



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
DEPARTMAN ZA SAOBRAĆAJ




mr Mirko Delošević, dipl. ing.


**MULTIDISCIPLINARNI RAZVOJ ELEMENATA
REGALA FLEKSIBILNOG SKLADIŠNOG KONCEPTA
TRANSPORTNO – LOGISTIČKIH SISTEMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: dr Jovan Tepić, vanr. prof.
dr Ilija Tanackov, vanr. prof.

Novi Sad, 2014.

	УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА 21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6	
	КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА	
Редни број, РБР:		
Идентификациони број, ИБР:		
Тип документације, ТД:	Монографска документација	
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација	
Аутор, АУ:	mr Мирко Ђелошевић	
Ментор, МН:	др Илија Танацков, ванредни професор	
Наслов рада, НР:	Мултидисциплинарни развој елемената регала флексибилног складишног концепата транспортно – логистичких система	
Језик публикације, ЈП:	Српски	
Језик извода, ЈИ:	Српски	
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП:	Војводина	
Година, ГО:	2014.	
Издавач, ИЗ:	Факултет техничких наука	
Место и адреса, МА:	Нови сад, Трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, ФО:	10 поглавља / 163 страна / 8 табела / 74 слике / 12 прилога	
Научна област, НО:	Саобраћајно инжењерство	
Научна дисциплина, НД:	Организације и технологије транспорта	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Логистика, транспорт, складишта, оптимизација, регали	
УДК		
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду	
Важна напомена, ВН:		
Извод, ИЗ:	Savremeni uslovi tržišnog poslovanja zahtevaju visoku konkurentnost robe u cilju ostvarivanja maksimalnog profita proizvodnih kompanija odnosno distributera i zadovoljenja potreba kupaca. Debalans rasta produktivnosti proizvodnih procesa i logističkog sistema je jedan od glavnih uzroka usporavanja celokupnog reproduktivnog procesa. Istraživanje transportno-logističkog sistema sa tendencijom razvoja elementa fleksibilnog skladišnog koncepta je multidisciplinarnog karaktera i fokusirano je na analizu procesa, funkcionalnih površina, layout-a i regalske opreme skladišta.	
Датум прихватања теме, ДП:	26. 09. 2013.	
Датум одбране, ДО:		
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Славко Весковић, ред. професор
	Члан:	др Драган Симић, доцент
	Члан:	др Милан Костелац, доцент
	Члан:	др Бојан Лалић, доцент
	Члан, ментор:	др Јован Тепић, ванр. професор
	Члан, ментор:	др Илија Танацков, ванр. професор
		Потпис ментора

	UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES 21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6	
	KEY WORDS DOCUMENTATION	
Accession number, ANO :		
Identification number, INO :		
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual material printed	
Contents code, CC :	PhD thesis	
Author, AU :	MSc Mirko Delošević	
Mentor, MN :	PhD Ilija Tanackov, Associate Professor	
Title, TI :	Multidisciplinary development elements racks of flexible storage concept transport logistics system	
Language of text, LT :	Serbian	
Language of abstract, LA :	Serbian	
Country of publication, CP :	Serbia	
Locality of publication, LP :	Vojvodina	
Publication year, PY :	2014.	
Publisher, PB :	Faculty of Tehnical Sciences	
Publication place, PP :	Novi Sad, Square of Dositej Obradović 6	
Physical description, PD :	10 chapters / 163 pages / 8 tables / 74 pictures / 12 appendixes	
Scientific field, SF :	Traffic engineering	
Scientific discipline, SD :	Organizations and technologies of transport	
SUBJECT/KEY WORDS, S/KW :	Logistic, transport, warehouse, optimization, rack	
UC		
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Square of Dositej Obradović 6, Novi Sad	
Note, N :		
Abstract, AB :	Modern conditions of market economy requires a highly competitive goods in order to achieve maximum profit production company respectively distributors and gratification the needs of customers. Imbalance growth of productivity of production processes and logistics system is one of the main causes of slowing down the entire of reproductive process. The research of transport and logistics system with the tendency development of elements of flexible storage concept is multidisciplinary and focused on process analysis, functional area, layout and storage racks.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	26. 09. 2013.	
Defended on, DE :		
Defended Board, DB :	President:	PhD Slavko Vesković; Full Professor
	Member:	PhD Dragan Simić, docent
	Member:	PhD Milan Kostelac, docent
	Member:	PhD Bojan Lalić, docent
	Member, Mentor:	PhD Jovan Tepić, Associate Professor
	Member, Mentor:	PhD Ilija Tanackov, Associate Professor
		Menthor's sign

Istraživanja realizovana u okviru disertacije su podržana sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekata:

"Razvoj i primena optimizacionih metoda u oblikovanju lanaca snabdevanja i distribucije pri oblikovanju distribucionog centra za logističku podršku velikoserijskoj proizvodnji" – broj projekta 36030.



SADRŽAJ

REZIME	VIII
ABSTRACT	IX
SPISAK SLIKA	X
SPISAK TABELA	XXII
SPISAK OZNAKA I SKRAĆENICA.....	XIII
1. UVOD	1
1.1. KONCEPT DISERTACIJE	2
1.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA	3
1.3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA	4
1.4. STRUKTURA DISERTACIJE	5
2. LOGISTIČKI SISTEM	6
2.1. ELEMENTI LOGISTIČKOG SISTEMA	7
2.1.1. Podsystem pakovanja	8
2.1.2. Podsystem unutrašnjeg transporta	9
2.1.3. Podsystem pretovara	11
2.1.4. Podsystem spoljašnjeg transporta	12
2.1.5. Podsystem skladištenja	14
2.2. DISTRIBUCIJA ROBE	15
3. UPRAVLJANJE TRANSPORTNIM I SKLADIŠNIM PROCESIMA	18
3.1. KONCEPT ODRŽIVOG TRANSPORTA	22
3.2. PROCENA RIZIKA OD ISKLIZNUČA VOZA	24
3.2.1. Uzroci iskliznuća voza	24
3.2.2. Upravljanje rizikom	26
3.2.3. Pretpostavke modela	28
3.2.4. Matematički model	28
3.2.5. Rezultati procesa	30
3.2.6. Iskliznuće vagona u kompoziciji	31
3.3. SKLADIŠTA I TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA	33
3.3.1. Sofisticirani sistemi praćenja	35
3.3.2. Implementacija ACCELLOS One sistema	36

4. MODELIRANJE NEKONVENCIONALNIH SKLADIŠTA	38
4.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA SKLADIŠTA	39
4.2. MODEL OČEKIVANOG RASTOJANJA SKLADIŠTA	42
4.2.1. Očekivano rastojanje unutar zona skladišta.....	42
4.2.2. Alternativne trase kretanja	44
4.2.3. Normalni poprečni prolaz – najpovoljnija trasa	45
4.2.4. Očekivano rastojanje unutar karakteristične oblasti skladišta	46
4.2.5. Očekivano rastojanje između dve karakteristične zone	46
4.2.6. Ukupno očekivano rastojanje lokacija skladišta	48
4.3. OPTIMIZACIJA LAYOUT-a SKLADIŠTA	49
4.4. UPOREDNA ANALIZA SA TRADICIONALNIM SKLADIŠTIMA.....	52
5. DINAMIČKO PROGRAMIRANJE FUNKCIONALNIH POVRŠINA I TOKOVA SKLADIŠTA	54
5.1. FUNKCIONALNE POVRŠINE I TOKOVI SKLADIŠTA	55
5.2. PRETPOSTAVKE MATEMATIČKOG MODELA	57
5.3. MATEMATIČKO MODELIRANJE	58
6. STRUKTURNA ANALIZA REGALSKOG SKLADIŠTA – PREGLED STANJA	62
6.1. STANDARDI I METODE PRORAČUNA.....	63
6.2. OSNOVNI TIPOVI SKLADIŠNIH REGALA	74
7. METODE PROCENE NOSIVOSTI STUBOVA I NOSAČA REGALSKIH SKLADIŠTA	77
7.1. DOMINANTNA NAPREZANJA STUBOVA I MODOVI IZVIJANJA	78
7.1.1. Lokalno izvijanje	80
7.1.2. Distorziona izvijanje	81
7.1.3. Globalno izvijanje	83
7.2. METODA EFEKTIVNE ŠIRINE (EWM)	85
7.3. METODA DIRETNE OTPORNOSTI (DSM).....	88
7.3.1. Primena DSM za stubove	89
7.3.2. Primena DSM za nosače	91
7.3.3. Pregled eksperimentalnih podataka	93
7.3.4. Komparacija metoda za procenu nosivosti prema DSM	94
7.3.5. Osobine metoda za procenu stabilnosti prema DSM	95
7.3.6. Razvoj novih i optimalnih poprečnih preseka	96
7.4. METODA EFEKTIVNE POVRŠINE (EAM).....	98

7.5. METODA EFEKTIVNOG PRESEKA (ESM).....	99
7.5.1. Implementacija ESM pristupa	102
7.5.2. Kalibracija metode efektivne širine	104
8. IDENTIFIKACIJA PARAMETARA NAPREZANJA PERFORIRANIH PRITISNUTIH ELEMENATA	105
8.1. ANALIZA I FORMULACIJA PROBLEMA	106
8.2. MATEMATIČKI MODEL IZVIJANJA PLOČE	107
8.2.1. Osnovne postavke problema izvijanja.....	107
8.2.2. Definisanje ravnog stanja napona	108
8.2.3. Koeficijent izvijanja i kritični napon.....	111
8.3. UPOREDNA ANALIZA I VERIFIKACIJA REZULTATA	114
8.3.1. Slučaj pravougaonog otvora	114
8.3.2. Slučaj kružnog otvora.....	116
8.3.3. Ploča slotovanog otvora	118
8.4. UTICAJ OTVORA NA SPOLJAŠNJI RAD I STABILNOST PLOČE	119
9. OPTIMIZACIJA STRUKTURNIH ELEMENATA REGALA	122
10. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA	127
LITERATURA	129
PRILOG	139
Prilog 1. Distanca skladišnih jedinica u okviru karakteristične oblasti.....	139
Prilog 2. Distanca skladišnih jedinica različitih karakterističnih zona.....	142
Prilog 3. Distanca skladišnih jedinica između zona 1 i 3	146
Prilog 4. Ograničenja funkcije cilja za četvero-intervalni model	147
Prilog 5. Kriva i modaliteti izvijanja	149
Prilog 6. Krive izvijanja tipičnih preseka stubova i nosača	151
Prilog 7. Konvencionalni i optimizovani oblici tipičnih preseka	153
Prilog 8. Koeficijenti lokalnog izvijanja profila	154
Prilog 9. Koeficijenti stabilnosti perforiranih pritisnutih ploča	156
Prilog 10. Numerička analiza Ω profila.....	158
Prilog 11. Poprečni presezi nosača regala (komercijalni i optimizovani)	160
Prilog 12. Poprečni presezi stubva regala (komercijalni i optimizovani).....	162

REZIME

Savremeni uslovi tržišnog poslovanja zahtevaju visoku konkurentnost robe u cilju ostvarivanja maksimalnog profita proizvodnih kompanija odnosno distributera i zadovoljenja potreba kupaca. Realizacija niza distributivnih aktivnosti u lancu snabdevanja između proizvođača i potrošača se ostvaruje uz podršku logističkog sistema.

Osnovana komponenta logističkog sistema egzistira kroz transportno-skladišni sistem i predstavlja glavnu sponu u procesu distribucije između proizvodnje i potrošnje. Neadekvatnu podršku logističkog sistema u procesu tehnološkog razvoja prati izvesni reciprocitet troškova. Debalans rasta produktivnosti proizvodnih procesa i logističkog sistema je jedan od glavnih uzroka usporavanja celokupnog reproduktivnog procesa. Posledica ovog stanja se otklanja redukcijom troškova integralnog logističkog sistema.

Istraživanje transportno-skladišnog sistema ukazuje na potencijal tehnološke rezerve i predlaže mere za povećanje efikasnosti pratećih procesa. Transportni sistem je tretiran kroz aspekt sigurnosti železničkog saobraćaja uključenog u proces tokova robe. Predloženi matematički model kojim se analizira iskliznuće voza je univerzalnog karaktera i daje rezultate saglasne sa postojećim statističkim podacima.

Poseban akcenat je stavljen na skladišni sistem logističkog lanca u otklanjanju prostorne, vremenske i kvantitativne distance između proizvodnje i potrošnje (kupca). Analiza nekonvencionalnih skladišta pokazuje da prosečno poboljšanje performansi opsluživanja iznosi oko 15 % u odnosu na tradicionalna rešenja. Definisane funkcionalnih površina i tokova skladišta je realizovano primenom dinamičkog programiranja. Funkcija cilja je eksternog karaktera i odnosi se na maksimizovanje profita.

Infrastrukturni resursi skladišnog sistema su interpretirani kroz strukturnu analizu skladišta. Razmatrana su konstruktivna izvođenja stubova i podužnih nosača regalskih skladišta, kao dominantno opterećenih elemenata. Primenom klasične teorije elastičnosti su identifikovani uticajni parametri stabilnosti aksijalno pritiskute ploče sa tipičnim otvorima. Optimizacija elemenata regala za izvedene komercijalne oblike stubova i nosača različitih nosivosti je izvršena primenom FEA, koristeći multimodalni softverski paket ANSYS 12.

Istraživanje transportno-logističkog sistema sa tendencijom razvoja elementa fleksibilnog skladišnog koncepta je multidisciplinarnog karaktera i fokusirano je na analizu procesa, funkcionalnih površina, layout-a i regalske opreme skladišta.

ABSTRACT

Modern conditions of market economy requires a highly competitive goods in order to achieve maximum profit production company respectively distributors and gratification the needs of customers. Implementation of the range of distribution activities in the supply chain between producers and consumers is realized with the support of the logistics system.

Basic component of the logistics system exists through transport and storage system and represents the main link in the distribution process between production and consumption. Inadequate support of logistics system in the process of technological development follow a certain reciprocity of costs. Imbalance growth of productivity of production processes and logistics system is one of the main causes of slowing down the entire of reproductive process. The consequence of this state is eliminated by reducing the cost of integrated logistics system.

Research transportation and storage system indicates the potential of technological reserve and proposes measures to increase the efficiency of accompanying processes. The transport system is treated through the security aspect of rail transport which is involved in the process flow of goods. The proposed mathematical model which analyzes the derailment is a universal character and gives results compatible with existing statistical data.

Special emphasis is placed on the storage system of the logistics chain in the elimination of spatial, temporal and quantitative distance between production and consumption (the buyer). Analysis of unconventional storage shows that the average performance improvement of handling is approximately 15% compared to traditional solutions. Defining functional areas and flows storage is implemented using dynamic programming. The objective function is the external character and refers to the maximization of profit.

Infrastructure resources of storage system are interpreted through the structural analysis of warehouse. This paper discusses constructive of performance of column and longitudinal girder of storage rack, as the dominantly loaded elements. By applying the classical theory of elasticity are identified influential parameters of the stability of axially pressed plates with typical openings. Optimization elements racks for derivative commercial forms of columns and beams of different capacity was performed application FEA, using of multimodal software package ANSYS 12.

The research of transport and logistics system with the tendency development of elements of flexible storage concept is multidisciplinary and focused on process analysis, functional area, layout and storage racks.

SPISAK SLIKA	
Slika 2.1. Učešće troškova logistike u ukupnim troškovima kompanije	7
Slika 2.2. Tipovi paleta: a) drvena-otvorenog tipa i b) plastična (PP i PE)	9
Slika 2.3. Opsluživanje skladišta: a) AS/RS i b) viljuškarom kod fiksnih i pokretnih regala	10
Slika 2.4. Uloga unutrašnjeg transporta u operaciji pretovara	11
Slika 2.5. Tehnologija bimodalnog transporta Ro-La	13
Slika 2.6. Tehnologija bimodalnog transporta tipa MEGASWING	13
Slika 2.7. Visokoregalno skladište sa pretovarnim frontom (tovarnim prostorom)	14
Slika 2.8. Hijerarhijska struktura distributivnog sistema	16
Slika 2.9. Transakcije u procesu distribucije: a) bez, b) sa jednim i c) sa dva posrednika	17
Slika 2.10. Troškovi prometa robe za direktni i posrednički sistem distribucije	17
Slika 3.1. Vizuelizacija skladišnih procesa	21
Slika 3.2. Udeo troškova transporta i zaliha u ukupnim troškovima	21
Slika 3.3. Učešće u emisiji CO ₂ za EU (prema Eurostat-u)	22
Slika 3.4. Povećanje tovarnog prostora kod transportnih sredstava	23
Slika 3.5. Mogućnosti za uštede energije u okviru koncepta održivog transporta	23
Slika 3.4. Uticajni degradacioni faktori u kontaktu točak-šina	25
Slika 3.5. Generalni uzroci iskliznuća voza	25
Slika 3.6. Proces upravljanja rizikom	26
Slika 3.7. Proces odlučivanja u sistemu upravljanja rizikom Q850 [17]	27
Slika 3.8. Pojava potencijalnog akcident na deonici AB	28
Slika 3.9. Sistem procene rizika od iskliznuća voza	29
Slika 3.10. Verovatnoća iskliznuća voza od stepena oštećenja	31
Slika 3.11. Uzroci iskliznuća vagona u kompoziciji	32
Slika 3.12. Učešće u iskliznućima pojedinih vagona voza	32
Slika 3.13. Verovatnoća iskliznuća vagona u kompoziciji voza	33
Slika 3.14. Opšta šema skladišta u logističkom sistemu	34
Slika 3.15. Savremeno rešenje skladišta automobila (Volkswagen – Minhen)	35
Slika 3.16. Organizaciona šema skladišta (ACCELLOS One)	37
Slika 4.1. Tipovi layout-a tradicionalnih skladišta	39
Slika 4.2. Zone koncentracije skladišnih jedinica za: a) nekonvencionalni oblik (kružni) i b) tradicionalni (Layout A)	41
Slika 4.3. Skladišne lokacije unutar iste zone “fishbone” skladišta	43
Slika 4.4. Skladišne lokacije između različitih zona “fishbone” skladišta	47
Slika 4.5. Skladišne lokacije u zona 1 i 3 “fishbone” skladišta	48
Slika 4.6. Očekivana rastojanja $E[DC]$ i $E[SC]$ za skladišta „uskog“ i „visokog“ tipa [49]	50
Slika 4.7. Optimalni oblik skladišta u zavisnosti od parametra T [49]	51
Slika 4.8. Komparaciona analiza očekivanih rastojanja u zavisnosti od tipa skladišta [49]	52
Slika 4.9. Očekivana distanca tradicionalnih i nekonvencionalnih skladišta [49]	53
Slika 5.1. Šematski prikaz: a) zone zaliha i b) zone zaliha sa zonom prosleđivanja	56
Slika 5.2. Tipična tokovi robe i funkcionalne površine unutar skladišta	58
Slika 5.3. Model “crne kutije” skladišta	60
Slika 5.4. Potrebne količine robe za: a) nabavku i b) prodaju	61

Slika 6.1. Laki regala opšte namene (tipa LS proizvodnje EKONOM)	75
Slika 6.2. Regal umerene nosivosti (tipa PRIMARACK proizvodnje EKONOM)	75
Slika 6.3. Regali velike nosivosti (stubovi od Ω profila)	76
Slika 7.1. Konekcija stuba i nosača: a) opterećenje i b) merenje deformacije	78
Slika 7.2. Izvijanje aksijalno pritisnutog hladno-valjanog U profila	79
Slika 7.3. Lokalno izvijanje: a) uzročnik pojave i b) eksperimentalna simulacija	80
Slika 7.4. Distorzoni mod izvijanja sa: a) jednim i b) dva polutalasa	81
Slika 7.5. Modalitet izvijanja: a) fleksiono-torzioni i b) interakcija globalnog i distorzionog	84
Slika 7.6. Efektivne zone poprečnog preseka C profila	85
Slika 7.7. Komparacija krivih za procenu otpornosti po DSM za stubove	90
Slika 7.8. Odstupanje rezultata EWM i DSM u odnosu na eksperimentalne vrednosti	90
Slika 7.9. Komparacija krivih za procenu otpornosti po DSM za nosače	92
Slika 7.10. Kriva otpornosti na gubitak stabilnosti po metodama 1, 2 i 3 (DSM)	95
Slika 7.11. Uporedna analiza koeficijenata lokalnog izvijanja za pritisnute profile	100
Slika 7.12. Uporedna analiza koeficijenta lokalnog izvijanja za fleksione profile	101
Slika 7.13. Dvoparametarska zavisnost koeficijenta lokalnog izvijanja k_l	101
Slika 8.1. Preraspodela naponskog toka ploče sa otvorom	108
Slika 8.2. Model ravnog stanja napona ploče sa pravougaonim otvorom	109
Slika 8.3. Jednoosno pritisnuta ploča: a) uniformna i b) sa pravougaonim otvorom	114
Slika 8.4. Komparacija $k(h/a)$ ploče sa pravougaonim otvorom	114
Slika 8.5. Komparacija $k(h/a)$ ploče sa kvadratnim otvorom	115
Slika 8.6. Pravougaona ploča sa kružnim otvorom	115
Slika 8.7. Podela kružnog otvora na pravougaone procepe	116
Slika 8.8. Komparacija $k(h/a)$ ploče sa kružnim otvorom	117
Slika 8.9. Ploča sa: a) horizontalno i b) vertikalno slotovanim otvorom	117
Slika 8.10. Komparacija $k(d/a)$ ploče sa horizontalno slotovanim otvorom	118
Slika 8.11. Komparacija $k(d/a)$ ploče sa vertikalno slotovanim otvorom	118
Slika 8.12. Koeficijenta λ u zavisnosti od parametra (h/a)	119
Slika 8.13. Faktor osetljivosti t u funkciji od parametra (h/a)	120
Slika 9.1. Optimizacione metode softverskog paketa ANSYS 12	122
Slika 9.2. Strukturna šema optimizacije u ANSYS 12	123
Slika 9.3. Blok dijagram modula za optimizaciju u ANSYS 12	124
Slika 9.4. Ukupna deformacija pritisnutog segmenta Ω stuba	125
Slika 9.5. Ekvivalentni napon pritisnutog segmenta Ω stuba	125

SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Podela transportnih sredstva prema tipu proizvodnje	10
Tabela 7.1. Uticajni parametri U profila elastičnog izvijanja	79
Tabela 7.2. Određivanje otpornosti stuba po EWM (OSP I TSP)	87
Tabela 7.3. Baza podataka eksperimentalno ispitanih tipičnih nosača	93
Tabela 7.4. Komparacija metoda po DSM u odnosu na eksperimentalne vrednosti	96
Tabela 7.5. Statistički pregled istraživanih preseka po DSM	97
Tabela 7.6. Pouzdanost metoda za projektovanje [166]	98
Tabela 9.1. Izlazni rezultati optimizacionog postupka u ANSYS 12	124

SPISAK OZNAKA I SKRAĆENICA

FEM	– Metoda konačnih elemenata
ANSYS 12	– Višemodalni softver baziran na FEM
PP	– Polipropilen
PE	– Polietilen
JIT	– Just-in-time (“u pravo vreme”)
P	– Broj proizvođača
K	– Broj potrošača (kupaca)
N	– Broj transakcija između proizvođača i kupaca
CO_2	– Ugljen dioksid
EU	– Evropska Unija
TNG	– Tečni naftni gas
S_i	– Skup scenarija za pojavu rizika
p_i	– Verovatnoća pojave rizika
C_i	– Konsekvence pojave rizika
RE	– Izloženost riziku
P	– Verovatnoća da će doći do rizičnog događaja
C	– Uticaj rizičnog događaja na gubitak proizvodnih dobara
L	– Referentna dužina pruge
i	– Pozicija iskliznuća voza
N	– Ukupan broj potencijalnih mesta za iskliznuće voza
V_i	– Vrednost materijalne štete usled iskliznuća voza na i -toj lokaciji
U_i	– Vrednost kritičnih faktora za iskliznuće voza na i -toj lokaciji
D_i	– Vrednost angažovanih resursa monitoringa na i -toj lokaciji
ED	– Očekivano iskliznuće
$P_r(V_i, U_i, D_i)$	– Verovatnoća da će doći do iskliznuća na i -toj lokaciji
β	– Vektor koeficijena dobijen opservacijom podataka
PC	– Personalni računar
RFID	– Radio frekventni tagovi
ERP	– Planiranje resursa preduzeća
RF	– Radio frekventna komunikacija
USA	– Sjedinjene Američke Države
P&D	– Zona deponovanja skladišnih jedinica
x, y, z	– Koordinate Dekartovog koordinatnog sistema
v	– Širina prolaza prikupljanja
w	– Širina dijagonalnog poprečnog prolaza
i, j	– Prolazi prikupljanja
L_i	– Dužina i -tog prolaza prikupljanja
L_j	– Dužina j -tog prolaza prikupljanja
d_h	– Horizontalno rastojanje dva susedna prolaza prikupljanja
d_v	– Vertikalno rastojanje dva susedna prolaza prikupljanja
n	– Nagib dijagonalnog poprečnog prolaza
q_{ij}	– Integralni parametar koordinata ($=x+y$)
X_i, Y_i, Z_i	– Uniformne slučajne promenljive ($Z_i=X_i+Y_i$)
$f_z(Z)$	– Konvoluciona funkcija
$P_r(Z_{ij} \leq q_{ij})$	– Verovatnoća da je najkraća trasa duž poprečnog prolaza
$P_r(Z_{ij} > q_{ij})$	– Verovatnoća da je najkraća trasa duž dijagonalnog prolaza

$E[Z_{ij}]$	– Očekivano rastojanje između skladišnih lokacija i odnosno j
p_i	– Verovatnoća i -te skladišne lokacije u smislu 4.18
N_l ($l = 1,2,3$)	– Broj prolaza karakterističnih oblasti
w_{rs}	– Verovatnoća skladišnih lokacija u r,s -toj zoni prema 4.24
T_r	– Dužina prolaza prikupljanja u r -toj zoni
T_s	– Dužina prolaza prikupljanja u s -toj zoni
T	– Ukupna dužina prolaza prikupljanja skladišta
$E[DC]$	– Očekivano rastojanje za dvokomandni sistem opsluživanja
$E[SC]$	– Očekivano rastojanje za jednokomandni sistem opsluživanja
$E[TB]$	– Očekivano rastojanje između skladišnih lokacija
V	– Oblast vertikalnih prolaza
H	– Oblast horizontalnih prolaza
δ_i	– Broj prolaza od i -tog do P&D tačke
δ_j	– Broj prolaza od j -tog do P&D tačke
A_s	– Početne zalihe
B_s	– Raspoloživ kapacitet skladišta
LINGO	– Specijalizovan softver za analizu skladišta
x_i	– Količina nabavljene robe u i -tom periodu
q_i	– Jedinična cena nabavljenog proizvoda u i -tom periodu
y_i	– Količina prodane robe u i -tom periodu
p_i	– Jedinična prodajna cena proizvoda u i -tom periodu
c_i	– Troškovi skladištenja jedinice proizvoda
$f_i(A)$	– Ostvaren profit za prethodnih i perioda
f_{profit}	– Funkcija cilja profita skladišta
EC 3	– Eurocode 3 (naziv standarda)
A_{eff}	– Efektivna površina poprečnog preseka
g_{eff}	– Efektivni centar gravitacije poprečnog preseka
FE	– Konačni elementi
C	– Poprečni presek C oblika
Z	– Poprečni presek Z oblika
EWM	– Metoda efektivne širine
AISI S100-2007	– Severnoamerički standard za hladno – valjane profile
ABNT NBR 14762	– Brazilski standard za hladno – valjane profile
EN 1993 1- 3	– Evropski standar za hladno – valjane profili (identično sa EC 3)
DSM	– Metoda direktne otpornosti
BS 5950 Part 5	– Britanski standard za procenu otpornosti perforiranih stubova
AS/NZ 4600-2005	– Australijski standard za definisanje distorzionog izvijanja
THIN - WALL	– Softver za proračun tankozidnih struktura
GBT	– Generalisana teorija nosača
HAT	– Poprečni presek oblika “cilindra-šešira”
Ω	– Poprečni presek “omega” oblika
U	– Poprečni presek U oblika
NAS	– Severnoamerički standard, ekvivalentno sa AISI S100
CUFSM	– Softver baziran na metodi konačnih traka
FSM	– Metoda konačnih traka
ESM	– Metoda efektivnog preseka
EAM	– Metoda efektivne širine
ECBL	– Pristup raščlanjavanja kritičnog opterećenja
ISFSM	– Izoparametarska metoda konačnih traka
EN 15512	– Evropskog standard za projektovanje paletnih skladišnih sistema

RMI	– Američki institut za proizvodnu regala
ISFSM	– Izoparametarska metoda konačnih traka
RMI	– Američki insitut za proizvodnju regala
P	– Korisno opterećenje podužnog nosača regala
M_x, M_y	– Momenti savijanja stuba regala
S 275	– Oznaka za konstruktivni čelik prema EN 10025-2
EN 10025-2	– Standard za označavanje čelika
N_{crx}, N_{cry}	– Kritična sila globalnog izvijanja oko osa x i y
$(N_{ocr})_1, (N_{ocr})_2$	– Kritična sila globalnog izvijanja oko glavnih osa 1 i 2
f_{oc}	– Kritičan napon globalnog izvijanja
A	– Površina poprečnog preseka
L	– Dužina pritisnutog elementa
b_{eff}	– Efektivna širina ploče
b	– Realna (fizička) širina ploče
λ_p	– Koeficijent vitkosti ploče
σ_{crl}	– Kritičan napon lokalnog izvijanja
f_y	– Napon na granici tečenja
k	– Koeficijent izvijanja ploče
E	– Modul elastičnosti materijala ($\approx 21000 \text{ kN/cm}^2$)
ν	– Poasonov koeficijent ($\approx 0,3$)
t	– Debljina ploče
N_{th}	– Teorijska vrednost kritične sile izvijanja
χ	– Koeficijent globalnog izvijanja elementa
λ_c	– Koeficijent izvijanja stuba
OSP	– Jednostepena procedura kod EWM
TSP	– Dvostepena procedura kod EWM
P_y	– Kritična pritisna sila stuba
M_{test}	– Moment nosača – eksperimentalno dobijena vrednost
EW	– Efektivna širina
N_{crg}	– Kritična vrednost sile nosača na globalno izvijanje
N_l	– Kritičan napon od kompresionog opterećenja
λ_l	– Koeficijent interakcije logalno-globslnog izvijanja (po DSM)
λ_d	– Krutost nosača
M_{cr}	– Kritičan moment izvijanja nosača
M_n	– Nominalna otpornost na savijanje
R_d	– Koeficijent redukcije momenta torzije
ϕ, Ω	– Koeficijenti otpornosti
n	– Broj uzoraka
P_m	– Profesionalni faktor
v_m	– Koeficijent varijacije
GBTUL	– Softver baziran na generalisanoj teoriji nosača - GBT
S	– Geometrijske veličine poprečnog preseka (A i W)
W	– Otporni moment površine
A, C_1 i C_2	– Imperfekcioni faktori
M_l	– Kritičan napon od fleksionog opterećenje
k_l	– Koeficijent lokalnog izvijanja
μ, η	– Bezdimenzioni faktori preseka (prema P.7a i P.7b)
N_{crd}	– Vrednost kompresione otpornosti stuba
W_{eff}	– Efektivni fleksioni modul poprečnog preseka
γ	– Parcijalni koeficijent otpornosti

M	– Srednja vrednost
SD	– Standardno odstupanje
X_M	– Srednja vrednost materijala
X_F	– Srednja vrednost uticaja izrade odnosno fabrikacije
X_P	– Srednja vrednost profesionalnog faktora
V_M	– Koeficijent varijacije materijala
V_F	– Koeficijent varijacije izrade odnosno fabrikacije
C_P	– Korelacioni faktor
V_P	– Koeficijent varijacije rezultata ispitivanja
β_0	– Indeks pouzdanosti
$w(x,y)$	– Funkcija ugiba ploče
D	– Savojna krutost ploče $\{=Eh^3/[12(1-\nu^2)]\}$
N	– Spoljašnje kompresiono opterećenje
N_x, N_y	– Ravanske biaksijalne sile ploče
N_{xy}	– Ravanska smičuća sila ploče
E_W	– Rad spoljašnjih sila
E_I	– Deformaciona energija ploče
E_T	– Ukupna energija ploče
$q(x,y)$	– Poprečno opterećenje ploče
a, b	– Dužina i širina ploče
δ	– Debljina ploče
a_1	– Širina elementa “1” (prema slici 8.2)
b_1	– Dimenzija na elementu “1” (prema slici 8.2)
c	– Širina otvora ploče
h	– Visina otvora ploče
d	– Prečnik otvora ploče
σ_x, σ_y	– Ravanski biaksijalni normalni naponi
σ_{xy}	– Ravanski smičući napon ploče
p, q	– Koordinate položaja otvora u odnosu na ploču
$N_1(y), N_2(y)$	– Konstantne komponente reakcijske sile
$N_1'(y), N_2'(y)$	– Linearne komponente reakcijske sile
$r_1 \dots 8$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9a
$s_1 \dots 4$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9a
$e_1 \dots 2$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9a
$t_1 \dots 2$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9a
$g_1 \dots 4$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9a
$M_1 \dots 4$	– Reakcijski momenti
P_n, Q_n	– Koeficijenti reakcijske sile
A_n, B_n, C_n, D_n	– Koeficijenti funkcije ugiba ploče
A_n', B_n', C_n', D_n'	– Modifikovani koeficijenti funkcije ugiba ploče (Prilog 9b)
$U(x,y)$	– Airy-eva funkcija napona
α_n	– Bezdimenzioni koeficijent
$\varepsilon_{mn}, \rho_{mn}, \varphi_{mn}, \omega_{mn}$	– Energetski koeficijenti dati sa (8.30) - (8.33)
λ_{mn}, μ_{mn}	– Energetski koeficijenti dati sa (8.35) i (8.36)
$I_{mn}, J_{mn}, K_{mn}, L_{mn}$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9c
$V_{mn}, W_{mn}, R_{mn}, T_{mn}$	– Koeficijenti dati u Prilogu 9c
k_{hole}	– Koeficijent izvijanja ploče sa otvorom
t	– Koeficijent osetljivosti
λ	– Koeficijent spoljašnjeg rada
TOSCA	– Neparametarski pristup optimizacije

1. UVOD

Naučno – tehnička dostignuća tokom XX veka su uticala na intenzivan industrijski razvoj, naročito posle II svetskog rata, kada dolazi do komercijalizacije savremenih tehnoloških inovacija. U tom ambijentu, uloga logistike se javlja kao neminovnost, a transportno-skladišni sistemi počinju da zauzimaju sve važnije mesto u lancu snabdevanja proizvodnih pogona sirovinama i potrošača gotovim proizvodima.

Značajni napredak logistike započinje sa procesom industrijalizacije ratom razorenih i nerazvijenih nacionalnih ekonomija, tokom 1950-tih godina. Krajem XX i početkom XXI veka, kada se intenzivno sprovodi globalizacija svetskog tržišta, menadžment logistike zauzima važno mesto u tom procesu i integrisan je sa različitim naučnim disciplinama.

U okviru lanaca snabdevanja, logistika omogućava optimizaciju proizvodnih i distributivnih procesa u pogledu maksimalnog iskorišćenja angažovanih resursa, unapređenja efikasnosti i konkurentnosti kompanija.

Razvoj logistike se može posmatrati kroz četiri perioda i to:

- Period do 1950. godine,
- Period od 1950 ÷ 1970. godine,
- Period od 1970 ÷ 1990. godine i
- Period posle 1990. godine.

Do sredine XX veka logistika je isključivo vezana za fenomen fizičke distribucije, a prvi logistički termini su se odnosili na transport i skladištenje. Značajniji napredak u razvoj teorije o logistici dao je Oskar Morgenstern u period nakon 1950. godine [1]. U tom periodu dolazi do intenzivnijeg širenja tržišta od strane kompanija, što je zahtevalo rešavanje problema zaštitnog pakovanja kroz upotrebu kontejnera i paleta. S druge strane, aktivnosti oko pakovanja su vezana za dodatna ulaganja što je uticalo na povećanje prodajne cene robe.

Nedostatak zaliha proizvoda na prodajnim mestima dovodi do povećanja konkurencije među prodavcima i rezultira iznalaženjem rešenja za eliminisanje diferencije. Redukcija troškova transporta dovodi do velikih zaliha, dok smanjenje zaliha dovodi do čestih nestašica proizvoda i destabilizacije tržišta.

U period od 1970 ÷ 1990. godine došlo je do značajnih promena prioriteta u logistici, a akcenat je stavljen na proces nabavke i snabdevanja, kao i na aktivnosti manipulisanja radi njihove integracije u logistički lanac.

Poslednjih nekoliko godina, svetska ekonomija se suočava sa rastom cene nafte što značajno utiče na povećanje troškova transporta. To je osnovni uzrok stvaranja većih zaliha i povećanja skladišnih troškova, čime se utiče na veće prodajne cene i slabiji nivo usluga u pogledu uskraćivanja mogućnosti potrošačima da biraju proizvode na pravom mestu, u pravo vreme i po primerenoj ceni.

Dva ključna segmenta logističkog lanca se odnose na transportni i skladišni sistem. Dosadašnja iskustva su pokazala da udeo transportnih troškova može iznositi do trećine ukupnih logističkih troškova, kao i da transportne aktivnosti u velikoj meri utiču na performanse logističkog sistema.

1.1. KONCEPT DISERTACIJE

Obrađena tema doktorske disertacije je multidisciplinarnog karakterima i u svojoj strukturi obuhvata dve naučne discipline: saobraćajnu i tehničko – mašinsku. Osnovni pristup koji je tretiran u ovoj disertaciji, omogućava uspostavljanje eksplicitne veze između ove dve naučne discipline, kako bih se na sveobuhvatan i sistematski način ispitale mogućnosti za poboljšanje performansi pojedinih komponenta logističkih sistema odnosno lanaca snabdevanja. U tom smislu, poseban akcenat je stavljen na istraživanje skladišnog sistema.

Struktura disertacije je koncipirana na dva nezavisna istraživanja, čija implementacija rezultata treba da omogući veću efikasnost funkcionisanja skladišnog prostora i veću konkurentnost proizvoda na tržištu, kroz redukciju troškova skladištenja odnosno ukupnih logističkih troškova.

U prvom delu disertacije (poglavlja 2, 3, 4 i 5) izloženo je istraživanje transportno-skladišnih procesa koji obezbeđuju funkcionisanje logističkog sistema odnosno lanca snabdevanja, kako bih se uspostavila uzročno-posledična veza između proizvodnje i potrošnje. S obzirom da je svrha transportno-skladišnih procesa prostorno, vremensko i kvantitativno usaglašavanje proizvodnje i potrošnje, upravljanje ovim procesima u pogledu snabdevanja potrošača je značajna aktivnost za maksimiziranje profita distributera i povećanje konkurentnosti proizvoda.

U drugom delu disertacije (poglavlja 6, 7, 8 i 9) fokus je stavljen na optimizaciju noseće strukture regalskog skladišta u cilju redukovanja investicionih troškova. Ovaj deo istraživanja je naročito značajan kod izgradnje tkz. samonosećih skladišta, gde je struktura regalske konstrukcije izložena dodatnom opterećenju. Projektovanje ovih tipova skladišta predstavlja trend u savremenim uslovima poslovanja, pošto kompanijama obezbeđuje visok stepen fleksibilnosti u pogledu njihove eksploatacije. Pozitivan efekat ove analize ogleđa se u boljoj nosivosti stubova regala (najopterećeniji element regala), optimalnoj nosivosti strukture regala i manjim investicionim ulaganjima.

U savremenim uslovima poslovanja, više nije cilj samo optimizacija postojeće transportno-skladišne infrastrukture, radi bolje iskorišćenosti kapaciteta transportnih-pretovarnih sredstava i skladišta, već se težište pomera ka optimalnom upravljanju resursima neophodnih za angažovanje logističkih aktivnosti. To znači da je neophodna optimizacija logističke infrastrukture, kako bi se minimizovali troškovi investicija bez smanjenja kvaliteta usluga i očekivanih zahteva tržišta.

1.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja disertacije je fokusiran na analizi transportnih i skladišnih procesa u okviru logističkog sistema, ispitujući mogućnosti za racionalizaciju investicionih i tekućih troškova infrastrukture u pogledu veće efikasnosti poslovanja kompanija. U tom pogledu, koncepcija disertacije je radi lakše analize definisana kroz dva segmenta istraživanja:

- Modeliranje transportnih i skladišnih procesa u okviru lanaca snabdevanja i
- Razvoj elemenata regala fleksibilnog skladišnog koncepta.

U prvoj fazi istraživanja, tretira se problematika transportnog, a naročito skladišnog sistema, kako bi se ukazalo na mogućnosti tehnoloških rezervi koje u sebi sadrže ove komponente logističkog sistema.

Transportni sistem je neizostavan deo lanca snabdevanja koga odlikuje izrazito dinamičan i stohastički proces. Upravljanje tokovima robe preko razvijenih modela, može se znatno uticati na ekonomičnost preduzeća koja se bave transportno-skladišnim aktivnostima. Pomenuti modeli upravljanja tokovima robe ne uzimaju u obzir jedan važan aspekt koji se odnosi na bezbednost saobraćaja. Naime, realizaciju transportnog procesa između dve unapred poznate lokacije primenom određenog transportnog sredstva, prati rizik od akcidentnih situacija koji može ugroziti planirani transport. Procena rizika transportnog sredstva od pojave akcidentnih situacija je još jedan segment u nizu koji upotpunjuje modele robnih tokova. Konkretno, u disertaciji je izložen model procene rizika kod železničkih vozila kada je uzrok akcidentnog odnosno vanrednog događaja iskliznuće voza. Ovakvi modeli se retko zastupljeni u literaturi, a značajni su što se preko funkcije verovatnoće mogu kvalitativno i kvantitativno identifikovati parametri koji izazivaju fenomen iskliznuća.

Skladišni sistem lanca snabdevanja obuhvata infrastrukturu i tehnološki proces opsluživanja. Ukupne troškove jednog skladišnog sistema čine investicioni i tekući troškovi. Investicioni troškovi se odnose na skladišnu infrastrukturu, dok tekući troškovi prate određene tehnološke procese skladištenja robe. Infrastrukturna oprema i procesi skladišnog sistema imaju za cilj da nadomeste prostorno-vremenske i kvantitativne razlike između proizvodnje i potrošnje. U okviru skladišnog sistema, disertacija je usmerena u dve specijalističke oblasti:

- Modeliranje nekonvencionalnog layout-a regalske opreme unutar skladišta i
- Dinamičko programiranje tokova i funkcionalnih površina skladišta.

U drugoj fazi istraživanja date disertacije, analiza je fokusirana na optimizaciju osnovnih elemenata regala (stubova i podužnih nosača) koji su montažno-demontažne konstrukcije. U ovom delu, disertacija na sistematski način daje pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti otvorenih tankozidnih perforiranih nosača izloženih izvicanju, kao i različite kvazianaličke i empirijske metode za procenu njihove nosivosti. Optimizacija perforiranih stubova i podužnih nosača različitih poprečnih preseka daje široke mogućnosti u pogledu racionalnog projektovanja regalskih konstrukcija. Ova aktivnost je omogućena na bazi numeričke simulacije zasnovane na metodi konačnih elemenata (FEM), primenom softvera ANSYS 12. Ovaj pristup optimizacije je u naučno-istraživačkim okvirima još uvek u razvoju, dok je u inženjerskoj praksi implementiran samo od strane specijalizovanih kompanija (uglavnom se odnosi na avio i automobilsku industriju).

1.3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Upravljanje tokovima i zalihama robe zahteva integralni pristup u planiranju i kontroli kroz sve faze lanca snabdevanja. Vremenska, prostorna i kvantitativna distanca između proizvođača na početku i potrošača na kraju lanca snabdevanja se balansira koordinacijom nivoa zaliha kako bih se maksimalno redukovali troškovi skladištenja i povećala efikasnost poslovanja kompanija. Tematiku koju tretira disertacija u literaturi je interpretirana kroz sledeće dve teme:

- ♦ Identifikacija transportno-skladišnih procesa i optimizacija parametara u cilju poboljšanja performansi logističkog sistema i
- ♦ Procena nosivosti pritisnutih perforiranih stubova regalskih skladišta primenom kvazianaličke, numeričke i eksperimentalne metode.

Vodeća literatura iz ovih oblasti istraživanja se odnose na sledeće međunarodne časopise (svi imaju IF): Europe Journal of Operational Research, Operations Research, IIE Transactions, Internacional Journal of Production Research, Econometrica, Management Science, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Naval Research Logistics (NRL), Applied Mathematical Modelling, Journal of Structural Engineering ASCE, Thin-Walled Structures, Engineering Structures i Journal of Construction Steel Research.

Dosadašnja istraživanja transportno-skladišnih sistema su uglavnom bila usmerena na parcijalno istraživanje usko specijalizovanih oblasti u okviru logističkog sistema. Da bi se identifikovali svi relevantni parametri u lancu snabdevanja, neophodno je logistički sistem posmatrati kao celinu, uzimajući u obzir specifičnost transportno-skladišnog sistema i uticaj spoljašnjih faktora. Razlozi za to leže u činjenici da ne postoji jedinstvena metodologija kojom bi se analizirali procesi logističkog sistema.

Noseća struktura regalskog skladišta je izložena složenom naprezanju. Osnovni element regala je perforirani stub, koji je usled pritiska podložen izvijanju (gubitku stabilnosti) i predstavlja najkritičniji element strukture. Iako su sprovedene brojne eksperimentalne i numeričke analize perforiranih stubova, ne postoji jedinstvena analitička procedura na bazi koje bi se definisala nosivost. Razvoj ove oblasti se beleži u zadnjih nekoliko godina, a ogleda se u uključivanju kvazianaličkih i empirijskih izraza u određene standarde. Na ovaj način je moguće izvršiti procenu nosivosti perforiranih stubova, bez mogućnosti da dođe do njegovog razaranja (loma). Međutim, ovi analitički pristupi ne omogućavaju optimizaciju preseka stubova, što je osnovni preduslov za racionalno projektovanje regalske strukture. U okviru ovog istraživanja je razvijen numerički optimizacioni algoritam, kojim se u znatnoj meri poboljšavaju performanse nosivosti i smanjuju troškovi ulaganja u izgradnji skladišta.

Ciljevi istraživanja disertacije su usmereni na teorijsku i praktičnu implementaciju sprovedenih istraživanja. Teorijski značaj doprinosi naučno-istraživačkom razvoju, a ogleda se u prezentovanju novih ili modifikovanih pristupa i procedura u simulaciji transportno-skladišnih procesa i optimalnom projektovanju infrastrukturne opreme regalskih skladišta.

Praktičan značaj ima za cilj da simulacione modele implementira u konkretne aktivnosti vezane za povećanje efikasnosti poslovanja kompanija i veću konkurentnost njihovih proizvoda na tržištu.

1.4. STRUKTURA DISERTACIJE

U skladu sa postavljenim ciljevima disertacije, sprovedena istraživanja su prezentovana kroz deset poglavlja.

U prvom poglavlju je definisan koncept disertacije u okviru kojeg su izloženi predmet i cilj istraživanja. Identifikovan je metodološki pristup koji će biti realizovan kroz dve nezavisne faze studije. Definisana je struktura disertacije i osnovni elementi istraživačkog procesa.

U drugom poglavlju su definisani elementi logističkog sistema i njihov značaj u savremenim uslovima poslovanja, sa posebnim akcentom na transportno-skladišne procese. Uloga distributivnih procesa u logističkom lancu se manifestuje fizičkom distribucijom robe preko odgovarajućih kanala povezujući proizvodnju i potrošnji. Distributivna aktivnost pozitivno utiče na smanjenje obima logističkih usluga uz veći kvalitet ponude na tržištu.

Treće poglavlje se odnosi na specifične transportno-skladišne procese logističkog sistema. Definisan je model procene rizika od iskliznuća voza i data je implementacija sofisticiranog sistema ACCELLOS One za obavljanje skladišnih operacija.

U četvrtom poglavlju je tretirana problematika nekonvencionalnih layout-a skladišta. Konstantovan je izvestan tehnološki potencijal njihove aplikacije koja iznose oko 20 % u odnosu na tradicionalna rešenja. Praktična primena je potvrdila iznete teorijske rezultate.

Dinamičko programiranje funkcionalnih površina i tokova skladišta je obrađeno u okviru petog poglavlja. Značaj ovog pristupa se ogleda u uzimanju spoljašnjeg uticaja (nabavke i plasmana robe na tržištu) na unutrašnju strukturu skladišta (funkcionalne površine i tokove robe). Ovaj koncept skladišta omogućava analizu u okviru integralnog logističkog sistema.

U šestom poglavlju je na sveobuhvatan i sistematski način izvršen pregled dosadašnjih istraživanja u domenu strukturne analize regalskog skladišta. Analizirane su teorijske, numeričke i eksperimentalne metode, kao i odgovarajuće procedure definisane standardima.

U sedmom poglavlju su izloženi osnovni modaliteti izvijanja stubova odnosno nosača regala. Definisane su metode i standardne procedure koje se odnose na projektovanje regala.

Osmo poglavlje obuhvata matematičku identifikaciju uticajnih parametara pritisnute perforirane ploče. Analiza je bazirana na energetskej metodi i obuhvata različite oblike otvora (proreza). Date su preporuke za projektovanje vitkih perforiranih elemenata u zavisnosti od koeficijenta izvijanja ploče.

U devetom poglavlju je izvršena optimizacija poprečnih preseka stubova i nosača koji su tipičnog oblika za različite konstrukcije regala. Optimizacioni postupak je sproveden primenom numeričkog postupka koristeći softverski paket ANSYS 12.

U desetom poglavlju su definisani zaključci i predloženi pravci daljeg istraživanja u skladu sa identifikovanim uticajnim parametrima u projektovanju i upravljanju skladišnim sistemima.

Na kraju disertacije, dat je popis korišćene literature i prikazani su prilozi.

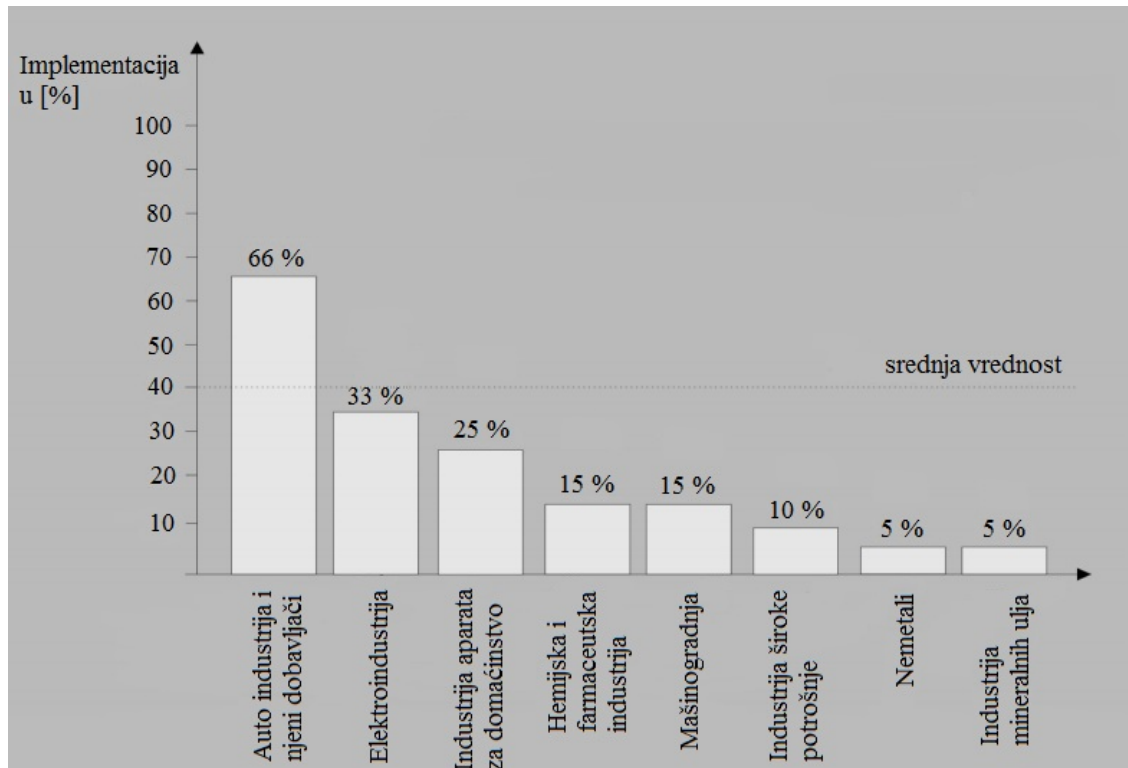
2. LOGISTIČKI SISTEM

Logistika je multidisciplinarna oblast koja obuhvata aktivnosti oblikovanja, planiranja, usmeravanja, projektovanja, upravljanja i kontrole u svim procesima kretanja robe, energije i informacija kroz različite celine sistema. U poslednje vreme, logistika ima sve značajniju stratešku ulogu u organizovanju aktivnosti koje prate promene na tržištu i integrisana je u okviru lanaca snabdevanja.

Sedamdesetih godina prošloga veka uočene su značajne tehnološke rezerve u procesima transporta, skladištenja, pretovara, pakovanja i drugim logističkim procesima čiji je osnovni cilj realizacija tokova robe u svim fazama, počev od pripreme proizvodnje do konačne potrošnje proizvedenih dobara. Pomenuti procesi imaju veliki značaj sa aspekta manipulativnih aktivnosti robe i troškova.

Logistički sistemi su kompleksne celine koje obuhvataju više podsistema, strukturnih elemenata, procesa, kao i aktivnosti sa nizom vertikalnih, horizontalnih i dijagonalnih veza. Egzistiraju kao podsistemi nekog hijerarhijski višeg privrednog sistema, dok između učesnika u logističkom lancu se odvijaju fizički, vrednosni i informativni tokovi. Zadatak logistike je realizacija monitoringa, prikupljanja i analiza svih procesa koji na direktan ili indirektan način imaju veze sa stanjem proizvoda na tržištu. Logistički sistem obuhvata logistiku usluga, infrastrukturne resurse i informacioni sistem, pa se shodno ovome definišu uže logističke discipline, kao što je proizvodna logistika, informacioni logistički sistemi i dr.

U uslovima kada potražnja stagnira, a asortiman proizvoda raste sve je važnije proizvoditi robu koja je prethodno naručena i isporučivati je u što kraćem roku uz redukciju troškova proizvodnje i isporuke. Debalans rasta produktivnosti proizvodnih procesa i logističkog sistema je jedan od glavnih uzroka usporavanja celokupnog reproduktivnog procesa (produktivnost proizvodnog procesa je oko deset puta veća od produktivnosti logističkog sistema). Pokazatelj ove činjenice govori da je udeo logističkih troškova relativno veliki u odnosu na ukupne troškove i to za sve privredne grane (Slika 2.1). Razlozi koji utiču na povećanje logističkih troškova posledica su razvoja novih proizvoda, uvođenja novih tehnologija, permanentnog povećanja produktivnosti proizvodnje, povećanja vrednosti u robnim tokovima, skraćanja vremena isporuke i zahteva za kvalitetnijom uslugom isporuke. Razvoj proizvodnog sistema inicira snižavanje proizvodnih troškova i uvođenje novih proizvoda. Između proizvodnih i logističkih troškova postoji reciprocitet, što znači da smanjenje proizvodnih troškova prati određeno povećanje logističkih troškova i obratno. Uzroci koji utiču na povećanje logističkih troškova karakteristični su za proces ukupnjavanja mase kapitala. Ova činjenica diktira odnos logističkih i proizvodnih troškova koji u USA ima odnos (60:40) %, dok je u zapadnoevropskim zemljama taj odnos (40:60) %.



Slika 2.1. Učešće troškova logistike u ukpnim troškovima kompanije

2.1. ELEMENTI LOGISTIČKOG SISTEMA

Logistički sistem se sastoji iz više podsistema: pakovanja, unutrašnjeg transporta, pretovara, skladištenja i spoljašnjeg transporta, a koje karakteriše međusobna funkcionalna zavisnost. U logističkim sistemima se pojavljuju i određeni tokovi, kao što su robni, informacioni i finansijski.

Logistički posistemi i odgovarajući tokovi čine integralni logistički sistem koji obuhvata:

- Nabavku (obezbeđuje neophodne resurse definisane procesom planiranja),
- Proizvodnju (proces transformacije resursa u gotove proizvode) i
- Distribuciju (proces koji povezuje proizvodnju i potrošnju, a odnosi se na niz aktivnosti u vezi sa kretanjem i skladištenjem robe između centara snabdevanja i tražnje).

U nastavku ovog materijala date su osnovne postavke pojedinih logističkih podsistema sa fokusom na transportno-skladišne procese. U tom pogledu, transportni proces je obrađen kroz održivi transport primenom bimodalne tehnologije (Ro-La) i sa aspekta procene bezbednosti železničkog saobraćaja usled iskliznuća voza.

Procesi i infrastrukturni resursi kod skladišnog sistema su identifikovani kao parametri sa znatnom tehnološkom rezervom, što je razlog da se najveći deo ove disertacije posveti tom problemu.

2.1.1. PODSISTEM PAKOVANJA

Podsistem pakovanja logističkog sistema je karakterističan za robe komadnog tipa, a treba da obezbedi pouzdane uslove transporta i skladištenja do njegove primopredaje potrošaču odnosno krajnjem korisniku. Generalno, primarne funkcije pakovanja se mogu svrstati u sledeće četiri grupe:

- ♦ Proizvodna funkcija,
- ♦ Marketinška funkcija,
- ♦ Upotrebna funkcija i
- ♦ Logistička funkcija.

Proizvodna funkcija pakovanja se ogleda u integralnoj isporuci proizvodnoj kompaniji nekog poluproizvoda od strane dobavljača, zajedno sa svim komponentama neophodnim za njegovu ugradnju u finalni proizvod. Ovo je pogodno za proizvodnu kompaniju koja vrši finalizaciju proizvoda, pošto naručivanjem određenog poluproizvoda rešava i pitanje ostalih elemenata koji su potrebni za njegovu ugradnju (npr. zavrtnjevi i sl.). Ova pogodnost je naročito izražena kod većih nabavki, što utiče na smanjenje troškova proizvodnih kompanija.

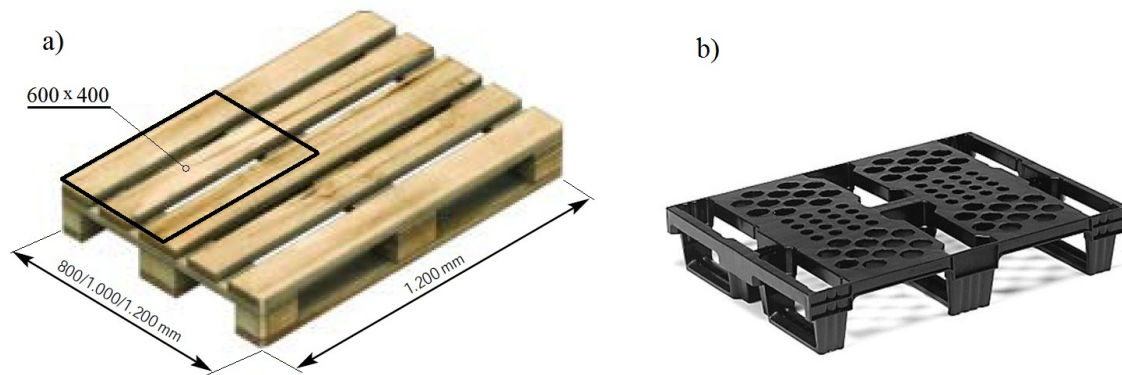
Marketinšku funkciju pakovanje realizuje zahvaljujući neposrednom komunikacijom sa kupcem. Ovo treba shvatiti u smislu devize da ambalaža prodaje proizvod. Naime, ako imamo dva proizvoda istih kvantitativno-kvalitativnih karakteristika i različitih ambalaža, kupci se najčešće odlučuju za proizvod sa atraktivnijim pakovanjem. Osim toga, preko informacija na ambalaži, kupcima se daju informacije o performansama proizvoda, a često se pažnja usmerava na karakteristike firme, obavljajući time ulogu marketinga.

Upotrebna funkcija pakovanja se odnosi na mogućnost korišćenja ambalaže za namene koje nisu u vezi sa kupljenim proizvodom. Ovo se može ilustrovati na primeru dva proizvoda istih kvalitativno-kvantitativnih karakteristika i iste cene, upakovane u različite ambalaže (npr. u kanticu i PVC kesu). Prednosti ima prvi proizvod (koji je upakovan u kanticu), pošto se ona nakon upotrebe proizvoda može koristiti za neku namenu, nevezano za kupljeni proizvod.

Logistička funkcija pakovanja se ogleda u sledećim sekundarnim funkcijama:

- Optimalno iskorišćenje prostora,
- Stabilno i bezbedno slaganje robe,
- Zaštita proizvoda od rastura i uticaja okoline,
- Zaštita okoline od sadržaja pakovanja agresivnog sadržaja,
- Efikasno manipulisanje pri transportu, skladištenju i pretovaru,
- Minimizovanje eventualnih šteta na proizvodu usled transporta i
- Smanjenje praznih hodova.

Posebna specifičnost pakovanja se odnosi na primenu modularnog sistema koji se razvio iz potrebe boljeg iskorišćenja transportnog i skladišnog prostora. Istraživanja su pokazala da je optimalna osnovica modula sa dimenzijama 600×400 mm, koja omogućava njihovo slaganje u jedinstvenu celinu odnosno paletu (Slika 2.2). Zanimljivo je da odnos dimenzija osnovice modula ($600/400 = 1,5$) približno jednak Fibonačijevom broju (ovaj broj je iracionalan) $\phi = 1,618...$



Slika 2.2. Tipovi paleta: a) drvena-otvorenog tipa i b) plastična (PP i PE)

Fizička distribucija i odgovarajući tokovi robe koji treba da međusobno usklade vremensko-prostornu distancu između proizvođača i potrošača, uslovljavaju sa tehnoloških aspekata ispunjavnije sledeći logističkih funkcija pakovanja:

- Zaštitnu (fizička zaštita proizvoda i okoline od proizvoda),
- Skladišnu (u pogledu iskorišćenja skladišnog prostora),
- Manipulativnu (rukovanje robom radi pretovara i ukрупnjavanja skladišnih jedinica),
- Transportnu (reprezentuje tok robe od proizvođača do potrošača) i
- Informacionu (informacije koje se odnose na manipulisanje, transport, skladištenje i dr.).

2.1.2. PODSISTEM UNUTRAŠNJEG TRANSPORT

Podsistem unutrašnjeg transporta logističkog sistema je karakterističan za transport robe na kraća rastojanja odnosno unutar pogona proizvodnih ili prometnih kompanija u cilju odvijanja tehnološkog procesa. U tom pogledu, unutrašnji transport je specifičan vid transporta koji se javlja u kompanijama:

- ✧ Proizvodne delatnosti – proizvodnim pogonima (gde su sredstva unutrašnjeg transporta direktno uključena u proizvodni process i najčešće su kontinualnog tipa, poput transportnih traka, konvejera i sl.),
- ✧ Prometne delatnosti – skladišta (radi obavljanja pretovarnih aktivnosti u cilju uskladištenja i iskladištenja robe, a uglavnom se ove operacije odvijaju cikličnim sredstvima mehanizacije, kao što su dizalice, viljuškari i dr.).

Uloga unutrašnjeg transporta je da omogući:

- Optimalno angažovanje sredstava (redukovanje transportnih troškova i praznih hodova, visok stepen funkcionalnosti i vremenske iskorišćenosti),
- Visok stepen usluge (kratko vreme transporta i čekanja na operaciju pretovara),
- Visoka fleksibilnost (širok asortiman proizvoda za transport i laka prilagodljivost različitom proizvodnom okruženju) i
- Visoku transparentnost (nosilac informacija o pokazateljima trenutnog stanja).

Da bi ciljevi unutrašnjeg transporta bili realizovani, potrebno je sprovesti mere koje tretiraju:

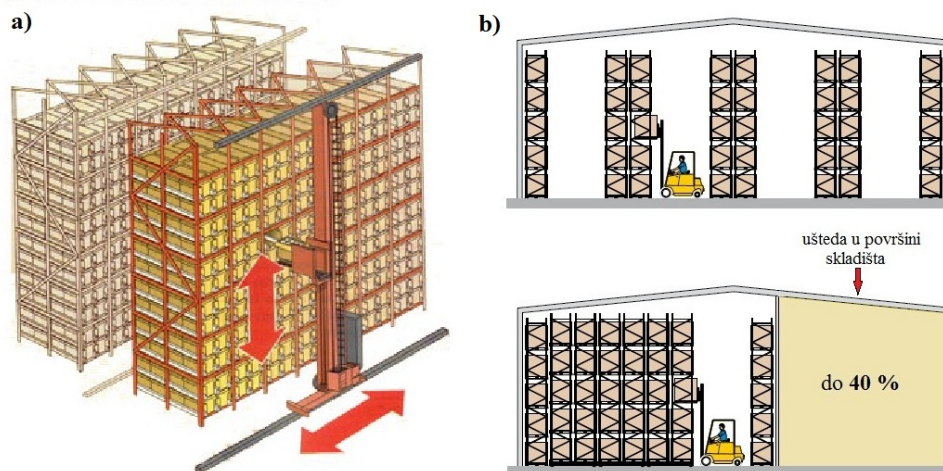
- Dugoročno planiranje sredstava unutrašnjeg transporta i razvoj odgovarajućih strategija na bazi dispozicije transportnih podataka,
- Kratkoročna dispozicija sredstava unutrašnjeg transporta na bazi aktuelnih podataka, raspoređivanje transportnih naloga pojedinim realizatorima i mere za preduzimanje u slučaju nepredvidljivih situacija i
- Operativna realizacija transportnih zadataka i dostavljanje podataka o realizaciji.

Podsistem unutrašnjeg transporta je čvrsto spregnut u lancu logističkih aktivnosti (utovara i istovara) između procesa spoljašnjeg transporta i skladištenja (Slika 2.4). Zato se sistem unutrašnjeg transporta, može tretirati kao specijalni vid transportne delatnosti koji je isključivo vezana za pretovarne i skladišne aktivnosti. Sredstva unutrašnjeg transporta se generalno mogu podeliti na kontinualna (sa neprekidnim radom) i ciklična (sa prekidnim radom). Izbor ovih sredstava se vrši na osnovu karakteristika i obima poslova koji obavljaju (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Podela transportnih sredstava prema tipu proizvodnje

Korišćena transportna sredstva	Princip radnog mesta	Princip radionice	Princip proizvoda
	Pojedinačna proizvodnja	Serijska proizvodnja	Masovna proizvodnja
	Podni transporter		
		Dizalice	
			Kontinualni transporter
			Broj komada →

Automatizovan sistem rada (AR/RS) skladišta i pokretni regali značajno utiče na povećanje skladišnog prostora i redukciju vremena opsluživanja (Slika 2.3).

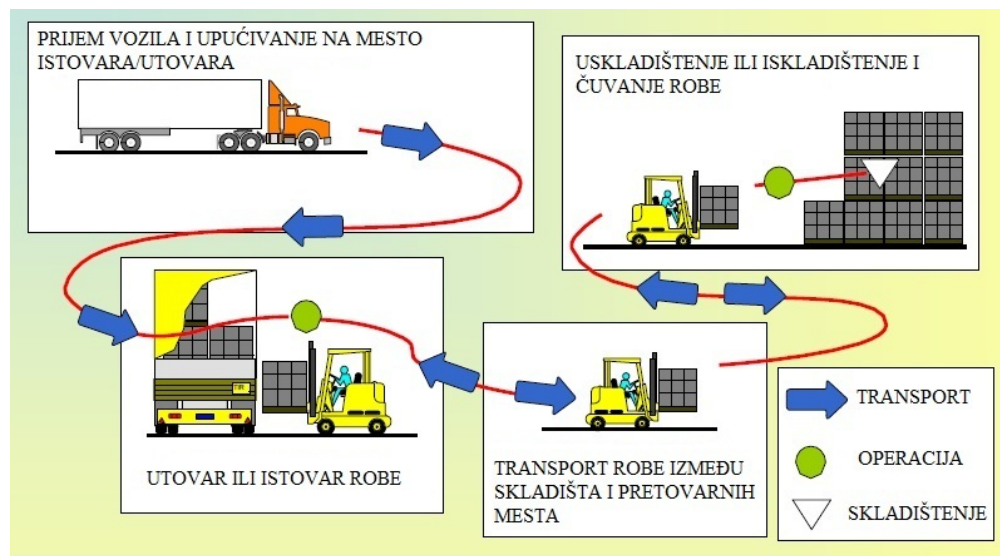


Slika 2.3. Opsluživanje skladišta: a) AS/RS i b) viljuškarom kod fiksnih i pokretnih regala

2.1.3. PODSISTEM PRETOVARA

Podsistem pretovara logističkog sistema je koncipiran integrisanjem skladišnog i transportnog podsistema. Pretovar robe je sastavni deo transportnog lanca i pojavljuje se u svim fazama procesa reprodukcije kada roba treba da se distribuira sa jednog sredstva na drugo u fazi proizvodnje, transporta ili skladištenja. Pretovarno-transportne operacije se javljaju kao međufazne aktivnosti između spoljašnjeg i unutrašnjeg transporta u obliku utovara, pretovara i istovara robe.

Pretovar je strukturni element svakog proizvodnog, transportnog i skladišnog sistema. Pretovar se može definisati kao poseban vid transporta i predstavlja tehnološki proces gde su dve osnovne manipulativne aktivnosti utovar i istovar integrisane u neprekidni proces. To znači da je pretovar ekvivalentan sa operacijom istovara iz jednog i utovara u drugo vozilo, bilo da se odvija neposredno ili posredno preko skladišta. Pretovarne aktivnosti (utovar i istovar robe) su deo logističkog lanca i predstavljaju spregu između spoljašnjeg i unutrašnjeg transporta odnosno unutrašnjeg transporta i skladišta (Slika 2.4).



Slika 2.4. Uloga unutrašnjeg transporta u operaciji pretovara

Generalno, u pretovarnim procesima su identifikovane sledeće tehnološke aktivnosti:

- ◆ Istovar transportnog sredstva,
- ◆ Transport robe od mesta istovara do skladišta,
- ◆ Uskladištenje robe,
- ◆ Čuvanje odnosno privremeno zadržavanje robe u skladištu,
- ◆ Iskladištenje robe,
- ◆ Transport robe od mesta iskladištenja do zone utovara i
- ◆ Utovar robe u transportna sredstva.

U okviru pretovarnog procesa se mogu realizovati i niz drugih aktivnosti kao što su:

- Sortiranje robe,
- Direktno pretovar sa jednog na drugo transportno sredstvo,
- Konsolidacija robe,
- Ukupnjavanje manipulativnih jedinica i
- Kvantitativna kontrola robe i dr.

U zavisnosti od stepena mehanizovanosti tehnološkog procesa, pretovar može biti:

- Ručni,
- Polumehanizovani,
- Mehanizovani i
- Automatizovani.

2.1.4. PODSISTEM SPOLJAŠNJEG TRANSPORTA

Podsistem spoljnog transporta logističkog sistema je u funkcionalnoj povezanosti sa podsistemom skladištenja, sobzirom da je početak i završetak transportnih procesa uglavnom vezan za skladištenje robe. Izuzetak predstavlja just-in-time (JIT) koncepcija koja obezbeđuje direktnu povezanost transportnih aktivnosti sa proizvodnim procesom, bez posrednog učestvovanja skladišnog podsistema. Sinhronizovane operacije transportnog i proizvodnog procesa zahtevaju samo zaštitni nivo zaliha. Osnovni tipovi ovog vida transporta su kategorisani prema vrsti transportnih sredstva pomoću kojih se realizuje spoljašnji transport i obuhvataju:

- * Drumski saobraćaj,
- * Železnički saobraćaj,
- * Vodni saobraćaj,
- * Vazdušni saobraćaj i
- * Cevni saobraćaj.

U ovom razmatranju, fokus će se skoncentrisati na komparativne prednosti železničkog transporta u odnosu na drumski, koje se ogledaju u sledećem:

- ✓ Omogućava prevoz različite robe (komadnog, rastresitog i dr.),
- ✓ Daje mogućnost transporta robe velikih gabarita (npr. generatora elektrana i sl.),
- ✓ Velika količina prevezene robe po jednom ciklusu,
- ✓ Pogodan je za prevoz na veće daljine,
- ✓ Ekonomičan je za prevoz robe velike specifične težine (gustine) čija je vrednost po jedinici mase mala (npr. rude, drvene mase, poljoprivrednih proizvoda i sl.),
- ✓ Pogodnost sa ekološkog aspekta (minimalan uticaj na zagađenje životne sredine) i
- ✓ Ima potencijale za realizaciju održivog transporta i razvoja.

U savremenom privrednom okruženju, udeo železničkog transporta je u permanentnom padu u odnosu na ostale vidove transporta. Tendencija smanjenja udela železničkog saobraćaja uglavnom ide u prilog povećanja drumskog i delimično vazdušnog saobraćaja. Razlozi za ovakvo trenutno stanje u domenu transporta se nalaze u sledećim činjenicama:

- ⇒ Relativna nedostupnost (zbog nedovoljno razvijene infrastrukture),
- ⇒ Neophodno je angažovanje drumskih vozila za prevoz od proizvođača ili skladišta do utovarne stanice, sprovođenje dodatnih manipulativnih radnji oko pretovara, što utiče na dodatne troškove i povećava verovatnoću od oštećenja robe,
- ⇒ Vreme transporta je duže u odnosu na drumski saobraćaj (u Severnoj Americi, Japanu i Zapadnoevropskim zemljama prosečna brzina transporta iznosi oko 100 km/h, dok je u mnogim zemljama ograničena na oko 30 km/h) i
- ⇒ Dodatni troškovi oko klasifikacije robe, raščlanavanje i razdvajanje železničkih kompozicija.

Primena bimodalnog koncepta transporta omogućava da se minimizuju transportni troškovi, time što će se između početne i krajnje destinacije koristiti kombinovani vid transporta (drumski i železnički), kako bih se maksimalno iskoristile njihove prednosti. Iz ovog koncepta je razvijena tehnologija Ro-La (Road-Rail-Road) koja je zasnovana na primeni specijalnih niskopodnih plato vagona tipa Sadkkms (Slika 2.5).



Slika 2.5. Tehnologija bimodalnog transporta Ro-La

Odlike ovog načina transporta su prevashodno u niskoj ceni multimodalne tehnologije terminala i znatno niži pretovarni troškovi. Nedostaci koji se odnose na FIFO pretovarnu tehnologiju, velike težine praznih plato vagona i specijalnih uslova održavanja točkova vagona u znatnoj meri ograničavaju mogućnosti i potiskuju ovu tehnologiju iz primene.

Nedostaci Ro-La vagona su nadomešćeni MODALOHR modalnom tehnologijom. Ovaj sistem se odlikuje kratkim vremenom pretovara, vagoni su pouzdani u prevozu, skuplji su od Ro-La vagona, ali imaju manju taru i troškove održavanja, dok je cena specijalizovanog terminala umerena (veća od Ro-La koncepta, ali manja od terminala za vertikalni pretovar).



Slika 2.6. Tehnologija bimodalnog transporta tipa MEGASWING

Najnovija multimodalna tehnologija transporta je zasnovana na sistemu MEGASWING (Slika 2.6). Ovaj sistem je zasnovan na specijalizovanim železničkim vagonima sa horizontalnom autonomijom pretovara i odlikuje ga niska cena terminala sa velikim mogućnostima prerade multimodalnih jedinica-kamionskih poluprikolica. Ovi tipovi vagona su još uvek u fazi razvoja, zbog specifičnog longitudinalnog napreznja garnitura od čijih istraživanja zavisi i cena.

Kriterijumi za izbor transportnog sredstva od strane korisnika saobraćajnih usluga se mogu definisati preko sledećih parametara:

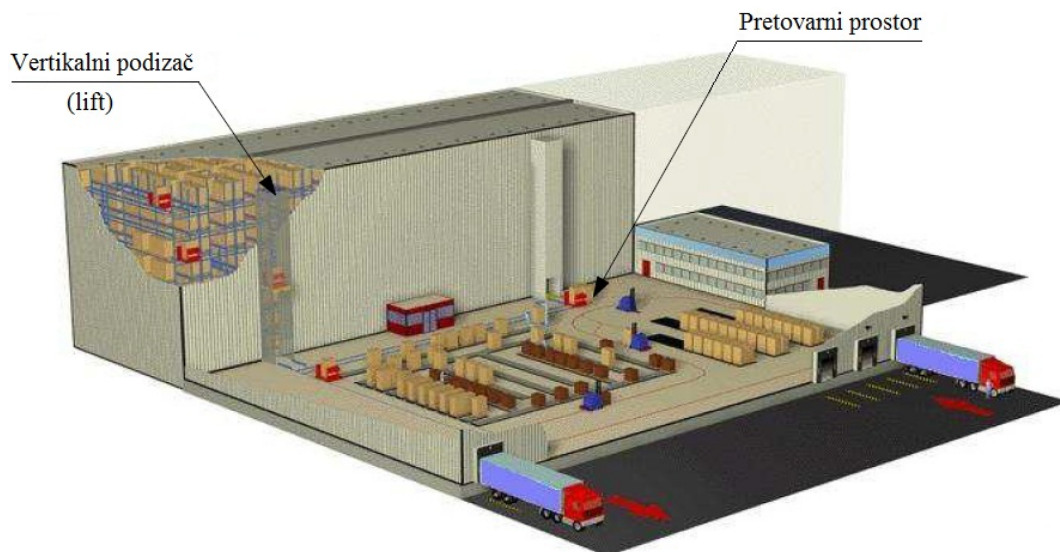
- ✧ Cena prevoza robe,
- ✧ Brzina izvršenja usluge transporta,
- ✧ Kvalitet i kontinualnost prevoza, elastičnost i stepen prilagođavanja potrebama korisnika,
- ✧ Stepenn bezbednosti prevoza i
- ✧ Vrsta robe.

2.1.5. PODSISTEM SKLADIŠTENJA

Podsistem skladištenja logističkog sistema ima funkciju čuvanja zaliha u cilju sinhronizacije procesa koji prethode i koji će se realizovati nakon skladištenja robe. Osnovna uloga skladišta se ogleda u vremenskom, prostornom i kvantitativnom usaglašavanju proizvodnih aktivnosti i potražnje od strane tržišta za određenom vrstom robe, uz minimizovanje pratećih troškova i podizanju kvaliteta usluga. Tipičan izgled skladišta odnosno distributivnog centra snabdevanja je prikazan na slici 2.7. Razlikuju se tri vrste skladišta:

- Distributivna,
- Proizvodna i
- Ugovorna.

Dobra se od dobavljača (proizvođača ili drugih distributivnih centara u lancu snabdevanja) do posmatranog skladišta dopremaju transportnim sredstvima (kamionima ili vozovima), koja se prihvata preko prijemne rampe.



Slika 2.7. Visokoregalno skladište sa pretovarnim frontom (tovarnim prostorom)

2.2. PROCES DISTRIBUCIJE ROBE

Distribucija robe predstavlja proces koji povezuje proizvodnju i potrošnju, a ukazuje na skup aktivnosti u vezi sa transportom i skladištenjem robe od centara snabdevanja do centara tražnje, u okviru lanaca snabdevanja. Posebna komponenta distributivnog procesa je fizička distribucija robe koja se realizuje kroz faze upravljanja, prenosa i čuvanja robe od mesta njenog nastanka do mesta potrošnje preko različitih kanala distribucije. Fizička distribucija robe obuhvata procese kao što su: kontrola zaliha, upravljanje materijalom, zaštita upakovane robe, naručivanje robe, transport, izbor mesta skladištenja, skladištenje i dr. Značaj distribucije robe najbolje ilustruje podatak da se njeno učešće u ceni proizvoda kreće do 50 % i da iznosi oko 20 % bruto društvenog proizvoda [1].

Cilj distribucije je stvaranje uslova u pogledu dostupnosti robe potrošačima radi zadovoljenja njihovih potreba. Distributivni proces treba da omogući sledeće uslove:

- Redukovanje distance između proizvodnje i potrošnje,
- Prostorno, vremensko i kvantitativno usklađivanje proizvodnje i potrošnje,
- Usmeravanje proizvodnje prema potrebama potrošnje,
- Kontinualnu cirkulaciju robe,
- Delovanje na plasman novih proizvoda i
- Uticaj na promenu potrošačkih navika i zaštitu interesa potrošača.

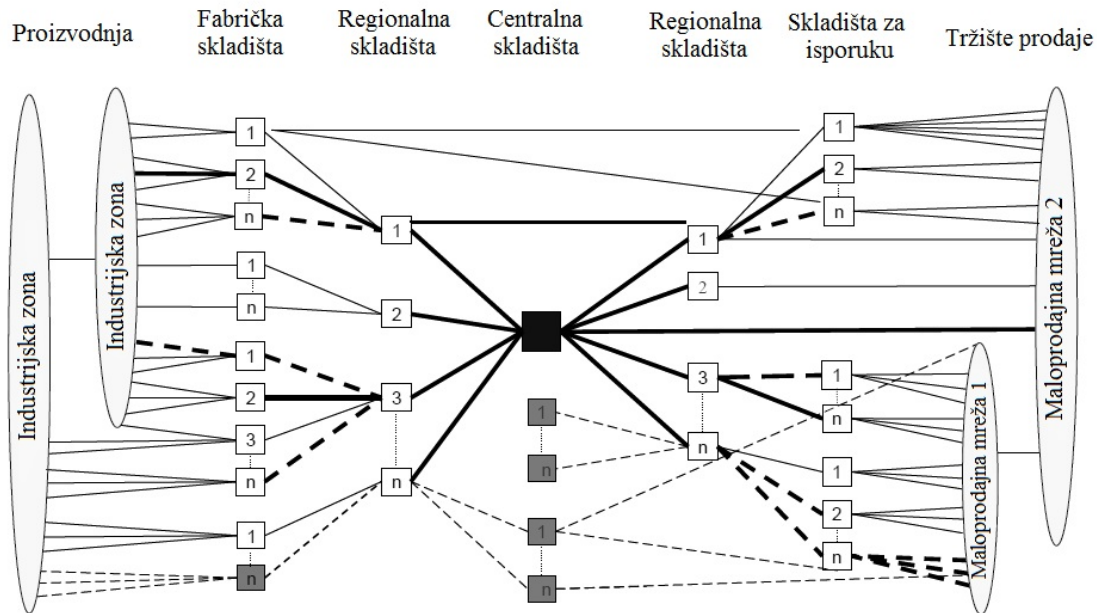
U okviru distributivnih aktivnosti kao integralnog procesa prometa i kretanja robe do potrošača, posebno se ističe fenomen fizičke distribucije. Proces fizičke distribucije robe se odnosi na niz kompleksnih aktivnosti koje omogućavaju dopremanje sirovina do proizvodnih pogona odnosno gotovih proizvoda od proizvođača do potrošača, pod najpovoljnijim uslovima transporta. Iako fizička distribucija reprezentuje tok robe koji se realizuje zahvaljujući transportu, ne treba zanemariti ni ulogu skladištenja čija je funkcija upravljanje zalihama.

Ovaj stav opravdava činjenica da je učešće transportnih i skladišnih troškova dominantno u odnosu na ukupne troškove logističkog sistema. U nerazvijenim zemljama ovi troškovi mogu iznositi do polovine prodajne cene, kod zemalja u tranziciji se kreću oko 25 %, dok su u razvijenim zemljama limitirani na 8 %. Veliko učešće ovih troškova nepovoljno se odražava na sve učesnike u lancu snabdevanja, a najviše pogađa proizvođače i potrošače. Sa ovog stanovišta, proces fizičke distribucije robe se može posmatrati sa aspekta:

- ◇ Proizvođača odnosno potrošača robe i
- ◇ Ostalih učesnika transportno-skladišnih aktivnosti u lancu snabdevanja.

Fizička distribucija sa aspekta proizvođača robe je značajna u pogledu upravljanja zalihama radi blagovremene nabavke potrebnih sirovina i normalnog odvijanja proizvodnog procesa. Hijerarhijsku strukturu jednog sistema za distribuciju određuje broj, lokacijski položaj, stepen centralizacije i tehnološko-prostorna povezanost strukturnih elemenata (Slika 2.8). Strukturu distributivnog sistema moguće je raščlaniti u vertikalnom i horizontalnom pravcu.

Vertikalnim raščlanjivanjem dobija se broj hijerarhijskih nivoa distribucije (broj distributivnih centara odnosno skladišta) i njihova tehnološka, organizaciona i informatička povezanost, dok se raščlanjavanjem u horizontalnom pravcu utvrđuje broj učesnika i njihova povezanost na jednom nivou distribucije (opsluživanje klijenata iz skladišta za isporuku i skladištenje proizvoda u proizvodnim skladištima).

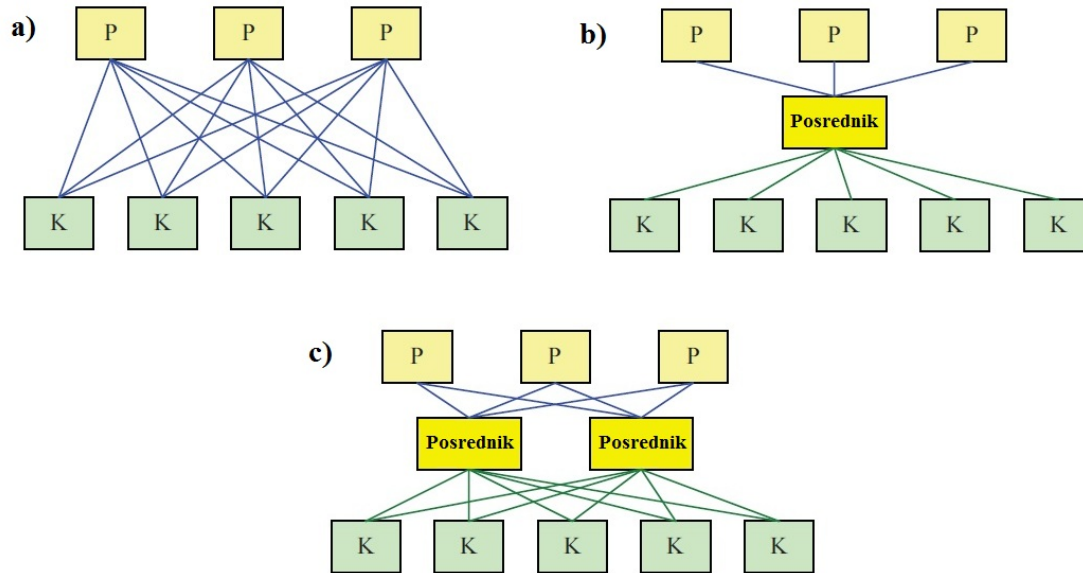


Slika 2.8. Hijerarhijska struktura distributivnog sistema

Distributivni kanali obezbeđuju tokove robe između proizvodnje i potrošnje. Broj i karakter posrednika u kanalima distribucije određen je potrebom za stvaranje adekvatnog prodajnog asortimana u distributivnom lancu i postizanje određenog ekonomskog učinka. Funkcije kanala distribucije obuhvataju:

- Zadržavanje određenog asortimana robe (postojanje zaliha),
- Zadovoljavanje uslova koje diktira potražnja odnosno potražnja,
- Fizičku distribuciju robe,
- Postprodajno usluživanje i
- Finansijsko zatvaranje ciklusa.

Savremeni tokovi robe imaju tendenciju povećanja posredničke delatnosti u lancu između proizvođača i potrošača. Osnovni razlozi za ovakav trend u distributivnoj mreži snabdevanja nalaze se u činjenici za efikasnije prostorno i vremensko povezivanje proizvodnih lokacija sa destinacijama potrošnje odnosno krajnjih korisnika. Osim toga, pozitivna uloga distributerskih posrednika ogleda se u obezbeđivanju zaliha u distributivnoj mreži, koja treba da eliminiše ili redukuje kvantitativne neusaglašenosti proizvodnih aktivnosti i zahteva potražnje, kao i da ublaži dinamičke tržišne promene. Distributerske kompanije su specijalizovane za obavljanje ovih aktivnosti i imaju za cilj da redukuju broj prometnih transakcija, minimizujući pritom troškove distribucije robe odnosno ukupne logističke troškove. Efikasnost transakcije u sferi razmene su u direktnoj zavisnosti od broja posrednika, za dati broj proizvođača i potrošača (kupaca), što je ilustrovano na slici 2.9.



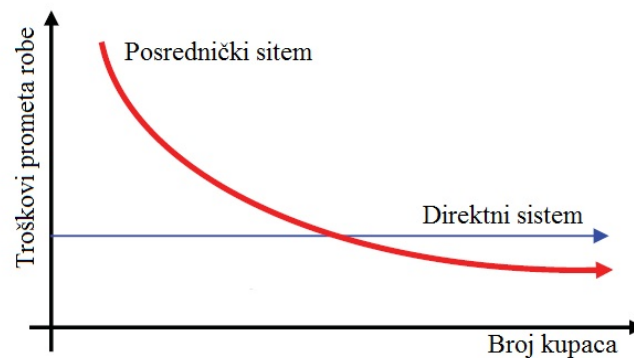
Slika 2.9. Transakcije u procesu distribucije: a) bez, b) sa jednim i c) sa dva posrednika

Ako broj proizvođača određenog asortimana proizvoda označimo sa P i korespondentni broj potrošača (kupaca) sa K , tada je mogući broj transakcija N dat sa:

$$N = P \times K \quad (2.1)$$

Broj transakcija N između svakog proizvođača i potrošača u slučaju kada nemamo posrednika (Slika 2.9a) iznosi 15 ($P \times K = 5 \times 3$) od ukupno mogućih 15 transakcija. Ukoliko između proizvođača i potrošača postoji posrednik (Slika 2.9b), broj transakcija u interakciji između proizvođača i posrednika iznosi 3 od ukupno 8 u odnosu na kupca. Ako u distributivnom lancu postoje dva posrednika (Slika 2.9c), broj transakcija proizvođača u odnosu na posrednika iznosi 6 od ukupno mogućih 16 posmatrano u odnosu na kupca.

Pored ovoga, sistem posrednika u distributivnom lancu je naročito karakterističan za poslovanje kod razvijenih tržišta. Mala tržišta sa ovog aspekta nemaju povoljan ekonomski ambijent zbog visokih troškova koji prate angažovanje distributera (Slika 2.10).



Slika 2.10. Troškovi prometa robe za direktni i posrednički sistem distribucije

3. UPRAVLJANJE TRANSPORTNIM I SKLADIŠNIM PROCESIMA

Transportno-skladišni proces predstavlja niz integralnih aktivnosti u upravljanju tokovima robe kroz logistički lanac između proizvođača i potrošača. Pomenute aktivnosti se odnose na planiranje, organizovanje, rukovođenje, kontrolu i nadzor tokova robe između sfere proizvodnje i potrošnje. Dobra se od dobavljača (proizvođača ili drugih distributivnih centara u lancu snabdevanja) do posmatranog skladišta dopremaju transportnim sredstvima (kamionima ili vozovima), koja se prihvata preko prijemne rampe (Slika 2.7).

Funkcije skladišta koje su definisali Bartholdi i Hackman obuhvata sledeće aktivnosti [2]:

- Konsolidacija proizvoda radi redukovanja transportnih troškova i boljih usluga potrošača,
- Realizacija ekonomije obima u proizvodnji ili nabavci robe,
- Obezbeđivanje procesa dodatne vrednosti skladišnih jedinica i
- Redukcija vremenskog reagovanja odnosno odziva skladišta od strane potrošača.

Efikasnost distributivne mreže u velikoj meri zavisi od operacija u čvorištima sistema odnosno skladištima. U tom smislu, značajno mesto zauzimaju inovacije skladišnih tehnologija implementirane u poslednje dve decenije. Skladišta su ključna tačka u lancu snabdevanja, imaju ulogu u formiranju asortimana proizvoda i utiču na efikasnost transportnih tokova. Skladišta odnosno distributivni centri imaju veoma važnu ulogu u lancu snabdevanja kompanija, kako bih se u izvesnoj meri distancirala ponuda od potražnje i time amortizovale nagle dinamičke promene na tržištu.

Savremni distributivni centri sve više predstavljaju dislocirane logističke pogone kompanija u kojima se obavljaju delom i proizvodne odnosno aktivnosti dodatne vrednosti, poput montaže, pakovanja, kontrole, obeležavanja i dr. Time se proizvodne kompanije rasterećuju navedenih aktivnosti, dok se one obavljaju u okviru skladišta. Cilj je da se postigne maksimalna efikasnost proizvodnih kompanija i skladišta, kako bih cena tih proizvoda bila konkurentna na tržištu. Savremene tendencije dvotaktnog sistema proizvodnje, skladištima dodeljuju dodatnu ulogu koja se odnosi na tkz. aktivnosti dodatne vrednosti. Jedan od preduslova uspešnog funkcionisanja takvih skladišta je njihova automatizacija, kako bi se minimizovali operativni troškovi i povećala brzina odziva na specifične zahteve. Najjednostavniji automatizovan sistem skladištenja uveden je tokom 1960-ih, za opsluživanje individualnih skladišnih jedinica, a u literaturi je poznat pod nazivom sistem automatskog skladištenja i pronalaženja (AS/RS). U zadnjih 15-tak godina razvijeni su AS/RS koji omogućavaju složenije zahteve skladištenja i redoslednog prikupljanja, više skladišnih jedinica u toku jednog ciklusa, za skladišta sa širokim asortimanom artikala.

U cilju projektovanja, planiranja rada i upravljanja automatizovanim sistemom skladištenja neophodni su odgovarajući algoritmi odnosno modeli. Softverski modeli obezbeđuju redosled grupisanja, alokaciju do određene skladišne pozicije i odlaganje, instrukcije o redosledu prikupljanja, vremensko sinhronizovanje tokova unutar i između funkcionalnih oblasti skladišta, definisanje trasa u procesu komisioniranja robe i planiranje pošiljke.

Odluku o ovim i sličnim pitanjima odgovor daje istraživačka zajednica kroz brojna istraživanja. Cilj kompanija je maksimizovanje profita što se postiže masovnom proizvodnjom i distribucijom velike količine dobara u minimalnom vremenu intervalu, uz angažovanje minimalnih resursa i skladišnog prostora, zadržavajući visok nivo usluga. Od načina upravljanja distributivnim centrima, zavisi efikasnost celokupnog lanca snabdevanja, a logistički troškovi na cenu proizvoda imaju isti uticaj kao i troškovi proizvodnje.

U kontekstu logističkih troškova, dva najvažnija aspekta koja treba detaljno istražiti su: planiranje i organizovanje procesa upravljanja skladišta i optimalna alokacija proizvoda. Strategija alokacije proizvoda utiče na gotovo sve performanse distributivnih centara (vreme potrebno za dopremanje, skladištenje i prikupljanje skladišnih jedinica, produktivnost, potreban prostor skladištenja i sl.), a u velikoj meri zavisi od layout-a odnosno konfiguracije rasporeda skladišnih regala.

Na bazi prethodnog, jasno se vidi da za optimalno projektovanje skladišta postoji dosta ograničenja koja moraju biti uzeta u obzir. Jedno od karakterističnih ograničenja odnosi se na palete sa proizvodima koje moraju biti alocirane u slotovima jedna pored druge. Proizvodi koji su najtraženiji moraju biti raspoređeni najbliže zoni deponovanja (P&D tački) u cilju redukovanja transportnih puteva i troškova energije odnosno smanjenja ukupnih logističkih troškova. U pogledu redukcije broja proizvoda kojim se manipuliše u okviru skladišta, sprovodi se grupisanje po klasama. Dva proizvoda pripadaju istoj klasi ako imaju iste karakteristike.

Matematičko modeliranje proizvodnih tokova distributivnog centra (skladišta) zahteva analizu ponude i potražnje određenih proizvoda u posmatranim vremenskim intervalima, na bazi čega se definišu optimalne karakteristike. Procedura optimizacije skladišta podrazumeva rešavanje kombinovanih problema koji se odnose najpre na globalnu poziciju skladišta u sistemu lanca snabdevanja, a zatim i na parametre samog distributivnog centra. Osnovne veličine koje su predmet optimizacije skladišta tiču se veličine pojedinih funkcionalnih površina odnosno ukupnog kapaciteta skladišta, skladišnih tokova između pojedinih funkcionalnih oblasti skladišta kao i konfiguracije layout-a podržane od strane odgovarajuće skladišne strategije.

Literatura koja razmatra skladišne tehnologije obično tretira problem analize skladišta sa jednog od navedenih aspekta. Postupak nalaženja optimalnog oblika layout-a, minimizujući konstruktivne odnosno troškove izgradnje skladišta, kao i troškove manipulativnog opsluživanja, izložen je od strane Roll i Rosenbaltt [3]. U poređnom analizom različitih tipova layout-a skladišta, zaključeno je da su troškovi koji utiču na izbor optimalne konfiguracije regalske opreme u funkciji obima skladišta i manipulativnih aktivnosti skladišnih jedinica [4]. Konzistentnu pretpostavku o indeferentnosti površine skladišta na izbor layout-a izložio je Francis kroz studiju [5]. Problem veličine skladišta je razmatran od strane White i Francis kroz studiju [6], u okviru koje se tretiraju troškovi izgradnje pod pretpostavkom da su proporcionalni veličini skladišta. U okviru iste studije je izvršena procena troškova skladištenja u slučaju redukcije raspoloživog skladišnog prostora.

Prema istraživanju datom od strane Rosenbaltt i Roll [7], ukupni troškovi skladišta su klasifikovani u tri grupe, a odnose se na veličinu skladišta, konfiguracije regala i strategiju skladištenja. Rešavanje problema zahteva minimizaciju funkcije cilja koja matematički interpretira ukupne troškove [8].

Skladište se odlikuje sledećim karakteristikama:

- Organizacijom,
- Procesima i
- Resursima.

Aktivnosti koje se sprovode nad skladišnim jedinicama u okviru skladišnog prostora klasifikuju se kao procesi. Da bi se navedeni procesi realizovali neophodno je angažovanje skladišnih resursa koji se odnose na sredstva opsluživanja i kadrovske potencijale skladišta. Organizacija uključuje mehanizam upravljanja, a obuhvata planiranje i kontrolu procesa skladišnog sistema.

Sa aspekta robnih tokova, funkcije skladišta treba da obezbede:

- ♦ Kontinuirano snabdevanje proizvodnih ili potrošačkih delatnosti određenom količinom robe, propisanog kvaliteta i uz minimalne troškove skladištenja i
- ♦ Adekvatno upravljanje uskladištenim proizvodima (čuvanje od rastura, kvara, loma, kaliranja i dr.).

U zavisnosti od funkcija koju obavljaju skladišta se mogu podeliti na:

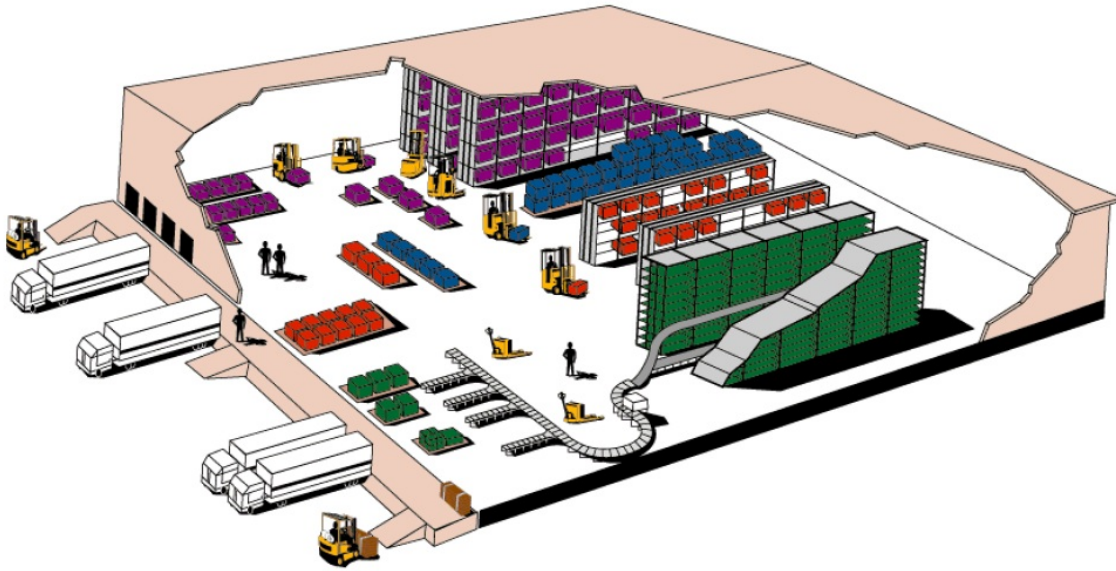
- Skladišta zaliha,
- Skladišta obrta (tranzitni terminali) i
- Skladišta dekompozicije.

Skladišni sistem kao deo logističkog lanca snabdevanja obuhvata:

- Procese koji se odvijaju u skladištu,
- Robu koja se skladišti i njene karakteristike,
- Vrstu skladišnih objekata i
- Skladišnu opremu.

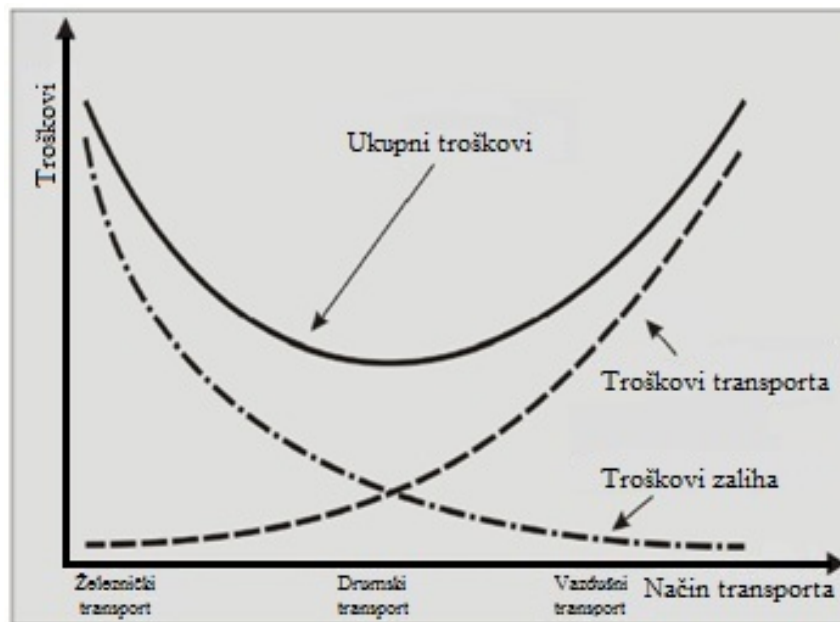
Podsistemi skladišnog sistema su funkcionalne povezane celine u okviru kojih se realizuje prijem, predaja, čuvanje i otprema robe. Najjednostavniji tipovi skladišta odlikuju tri karakteristična procesa: prijem, čuvanje (skladištenje) i otprema. Savremeni uslovi poslovanja i organizacije zahtevaju primenu kompleksnih skladišta koja karakterišu složeniji procesi, primenu različitih tehnologija skladištenja i komisioniranja, a česte su aktivnosti koje se odnose na procese prerade ili dorade proizvoda unutar skladišta (Slika 3.1).

Konvencionalno poboljšanje logističkog procesa je najčešće fokusirano samo na jedan element sistema. Međutim, sa gledišta makro nivoa logistički sistem je integralni deo društvene zajednice i čvrsto je spregnut sa društveno-političkim trendovima u svetu. To se očigledno može pokazati na jednostavnom primeru koji pokazuje zavisnost transportnih troškova od različitih modaliteta transporta (Slika 3.2). Ukoliko razmatramo izbor optimalnog vida transporta od transportnih i skladišnih troškova, to je samo jedan element logističkog sistema koji smo uzeli u obzir i rezultati takve odluke su ograničenog karaktera.



Slika 3.1. Vizuelizacija skladišnih procesa

Konkretno, minimalni troškovi transporta su za železnički transport, dok su istovremeno troškovi zaliha maksimalni (ovaj vid transporta karakteriše mala brzina prevoza velike količine robe). Nasuprot ovome, kod vazdušnog saobraćaja transportni troškovi su veliki, dok su troškovi zaliha minimalni (ovaj vid transporta odlikuje brz prevoz relativno male količine robe). Na bazi krivih koje reprezentuju troškove transporta i zaliha može se definisati kriva ukupnih troškova, čiji minimum pokazuje da optimalni modalitet odgovara drumskom transportu.



Slika 3.2. Udeo troškova transporta i zaliha u ukupnim troškovima

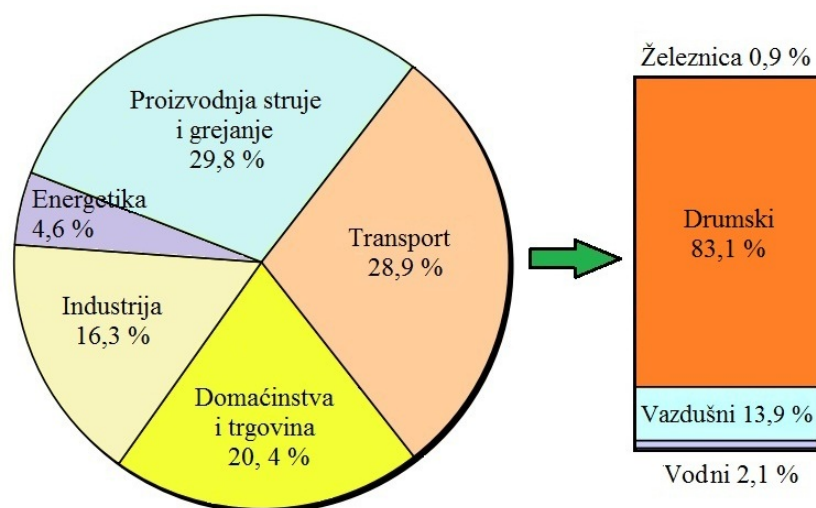
3.1. KONCEPT ODRŽIVOG TRANSPORTA

Održivi transport je aspekt globalne održivosti koji podrazumeva zadovoljenje egzistencijalnih potreba sadašnjice bez mogućnosti ugrožavanja budućih generacija za zadovoljenje istih. Održivi transportni sistem se odnosi na koncept upravljanja koji ispunjava sledeće uslove:

- ✘ Omogućava bezbednu realizaciju transporta bez štetnog uticaja na životnu sredinu i razvoj budućih generacija,
- ✘ Ekonomski održiv razvoj i
- ✘ Redukuje emisiju štetnih gasova, minimizira potrošnju neobnovljivih izvora energije, a potrošnju obnovljivih resursa ograničava na nivo održive proizvodnje (Slika 3.3).

Osnova koncepta održivog razvoja predstavlja iznalaženje optimalnih parametara balansa između ekonomskih, ekoloških i društvenih ciljeva u pogledu njihove harmonizacije. Na bazi ovoga su identifikovane tri osnovne komponente održivog razvoja.

- ◆ Ekonomski rast,
- ◆ Zaštita životne sredine i
- ◆ Socijalna jednakost.



Slika 3.3. Učešće u emisiji CO₂ za EU (prema Eurostat-u)

Strategija održivog transporta se manifestuje delovanjem sa sledećih aspekata:

- Unapređenje transportnih sredstava (poboljšanje konvencionalne tehnologije transportnih sredstava i uvođenje novih tehnoloških rešenja),
- Unapređenje odvijanja transporta (konvencionalne metode upravljanja i regulisanja saobraćaja, integralni transportni sistemi, edukacija vozača, bolja logistika i organizacija prevoza),
- Menadžment transportnih zahteva (unapređenje vidovne raspodele, supstitucija putovanja, politika cena i prostorno planiranje),
- Stvaranje integrisanog transportnog sistema,
- Efikasna infrastruktura i
- Pojačanje uloge državnih, regionalnih i lokalnih vlasti u upravljanju saobraćajem.

Tehnološka poboljšanja se odnose na:

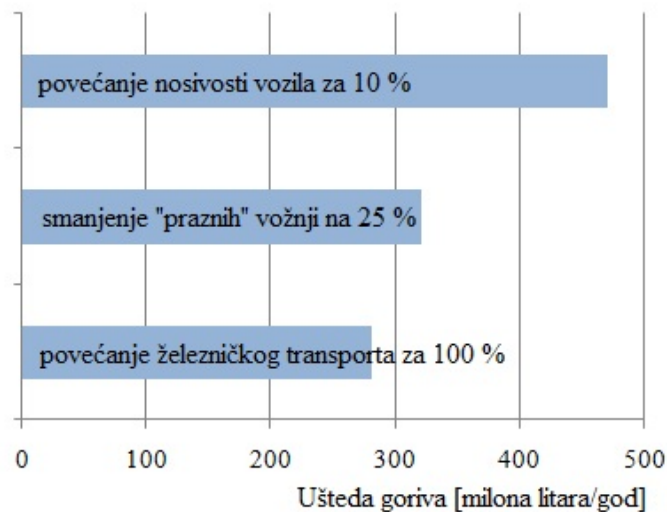
- Promene karakteristike motora,
- Povećanje aerodinamičnosti,
- Upotreba čistijeg goriva (TNG, biogas, električna energija i sl.) i
- Konstrukciju tovarnog prostora (Slika 3.4).



Slika 3.4. Povećanje tovarnog prostora kod transportnih sredstava

Efikasnosti funkcionisanja saobraćaja na nivou drumskog teretnog transporta se odnose na:

- ♦ Poboljšanje obuke vozača (može se redukovati potrošnja goriva i do 15 %),
- ♦ Povećanje stepena iskorišćenja vozila u povratnim vožnjama,
- ♦ Eliminisanje ili redukcija "praznih" vožnji (Slika 3.5) i
- ♦ Efikasno planiranje transportnih procesa (primena softvera u praćenju i iznalaženju najpovoljnije odnosno najkraće rute kretanja).



Slika 3.5. Mogućnosti za uštede energije u okviru koncepta održivog transporta

Implementacija održivog transporta je generalno spregnuta sa problematikom održivog razvoja i mora se postupno realizovati kroz globalni i lokalni nivo delovanja. Globalni nivo obuhvata stvaranje odgovarajućeg pravnog odnosno ekonomskog okvira i podsticanjem dobrovoljnih inicijativa, a odnose se na privredne grane nacionalne ekonomije. Lokalni nivo se odnosi na transportna preduzeća i delovanje koje treba usmeriti ka njima je bazirano na poboljšanju poslovanja, tj. povećanja profita.

3.2. PROCENA RIZIKA OD ISKLIZNUĆA VOZA

Modernizacija i poboljšanje efikasnosti železničkog transporta se odvija paralelno sa ekonomskim prosperitetom i predstavlja važan element privređivanja razvijenih i zemalja u razvoju. Razvojem brzih pruga, železnica je postala glavni konkurent drumskom saobraćaju, koji je krajem XX veka zauzimao primat u procesu transporta. Pozitivni rezultati koji su evidentni kod putničkog saobraćaja na brzim prugama, ukazuje da će se u budućnosti znatno intenzivirati učešće teretnog transporta, povećavajući ukupnu frekventnost železničkog saobraćaja. U takvim uslovim intenzivne eksploatacije, ključnu ulogu igra sigurnost transporta i upravljanje rizikom. Praksa je dosada dovoljno puta pokazala da akcidente na železnici često prate ljudske žrtve kao i znatna direktna i indirektna materijalna šteta. Otuda i značaj za upravljanjem rizikom sa posebnim osvrtom na pojavu iskliznuća voza. U okviru ovoga razmatranja, pažnja će biti usmerena na fenomen koji zauzima značajno mesto u ukupnom broju akcidenata, detektujući brojne uticajne faktore koji utiču na proces iskliznuća iz šina.

Identifikacija uticaja i procena rizika od iskliznuća voza, u poslednjoj deceniji je predmet brojnih istraživanja, ukazujući time na značaj i aktuelnost ove oblasti železničkog saobraćaja. Upravljanje rizikom, kao i kvalitativno-kvantitativnu procenu rizika nije moguće sprovesti bez poznavanja mehanizma i monitoringa fenomena iskliznuća. Studije [9-13] analiziraju mehanizam iskliznuća sa aspekta odnosa vertikalnog opterećenja i bočne sile, ukazujući na njihovu zavisnost od stanja i uslova kontakta točka i šine. Stanje šinskih vozila i koloseka se uvrđuje monitoringom po unapred definisanoj proceduri [14-15]. Pojava akcidenata se može generalno svrstati u nezgode nastale isključivo kao posledica ljudskog faktora i akcidentne događaje uzrokovane narušavanjem tehničke funkcionalnosti šinskih vozila odnosno tehnološkog procesa prevoza opasnih materija.

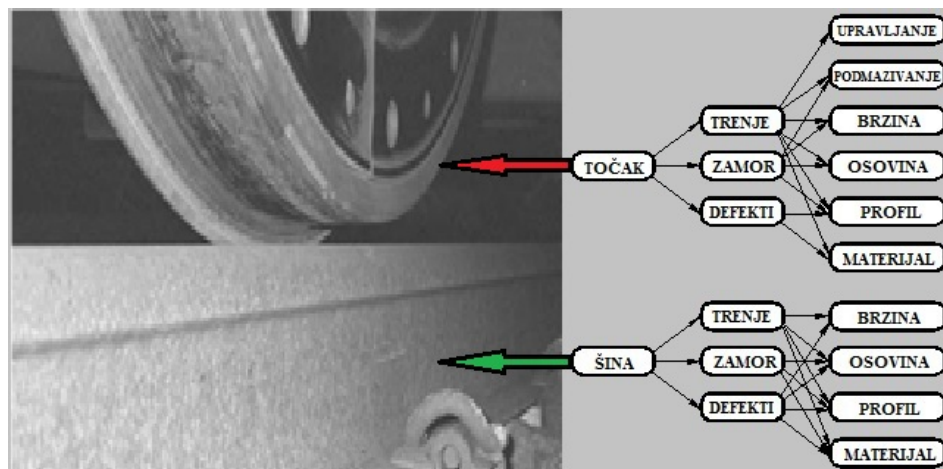
Železnica je najefikasniji vid transporta za prevoz opasnih materija na većim razdaljinama (najčešće vagon-cisternama). U tim situacijama, osnovna dilema koja se postavlja u vezi toga, tiče se veličine transporta odnosno broja vagona u kompoziciji. Transport veće količine robe koja se odnosi na jednu isporuku, podrazumeva i veću verovatnoću da će doći do akcidenta [16]. Zato je proces upravljanja i procene rizika u železničkom saobraćaju [17-18] važan činilac ne samo za efikasnosti ovog vida transporta, već i za globalni sistem u okviru distributivnih lanaca snabdevanja [19-22].

3.2.1. UZROCI ISKLIZNUĆA VOZA

Od samog nastanka železnice problem iskliznuća voza je bio i ostao glavni problem koji ugrožava sigurnost ovog vida transporta. Intenzivan razvoj železničke tehnologije u poslednjih desetak godina, značajno je doprineo povećanju ne samo efikasnosti, već i sigurnosti transporta, ali i pored toga ne mogu se izbeći akcidentni događaji vezani za iskliznuće voza. To ukazuje na veoma kompleksan mehanizam koji prati fenomen iskliznuća voza. Do iskliznuća na železnici dolazi usled gubitka bočnog vođenja između točka i šine, koji nastaje kada se javi jedan od navedenih slučajeva:

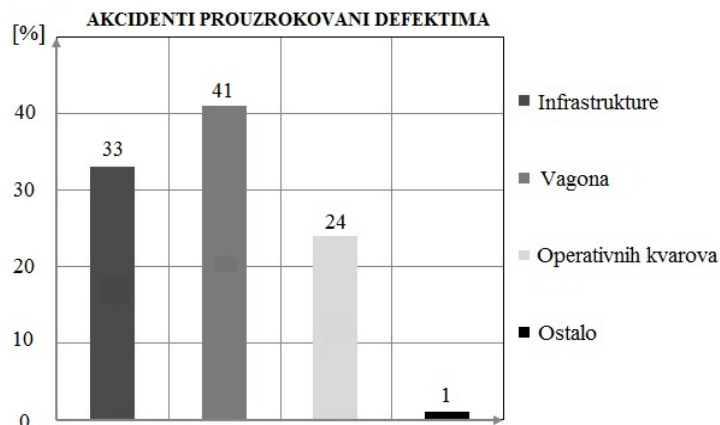
- ♦ Penjanje oboda točka na šinu,
- ♦ Proširenje koloseka,
- ♦ Bočna deformacija šine i
- ♦ Ravansko pomeranje pruge.

Prema dosada sprovedenim istraživanjima, osnovni parametar koji dovodi do iskliznuća voza je nepovoljni odnos vertikalne i bočne sile (Y/Q) [11]. U tom smislu, parametri koji utiču na iskliznuće voza obuhvataju: maksimalni kontaktni ugao i dužina oboda točka, efekat koničnosti usled bočne nestabilnost šinskog vozila, odstupanje širine železničkog koloseka, pozicija kontakta točka i šine, neusaglašenost odnosa točak-šina na upravljivost obrtnog postolja i nivo bočnih sila, različit radijus kotrljanja dva točka iste osovine, habanje gazeće zone točka, habanje oboda točkova inicirajući znatno bočno pomeranje osovinskog sklopa i redukovanje efikasnosti kontakta točak-šina u krivinama. Detaljne studije su pokazale da do iskliznuća ne dolazi samo od dejstvu jednog uticajnog parametra, već kao posledica njihove interakcije u zoni kontakta točka i šine, prema slici 3.4 [11, 22].



Slika 3.4. Uticajni degradacioni faktori u kontaktu točak-šina

Učešće uzročnika na iskliznuće voza u sistemu vagon-kolosek, prikazani su na slici 3.5. Glavni uzroci iskliznuća usled infrastrukturnih nedostataka su: prekomerna promena širine koloseka, prekomerno uvijanje koloseka, izvijanje šina pod uticajem toplote, defekti šina i dr. Kvalitet vertikalne geometrije koloseka i njegovo ponašanje pod dejstvom vertikalnog opterećenja je u direktnoj zavisnosti od krutosti podloge [23]. Dominantni faktori koji su potencijalna opasnost od iskliznuća šinskog vozila su defekti osovinskog sklopa (točka i osovine) i obrtnog postolja. Operaciona oštećenja se uglavnom javljaju usled nejednako raspoređenog tereta na vagonu, što inicira oštećenja ključnih sklopova šinskog vozila.



Slika 3.5. Generalni uzroci iskliznuća voza

3.2.2. UPRAVLJANJE RIZIKOM

U poslednjih nekoliko godina, vodeće svetske železnice su se okrenule disciplini upravljanja rizikom u cilju poboljšanja bezbednosti odnosno smanjenju potencijalnih rizika od akcidenata. Rizik može biti definisan preko kvalitativne i kvantitativne komponente. Rizik je kvalitativno potencijalan gubitak dobara i ljudstva koji može nastati usled izloženosti opasnostima [24]. Sa distance [25], rizik se kvantitativno definiše kao skup scenarija S_i , svaki sa svojom učestalošću pojave odnosno verovatnoćom p_i , čiju realizaciju prate odgovarajuće posledice C_i . Proces upravljanja rizikom zahteva redovno praćenje i kontrolu, naročito kod dinamičkih sistema (kao što je železnički saobraćaj).

Proces upravljanja rizikom može se podeliti u dve međusobno povezane faze: procenu rizika i kontrolu rizika. Procena rizika obuhvta: identifikaciju, analizu i prioritete. Kontrola rizika obuhvta: planiranje, smanjenje uticaja i monitoring. Polazna faza u upravljanju rizikom je plan kao rezultat prethodnih iskustava i analiza, kojim se utiče na smanjenje ili ublažavanje potencijalnih uzročnika akcidenta. Permanentnim praćenjem stanja se identifikuju uticajni parametri potencijalnih akcidenata, vrši se njihova statistička obrada u cilju kvantitativne i kvalitativne analize i određuju se prioritete delovanja u narednom ciklusu monitoringa (Slika 3.6).

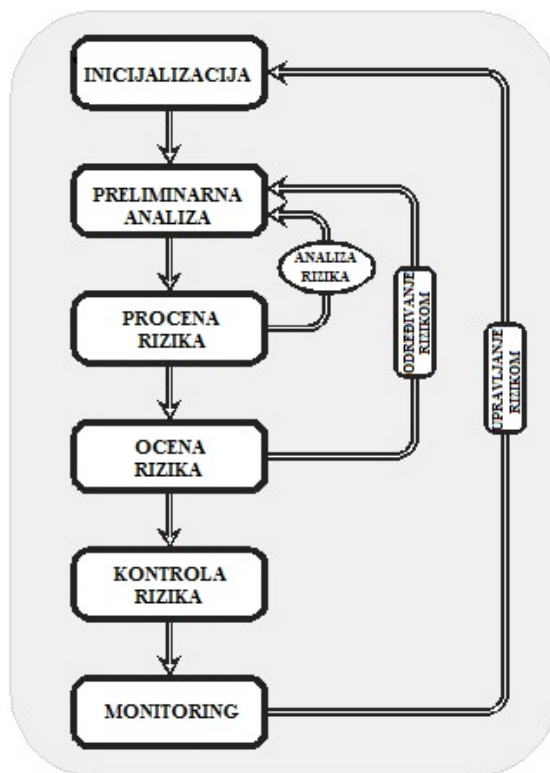


Slika 3.6. Proces upravljanja rizikom

Uspešno upravljanje rizikom zahteva da svi elementi koji koincidiraju sa fazama sistema budu funkcionalno organizovani kako bi imali priliku da daju adekvatnu informaciju o razvoju događaja tokom procesa. Analiza rizika podrazumeva procenu učestalosti od slučajnih događaja i dejstvo njihovih posledica. Cilj upravljanja rizikom zasniva se najpre na identifikaciju uzročnih faktora pojave akcidenta, a zatim ako je moguće, na njihovom potpunom eliminisanju ili ublažavanju štetnog dejstva. Procena rizika od pojave akcidenta je okvirno, stohastička analiza koja obuhvata sledeće aktivnosti:

- Snimanje stohastičke promene i dekompozicija radi analize procene rizika,
- Formiranje stohastičko-dinamičkog modela kojim će se simulirati određena pojava,
- Razvoj odgovarajućih kognitivnih modela koji uključuju ljudski faktor (ako je neophodno),
- Sprovođenje različitih aktivnosti ocenjivanja, prema određenim kriterijumima i
- Validaciju upotrebljivosti procenjenog rizika.

Kod procene rizika, pored individualnog razmatranja opasnosti, posebno je značajna kumulativna analiza kada pojava nekog rizika lančano može dovesti do nesreća većih razmera. Upravljanje i procena rizika je dinamički iterativni proces koji zahteva konstantnu analizu, praćenje i ocenu stanja preko povratne sprege u cilju smanjenja mogućnosti pojave akcidentnih događaja (Slika 3.7).



Slika 3.7. Proces odlučivanja u sistemu upravljanja rizikom Q850 [17]

Izloženost riziku RE se određuje kao:

$$RE = P \times C \quad (3.1)$$

Gde je:

P – verovatnoća da će doći do rizičnog događaja i

C – uticaj rizičnog događaja na gubitak proizvodnih dobara.

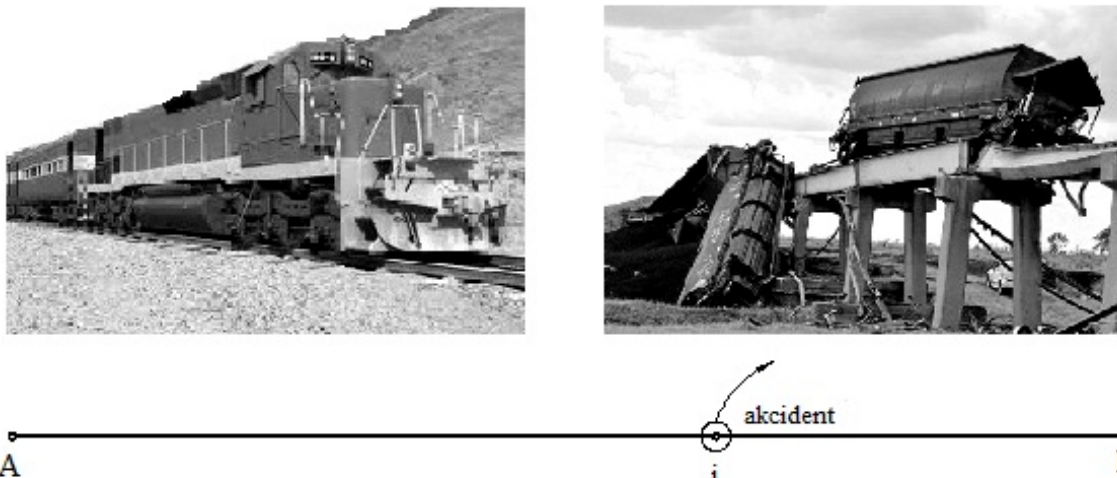
Generalno, procena rizika podrazumeva kvalitativnu i kvantitativnu dimenziju. Tehnike kvalitativne procene zasnivaju se na poznavanju mehanizma nastanka rizika, ali bez validne informacije o eventualnim katastrofalnim posledicama takvog rizika. Glavni nedostatak kvalitativnih metoda je što daju malo indicija u pogledu kolika je opasnost pojave određenog rizika, kao i nemogućnost komparacije sa drugim rizicima.

Kvantitativne metode procene daju verodostojnu identifikaciju o razmerama eventualnog rizika, za koje uzročnici posledica nisu očigledni ili nedovoljno istraženi. Jedan od glavnih benefita kvantitativnog pristupa je što obezbeđuje okvir unutar koga se na zajedničkoj osnovi mogu ocenjivati svi rizici, čime se ističe značaj procenjenog uticaja pojedinih akcidenta u odnosu na sistem.

Kvantitativne metode se mogu uspešno koristiti i za ocenu kontrolnih mera (monitoringa) kojima se utiče na poboljšanje sigurnosti. U daljem tekstu, pažnja će biti usmerena na razvoji i primeni originalnog modela za procenu rizika od iskliznuća voza.

3.2.3. PRETPOSTAVKE MODELA

Kvantitativna procena rizika nije moguća samo primenom tradicionalne teorije verovatnoće, bez primene neki prestižnih nekonvencionalnih tehnika iz specijalizovanih oblasti statistike, kao što su metode iz oprecionih istraživanja, koje obuhvataju teoriju igara i teoriju traženja [26].



Slika 3.8. Pojava potencijalnog akcidenta na deonici AB

Procenu rizika od iskliznuća voza posmatraćemo na nekoj referentnoj dužini pruge između tačaka A i B (Slika 17), na bazi sledeće uvedenih pretpostavki:

- Na pruzi referentne dužine $AB = L$ ima $i=1, \dots, N$ potencijalno mogućih mesta na kojima može doći do iskliznuća voza,
- Svakoju poziciji iskliznuća voza i odgovara direktna i indirektna nastala šteta vrednosti V_i ,
- Iskliznuće voza na poziciji i nastaje pod uticajem kritičnih faktora U_i ,
- Voz u poziciji i karakterišu angažovani resursi monitoringa uticajnih faktora D_i ,

3.2.4. MATEMATIČKI MODEL

Na bazi uvedenih pretpostavki, očekivano iskliznuće ED se matematički izražava preko izraza:

$$ED = \sum_{i=1}^N V_i P_r(V_i, U_i, D_i) \quad (3.2)$$

Gde je sa:

$P_r(V_i, U_i, D_i)$ označena verovatnoća da će doći do iskliznuća voza u i -toj poziciji posmatrane trase.

Prema ovome modelu, razmatramo interakciju potencijalnih činilaca koji mogu dovesti do akcidenta i angažovanih resursa monitoringa koji utiču na eliminisanje uticaja iskliznuća voza. Potencijalni akcidenti od iskliznuća su mogući na bilo kojoj lokaciji na dužini $AB=L$. Pretpostavimo inicijalni slučaj $U=D=1$. Verovatnoća realizacije ovog događaja je $1/G$, pošto postoji samo jedna zona pojave akcidenta u oblasti G i jedna od mogućnosti da se u toj oblasti izbegne iskliznuće voza potpunim monitoringom uticajnih faktora. Ako je $D>1$ i $U=1$, verovatnoća u prethodno definisanom smislu je:

$$1 - (1 - 1/G)^D \quad (3.3)$$

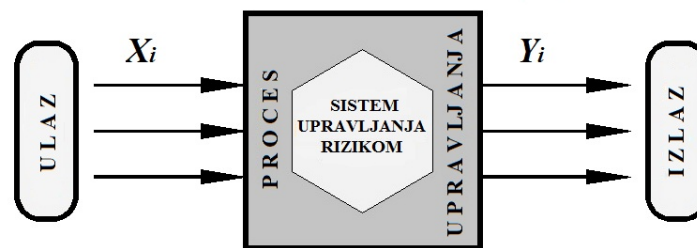
Reflektujući činjenicu da svaki D uslova ima $1/G$ nezavisnih mogućnosti koji koincidiraju sa akcidentom U . Ovo je komplementaran događaj verovatnoći da se od svih D međusobno nezavisnih resursa ne može identifikovati uticaji koji će dovesti do iskliznuća $(1-1/G)^D$. Najopštiji slučaj je za $D>1$ i $U>1$, implementirajući prethodni rezultat sa konjukcijom veličine U . Verovatnoća da će doći do iskliznuća voza bez prethodne detekcije od strane resursa monitoringa je:

$$(1 - 1/L)^{U \cdot D} \quad (3.4)$$

U opštem slučaju, veličina prostora traženja je površina, pa sobzirom da se u razmatranom slučaju radi o linijskom rasporedu, umesto oblasti G će se koristiti veličina $\sqrt{G} \sim L$. Pretpostavlja se da između trase potencijalnog iskliznuća voza i vrednosti nastale štete, postoji direktna proporcionalna veza, tj. $L \sim D$. Prema tome, verovatnoća da će uzroci koji dovode do iskliznuća voza ostati neidentifikovani, izražava se preko eksponencijalne funkcije:

$$P_r(EI) = e^{-\frac{UV}{\sqrt{D}}} \quad (3.5)$$

Verovatnoću da će doći do iskliznuća voza pod uslovom da uticajni faktori ne budu registrovani na vreme se određuje prema submodelu dozne reakcije [26]. Ovaj pristup je zasnovan na egzaktnoj logističkoj analizi i koristi se u proceni odziva sistema Y_i u funkciji od ulaznih parametara X_i (Slika 3.9).



Slika 3.9. Sistem procene rizika od iskliznuća voza

Ako rezultate predstavimo sa $Y=0$ i $Y=1$, time označavamo uslove da nije došlo odnosno da je realizovan događaj iskliznuća voza, respektivno. Ako sa p_i pretpostavimo verovatnoću realizacije iskliznuća u i -toj zoni $Y_i=1$, preko vektora vrednosti X_i se definiše tretman promenljivosti koji predstavljaju izlazne rezultate. Uobičajeno je da se rezultati prikazuju preko linearnog logističkog modela:

$$\log \text{it}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1 - p_i}\right) = \alpha + \beta X_i \quad (3.6)$$

Levi deo jednačine je logit verovatnoće p_i , čija je vrednost neodređena ako je $p_i=0$ i 1 . Koeficijenti α i β su nepoznate vrednosti koji se dobijaju iz uslova opservacije podataka. Delovanje promenljivih X_i se pretpostavlja preko veličina $\ln(U_i)$ i $\ln(V_i)$. Vrednosti matrice koeficijenta β imaju samo dve vrednosti β_1 i β_2 odnosno $\beta = \{\beta_1, \beta_2\}$, sobzirom da je matrica nezavisnopromenljivih data sa: $X_i = \{\ln(U_i), \ln(V_i)\}^T$. Posmatračemo, najjednostavniji slučaj kada je parametar $\alpha = 0$. Konačno, verovatnoća da će doći do iskliznuća voza u i -toj lokaciji pod uslovom da prethodno nije bilo indicija šta će se desiti je:

$$P_r(D \setminus EI) = \frac{U_i^{\beta_1}}{U_i^{\beta_1} + U_i^{-\beta_2}} \quad (3.7)$$

Kvalitativna i kvantitativna procena rizika od iskliznuća voza donosi se na osnovu tkz. funkcije mogućeg akcidenta $P_r(V_i, U_i, D_i)$. Ovaj zakon raspodele se dobija kao verovatnoća dva redno spojena događaja, a koji se odnose na sledeće:

- 1) Uslov da uticajni faktori koji su potencijalna opasnost za nastanak akcidenta ostaju neidentifikovani odnosno da su kvalitativno poznati, ali ne pokazuju da njihove kvantitativni vrednosti predstavljaju opasnost na predviđenoj ruti kretanja i
- 2) Uslov da je došlo do iskliznuća voza pod pretpostavkom da prethodno nije bilo nikakvih nagoveštaja oko eventualnog akcidenta i pored svih sprovedenih kontrolnih mera.

Na primeru točkova vagona, to praktično znači, da oni predstavljaju identifikovani uticaj, čije odstupanje geometrije profila izvan predviđenih granica može nepovoljno uticati na odnos kontakta točak-šina, što je direktna opasnost od iskliznuća voza. Planom kontrole redovnih i vanrednih pregleda točkova se prati proces njihovog habanja (istrošenosti) i na bazi toga se donosi odluka da li su takvi točkovi sposobni za eksploataciju ili ne. Po pravilu, kompoziciji je dozvoljeno ušestvovanje u saobraćaju samo ako je tehnički ispravna. Ove aktivnosti se odnose na uslov pod rednim brojem 1. Međutim, kada se voz nađe u saobraćajnom procesu on može uspešno obaviti transport dobara ili eventualno biti učesnik akcidenta. Ako dođe do akcidentnog događaja (u razmatranom slučaju iskliznuća voza), traže se uzroci nastanka nesreće, među koji je prva na udaru tehnička ispravnost. Ako se ustanovi da nije u tom pogledu bilo propusta pristupa se postakcidentnoj analizi što upravo definiše uslov broj 2. Verovatnoća da će doći do iskliznuća voza, pod pretpostavkama koje su definisane uslovima 1 i 2, iznosi:

$$P_r(D) = P_r(EI) \cdot P_r(D \setminus EI) = e^{-\frac{U_i V_i}{\sqrt{D_i}}} \cdot \frac{U_i^{\beta_1}}{U_i^{\beta_1} + U_i^{-\beta_2}} \quad (3.8)$$

Egzaktni podaci za β_1 i β_2 dobijaju se prema monitoringu pojave iskliznuća, koristeći proceduru izloženu u studiji [19]. Koeficijent $\beta_2 < 0$, ima zanemarljiv uticaj u odnosu na $\beta_1 > 0$, a za procenu rizika uzeta je orjentaciona (preporučena) vrednost $\beta_2=2$.

3.2.5. REZULTATI PROCENE

Procena rizika železničkog transporta na deonici dužine $AB = L$ vrši se korišćenjem izraza za verovatnoću (3.8). Verovatnoća iskliznuća voza data je u funkciji od broja i stepena oštećenja uticajnih parametara sistema vozilo-kolosek, identifikovanih u tački 3.2.1 (Slika 3.10). Verovatnoća iskliznuća voza je data parametarski u zavisnosti od vrednosti parametra ($k = D_i/V_i$), koji predstavlja specifičnu vrednost angažovanih resursa u procesu upravljanja rizikom od iskliznuća voza. Ako je vrednost angažovanih sredstava za otklanjanje uzročnika iskliznuća $D_i = 0$, odnosno $k = 0$, imamo progresivno povećanje verovatnoće iskliznuća, koja asimptotski teži 1 kada broj uzročnika i stepen oštećenja rastu.

Praktično, to znači ako nema ulaganja u monitoring i/ili se ne preduzimaju adekvatne mere za potpuno uklanjanje odnosno ublažavanje uzročnih faktora, iskliznuće voza je neminovnost. Malo ulaganje (kriva definisana za $k = 0,25$) znatno smanjuje verovatnoću iskliznuća.



Slika 3.10. Verovatnoća iskliznuća voza od stepena oštećenja

Izložena metodologija se može primeniti i na procenu rizika od iskliznuća vagona unutar kompozicije voza.

3.2.6. ISKLIZNUĆE VAGONA U KOMPOZICIJI

U uvodnom delu konstantovan je uticaj dužine voza odnosno broja vagona u kompoziciji na mogućnost iskliznuća voza. Transport opasnih materija železnicom podrazumeva posebne mere predostrožnosti među kojima procena od iskliznuća zauzima značajno mesto u procesu generalnog upravljanja rizikom. Procena rizika koja se odnosi na stanje između individualnog šinskog vozila i koloseka nije dovoljna za sigurnost železničkog saobraćaja. Ekonomičnost saobraćajnog procesa podrazumeva veći broj vagona u kompoziciji između kojih u toku transporta dolazi do dinamičke interakcije, stvarajući preduslove za iskliznuće pojedinih vagona. Značaj ovog fenomena dinamičke interakcije vagona je utoliko veća što može dovesti do iskliznuća potpuno ispravnih vagona na kvalitetnom koloseku. Osnovni uzroci koji utiču na ovaj fenomen su: vučna sila lokomotive, sile otpora voza, kočenje voza i nedovoljna zategnutost vučnog uređaja. Uticaj ovih parametara je posebno izražen kod većih krivina, gde se mogu javiti fenomeni izvijanja (“buckling”) i zatezanja kompozicije (“stringlining”), prema slici 3.11. Istraživanje od strane the Volpe National Transportation Systems Center [28] razmatra učestalost iskliznuća pojedinih vagona u kompoziciji, posmatrajući od vučnog sredstva-lokomotive. Rezultati su dobijeni tokom trogodišnjeg praćenja (1975 ÷ 77.) na uzorku od 22.000 iskliznuća. Studija je pokazala da se najveći broj iskliznuća javlja u prvoj i drugoj četvrtini dužine kompozicije računato od lokomotive (Slika 3.12).

Prema modelu pojave akcidentnog događaja od iskliznuća i statistički obrađenim podacima, kod kojih je uzrok akcidenta bio iskliznuće voza, formiran je dijagram uporedne analize (Slika 3.13). Komparacijom raspodele ovih funkcija verovatnoće zaključena je kvalitativno-kvantitativna saglasnost rezultata.

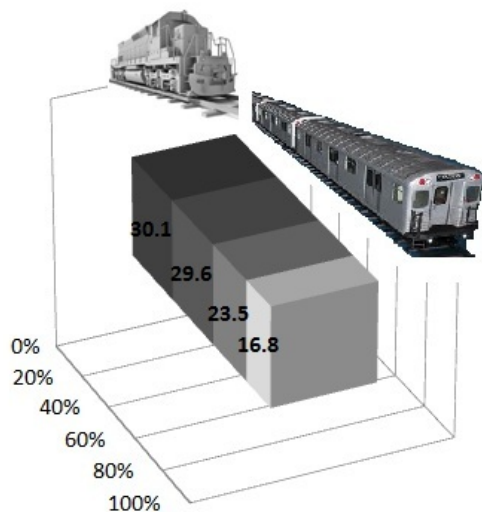
Analitička funkcija ekvivalentna je specifično angažovanim troškovima za $k=0,45$, što ukazuje da stanje koloseka i šinskih vozila nije bilo na zavidnom nivou.



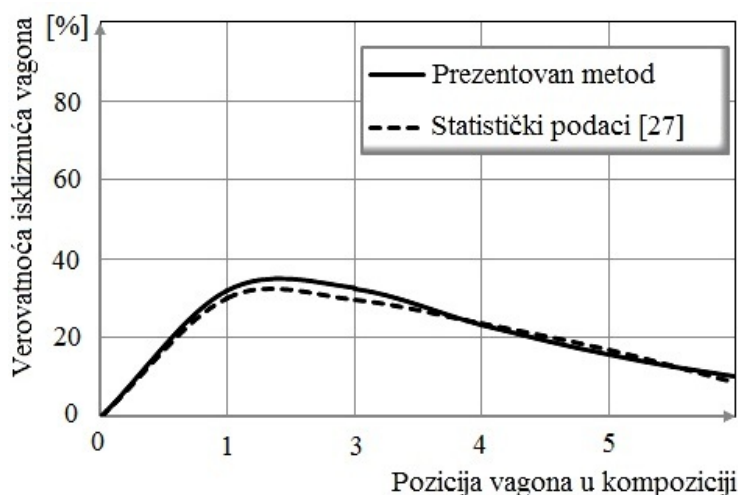
Slika 3.11. Uzroci iskliznuća vagona u kompoziciji

Na bazi prethodno iznete analize identifikovani su uticajni faktori iskliznuća voza koji zavise od stanja šinskog vozila i koloseka, kao i od interakcije vagona pri kretanju. Upravljanje rizikom od iskliznuća voza je važan segment železničkog saobraćaja, naročito pri transportu opasnih materija, radi sprečavanja kumulativnih akcidenata. Simulacioni model se odnosi na procenu rizika odnosno verovatnoću od iskliznuća voza kada predviđenim monitoringom nisu detektovane nepravilnosti kod vagona i koloseka.

Razvijeni model je univerzalnog tipa i primenljiv je za kumulativnu procenu rizika kada postoje više kvantitativno različitih uticaja čije integrisano dejstvo dovodi do akcidenta. Sprovedenim istraživanjem je uspostavljena zavisnost između angažovanih resursa monitoringa koji se odnose na troškove prevencije i uzročnih faktora na potencijalne lokacije akcidenta usled iskliznuća voza.



Slika 3.12. Učeće u iskliznućima pojedinih vagona voza



Slika 3.13. Verovatnoća iskliznuća vagona u kompoziciji voza

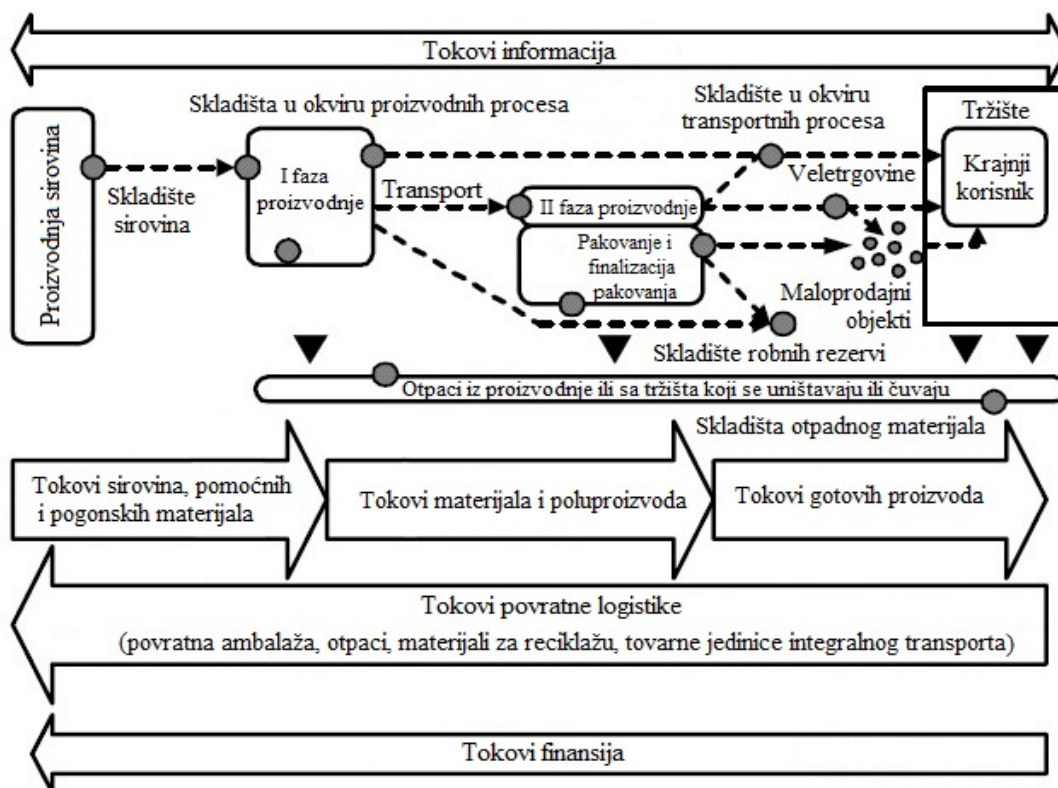
Upravljanje rizikom i njegova procena posebno je značajna za procenu iskliznuća pojedinih vagona kompozicije kada uticaji vagon-kolosek nisu dominantni u odnosu na interaktivni dinamički odnos između vagona. Izložena kvantitativna metodologija upravljanja rizikom od iskliznuća voza, ima teorijski i praktičan značaj, može se implementirati na druge akcidente u železničkom transportu i generalno na procene akcidentnih događaja u procesu saobraćaja [29-30].

3.3. SKLADIŠTA I TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA

Skladište je čvor u logističkoj mreži koji ima ulogu privremenog zadržavanja u okviru distributivne mreže snabdevanja. Skladište je deo lanca snabdevanja koji mora biti projektovan tako da deluje efikasno i pouzdano u uslovima intenzivnih dinamičkih promena na tržištu. Za uspeh kompanija na sve zahtevnijem svetskom tržištu odlučujuću ulogu ima efikasnost lanca snabdevanja, a deo toga lanca predstavljaju skladišta. Skladišta moraju biti tako dislocirana da obezbeđuju optimalno funkcionisanje lanca snabdevanja, dok u organizacionom pogledu treba da omoguće intenzivnije kretanja robe (Slika 3.14).

Logistički troškovi imaju udeo od 10 ÷ 30 % u prodajnoj ceni robe i otuda predstavljaju značajnu mogućnost za poboljšanje logističkog procesa. U savremenim uslovima tržišnog poslovanja više ne važi princip da je proizvod najboljih karakteristika istovremeno i najbolje plasiran na tržištu. Tržišno pozicioniranje određenog proizvoda u velikoj meri određuje efikasnost lanca snabdevanja.

Performance lanca snabdevanja su u funkcionalnoj zavisnosti od usklađenosti snabdevanja proizvodnje i tržišta, uz minimalne zalihe, po principu “just-in-time” (JIT), kako bi se troškovi redukovali na najmanju moguću meru. U tom smislu, ovladavanje tokovima robe kroz skladište je važan deo aktivnosti u lancu snabdevanja i da bi se njima moglo pouzdano upravljati neophodno je sprovođenje mehanizacije odnosno automatizacije manipulativnih procesa, kao i adekvatna informatička podrška celog skladišnog sistema.



Slika 3.14. Opšte šema skladišta u logističkom sistemu

S obzirom na svoju specifičnu ulogu, skladište mora biti najbolje usklađeni deo lanca snabdevanja. Odziv skladišnog sistema na svaka promenu izazvanu spoljašnjim uticajem (tržištem), koja je po prirodi nepredvidljivog karaktera, ne sme pokazivati karakter nestabilnosti kroz oscilovanje u procesima poručivanja, isporuke, transporta i proizvodnje. Informatička podrška skladišnog sistema omogućava efikasno upravljanje zalihama, ubrzava tok robe kroz skladište, utiče na pouzdanost isporuke kupcima i generalno, pospešuje stabilnost poslovanja svih činilaca u lancu snabdevanja.

Sistem za upravljanje skladišta predstavlja integralnu spregu savremenih tehnoloških inovacija i manipulativnih procesa u cilju optimizacije svih skladišnih funkcija (Slika 3.15). Skladišni procesi započinu prijemom robe od strane dobavljača i završavaju se isporukom robe krajnjem kupcu. Između ova dva granična procesa se odvija fizički tok robe i protok informacija koje prate odgovarajuće skladišne operacije.

Sistem za upravljanje skladištem povezuje softverske, hardverske i periferne uređaje u funkcionalnu celinu koja obezbeđuje upravljanje zalihama, tokovima robe, opremom i infrastrukturnim resursima u skladištu ili distributivnom centru. Implementacija sistema za upravljanje ima za cilj da omogući kompanijama poboljšanje svoje konkurentnosti kroz smanjenje troškova rada, redukciju zaliha, unapređenje korisničkog servisa, poboljšanje fleksibilnosti i pouzdanosti skladišnog sistema. Osnovne prednosti skladišta sa integrisanim sistemom za upravljanje, ogledaju se u sledećem:

- Brži obrt zaliha,
- Efikasnije korišćenje skladišnog prostora,
- Smanjenje administrativnih troškova i
- Poboljšanje usluga kupcima.



Slika 3.15. Savremeno rešenje skladišta automobila (Volkswagen – Minhen)

3.3.1. SOFISTICIRANI SISTEMI PRAĆENJA

Uslovi koji iniciraju navedene prednosti i performanse skladišnog sistema uz primenu informacionih tehnologija u procesu upravljanja su date u nastavku teksta. Efikasnim organizovanjem manipulativnih aktivnosti robe u skladištu, smanjuje se vreme čekanja na isporuku, povećava se ažurnost informacija i podržava JIT tehnologija opsluživanja. Posledica ovoga je smanjenje potrebe za dodatnim zalihama, što direktno povećava koeficijent obrta zaliha i koeficijenta iskorišćenosti kapitala. Smanjenjem zaliha odnosno potrebnog prostora za zalihe, povećava se skladišni prostor dostupan za skladištenje. Time se postiže znatno efikasnije skladištenje uz optimalno iskorišćenje raspoloživog prostora i skraćanja vremena potrebnog za prikupljanje, pakovanje i otpremu skladišnih jedinica. Povećanje efikasnosti opsluživanja utiče na veću produktivnosti i smanjenje troškova održavanja opreme u skladištu. Implementacija sistema za upravljanje skladištem značajno smanjuje obim administrativnih poslova koji prate skladišne procese (dopremanje, otpremanje i dr.).

Sofisticirani sistem praćenja procesa omogućava adekvatno reagovanje na bazi pravovremeno registrovane informacije o toku i trenutnoj poziciji skladišne jedinice. Informatička podrška skladišnog sistema pruža operaterima mogućnost da prateću dokumentaciju (prijemnice, otpremnice, izveštaje i dr.) čuvaju u elektronskoj formi i po potrebi štampaju, čime se smanjuju administrativni troškovi skladištenja. Zadovoljenje potreba potrošača odnosno kupaca se ne ogleda samo sa aspekta performansi proizvoda, već i sa satanovišta rokova isporuke. Uloga sistema upravljanja skladištem je automatska identifikacija dopremljene robe i permanentno praćenje njenog toka kroz skladišne procese. Ovim je broj pogrešnih isporuka sveden na minimum, a snabdevanje potrošača podignuto na viši nivo.

ACCELLOS One je napredni softverski sistem koji je namenjen za upravljanje tokovima robe u skladištu odnosno distributivnom centru sa potpuno automatizovanim pristupom u manipulativnim operacija. Ovaj sistem je formiran integrisanjem više podsistema koji se odnose na: PC računar, internet, barkod tehnologiju, radio frekventne tagove (RFID) i mobilnu tehnologiju. ACCELLOS One omogućava registrovanje tačnih informacija u realnom vremenu o svim značajnim parametrima u procesu skladištenja, kao što su iskorišćenost prostora, količina proizvoda, stanje radnih naloga, aktivnost i lokaciju svakog zaposlenog u toku manipulativnih radnji, vreme nastanka promene stanja robe i sl. Na bazi informacija o ovim parametrima stvorene su mogućnosti za skoro trenutno delovanje u cilju efikasnog upravljanja skladišnog sistema.

ACCELLOS One je kompleksan sistem koga odlikuje modularna struktura, jer se sastoji od tri potpuno nezavisne celine (modula) koji pružaju mogućnost prilagođavanja različitim skladišnim zahtevima, kako bih se u datom trenutku izabrala funkcionalno optimalna opcija. Moduli ovog sistema su:

- ♦ Collect Edition (odnosi se na početnu opciju sistema koja je ograničena za prošireno praćenje dokumenata, npr. otpremnice i dr.),
- ♦ Manage Edition (namenjena je kompanijama za praćenje procesa skladištenja, kao što su prijem, odlaganje, prikupljanje i isporuka robe) i
- ♦ FulFill Edition (predstavlja napredni nivo sistema koji se odnosi na dodatnu kontrolu, automatizaciju i fleksibilnost u skladištima).

3.3.2. IMPLEMENTACIJA ACCELLOS ONE SISTEMA

Jedna od osnovnih funkcija sistema za upravljanje skladištem, koju u potpunosti podržava ACCELLOS One se odnosi na stalnu raspoloživost robe i potpunu transparentnost procesa. Tipični procesi koji se odvijaju u skladištu prema operativnom delovanju ACCELLOS One sistema su prikazani na slici 3.16. Na istoj slici je prikazan protok informacija kroz sistem od trenutka prijema proizvoda u skladište do trenutka otpreme iz skladišta. Treba imati u vidu da se pojedini procesi mogu odvijati simultano, dok se operacija štampanja etikete može realizovati tokom bilo kog koraka u tom procesu. U nastavku teksta su prezentovani osnovni skladišni procesi koji su dirigovani ACCELLOS One sistemom upravljanja.

Prijem robe započinje preuzimanjem nabavne porudžbenice od strane ACCELLOS One iz ERP sistema. Preuzetu robu sa odštampanom dostavnicom preuzimaju skladišni radnici u cilju daljih radnji (sortiranja, odlaganja i sl.).

Odlaganje robe se u većini slučajeva odvija kao nezavisna aktivnost od procesa prijema. Primitljena roba se privremeno skladišti na tkz. utovarno mesto, odakle se kasnije od strane skladišnih radnika transportuje do mesta za odlaganje (skladištenje) određene vrste proizvoda.

Raspoređivanje (alokacija) robe je proces integrisanja zaliha sa prodajnim porudžbinama, odnosno vrši se identifikacija robe koja će biti isporučena na osnovu prodajnih porudžbenica. Isporuka prema prodajnim porudžbenicama se može izvršiti tek nakon alociranja zaliha. Transfer prodajne porudžbenice iz ERP u ACCELLOS One sistem se može realizovati na jedan od sledećih načina, zavisno od podešenosti sistema:

- Automatski (ACCELLOS One na bazi cikličnog procesa kontinualno vrši alociranje neraspoređenih proizvoda, prema slici 3.16) i
- Manuelno (preko Web dispičera)

Nakon uspešno obavljene operacije alociranja sistem izveštava o spremnosti za fazu prikupljanja robe.

Dopuna robe je proces zamene nedostajuće robe iz komisionih skladišnih lokacija sa lokacija za dopunu i depaletizacijom robe koja je određena od strane skladišta. Zahtev za dopunu zaliha može biti generisan automatski o strane ACCELLOS One sistema kada prodajna porudžbina ne može biti kompletirana, jer nema dovoljno raspoložive robe na komisionim lokacijama. Time je status porudžbine označen kao nekompletan, obaveštavajući dispičera da je proces dopune robe u zastoju (stanje čekanja). Od strane dispičera se mogu definisati grupe zahteva za dopunu, prema karakteristikama, kao što su: prioritet, kupci, vrsta robe i dr.

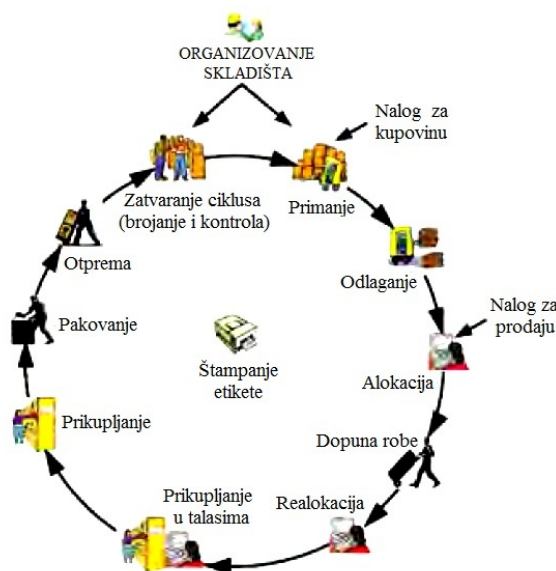
Ponovno raspoređivanje (relokacija) robe se odnosi na prodajne porudžbine koje nisu namenjene za momentalno slanje, pa shodno tome moraju biti naknadno raspoređene (relocirane). Za porudžbine robe koje ne mogu biti alocirane u prvom ciklusu, dispičer ima sledeće opcije:

- Porudžbine koje su zadržane se kompletiraju dodajući nedostajući artikal,
- Porudžbine koje se ne mogu odmah kompletirati:
 - Imaju status čekanja dok se ne pojavi nedostajući artikal,
 - Ukoliko se druge porudžbine skinu sa liste alociranih, uzima se potreban artikal i
 - Porudžbina se isporučuje bez nedostajećeg artikla.

Prikupljanje robe u talasima je važna osobina ACCELLOS One sistema, a odnosi se na process grupisanja lociranih prodajnih porudžbina radi njihove otpreme. Proces prikupljanja je podržan različitim tehnologijama, poput RF prenosa podataka (radio-frekventna komunikacija i wireless).

Prikupljanje i pakovanje robe se uglavnom realizuje simultano, u zavisnosti od organizacione strukture skladišta. Prikupljanje robe u skladištu se može realizovati na više načina.

Otprema robe je specifičan proces za svako skladište i konkretnu porudžbinu. ACCELLOS One podržava razmenu informacija sa službama izvan skladišta (kurirska služba, špediterske kompanije i sl.), kako bi se što efikasnije pratio tok pošiljke. Na ovaj način je celokupan tok robe u lancu isporuke integrisan u jednu celinu.



Slika 3.16. Organizaciona šema skladišta (ACCELLOS One)

4. MODELIRANJE NEKONVENCIONALNIH SKLADIŠTA

Logistički troškovi imaju značajan uticaj na konačnu uspešnost svake kompanije. Prema studiji date od strane “Logistic Coast and Service 2007” [31] u kompanijama zapadne Evrope učešće troškova logistike je oko 10 % od prodajne cene. Distributivni centar uporedo sa procesom transportovanja i skladišnom tehnikom predstavlja jedan od tri dominantna faktora na ukupne troškove logistike, sa učešćem od 21 % u USA odnosno 37 % u zemljama EU.

Proces redoslednog prikupljanja, definisan kao proces pronalaženja tačaka iz skladišnih lokacija u odgovoru na specifične zahteve kupaca, najteža je i najskuplja aktivnost sa učešćem do 55 % od ukupnih operativnih troškova skladišta, prema podacima Tompkins et al. [32]. Proces prikupljanja je u direktnoj vezi sa brzinom isporuke, što takođe utiče na nivo usluge. Stoga, veoma je važno sprovesti analizu u cilju smanjenja troškova prikupljanja i skraćenje vremenskog ciklusa, tj. poboljšati efikasnost redosleda prikupljanja.

U poslednje vreme sprovedena su brojna istraživanja ove oblasti iz kojih je proistekla značajna literatura bazirana na različitim metodama obezbeđujući najefikasniji poredak odabira [33]. Vreme potrebno za određeni redosled prikupljanja može se podeliti na tri komponente: vreme za prelazak rastojanja između tačaka prikupljanja, vreme potrebno za prikupljanje skladišnih jedinica i vreme za ostale aktivnosti. Činjenica da se oko 50 % od ukupnog vremena prikupljanja utroši na transportovanje ukazuje na neophodnost potencijalnog poboljšanja efikasnosti prikupljanja, smanjenjem dužine transportnih puteva [32].

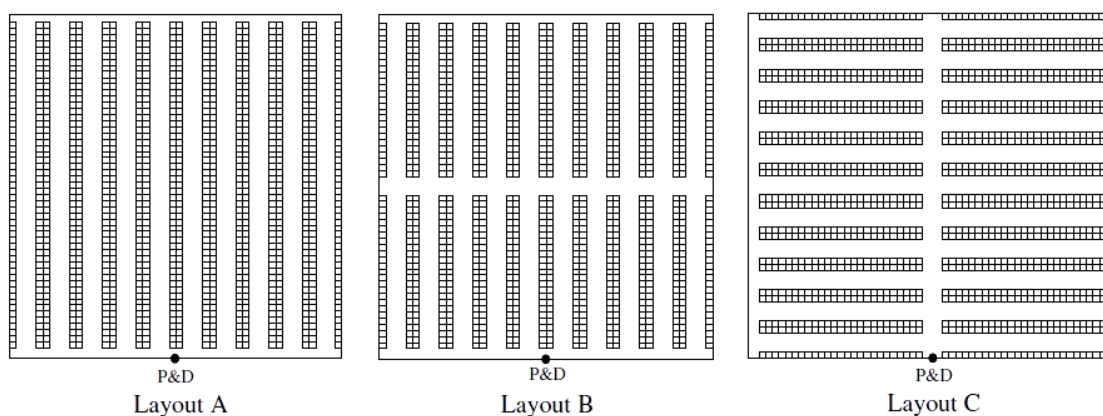
Većina metoda za poboljšanje operativne efikasnosti u pogledu redosleda prikupljanja fokusira se na redukciji vremena opsluživanja i može se kategorisati u tri grupe operativne politike: usmeravanje, skladištenje i doziranje (grupisanje) [34]. Metode usmeravanja definišu rute kretanja, težeći minimizaciju ukupne distance između skladišnih lokacija. Način skladištenja ili dodeljivanje skladišnih jedinica na određene lokacije, koji je baziran na nekom algoritmu (pravilu), može redukovati njihove distance u odnosu na varijantu slučajnog raspoređivanja odnosno odabira. Metode koje definišu redosled doziranja odnosno grupisanja dva ili više zahteva kupaca u jedan zahtev prikupljanja su takođe vrlo efikasne u redukciji distanci između skladišnih lokacija odnosno vremena potrebnog za njihovo prikupljanje.

U nastavku će biti izložen postupak modeliranja skladišta nekonvencionalnog layout-a, gde su regali raspoređeni u obliku “riblje kosti” (“fishbone” layout). Osnova ideja je komparaciona analiza ovog tipa skladišta sa tradicionalnim oblicima i tehnološki potencijal u pogledu njegove implementacije.

4.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA SKLADIŠTA

Projektovanje skladišta je kompleksan problem u okviru koga je integrisan veliki broj zahteva, sa posebnim akcentom na layout regalske opreme. U poslednjih nekoliko godina, ovoj problematici se posvećuje velika pažnja, pošto je dokazano da postoje znatni potencijali u pogledu redukcije troškova opsluživanja regalskih skladišta odnosno logističkih troškova [33, 35]. Istraživanja layout-a skladišta su razvijana kroz dva aspekta.

Prvi se odnosi na tradicionalne oblike sa prolazima koji se seku pod pravim uglom (Layout A), u okviru koga je razmatrano uvođenje dodatnog poprečnog prolaza (Layout B) ili promenom orijentacije regala prethodnog tipa layout-a koji su zarotirani za ugao od 90^0 (Layout C), prema slici 4.1. Modeliranje jednokomandnog sistema opsluživanja za layout A odnosno layout C skladišta su analizirali Francis [36] i Bassan [37], čiji su rezultati implementirani za optimizaciju oblika skladišta i definisanje lokacije P&D tačke. Model za simulaciju dvokomandnog načina opsluživanja za layout A skladišta, predložili su Mayer [38], Malmberg [39] i Krishnakumar [40], ali njihovi rezultati ne obuhvataju optimizaciju skladišnih parametara, kao što su broj i dužina prolaza prikupljanja. Sistematski pristup u razvoju analitičkih izraza kojima se opisuje jednokomandni i dvokomandni sistemi opsluživanja, za tipične rasporede regala kod tradicionalnih skladišta (layout tipa A, B i C) dali su Pohl, Meller i Gue [41]. Na ovaj način su stvoreni uslovi za definisanje prolaza koji obezbeđuje minimizaciju očekivane distance između dve sličajno odabrane skladišne lokacije. Takođe, razvijeni modeli su značajni radi uporedne analize sa performansama nekonvencionalnih skladišta i daljeg razvoja netradicionalnih tipova layout-a.



Slika 4.1. Tipovi layout-a tradicionalnih skladišta

Drugi aspekt istraživanja se odnosi na nekonvencionalne oblike layout-a, a prevashodno je bio fokusiran na heurističke algoritme koji omogućavaju definisanje optimalne trase prikupljanja skladišnih jedinica [42-43]. Značajne rezultate u pogledu izbora najpogodnije trase prikupljanja, za dati skladišni kapacitet dali su Roodbergen i Vis, razmatrajući skladišta sa layout-om tipa A [34] odnosno ukupno dozvoljeni broj poprečnih prolaza i alternativnu poziciju P&D tačke [44]. Sva prethodno citirana literature se odnosila isključivo na skladišta tradicionalnog layout-a (tipa A, B ili C).

Za uvođenje skladišta sa nekonvencionalnim tipom layout-a su zaslužni Gue i Miller [45]. Ovi istraživači su fokus stavili na tri karakteristična netradicionalna layout-a, a njihovi oblici su specifični za postojanje središnjih poprečnih prolaza, koji mogu biti:

- ♦ V oblika,
- ♦ Modifikovanog V oblika ("flying V") i
- ♦ Oblika „riblje kosti“ ("fishbone")

Očekivano rastojanje između slučajno odabrane skladišne jedinice i P&D tačke zavisi od pozicije i orijentacije središnjeg poprečnog prolaza. Minimizacijom funkcije očekivanog rastojanja, za unapred definisan oblik središnjeg poprečnog prolaza, moguće je definisati optimalne vrednosti skladišnih parametara (broj prolaza prikupljanja, širine skladišta, itd.).

Skladištenje i komisioniranje dobara unutar skladišnog procesa se odvija od zone prikupljanja i deponovanja (P&D tačke) do neke skladišne lokacije, po unapred determinisanoj trasi kretanja. Organizovanje ovih aktivnosti utiče na efikasnost procesa skladištenja i komisioniranja, kao i na troškove njihove realizacije. Jednooperacijske aktivnosti skladištenja odnosno komisioniranja odnose se na manipulaciju skladišne jedinice od P&D tačke do određene skladišne lokacije odnosno od predviđene skladišne pozicije do mesta deponovanja. Povratni hodovi jednooperacijskog organizovanja skladištenja i komisioniranja podrazumevaju angažovanje transportne opreme uz odsustvo manipulisanja skladišnim jedinicama. To povećava troškove transportovanja, a time i ukupnih logističkih troškova skladišno-transportnog sistema.

Iz potrebe za smanjenjem troškova odnosno minimizovanjem praznih hodova transportnih sredstava razvijene su dvooperacijske aktivnosti skladištenja i komisioniranja dobara. Premeštanje skladišnih jedinica od P&D tačke do odlaganja na određene lokacije vrši se po determinisanoj trasi, a u povratku se sa drugih skladišnih pozicija uzimaju već uskladištene jedinice koje se prikupljaju po najpogodnijem redosledu i vraćaju do polazne pozicije. Preklapanjem funkcija odlaganja i prikupljanja u izvesnoj meri je skraćeno vreme ciklusa čime je obezbeđena veća efikasnost angažovanih resursa. Manipulacije oko aktivnosti skladištenja i komisioniranja su u većini slučajeva praćene sa izvesnim praznim hodovima, ali se minimizacijom dužine trase dolazi do optimalnog rešenja.

S obzirom da su savremena skladišta velikih kapaciteta sa izraženim dinamičkim zahtevima, aktivnosti skladištenja i prikupljanja već uskladištenih dobara su vrlo intenzivnog karaktera sa značajnim udelom u operacionim troškovima distributivnih centara i pored angažovanja dvooperacijskog manipulativnog modela. Zato je neophodno pri projektovanju skladišta voditi računa o minimizaciji očekivanih distanci između skladišnih lokacija odnosno transportnih puteva, što direktno utiče na raspored regalske opreme unutar skladišta.

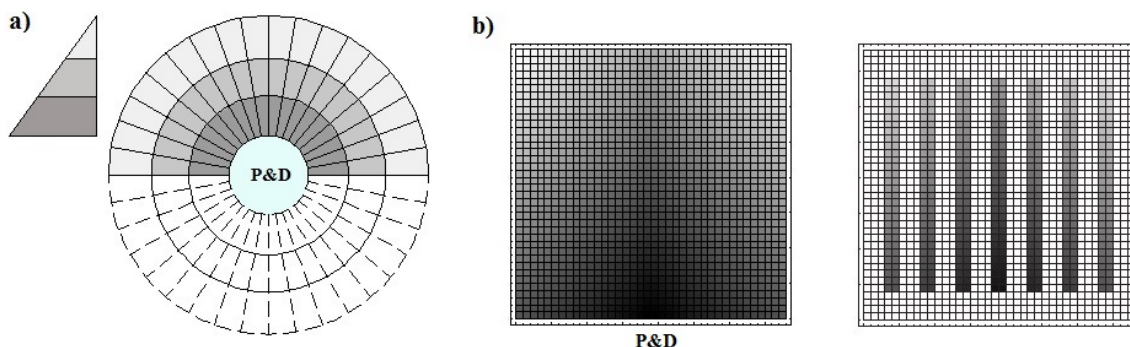
Shvatajući značaj ove oblasti logistike, istraživači Pohl et al. su analizirali tri različite konfiguracije skladišno-regalske opreme (layout A, B, C) koji su karakteristični za tipove konvencionalna skladišta [46]. Konfiguracija tipa A ima prolaze za prikupljanje koji se prostiru između dva poprečna prolaza, locirana na gornjoj i donjoj strani skladišta. Regali se ugrađuju u tandemu između kojih se nalaze prolazi za manipulaciju, osim krajnjih (prvi i poslednji u nizu) koji su jednoredni i pozicionirani su neposredno uz zid skladišta. Konfiguracija tipa B, za razliku od tipa A, se odlikuje postojanjem trećeg poprečnog prolaza postavljenog duž sredine skladišta. Konfiguracija tipa C je dobijena rotacijom konfiguracije tipa B za 90° .

Osnovna pravila za projektovanje tradicionalnih skladišta obuhvataju:

- ❖ Prolazi prikupljanja moraju biti pravi i paralelni, i
- ❖ Poprečni prolazi moraju biti takođe pravi i da su pod pravim uglom u odnosu na prolaze prikupljanja.

Dodavanje tradicionalnih poprečnih prolaza se preporučuje samo u slučaju velikih skladišta što je pogodno za dvooperacijski načina prikupljanja skladišnih jedinica i smanjenju mogućnosti eventualne zagušenosti u opsluživanju. Kod skladišta male i srednje veličine dodavanje tradicionalnih poprečnih prolaza može čak biti i kontraproduktivno, jer dolazi do značajnog redukovanja skladišnog prostora. Navedena činjenica odlika je samo tradicionalnih dispozicija skladišta kod kojih se prolazi za prikupljanje pod pravim uglom u odnosu na poprečne prolaze. Gue, Meller, Pohl et al. su razmatrali skladišne prostore pravougaone osnove kod kojih rasporeda regala i oblik središnjeg poprečnog prolaza odstupa od tradicionalnih konfiguracija, a koji si poznati pod nazivom netradicionalna skladišta [47].

Idelna dispozicija regalske opreme kod netradicionalnog skladišta sa jednom P&D tačkom je polukružnog oblika (Slika 4.2a). Kretanje od P&D tačke do određene skladišne lokacije se vrši po pravolinijskoj putanji, koja ujedno predstavlja najkraće rastojanje između dve definisane lokacije. Ovo omogućavaju dijametralni prolazi za prikupljanje, koji polaze od jedne odnosno P&D tačke. Međutim, ova konfiguracija zahteva tkz. klinaste regale koji su nepovoljni za praktičnu primenu u pogledu izrade, a naročito za skladištenje paletnih jedinica. Kod tradicionalnih skladišta skladišne jedinice treba locirati duž vertikalnog prolaza u pravcu P&D tačke i u njenoj neposrednoj blizini (Slika 4.2b).



Slika 4.2. Zone koncentracije skladišnih jedinica za: a) nekonvencionalni oblik (kružni) i b) tradicionalni (Layout A)

Osnovni oblik netradicionalnih skladišta je sa poprečnim prolazom V oblika koji se dijagonalno prostire od P&D tačke ka levoj i desnoj polovini, dok su regali paralelno pozicionirani kao kod tradicionalnih konfiguracija. Prethodno pomenuti istraživači najveći značaj su posvetili oblicima “flying V” i “fishbone” koji predstavljaju modifikaciju V oblika. Konfiguracija “flying V”, za razliku od modela V tipa, ima krivolinijski oblik putanje poprečnog prolaza. Konfiguracija “fishbone” karakteriše se pravoliniskom putanjom V oblika (kao i osnovni tip netradicionalnog skladišta), dok je ispod poprečnog prolaza orijentacija regala zarotirana za ugao od 90° u odnosu na regale iznad prolaza (Slika 4.3).

Osnovna pravila kojih se treba pridržavati prilikom projektovanja netradicionalnih skladišta podrazumevaju sledeće:

- ♦ Prolazi za prikupljanje mogu biti različitih dužina, ali moraju biti paralelni,
- ♦ Od poprečnih prolaza se ne zahteva da budi pravolinijski niti moraju biti upravni na prolaze prikupljanja,
- ♦ Orijeentacije prolaza za prikupljanje tendencijski moraju biti usmerene ka P&D tački.

Ovo nedvosmisleno navodi na činjenicu da se za optimizaciju konfiguracije skladišta ne može efikasno primeniti neka od optimizacionih tehnika zasnovana na mrežnom modelu.

4.2. MODEL OČEKIVANOG RASTOJANJA SKLADIŠTA

Istraživanje nekonvencionalnog rasporeda regala i neophodnih prolaza se odnosi na geometrijsku analizu parametara skladišta u horizonatalnoj ravni. To podrazumeva da se kinematske i dinamičke veličine transportnog sredstva i skladišnih jedinica indiferentne na očekivano vreme transporta. Osim toga, u razmatranje se neće uzimati lokacije skladišnih jedinica u vertikalnoj ravni skladišta, već će se pretpostavljati da su duž svih prolaza prikupljanja uniformno raspoređene.

Uvedene pretpostavke imaju za cilj da pojednostave analizu skladišta. Pretpostavlja se da su prolazi dovoljno široki da omogućе nesmetano kretanje u oba smera odnosno da je moguća manipulaciju transportnog sredstva u cilju promene pravca. Kod skladišta, termin pozicija i lokacija se suštinski razlikuju. Termin pozicija se odnosi na skladišnu jedinicu koja je striktno definisana koordinatama (x, y, z) u odnosu na referentni sistem. Nasuprot ovome, termin lokacija može se istovremeno odnositi na skladišnu jedinicu (x, y, z) , ali i na sve druge skladišne jedinice koje se nalaze iznad ili ispod nje, kao i na dijametralno suprotne skladišne jedinice (koje su u istom pravcu, ali sa suprotne strane prolaza). Prema tome, može se zaključiti da se lokacija skladišne jedinice definiše sa koordinatama (x, y) odnosno položaj sa (x, y, z) .

4.2.1. OČEKIVANA RASTOJANJA UNUTAR ZONA SKLADIŠTA

Konfiguracija (layout) regala u obliku “riblje kosti” (“fishbone”) odlikuju tri karakteristične zone (zona 1, 2 i 3), shodno slici 4.3. Dve zone (npr. 1 i 3) razmatranog layout-a su iste veličine i oblika, samo što su simetričnog rasporeda u odnosu na osu skladišta, dok je zona 2 različitih osobenosti u odnosu na oblasti 1 i 3. Bez obzira na razlike oblika i veličine, između zona 1 odnosno 3 i zone 2 se može uspostaviti određena analogija koja se odnosi na sledeće:

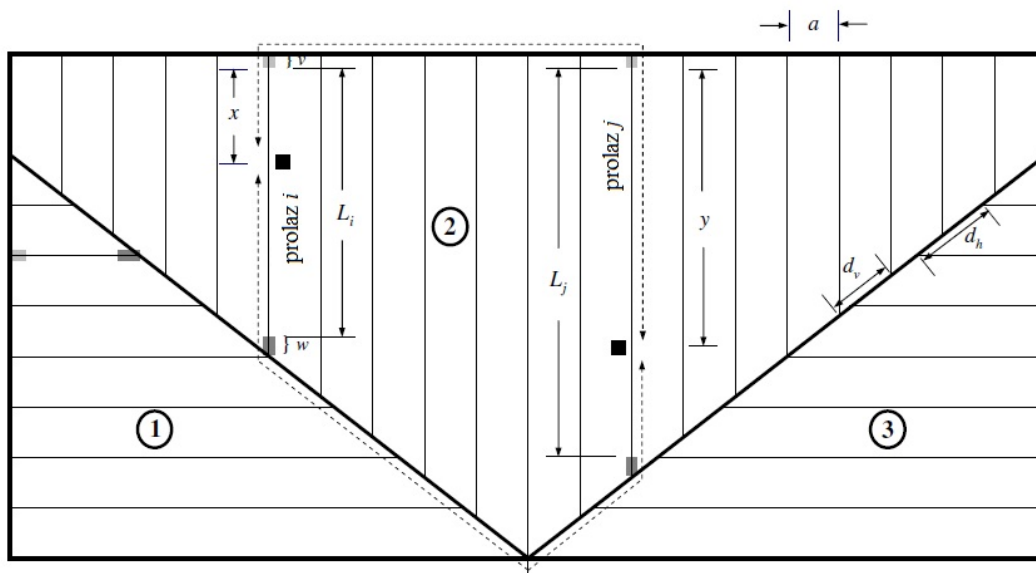
- ✧ Oblast 2 se sa jedne strane graniči poprečnim prolazom koji je upravan na prolaze prikupljanja (gornji poprečni prolaz) i
- ✧ Oblast 2 se sa druge dve strane graniči dijagonalnim prolazom prikupljanja.

Koristeći ovu analogiju može se razviti model za identifikaciju očekivanog rastojanja u bilo kojoj zoni razmatranog skladišta. Termin očekivano rastojanje se odnosi na najkraću trasu kretanja prilikom opsluživanja regala između dve slučajno odabrane lokacije. U tom smislu je potrebno razlikovati dva slučaja, koji se odnose na određivanje očekivanog rastojanja:

- ❖ Skladišne lokacije su unutar jedne karakteristične zone i
- ❖ Skladišne lokacije se nalaze u različitim karakterističnim zonama.

Procena rastojanja između dve skladišne lokacije, bez obzira da li pripadaju istoj ili različitoj zoni skladišta, obuhvata dve varijante:

- ✚ Skladišne lokacije se nalaze u istom prolazu i
- ✚ Skladine lokacije razdvaja bar jedan poprečni prolaz.



Slika 4.3. Skladišne lokacije unutar iste zone “fishbone” skladišta

Specijalni slučaj pozicija skladišnih lokacija odnosi se na prvu varijantu, kada su obe lokacije unutar istog prolaza, pa nije potreban poprečan prolaz za definisanje njihovih distanci. Opšti slučaj se odnosi na drugu varijantu, kada se dve lokacije nalaze u različitim prolazima, pa je određivanje njihovih distanci zavisno od položaja i dužina poprečnih odnosno dijagonalnih prolaza. Položaj svake lokacije se definiše preko njene udaljenosti od krajnjeg poprečnog prolaza koji je normalan sa prolazima prikupljanja. Zavisno od ove lokacija se vrši konkretni izbor od dve moguće alternativne trase kretanja. Širina poprečnog prolaza odgovara veličini v , dok je za dijagonalni poprečni prolaz neophodno obezbediti distanu od $w \approx \sqrt{2}v$. Položaj lokacije u i -tom prolazu, dužine L_i , se definiše preko koordinate x , dok je položaj lokacije u j -tom prolazu, dužine L_j , određen veličinom y . Udaljenost ove dve lokacije duž krajnjeg (normalnog) poprečnog prolaza je:

$$x + y + a|i - j| + 2v \quad (4.1)$$

Ako se određivanje rastojanja između lokacija i odnosno j spovodi preko dijagonalnog poprečnog prolaza, tada imamo:

$$L_i - x + L_j - y + d_v|i - j| + 2w \quad (4.2)$$

Geometrijska veličina koja se odnosi na dijagonalno rastojanje između dva susedna prolaza prikupljanja zone 1 ili 3 odnosno zone 2 je data respektivno sa:

$$d_h = a\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} \quad (4.3)$$

$$d_v = a\sqrt{1 + n^2} \quad (4.4)$$

Gde je:

n – nagib dijagonalnog poprečnog prolaza ($n \approx \tan \alpha$) i

α – ugao nagiba dijagonalnog poprečnog prolaza prema horizontali.

Odluku o tome kojom trasom će se vršiti transport skladišnih jedinica donosi se na bazi minimalnog rastojanja dve lokacije skladišta.

4.2.2. ALTERNATIVNE TRASE KRETANJA

Izbor transportnog puta između dve skladišne lokacije vezan je za određen poprečni prolaz, čiji izbor zavisi od vrednosti x i y . Napovoljnija odnosno najkraća trasa transporta odgovara minimalnoj vrednosti alternativnih dužina kretanja, koje su date sa (4.5).

$$\min \begin{cases} x + y + a|i - j| + 2v \\ L_i - x + L_j - y + d_v|i - j| + 2w \end{cases} \quad (4.5)$$

Ako su vrednosti x i y male, tada se koristi normalan poprečan prolaz, u suprotnom je neophodno koristiti dijagonalni poprečni prolaz. Izjednačavanjem dve alternativne trase kretanja i uvođenjem parametra $q_{ij}=x+y$, postiže se indiferentnost u izboru putanje. Parametar q_{ij} integriše prolaze i odnosno j , reprezentujući tačku koja je nezavisna od izbora putanje transporta između lokacija i određuje se prema:

$$q_{ij} = 0.5[L_i + L_j + (d_v - a)|i - j|] + w - v \quad (4.6)$$

Ako je parametar $q_{ij} > x+y$, tada je najkraća trasa preko dijagonalnog poprečnog prolaza, u suprotnom ($q_{ij} < x+y$), najpovoljnija trasa je preko normalnog poprečnog prolaza. Ako uvedemo veličine X_i u domenu $[0, L_i]$ i Y_j u domenu $[0, L_j]$, koje predstavljaju uniformne slučajno promenljive reprezentujući lokacije skladišnih jedinica u prolazima i odnosno j , tada je veličina $Z_{ij} = X_i + Y_j$ nova slučajna promenljiva. Uvođenje slučajno promenljive Z_{ij} , prema teoriji verovatnoće je neophodno pri analizi dve slučajno promenljive X_i i Y_j . Određivanje verovatnoće i očekivanog rastojanja zahteva korišćenje konvolucione funkcije $f_z(Z)$. Verovatnoća da se najkraće rastojanje između lokacija u različitim prolazima i odnosno j prostire duž normalnog poprečnog prolaza je:

$$P_r(Z_{ij} < q_{ij}) = \int_0^{q_{ij}} f_z(z) dz \quad (4.7)$$

Verovatnoća da će najkraći trasa biti duž dijagonalnog poprečnog prolaza je:

$$P_r(Z_{ij} > q_{ij}) = 1 - P_r(Z_{ij} < q_{ij}) \quad (4.8)$$

Očekivana vrednost udaljenosti između skladišnih lokacija koje se nalaze unutar iste karakteristične oblasti, a različitih prolaza prikupljanja i odnosno j je:

$$\begin{aligned} & \{E[Z_{ij}(Z_{ij} < q_{ij})] + a|i - j| + 2v\}P_r(Z_{ij} < q_{ij}) + \\ & + \{L_i + L_j - E[Z_{ij}(Z_{ij} > q_{ij})] + d_v|i - j| + 2w\}P_r(Z_{ij} > q_{ij}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Gde je:

$$E[Z_{ij}(Z_{ij} \leq q_{ij})] = \int_0^{q_{ij}} z f_z(Z \leq q_{ij}) dz \quad (4.10)$$

$$E[Z_{ij}(Z_{ij} > q_{ij})] = \int_{q_{ij}}^{L_i + L_j} z f_z(Z > q_{ij}) dz \quad (4.11)$$

Za određivanje funkcije gustine verovatnoće koristi se konvoluciona funkcija $f_z(z)$. Njen oblik zavisi od dužina prolaza i odnosno j , pa se razlikuju dva slučaja:

- * Prolazi prikupljanja i odnosno j su istih dužina ($L_i = L_j$), pa je konvolucija trougaona i
- * Prolazi prikupljanja i odnosno j su različitih dužina ($L_i \neq L_j, L_i > L_j$), pa je konvolucija oblika jednakokrakog trapeza [48].

Funkcije koje definišu raspodele $f_z(z)$, $f_z(Z \leq q_{ij})$ i $f_z(Z > q_{ij})$ su date u Prilogu 1.

Koristeći (4.10) i (4.11) kao i odgovarajuće funkcije gustina koja su data u Prilogu 1, dolazi se do traženih očekivanih rastojanja:

$$E[Z_{ij} \setminus Z_{ij} \leq q_{ij}] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3}q_{ij}, \quad 0 \leq q_{ij} < L_i \\ \frac{q_{ij}^2 - L_i^2 / 3}{2q_{ij} - L_i}, \quad L_i \leq q_{ij} < L_j \\ \frac{(L_i + L_j)q_{ij}^2 - (L_i^3 - L_j^3 + 2q_{ij}^3) / 3}{2L_i L_j - (q_{ij} - L_i - L_j)^2}, \quad L_j \leq q_{ij} < (L_i + L_j) \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

$$E[Z_{ij} \setminus Z_{ij} > q_{ij}] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_i^2 L_j + L_i L_j^2 - 2 / 3 q_{ij}^3}{2L_i L_j - q_{ij}}, \quad 0 \leq q_{ij} < L_i \\ \frac{L_i^2 / 3 + L_i L_j + L_j^3 - q_{ij}^2}{2(L_i / 2 + L_j - q_{ij})}, \quad L_i \leq q_{ij} < L_j \\ \frac{1 / 3 (L_i + L_j)^3 + 2 / 3 q_{ij}^3 - (L_i - L_j) q_{ij}^2}{2(q_{ij} - L_i - L_j)^2}, \quad L_j \leq q_{ij} < (L_i + L_j) \end{array} \right\} \quad (4.13)$$

4.2.3. NORMALNI POPREČNI PROLAZ – NAJPOVOLJNIJA TRASA

U prethodnom odeljku tretirana je problematika određivanja najkraćeg rastojanja između dve slučajno izabrane skladišne lokacije koje su funkcije koordinata x i y . Međutim, postoje slučajevi kada se najkraće rastojanje slučajnih lokacija može realizovati samo korišćenjem normalnog poprečnog prolaza. To znači da je izbor optimalne odnosno najkraće putanje indiferentan u odnosu na položaj slučajnih lokacija odnosno koordinata x i y . Najkraće rastojanje između dve skladišne lokacije koje se nalaze u krajnjem levom odnosno desnom delu zone 2 je obezbeđeno korišćenjem gornjeg poprečnog prolaza (Slika 4.3). Za svaku vrednost koordinata x odnosno y u rubnim delovima zone 2, minimalna distanca između skladišnih lokacija se realizuje korišćenjem gornjeg poprečnog prolaza (pošto je ova trasa kraća od dijagonalnog poprečnog prolaza kao alternativne mogućnosti). Matematička interpretacija prethodno navedenog, glasi:

$$\begin{aligned} x + v + a|i - j| + v + y < \\ < (L_i - x) + w + d_v|i - j| + w + (L_j - y), \quad x \in [0, L_i], \quad y \in [0, L_j] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Ako nejednačinu primenimo za najjisturenije tačke prolaza i odnosno j (to su najudaljenije tačke od normalnog poprečnog prolaza), tada je ona primenljiva za sve ostale tačke unutar tih prolaza, pa imamo:

$$L_i + L_j < (d_v - a)|i - j| + 2w - 2v \quad (4.15)$$

Nejednačina definiše uslov koji se mora zadovoljiti da bi normalan poprečan prolaz bio uvek najkraća trasa između skladišnih lokacija, nezavisno od položaja koordinata x i y . Očekivana vrednost između dve skladišne lokacije slučajno izabrane u prolazima prikupljanja i odnosno j je oblika:

$$E[i, j] = (L_i + L_j) / 2 + a|i - j| + 2v \quad (4.16)$$

Ovaj rezultat ima značajnu primenu prilikom definisanja ukupnog očekivanog rastojanja između skladišnih lokacija koje se nalaze unutar iste karakteristične zone skladišta.

4.2.4. OČEKIVANO RASTOJANJE UNUTAR KARAKTERISTIČNE ZONE

Očekivano rastojanje između dve skladišne lokacije koje se nalaze u različitim prolazima prikupljanja i odnosno j karakteristične zone 2 skladišta se definiše preko:

$$E[TB_{ij}^{22} | i \neq j] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(L_i + L_j)}{2} + a|i - j| + 2v, \quad L_i + L_j < (d_v - a)|i - j| + 2w - 2v \\ \left(\frac{E[Z_{ij}(Z_{ij} < q_{ij})] +}{a|i - j| + 2v} \right) P_r(Z_{ij} < q_{ij}) + \\ \left(\frac{L_i + L_j - E[Z_{ij}(Z_{ij} > q_{ij})] +}{d_v|i - j| + 2w} \right) P_r(Z_{ij} > q_{ij}), \quad otherwise \end{array} \right. \quad (4.17)$$

Kao što je već ranije naglašeno, rezultati dobijeni za karakterističnu zonu 2 skladišta mogu se implementirati i na zone 1 odnosno 3. Iako je broj prolaza različit kao i njihove dužine, jednačine koje se odnose na očekivana rastojanja su validne i u oblastima 1 i 3 skladišta. Prema tome, očekivano rastojanje između dve skladišne lokacije koje se nalaze unutar oblasti 1 odnosno 3 se dobija primenjujući (4.17) zamenom parametra d_v sa d_h .

Iz teorije verovatnoće je poznato da očekivano rastojanje između dve skladišne lokacije slučajno izabrane unutar istog poprečnog prolaza (npr. i -tog prolaza dužine L_i), pod pretpostavkom da su lokacije uniformne raspodele (svaka ima istu verovatnoću izbora) iznosi $L_i/3$. Verovatnoća da će se dve skladišne lokacije naći u i -tom prolazu i r -toj karakterističnoj oblasti ($r = 1, 2$ i 3) je data sa:

$$p_i = \frac{L_i}{\sum_{j=1}^{N_r} L_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_r \quad (4.18)$$

Odnosno

$$\sum_{i=1}^{N_r} p_i^2 + \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j \neq i}^{N_r} p_i p_j = 1 \quad (4.19)$$

Konačno, ukupno očekivano rastojanje između dve slučajno izabrane skladišne lokacije r -te zone je:

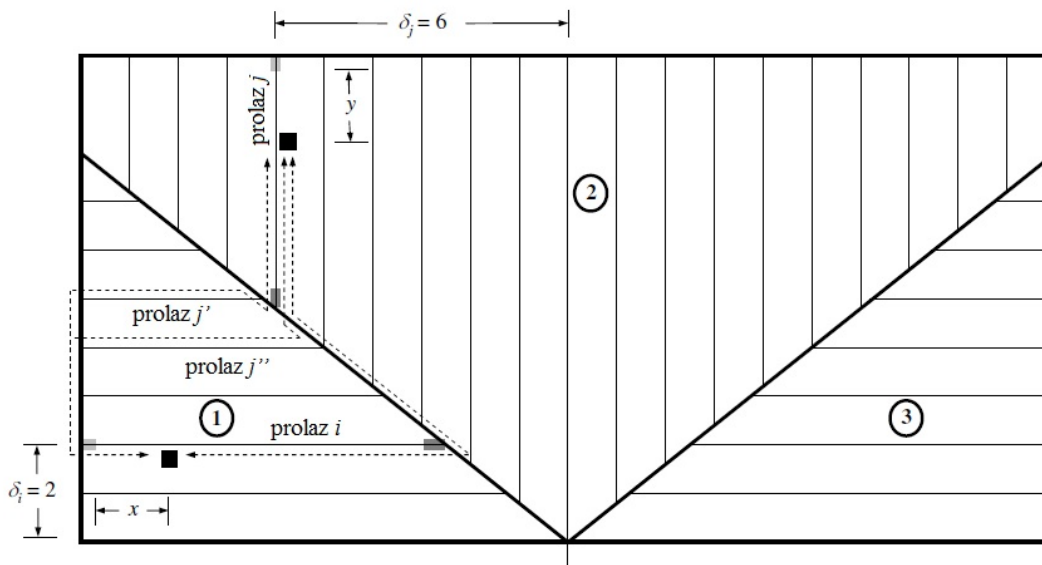
$$E[TB^{rr}] = \sum_{i=1}^{N_r} \left(\frac{L_i}{3} \right) p_i^2 + \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j \neq i}^{N_r} E[TB_{ij}^{rr}] p_i p_j \quad (4.20)$$

4.2.5. OČEKIVANO RASTOJANJE IZMEĐU DVE KARAKTERISTIČNE ZONE

Kod određivanja očekivanog rastojanja između dve skladišne lokacije različite karakteristične oblasti (regiona) skladišta, razlikuju se dva slučaja (A i B) u zavisnosti od korišćenja dijagonalnog ili normalnog poprečnog prolaza (Slika 4.4). Pretpostavimo da se skladišna lokacija u zoni 1 nalazi u prolazu prikupljanja i ($i = 1, 2, \dots, N_1$), odnosno da se druga skladišna lokacija koja pripada zoni 2, nalazi u prolazu prikupljanja j ($j = 1, 2, \dots, N_2$). U slučaju A, prolazi prikupljanja i odnosno j ispunjavaju sledeća dva uslova:

- ◆ Oba prolaza prikupljanja se nalaze u levom delu skladišnog prostora i
- ◆ Tačka preseka prolaza prikupljanja i sa dijagonalnim poprečnim presekom je bliža PD tački, nego presečna tačka prolaza j sa poprečnim prolazom.

Kada su ova dva uslova ispunjena, tada se za kretanje između dve skladišne lokacije koristi levi vertikalni poprečni prolaz (koristeći prolaze j' ili j'') ili dijagonalni poprečni prolaz, jer obezbeđuje najkraće rastojanje.



Slika 4.4. Skladišne lokacije između različitih zona “fishbone” skladišta

Slučaj B se primenjuje za sve kombinacije prolaza koji ne ispunjavaju uslove iz slučaja A , a odnose se na i odnosno j u levom delu skladišta. Rastojanje tačke preseka prolaza prikupljanja j sa poprečnim prolazom i PD tačke je manje ili jednako od distance koja odgovara slučaju A .

Slučaj B obuhvata i varijantu koja se odnosi na prolaze i odnosno j u suprotnim stranama skladišta. Trasa koja odgovara slučaju B koristi gornji horizontalni poprečni prolaz (i' ili i'') ili dijagonalni poprečni presek.

Ako A odnosno B predstavlja skup parova prolaza koji ispunjavaju uslove slučaja A odnosno B reprezentujući time udeo svih parova prolaza između regiona 1 i 2, tada je ukupno očekivano rastojanje između skladišnih lokacija koje se nalaze u različitim zonama (npr. u zonama 1 i 2) je oblika:

$$E[TB^{12}] = \sum_{i,j \in A} E[TB_{ij}^{12(A)}] p_i p_j + \sum_{k,l \in B} E[TB_{kl}^{12(B)}] p_k p_l \quad (4.21)$$

Gde je:

p_i – verovatnoća definisana sa (4.18)

$E[TB_{ij}^{12(A)}]$ – očekivano rastojanje koje odgovara slučaju A (prilog 2)

$E[TB_{kl}^{12(B)}]$ – očekivano rastojanje koje odgovara slučaju B (prilog 2)

Zbog simetričnosti skladišta, očekivana rastojanja između skladišnih lokacija koja odgovaraju karakterističnim zonama 2 i 3 odnosno 1 i 3 su identična, pa važi:

$$E[TB^{12}] = E[TB^{23}] \quad (4.22)$$

Ako pretpostavimo da se jedna skladišna lokacija nalazi u prolazu i karakteristične zone 1, a druga u prolazu j zone 3, pod pretpostavkom da je $i, j = 1, 2, \dots, N_1$ i $N_1 = N_3$, moguće trase kretanja se odnose na dijagonalni poprečni prolaz ili na gornji horizontalni poprečni prolaz (Slika 4.5).

Ako je trasa kretanja duž gornjeg horizontalnog poprečnog prolaza, potencijalno postoje dve alternativne idući od prolaza i odnosno j do gornjeg poprečnog prolaza (prolazi i' i i'' odnosno j' ili j'').

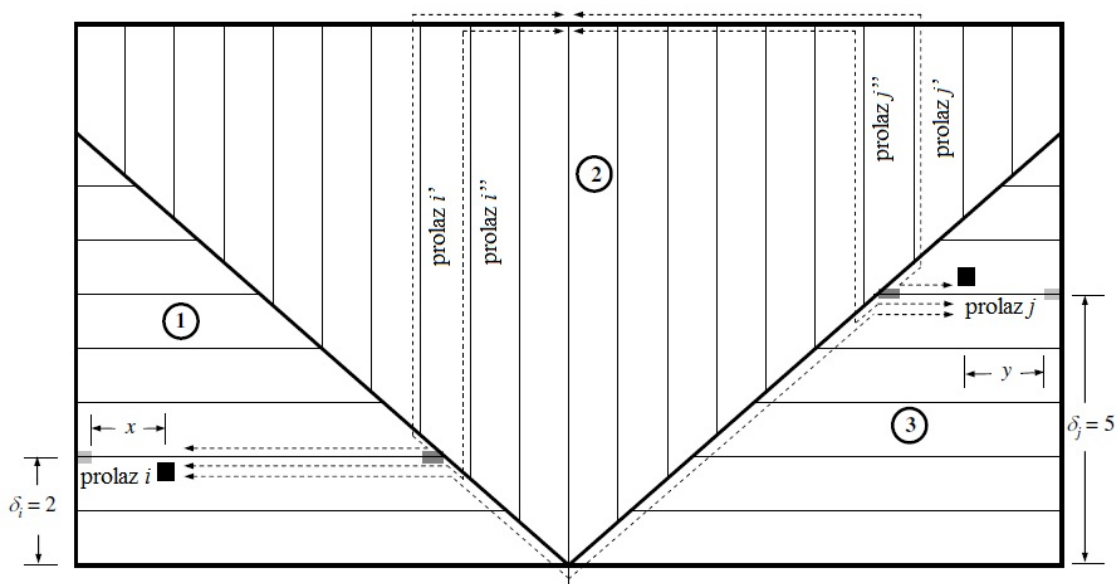
Očekivano rastojanje između skladišnih lokacija koje su dislocirane u zoni 1 i 3 je:

$$E[TB^{13}] = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} E[TB_{ij}^{13}] p_i p_j \quad (4.23)$$

Gde je:

p_i – verovatnoća definisana sa (4.18) i

$E[TB_{ij}^{13}]$ – očekivano rastojanje između prolaza i odnosno j koji su u zonama 1 i 3 (Prilog 3).



Slika 4.5. Skladišne lokacije u zona 1 i 3 “fishbone” skladišta

4.2.6. UKUPNO OČEKIVANO RASTOJANJE LOKACIJA SKLADIŠTA

Verovatnoća da će dve skladišne lokacije sa dvokomandnim režimom rada naći u karakterističnim zonama r i s ($r, s = 1, 2$ i 3) je:

$$w_{rs} = \frac{T_r T_s}{T^2} \quad (4.24)$$

Gde je:

T_r – ukupna dužina prolaza prikupljanja u karakterističnoj zoni r ,
 T_s – ukupna dužina prolaza prikupljanja u karakterističnoj zoni s i
 T – ukupna dužina prolaza prikupljanja celukpnog skladišta.

Konačno, ukupno očekivano rastojanje između dve skladišne lokacije, slučajno izabrane unutar skladišnog prostora, se definiše preko sledećeg izraza:

$$E[TB] = E[TB^{11}]w_{11} + E[TB^{22}]w_{22} + E[TB^{33}]w_{33} + 2E[TB^{12}]w_{12} + 2E[TB^{13}]w_{13} + 2E[TB^{23}]w_{23} \quad (4.25)$$

4.3. OPTIMIZACIJA LAYOUT-a SKLADIŠTA

Projektovanje layout-a regalske opreme kod skladišta sa dvokomandnim sistemom opsluživanja podrazumeva definisanje distance između dve slučajne skladišne lokacije koje se odnose na operacije dopremanja i optremanja skladišnih jedinica. U tom slučaju, očekivano rastojanje dvokomnadnog sistema osluživanja predstavlja zbir očekivanog rastojanja za jednokomandni način upravljanja i očekivane distance između skladišnih jedinica, tj imamo:

$$E[DC] = E[SC] + E[TB] \quad (4.26)$$

Gde je:

$E[SC]$ – očekivano rastojanje sa jednokomandnim sistemom opsluživanja i

$E[TB]$ – očekivana distanca između dve slučajne lokacije skladišta koje su akteri. dvokomandnog sistema

Očekivano rastojanje sa jednokomandnim načinom opsluživanja su razvili Gue i Meller [45] i ima oblik:

$$E[SC] = 2 \left[\frac{a}{2} + \sum_{i \in V} p_i \left(\delta_i d_v + w + \frac{L_i}{2} \right) + \sum_{j \in H} p_j \left(\delta_j d_h + w + \frac{L_j}{2} \right) \right] \quad (4.27)$$

Gde je:

V – oblast skladišta sa vertikalnim prolazima,

H – oblast skladišta sa horizontalnim prolazima i

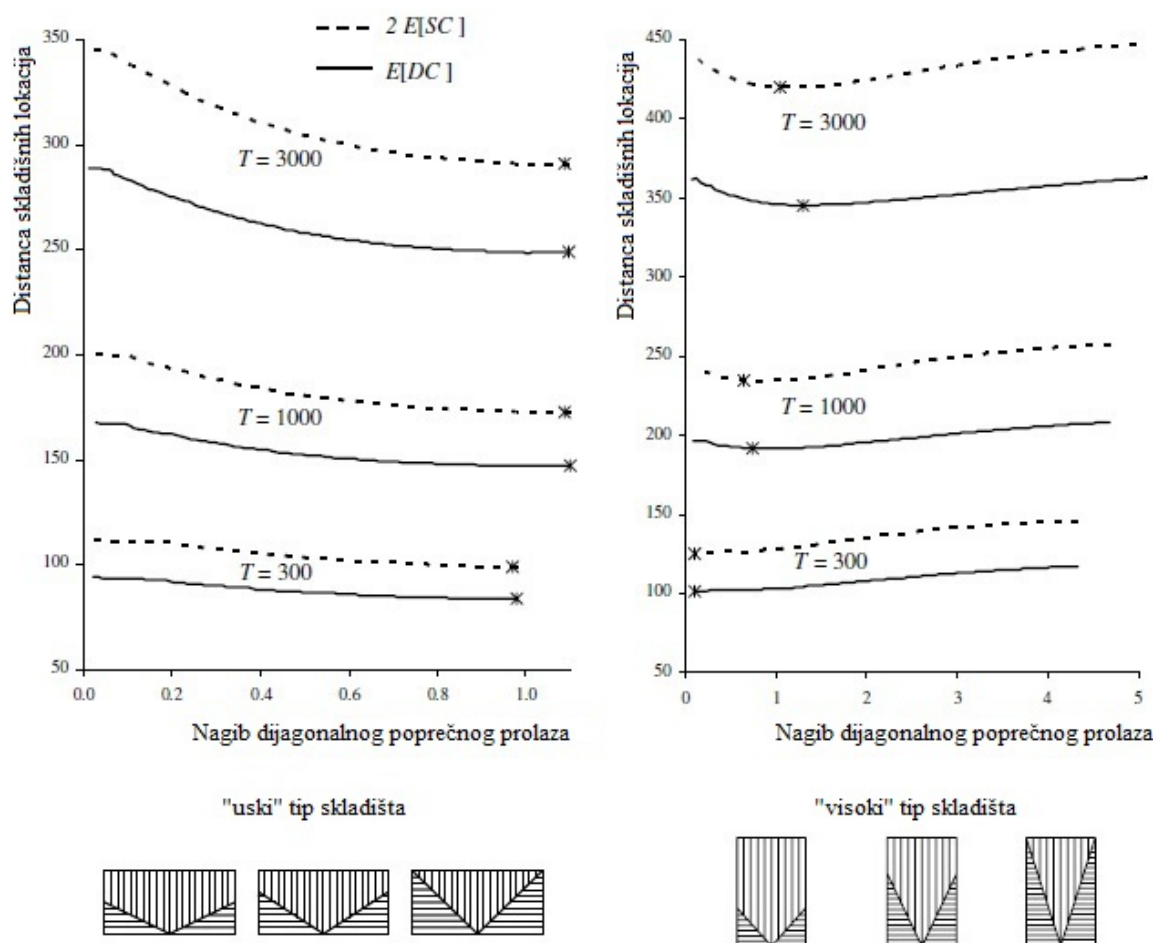
δ_i i δ_j – predstavlja ceo broj prolaza između PD tačke i prolaza i odnosno j .

Veličina $E[DC]$ je karakteristika skladišta koja je u funkcionalnoj zavisnosti od skladišnog kapaciteta (prostora skladištenja) i rasporeda regala odnosno prolaza prikupljanja. Najpovoljnija rešenja skladišta sa aspekta razmeštaja regalske opreme zahtevaju minimizaciju očekivanog rastojanja $E[DC]$, zadržavajući pritom ukupnu dužinu prolaza prikupljanja T konstantnom veličinom ($T = const.$). Zadatak optimizacije je da se za određenu konstantnu vrednost parametra T definiše nekonvencionalna konfiguracija regala sa dijagonalnim poprečnim prolazom. Širina skladišta, data preko broja vertikalnih prolaza i nagiba dijagonalnog prolaza prikupljanja predstavljaju nezavisno promenljive veličine, čija varijacija treba da dovede do optimalnog rešenja.

Optimizacioni proces se sprovodi kroz sledeća četiri koraka [49]:

- Definisane širine skladišta preko diskretnog broja prolaza za različite vrednosti T ,
- Za svaku vrednost širine skladišta se razmatra 100 vrednosti nagiba n koji uzimaju vrednosti od minimalne (nulte) do maksimalne (definisane uglom dijagonalnog poprečnog prolaza kada se završava u gornjem uglu skladišta),
- Izračunavanje očekivanog rastojanja dvokomandnog režima rada, prema (4.26) i
- Izbor minimalne vrednosti $E[DC]$ čime se definišu traženi parametri skladišta.

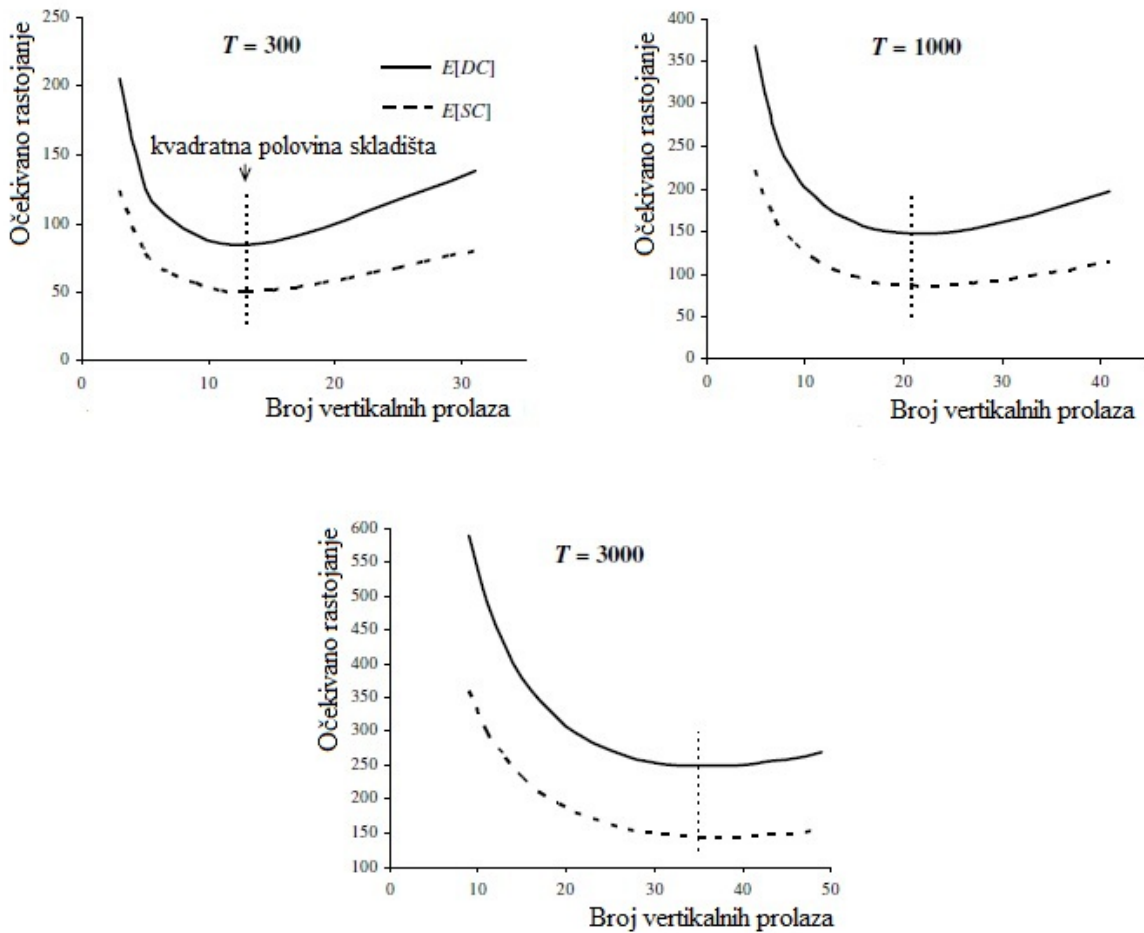
Rezultati optimizacije za dva oblika (“uski” i “visoki”) i tri veličine ($T = 300, 1000$ i 3000) “fishbone” tipa skladišta su prikazani na slici 4.6. Kod skladišta “uskog” tipa optimalna rešenja odgovaraju maksimalnoj vrednosti nagiba dijagonalnog poprečnog prolaza (nagib je označen sa zvezdicom). Dok kod “visokog” tipa skladišta optimalna vrednost nagiba je znatno manja od maksimalnih vrednosti.



Slika 4.6. Očekivana rastojanja $E[DC]$ i $E[SC]$ za skladišta „uskog“ i „visokog“ tipa [49]

Očekivana rastojanja za jednokomandni i dvokomandni sistem rada, definisan preko $E[SC]$ odnosno $E[DC]$ u zavisnosti od broja prolaza (širine skladišta) su data na slici 4.7. Za razmatrane vrednosti parametra T ($T = 300, 1000$ i 3000) minimalne vrednosti očekivanih rastojanja $E[SC]$ i $E[DC]$ odgovaraju broju vertikalnih prolaza koji imaju vrednosti 13, 21 i 35, respektivno (definisane isprekidanim linijama). Ove širine odgovaraju približno polovini visine, što znači da je polovina skladišta kvadratnog oblika.

Rezultati ovih istraživanja su konzistentna sa optimalnim oblicima tradicionalnih skladišta sa jednokomandnim načinom opsluživanja [36-37].



Slika 4.7. Optimalni oblik skladišta u zavisnosti od parametra T [49]

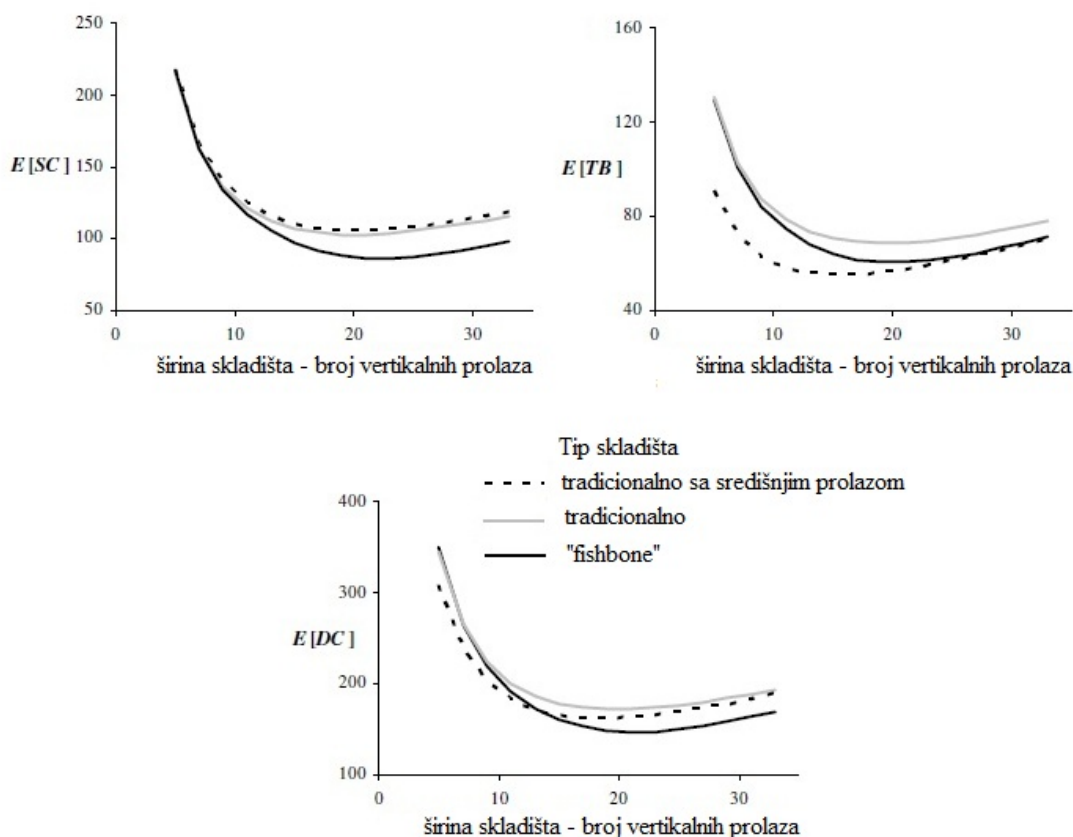
Na bazi prethodnih istraživanja, kod skladišta tipa “fishbone” sa dvokomandnim sistem izvršenja operacija identifikovana su sledeće dve zakonitosti kojih se treba pridržavati pri projektovanju skladišta:

- ♦ Širina skladišta mora biti približno dva puta veća od njegove visine i
- ♦ Dijagonalni poprečni prolaz treba se završava u gornjem uglu skladišta.

Rezultati optimizacije layout-a dvokomandnog sistema skladišta tipa “fishbone” su vrlo bliski sa vrednostima dobijenim za iste parametre sa jednokomandnim načinom opsluživanja [49]. Ova činjenica je naročito značajna za procenu osetljivosti optimizacione procedure, pošto tehnološki procesi često zahtevaju izmenu režima rada (jednokomandnog ili dvokomandnog upravljanja).

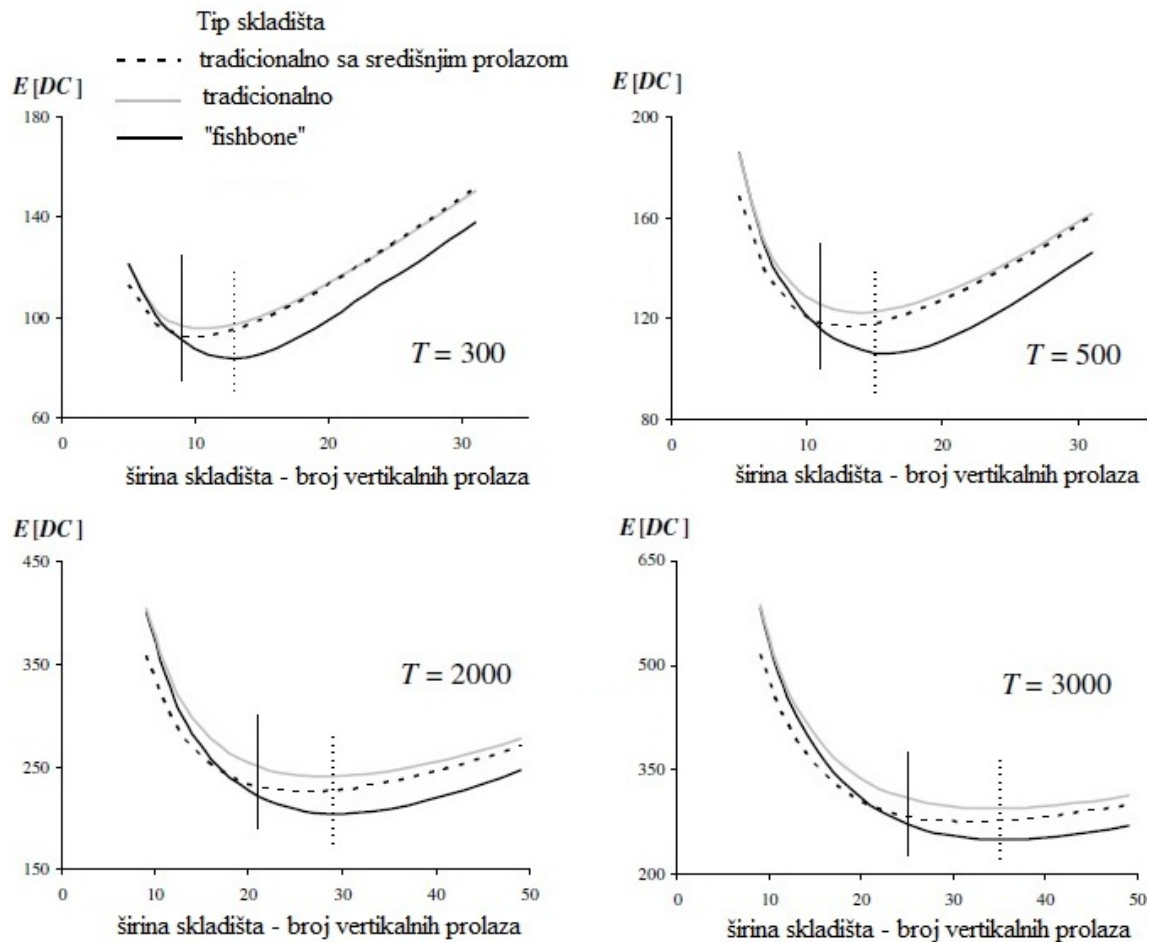
4.4. UPOREDNA ANALIZA SA TRADICIONALNIM SKLADIŠTIMA

Prema slici 4.8 može se zaključiti da izbor konfiguracije prolaza dominantno zavisi od oblika skladišta. Ako je visina skladišta veća od njegove širine, tada uvođenje normalnog poprečnog preseka daje najbolje rezultate, što odgovara tradicionalnom obliku skladišta (Layout C). Veća širina skladišta u odnosu na visinu implicira uvođenje dijagonalnog poprečnog prolaza, koji povezuje P&D tačku sa naspramnim uglovima skladišta odnosno zahteva primenu nekonvencionalnog skladišta tipa “fishbone”.



Slika 4.8. Komparaciona analiza očekivanih rastojanja u zavisnosti od tipa skladišta [49]

Ova konfiguracija regalske opreme definiše prolaze koji pri osluživanju skladišta obezbeđuju znatno kraća očekivana rastojanja između skladišnih lokacija. U odnosu na tradicionalnu dispoziciju (Layout C), nekonvencionalna skladišta tipa “fishbone” se odlikuje boljim performansama opsluživanja od 10 % za dvokomandni sistem rada (Slika 4.9). Za jednokomandni način opsluživanja ova razlika je veća za oko 15 %. S druge strane, redukovanje očekivanog rastojanja skladišnih lokacija u odnosu na Layout A i B, za dvokomandni sistem rada iznosi 15,5 %. Takođe, za jednokomandni pristup opsluživanja ova razlika je veća i kreće se oko 20 %. Ovo jasno pokazuje na nekonvencionalni tipovi skladišta imaju tehnološkog potencijala za redukovanje manipulativnih operacija odnosno logističkih troškova.



Slika 4.9. Očekivana distanca tradicionalnih i nekonvencionalnih skladišta [49]

Bitno je napomenuti da je izložena analiza tretirala samo lokacijski odnosno ravanski aspekt razmatranja (u ravni xy). Istraživanje položaja skladišnih jedinica otvara znatno veće mogućnosti optimizacije koja ide u pravcu redukovanja ne samo fizičke distance (pređenog puta), već i angažovane energije. Ovde posebno treba naglasiti da se najveći deo energije odnosi na podizanje skladišnih lokacija (za nadomeštanje visinske razlike). Optimizacijom energetskeg segmenta skladišta se definiše raspodela skladišnih jedinica duž pojedinih prolaza prikupljanja u odnosu na zonu deponovanja odnosno P&D tačku (ili više njih ako ih ima). Dobijena raspodela neće biti uniformna (već eksponencijalna ili nekog drugog karaktera), što inicira znatno kompleksniji matematički model, iako je procedura slična sa prethodno iznetim postupkom.

Osim toga, treba imati u vidu da je su oblici netradicionalnih još uvek u fazi razvoja. Oblici koji kombinuju specifičnosti prethodno razmatranih tipova predstavljaju respektabilno rešenje nekonvencionalnih skladišta.

5. DINAMIČKO PROGRAMIRANJE FUNKCIONALNIH POVRŠINA I TOKOVA SKLADIŠTA

Do sada je publikovano nekoliko studija u kojima su izložene metode za projektovanje skladišta. Problema projektovanja skladišta u literaturi je zasnovana na analitičkom i simulacionom pristupu, pri čemu ni jedan od ovih aspekta u nezavisnom obliku nije dovoljan za adekvatno projektovanja skladišnog sistema [50]. Kombinovani pristup analitičkog i simulacionog modela se upraksi pokazao kao dobra metoda u procesu projektovanja skladišta. Istraživanje o modelima protoka robe, skladišnih kapaciteta i projektovanja veličine skladišta je prezentovano u [51]. Istraživanje metoda i tehnika za planiranje i kontrolu skladišnih sistema izloženo je u [52]. Rouwenhorst et al. su prezentovali referentni okvir u pogledu klasifikacije metoda za projektovanje skladišta [53]. Većina ovih radova su zasnovani na analizama orjencionog karaktera i daju određene smernice istraživačkog pristupa u procesu projektovanja skladišnih sistema.

Projektovanje skladišta je strateško-taktički nivo odlučivanja koji se odvija u dve međusobno povezane faze. Prva faza je strateškog nivoa odlučivanja i odnosi se na izbor lokacije i veličine skladišta. U drugog fazi se definiše veličina i međusobni raspored funkcionalnih površina, kao i tokovi alociranja robe između ovih zona skladišta [54].

Numerička studija koja istražuje procedure projektovanja procesa prikupljanja robe unutar skladišta je data od strane [55-56]. U studiji koji je prezentovao Bozer, razmatrane su performance skladišnog sistema, gde su skladišni regali raspoređeni u dve odvojene funkcionalne površine: zonu zaliha i zonu prosleđivanja [57]. Ova problematika je tretirana od strane Hackman i Rosenblatt, koji su prezentovali heuristički model za analizu procesa u zonama zaliha i prosleđivanja radi minimizovanja troškova prikupljanja i popunjavanja [58].

Problematika određivanja veličine zone prosleđivanja, kao i alokaciju robe na ovoj funkcionalnoj površini skladišta je analizirana u studiji [59]. Procedura matematičkog programiranja koja omogućava rešavanje više značajnih zadataka i problem alokacije robe u skladištu je razmatran od strane Hackman and Platzman [60]. Analiza skladišnih funkcionalnih površina (zona zaliha i prosleđivanja) tokom perioda zauzetosti ili mirovanja u procesu prikupljanja robe je razmatran u studiji [61]. Autori konstatuju da vreme mirovanja pre procesa prikupljanja robe treba iskoristiti kako bi se redukovale aktivnosti nakon izdavanja zahteva za manipulacijom skladišnih jedinica, obavljajući dopunu robe pre aktiviranja naloga za proces prikupljanja. Ova preraspodela opterećenosti ne utiče samo na intenziviranje protoka robe, već smanjuje eventualne zastoje i akcidentne situacije unutar skladišta.

Izvestan broj radova se odnosi na analizu layout-a u okviru pretovarnih terminala, od čijih performansi opsluživanja zavisi ukupna efikasnost skladišnih procesa. Praktična uputstva vezana za planiranje, projektovanje i implementaciju pretovarnih operacija je izložena u [62]. Model troškova opsluživanja prilikom pretovarnih aktivnosti (utovar i istovar robe) za tri tipična scenarija zakrčenosti na pretovarnom terminalu je izložen u studiji [63]. U pomenutom istraživanju je konstantovano da se pogodnim izborom layout-a transportnih sredstava na pretovarnom terminalu mogu redukovati troškovi opsluživanja za oko 11 %. Model bilinearnog programiranja za povećanje efikasnosti pretovarnih operacija na primeru broderske kompanije je izložen u studijima [64-65].

Integralni pristup u projektovanju i operacionom opsluživanju tipičnog skladišta razvijen je od strane Gray et al. [66]. U radu se tretira problematika layout-a skladišta, izbora skladišne opreme i tehnologije, definisanja optimalne trase prikupljanja, redosleda prikupljanja i procesa komisioniranja. Usled kompleksnosti problema projektovanja skladišta, autori su razvili multifazni pristup hijerarhijskog odlučivanja.

Hijerarhijski pristup koristi niz koordiniranih matematičkih modela u pogledu procene glavnih ekonomskih neusklađenosti, čime se postiže redukcija prostora odlučivanja za nekoliko alternativa. Simulacione tehnike se koriste za procenu validnosti hijerarhijskog pristupa i finalizaciju rezultata projektovanja, kao i za utvrđivanje operativne organizovanosti skladišta. Preko hijerarhijskog pristupa koji podrazumeva korišćenje niza koordiniranih matematičkih modela u cilju procene glavnih ekonomskih kompromisa se vrši redukcija prostora odluke za nove alternative.

5.1. FUNKCIONALNE POVRŠINE I TOKOVI SKLADIŠTA

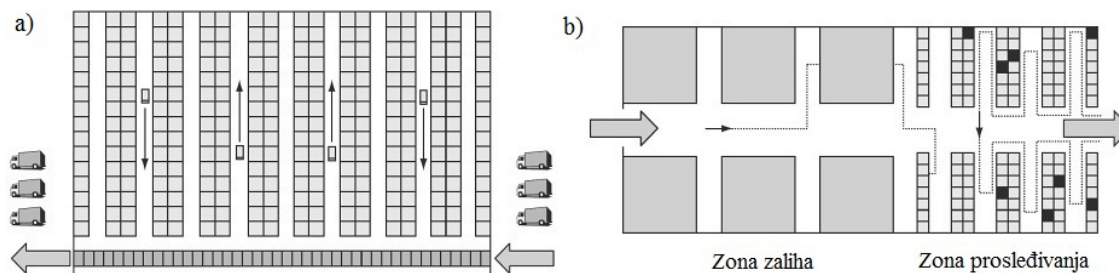
Dve osnovne funkcije skladišta se odnose na:

- Privremeno skladištenje u pogledu zaštite dobara i
- Pružanje usluga dodatne vrednosti, radi ispunjenja određenih zahteva kupaca (pakovanje, popravke, testiranje, inspekcija, montaža i sl.).

Skladište je radi obavljanje svoje funkcije podeljeno na sledeće funkcionalne površine (zone):

- Zonu zaliha,
- Zonu prosleđivanja i
- Pretovarnu zonu.

Zona zaliha skladišnog prostora omogućava čuvanje dobara sve dok se ne zahteva isporuka kupcu ili prosleđivanje radi obavljanje usluga dodatne vrednosti odnosno kolacioniranja (razvrstavanja). Za realizaciju ovih usluga nad skladišnim jedinicama koristi se zona prosleđivanja (Slika 5.1). Osim toga, ova funkcionalna površina skladišta se može koristiti i za brzo skladištenje dobara, koja ne zauzimaju mnogo mesta ili će vrlo brzo biti dalje distribuirana. Zonu pretovara karakteriše pretovarni proces onih dobara kod kojih se ne zahteva duže zadržavanje odnosno predviđeni su za dalju distribuciju. Time se ostvaruje brz protok robe i minimizuju troškovi manipulativnih aktivnosti, što je u skladu sa “just-in-time” strategijom poslovanja.



Slika 5.1. Šematski prikaz: a) zone zaliha i b) zone zaliha sa zonom prosleđivanja

Projektovanje skladišta je kompleksan problem i uključuje veliki broj međusobno povezanih odluka koji se odnose na skladišne procese, resurse i organizacije osobnosti [67]. Problematika projektovanja skladišta se klasifikuje u tri nivoa: strateški, taktički i operacioni [53].

Strateški nivo podrazumeva donošenje odluka globalnog karaktera vezanih za utvrđivanje broja skladišta, njihove veličine i lokacije, kao i neophodnih transportnih sredstava za postizanje željenog propusnog opsega. Strateške aktivnosti lokalnog karaktera odnose se na veća investiciona ulaganja, a obuhvataju definisanje funkcionalnih površina skladišta, njihove veličine, projektovanje tokova robe, konfiguracije skladišne tehnike (regala) i sistema menadžmenta skladišta.

Taktički nivo predstavlja srednji nivo odlučivanja koji je bazirana na rezultatima strateškog odlučivanja. Taktički nivo odlučivanja obuhvata procenu potrebne radne snage za opsluživanje skladišnog sistema, alokaciju dobara unutar funkcionalnih zona skladišta, razvoj strategije prikupljanja i popunjavanja, planiranje kapaciteta i dr.

Operacioni nivo odlučivanja se sprovodi u okvirima ograničenja koje diktiraju viši odnosno strateški i taktički nivoi upravljanja. Ovaj nivo karakteriše najmanji uticaj odlučivanja i investicionih ulaganja, a usmeren je na definisanje operativne politike skladišta, poput organizovanja skladišnih procesa (zaliha, prikupljanja i dr.). Operacioni nivo odlučivanja obuhvata usmeravanje tokova robe, definisanje količine robe, redosled odlaganja, kratkoročni raspored radne snage i sl.

Definisanje globalnih karakteristika skladišta se odnosi na definisanje makrolokacije i njegove veličine, dok lokalni parametri skladišta karakterišu veličinu i konfiguraciju pojedinih funkcionalnih zona, kao i odgovarajuće skladišne procesa kojim se obezbeđuje tok robe unutar skladišta. Naime, problem odeđivanja veličine svake funkcionalne zone odgovara strateškom nivo planiranja i spregnut je sa taktičkim aktivnostima koje se odnose na procese fizičke distribucije odnosno alokacije robe unutar skladišta.

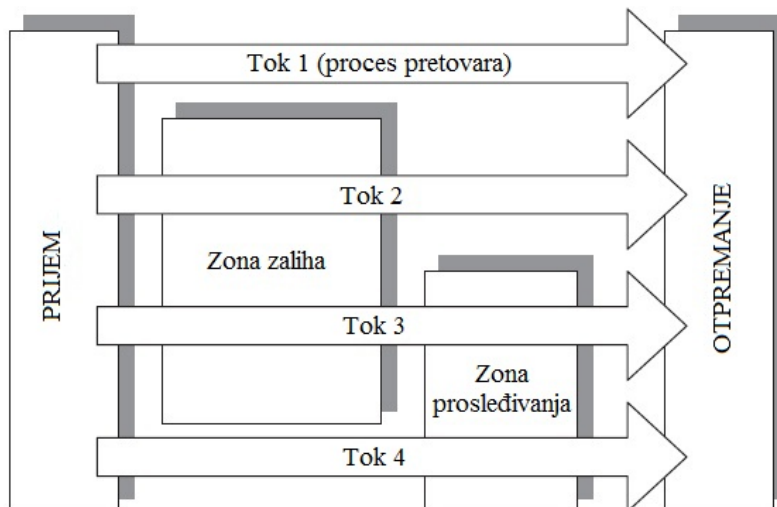
Razvoj modela funkcionalnih površina je značajan za definisanje njegove veličine i rasporeda u cilju minimizacije manipulativnih troškova prilikom alokacije robe. Pored toga, rezultati simulacionog modela funkcionalnih površina i skladišnih procesa predstavljaju bazu za detaljno projektovanje skladišta. Bez obzira što projektovanje funkcionalnih površina skladišta odgovara strateškom planiranju, njihova veličina se može menjati tokom eksploatacionog veka skladišta, zavisno od trendova razvoja i stanja tržišnih zahteva.

5.2. PRETPOSTAVKE MATEMATIČKOG MODELA

Konfiguracija skladišta sastavljena je od sledećih funkcionalnih oblasti, a odnose se na zone prijema, otpremanja, pretovara, zaliha i prosleđivanja. U prijemnoj zoni skladišta, dopremljena dobra se prihvataju, čiji je dalji tok definisan zahtevima kupaca odnosno organizacionim procesom skladišta. Ako se zahteva relativno brzo otpremanje ka kupcima odnosno drugim distributivnim centrima, roba se direktno otprema nakon procesa pretovara, uz mogućnost kratkotrajnog zadržavanja (skladištenja) na pretovarnom terminalu. U suprotnom, dobra se transportuju u zonu zaliha skladišta koja su opremljena skladišnom tehnikom (regalima) i omogućavajući veliku gustinu skladištenja za relativno dugi vremenski period. Skladišne jedinice se iz ove oblasti prikupljaju po određenom redosledu i transportuju do oblasti otpremanja gde se sortiraju i pakuju radi dalje distribucije. U nekim slučajevima, koriste se i zone prosleđivanja skladišta kada je neophodno manju količinu dobara uskladištiti na kraće vreme, radi brže manipulacije, kada se na skladišnim jedinicama zahtevaju operacije dodatnih vrednosti ili u cilju kolacioniranja (sravnjavanja).

Na bazi ovih tipičnih funkcija skladišta, razlikuje se sledećih pet tokova (slika 5.2):

- Tok 1 (primanje-pretovar-otprema) definiše slučaj kada se po prijemu proizvodnih dobara, ona direktno upućuju u zonu otpremanja radi distribucije ka kupcima ili sledećem skladištu u lancu snabdevanja (distributivnom centru). U nekim slučajevima, zahteva se sortiranje pojedinih artikla pre upućivanja ka drugim distributivnim centrima, što podrazumeva kraće skladištenje odnosno zadržavanje. Ova strategija je zbog svoje efikasnosti i smanjenih troškova poželjna aktivnost u upravljanju lancima snabdevanja. Međutim, u velikom broju slučajeva, ovakav pristup nije moguće realizovati, pa se primenjuju neki od sledećih tokova,
- Tok 2 (primanje-zalihe skladišta-otprema) je najčešće korišćena aktivnost kod skladišta. Dopremljeni artikli se transportuju do zone zaliha skladišta, gde se čuvaju određeno vreme, kada se po određenom redosledu prikupljaju i upućuju u oblast za otpremu,
- Tok 3 (primanje-skladištenje-prosleđivanje-otprema) je tipična aktivnost koja se sreće kod skladišta. Dopremljena proizvodna dobra na paletama se iz prijemne zone transportuju u oblast zaliha skladišta. Nakon toga, artikli se u određenom trenutku premeštaju u oblast prosleđivanja radi bržeg komisioniranja, konsolidacije ili obavljanja operacija uvećavajući dodatnu vrednost dobara (npr. montaža elemenata u sklopove, pakovanje i dr.) i
- Tok 4 (primanje-prosleđivanje-otprema) je specijalni slučaj prethodne varijante, gde se po prijemu dobra direktno transportuju u oblast prosleđivanja radi integrisanja velikih porudžbina, bez slanja na čuvanje u zonu zaliha. Ovo za posledicu ima veću efikasnost rada skladišta, a aktivnosti koje se odnose na ovaj tok robe su karakteristični za skladišta dobavljača odnosno kada je potrebna konsolidacija većih porudžbina.



Slika 5.2. Tipična tokovi robe i funkcionalne površine unutar skladišta

Na bazi prethodno iznetog činjeničnog stanja u pogledu literaturnog pregleda i mogućih scenarija za odvijanje robnih tokova odnosno procesa skladišta, proističe koncept modela za definisanje i simulaciju parametara skladišnog sistema. Trend razvoja modela za definisanje karakteristika skladišta može biti zasnovan na dva principa:

- Minimizovanju troškova skladištenja i
- Maksimizovanje profita skladišta

Modeli analize tokova robe (proces) i funkcionalnih površina skladišta, zasnovanih na prvom principu (minimizovanju troškova) su najčeće zastupljeni u literaturi, a rešavaju se heurističkim algoritmom ili primenom specijalizovanog softvera LINGO [68-70]. U okviru ove disertacije težište modeliranja funkcionalnih površina i procesa skladišta će biti pomena ka drugom principu odnosno bazirano je na modelu maksimizovanja profita skladišta. Razlozi za ovakav pristup se nalazi u sledećim činjenicama:

- ♦ Spoljašnji faktori značajno utiču na performanse skladišnog sistema,
- ♦ Interaktivni uticaj eksternih faktora nabavke i otpreme sa skladišnim parametrima i
- ♦ Optimalno projektovanje, planiranje i upravljanje skladišnim sistemom u lancu snabdevanja.

U nastavku je prezentovan model dinamičkog programiranja koji ima za cilj simulaciju ponašanja skladišta u uslovima tržišnih promena.

5.3. MATEMATIČKO MODELIRANJE

Efikasno upravljanje skladišnim sistemom podrazumeva primenu optimizacione matematičke metode koja je poznata pod nazivom dinamičko programiranje. Teorijsku osnovu primene dinamičkog programiranja je dao Richard Bellman za potrebe RAND Corporation (Santa Monica, California) koja se bavi istraživanjima za potrebe oružanih snaga USA [71]. Najjednostavnija formulacija problema skladištenja se odnosi na određivanje količine jedne vrste proizvoda koja se skladišti radi nabavke odnosno isporuke za unapred definisane nabavne odnosno prodajne cene [72].

Generalizacija modela koji reprezentuje problem skladišta podrazumeva analizu više različitih tipova proizvoda, čija se nabavne i prodajne cene različite tokom analiziranih vremenskih intervala [73]. Za rešavanje ovog generalizovanog problema skladištenja razvijeni su algoritmi bazirana na teoremi dualnosti [74] i principu pregrupisanja [75]. Tipičan skladišni problem koji je konstatovan od strane Charnes i Cooper [75] se odnosi na poslovanje distributerske kompanije u određenom vremenskom periodu, čije je skladište poznatog kapaciteta i namenjeno za skladištenje sezonskih proizvoda.

Posmatrani vremenski period se deli na karakteristične interval (npr. mecece, kvartale, tromesečja i sl.) i svaki se od niza uzastopnih interval karakteriše nabavnom odnosno prodajnom cenom određene jedinice proizvoda. Za svaki interval, prodajna cena ostaje konstantna do određenog broja jedinica proizvoda. U nekim slučajevima, prodajna cena može imati nižu vrednost kada prodata količina robe pređe određene limite.

Osnovno pitanje koje se odnosi na problem skladištenja razmatra model nabavke, skladištenja i prodaje, kako bi se sinhronizovanim aktivnostima ostvarila maksimalna dobit kompanije koja rukovodi radom skladišta. Interpretacija problema skladištenja kroz proces distribucije robe, koristeći princip nepozitivnih tokova duž određenih pravaca sa mešovitim graničnim uslovima je razmatran u studiji [76]. Granični uslovi razmatranog problema se nazivaju mešovitim, pošto obuhvataju količine robe za jedne redove i kolone odnosno cene za druge. Granični uslovi klasičnog problema distribucije koji je razmatrao Hitchcock, obuhvataju samo količine za sve redove i kolone [77].

Matematički model na bazi koga se određuje tok robe kroz svaku funkcionalnu površinu, kao i potrebnu veličinu svake od karakterističnih oblasti skladišta (zone zaliha i prosleđivanja) zasnovan je na funkciji maksimizacije profita. Matematički model koji će biti izložen odnosi se na definisanje optimalne strategije nabavke, skladištenja i prodaje, pod uslovom poznatih količina početnih zaliha A_s i fiksnog raspoloživog kapaciteta skladišta B_s . Matematički model se formira na bazi sledećih pretpostavki:

- Proces optimalnog strategijskog upravljanja sastoji se od m vremenskih perioda,
- Inicijalne količine zaliha određenog tipa robe A_s i raspoloživi kapacitet skladišta B_s su konstante,
- Nabavljena količina određene vrste robe u i -tom periodu je x_i ,
- Nabavna cena jedinične količine robe u i -tom period je q_i ,
- Troškovi skladištenja po jedinici robe u toku i -tog vremenskog perioda je c_i ,
- Prodajna cena jedinične količine robe u i -tom periodu je p_i ,
- Prodana količina robe u i -tom periodu je y_i ,
- Nabavna odnosno prodajna cena ne zavise od količine nabavljene odnosno prodate robe i
- Profit realizovan tokom preostalih i perioda, uz korišćenje optimalne strategije poslovanja skladišta sa početnom količinom zaliha A_s je definisan funkcijom $f_i(A_s)$.

Analitičko rešenje problema skladištenja primenom principa optimalnosti dinamičkog programiranja zasnovano je na maksimizovanju funkcije cilja, sledećeg oblika [71, 78]:

$$f_m(A) = \max[p_m y_m - q_m x_m + f_{m-1}(A + x_m - y_m)], \text{ za } m \geq 2 \quad (5.1)$$

Gde je:

$$f_1(A) = p_1 A, \text{ za } m = 1 \quad (5.2)$$

Ograničenja ove funkcije cilja se odnose na sledeće uslove:

- Limit nabavke: Ukupno nabavljena količina svih vrsta robe ne sme premašiti kapacitet skladišta,
- Limit prodaje: Prodata količina određene vrste robe na kraju i -tog perioda ne sme preći vrednost raspoložive količine te iste robe u $(i - 1)$ periodu i
- Limit pozitivnih količina: Sve nabavne odnosno prodajne količine robe moraju imati nenegativne odnosno pozitivne vrednosti.

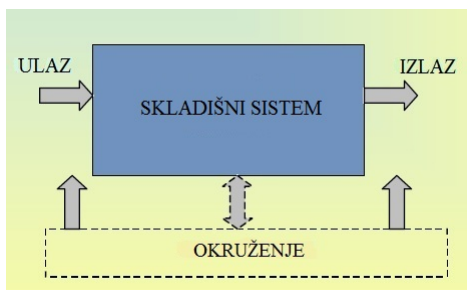
Matematička interpretacija prethodno definisanih ograničenja, respektivno glase:

$$\bullet \quad A + \sum_{i=1}^m (x_i - y_i) \leq B_s \quad (5.3)$$

$$\bullet \quad y_i \leq A_s + \sum_{i=1}^{m-1} (x_i - y_i) \text{ odnosno } y_1 \leq A_s \quad (5.4)$$

$$\bullet \quad (x_i, y_i) \geq 0 \quad (5.5)$$

Funkcija cilja data sa (5.1) uz zadovoljenje ograničavajućih faktora skladišta (5.2-5.4) reprezentuje matematički model kojim se simulira optimalan proces nabavke i prodaje robe od strane skladišta. U tom smislu, skladišni sistem posmatramo kao “crnu kutiju”, koji je u interakcija sa eksternim faktorima okruženja kroz kupo-prodajnu aktivnost (Slika 5.3).



Slika 5.3. Model “crne kutije” skladišta

Funkcija cilja (5.1) profit tretira kao razliku ostvarenog prihoda i sredstava angažovanih za nabavku robe, ne uzimajući u obzir logističke troškove (usluge transporta, pretovara, skladištenja i dr.). Razlozi za to se nalaze u činjenici da je ovaj pristup razvijen tokom 1950-tih godina, kada se logistika kao naučna disciplina tek formirala, što je indikator sledećih zaključaka:

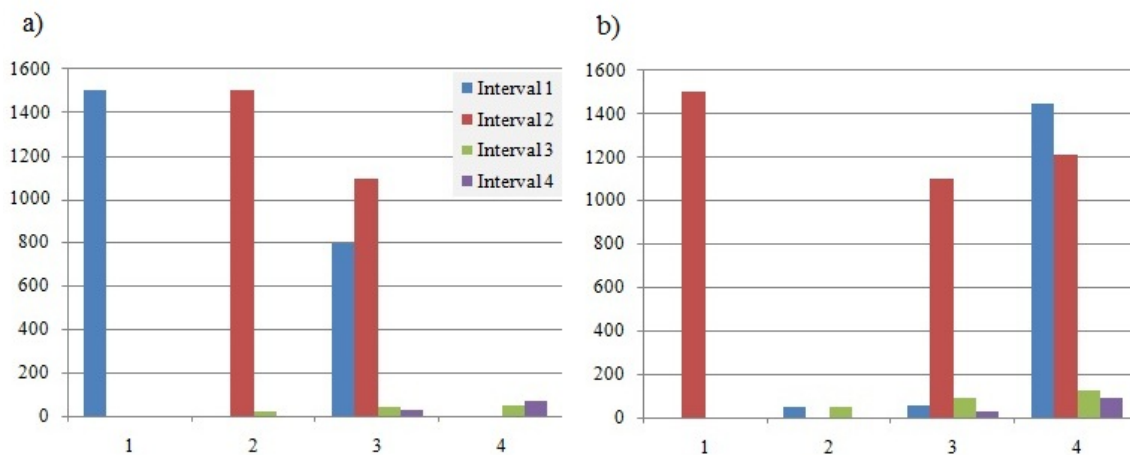
- ⇒ Nedovoljno razvijen istraživački pristup u to vreme za analizu logističkih troškova i
- ⇒ Nemogućnost implementacije tek razvijenog koncepta dinamičkog programiranja na optimizaciju složenijih sistema, poput tokova robe u skladišnim sistemima, lancima snabdevanja i sl.

Efikasnost tržišnog poslovanja kompanija je u funkcionalnoj zavisnosti od logističkih troškova. U savremenim uslovima softverske podrške, problem optimizacije procesa i kapaciteta pojedinih sistema lanca snabdevanja predstavlja trend u razvoju modernih logističkih sistema. Savremeni princip upravljanja lancima snabdevanja, u uslovima ustaljenog ekonomskog poslovanja, podrazumeva distribuciju što veće količine dobara, isporučenih u kratkim vremenskim intervalima i korišćenje minimalnih zaliha u logističkom lancu.

U nastavku je dato određivanje potrebnih količina robe u postupku nabavke i optreme kao bih profit realizovan skladišnim aktivnostima bio maksimalan. U tu svrhu, pretpostavljeno je da nabavne i prodajne cene robe variraju tokom posmatranog perioda, koji je podeljen u četiri jednaka vremenska intervala. U analizu su uključeni i troškovi skladištenja c_i koji su dati preko fiksnog i varijabilnog dela, pretpostavljajući da su linearna funkcija nabavljene količine robe x_i . Funkcija cilja koja prem ovim pretpostavkama definiše profit je data sa (5.6).

$$f_{profit} = \max \left\{ \sum_{i=1}^4 [p_i y_i - q_i x_i - c_i] \right\} \quad (5.6)$$

Odgovarajuća ograničenja i model funkcionalnih površina odnosno tokova skladišta na bazi kojeg su definisana ograničenja dat je u Prilogu 4. Problem spada u kategoriju dinamičkog programiranja i rešen je primenom softvera Microsoft Excel (modul Solver). Rezultati su prikazani dijagramski za četiri intervala, unutar koga su definisane nabavne i prodajne količine jedne vrste robe. Razmatrani intervali se mogu odnositi na mesece, pa u tom slučaju analiza odgovara prvom tromesečju godine.



Slika 5.4. Potrebne količine robe za: a) nabavku i b) prodaju

Vrednosti na ordinati predstavljaju količinu robe, dok apciska osa reprezentuje broj tokova unutar skladišta (razmatran je slučaj sa 4 toka). Analizom podataka sa prethodne slike može se zaključiti da najveće količine nabavne i prodajne količine robe se odnose na prva dva intervala (mesece), dok se u poslednja dva odvija minimalan broj aktivnosti. Posledica ovog stanja su tržišna kretanja posmatrane vrste robe i tehnološke mogućnosti skladišta. Tok između zone zaliha i zone komisioniranja je aktivan samo za vreme prvog intervala, što je pokazuje na neadekvatnu harmonizaciju funkcionalnih površina i tokova skladišta (za date podatke).

Značaj ovakog koncepta analize skladišta ogleda se u mogućnosti njegovog integrisanja u sistem predviđanja i procene efikasnosti skladišta. U takvom okruženju, ulazne i izlazne količine robe, kao i njihove cene su slučajno promenljive odnosno statističke varijable koje su dobijene prethodno nezavisnim istraživanjem (analizom tržišta). Statistička procena dugoročnog karaktera je bitna u procesu projektovanja, dok srednjeročna i kratkoročna prognoza omogućavaju efikasno operativno planiranje i organizovanje rada skladišta.

6. STRUKTURNA ANALIZA REGALSKOG SKLADIŠTA – PREGLED STANJA

Hladno-valjani čelični profili su u širokoj upotrebi u izvođenju lakih konstrukcija, koje se odlikuju relativno velikim specifičnom nosivošću (nosivost po jedinici mase). Konstrukcije ovog tipa omogućavaju laku montažu i demontažu, kao i ekonomičnost izgradnje. Hladno-oblikovani profili su najpre upotrebljavani za izvođenje specifičnih konstruktivnih struktura kao što su regalska skladišta, dok je savremena upotreba ovih profila znatno implementirana i nalazi primenu kod različitih struktura (npr. izgradnja objekata, skladišta, hala i sl.). Otpornost i efikasnost hladno-oblikovanih čeličnih profila zavisi od oblika poprečnog preseka, kao i njegove dužine. U tom smislu su identifikovana tri osnovna modaliteta izvijanja: lokalni, distorzioni i globalni. Više o ovim modovima izvijanjima kao i njihovom interaktivnom dejstvu dato je u poglavlju 7.

Eksperimentalna ispitivanja elemenata regala predstavlja važan aspekt analize regalskih skladišta i najpre je korišćena u cilju procene nosivosti, a u savremenim uslovima istraživanja koristi se za verifikaciju rezultata. Osnovni elementi regalskog skladišta su stubovi i nosači, pa se ovi elementi najčešće tretiraju u postupku istraživanja nosivosti. Stubovi nosača su dominantno opterećeni pritiskom (izloženi su i savijanjem), dok su nosači usled vertikalnog (korisnog) opterećenja izloženi momenatu savijanja u vertikalnoj ravni. Detaljna analiza elemenata nosača od aktivnog i pasivnog opterećenja data je u poglavlju 7.

Stubovi regala, bez obzira na tip poprečnog preseka, uvek imaju otvore određenog oblika i konstantnog međusobnog rastojanja, čija konfiguracija predstavlja perforaciju regalskog stuba. Perforirani otvor predstavlja konstruktivno rešenje koje omogućava vezu stuba odnosno stranice regala sa podužnim nosačima, obrazujući funkcionalnu stabilnu strukturu regalske konstrukcije. Međutim, sa aspekta naponske analize, a naročito procesa projektovanja perforacija predstavlja veliki problem, pošto utiče na kompleksnost proračuna nosivosti. Veza stubova i podužnih nosača se ostvaruje preko profilisanih konektora čiji je oblik kompatibilan sa perforiranim otvorima stuba.

Ovaj tip veze je siguran i pouzdan bez primene dodatnih elemenata za vezu (npr. vijaka i sl.), obezbeđuje laku montažu i demontažu, fleksibilnost visine etaže i ekonomičnost u pogledu iskorišćenosti. Da bi se ispunili postavljeni zahtevi od strane korisnika regala (zahtevi su ekvivalentni sa prethodno navedenim prednostima), inženjeri su primat dali konstrukciji stubova sa perforiranim otvorima. Iako je u poslednje vreme razvijen veliki broj varijantnih rešenja perforiranih otvora odnosno profilisanih konektora, treba istaći da je princip ostvarivanja veze stuba i nosača ostao nepromenjen.

Kod svih dosada poznatih odnosno izvedenih rešenja, veza stuba i nosača je realizovana oblikom otvora i profilisanog konektora, neposrednim fizičkim užlebljenjem. Do sada nisu realizovana rešenja koja bih obezbedila vezu stuba i nosača na bazi principa oblika bez perforiranih otvora. U okviru ovog istraživanja pažnja će biti usmerena na perforirane otvore.

6.1. STANDARDI I METODE PRORAČUNA

Eksperimentalno istraživanje novijeg datuma koje tretira distorziono izvijanja stuba dato je u [79]. Uzorci koji su predmet analize imaju različite dužine, ali moraju biti u opsegu koji je karakterističan za pojavu distorzionog izvijanja. To podrazumeva da dužine uzoraka moraju biti dovoljno velike na pojavu distorzionog izvijanja i dovoljno mala da nisu podložne iniciranju globalnog (Euler-ovog) izvijanja. Veličine koje se mere odnose se na relativnu ugaonu deformaciju elemenata usled otvaranja odnosno zatvaranja poprečnog preseka. Treba istaći da između navedenih modova izvijanja ne postoji striktna granica, pa je distorzioni mod u interakciji sa lokalnim i globalnim izvijanjem, što je verifikovano eksperimentalnim putem.

Savremeno projektovanje regala, sa posebnim osvrtom na perforirane stubove, zahteva korišćenje metoda i procedura koje daju preporuke za optimalno projektovanje i procenu otpornosti odnosno naponskog stanja. Evropski standard koji se odnosi na projektovanje hladno-oblikovanih struktura Eurocode 3 Part 1.3 (EC 3) daje preporuke za procenu otpornosti stubova. Osim toga, softveri koji su bazirani na metodi konačnih elemenata značajno redukuju broj skupih i dugotrajnih ispitivanja, a pružaju mogućnost aplikacije na složene geometrijske oblika, sa potpuno proizvoljnih dejstvom opterećenja i konturnim uslovima oslanjanja.

Integrirani pristup eksperimentalnog ispitivanja, FE analize i procedure EC 3, izložen je od strane istraživača [80]. Predmet istraživanja je fokusiran na određivanje efektivne površine A_{eff} i efektivnog centra gravitacije g_{eff} poprečnog preseka. Analitički metod, koristeći EC 3, daje dobre rezultate kod određivanja A_{eff} , dok rezultate g_{eff} prati znatno odstupanje od eksperimentalnih vrednosti. Što se tiče FE analize, njeni rezultati su saglasni sa eksperimentalnim vrednostima, za svih 9 razmatranih tipova poprečnog preseka stuba. Konstantovano je da se EC 3 može primeniti na perforirane stubove, dok površina efektivne zone poprečnog preseka A_{eff} uključuje odbijanje površine koja se odnosi na perforaciju.

EC 3 ima ograničenje u pogledu primene na kompleksnije oblika, ali daje zadovoljavajuće rezultate za Ω profile manje dubine (tipične profile za stubove novijeg datuma). U prošlosti, nijedan od poznatih metoda nije mogla u potpunosti zameniti eksperimentalna ispitivanja. Razlozi za to leže u činjenici da je potrebno simulirati potpuno proizvoljne uslove opterećenja i oslanjanja, geometrijske nesavršenosti i rezidualne napone. Zato su istraživanja uglavnom bazirana na eksperimentalnim podacima [81].

Poprečni preseki koji su u prethodnom periodu bili najčešće u upotrebi odnosili su se na C i Z oblike, pa se najveći broj ispitivanja upravo i odnosi na ove profile. Na osnovu obimnih eksperimentalnih baza podataka, osnovne postavke iz teorije ploča su integrirane i zatim su kalibracionom procedurom dopunjene i prilagođene za praktično korišćenje. Ovim su stvorene prve metode koje tretiraju problematiku projektovanja hladno-oblikovanih profila.

Procedura koja se najpre pojavila odnosila se na metodu efektivne širine (EWM) i njeni fundamenti potiču iz teorijskih podloga koje je definisano Timoshenko [82-83] i modifikacija koje su predložene najpre od strane von Kármán-a [84], a zatim kalibracije prethodnih rezultata prema Winter-u [85]. Ova metoda je najduže u upotrebi, pa je najveći broj vodećih svetskih standarda odnosno propisa, koji se odnose na projektovanje hladno-oblikovanih poprečnih preseka, bazirana u većoj ili manjoj meri na ovoj metodi. Osnovna verzija Severnoameričkog standard AISI S100-2007 (verzija iz 1996) [86], Evropski standard EN 1993 1-3, koji je poznat pod nazivom Eurocode 1.3 (EC 3) [87], kao i Brazilski propis ABNT NBR 14762 [88], utemeljeni su na primeni metode efektivne širine EWM. Međutim, praktično korišćenje ove metode (najčešće kroz standardne procedure) pokazalo je da EWM u mnogim slučajevima prati znatna varijacija rezultata od eksperimentalnih vrednosti, ali i od drugih pristupa [89-90]. U tom smislu, bilo je neophodno formirati metodu koja ne bih bila suviše konzervativnog karaktera, a istovremeno omogućavala jednostavnu primenu i optimizaciju preseka odnosno razvoj savremenih oblika stubova i nosača.

Odgovor na nedostatke EWM-a bio je razvoj metode direktne otpornosti (DSM), koja je preporučena od strane Schafer-a i Pekoz-a [91]. DSM je empirijska metoda, dobijana kalibracijom eksperimentalnih vrednosti, koja na jednostavan i direktan način omogućava procenu otpornosti stubova i nosača na gubitak stabilnosti. Ova metoda ne zahteva iteracioni postupak (poput EWM), već se postupak definisanja otpornosti primenjuje u eksplicitnoj formi - direktno, po čemu je i dobila naziv. Zbog svojih prednosti u odnosu na EWM, karakteristike DSM su uključene u neke već postojeće standarde, poput AISI S 100-2007 kroz dodatak odnosno Appendix 1 i predstavlja poslednju verziju Severnoameričkog standarda iz 2007. godine. Više detalja i osnovnih principa na kojima su utemeljene prethodno iznete metode (EWM i DSM) dato je u poglavlju 7. Vrlo često se ove dve metode u istraživanju međusobno upoređuju i dopunjuju, pri čemu je zbog izvesnih benefiti prednost data DSM. Najveći broj istraživanja hladno – oblikovanih profila primenom EWM i DSM, utemeljeni su na analizi distorzionog izvijanja, kao i na međusobnoj interakciji sa ostala dva moda: lokalnog i globalnog karaktera.

Globalno (Euler-ovo) izvijanje je najpoznatiji mod izvijanja, koji je najpre definisan za zatvorene preseka, dok je za otvorene tankozidne elemente u potpunosti identifikovan od strane Timoshenko-a [83]. Fenomen lokalnog izvijanja je fenomen koji je znatno kasnije ustanovljen, a često nastupa u interakciji sa globalnim izvijanjem. Fenomen lokalnog izvijanja je najpre ustanovljen opservacijom u toku eksploatacionog praćenja, da bi se eksperimentalnim ispitivanjem identifikovao kao nezavisan modalitet izvijanja. Analitička podloga za matematičku interpretaciju lokalnog izvijanja je razvijana paralelno sa teorijom tankih ploča opterećenih u svojoj ravni i značajne rezultate u toj oblasti dali su von Kármán i Timoshenko.

Postupak izvođenja eksperimenta radi definisanja lokalnog izvijanja nosača izložen je u [92]. Autori ovog istraživanja konstantuju da prethodno sprovedena testiranja C i Z profila ne pružaju definitivnu procenu lokalnog stanja, prvenstveno zbog nepotpunog ograničavanja distorzionog izvijanja. Naime, da bise identifikovalo lokalni mod izvijanja nosača neophodno je eliminisati globalni i distorzioni mod. Globalno izvijanje je karakteristika dužih nosača i njega je lako otkloniti smanjivanjem dužine uzoraka, dok je distorzioni mod izvijanja karakterističan za dužine nekoliko puta većih od najveće dimenzije poprečnog preseka. Prema tome, distorziono izvijanje može biti uključeno u lokalno izvijanje ako se ne sprovedu detaljne aktivnosti oko sprečavanja bočno-torzionog pomeranja i distorzije poprečnog preseka.

Primena EWM za određivanje otpornosti nosača (elemenata izloženih savijanju) usled distorzionog izvijanja hladno-oblikovanih profila C i Z poprečnog preseka, izložena je u [93]. U radu je dat standardan postupak koji se koristi pri projektovanju fleksionih elemenata (nosača). Procena otpornosti prema AISI S100 podrazumeva nove (modifikovane) jednačine za određivanje koeficijenta izvijanja koje uzimaju u obzir distorzioni režim izvijanja. Predloženi postupak je kalibrisan od strane DSM i obezbeđuje slične performanse kada se uporedi sa eksperimentalnim rezultatima. Predloženi metod omogućava inženjerima da ispituju fleksionu otpornost nosača usled distorzionog izvijanja, koristeći postojeću proceduru izloženu u AISI S100, sa pojednostavljenom modifikacijom. Modifikacija pruža isti nivo tačnosti i pouzdanosti kao DSM.

Distorziona izvijanje, za razliku od globalnog i lokalnog, je relativno nov modalitet, koji je naročito u zadnjih nekoliko godina bio predmet intenzivnog istraživanja. Fenomen distorzije poprečnog preseka je uglavnom vezan za tankozidne otvorene preseke (tipične oblike koji se javljaju kod konstrukcije regalskog skladišta), ali se takođe javlja i kod zatvorenih preseka, stim što je u tom slučaju on manje izraženiji. Čest slučaj je analiza interaktivnog ponašanja distorzionog sa lokalnim i globalnim izvijanjem [94]. Na primeru ukrućenog Z profila razmatrani su modaliteti izvijanja (lokalni, distorzioni i kombinovani: lokalno-distorzioni), u zavisnosti od varijacije ugla ukrućenja ojačanih ivica pojaseva [95]. Ocenjena je pogodnost primene EC 3 u analizi lokalnog i distorzionog izvijanja hladno-oblikovanog Z profila, identifikovani su nedostaci i napravljeni predlozi za poboljšanje, koji se prevashodno odnose na faktore izvijanja pločastih elemenata za ukružene ivice pritisnutih pojaseva.

Od strane istih autora je zaključeno da standardna procedura EC 3, generalno daje nekozervativnu procenu fleksione otpornosti. Definisanje nosivosti aksijalno pritisnutog hladno-valjanog C profila sa početnim geometrijskim imperfekcijama prezentovano je u [96]. Testiranje je izvršeno na ukupno 10 različitih uzoraka koji su svrstani u 2 grupe sa različitim dimenzijama poprečnog preseka. Zaključeno je da su pojasevi C profila izloženi distorziji poprečnog preseka, dok je rebro podložno lokalnom izvijanju. Granična kompresiona otpornost pritisnutih stubova (C profila) dobijena na bazi eksperimentalnih vrednosti kreće se u granicama od 75 ÷ 77 % vrednosti koja je preporučena od strane Britanskog standarda BS 5950 Part 5 [97]. Ovo ukazuje da odstupanja geometrije od idealnog oblika profila, uzrokovana procesom izrade (valjanjem), u značajnoj meri može indukovati smanjenje granične otpornosti stuba. Ovome, naročito treba dodati činjenicu da BS 5950 Part 5, ima vrlo konzervativan pristup, koji obezbeđuje znatnu tehnološku rezervu u proceni otpornosti na gubitak stabilnosti, pošto ne uključuje uticaj distorzionog izvijanja.

Projektovanje elemenata nosećih struktura od hladno-oblikovanih profila je kompleksan proces, čije je naposnko stanje složenog karaktera inicirano uticajem različitih faktora nastalih usled vitkosti elemenata, kao i samog poprečnog preseka. Efekti ovog uticaja su manifestuju kroz različite modalitete izvijanja, posebno kroz njihovo interaktivno ponašanje, pri čemu u tom slučaju, opterećenje razaranja odgovara manjoj vrednosti u odnosu na slučaj pojedinačnog delovanja parcijalnih modova izvijanja [98]. Ovi efekti u procesu projektovanja stvaraju izvesne komplikacije, ali moraju biti uključene u odgovarajuće standarne procedure radi postizanja benefiti koji se odnosi na racionalizaciju elemenata strukture. Fenomen distorzionog izvijanja, na primeru C i Z poprečnog preseka, uz adekvatnu matematičku interpretaciju pritisnutih pojaseva kod nosača, detaljno je izložena od strane Hancock-a [99].

Spoj pojaseva i rebra je tretiran elastičnom vezom, među kojom dominira moment elastičnog ukleštenja. Krutost rotacione veze (opruge) se određuje iteracionim postupkom, dok je sam analitički postupak za definisanje elastičnog kritičnog napona distorzionog izvijanja baziran na osnovama koje su date u [100]. Ovo istraživanje je vrlo značajno, jer analitički izraz kritičnog napona omogućava optimizaciju poprečnog preseka i u direktnom obliku je uključeno u Australijski odnosno Novozelandski standard za hladno-oblikovane čelične strukture AS/NZ 4600 – 2005 [101].

Rezultati istraživanja su upoređena sa vrednostima koje su dobijene analizirajući isti tip profila (C oblika) od strane Sharp-a [102], kao i primenjujući softver razvijenog na bazi metode konačnih traka, poznat pod nazivom THIN-WALL [103]. Konstantovano je da prezentovni izrazi daju najtačniju procenu elastičnog napona distorzionog izvijanja, bez obzira na to da li je pritisnuti pojas nosača bočno podržan. S druge strane, formule koje se predložene od strane [102], nezavisno da li se odnose na dominantno pritisnute ili fleksione elemente, daju manje tačnije vrednosti za procenu distorzionog naponskog stanja.

Sistematska analiza lokalnog i distorzionog izvijanja tankozidnih kratkih stubova izložena je u [104] u okviru koga je izvršena komparativna analiza poznatih procedura, tj. metoda i standarda za poprečni presek C oblika različitih dimenzija. Usporedna analiza elastičnog distorzionog izvijanja je data za tri metode-standarda i to: AS/NZ 4600, EC 3 i Generalisanu teoriju nosača (GBT). Više detalja oko GBT, kao i njegova implementacija u cilju analize lokalnog, globalnog i distorzionog izvijanja, izložena je u [105]. Utvrđeno je da AS/NZ 4600 daje prosečno 4 % manje vrednosti napona izvijanja u odnosu na GBT (sa standardnom devijacijom od 0,04), nezavisno od varijacije debljine zida profila.

Što se tiče EC 3 srednje odstupanje je oko 9 % (standardna devijacija iznosi 0,34), što ukazuje na prilično rasipanje vrednosti odnosno znatno veće odstupanje (čak do 85 % za C 200×50×20×1,5), bilo varirajući debljinu ili neku drugu dimenziju poprečnog preseka profila. Razlog tome leži u činjenici da ako dođe do izvijanja rebra, ranije u odnosu na pojaseve, EC 3 daje znatno veće vrednosti napona izvijanja u poređenju sa GBT. Primeri kod kojih je izražen ovaj efekat imaju neke od sledećih dimenzija: C 200×50×(20;15;10)×(2;1,5). Odstupanje vrednosti je posledica što EC 3 ne uključuje redukciju fleksionog ograničenja po pretpostavkpm da je došlo do izvijanja rebra. Zato u slučajevima kada se radi o širim pojasevima ili kraćim ukrućenjima (kao prethodno navedena grupa profila), EC 3 daje u većem stepenu lošije rezultate. U radu su eksperimentalno tretirani, pored klasičnog C profila, modifikovani oblik C profila (sa središnjim podužnim ukrućenjem), HAT, RACK i Ω profili.

Po uzoru na ovaj rad, kasnija istraživanja su težila da matematičke modele koji interpretiraju fizikalnost mehanizma distorzionog izvijanja, implementiraju i na složenije otvorene preseke, kao što je izneto u [106]. Fundament ovog istraživanja je zasnovan na jednačinama koje tretiraju fleksiono-torziono izvijanje i ključne postavke ovog pristupa su iznete u [83]. U ovom radu, prezentovana je zatvorene forma rešenja za distorzioni mod izvijanja hladno-oblikovanog stuba, kombinovano opterećenog pritiskom i biksijalnim savijanjem. Rešenje je bazirano na pristupu Lau i Hancock-a [107], od strane kojih je najpre predložena metodologija za uniformno pritisnute preseke stubova. Fenomen distorzije je modeliran preko fleksiono-torzionog izvijanja pojaseva u kombinaciji sa elastičnim ograničenjem od strane rebra poprečnog preseka. Posebna pažnja je posvećena slučaju kombinovanog pritiska i savijanja u ravni simetrije. Rezultati prezentovanog postupka su upoređena sa metodom konačnih traka, uz konstataciju da su međusobna odstupanja zanemarljiva.

Sistematska analiza mehanizma distorzije otvorenog poprečnog preseka je data kroz istraživanje novijeg datuma [90]. U radu je tretirana problematika distorzione kinematike koja je baziran na konvencionalnim modovima (aksijalnog naprezanja, savijanja i torzije). Fenomen distorzije podrazumeva vitoperenje elemenata preseka i karakteriše se sa dve kinematske komponente pomeranja: ravanskom i vanravanskom. Ustanovljeno je da primarno savijanje ima ključnu ulogu na pojavu distorzije poprečnog preseka. Kao uzrok toga, imamo dominantno učešće distorzije kod klasičnih C profila i složenijih oblika. Kod jednostavnijih oblika (npr. U profila) uticaj distorzije je sekundarnog značaja. Optimizacija oblika savremenih profila zahteva primenu složenih oblika, najčešće dobijenih ukrućenjem slobodnih ivica ili relativno širokih pojaseva i rebara, pa je fenomen distorzije prilično izražen.

Postojeće metode i standardne specifikacije, često nisu adekvatne za određivanje distorzionog izvijanja. U tu svrhu predviđene su krive otpornosti, kojima se procenjuje otpornost stubova i nosača [108]. Ove krive su bazirane na eksperimentalnim podacima i obuhvataju uticaj lokalnog na distorziono izvijanje. Sa razvojem softvera zasnovanim na primeni numeričkih metoda, krive za procenu otpornosti od gubitka stabilnosti nosača i stubova dobija na značaju i uticaj izvijanja je analiziran sa aspekta pojave sva tri modaliteta: lokalnog, distorzionog i globalnog (Euler-ovo), kao što je prikazano u [109]. Ovo istraživanje dotiče pitanje interakcije elemenata preseka, gde dominantno mesto ima spoj rebro-pojas. Osim toga, analizira se i stanje post-izvijanja u vezi čega je zaključeno da je nosivost distorzionog moda u tom režimu manja od lokalnog modaliteta. Na kraju je konstantovano da Severnoamerički standard (NAS) ne obezbeđuje egzaktnu proveru distorzionog izvijanja, kao i da ne uzima u obzir interakciju sa lokalnim modalitetom, što odstupa od eksperimentalnih i numeričko dobijenih vrednosti.

Predložena metoda od strane [109], eksplicitno obuhvata lokalno, distorziono i globalno izvijanje, ne zahteva definisanje efektivnih osobina poprečnog preseka i stvara preduslove za uvođenje racionalne analize u procesu projektovanja odnosno procene stabilnosti tankozidnih preseka. Ponašanje u zoni spoja pojaseva i rebra poprečnog preseka definiše stanje distorzionog izvijanja [110]. Preporuke koje su izložene od propisa NAS daju prilično konzervativna rešenja u odnosu na eksperimentalne i numeričke vrednosti. Kod uniformno pritisknog opterećenja distorziono izvijanje obuhvata rotaciju ukrućenih pojaseva oko tačke spoja sa rebrom, što je tipično za stubove manjih dužina. Kod nosača, dejstvo momenata savijanja utiče na bočno pomeranje tačke spoja rebra i pojaseva.

Definisanje krivih izvijanja za ukrućeni i neukrućeni C profil prezentovano je u studiji [111]. Istraživanje uključuje lokalno-globalnu interakciju i zasnovano je na seriji testova koji su realizovani na dužim stubovima. Definisana kriva izvijanja je bazirana na aktuelnom Brazilskom standardu za izgradnju čeličnih konstrukcija [88] i primenljiv je za ukrućene i neukrućene profile. Pouzdanost predviđanja predloženih krivi izvijanja je verifikovana za različite grupe eksperimentalnih rezultata, uključujući lokalno fleksionu i lokalnu torziono-fleksionu interakciju.

Razvoj DSM kao relativno nove metode sa nizom prednosti od ostalih procedura uslovio je njegovu adaptaciju u osnovnu verziju NAS propisa kroz Appendix 1. Osnovna kompleksnost ovog metoda ogleda se u određivanju elastičnog lokalnog, distorzionog i globalnog opterećenja izvijanja [112]. Kada se ove veličine definišu dalja primena metode je jednostavna i eksplicitna.

Softveri zasnovani na numeričkim metodama, kao što je CUFISM (baziran na metodi konačnih traka) omogućava egzaktno definisanje neohodnih parametara za primenu DSM. Prethodno navedena studija ističe neke od karakterističnih preporuka, uključujući neke primere i diskusije radi lakše inženjerske primene.

Analiza elastičnog izvijanja hladno-oblikovanih elemenata sa opštim konturnim uslovima i teorijskom podlogom primene metode konačnih traka FSM data je u istraživanju [113]. Konvencionalna implementacija FSM kroz softver CUFISM (za verzije 3.13 i ranije) odnosila se samo na slobodno oslonjene elemente, ograničavajući na taj način širinu primene. Novije verzije softvera (V 4.0) daju veću komfornost ka opštim uslovima oslanjanja i celishodnije sprovođenje DSM postupka. Nosivost bočno podržanog hladno-oblikovanog čeličnog nosača sa ivičnim ukrućenjem pojaseva (poput C i Z profila), može uticati nepovoljno na lokalno i distorziono izvijanje [114]. U ovom radu je prezentovana i verifikovana nova metoda za procenu napona izvijanja u lokalnom i distorzionom modalitetu.

U poređenju sa lokalnim, distorziono izvijanje se odlikuje većom osetljivošću na pojavu inicijalnih nesavršenosti (npr. odstupanje od idealne geometrije usled izrade ili deformacija usled prethodnog dejstva opterećenja), smanjenom nosivošću u postkritičnom stanju izvijanja i ima sposobnost kontrolisanog mehanizma razaranja, čak i u slučajevima kada je elastični napon izvijanja lokalnog moda manji od distorzionog. Predložena procedura izneta u [114] upotpunjuje tradicionalne metode, integrišući fenomen distorzionog izvijanja sa jedinstvenim pristupom efektivne širine, ukazujući na doslednije i pouzdane rezultate od dotada poznatih konvencionalnih propisa.

Tankozidni hladno-valjani čelični elementi struktura, zahtevaju obaveznu analizu lokalno-globalnog izvijanja koja je vrlo izražena, kako kod stubova, tako i kod nosača [115]. Lokalno izvijanje vitkih preseka je razvijeno po analogiji sa pojedinačnim pločastim elementom, uzimajući u obzir i međusobno dejstvo elemenata poprečnog preseka. Prethodno navedena studija, odnosi se na implementaciju metode efektivnog preseka ESM, koja predstavlja produžetak (nastavak) metode efektivne površine EAM. Bazirana je na aktuelnim rezultatima lokalnog izvijanja preseka uz formulaciju kalibrisanja za otpornost stubova i nosača. ESM je predložena u kombinaciji jednačina i tabela, koje omogućavaju inženjerima direktan pristup (po analogiji sa DSM) u određivanju kritičnih napona lokalnog izvijanja usled pritisnih sila i momenata savijanja, za tipične oblike poprečnih preseka, što ovu metodu čini atraktivnijom od EWM.

Za razliku od nosača, stubovi regalskih skladišta su zbog postojanja perforacije znatno složeniji za naponsku analizu i ne postoji neki opšte prihvatljivi analitički metod, koji bi obuhvatio uticaje otvora. Uticaj perforacije se u nekim slučajevima uzima preko korekcija postojećih metoda odnosno standardnih procedura, a ekzaktnija rešenja se dobivaju primenom neke od numeričkih metoda, dok je validacija dobijenih vrednosti zasnovana na eksperimentalnim vrednostima.

Postojanje perforacije dovodi do redukovanja osobina poprečnog preseka, utičući na smanjenje nosivosti lokalnog i distorzionog izvijanja, intenzivirajući i njihovo interakcijsko ponašanje. Zbog velike raznovrsnosti perforacija, kako u pogledu veličine, tako i sa aspekta konfiguracije (oblika) otvora, praktično je nemoguće definisati jedinstvenu proceduru koja bih obezbeđivala procenu granične otpornosti takvih preseka.

Postupak kalibracije formule efektivne širine za perforirane preseke i korišćenje ECBL (Erosion of Critical Bifurcation Load) pristupa u cilju procene ekvivalentnog faktora nesavršenosti za krive izvijanja po EN, kako bi se prilagodilo za različite konfiguracije perforacija, iznet je u studiji [116]. U slučajevima perforiranih stubova, predložena je formula za određivanje ekvivalentne efektivne širine neto poprečnih preseka (bruto presek je definisan prema AISI propisu), koji su konformni sa rezultatima ispitivanja i numeričkim simulacija.

Primena ekvivalentne debljine daje takođe prihvatljiva rešenja, ali samo za perforacije sa malim otvorima. Eksperimentalna uporedna analiza C profila, u slučajevima kada nemamo perforaciju i varijante sa perforiranim otvorima ovalnog oblik duž rebra stuba, publikovana je kroz istraživanje [114]. Kraći stubovi su podložni interaktivnom dejstvu lokalno-distorzionom izvijanju (kod neperforiranih stubova), dok kod perforiranih elemenata otvori redukuju nosivost rebra na lokalno izvijanje, uzrokujući pri tome da se stub više oslanja na pojaseve i njegova ukrućenja. Povećanjem dužine stubova, imamo drugačije ponašanje, a ogleđa se kroz deformacije koje ostaju u lokalnom režimu izvijanja do postizanja maksimalnog opterećenja. Razmatranje globalnog, distorzionog i lokalnog izvijanja, za hladno-oblikovane profile sa perforacijom otvora tipičnih oblika je tretirano od strane [115].

Globalno izvijanje elemenata sa otvorima se aproksimativno analiza primenom pristupa tkz. prosečnog opterećenja u dešinisaju osobina poprečnog preseka. Eksplicitni analitički izrazi dobijenih na bazi redukovanih osobina bruto poprečnog preseka se mogu upotrebljavati za procenu fleksionog i fleksiono-torzionog izvijanja kod stubova, kao i bočno-torzionog izvijanja kod nosača, čija je tačnost i pouzdanost potvrđena kroz validacione studije. Distorziona i lokalno izvijanje elemenata sa otvorima se aproksimativno modelira preko modifikacije metode konačnih traka. Pošto je uticaj otvora različit za svaki modalitet izvijanja, neophodno je odvojeno modeliranja distorzionog i lokalnog izvijanja.

Kod distorzionog izvijanja, primarni uticaj otvora se manifestuje na redukciju rotacione krutosti, a definisani izraz redukovane debljine koristi se za određivanje gubitka nosivosti usled distorzionog izvijanja u odnosu na profil bez otvora. Lokalno izvijanje podrazumeva definisanje kritične sile koja odgovara neto i bruto poprečnom preseku. Lokalno izvijanje bruto poprečnog preseka odgovara razmatranju profila bez otvora i procedura njegovog definisanje je data u AISI S100 Appendix 1. Lokalno izvijanje po modelu neto poprečnog preseka zahteva razmatranje idealizovane neukrućene trake, čija je dužina manja od najveće mere otvora. Od strane istih autora, istraživanje hladno-oblikovanih profila je sprovedeno u cilju proširenja DSM odnosno AISI standarda na oblike sa otvorima [116].

Predložene modifikacije DSM pristupa, u poređenju sa podacima sprovedenih ispitivanja i brojnim numeričkim simulacijama, pokazuju da su primenjiva u širokom opsegu veličina otvora, oblika, razmaka i dimenzija stuba, nadmašujući klasičnu verziju AISI propisa sa stanovišta tačnosti i opštosti. Istraživanje o primeni metode konačnih traka FSM na definisanje kritičnih napona elastičnog izvijanja kod savremenih preseka perforiranih stubova regalskih skladišta, predstavljeno je u [117].

Kalkulacija nosivosti ovakvih struktura može biti ekzaktno interpretirana primenom FSM zahvaljujući time što se efekat perforacije eksplicitno uključuje u analizu. FSM ima preferencije u projektovanju hladno-oblikovanih profila, jer je pogodan za jednostavnu implementaciju u softverski paket (poput CUFSM).

Osnovni problem koji je vezan za primenu FSM odnosi se na nemogućnost direktne primene za modeliranje otvora odnosno preforacija. Studija [117] efekat perforacije uzima u obzir implicitno, preko redukovane debljine u zonama oslabljenim postojanjem otvora. Formulacija prezentovanog postupka upotrebom redukovane debljine je kalibrisana sa vrednostima dobijenim primenom FEM. Novija istraživanja koja se odnose na problematiku izvijanja, naročito ako se zahteva nelinearna analiza i razmatranje perforiranih elemenata, akcentat stavljaju na generalisanu primenu metode konačnih traka koja je poznata pod nazivom ISFSM (Isoparametric Spline Finite Method), čije su teorijske podloge date u [118].

Aplikacija modifikovane metode konačnih traka, predstavljene preko ISFSM kroz studije [119-121] su prezentovane kao pouzdana i egzaktna numerička metoda koja omogućava nelinearnu analizu perforiranih profila složenog oblika, sa podužnim ukruženjima i nelinearnim karakteristikama u pogledu geometrije i ponašanja materijala. Eksperimentalno istraživanje ponašanja hladno-oblikovanih profila sa i bez perforacije, prema metodologiji predložene od strane Evropskog standard za projektovanje paletnih skladišnih sistema EN 15512, predstavljeno je kroz studiju [122].

Predmet analize su dva tipa profila različitih dužina, koje su korespondentne za analizu lokalnog i distorzionog moda izvijanja. Kratki elementi stubova služe za identifikaciju lokalnog izvijanja, dok deo stubova čija dužina odgovara između dve susedne etaže regala (paletnih nosača) je merodavna za analizu distorzionog izvijanja i distorziono-globalnog interaktivnog uticaja. U okviru rada, dat je osvrt na ECBL pristup koji uticaj perforacije razmatra kao imperfekcije (nesavršenosti) istovetnog profila (istih dimenzija poprečnog preseka i dužine, samo bez perforacije). Izvršena je komparaciona analiza za prethodno realizovana ispitivanja i konstantovano je saglasnost rezultata. Nastavak ovog istraživanja, od strane istih autora, prezentovano je kroz numeričko istraživanje [123]. Eksperimentalno ispitivanje i numeričke simulacije dokazuju negativan uticaj usled interakcije distorzionog i globalnog izvijanja, za tipične poprečne preseke stubova regalskih skladišta novijeg dizajna (Ω profile), redukujući u značajnoj meri nosivost preseka.

Procedura projektovanja bazirana na EN 1993-1.1, integrisana sa ECBL pristupom, primenjuje se za kalibraciju vrednosti imperfekcionog faktora, neophodnog za definisanje otornosti na gubitak stabilnosti pritisnutih elementata paletnih regala (stubova i nosača). Problematiku projektovanja perforiranih stubova, izloženih pritisku i savijanjem, tretiran je od strane [124]. U praksi, ovi elementi se projektuju primenom istraživanja koja su realizovana na bazi skupih eksperimentalnih programa. U okviru istog rada, istraživači tretiraju problematiku analitičke aplikacije u procesu projektovanja regalskih struktura. Istraživanje je bazirano na sveobuhvatnom skupu eksperimentalnih rezultata, za dva tipa pritisnutih preseka kod kojih opterećenje varira duž ose simetrije poprečnog preseka, kao i duž podužne ose stubova.

Kao alternative eksperimentalnoj analizi, prezentovane su dve numeričke metode (FEM i GBT) u cilju procene nosivosti perforiranih stubova. U ovoj studiji, prednost je data GBT metodu u odnosu na FE analizu, uz konstataciju da GBT omogućava simulaciju geometrijskih imperfekcija i da pruža sigurnije rezultate u odnosu na FEM. Pokazano je da GBT može biti pouzdano sredstvo za predviđanje otpornosti na gubitak stabilnosti perforiranih elemenata, pri čemu donja granica dobijenih rezultata daje dovoljno tačne podatke za definisanje lokalnog, distorzionog i globalnog izvijanja, čime je eliminisan deo obimnih ispitivanja.

Tendencija za permanentnim razvojem metoda, postupaka i propisa u pogledu što egzaktnije procene nosivosti, ima za krajni cilj optimalno projektovanje elementa regalskih struktura. Dosadašnja istraživanja koja tretiraju optimizaciju dimenzija poprečnih preseka određenog odnosno unapred definisanog oblika, zasnovana su uglavnom na matematičkom pristupu, tj. minimizaciji funkcije cilja. Optimizacija otvorenih tankozidnih poprečnih preseka, izloženih savijanju i ograničenoj torziji, na primeru I i U profila je analiziran u [125]. Problem optimizacije zahteva minimizovanje mase uz ispunjenje postavljenih ograničenja. U citiranom radu problem je redukovano na funkciju cilja koja obuhvata minimizaciju površine poprečnog preseka, primenjujući metodu Lagranžovih množitelja. Ista metodologija je primenjena u studiji [126], gde je razmatran slučaj optimizacije I profila izloženog savijanjem oko obe ose simetrije i torzijom.

Pristup optimizacije tankozidnog Z profila, za dato opterećenje, geometrijske i materijalne karakteristike, izloženog savijanjem i ograničenom torzijom, prezentovan je u [127]. Istovetna metodologija se može primeniti i na druge, složenije oblike, koristeći numeričko rešavanje problema, mada većina autora se zadržava na razmatranju sandučastih nosača, različitog oblika. Osnovni nedostatak takog pristupa, pored složenog matematičkog modela, ogleda se i nemogućnosti primene kod perforiranih elemenata (nosača sa otvorima), kakve srećemo kod stubova regalskih skladišta.

Optimizacija hladno-oblikovanih tankozidnih antisimetričnih poprečnog preseka Z, S i klotoidnog oblika razmatrano je od strane [128]. Kriterijum optimalnog projektovanja je definisan preko bezdimenzionalne funkcije cilja, reprezentujući kvalitativnu meru otpornosti preseka. Za ovu tezu je posebno značajno istraživanje koje se odnosi na optimizaciju hladno-oblikovanih profila sa ukrućenjima [129]. Predmet optimizacije je aksijalno pritisnuti C profil izražene vitkosti odnosno podložnog pojavi izvijanja. Optimizacione promenljive obuhvataju: širine pojaseva i rebra, širinu ukrućene ivice i debljinu lima profila, koje se određuju pomoću optimizacione metode bazirana na AISI standardu.

Prednosti hladno-oblikovanih profila, do punog izražaja dolaze u procesu optimalnog projektovanja stubova i nosača, omogućavajući fleksibilnost poprečnog preseka u procesu projektovanja. Optimizacija hladno-oblikovanog U i C profila, pod dejstvom aksijalnog pritiska, koristeći mikro genetski algoritam (Micro genetic algorithms – MGA), data je u [130]. MGA se odlikuje odličnim performansama u procesu optimizacije hladno-oblikovanih profila, pri čemu je konstantovano da C profil karakteriše veća efikasnost za 15 % u odnosu na U oblik.

Poslednja istraživanja koja se odnose na optimizaciju hladno-valjanih poprečnih preseka, prezentovana je od strane autora [131] analizirajući mono-simetrične otvorene tankozidne preseke stubova regala. Optimalni oblici poprečnog preseka su definisani za slobodno oslonjeni stub, usvojene debljine 1,2 mm, aksijalno pritisnutog silom od 75 kN, čija dužina varira u opsegu od 1000 do 2500 mm. Rezultati optimizacije su nekonvencionalni oblici, poput ovalnog, zrnastog i zaobljenog Ω profila.

Prethodna analiza je, kroz studiju [132], fokusirana na optimizaciju glavnih dimenzija konvencionalnih oblika. U okvirima ovog rada, uveden je koncept nove optimizacione metodologije, koja je adaptirana prema benefitima MGA. Prethodna analiza je pokazala da se postojanje podužnih ukrućenja konvencionalnih profila, u znatnoj meri može povećati otpornost pritisnutih elemenata na različite modalitete izvijanja. U tom smislu, istraživanje [133] ima za svrhu razmatranje uticaja kompleksnih ukrućenja.

Standard AISI (1996) ne raspoznaje razliku u orijentaciji dodatno ukrućenih ivica (npr. klasičan C profil se može dodatno ukrotiti ojačanjem slobodne ivice postojećeg ukrućenja, koje je paralelno sa pojansom). Orijehtacija ovog dodatnog ukrućenja (da li je usmereno ka ili od unutrašnjosti profila) ne utiče podjednako na stabilnost profila.

Razmatranje dodatno ukrućenih profila je izloženo u [134], u okviru koga su definisani postupci projektovanja za ivično-ukrućene elemente koji se mogu koristiti u konjukciji sa postojećim pristupima i propisima radi definisanja njihove nosivosti. U okviru istog rada, projektna pravila su razvijena iz fundamentalne teorije ploča, analizirajući ponašanje slobodno oslonjene ploče duž tri ivice, dok je preostala ivica podužno ukrućena. Izloženi postupak, u primeni sa EWM, obezbeđuje dobru saglasnost sa testiranim uzorcima, eliminišući na taj način konzervativizam važećih standardizovanih propisa.

S druge strane, primena ivičnog ukrućenja utiče na povećanje lokalne nosivosti preseka, ali ima vrlo nepovoljan efekat na druge modalitete (prevashodno na distorzioni) i može biti uzročnik interaktivnog ponašanja različitih modaliteta izvijanja, što je demonstrirano od brojnih autora. Egzaktno ponašanje interaktivnih modova izvijanja i kvantitativno definisanje istih u procesu projektovanja nije dovoljno istraženo.

Prethodno citirani autor, je kroz novije istraživanje sproveo proceduru fotogrametrijskog postupka merenja modova izvijanja i njihovog interakcijskog uticaja za preseke sa ivično-ukrućenim pojasevima [135]. Dobijeni rezultati primenom 3D fotogrametrijskim sistemom su upoređeni i diskutovani u odnosu na modifikovani pristup EWM i DSM. Na bazi pregleda dosadašnjih istraživanja, može se zaključiti da su optimalni oblici aksijalno pritisnutih stubova kompleksnog poprečnog preseka sa određenim brojem podužnih ukrućenja.

Ovo potvrđuje i skorašnja studija na primeru otvorenog tankozidnog presek C oblika sa dužim pojasevima [136]. Pokazano je da postojanje središnjih podužnih ukrućenja daje poboljšanje sa aspekta redukovanja napona lokalnog izvijanja. Testovi otpornosti takvih stubova su upoređeni sa rezultatima koji su bazirana na DSM, a dati kroz standarde NAS i AS/NZ 4600. Veći broj podužnih ukrućenja je karakterističan kod profilisanih limova odnosno panela, kako bi se smanjio uticaj lokalnog naprežanja [137].

Stepen rezerve post-izvijenog stanja, kao i granična nosivost panela od interesa su za projektovanje efikasnih preseka. Ponašanje hladno-oblikovanih čeličnih preseka, sa jednim ili više središnjih ukrućenja pritisnutih pojaseva je istražen u [138]. Postojeći eksperimentalni podaci se koriste za kritičku procenu standarda AISI i Eurocode. Za procenu otpornosti preseka izloženih savijanju sa više podužnih ukrućenja, AISI daje prilično nekonzervativne rezultate, dok Eurocode često donosi preterano konzervativna rešenja. U prošlosti, zbog nepouzdanosti sotvera baziranog na metodi konačnih elemenata, vršena je kalibracija rezultata prema postojećim eksperimentalnim podacima.

Pored individualnog razmatranja stubova i nosača, od interesa za nosivost regala kao konstruktivne celine je međusobno (interaktivno) ponašanje spoja stub-nosač, koji se realizuje uz pomoć profilisanog konektora. Definisane elastičnosti spoja stub-nosač na primeru konvencionalnog paletnog sistema, opisan je u studiji [139]. Istraživanje je sprovedeno kroz eksperimentalnu analizu na jednokonzolnom i dvokonzolnom uzorku, čiji su rezultati upoređeni sa numeričkim vrednostima dobijenim FEM postupkom, koristeći softverski paket ANSYS 7.0.

Dosadašnja analiza koja se ticala projektovanja regala zasnovana je na statičkom opterećenju. Međutim, studija [140] ukazuje na značaj projektovanja regala u seizmičkim uslovima. Definisana su pravila projektovanja sa posebnim osvrtom na vezu stub-nosač. Detaljna analiza stabilnosti i dinamičkog ponašanja skladišnih regala, prezentovana je u [141]. U radu je analizirana softverska simulacija (ANSYS) ponašanja stranica regala na izvijanje, koja je upoređena sa eksperimentalno dobijenim podacima i preporukama datim od strane RMI (Rack Manufacturers Institute of USA).

Dinamička analiza se odnosi na razmatranje udarnog opterećenja od strane viljuškara u stub i podužni nosač regala, za više tipova profila. Istraživanje stabilnosti i otpornosti tankozidnih preseka je sistematizovano kroz [142] i obuhvata: racionalnu analizu fenomena izvijanja radi tačnije identifikacije kritičnog opterećenja; eksperimentalno kalibrisane krive izvijanja koje tretiraju granično stanje izvijanja; definisanje tačne procedure za verifikaciju uslova otpornosti elemenata pod kombinovanim dejstvom pritisknog i fleksionog opterećenja.

U fazi izrade (proizvodnje) elemenata regala (stubova, nosača i dr.), javljaju se određena odstupanja od idealne geometrije. Izvestan broj istraživača je analizirao ponašanje nesavršenosti (imperfekcija) uglavnom kod stubova [143-144]. Uticaj inicijalne geometrijske deformacije zahteva nelinearnu analizu, a u okviru [144] su izložene tri metodologije za različite oblike imperfekcije.

Distorzioni modalitet nije samo karakterističan za izvijanje stubova (isključivo pritisnutih elemenata), već je izražen i kod nosača, koji su dominantno izloženi savijanjem. Pritisnuti pojas je inicijalna zona gubitka stabilnosti sa tendencijom širenja ka zoni zatezanja. Kroz istraživanje [145] ukazano je na uticaj distorzionog izvijanja kod sačastih nosača (modifikovanih I profila), dok je teorijska baza fenomena elastične distorzije analizirana na primeru nosača i panela odnosno profilisanih limova [146]. Istraživanje distorzionog izvijanja hladno-valjanih Σ nosača za različite modele ukrućenog pojasa po EN 1993, dato je u [147]. Pokazano je da model sa fiksnim osloncem na zategnutom pojasu i zglobovom vezom na pritisnutom delu nosača, pri čemu su veze u zoni spoja rebra i pojaseva nosača, daje najbolje rezultate u poređenju sa FSM.

Analiza ponašanja post-izvijenog stanja centrično pritisnutih elemenata otvorenog poprečnog preseka, sprovedena je kroz istraživanje karakterističnih preseka u pogledu definisanja fleksiono-torzionog izvijanja [148]. Istraživanje efekta labavosti komponenata regala na graničnu nosivost je analiziran u [149]. Ponašanje post-izvijenog stanja ploče sa otvorom je analiziran u [150] u okviru koga su predložene analitičke formule granične nosivosti za različite uslove oslanjanja kvadratne ploče sa kružnim otvorom koje su jednoosno i biaksijalno pritisnute. Po analogiji sa prethodnim istraživanjem, kroz studiju [151] je tretirana granična nosivost hladno-oblikovanog perforiranog stuba na bazi obimne parametarske analize C profila. Tačnost predloženih izraza za projektovanje perforiranih stubova, ustanovljen je komparacijom sa numeričkim i eksperimentalnim rezultatima, datim od strane drugih istraživača.

Procena nosivosti hladno-oblikovanog stuba C oblika sa dodatnim inicijalnim geometrijskim imperfekcijama obrađena je u studiji [152]. Granična kompresiona otpornost dobijena na bazi sprovedenih ispitivanja, pokazuje da iznosi od 75 ÷ 77 % u odnosu na vrednosti bazirane prema BS 5950: Part 5. Ova činjenica ukazuje da geometrijsko odstupanje od idealne geometrije može značajno uticati na redukovanje otpornosti stuba.

Eksperimentalna analiza konektora koji obezbeđuje čvrstu vezu između stubova i nosača, za tipična komercijalna rešenja, sprovedena je u [153]. Definisani su dijagrami zavisnosti momenta od ugla rotacije, kao glavnih parametara ponašanja spoja stub-nosač. Metoda konačnih elemenata odnosno softveri koji su bazirana na njenoj primeni je najčešće korišćen postupak za analizu elemenata regala [154-156]. Omogućavaju u najopštijem slučaju nelinearnu analizu stabilnosti nad elementima potpuno proizvoljne geometrije, opterećenja i uslova oslanjanja.

Treba napomenuti da se najveći broj literature odnosi na klasične regale srednje ili velike nosivosti. Međutim u praksi se javljaju i drugi tipovi, poput: protočnih, pokretnih (mobilnih) i sl. izvedbi, koji su karakteristični zbog postojanja određenih sklopova koji obezbeđuju protočnost, mobilnost ili neku drugu funkciju. U tom smislu, istraživači [157] su analizirali ponašanje protočnih regala, procenjujući uticaj svake komponente na globalnu stabilnost regala.

Za praktično projektovanje regala je značajna studija [158], koja tretira metodu efektivne dužine i njegovu alternativu poznatu pod nazivom metoda zamišljenog opterećenja. Metoda efektivne dužine je zasnovana na redukciji dužine elemenata (stubova i nosača), dok je metoda zamišljenog opterećenja zasnovana na stvarnoj dužini elemenata, ali uz redukciju njihove krutosti. Zaključak ovog istraživanja pokazuje da metoda zamišljenog opterećenja daje rezultate koji su saglasni sa FEM vrednostima, obezbeđujući racionalnije konstrukcije, za razliku od metode efektivne dužine koja je znatno konzervativnijeg pristupa.

Na kraju treba napomenuti, bez obzira što su regalska skladišta izrazito statičke strukture, da je dinamička analiza sastavni deo savremene procedure projektovanja. Dinamički uticaji kod regalskih konstrukcija su isključivo slučajnog karaktera i mogu nastati kao posledica seizmičkog dejstva ili udara manipulativnog sredstva (viljuškara) u stub ili nosač. Ovaj poslednji dinamički efekat je u studiji [159] simuliran kroz ponašanje strukture uklanjanjem noge (dela stuba ispod najnižeg nosača).

6.2. OSNOVNI TIPOVI SKLADIŠNIH REGALA

Permanentni rast proizvodnje inicira potrebu za većim brojem distributivnih centara odnosno skladišta. U zavisnosti od karakteristika proizvodnih dobara, među kojima dominiraju težina i gabarit, neophodno je primeniti odgovarajući tip regala, kako bih se obezbedilo ekonomično skladištenje. Naime, skladištenje dobara male težine na regale velike nosivosti je u potpunosti neracionalno, već je neophodno težinu uskladištene robe usaglasiti sa nosivošću regala. Iz ovoga su proistekli različiti tipovi regala, koji se generalno mogu svrstati u tri osnovne grupe:

- ♦ Laki regali,
- ♦ Srednje teški regali i
- ♦ Regali velike nosivosti.

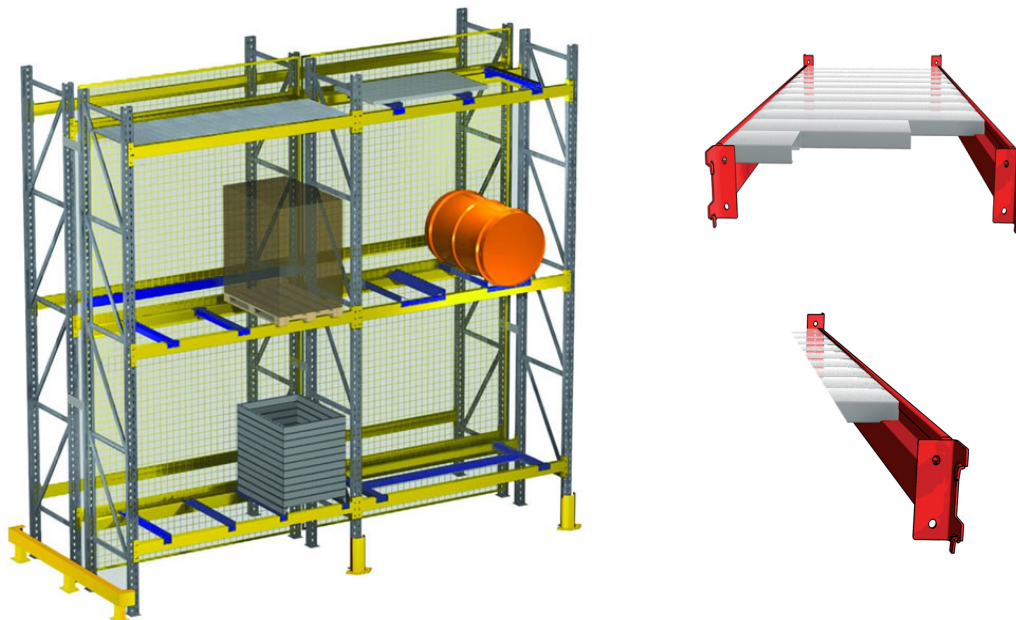
Ova podela je od velikog značaja prilikom pravilnog izbora regala za opremanje skladišnog prostora. Najčešća konstrukcija lakih regala (LS) je prikazana slici 6.1. Ovi regali imaju stubove od L profila sa perforiranim otvorima kružnog ili eventualno slotovanog (šlicovanog) oblika čija debljina ne prelazi 1,5 mm. Police se rade od lima najčešće od 0,6 ÷ 0,8 mm. Za širine police preko 300 mm ugrađuje se po jedno ukrućenje (duž sredine police), dok se za veće širine (preko 500 mm) ugrađuju po 2 ukrućenja ravnomerno raspoređenih po širini.

Spoj stubova i polica se ostvaruje vijcima, a krutost veze se obezbeđuje pomoću trougaonih ukrčenja. Uobičajeno dužina ovog tipa regala se kreće oko 900 mm, visina do 2000 mm, dok širina varira u opsegu od 300 ÷ 600 mm. Broj polica (etaža) iznosi do 6 po jednom polju, a nosivost svake etaže je 60 kg. Primenu uglavnom nalaze u prehrambenoj industriji (u tom slučaju se obavezno izrađuju od prohroma ili se plastificiraju što je znatno ekonomičnije), manjim trgovinama i sličnim objektima. Odlikuju se niskom cenom, fleksibilnošću primene za nasloženije zahteve kupaca, lakom montažom odnosno demontažom, malom težinom i kompaktabilni su za primenu gde se zahteva HACCP standard.



Slika 6.1. Laki regala opšte namene (tipa LS proizvodnje EKONOM)

Regali srednje nosivosti su namenjeni u slučajevima kada su individualne težine uskladištenih dobra preko 150 kg koja su u obliku palete, sanduka, bačve i sl. (Slika 6.2). Kod ovog tipa regala stubovi se rade isključivo od C profila, dok perforirani otvori mogu biti pravougaonog, trapeznog i sl. oblika.



Slika 6.2. Regal umerene nosivosti (tipa PRIMARACK proizvodnje EKONOM)

Za razliku od prethodnog tipa, ovi regali imaju profilisane podužne nosače sa specijalnim konektorima na njihovim krajevima kako bi se obezbedila veza sa stubovima bez upotrebe klasičnih vijčanih spojeva. U profilisan oblik nosača se po potrebi mogu postaviti metalni umeci radi formiranja polica.

U suprotnom, nosač omogućava postavljanje paleta i sanduka, dok se posebnim dodacima može ostvariti uležištenje za bačvaste oblike (burad). Uobičajene dužine jednog polja ovih regala se kreću do 1300 mm, širine do 900 mm i visine do 3000 mm. Ovi regali se karakterišu manjim brojem etaža (najčešće do 3 ili 4) i pogodni su za formiranje platformi (podesta). Dozvoljena nosivost za skladištenje po etaži iznosi 500 kg.

Regali velike nosivosti su zapravo tipična visokoregalna skladišta namenjena za skladištenje širokog asortimana dobara. Visokoregalna skladišta su svoju najveću primenu našla na Evropskom kontinentu i Japanu, gde je izražen problem prostora usled visoke cene zemljišta.

Ovaj tip regala nastao je na koncepciji prethodnog, ali uz izvesne korekcije koje se odnose na povećanje otpornosti stubova, podužnih nosača i konektora (veze stuba i nosača). Osnovne prednosti visokoregalnih skladišta ogledaju se u:

- Minimizaciji troškova skladištenja,
- Optimizaciji procesa,
- Dobroj iskorišćenosti prostora i
- Obezbeđenju potpune kontrole nad zalihama.

Radi bolje iskorišćenosti površine skladištenja i postizanja veće bočne stabilnosti, ovi regali se obavezno ugrađuju u paru, koji su međusobno spojeni. Tipična širina stranice je 1100 mm, dužina paletnih nosača se kreće oko 2000 mm, dok visina iznosi do 12000 mm, mada su moguće i znatno veće visine (Slika 6.3).



Slika 6.3. Regali velike nosivosti (stubovi od Ω profila)

7. METODE PROCENE NOSIVOSTI STUBOVA I NOSAČA REGALA

Stubovi stranica savremenih skladišnih regala su tankozidni otvoreni elementi sa perforiranim otvorima. Poprečni preseki stubova su najčešće kompleksnog oblika, sa otvorima različite konfiguracije, što je rezultat brojnih naučnih istraživanja. Na stubovima regalskih skladišta, razlikuju se dve vrste perforiranih otvora koji omogućavaju:

- Konekciju (vezu) stranica odnosno stubova sa podužnim regalskim nosačima i
- Vezu stubova sa kosnicima (ispunom) obrazujući stranicu regala.

U nekim slučajevima, predviđaju se otvori za osiguranje podužnog nosača od eventualnog ispadanja prilikom podizanja skladišnih jedinica (paleta). Postojanje ovih otvora su zahtevi konstrukcionog karaktera, kako bih se ispunili uslovi montažno-demontažne strukture. To omogućava laku montažu, veću fleksibilnost primene i manje troškove proizvodnje. Međutim, postojanje otvora sa aspekta projektovanja, a posebno identifikacije naponskog stanja, predstavlja veliki problem pošto su to zone koncentracije napona, za koje ne postoje ekcplcitne formule prilagodljive praktičnoj inženjerskoj primeni.

Elementi skladišnih regala su najčešće otvorenog poprečnog preseka koji su pod dejstvom korisnog opterećenja (tereta) složeno napregnuti, za koje nije moguće egzaktno defisati naponsko stanje analitičkim putem. Zato se odluka o validnosti projektovanog regala donosi na bazi eksperimentalnog ispitivanja. Međutim, ovakav pristup je inicirao da regalske konstrukcije budu predimenzionirane, čime se znatno utiče na investicione troškove izgradnje skladišta.

Analiza ponašanja paletnih regala ukazuje na značaj podužne krutosti za obezbeđivanje stabilnosti koja je u direktnoj zavisnosti od spoja stuba i podužnog nosača [160]. Zbog relativno vitkih stubova regala, sekundarni efekti imaju značajan uticaj na performanse stranica. Takođe, u okviru istog rada je analiziran i uticaj bazne (temeljne) ploče stubova na ukupnu stabilnost regalske konstrukcije. Iz potrebe za većom racionalizacijom ovih struktura razvijene su određene poluanalitičke i numeričke metode koje su uključene u standarde pri projektovanju regalskih elemenata, a čija je tačnost verifikovana eksperimentalnim putem.

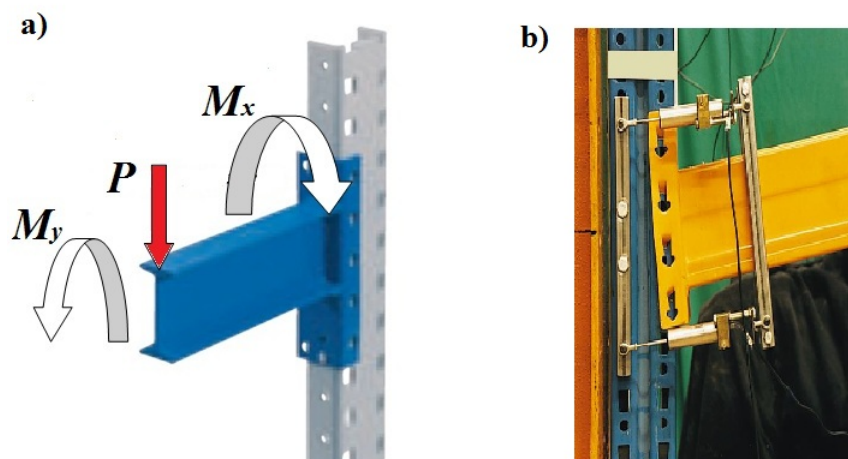
U savremenim uslovima projektovanja, posebno se ističe korišćenje softvera baziranih na metodi konačnih elemenata koji omogućavaju simulaciju realnog ponašanja usled dejstva osnovnog opterećenja, kao i predviđanje ponašanja konstrukcija u ekstremnim uslovima (npr. seizmičko opterećenje, udarno dejstvo o stub regala i sl.).

U prošlosti, osnovni nedostatak ovog pristupa je bio nemogućnost eksplicitne optimizacije regalske strukture, što zahteva implementaciju analitičkog i poluanalitičkog aspekta u analizi naponskog stanja elemenata regala. Osnovna ideja ovog pristupa ogleda se u korišćenju aproksimativnih modela analitičkog oblika kako bi omogućili sprovođenje optimizacionog postupka, dok se verifikacija realizuje eksperimentalno. Cilj ovoga je da se redukuju skupa eksperimentalna izvođenja, skрати proces projektovanja i racionalizuje masa regalske strukture.

7.1. DOMINANTNA NAPREZANJA STUBOVA I MODOVI IZVIJANJA

Prenošenje korisnog opterećenja P sa podužnih (paletnih) nosača na stubove se ostvaruje preko profilisanog konektora i perforiranih otvora indukujući pritom moment savijanja M_y . S druge strane, u zavisnosti od torziona krutosti paletnog nosača imamo pojavu momenta savijanja M_x (Slika 7.1). Aksijalna pritisna sila je dominantna kod napreznja stubova i stepenasto raste idući ka fundamentu (temeljnoj ploči stuba). Pritisna sila P i moment savijanja M_y stuba je direktna posledica prenošenja aktivnog (korisnog) opterećenja. Moment savijanja M_x je veličina isključivo zavisna od konstrukcionog izvođenja paletnog nosača.

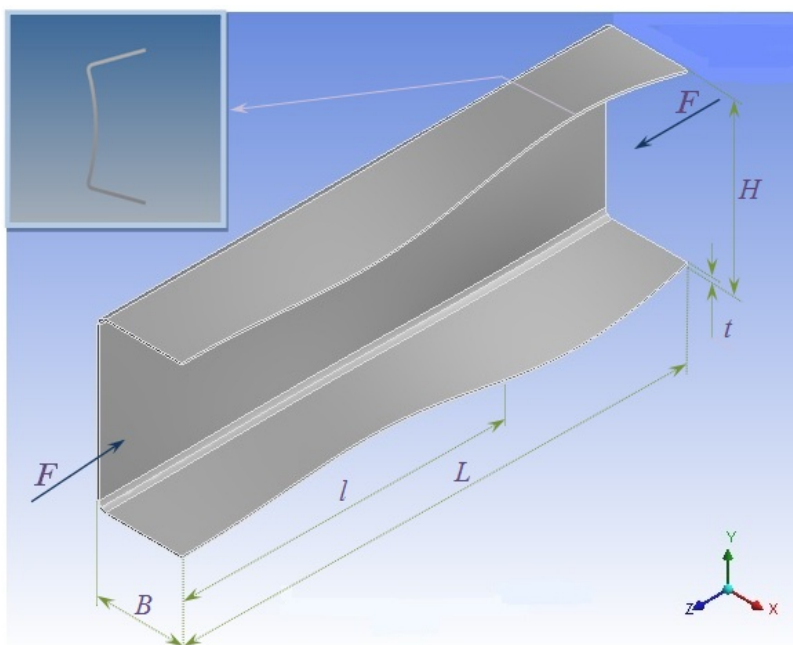
Kada je krutost paletnog nosača velika, na mestu veze deformacije su male, pa je moment savijanja koji se prenosi na stub minornog značaja. U suprotnom, nosač male krutosti prate velike ugaone deformacije u zoni konekcije sa stubom, što indukuje veći moment savijanja stuba. Pošto je stub izložen pritisku, podložan je gubitku stabilnosti odnosno fenomenu izvijanja, pri čemu se razlikuju: globalno (Euler-ovo), lokalno i distorziono izvijanja. Koji tip izvijanja će biti dominantan zavisi od dužine elementa (stuba), ali i od njegovog poprečnog preseka. Bitno je naglasiti da se poseban akcenat stavlja na lokalno i distorziono izvijanje čiji je mehanizam ponašanja predmet brojnih istraživanja, naročito u poslednje dve decenije i to uglavnom kod tankozidnih otvorenih nosača.



Slika 7.1. Konekcija stuba i nosača: a) opterećenje i b) merenje deformacije

Globalno (Euler-ovo) izvijanje karakteriše deformacija neutralne ose poprečnog preseka pritisnutog elementa. Lokalno izvijanje predstavlja granično stanje izvijanja pritisnutog profila kod kojeg čvorne linije između pritisnutih elemenata ostaju prave, dok uglovi između njih ostaju nepromenjeni. Distorziona izvijanje je mod izvijanja kojeg karakteriše deformacija oblika poprečnog preseka, izuzimajući lokalno izvijanje (Slika 7.2).

Navedeni fenomeni su ilustrovani na primeru aksijalno pritisnutog U nosača, pri vrednosti sile $F=const.$ za različite geometrijske parametre. Prikazan modalitet odgovara distorzionom izvicanju sa različitim brojem politalasa neukrućenog pojasa (Tabela 7.1).



Slika 7.2. Izvicanje aksijalno pritisnutog hladno-valjanog U profila

Tipični profili kod stubova skladišnih regala su mono-simetrični i otvoreni tankozidni hladno-valjani profili. Stubovi su najčešće sa dvoredno perforiranim otvorima, koji omogućavaju vezu sa paletnim nosačima, a obezbeđuju fleksibilnost u pogledu potrebne visine, za svaku etažu skladišnog regala. U ranijim periodima, razmatranje nosivosti stubova skladišnih regala odnosilo se na analizu globalne i lokalne stabilnosti, primenjujući metod efektivne širine, teoriju izloženu od strane Timoshenko-a i eksperimentalno ispitivanje.

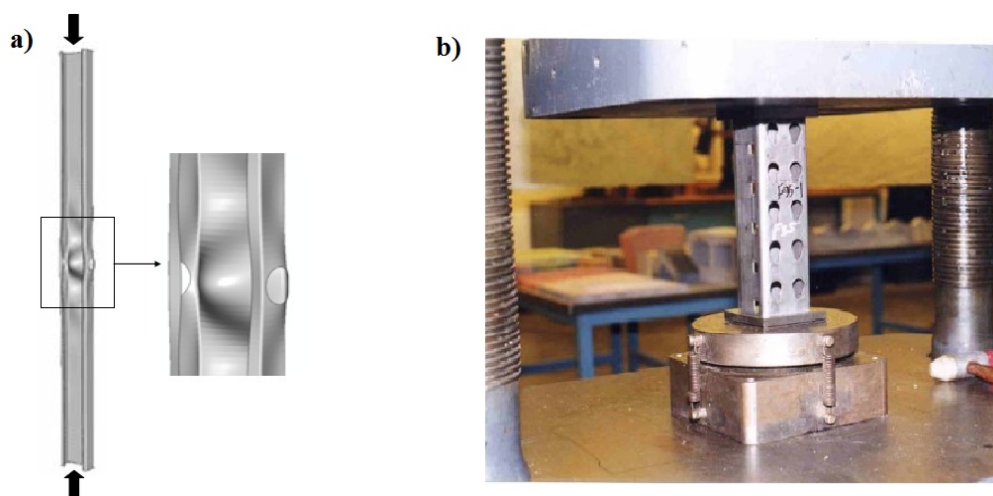
Tabela 7.1. Uticajni parametri U profila elastičnog izvicanja

Red. br.	Konstrukcioni parametri U profila						broj politalasa
	F [N]	H [mm]	B [mm]	t [mm]	L [mm]	l [mm]	
1	5000	50	25	0,8	150	100	2
2	5000	80	30	1	300	100	3
3	5000	100	50	1,25	600	150	4

U zadnjih dvadesetak godina, istraživanje i razvoj skladišnih regala dobija na značaju, pri čemu su postojeći pristupi analize znatno unapređeni, dok su s druge strane istraživači ukazali na novi fenomen u ponašanju otvorenih tankozidnih elemenata, kao što je efekat distorzionog izvicanja. Za razliku od lokalnog izvicanja, koje je karakteristika delova odnosno elemenata poprečnog preseka, distorziono izvicanje je fenomen poprečnog preseka. To ukazuje na činjenicu da je lokalna stabilnost deo kompleksnog mehanizama ponašanja koji se odnosi na distorzioni mod izvicanja.

7.1.1. LOKALNO IZVIJANJE

Potreba za optimalnim projektovanjem zahteva primenu tankozidnih struktura, koje pod dejstvom pritisknog opterećenja pojedini elementi poprečnog preseka mogu lokalno izgubiti stabilnost. Ovaj fenomen je poznat pod nazivom lokalno izvijanje, a javlja se na delu pritisnutog elementa noseće strukture (Slika 7.3). Lokalno izvijanje je naročito značajno u procesu post-izvijenog stanja, kada pritisnuti elementi imaju prilični kapacitet da i dalje mogu prenositi opterećenje. Pod dejstvom pritisknog opterećenja, elementi (ploče) poprečnog preseka bivaju izložene elastičnom izvijanju lokalnog karaktera.



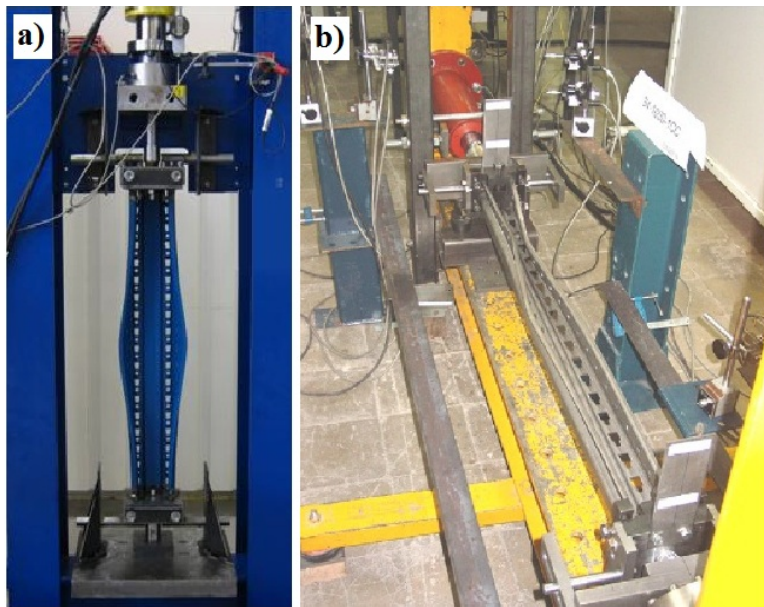
Slika 7.3. Lokalno izvijanje: a) uzročnik pojave i b) eksperimentalna simulacija

Oblasti koje su podložne lokalnom izvianju nisu sve podjednako osetljive, što se manifestuje preko različitih vrednosti ugiba. Oblasti koje imaju veće ugibe su osetljivije na lokalno izvianje i karakterišu se izrazito neravnomernom raspodelom napona. Najveće vrednosti ugiba od lokalnog izvianja odgovaraju minimalnim vrednostima napona i to su neefektivne zone, pošto vrlo malo doprinose sprečavanju fenomena lokalnog izvianja. Nasuprot ovome, zone koje se nalaze u neposrednoj blizini uglova poprečnog preseka, ukrućenih ivica ili profilisanih žlebova, praćene su malim ugibima i znatnim vrednostima napona, koje imaju dominantnu ulogu u prenošenju opterećenja i nazivaju se uticajne ili efektivne zone. Od njihove veličine u velikoj meri zavisi ponašanje elemenata poprečnog preseka u fazi post-izvijenog stanja.

Kritični napon usled lokalnog izvianja isključivo je funkcija geometrijskih parametara elemenata (ploča) i karakteristika je svakog poprečnog preseka. Analiza lokalnog izvianja pokazuje da je otpornost na gubitak stabilnosti neukrućenog elementa znatno manja nego kod ukrućenih elemenata. U cilju smanjenja uticaja lokalnog izvianja, konstrukcionim merama se izvode odgovarajuća ukrućenja, najčeće duž ivica ili profilisanjem središnjih neefektivnih zona elemenata. Ovim pristupom se može znatno uticati na povećanje lokalne stabilnosti pojedinih elemenata poprečnog preseka, ali do određenih limita. Ako se poveća dužina nosača, tada dolazi do gubitka stabilnosti ukrućene ivice poprečnog preseka, a fenomen je definisan kao distorziono izvianje (Slika 7.4.). Ključno pitanje kod distorzionog izvianja odnosi se na ugaono ograničenje u spoju pojasa i rebra. Matematička interpretacija lokalnog i distorzionog modaliteta izvianja je data kroz analizu metoda procene nosivosti u okviru tačke 7.2.

7.1.2. DISTORZIONO IZVIJANJE

Preteče savremenih skladišnih struktura sa perforiranim prorezima stubova, prvi put su uvedena tokom 1930-tih. Osnovni cilj regalskih struktura ovog tipa je postizanje varijabilne visine određene etaže i time bolje iskorišćenje skladišnog prostora. Osim toga, ove strukture su montažno-demontažnog tipa, čime se postiže fleksibilnost različitih skladišnih zahteva. Perforacija stubova regala obezbeđuje da se na istom stubu određene visine može realizovati više etaža manje visine ili manje etaža veće visine, zavisno od potreba skladištenja odnosno visine skladišnih jedinica. S druge strane, veza paletnih nosača sa stubovima ne zahteva primenu montažno-demontažnih spojeva (npr. vijaka), već se veza sa stubom regala ostvaruje preko konektora L oblika sa profilisanim žlebom.



Slika 7.4. Distorzioni mod izvijanja sa: a) jednim i b) dva polutalasa

Oblik ovog žleba i perforiranih otvora na stubu moraju biti kompaktabilni za ostvarivanje kvalitetnog i sigurnog spoja između stuba i paletnog nosača. Ovaj koncept pruža mogućnost formiranja skladišnih regala u različitim varijantama i konfiguracijama, bez potrebe za nahnadnom doradom ili nabavkom dodatnih elemenata regala. Od nastanka ovog koncepta pa do današnjih dana, elementi regalske strukture predmet su intenzivnih istraživanja, među kojima posebno mesto zauzima analiza stabilnosti. Masovna proizvodnja elemenata regalskog skladišta zahteva optimizaciju njihovih poprečnih preseka u cilju smanjivanja troškova proizvodnje. Potreba za racionalnim projektovanjem regalskih skladišta inicirala je razvoj više metoda, polu-empirijskog karaktera i predstavljaju sastavni deo standarda koji tretiraju problematiku tankozidnih hladno-valjanih profila.

Stubovi regala su najkritičniji elementi regala, pošto se preko njih prenosi celokupno opterećenje na fundament. Perforirani otvori dodatno slabe poprečni presek. Polazni oblik poprečnog preseka za izradu stubova regala bio je C profil, jer je omogućavao jednostavnu izradu. Kasniji razvoj inicirao je uvođenje i drugih oblika, poput: C, Σ i Ω profila, kao i njihovih modifikacija.

Kompleksnost poprečnog preseka stuba se definiše na bazi dva osnovna uslova: jednostavnosti montaže i minimizacije troškova proizvodnje (obuhvata materijalne i troškove izrade).

Interakcija između lokalnog i distorzionog moda izvijanja postiže se pri određenim geometrijskim karakteristikama poprečnog preseka. Za razliku od lokalnog i globalnog izvijanja, distorzioni modalitet je novijeg datuma i još uvek je u fazi razvoja posebno u pogledu primene kod složenijih poprečnih preseka. Međutim, to ne treba uzeti kao pokazatelj značajnog nedostatka. Fenomen distorzionog izvijanja je efekat koji prati ponašanje otvorenih tankozidnih nosača i njegova pojava nije ništa manje verovatna od manifestovanja lokalnog moda izvijanja.

Termin distorziono izvijanje sugerise na onaj modalitet izvijanja koji se odražava kao posledica distorzije (izvitoperenosti-promene originalnog oblika) poprečnog preseka. Kod otvorenih tankozidnih oblika pritisnutih elemenata struktura, distorziono izvijanje se karakteriše relativnim pomeranjem savijenih ivica (uglova i ukrućenih rubova) kao i otvaranjem odnosno zatvarenjem poprečnog preseka.

Dužina nosača odnosno stuba koji obuhvata distorziono izvijanje je veća od lokalnog, a manja od globalnog izvijanja. Od svog identifikovanja, distorziono izvijanje je dugi niz godina bilo zanemarivano, ali je zahvaljujući intenzivnim istraživanjima u poslednje dve decenije, označeno kao neophodan deo strukturne analize otvorenih tankozidnih profila.

Rezultati sprovedenih istraživanja su integrisani kroz odgovarajuće procedure i sastavni su deo savremenih standarda koji tretiraju ovu problematiku. Iako su publikovana istraživanja distorzionog izvijanja značajna i dalje postoje problemi čiji mehanizam ponašanja nije do kraja razjašnjen, naročito kod složenijih poprečnih preseka. To se odnosi na sledeće aspekte:

- Značaj distorzionog izvijanja generalno nije prihvaćen. Razlog za to se može ilustrovati kroz sledeći primer: Aktuelni britanski standard BS 5950 Part 5 koji se odnosi na projektovanje od hladno-valjanih profila, ne tretira uticaj distorzionog izvijanja. S druge strane, Britanski proizvođači regalskih skladišta koriste čelik S 275 po EN 10025-2, dok se projektovanje sa aspekta stabilnosti vrši prema lokalnom izvijanju kao kritičnom modu koji može dovesti do nestabilnosti preseka. Međutim, značajnim poboljšanjem kvaliteta primenjenih čelika za izradu regalskih struktura u toku poslednjih nekoliko godina, uticaj distorzionog izvijanja dobija na značaju pošto naprezanje ovog modaliteta može biti podjednako kritično kao i lokalno izvijanje,
- Uticaj distorzionog izvijanja je obuhvaćen Evropskim standardom EN 1993 Part 1-3, ali samo za C i Z poprečne preseke. Iako je fizički model distorzionog izvijanja relativno jednostavan, matematički izrazi koji opisuju ponašanje fenomena distorzije su prilično komplikovani i uključuju veliki broj uticajnih koeficijenata. To čini ovaj standard teško primenjiv na profile drugih oblika (npr. Σ , Ω i dr.) koji takođe imaju veliku praktičnu primenu i
- Rezultati istraživanja koji analiziraju interaktivne uticaje distorzionog izvijanja i drugih kritičnih modova izvijanja, kao što su lokalno i različite varijante globalnog izvijanja, su u velikoj meri limitirani i obuhvataju samo jednostavnije slučajeve. Interaktivni uticaj pojedinih kritičnih modova izvijanja u odnosu na projektovano opterećenje je uzrok kompleksnog mehanizma ponašanja elemenata poprečnog preseka, na koji dominantan uticaj ima distorziono izvijanje.

Sa povećanjem upotrebe čelika veće čvrstoće, tendencijski dolazi do redukcije debljine poprečnog preseka. Projektovanje prema kriterijumu čvrstoće, poprečni presek valjanog profila može biti veoma male debljine. Međutim, elementi takvog poprečnog preseka su podložni izvijanju i mogu izgubiti stabilnost dovodeći do razaranja (loma). Da bi se povećala otpornost na izvijanje, a pritom održao tanak poprečni presek, sprovode se odgovarajuće konstrukcione mere kako bi se povećala krutost vitkih elemenata (pojaseva i rebara). Primena središnjih ukrućenja izvodi se preko profilisanih žlebova, dok se krajni elementi preseka ukrućuju savijanjem rubova i omogućavaju povećanja kritičnog napona lokalnog izvijanja. Međutim, ove mere ne garantuju da je time rešeno i pitanje distorzionog izvijanja, a dosadašnje analize pokazuju da ove mere negativno utiču sa aspekta distorzionog izvijanja.

Znači, podužnim ukrućenjem vitkih elemenata (ploča) od kojih je formiran poprečni presek, smanjuje se stepen njihove deformabilnosti, što je manifestovano manjom apsorpcijom deformacione energije usled lokalnog izvijanja. Preostala razlika deformacione energije raspodeljuje se na ukrućenja, koja su takođe podložna gubitku stabilnosti izazivajući vitoperenje poprečnog preseka. Fenomen koji prati promenu originalnog oblika poprečnog preseka klasifikuje se kao distorziono izvijanje. Interakcija između lokalnog i distorzionog izvijanja manifestuje se preko podužnih ukrućenja. Ako su ona veće krutosti tada je smanjena mogućnost pojave lokalnog izvijanja, dok je efekat distorzije izraženiji. Optimalno projektovanje poprečnih preseka hladnovaljanih profila podrazumeva uspostavljanje balansa između lokalne i distorzionne stabilnosti. Geometrija poprečnog preseka mora biti tako dizajnirana da kritični naponu od lokalnog i distorzionog izvijanja budu približno jednaki. Fizička interpretacija pojedinih modova izvijanja, kao i njihova interakcija na primeru C profila je data u Prilogu 5.

7.1.3. GLOBALNO IZVIJANJE

Globalno (Euler-ovo) izvijanje je napoznatiji vid gubitka stabilnosti kod pritisnutih elemenata nosećih struktura. Naziv globalno odnosi se na činjenicu da ovaj tip izvijanja je karakterističan za celu dužinu pritisnutog preseka, za razliku od lokalnog i distorzionog izvijanja. Značajno za analizu globalnog izvijanja, pored dužine i oblika poprečnog preseka, su i uslovi oslanjanja krajeva pritisnutog elementa. Za analizu globalnog izvijanja merodavan je bruto poprečni presek, bez obzira da li je pritisnuti stub (nosač) sa ili bez perforacije. Uticaj otvora (perforacije) manifestuje se uglavnom kroz lokalno, a delom i distorziono izvijanje, dok na ponašanje globalne stabilnosti jedino ima uticaj bruto poprečni presek. Kod globalnog izvijanja karakteristična su tri modaliteta izvijanja i to: fleksioni (savojni), torzioni i fleksiono-torzioni.

Gubitak globalne stabilnosti najčešće je praćen savijanjem nosača oko ose minimalnog momenta inercije, što reprezentuje fleksioni mod globalnog izvijanja. Kod otvorenih poprečnih preseka usled pritisnog opterećenja dolazi do indukovanja bimomenta koji se odnosi na pojave torzije odnosno torzionog moda izvijanja. Kod otvorenog poprečnog preseka je često zastupljena kombinacija dva navedena slučaja, koji se definišu kao fleksiono-torzioni modalitet globalnog izvijanja. Kvalitativni uticaj na modalitet globalnog izvijanja definisan je oblikom poprečnog preseka, dok dužina pritisnutog elementa predstavlja kvantitativni pokazatelj o određenom modu globalne stabilnosti. Kritičnu vrednost napona globalnog izvijanja izveo je Timoshenko, a rezultati su izloženi u [83]. Ovaj modalitet u interakcija sa prethodna dva, za tipične presek stubova i nosača je dat u Prilogu 6.

U slučaju monosimetričnog poprečnog preseka (npr. ako je osa simetrije x osa), tada su fleksione komponente opterećenja usled globalnog izvijanja date sa (7.1) (7.2). Druga komponenta opterećenja vezana je za fleksiono-torzioni modalitet globalnog izvijanja, koji je definisan preko (7.3). Kritična vrednosti pritisne sile, kao i odgovarajućih komponenata su date sa (7.6) odnosno sa (7.4) i (7.5).

$$N_{ox} = \pi^2 \frac{EI_x}{l^2} \quad (7.1)$$

$$N_{oy} = \pi^2 \frac{EI_y}{l^2} \quad (7.2)$$

$$N_{oz} = \frac{GJ}{r_0^2} \left(1 + \frac{\pi^2 EI_w}{GJl^2} \right) \quad (7.3)$$

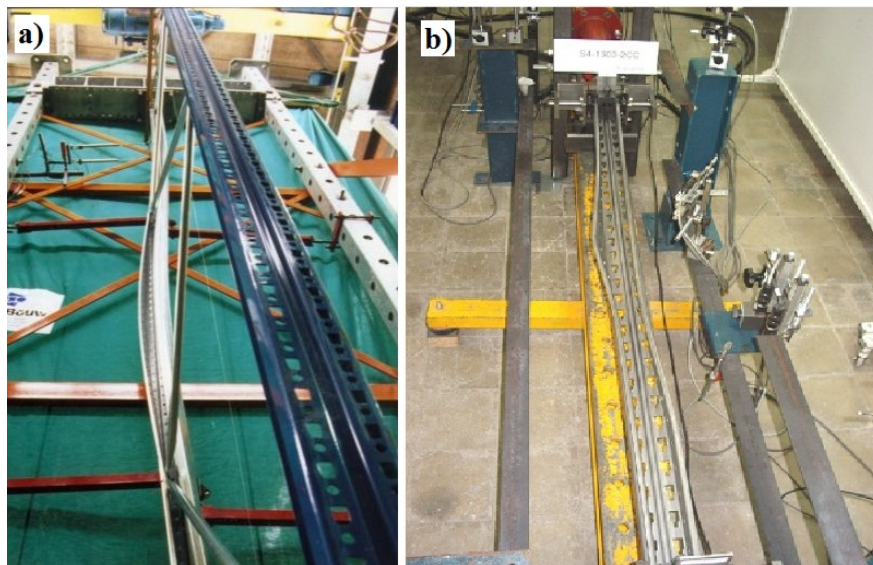
$$(N_{oc})_1 = N_{ox} \quad (7.4)$$

$$(N_{oc})_{2,3} = \frac{(N_{ox} + N_{oz}) \pm \sqrt{(N_{ox} - N_{oz})^2 + 4N_{ox}N_{oz} \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \quad (7.5)$$

Kritična vrednost napona globalnog izvijanja odgovara minimalnoj vrednosti pritisne sile i definiše se preko bruto poprečnog preseka (klauzula 3.4.3 standarda AS/NZS 4600):

$$f_{oc} = \frac{\min\{(N_{oc})_1, (N_{oc})_{2,3}\}}{A_g} \left[\frac{kN}{cm^2} \right] \quad (7.6)$$

Globalno izvijanje, zavisno od oblika poprečnog preseka i dužine, obuhvata sledeće modalitete: savojni, torzioni, savojno-torzioni i poprečno-savojni (Slika 7.5).

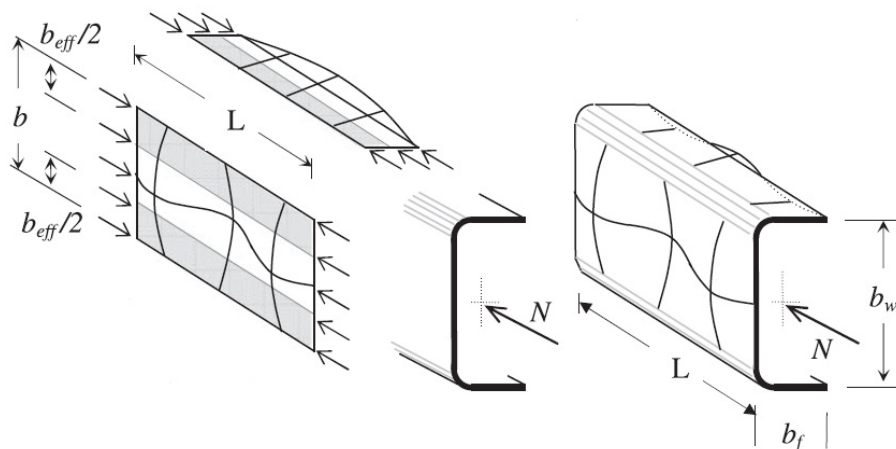


Slika 7.5. Modalitet izvijanja: a) fleksiono-torzioni i b) interakcija globalnog i distorzionog

7.2. METODA EFEKTIVNE ŠIRINE (EWM)

Tradicionalni način za definisanje nosivosti čeličnih hladno-valjanih pritisnutih nosača i stubova podrazumeva korišćenje metode efektivne širine EWM. Osnova ove metode izložena je tokom 1932. godine od strane von Kármán et al. u publikaciji koja razmatra ponašanje vitke ploče [84]. Dobijana rešenja je zatim 1947. godine modifikovao Winter [85], uvođenjem eksperimentalno kalibrisanog faktora kojim se obuhvata uticaj neravnomernog prenošenja opterećenja u fazi post-izvijenog stanja ploče, kao i geometrijske nesavršenosti odnosno rezidualne napone ploče. Ovaj pristup predstavlja opšte prihvatljivo rešenje u pogledu procene kompresione otpornosti usled efekta lokalnog izvijanja kod hladno-valjanih čeličnih poprečnih preseka. Eksperimentalno kalibrisane metode omogućavaju dobijanje rezultata koji konvergiraju poznatim rešenjima, pa su internacionalno prihvaćene i često se kombinuju sa principom dekompozicije poprečnog preseka na individualne pločaste elemente.

Winter-ova jednačina (7.9), kojom se definiše uticajna zona odnosno efektivna širina b_{eff} je sastavni deo skoro svih propisa koji tretiraju problematiku projektovanja strukturnih tankozidnih pritisnutih elemenata. Ova metoda je polu-empiriskog karaktera, a zahteva kalibraciju analitičkog izraza kojim se reprezentuje efekat izvijanja ploče kod tankozidnih profila. Metoda je zasnovana na parcijalnoj analizi pločastih elemenata tankozidnog nosača, dužine L i širine b ($L \gg b$), slobodno oslonjene duž svojih ivica i izložene u podužnom pravcu pritisnim opterećenjem N (Slika 7.6).



Slika 7.6. Efektivne zone poprečnog preseka C profila

EWM pretpostavlja da samo deo od ukupne širine ploče b , koji se odnosi na efektivnu zonu ploče, aktivno učestvuje u prenošenju opterećenja usled izvijanja. Delovi ploče izvan efektivnih zona su podložne znatnim ugibima i one ne mogu nakon pojave elastičnog izvijanja prenositi opterećenje, bez obzira na uniformnu raspodelu opterećenja duž širine ploče. Zone koje odlikuju manji ugibi su oni delovi ploča koji su u blizini savijenih odnosno ukrućenih ivica ili profilisanih žlebova. Te oblasti se nazivaju efektivne zone, a širina ploče koja nosi ravansko opterećenje klasifikuje se kao efektivna širina ($b_{eff} \leq b$), po kojoj je metoda i dobila naziv. EWM nema definisanu adekvatnu proceduru za procenu razaranja (loma) usled distorzionog izvijanja. Određivanje distorzionog izvijanja, prema EWM, podrazumeva korišćenje redukovano koeficijenta izvijanja ploče k , za pritisnuti element poprečnog preseka nosača ili stuba.

Osnovne jednačine kojima se definiše teorijska kritična vrednost pritisne sile N_{th} , napona lokalnog izvijanja σ_{crl} i efektivne širine b_{eff} , date su sa (7.6-7.10) respektivno i čine okosnicu EWM.

$$\frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{crl}}{f_y}} \leq 1 \quad (7.6)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{crl}}} \quad (7.7)$$

$$\sigma_{crl} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (7.8)$$

$$b_{eff} = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_p}\right) \left(\frac{b}{\lambda_p}\right) \quad (7.9)$$

$$N_{th} = b_{eff} t f_y \quad (7.10)$$

Osnove ove metode su sastavni delovi najpoznatijih svetskih standarda iz domena projektovanja hladno-valjanih čeličnih profila, poput AISI Specification [86], European code [87] i Brazillian code [88].

Međutim, bez obzira što su ovi propisi utemeljeni na EWM i što razlike između ovih procedura naizgled mogu izgledati beznačajne, bitno je naglasiti da između navedenih propisa postoji suštinska razlika, a ogleda se u sledećem:

- Određivanje efektivne širine b_{eff} bazirano je na Winter-ovoj jednačini (7.9), dok se napon koji odgovara granici tečenja f_y , za duže stubove koriguje redukcionim faktorom $\chi < 1$,
- Efektivna površina poprečnog preseka A_{eff} , definiše se preko određenih efektivnih širina b_{eff} za svaki pritisnuti element preseka i predstavlja neto površinu poprečnog preseka. Napadna linija pritisne sile poklapa se sa težište bruto poprečnog preseka čija je površina A ($A_{eff} < A$), što je slučaj kod Severnoameričkog propisa AISI Specifications [86], Brazilskog ABNT NBR 14762 [88] i Australijskog AS/NZ 4600: 2005 [101],
- Kritična vrednost pritisne sile odnosno kompresiona otpornost dugačkog stuba, dobija se preko neto površine poprečnog preseka i redukovane vrednosti napona tečenja, tj. preko izraza: $N_{cr} = \chi A_{eff} f_y$,
- Kod Evropskog standarda Eurocode 3 [87] definisanje kompresione otpornosti se realizuje transformacijom napadne tačke pritisne sile iz težišta bruto poprečnog preseka u težišnu tačku neto površine preseka. Posledica toga je ekscentrični pritisak, pa se definisanje otpornosti stuba interpretira preko interakcionih jednačina koje tretiraju kombinovano dejstvo savijanja i aksijalnog pritiska,
- Definisane teorijske kritične sile izvijanje N_{th} podrazumeva korišćenje jednostepene i dvostepene procedure (Tabela 7.2), a ogleda se u iteraciji redukcionog faktora χ . Ovaj pristup je prvobitno bio obuhvaćen odredbama AISI Specification [86], a kasnije je postao sastavni deo standarda [87, 88 i 101] i

- Za vrlo vitke poprečne preseke, dvostepena procedura daje veće vrednosti kompresione otpornosti stubova u poređenju sa jednostepenom procedurom, čije su vrednosti znatno bliže eksperimentalnim rezultatima. Dodatna redukcija koeficijenta vitkosti λ_c , preko koga se definiše kritična vrednost pritisne sile N_{th} , utiče na smanjenje tehnološke rezerve kompresione otpornosti u ponovljenom odnosno dvostepenom koraku (TSP).

Tabela 7.2. Određivanje otpornosti stuba po EWM (OSP I TSP)

JEDNOSTEPENA PROCEDURA (OSP)	DVOSTEPENA PROCEDURA (TSP)
<p>1. Lokalna vitkost odnosno redukovani napon tečenja:</p> $\lambda_c = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0.5} \Rightarrow \chi$ $\sigma = \chi f_y$	Isto kao OSP
<p>2. Za svaki pločasti element širine b pritisnutog poprečnog preseka:</p> <p>2.1 $\sigma_{crl} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$</p> <p>2.2 $\lambda_p = \left(\frac{\chi f_y}{\sigma_{crl}} \right)^{0.5}$</p> <p>2.3 $b_{eff} = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_p} \right) \left(\frac{b}{\lambda_p} \right)$</p>	Isto kao OSP
<p>3. Efektivna površina preseka A_{eff}:</p> $A_{eff} = \sum t b_{eff} + A_c$	Isto kao OSP
<p>4. Kritična pritisna sila N_{cr}:</p> $N_{cr} = \chi A_{eff} f_y$	<p>4. Rekalkulacija koeficijenta λ_c:</p> $\lambda_c = \left(\frac{A_{eff} f_y}{N_e} \right)^{0.5} \Rightarrow \chi_{OSP}$ $N_{cr} = \chi_{OSP} A_{eff} f_y$

Bitno je istaknuti da EWM procenu otpornosti stubova odnosno nosača bazira na osnovu prilagođene krive izvijanja (dobijene prema Winter-ovoj jednačini) koja obuhvata ponašanje samo lokalnog i globalnog izvijanja, kao i njihovu međusobnu interakciju. EWM ne obuhvata analizu otpornosti distorzionog moda izvijanja, koji je dominantnog uticaja kod hladnovaljanih profila regalskih struktura.

Hladno-valjani U profil (neukruženi C poprečni presek) spada u vrlo osetljive oblike na pojavu lokalnog izvijanja. Kada aksijalno pritisna sila dostigne kritičnu vrednost, pojasevi profila lako gube stabilnost, pošto je njihova slobodna ivica neukružena. Gubitak stabilnosti pojaseva teži da spreči rebro preko momenata elastičnog uklještenja (deluje duž spoja rebra i pojasa), čije se interaktivno dejstvu manifestuje na izvijanje i pojedinih zona rebra. Zbog toga zone maksimalnih ugiba pojasa i rebra odgovaraju istom poprečnom preseku.

Rebro u izvesnom meri utiče na redukciju ugiba (npr. povećanjem visine, a naročito debljine), ali znatno efikasnije način za povećanje otpornosti izvijanja je ukrućenje slobodne ivice pojasevne ploče. Time se dolazi do ukrućenog C profila, čija je otpornost na lokalno izvijanje znatno povećana. Da bi se slobodna ivica pojasa što više ukružila odnosno da bi uslovi oslanjanja približno bili isti kao i u zoni spoja sa rebrom sprovode se mere dodatnog ukrućenja. Međutim, kao kontra efekat sprovedenih konstruktivnih mera za ukrućivanje slobodnih ivica pločastih elemenata C profila imamo fenomen distorzije, koji izobličuje oblik poprečnog preseka i indukuje distorzioni modalitet izvijanja.

Uticaji lokalnog i distorzionog gubitka stabilnosti inicirao je razvoj kompleksnijih oblika poprečnog preseka hladno-valjanih tankozidnih preseka, posebno kod otvorenih profila. S druge strane, takvi poprečni preseki zahtevaju složenu proceduru za identifikaciju deformacijsko-naponskog stanja i procenu stabilnosti, naročito kada su u pitanju elementi sa perforiranim otvorima, kao u slučaju stubova regalskih skladišta.

7.3. METODA DIREKTNE OTPORNOSTI (DSM)

Metoda direktne otpornosti (DSM) je relativno nova metoda koja omogućava procenu otpornosti stubova i nosača podložnih gubitku stabilnosti na pojavu lokalnog, distorzionog i globalnog izvijanja koristeći empirijske jednačine. Osim toga, DSM obuhvata i interakcijsku analizu lokalnog i globalnog izvijanja.

DSM je razvijena na osnovu realnih rezultata elastičnog izvijanja hladno-valjanih profila, a predložena je od strane Schafer-a i Pekoz-a [91] i uključena u AISI S100-2007 Appendix 1 [86], poslednju verziju Severno Američkog standarda. Ova metoda obezbeđuje konzistentan pristup u određivanju kompresione i savojne otpornosti bez obzira na oblik poprečnog preseka stubova i nosača.

Razvoj DSM preko fenomena distorzije rezultirao je korišćenjem znatno šireg spektra hladno-oblikovanih preseka, kojim su otklonjeni nedostaci u proceni kritičnih napona izvijanja svih modaliteta. DSM je ubrzo prihvaćena, najpre od strane Severnoameričke i Australijske istraživačke zajednice, a kasnije i od drugih, kao pouzdan i efikasan metod u projektovanju hladno-valjanih čeličnih struktura.

Ova metoda objedinjuje elastični lokalni i distorzioni napon celokupnog poprečnog preseka, koji su definisani iz klasične analize izvijanja. DSM je koncept koji obezbeđuje direktno određivanje efektivne nosivosti poprečnog preseka, po čemu je metoda i dobila naziv. DSM karakterišu značajna poboljšanja u pogledu preporuka za projektovanje hladno-valjanih elemenata, koja se odnose na sledeće karakteristike:

- Efikasnija strategija sa manje kompleksnijim izrazima za definiisanje otpornosti elemenata u poređenju sa EWM,
- Rezultati dobijeni DSM znatno bolje konvergiraju eksperimentalno dobijenim vrednostima u odnosu na EWM,
- Omogućava optimizaciju poprečnog preseka tankozidnih nosača,
- Ima solidnu osnovu za potencijalnu širu primenu i dalji razvoj i
- Fokusira se na korektnom definisanju ponašanja elastišnog izvijanja.

DSM u odnosu na druge metode procene stabilnosti, ima određene teorijske i praktične prednosti. Teorijske prednosti odnose se na metodološku benefit postupka, dok se praktične prednosti tiču pogodnosti za inženjersku praksu. Teorijske prednosti DSM ogledaju se u sledećem:

- Uključuje interakciju između elemenata poprečnog preseka (rebra i pojasa),
- Eksplicitno definiše distorziono izvijanje i
- Obuhvata sva granična stanja stabilnosti elementa.

Praktične prednosti DSM su:

- Ne zahteva određivanje efektivne širine,
- Niti sprovođenje iteracionog postupka i
- Metoda koristi bruto poprečni presek nosača, čime se pojednostavljuje njeno korišćenje.

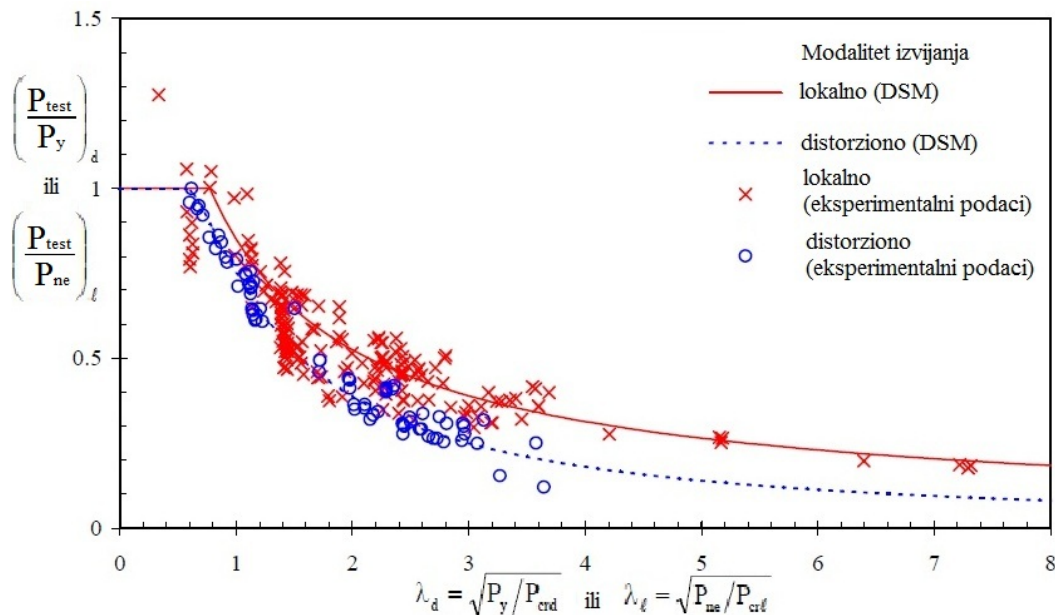
Ograničenja DSM odnose se na sledeće:

- ♦ Ne uzima se uticaj smicanja,
- ♦ Ne predviđa odredbe koje se odnose na deformaciju rebra,
- ♦ Ne razmatra se postojanje otvora,
- ♦ Previše konzervativni pristup za vrlo vitke elemente preseka,
- ♦ Metod je kalibrisan samo za prethodno ispitivane preseke i
- ♦ Ne uzima se uticaj ojačanja usled hladnog valjanja materijala.

7.3.1. PRIMENA DSM ZA STUBOVE

DSM tretira lokalno, distorziono i globalno-fleksiono odnosno lateralno-fleksiono izvijanje, kao i interakcijsko ponašanje pod uticajem ovih modova izvijanja. Na osnovu eksperimentalnih podataka, zaključeno je da interakcija lokalnog i globalnog izvijanja značajna i mora biti uključena u razmatranje, dok interakcija lokalno-distorzionog i distorziono-globalnog izvijanja dovodi do preterano konzervativnog rešenja, pa se međusobno dejstvo ovih modaliteta ne preporučuje za inkluziju u DSM. Međutim, ovaj zaključak ne važi generalno i u nekim specifičnim slučajevima kada lokalno-distorziona interakcija mora biti uključena u analizu procene otpornosti na gubitak stabilnosti [161].

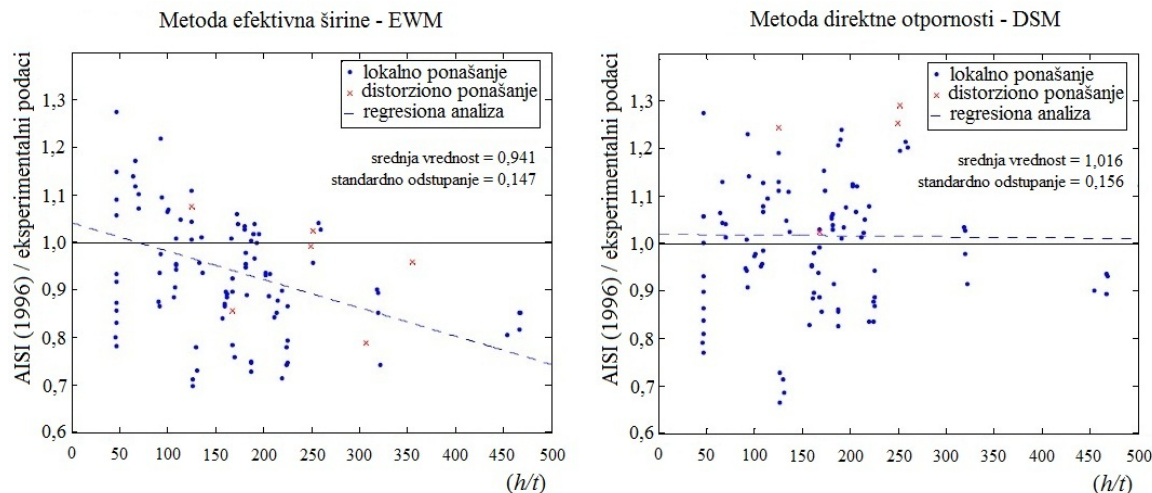
Uporedna analiza između odredbi kojim se definiše DSM (videti izraze u 7.3.2) i eksperimentalno dobijenih podataka, grafički je prikazana na slici 7.7. Time se jasno ističe da DSM obezbeđuje racionalno predviđanje otpornosti stubova odnosno nosača za širok opseg vitkosti, što nije u mogućnosti da pruži EWM.



Slika 7.7. Komparacija krivih za procenu otpornosti po DSM za stubove

Kritična pritisna sila P_y koja izaziva gubitak stabilnosti stuba javlja se kao posledica distorzionog izvijanja. Kriva koja reprezentuje lokalno ponašanje stuba odlikuje se većom otpornošću na gubitak stabilnosti u odnosu na distorziono izvijanje, za iste vrednosti vitkosti. Posledica toga je uticaj globalnog moda izvijanja odražavajući se preko lokalno-globalne interakcije.

Komparacioni rezultati sistematske greške pri proceni otpornosti na gubitak stabilnosti pritisnutog stuba (C profila) u funkciji of vitkosti rebra, prema EWM i DSM su dijagramski dati na slici 7.8. Pri malim vrednostima vitkosti EWM daje suviše konzervativne vrednosti.



Slika 7.8. Odstupanje rezultata EWM i DSM u odnosu na eksperimentalne vrednosti

Ovo stanje je još nepovoljnije u slučajevima kada imamo profile sa velikim odnosom između širine pojasa i visine rebra (slučaj tkz. uskih profila), što je posledica lokalne interakcije elementa preseka (pojaseva i rebra). Razlog za to leži u samom konceptu EWM, koja je bazirana na parcijalnom pristupu elemenata poprečnog preseka. Uticaj vitkosti rebra razmatranog profila prema EWM se ne manifestuje na vrednosti kritičnog napona pojasa usled lokalnog izvijanja, što u većini slučajeva daje rešenja sa znatnom naponskom rezervom (konzervativan pristup).

7.3.2. PRIMENA DSM ZA NOSAČE

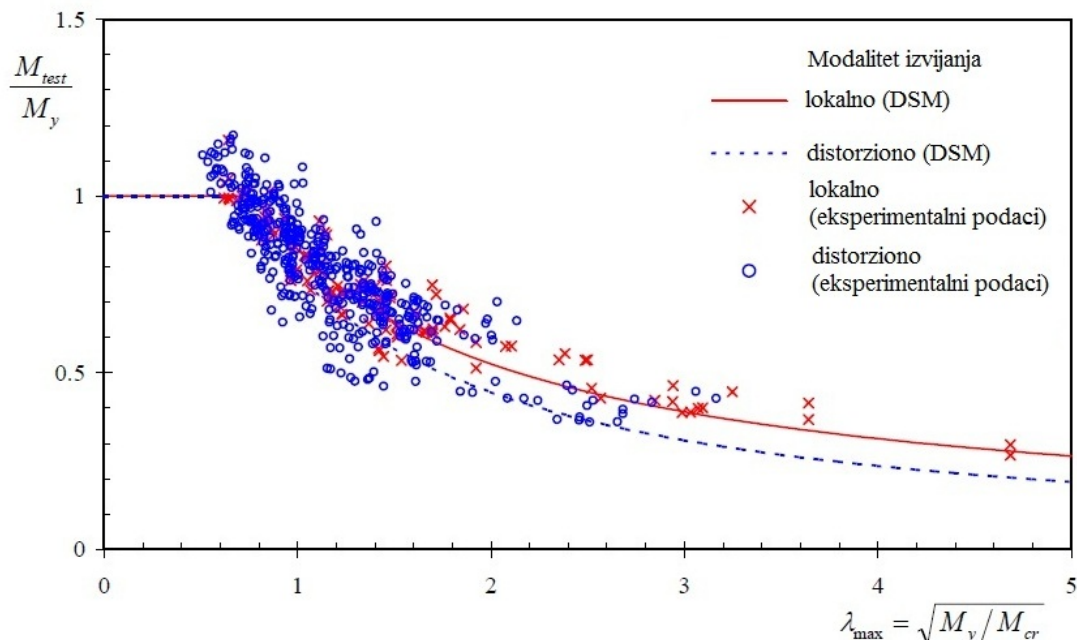
DSM je najpre bila razvijena za primenu kod nosača (elemenata struktura izloženih savijanju), sa ciljem identifikacije distorzionog izvijanja. Oblici poprečnog preseka se mogu podeliti u dve karakteristične grupe [91]:

- ✧ Profili C i Z poprečnog preseka i njihove različite modifikacije, kao dominantni i najčešće korišćeni hladno-oblikovani profili i
- ✧ Profilisani limovi sa podužnim ukrućenjima na pojasevima i rebrima.

Eksperimentalno dobijene vrednosti momenata savijanja M_{test} se normalizuju sa momentom M_y koji dovodi do razaranja nosača (Slika 7.9). Ovo se radi zbog činjenice da su svi eksperimentalno dobijeni podaci odnose na bočno poduprte nosače. Kod nosača takođe je ignorisana lokalno–distorziona i distorziono–globalna inetrakcija u odnosu na međusobno ponašanje lokalnog i globalnog ponašanja, kao što je uobičajeno za stubove. Za identifikaciju stabilnosti potpuno ili ograničeno slobodnih i bočno poduprtih nosača, neophodna su dalja istraživanja fenomena vitoperosti i torzije, kao i potencijalnih interakcija izvan konteksta DSM. Za ograničeno bočno oslonjene nosače, uticaj torzionog napona na lokalno i distorziono izvijanje je neophodno uzeti u obzir kod tankozidnih otvorenih preseka [162] i njegovo potencijalno uključivanje u DSM opravdavaju studije iz ove problematike. Eksperimentalni podaci koji se odnose na gubitak stabilnosti usled distorzionog izvijanja su znatno zastupljeniji kod nosača (Slika 7.9) nego za stubove (Slika 7.7) iz sledećih razloga:

- ♦ Efekat distorzionog izvijanja je vrlo izražen kod tipičnih C i Z poprečnih preseka, pošto rebro utiče na stabilizaciju napona savijanja i
- ♦ Baze podataka eksperimentalnih rezultata obuhvataju veliki broj HAT preseka odnosno profilisanih limova za koje je tipično postojanje podužnih ukrućenja pritisnutih pojaseva (ovi elementi se odlikuju znatnim naponima usled distorzionog izvijanja).

DSM daje mogućnost razdvajanja lokalnog i distorzionog moda izvijanja nosača, koristeći adekvatne veze odnosno konturne uslove prilikom eksperimentalnog kalibrisanja. Razdvajanje ova dva moda izvijanja je neophodno radi tačnije indentifikacije izraza za procenu otpornosti nosača, koji se odnose na lokalno i distorziono izvijanje. Analiza njihovog zbirnog dejstva ne pruža dovoljno informacija o osetljivosti nosača na pojedinačne modalite izvijanja. Eksperimentalna analiza lokalnog izvijanja na nosačima C i Z poprečnog preseka, uz potpuno ograničenje distorzionog i lateralno–torzionog izvijanja je detaljno izložena u [163]. Od strane istih autora, izvršeno je izolovanje distorzionog moda izvijanja, koji u znatnoj meri utiče na redukciju otpornosti izvijanja nosača, u odnosu na samostalno dejstvo lokalnog moda izvijanja [92].



Slika 7.9. Komparacija krivih za procenu otpornosti po DSM za nosače

DSM tretira analizu elastičnog izvijanja za ceo poprečni presek, a ne samo na izolovanom delu pritisnutog elementa poprečnog preseka. Ako je poprečni presek izveden od elemenata (ploča) koje imaju različitu otpornost na pojavu izvijanja (npr. neki od elemenata ima znatno manju vitkost od ostalih, a ceo poprečni presek je uniformno opterećen), DSM procenjuje nosivost celog poprečnog preseka na bazi stabilnosti kritičnog elementa. Pristup efektivne širine (EW) koji je sastavni deo standarda AISI S100 predviđa malu otpornost na izvijanje kritičnog elementa (koji se odlikuje velikm vitkošću), ali dozvoljava da ostali elementi poprečnog preseka prenose opterećenje.

Rezultate koje u tom smislu daje DSM su suviše konzervativnog karaktera i sadrže znatan nivo tehnološke rezerve od nastupanja kritičnog stanja. DSM je empirijski podržana metoda, zasnovana na kalibraciji eksperimentalno dobijenih izrazima (analogno kao kod EWM, gde je izvršena kalibracija analitičkog izraza). Međutim, DSM zbog svojih prednosti oko jednostavne aplikacije, omogućava istraživanje prilično širokog opsega poprečnih preseka, što nije osobenost EWM (Prilog 7).

- *Globalno izvijanje*

Kritične vrednosti pritisnih sila N_{cRg} , date su u zavisnosti od opsega parametra λ_c .

$$N_{cRg} = \left(0.658^{\lambda_c^2}\right) A f_y, \quad \text{ako je } \lambda_c \leq 1.5 \quad (7.11)$$

$$N_{cRg} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) A f_y, \quad \text{ako je } \lambda_c > 1.5 \quad (7.12)$$

Gde je:

$$\lambda_c = \left(\frac{A f_y}{N_g}\right)^{0.5} \quad (7.13)$$

- Interakcija globalnog i lokalnog izvijanja

$$N_{cRl} = N_{cRg}, \quad \text{ako je } \lambda_l \leq 0.776 \quad (7.14)$$

$$N_{cRl} = \left(1 - \frac{0.15}{\lambda_l^{0.8}}\right) \left(\frac{N_{cRg}}{\lambda_l^{0.8}}\right), \quad \text{ako je } \lambda_c > 0.776 \quad (7.15)$$

Gde je:

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{cRg}}{N_l}\right)^{0.5} \quad (7.16)$$

7.3.3. PREGLED EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

U period od 1946. do 1997. godine, od strane 17 istraživača sprovedeno je ukupno 547 eksperimentalnih ispitivanja na tipičnim, najčešće korišćenim profilima koji su izloženi fleksionom naprezanju (Tabela 7.3). Poprečni preseći koji su bili predmet istraživanja su: C, Z, HAT i profilisani limovi trapeznog oblika, kao i njihove različite modifikacije koje se odnose na podužna ukrućenja rebara i pojaseva. Krutost nosača λ_d (7.22) se definiše kao odnos minimalne vrednosti kritičnog momenta izvijanja M_{cr} i momenta koji dovodi do popuštanja (razaranja) nosača M_y , čije je dejstvo analogno sa pojavom napona na granici tečenja. Uobičajeno je da se eksperimentalni rezultati M_{test} normalizuju sa vrednostima M_y ,

Tabela 7.3. Baza podataka eksperimentalno ispitanih tipičnih nosača

Nazivi istraživača i godina realizovanog istraživanja	Ukrućeni C profil	Neukručeni C profil	C profil sa kosim ukrućenjem	Ukrućeni C profil sa ojačanjem rebra	HAT profil	HAT profil sa jednim središnjim ukrućenjem	HAT profil sa dva središnja ukrućenja	HAT profil sa tri središnja ukrućenja	HAT profil sa četiri središnja ukrućenja	Trapezno profilisan lim (TPL)	TPL sa jednim središnjim ukrućenjem pojasnog lima	TPL sa jednim središnjim i jednim ojačanjem rebra	TPL sa jednim središnjim i dvostrukim ojačanim rebrom	TPL sa dva središnja ojačanja i dvostrukom ukrućenim rebrom	Neukručeni Z profil	Ukrućeni Z profil	Ukupno realizovanih istraživanja
Acharya (1997)							30	32	32								94
Bernard (1993)										6	12						18
Cohen (1987)	14		22														36
Desmond (1977)						22											22
Ellifritt et. al. (1997)	5														5		10
Hoglund (1980)										6	53	16	4	19			98
Konig (1978)					4	15	13										32
LaBoube and Yu (1978)	32																32
Moreyra (1993)	9																9
Papazian (1994)						2	6	6	6								20
Phung and Yu (1978)	6			42													48
Rogers (1995)	50	9															59
Schardt and Schrade (1982)															8	29	37
Schuster (1992)	5																5
Shan (1994)	29																29
Willis and Wallace (1990)	4														6		10
Winter (1946)					15												15
Broj eksperimenata po profilu	154	9	22	42	19	39	49	38	38	12	65	16	4	19	19	29	574

7.3.4. KOMPARACIJA METODA ZA PROCENU NOSIVOSTI PREMA DSM

Prva metoda za procenu stabilnosti nosača podrazumeva korišćenje AISI Specification (NAS) [86] za hladno-oblikovane čelične savojne elemente struktura, koja je bazirana na jedinstvenom pristupu efektivne širine [164]. Za nosače koji nisu izloženi bočno-torzionom izvijanju, nominalna otpornost na savijanje M_n se određuje prema:

$$(M_n)_1 = M_y, \quad \text{ako je } \lambda \leq 0.673 \quad (7.17)$$

$$(M_n)_1 = M_y \left(1 - 0.22 \sqrt{\frac{M_{cr}}{M_y}} \right) \sqrt{\frac{M_{cr}}{M_y}}, \quad \text{ako je } \lambda > 0.673 \quad (7.18)$$

Druga metoda za procenu stabilnosti nosača odnosi se na dodatnu redukciju usled potencijalnog razaranja od distorzionog izvijanja. Elastično izvijanje karakteriše znatan kapacitet post-izvijenog stanja, što nije odlika distorzionog moda izvijanja.

Međutim, istraživanje [165] ukazuje da distorziono izvijanje u određenoj meri, takođe ima mogućnost prenošenja opterećenja nakon pojave kritične sile elastičnog izvijanja. U tom smislu, neophodno je korigovati kritičnu vrednost momenta M_{cr} , prema pristupu baziranom od strane Schafer-a [165].

$$(M_n)_2 = M_y \left(1 - 0.22 \sqrt{\frac{M_{cr}^*}{M_y}} \right) \sqrt{\frac{M_{cr}^*}{M_y}} \quad (7.19)$$

$$M_{cr}^* = \min\{(M_{cr})_{local}, R_d (M_{cr})_{distortion}\} \quad (7.20)$$

$$R_d = \frac{1.17}{\lambda_d + 1} + 0.3, \quad \text{ako je } \lambda_d > 0.776 \quad (7.21)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{(M_{cr})_{distortion}}} \quad (7.22)$$

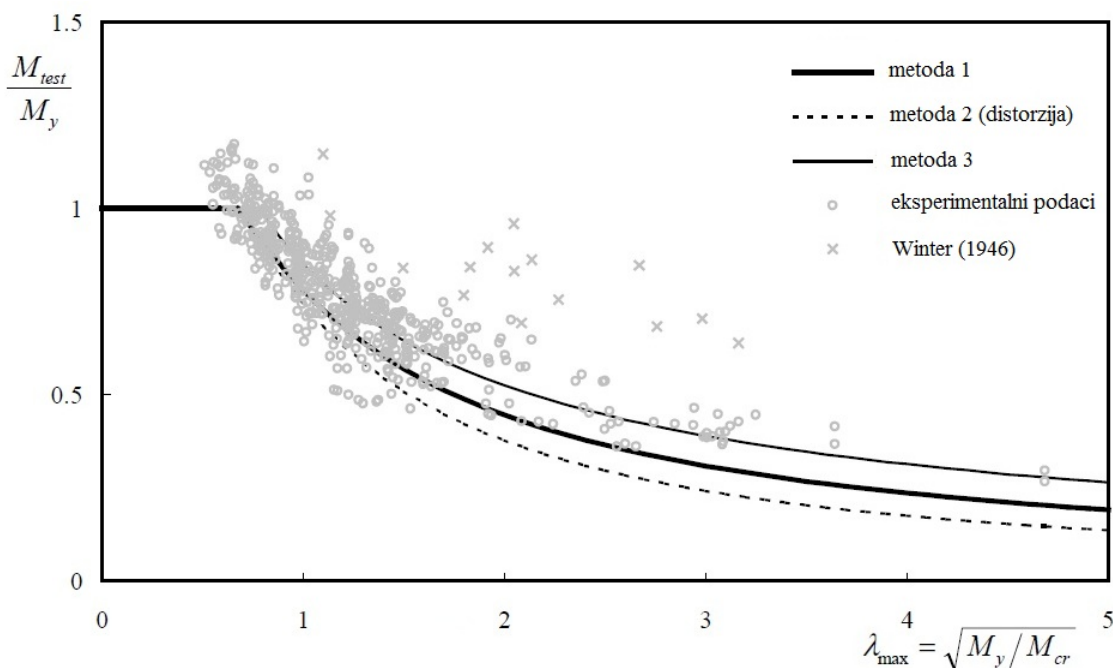
Treća metoda za procenu stabilnosti nosača predstavlja modifikaciju prve metode. Korekcija se odnosi na stepenovanje odnosa (M_{cr}/M_y) koeficijentom 0,4 (umesto 0,5 kod prve metode), čime su rezultati znatno bliži eksperimentalnim vrednostima.

$$(M_n)_3 = M_y, \quad \text{ako je } \lambda \leq 0.776 \quad (7.23)$$

$$(M_n)_3 = M_y \left(\frac{M_{cr}}{M_y} \right)^{0.4} \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{cr}}{M_y} \right)^{0.4} \right], \quad \text{ako je } \lambda > 0.776 \quad (7.24)$$

7.3.5. OSOBINE METODA ZA PROCENU STABILNOSTI PREMA DSM

Krive otpornosti na izvijanje po DSM za prethodno navedene pristupe: $(M_n)_1$, $(M_n)_2$ i $(M_n)_3$ su prikazane na slici 7.10. Vrednosti $(M_n)_2$ se razlikuje od $(M_n)_1$ samo u slučajevima kada se tretira distorziono izvijanje. Kvalitativno-kuantitativno poređenje adekvatnosti navedenih pristupa u odnosu na AISI Specifikation (NAS) je datu u tabeli 7.4.



Slika 7.10. Kriva otpornosti na gubitak stabilnosti po metodama 1, 2 i 3 (DSM)

Prva metoda DSM pristupa u cilju definisanje $(M_n)_1$ je relativno konzervativna za sve testirane elemente. Rezultati koji odgovaraju ovom pristupom daju veće vrednosti u odnosu na drugu metodu kojom se određuje $(M_n)_2$, kao posledica manjeg post-izvijenog distorzionog kapaciteta u odnosu na lokalno izvijanje. Međutim, ovaj zaključak ne potvrđuje većina eksperimentalnih istraživanja.

Pristup koji je izložen kroz treću metodu radi definisanja $(M_n)_3$, za većinu eksperimentalnih ispitivanja pokazuje dobro poklapanje rezultata, izuzimajući podatke koji su izneti od strane Winter-a [85]. Ovaj pristup (treća metoda) je znatno precizniji i pouzdaniji od ostalih pristupa DSM (prve i druge metode) i daje bolje rezultate od AISI Specification [86]. Zbog svoje jednostavnosti i eksperimentalne verifikacije, ova modifikacija DSM-a je najčešće primenljiva za tipične hladno-oblikovane čelične profile.

Na kraju, ali ne i na poslednjem mestu, treba istaći da se DSM još uvek nalazi u fazi razvoja, kako bi se našla u ulozi sveobuhvatne projektanske procedure, sa tendencijom da zbog svojih prednosti u izvesnoj meri potisne dosada neizbežnu EWM.

Tabela 7.4. Komparacija metoda po DSM u odnosu na eksperimentalne vrednosti

Nazivi istraživača i godina realizovanih istraživanja	prosečna eksperimentalna vrednost za procenu				standardno odstupanje eksperimentalnih vrednosti			
	$\frac{M_{test}}{M_{AISI}}$	$\frac{M_{test}}{M_1}$	$\frac{M_{test}}{M_2}$	$\frac{M_{test}}{M_3}$	$\frac{M_{test}}{M_{AISI}}$	$\frac{M_{test}}{M_1}$	$\frac{M_{test}}{M_2}$	$\frac{M_{test}}{M_3}$
	Acharya (1997)	1.03	1.15	1.24	1.04	0.32	0.16	0.22
Bernard (1993)	1.04	1.22	1.33	1.01	0.12	0.19	0.26	0.11
Cohen (1987)	1.14	1.12	1.15	1.02	0.09	0.12	0.13	0.10
Desmond (1977)	1.07	1.06	1.11	0.94	0.07	0.07	0.08	0.07
Ellifritt et. al. (1997)	0.78	0.89	0.97	0.81	0.10	0.11	0.13	0.10
Hoglund (1980)		1.06	1.06	0.99		0.13	0.12	0.09
Konig (1978)	1.01	1.18	1.26	0.96	0.23	0.33	0.35	0.18
LaBoube and Yu (1978)	1.02	1.14	1.14	1.04	0.08	0.12	0.13	0.10
Moreyra (1993)	0.82	0.96	0.96	0.88	0.09	0.10	0.10	0.09
Papazian (1994)	0.90	1.11	1.15	1.03	0.17	0.12	0.13	0.11
Phung and Yu (1978)		1.15	1.21	1.03		0.10	0.12	0.07
Rogers (1995)	1.01	1.15	1.22	1.05	0.12	0.11	0.17	0.08
Schardt and Schrade (1982)	1.05	1.15	1.17	1.03	0.10	0.07	0.09	0.07
Schuster (1992)	0.82	1.03	1.03	0.94	0.04	0.04	0.04	0.04
Shan (1994)	0.97	1.08	1.12	0.99	0.13	0.12	0.16	0.10
Willis and Wallace (1990)	1.00	1.07	1.08	0.98	0.07	0.07	0.07	0.07
Winter (1946)	1.10	1.84	1.84	1.54	0.08	0.32	0.32	0.21

7.3.6. RAZVOJ NOVIH I OPTIMALNIH POPREČNIH PRESEKA

DSM metoda je predviđena za korišćenje kod poprečnih preseka poznatog oblika, koji su prethodno eksperimentalno verifikovani. To znači da se za određene uslove geometrije i materijala poprečnog preseka, koristi verifikovan pristup DSM, koji je u stanju da aplicira izvedene ϕ faktore. S druge strane, ako karakteristike novih poprečnih preseka izlaze izvan predviđenih granica, koji se odnose na ispitane preseke, neophodno je koristiti u izvesnoj meri redukovani (više konzervativniji) faktor ϕ . Oni elementi nosećih struktura koji ispunjavaju postavljena ograničenja u skladu sa AISI S 100-2007 Appendix 1 [86], tretiraju se kao prethodno kvalifikovani članovi. Nasuprot njima se nalaze nekvalifikovani elementi koji su rezultat optimizacije i novih rešenja struktura.

Prethodno kvalifikovani elementi koriste faktore ϕ i Ω koji su dati u dodatku 1 (AISI S 100, Appendix 1). U suštini, prethodno kvalifikovani elementi (nosači i stubovi) predstavljaju rezime eksperimentalne baze podataka koja je upotrebljavana za verifikaciju DSM. Važno je napomenuti da je baza podataka koja se koristi u ovu svrhu veća od one koja se koristi u definisanju EWM pristupa. Limiti prethodno kvalifikovanih elemenata reprezentuju ograničenja dostupnih istraživanja i razvoja, ali ne predstavlja granice unutar kojih se može postići optimalno rešenje. Mnogi hladno-oblikovani poprečni preseki elemenata čeličnih struktura koji obezbeđuju veću nosivost u odnosu na istu masu (optimalni oblici) su izvan delokruga [86] i nisu unapred kvalifikovani za upotrebu od strane DSM.

U takvim slučajevima inženjerima se preporučuje korišćenje racionalne analize. Od posebnog interesa je mogućnost da se s malim brojem eksperimentalnih analiza proširi jedna od unapred kvalifikovanih metoda.

U tom smislu, broj uzoraka n , srednja normalizovana vrednost (odnos eksperimentalnih rezultata i procenjene vrednosti) koja je poznata kao profesionalni factor P_m , i koeficijent varijacije profesionalnog faktora v_m , su predstavljeni u tabeli 7.5. Ovi statistički podaci daju dodatne informacije kako se DSM implementira preko različitih tipova poprečnog preseka.

Tabela 7.5. Statistički pregled istraživanih preseka po DSM

	n	P_m	V_P
Nosači			
C profili	185	1.10	0.11
C profili sa ukrućenjem rebra	42	1.12	0.07
Z profili	48	1.13	0.13
HAT profili	186	1.10	0.15
Trapezni profili	98	1.01	0.13
ukupno nosača	559	1.09	0.12
Stubovi			
C profili	114	1.01	0.15
C profili sa ukrućenim rebrom	29	0.88	0.14
Z profili	85	0.96	0.13
RACK profili	17	1.02	0.05
HAT profili	4	0.98	0.02
ukupno stubova	249	0.98	0.14

Pouzdanost rezultata dobijena od strane DSM utvrđuje se na bazi ponašanja elemenata u oblasti graničnog stanja, preko LRFD (Load and Resistance Factor Design) koeficijenta. Poglavlje F standarda [86], daje formalne izraze za izvođenje faktora otpornosti ϕ , gde kapacitet (ϕR_n) mora biti veći od (γQ), tj. imamo:

$$\phi R_n > \sum_i \gamma_i Q_i \quad (7.25)$$

Faktori otpornosti ϕ za DSM i EWM su predstavljeni u tabeli 7.6, a određuje se prema [166]:

$$\phi = C_\phi e^{-\beta_o \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_P V_P^2 + V_Q^2}} \quad (7.26)$$

Gde je:

C_ϕ – kalibracioni koeficijent,

β_o – indeks ciljne pouzdanosti,

V_M – koeficijent varijacije materijala,

V_F – koeficijent varijacije izrade (fabrikacije),

C_P – korelacioni faktor,

V_P – koeficijent varijacije rezultata ispitivanja i

V_Q – koeficijent varijacije efekta opterećenja.

Tabela 7.6. Pouzdanost metoda za projektovanje [166]

Primenjeni standard - metoda	ϕ nosači	ϕ stubovi
AISI (1996) Specification Bazirano na DSM podacima Definisano sa [86]	0.77 0.90-0.95	0.82 0.85
AISI S100 (2007) - DSM Lokalno izvijanje Distorziono izvijanje Kombinovano Definisano sa AISI Appendix 1	0.89 0.93 0.92 0.90	0.79 0.90 0.85 0.85

7.4. METODA EFEKTIVNE POVRŠINE (EAM)

Metoda efektivne površine EAM je alternativa metode direktne otpornost DSM, prezentovane i predložene od strane Batista-e, kroz originalno istraživanje [115]. Batista et al. su ovu metodu primenili za analizu stabilnosti U i C profila [89]. Ovaj metod je predložen kako bih obuhvatio interaktivno ponašanje između lokalnog i globalnog izvijanja, koje je vrlo izraženo kod hladno-valjanih otvorenih tankozidnih elemenata.

Izvorna primena EAM tretira korišćenje softvera baziranog na metodi konačnih traka FSM, specijalno razvijenog za aplikaciju predložene procedure. Osim toga, ova metoda je kompatibilna za primenu i generalisane teorije nosača GBT, takođe, numeričke metode za identifikaciju kritičnih napona lokalnog i distorzionog izvijanja. U zavisnosti od toga koja od ove dve numeričke tehnike je primenjena za izradu softvera, razlikujemo: CUFSM i GBTUL. Bitno je naglasiti, da oba navedena softvera omogućavaju definisanje kritičnih napona izvijanja lokalnog, distorzionog i globalnog modaliteta, koji su neophodni u definisanju efektivne površine za slučaj primene kod EAM.

EAM na direktan način analizira efekat lokalnog izvijanja u cilju identifikacije kritične vrednosti elastičnog izvijanja, koristeći razvijene softvere za analizu stabilnosti (CUFSM i GBTUL). Na bazi toga, određuje se efektivna površina preseka A_{eff} , koja predstavlja redukovanu vrednost površine poprečnog preseka A , usled efekta lokalnog izvijanja. EAM podržava koncept efektivne odnosno redukovane geometrije poprečnog preseka, koji omogućava uspostavljanje veze između efektivne površine i efektivne širine. Time se ukazuje na međusobnu povezanost dve metode: EAM i EWM.

- *Globalno izvijanje*

$$N_{cR} = \chi A_{eff} f_y \quad (7.27)$$

$$\chi = \left(0.658^{\lambda_c^2}\right), \quad \text{ako je } \lambda_c \leq 1.5 \quad (7.28)$$

$$\chi = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right), \quad \text{ako je } \lambda_c > 1.5 \quad (7.29)$$

- Interakcija lokalnog i globalnog izvijanja

$$N_{cR} = \chi A_{eff} f_y \quad (7.30)$$

$$\lambda_c = \left(\frac{A_{eff} f_y}{N_g} \right)^{0.5} \Rightarrow \text{vrednost } \chi \text{ se određuje prema (7.28) i (7.29)} \quad (7.31)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_l} \right) \quad (7.32)$$

$$A_{eff} = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_p} \right) \left(\frac{A}{\lambda_p} \right) \leq A \quad (7.33)$$

7.5. METODA EFEKTIVNOG PRESEKA (ESM)

Metoda efektivnog preseka ESM predstavlja dodatak metode efektivne širine EWM, koja je predložena za hladno-oblikovane profile [167]. EAM je ustvari eksplicitna metoda, zbog toga što prati glavne principe podržane od strane formulacije direktne otpornosti (DSM). Osnovne osobine koje karakterišu ESM su:

- Lokalno izvijanje ploče uzima u razmatranje ponašanje celokupnog poprečnog preseka (nasuprot EWM pristupa gde se elementi poprečnog preseka odnosno ploče razmatraju izolovano),
- Krive strukturne otpornosti za stubove uključuju interakciju lokalno-globalnog izvijanja koje su predložene na bazi prethodne eksperimentalne kalibracije i
- Projektna pravila su formulisana na isti način kao kod DSM procedure.

U revidiranom sadržaju Brazilskog standard za projektovanje hladno-oblikovanih profila iz 2001. godine [88], razmatrane su različite metode projektovanja u cilju donošenja odluke o tome koja će od njih ostati, biti modifikovana, potisnuta ili predložena nova i uključena u noviju verziju propisa iz 2007. godine.

EWM i EAM su vremenom pretrpele rekalkibraciju na bazi pouzdanih eksperimentalnih vrednosti, dok se proširenje EAM koncepta odnosi na uključivanje izraza za analizu nosača. Rezultati ovih istraživanja, za EWM i EAM prezentovani su u [89]. Na osnovama ovih istraživanja zaključeno je da EAM:

- Pruža rezultate veće tačnosti,
- Sveobuhvatan postupak za potrebe projektovanja,
- Jednostavnija za primenu od EWM postupka, sa manje kompleksnijim jednačinama i
- Izbegava pojednostavljene odnosno aproksimativne modele.

Ove kvalitativne osobine su ustvari iste kao i kod svake projektne metode i bazirane su na principu direktne otpornost poput DSM. Proširenje EWM principa hladno-oblikovanih nosača dozvoljava propoziciju kompletnog niza jednačina za aplikaciju u pogledu projektovanja nosećih elemenata potpuno zamenjujući EWM. Otpornost tankozidnih nosača i stubova zavisi od napona na granici tečenja f_y , kao i relevantnih modova izvijanja: lokalnog, distorzionog i globalnog.

Stanje pre distorzionog izvijanja nije dovoljno istraženo, kao ni interakcija lokalno-globalnog izvijanja. Otpornost elemenata koji predlaže ESM pristup je analogan sa DSM i uključuje tri jednostavna koraka:

- Defnisanje efekta globalnog izvijanja,
- Nakon defnisanja lokalnog moda, uključuje se u interakciju sa globalnim izvijanjem i
- Procenjuje se granična nosivost.

Efekat globalnog izvijanja se tretira uz pomoć odgovarajućih krivi izvijanja za stubove i nosače, dok se učešće lokalnog izvijanja u otpornosti elemenata određuje prema Winter-ovoj formulaciji (7.9).

$$\frac{S_{eff}}{S} = \frac{1}{\lambda_p^{C_1}} - \frac{a}{\lambda_p^{C_2}} \leq 1 \quad (7.34)$$

Gde je:

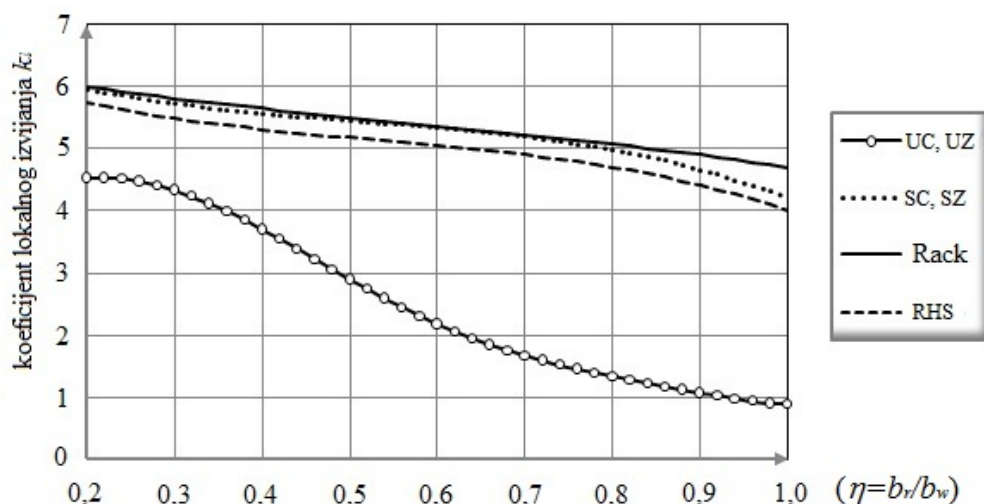
S – vrednost geometrijskih svojstava aktuelnog poprečnog preseka (A ili W) i
 a , C_1 i C_2 – imperfekcioni faktori definisani eksperimentalnom kalibracijom.

ESM je baziran na realnom ponašanju tankozidnih preseka i predstavlja značajno poboljšanje u odnspsu na EWM. U cilju što korisnije inženjerske aplikacije i izbegavanja za nahnadnim kompjuterskim analizama, odgovarajući kritični naponi elastičnog lokalnog izvijanja pod dejstvom kompresionog opterećenja odnosno momenta savijanja su dati sa:

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} A \quad (7.35)$$

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} W \quad (7.36)$$

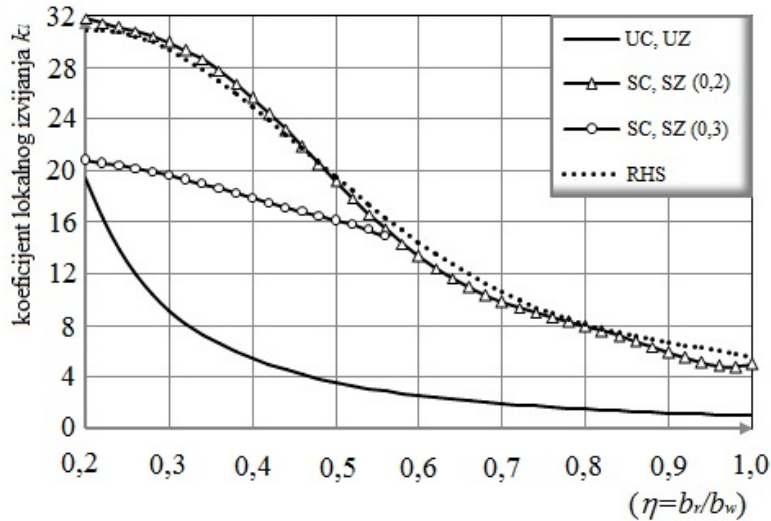
Koeficijenti lokalnog izvijanja k_l za različite tipove preseka i njihove geometrijske karakteristike su dijagramski prikazani na slikama 7.11 ÷ 7.13. Matematički izrazi koji definišu ovaj koeficijent lokalnog izvijanja k_l su dati u Prilogu 8.



Slika 7.11. Uporedna analiza koeficijenata lokalnog izvijanja za pritisnute profile

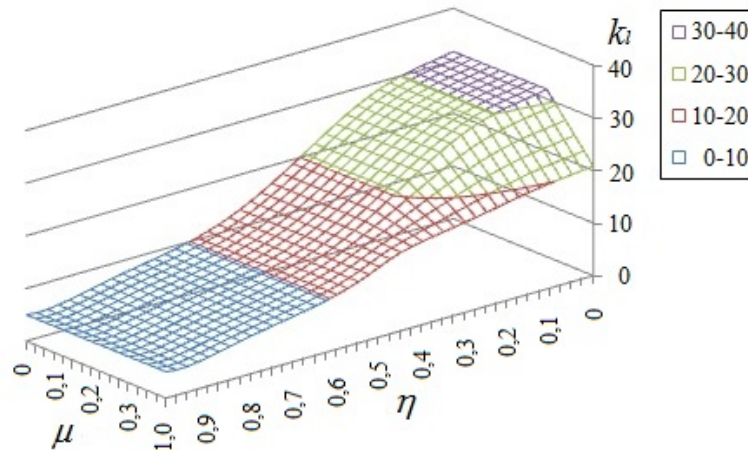
Ove jednačine su analogne sa naponom iz klasične teorije ploča i obuhvataju sledeće parametre:

- ✧ Elastične osobine materijala (E i ν),
- ✧ Oblik elastično izvijene ploče je sinusoidalnog oblika,
- ✧ Vitkost elemenata (ploča) poprečnog preseka je definisana odnosom njihove širine i debljine (b_w/t) i
- ✧ Oblik poprečnog preseka i uslove opterećenja (aksijalni pritisak ili moment savijanja) preko kojih se manifestuje koeficijent lokalnog izvijanja k_l .



Slika 7.12. Uporedna analiza koeficijenta lokalnog izvijanja za fleksione profile

Da bi analizu lokalnog izvijanja dala validne rezultate, neophodno je razmatrati duže elemente ($L \gg b$) koji su na svojim krajevima slobodno oslonjeni. Isti pristup se primenjuje i kod distorzionog izvijanja, pri čemu konturni uslovi ne utiču na lokalizovano ponašanje ovih modaliteta izvijanja, a sa druge strane, omogućavaju lakše dobijanje rešenja. To nije slučaj sa globalnim izvijanjem, gde konturni uslovi na krajevima elemenata, imaju veliki uticaj na ponašanje ovog modaliteta.



Slika 7.13. Dvoparameterska zavisnost koeficijenta lokalnog izvijanja k_l

7.5.1. IMPLEMENTACIJA ESM PRISTUPA

U prethodno iznetom izlaganju konstatovano je da izvijanje može nastati ne samo kod čisto pritisnutih elemenata odnosno stubova, već i kod nosača, tj. elementa izloženih savijanju. Pritisnute zone nosača su izložene izvijanju, dok se zone zatezanja suprotstavlja gubitku stabilnosti kompresione zone. Zato će se u daljem, definisati parcijalni izrazi koji odgovaraju ovim nosećim elementima odnosno stubovima i nosačima.

Hladno – oblikovani stubovi

Projektovana vrednost kompresione otpornost stuba N_{crd} koja je data sa (7.42), definisana je u funkciji redukovane efektivne površine A_{eff} , na isti način kao kod EWM. Efektivna površina A_{eff} se određuje pomoću (7.41) i potiče iz prethodno kalibrisanih izraza predloženih u okviru DSM odnosno izloženih u [86]. Originalan EAM pristup je bazirana na korišćenju Witer-ove jednačine [85], gde se umesto stvarne širine elemenata preseka b i površine poprečnog preseka A_b koriste redukovane odnosno efektivne vrednosti b_{eff} i A_{eff} , respektivno.

Rekalibracijom EAM novijeg datuma [119] ukazuje da (7.42) obezbeđuje bolje slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Granična otpornost stubova, prema ESM je definisana sa (7.37-7.42). ESM spada u metode direktnog pristupa, što podrazumeva razmatranje lokalnog izvijanja ploča iz kojih je formiran poprečni presek, uključujući njihov međusobni uticaj (interakcijsko ponašanje elemenata preseka). Vitkost ovih elemenata definiše se preko λ_p (7.40) na bazi kritičnog napona elastičnog izvijanja N_l (7.35).

- *Globalno izvijanje*

$$\lambda_c = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0.5} \quad (7.37)$$

$$\chi = \left(0.658^{\lambda_c^2} \right), \quad \text{ako je } \lambda_c \leq 1.5 \quad (7.38)$$

$$\chi = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right), \quad \text{ako je } \lambda_c > 1.5 \quad (7.39)$$

- *Interakcija lokalnog i globalnog izvijanja*

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi Af_y}{N_l} \right) \quad (7.40)$$

$$A_{eff} = A \left(1 - \frac{0.15}{\lambda_p^{0.8}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_p^{0.8}} \right) \leq A \quad (7.41)$$

$$N_{cR} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma} \quad (7.42)$$

Hladno – oblikovani nosači

Izrazi ESM pristupa za nosače su analogni sa prethodnim rešenjem koje se odnosi na stubove, s tim što umesto efektivne površine A_{eff} i aksijalnog pritisknog opterećenja lokalnog izvijanja N_l , treba koristiti efektivni fleksioni modul poprečnog preseka W_{eff} i moment savijanja lokalnog izvijanja M_l . Poslednja vrednost (M_l) može se odrediti nekom od numeričkih postupaka (FSM i GBT) ili primenom analitičkog izraza (7.36). ESM za nosače je implementiran u kombinaciji sa krivom otpornosti bočno-torzionog izvijanja, predložene u Appendix 1 AISI propisa [86].

Efekat lokalnog izvijanja usled savijanja, prezentovan u okviru ESM je bazirana na originalnoj Winter-ovoj jednačini koja je dobijena adaptacijom efektivnog fleksionog modula W_{eff} (7.48). ESM formulacija je, shodno iznetom, proširenija verzija EWM postupka, koja uzima u obzir efekat lokalnog izvijanja ploča poprečnog preseka pod dejstvom momenta savijanja, sledeći isti princip razvoja kao kod stubova. Jednačine kojima se vrši procena stabilnosti i interakcijsko ponašanje lokalno-globalnog modaliteta izvijanja su date sa (7.43 ÷ 7.49).

- *Globalno izvijanje*

$$\lambda_M = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0.5} \tag{7.43}$$

$$\chi_{LT} = 1.0, \quad \text{ako je } \lambda_M \leq 0.6 \tag{7.44}$$

$$\chi_{LT} = 1.11(1 - 0.278\lambda_M^2), \quad \text{ako je } 0.6 < \lambda_c < 1.34 \tag{7.45}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\lambda_M^2}, \quad \text{ako je } \lambda_M \geq 1.34 \tag{7.46}$$

- *Interakcija lokalnog i globalnog izvijanja*

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{LT} W f_y}{M_l} \right) \tag{7.47}$$

$$W_{eff} = W \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_p} \right) \left(\frac{1}{\lambda_p} \right) \leq W \tag{7.48}$$

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{LT} W_{eff} f_y}{\gamma} \tag{7.49}$$

Osnovna prednost ESM u odnosu na EWM pristup, ogleda se u racionalnijoj i tačnijoj analizi stubova i nosača podložnih izvijanju.

7.5.2. KALIBRACIJA METODE EFEKTIVNOG PRESEKA

Statistička verifikacija odnosa teorijski procenjenih i eksperimentalno dobijenih vrednosti ima za cilj da ukaže na performanse ESM procedure, preko parcijalnog koeficijenta otpornosti γ . Komparaciona analiza ESM procedure sa rezultatim koje daje EWM, podrazumeva poređenje jednačina (7.37 ÷ 7.42) za stubove odnosno (7.43 ÷ 7.49) za nosače, sa izrazima zasnovanim na primeni AISI NAS [86]. Treba napomenuti, da je i Brazilski kod [88] zasnovan na primeni EWM, ali uz korekciju koja podrazumeva dvostepenu proceduru [89]. Dvostepena procedura uključuje dodatnu korekciju vitkosti λ_c , zamenjujući bruto poprečni presek A sa efektivnom površinom A_{eff} , u pogledu određivanja kompresione otpornosti N_{crd} .

Pristup sa dvostepenom procedurom, iako uzima u obzir nelinearnu lokalno-globalnu interakciju, nije dovoljno pouzdan, naročito kada se radi o vrlo vitkim elementima, prema analizi datoj u [89]. Rezultati komparacione analize između teorijskih i eksperimentalnih vrednosti kompresione odnosno fleksione otpornosti hladno-oblikovani stubova odnosno nosača su analizirani uz pomoć statističkih vrednosti: srednje vrednosti M , standardne devijacije SD i koeficijenta varijacije V_p . Na osnovu ovih vrednosti definiše se parcijalni faktor otpornosti γ (7.50), što je u skladu sa Brazilskim kodom [88] i AISI propisom [86]. Svaki odnos eksperimentalnih i teorijskih vrednosti (N_{exp}/N_{th} odnosno M_{exp}/M_{th}), sa devijacijom većom od 15 % u odnosu na srednju vrednost, mora biti odbačen. Parcijalni koeficijent otpornosti γ se definiše sa:

$$\gamma = \left(\frac{1}{1.15} \right) X_M X_F X_P e^{-\beta_o \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_P V_P^2 + 0.044}} \quad (7.50)$$

Gde je:

X_M – srednja vrednost materijala (=1.1),

X_F – srednja vrednost uticaja izrade odnosno fabrikacije (=1.0),

X_P – srednja vrednost profesionalnog faktora (=1.0),

V_M – koeficijent varijacije materijala (= 0.10),

V_F – koeficijent varijacije izrade odnosno fabrikacije (=0.05),

C_P – korelacioni faktor (u skladu sa brojem ispitivanja),

V_P – koeficijent varijacije rezultata ispitivanja (ne sme biti manji od 6.5 %) i

β_o – indeks pouzdanosti (=2.5).

Uobičajeno je da se kalibrisani teorijski rezultati za hladno-oblikovane stubove i nosače porede sa eksperimentalnim vrednostima u odnosu na opterećenje N_y ($= Af_y$), koje odgovara naponu na granici tečenja f_y . Rezultati prezentovani u parametarskom obliku N_{exp}/N_y i N_{th}/N_y , na primeru C i Z profila, analizirani su u [116]. Komparacioni dijagrami za razmatrane profile su formirani na osnovu teorijskih vrednosti dobijenih EWM i ESM pristupom.

Što se tiče stubova, konstantovano je da EWM nije u mogućnosti da tretira zajedno dva različita oblika (C i Z profil), već je potrebno da se sprovede zasebna kalibracija rezultata za svaki skup analiziranih profila. Osim toga, ESM ne zahteva nezavisnu kalibraciju rezultata za prethodno pomenute profile, a odlikuje se harmonizovanim odnosom između teorijski dobijenih i eksperimentalnih vrednosti, što daje prednost ovoj metodi u odnosu na EWM.

8. IDENTIFIKACIJA PARAMETARA NAPREZANJA PERFORIRANIH PRITISNUTIH PLOČA

Tankozidne ploče su osnovne komponente velikog broja savremenih nosećih struktura otvorenog i zatvorenog tipa odnosno profilisanih i sandučastih nosača koji nalaze primenu u izgradnji mostova, aviona, plovila i drugih odgovornih objekata. Kod takvih struktura se vrlo često ugrađuju pločasti elementi neuniformne geometrije, što podrazumeva varijaciju debljine i postojanje otvora različitog oblika. Zahtevi za primenom ploča sa perforiranim otvorima i stepenasto promenljivom debljinom proističu iz funkcionalnih, montažnih, servisno-kontrolnih i dr. uslova, a često su rezultat minimizacije mase radi postizanja ekonomskog efekat u postupku optimalnog projektovanja konstrukcija. Matematička identifikacija fenomena stabilnosti ploča i generalno nosača odnosno stubova kao njihovih komponenata zasnovana je na primeni metoda Kantorovich i Ritz.

Prva metoda zasnovana je na rešavanju parcijalne diferencijalne jednačine četvrtog reda, a izvedena je iz uslova ravnoteže tanke ploče konstantne geometrije. Druga metoda je bazirana na principu minimum totalne potencijalne energije koji obezbeđuje stanje stabilne ravnoteže ploče. Teorijske osnove za obe metode, sistematski su izložene u [82,83,168]. Problematika stabilnosti tankozidnih elemenata zauzima značajno mesto u procesu projektovanja nosećih konstrukcija [169]. Kod ploča konstantne debljine uticajne parametre stabilnosti obuhvataju geometrijske veličine, uslove oslanjanja i opterećenja [170-172], dok na stabilnost elementa sa otvorom pored navedenih karakteristika utiču oblik, veličinu i položaj otvora [173-174]. Analize ploča konstantne geometrije pokazuju da uslovi oslanjanja u velikoj meri utiču na stabilnost [172]. Pored toga, ugradnja ukrućenja je način da se utiče na povećanje stabilnosti ploče [175-178]. Od posebnog interesa su istraživanja ploča sa otvorima i/ili stepenasto promenljive debljine kao sastavnih elemenata nosača [179-189].

Razvoj kompjuterske tehnike zasnovanog na primeni metode konačnih elemenata (FEM) omogućio je istraživačima da u poslednjih desetak godina daju značajan doprinos ovom fenomenu [190-191]. Istraživanja [183,187] ukazuje da postojanje otvora dovodi do redukcije koeficijenta izvijanja za određenu vrednost, koji zavisi isključivo od oblika, veličine i položaja otvora. Ovoj činjenici treba dodati da je međusobno rastojanje otvora kod perforiranih ploča takođe parametar koji u interakciji sa drugima utiče na vrednost kritičnog napona izbočavanja. Zbog kompleksnosti matematičkog modela između koeficijenta izvijanja odnosno minimalne vrednosti kritičnog napona izvijanja i karakterističnih parametara otvora, istraživači su se uglavnom zadržali na poluanalitičkim aproksimativnim, numeričkim metodama i eksperimentalno dobijenim izrazima.

8.1. ANALIZA I FORMULACIJA PROBLEMA

Znatan broj istraživača je razmatrao fenomen linearnog odnosno elastičnog izbočavanja ploča ukazujući na značaj takve analize u projektovanju struktura. Od posebnog značaja su istraživanja pločastih elemenata nosača odnosno stubova sa perforiranim otvorima koja se realizuju uz korišćenje metode konačnih elemenata, metode konačnih traka [191-193] i eksperimentalnim ispitivanjem. Usled geometrijske i naponske kompleksnosti proučavanje takvih problema matematičkim putem usmereno je ka parcijalnoj analizi pojedinih komponenata. Izvesan broj istraživača analizu elastičnog izvijanja ploča zasnovalo je na primeni von Karman-ove teorije bazirane na parcijalnoj diferencijalnoj jednačini četvrtog reda [168, 169, 194].

$$\nabla^4 w = -\frac{1}{D} \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (8.1)$$

Funkcija ugiba zavisi od tipa opterećenja kao i od konturnih uslova i predstavljena je kao linearna kombinacija trigonometrijskih i hiperboličkih funkcija. Kako su analizirane ploče idealno ravne geometrije bez poprečnog opterećenja i početne krivine, integracione konstante koje definišu konturni uslovi ostaju neodređene. U tom slučaju, funkcija ugiba sa neodređenim koeficijentima se može koristiti samo za određivanje koeficijenta izvijanja. Pod dejstvom pritisnog opterećenja, ploča je u položaju stabilne ravnoteže sve do postizanja kritičnog intenziteta kada naglo gubi stabilnost i dolazi do loma. Ova situacija je posledica idealizacije početnog stanja geometrije ploče. Primena ove metode se ograničava na ploče konstantne debljine.

Brojna istraživanja linearnog izvijanja ploča, naročito ona koja su zasnovana na matematičkim modelima, odnose se samo na problem uniformnih ploča. Predmet istraživanja su ploče konstantne ili promenljive debljine u jednom ili oba pravca pod dejstvom kombinovanog ravanskog opterećenja. Analitičko rešenje za pritisnitu ploču promenljive debljine sastavljenu od dva segmenta iste dužine je dato u [170]. Energetska metoda zasnovana na Rayleigh–Ritz principu je primenjena za analizu ukrućenog panela [194-195]. Složeniji slučajevi, gde su ploče stepenasto promenljive debljine u dva upravna pravca razmatrano je metodom konačnih razlika [171].

Tankozidni elementi su potencijalno kritična mesta struktura zbog interaktivnog uticaja ravnog stanja napona sa fenomenom elastičnog izvijanja. Postojanje otvora na takvim elementima, praćeno koncentracijom napona, generalno umanjuje njihovu otpornost na izvijanje. Elastično izvijanje predstavlja prvi korak u analizi stabilnosti konstrukcija. Mere preduzete za povećane kritičnog napona elastičnog izvijanja povoljno utiču na ponašanje u zoni neelastičnog izvijanja i mehanizam graničnog stanja.

Predmet razmatranja u ovom poglavlju je slobodno oslonjena jednoosno opterećena pravougaona ploča sa otvorima kvadratnog, pravougaonog i kružnog oblika kao i otvora sa prorezom. Elastično izvijanje ploče sa tako definisanom geometrijom i uslovima oslanjanja odnosno opterećenja modelira se sa aspekta energetske metode (detaljne informacije date su u poglavlju 8.2). Matematički model se formira na osnovu principa minimum ukupne energije ploče koji obezbeđuje stanje stabilne ravnoteže. Model elastičnog izvijanja ploče sa otvorom je čvrsto spregnut sa modelom ravnog stanja razmatranog elementa. Cilj autora je da izloženim pristupom verifikuju postojeće i upotpune rezultate u oblasti elastičnog izvijanja ploča sa otvorom različitog oblika. Analiza zasnovana na fizičkim odnosno matematičkom modelu daje mogućnost egzaktno identifikacije mehanizma elastične stabilnosti.

8.2. MATEMATIČKI MODEL IZVIJANJA PLOČE

Izložen pristup baziran na analitičkom rešenju zahteva formiranje matematičkog modela prema definisanim fizičkim uslovima oslanjanja i opterećenja. Pored modela elastične stabilnosti, neophodno je formirati i model ravnog stanja napona ploče sa pravougaonim otvorom. U okviru ovoga poglavlja, istraživanje je usmereno na analizu ploča sa otvorima različitog oblika u domenu elastičnog ponašanja materijala. Noseće strukture su formirane od ploča različite geometrije međusobno spojene u funkcionalnu celinu. Model formiran na bazi sistema ploča daje realnu sliku o ponašanju celog poprečnog preseka nosača. Takav pristup rešavanja bio je izložen u [196], gde je analiziran problem statičke nosivosti sandučastog nosača izloženog delimično poprečnim opterećenjem. Parcijalna analiza stabilnosti nosača obuhvata nezavisno razmatranje pojedinih ploča, što znatno uprošćava matematički model, koji će biti prezentovan u ovom poglavlju.

8.2.1. OSNOVNE POSTAVKE PROBLEMA IZVIJANJA

Matematički model je zasnovan na primeni energetske metode koristeći ukupnu potencijalnu energiju ploče [168-169]. Poprečne i ravanske sile predstavljaju poznato spoljašnje opterećenje čije se dejstvo manifestuje preko spoljašnjeg rada E_w koji dovodi do deformacije ploče. Kao posledicu spoljašnjeg opterećenja imamo pojavu deformacione energije E_I , koja se manifestuje kroz proces savijanja i torzije indukujući pritom dodatne ravanske sile usled postojanja veza oslonaca ploče (ako postoje). Poprečno opterećenje utiče na savijanje ploče, dok ravanske sile u zavisnosti da li su pritisne ili zatežuće utiču na povećanje odnosno smanjenje ugiba ploče. Postojanje početne krivine je ekvivalentno postojanju fiktivnog poprečnog opterećenja [168].

Matematički model je formiran prema sledećim pretpostavkama:

- Razmatrane ploče si idelane geometrije (bez izražene vitoperosti),
- Ponašanje izotropnih ploča je u domenu elastične stabilnosti,
- Zanemaren je uticaj oslonaca na indukovanje sila u ravni ploče i
- Eliminisan je uticaj spoljašnjeg poprečnog opterećenja.

Generalno, energetski bilans ploče, koja se nalazi u stanju stabilne ravnoteže glasi:

$$E_w = E_I \quad (8.2)$$

Rad spoljašnjih sila E_w definisan je izrazom:

$$E_w = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy - \int_0^a \int_0^b w q dx dy \quad (8.3)$$

Unutrašnja deformaciona energija E_I je oblika:

$$E_I = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (8.4)$$

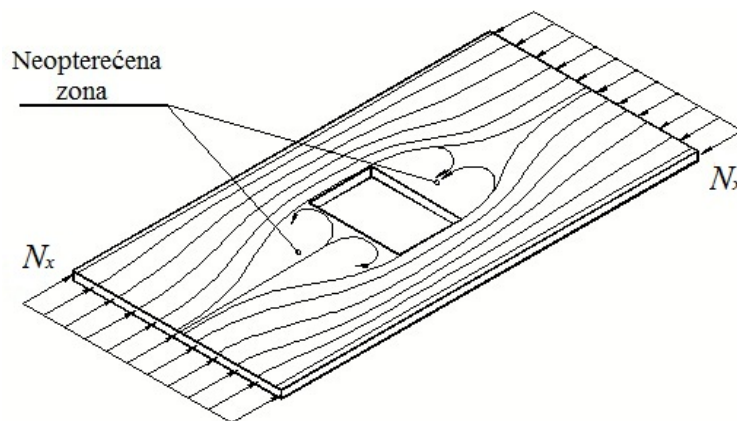
Da bi razmatrana ploča bila u položaju stabilne ravnoteže potreban i dovoljan uslov je da ukupna energija E ima minimum. Ukupna energija ploče, čije su komponente date sa (8.3 i 8.4), a saglasno sa [168-169] je oblika:

$$\begin{aligned}
 E &= E_w + E_l = \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy + \\
 &+ \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy - \int_0^a \int_0^b w q dx dy
 \end{aligned} \tag{8.5}$$

Prvi član se odnosi na deformacionu energiju odnosno rad koji vrše sile delujući u ravni ploče. Ako je indukovanje ovih sila posledica konturnih uslova odnosno ograničenja ploče, njihovo dejstvo je pasivnog karaktera i manifestuje se kroz smanjenje ugiba, a time i deformacione energije ploče. Takav primer imamo kod ograničeno oslonjenih ploča, tj. ploča oslonjenih na fiksne oslonce koji sprečavaju istežanje usled ugiba ploče. Pojava pasivnih ravanskih sila uvek je vezan za fenomen deformacione odnosno unutrašnje energije i karakteristika je geometrije, materijala i konturnih uslova ploče. Nasuprot ovome, ako je ploča izložena spoljašnjem ravanskom opterećenju tada je njihovo dejstvo aktivno, jer inicira naprezanje dok se energija sa kojom raspolažu klasifikuje kao spoljašnji rad.

8.2.2. DEFINISANJE RAVNOG STANJA NAPONA

Za određivanje rada koji izvrše ravanske pritisne sile prema (8.3) neophodno je poznavati njihove raspodele po celoj površini ploče. Kada je ploča konstantne debljine, bez postojanja otvora, tada je raspodela ovih sila uniformna pa je takav slučaj opterećenja i najjednostavniji za proučavanje stabilnosti. U slučaju kada na ploči postoje otvori i/ili stepenasto promenljive debljine, bez obzira što su ivice ploče izložene konstantnom ravanskom opterećenju, dolazi do preraspodele tih sila u izrazito neuniformne funkcije. Ovaj fenomen se objašnjava postojanjem diskontinualnih promena preko kojih se ne može preneti opterećenje, već se ono preusmerava na ostale oblasti ploče koje predstavljaju “uska grla” u prenosu opterećenja. To su najčešće zone iznad i ispod otvora u čijoj neposrednoj blizini dolazi do koncentrisanja opterećenja, dok se ispred i iza ploče gustina strujnica opterećenja smanjuje (Slika 8.1).

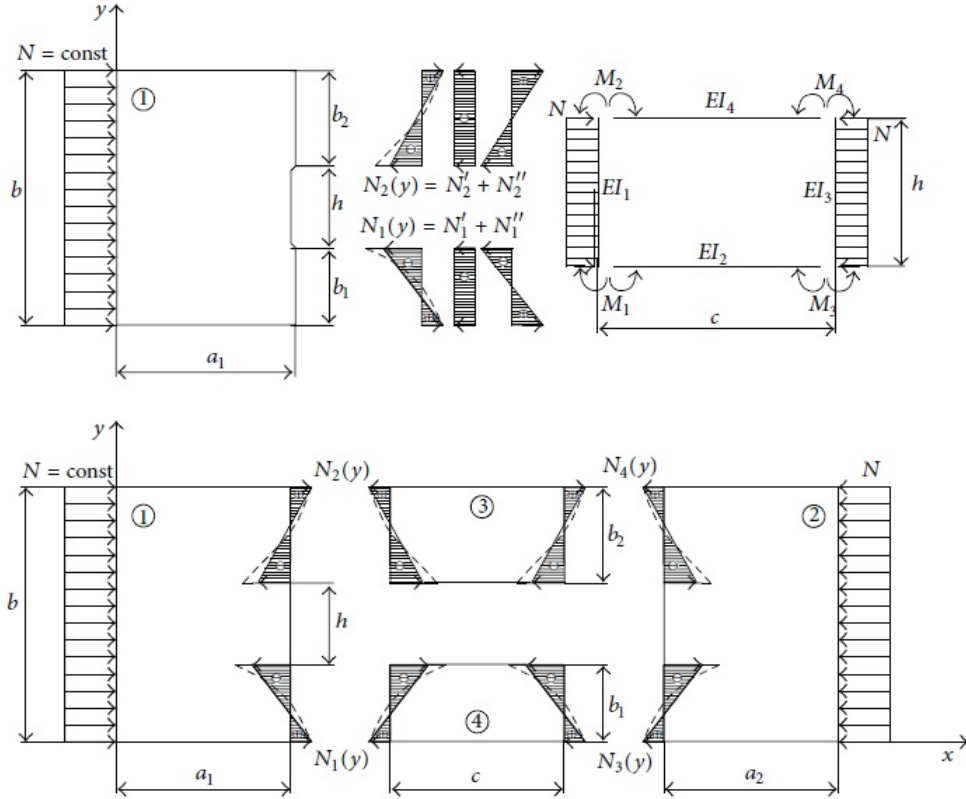


Slika 8.1. Preraspodela naponskog toka ploče sa otvorom

Model ravnog stanja ploče sa pravougaonim otvorom je formiran pod sledećim uslovima:

- Na mestu rastavljana elemenata ploče raspodela opterećenja je linearizovana i
- Zanemareno je dejstvo transverzalnih sila duž linije spajanja elemenata ploče.

Opravdanje uvedenih pretpostavki ogleda se u činjenici da uvedena linearizovana funkcija sile N_x ima istu srednju vrednost kao i realna raspodela, tako da je razlika spoljašnjeg rada mala veličina u odnosu na rad realnog opterećenja (Slika 8.2). Spoljašnje smičuće sile ne deluju na ploču, pa je indukovana deformaciona energija usled napona smicanja mala veličina u odnosu na normalne napone.



Slika 8.2. Model ravnog stanja napona ploče sa pravougaonim otvorom

Komponentne reakcijske sile $N_1'(y)$ i $N_2'(y)$ koje su definisane sa (8.6) i (8.7) određuju se iz uslova ravnoteže elementa "1" ploče.

$$N_1'(y) = \frac{b}{b_1} \frac{b-b_2}{2b-b_1-b_2} N = f_1 N, \quad 0 \leq y \leq b_1 \quad (8.6)$$

$$N_2'(y) = \frac{b}{b_2} \frac{b-b_1}{2b-b_1-b_2} N = f_2 N, \quad (b-b_2) \leq y \leq b \quad (8.7)$$

Elastičnost ploče utiče na indukovanje dodatnih reakcija elementa "1" koje se manifestuju kroz momente (8.8)-(8.11) odnosno linearно promenljive sile (8.12) i (8.13).

$$M_1 = \frac{s_2 e_2 + s_4 e_1}{s_2 s_3 - s_1 s_4} N = g_1 N \quad (8.8)$$

$$M_2 = \left(\frac{e_1}{s_2} + \frac{s_1}{s_2} \frac{s_2 e_2 + s_4 e_1}{s_2 s_3 - s_1 s_4} \right) N = g_2 N \quad (8.9)$$

$$M_3 = \left[\frac{t_1}{r_3} - \frac{r_2}{r_3} \frac{e_1}{s_2} - \frac{s_2 e_2 + s_4 e_1}{s_2 s_3 - s_1 s_4} \left(\frac{s_1}{s_2} \frac{r_2}{r_3} + \frac{r_1}{r_3} \right) \right] N = g_3 N \quad (8.10)$$

$$M_4 = \left[\frac{t_1}{r_6} - \frac{r_8}{r_6} \frac{e_1}{s_2} - \frac{s_2 e_2 + s_4 e_1}{s_2 s_3 - s_1 s_4} \left(\frac{s_1}{s_2} \frac{r_8}{r_6} + \frac{r_2}{r_6} \right) \right] N = g_4 N \quad (8.11)$$

Koeficijenti $r_{1...8}$, $s_{1...4}$, $e_{1...2}$, $t_{1...2}$ su definisani u Prilogu 9a.

Raspodela linearno promenljivih sila, uzrokovane dejstvom memenata elastičnog uklještenja, date su sa:

$$N_1''(y) = \left(\frac{2y}{b_1} - 1 \right) \frac{2M_1}{b_1} = f_1 N, \quad 0 \leq x \leq b_1 \quad (8.12)$$

$$N_1''(y) = \left(\frac{2(b-y)}{b_2} - 1 \right) \frac{2M_2}{b_2}, \quad (b-b_2) \leq x \leq b \quad (8.13)$$

Raspodela reakcijskih sila (8.6), (8.7), (8.12) i (8.13) duž strane $x=a_1$ je stepenasto promenljiva, što znači da na delu $b_1 < y < (b_1+h)$ ne deluje opterećenje. Razvijanjem u jednostruki trigonometrijski red i njihovim sabiranjem dolazi se do jedinstvene funkcije (8.16) koja određuje uslove na ivici $x=a_1$ segmenta "1" razmatrane ploče.

$$N_1(x=a_1, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4f_1 N}{n\pi} \sin \frac{n\pi b_1}{2b} \sin \frac{n\pi b_1}{2b} - \frac{8g_1 N}{n^2 \pi^2 b_1^2} \cos \frac{n\pi}{2} \left(n\pi \cos \frac{n\pi b_1}{2b} - 2 \frac{b}{b_1} \sin \frac{n\pi b_1}{2b} \right) \right] \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.14)$$

$$= N \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$N_2(x=a_1, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4f_2 N}{n\pi} \sin \frac{n\pi(2b-b_2)}{2b} \sin \frac{n\pi b_2}{2b} + \frac{8g_2 N}{n^2 \pi^2 b_2^2} \cos \frac{n\pi(2b-b_2)}{2b} \left(n\pi \cos \frac{n\pi b_2}{2b} - 2 \frac{b}{b_2} \sin \frac{n\pi b_2}{2b} \right) \right] \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.15)$$

$$= N \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$N(x=a_1, y) = N_1(x=a_1, y) + N_2(x=a_1, y) = N \sum_{n=1}^{\infty} (P_n + Q_n) \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.16)$$

Za definisanje ravanskog stanja napona ploče primenjuje se Airy-eva funkcija napona koja je oblika:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad (8.17)$$

Funkcija koja zadovoljava (8.17) predstavlja se trigonometrijskom redom:

$$U(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{aligned} & A_n \sinh \frac{n\pi x}{b} + B_n \left(\frac{n\pi x}{b} \right) \sinh \frac{n\pi x}{b} + \\ & + C_n \cosh \frac{n\pi x}{b} + D_n \left(\frac{n\pi x}{b} \right) \cosh \frac{n\pi x}{b} \end{aligned} \right] \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.18)$$

Ravanske sile N_x i N_{xy} se definiše preko komponentnih napona σ_x i σ_{xy} , koje su formulisane sa (8.19) i (8.20).

$$N_x = \frac{\sigma_x}{\delta} = \frac{1}{\delta} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\pi^2}{8b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{aligned} & n^2 \left[A_n \sinh \frac{n\pi x}{b} + B_n \left(2 \cosh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \sinh \frac{n\pi x}{b} \right) + \right. \\ & \left. C_n \cosh \frac{n\pi x}{b} + D_n \left(2 \sinh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \cosh \frac{n\pi x}{b} \right) \right] \right] \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.19)$$

$$N_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\delta} = -\frac{1}{\delta} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} =$$

$$= -\frac{\pi^2}{\delta b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ n^2 \left[\begin{array}{l} A_n \cosh \frac{n\pi x}{b} + B_n \left(\sinh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \cosh \frac{n\pi x}{b} \right) + \\ C_n \sinh \frac{n\pi x}{b} + D_n \left(\cosh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \sinh \frac{n\pi x}{b} \right) \end{array} \right] \right\} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (8.20)$$

Integracione konstante A_n, B_n, C_n, D_n se određuju iz konturnih uslova koji glase:

$$1) N_x = N = \frac{2N}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (1 - \cos n\pi) \sin \frac{n\pi y}{b} = const, \quad N_{xy} = 0 \quad za \quad x = 0 \quad (8.21)$$

$$2) N_x = N \sum_{n=1}^{\infty} (P_n + Q_n) \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad N_{xy} = 0 \quad za \quad x = a_1 \quad (8.22)$$

Smenom (8.21) i (8.22) u (8.19) i (8.20) nalaze se koeficijenti definisani sa (8.23) - (8.26).

$$A_n = A'_n N \quad (8.23)$$

$$B_n = B'_n N \quad (8.24)$$

$$C_n = C'_n N \quad (8.25)$$

$$D_n = D'_n N \quad (8.26)$$

gde je:

$$\alpha_n = \frac{n\pi a_1}{b} \quad (8.27)$$

Koeficijenti A'_n, B'_n, C'_n i D'_n su dati u Prilogu 9b.

Koeficijenti dati sa (8.23) - (8.26) su izvedeni za element "1", a za njihovu primenu na element "2" neophodno je faktor α_n korigovati za odnos a_1/a_2 , pa je tada njegova vrednost $\alpha_n = n\pi a_2/b$. Ako je otvor necentričan duž x ose, tj. ako je centar otvora bliži jednoj od stranica $x=0$ ili $x=b$, tada su elementi "1" i "2" ploče međusobno različiti što se manifestuje kroz koeficijent α_n . Specijalno, kada je otvor centričan imamo $\alpha_n = n\pi a/2b$.

8.2.3. KOEFICIJENT IZVIJANJA I KRITIČNI NAPON

Analiza elastičnog izbočavanja perforirane ploče energetskom metodom prezentuje se na primeru slobodno oslonjene ploče idealno ravne geometrije i bez dejstva poprečnog opterećenja, uz konstataciju da time nije umanjena opštost izložene metodologije. Ugib se pretpostavlja trigonometrijskim redom (8.28), koji zadovoljava konturne uslove slobodno oslonjene ploče.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (8.28)$$

Rad koji vrši jednoosno aksijalno promenljivo opterećenje N_x dejstvujući na ploču sa pravougaonim otvorom je:

$$\begin{aligned}
 E_w &= \frac{1}{2} \int_A N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dA = \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{a_1} \int_0^b N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy + \frac{1}{2} \int_{a_2}^a \int_0^b N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy + \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{a_1}^{a_2} \int_0^{b_1} N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy + \frac{1}{2} \int_{a_1}^{a_2} \int_{b_1}^b N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy
 \end{aligned} \tag{8.29}$$

Ukupni spoljašnji rad se određuje preko komponentata koje odgovaraju elementima "1-4" ploče, prema slici 8.2.

$$\begin{aligned}
 E_{w,1} &= \frac{1}{2} \int_0^{a_1} \int_0^b N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{1}{2} \frac{\pi^4 m^2 n^2}{a^2 b^2 \delta} A_{mn}^2 (A_n I_{mn} + B_n J_{mn} + C_n K_{mn} + D_n L_{mn}) \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\pi^4 m^2 n^2}{a^2 b^2 \delta} A_{mn}^2 (A_n' I_{mn} + B_n' J_{mn} + C_n' K_{mn} + D_n' L_{mn}) N \\
 &= \varepsilon_{mn} A_{mn}^2 N
 \end{aligned} \tag{8.30}$$

$$\begin{aligned}
 E_{w,2} &= \frac{1}{2} \int_{a-a_2}^a \int_0^b N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{1}{2} \frac{\pi^4 m^2 n^2}{a^2 b^2 \delta} A_{mn}^2 (E_n V_{mn} + F_n W_{mn} + G_n R_{mn} + H_n T_{mn}) \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\pi^4 m^2 n^2}{a^2 b^2 \delta} A_{mn}^2 (E_n' V_{mn} + F_n' W_{mn} + G_n' R_{mn} + H_n' T_{mn}) N \\
 &= \rho_{mn} A_{mn}^2 N
 \end{aligned} \tag{8.31}$$

Integralne forme date preko koeficijenata I_{mn} , J_{mn} , K_{mn} , L_{mn} koji odgovaraju elementu "1" odnosno preko koeficijenta V_{mn} , W_{mn} , R_{mn} , T_{mn} koji pripadaju elementu "2" formulisane su u Prilogu 9c.

$$\begin{aligned}
 E_{w,3} &= \frac{1}{2} \int_{a_1}^{a_2} \int_{b-b_2}^b N_1(y) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{1}{4} A_{mn}^2 Q_n N \frac{m^2 b \pi}{na^2} \left(c + \frac{a}{m\pi} \cos \frac{2m\pi p}{a} \sin \frac{m\pi c}{a} \right) \times \\
 &\times \left[\frac{1}{3} \left(\cos^3 n\pi - \cos \frac{n\pi(b-b_2)}{b} \right) - \left(\cos n\pi - \cos \frac{n\pi(b-b_2)}{b} \right) \right] = \varphi_{mn} A_{mn}^2 N
 \end{aligned} \tag{8.32}$$

$$\begin{aligned}
 E_{w,4} &= \frac{1}{2} \int_{a_1}^{a_2} \int_0^{b_1} N_2(y) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{1}{4} A_{mn}^2 P_n N \frac{m^2 b \pi}{na^2} \left(c + \frac{a}{m\pi} \cos \frac{2m\pi p}{a} \sin \frac{m\pi c}{a} \right) \times \\
 &\times \left[\frac{1}{3} \left(\cos^3 \frac{n\pi b_1}{b} - 1 \right) - \left(\cos \frac{n\pi b_1}{b} - 1 \right) \right] = \omega_{mn} A_{mn}^2 N
 \end{aligned} \tag{8.33}$$

Odgovarajuća unutrašnja odnosno deformaciona energija ploče, sastavljena iz fleksione i torzione komponente, data je sa:

$$E_I = \frac{D}{2} \int_A \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \tag{8.34}$$

Fleksiona komponenta unutrašnje energije je:

$$\begin{aligned}
 E_{I,f} &= \frac{1}{8} DA_{mn}^2 \pi^4 \left(\frac{m^4}{a^4} + \frac{n^4}{b^4} + 2\nu \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} \right) \times \\
 &\times \left[ab - \left(c - \frac{a}{m\pi} \cos \frac{2m\pi p}{a} \sin \frac{m\pi c}{a} \right) \left(h - \frac{b}{n\pi} \cos \frac{2n\pi q}{b} \sin \frac{n\pi h}{b} \right) \right] = \lambda_{mn} A_{mn}^2
 \end{aligned} \tag{8.35}$$

Torziona komponenta unutrašnje energije je:

$$E_{I,t} = \frac{1}{4} D(1-\nu) A_{mn}^2 \pi^4 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} \times \left[ab - \left(c + \frac{a}{m\pi} \cos \frac{2m\pi p}{a} \sin \frac{m\pi c}{a} \right) \left(h + \frac{b}{n\pi} \cos \frac{2n\pi q}{b} \sin \frac{n\pi h}{b} \right) \right] = \mu_{mn} A_{mn}^2 \quad (8.36)$$

Ploča je u stanju stabilne ravnoteže ako je ispunjeno:

$$\frac{\partial E_T}{\partial A_{mn}} = 0, \quad \text{odnosno} \quad \frac{\partial (E_{I,f} + E_{I,t} + E_W)}{\partial A_{mn}} = 0 \quad (8.37)$$

Gde je totalna potencijalna energija ploče data sa:

$$E_T = E_{I,f} + E_{I,t} + E_W \quad (8.38)$$

Smenom (8.29), (8.35) i (8.36) u (8.37) dolazi se do (8.39) koji definiše kritičan napon elastičnog izvijanja.

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{\delta} = \frac{\lambda_{mn} + \mu_{mn}}{\varepsilon_{mn} + \rho_{mn} + \varphi_{mn} + \omega_{mn}} \quad (8.39)$$

Kritična sila izvijanja se može zapisati u kompaktnom obliku:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 \delta} \quad (8.40)$$

Gde je k koeficijent elastičnog izvijanja ploče i može se predstaviti kao:

$$k_{hole} = \frac{\lambda_{mn} + \mu_{mn}}{\varepsilon_{mn} + \rho_{mn} + \varphi_{mn} + \omega_{mn}} \frac{b^2 \delta}{\pi^2 D} \quad (8.41)$$

Odnos koeficijenta izvijanja uniformne i ploče sa otvorom se definiše preko faktora osetljivosti t koji predstavlja meru osetljivosti ploče na diskontinualne promene geometrije. Ovaj faktor je proporcionalan recipročnoj vrednosti koeficijenta elastičnog izvijanja k_{hole} , a značajan je pošto reprezentuje sposobnost ploče sa otvorom, određenog oblika i orijentacije, da zadrži svoje ponašanje u domenu elastične stabilnosti.

$$t = \frac{k_{unhole}}{k_{hole}} = \frac{4}{k_{hole}} \quad (8.42)$$

Karakteristična vrednost korekcionog faktora t iznosi 1 što odgovara uniformnoj ploči (Slika 8.3a). Ako je ploča sa otvorom vrednost se koriguje koeficijentom ($1/k_{hole}$) i faktor osetljivosti t može biti veći, manji ili eventualno jednak 1, zavisno od oblika i orijentacije otvora (Slika 8.3b).

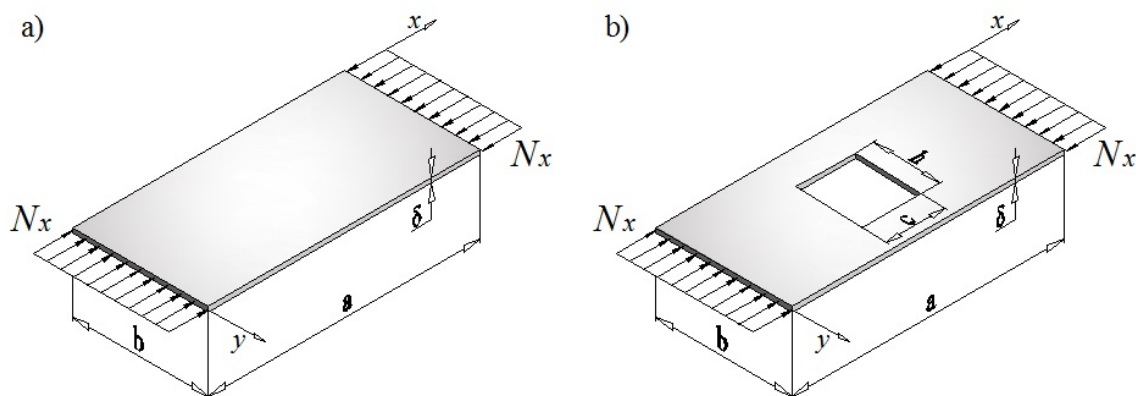
8.3. UPOREDNA ANALIZA I VERIFIKACIJA REZULTATA

Analizirajući matematički model elastičnog izvijanja ploče zaključuje se da presudnu ulogu na stabilnost ploče ima rad spoljašnjeg opterećenja. Ovaj zaključak dolazi do izražaja kada se razmatraju ploče sa izduženim otvorima. Naime, tada je promena deformacione energije ploče minorna, dok postojanje otvora inicira preraspodelu napona i znatne promene spoljašnje energije. Posledica ovog fenomena je korekcija koeficijenta izvijanja odnosno faktora osetljivosti, smanjujući ili uvećavajući njihovu vrednost. U okviru ovoga rada, analiza uticajnih parametara razmatraće se za neke od karakterističnih oblika.

8.3.1. SLUČAJ PRAVOUGAONOG OTVORA

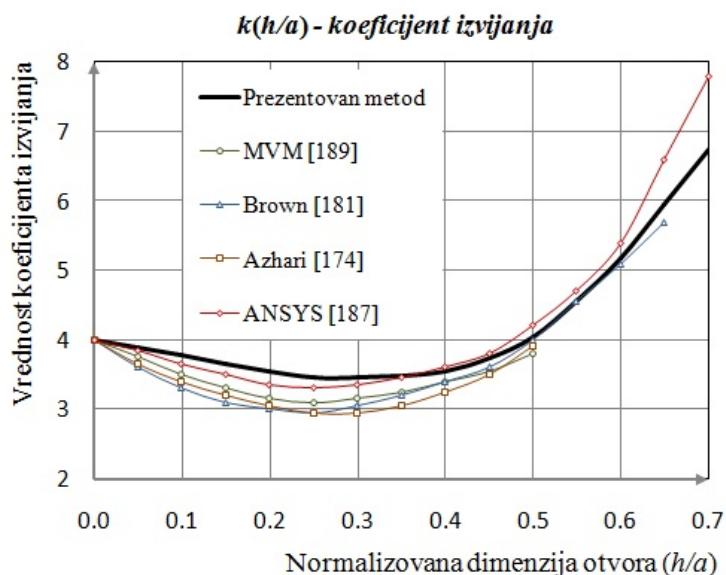
Slika 8.4 prikazuje uporednu analizu koeficijenta izvijanja prezentovanom metodom sa literaturnim podacima za kvadratnu ploču čije su dimenzije $a \times a$, sa centričnim pravougaonim otvorom dimenzija $c \times h$, gde $c=0,25a$ predstavlja širinu otvora. Uobičajeno je da se koeficijent izvijanja k izražava u funkciji od bezdimenzionalne veličine (h/a) , gde je h visina otvora.

Analizom dijagrama zaključuje se da podaci prema [174, 181, 187, 189] imaju isti trend raspodele, dok se vrednosti međusobno razlikuju (Slika 8.4). Osnovna razlika prezentovanog postupka sa literaturom ogleda se u obliku raspodele do vrednosti $y/a=0.25$ gde funkcija $k(h/a)$ ima konkavan oblik.



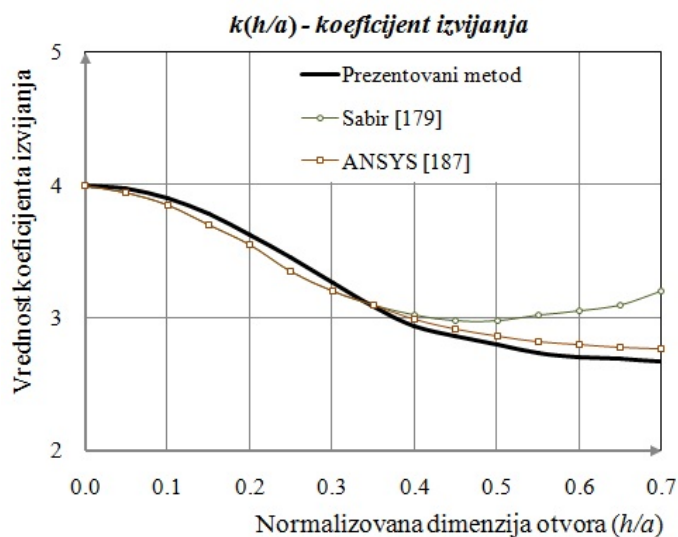
Slika 8.3. Jednoosno pritisnuta ploča: a) uniformna i b) sa pravougaonim otvorom

Prema [187] taj oblik je linearan dok ostala istraživanja pokazuju da je funkcija na celom domenu konveksna. Na domenu $h/a > 0.25$ funkcija koeficijenta izvijanja asimptotski teži raspodeli prema [181], dok su njene vrednosti nablize podacima koji odgovaraju [187].



Slika 8.4. Komparacija $k(h/a)$ ploče sa pravougaonim otvorom

Istraživanje [183] kroz analizu otvora sa vertikalnim presekom, koji je po obliku najpribližniji sa pravougaonom otvorom, pokazuje postojanje konkavne strane u domenu do $h/a=0.25$, što je detaljno izloženo u 8.3.3. Specijalan slučaj prethodnog razmatranja prikazan je na slici 8.5, gde je analizirana kvadratna ploča sa centričnim kvadratnim otvorom dimenzija $h \times h$. Uporedna analiza izloženog postupka data je sa istraživanjima [179, 187]. Sa uvećanjem dimenzije otvora prema dimenzijama ploče imamo permanentno opadanje koeficijenta izvijanja. Funkcija $k(h/a)$ prema izloženom metodu dobro se podudara sa raspodelom koja odgovara [187], kako u pogledu trenda tako i kvantitativno. Prema [179] u domenu iznad $h/a > 0.4$ koeficijent izvijanja k najpre stagnira, a zatim ima tendenciju blagog rasta.



Slika 8.5. Komparacija $k(h/a)$ ploče sa kvadratnim otvorom

U specijalnom slučaju, kada ne postoji pravougaoni otvor imamo slučaj geometrijski uniformne slobodno oslonjene i jednoosno opterećene ploče (Slika 8.3a), za koju je koeficijent izvijanja (8.43) i kritični napon (8.44), što odgovara podacima iz [168-169].

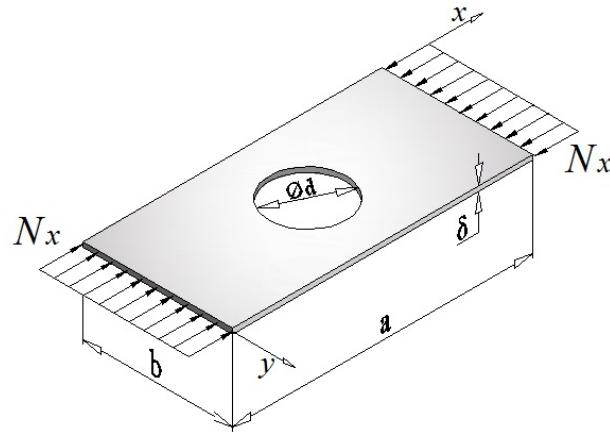
$$k = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (8.43)$$

$$\sigma_{cr}(m, n = 1) = 4 \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (8.44)$$

Gde je $k=4$ koeficijent izvijanja kvadratne uniformne ploče

8.3.2. PLOČA SA KRUŽNIM OTVOROM

Određivanje koeficijenta elastičnog izvijanja za pravougaonu ploču sa kružnim otvorom (Slika 8.6), prethodno izloženim postupkom nije moguće u direktnoj formi. Razlog tome odnosi se na složenost podintegralne funkcije usled kružne konture i međusobno zavisnih koordinata x i y .



Slika 8.6. Pravougaona ploča sa kružnim otvorom

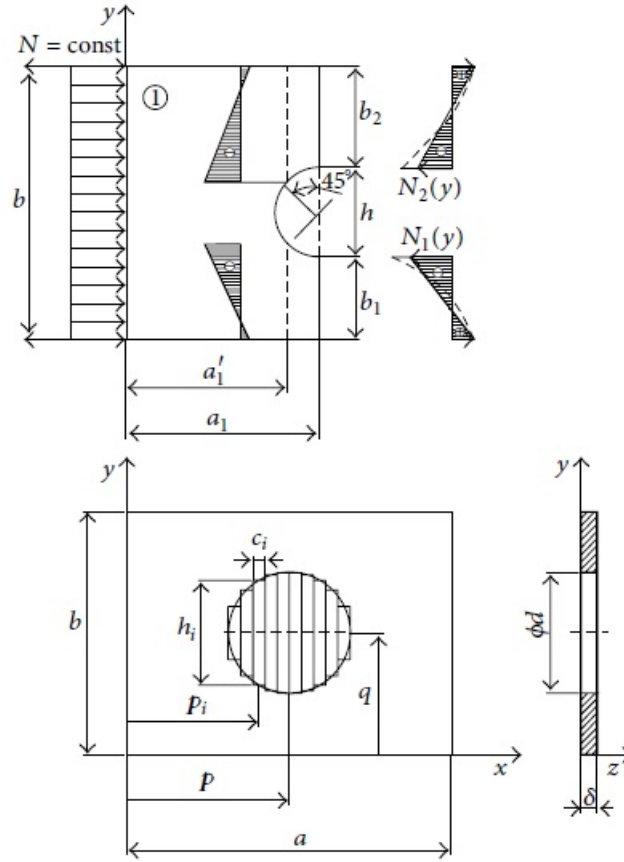
Zato je neophodno koristiti aproksimativni pristup rešavanja koji je zasnovan na rezultatima prethodne analize. Naime, suština ovog postupka je da se kružni otvor prečnika d podeli na s pravougaonih procepa dimenzija h_i i c_i , čiji su položaji definisani sa p_i i q_i . Broj pravougaonih procepa s mora biti dovoljno veliki kako bi se što bolje pratila konturu kružnog otvora. Da bi model ravnog stanja napona, razvijen za pravougaoni otvor, bio primenjiv i za kružni otvor, neophodno je izvršiti korekciju, prema slici 8.7. Element "1" dimenzija $a_1 \times b$ se koriguje na dužinu a_1' kojoj odgovara raspodela sile sa manjim uticajem momenata (raspodela teži uniformnom obliku). Definisane geometrijske veličine pravougaonih procepa (8.45) – (8.48) koriste se u izrazima za deformacionu energiju (8.35) - (8.36).

$$p_i = p - \frac{d}{2} + \frac{2i-1}{2} c, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (8.45)$$

$$c_i = \frac{d}{i}, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (8.46)$$

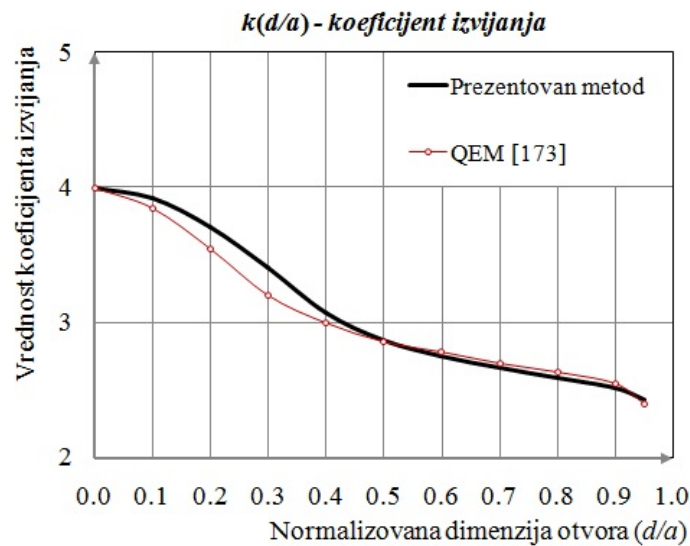
$$q_i = q = \text{const} \quad (8.47)$$

$$h_i = \sqrt{d^2 - [(2i-1)c]^2}, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (8.48)$$



Slika 8.7. Podela kružnog otvora na pravougaone procepe

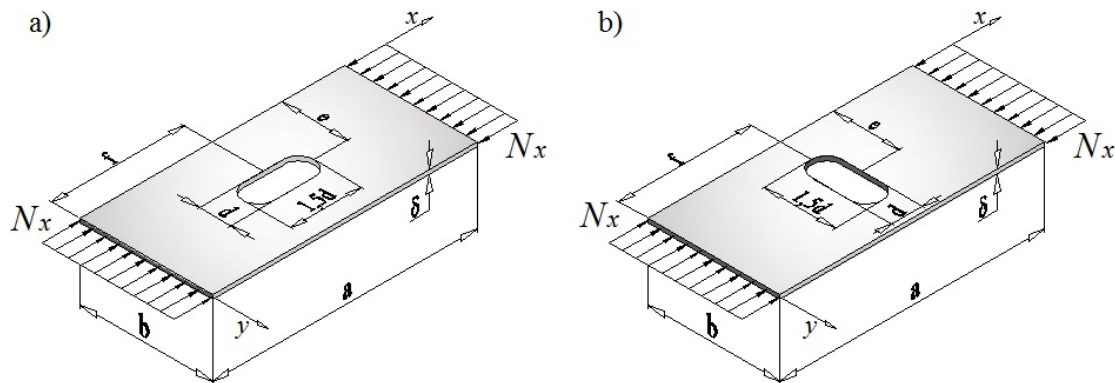
Funkcija koeficijenta izvijanja $k(d/a)$ ima tendencijski pad vrednosti na celom domenu razmatranja (Slika 8.8). Progresivan pad vrednosti je na intervalu $d/a = [0,1 \div 0,4]$ i preko vrednosti 0,9. Dobijeni podaci su kvalitativno i kvantitativno saglasni sa [173], što opravdava uvedene pretpostavke u procesu formiranja modela i primenu na druge konture sličnog oblika.



Slika 8.8. Komparacija $k(d/a)$ ploče sa kružnim otvorom

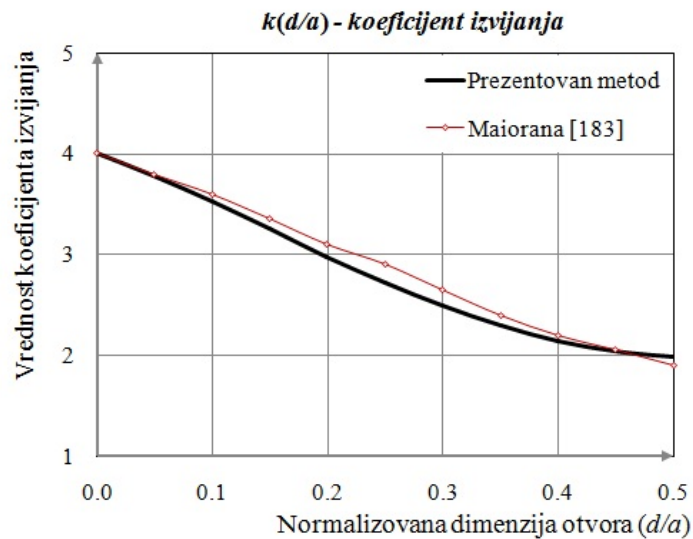
8.3.3. PLOČA SLOTOVANOG OTVORA

Istraživanje ploče sa pravougaonim otvorom pokazalo je da orijentacija otvora prema položaju ploče ima veliki uticaj na stabilnost. Sa druge strane, analiza ploče sa otvorom ukazuje na povećanje rada koji vrši spoljašnja sila N_x što utiče na smanjenje koeficijenta izvijanja. Otvor sa prorezom predstavlja kombinaciju prethodna dva slučaja (Slika 8.9).



Slika 8.9. Ploča sa: a) horizontalno i b) vertikalno slotovanim otvorom

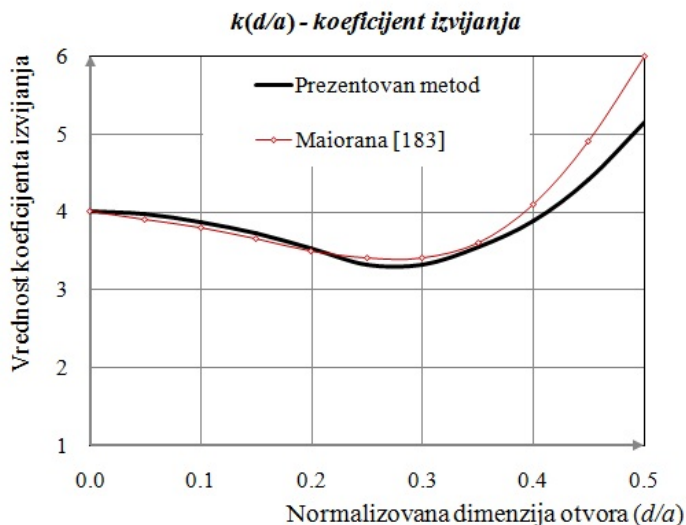
Analiza koeficijenta izvijanja k ukazuje na zavisnost od orijentacije otvora. Slika 8.9a odgovara horizontalnom položaju otvora u odnosu na pravac dejstva sile N .



Slika 8.10. Komparacija $k(d/a)$ ploče sa horizontalno slotovanim otvorom

Koeficijent izvijanja prema [183], definisan FEM postupkom, konstantno opada po linearnom zakonu. Raspodela $k(d/a)$ dobijena izloženom metodologijom ima isti trend dok je maksimalno odstupanje 6 % za $d/a = 0,25$ (Slika 8.10). Međutim, ukoliko se otvor zarotira za ugao od 90^0 (Slika 8.9b), ponašanje je znatno drugačije pri nepromenjenim ostalim karakteristikama ploče.

Funkcija $k(d/a)$ se na domenu razmatranja može podeliti na dva dela (Slika 8.11). Prvi deo odnosi se na interval $[0 \div 0,2]$, gde je funkcija k konkavna i degresivno opada sa porastom d/a . Na domenu $[0,2 \div 0,5]$ funkcija ima konveksan oblik koji utiče najpre na stagnaciju, a potom na progresivno povećanje koeficijenta k .



Slika 8.11. Komparacija $k(d/a)$ ploče sa vertikalno slotovanom otvorom

Funkcije koeficijentata izvijanja za slučaj otvora sa prorezom i pravougaonog otvora su analogne. Vrednost k je veća za pravougaoni otvor u odnosu na otvor sa prorezom za istu vrednost bezdimenzionalnog argumenta kao posledica manjeg spoljašnjeg rada.

8.4. UTICAJ OTVORA NA SPOLJAŠNI RAD I STABILNOST PLOČE

Prethodno je konstantovano da rad spoljašnjih sila dominantno utiče na elastičnu stabilnost ploče. Deformacioni rad ploče isključivo zavisi od veličine otvora, dok su položaj i orijentacije otvora sekundarnog uticaja. Deformacioni rad je linearna funkcija krutosti ploče. Raspodele ravanskih pritisnih sila su uzročnici indukovanja spoljašnjeg rada, pa je njihova indentifikacija ključna u analizi stabilnosti. Model ravnog stanja napona je razvijen za pravougaoni otvor i uz određenu korekciju je implementiran na kružni i oblik sa prorezom.

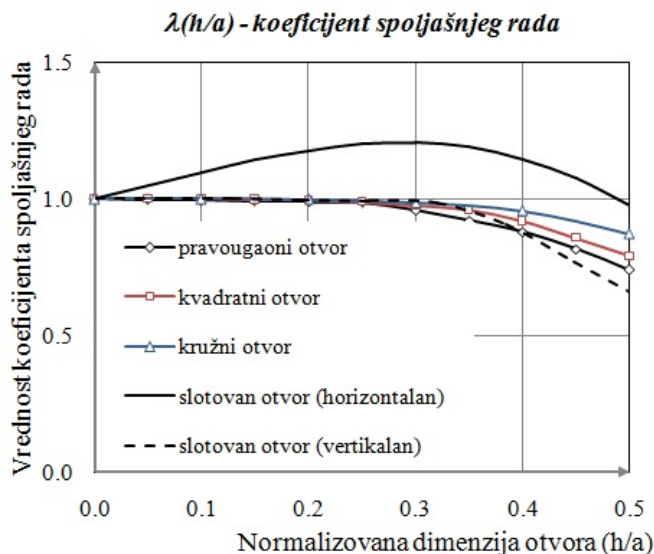
Analiza sprovedena u tački 8.3 jasno ukazuje da sa porastom veličine jednodimenzionalnih otvora (kvadratnog i kružnog oblika) dolazi do smanjenja elastične stabilnosti. Kada se radi o dvodimenzionalnim otvorima (pravougaoni i oblik sa prorezom) treba razlikovati horizontalnu i vertikalnu orijentaciju. Prvi slučaj je analogan sa prethodnom analizom, dok druga varijanta utiče da elastična stabilnost najpre opada, a zatim dominantno raste i čak prelazi vrednost 4 koja je karakteristična za ploče bez otvora. Pravougaoni otvor čija je veća dimenzija normalna na pravac dejstva opterećenja izložen je znatnoj koncentraciji napona, što je negativno sa aspekta statičke nosivosti, ali pogodno za stanje stabilnosti.

S obzirom da rad spoljašnjih pritisnih sila direktno utiče na koeficijent izvijanja, neophodno je uvesti koeficijent spoljašnjeg rada λ , koji prezentuje apsorbovanu energiju izazvanu oblikom otvora u odnosu na uniformnu ploču.

Koeficijent spoljašnjeg rada je definisan kao odnos spoljašnje energije ploča sa otvorom i uniformne geometrije, preko relacije (8.49).

$$\lambda = \frac{E_{W,hole}}{E_{W,unhole}} \quad (8.49)$$

Prema dijagramu na slici 8.12 vrednost koeficijenta λ , za otvor sa presekom horizontalnog položaja, je veća od 1 na interval do 0,5 dok za veće domene opada. Koeficijent λ za ostale otvore ima tendenciju pada, pošto njihov oblik utiče na smanjenje rada pritisnih sila u odnosu na uniformnu ploču. Najmanja vrednost λ je za otvor sa presekom vertikalne orijentacije.

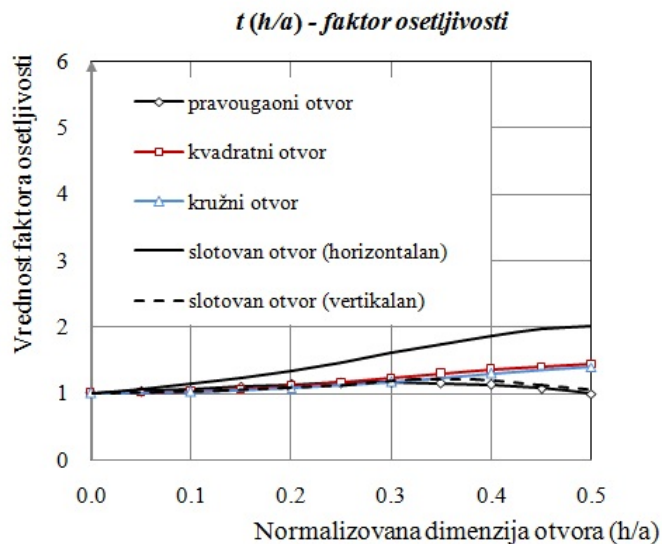


Slika 8.12. Koeficijenta λ u zavisnosti od parametra (h/a)

Između dijagrama prikazanih na slici 8.12 i 8.13 postoji izvesna paralela. Najveća osetljivost je za otvor sa presekom horizontalnog položaja. Takav oblik preraspodeljuje opterećenje iznad i ispod otvora preko nominalne vrednosti N_x , dok ispred i iza otvora kružni oblik sprečava turbulenciju strujnog toka i formira raspodelu blisku vrednosti N_x .

Zato je vrednost E_w veća od vrednosti koja odgovara uniformnoj ploči, gde je raspodela pritiska duž cele ploče odgovara nominalnoj vrednosti N_x . Situacija ploče sa pravougaonim otvorom je suprotna od prethodno izloženog. Kao posledicu toga imamo maksimalnu osetljivost za oblik sa presekom horizontalne orijentacije, dok isti oblik zarotiran za 90° ima minimalnu. Ostale varijante su između ova dva slučaja.

Dijagram dat na slici 8.13 je osnovna smernica za izbor oblik otvora sa aspekta stabilnosti ploče. Otvor sa presekom vertikalnog položaja (Slika 8.9b) u tom smislu predstavlja optimalni oblik, što je značajano u procesu konstruisanja tankozidnih nosećih struktura.



Slika 8.13. Faktor osetljivosti t u funkciji od parametra (h/a)

U okviru ovoga rada tretirana je problematika elastične stabilnosti ploča sa otvorom koristeći matematički model razvijenog na osnovama energetske metode. Analiza obuhvata razmatranje četiri oblika otvora: pravougaoni, kvadratni, kružni i slotovani (kombinacija pravougaonog i kružnog). Postojanje otvora smanjuje deformacionu energiju ploče, dok zavisno od oblika najčešće utiče na smanjenje spoljašnjeg rada usled pritisnih sila.

Dominantni činilac na koeficijent izvijanja k ima rad spoljašnjih sila. Zato je definisan koeficijent λ kojim se manifestuje apsorpciona sposobnost ploče sa otvorom u odnosu na uniformnu ploču. Kroz izloženu metodologiju analiziran je mehanizam elastične stabilnosti koristeći energetske bilans ploče u stanju stabilne ravnoteže. Izvršena je matematička identifikacija uticajnih parametara stabilnosti u koje spadaju: dimenzije i vrsta materijala ploče, oblik, veličina, položaj i orijentacija otvora.

Verifikacija rezultata prezentovane metode je verifikovana prema istraživanjima [174, 179, 181, 183, 187 i 189]. Faktor osetljivosti t definiše kriterijum za izbor najpovoljnijeg oblika otvora sa aspekta stabilnosti. Rezultati primene ovog istraživanja su značajni za optimizaciju struktura, sa posebnim akcentom na tankozidne perforirane stubove visokoregalskih skladišta.

Materijal prezentovan u ovom poglavlju je rezultat originalnog istraživanja autora u oblasti stabilnosti nosećih elemenata i dat je u studiji [196]. Poseban doprinos predstavlja implementacija ovog modela u analizi stabilnosti celokupnog poprečnog preseka, koristeći princip dekompozicije elemenat poprečnog preseka [197].

9. OPTIMIZACIJA STRUKTURNIH ELEMENATA REGALA

Izbor optimizacione strategije je od ključnog značaja za uspešno rešenje problema optimalnog projektovanja. Optimizacioni algoritmi se generalno mogu podeliti u dve grupe:

- ✧ Determinističke metode i
- ✧ Nedeterminističke metode.

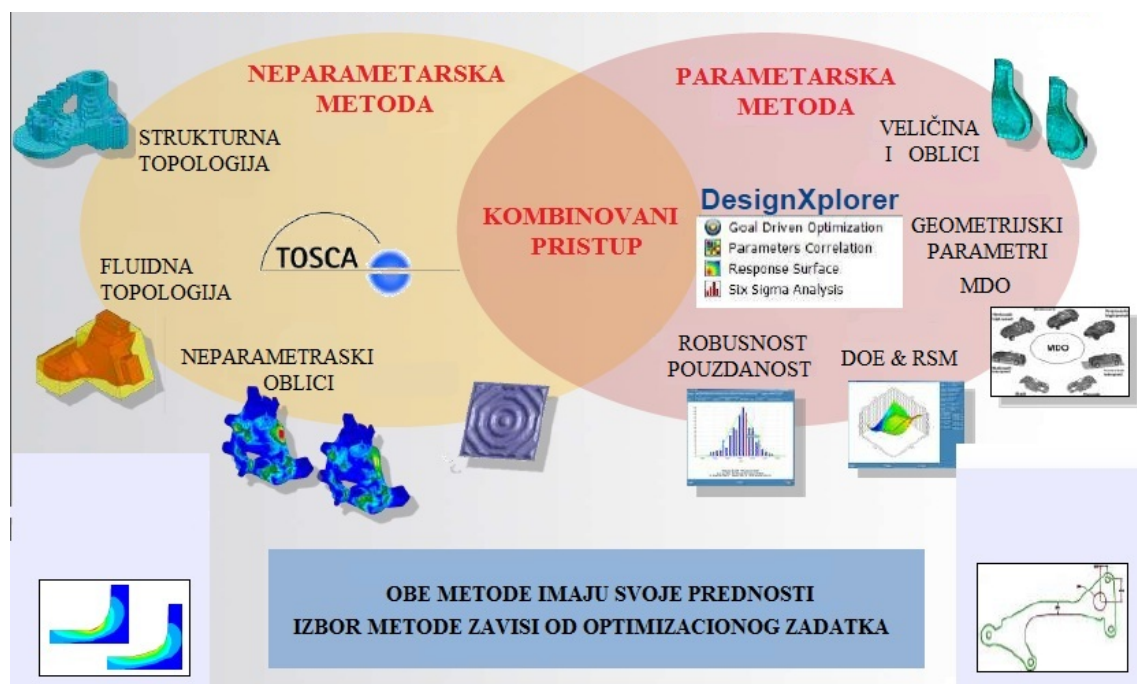
Determinističke metode su zasnovane na primeni neprekidnih egzaktnih ili aproksimativnih matematičkih funkcija kojima se opisuje funkcija cilja, kao i odgovarajuća ograničenja. Treba naglasiti da se mali broj problema optimizacije može realizovati ovim pristupom. Nasuprot ovome, nedeterminističke metode su razvijene sa ciljem da daju rešenje kada se funkcija cilja i ograničenja ne mogu eksplicitno izraziti matematičkim izrazima. Determinističke metode obuhvataju:

- ◆ Linearno programiranje (linear programming - LP),
- ◆ Nelinearno programiranje (nonlinear programming - NLP),
- ◆ Celobrojno programiranje (integer programming - IP),
- ◆ Kombinovano-celobrojno programiranje (mixed-integer programming - MIP) i
- ◆ Binarno programiranje (binary programming - BP).

Nedeterminističke metode obuhvataju one postupke koji su zasnovani na principu slučajnog traženja optimalnog rešenja. Ove metode mogu koristiti diskretne promenljive za nalaženje globalnog optimuma u prisustvu nekoliko lokalnih ekstrema. Međutim, osnovni nedostatak ovih metoda je što broj procenjenih funkcija može biti veliki, čak kada i ne postoji globalni optimum. Rad nedeterminističkih metoda zasnovan je isključivo na korišćenju vrednosti funkcija. U nedeterminističke metode se svrstavaju:

- ◆ Genetski algoritmi (genetic algorithms - GA),
- ◆ Evoluciono programiranje (evolutionary programming - EP),
- ◆ Razvojne strategije (evolution strategies - ES),
- ◆ Simulaciono žarenje (simulated annealing - SA) i
- ◆ Optimizacija čestice jata (particle swarm optimization - PSO).

Napredan softverski paket, kao što je ANSYS 12 [198], između ostalog omogućava optimizaciju složenih modela, za potpuno proizvoljne uslove opterećenja i oslanjanja. To je ovom softveru otvorilo široke mogućnosti primene za racionalno projektovanje onih modela, koji zbog svoje kompleksnosti nisu mogli biti predmet adekvatnih optimizacionih procedura. Optimizacioni postupak koji podržava ANSYS 12 baziran je na parametaraskoj i neparametaraskoj metodi (Slika 9.1).

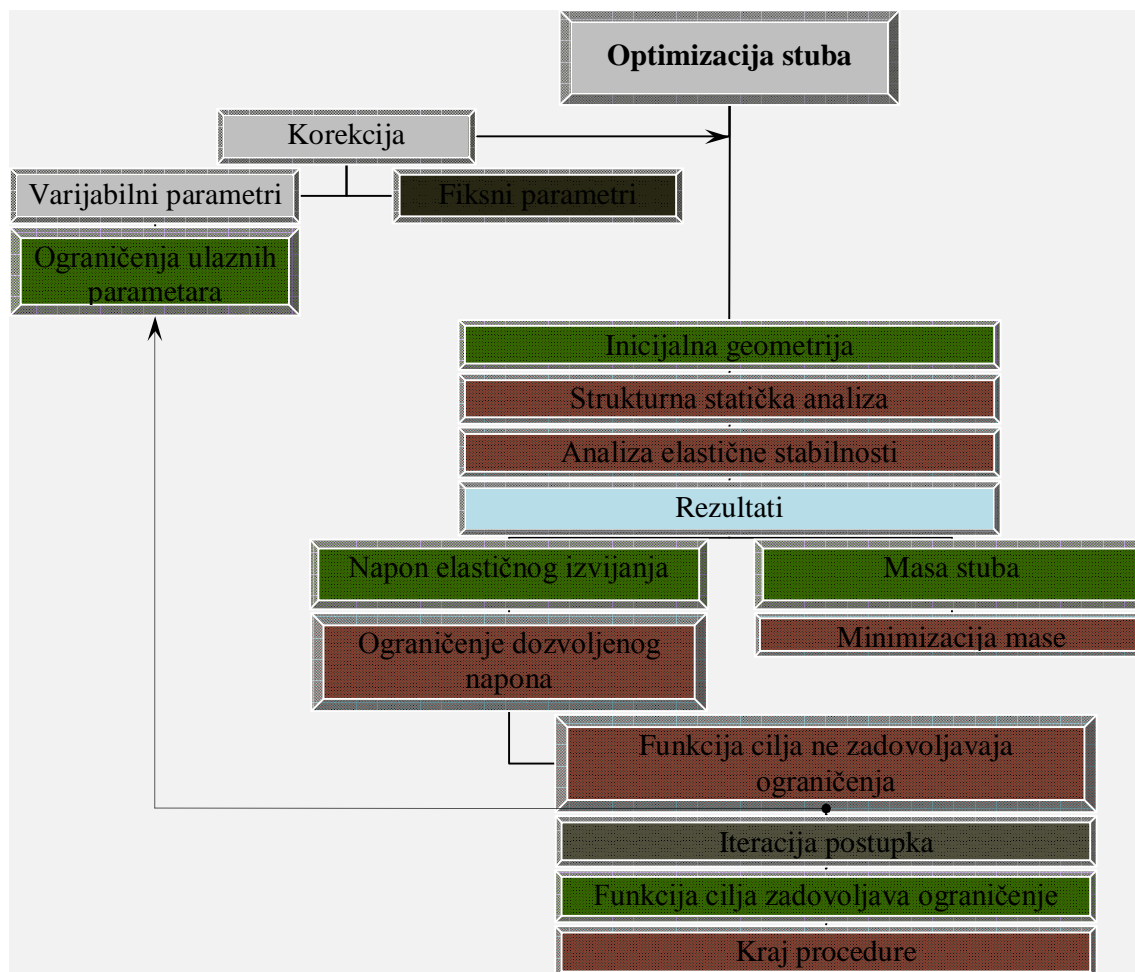


Slika 9.1. Optimizacione metode softverskog paketa ANSYS 12

Izbor optimizacione metode diktiran je projektnim zadatkom odnosno konkretnim potrebama zavisno od modela. Neparametarska metoda (TOSCA) koristi se kada nije eksplicitno poznat oblik, ali su definisani uslovi opterećenja i oslanjanja. U zavisnosti od ovih ulaznih parametara, formira se naponska slika prema kojoj se definiše optimalan oblik modela. Parametarska metoda (Design Xplorer) omogućava optimizaciju poznatog oblika modela, dok su dimenzije oblika predstavljene kao parametri, koji su uključeni u ograničenja funkcije cilja.

Optimizacija poprečnih preseka stubova i nosača regalskih skladišta prema naponskom kriterijumu (maksimalno dozvoljenog napona) realizovana je u softveru ANSYS 12 koristeći modul Goal Driven Optimization. Optimizacioni postupak je primenjen na modelu sa proizvoljno definisanim dimenzijama poprečnog preseka, ali sa aktiviranom opcijom za parametarske vrednosti. Ulazne varijable optimizacionog algoritma se generalno mogu odnositi na sve dimenzije poprečnog preseca osim onih koje su limitirane konstrukcionim zahtevima. Izlazne varijable odnose na masu i ekvivalentni napon, a treba da obezbede one dimenzije poprečnog preseka koji će minimizovati njihove vrednosti.

Optimizacioni algoritam koji je baziran na metodi konačnih elemenata je iteracionog karaktera i predstavljen je na slici 9.2.

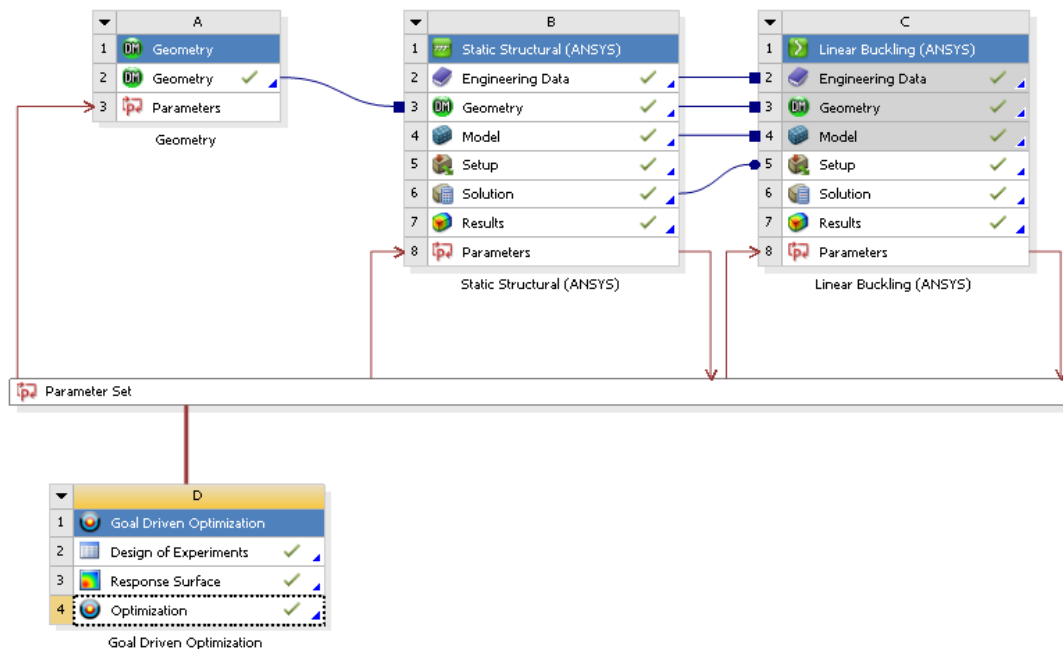


Slika 9.2. Strukturalna šema optimizacije u ANSYS 12

Osnovno pitanje koje se tiče numeričke optimizacije u softveru ANSYS 12 obuhvata metodološku proceduru za definisanje parametarskog modela, njegovo uključivanje u odgovarajući modul naponske analize, definisanje varijabilnih i izlaznih parametara modela, kao i njihovih ograničenja. Izgled međusobno povezanih modula je dat na slici 9.3.

Optimizaciona analiza u DesignXplorer se realizuje kroz 7 koraka [198]:

- Kreiranje parametarskog modela u DesignModeler i definisanje ulaznih varijabli,
- Transfer modela iz DesignModeler u odgovarajući modul Mechanical koji je merodavan za naponsku analizu (Static Structural),
- Integracija prethodnih modula sa Goal Driven Optimization,
- Definisanje ograničenja ulaznih varijabli u podmodulu Design of Experiments,
- Pokretanje postupka u podmodulu Design of Experiments,
- Definisanje osetljivosti za svaku tačku formiranog eksperimenta i
- Pokretanje optimizacionog postupa.



Slika 9.3. Blok dijagram modula za optimizaciju u ANSYS 12

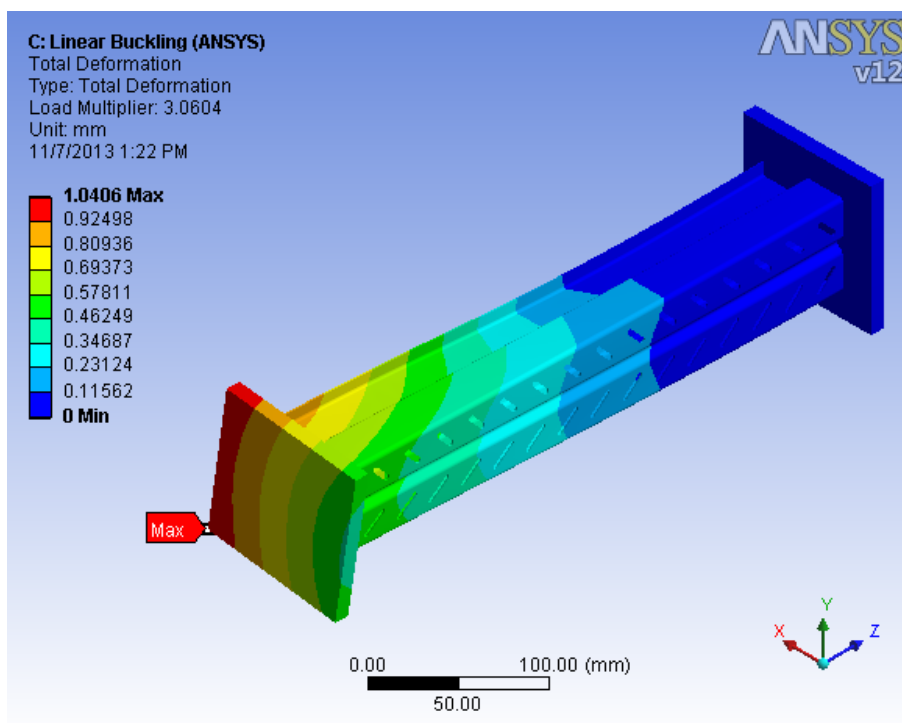
Rezultati optimizacije su dati za tri varijante (Candidate A, B and C), a najpovoljniji izbor se određuje na osnovu broja zvezdica, gde veći broj zvezdica reprezentuje povoljnije uslove varijante (Tabela 9.1). Dobijene optimalne vrednosti geometrijskih parametra izabrane varijante treba prilagoditi konstruktivno-proizvodnim zahtevima i za tako usvojene mere je potrebno definisati korespondentne vrednosti mase i ekvivalentnog (von Mises) napona.

Tabela 9.1. Izlazni rezultati optimizacionog postupka u ANSYS 12

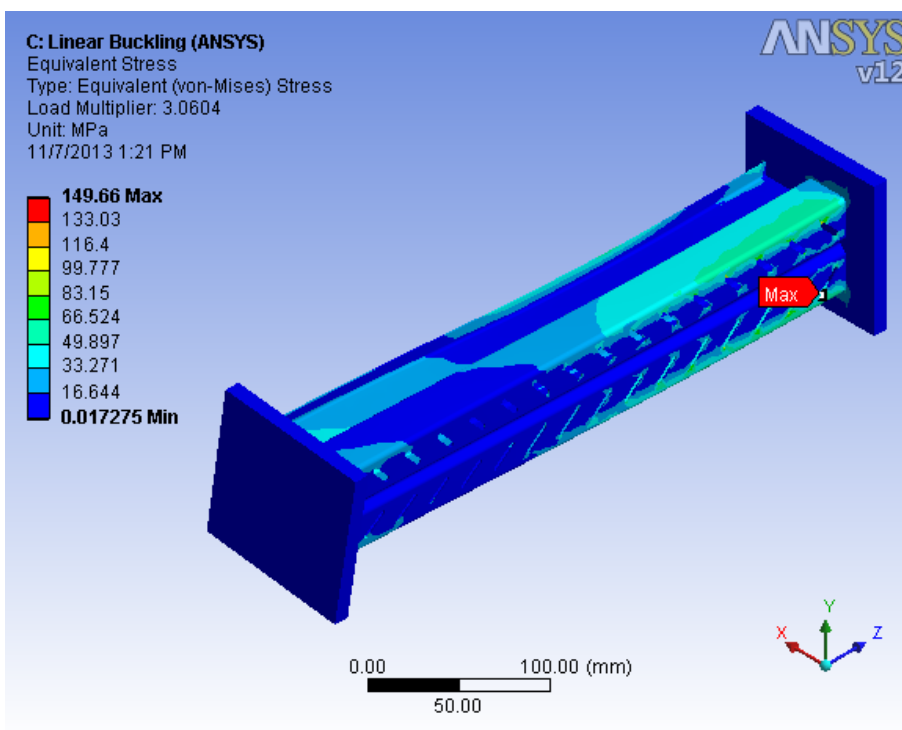
Table of Schematic D4: Optimization										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		P1 - Plane4.H2	P2 - Plane4.V3	P4 - Plane4.V14	P5 - Plane4.A13	P6 - Plane7.A7	P7 - Plane8.A7	P10 - Plane4.V4	P8 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P9 - Geometry Mass (kg)
2	Optimization Study									
3	Objective	No Objective	No Objective	No Objective	No Objective	No Objective	No Objective	No Objective	Values <= Target	Minimize
4	Target Value								240	
5	Importance	Default	Default	Default	Default	Default	Default	Default	Higher	Higher
6	GDO Sample Set 1									
7	Candidate A	63.07	63.07	27.03	105.15	45.075	225.08	1.0055	★ ★ 142.74	★ ★ ★ 2.2677
8	Candidate B	64.89	72.695	29.919	125.55	58.238	227.93	1.012	★ ★ 168.86	★ ★ ★ 2.3241
9	Candidate C	66.71	67.883	32.808	111.39	56.708	230.78	1.0185	★ 191.47	★ ★ ★ 2.3256

Razmatrana dužna modeliranog uzorka je 500 mm i odgovara najkraćoj dužini stuba između dve susedne etaže. Ova dužina stuba je karakteristična za analizu lokalno-distorzionog modaliteta izvijanja, čija je identifikacija trendu u savremenoj literaturi. Raspodele deformacija i napona u domenu elastičnog izvijanja su prikazane na slikama 9.4 i 9.5. Maksimalna vrednost napona je u zoni perforiranog otvora (optimalna orijentacija perforacije odgovara uglu od 45^0) i iznosi $\approx 15 \text{ kN/cm}^2$ ($< \sigma_{doz} = 24 \text{ kN/cm}^2$ za S235JRG2 po EN 10025). Uslovi opterećenja modela, inicijalne dimenzije poprečnog preseka, statička strukturalna analiza i vizuelizacija lokalno-distorzionog moda izvijanja su dati u Prilogu 10.

Izložen postupak za slučaj Ω je primenjen za tipične poprečne preseke stubova i nosača kod komercijalnih regalskih skladišta (za 5 stubova i 6 nosača), a rezultati optimizacionog postupka su dati u priložima 11 i 12.



Slika 9.4. Ukupna deformacija pritisnutog segmenta Ω stuba



Slika 9.5. Ekvivalentni napon pritisnutog segmenta Ω stuba

10. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Razvoj elemenata regala fleksibilnog skladišnog koncepta je na sistematski i sveobuhvatan način prezentovan kroz poglavlja multidisciplinarnog pristupa prezentovane disertacije. Generalni zadatak disertacije je bio da uspostavi zavisnost između elemenata logističkog sistema i konkurentnosti proizvoda na tržištu. Poseban akcenat je stavljen na transportni i skladišni sistem kao dominantne komponente u lancu snabdevanja. U tom smislu, modeli robnih tokova zauzimaju značajno mesto u analizama integralnog logističkog sistema.

Doprinos ovog istraživanja u tom pogledu se odnosi na uključivanje aspekta sigurnosti u procesu transporta robe. Predložen model kvantitativno-kvalitativne procene rizika od iskliznuća voza ima za cilj da analizira potencijalne uzročnike vanrednih događaja kroz proces monitoringa i da kroz matematičku formulaciju daje ocenu o sigurnosti transporta robe između unapred definisanih čvorišta distributivne mreže snabdevanja.

Težište disertacije je stavljeno na skladišni sistem čija je uloga da amortizuje prostorno-vremensku i kvantitativnu distancu proizvodne delatnosti i tržišnih zahteva. Ova specifična aktivnost logističkog sistema je predmet intenzivnih istraživanja u poslednjih nekoliko decenija, ukazujući na različite aspekte istraživanja. Poznato je da proizvodni procesi nisu dovoljno propraćeni od strane logističkih aktivnosti, što je dovelo do višestrukog debalansa u odnosu njihovih troškova. Zapravo, ove dve delatnosti su kontradiktornih karakteristika pošto svako unapređenje proizvodnih procesa zahteva simultano poboljšanje logističkih tehnologija.

Neadekvatna podrška logističkog sistema za vreme procesa uvođenja novih tehnologija u kompanijama se posmatrano na duži rok nepovoljno odražava kroz povećanje logističkih odnosno ukupnih troškova i manju konkurentnost robe na svetskom tržištu. Iz tog razloga je bitan osvrt na logističku komponentu poslovanja kompanija, pošto ima isti uticaj na cenu proizvoda kao i sam proizvodni proces. Sa tog stanovišta je i izvršeno istraživanje skladišnog sistema koje se može podeliti u tri segmenta:

- Razvoj nekonvencionalnih oblika skladišta,
- Analiza funkcionalnih površina i tokova skladišta i
- Strukturna analiza elemenata skladišnih regala.

Sa metodološkog i naučno-istraživačkog gledišta ove tematike spadaju u granične oblasti disciplina koje se oslanjaju na logistiku i tehniku. Zato se razvoj skladišnog sistema ne može realizovati bez kompleksnog sagledavanja problema i multidisciplinarnog pristupa. U tom pravcu je upravo išla tematika i sadržaj ove disertacije.

Istraživanje nekonvencionalnih tipova layout-a skladišta je relativno nova problematika i početak njenog razvoja je u zadnjih nekoliko godina. Iako je broj istraživanja iz ove oblasti relativno mali, treba imati u vidu da je većina prezentovanih rezultata našla svoju praktičnu primenu. U poglavlju 4 ove studije je zaključeno da se lokacijskom optimizacijom slučajno definisanih skladišnih jedinica kod nekonvencionalna skladišta mogu smanjiti dužine transportnih puteva za oko 15 % u odnosu na najpovoljniji layout tradicionalnih rešenja. Dalji pravcu razvoja u ovoj oblasti se odnose na implementaciji pozicijske optimizacije, gde je uključen i energetska aspekt skladišnih jedinica. Kako je učešće energetskih resursa veće od vremena provedenog za obavljanje unutrašnjeg transporta, jasno je da poslednji aspekt analize u sebi sadrži znatnu tehnološku rezervu, koj može doprineti boljim performansama skladišta.

Drugi segment istraživanja se odnosi na analizu funkcionalnih površina i tokova skladišta (Poglavlje 5). Definisan je kompleksan model sa devet nepoznatih (tokova) koji je rešavan algoritmom dinamičkog programiranja. Ulazni i izlazni parametri skladišta, kao i tokovi unutar njega su simulirani u diskretnim vremenskim intervalima. Vrednosti ovih parametara su definisane za svaki interval maksimizujući funkciju cilja koja reprezentuje profit. Simulacionim modelom se definiše kada i u kojim količinama treba nabaviti odnosno prodati određenu vrstu robe. Uticaj troškova je uzet kroz fiksnu i varijabilnu komponentu. Izložena procedura je univerzalna i može se primeniti za širi spektar analiza u okviru poslovanja kompanija. Značaj predložene procedure je što sistem (skladište ili kompaniju) ne posmatra izolovano (kroz minimizovanje troškova), već u interakciji sa tržištem (maksimizovanje profita).

Na kraju, treći segment istraživanja studije se ogleda u strukturnoj analizi elemenata regalskog skladišta, sa akcentom na nosivost stubova i paletnih nosača. Analiza naprezanja ovih elemenata je izvršena u kontekstu tkz. samonosećih skladišta koji su trend u oblasti izgradnje skladišta. Izvršen je sistematski pregled literature u poslednje dve decenije i konstantovana neophodnost procene nosivosti stubova (nosača) sa aspekta stabilnosti. Konstantovano je da su razvijene metode i predloženi standardi za projektovanje od hladno-oblikovanih profila ograničavajućeg karaktera i da se mogu adekvatno koristiti samo za procenu nosivosti iz prethodno definisanog skupa preseka. Primena ovih metoda (standarda) za optimizaciju poprečnih preseka nije moguća ili ne daje validne rezultate. Matematička identifikacija uticajnih parametara aksijalno pritisnutih perforiranih ploča za različite oblike otvora je implementirana u pravcu razvoja novih i modifikacije postojećih oblika elemenata regala (Poglavlje 8). Optimizacija postojećih, najčešće korišćenih tipova stubova i regala je sprovedena numeričkim postupkom, koristeći softverski paket ANSYS 12 (modul Goal Driven Optimization). Rezultati parametarske optimizacije su prikazani u prilogima 11 i 12. Ova postupak daje široke mogućnosti u projektovanju i razvoju struktura regalskih skladišta.

Prezentovana studija ima teorijski i praktičan značaj. Teorijski se ogleda kroz otvaranje mogućnosti za dalji naučno-istraživački rad u ovoj oblasti. Praktični značaj se manifestuje kroz primenjivost izloženih rezultata u cilju smanjenje troškova logistike, povećanja konkurentnosti proizvoda i stvaranja povoljnijeg poslovnog ambijenta.

LITERATURA

- [1] Morgenstern O, Thompson GL. *Mathematical theory of expanding and contracting economies*. Lexington Books. Lexington, Massachusetts: D. C. Heath and Company, 1976, pp. 277.
- [2] Bartholdi J, Hackman S. *Warehouse & distribution science: release 0.92*. The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, 2010.
- [3] Roll Y, Rosenblatt MJ. *Optimal warehouse size configuration and storage policies*. Proceedings of VI International Conference on Production Research, 1981, pp. 325-328.
- [4] Bassan Y, Roll Y, Rosenblatt MJ. *Internal layout design of a warehouse*. AIIE Transactions, vol. 12, No 4, 1980, pp. 317-22.
- [5] Francis RL. *On some problems of rectangular warehouse design and layout*. The Journal of Industrial Engineering, vol. 18, 1967, pp. 595-604.
- [6] White JA, Francis RL. *Normative models for some warehouse sizing problems*, AIIE Transactions, vol. 9, No 3, 1971, pp. 185-90.
- [7] Rosenblatt MJ, Roll Y. *Warehouse capacity in a stochastic environment*, International Journal of Production Research, vol. 26, No 12, 1988, pp. 1847-51.
- [8] Rosenblatt MJ, Roll Y. *Warehouse design with storage policy considerations*, International Journal of Production Research, vol. 22, No 5, 1984, pp. 809-821. doi: 10.1080/00207548408942501
- [9] Santamaria J, Vadillo EG, Gomez J. *Influence of creep forces on the risk of derailment of railway vehicles*, Vehicle System Dynamics, vol.47, No 6, 2009, pp.721-52.
- [10] Wu H, Wilson N. *Railway vehicle derailment and prevention*. Handbook of Railway Vehicle Dynamics, 2006, pp. 209-38.
- [11] Brabie D. *On the influence of rail vehicle parameters on the derailment process and its consequences*. PhD diss., KTH, 2005.
- [12] Gopinath C, Reddy V. *Development of integrated model for assessment of operational risks in rail track*. In Industrial Engineering and Engineering Management, 2007 IEEE International Conference on, IEEE, 2007, pp. 612-6.
- [13] Takai H, Uchida M, Muramatsu H, Ishida H. *Derailment safety evaluation by analytic equations*. Quarterly Report of RTRI43, No. 3, 2002, pp.119-24.
- [14] Molina LF, Resendiz E, Edwards JR, Hart JM, Barkan CPL, Ahuja N. *Condition Monitoring of Railway Turnouts and Other Track Components Using Machine Vision TRB 11-1442*, 2010.
- [15] Schlake BW, Todorovic S, Edwards JR, Hart JM, Narendra Ahuja N, Barkan CPL. *Machine vision condition monitoring of heavy-axle load railcar structural underframe components*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 224, No 5, 2010, pp. 499-511. doi: 10.1243/09544097JRRT376
- [16] Nijole B. *The reduction of the risk and accident probability on carriage of dangerous goods*. Transport 9, No. 1, 2008, pp.21-8.
- [17] Tim KS, Abbott B, Ruel M. *A risk management framework for ground hazards along canadian national railways*. In AREMA Proceedings of the 2000 Annual Conference, 2000.
- [18] Bunce CM, Martin CD, Keegan T, Hutchinson DJ, Ruel M, Lemay P. *An overview of the Canadian Railway Ground Hazard Research Program*. In 7th World Congress on Railway Research, 2006, pp. 4-8.

- [19] Kolar V, Magličić D, Kaužijar D. *Function of train traction department and railwaz vehicles in logistic centres*. Promet-Traffic&Transportation, vol.19, No 3, 2007, pp.233-9.
- [20] Schubert G. *Logistic centres in the Hungarian traffic network – A Current Survey*. Promet-Traffic&Transportation, vol.15, No 4, 2003, pp.173-9.
- [21] Cerić A, Marčić D, Ivandić K. *A risk-assessment methodology in tunneling*, Technical Gazette, vol. 14, No 4, 2011, pp. 529-36.
- [22] Duncan IGT, McCann JBC, Brown A. *The Investigation of Derailments*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 191, No 1, 1977, pp. 323-32.
- [23] Puzavac L, Popović Z, Lazarević L. *Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load*. Promet-Traffic&Transportation, vol.24, No 5, 2012, pp.405-12.
- [24] Modarres M. *What every engineer should know about reliability and risk Analysis*. Marcel Dekker, NewYork, 1993.
- [25] Kaplan S, Garrick GJ. *On the quantitative definition of risk*, Risk Anal., vol.1, No1, 1981, pp. 11-27.
- [26] Von Neumann J, Oskar M. *Theory of Games and Economic Behavior (Commemorative Edition)*. Princeton university press, 2007.
- [27] Derr RE. *Performing Exact Logistic Regression with the SAS® System*. Cary, NC: SAS Institute, Inc., 2000. <http://www.sas.com/rnd/app/papers/exactlogistic.pdf>
- [28] Fang PC, Reed HD. *Strategic positioning of railroad cars to reduce their risk of derailment*. Internal Staff Study, Transportation Systems Center (DOT/TSC), March 1979.
- [29] Preše S, Kovačević D, Marković B. *Analyses of fracture that have caused traffic accident*, Promet-Traffic&Transportation, vol.9, No 4, 1997, pp.171-5.
- [30] Hoseini SMS, Vaziri M. *Modeling drivers behavior as crash risk reduction process*, Promet-Traffic&Transportation, vol.20, No 3, 2008, pp.139-46.
- [31] *Logistics Cost and Service 2007*, Establish, Inc. Herbert W Davis & Company.
- [32] Tompkins JA, White JA, Bozer YA, Frazelle EH, Tanchoco JMA, Trevino J. *Facilities Planning*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [33] de Koster R, Le-Duc T, Roodbergen KJ. *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. European Journal of Operational Research, vol. 182, 2007, pp. 481-501.
- [34] Roodbergen KJ, Vis IFA. *A model for warehouse layout*. IIE Transactions, vol. 38, 2006, pp. 799-811.
- [35] Gu J, Goetschalckx M, McGinnis LF. *Research on warehouse operation: A comprehensive review*. European Journal of Operational Research, vol. 177, No 1, 2007, pp. 1-21.
- [36] Francis RL. *On some problems of rectangular warehouse design and layout*. Journal of Industrial Engineering, vol.18, No 10, 1967, pp. 595-604.
- [37] Bassan Y, Roll Y, Rosenblatt MJ. *Internal layout design of a warehouse*. AIIE Transactions, vol.12, No 4, 1980, pp. 317-22.
- [38] Mayer JHE. *Storage and retrieval of material*. The Western Electric Engineer, vol.5, No 1, 1961, pp. 42-8.
- [39] Malmborg CJ Krishnakumar B. *On the optimality of the cube per order index for conventional warehouses with dual command cycles*. Material Flow, vol. 4, 1987, 169-75.
- [40] Malmborg CJ, Krishnakumar B.A. *Revised proof of optimality for the cube-per-order index rule for stored item location*. Applied Mathematical Modelling, vol.14, No 2, 1990, pp. 87-95.

- [41] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. *An evaluation of two new warehouse aisle designs for dual-command travel*. In Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference. Institute of Industrial Engineers, Norcross, GA, 2007, pp. 740-5.
- [42] Ratliff HD, Rosenthal AS. *Order-picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem*. Operations Research, vol. 31, No 3, 1983, pp. 507-21.
- [43] Roodbergen KJ, de Koster R. *Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle*. European Journal of Operational Research, vol. 133, No 1, 2001, pp. 32-43.
- [44] Roodbergen KJ, Sharp GP, Vis IF. *Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouses*. IIE Transactions, vol. 40, No 11, 2008, pp. 1032-45.
- [45] Gue KR, Meller RD. *Aisle configurations for unit-load warehouses*. IIE Transactions, vol. 41, No 3, 2009, pp. 171-82.
- [46] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. *An analysis of dual-command operations in common warehouse designs*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol.45, No 3, 2009, pp. 367-79.
- [47] Gue KR, Ivanović G, Meller RD. *A unit-load warehouse with multiple pickup and deposit points and non-traditional aisles*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol.48, No 4, 2012, pp. 795-806.
- [48] Killmann F, von Collani E. *A note on the convolution of the uniform and related distributions and their use in quality control*. Economic Quality Control, vol.16, No 1, 2001, pp. 17-41.
- [49] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. *Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse*. Naval Research Logistics (NRL), vol. 56, No 5, 2009, pp. 389-403.
- [50] Ashayeri J, Gelders LF. *Warehouse design optimization*. European Journal of Operational Research, vol. 21, 1985, pp. 285-94.
- [51] Cormier G, Gunn EA. *A review of warehouse models*. European Journal of Operational Research, vol. 58, 1992, pp. 3-13.
- [52] Van den Berg JP. *A literature survey on planning and control of warehousing systems*. IIE Transactions, vol. 31, 1999, pp. 751-62.
- [53] Rouwenhorst B, Reuter B, Stockrahm V, van Houtum GJ, Mantel RJ, Zijm WHM. *Warehouse design and control: framework and literatures review*. European Journal of Operational Research, vol. 122, 2000, pp. 515-33.
- [54] Heragu S, et al. *Mathematical model for warehouse design and product allocation*. International Journal of Production Research, vol 43, No 2, 2005, pp. 432-40.
- [55] Yoon CS, Sharp GP. *Example application of the cognitive design procedure for an order pick system: case study*. European Journal of Operational Research, vol. 87, 1995, pp. 223-46.
- [56] Yoon CS, Sharp GP. *A structured procedure for analysis and design of order pick systems*. IIE Transactions, vol. 28, 1996, pp. 379-89.
- [57] Bozer YA. *Optimizing throughput performance in designing order picking systems*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1985.
- [58] Hackman ST, Rosenblatt MJ. *Allocating items to an automated storage and retrieval system*. IIE Transactions, vol. 22, No 1, 1990, pp. 7-14.
- [59] Frazelle EH, Hackman ST, Passy U, Platzman LK. *The forward-reserve problem*. In Optimization in Industry 2, edited by T.A. Ciriani and R.C. Leachman, 1994, pp. 43-61 (Wiley: New York).
- [60] Hackman ST, Platzman LK. *Near-optimal solution of generalized resource allocation problems with large capacities*. European Journal of Operational Research, vol. 38, No. 5, 1990, pp. 902-10.

- [61] Van den Berg JP, Sharp GP, Gademann AJRM, Pochet Y. *Forward-reserve allocation in a warehouse with unit load replenishment*. European Journal of Operational Research, vol. 111, 1998, pp. 98-113.
- [62] Napolitano M. *Making the Move to Cross Docking*. Warehousing Education and Research Council, Illinois, 2000.
- [63] Bartholdi JJ, Gue KR. *Reducing labor costs in an LTL Crossdocking terminal*. Operations Research, vol. 48, No 6, 2000, pp. 823-32.
- [64] Tsui LY, Chang C-H. *A microcomputer – based decision support tool for assigning dock doors in freight yards*. Computers Industrial Engineering, vol.19, No 1- 4,1990, pp. 309-12.
- [65] Tsui LY, Chang C-H. *Optimal solution to a dock doors assignment problem*. Computers Industrial Engineering, vol.19, No 1- 4,1990, pp. 309-12.
- [66] Gray AE, Karmarkar US, Seidmann A. *Design and operation of an order consolidation warehouse: Models and application*. European Journal of Operational Research, vol.58, 1992, pp.14-36.
- [67] Yoon CS, Sharp GP. *Example application of the cognitive design procedure for an order pick system: case study*. European Journal of Operational Research, vol.87, 1995, pp. 223-36.
- [68] Geraldes CAS, Carvalho MSF, Pereira GAB. *A warehouse design decision model – Case study*. In Engineering Management Conference, 2008. IEMC Europe 2008. IEEE International, pp. 1-5. IEEE, June 2008.
- [69] Heragu SS, Huang C, Mantel RJ, Schuur PC. *An Efficient Model for Allocating Products and Designing a Warehouse*. In R. Meller, M. Ogle, B.A. Peters, G.D. Taylor and J.S. Usher (Eds.), Progress in Material Handling Research: 2004, The Material handling Institute, Charlotte, NC, 2005, pp. 143-52.
- [70] Heragu SS, Du L, Ronald J. Mantel RJ, Schuur PC. *Mathematical model for warehouse design and product allocation*. International Journal of Production Research, vol.43, No 2, 2005, pp. 327-38.
- [71] Bellman R. *On the theory of dynamic programming*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 38, No 8, 1952, pp. 716.
- [72] Cahn AS. *The Warehouse Problem* (Abstract). Bull. Amer. Math. Soc., vol. 54, 1948, pp. 1073.
- [73] Charnes A, Cooper WW. *Generalizations of the warehousing model*. OR 6, No 4, 1955, pp. 131-72.
- [74] Gale D, Kuhn HW, Tucker AW. *Linear programming and the theory of games*. Chapter XIX of Activity Analysis of Production and Allocation, T. C. Koopmans (ed.), Wiley, New York, 1951.
- [75] Charnes A, Cooper WW, Mellon B. *A Model for programming and sensitivity analysis in an integrated oil company*. Econometrica, vol.22, 1954, pp. 193-217.
- [76] Prager W. *On warehousing problems*. Operations Research, vol.5, No 4, 1957, pp. 504-12.
- [77] Hitchcock FL. *The distribution of a product from several sources to numerous locations*. Journal of Mathematical Physics. Vol.20, 1941, pp. 224-30.
- [78] Dreyfus SE. *An analytic solution of the warehouse problem*. Management Science, vol.4, No 1, 1957, pp. 99-104.
- [79] Casafont M, Pastor MM, Roure F, Peköz T. *An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns*. Thin-Walled Structures, vol. 49, 2011, pp. 933-46.

- [80] Roure F, Pastor MM, Casafont M, Somalo MR. *Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3*. Thin-Walled Structures, vol. 49, 2011, pp. 167-84.
- [81] Yu C, Schafer BW. *Distortional buckling tests on cold-formed steel beams*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 132, No.4, 2006, pp. 515-28.
- [82] Timoshenko SP, Woinowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1959.
- [83] Timoshenko SP, Gere JM. *Theory of elastic stability*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1961.
- [84] von Kármán T, Sechler EE, Donnell LH. *The strength of thin plates in compression*. Transaction of the ASME, vol. 54 (APM 54-5), 1932, pp. 53.
- [85] Winter G. *Strength of thin-walled compression flange*. Transaction of the ASME, vol. 112, 1947.
- [86] AISI S 100-2007. *North American specification for the design of cold-formed steel members*. American Iron and Steel Institute, 2007.
- [87] EN 1993 1-3, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: *General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, 2006.
- [88] ABNT NBR 14762. *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.
- [89] Batista EM. *Local-global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 1218-31.
- [90] Silvestre N, Camotim D. *On the mechanics of distortion in thin-walled open sections*. Thin-Walled Structures, vol. 48, 2010, pp. 469-81.
- [91] Schafer BW, Peköz T. *Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions*. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures Saint Louis, Missouri, USA, October 15-16, 1998.
- [92] Yu C, Schafer BW. *Distortional buckling tests on cold-formed steel beams*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 132, No.4, 2006, pp. 515-28.
- [93] Yu C, Yan W. *Effective Width Method for determining distortional buckling strength of cold-formed steel flexural C and Z sections*. Thin-Walled Structures, vol. 49, 2011, pp. 233-8.
- [94] Dinis PB, Batista EM, Camotim D, Santos ES. *Local-distortional-global interaction in lipped channel columns: Experimental results, numerical simulations and design considerations*. Thin-Walled Structures, vol. 61, 2012, pp. 2-13.
- [95] Haidarali MR, Nethercot DA. *Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with edge-stiffened flanges*. Journal of Construction Steel Research, vol. 73, 2012, pp. 31-42.
- [96] Lam SSE, Chung KF, Wang XP. *Load-carrying capacities of cold-formed steel cut stub columns with lipped C-section*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006, pp. 1077-83.
- [97] BS 5950 Part 5 – 1998. *Code of practice for design of cold formed thin gauge sections*. British Standard Institution (BSI), 1998.
- [98] Macdonald M, Heiyantuduwa MA, J. Rhodes J. *Recent developments in the design of cold-formed steel members and structures*. Thin-Walled Structures, vol. 46, 2008, pp. 1047-53.
- [99] Hancock GJ. *Design for distortional buckling of flexural members*. Thin-Walled Structures, vol. 27, No 1, 1997, pp. 3-12.
- [100] Shanmugam NE, Thevendran V, Tan YH. *Design formula for axially compressed perforated plates*. Thin-Walled Structures, vol. 34, 1999, pp. 1-20.

- [101] AS/NZ 4600: 2005. *Cold formed steel structures*. Australian/New Zealand Standard, 2005.
- [102] Sharp ML. *Longitudinal Stiffeners for Compression Members*. Journal of the Structural Division ASCE, vol. 92, No. 5, 1966, pp. 187-212.
- [103] Papangelis JP, Hancock GJ. *Computer analysis of thin-walled structural members*. Computers & structures, vol. 56, No. 1, 1995, 157-76.
- [104] Kesti J, Davies M. *Local and distortional buckling of thin-walled short columns*. Thin-Walled Structures, vol. 34, 1999, pp. 115-34.
- [105] Basaglia C, Camotim D, Silvestre N. *GBT – based local, distortional and global buckling analysis of thin-walled steel frames*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 1246-64.
- [106] Teng JG, Yao J, Zhao Y. *Distortional buckling of channel beam-columns*. Thin-Walled Structures, vol. 41, 2003, pp. 595-617.
- [107] Lau SCW, Hancock GJ. *Distortional Buckling Formulas for Channel Columns*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 113, No.5, 1987.
- [108] Hancock GJ, Kwon YB, Bernard ES. *Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 31, 1994, pp. 169-86.
- [109] Schafer BW. *Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 128, No. 3, 2002, pp. 289-99.
- [110] Rogers CA, Schuster RM. *Flange/web distortional buckling of cold-formed steel sections in bending*. Thin-Walled Structures, vol. 27, No. 1, 1997, pp. 13-29.
- [111] Batista EM. *Buckling curve for cold-formed compressed members*. Journal of Construction Steel Research, vol. 28, 1994, pp.121-36.
- [112] Schafer BW. *Designing Cold-Formed Steel Using the Direct Strength Method*. 18th International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida, USA, October 26-27, 2006.
- [113] Li Z, Schafer BW. *Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFMS: conventional and constrained finite strip methods*. 20th International specialty conference on cold formed steel structures, Saint Louis, Missouri, USA, November 3-4, 2010.
- [114] Schafer BW, Peköz T. *Laterally braced cold-formed steel flexural members with edge stiffened flanges*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 125, No. 2, 1999, pp. 118-27.
- [115] Batista EM. *Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction*. Thin-Walled Structures, vol. 48, 2010, pp. 345-56.
- [116] Moen CD, Schafer BW. *Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes*. Journal of Structural Engineering, vol. 137, No 5, 2010, pp. 559-70.
- [117] Casafont M, Pastor M, Bonada J, Roure F, Peköz T. *Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with the Finite Strip Method*. Thin-Walled Structures, vol. 61, 2012, pp. 71-85.
- [118] Yao Z, Rasmussen KJR. *Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures-Analytical developments*. Thin-Walled Structures, vol. 49, 2011, pp. 1359-73.
- [119] Eccher G, Rasmussen KJR, Zandonini R. *Elastic buckling analysis of perforated thin-walled structures by the isoparametric spline finite strip method*. Thin-Walled Structures, vol. 46, 2008, pp. 165-91.

- [120] Eccher G, Rasmussen KJR, Zandonini R. *Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 219-32.
- [121] Eccher G, Rasmussen KJR, Zandonini R. *Linear elastic isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures*. Thin-Walled Structures, vol. 46, 2008, pp. 242-60.
- [122] Crisan A, Ungureanu V, Dubina D. *Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1 – Experimental investigations*. Thin-Walled Structures, vol. 61, 2012, pp. 86-96.
- [123] Crisan A, Ungureanu V, Dubina D. *Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 2 – numerical investigations and design considerations*. Thin-Walled Structures, vol. 61, 2012, pp. 97-105.
- [124] Davies JM, Leach P, Taylor A. *The design of perforated cold-formed steel sections subject to axial load and bending*. Thin-Walled Structures, vol. 29, No 1-4, 1997, pp. 141-57.
- [125] Anđelić N, Milošević Mitić V. *An approach to the optimization of thin-walled cantilever open section beams*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 34, No 4, 2007, pp. 323-40.
- [126] Anđelić N, Milošević Mitić V. *Optimum design of thin-walled I-beam subjected to stress constraint*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 50, No 4, 2012, pp. 987-99.
- [127] Anđelić N, Milošević Mitić V, Maneski T. *An approach to the optimization of a thin-walled Z-beam*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 55, No 12, 2009, pp. 742-48.
- [128] Lewiński J, Magnucki K. *Optimization of anti-symmetrical open cross-sections of cold-formed thin-walled beams*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 47, No 3, 2009, pp. 553-71.
- [129] Gholipour Y. *Section optimization of cold-formed steel columns with stiffeners*. Canadian Journal on Mechanical Sciences & Engineering, vol. 2, No 8, 2011, pp. 199-209.
- [130] Lee J, Kima S-M, Park HS. *Optimum design of cold-formed steel columns by using micro genetic algorithms*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006, pp. 952-60.
- [131] Gilbert BP, Savoyat TJ-M, Teh LH. *Self-shape optimisation application: Optimization of cold-formed steel columns*. Thin-Walled Structures, vol. 60, 2012, pp. 173-84.
- [132] Gilbert BP, Teh LH, Guan H. *Self-shape optimization principles: Optimization of section capacity for thin-walled profiles*. Thin-Walled Structures, vol. 60, 2012, pp. 194-204.
- [133] Sarawit AT, Pekoz T. *A design approach for complex stiffeners*. Proceedings of the 15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri-Rolla, oktober 2000.
- [134] Bambach MR. *Design of uniformly compressed edge-stiffened flanges and sections that contain them*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 277-94.
- [135] Bambach MR. *Photogrammetry measurements of buckling modes and interactions in channels with edge-stiffened flanges*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 485-504.
- [136] Chen J, He Y, Jin W-L. *Stub column tests of thin-walled complex section with intermediate stiffeners*. Thin-Walled Structures, vol. 48, 2010, pp. 423-29.
- [137] Bernard ES, Bridge RQ, Hancock GJ. *Design methods for profiled steel decks with intermediate stiffeners*. Journal of Construction Steel Research, vol. 38, No 1, 1996, pp. 61-88.

- [138] Schafer BW, Peköz T. *The behaviour and design of longitudinally stiffened thin-walled compression elements*. Thin-Walled Structures, vol. 27, No. 1, 1997, pp. 65-78.
- [139] Bajoria KM, Talikoti RS. *Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2003, pp. 372-80.
- [140] Bernuzzi C, Castiglioni CA. *Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks*. Thin-Walled Structures, vol. 39, 2001, pp. 841-59.
- [141] Sangle KK, Bajoria KM, Talicotti RS. *Stability and dynamic analysis of cold-formed storage rack structures with semirigid connections*. International Journal of Structural Stability and Dynamics Vol. 11, No. 6, 201, 1059-88.
- [142] Batista, EDM. *Stability and strength of thin-walled cold-formed members*. In *Recent advances and new trends in structural design*. International colloquium dedicated to the 70th anniversary of professor Victor Gioncu, Timișoara, Romania, May 2004.
- [143] Bonada J, Casafont M, Roure F, Pastor MM. *Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns*. Thin-Walled Structures, vol. 51, 2012, pp. 99-111.
- [144] Zeinoddini VM, Schafer BW. *Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach*. Thin-Walled Structures, vol. 60, 2012, pp. 105-17.
- [145] Zirakian T, Showkati H. *Distortional buckling of castellated beams*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 62, 2006, 863-71.
- [146] Serrette RL, Peköz T. *Distortional buckling of thin-walled beams/panels I: Theory*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 121, No. 4, 1995, pp. 757-66.
- [147] Li Long-yuan. *Analyses of distortional buckling of cold-formed sigma purlins using EN1993-1-3*. Journal of Construction Steel Research, vol. 65, 2009, pp. 2099-102.
- [148] Ioannidis GS. *Postbuckling analysis of centrally compressed bars with open thin-walled cross section*. FACTA UNIVERSITATIS: Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, vol. 4, No. 17, 2005, pp. 317-31.
- [149] Godleya MHR, Beale RG. *Investigation of the effects of looseness of bracing components in the cross-aisle direction on the ultimate load-carrying capacity of pallet rack frames*. Thin-Walled Structures, vol. 46, 2008, pp. 848-54.
- [150] Shanmugam NE, Thevendran V, Tan YH. *Design formula for axially compressed perforated plates*. Thin-Walled Structures, vol. 34, 1999, pp. 1-20.
- [151] Shanmugam NE, Dhanalakshmi M. *Design for openings in cold-formed steel channel stub columns*. Thin-Walled Structures, vol. 39, 2001, pp. 961-81.
- [152] Lam SSE, Chung KF, Wang XP. *Load – carrying capacities of cold-formed steel cut stub columns with lipped C – section*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006, pp. 1077-83.
- [153] Markazi FD, Beale RG, Godley MHR. *Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors*. Thin-Walled Structures, vol. 28, 1997, pp. 57-87.
- [154] Del Coz Diaz JJ, Nieto PJG, Biempica CB, Rougeot GF. *Non-linear analysis of unbolted base plates by the FEM and experimental validation*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006, pp. 529-41.
- [155] Sarawit AT, Kim Y, Bakker MCM, Peköz T. *The finite element method for thin-walled members-applications*. Thin-Walled Structures, vol. 41, 2003, pp. 191-206.
- [156] Sivakumaran KS, Abdel-Rahman N. *A finite element analysis model for the behaviour of cold-formed steel members*. Thin-Walled Structures, vol. 31, 1998, pp. 305-24.
- [157] Freitas AMS, Souza FT, Freitas MSR. *Analysis and behaviour of steel storage drive-in racks*. Thin-Walled Structures, vol. 48, 2010, pp. 110-17.

- [158] Sarawit AT, Peköz T. *Notional load method for industrial steel storage racks*. Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006, pp. 1280-86.
- [159] Ng ALY, Beale RG, Godley MHR. *Methods of restraining progressive collapse in rack structures*. Engineering Structures, vol. 31, 2009, pp. 1460-68.
- [160] Baldassino N, Bernuzzi C. *Analysis and behaviour of steel storage pallet racks*. Thin-Walled Structures, vol. 37, 2000, pp. 277-304.
- [161] Yang D, Hancock GJ. *Compression tests of high strength steel channel columns with interaction between local and distortional buckling*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 130, No 12, 2004, 1954-63.
- [162] Gotluru BP, Schafer BW, Peköz T. *Torsion in thin-walled steel beams*. Thin-Walled Structures, vol. 37, No. 2, 2000, pp. 127-45.
- [163] Yu C, Schafer BW. *Local buckling tests on cold-formed steel beams*. Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 129, No.12, 2003, pp. 1596-1606.
- [164] Peköz T. *Development of a unified approach to the design of cold-formed steel members*. American Iron and Steel Institute Research Report CF 87-1, 1987.
- [165] Schafer BW. *Cold-formed steel behavior and design: Analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners*. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, 1997.
- [166] Schafer BW. *Review: the direct strength method of cold-formed steel member design*. Journal of Constructional Steel Research, vol.64, No 7, 2008, pp. 766-78.
- [167] Batista EM. *Étude de la stabilité des profils à parois minces et section ouverte de types U et C*. Collection des publications de la Faculté des Sciences Appliquées no. 119, University of Liege, 1989.
- [168] Allen HG, Bulson PS. *Background to Buckling*. London: McGraw-Hill, 1980.
- [169] Gerstle KH. *Basic Structural Design*. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1967, pp. 88-90.
- [170] Radosavljevic V, Drazic M. *Exact solution for buckling of FCFE stepped rectangular plates*. Applied Mathematical Modeling, vol. 34, 2010, pp. 3841-49.
- [171] Wilson AJ, Rajasekaran S. *Elastic stability of all edges simply supported, stepped and stiffened rectangular plate under uniaxial loading*. Applied Mathematical Modeling, vol. 36, No.12, 2012, pp. 5758-72.
- [172] Paik JK, Thayamballi AK. *Buckling strength of steel plating with elastically restrained edges*. Thin-Walled Structures, vol.37, 2000, pp. 27-55.
- [173] Zhong H, Pan C, Yu H. *Buckling analysis of shear deformable plates using the quadrature element method*. Applied Mathematical Modeling, vol. 35, 2011, pp. 5059-74.
- [174] Azhari M, Shahidi AR, Saadatpour MM. *Local and post local buckling of stepped and perforated thin plates*. Applied Mathematical Modeling, vol. 29, 2005, pp. 633-52.
- [175] Petrisic J, Kosel F, Bremec B. *Buckling of plates with strengthenings*. Thin-Walled Structures, vol.44, 2006, pp. 334-43.
- [176] Bedair OK, Sherbourne AN. *Plate/stiffener assemblies under non uniform edge compression*. Journal of Structural Engineering, vol. 11, 1995, pp.1603-12.
- [177] Mizusawa T, Kajita T, Naruoka M. *Vibration and buckling analysis of plates of abruptly varying stiffness*. Computers & Structures, vol. 12, 1980, pp. 689-93.
- [178] Singh JP, Dey SS. *Variational finite difference approach to buckling of plates of variable stiffness*. Computers & Structures, vol. 36, 1990, pp. 39-45.
- [179] Sabir AB, Chow FY. *Elastic buckling of flat panels containing circular and square holes*. In: Morris LJ, editor. Proceedings of the International Conference on Instability and Plastic Collapse of Steel Structures, London: Granada Publishing, pp. 311-21, 1983.

- [180] Brown CJ, Yettram AL. *The elastic stability of square perforated plates under combination of bending, shear and direct load*. Thin-Walled Structures, vol. 4, No.3, 1986, pp. 239-46.
- [181] Brown CJ, Yettram AL, Burnett M. *Stability of plates with rectangular holes*. Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 113, No. 5, 1987, pp. 1111-6.
- [182] Brown CJ. *Elastic buckling of perforated plates subjected to concentrated loads*. Computers and Structures, vol. 36, No. 6, 1990, pp. 1103-9.
- [183] Maiorana E, Pellegrino C, Modena C. *Elastic stability of plates with circular and rectangular holes subjected to axial compression and bending moment*. Thin-Walled Structures, vol. 47, No. 3, 2009, pp. 241-55.
- [184] Harik IE, Andrade MG. *Stability of plates with step variation in thickness*, Computers and Structures, vol. 33, 1989, pp. 257-63.
- [185] Bui HC. *Buckling analysis of thin-walled sections under general loading conditions*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 730-9.
- [186] Brown CJ, Yettram AL. *Factors influencing the elastic stability of orthotropic plates containing a rectangular cut-out*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 35, No. 6, 2000, pp. 445-58.
- [187] El-Sawy KM, Nazmy AS. *Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes*. Thin-Walled Structures, vol. 39, 2001, pp. 983-98.
- [188] Moen CD, Schafer BW. *Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 1597-607.
- [189] Rahai AR, Alinia MM, Kazemi S. *Buckling analysis of stepped plates using modified buckling mode shapes*. Thin-Walled Structures, vol. 46, 2008, pp. 484-93.
- [190] Shanmugam NE, Lian VT, Thevendran V. *Finite element modeling of plate girders with web openings*, Thin-Walled Structures, vol. 40, 2002, pp. 443-64.
- [191] Bradford MA, Azhari M. *Buckling of plates with different end conditions using the finite strip method*, Computers & Structures, vol. 56, 1995, pp. 75-83.
- [192] Lau SCW, Hancock GJ. *Buckling of thin flat-walled structures by a spline finite strip method*. Thin-Wall Structures, vol. 4, 1986, pp. 269-94.
- [193] Cheung YK, Au FTK, Zheng DY. *Finite strip method for the free vibration and buckling analysis of plates with abrupt changes in thickness and complex support conditions*, Thin-Walled Structures, vol. 36, No. 2, 2000, pp. 89-110.
- [194] Bisagni C, Vescovini R. *Analytical formulation for local buckling and post-buckling analysis of stiffened laminated panels*. Thin-Walled Structures, vol. 47, 2009, pp. 318-34.
- [195] Stamatelos DG, Labeas GN, Tserpes KI. *Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels*. Thin-Walled Structures, vol. 49, 2011, pp. 422-30.
- [196] Djelosevic M, Tepic J, Tanackov I, Kostelac M. *Mathematical identification of influential parameters on the elastic buckling of variable geometry plate*. The Scientific World Journal, vol. 2013, Article ID268673, 15 pages, 2013. doi:10.1155/2013/268673
- [197] Djelosevic M, Gajic V, Petrovic D, Bizic M. *Identification of local stress parameters influencing the optimum design of box girders*. Engineering Structures, vol. 40, pp. 299-316, 2012.
- [198] ANSYS 12.1 – User’s manual, ANSYS Inc., 2009.

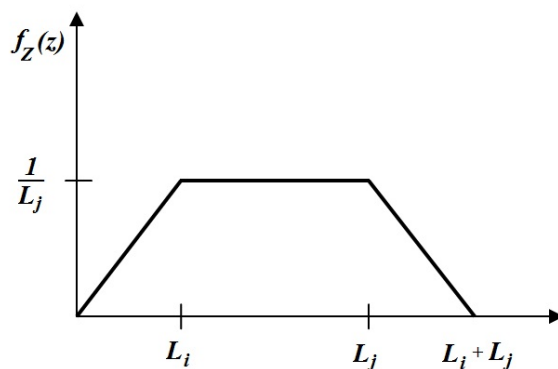
PRILOG

Prilog 1. Distanca skladišnih jedinica u okviru karakteristične oblasti

Prilog 1.1. Raspodela slučajno promenljive Z

Ako su dužine prolaza različite, pod pretpostavkom da je $L_j > L_i$, gustina slučajno promenljive Z_{ij} je oblika jednokrakog trapeza (Slika P1) i definisana je sa:

$$f_Z(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ \frac{z}{L_i L_j}, & 0 \leq z < L_i \\ \frac{1}{L_j}, & L_i \leq z < L_j \\ \frac{L_i + L_j - z}{L_i L_j}, & L_j \leq z < (L_i + L_j) \\ 0, & z > (L_i + L_j) \end{cases} \quad (\text{P1.1})$$



Slika P1. Funkcija gustine verovatnoće $Z_{ij} = X_{ij} + Y_{ij}$

Kumulativna raspodela slučajno promenljive Z_{ij} se određuje za intervale na kojima je definisana konvoluciona funkcija $f_Z(z)$, koristeći relaciju:

$$F_Z(z) = \int_0^z f_Z(t) dt \quad (\text{P1.2})$$

$$F_Z(z) = \int_0^z \frac{u}{L_i L_j} du = \frac{z^2}{2L_i L_j}, \quad 0 \leq z < L_i \quad (\text{P1.3})$$

$$F_Z(z) = F(L_i) + \int_{L_i}^z \frac{1}{L_j} du = \frac{2z - L_i}{2L_j}, \quad L_i \leq z < L_j \quad (\text{P1.4})$$

$$F_Z(z) = F(L_j) + \int_{L_j}^z \frac{L_i + L_j - u}{L_i L_j} du = \frac{2L_i L_j - (z - L_i - L_j)^2}{2L_i L_j}, \quad L_j \leq z < (L_i + L_j) \quad (\text{P1.5})$$

Konačno, raspodela kumulativne funkcije $F_Z(z)$ je oblika:

$$F_Z(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ \frac{z^2}{2L_i L_j}, & 0 \leq z < L_i \\ \frac{2z - L_i}{2L_j}, & L_i \leq z < L_j \\ \frac{2L_i L_j - (z - L_i - L_j)^2}{2L_i L_j}, & L_j \leq z < (L_i + L_j) \\ 1, & z > 0 \end{cases} \quad (\text{P1.6})$$

Prilog 1.2. Raspodela slučajno promenljive Z uslovljena sa q_{ij}

Na bazi definisane funkcije kumulativne raspodele $F_Z(z)$ moguće je odrediti funkciju verovatnoće $P_r(Z_{ij} < q_{ij})$. Prema tome, imamo:

$$P_r(Z_{ij} \leq q_{ij}) = F_Z(q_{ij}) = \begin{cases} \frac{q_{ij}^2}{2L_i L_j}, & 0 \leq q_{ij} < L_i \\ \frac{2q_{ij} - L_i}{2L_j}, & L_i \leq q_{ij} < L_j \\ \frac{2L_i L_j - (q_{ij} - L_i - L_j)^2}{2L_i L_j}, & L_j \leq q_{ij} < (L_i + L_j) \end{cases} \quad (\text{P1.7})$$

Za određivanje očekivanog rastojanja neophodno je definisanje uslovnih funkcija raspodele $F_{Z \setminus Z < q_{ij}}$ odnosno $F_{Z \setminus Z > q_{ij}}$. Ove funkcije se određuju prema formuli uslovne verovatnoće i imaju sledeće oblike:

$$F_{Z \setminus Z < q_{ij}} = P_r(Z_{ij} \leq z \setminus Z_{ij} \leq q_{ij}) = \frac{P_r(Z_{ij} \leq z, Z_{ij} \leq q_{ij})}{P_r(Z_{ij} \leq q_{ij})} = \frac{F_Z(z)}{F_Z(q_{ij})} \quad (\text{P1.8})$$

$$\begin{aligned} F_{Z \setminus Z > q_{ij}} &= P_r(Z_{ij} \leq z \setminus Z_{ij} > q_{ij}) = 1 - P_r(Z_{ij} > z \setminus Z_{ij} \leq q_{ij}) = \\ &= 1 - \frac{P_r(Z_{ij} > z, Z_{ij} > q_{ij})}{P_r(Z_{ij} > q_{ij})} = 1 - \frac{1 - F_Z(z)}{1 - F_Z(q_{ij})} = \frac{F_Z(z) - F_Z(q_{ij})}{1 - F_Z(q_{ij})} \end{aligned} \quad (\text{P1.9})$$

Konvolucije koje odgovaraju uslovnim kumulativnim funkcija se dobijaju prema poznatoj formuli:

$$f_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z) = \frac{d}{dz} [F_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z)] \quad (\text{P1.10})$$

U zavisnosti od opsega u kome se nalazi parametar q_{ij} , identifikovana su tri intervala i to:

- ♦ $0 < q_{ij} < L_i$
- ♦ $L_i < q_{ij} < L_j$
- ♦ $L_j < q_{ij} < L_i + L_j$

Definisanje konvolucija je karakteristično za dva generalna slučaja:

Prvi slučaj se primenjuje kada je ispunjen uslov ($0 < q_{ij} < L_i$), pri čemu je za potpuno definisanje $F_{Z \setminus Z < q_{ij}}$ dovoljno razmatrati samo prvi interval, jer je u njemu Z_{ij} uvek manje od q_{ij} .

$$F_{Z \setminus Z < q_{ij}} = \frac{F_Z(z)}{F_Z(q_{ij})} = \frac{z^2}{q_{ij}^2} \quad (\text{P1.11})$$

$$f_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z) = \frac{d}{dz} [F_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z)] = \frac{2z}{q_{ij}^2} \quad (\text{P1.12})$$

Drugi slučaj se odnosi na definisanje $F_{Z \setminus Z > q_{ij}}$ kada je ($0 < q_{ij} < L_i$), pri čemu se razmatraju tri intervala funkcije F_Z , pošto je moguće da u svakom od njih važi $Z_{ij} > q_{ij}$.

Najpre razmatramo raspodelu funkcije $F_{Z \setminus Z > q_{ij}}$ na intervalu ($q_{ij} < z < L_i$).

$$F_{Z \setminus Z > q_{ij}} = \frac{F_Z(z) - F_Z(q_{ij})}{1 - F_Z(q_{ij})} = \frac{z^2 - q_{ij}^2}{2L_i L_j - q_{ij}^2} \quad (\text{P1.13})$$

Odnosno za interval ($L_i < z < L_j$) imamo:

$$F_{Z \setminus Z > q_{ij}} = \frac{F_Z(z) - F_Z(q_{ij})}{1 - F_Z(q_{ij})} = \frac{2L_i z - L_i^2 - q_{ij}^2}{2L_i L_j - q_{ij}^2} \quad (\text{P1.14})$$

Kao i za interval ($L_j < z < L_i + L_j$)

$$F_{Z \setminus Z > q_{ij}} = \frac{F_Z(z) - F_Z(q_{ij})}{1 - F_Z(q_{ij})} = 1 - \frac{(z - L_i - L_j)^2}{2L_i L_j - q_{ij}^2} \quad (\text{P1.15})$$

Smenom P1.10-12 u P1.7 dolazimo do konačnog rešenja za konvolucione funkcije i to za svaki od tri karakteristična intervala.

Slučaj I ($0 < q_{ij} < L_i$)

$$f_{Z \setminus Z > q_{ij}}(z) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{z}{L_i L_j - q_{ij}^2 / 2}, q_{ij} < z < L_i \\ \frac{L_i}{L_i L_j - q_{ij}^2 / 2}, L_i \leq z < L_j \\ \frac{L_i + L_j - z}{L_i L_j - q_{ij}^2 / 2}, L_j \leq z < L_i + L_j \end{array} \right\} \quad (\text{P1.16})$$

Analogno ovome se mogu izvesti konvolucione funkcije i za ostala dva intervala, pa imamo:

Slučaj II ($L_i < q_{ij} < L_j$)

$$f_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{z}{L_i(q_{ij} - L_i/2)}, 0 < z < L_i \\ \frac{1}{q_{ij} - L_i/2}, L_i < z < L_j \end{array} \right\} \quad (P1.17)$$

$$f_{Z \setminus Z > q_{ij}}(z) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{L_j - q_{ij} + L_i/2}, q_{ij} < z < L_j \\ \frac{L_i + L_j - z}{L_i(L_j - q_{ij} + L_i/2)}, L_j < z < L_i + L_j \end{array} \right\} \quad (P1.18)$$

Slučaj III ($L_j < q_{ij} < L_i + L_j$)

$$f_{Z \setminus Z \leq q_{ij}}(z) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{z}{L_i L_j - (q_{ij} - L_i - L_j)^2 / 2}, 0 < z < L_i \\ \frac{L_i}{L_i L_j - (q_{ij} - L_i - L_j)^2 / 2}, L_i \leq z < L_j \\ \frac{L_i + L_j - z}{L_i L_j - (q_{ij} - L_i - L_j)^2 / 2}, L_j \leq z < L_i + L_j \end{array} \right\} \quad (P1.19)$$

$$f_{Z \setminus Z > q_{ij}}(z) = \frac{L_i + L_j - z}{(q_{ij} - L_i - L_j)^2 / 2} \quad (P1.20)$$

Prilog 2. Distanca skladišnih jedinica različitih karakterističnih zona

Definisanje očekivanog rastojanja između dve skladišne lokacije koje se nalaze u različitim oblastima skladišta (npr. između zone 1 i zone 2) karakterišu dva slučaja u zavisnosti od relativne pozicije prolaza prikupljanja. Ako δ_i odnosno δ_j reprezentuje broj prolaza između donjeg prolaza skladišta i i -tog prolaza odnosno između centralnog vertikalnog prolaza i j -tog prolaza prikupljanja (Slika 4.4), tada je distanca između skladišnih lokacija duž dijagonalnog poprečnog prolaza, oblika:

$$|\delta_j d_v - \delta_i d_h| \quad (P2.1)$$

Slučaj A

Ovaj slučaj podrazumeva da prolazi i odnosno j ispunjavaju sledeća dva uslova:

- Skladišne lokacije se nalaze u levom delu skladišta i
- Tačka preseka i -tog prolaza sa dijagonalnim poprečnim prolazom je bliža P&D tačke nego presek j -tog prolaza za poprečnim prolazom.

Kada su ova dva uslova ispunjena, najkraća trasa kretanja je obezbeđena korišćenjem vertikalnog ili dijagonalnog poprečnog prolaza.

Korišćenje levog vertikalnog poprečnog prolaza u oblasti j -tih prolaza obuhvata uključivanje jednog od navedena dva prolaza prikupljanja u zoni 1 (j' ili j'') u trasu kretanja. Tačka preseka prolaza j' odnosno j'' i dijagonalnog poprečnog prolaza je nešto iznad odnosno ispod presečne tačke prolaza j sa istim poprečnim prolazom. Distance između skladišnih lokacija koje odgovaraju prolazu j' odnosno j'' su definisani preko funkcije P_{ij} .

$$P_{ij} = \begin{cases} (j' - i)a + L_{j'} + \delta_{j'} d_h - \delta_j d_v, & 2\delta_j d_v - 2\delta_{j'} d_h > a(1 - 1/m) - d_h \\ (j'' - i)a + L_{j''} + \delta_{j''} d_h - \delta_j d_v, & \text{za ostalo} \end{cases} \quad (\text{P2.2})$$

Najkraća distanca između skladišnih lokacija u prolazima i odnosno j koja odgovara vertikalnom poprečnom prolazu je:

$$D_v = x + 2v + P_{ij} + 2w + L_j - y \quad (\text{P2.3})$$

Ako se koristi dijagonalni poprečni prolaz, odgovarajuća dužina trase je:

$$D_d = L_i - x + 2w + \delta_j d_v - \delta_i d_h + L_j - y \quad (\text{P2.4})$$

Ako pretpostavimo indiferentnost u odnosu na izbor moguće trase kretanja, to podrazumeva da su njihove dužine međusobno jednake, pa imamo:

$$x = \frac{1}{2} [L_i - P_{ij} + \delta_j d_v - \delta_i d_h] - v \quad (\text{P2.5})$$

Ako se uvede parametar q_{ij}^x koji je identičan sa promenljivom x kada su dve moguće trase kretanja istih dužina, tada imamo:

$$q_{ij}^x = \frac{1}{2} [L_i - P_{ij} + \delta_j d_v - \delta_i d_h] - v \quad (\text{P2.6})$$

Ako je $x = q_{ij}^x$, tada su dve moguće trase kretanja iste dužine (po definiciji) i imamo slučaj njihove indiferentnosti. Ako je $x < q_{ij}^x$ najkraća trasa između skladišnih lokacija se odnosi na levi vertikalni poprečni prolaz, dok slučaj $x > q_{ij}^x$ odgovara korišćenju dijagonalnog poprečnog prolaza. Pošto je slučajno promenljiva X_i uniformno raspoređena, imamo da je:

$$P_r(x \leq q_{ij}^x) = \frac{q_{ij}^x}{L_i} \quad (\text{P2.7})$$

Očekivano rastojanje između skladišnih lokacija koje se nalaze u prolazu i odnosno j zona 1 odnosno 2 skladišta je:

$$\begin{aligned} E[TB_{ij}^{12(A)}] &= \{E[X \mid X \leq q_{ij}^x] + 2(v + w) + P_{ij} + L_j - E[Y]\} P_r(x \leq q_{ij}^x) + \\ &+ \{L_i - E[X \mid X > q_{ij}^x] + 2w + \delta_j d_v - \delta_i d_h + L_j - E[Y]\} P_r(x > q_{ij}^x) \\ &= \left[\frac{1}{2} (L_j + q_{ij}^x) + 2(v + w) + P_{ij} \right] \left[\frac{q_{ij}^x}{L_i} \right] + \\ &+ \left[\frac{1}{2} (L_i + L_j - q_{ij}^x) + w + \delta_j d_v - \delta_i d_h \right] \left[1 - \frac{q_{ij}^x}{L_i} \right] \end{aligned} \quad (\text{P2.8})$$

Slučaj B

Slučaj B se primenjuje u onim varijantama koje ne ispunjavaju uslove slučaja A i obuhvata sledeće kombinacije:

- Prolazi i odnosno j se nalaze na istoj strani skladišta, gde je presek prolaza j sa poprečnom prolazom bliži (ili jednak) P&D tački, nego presek sa i -tim prolazom i
- Prolazi i odnosno j su na suprotnim stranama skladišta.

Potencijalno najkraće trase između skladišnih lokacija za slučaj B je ilustrovano na slici 4.4. Korišćenjem gornjeg horizontalnog poprečnog prolaza za dostizanje j -og prolaza obuhvata uključivanje jednog od navedena dva prolaza prikupljanja u zoni 2 (i ili i') u trasu kretanja.

Tačka presek prolaza i' odnosno i'' i dijagonalnog poprečnog prolaza je nešto iznad odnosno ispod presečne tačke prolaza i sa istim poprečnim prolazom. Distance između skladišnih lokacija koje odgovaraju prolazu i' odnosno i'' su definisani preko funkcije P_{ij} .

$$P_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} (j-i')a + L_{i'} + \delta_{i'}d_v - \delta_i d_h \quad , \quad 2\delta_i d_h - 2\delta_{i'}d_v > a(1-1/m) - d_v \\ (j-i'')a + L_{i''} - \delta_{i''}d_v + \delta_i d_h \quad , \quad \text{za ostalo} \end{array} \right\} \quad (\text{P2.9})$$

Najkraća distanca koristeći normalni poprečni prolaz je:

$$D_p = y + 2v + P_{ij} + 2w + L_i - x \quad (\text{P2.10})$$

Drugi izbor trase kretanja se odnosi na dijagonalni poprečni prolaz. Ako su prolazi i odnosno j na suprotnim stranama, odgovarajuća dužina je:

$$D_{os} = L_i - x + 2w + \delta_j d_v + \delta_i d_h + L_j - y \quad (\text{P2.11})$$

Ako su prolazi i odnosno j na istim stranama, odgovarajuća dužina trase je:

$$D_{SE} = L_i - x + 2w - \delta_j d_v + \delta_i d_h + L_j - y \quad (\text{P2.12})$$

Ako definišemo parametar D_{ij} kao distancu duž dijagonalnog poprečnog prolaza koji je oblika:

$$D_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \delta_j d_v + \delta_i d_h \quad i, j \text{ na kontra stranama} \\ \delta_i d_h - \delta_j d_v \quad i, j \text{ na istim stranama} \end{array} \right\} \quad (\text{P2.13})$$

Tada je ukupna distanca skladišnih lokacija koristeći dijagonalni poprečni prolaz, oblika:

$$D_T = L_i - x + 2w + D_{ij} + L_j - y \quad (\text{P2.14})$$

Svi potencijalni prilazi i -tom prolazu si iz istog pravca, pa je izbor trase nezavisan od x . Postoje slučajevi gde je najpovoljnija trasa kretanja duž jednog od dva postojeća poprečna prolaza, pa je tada ona nezavisna od obe koordinata x i y (npr. ako se prolaz i nalazi u najvišem prolazu zone 1, a prolaz j u krajnje desnom delu zone 2). Indiferentnost u odnosu na izbor alternativne trase kretanja postiže se izjednačavanjem njihovih dužina, tj. imamo:

$$L_i - x + 2w + P_{ij} + 2v + y = L_i - x + 2w + D_{ij} + L_j - y \quad (\text{P2.15})$$

Odakle se dobija:

$$y = \frac{1}{2}[L_j + D_{ij} - P_{ij}] - v \quad (P2.16)$$

Ako se uvede parametar q_{ij}^y koji je identičan sa promenljivom y kada su dve moguće trase kretanja istih dužina, tada imamo:

$$q_{ij}^y = \frac{1}{2}[L_j + D_{ij} - P_{ij}] - v \quad (P2.17)$$

Ako je $y = q_{ij}^y$, tada su dve moguće trase kretanja iste dužine (po definiciji) i imamo slučaj njihove indiferentnosti. Ako je $y < q_{ij}^y$ najkraća trasa između skladišnih lokacije se odnosi na horizontalni poprečni prolaz, dok slučaj $y > q_{ij}^y$ odgovara korišćenju dijagonalnog poprečnog prolaza. Pošto je slučajno promenljiva Y_i uniformno raspoređena, imamo da je:

$$P_r(y \leq q_{ij}^y) = \frac{q_{ij}^y}{L_j} \quad (P2.18)$$

Očekivano rastojanje između skladišnih lokacija koje se nalaze u prolazu i odnosno j zone 1 odnosno 2, u slučaju kada ono zavisi od parametra q_{ij}^y je:

$$\begin{aligned} E[TB_{ij}^{12(B)}(q_{ij}^y)] &= \{L_i - E[X] + 2(v+w) + P_{ij} + E[Y \mid Y \leq q_{ij}^y]\}P_r(Y \leq q_{ij}^y) + \\ &+ \{L_i - E[X] + 2w + D_{ij} + L_j - E[Y \mid Y > q_{ij}^y]\}P_r(Y > q_{ij}^y) \\ &= \left[\frac{1}{2}(L_i + q_{ij}^y) + 2(v+w) + P_{ij} \right] \left[\frac{q_{ij}^y}{L_j} \right] + \\ &+ \left[\frac{1}{2}(L_i + L_j - q_{ij}^y) + 2w + D_{ij} \right] \left[1 - \frac{q_{ij}^y}{L_j} \right] \end{aligned} \quad (P2.19)$$

Konačno, očekivano rastojanje između bilo koje dve skladišne lokacije dislocirane u zonama 1 i 2 skladišta, je oblika:

$$E[TB_{ij}^{12(B)}] = \begin{cases} \frac{1}{2}(L_i + L_j) + 2(v+w) + P_{ij} & \text{za } P_{ij} + 2v + L_j < D_{ij} \\ \frac{1}{2}(L_i + L_j) + D_{ij} + 2w & \text{za } P_{ij} + 2v > D_{ij} + L_j \\ \left[\frac{1}{2}(L_i + q_{ij}^y) + 2(v+w) + P_{ij} \right] \left[\frac{q_{ij}^y}{L_j} \right] + \\ \left[\frac{1}{2}(L_i + L_j - q_{ij}^y) + 2w + D_{ij} \right] \left[1 - \frac{q_{ij}^y}{L_j} \right] & \text{za ostalo} \end{cases} \quad (P2.20)$$

Prilog 3. Distanca skladišnih jedinica između zona 1 i 3

Ako sa δ_i odnosno δ_j označimo broj prolaza između donjeg prolaza prikupljanja i prolaza i odnosno j , tada je distanca između ovih prolaza (i, j) definisana sa $d_h(\delta_i + \delta_j)$. Moguće trase kretanja se odnose na dva slučaja:

- Korišćenjem gornjeg poprečnog prolaza i
- Primenom trase duž dijagonalnog poprečnog prolaza.

Ako se koristi gornji poprečni prolaz, postoje dve potencijalne trase kretanja od prolaza i odnosno j do gornjeg poprečnog prolaza. Radi lakše analize, karakteristična zona 2 je podeljena na levi i desni deo (u odnosu na centar gornjeg poprečnog prolaza). Distanca između lokacije koja se nalazi u i -tom prolazu i centra gornjeg poprečnog prolaza je:

$$P_i = \left\{ \begin{array}{l} i \cdot a + L_i + \delta_i \cdot d_v - \delta_i \cdot d_h \quad , \quad 2\delta_i \cdot d_h - 2\delta_i \cdot d_v > a(1 - 1/m) - d_v \\ i \cdot a + L_i - \delta_i \cdot d_v + \delta_i \cdot d_h \quad , \quad \text{za ostalo} \end{array} \right\} \quad (\text{P2.21})$$

Distanca između lokacije koja se nalazi u j -tom prolazu i centra gornjeg poprečnog prolaza je:

$$P_j = \left\{ \begin{array}{l} j \cdot a + L_j + \delta_j \cdot d_v - \delta_j \cdot d_h \quad , \quad 2\delta_j \cdot d_h - 2\delta_j \cdot d_v > a(1 - 1/m) - d_v \\ j \cdot a + L_j - \delta_j \cdot d_v + \delta_j \cdot d_h \quad , \quad \text{za ostalo} \end{array} \right\} \quad (\text{P2.22})$$

Izbor najpovoljnije alternativne trase kretanje se vrši prema uslovu:

$$P_i + P_j + 2(v + w) < d_h(\delta_i + \delta_j) \quad (\text{P2.23})$$

Ako je uslov P2.23 ispunjen najpovoljnija trasa kretanja koristi gornji poprečni prolaz. U suprotnom, primenjuje se trasa duž dijagonalnog poprečnog prolaza. Ukupno očekivano rastojanje između skladišnih lokacija koje se odnose na prolaz i karakteristične zone 1 i prolaz j zone 3 je oblika:

$$E[TB_{ij}^{(13)}] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(L_i + L_j) + P_i + P_j + 2v + 4w, \quad P_i + P_j + 2(v + w) < d_h(\delta_i + \delta_j) \\ \frac{1}{2}(L_i + L_j) + d_h(\delta_i + \delta_j) + 2w, \quad \text{za ostalo} \end{array} \right\} \quad (\text{P2.24})$$

Prilog 4. Ograničenja funkcije cilja za četvero – intervalni model

Tržišni uslovi (definisani preko nabavnih i prodajnih cena) i osnovnih parametra skladišta (kapaciteta i početnih zaliha) su dati u sledećoj tabeli.

Red. broj	Cena robe (RSD)		Faktori troškova (RSD)		Početne zalihe		Kapaciteti skladišta	
	nabavna p_i	prodajna q_i	fiksni f	varijabilni v	A_r	A_p	B_r	B_p
1.	1500	1100	100	0,5	200	100	1500	1000
2.	1400	1300	100	0,5	200	100	1500	1000
3.	1200	900	100	0,5	200	100	1500	1000
4.	1800	1500	100	0,5	200	100	1500	1000

Troškovi skladištenja c_i se pretpostavljaju preko linearne funkcije, oblika:

$$c_i = f + vx_i \quad (\text{P4.1})$$

Gde su koeficijenti f i v dati u prethodnoj tabeli.

Konturni uslovi koji odgovaraju tokovima robe unutar skladišta (Slika P4.1) su dati sa:

$$1. \quad y_1(1) + z(1) \leq A_r \quad (\text{P4.2})$$

$$2. \quad x_1(1) + x_2(1) - y_1(1) - z(1) \leq B_r - A_r \quad (\text{P4.3})$$

$$3. \quad y_2(1) + y_3(1) \leq A_p \quad (\text{P4.4})$$

$$4. \quad z_1(1) + x_3(1) - y_2(1) - y_3(1) \leq B_p - A_p \quad (\text{P4.5})$$

$$5. \quad x_4(1) = y_4(1) \quad (\text{P4.6})$$

$$6. \quad y_1(2) + z(2) - x_1(1) - x_2(1) + y_1(1) + z(1) \leq A_r \quad (\text{P4.7})$$

$$7. \quad x_1(2) + x_2(2) - y_1(2) - z(2) + x_1(1) + x_2(1) - y_1(1) - z(1) \leq B_r - A_r \quad (\text{P4.8})$$

$$8. \quad y_2(2) + y_3(2) - x_3(1) - z(1) \leq A_p \quad (\text{P4.9})$$

$$9. \quad z(2) + x_3(2) - y_2(2) - y_3(2) + x_3(1) - y_2(1) - y_3(1) + z(1) \leq B_p - A_p \quad (\text{P4.10})$$

$$10. \quad x_4(2) = y_4(2) \quad (\text{P4.11})$$

$$11. \quad y_1(3) + z(3) - x_1(1) - x_2(1) + y_1(1) + z(1) - x_1(2) - x_2(2) + y_1(2) + z(2) \leq A_r \quad (\text{P4.12})$$

$$12. \quad x_1(3) + x_2(3) - y_1(3) - z(3) + x_1(1) + x_2(1) - y_1(1) - z(1) + x_1(2) + x_2(2) - y_1(2) - z(2) \leq B_r \quad (\text{P4.13})$$

$$13. \quad y_2(3) + y_3(3) - z(1) - x_3(1) - z(2) - x_3(2) \leq A_p \quad (\text{P4.14})$$

$$14. \begin{aligned} & z(3) + x_3(3) - y_2(3) - y_3(3) + z(1) + x_3(1) - \\ & - y_2(1) - y_3(1) + z(2) + x_3(2) - y_2(2) - y_3(2) \leq B_p - A_p \end{aligned} \quad (P4.15)$$

$$15. x_4(3) = y_4(3) \quad (P4.16)$$

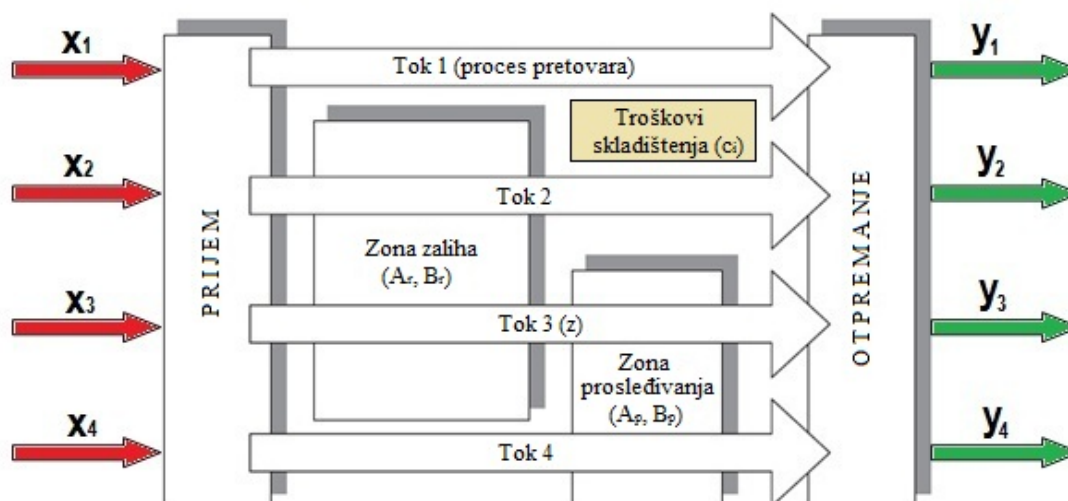
$$16. \begin{aligned} & y_1(4) + z(4) - x_1(1) - x_2(1) + y_1(1) + z(1) - x_1(2) - \\ & - x_2(2) + y_1(2) + z(2) - x_1(3) - x_2(3) + y_1(3) + z(3) \leq A_r \end{aligned} \quad (P4.17)$$

$$17. \begin{aligned} & x_1(4) + x_2(4) - y_1(4) - z(4) + x_1(1) + x_2(1) - y_1(1) - z(1) + x_1(2) + \\ & + x_2(2) - y_1(2) - z(2) + x_1(3) + x_2(3) - y_1(3) - z(3) \leq B_r - A_r \end{aligned} \quad (P4.18)$$

$$18. y_2(4) + y_3(4) - z(1) - x_3(1) - z(2) - x_3(2) - z(3) - x_3(3) \leq A_p \quad (P4.19)$$

$$19. \begin{aligned} & z(4) + x_3(4) - y_2(4) - y_3(4) + z(1) + x_3(1) - y_2(1) - y_3(1) + \\ & + z(2) + x_3(2) - y_2(2) - y_3(2) + z(3) + x_3(3) - y_2(3) - y_3(3) \leq B_p - A_p \end{aligned} \quad (P4.20)$$

$$20. x_4(4) = y_4(4) \quad (P4.21)$$



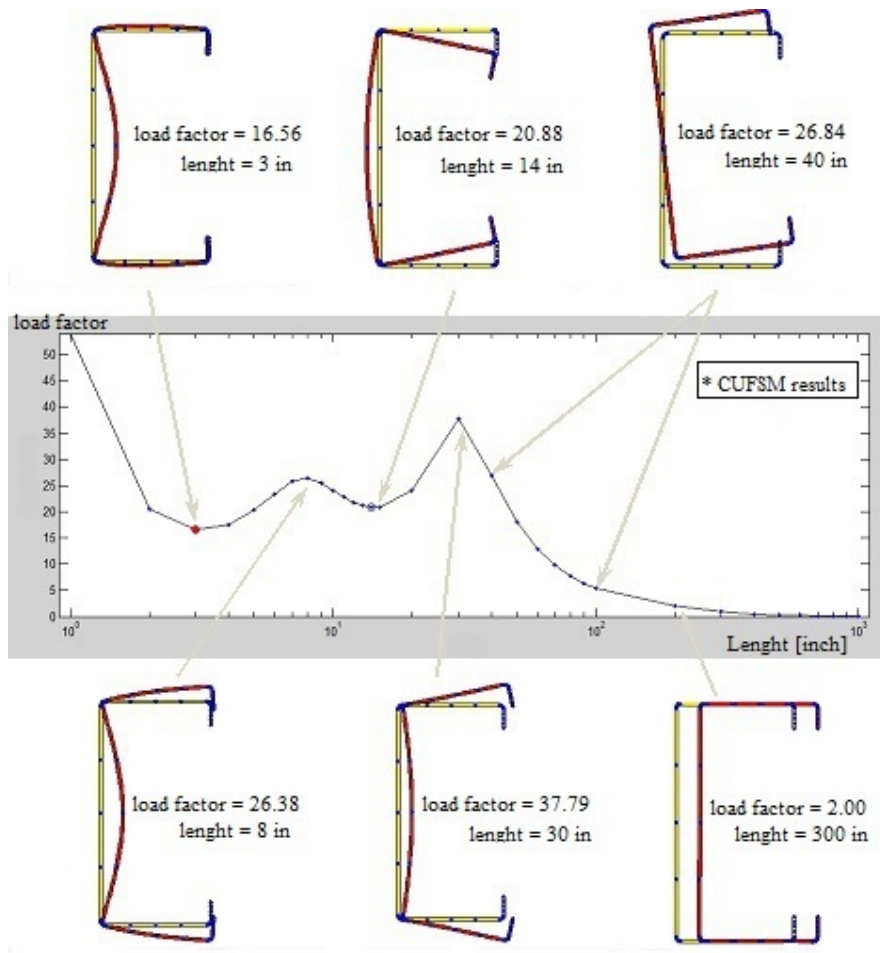
Slika P4.1. Struktura funkcionalnih površina i tokova skladišta

Numerički izlazni rezultati dinamičkog programiranja su dati u sledećoj tabeli.

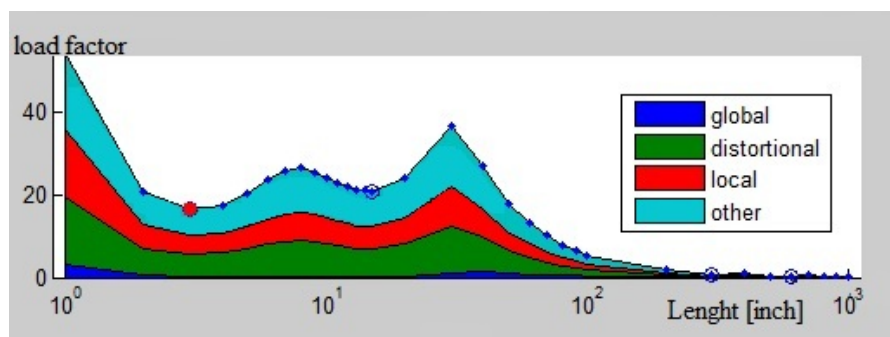
Interval	Ulazne količine robe (kom)				Izlazne količine robe (kom)				Tok 3
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	z
1	200	100	1500	1000	0	47	53	1450	200
2	200	100	1500	1000	1500	0	1100	1210	0
3	200	100	1500	1000	0	50	90	125	0
4	200	100	1500	1000	0	0	25	89	0

Prilog 5. Kriva i modaliteti izvijanja

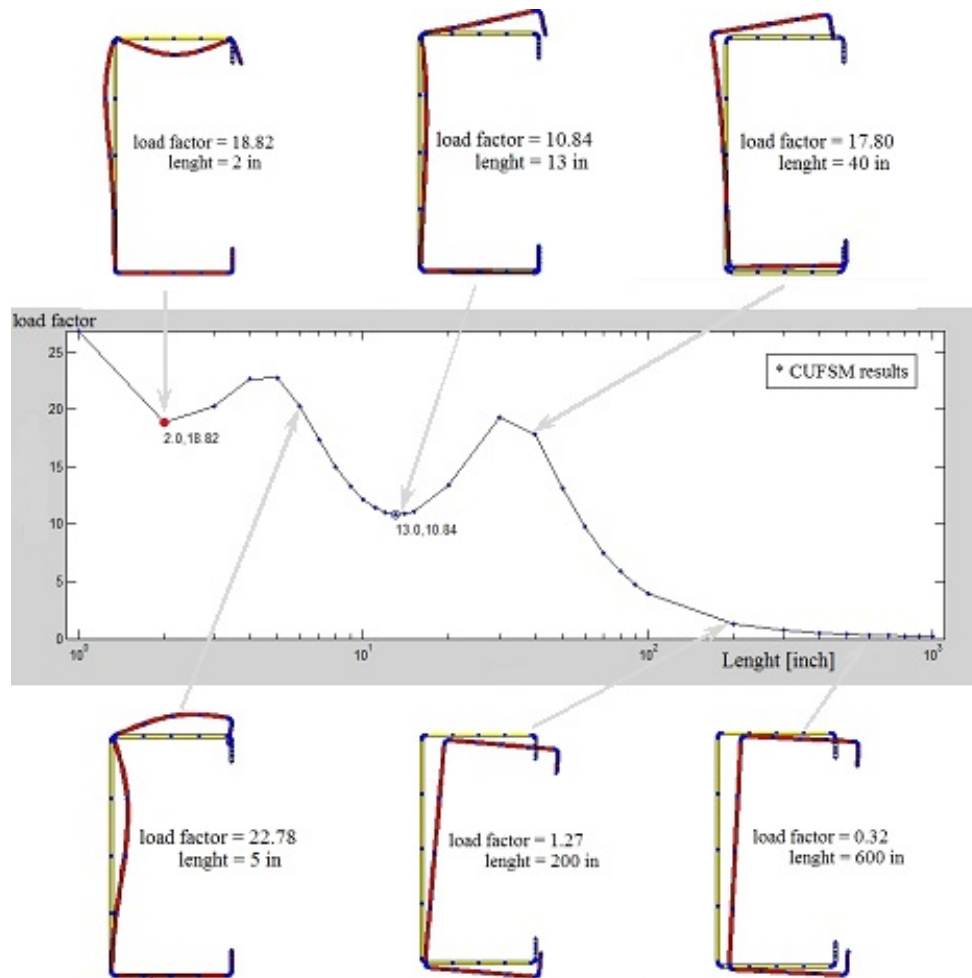
Prilog 5.1. Kriva i modaliteti izvijanja uniformno pritisnutog C profila (C 100×50×15×2), opterećenje 5 kN.



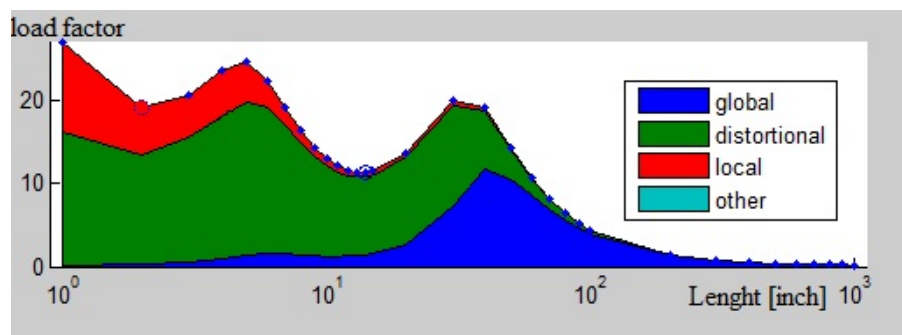
Prilog 5.2. Raspodela deformeone energije pritisnutog C profila (C 100x50x15).



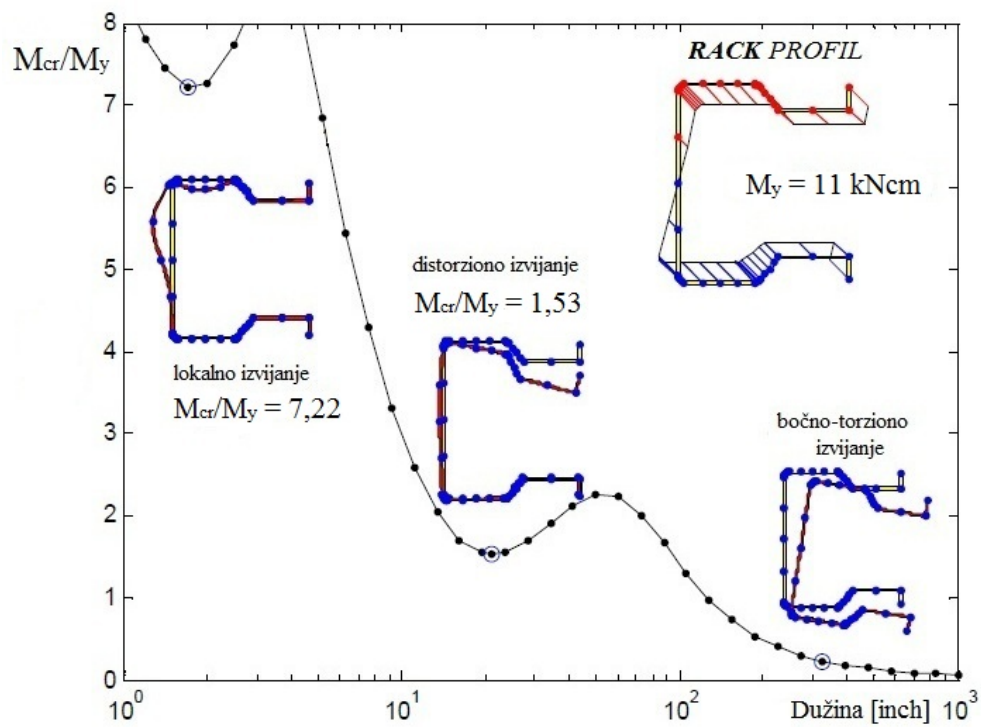
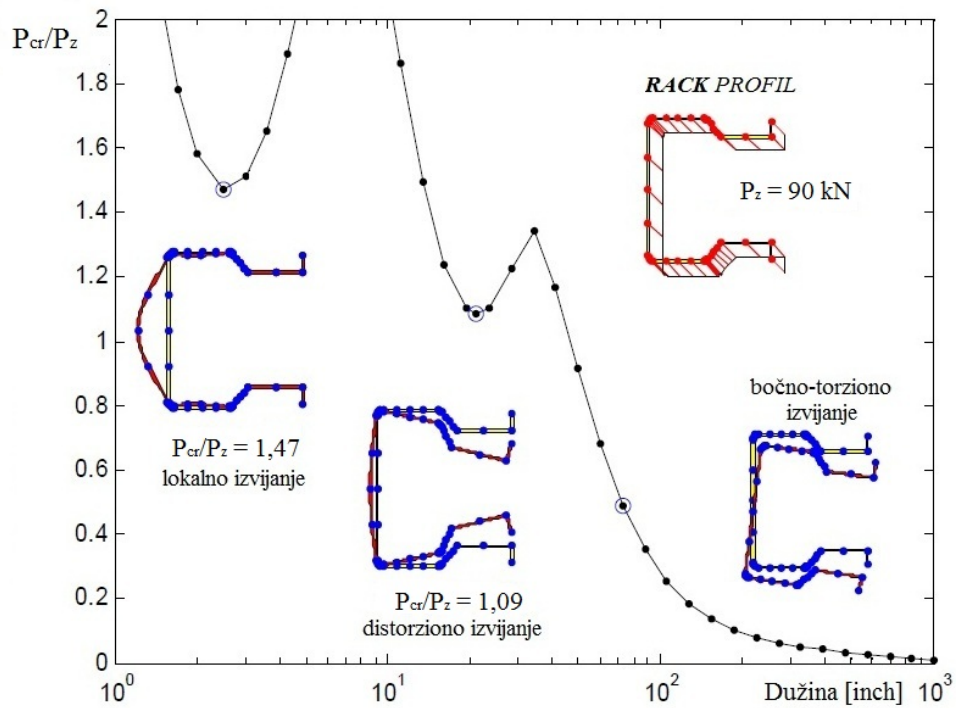
Prilog 5.3. Kriva i modaliteti izvijanja fleksiono opterećenog C profila (C 100×50×15×2), opterećenja od 5 kN na sredini nosača.

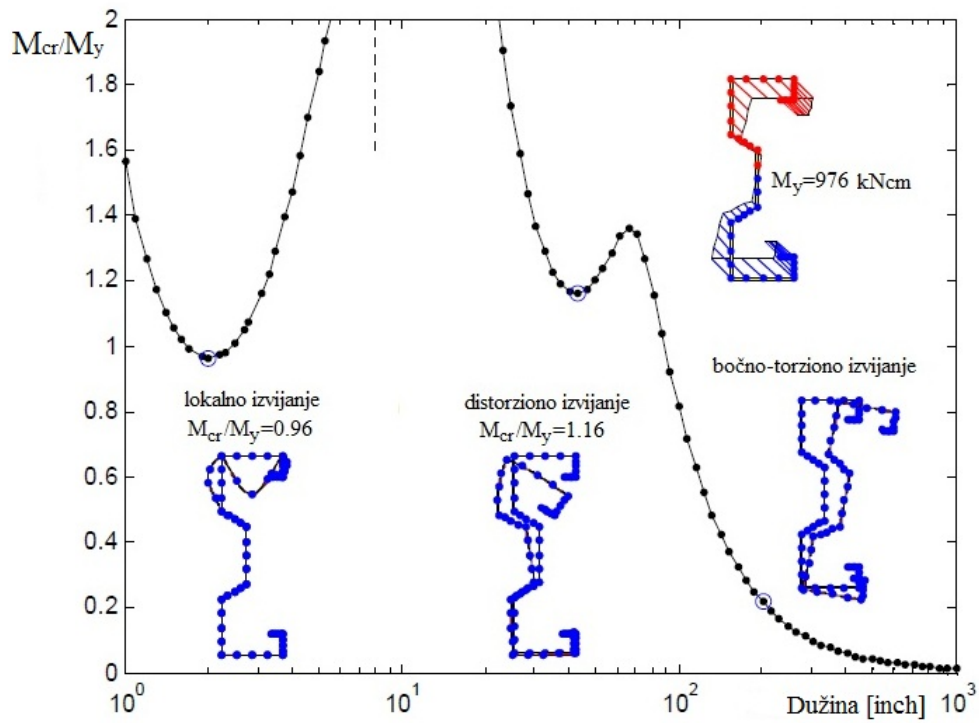
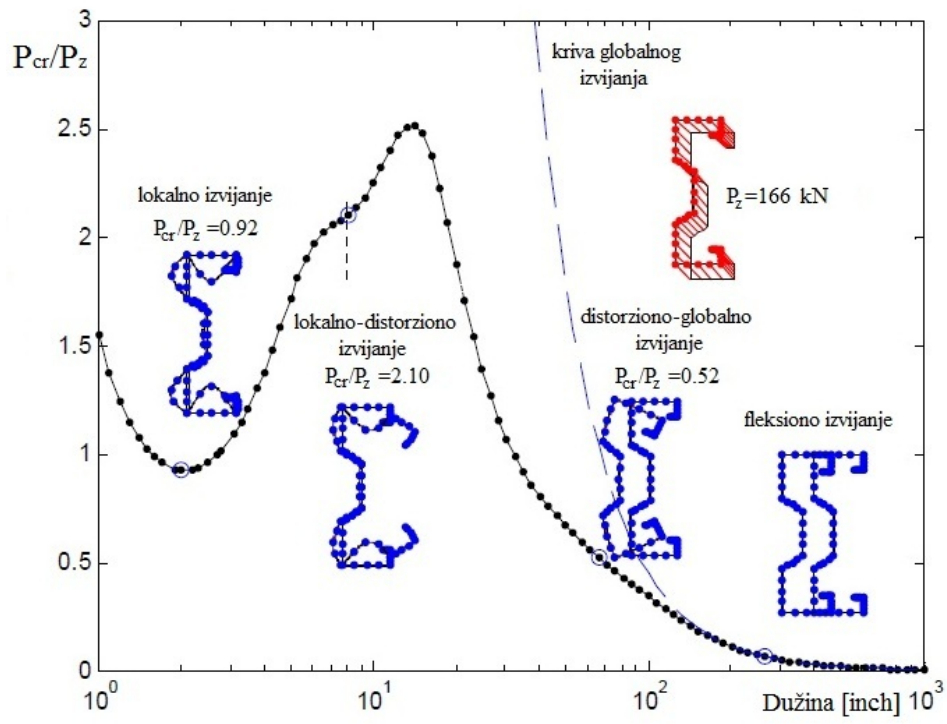


Prilog 5.4. Raspodela deformativne energije fleksionog C profila (C 100x50x15).

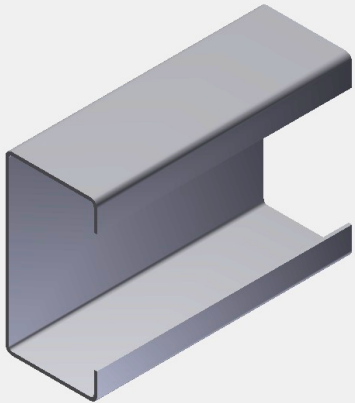
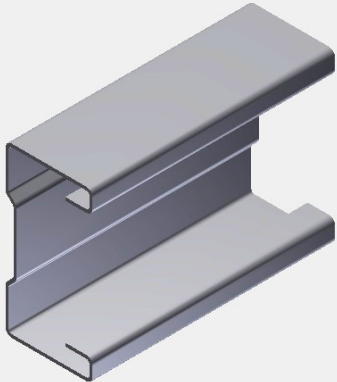
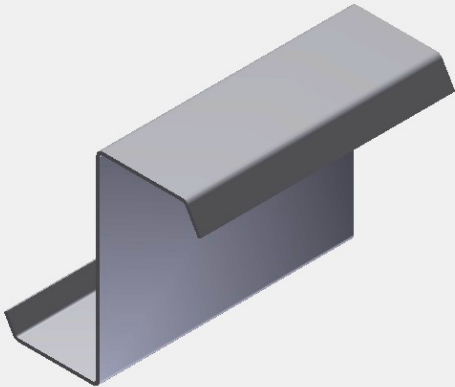
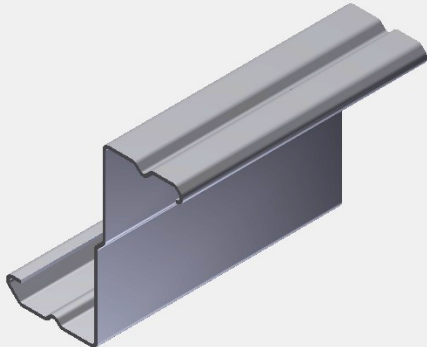
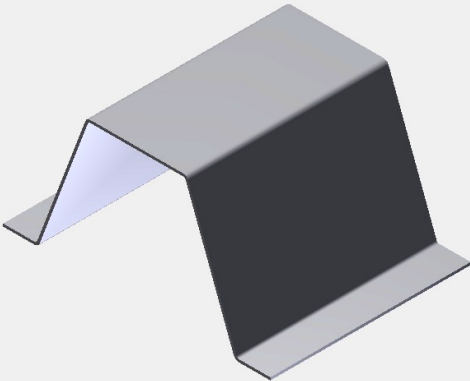
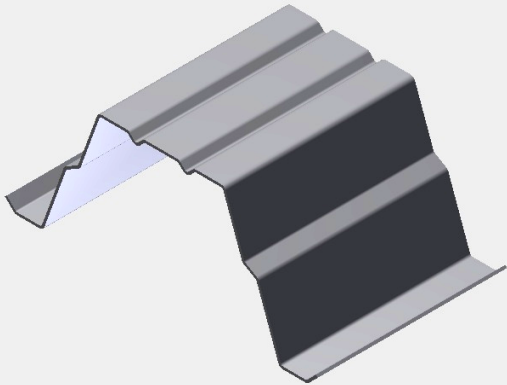


Prilog 6. Krive izvijanja tipičnih preseke stubova i nosača



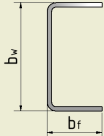
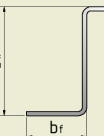
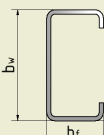
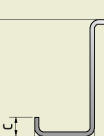
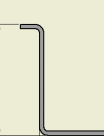
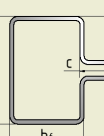



Prilog 7. Konvencionalni i optimizovani oblici tipičnih preseka

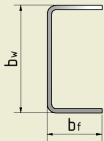
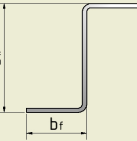
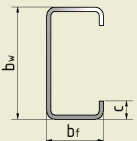
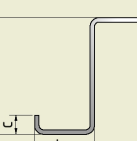
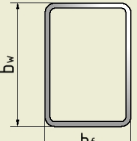
Konvencionalni oblici	Optimizovani oblici
	
	
	

Prilog 8. Koeficijenti lokalnog izvijanja profils

Prilog 8a. Koeficijent lokalnog izvijanja za aksijalno pritisnute stubove [115]

Red. br.	Naziv profila	Oznaka	Izgled	Koeficijent lokalnog izvijanja (k_l)	Uslovi
1.	Neukrućeni C profil	UC		$k_l = 4.0 - 1.59\eta + 70.14\eta^2 - 352.41\eta^3 + 629.81\eta^4 - 493.14\eta^5 + 144.07\eta^6$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$
2.	Neukrućeni Z profil	UZ			
3.	Ukrućeni C profil	SC		$k_l = 6.8 - 5.8\eta + 9.2\eta^2 - 6.0\eta^3$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $0.1 \leq \frac{c}{b_w} \leq 0.3$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$
4.	Ukrućeni Z profil	SZ			
5.	Hat profil	H			
6.	Rack profil	R		$k_l = 6.5 - 3.0\eta + 2.8\eta^2 - 1.6\eta^3$	$0.1 \leq \frac{d}{b_w} \leq 0.3$ $0.1 \leq \frac{c}{b_w} \leq 0.4$
7.	Pravougaoni cevasti presek	RHS		$k_l = 6.6 - 5.8\eta + 8.6\eta^2 - 5.4\eta^3$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$

Prilog 8b. Koeficijent lokalnog izvijanja za nosače opterećene savijanjem [115]

Red. br.	Naziv profila	Oznaka	Izgled	Koeficijent lokalnog izvijanja (k_l)	Uslovi
1.	Neukrućeni C profil	UC		$k_l = \eta^{-1.843}$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$
2.	Neukrućeni Z profil	UZ			
3.	Ukrućeni C profil	SC		$k_l = a - b(\mu - 0.2)$ $a = 81 - 730\eta + 4261\eta^2 - 12304\eta^3 + 17919\eta^4 - 12796\eta^5 + 3574\eta^6$ $b = 0, 0.1 \leq \mu \leq 0.2 \text{ i } 0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $0.2 < \mu \leq 0.3 \text{ i } 0.6 < \eta \leq 1.0$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $0.1 \leq \frac{c}{b_w} \leq 0.3$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$ $\mu = \frac{c}{b_w}$
4.	Ukrućeni Z profil	SZ			
5.	Pravougaoni cevasti presek	RHS		$k_l = 14.5 + 178\eta - 602\eta^2 + 649\eta^3 - 234\eta^4$	$0.2 \leq \eta \leq 1.0$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$

Prilog 9. Koeficijenti stabilnosti perforirane pritisnute ploče

Prilog 9a. Koeficijent krutosti

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \frac{r_2 r_7}{r_6} + \frac{r_1 r_5}{r_3} & s_2 &= r_6 - \frac{r_7 r_8}{r_6} - \frac{r_2 r_5}{r_3} & s_3 &= r_3 - \frac{r_2 r_5}{r_6} - \frac{r_1 r_4}{r_3} & s_4 &= \frac{r_5 r_8}{r_6} + \frac{r_2 r_4}{r_3} \\
 e_1 &= t_2 - \left(\frac{r_5}{r_3} + \frac{r_7}{r_6} \right) t_1 & e_2 &= t_2 - \left(\frac{r_5}{r_6} + \frac{r_4}{r_3} \right) t_1 \\
 r_1 &= \frac{c}{3EI_2} + \frac{h}{3EI_1} & r_2 &= \frac{h}{6EI_1} & r_3 &= \frac{c}{6EI_2} & r_4 &= \frac{c}{3EI_2} + \frac{h}{3EI_3} \\
 r_5 &= \frac{h}{6EI_3} & r_6 &= \frac{c}{6EI_4} & r_7 &= \frac{c}{3EI_4} + \frac{h}{3EI_3} & r_8 &= \frac{c}{3EI_4} + \frac{h}{3EI_1} \\
 t_1 &= \frac{h^3}{24EI_1} & t_2 &= \frac{h^3}{24EI_3} \\
 I_1 &= \frac{\delta \alpha_1^3}{12} & I_2 &= \frac{\delta b_1^3}{12} & I_3 &= \frac{\delta \alpha_2^3}{12} & I_4 &= \frac{\delta b_2^3}{12}
 \end{aligned}$$

Prilog 9b. Modifikovani koeficijenti funkcije ugiba ploče

$$\begin{aligned}
 A'_n &= \left[\frac{\alpha_n \sinh^2 \alpha_n + \sinh \alpha_n + \alpha_n \cosh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi) - \frac{\sinh \alpha_n + \alpha_n \cosh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{P_n + Q_n}{n^2} \right] \frac{\delta b^2}{\pi^2} \\
 B'_n &= \left[\frac{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n \sinh \alpha_n (\cosh \alpha_n + 1)}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi) + \frac{\alpha_n \sinh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{P_n + Q_n}{n^2} \right] \frac{\delta b^2}{\pi^2} \\
 C'_n &= \left[\frac{2\alpha_n \sinh \alpha_n (\cosh \alpha_n + 1) - \sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi) - \frac{2\alpha_n \sinh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{P_n + Q_n}{n^2} \right] \frac{\delta b^2}{\pi^2} \\
 D'_n &= \left[-\frac{\alpha_n \sinh^2 \alpha_n + \sinh \alpha_n + \alpha_n \cosh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi) + \frac{\sinh \alpha_n + \alpha_n \cosh \alpha_n}{\sinh^2 \alpha_n - \alpha_n^2} \frac{P_n + Q_n}{n^2} \right] \frac{\delta b^2}{\pi^2}
 \end{aligned}$$

Prilog 9c. Koeficijent deformacione energije

$$\begin{aligned}
 I_{mm} &= \int_0^{a_1} \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi x}{b} \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[\frac{b}{2n\pi} \left(\cosh \frac{n\pi a_1}{b} - 1 \right) + \frac{ab}{2\pi} \frac{1}{4b^2 m^2 + a^2 n^2} \left(an \left(\cos \frac{2m\pi a_1}{a} \cosh \frac{n\pi a_1}{b} - 1 \right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + 2mb \sin \frac{2m\pi a_1}{a} \sinh \frac{n\pi a_1}{b} \right) \right] \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right] \\
 J_{mn} &= \int_0^{a_1} \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \left(2 \cosh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \sinh \frac{n\pi x}{b} \right) \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[n \cosh \frac{n\pi a_1}{b} \left((4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \pi a_1 + a^2 n^2 (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \pi a_1 \cos \frac{2m\pi a_1}{a} + 16ab^4 m^3 \sin \frac{2m\pi a_1}{a} \right) + \right. \\
 &\quad \left. b \sinh \frac{n\pi a_1}{b} \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) \cos \frac{2m\pi a_1}{a} + (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \left(4b^2 m^2 + a^2 n^2 + 2amn^2 \pi a_1 \sin \frac{2m\pi a_1}{a} \right) \right) \right] \times \\
 &\quad \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi x}{b} \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[\frac{b}{2n\pi} \sinh \frac{n\pi a_1}{b} + \frac{ab}{2\pi} \frac{1}{4b^2 m^2 + a^2 n^2} \left(\frac{an \cos \frac{2m\pi a_1}{a} \sinh \frac{n\pi a_1}{b} + \right) \right] \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right] \\
 L_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \left(2 \sinh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \cosh \frac{n\pi x}{b} \right) \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[n \sinh \frac{n\pi a_1}{b} \left((4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \pi a_1 + a^2 n^2 (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \pi a_1 \cos \frac{2m\pi a_1}{a} + 16ab^4 m^3 \sin \frac{2m\pi a_1}{a} \right) + \right. \\
 &= \left. b \cosh \frac{n\pi a_1}{b} \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) \cos \frac{2m\pi a_1}{a} + (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \left(4b^2 m^2 + a^2 n^2 + 2amn^2 \pi a_1 \sin \frac{2m\pi a_1}{a} \right) \right) - \right. \\
 & \left. b \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) + (4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \right) \right] \times \\
 & \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi x}{b} \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[\frac{b}{2n\pi} \left(\cosh \frac{n\pi a_2}{b} - 1 \right) + \frac{ab}{2\pi} \frac{1}{4b^2 m^2 + a^2 n^2} \left(an \left(\cos \frac{2m\pi a_2}{a} \cosh \frac{n\pi a_2}{b} - 1 \right) + \right) \right] \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

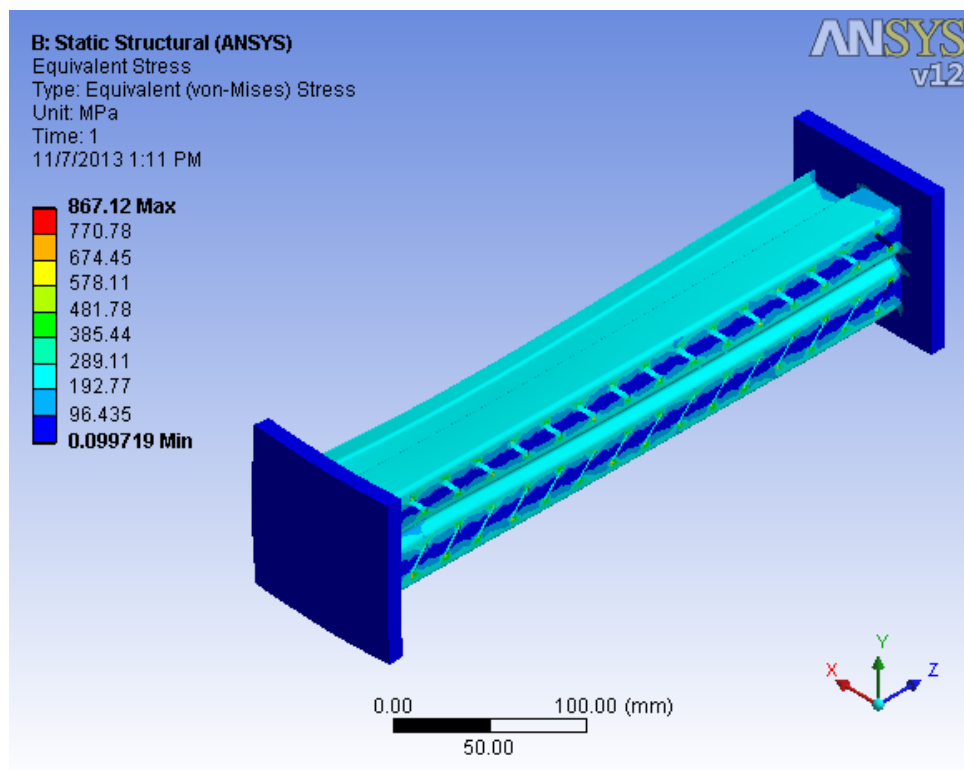
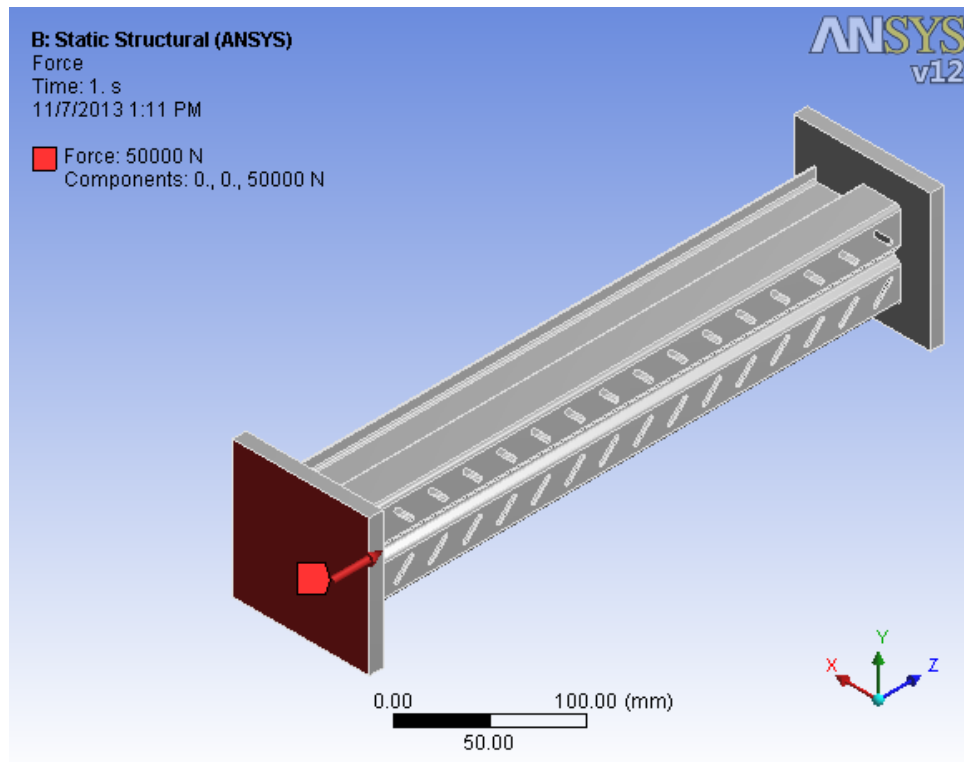
$$\begin{aligned}
 W_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \left(2 \cosh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \sinh \frac{n\pi x}{b} \right) \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[n \cosh \frac{n\pi a_2}{b} \left((4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \pi a_2 + a^2 n^2 (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \pi a_2 \cos \frac{2m\pi a_2}{a} + 16ab^4 m^3 \sin \frac{2m\pi a_2}{a} \right) + \right. \\
 &= \left. b \sinh \frac{n\pi a_2}{b} \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) \cos \frac{2m\pi a_2}{a} + (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \left(4b^2 m^2 + a^2 n^2 + 2amn^2 \pi a_2 \sin \frac{2m\pi a_2}{a} \right) \right) \right] \times \\
 & \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi x}{b} \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[\frac{b}{2n\pi} \sinh \frac{n\pi a_2}{b} + \frac{ab}{2\pi} \frac{1}{4b^2 m^2 + a^2 n^2} \left(an \cos \frac{2m\pi a_2}{a} \sinh \frac{n\pi a_2}{b} + \right) \right] \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

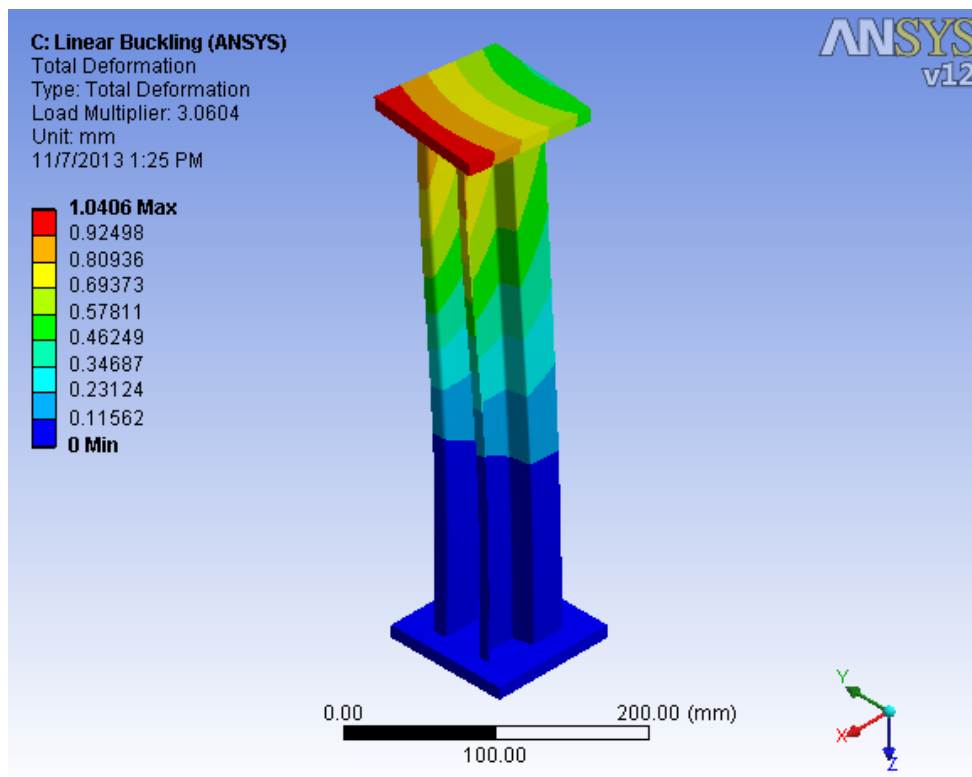
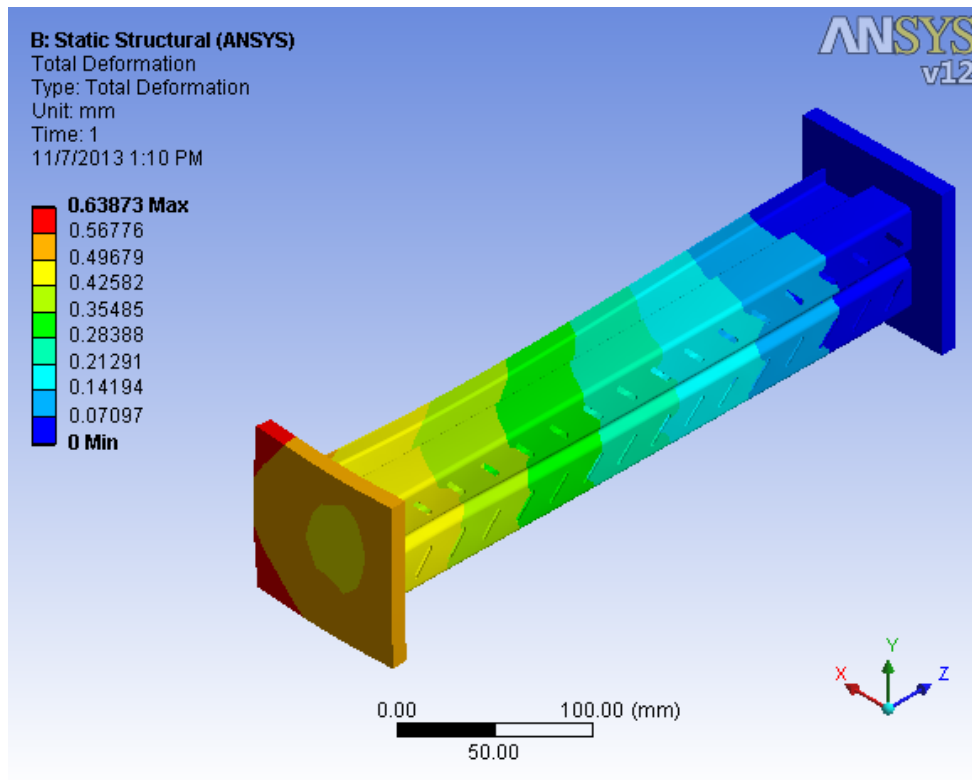
$$\begin{aligned}
 T_{mn} &= \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{m\pi x}{a} \left(2 \sinh \frac{n\pi x}{b} + \frac{n\pi x}{b} \cosh \frac{n\pi x}{b} \right) \sin^3 \frac{n\pi y}{b} dx dy = \\
 &= \left[n \sinh \frac{n\pi a_2}{b} \left((4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \pi a_2 + a^2 n^2 (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \pi a_2 \cos \frac{2m\pi a_2}{a} + 16ab^4 m^3 \sin \frac{2m\pi a_2}{a} \right) + \right. \\
 &= \left. b \cosh \frac{n\pi a_2}{b} \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) \cos \frac{2m\pi a_2}{a} + (4b^2 m^2 + a^2 n^2) \left(4b^2 m^2 + a^2 n^2 + 2amn^2 \pi a_2 \sin \frac{2m\pi a_2}{a} \right) \right) - \right. \\
 & \left. b \left(a^2 n^2 (12b^2 m^2 + a^2 n^2) + (4b^2 m^2 + a^2 n^2)^2 \right) \right] \times \\
 & \left[\frac{b}{n\pi} \left(\frac{1}{3} \cos^3 n\pi - \cos n\pi + \frac{2}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Prilog 10. Numerička analiza Ω profila

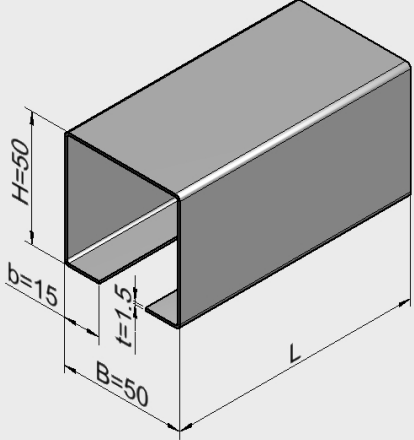
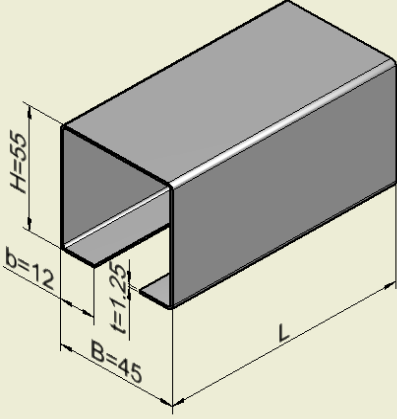
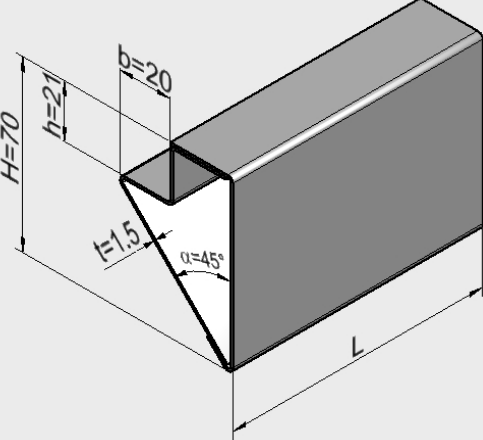
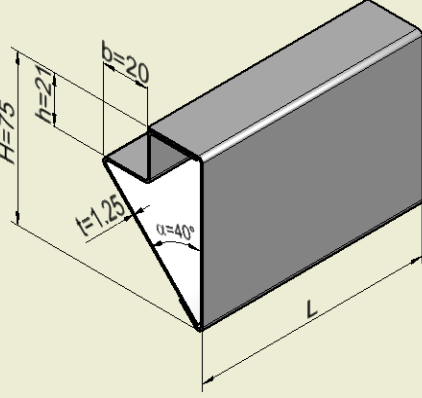
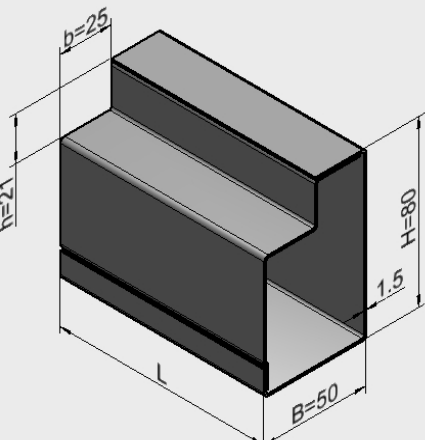
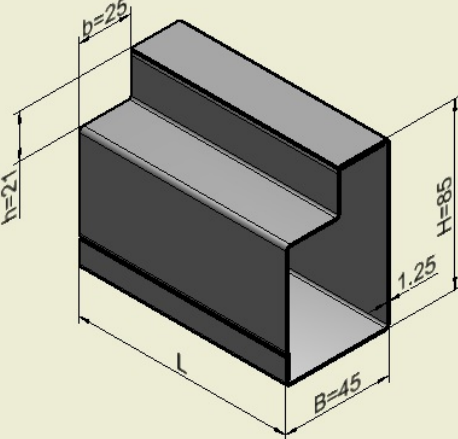
Prilog 10a. Statičko opterećenje i naprezanje stuba

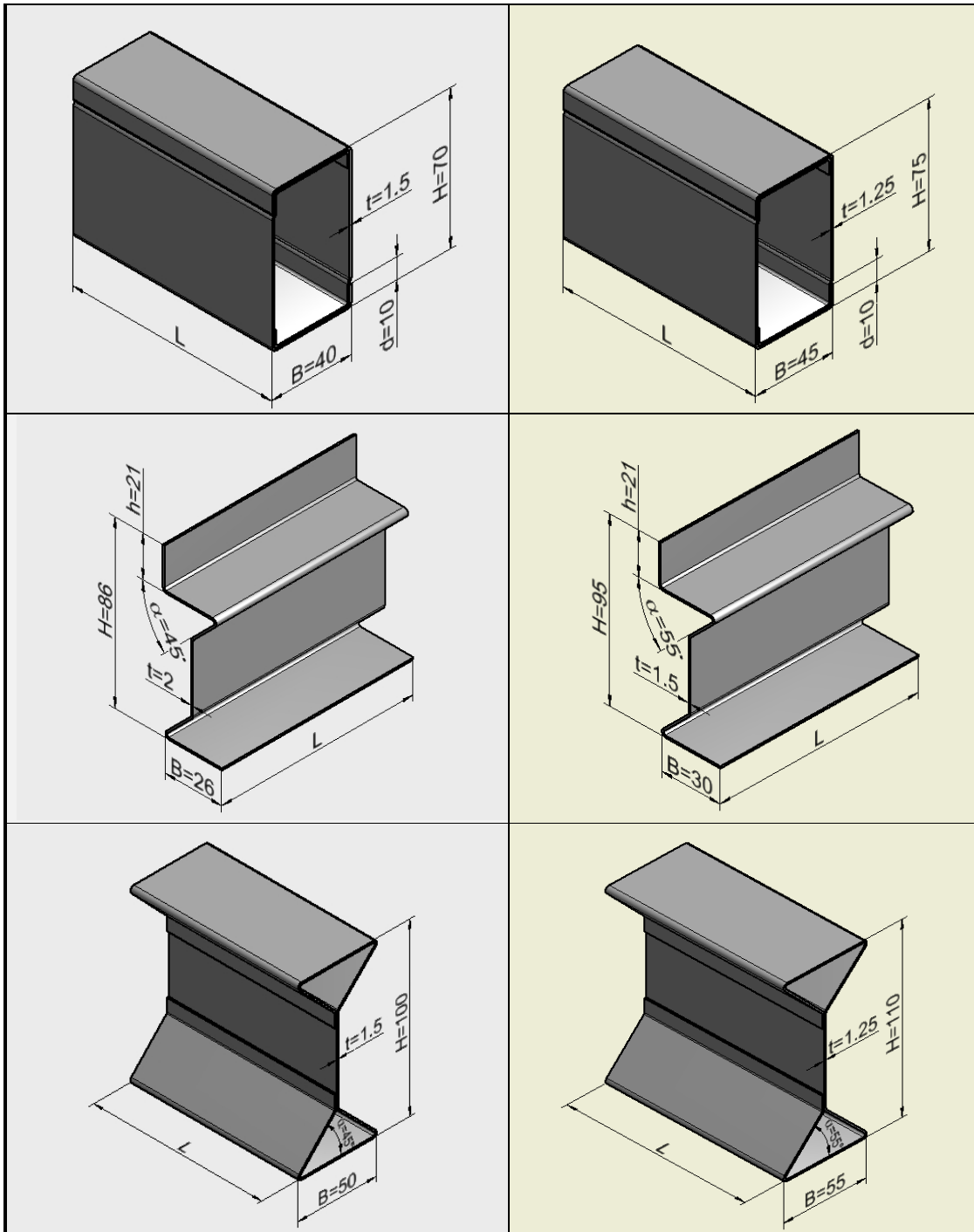


Prilog 10b. Deformacija stuba bez i sa uticajem izvijanja



Prilog 11. Poprečni preseki nosača regala (komercijalni i optimizovani).

Dimenzije postojećih (komercijalnih) preseka	Dimenzije optimizovanih preseka
	
	
	



Prilog 12. Poprečni preseki stubova regala (komercijalni i optimizovani).

Dimenzije postojećih (komercijalnih) preseka	Dimenzije optimizovanih preseka
