dim oPDFConvertor3D
oPDFConvertor3D = oPDFAddIn.Automation
Dim oDocument As Document
oDocument = ThisApplication.ActiveDocument
Dim oOptions As NameValueCollection
oOptions = ThisApplication.TransientObjects.CreateNameValueCollection
' Podesavanje opcija
oOptions.Value("FileOutputLocation") =
ThisDoc.PathAndFileName(False) + ".pdf"
oOptions.Value("ExportAnnotations") = 0
oOptions.Value("ExportWorkFeatures") = 0
oOptions.Value("GenerateAndAttachSTEPFile") = False
oOptions.Value("LimitToEntitiesInDVRs") = False
oOptions.Value("ExportAllProperties") = True
oOptions.Value("VisualizationQuality") = AccuracyEnum.kHigh
oOptions.Value("ExportTemplate") = "C:\Autodesk Inventor 2019\Templates\
Template.pdf"
Dim sDesignViews(0) As String
sDesignViews(0) =
oDocument.ComponentDefinition.RepresentationsManager.ActiveDesignViewRepresenta
tion.Name
oOptions.Value("ExportDesignViewRepresentations") = sDesignViews
ThisApplication.StatusBarText = "Snimanje 3D PDF"
Call oPDFConvertor3D.Publish(oDocument, oOptions)
ThisApplication.StatusBarText = "3D PDF je spreman"
Return

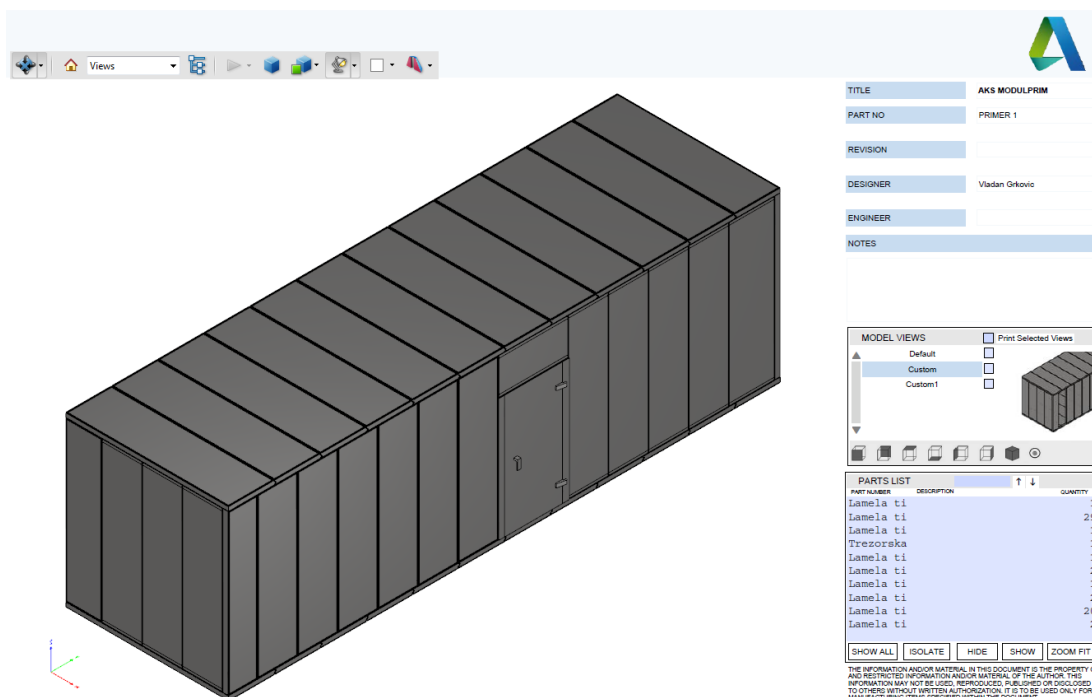
```

Слика 6.14 – *iLogic* програмски код за аутоматски извоз 3D PDF склопа МТП

### 6.2.3. Пројектовање шаблона 2D техничке документације

Израда техничке документације спада у дуготрајне и некреативне задатке, па га као таквог вреди аутоматизовати. Аутоматизована израда документације остварује се помоћу шаблона 2D техничке документације. Комплетна документација се састоји од радионичких цртежа за сваку компоненту, склопних цртежа за сваки припадајући модул и склопног цртежа МТП.

CAD софтвери сваку промену на 3D моделу аутоматски ажурирају на техничком цртежу. И код 2D шаблона могу се применити правила пројектовања, а као пример на слици 6.16. приказано је правило пројектовања за аутоматску промену размере и позиције пројекција и пресека код склопа МТП.



Слика 6.15 – 3D PDF склопа МТП

```

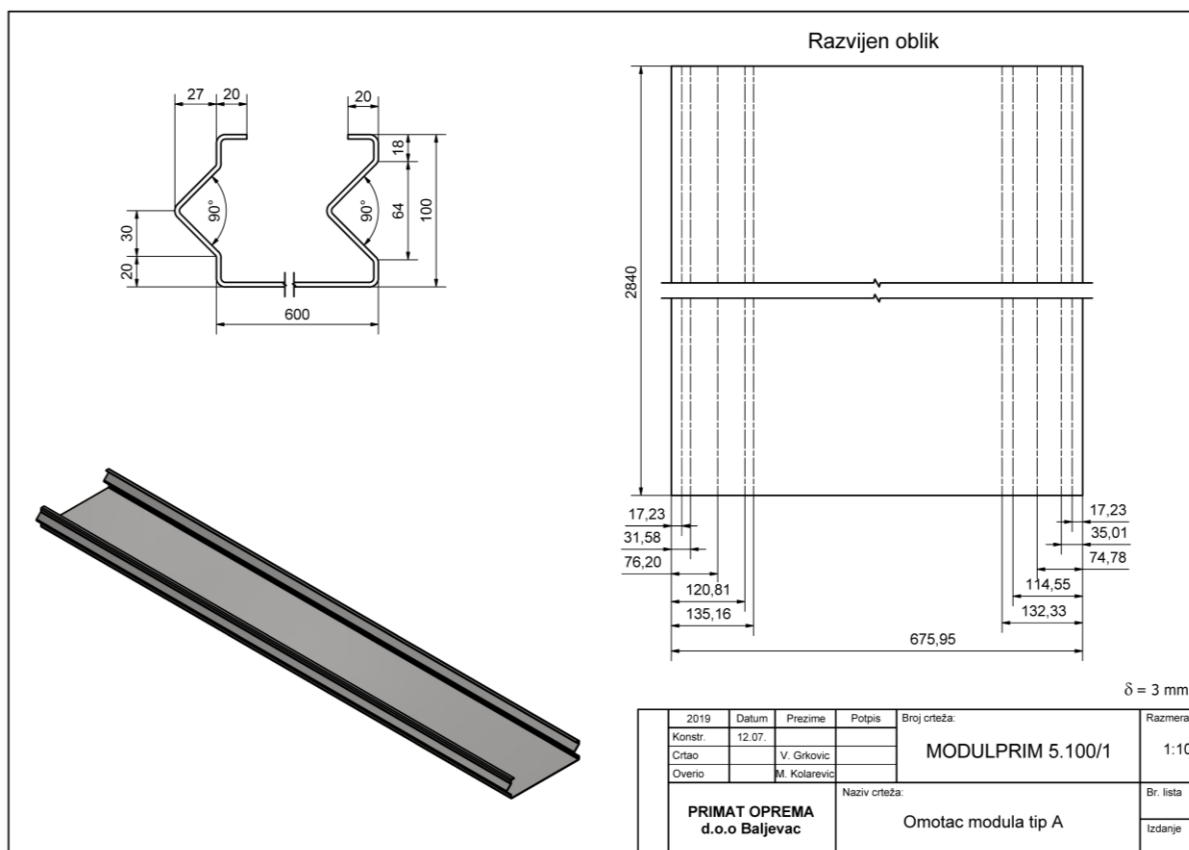
TR = ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale
SP1 = ActiveSheet.View("Projekcija 1").Width
VP1 = ActiveSheet.View("Projekcija 1").Height
If SP1 <= 100 Then
    If TR = 0.02 ul Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 20
    ElseIf TR = 0.05 Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 10
    End If
ElseIf SP1 >= 195 Then
    If TR = 0.1 Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 20
    ElseIf TR = 0.05 Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 50
    End If
End If
If VP1 >= 130 Then
    If TR = 0.1 Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 20
    ElseIf TR = 0.05 Then
        ActiveSheet.View("Projekcija 1").Scale = 1 / 50
    End If
End If
ActiveSheet.View("Projekcija 1").SetCenter(200, 200)
ActiveSheet.View("Projekcija 2").SetCenter(280, 200)
ActiveSheet.View("A").SetCenter(200, 100)

```

Слика 6.16 – iLogic програмски код за аутоматску промену размере и позиције пројекција и пресека склопног цртежа МТП



За компоненте које су пројектоване у модулу за пројектовање лимова, на техничком цртежу се аутоматски ажурирају савијен и развијен облик компоненте. Из развијеног облика се добијају облик и димензије припремка као и линије и углови савијања, што се види на примеру једне компоненте (омотац модула А) на слици 6.17. У наставку су дати примери склопних цртежа модула А (слика 6.19) и комплетне модуларне трезорске просторије (слика 6.20).

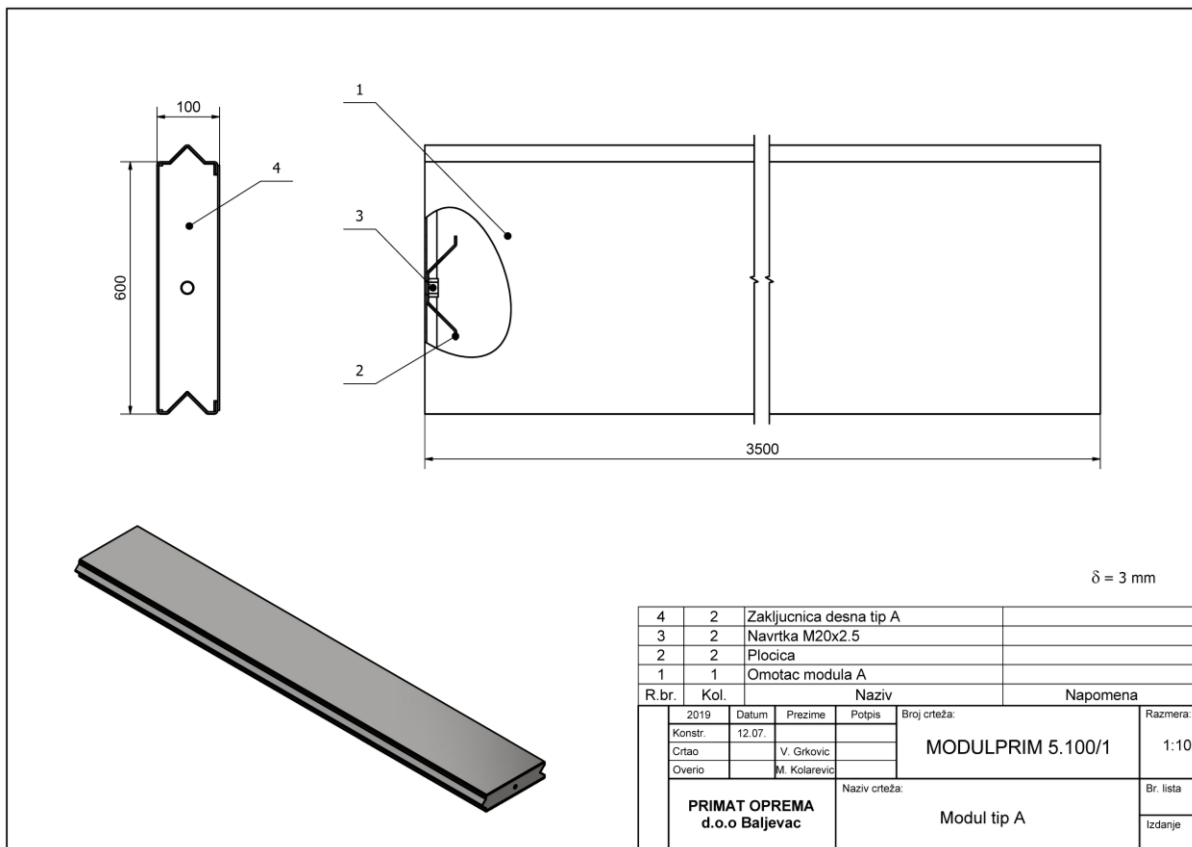


Слика 6.17 – Технички цртеж омотача модула А

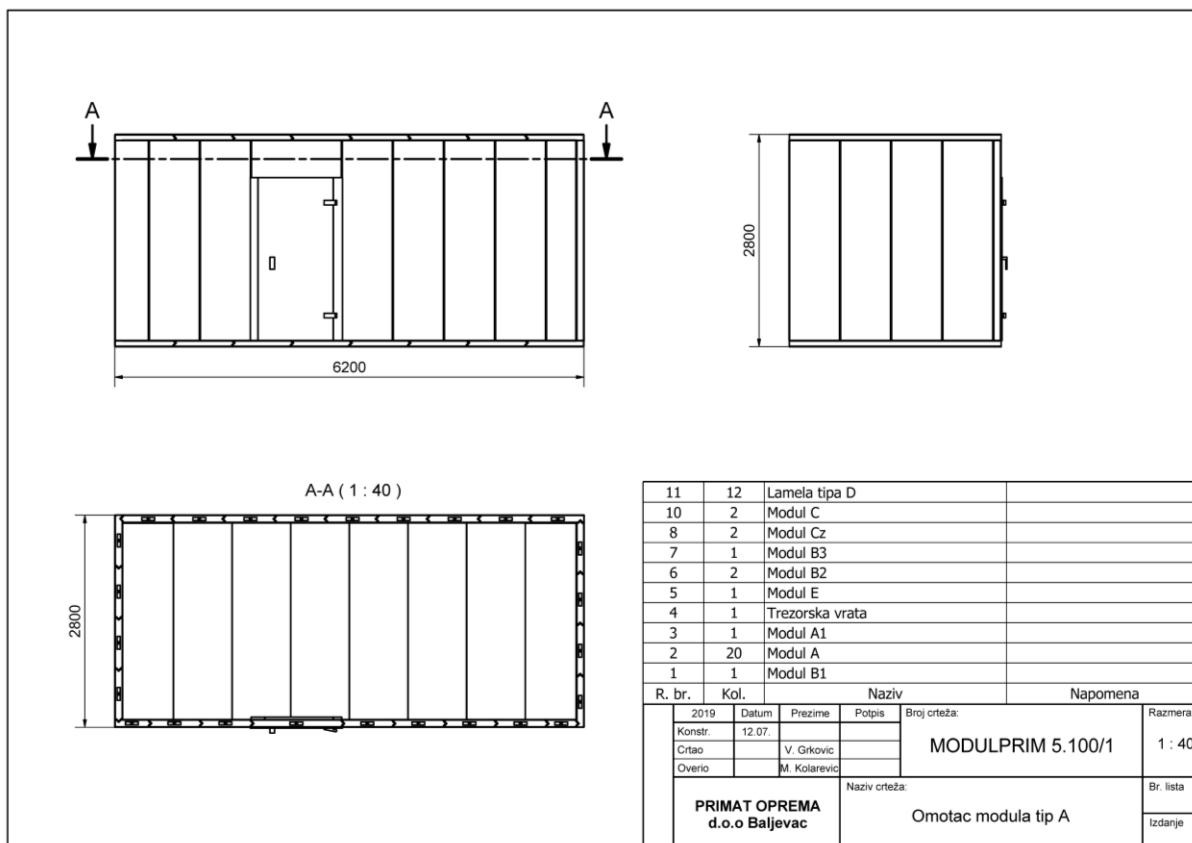
Све чешћа пракса је да се цртежи снимају у *PDF* формату. Зато је написано посебно правило за аутоматско снимање цртежа у *PDF* формат, чији код је приказан на слици 6.18.

```
RadniProstor = ThisDoc.WorkspacePath()
Folder = RadniProstor & "\PDF\" & Kupac
If (Not System.IO.Directory.Exists(Folder)) Then
    System.IO.Directory.CreateDirectory(Folder)
End If
ThisDoc.Document.SaveAs(Folder & "\" & ThisDoc.FileName(False) & ".pdf",
True)
```

Слика 6.18 – *iLogic* програмски код за аутоматско снимање цртежа у *PDF* формат



Слика 6.19 – Склопни цртеж модула А



Слика 6.20 – Склопни цртеж МТП

#### 6.2.4. Алгоритам рада CAD конфигуратора

Процес коришћења CAD конфигуратора МТП започиње уносом CRs у ГКИ након чега се аутоматски покрећу интелигентни шаблони. Покретањем интелигентних шаблона учитавају се основни параметри на основу којих се прилагођавају све потребне компоненте и модули и конфигурише склоп МТП. Након тога прилагођавају се 2D цртежи, извози 3D PDF и снимају сва документа.

Конфигурисање МТП се одвија према псеудо коду приказаном у наставку.

1. Ошварање шаблона склоја МТП
2. Увоз основних параметара МТП из excel табеле
3. **for**  $i=1:s$  //за све стране МТП
4.   **for**  $j=1:p(i)$  //за све модуле на страници(i) МТП
5.     **if** модул( $M_{ij}$ ) неопходан за страницу(i) **then**
6.       Ошварање шаблона модула( $M_{ij}$ )
7.       Увоз основних параметара модула( $M_{ij}$ ) из excel табеле
8.       **for**  $c=1:r_{ij}$  //за све компоненте у модулу( $M_{ij}$ )
9.         Ошварање шаблона компоненте( $D_{ijc}$ )
10.        Увоз основних параметара компоненте( $D_{ijc}$ ) из excel табеле
11.        Прорачун димензија на основу везе и увезених параметара
12.        Ажурирање свих компоненти( $D_{ijc}$ ) према димензијама и ограничења
13.        Снимање и зашварање компоненте( $D_{ijc}$ )
14.        Ажурирање цртежа компоненте( $D_{ijc}$ )
15.        **next**  $c$  //следећа компонента
16.     **end for**
17.     Ажурирање свих компоненти у модулу( $M_{ij}$ )
18.     Распоредивање компоненти (позиционирање) према геометријским ограничењима
19.     Снимање и зашварање модула( $M_{ij}$ )
20.     Ажурирање цртежа модула( $M_{ij}$ )
21.     Ажурирање модула( $M_{ij}$ ) у склоју МТП
22.     Распоредивање модула( $M_{ij}$ ) у склоју МТП
23.     Умножавање модула( $M_{ij}$ ) према пошредном броју( $n_{ij}$ )
24.     **else if**
25.       Прескакање ошварања и ажурирања модула( $M_{ij}$ )
26.       Искључивање (брисање) модула( $M_{ij}$ ) из склоја МТП
27.     **end if**
28.     **next**  $j$  //следећи модул
29.     **end for**
30.     **next**  $i$  //следећа страница
31.     **end for**
32.     Снимање склоја МТП
33.     Ажурирање цртежа склоја МТП
34.     Извоз BOM и 3D PDF склоја МТП

Слика 6.21 – Псеудо код CAD конфигуратора МТП

Све активности у CAD конфигуратору су аутоматизоване.

ПОГЛАВЉЕ

7

---

**ВЕРИФИКАЦИЈА И ВАЛИДАЦИЈА  
МОДЕЛА**

## 7.1. Верификација и валидација

У контексту тестирања, **верификација и валидација** (*V&V*) су појмови који се користе заједно да би се проверило да ли је систем у складу са дефинисаним спецификацијама (захтевима) и да ли задовољава предвиђену сврху тј. да ли је погодан за коришћење. Иако се користе заједно, методе су сасвим различите и спроводе се као одвојене (независне) процедуре.

Термин **верификација** потиче од латинске речи *verificatio* и у преводу значи проверавање, оверавање, утврђивање правог стања [109]. Према стандарду ISO 9000 [157] верификација је „потврђивање пружањем **објективної доказа** да су специфицирани **захтеви** испуњени“. Верификација (потврђивање) се може обавити различитим поступцима у зависности од тога шта се верификује:

- обављањем алтернативних прорачуна,
- упоређивањем нове пројектне спецификације са сличном пројектном спецификацијом која је већ одобрена,
- спровођењем испитивања и приказивања и
- преиспитивањем докумената пре издавања.

Циљ верификације је да оцени да ли производ, услуга или систем задовољава скуп спецификација које су дефинисане дизајном тј. да одговори на питање „**да ли ћраavimo ћпроизвод исправно**“?

Термин **валидација** потиче од латинске речи *validatio* и у преводу значи потврда, потврђивање, овера, оверавање, признање правне важности неког акта (валидан-пуноважан) [109]. Према стандарду ISO 9000 [157] валидација је „потврђивање пружањем **објективної доказа** да су испуњени **захтеви** за специфичну предвиђену употребу или примену“.

Циљ валидације је да гарантује да производ, систем или услуга задовољава намену тј. функционалне захтеве корисника и за то произвођач мора да обезбеди одговарајуће доказе. Валидација треба да одговори на питање „**да ли ћраavimo ћправи ћпроизвод**“?

Може се закључити да је основни **задаћак верификације** да у интерном процесу тј. са аспекта произвођача потврди да ли производ испуњава специфициране захтеве, док је **задаћак валидације** да у спољашњем процесу тј. са аспекта корисника потврди да ли је производ погодан за употребу.

Када је у питању верификација и валидација аналитичких метода или симулационих модела, такође треба имати у виду разлику ова два појма [158]:

- **Верификација модела** треба да провери да ли он садржи све потребне компоненте и да ли ради како је предвиђено, односно, да одговори на питање „**да ли је модел наћрављен исправно**“?

- **Валидација модела** је поступак којим се доказује да модел служи сврси којој је намењен и да модел реално осликава (представља) стварни систем. Валидација треба да одговори на питање „**да ли је најправљен исправан модел**“?

На крају, треба нагласити да се валидација изводи после верификације тј. да нема сврхе изводити валидацију модела који претходно није успешно прошао процес верификације, као и напомену да услови за валидацију могу бити стварни или симулирани.

За верификацију и валидацију предложеног модела је одабрано 8 примера модуларних трезорских просторија типа МОДУЛПРИМ степена сигурности 5. Примери су одабрани тако да репрезентују МТП које се најчешће реализују. Основне димензије МТП из примера су у распонима:  $A=2050\div 9500$  mm,  $B=2150\div 8640$  mm и  $C=2500\div 2910$  mm. Већина наведених примера је практично реализована у протеклом периоду на основу правила која су дефинисана старом платформом производа објашњеном у делу 4.2. Димензије МТП за свих 8 примера су приказане у табели 7.1.

Табела 7.1 – Основне димензије МТП МОДУЛПРИМ 5 за одабране примере

Димензија	Пример							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A [mm]=	9500	2050	3560	2200	2830	2350	4430	2900
B [mm]=	2800	3890	2150	3600	3590	3975	2150	8460
C [mm]=	2900	2910	2500	2500	2560	2540	2680	2800
D [mm]=	4650	400	1860	506	705	575	2793	400
E [mm]=	1200	1150	1200	1104	1200	1200	1137	1200
F [mm]=	2110	2110	2105	2110	2165	2155	2110	2150

## 7.2. Верификација модела

Верификација модела аутоматског конфигурационог система ИАКС МОДУЛПРИМ урађена је посебно за сваку од следећих целина:

- тестирање оптимизационог модула,
- тестирање САД конфигурациона и
- тестирање главног кода.

У поглављу 6 је детаљно описан рад САД конфигурациона. Тестирање овог модула је захтевало проверу да ли су параметри производа, правила и ограничења дефинисана платформом производа исправно имплементирана и да ли САД конфигурациона исправно моделира производ, модуле, компоненте и 2D конструкциону документацију. Тестирање САД конфигурациона рађено је по фазама током имплементирања његових саставних целина. Део ових модела је приказан у поглављу 6 те због обима дисертације овде неће бити посебно представљен.

### 7.2.1. Тестирање модула за оптимизацију

Тестирање оптимизационог модула је урађено са сврхом да се провери да ли модул исправно:

- генерише конфигурационе алтернативе,
- рачуна вредности дефинисаних критеријумских функција за сваку генерисану алтернативу и
- бира оптимално решење.

За потребе провере је урађен упоредни табеларни прорачун у *MS Excel*-у. Поред табеларног прорачуна урађени су и дијаграми збирних функција циља по алтернативама са означеним изведеним решењем и оптималном алтернативом за зидове и под/плафон за све примере.

Провера овог модула је извршена по фазама, односно саставним целинама модула.

#### 7.2.1.1. Поступак избора оптималне конфигурације

Због специфичности производа МОДУЛПРИМ, поступак избора оптималне конфигурације предложен у делу 3.4.2 је делимично коригован те је неопходно образложити га детаљније.

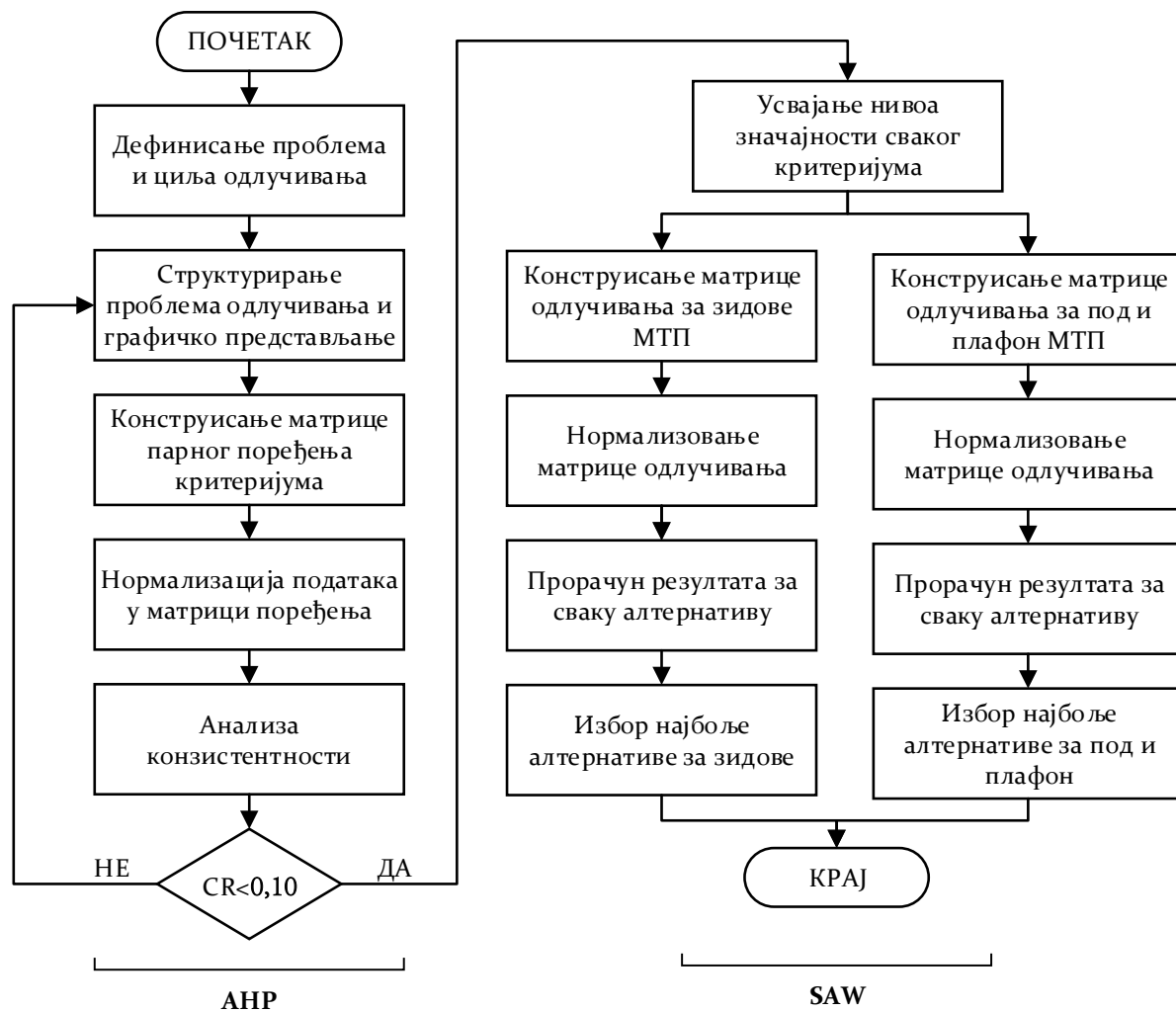
Предложена процедура избора се спроводи два пута тј. посебно за зидове а посебно за под и плафон *МТП*. Зато је било неопходно модификовати алгоритам из дела 3.4.2 при чему је део који се односи на утврђивање нивоа значајности критеријума остао исти а део који се односи на избор оптималне варијанте се сада дели на две гране тј. на грану која се односи на зидове *МТП* и грану која се односи на под и плафон *МТП*. Модификовани алгоритам је приказан на слици 7.1.

Примена предложеног модела за избор оптималне конфигурације је у наставку презентована на примеру бр. 1.

#### Дефинисање циља и проблема одлучивања

**Основни циљ** оптимизације је избор оптималне конфигурације *МТП* која задовољава захтеве купца а да при том буде рационална за производњу. Основни захтеви купца се у овом случају односе на димензије у које је потребно уклопити овај производ (табела 7.1) и степен отпорности *МТП* који је у овом случају дефинисан избором модела МОДУЛПРИМ 5 (табела 4.2).

**Проблем** се своди на избор најповољније алтернативе из коначног скупа могућих алтернатива, које се генеришу на основу алгоритама приказаних у делу 5.1 и на основу критеријума дефинисаних у делу 5.2. Примена алгоритма приказаног на слици 7.1 омогућује да се, уместо субјективне процене, одлука о избору најповољније конфигурације донесе на основу научно заснованог приступа спровођењем јасно дефинисаних фаза.



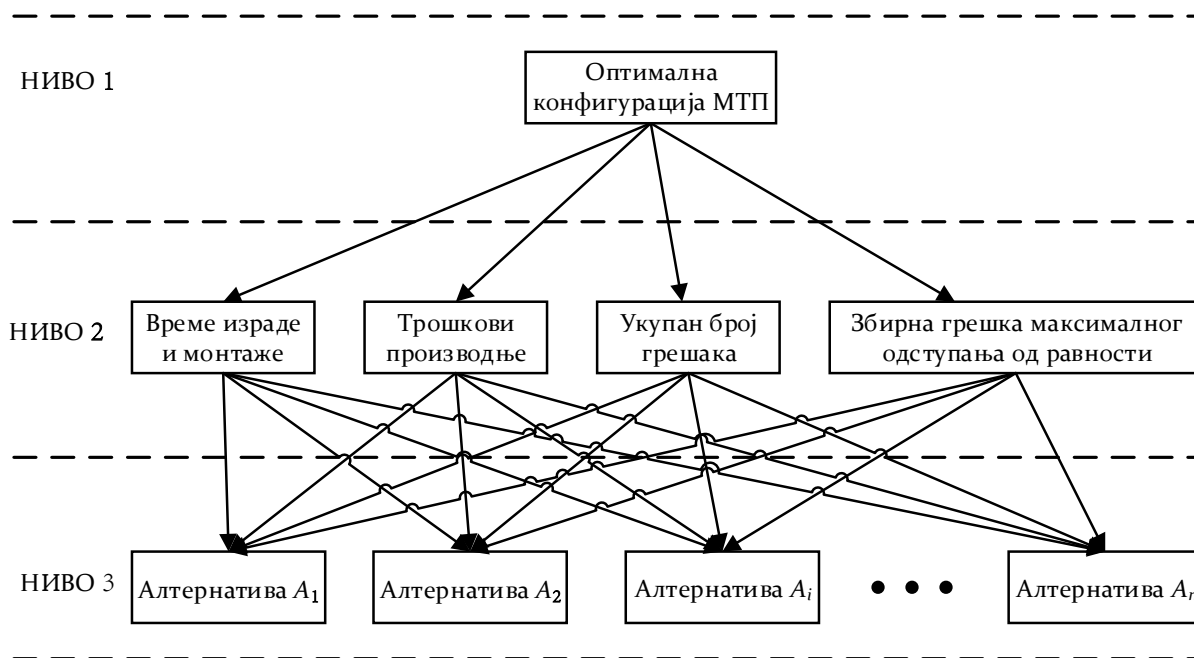
Слика 7.1 – Модификовани дијаграм тока интеграције ANP и SAW методе

### Структурирање проблема

Декомпозиција проблема је урађена на три хијерархијска нивоа. На највишем нивоу је циљ одуке који је претходно дефинисан. Средњи ниво хијерархије представљају критеријуми на основу којих се рангирају алтернативе који су у виду параметарских функција детаљно дефинисани у делу 5.2. Треба напоменути да функција квалитета производа која се састоји од две критеријумске функције није даље рашчлањавана на нижи хијерархијски ниво већ су обе функције ( $f_3$ : минимизација укупног броја грешака на свим модулима и  $f_4$ : минимизација збира максималних одступања од равности свих модула) задржане на средњем нивоу хијерархије а њихов значај је узет у обзир преко тежинских критеријума дефинисаних у наставку ове процедуре.

Најнижи хијерархијски ниво представљају алтернативе тј. технички изводљиве конфигурације производа. Алтернативе су у овом случају могуће комбинације модула и њихових ширина и генеришу се посебно за зидове а посебно за под и плафон МТП.





Слика 7.2 – Хијерархијска структура проблема одлучивања

### Прорачун релативних тежина критеријумских функција

С обзиром да на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву већ постоји развијена апликација у *Excel*-у за примену АНП методе (слика 7.3) то је иста коришћена за прорачун релативних тежина критеријумских функција и оцену конзистентности добијеног решења. Није неопходно да се оцена релативних тежина критеријума изводи за сваку нову конфигурацију МТП тако да у оквиру збирног кода за ИАКС МОДУЛПРИМ није урађен посебан код за овај део.

**Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet**  
**Decision Support System**  
 University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo  
 Department of Production Engineering  
 Version 1.0

Number of Criteria

**Comparison matrix (Matrica proredjenja kriterijuma)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<b>Criteria</b>									
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>	<b>C10</b>
1	<b>C1</b>	1	0,143	2,000	0,500					
2	<b>C2</b>	7,00	1	9,000	5,000					
3	<b>C3</b>	0,50	0,11	1	0,250					
4	<b>C4</b>	2,00	0,20	4,00	1					
5	<b>C5</b>				1					
6	<b>C6</b>					1				
7	<b>C7</b>						1			
8	<b>C8</b>							1		
9	<b>C9</b>								1	
10	<b>C10</b>									1

Слика 7.3 – Апликација у *Excel*-у за примену АНП методе

За ову намену се формира **матрица поређења** (квадратна матрица  $n \times n$ ) у којој се сваки критеријум у реду пореди са сваким критеријумом у колони на сваком нивоу хијерархијске структуре. За међусобно поређење критеријума је коришћена Saaty-јева скала релативне важности (табела 3.1 у поглављу 3.4). Нумеричке вредности поређења парова критеријума су приказане у **матрици поређења критеријума** (слика 7.3).

Након нормализација података матрице поређења спроведена је анализа конзистентности како би се уочиле могуће контрадикторности између поређених парова. Резултати анализе су приказани на слици 7.4.

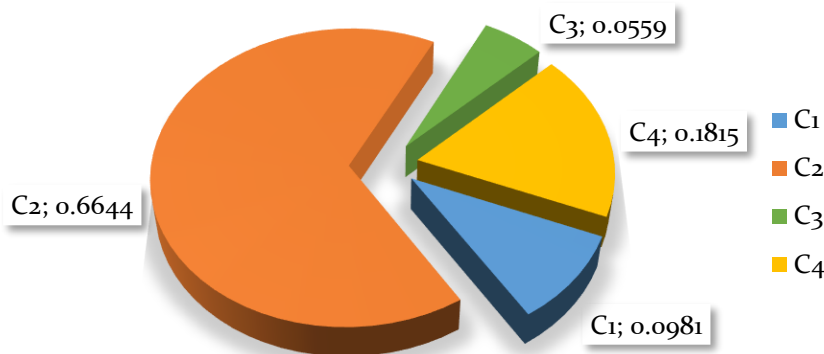
Criteria											SUM	Average	C.M.		
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10						
C1	0.09524	0.09825	0.12500	0.07407							0.393	0.0981	0.3956	4.031	
C2	0.66667	0.68777	0.56250	0.74074							2.658	0.6644	2.7622	4.157	
C3	0.04762	0.07642	0.06250	0.03704							0.224	0.0559	0.2242	4.011	
C4	0.19048	0.13755	0.25000	0.14815							0.726	0.1815	0.7343	4.045	
C5											0.000	0.0000			
C6											0.000	0.0000			
C7											0.000	0.0000			
C8											0.000	0.0000			
C9											0.000	0.0000			
C10											0.000	0.0000			
<b>SUM</b>	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		1.0000	$\lambda_{max}=$	4.061	
<b>Wj=</b>	0.0981	0.6644	0.0559	0.1815	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			CI=	0.020	
														Ri=	0.892
														C.R=	0.023

Слика 7.4 – Провера конзистентности

Највећа карактеристична вредност матрице износи  $\lambda_{max}=4,061$ . Вредност индекса конзистенције је  $CI=0,020$  а индекса случајне конзистенције је  $RI=0,8921$ . Вредност коефицијента конзистенције  $CR$  који се добија као количник  $CI$  и  $RI$  износи  $CR=0,023$ . То значи да неконзистентност процене износи 0,023 тј. 2,3% и испуњава услов да је  $CR \leq 0,10$  те се процењене релативне важности критеријума могу сматрати прихватљивим. Пошто је доказана конзистентност процене, могу се усвојити процењене релативне важности критеријума приказане у табели 7.2.

Табела 7.2 – Процењене релативне тежине критеријума

Критеријум	$C_1 = \min T_{UK}$	$C_2 = \min C_{UK}$	$C_3 = \min G_{UK}$	$C_4 = \min R_{UK}$
Wj	0,0981	0,6644	0,0559	0,1815



Слика 7.5 – Приказ важности појединачних критеријума у моделу

### Избор најповољније алтернативе

Као што је напред наведено, избор најповољније алтернативе на основу *меџоге једносџавних агџивних џежина* (SAW) се спроводи два пута. Програмски код који је развијен у *MATLAB*-у примењује се за избор најповољније алтернативе како зидова тако и пода и плафона и приказан је на слици 7.6.

```
function [max_vrednost, alter]=SAW(funkcije)
v=size(funkcije,1);
w=[0.098 0.664 0.056 0.182];
k=size(w,2);
f=[0 0 0 0];
DMM=funkcije;
for i=1:v
    for j=1:k
        if DMM(i,j)==0
            NDT(i,j)=0;
        else
            if f(j)==1
                NDT(i,j)=DMM(i,j)/max(DMM(:,j));
            else
                NDT(i,j)=min(DMM(:,j))/DMM(i,j);
            end
        end
        AAS(i,j)=NDT(i,j)*w(j);
    end
end
S=sum(AAS,2);
[max_vrednost, alter] = max(S, [], 1)
end
```

Слика 7.6 – *MATLAB* програмски код за избор најповољније алтернативе

Применом алгоритма за генерисање алтернатива (алгоритми на сликама од 5.1 до 5.4) добијају се 164 технички изводљиве алтернативе за зидове и 347 алтернатива за под и плафон.

#### а) Избор оџималне алџернативе за зидове

Вредности појединачних функција и збирне функције циља за сваку алтернативу зидних модула су приказане у табели 7.3. Одабрано оптимално решење за зидне модуле је алтернатива А2 а њени параметри и расподела модула су приказани у табели 7.4.

Табела 7.3 – Вредности појединачних и збирне функције циља за зидове МТП из примера бр. 1

$A_i$	$T_{UK}$	$C_{UK}$	$\Sigma G_{UK}$	$\Sigma R_{UK}$	$F_{UK}(w_j)$
1	504,1823	7246,3624	25,5436	57,9551	0,9968065
2	504,1857	7246,3970	25,5414	57,9551	0,9968072
3	504,1892	7279,1706	25,5393	57,9551	0,9938212
4	504,1927	7279,2053	25,5374	57,9551	0,9938214
5	504,1961	7279,2399	25,5356	57,9551	0,9938214
6	504,1996	7279,2746	25,5339	57,9551	0,9938211
7	504,2031	7279,3092	25,5323	57,9551	0,9938205
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
158	546,0054	7642,6884	24,0935	83,6608	0,9021237
159	546,0112	7642,7466	24,0972	83,6608	0,9021091
160	546,0170	7642,8048	24,1013	83,6608	0,9020939
161	546,0228	7675,6020	24,1058	83,6608	0,8993925
162	546,0287	7675,6602	24,1105	83,6608	0,8993758
163	546,0345	7675,7184	24,1156	83,6608	0,8993582
164	546,0403	7675,7767	24,1211	83,6608	0,8993399

Табела 7.4 – Параметри оптималне алтернативе за зидове МТП примера бр. 1

Параметар	Ознака	Вредност
Ширина модула А [mm]	$b$	691
Ширина модула А1 [mm]	$b_{A1}$	786
Ширина модула В1 [mm]	$b_{B1}$	504
Ширина модула В2 [mm]	$b_{B2}$	627
Ширина модула В3 [mm]	$b_{B3}$	417
Бр. модула А лево од врата	$n_{AL}$	6
Бр. модула А десно од врата	$n_{AR}$	4
Бр. модула А на бочним зидовима	$2 \times n_{AS}$	6
Бр. модула А на задњем зиду	$n_{AB}$	13
Бр. модула А1	$n_{A1}$	1
Укупан бр. модула А	$N_A$	29

б) Избор оптималне алтернативе за под и плафон МТП

Вредности појединачних функција и збирне функције циља за подне и плафонске модуле су приказане у табели 7.5. Најбоља алтернатива за под и плафон МТП је А59 а њени параметри и расподела модула су приказани у табели 7.6.

Табела 7.5 – Вредности појединачних и збирне  $\phi$ -је циља за под/плафон МТП за пример бр. 1

$A_i$	$T_{UK}$	$C_{UK}$	$\Sigma G_{UK}$	$\Sigma R_{UK}$	$F_{UK}(w_j)$
1	413,7715	5831,2073	22,2782	45,9724	0,9601342
2	413,7707	5831,1986	21,8178	45,9724	0,9604777
3	413,7698	5831,1899	21,3683	45,9724	0,9608272
4	413,7689	5831,1811	20,9296	45,9724	0,9611829
5	413,7680	5831,1724	20,5014	45,9724	0,9615446
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
57	413,7226	5830,7181	9,7715	45,9724	0,9809598
58	413,7217	5830,7094	9,7581	45,9724	0,9810117
59	413,7209	5830,7006	9,7520	45,9724	0,9810360
60	413,7200	5830,6919	9,7532	45,9724	0,9810326
61	413,7191	5830,6832	9,7618	45,9724	0,9810010
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
343	460,4377	6387,7122	158,3734	62,4243	0,8304581
344	460,4340	6387,6755	159,0830	62,4243	0,8304521
345	460,4303	6387,6389	159,9954	62,4243	0,8304433
346	460,4267	6387,6022	161,0967	62,4243	0,8304321
347	460,4230	6387,5655	162,3744	62,4243	0,8304186

Табела 7.6 – Параметри оптималне алтернативе за под/плафон МТП за пример бр. 1

Параметар	Ознака	Вредност
Ширина модула C [mm]	$b_C$	790
Ширина модула Cz [mm]	$b_{Cz}$	790
Ширина модула D [mm]	$b_D$	702
Укупан број модула D	$N_D$	20

## 7.2.1.2. Резултати избора оптималне конфигурације тестираних примера

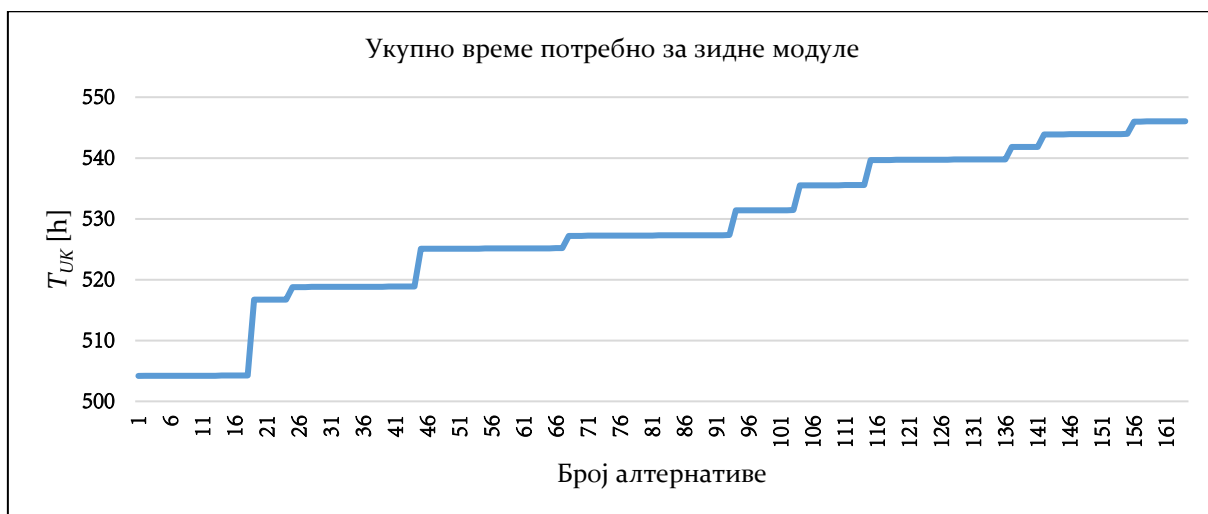
Резултати избора оптималне конфигурације, за пример 1, су приказани у наставку у виду дијаграма појединачних и збирне функције циља по генерисаним алтернативама. За остале примере приказани су само дијаграми збирне функције циља и дати су у прилогу 3 ове дисертације.

Дијаграми добијених критеријумских функција за зидове су приказани на сликама 7.7 до 7.11.

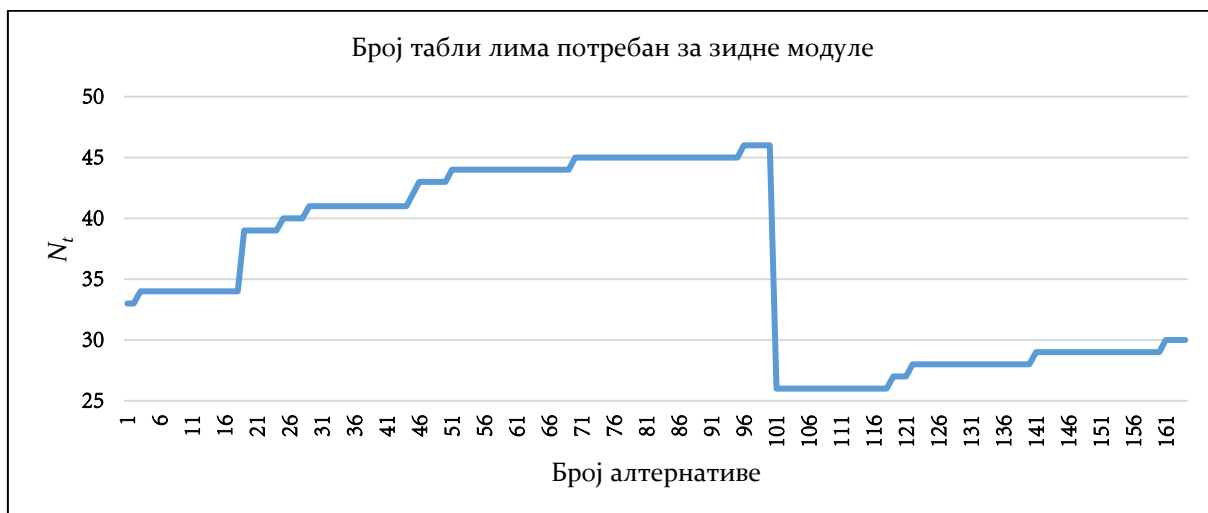
Дијаграм збирне  $\phi$ -је циља са позицијом оптималне алтернативе у односу на изведено решење приказан је на слици 7.12.

Дијаграми критеријумских функција за под и плафон су приказани на сликама од 7.13 до 7.17.

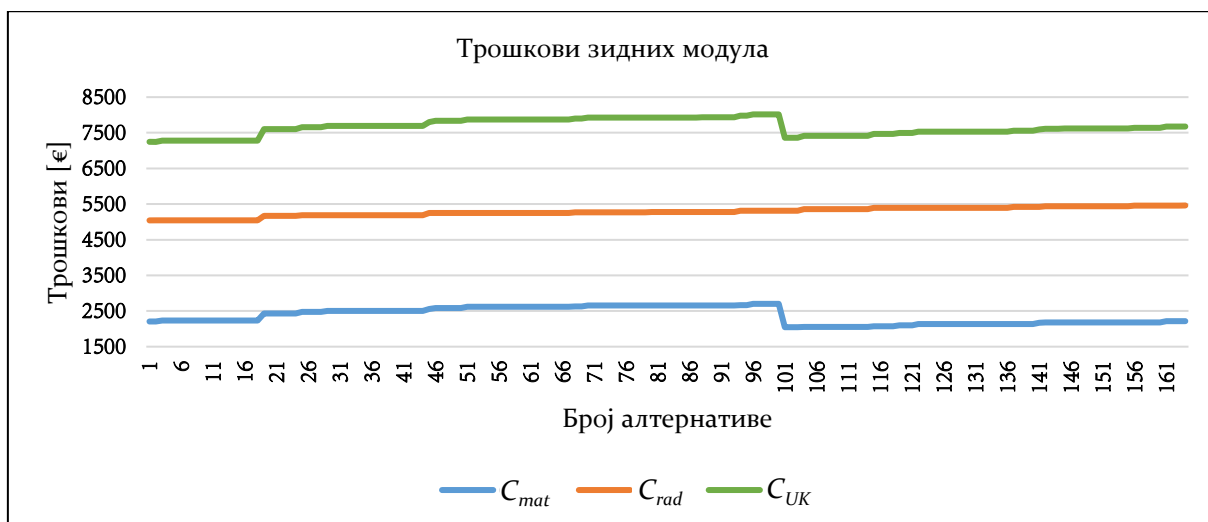
Дијаграм збирне ф-је циља са позицијом оптималне алтернативе у односу на изведено решење приказан је на слици 7.18.



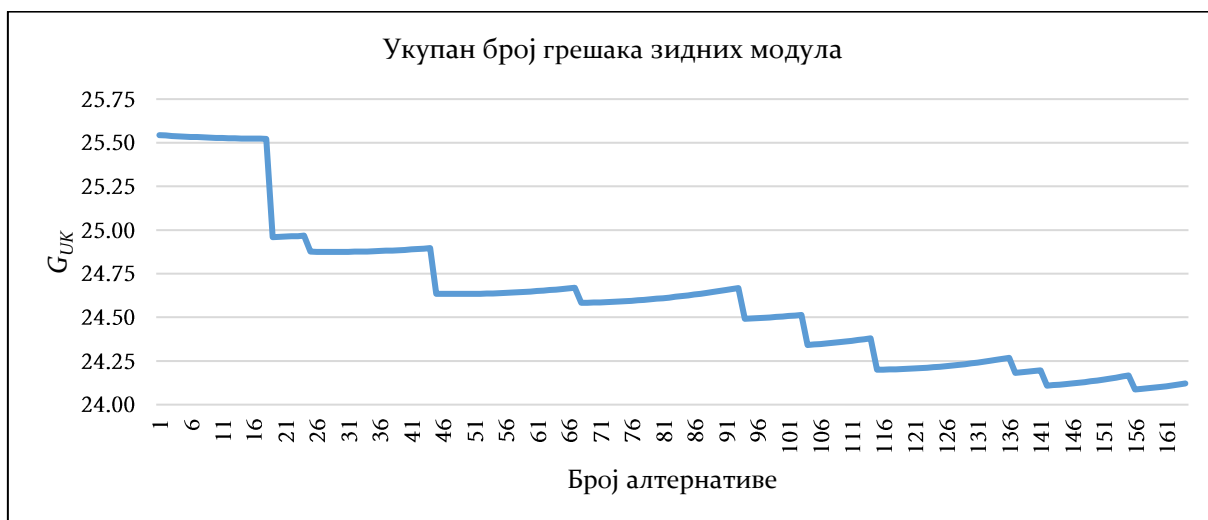
Слика 7.7 – Дијаграм укупног времена за све зидне модуле по алтернативама



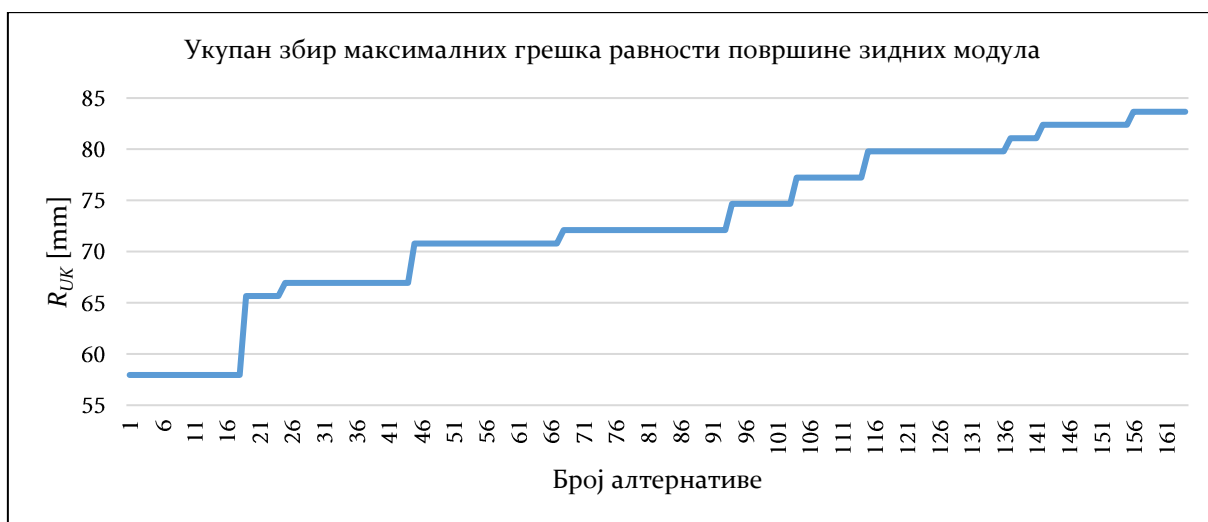
Слика 7.8 – Дијаграм укупног броја табли лима за све зидне модуле по алтернативама



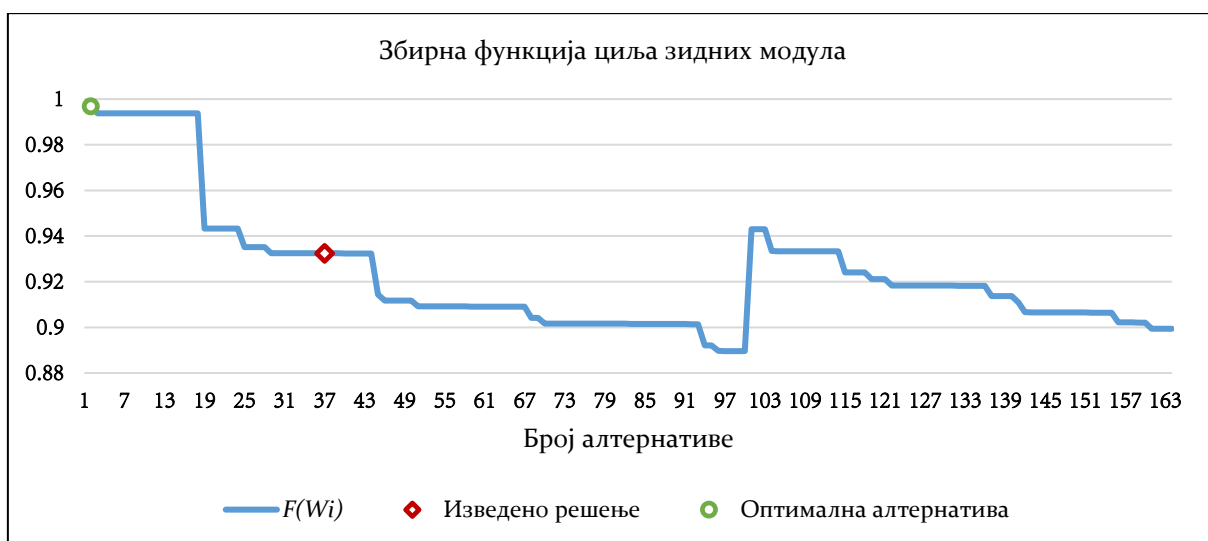
Слика 7.9 – Дијаграм трошкова за све зидне модуле по алтернативама



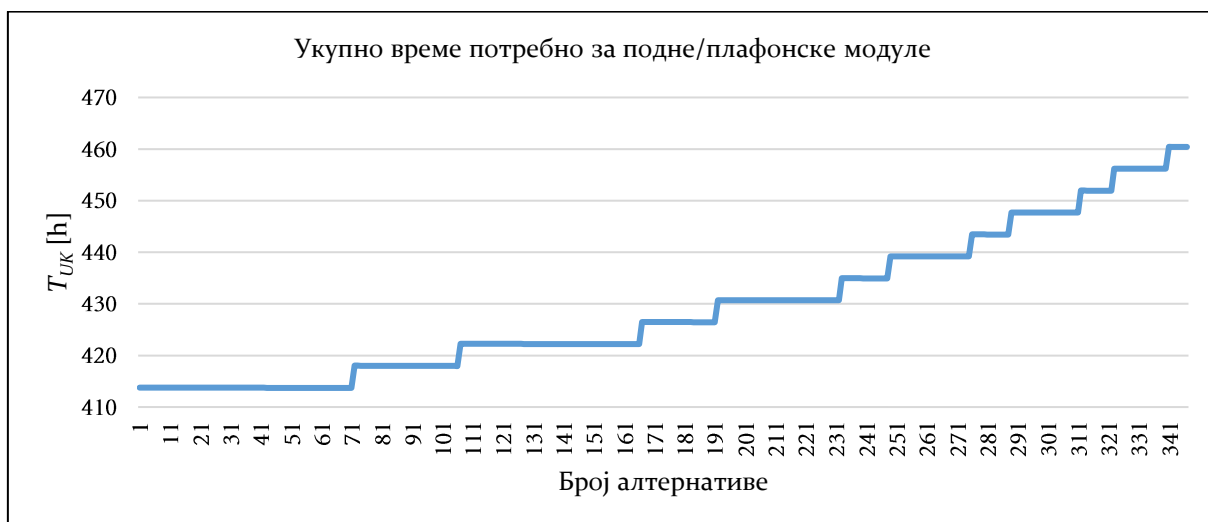
Слика 7.10 – Дијаграм укупног број грешака на свим зидним модулима по алтернативама



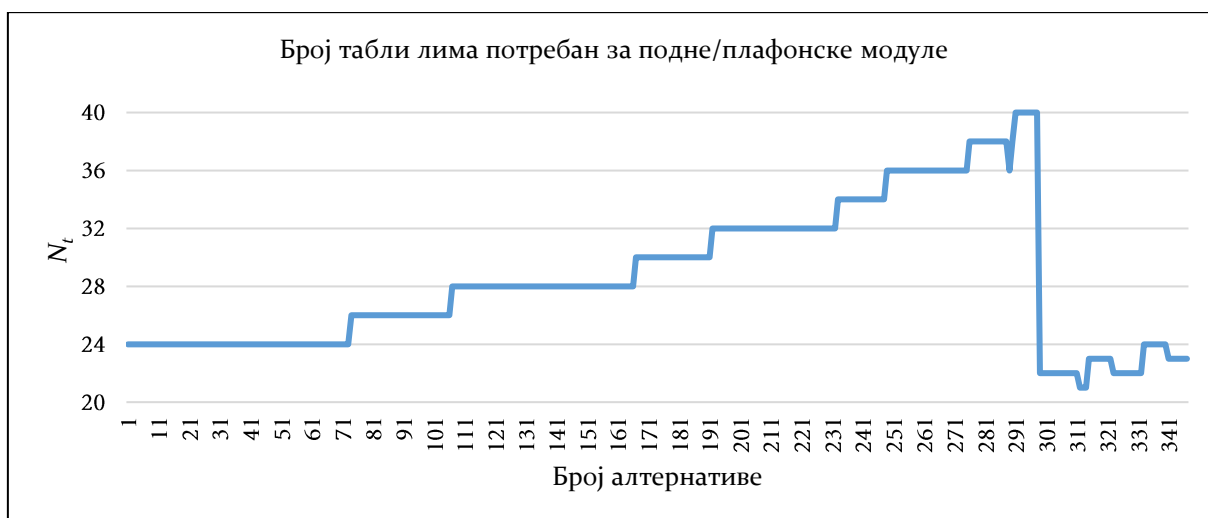
Слика 7.11 – Дијаграм укупног збира максималних грешка равности површине зидних модула по алтернативама



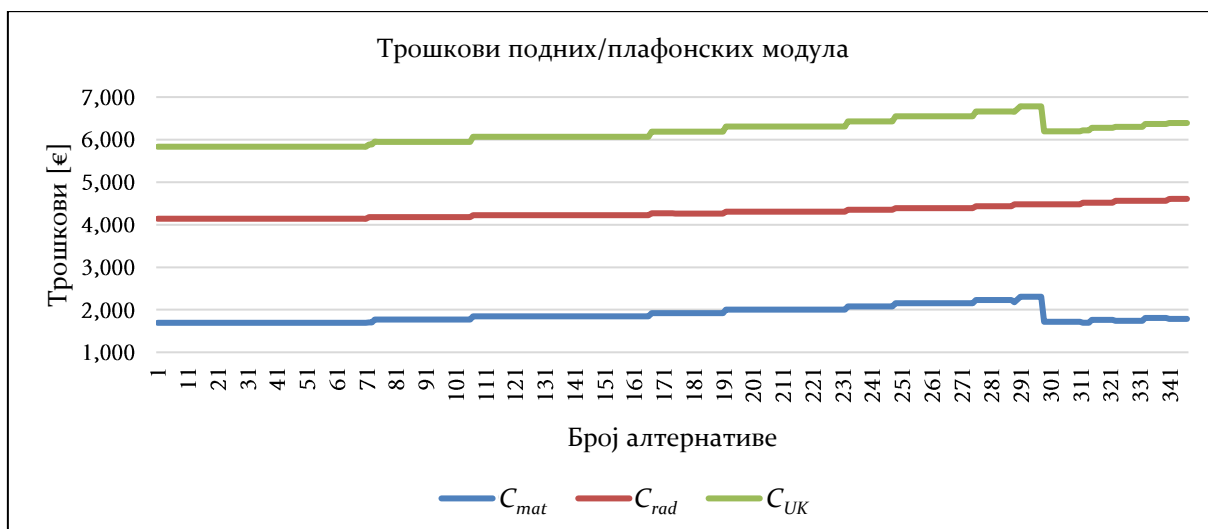
Слика 7.12 – Дијаграм збирне функције зидних модула по алтернативама са позицијама изведене и оптималне алтернативе



Слика 7.13 – Дијаграм укупног времена за све подне/плафонске модуле по алтернативама

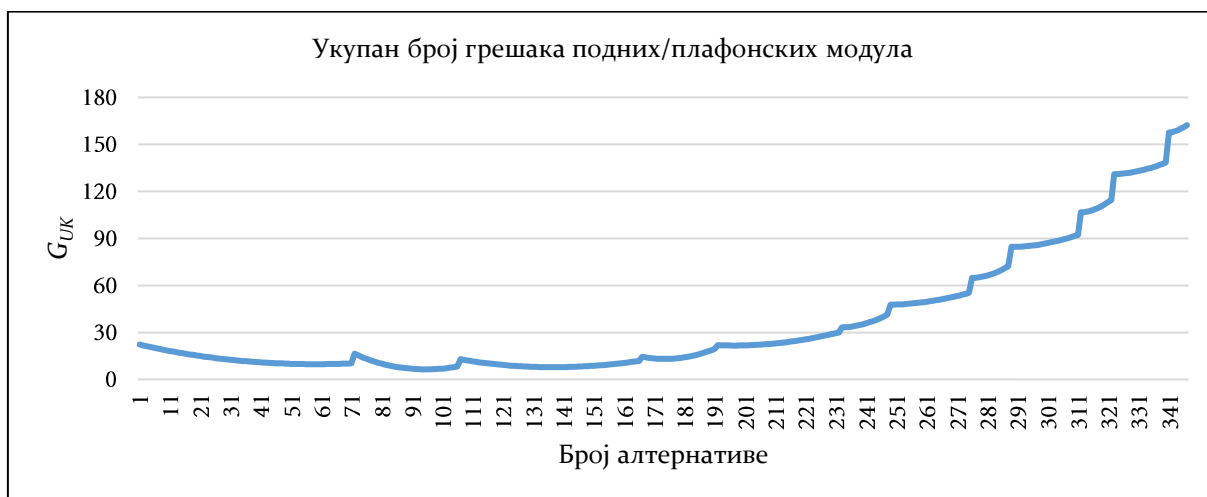


Слика 7.14 – Дијаграм укупног броја табли лима за све подне/плафонске модуле по алтернативама

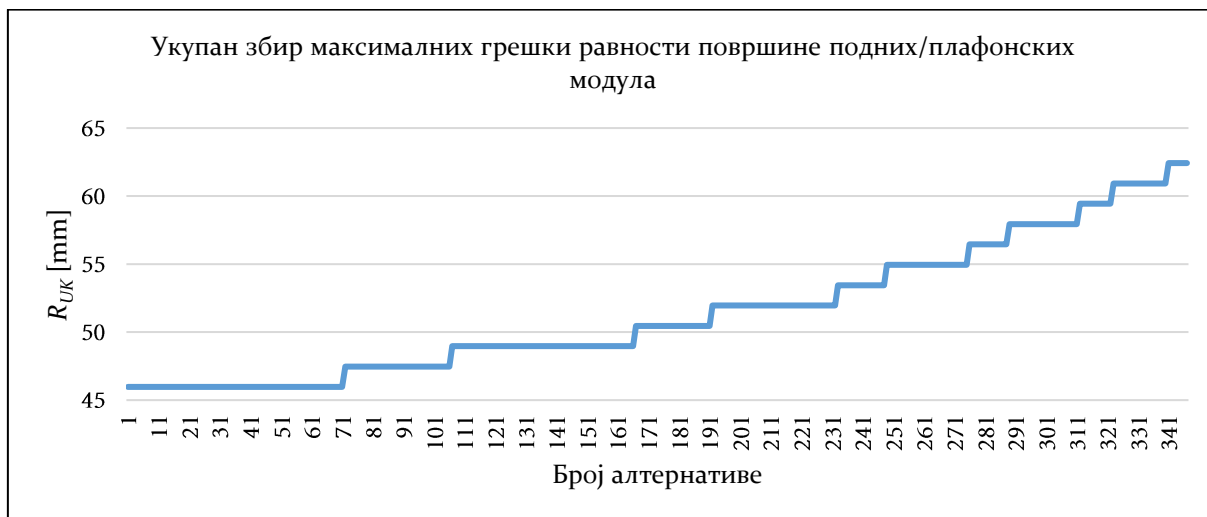


Слика 7.15 – Дијаграм трошкова за све подне/плафонске модуле по алтернативама

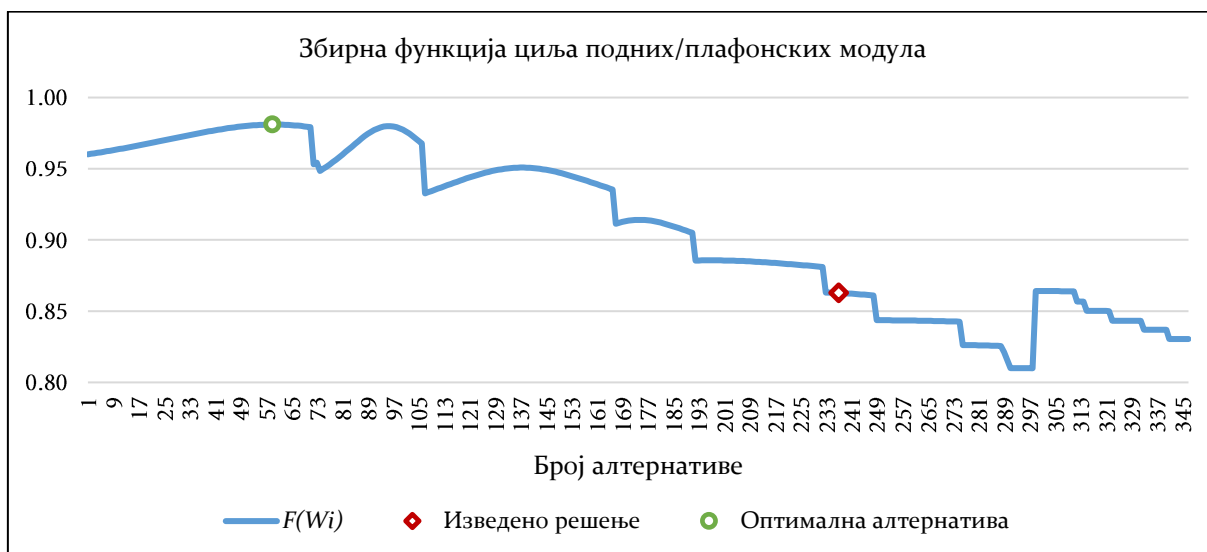




Слика 7.16 – Дијаграм укупног број грешака на свим подним/плафонским модулима по алтернативама



Слика 7.17 – Дијаграм укупног збира максималних грешка равности површине подних/плафонских модула по алтернативама

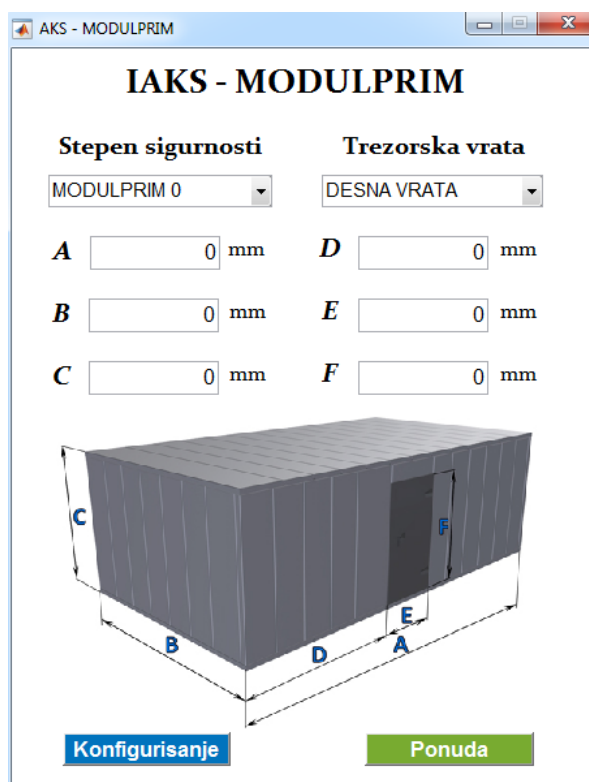


Слика 7.18 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула по алтернативама са позицијама изведене и оптималне алтернативе

## 7.2.2. Тестирање главног кода

У оквиру тестирања главног кода урађена је провера да ли главни код функционише исправно и да ли је интеграција припадајућих кодова урађена исправно.

Приступ збирном коду се изводи преко улазне маске која је у исто време и Графички кориснички интерфејс предложеног модела. Он има задатак да прикупи све захтеве корисника неопходне за даљи рад комплетног модела, као и да прикаже оптималну алтернативу производа у виду понуде. За потребе примене *Ауџомајскої инџејрисаної конфїгурационої сисџема* на примеру МТП МОДУЛПРИМ (ИАКС – МОДУЛПРИМ) у *MATLAB*-у је направљен графички кориснички интерфејс који је приказан на слици 7.19. Састоји се од две падајуће листе (избор степена сигурности и смер отварања врата), шест поља за унос основних димензија МТП и положаја врата и скице која олакшава разумевање основних димензија. Поред њих ту је дугме *Конфїгурисање* чијим притиском се покреће комплетан систем, и дугме *Понуда* чијим притиском се добија понуда на крају процеса конфигурисања.



Слика 7.19 – Изглед ГКИ предложеног модела за МТП

За аутоматизацију предложеног модела написан је код главног програма у *MATLAB*-у који је приказан у прилогу 4. Његов задатак је да међусобно повеже све модуле, тј. да преузме захтеве купца од *џрафичкої корисничкої инџерфејса* и даље их, у одређеном редоследу, прослеђује у остале модуле (*MATLAB* функције) захтевајући дефинисане повратне информације.

Тестирање главног кода је такође урађено на свих 8 одабраних примера и потврђена је његова функционалност.

### 7.3. Валидација модела

Након верификације предложеног модела, којом је доказано да он исправно симулира све предвиђене функције производа, било је неопходно проверити и доказати да ли је предложени модел заснован на новој платформи ефективнији у реалним условима од постојећег поступка конфигурирања МТП МОДУЛПРИМ.

Структура и димензије модула, по зидовима и поду/плафону, за свих 8 реализованих примера заснованих на старој платформи су приказани у табелама 7.7. и 7.8.

Табела 7.7 – Изведена решења зидова за све примере

Параметар	Ознака	Пример							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина модула А [mm]	$b$	550	550	550	550	550	550	550	550
Ширина модула А1 [mm]	$b_{A1}$	800	0	760	0	0	0	593	0
Ширина модула А2 [mm]	$b_{A2}$	800	400	400	490	825	475	400	650
Ширина модула А3 [mm]	$b_{A3}$	0	0	750	0	0	0	750	0
Ширина модула А4 [mm]	$b_{A4}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Ширина модула В1 [mm]	$b_{B1}$	550	400	550	506	705	575	550	400
Ширина модула В2 [mm]	$b_{B2}$	500	490	750	750	740	575	750	660
Ширина модула В3 [mm]	$b_{B3}$	600	850	710	450	530	600	480	600
Бр. модула А лево од врата	$n_{AL}$	6	0	1	0	0	0	3	0
Бр. модула А десно од врата	$n_{AR}$	5	0	0	0	0	0	0	1
Бр. модула А на бочним зидовима	$2 \times n_{AS}$	8	12	2	10	10	12	2	28
Бр. модула А на задњем зиду	$n_{AB}$	16	2	5	3	4	3	7	4
Бр. модула А1	$n_{A1}$	1	0	1	0	0	0	1	0
Бр. модула А2	$n_{A2}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Бр. модула А3	$n_{A3}$	0	0	2	0	0	0	2	0
Бр. модула А4	$n_{A4}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Укупан бр. модула А	$N_A$	35	14	8	13	14	15	12	33

Табела 7.8 – Изведена решења пода/плафона за све примере

Параметар	Ознака	Пример							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина модула С [mm]	$b_c$	625	570	680	700	695	612	565	655
Ширина модула Cz [mm]	$b_{Cz}$	625	570	680	700	695	613	565	655
Ширина модула D [mm]	$b_D$	550	550	550	550	550	550	550	550
Укупан број модула D	$N_D$	30	10	8	8	8	10	12	26

Структура и димензије модула, по зидовима и поду/плафону, за свих 8 примера добијених применом ИАКС МОДУЛПРИМ заснованог на новој платформи су приказане у табелама 7.9. и 7.10.

Табела 7.9 – Вредности оптималних решења за зидове

Параметар	Ознака	Пример							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина модула А [mm]	$b$	691	775	730	775	771	850	775	783
Ширина модула А1 [mm]	$b_{A1}$	786	400	400	490	825	475	400	417
Ширина модула В1 [mm]	$b_{B1}$	504	400	400	506	705	575	468	400
Ширина модула В2 [mm]	$b_{B2}$	627	690	590	400	406	475	500	530
Ширина модула В3 [mm]	$b_{B3}$	417	400	540	550	417	550	455	451
Бр. модула А лево од врата	$n_{AL}$	6	0	2	0	0	0	3	0
Бр. модула А десно од врата	$n_{AR}$	4	0	0	0	0	0	0	1
Бр. модула А на бочним зидовима	$2 \times n_{AS}$	6	8	4	8	8	8	4	20
Бр. модула А на задњем зиду	$n_{AB}$	13	2	4	2	3	2	5	3
Бр. модула А1	$n_{A1}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Укупан бр. модула А	$N_A$	29	10	10	10	11	10	12	24

Табела 7.10 – Вредности оптималних решења за под/плафон

Параметар	Ознака	Пример							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина модула С [mm]	$b_C$	790	778	712	720	718	795	739	765
Ширина модула Cz [mm]	$b_{Cz}$	790	778	712	720	718	795	739	765
Ширина модула D [mm]	$b_D$	702	778	712	720	718	795	738	770
Укупан број модула D	$N_D$	20	6	6	6	6	6	8	18

Анализом напред приказаних података може се уочити следеће (види табеле 7.11 и 7.12):

- Број различитих модула на зидовима је мањи на рачун смањења броја нестандартних модула у просеку за 11,11% што доприноси рационализацији производње.
- Укупан број модула који је неопходан за реализацију једне МТП је смањен у просеку за 18,32% код зидова и за 25% код пода/плафона што је такође погодно за рационализацију производње.

Ефекти модула за оптимизацију који је уграђен у конфигурациони систем заснован на новој платформи се најбоље сагледавају из табеле 7.13 у којој су упоредно приказане вредности критеријумских функција за изведена решења на основу старе платформе производа и оптимална решења одабрана на основу предложеног модела заснованог на новој платформи производа за свих 8 тестираних примера.

Табела 7.11 – Анализа броја модула за зид

Параметар	Пример								Укушно
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Укупан бр. модула за изведено решење	41	19	16	18	19	20	20	38	191
Укупан бр. модула за оптимално решење	34	15	15	15	16	15	17	29	156
<b>Разлика (ком.)</b>	<b>-7</b>	<b>-4</b>	<b>-1</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-5</b>	<b>-3</b>	<b>-9</b>	<b>-35</b>
<b>Разлика (%)</b>	<b>-17,07</b>	<b>-21,05</b>	<b>-6,25</b>	<b>-16,67</b>	<b>-15,79</b>	<b>-25</b>	<b>-15</b>	<b>-23,68</b>	<b>-18,32</b>
Бр. различитих модула за изведено решење	6	5	7	5	5	5	7	5	45
Бр. различитих модула за оптимално решење	5	5	5	5	5	5	5	5	40
<b>Разлика (ком.)</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>-5</b>
<b>Разлика (%)</b>	<b>-16,67</b>	<b>0</b>	<b>-28,57</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-28,57</b>	<b>0</b>	<b>-11,11</b>

Табела 7.12 – Анализа броја модула за под/плафон

Параметар	Пример								Укушно
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Укупан бр. модула за изведено решење	34	14	12	12	12	14	16	30	144
Укупан бр. модула за оптимално решење	24	10	10	10	10	10	12	22	108
<b>Разлика (ком.)</b>	<b>-10</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-4</b>	<b>-4</b>	<b>-8</b>	<b>-36</b>
<b>Разлика (%)</b>	<b>-29,41</b>	<b>-28,57</b>	<b>-16,67</b>	<b>-16,67</b>	<b>-16,67</b>	<b>-28,57</b>	<b>-25</b>	<b>-26,67</b>	<b>-25</b>
Бр. различитих модула за изведено решење	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Бр. различитих модула за оптимално решење	3	3	3	3	3	3	3	3	24
<b>Разлика (ком.)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Разлика (%)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Табела 7.13 – Упоредни приказ добијених резултата са побољшањима за све примере

Пример		Број табли	Критеријумске функције					Збирна ф-ја циља	
			$N_t$	$T_{UK}$	$C_{UK}$	$G_{UK}$	$R_{UK}$	$F(W_i)$	
1	Изведено решење	Зид	41	518,808	7692,702	24,881	66,952	0,9325	
		Под	34	434,959	6426,189	33,986	53,451	0,8628	
	Оптимална алтернатива	Зид	33	504,186	7246,397	25,541	57,955	0,9968	
		Под	24	413,721	5830,701	9,752	45,972	0,9810	
	<b>Побољшање</b>			<b>24,0%</b>	<b>3,8%</b>	<b>7,4%</b>	<b>40,0%</b>	<b>13,7%</b>	<b>10,17%</b>
2	Изведено решење	Зид	17	239,109	3485,004	15,397	30,766	0,9260	
		Под	14	133,782	2084,400	14,179	21,370	0,8619	
	Оптимална алтернатива	Зид	14	230,716	3280,965	15,855	25,637	0,9971	
		Под	10	127,416	1873,470	3,519	18,543	1,0000	
	<b>Побољшање</b>			<b>22,6%</b>	<b>4,0%</b>	<b>7,5%</b>	<b>34,5%</b>	<b>15,3%</b>	<b>11,70%</b>
3	Изведено решење	Зид	16	189,000	2830,791	29,717	23,584	0,9689	
		Под	12	127,010	1936,000	9,664	19,049	0,9050	
	Оптимална алтернатива	Зид	14	187,121	2741,864	29,278	22,490	1,0000	
		Под	10	123,693	1828,797	2,421	17,625	0,9999	
	<b>Побољшање</b>			<b>14,3%</b>	<b>1,6%</b>	<b>4,1%</b>	<b>19,5%</b>	<b>5,9%</b>	<b>6,72%</b>
4	Изведено решење	Зид	18	196,715	2991,513	30,662	25,942	0,9202	
		Под	12	131,022	1985,036	9,548	19,200	0,9059	
	Оптимална алтернатива	Зид	13	191,234	2759,034	29,368	22,661	0,9999	
		Под	10	127,635	1876,935	2,422	17,770	0,9999	
	<b>Побољшање</b>			<b>23,3%</b>	<b>2,7%</b>	<b>6,8%</b>	<b>20,9%</b>	<b>10,4%</b>	<b>9,51%</b>
5	Изведено решење	Зид	20	222,198	3368,286	30,380	29,026	0,9275	
		Под	12	166,473	2419,463	9,568	19,584	0,9088	
	Оптимална алтернатива	Зид	15	216,564	3133,924	29,389	25,543	0,9999	
		Под	10	162,184	2299,834	2,418	18,085	0,9999	
	<b>Побољшање</b>			<b>21,9%</b>	<b>2,6%</b>	<b>6,1%</b>	<b>20,4%</b>	<b>10,2%</b>	<b>8,90%</b>
6	Изведено решење	Зид	20	219,081	3330,910	31,368	29,650	0,9019	
		Под	14	155,126	2345,853	12,890	21,851	0,8708	
	Оптимална алтернатива	Зид	15	209,891	3051,630	29,566	23,950	0,9999	
		Под	10	147,903	2123,956	4,213	18,958	1,0000	
	<b>Побољшање</b>			<b>26,5%</b>	<b>4,4%</b>	<b>8,8%</b>	<b>23,7%</b>	<b>16,7%</b>	<b>12,81%</b>
7	Изведено решење	Зид	19	242,443	3586,099	25,348	32,303	0,9373	
		Под	16	159,112	2459,676	16,503	24,465	0,8712	
	Оптимална алтернатива	Зид	15	236,569	3381,361	24,874	28,538	0,9998	
		Под	12	152,464	2245,124	3,073	21,616	0,9999	
	<b>Побољшање</b>			<b>22,9%</b>	<b>3,1%</b>	<b>6,9%</b>	<b>33,2%</b>	<b>11,7%</b>	<b>10,58%</b>
8	Изведено решење	Зид	38	459,985	6872,068	30,285	62,272	0,9048	
		Под	30	400,507	5874,035	29,183	47,555	0,8527	
	Оптимална алтернатива	Зид	27	441,769	6282,496	30,246	50,624	0,9998	
		Под	22	382,948	5390,364	7,095	41,529	0,9678	
	<b>Побољшање</b>			<b>27,9%</b>	<b>4,2%</b>	<b>8,4%</b>	<b>37,2%</b>	<b>16,1%</b>	<b>11,95%</b>
<b>Просечно побољшање</b>				<b>22,9%</b>	<b>3,3%</b>	<b>7,0%</b>	<b>28,7%</b>	<b>12,5%</b>	<b>10,3%</b>

Из последњег реда табеле 7.13 се може констатовати следеће:

- Просечан број табли лима потребан за израду *МТП* је мањи за 22,9%.
- Укупно време за израду и монтажу *МТП* је мање у просеку за 3,3%.
- Укупни трошкови производње се смањују у просеку за 7%.
- Укупан бр. грешака на свим модулима *МТП* се смањује у просеку за 28,7%.
- Укупан збир максималних одступања од равности површине свих модула се у просеку смањује за 12,5%.

Уколико се посматра збирна функција циља у којој су појединачни критеријуми узети са напред усвојеним тежинским коефицијентима, може се рећи да је укупан ефекат примене предложеног модела **10,3%**.

ПОГЛАВЉЕ

8

---

**ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА**



## 8.1. Анализа остварених резултата

У савременим условима глобализације тржишта све више се захтевају производи који су прилагођени захтевима купца. Као последица овог захтева, производи су све комплекснији, број варијанти производа је све већи, животни век производа све краћи као и време пласирања производа на тржиште. Ово су чињенице које су подстакле и определиле истраживање спроведено у овој дисертацији.

Фокус дисертације је на развоју теоријског модела за аутоматско конфигурисање сложених производа са модуларном архитектуром. У складу са тим, спроведена истраживања се могу груписати у три основне целине:

- **Прва целина** представља *теоријски део истраживања*. Овај део је спроведен на основу прегледа и анализе доступне литературе и обухватио је анализу стања и савремене трендове у процесу развоја сложених производа са посебним акцентом на сагледавање постојећег нивоа знања у области варијабилности производа, конфигурације сложених производа и система за подршку одлучивању.
- **Друга целина** је такође у домену теорије и односи се на *развој опшће модела истраживачког аутоматског конфигурационог система*. Ова целина је уједно представљала главни научно-истраживачки изазов у овој дисертацији. Модел се састоји од 9 модула од којих већина може представљати посебан конфигуратор за одређену област а заједно интегрисани у једну целину представљају *конфигурациони систем* на основу којег је могуће добити оптималну конфигурациону варијанту производа која задовољава индивидуалне захтеве купца и која је економски најповољнија за произвођача.
- **Трећа целина** је најобимнија и обухватила је *развој програмског система ИАКС МОДУЛПРИМ* чији је задатак био да на примеру одабране врсте производа изврши верификацију и валидацију предложеног модела.

У складу са циљевима истраживања и постављеним основним научним хипотезама у докторској дисертацији, остварени су релевантни теоријски, методолошки и практични резултати.

Кључни научни резултати докторске дисертације:

- Извршена је систематизација релевантних научних знања која се односе на област истраживања докторске дисертације
- Развијен је оригинални вишекритеријумски модел за аутоматско конфигурисање сложених производа који је научно заснован и погодан за коришћење у пракси. Развијени модел интегрише процесе конфигурисања производа, пројектовања технолошких процеса и планирања производње.
- У оквиру предложеног модела, развијен је и тестиран модел за подршку одлучивању у процесу вредновања, рангирања и интелигентног избора оптималне

конфигурације сложеног производа заснован на савременим методама вишекритеријумске анализе.

- Верификација и валидација модела на реалним примерима сложеног производа је показала да постоје велике могућности за побољшање ефикасности и ефективности у процесу развоја сложених производа. Допринос се огледа у повећању степена аутоматизације и ефикасности пројектовања производа и технолошких процеса, смањењу трошкова и времена пројектовања, уштеде у процесу производње и скраћења времена испоруке производа.
- Предложени модел има висок степен флексибилности и универзалности, може се даље надограђивати и могуће га је интегрисати у пословни систем привредног друштва.
- Спроведено истраживање је омогућило проширење постојећих и стицање нових научних сазнања у посматраној области. Стечена су и нова искуства у примени конфигурабилних производа и теорије одлучивања која је могуће имплементирати и на сложене производе у другим гранама индустрије.

Практични резултати истраживања:

- Практична примена предложеног модела и тестирање развијеног програмског система ИАКС МОДУЛПРИМ у реалним условима, је показала да збирни ефекат примене предложеног модела износи 10,3%. Ефекти појединачних критеријумских функција су:
  - смањење трошкова производње за 7%,
  - смањење времена израде и монтаже за 3,3% и
  - побољшање анализираних параметара квалитета за  $12,5 \div 28,7\%$ .
- Применом предложеног модела, купцу је могуће понудити жељену конфигурацију производа изузетног квалитета по што мањој цени и у што краћем року.
- Аутоматизацијом дела продајног циклуса продавци и дистрибутери добијају веома моћан алат за израду квалитетне понуде и брз одговор на захтеве купца.
- Смањење оперативних трошкова у процесу уговарања посла.
- Аутоматизација процеса:
  - отварања и управљања радним налогом,
  - конфигурисања производа,
  - израде конструкционе и технолошке документације и
  - планирања производње.
- Повећање ефикасности рада кроз:
  - редуковање или елиминисање задатака који се понављају и
  - скраћење инжењерског времена потребног за рад на пројектовању производа и његово преусмеравање на друге креативне послове.
- Обезбеђење конкурентске предности на тржишту кроз:
  - перманентно стварање додатне вредности разумевањем, предвиђањем и задовољењем потреба и очекивања купаца,

- повећање задовољства и лојалности купаца и
- повећање продаје и тржишног удела а тиме и профита привредног друштва.

Важно је напоменути да је у оквиру програмског система ИАКС МОДУЛПРИМ у овој дисертацији развијено пет оригиналних алгоритама:

- *Алгоритам оптимизационог модула* за решење проблема вишекритеријумског одлучивања.
- *Алгоритам за генерисање технички изводљивих конфигурација МТП.*
- *Алгоритам за оптимизацију плана сечења* делова из табле лима.
- *Алгоритам збирног кода* за интеграцију свих модула предложеног модела.
- *Алгоритам САД конфигурациона* за конфигурисање склопа МТП.

Алгоритам САД конфигуратора је развијен и тестиран у САД софтверском систему Autodesk Inventor Professional® а за остале алгоритме развијени су и тестирани оригинални програмски кодови у MATLAB® окружењу.

Осим тога, у дисертацији је представљена *нова платформа за конфигурисање МТП* у оквиру које су развијени следећи модели:

- Стохастички модели зависности укупног броја грешака од димензија модула.
- Стохастички модели зависности укупне грешке равности површине модула у зависности од димензија модула.
- Математички модели зависности укупног времена израде и монтаже од параметра производа.
- Математички модели укупних производних трошкова у зависности од параметара производа.
- Модели интелигентних 3D шаблона модула, склопова и компоненти, као и 2D шаблони техничке документације.

Из свега наведеног се може видети да је истраживање предложеног проблема веома комплексан задатак како са научног тако и са практичног становишта.

## 8.2. Закључци

У оквиру докторске дисертације остварен је научни циљ: развој интегрисаног модела за аутоматско конфигурисање оптималне варијанте сложених производа у индустрији прераде метала са аспекта трошкова, квалитета и времена израде производа.

Верификацијом и валидацијом предложеног модела је доказана хипотеза **Н1** да је *могуће развијати модел за аутоматско конфигурисање оптималне варијанте сложених производа, заснован на модуларној платформи производа и интеграцији пројектовања производа, пројектовања технолошких процеса и планирања производње.*

Тестирањем CAD конфигуратора и главног кода ИАКС МОДУЛПРИМ је показано да је могуће аутоматизовати цео процес и да је интегрисани процес знатно ефикаснији од индивидуалне примене CAD система. С друге стране, валидација модела је показала да се применом ИАКС остварују знатне уштеде трошкова производње и времена израде и монтаже, као и да се добија конфигурација производа са знатно унапређеним квалитетом. Тиме је доказана и хипотеза **H2** да ће *модел бићи вишесџруко ефикаснији и ефектнији од њосијећих ѓрисџуја, заснованих на ѓримени комерџијалних CAD сисџема, са асџекџа квалиџеџа ѓпроизвода, времена израде, монџаже и џрошкова ѓпроизводње.*

Иако је верификаџа и валидација предложеног модела извршена на примерима фамилије модуларних трезорских просторија, може се са сигурношћу тврдити да ће предложени модел, уз одређене корекџије, бити применљив на широк спектар сложених производа.

Резултати остварени применом развијеног модела потврђују да су савремени аутоматизовани конфигурациони системи засновани на виртуелним инжењерским технологијама кључни за успешну имплементацију стратегије *Mass Customization* и да је могућа производња високо варијабилних производа који задовољавају широк спектар захтева купца уз услов да је цена производа блиска цени производа који се остварују у масовној производњи.

Зато се савремени концепти развоја производа све више базирају на **џлаџформама** помоћу којих се развијају фамилије производа модуларне архитектуре, које се састоје од скупова заједничких модула и компоненти, помоћу којих је могуће остварити велику варијабилност али и производњу приближно серијских карактеристика.

Привредна друштва која су способна да пројектују, произведу и продају производе у складу са овом стратегијом, и у потпуности су посвећена задовољењу захтева купца, моћи ће да обезбеде стални раст и развој и своје место на глобалном тржишту. Предуслов је константна иновативност, примена нових организационих форми, метода, алата и савремених информационих технологија што се може остварити само помоћу развојних тимова који се састоје од високообразованих и креативних појединаца.

Упознавање производног окружења са досадашњим резултатима истраживања и даља употреба и пласирање развијене методологије у домаћу индустрију омогућиће домаћим привредним друштвима да повећају флексибилност и ефикасност производње и тако обезбеде одрживи развој и тржишну конкурентност.

### 8.3. Правци даљег истраживања

Будући истраживачки рад у овој области треба да истражи нове могућности и границе примене представљеног концепта кроз конкретну примену развијеног модела на шири спектар производа и интензивну сарадњу са индустријским партнерима у окружењу. Наставак истраживања је могуће усмерити у два правца.

Даљи рад на унапређењу општег *модела индустријске аутоматске конфигурационе система* као целине:

- побољшања и унапређења алгоритамских структура,
- укључење нових критеријумских функција у модел одлучивања,
- имплементација метода вештачке интелигенције,
- развој колаборативног радног окружења,
- интеграција модела у пословни систем предузећа и
- континуална верификација и валидација модела.

Будући рад на унапређењу модела *ИАКС МОДУЛПРИМ* биће усмерен на:

- потпуну интеграцију *CAD/CAPP/CAM* система,
- формирање јединствене платформе за целу фамилију *МТП*,
- проширење платформе *МТП* на:
  - *МТП* са више трезорских врата,
  - *МТП* великих димензија са потконструкцијом,
  - *МТП* сложеног облика,
  - специјалне модуле са додатним функцијама,
- унапређење модула за планирање производње уграђивањем оптимизационих модела и
- унапређење продајног конфигурајора са *Web* сервисом за *Online* куповину.

---

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] **Kolarević M.**, *Brzi razvoj proizvoda*, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2004
- [2] **Borojević S.**, *Razvoj sistema za simultano projektovanje proizvoda i tehnoloških procesa*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija, 2015
- [3] **Mandić V., Erić D., Adamović D., Janjić M., Jurković Z., Babić Ž., Ćosić P.**, *Concurrent Engineering Based on Virtual Manufacturing*, Tehnicki Vjesnik, 2012, Vol. 19, № 4, p. 885–892
- [4] **Stjepandić J., Wognum N., Verhagen W.J.C.**, *Concurrent Engineering in the 21st Century*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2015, DOI:10.1007/978-3-319-13776-6
- [5] **Woörner K., Wißler K.F.**, *Rapid Product Development - An Iterative Approach to Innovative Design*, Institute for Human Factors and Technology Management, University of Stuttgart, Stuttgart, 1997
- [6] **Bullinger H.J., Woörner K., Wißler K.F.**, *Rapid Product Development - A Multi-Disciplinary Approach for Design of Innovative Products*, 3rd International Conference on Manufacturing Technology, Hong Kong, 1995, p. 11–19
- [7] **Bullinger H.J., Woörner K., Wißler K.F.**, *Rapid Product Development - Methodic Support for Creative Product Development*, Institute for Human Factors and Technology Management, University of Stuttgart, Stuttgart, 1997
- [8] **Ryan R.R.**, *Digital Testing in the Context of Digital Engineering" Functional Virtual Prototyping"*, VDI BERICHTE, VDI VERLAG GMBH, 1999, Vol. 1489, p. 163–186
- [9] **Blecker T., Friedrich G., Kaluza B., Abdelkafi N., Kreutler G.**, *Information and Management Systems for Product Customization*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2005, Vol. 7, DOI:10.1007/b101300
- [10] **Tseng M.M., Jiao J.R., Merchant M.E.**, *Design for Mass Customization*, CIRP Annals, 1996, Vol. 45, № 1, p. 153–156, DOI:10.1016/S0007-8506(07)63036-4
- [11] **Tseng M.M., Jiao J.R.**, *Mass Customization*, Handbook of Industrial Engineering, 3rd ed. / ed. by Salvendy G., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2001, p. 684–709, DOI:10.1002/9780470172339.ch25
- [12] **Pine B.J.**, *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*, Harvard Business Review Press, Boston, MA, 1993
- [13] **Myung S., Han S.**, *Knowledge-Based Parametric Design of Mechanical Products Based on Configuration Design Method*, Expert Systems with Applications, 2001, Vol. 21, № 2, p. 99–107, DOI:10.1016/S0957-4174(01)00030-6
- [14] **Fujita K.**, *Product Variety Optimization Under Modular Architecture*, Computer-Aided Design, 2002, Vol. 34, № 12, p. 953–965, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00149-X
- [15] **Paunu P.**, *Design Configurator – Managing the Order Engineering Challenge in ETO Companies*, Doktorska disertacija, University of Tampere, School of Information Sciences, Tampere, Finland, 2014
- [16] **Toffler A.**, *Future shock*, Bantam Books Inc, New York, 1971

- [17] **Davis S.M.**, *Future Perfect*, Addison-Wesley, Reading, 1987
- [18] **Felfernig A., Hotz L., Bagley C., Tiihonen J.**, *Knowledge-Based Configuration: From Research to Business Cases*, Elsevier, Waltham, 2014
- [19] **Chen C.-Y., Liao G.-Y., Lin K.-S.**, *An attribute-based and object-oriented approach with system implementation for change impact analysis in variant product design*, *Computer-Aided Design*, 2015, Vol. 62, p. 203–217, DOI:10.1016/j.cad.2014.11.006
- [20] **Anderson D.M., Pine B.J.**, *Agile Product Development for Mass Customization*, McGraw-Hill, New York, 1997
- [21] **Tseng M.M., Piller F.T.**, *The Customer Centric Enterprise: Advances in Mass Customization and Personalization*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003
- [22] **Anišić Z., Suzić N., Tekić A.**, *Menadžment proizvodna i usluga*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija, 2015
- [23] **Burbidge J.L.**, *The Introduction of Group Technology*, Heineman, London, UK, 1978
- [24] **Scallan P.**, *Process Planning: The design/manufacture interface*, Butterworth-Heinemann, Boston, MA, 2003
- [25] **Lukić D., Milošević M., Todić V.**, *Integrirani CAPP sistemi i tehnološka baza podataka - modul integrirani CAPP sistemi*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija, 2013
- [26] **SAP**, *Strategies to connect Sales with Production*; [Electronic resource], SAP, 2012, URL: <https://blogs.sap.com/2012/07/06/mts-mto-ato-cto-e> (accessed: 10.05.2018)
- [27] **Caron F., Fiore A.**, 'Engineer to Order' Companies: How to Integrate Manufacturing and Innovative Processes, *International Journal of Project Management*, 1995, Vol. 13, № 5, p. 313–319, DOI:10.1016/0263-7863(95)00023-J
- [28] **Vollmar J., Gepp M.**, *Framework for Standardization Programs in the Engineer-To-Order Industry*, 2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), IEEE, 2015, p. 13–20, DOI:10.1109/PICMET.2015.7273186
- [29] **Wikner J., Rudberg M.**, *On the Customer Order Decoupling Point*, 2001
- [30] **Rudberg M., Wikner J.**, *Mass Customization in Terms of the Customer Order Decoupling Point*, *Production Planning & Control*, 2004, Vol. 15, № 4, p. 445–458, DOI:10.1080/0953728042000238764
- [31] **Gamal A.**, *Introduction to Supply Chain Management*; [Electronic resource], slideshare, 2015, p. 29, URL: <https://www.slideshare.net/amdgamal/introduction-to-supply-chain-management-52594547> (accessed: 20.03.2019)
- [32] **Saghiri S.**, *Critical Role of Supply Chain Decoupling Point in Mass Customisation from Its Upstream and Downstream Information Systems Point of View*, *Mass Customization Information Systems in Business* / ed. by Blecker T., Friedrich G., IGI Global, London, UK, 2007, p. 185–196
- [33] **Jensen K.N., Nielsen K., Brunoe T.D.**, *Application of Mass Customization in the Construction Industry*, *Advances in Production Management Systems: Innovative*



- Production Management Towards Sustainable Growth. APMS 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology / ed. by Umeda S., Nakano M., Mizuyama H., Hibino N., Kiritsis D., von Cieminski G., Springer, Cham, 2015, p. 161–168, DOI:10.1007/978-3-319-22756-6\_20
- [34] **Ulrich K.T., Eppinger S.D.**, *Product Design and Development*, 6th ed., McGraw-Hill Education, 2015
- [35] **Hölttä-Otto K.**, *Modular Product Platform Design*, Doktorska disertacija, Helsinki University of Technology, Finland, 2005
- [36] **US Department of Defense**, *Joint Capabilities Integration and Development System - CJCSI 3170.01D*, 2004
- [37] **Riitahuhta A., Andreassen M.M.**, *Configuration by Modularisation*, NordDesign'98, KTH, Stockholm, Sweden, 1998, p. 167–176
- [38] **Ulrich K.T.**, *The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm*, Research Policy, 1995, Vol. 24, № 3, p. 419–440, DOI:10.1016/0048-7333(94)00775-3
- [39] **Ulrich K.T., Eppinger S.D.**, *Product Design and Development*, McGraw-Hill Education Singapore, 2008
- [40] **Muffatto M., Roveda M.**, *Product Architecture and Platforms: A Conceptual Framework*, International Journal of Technology Management, 2002, Vol. 24, № 1, p. 1–16, DOI:10.1504/IJTM.2002.003040
- [41] **Paralikas J., Fysikopoulos A., Pandremenos J., Chryssolouris G.**, *Product Modularity and Assembly Systems: An Automotive Case Study*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, Vol. 60, № 1, p. 165–168, DOI:10.1016/j.cirp.2011.03.009
- [42] **Jose A., Tollenaere M.**, *Modular and Platform Methods for Product Family Design: Literature Analysis*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2005, Vol. 16, № 3, p. 371–390, DOI:10.1007/s10845-005-7030-7
- [43] **Boothroyd G.**, *Product Design for Manufacture and Assembly*, Computer-Aided Design, 1994, Vol. 26, № 7, p. 505–520, DOI:10.1016/0010-4485(94)90082-5
- [44] **Pavlic D.**, *Sustav za konfiguriranje proizvoda modularne arhitekture*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003
- [45] **Xu Z., Liang M.**, *Concurrent Optimization of Product Module Selection and Assembly Line Configuration: A Multi-Objective Approach*, Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, Vol. 127, № 4, p. 875–884, DOI:10.1115/1.2034513
- [46] **Fujita K., Yoshida H.**, *Product Variety Optimization Simultaneously Designing Module Combination and Module Attributes*, Concurrent Engineering, 2004, Vol. 12, № 2, p. 105–118, DOI:10.1177/1063293X04044758
- [47] **Erens F.J.**, *The Synthesis of Variety: Developing Product Families*, Doktorska disertacija, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1996, DOI:10.6100/IR466456

- [48] **Miller T.D., Elgård P.**, *Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective*, Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Aalborg University, Fuglsoe, 1998, p. 1–19
- [49] **Ulrich K.T., Tung K.**, *Fundamentals of Product Modularity*, ASME Issues in Design Manufacturing/Integration, 1991, Vol. 39, № 1, p. 73–79
- [50] **Zha X.F., Sriram R.D.**, *Platform-Based Product Design and Development: A Knowledge-Intensive Support Approach*, Knowledge-Based Systems, 2006, Vol. 19, № 7, p. 524–543, DOI:10.1016/j.knosys.2006.04.004
- [51] **Simpson T.W., Maier J.R., Mistree F.**, *Product Platform Design: Method and Application*, Research in Engineering Design, 2001, Vol. 13, № 1, p. 2–22, DOI:10.1007/s001630100002
- [52] **Meyer M.H., Lehnerd A.P.**, *The Power of Product Platform: Building Value and Cost Leadership*, The Free Press, New York, 1997
- [53] **Robertson D., Ulrich K.T.**, *Planning for Product Platforms*, Sloan Management Review, 1998, Vol. 39, № 4, p. 19–31
- [54] **Meyer M.H., Utterback J.M.**, *The Product Family and the Dynamics of Core Capability*, Sloan management review, 1993, Vol. 34, № 3, p. 29
- [55] **Sundgren N.**, *Introducing Interface Management in New Product Family Development*, Journal of Product Innovation Management, 1999, Vol. 16, № 1, p. 40–51, DOI:10.1111/1540-5885.1610040
- [56] **Simpson T.W.**, *A Concept Exploration Method for Product Family Design*, Doktorska disertacija, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1998
- [57] **Simpson T.W., Siddique Z., Jiao J.R.**, *Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications*, Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2006
- [58] **Martin M. V., Ishii K.**, *Design for Variety: Developing Standardized and Modularized Product Platform Architectures*, Research in Engineering Design, 2002, Vol. 13, № 2002, p. 213–235, DOI:10.1007/s00163-002-0020-2
- [59] **Heese H.S., Swaminathan J.M.**, *Product Line Design with Component Commonality and Cost-Reduction Effort*, Manufacturing & Service Operations Management, 2006, Vol. 8, № 2, p. 206–219, DOI:10.1287/msom.1060.0103
- [60] **Zacharias N.A., Yassine A.A.**, *Optimal Platform Investment for Product Family Design*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, Vol. 19, № 2, p. 131–148, DOI:10.1007/s10845-007-0069-x
- [61] **Chen S.L., Jiao J.R., Tseng M.M.**, *Evolutionary Product Line Design Balancing Customer Needs and Product Commonality*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, Vol. 58, № 1, p. 123–126, DOI:10.1016/j.cirp.2009.03.014
- [62] **Gonzalez-Zugasti J.P., Otto K.N., Baker J.D.**, *A Method for Architecting Product Platforms*, Research in Engineering Design, 2000, Vol. 12, № 2, p. 61–72, DOI:10.1007/s001630050024

- [63] **Tiihonen J., Soininen T.**, *Product Configurators - Information System Support for Configurable Products*, Helsinki University of Technology, Finland, 1997
- [64] **Yang D., Dong M., Miao R.**, *Development of a Product Configuration System with an Ontology-Based Approach*, *Computer-Aided Design*, 2008, Vol. 40, № 8, p. 863–878, DOI:10.1016/j.cad.2008.05.004
- [65] **Hvam L., Mortensen N.H., Riis J.**, *Product Customization*, Springer, Berlin, 2008, DOI:10.1007/978-3-540-71449-1
- [66] **McDermott J.**, *RI: A Rule-Based Configurer of Computer Systems*, *Artificial Intelligence*, 1982, Vol. 19, № 1, p. 39–88, DOI:10.1016/0004-3702(82)90021-2
- [67] **Haug A., Hvam L., Mortensen N.H.**, *The Impact of Product Configurators on Lead Times in Engineering-Oriented Companies*, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2011, Vol. 25, № 2, p. 197–206, DOI:10.1017/S0890060410000636
- [68] **Trentin A., Perin E., Forza C.**, *Product Configurator Impact on Product Quality*, *International Journal of Production Economics*, 2012, Vol. 135, № 2, p. 850–859, DOI:10.1016/j.ijpe.2011.10.023
- [69] **Zhang L.L.**, *Product Configuration: A Review of The State-of-the-Art and Future Research*, *International Journal of Production Research*, 2014, Vol. 52, № 21, p. 6381–6398, DOI:10.1080/00207543.2014.942012
- [70] **Trentin A., Perin E., Forza C.**, *Overcoming the Customization-Responsiveness Squeeze by Using Product Configurators: Beyond Anecdotal Evidence*, *Computers in Industry*, 2011, Vol. 62, № 3, p. 260–268, DOI:10.1016/j.compind.2010.09.002
- [71] **Blažek P., Kolb M., Streichsbier C., Honetz S.**, *The Evolutionary Process of Product Configurators*, *Managing Complexity* / ed. by Bellemare J., Carrier S., Nielsen K., Piller F.T., Cham, Switzerland, 2017, p. 161–172, DOI:10.1007/978-3-319-29058-4\_13
- [72] **Qin Y., Wei G.**, *Product Configuration Based on Modular Product Family Modelling*, *Journal of Computational Information Systems*, 2010, Vol. 6, № 7, p. 2321–2331
- [73] **Shafiee S., Kristjansdottir K., Hvam L.**, *Alignment of Configuration and Documentation for Highly Engineered Complex Product Configuration Systems: A Demonstration from a Case Study*, 2015 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), IEEE, Singapore, 2015, Vol. 3, p. 249–250, DOI:10.1109/WI-IAT.2015.40
- [74] **Yu B.**, *A Virtual Configuration Workbench for Product Development*, Doktorska disertacija, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 1996
- [75] **Tiihonen J., Soininen T., Männistö T., Sulonen R.**, *Configurable Products - Lessons Learned from the Finnish Industry*, 2nd International Conference on Engineering Design and Automation (ED&A '98), 1998, p. 6 pp.
- [76] **Yang D., Li X., Jiao J.R., Wang B.**, *Decision Support to Product Configuration Considering Component Replenishment Uncertainty: A Stochastic Programming Approach*, *Decision Support Systems*, 2018, Vol. 105, p. 108–118, DOI:10.1016/j.dss.2017.11.004

- [77] **Tiihonen J., Lehtonen T., Soininen T., Pulkkinen A., Sulonen R., Riitahuhta A.**, *Modeling Configurable Product Families*, 4th WDK Workshop on Product Structuring, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1998, p. 1–22
- [78] **Olofsson T., Jensen P., Rönneblad A.**, *Configuration and Design Automation of Industrialised Building Systems*, Proceedings of the CIB W78 2010: 27th International Conference, Cairo, Egypt, 2010
- [79] **Verhagen W.J.C., Bermell-Garcia P., van Dijk R.E.C., Curran R.**, *A Critical Review of Knowledge-Based Engineering: An Identification of Research Challenges*, Advanced Engineering Informatics, 2012, Vol. 26, № 1, p. 5–15, DOI:10.1016/j.aei.2011.06.004
- [80] **Rocca G. La**, *Knowledge Based Engineering: Between AI and CAD. Review of a Language Based Technology to Support Engineering Design*, Advanced Engineering Informatics, 2012, Vol. 26, № 2, p. 159–179, DOI:10.1016/j.aei.2012.02.002
- [81] **Robertson D., Ulrich K.T.**, *Platform Product Development*, Sloan Management Review, 1998, № 1, p. 1–33
- [82] **Tichem M., Andreasen M.M., Riitahuhta A.**, *Design of Product Families*, Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design – ICED 99, Munich, 1999, p. 1039–1042
- [83] **Pavlic D., Pavkovic N., Štorga M.**, *Variant Design Based on Product Platform*, International Design Conference - DESIGN 2002, Dubrovnik, Croatia, 2002, p. 397–402
- [84] **Pirmoradi Z., Wang G.G., Simpson T.W.**, *A Review of Recent Literature in Product Family Design and Platform-Based Product Development*, Advances in Product Family and Product Platform Design: Methods & Applications, Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2014, p. 1–46, DOI:10.1007/978-1-4614-7937-6
- [85] **Muffatto M.**, *Introducing a Platform Strategy in Product Development*, International Journal of Production Economics, 1999, Vol. 60, p. 145–153, DOI:10.1016/S0925-5273(98)00173-X
- [86] **Otto K.N., Wood K.L.**, *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*, Prentice Hall, New Jersey, 2001
- [87] **Simpson T.W.**, *Product Platform Design and Customization: Status and Promise*, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2004, Vol. 18, № 01, p. 3–20, DOI:10.1017/S0890060404040028
- [88] **Baldwin C.Y., Clark K.B.**, *Design Rules, Vol. 1: The Power of Modularity*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2000
- [89] **Zamirowski E.J., Otto K.N.**, *Identifying Product Family Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics*, 11th International Conference on Design Theory and Methodology, ASME, Las Vegas, 1999, p. 1–12
- [90] **Jiao J.R., Simpson T.W., Siddique Z.**, *Product Family Design and Platform-Based Product Development: A State-of-the-Art Review*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2007, Vol. 18, № 1, p. 5–29, DOI:10.1007/s10845-007-0003-2

- [91] **Franke N., Piller F.T.**, *Configuration Toolkits for Mass Customization: Setting a Research Agenda*, 2002
- [92] **Pine B.J., Victor B., Boynton A.C.**, *Making Mass Customization Work*, Harvard Business Review, 1993, Vol. September, № 93509, p. 108–119
- [93] **Aleksic D.S., Jankovic D.S., Rajkovic P.**, *Product Configurators in SME One-of-a-Kind Production with the Dominant Variation of the Topology in a Hybrid Manufacturing Cloud*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, Vol. 92, № 5–8, p. 2145–2167, DOI:10.1007/s00170-017-0286-1
- [94] **Tiihonen J., Heiskala M., Anderson A., Soininen T.**, *WeCoTin - A Practical Logic-Based Sales Configurator*, AI Communications - Intelligent Engineering Techniques for Knowledge Bases, 2013, Vol. 26, № 1, p. 99–131, DOI:10.3233/AIC-2012-0547
- [95] **Haug A., Hvam L., Mortensen N.H.**, *Definition and Evaluation of Product Configurator Development Strategies*, Computers in Industry, 2012, Vol. 63, № 5, p. 471–481, DOI:10.1016/j.compind.2012.02.001
- [96] **Forza C., Salvador F.**, *Application Support to Product Variety Management*, International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46, № 3, p. 817–836, DOI:10.1080/00207540600818278
- [97] **Zheng P., Xu X., Yu S., Liu C.**, *Personalized Product Configuration Framework in an Adaptable Open Architecture Product Platform*, Journal of Manufacturing Systems, 2017, Vol. 43, p. 422–435, DOI:10.1016/j.jmsy.2017.03.010
- [98] **Kristianto Y., Helo P., Jiao J.R.**, *A System Level Product Configurator for Engineer-To-Order Supply Chains*, Computers in Industry, 2015, Vol. 72, p. 82–91, DOI:10.1016/j.compind.2015.04.004
- [99] **Blecker T., Abdelkafi N., Kreutler G., Friedrich G.**, *Product Configuration Systems: State-of-the-Art, Conceptualization and Extensions*, Génie logiciel & Intelligence artificielle. Eight Maghrebien Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence (MCSEAI 2004), University of Klagenfurt, Klagenfurt, Austria, 2004, p. 25–36
- [100] **Zivanovic S., Glavonjic M., Milutinovic D.**, *Configuring A Mini-Laboratory and Desktop 3-Axis Parallel Kinematic Milling Machine*, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, 2015, Vol. 61, № 1, p. 33–42, DOI:10.5545/sv-jme.2013.1619
- [101] **Wang C.-S.**, *Web-Based Modular Interface Geometries with Constraints in Assembly Models*, Computers & Industrial Engineering, 2009, Vol. 56, № 4, p. 1675–1686, DOI:10.1016/j.cie.2008.10.018
- [102] **Mäkipää M., Paunu P., Ingalsuo T.**, *Design Configurator: A Tool for Order Engineering*, 5th International Conference on Mass Customization and Personalization in Central Europe (MCP-CE), Novi Sad, Serbia, 2012, p. 154–162
- [103] **Salvador F., Forza C.**, *Configuring Products to Address the Customization-Responsiveness Squeeze: A Survey of Management Issues and Opportunities*, International Journal of Production Economics, 2004, Vol. 91, № 3, p. 273–291, DOI:10.1016/j.ijpe.2003.09.003

- [104] **Forza C., Salvador F.**, *Product Information Management for Mass Customization*, Palgrave Macmillan UK, London, 2006, DOI:10.1057/9780230800922
- [105] **Paunu P., Mäkipää M.**, *Design Configurators in a Project Business*, Bridging Mass Customization & Open Innovation. Proceedings of World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation / ed. by Chesbrough H., Piller F.T., Lulu Inc, Raleigh, 2011, p. 44
- [106] **Shafiee S., Hvam L., Haug A., Dam M., Kristjansdottir K.**, *The Documentation of Product Configuration Systems: A Framework and An IT Solution*, Advanced Engineering Informatics, 2017, Vol. 32, № 2, p. 163–175, DOI:10.1016/j.aei.2017.02.004
- [107] **Haug A., Shafiee S., Hvam L.**, *The Costs and Benefits of Product Configuration Projects in Engineer-To-Order Companies*, Computers in Industry, 2019, Vol. 105, p. 133–142, DOI:10.1016/j.compind.2018.11.005
- [108] **Riitahuhta A.**, *Views and Experiences of Configuration Management*, Design for Configuration - a Debate based on the 5th WDK Workshop on Product Structuring, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, p. 1–21, DOI:10.1007/978-3-642-56905-0\_1
- [109] **Vujaklija M.**, *Leksikon stranih reči i izraza*, Prosveta, Beograd, Srbija, 2004
- [110] **Lindemann U., Maurer M., Braun T.**, *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*, Springer, Berlin, 2009
- [111] **Weaver W.**, *Science and Complexity*, American Scientist, 1948, Vol. 36, № 4, p. 536–544
- [112] **Ehrlenspiel K.**, *Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*, 3rd ed., Hanser, München, 2007
- [113] **Miltenović V.**, *Razvoj proizvoda: strategija, metode, primena*, Mašinski fakultet, Niš, 2003
- [114] **Ognjanović M.**, *Razvoj i dizajn mašina*, Mašinski fakultet, Beograd, 2007
- [115] **Bashir H.A., Thomson V.**, *Estimating Design Complexity*, Journal of Engineering Design, 1999, Vol. 10, № 3, p. 247–257, DOI:10.1080/095448299261317
- [116] **Weber C.**, *What is “Complexity”?*, International Conference on Engineering Design ICED 05 Melbourne, 2005, p. 1–12
- [117] **Köster O.**, *Komplexitätsmanagement in der Industrie*, DUV, Wiesbaden, 1998
- [118] **Schuh G.**, *Produktkomplexität managen, Strategien-Methoden-Tools*, Hanser, Munich, 2005
- [119] **Schuh G., Schwenk U.**, *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*, Hanser, München, 2001
- [120] **Todić V., Stanić J.**, *Osnove optimizacije tehnoloških procesa izrade i konstrukcije proizvoda*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija, 2006
- [121] **Nikolić I., Borović S.**, *Višekriterijumska optimizacija: metode, primena u logistici, softver*, Centar vojnih Skola Vojske Jugoslavije, Beograd, Srbija, 1996

- [122] **Milanović D.D., Misita M.**, *Informacioni sistemi podrške upravljanju i odlučivanju*, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2008
- [123] **Čupić M.**, *Uvod u teoriju odlučivanja*, Naučna knjiga, Beograd, Srbija, 1987
- [124] **Radojičić M., Žižović M.**, *Primena metoda višekriterijumske analize u poslovnom odlučivanju*, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija, 1998
- [125] **Pratiwi D., Putri Lestari J., Agushinta R D.**, *Decision Support System to Majoring High School Student Using Simple Additive Weighting Method*, International Journal of Computer Trends and Technology, 2014, Vol. 10, № 3, p. 153–159, DOI:10.14445/22312803/IJCTT-V10P126
- [126] **Saaty T.L., Vargas L.G.**, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Journal of the Operational Research Society, Springer Science+Business Media, New York, 2001, Vol. 34, № 3, DOI:10.1007/978-1-4615-1665-1
- [127] **Brunelli M.**, *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2015, DOI:10.1007/978-3-319-12502-2
- [128] **Hummel J.M., Bridges J.F.P., IJzerman M.J.**, *Group Decision Making with the Analytic Hierarchy Process in Benefit-Risk Assessment: A Tutorial*, The Patient - Patient-Centered Outcomes Research, 2014, Vol. 7, № 2, p. 129–140, DOI:10.1007/s40271-014-0050-7
- [129] **Ishizaka A., Nemery P.**, *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2013
- [130] **Afshari A., Mojahed M., Yusuff R.M.**, *Simple additive weighting approach to personnel selection problem*, International Journal of Innovation, Management and Technology, 2010, Vol. 1, № 5, p. 511–515, DOI:10.7763/IJIMT.2010.V1.89
- [131] **Tzeng G.-H., Huang J.-J.**, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2011
- [132] **Cahyapratama A., Sarno R.**, *Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Simple Additive Weighting (SAW) Methods in Singer Selection Process*, 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), IEEE, 2018, p. 234–239, DOI:10.1109/ICOIACT.2018.8350707
- [133] **Adriyendi**, *Multi-Attribute Decision Making Using Simple Additive Weighting and Weighted Product in Food Choice*, International Journal of Information Engineering and Electronic Business, 2015, Vol. 7, № 6, p. 8–14, DOI:10.5815/ijieeb.2015.06.02
- [134] **Mileusnić N.**, *Planiranje i priprema proizvodnje*, Književne novine, Beograd, Srbija, 1980
- [135] **Ristić D.**, *Organizacija proizvodno poslovnih sistema*, TF Mihajlo Pupin, Zrenjanin, Srbija, 1996
- [136] **Grković V., Kolarević M., Petrović A., Bjelić M.**, *Product Platform for Automatic Configuration of Modular Strongrooms*, Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, 2020, Vol. 27, № 1, p. 333–340, DOI:10.17559/TV-20180625125202
- [137] **Štefanec E.**, *Trezorski prostori*, Maribor, 2003

- [138] **Grković V., Kolarević M., Vukićević M., Bjelić M.**, *Automatic Configuration of Modular Vault Walls*, Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering, 2012, Vol. 10, № 3, p. 291–300, DOI:10.2298/FUACEI203291G
- [139] *Primat a.d. Maribor*; [Electronic resource], URL: <http://www.primat.si> (accessed: 15.05.2016)
- [140] **Grković V., Kolarević M., Obradović N.**, *Configuration of Modular Vault Rooms, Application of New Technologies and Ideas in Engineering Education*, Požega, Serbia, 2017, p. 165–174
- [141] **Standard EN 1143-1**, *Secure Storage Units - Requirements, Classification and Methods of Test for Resistance to Burglary - Part 1: Safes, ATM Safes, Strongroom Doors and Strongrooms*, European committee for standardization, 2012, p. 42
- [142] **Kolarević M., Grković V., Vukićević M., Bjelić M.**, *Configuration of Modular Noise Barriers*, International Conference Noise and Vibration, 2012, p. 95–100
- [143] **Lehtonen T.**, *Designing Modular Product Architecture in the New Product*, Doktorska disertacija, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2007
- [144] **Kolarević M., Cvetković L., Bošković R.**, *Parametric Modelling of Modular Vault Rooms*, VI International Triennial Conference Heavy Machinery – HM'08, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljevo, Serbia, 2008, p. F.13-F.17
- [145] **Suliman S.M.A.**, *Pattern Generating Procedure for the Cutting Stock Problem*, International Journal of Production Economics, 2001, Vol. 74, p. 293–301, DOI:10.1016/S0925-5273(01)00134-7
- [146] **Montgomery D.C.**, *Design and Analysis of Experiments*, 11th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2017
- [147] **Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M.**, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016
- [148] **Stanić J.**, *Metod inženjerskih merenja*, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1990
- [149] **Box G.E.P., Draper N.R.**, *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2007, DOI:10.1002/0470072768
- [150] **Anderson M.J., Whitcomb P.J.**, *RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*, 2nd ed., Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, 2017
- [151] *Handbook for Experimenters*, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, 2017
- [152] **Hirz M., Dietrich W., Gfrerrer A., Lang J.**, *Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development*, Springer, Berlin, 2013, DOI:10.1007/978-3-642-11940-8
- [153] **Gembariski P.C., Lachmayer R.**, *A Business Typological Framework for the Management of Product Complexity*, Managing Complexity / ed. by Bellemare J., Carrier S., Nielsen K., Piller F.T., Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017,



- p. 235–247, DOI:10.1007/978-3-319-29058-4\_18
- [154] **Shah J.J.**, *Designing with Parametric CAD: Classification and Comparison of Construction Techniques*, Geometric Modelling, Springer US, Boston, MA, 2001, p. 53–68, DOI:10.1007/978-0-387-35490-3\_4
- [155] **Gembariski P.C., Li H., Lachmayer R.**, *KBE-Modeling Techniques in Standard CAD-Systems: Case Study—Autodesk Inventor Professional, Managing Complexity* / ed. by Bellemare J., Carrier S., Nielsen K., Piller F.T., Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017, p. 215–233, DOI:10.1007/978-3-319-29058-4\_17
- [156] **Vajna S., Weber C., Bley H., Zeman K.**, *CAX für Ingenieure*, Springer, Berlin, 2009, DOI:10.1007/978-3-540-36039-1
- [157] **Standard EN ISO 9000**, *Quality Management Systems-Fundamentals and Vocabulary*, European committee for standardization, 2015
- [158] **Chung C.A.**, *Simulation Modelling Handbook: A Practical Approach*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004

---

**ПРИЛОЗИ**

## Прилог 1 - MATLAB програмски код за optimizaciju plana sечења и прорачун свих критеријума за зидове

```

function
[broj_tabli_zid,funkcije_ZID,vreme_ZID,cena_ZID]=Proracun_troskovi_ZID(A,B,
C,D,E,F,podaci_zid,d,Lz,LE)
nB1=1;
nB2=2;
nB3=1;
dim_table=1450;
[pot_dim,idxx]=sort((podaci_zid(:,1:5)+260),2,'descend');
brojac=1;
br_panela = (sum(podaci_zid(:,1:5)-260>0,2));
matrica=zeros(10,12,size(pot_dim,1));
for komb =1:size(pot_dim,1)
    a(1,brojac,komb)=floor(dim_table/pot_dim(komb,1));
    for ttt=2:br_panela(komb,1)
        a(ttt,brojac,komb)=floor((dim_table-sum(a(1:ttt-1,brojac,komb).*
pot_dim(komb,1:ttt-1)))/pot_dim(komb,ttt));
    end
    a(br_panela(komb,1)+1,brojac,komb)=dim_table-sum(a(1:ttt,brojac,komb).*
pot_dim(komb,1:ttt));
    t=br_panela(komb,1)-1;
    while t>0
        if a(t,brojac,komb)>0
            brojac=brojac+1;
            a(1:t-1,brojac,komb)= a(1:t-1,brojac-1,komb);
            a(t,brojac,komb)=a(t,brojac-1,komb)-1;
            for tt=t+1:br_panela(komb,1)
                a(tt,brojac,komb)=floor((dim_table-sum(a(1:tt-
1,brojac,komb).*pot_dim(komb,1:tt-1)))/pot_dim(komb,tt));
                a(br_panela(komb,1)+1,brojac,komb)=dim_table-
sum(a(1:br_panela(komb,1),brojac,komb).*pot_dim(komb,1:br_panel
a(komb,1)));
            end
            t=br_panela(komb,1)-1;
        else
            t=t-1;
        end
    end
    brojac=1;
    A_2=-a(1:br_panela(komb,1),:,komb);
    r2= find(~any(A_2, 2)); c2 = find(~any(A_2, 1));
    if r2>0
        A_2(r2,:)=[];
    end
    if c2>0
        A_2(:,c2)=[];
    end
    xx=[podaci_zid(komb,1) podaci_zid(komb,2) podaci_zid(komb,3)
podaci_zid(komb,4) podaci_zid(komb,5) sum(podaci_zid(komb,6:9))
podaci_zid(komb,10) nB1 nB2 nB3];
    b_2=-xx(:,idxx(komb,:)+5)';
    b_2(b_2(:, 1)==0)= [];
    fc_2=ones(size(a(size(A_2,1)+1,1:size(A_2,2),komb)));
    br_prom=size(fc_2,2);
    lb_2=zeros(br_prom,1);ub_2=Inf+zeros(br_prom,1);
    options = optimoptions('intlinprog','Display','off');

```

```

[v,fopt,~,~] = intlinprog(fc_2,linspace(1,br_prom,br_prom),A_2,b_2,[], [],
lb_2,ub_2,options);
cc=pot_dim(komb,:);
cc(cc(1,:)-260==0)=[];
priv_a=a(:, :, komb);priv_a=priv_a(1:size(A_2,1)+1,1:size(A_2,2));
r1 = find(~any(priv_a, 2)); c1 = find(~any(priv_a, 1));
if r1>0
    priv_a(r1,:)=[];
end
if c1>0
    priv_a(:,c1)=[];
end
matrica(1:size(priv_a,1)+1,1:size(priv_a,2)+2,komb)=[[cc 0]' [-b_2;0]
priv_a;0 0 v'];
broj_tabli_zid(komb,1)=sum(sum(v));
end
Nt=broj_tabli_zid;
bE(1:size(podaci_zid,1),1)=E;
NB1(1:size(podaci_zid,1),1)=1;
NB2(1:size(podaci_zid,1),1)=2;
NB3(1:size(podaci_zid,1),1)=1;
NE(1:size(podaci_zid,1),1)=1;
for h=1:size(podaci_zid,1)
    NA(h,1)=sum(podaci_zid(h,6:9));
end
b=[podaci_zid(:,1:5) bE];
N=[NA podaci_zid(:,10) NB1 NB2 NB3 NE];
l=[Lz Lz Lz Lz Lz LE];
tpz=[0.46 0.15 0.2 0.35];
tk=[0.07 1/150 0.253 0.0281 0.53 0.55 0.26 0.8 0.12 0.32 0.12 0.13 1.98
0.55];
Pt=1.45*2.95;
ro=7850;
delta=3;
Qlim=ro*delta/1000;
Qarm=10.2;
wc1=0.65;
wc2=0.68;
wrs=10;
kd=1.3;
etaost=50;
kHM=[1 1 1 1 1 1];
kSO=[1 1 1.2 1.2 1.2 1];
kSZ=[1 1 1 1 1 1];
kCO2=[1 1 1 1 1 1];
etaCO2=[15 10 15 33];
w=[0.2 0.2 0.6];
for i=1:size(b,1)
    for j=1:size(b,2)
        Cmax(i,j)=(2.96288+4.76e-4*b(i,j)-8.53e-4*1(j))^2-0.4;
        if Cmax(i,j)<0
            Cmax(i,j)=0;
        end
        Rmax(i,j)=-12.1894+6.198e-4*b(i,j)+1.0115e-2*1(j)-1.8968e-6*1(j)^2;
        if Rmax(i,j)<0
            Rmax(i,j)=0;
        end
        Pmod(i,j)=b(i,j)*1(j)*1e-6;
        Ozaklj(i,j)=(2*b(i,j)+330.9)*1e-3;
        lCO2zaklj(i,j)=2*(0.08+etaCO2(1)/100*b(i,j)*1e-3);
    end
end

```

```

lCO2arm(i,j)=etaCO2(2)/100*(2e-5*b(i,j)*l(j));
lCO2plo(i,j)=etaCO2(3)/100*(2*(b(i,j)-14+l(j))*1e-3);
QLIM(i,j)=(b(i,j)+260)*l(j)*delta*ro*1e-9;
QARM(i,j)=b(i,j)*l(j)*Qarm*1e-6;

end
Pzid(i,1)=N(i,:)*Pmod(i,:)';
OUKzaklj(i,1)=2*N(i,:)*Ozaklj(i,:)';
THM(i,1)=tpz(1)+tk(1)*kHM.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TLAS(i,1)=tpz(2)+OUKzaklj(i)*tk(2);
TSEC(i,1)=THM(i)+TLAS(i);
TNCAPomot(i,1)=tpz(3)+tk(3)*kSO.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TNCAPzaklj(i,1)=tpz(4)+tk(4)*kSZ.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TSAV(i,1)=TNCAPomot(i)+TNCAPzaklj(i);
LCO2zaklj(i,1)=kCO2.*lCO2zaklj(i,:)*N(i,:)';
LCO2arm(i,1)=lCO2arm(i,:)*N(i,:)';
LCO2plo(i,1)=lCO2plo(i,:)*N(i,:)';
LUKCO2(i,1)=LCO2zaklj(i)+LCO2arm(i)+LCO2plo(i);
TCM(i,1)=tk(5)*Pzid(i);
TCO2(i,1)=tk(6)*LUKCO2(i);
TBRS(i,1)=tk(7)*LUKCO2(i);
TSKL(i,1)=TCM(i)+TCO2(i)+TBRS(i);
TBET(i,1)=tk(8)*Pzid(i);
TCIS(i,1)=tk(9)*Pzid(i);
TBIC(i,1)=TBET(i)+TCIS(i);
TMFR(i,1)=tk(10)*Pzid(i);
TPAL(i,1)=tk(11)*Pzid(i);
TPAK(i,1)=tk(12)*Pzid(i);
TMAN(i,1)=tk(13)*Pzid(i);
LMON(i,1)=2*etaCO2(4)/100*1*N(i,:)*1e-3;
TZAV(i,1)=tk(14)*LMON(i);
TMON(i,1)=(TMAN(i)+TZAV(i))*kd;
TUK(i,1)=TSEC(i)+TSAV(i)+TSKL(i)+TBIC(i)+TMFR(i)+TPAL(i)+TPAK(i)+TMON(i);
QOST(i,1)=(Pt*Nt(i)-(1.*(b(i,:)+260)*1e-6*N(i,:)))+(E+260)*LE*1e-6)*Qlim;
CLIM(i,1)=(QLIM(i,:)*N(i,:))+QOST(i)*etaost/100)*wc1;
CARM(i,1)=wc2*QARM(i,:)*N(i,:);
Cmat(i,1)=CLIM(i)+CARM(i);
Crad(i,1)=TUK(i)*wrs;
Ck(i,1)=Cmat(i)+Crad(i);
CmaxUK(i,1)=Cmax(i,:)*N(i,:);
RmaxUK(i,1)=Rmax(i,:)*N(i,:);

end
funkcije_ZID=[TUK Ck CmaxUK RmaxUK];
vreme_ZID=[TSEC THM TLAS TSAV TSKL TBET TCIS TMFR TPAL TPAK TMON];
cena_ZID=[CLIM CARM Cmat Crad Ck];

end

```

## Прилог 2 - MATLAB програмски код за optimizaciju plana sечења и прорачун свих критеријума за под и плафон

```

function [broj_tabli_pod, funkcije_POD, vreme_POD, cena_POD]=
Kriterijumi_POD(A,B,C,D,E,F, podaci_pod, d, Lp)
nC=2;nCz=2;
dim_table=1450
pot_dim=sort((podaci_pod(:,1:3)+[235 235 260]),2, 'descend')
brojac=1;
br_panela = (sum(podaci_pod(:,1:3))-260>0,2
matrica=zeros(10,10, size(pot_dim,1));
for komb =1:size(pot_dim,1)
    a(1,brojac,komb)=floor(dim_table/pot_dim(komb,1));
    for ttt=2:br_panela(komb,1)
        a(ttt,brojac,komb)=floor((dim_table-sum(a(1:ttt-1,brojac,komb).*
pot_dim(komb,1:ttt-1)))/pot_dim(komb,ttt));
    end
    a(br_panela(komb,1)+1,brojac,komb)=dim_table-sum(a(1:ttt,brojac,komb).*
pot_dim(komb,1:ttt));
    t=br_panela(komb,1)-1;
    while t>0
        if a(t,brojac,komb)>0
            brojac=brojac+1;
            a(1:t-1,brojac,komb)= a(1:t-1,brojac-1,komb);
            a(t,brojac,komb)=a(t,brojac-1,komb)-1;
            for tt=t+1:br_panela(komb,1)
                a(tt,brojac,komb)=floor((dim_table-sum(a(1:tt-
1,brojac,komb).*pot_dim(komb,1:tt-1)))/pot_dim(komb,tt));
                a(br_panela(komb,1)+1,brojac,komb)=dim_table-
sum(a(1:br_panela(komb,1),brojac,komb).*pot_dim(komb,1:br_pa
nela(komb,1)));
            end
            t=br_panela(komb,1)-1;
        else
            t=t-1;
        end
    end
    brojac=1;
    A_2=-a(1:br_panela(komb,1),:,komb);
    r2= find(~any(A_2, 2)); c2 = find(~any(A_2, 1));
    if r2>0
        A_2(r2,:)=[];
    end
    if c2>0
        A_2(:,c2)=[];
    end
    [~,idx1]=ismember(pot_dim(komb,:)-260,podaci_pod(komb,:));
    [~,idx2]=ismember(pot_dim(komb,:)-260,podaci_pod(komb,:), 'legacy');
    idx=union(idx1,idx2, 'stable');
    idx(idx(1, :)>3)= [];
    idx(idx(1, :)<1)= [];
    if size(idx,2)<max(idx(1,:))
        idx=linspace(1,max(idx(1,:)),max(idx(1,:)));
    end
    cc=pot_dim(komb,:);
    cc(cc(1,:)-260==0)=[];
    priv_a=a(:,:,komb);
    r1 = find(~any(priv_a, 2)); c1 = find(~any(priv_a, 1));
    if r1>0

```

```

    priv_a(r1,:)=[];
end
if c1>0
    priv_a(:,c1)=[];
end
dd=find(cc == max(cc(:)));
if size(dd,2)==1
    b_2=-2*ones(3,1);
    b_2(dd,1)=-podaci_pod(komb,4);
elseif size(dd,2)==3
    b_2=-2*ones(3,1);
    b_2(1,1)=-podaci_pod(komb,4);
else
    b_2=-podaci_pod(komb,4)*ones(3,1);
    b_2(dd,1)=-2;
end
fc_2=ones(size(a(size(A_2,1)+1,1:size(A_2,2),komb)));
br_prom=size(fc_2,2);
lb_2=zeros(br_prom,1);ub_2=Inf+zeros(br_prom,1);
options = optimoptions('intlinprog','Display','off');
[v,fopt,~,~] = intlinprog(fc_2,linspace(1,br_prom,br_prom),A_2,b_2,[],[],lb_2,ub_2,options);
matrica(1:size(priv_a,1)+1,1:size(priv_a,2)+2,komb)=[cc 0' [-b_2;0]
priv_a;0 0 v'];
broj_tabli_pod(komb,1)=sum(sum(v));
end
Nt=broj_tabli_pod;
NC(1:size(podaci_pod,1),1)=2;
NCz(1:size(podaci_pod,1),1)=2;
ND=podaci_pod(:,4:4);
l=Lp;
b=[podaci_pod(:,1:3)];
N=[NC NCz ND];
tpz=[0.46 0.15 0.2 0.35
tk=[0.07 1/150 0.253 0.0281 0.53 0.55 0.26 0.8 0.12 0.32 0.12 0.13 1.98
0.55];
Pt=1.45*2.95;
ro=7850;
delta=3;
Qlim=ro*delta/1000;
Qarm=10.2;
wc1=0.65;
wc2=0.68;
wrs=10;
kd=1.3;
etaost=50;
kHM=[1.5 1.5 1];
kSO=[0.8 0.8 1];
kSZ=[1.5 1.5 1.5];
kCO2=[0.9 0.9 0.9];
etaCO2=[15 10 15 15 33
w=[0.2 0.2 0.6];
Odod=[435 435 447];
Qdod=[235 235 260];
for i=1:size(b,1)
    for j=1:size(b,2)
        Cmax(i,j)=(6.00847-0.0121627*b(i,j)+0.0000084966*b(i,j)^2)^2-2.5;
        if Cmax(i,j)<0
            Cmax(i,j)=0;
        end
    end
end

```

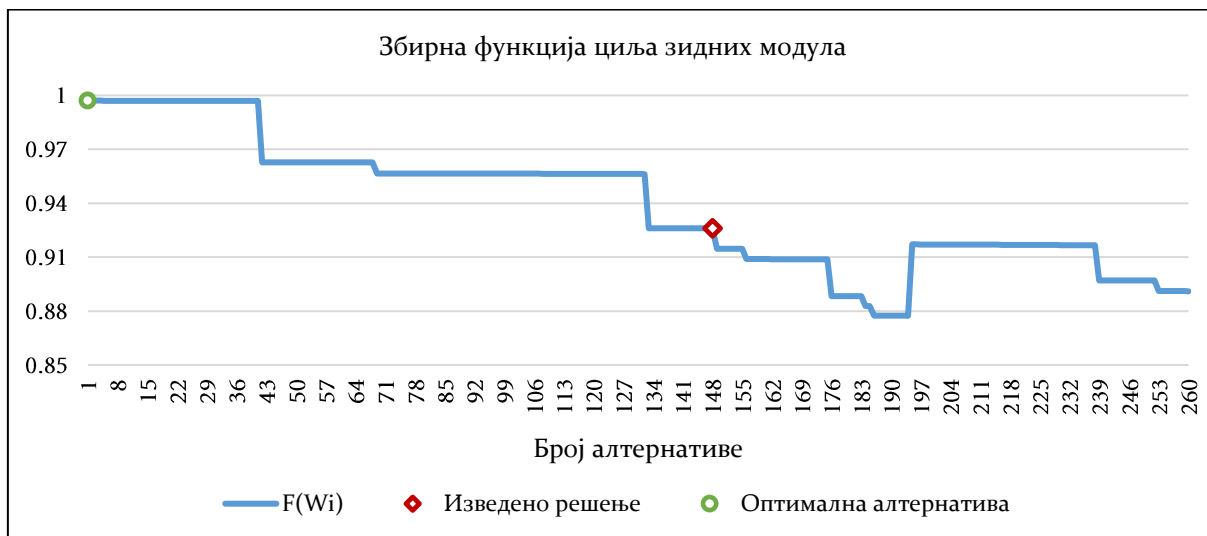
```

Rmax(i,j)=0.59465+1.475e-3*b(i,j)+5.47e-5*1;
if Rmax(i,j)<0
    Rmax(i,j)=0;
end
Pmod(i,j)=b(i,j)*1*1e-6;
Ozaklj(i,j)=(2*b(i,j)+Odod(j))*1e-3;
lCO2zaklj(i,j)=2*(0.08+etaCO2(1)/100*b(i,j)*1e-3);
lCO2arm(i,j)=etaCO2(2)/100*(2e-5*b(i,j)*1);
lCO2plo(i,j)=etaCO2(3)/100*(2*(b(i,j)-14+1)*1e-3);
lCO2Zprof(i,j)=etaCO2(4)/100*2*(1-220)*1e-3;
QLIM(i,j)=(b(i,j)+Qdod(j))*1*delta*ro*1e-9;
QARM(i,j)=b(i,j)*1*Qarm*1e-6;
end
Ppod(i,1)=N(i,:)*Pmod(i,:)';
OUKzaklj(i,1)=2*N(i,:)*Ozaklj(i,:)';
THM(i,1)=tpz(1)+tk(1)*kHM.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TLAS(i,1)=tpz(2)+OUKzaklj(i)*tk(2);
TSEC(i,1)=THM(i)+TLAS(i);
TNCAPomot(i,1)=tpz(3)+tk(3)*kSO.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TNCAPzaklj(i,1)=tpz(4)+tk(4)*kSZ.*N(i,:)*Pmod(i,:)';
TSAV(i,1)=TNCAPomot(i)+TNCAPzaklj(i);
lCO2zaklj(i,1)=kCO2.*lCO2zaklj(i,:)*N(i,:)';
lCO2arm(i,1)=lCO2arm(i,:)*N(i,:)';
lCO2plo(i,1)=lCO2plo(i,:)*N(i,:)';
lCO2Zprof(i,1)=lCO2Zprof(i,1:2)*N(i,1:2)';
LUKCO2(i,1)=lCO2zaklj(i)+lCO2arm(i)+lCO2plo(i)+lCO2Zprof(i);
TCM(i,1)=tk(5)*Ppod(i);
TCO2(i,1)=tk(6)*LUKCO2(i);
TBRS(i,1)=tk(7)*LUKCO2(i);
TSKL(i,1)=TCM(i)+TCO2(i)+TBRS(i);
TBET(i,1)=tk(8)*Ppod(i);
TCIS(i,1)=tk(9)*Ppod(i);
TBIC(i,1)=TBET(i)+TCIS(i);
TMFR(i,1)=tk(10)*Ppod(i);
TPAL(i,1)=tk(11)*Ppod(i);
TPAK(i,1)=tk(12)*Ppod(i);
TMAN(i,1)=tk(13)*Ppod(i);
LMON(i,1)=2*etaCO2(5)/100*[1 1 1]*N(i,:)'*1e-3;
TZAV(i,1)=tk(14)*LMON(i);
TMON(i,1)=(TMAN(i)+TZAV(i))*kd;
TUK(i,1)=TSEC(i)+TSAV(i)+TSKL(i)+TBIC(i)+TMFR(i)+TPAL(i)+TPAK(i)+TMON(i);
QOST(i,1)=(Pt*Nt(i)-(1.*(b(i,:)+Qdod)*1e-6*N(i,:)))*Qlim;
CLIM(i,1)=(QLIM(i,:)*N(i,:))'+QOST(i)*etaost/100)*wcl;
CARM(i,1)=wc2*QARM(i,:)*N(i,:))';
Cmat(i,1)=CLIM(i)+CARM(i);
Crad(i,1)=TUK(i)*wrs;
Ck(i,1)=Cmat(i)+Crad(i);
CmaxUK(i,1)=Cmax(i,:)*N(i,:))';
RmaxUK(i,1)=Rmax(i,:)*N(i,:))';
end
funkcije_POD=[TUK Ck CmaxUK RmaxUK];
vreme_POD=[TSEC THM TLAS TSAV TSKL TBET TCIS TMFR TPAL TPAK TMON];
cena_POD=[CLIM CARM Cmat Crad Ck];
end

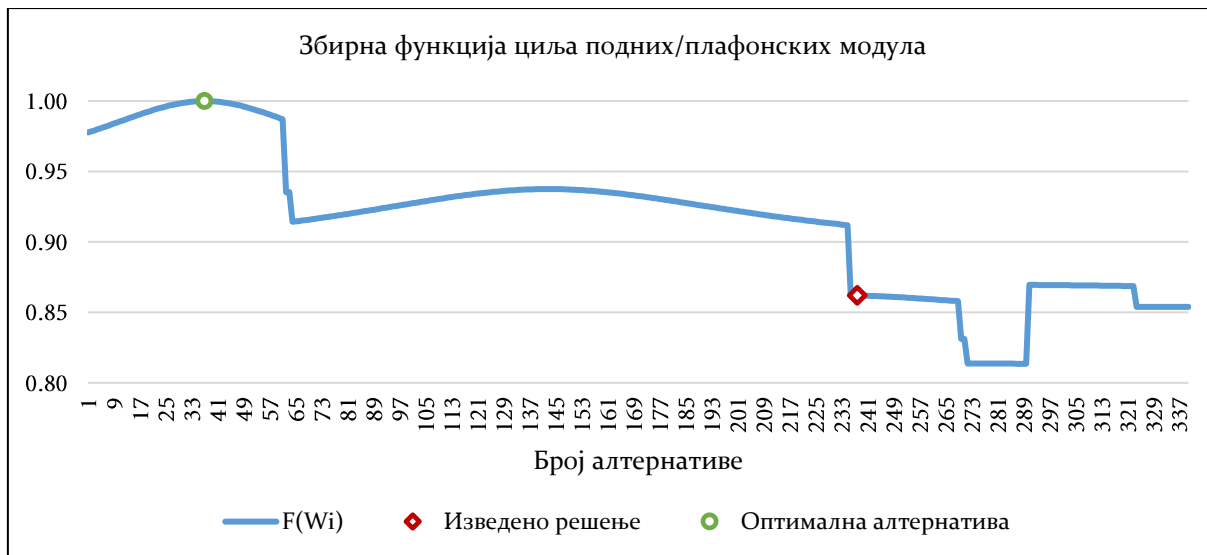
```



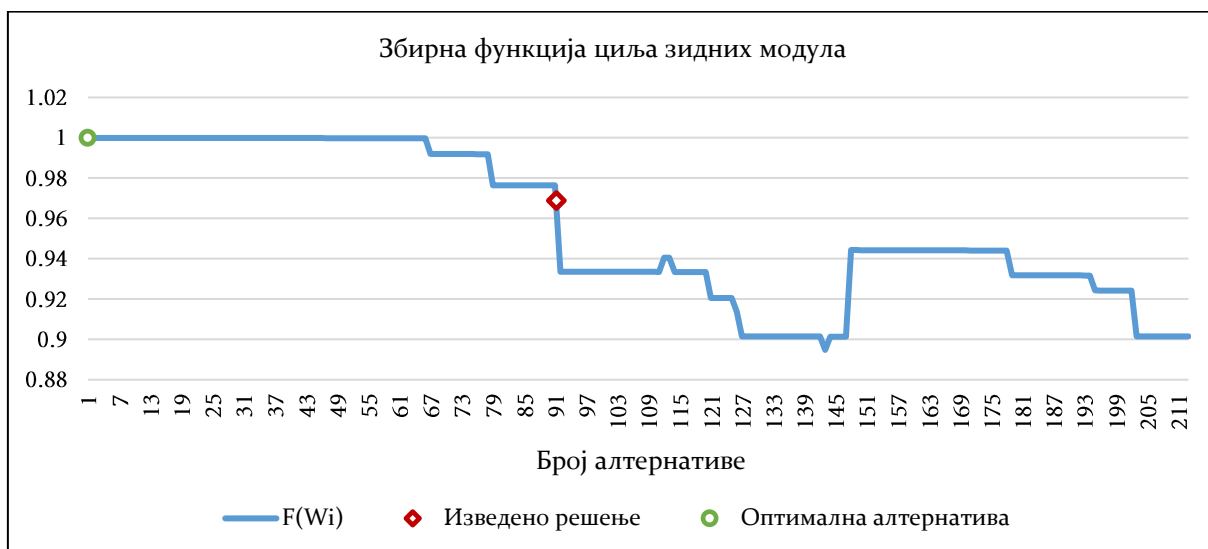
Прилог 3 - Дијаграми збирних ф-ја циља



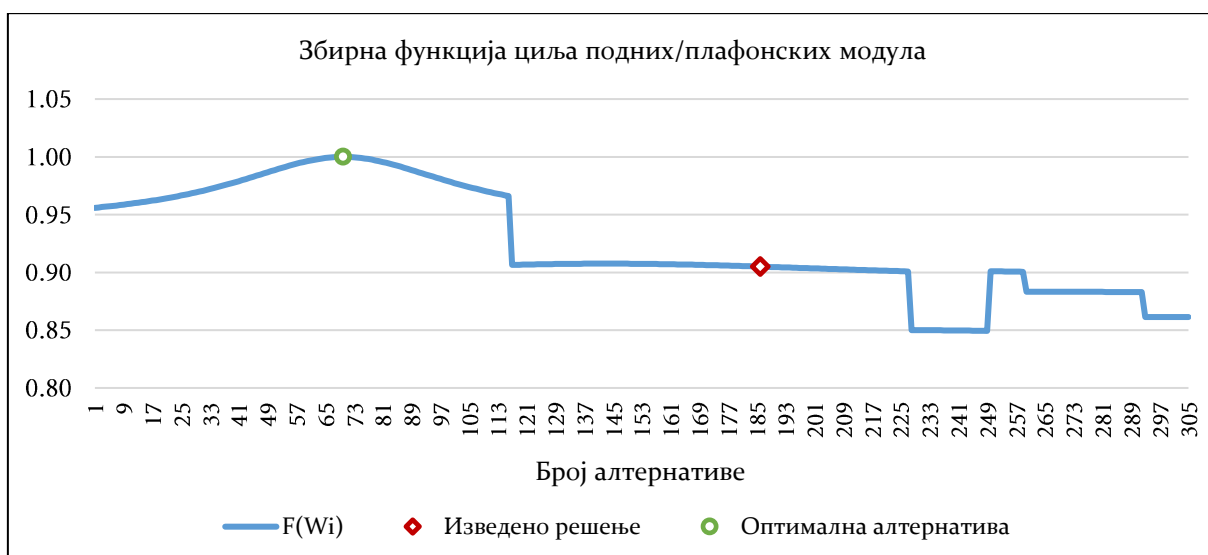
Слика П.1 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 2



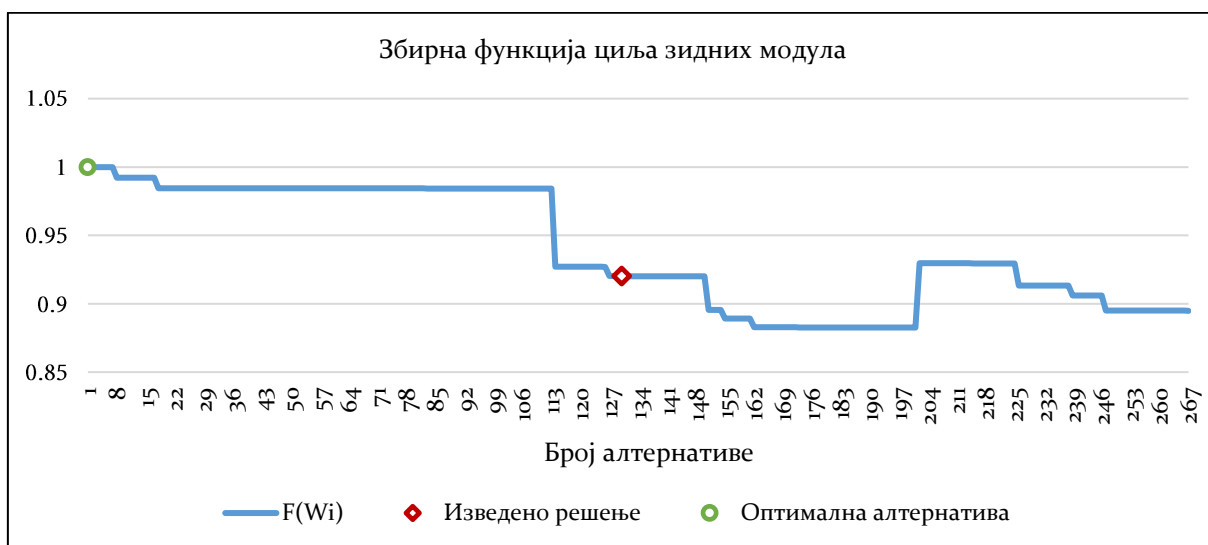
Слика П.2 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 2



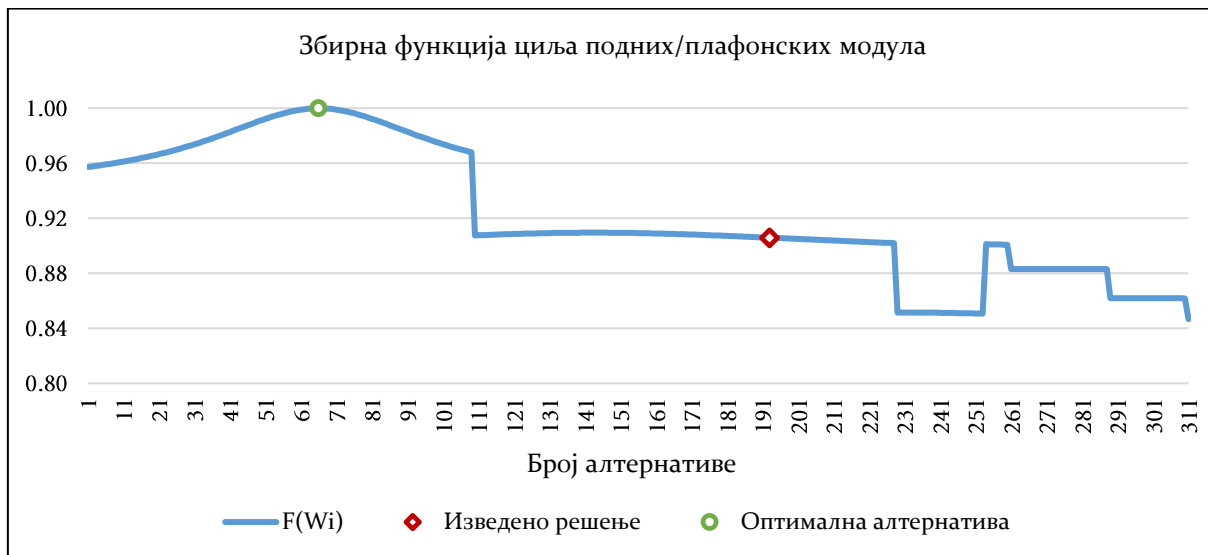
Слика П.3 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 3



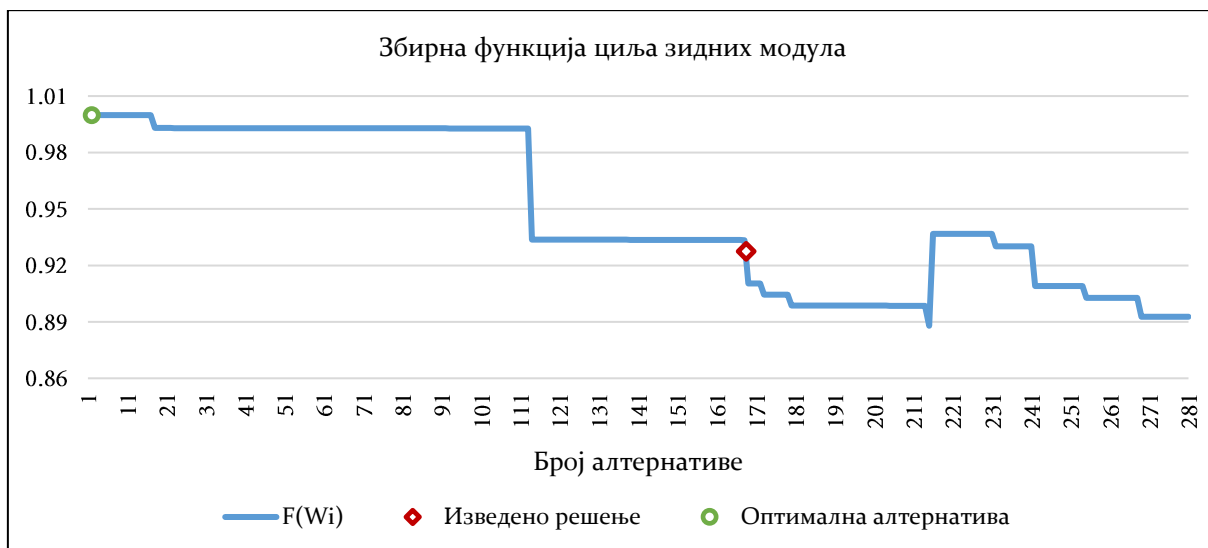
Слика П.4 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 3



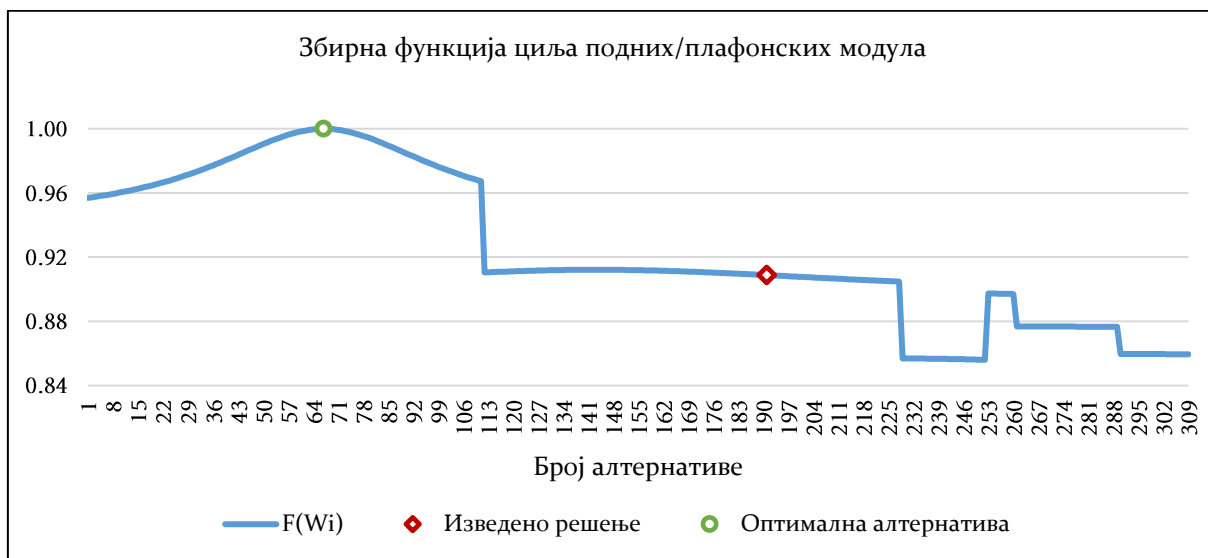
Слика П.5 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 4



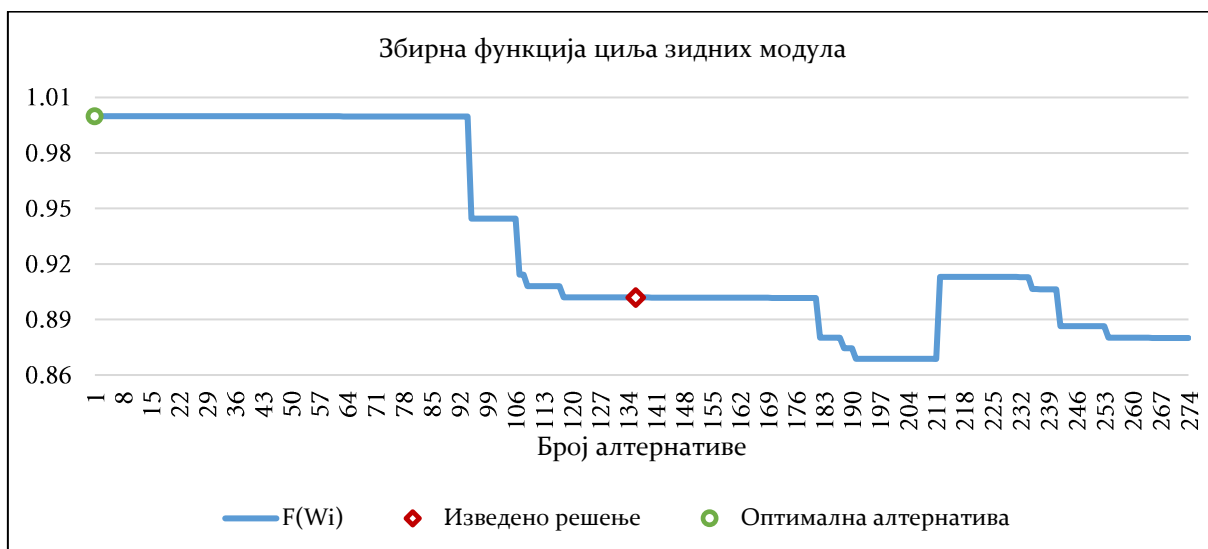
Слика П.6 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 4



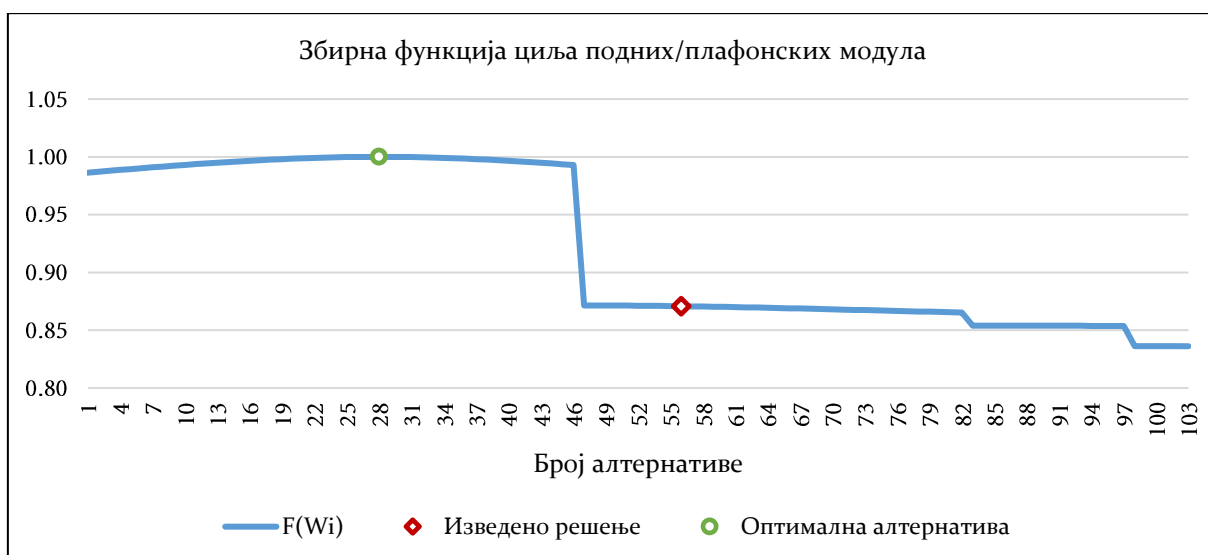
Слика П.7 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 5



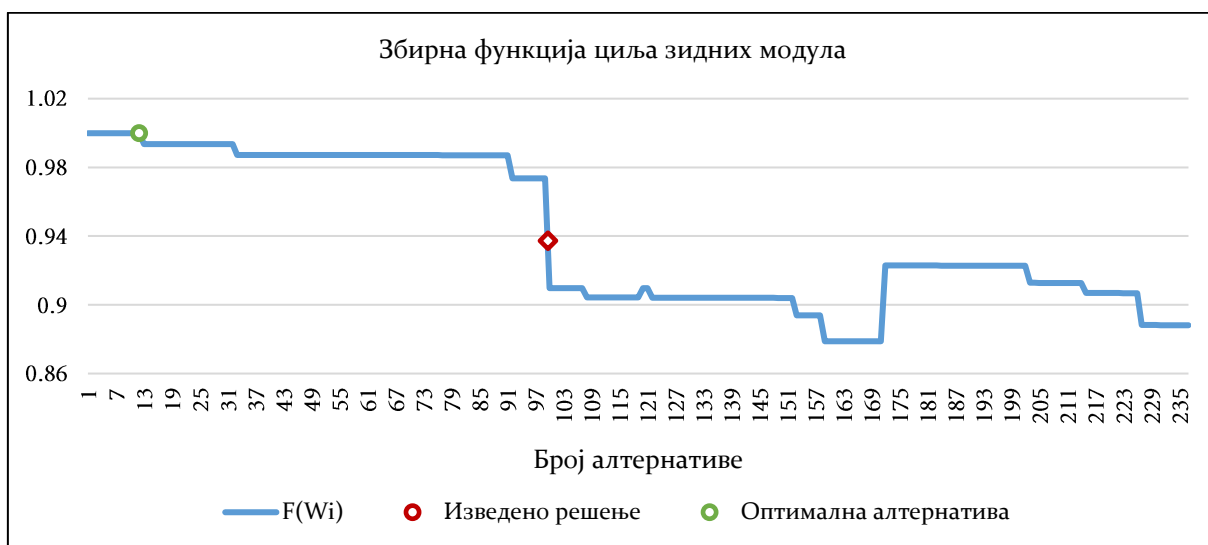
Слика П.8 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 5



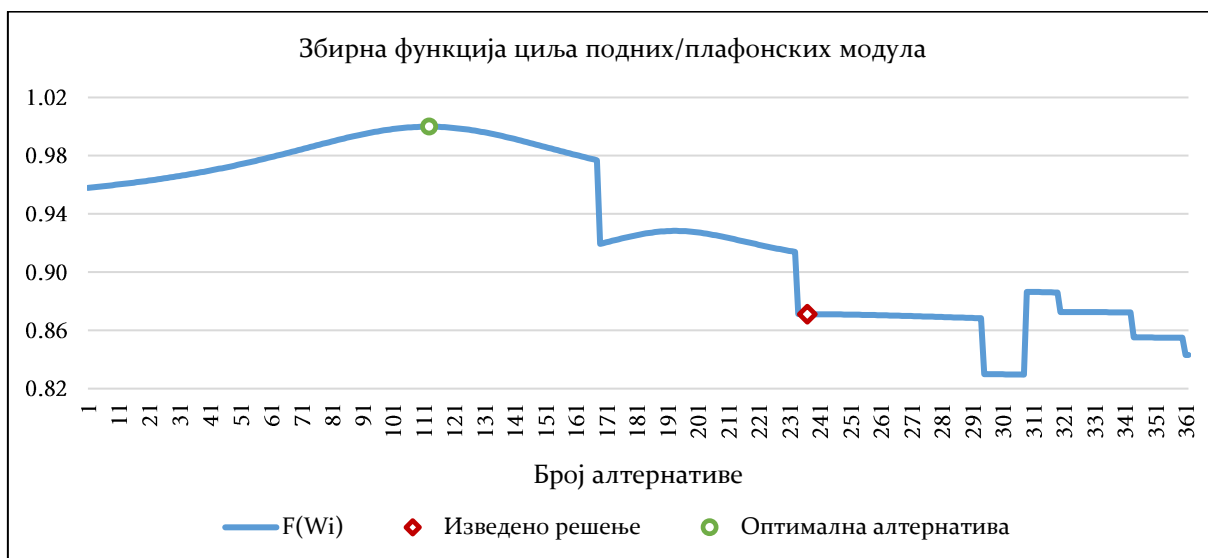
Слика П.9 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 6



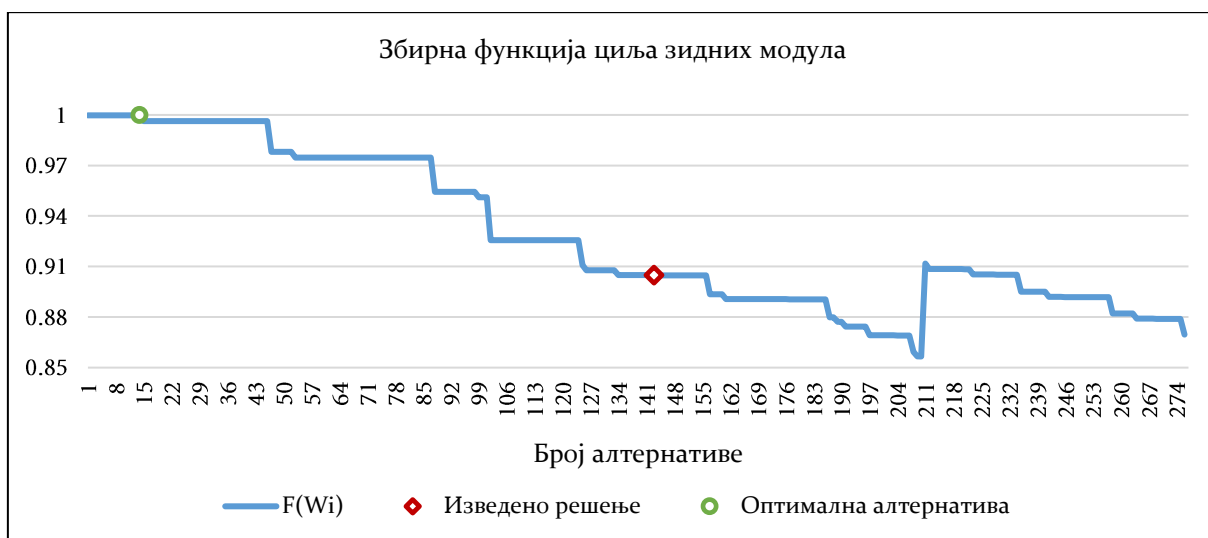
Слика П.10 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 6



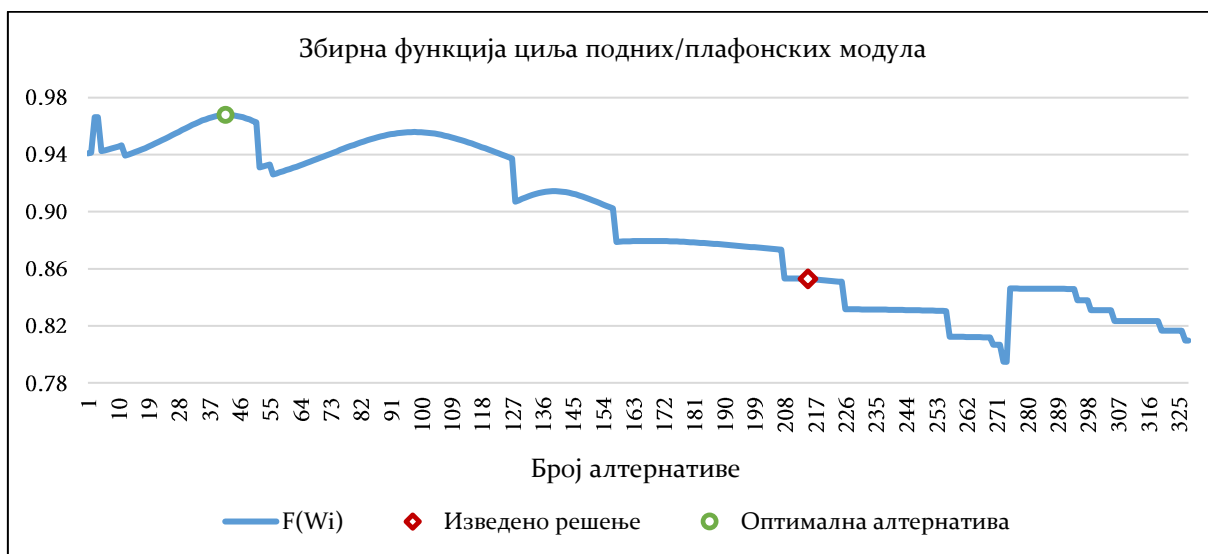
Слика П.11 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 7



Слика П.12 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 7



Слика П.13 – Дијаграм збирне функције зидних модула код примера 8



Слика П.14 – Дијаграм збирне функције подних/плафонских модула код примера 8

#### Прилог 4 - MATLAB главни програмски код за повезивање и аутоматизацију свих модула

```
run('ulazna_maska.m');
[podaci_zid,Lz,LE]=Alternative_ZID(A,B,C,D,E,F,d);
[podaci_pod,Lp,OPP]=Alternative_POD(A,B,C,D,E,F,d);
[broj_tabli_zid,funkcije_ZID,vreme_ZID,cena_ZID]=Kriterijumi_ZID(A,B,C,D,E,
F,podaci_zid,d,Lz,LE);
[broj_tabli_pod,funkcije_POD,vreme_POD,cena_POD]=Kriterijumi_POD(A,B,C,D,E,
F,podaci_pod,d,Lp);
funkcije=funkcije_ZID;
[max_vrednost,alter]=SAW(funkcije);
max_vrednost_ZID=max_vrednost;
alter_ZID=alter;
clear alter and funkcije and max_vrednost;
funkcije=funkcije_POD;
[max_vrednost,alter]=SAW(funkcije);
max_vrednost_POD=max_vrednost;
alter_POD=alter;
clear alter and funkcije and max_vrednost;
opt_alter=[podaci_zid(alter_ZID,:) podaci_pod(alter_POD,:) Lz LE Lp OPP A B
C D E F d];
opt_vreme=[vreme_ZID(alter_ZID:)+vreme_POD(alter_POD:)];
opt_cena=[cena_ZID(alter_ZID:)+cena_POD(alter_POD:)];
opt_br_gresaka=[funkcije_ZID(alter_ZID,3)+funkcije_POD(alter_POD,3)];
opt_ravnost=[funkcije_ZID(alter_ZID,4)+funkcije_POD(alter_POD,4)];
NUK=[sum(opt_alter(6:9)),opt_alter(10),1,2,1,2,2,opt_alter(14),1];
excelM='3D model\Modulprim.xlsx';
xlswrite(excelM,opt_alter,'Parametri','B26:Z26');
xlswrite(excelM,opt_cena,'Izvestaj','C18:G18');
xlswrite(excelM,opt_br_gresaka,'Izvestaj','E20');
xlswrite(excelM,opt_ravnost,'Izvestaj','E22');
excelP='Ponuda.xlsx';
xlswrite(excelP,opt_cena(5),'Izvestaj','C3');
xlswrite(excelP,opt_br_gresaka,'Izvestaj','C5');
xlswrite(excelP,opt_ravnost,'Izvestaj','C6');
winopen('3D model\MODULPRIM-D.iam');
excelT='Terminiranje.xlsx';
xlswrite(excelT,opt_vreme,'Proracun','C3:M3');
xlswrite(excelT,sum(NUK),'Proracun','D9');
winopen(excelT);
winopen('Termin plan.mpp');
```

**Владан (Рацо) Грковић** је рођен 02. 04. 1987. године у Ужицу. Основну школу завршио је у Ариљу а средњу машинску школу у Пожеги. Основне академске студије завршио је 2009. године, на Машинском факултету у Краљеву Универзитета у Крагујевцу са просечном оценом 8.27, на смеру Производно машинство. На истом факултету 2011. године завршава мастер академске студије са просечном оценом 9.60, на смеру Производно машинство. Уписан је на докторске академске студије на Машинском факултету у Краљеву од 2011. године, где је положио све испите према наставном плану и програму са просечном оценом 9.50.

Од 2012. године запослен је на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву (бивши Машински факултет у Краљеву) у својству истраживача сарадника на пројекту „Развој методологија и средстава за заштиту од буке урбаних средина“, евиденциони број ТР-37020 код Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије. Изабран је у звање асистента 2015. године на Катедри за производно машинство и изводи наставу на групи предмета из области производног машинства.

Као аутор и коаутор објавио је 2 рада у међународним научним часописима са SCI листе, преко 25 радова на домаћим и међународним конференцијама као и у домаћим и међународним часописима из области производног машинства.