

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Иван В. Белошевић

**ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА
ЗА СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ
ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У ТЕХНИЧКИМ
ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА**

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Ivan V. Belošević

**OPTIMIZATION OF SORTING SIDINGS FOR
SIMULTANEOUS FORMATION OF MULTIGROUP
TRAINS IN MARSHALLING YARDS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА
СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У
ТЕХНИЧКИМ ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА

докторска дисертација

Иван В. Белошевић
Универзитет у Београду
Саобраћајни факултет

МЕНТОР: Проф. др Милош Ивић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације:

Проф. др Милош Ивић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Проф. др Милан Марковић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Проф. др Александар Марковић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Факултет организационих наука

ДАТУМ ОДБРАНЕ: _____

Иван В. Белошевић

ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА
СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У
ТЕХНИЧКИМ ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА

докторска дисертација

Београд, 2014

Универзитет у Београду

Саобраћајни факултет

Кључне речи: техничке теретне станице, планирање колосечних капацитета,
експлоатација железница, математичко моделирање

Научна област: Техничко-технолошке науке, подручје Саобраћај

Ужа научна област: Планирање, пројектовање и одржавање железничке
инфраструктуре

УДК број: 625.1 (043.3)

САЖЕТАК

Предмет истраживања у овој дисертацији је димензионисање потребних колосечних капацитета за симултано формирање вишегрупних возова применом математичких и рачунарских модела. У оквиру дисертације дат је систематски преглед до сада научно формулисаних или у пракси примењених метода формирања вишегрупних возова. Детаљно су анализирани теоријске поставке ових метода, технолошки процеси и ефекти њихове примене. Ова анализа омогућила је формулисање техничких и технолошких услова као основе за поставку математичких модела. Како формирање вишегрупних возова обухвата проблем сортирања кола за који је доказано да припада класи НП тешких проблема у оквиру дисертације развијени су и рачунарски модели са хеуристичким алгоритмима за њихово решавање.

Циљ предложене дисертације јесте дефинисање опсега целисходне примене узастопних и симултаних метода формирања вишегрупних возова на нивоу генерализованих проблема. У оквиру истраживања адекватне примене симултаних метода садржан је и примарни циљ дисертације, а то је формулисање математичких модела симултаног формирања вишегрупних возова заснованих на реалним условима како експлоатације тако и услова пројектовања. Такође, формулисани математички модели омогућавају истраживање утицаја стварних токова кола у процесу формирања на креирање решења. Предмет истраживања примарно је усмерен ка димензионисању потребних колосечних капацитета, али и подизању квалитета рада у техничким теретним станицама. У том смислу извршена је разрада више модела у зависности од врсте проблема планирања симултаног формирања вишегрупних возова. У дисертацији су развијени и верификовани хеуристички приступи који су примењиви при планирању и саобраћајном пројектовању комплекснијих техничких теретних станица.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: техничке теретне станице, планирање колосечних капацитета, експлоатација железница, математичко моделирање

ABSTRACT

The research presented in this thesis is the mathematical and computational modelling of the process of simultaneous formation of multigroup trains with the aim of optimal dimensioning of the sidings capacities and improving the operational quality in marshalling yards. The thesis presents a systematic review of the methods of multigroup train formation scientifically formulated and applied so far. Theoretical assumptions of these methods, technological processes and the effects of their application are analyzed in details. This analysis enabled the formulation of technical and technological requirements that are the basis for the mathematical model for dimensioning of sidings capacities. As the problem of forming multigroup trains includes the sorting of rolling stock that has been proved to belong to the class of NP hard problems, the computational models with heuristic algorithms are developed in this thesis in order to solve this problem.

The aim of the proposed thesis is to define the scope of purposeful application of successive and simultaneous methods of forming multigroup trains on the level of generalized problems. Within the research of the adequate application of simultaneous methods, the primary goal of the thesis is given, which is the formulation of the mathematical model of the simultaneous formation of multigroup trains based on real conditions of exploitation and construction requirements. Also, the mathematical model enables the impact of actual wagon flows in the formation process on the creation of solutions. The subject of the research is primarily aimed at dimensioning the sidings capacities, and raising the operational quality in marshalling yards. In this sense, the elaboration of several models is given, depending on the type of problem of planning the simultaneous multigroup train formation. The thesis develops and verifies the heuristic approaches that are applicable for planning and designing marshalling yards.

KEYWORDS: marshalling yards, planning of sidings capacity, railway operations, mathematical modelling

САДРЖАЈ

1	УВОД.....	1
2	КОНЦЕПТ ПОЈЕДИНАЧНИХ КОЛСКИХ ПОШИЉАКА И ЗНАЧАЈ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА.....	5
2.1	Транспорт робе железницом.....	6
2.2	Историјски развој и тренутно стање транспорта појединачних колских пошиљака.....	7
2.3	Потенцијал и будућност транспорта појединачних колских пошиљака.....	8
2.4	Појам вишегрупних возова.....	11
2.5	Резиме.....	13
3	ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ТЕХНИЧКИХ ТЕРЕТНИХ СТАНИЦА.....	14
3.1	Димензионисање капацитета ранжирних колосека.....	15
3.2	Аналитички модели за димензионисање капацитета ранжирних колосека.....	16
3.2.1	Основни аналитички модели.....	16
3.2.2	Аналитички модели система масовног опслуживања.....	18
3.3	Симулациони модели за димензионисање капацитета ранжирних колосека.....	19
3.4	Модели математичког програмирања за димензионисање капацитета ранжирних колосека.....	20
3.5	Резиме.....	22
4	МЕТОДЕ ЗА ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА.....	23
4.1	Методе за узастопно формирање вишегрупних возова.....	24
4.1.1	Метода једностепеног формирања.....	24
4.1.2	Футнерова метода.....	27
4.1.3	Општа метода.....	29
4.1.4	Специјална метода.....	31
4.1.5	Метода обједињених група.....	35
4.2	Методе за симултано формирање вишегрупних возова.....	36
4.2.1	Елементарна метода.....	37
4.2.2	Троугаона метода.....	40
4.2.3	Геометријска метода.....	44
4.3	Резиме.....	47

5	ТЕХНИЧКИ И ТЕХНОЛОШКИ УСЛОВИ ЗА ПРИМЕНУ МЕТОДА ЗА ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА	49
5.1	Утицај колосечних и прерадних постројења на процес формирања вишегрупних возова	50
5.1.1	Постројења за узастопно формирање вишегрупних возова	51
5.1.2	Постројења за симултано формирање вишегрупних возова	53
5.1.3	Специфична колосечна постројења за формирање вишегрупних возова	57
5.2	Утицај ангажованих маневарских локомотива на процес формирања вишегрупних возова	58
5.3	Утицај примењене технологије рада на процес формирања вишегрупних возова	59
5.3.1	Технологија рада на извлачњаку	59
5.3.2	Технологија рада на ранжирном брегу	62
5.4	Резиме	64
6	СИМУЛАЦИОНА АНАЛИЗА МЕТОДА ЗА СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА.....	66
6.1	Симулациони модели метода за симултано формирање вишегрупних возова	67
6.2	Анализа резултата.....	73
6.2.1	Ангажовање колосечних капацитета	73
6.2.2	Квалитет рада станица	77
6.3	Резиме	80
7	МАТЕМАТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА СИМУЛТАНОГ ФОРМИРАЊА ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА	82
7.1	Прелиминарне поставке математичке оптимизације	83
7.2	Бинарна интерпретација процеса сортирања кола	85
7.3	Математички модели за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова	89
7.3.1	Проблем оперативног планирања	90
7.3.2	Проблем тактичког планирања	93
7.3.3	Проблем стратешког планирања	97
7.4	Сложеност решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова	102
7.5	Хеуристички приступ решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова	104
7.5.1	Генерисање почетног решења	105
7.5.2	Формирање околине решења.....	106
7.5.3	Поступак претраге околине	107
7.6	Резиме	112

8	ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА И АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА.....	113
8.1	Улазни подаци.....	114
8.2	Тестирање модела.....	115
8.3	Анализа резултата.....	118
8.4	Резиме.....	122
9	ЗАКЉУЧАК.....	124
	ЛИТЕРАТУРА.....	127
	ПРИЛОЗИ.....	133
Прилог I	Коригована форма метода за симултано формирање вишегрупних возова.....	134
Прилог II	Идејно решење анализираних техничке теретне станице.....	141
Прилог III	Резултати тестирања математичког модела.....	142
	<i>БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ.....</i>	158

ЛИСТА СЛИКА У РАДУ

Слика 2.1	Захтеви корисника у вези реализације транспортне услуге.....	9
Слика 4.1	Метода једностепеног формирања вишегрупног воза.....	25
Слика 4.2	Футнерова метода формирања вишегрупног воза	28
Слика 4.3	Општа метода формирања вишегрупног воза	31
Слика 4.4	Специјална метода формирања вишегрупног воза	33
Слика 4.5	Специјална метода формирања вишегрупног воза - модификована.....	34
Слика 4.6	Метода обједињених група за формирање вишегрупног воза.....	35
Слика 4.7	Елементарна метода за симултано формирање вишегрупних возова.....	38
Слика 4.8	Потребан број колосека за накупљање - елементарна метода.....	39
Слика 4.9	Очекивани број померања у фази сортирања - елементарна метода	39
Слика 4.10	Троугаона метода за симултано формирање вишегрупних возова	42
Слика 4.11	Потребан број колосека за накупљање - троугаона метода	43
Слика 4.12	Очекивани број померања у фази сортирања - тоугаона метода.....	43
Слика 4.13	Геометријска метода за симултано формирање вишегрупних возова	45
Слика 4.14	Потребан број колосека за накупљање - геометријска метода	46
Слика 4.15	Очекивани број померања у фази сортирања - геометријска метода.....	47
Слика 5.1	Постројења за формирање вишегрупних возова.....	50
Слика 5.2	Постројења за узастопно формирање вишегрупних возова.....	51
Слика 5.3	Облици станичне групе колосека	52
Слика 5.4	Постројења за симултано формирање вишегрупних возова.....	53
Слика 5.5	Помоћна постројења за симултано формирање вишегрупних возова	54
Слика 5.6	Специфична техничка решења за формирање вишегрупних возова	58
Слика 5.7	Графикон технологије рада формирања вишегрупног воза на извлачњаку.....	60
Слика 5.8	Графикон технологије рада једног корака сортирања кола на ранжирном брегу.....	63
Слика 6.1	Блок шема плана сортирања кола применом геометријске методе.....	70
Слика 6.2	Подсистем креирања колског тока за сортирање.....	70
Слика 6.3	Подсистем плана сортирања	71
Слика 6.4	Подсистем корака сортирања.....	72
Слика 6.5	Подсистем завршетка плана сортирања.....	72
Слика 6.6	Испис резултата.....	72

Слика 6.7	Појединачне теоријске дужине колосека.....	75
Слика 6.8	Теоријско одступање дужина колосека	76
Слика 6.9	Стварно одступање дужина колосека	76
Слика 6.10	Стваран број колосека	77
Слика 6.11	Теоријско време сортирања кола.....	78
Слика 6.12	Стварно време сортирања кола.....	79
Слика 6.13	Укупан број помераних кола у току сортирања.....	80
Слика 6.14	Просечан број померања по колима.....	80
Слика 7.1	Бинарна интерпретација плана сортирања кола	86
Слика 7.2	Принцип локалног претраживања	105
Слика 7.3	Трансформације унутар предложених околина при решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова	108
Слика 7.4	Генерална метода променљивих околина.....	111
Слика 8.1	Подела тестираних задатака сортирања.....	115
Слика 8.2	Структура генерисаних задатака сортирања према времену извршавања програма егзактне методе.....	116
Слика 8.3	Структура анализираних случајева	117
Слика 8.4	Потребан број колосека групе за накупљање.....	119
Слика 8.5	Средње одступање дужина колосека у односу на колосек са највећом дужином у групи за накупљање.....	120
Слика 8.6	Укупан број померених кола у току формирања вишегрупних возова	121
Слика 8.7	Потребно време сортирања кола	122
Слика П1	Коригована елементарна метода за симултано формирање вишегрупних возова.....	137
Слика П2	Коригована троугаона метода за симултано формирање вишегрупних возова	138
Слика П3	Коригована геометријска метода за симултано формирање вишегрупних возова.....	139

ЛИСТА ТАБЕЛА У РАДУ

Табела 4.1	Законитост сортирања кола - Футнерова метода.....	27
Табела 4.2	Законитост сортирања кола - општа метода.....	30
Табела 4.3	Законитост накупљања кола - троугаона метода.....	40
Табела 4.4	Законитост накупљања кола - геометријска метода.....	44
Табела 8.1	Улазни подаци математичког модела.....	114
Табела П1	Формирање блокова кола вишегрупних возова применом елементарне методе.....	136
Табела П2	Формирање блокова кола вишегрупних возова применом троугаоне методе.....	136
Табела П3	Формирање блокова кола вишегрупних возова применом геометријске методе.....	136
Табела П4	Резултати добијени применом CPLEX MIP Solver-a.....	142
Табела П5	Резултати добијени применом GVNS методе.....	144
Табела П6	Резултати добијени применом методе најбољег унапређења.....	146
Табела П7	Резултати добијени применом методе првог унапређења.....	148
Табела П8	Резултати добијени применом методе симулираног каљења.....	150
Табела П9	Резултати добијени применом VND методе.....	152
Табела П10	Резултати добијени применом RVND методе.....	154
Табела П11	Резултати у форми показатеља ангажованих колосечних капацитета и квалитета рада станице.....	156

1 Увод

У току свог индустријског развоја железница се од издвојених пруга које повезују локалне индустријске центре развила у сложени систем са тежњом формирања јединствене континенталне железничке мреже. Оваквим умрежавањем пруга, станице су добијале кључну улогу за ефикасно функционисање железничког саобраћаја. Истовремено у њима се појављивао читав низ проблема из области димензионисања инфраструктурних капацитета и планирања технологије рада, а који уједно представљају основне оптимизационе проблеме железничког саобраћаја.

Проблем ранжирања, као једна од основних карактеристика теретног железничког саобраћаја, везан је за специјализоване техничке теретне станице. У техничким теретним станицама врши се расформирање и формирање возова, при чему формирање вишегрупних возова представља један од комплекснијих проблема. Вишегрупни возови формирају се од више група кола које су изранжиране према одредиштима за које се упућују. Формирање вишегрупних возова омогућава концентрацију маневарског рада на мањи број техничких теретних станица и рационализацију њихових капацитета.

Настојање железничких управа да изврше рационализацију ранжирног система и да отпочну примену „чврстог реда вожње“ у теретном саобраћају актуелизује примену метода за симултано формирање вишегрупних возова. Симултане методе пружају могућност једновременог формирања вишегрупних возова и тиме ублажавају зависност укупног времена формирања од броја возова за отпрему.

Општа је процена да су ангажовани капацитети у техничким теретним станицама неравномерно искоришћени, односно да постоји несклад између колосечних капацитета, примењене технологије ранжирања и обима рада за које су ове станице пројектоване. Да би пројектовани колосечни капацитети били у складу са предвиђеним условима и обимом рада потребно је поставити математичке моделе димензионисања. Оправданост формулисања математичких модела димензионисања колосечних капацитета за формирање вишегрупних возова је и у чињеници да су досадашњи приступи били засновани на унапред дефинисаним поступцима сортирања кола који не зависе од структуре колских токова на формирању.

Предмет истраживања ове дисертације је формулисање математичког модела симултаног формирања вишегрупних возова заснованог на реалним условима, како експлоатације, тако и услова пројектовања. Математичким моделом омогућен је утицај стварних токова кола у процесу формирања на креирање решења потребних колосечних капацитета и технологије рада. Предмет истраживања примарно је усмерен ка димензионисању потребних колосечних капацитета, али и подизању квалитета рада у техничким теретним станицама. У том смислу извршена је разрада више модела у зависности од врсте проблема планирања симултаног формирања вишегрупних возова.

Након уводних разматрања у **другом поглављу** представљен је концепт појединачних колских пошиљака. Поред сагледавања тренутног стања транспорта појединачних колских пошиљака у оквиру овог поглавља приказан је потенцијал који се може реализовати уклањањем недостатака и испуњавањем захтева корисника у вези ове транспортне услуге. У оквиру овог поглавља дефинисани су појам вишегрупних возова и њихова улога у вршењу транспорта појединачних колских пошиљака.

У **трећем поглављу** дат је преглед постојећих метода за димензионисање колосечних капацитета техничких теретних станица. Поред ослањања на препоруке Међународне заједнице железничких управа и искуствене закључке појединих аутора, димензионисање колосечних капацитета до сада је вршено на основу успостављених зависности у оквиру основних аналитичких модела или применом система масовног опслуживања. Такође, досадашњи симулациони

моделу и модели математичког програмирања, који су коришћени за анализирање искоришћености постојећих ранжирних система и планирање развоја појединих подсистема, представљени су у оквиру овог поглавља.

Преглед до сада научно формулисаних или у пракси примењених метода формирања вишегрупних возова дат је у **четвртом поглављу**. Методе за формирање вишегрупних возова подељене су према карактеру рада на групу метода за узастопно формирање појединачних возова и групу метода за једновремено формирање више возова. У оквиру овог поглавља прво су представљене основне карактеристике ових група, а затим су детаљно анализаране теоријске поставке, технолошки процес и ефекти примене сваке од метода.

У **петом поглављу** анализирани су технички и технолошки услови за практичну реализацију метода формирања вишегрупних возова. Процес формирања возова захтева ангажовање адекватних станичних постројења и маневарских капацитета у комбинацији са одговарајућом организацијом и технологијом рада. Ова анализа омогућила је формулисање техничко-технолошких услова који су потом уграђени у предложене математичке моделе симултаног формирања вишегрупних возова.

У **шестом поглављу** спроведена је симулациона анализа метода за симултано формирања вишегрупних возова и анализирани су ефекти плана сортирања кола приказани кроз потребан број колосека и њихову дужину, потребно време формирања и остварени обим маневарског рада. Такође, анализирана је осетљивост метода на промене укупног броја кола и броја група у возовима на формирању.

У **седмом поглављу** формулисани су математички модели за изналажење оптималних планова сортирања кола при решавању проблема оперативног, тактичког или стратешког планирања симултаног формирања вишегрупних возова. Како је одређивање плана сортирања кола у реалним условима рада комплексан проблем, у овом поглављу разрађен је хеуристички приступ решавања проблема применом метода локалног претраживања.

У **осмом поглављу** извршено је тестирање модела и анализа добијених резултата. Тестирање модела у сегменту добијања оптималних вредности

реализовано је егзактном методом мешовитог целобројног програмирања *CPLEX MIP Solver*, док су алгоритми хеуристичких метода локалног претраживања развијени применом програмског језика *Python 2.6*. Поред уобичајеног поступка за сагледавање ефикасности математичког модела и хеуристичког приступа извршена је детаљнија анализа добијених резултата. Као и у случају симулационе анализе постојећих метода за симултано формирање вишегрупних возова резултати су представљени у форми показатеља ангажованих колосечних капацитета и квалитета рада станице. На крају, у **деветом поглављу** наведена су закључна разматрања и могућности даљих истраживања.

2 Концепт појединачних колских пошиљака и значај вишегрупних возова

Појединачне колске пошиљке представљају основни елемент традиционалног концепта транспорта робе железницом. У оквиру овог концепта, пошиљке сачињене од мањих или већих група кола накупљају се у техничким теретним станицама у циљу формирања возова којима се транспортују на заједничким деловима превозног пута.

Појединачне колске пошиљке су у прошлости биле доминантно заступљене у оквиру теретног железничког транспорта. Данас, овај облик транспорта на железници је преполовљен. Овакав драстичан пад транспорта појединачних колских пошиљака проистекао је из очигледних недостатака у погледу задовољавања захтева корисника. На домаћем тржишту концепт појединачних колских пошиљака није конкурентан друмском саобраћају због кратких релација на којима се не могу ублажити временски губици задржавања робе и кола услед неизбежног ранжирања. С друге стране, на међународном тржишту овај концепт је неконкурентан услед бројних процедуралних и организационих неусаглашености између железничких управа.

Ипак у последњих пар година, како од стране заједнице железничких управа тако и удружења корисника железничког транспорта, истиче се неподељено мишљење да се систем појединачних колских пошиљака мора очувати и учинити профитабилним. У оквиру међународне иницијативе за реформом железничког система покренута су бројна питања и напори да се недостаци концепта појединачних колских пошиљака превазиђу. Железничким управама сугерисано је да се усмере на либерализацију и интеграцију тржишта, оптимизацију колских токова и веће учешће вишегрупних возова у даљинском саобраћају. У досадашњој организацији колских токова, даљински саобраћај реализовао се једногрупним возовима, док су вишегрупни возови првенствено били заступљени у локалном саобраћају у оквиру сакупљања и доставе кола између техничких теретних станица и крајњих станица. Већим учешћем вишегрупних возова у даљинском саобраћају може се у великој мери утицати на скраћивање времена које кола проведу у техничким теретним станицама.

2.1 Транспорт робе железницом

Теретни саобраћај на железници могуће је организовати применом ранжирног система или директним повезивањем крајњих станица искључујући потребу за ранжирањем. Према томе, транспорт робе на железници могуће је реализовати возовима по концепту:

- појединачних колских пошиљака - конвенционални систем транспорта робе са ранжирним станицама као местима сабирања и прераде токова кола и возова,
- маршрутног транспорта - систем транспорта код којег кола и возови не пролазе кроз процес ранжирања, тј. саобраћају директно од утоварних до истоварних места,
- интермодалног транспорта – систем транспорта робе товарним јединицама где железница представља део интегрисаног транспортног ланца. У оквиру овог концепта возови саобраћају између интермодалних терминала у којима се товарне јединице накупљају и претоварају у циљу промене вида транспорта без директног руковања робом.

2.2 Историјски развој и тренутно стање транспорта појединачних колских пошиљака

У периоду настанка железничког транспорта, роба је превожена директним возовима на изолованим пругама повезујући искључиво крајње станице. Развојем железничког саобраћаја формирале су се мреже железничких пруга, а са њима и прва сакупљања колских пошиљака у возове који су их превозили на заједничким деоницама. Од тада, транспорт појединачних колских пошиљака је растао и трпео бројне промене и унапређења. Међутим, откако се друмски теретни саобраћај почео развијати шездесетих година прошлог века, започео је пад у обиму транспорта појединачних колских пошиљака железницом. Седамдесетих година прошлог века овај вид железничког транспорта обухватао је око 30% укупног обима теретног саобраћаја у ЕУ-15, а у наредних само десет година изгубио је око 10% обима (Бошкових 2007). Од тада овај пад се наставио, тако да данас транспорт појединачних колских пошиљака износи свега 5-10% укупног обима транспорта робе на различитим европским тржиштима (Marinov и др. 2012). Неконкурентност у односу на друмски транспорт, високи трошкови: почетно-завршних операција, превоза кола до техничких теретних станица и ранжирног рада на формирању возова чине овај начин транспорта неатрактивним за већину железничких управа. Ово је резултирало драстичним смањењем транспортне мреже колских пошиљака, а у неким земљама (Шпанија и Норвешка) и потпуним укидањем концепта појединачних колских пошиљака (Fried 2010).

Потпуно укидање концепта појединачних колских пошиљака оставило би велике последице на транспортну активност. Без могућности превоза појединачних колских пошиљака железницом, корисници би били принуђени искључиво на друмски транспорт, евентуално и на речни уколико би био могућ. Ова потенцијална ситуација у којој друмски транспорт не би имао алтернативу довела би до пораста цена транспорта, већих загушења у саобраћају и већег загађења животне средине.

2.3 Потенцијал и будућност транспорта појединачних колских пошиљака

У укупном уделу тржишта *EU-15* транспорт појединачних колских пошиљака на удаљеностима већим од *300 km* заступљен је свега *7%* у односу на *16%* заступљености на националним тржиштима и удаљеностима до *300 km* (*Selenik & Ferk 2009*). Тржиште Европе је средње величине, географски разубуђене индустрије и пољопривреде које карактеришу недовољни токови робе за покретање маршрутних возова. Ово је један од показатеља тржишног потенцијала даљинског транспорта појединачних колских пошиљака који би се могао реализовати уклањањем недостатака и побољшањем конкурентности у транспорту.

Поред недостатака који произилазе из основних карактеристика железничког саобраћаја и који се тешко могу превазићи, недостаци са аспекта корисника леже у брзини обраде захтева за транспортом, у доступности информација о кретању пошиљака у току транспорта и непоузданости термина њиховог приспећа. Ови недостаци су највећим делом последица мањка интеграција националних тржишта у области међународног транспорта појединачних колских пошиљака. Све ово урушава конкурентност транспорта појединачних колских пошиљака у поређењу са друмским транспортом.

Са становишта корисника, најважнији критеријум за одабир услуге је *цена*. Након цене, захтева се квалитет услуге који се огледа у *поузданости* реализације транспорта, *доступности информација* о кретању пошиљака (праћење пошиљака и предвиђање очекиваног приспећа у реалном времену) и *бржој изради понуде* за појединачне потребе корисника (слика 2.1).

Транспорт колских пошиљака је конкурентан друмском транспорту по питању цене на већим удаљеностима, иако има високе трошкове ранжирног рада. Повећање квалитета услуге је дуготрајан процес који захтева сарадњу националних тржишта и бројна улагања у оптимизационе и информационе системе.



Слика 2.1 Захтеви корисника у вези реализације транспортне услуге

Поузданост реализације транспорта пошиљака је од великог значаја за корисника услуге, јер су поуздане доставе основа у оптимизацији процеса снабдевања. На међународном нивоу, поузданост појединачних националних железница варира у зависности од организације колских токова, па међународна мрежа транспорта појединачних колских пошиљака без добре координације не може да обезбеди високу поузданост својим корисницима.

Доступност информација о пошиљкама такође варира међу националним железницама и до сада јој се није придавао значај. На међународном нивоу доступност информација о кретању пошиљака је јако битна и захтева примену квалитетног и координираног информационог система у оквиру којег би корисницима били доступни сви неопходни подаци добијени од стране националних железничких компанија које учествују у транспортном процесу.

У друмском саобраћају, потенцијални корисник добија понуду за транспорт у току радног дана, али када је транспорт појединачних колских пошиљака у питању за израду понуде неопходно је неколико дана. Резултати до сада реализованих студија о потенцијалу појединачних колских пошиљака (*Selenik & Ferk 2009*) показали су да се због дугог чекања на понуду изгуби око 20% потенцијалних захтева за транспортом.

Европско удружење корисника транспортних услуга (*ESC – European Shippers' council*) нарочито се залаже за оживљавање транспорта колских пошиљака. Став ове организације је да су корисници тренутно мање заинтересовани за овај вид транспорта због слабе поузданости, али да је потреба за овим видом транспорта очигледна. Према извештају (*Jagt 2010*) пад понуде у оквиру транспорта појединачних колских пошиљака у претходних неколико година се догађа баш у периоду када потреба за таквом услугом железнице расте. Овај пад у понуди нарочито прети областима тешке индустрије (металској, аутомобилској и хемијској) да остану без основног вида транспорта.

Највећи изазов транспорта појединачних колских пошиљака је у оптимизацији колских токова (*Ahuja и др. 2007, Borndörfer и др. 2012*). Како би се створили услови за адекватно моделирање овог проблема јако је важно изучити услове под којима се формирају возови у техничким теретним станицама. У току овог изучавања потребно је анализирати потребне колосечне капацитете, маневарски рад и време задржавања кола при формирању возова, а што се посебно односи на вишегрупне возове.

Јасно је да транспорт појединачних колских пошиљака тренутно има бројне недостатке кад је у питању задовољење потреба корисника. Како овај концепт транспорта на међународном нивоу лако може задовољити основни критеријум - цену, дотле остале захтеве корисника (пре свега високу поузданост и доступност информација) железница не може остварити без успостављања квалитетне сарадње, координације и интеграције националних тржишта (*Krasensky 2012*).

Многе развијене националне железничке управе разумеју неопходност интеграција и повезивања. У досадашњем периоду промовисано је више пројеката умрежавања појединачних националних транспортних тржишта, али углавном везаних за главне железничке коридоре. Како ниједан од досадашњих облика

интеграција није понудио свеобухватно решење за европски транспорт појединачних колских пошиљака, Међународна заједница железничких управа (*UIC – Union Internationale des Chemins de Fer*) иницирала је 2007. године *Xrail* пројекат.

Седам европских земаља придружило се *Xrail* пројекту (Немачка, Чешка Аустрија, Швајцарска, Белгија, Луксембург и Шведска) оснивајући 2010. године алијансу, са средиштем у Бриселу. *Xrail* алијанса отворена је за сваку европску железничку управу која испуњава прописане стандарде квалитета *Xrail*-а. Циљ је стварање једног општег европског оквира за транспорт појединачних колских пошиљака у којем ће се проблем лошег квалитета услуге превазићи понудом високе поузданости, уговореним међународним редом возње и комерцијалним брзинама које одговарају захтевима корисника. Даљим развојем ове алијансе, на целокупном европском тржишту, повећаће се конкурентност концепта појединачних колских пошиљака у односу на друмски транспорт.

2.4 Појам вишегрупних возова

Транспорт појединачних колских пошиљака могуће је реализовати једногрупним и вишегрупним возовима. Вишегрупни возови формирају се од две или више група кола које су посебно, свака за себе, изранжиране према одредиштима за које се упућују. Формирањем вишегрупних возова смањује се задржавање кола ради накупљања и омогућава концентрација маневарског рада на мањи број техничких теретних станица. Ова концентрација маневарског рада доводи до повећаног ангажовања колосечних капацитета, маневарских средстава и особља у њима, али с друге стране омогућава рационализацију капацитета и технологије рада у успутним и упутним станицама где се маневрисање своди на издвајање већ формираних група кола.

У конвенционалном концепту теретног железничког саобраћаја вишегрупни возови су, пре свега, били заступљени у сегменту локалног саобраћаја кроз категорију сабирних возова. Сабирни возови саобраћају на деоницама између суседних техничких теретних станица с циљем достављања и сакупљања кола по међустаницама и њиховог превозења до наредне техничке теретне станице.

Станица покретања формира сабирни воз тако што кола за сваку међустаницу издваја у посебну групу, а групе распоређује у возу према редоследу међустаница. Како би се остварила редовност превоза робе сабирним возовима потребно је да саобраћају свакога дана. Ипак, редовност превоза сабирним возовима много више зависи од постојања потребе за превозом него од реда вожње. Може се рећи да данас сабирни возови не само да не саобраћају свакога дана, већ се на многим правцима и укидају. На преосталим правцима, дешава се да буду отпремљени само пет до десет пута у току једног месеца.

Удруживањем националних железничких управа на међународном нивоу (попут формирања *Xrail* алијансе) вишегрупни возови све више добијају на значају и у сегменту даљинског саобраћаја. Даљински вишегрупни возови обједињују профитабилност железничког превоза на већим релацијама и флексибилност превоза појединачних колских пошиљака. Ова врста возова има улогу у повезивању већег броја упутних станица (станица, терминала, деоница, чворова) како би се мали токови робе објединили на заједничком делу превозног пута и формирали комплетни даљински возови. Принцип формирања даљинских вишегрупних возова у основи је исти као код сабирних возова, изузев у томе што просторни распоред упутних станица колских пошиљака није доминантан фактор који утиче на редослед уврштавања група кола у возу. У том смислу, вишегрупни возови могу бити са фиксним или слободним редоследом група у свом саставу.

Вишегрупни возови имају значајну улогу и у локалном теретном саобраћају великих железничких чворова, индустријских комплекса и лука. У оквиру чвора, локални теретни возови достављају кола за робне станице и индустријске колосеке. У циљу рационализације колосечних капацитета и технолошких операција робних станица формирање ових достава, према редоследу утоварно-истоварних колосека, треба извршити у самој техничко теретној станици. На овај начин избегава се изградња пријемних и ранжирних група колосека у робним станицама и дуплирање ранжирног рада. Индустријски железнички саобраћај представља важну карику у транспортном ланцу између индустрије и јавног транспорта, док се лучком железницом реализује претовар и повезивање водног саобраћаја са јавном железничком мрежом залеђа. Индустријске железнице и луке карактерише развијена мрежа колосека са великим бројем манипулативних места,

која је неретко подељена у већи број рејона које опслужују индустријске или лучке техничке теретне станице. И у случају ових техничких станица, једна од улога им је формирање индустријских возова у којима се кола групишу према манипулативним местима у циљу што бржег и једноставнијег достављања.

2.5 Резиме

У међународном железничком транспорту доминирају маршрутни и интермодални возови, при чему железница губи укупан удео на тржишту услед све мањег учешћа у транспорту појединачних колских пошиљака. Иако транспорт појединачних колских пошиљака у даљинском саобраћају по питању цене испуњава захтеве корисника, обим колских токова се смањује. Пад обима колских токова последица је пре свега слабе међународне сарадње што опет резултира, с аспекта корисника, slabим квалитетом услуге у виду смањене поузданости, недостатка информација о кретању пошиљака, касним испорукама и дугим чекањем на добијање понуде за тражену услугу.

Са аспекта организације и управљања транспорта појединачних колских пошиљака, највећи проблем је у оптимизацији колских токова и начину формирања даљинских возова. Формирањем даљинских вишегрупних возова смањило би се задржавање кола ради накупљања, а самим тим и укупно време које кола проведу у техничким теретним станицама. Такође, формирање вишегрупних возова омогућава концентрацију маневарског рада на мањи број техничких теретних станица и рационализацију њихових капацитета.

Ставови о потреби очувања појединачних колских пошиљака усмерени су првенствено на међународно тржиште. На основу таквих ставова покрећу се пројекти који омогућавају бољу сарадњу и повезаност у сврху постизања високог нивоа квалитета овог транспорта. Додатно, на развој међународног транспорта појединачних колских пошиљака ставља се велики акценат и у циљу очувања животне средине.

3 Димензионисање колосечних капацитета техничких теретних станица

Димензионисање колосечних капацитета техничких теретних станица представља веома важан проблем у железничком саобраћају, како са аспекта изградње и реконструкције ових станица, тако и са аспекта технолошког пројектовања њиховог рада у току експлоатације. Колосечни паркови техничких теретних станица се у основи деле на две главне групе колосека:

- пријемно-отпремне колосеке и
- ранжирне колосеке.

У пријемно-отпремне колосеке спадају колосеци: пријемног, отпремног и транзитног парка. Димензионисање броја пријемно-отпремних колосека врши се према обиму саобраћаја возова, карактеру обраде возова у станици и технолошким нормама предвиђеним за њихову обраду. У досадашњим истраживањима велики број радова био је посвећен димензионисању колосечних капацитета пријемно-отпремних колосека. Детаљан преглед радова у којима је разматран овај проблем и у којима су предложене различите методе за његово решавање дат је у оквиру истраживања (*Jokić 1979, Ivić 1992*).

Ранжирни колосеци служе за расформирање и формирање возова, односно за ранжирање кола према ранжирним задацима. У поређењу са бројем радова на тему димензионисања пријемно-отпремних колосека ранжирни колосеци су ретко истраживани.

3.1 Димензионисање капацитета ранжирних колосека

У оквиру димензионисања колосечних капацитета ранжирног парка утврђују се потребан број колосека и њихова дужина за накупљање кола и формирање састава возова, које станица врши према расподели ранжирног рада на мрежи. Број и дужина ранжирних колосека зависи од броја ранжирних задатака, јачине колских токова ових задатака, структуре станице (врсте колосечних паркова и прерадних постројења), организације и међусобне усклађености рада на расформирању и формирању возова.

Неадекватно димензионисање колосечних капацитета ранжирног парка, у смислу недовољног капацитета, утиче на повећање обима маневарског рада и задржавања кола у станици. Последице недовољних колосечних капацитета ранжирног парка манифестују се поскупљењем прерадног процеса, смањењем обрта кола и брзине превоза робе. С друге стране, у случају предимензионисаних капацитета долази до негативних ефеката у које, пре свега, спадају високи трошкови изградње и одржавања. У циљу спречавања пројектовања неадекватних колосечних капацитета, Међународна заједница железничких управа (*Jokić 1979*), али и поједини аутори (*Milošević 1971, Hiller 1983*) дефинисали су препоруке за опремање и димензионисање техничких теретних станица на основу вишегодишњег искуства. Према овим препорукама, број колосека ранжирног парка треба одредити у складу са технолошким задацима станице поштујући принцип формирања састава возова још у фази накупљања кола. Код димензионисања колосечних капацитета ранжирног парка треба тежити додељивању посебног ранжирног колосека за сваки ранжирни задатак станице, при чему се од овог става може одступити узимајући у обзир јачине колских токова ових задатака. Уколико је неки ранжирни задатак са јаким колским током, онда се за накупљање кола овог задатка могу предвидети два или више ранжирних колосека. С друге стране, уколико је неколико ранжирних задатака са слабијим колским токовима, онда се за њихово накупљање може одредити један заједнички колосек уз накнадно повећање обима рада на формирању. Минимална препоручена јачина дневног колског тока ранжирног задатка за издвајање посебног ранжирног колосека износи *60 до 80 кола/дан (Hiller 1983)*. Такође, исти

аутор износи препоруку да се за један ранжирни задатак усвоје два колосека уколико се формира најмање *6 састава/дан* (за случај ранжирног парка), односно *4 састава/дан* (за случај ранжирно-отпремног парка).

Дужине ранжирних колосека треба да одговарају јачинама колских токова који се накупљају на њима, при чему се у раду (*Ivić и др. 2010*) препоручује њихово међусобно усклађивање и ограничавање одступања најдужих колосека до *300 m* у односу на просечну дужину колосека ранжирног парка.

Формирање састава једногрупних возова могуће је извршити на колосецима накупљања без ангажовања додатних колосечних капацитета. Према препорукама (*Porović 2000*), вишегрупне возове са високим интензитетом накупљања кола по групама (најчешће су то двогрупни и трогрупни возови) могуће је формирати на овим колосецима засебним накупљањем појединачних група уз њихово накнадно обједињавање. За формирање вишегрупних возова са ниским интензитетом накупљања кола по групама (најчешће су то возови са већим бројем упутних станица) препоручује се употреба посебне колосечне групе. Потребан број колосека ове групе одређује се у зависности од примењене методе за формирање вишегрупних возова и највећег броја упутних станица који се може појавити у неком од возова.

3.2 Аналитички модели за димензионисање капацитета ранжирних колосека

Поред ослањања на претходно поменуте препоруке које су базиране на искуству у вези приближног одређивања потребног броја колосека, димензионисање колосечних капацитета ранжирног парка могуће је извршити на основу успостављених зависности у оквиру аналитичких модела.

3.2.1 Основни аналитички модели

Према *Бартенову (Milošević 1979)*, укупан број колосека за накупљање кола у ранжирном парку може се одредити на основу броја ранжирних задатака, јачине њихових колских токова и времена задржавања кола у току накупљања (3.1).

$$K_{nak} = n_{rz} + (N_k - mn_{rz}) \frac{t_z}{24} \quad (3.1)$$

где су:

- K_{nak} – укупан број ранжирних колосека за накупљање кола,
- n_{rz} – број ранжирних задатака,
- N_k – укупан број кола који се накупља у ранжирном парку,
- m – просечан број кола у возу и
- t_z – просечно време задржавања кола у току накупљања [*min*].

Такође, у (*Milošević 1979*) наведена је и релација (3.2) за утврђивање потребне дужине колосека за накупљање кола одређеног ранжирног задатка. Према овој релацији, дужину колосека потребну за смештање просечног састава воза, који се формира за посматрани ранжирни задатак, треба увећати ради омогућавања даљег накупљања кола за време док се претходно накупљени састав још налази на ранжирном колосеку.

$$L_{rz} = L_1 + L_2 = \frac{ml_k}{\gamma} + \frac{N_k^{rz} l_k t_z}{\gamma T_r} \quad [m] \quad (3.2)$$

где су:

- L_{rz} – дужина колосека за накупљање кола одговарајућег ранжирног задатка [*m*],
- L_1 – дужина колосека за смештање просечног састава воза који се формира за посматрани ранжирни задатак [*m*],
- L_2 – продужење колосека ради несметаног накупљања кола за време заузетости колосека претходним саставом [*m*],
- N_k^{rz} – јачина колског тока ранжирног задатка,
- l_k – просечна дужина теретних кола [*m*],
- t_z – просечно време које протекне од завршетка накупљања кола за формирање састава па до његовог премештања са колосека накупљања [*min*],
- T_r – време рада станице [*min*] и
- γ – коефицијент просторног искоришћења колосека.

Аналитички модели димензионисања групе колосека за формирање вишегрупних возова настали су проучавањем примењених метода за формирање вишегрупних возова и успостављањем зависности потребног броја колосека од броја упутних станица (*Milošević 1979, Daganzo 1986*). Опис до сада примењених метода за формирање вишегрупних возова и формулација успостављених зависности детаљно ће се представити у Поглављу 4.

3.2.2 Аналитички модели система масовног опслуживања

У првим радовима, у којима се димензионисање капацитета техничких теретних станица заснивало на примени система масовног опслуживања (у даљем тексту СМО системи), колосечни паркови (укључујући и ранжирни парк) посматрани су као изоловани једнофазни подсистеми и анализирани су за случајеве различитих расподела улазног тока и времена опслуживања (*Crane и др. 1955, Petersen 1977, Turnquist & Daskin 1982*). У каснијим радовима техничке теретне станице моделоване су као вишефазни СМО системи. Сложени системи ових станица интерпретирани су као узастопна мрежа једнофазних СМО система. Иако техничке теретне станице карактерише ограниченост броја места и времена чекања у редовима подсистема, они се не ограничавају, већ се димензионисање врши на основу неограничених отворених СМО система (*Ћићак 2003*). Треба напоменути, да се кроз досадашња истраживања за одређени број законитости расподела улазног тока и времена опслуживања дошло само до приближних аналитичких прорачуна вредности параметара који описују рад система.

Потребан број колосека за накупљање кола применом ових модела одређује се као збир основних колосека који су потребни за извршавање ранжирних задатака и допунског броја колосека (3.3). Допунски број колосека омогућава непрекидно расформирање састава у условима када се у ранжирној групи налази неколико састава који чекају на почетак завршног формирања и блокирају основне колосеке накупљања.

$$K_{nak} = K_{nak}^o + K_{nak}^{dp} \quad (3.3)$$

где су:

- K_{nak}^o – број основних колосека и
- K_{nak}^{dp} – број допунских колосека.

Допунски број колосека утврђује се на основу укупне заузетости колосека поступком завршног формирања и очекиваног броја састава који чекају отпочињање завршног формирања. За допунски број колосека није довољно узети средњу дужину реда, него дужину која обезбеђује високу експлоатациону поузданост рада (3.4). Моделирање технологије рада и капацитета ранжирних станица применом система масовног опслуживања извршено је у (Ћићак & Vesković 1992), док је у истраживањима (Popović 2000) модел коришћен за оптимизацију ранжирно-отпремног система станице и анализу повећања допунског броја колосека ранжирно-отпремног парка у односу на ранжирни парк.

$$K_{nak}^{dp} = \frac{\sum N_{f_i} t_i^{zf}}{1440} + M_{ml} \left[M(n_{\xi}^{zf}) + 1,5 \sqrt{D(n_{\xi}^{zf})} \right] \quad (3.4)$$

где су:

- N_{f_i} – број састава i -те категорије возова који се формира,
- t_i^{zf} – трајање завршног формирања једног састава i -те категорије [min],
- M_{ml} – број маневар. локомотива које раде на завршном формирању,
- $M(n_{\xi}^{zf})$ – математичко очекивање броја састава који чекају на завршно формирање и
- $D(n_{\xi}^{zf})$ – дисперзија броја састава који чекају на завршно формирање.

3.3 Симулациони модели за димензионисање капацитета ранжирних колосека

Недостаци аналитичких модела система масовног опслуживања уочени су у могућности тачног прорачуна параметара само за системе са егзактним карактеристикама законитости расподеле улазног тока и времена опслуживања (нпр. класичан систем масовног опслуживања код кога је улазни ток Поасонов, а време опслуживања има експоненцијалну расподелу) и у претпоставци стационарног режима рада система. У случају произвољних расподела основних параметара система масовног опслуживања примењују се различите апроксимације на основу којих се долази до приближних вредности показатеља. С друге стране,

симулациони модели омогућавају доста реалније анализирање рада система које карактерише стохастичка и динамичка структура окружења, опреме и технологије рада.

Симулациони модели данас представљају често примењену технику за подршку доношењу одлука приликом планирања и пројектовања техничких теретних станица. У бројним досадашњим истраживањима у оквиру изградње нових станица или реконструкције постојећих (*Lin & Cheng 2009, Adamko u др. 2010, Marinov & Viegas 2011*) креирани су модели применом различитих симулационих пакета. У оквиру ових радова анализирани су показатељи функционисања и искоришћености ранжирног система у зависности од расположивих колосечних капацитета за накупљање кола у току расформирања возова и у условима променљивих оптерећења изазваних различитим неравномерностима. Треба истаћи да је примена симулационих модела посебно дошла до изражаја при детаљним анализама потребног броја ранжирних колосека и њихових дужина у процесу формирања возова. Симулациони модели метода за формирање вишегрупних возова представљају тему радова (*Márton 2005, Ivić u др. 2007, Belošević u др. 2012a*). У раду (*Márton 2005*) испитиване су могућности примене различитих метода за узастопно и симултано формирање вишегрупних возова у постојећим техничким теретним станицама Словачке Републике. Детаљна анализа метода за узастопно формирање вишегрупних возова представљена је у раду (*Ivić u др. 2007*), док је анализа ефеката метода за симултано формирање извршена у оквиру рада (*Belošević u др. 2012a*).

3.4 Модели математичког програмирања за димензионисање капацитета ранжирних колосека

Претходно поменути модели за димензионисање ранжирних колосечних капацитета заснивају се на претпоставци статичке специјализације колосека. Оваква специјализација колосека огледа се у непроменљивости намене колосека у погледу накупљања и груписања кола. У случају променљиве намене колосека, накупљање и груписање кола може се вршити на различитим колосецима у зависности од улазног тока кола на ранжирању. Овакво прилагођавање намене омогућава бољу

искоришћеност колосека у току ранжирања и назива се динамичка специјализација колосека. Предуслов за примену динамичке специјализације колосека јесте постојање информационог система и обучено маневарско особље. Информациони систем треба да омогући благовремене и све неопходне податке о саставима возова који ће се расформирати у станици. Напуштање принципа непроменљивости намене колосека у току ранжирног рада ствара услове за оптимизацију рада и капацитета ранжирних колосека.

Тежња ка оптимизацији довела је до развоја модела математичког програмирања за решавање проблема димензионисања ранжирних колосека и планирања њиховог вишеетапног развоја. У радовима (*Bohlin u др. 2011, Bohlin u др. 2012, Gestrelius u др. 2013*) процес ранжирања кола посматран је као проблем комбинаторне оптимизације који се састоји у минимизирању укупног броја померања. Оптимизација плана формирања возова извршена је применом целобројног програмирања још у току накупљања кола, при чему су аутори настојали да у потпуности обједине процесе расформирања и формирања возова. Модели целобројног програмирања за минимизирање укупног броја померања кола у току симултаног формирања вишегрупних возова предложени су у радовима (*Márton u др. 2009, Hauser & Maue 2010*). Поређење предлога колосечних капацитета може се извршити понављањем претходно поменутих поступака оптимизације ранжирног рада за унапред дефинисане различите услове (нпр. број расположивих колосека и њихове дужине) и на основу добијених резултата изабрати најповољније идејно решење ранжирног парка. Овај итеративни приступ искоришћен је за математичко моделирање технологије рада формирања вишегрупних возова у ранжирној станици Лозана (Швајцарска).

Проблем планирања развоја појединих подсистема техничких теретних станица такође се може сврстати у групу проблема оптимизације капацитета станица. Развој техничких теретних станица треба вршити етапно и у складу са потребама због високих трошкова изградње и одржавања. Проблем оптимизације развоја је у досадашњим истраживањима решаван применом динамичког програмирања и дисконтовањем укупних трошкова за довољно дуг временски период (до 20 година). Прва истраживања (*Koreškov 1969, Arhangeljskij 1975 и Sotnikov 1976*) сводила су планирање развоја капацитета техничких теретних

станаци на утврђивање редоследа и тренутака увођења техничких и организационих мера за повећање прерадне моћи искључиво прерадног постројења за расформирање. У даљим истраживањима (*Jokić 1979*) проблем оптимизације развоја проширен је на сагледавање свих подсистема станице и анализирање међусобних утицаја на усклађеност рада и прерадну моћ станице.

3.5 Резиме

Димензионисање ранжирних колосека техничких теретних станица потребно је извршити у складу са предвиђеном расподелом ранжирног рада на мрежи како би се омогућила несметана прерада и отпрема возова према плану формирања. Имајући у виду да се ради о скупим инфраструктурним постројењима, како по питању изградње тако и по питању одржавања, веома је важно њихово адекватно димензионисање. Недовољни капацитети ранжирних колосека доводе до поскупљења прерадног процеса и смањења брзине превоза робе, док предимензионисани капацитети неповољно утичу на рентабилност и искоришћеност станице.

У поређењу са истраживањем пријемно-отпремних колосека, ранжирни колосеци су недовољно анализирани. Поред одређених искуствених препорука за одређивање броја ранжирних колосека, ранжирни колосечни капацитети су димензионисани егзактним математичким прорачунима и рачунарским симулацијама.

У досадашњем раду техничких теретних станица, коришћена је стална специјализација колосека у току расформирања и формирања возова. Динамичка специјализација колосека до сада није нашла примену, пре свега због недостатка адекватног информационог система и последица променљиве намене колосека у току ранжирног рада (забуна и грешке особља). Насупрот примени у пракси, многе железничке управе подржавају истраживања у области динамичке специјализације колосека у циљу минимизирања обима и трошкова маневарског рада. Оптимизација ранжирног рада представља „тежак“ математички проблем и изазов за даља истраживања у погледу постављања коректних и у пракси применљивих математичких формулација проблема.

4 Методе за формирање вишегрупних возова

Рад техничких теретних станица заснива се на принципу рационалног обједињавања процеса расформирања приспелих и формирања нових возова. У случају потпуног формирања вишегрупних возова у процесу расформирања, свака група кола плана формирања ових возова захтевала би накупљање на засебном колосеку. Дужине ових колосека би у највећем броју случајева биле знатно краће од дужина преосталих колосека ранжирног парка. У настојању да се што боље искористе ранжирни капацитети, формирање вишегрупних возова треба извршити само делимично у процесу расформирања или у потпуности накнадним ранжирањем и применом посебних метода.

Методe за формирање вишегрупних возова се у основи деле на методe узастопног формирања возова и методe једновременог формирања возова. Методe за узастопно формирање вишегрупних возова су до сада чешће биле заступљене на железницама и називају се класичним методама. Оне се заснивају на потпуном раздвајању процеса накупљања кола вишегрупних возова и процеса њиховог формирања. Формирање возова врши се појединачно, након формирања једног вишегрупног воза приступа се формирању другог воза и тако док се не саставе сви вишегрупни возови. За разлику од претходне групе метода, једновремено формирање више вишегрупних возова омогућено је симултаним методама. Симултано формирање вишегрупних возова започиње још у процесу расформирања. Кола вишегрупних возова накупљају се на колосецима по одређеном правилу које је у функцији броја група по возовима. Ово је битна разлика у односу на класичне методe где је број колосека за накупљање у функцији броја возова.

4.1 Методе за узастопно формирање вишегрупних возова

Основна карактеристика метода за узастопно формирање огледа се у класичном процесу расформирања и накупљању кола према ранжирним задацима и плану формирања вишегрупних возова. После завршеног накупљања довољног броја кола за формирање воза посматраног ранжирног задатка, кола се међусобно кваче и маневарском локомотивом извлаче у циљу накнадног ранжирања према упутним станицама. Након накнадног ранжирања кола према упутним станицама врши се обједињавање појединачних група кола и завршно формирање вишегрупног воза. Тек по формирању једног вишегрупног воза може се приступити формирању другог. У условима узастопног формирања већег броја возова укупно време формирања расте због директне зависности од броја возова за отпрему. То може имати последице на усклађеност саобраћаја возова са потребама привреде и може створити потешкоће у самој организацији саобраћаја на прикључним пругама. У оквиру овог поглавља даће се преглед до сада примењиваних класичних метода које су се првенствено користиле при формирању сабирних возова.

4.1.1 Метода једностепеног формирања

Једностепено формирање вишегрупног воза представља методу где се након једне операције растављања кола накупљеног састава дозвољава само још једна операција њиховог обједињавања. Сортирање кола у процесу једностепеног формирања вишегрупног воза најједноставније се може реализовати издвајањем сваке групе на засебном колосеку. Формирање вишегрупног воза наставља се обједињавањем издвојених група кола на колосецима сортирања и пребацивањем новоформираног састава на колосек са којег се врши отпрема. У овој форми једностепеног формирања потребан број колосека за сортирање једног воза једнак је броју група кола, односно броју упутних станица вишегрупног воза:

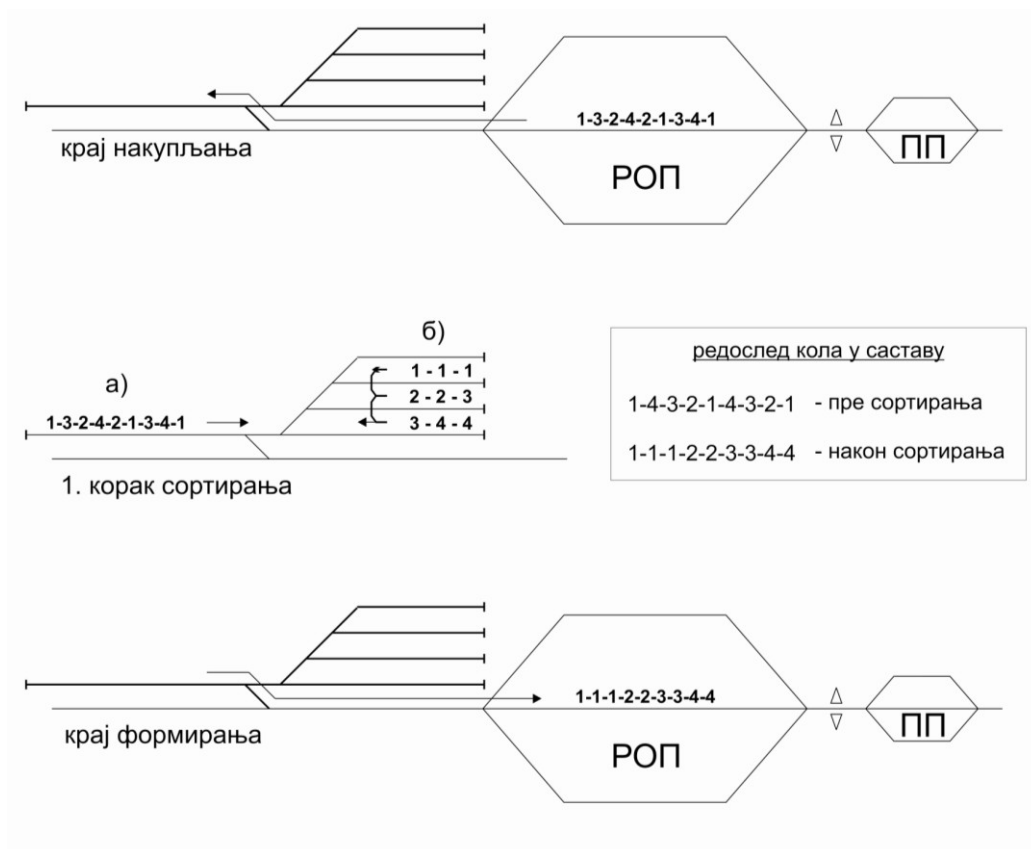
$$K_{sort} = g_{ups} \quad (4.1)$$

где су:

- K_{sort} – број колосека за сортирање кола вишегрупног воза и
- g_{ups} – број упутних станица вишегрупног воза.

Међутим, није увек неопходно ангажовати онолико колосека колико има група кола у возу. Број неопходних колосека може се смањити ако се узме у обзир међусобни положај кола у накупљеном саставу. Ипак треба нагласити да са порастом броја кола или броја група кола у саставу расте сложеност проблема, а сама могућност смањења броја неопходних колосека се умањује. У том смислу, на слици 4.1 приказаће се теоријски могућ случај смањења потребног броја колосека при формирању састава од 9 кола за 4 упутне станице.

Узимајући у обзир међусобни положај кола, потребан број колосека може се смањити ако се на првом колосеку издвоје кола за упутну станицу 1, на другом колосеку сва кола за станицу 2 и прва кола станице 3, а наредна кола за станицу 3 и сва кола за станицу 4 на трећем колосеку. И у овом случају формирање вишегрупног воза наставља се обједињавањем кола са колосека сортирања и пребацивањем новоформираног састава на колосек са кога ће се извршити отпрема.



Слика 4.1 Метода једноступеног формирања вишегрупног воза

Комплексност проблема једностепеног формирања представљала је предмет истраживања (*Dahlhaus и др. 2000a*). Детаљније анализе у оквиру ових истраживања показале су да за случај формирања вишегрупног воза, при чему редослед група није унапред дефинисан, потребан броја колосека за сортирање кола пре свега зависи од броја кола, а не од броја група (упутних станица) и може се представити зависношћу (4.2). Такође, аутори сматрају (без доказа) да се број потребних колосека K_{sort} може приближно одредити на основу броја кола накупљеног састава w_{sast} и најмањег броја кола једне од упутних станица g_j вишегрупног воза који се формира (4.3).

$$K_{sort} = \frac{w_{sast}}{4} + 2 \quad (4.2)$$

$$K_{sort} = \frac{(g_{min} - 1)d^2}{w_{sast}} + \frac{1}{\min(g_j)} \quad (4.3)$$

где су:

- w_{sast} – број кола у накупљеном саставу,
- $\min(g_j)$ – најмањи број кола једне од упутних станица $g_j (j = 1, \dots, g_{ups})$,
- $d = \left\lceil \frac{w_{sast}}{\min(g_j)} \right\rceil$ – однос укупног броја кола и најмањег броја кола једне од упутних станица.

Најинтезивнија примена једностепеног формирања вишегрупних возова остварена је на америчким железницама (*Boysen и др. 2012*). Метода једностепеног формирања вишегрупних возова омогућила је сортирање кола још у току самог накупљања кола чиме је време задржавања кола у оквиру мреже техничких теретних станица америчких железница сведено на најмању меру. Управо из тих разлога највећи број ових станица пројектован је са ранжирним парковима великог броја колосека релативно малих дужина.

4.1.2 Футнерова метода

Футнерова метода названа је по творцу, *Харију Футнеру*, који ју је први пут применио у експлоатацији 1880. године на станици Ливерпул (*Ivić и др. 2007*).

Применом ове методе, после завршеног накупљања кола вишегрупног воза, помоћу два растављања и два састављања може се брзо извршити сортирање кола за онолики број упутних станица колико износи квадрат броја расположивих колосека за тај маневарски рад. То значи да између броја потребних колосека за сортирање кола вишегрупног воза K_{sort} и броја упутних станица односног воза g_{ups} постоји зависност облика:

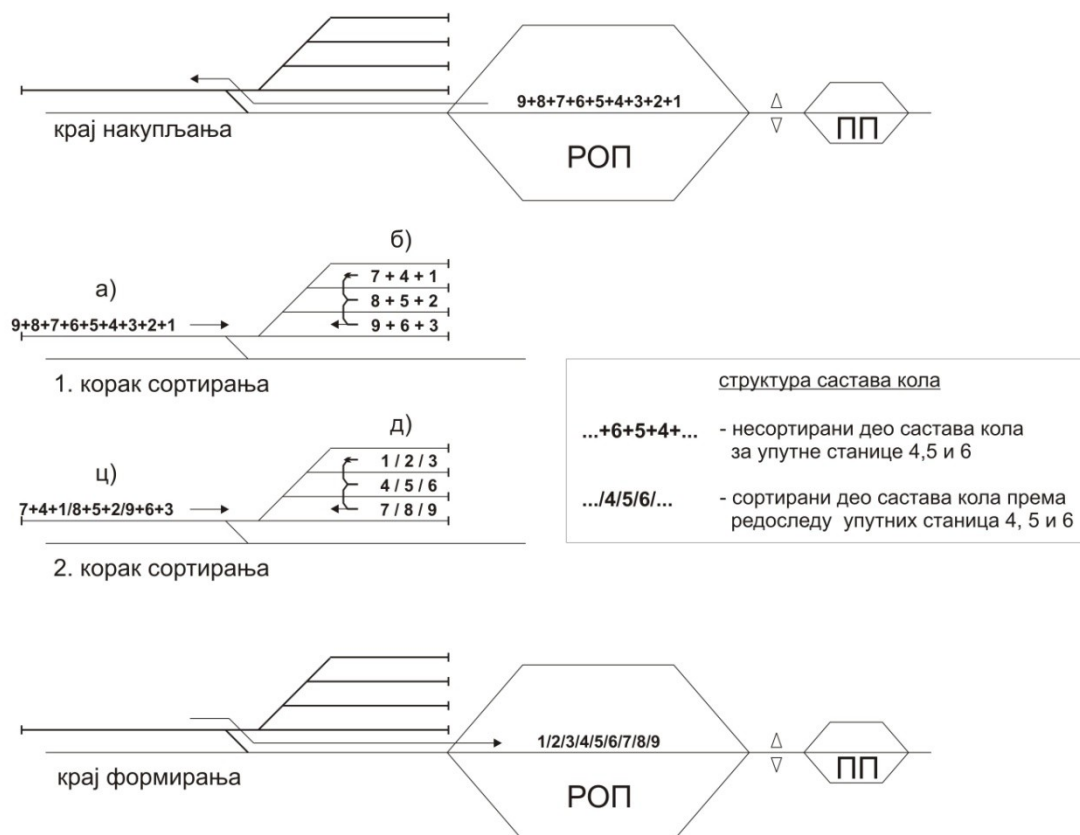
$$K_{sort} = \begin{cases} \sqrt{g_{ups}}; & \sqrt{g_{ups}} \in N \\ \lceil \sqrt{g_{ups}} \rceil + 1; & \sqrt{g_{ups}} \notin N \end{cases} \quad (4.4)$$

Општа законитост сортирања кола у поступку формирања вишегрупног воза по Футнеровој методи приказана је у табели 4.1.

Табела 4.1 Законитост сортирања кола - Футнерова метода

Први корак сортирања						
Колосек	Редни бројеви упутних станица					
1	1	$K + 1$	$2K + 1$	$3K + 1$	...	$(K - 1)K + 1$
2	2	$K + 2$	$2K + 2$	$3K + 2$	...	$(K - 1)K + 2$
3	3	$K + 3$	$2K + 3$	$3K + 3$	...	$(K - 1)K + 3$
4	4	$K + 4$	$2K + 4$	$3K + 4$	...	$(K - 1)K + 4$
...						
K	K	$2K$	$3K$	$4K$	...	K^2
Други корак сортирања						
Колосек	Редни бројеви упутних станица					
1	1	2	3	4	...	K
2	$K + 1$	$K + 2$	$K + 3$	$K + 4$	...	$2K$
3	$2K + 1$	$2K + 2$	$2K + 3$	$2K + 4$	...	$3K$
4	$3K + 1$	$3K + 2$	$3K + 3$	$3K + 4$	...	$4K$
...						
K	$(K - 1)K + 1$				...	K^2

Карактеристике ове методе могу се уочити на примеру формирања вишегрупног воза који у свом саставу има групе кола за 9 путних станица (слика 4.2).



Слика 4.2 Фунтерова метода формирања вишегрупног воза

У првом кораку сортирања кола за путне станице 1, 4 и 7 остављају се на први колосек, кола за станице 2, 5 и 8 на други колосек, а кола за станице 3, 6 и 9 остављају се на трећи колосек. На овај начин завршава се прво растављање кола по колосецима.

Затим следи прво састављање кола са колосека и њихово обједињено извлачење у циљу припреме за други корак сортирања. На почетку овако формираног састава налази се несортирана група коју чине кола за станице 3, 6 и 9, па други корак сортирања започиње њиховим разврставањем по колосецима сортирања. Даље сортирање у другом кораку врши се додавањем кола на колосеке на којима су већ издвојена кола суседних путних станица. На овај начин сва кола

накупљеног састава груписана су према упутним станицама и преостаје да се обави друго састављање кола по колосецима и њихово обједињавање како би се формирао воз.

На теоријским основама Футнерове методе формулисана је класа метода која на K колосека кроз x корака сортирања може формирати воз који се састоји из K^x група кола (Potthoff 1977). Дакле, на 3 колосека у 3 корака може се сортирати 27 група, а на 4 колосека у 3 корака 64 група кола ($3^3 = 27$ и $4^3 = 64$).

4.1.3 Општа метода

Општа метода, попут Футнерове методе, омогућава да се вишегрупни воз формира кроз два корака сортирања. Општу методу карактерише успостављена једнакост између редног броја колосека у групи за формирање и броја група које се издвајају на односном колосеку у моменту отпочињања процеса сортирања кола (Gašparik и др. 2011). Ова карактеристика омогућава већу флексибилност у примени опште методе у односу на Футнерову методу. Флексибилност се испољава у томе да се наредни кораци сортирања не морају реализовати обједињеним извлачењем и сортирањем свих кола са свих колосека, већ се могу остварити серијом извлачења и сортирања кола са појединачних колосека. Ова особина може доћи до изражаја и условити примену ове методе при ограниченим ресурсима (недовољна дужина извлачњака или недовољна снага маневарске локомотиве).

С друге стране, негативна карактеристика опште методе је да се на одређеном броју колосека може сортирати мањи број група у односу на Футнерову методу. За разлику од Футнерове методе која на K колосека може формирати воз који се састоји из K^2 група кола, општа метода може формирати воз чији број упутних станица износи највише:

$$g_{ups} = \frac{K_{sort}(K_{sort} + 1)}{2} \quad (4.5)$$

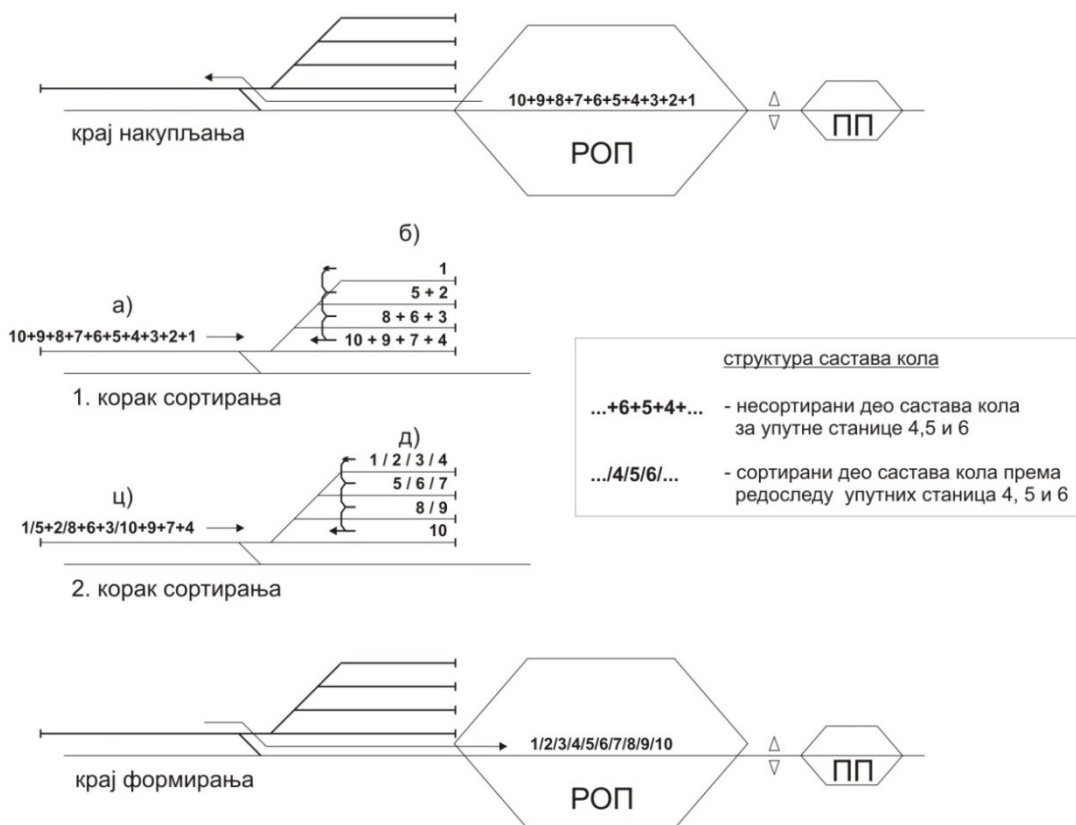
Законитост сортирање кола у поступку формирања вишегрупног воза по општој методи представљена је у табели 4.2.

Табела 4.2 Законитост сортирања кола - општа метода

Први корак сортирања						
Колосек	Редни бројеви упутних станица					
1	1	–	–	–	–	–
2	2	$K + 1$	–	–	–	–
3	3	$K + 2$	$(2K - 1) + 1$	–	–	–
4	4	$K + 3$	$(2K - 1) + 2$	$(3K - (1 + 2)) + 1$	–	–
...						–
K	K	$2K - 1$	$3K - (1 + 2)$	$4K - (1 + 2 + 3)$	...	$\frac{K(K + 1)}{2}$
Други корак сортирања						
Колосек	Редни бројеви упутних станица					
1	1			...	K	
2	$K + 1$			...	$2K - 1$	
3	$(2K - 1) + 1$			...	$3K - (1 + 2)$	
4	$(3K - (1 + 2)) + 1$			...	$4K - (1 + 2 + 3)$	
...						
$K - 1$	$(K - 2)K - (1 + 2 + \dots + (K - 3)) + 1$			...	$(K - 1)K - (1 + 2 + \dots + (K - 2))$	
K	$\frac{K(K + 1)}{2}$					

Да би се лакше уочиле карактеристике ове методе дат је пример формирања вишегрупног воза који у свом саставу има кола за 10 упутних станица (слика 4.3). У првом кораку сортирања на првом колосеку издвајају се кола за упутну станицу 1, на другом кола за станице 2 и 5, на трећем кола за станице 3, 6 и 8, а на четвртном кола за станице 4, 7, 9 и 10.

Други корак сортирања може се реализовати обједињеним извлачењем свих кола или појединачним извлачењем кола са сваког колосека посебно. На крају другог корака сортирања добијају се сортирана кола према упутним станицама и то на првом колосеку кола упутних станица 1, 2, 3 и 4, на другом 5, 6 и 7, на трећем 8 и 9, а на четвртном 10. Процес формирања вишегрупног воза завршава се састављањем кола по колосецима и њиховим превлачењем на колосек са којег се врши отпрема.



Слика 4.3 Општа метода формирања вишегрупног воза

4.1.4 Специјална метода

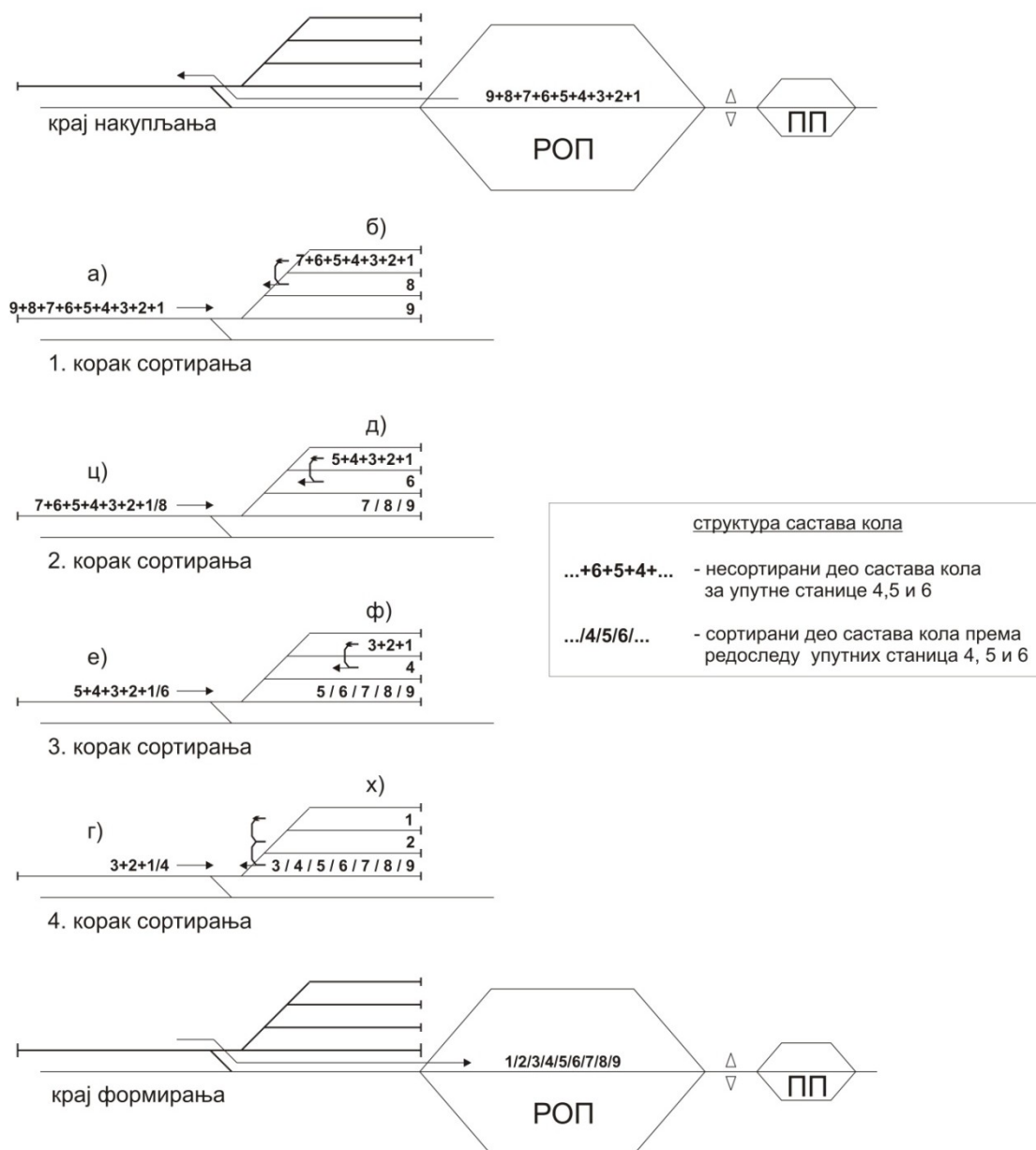
Основна карактеристика специјалне методе је да се може применити за сортирање кола на произвољном броју колосека, јер не постоји никаква чврста зависност између потребног броја колосека и броја упутних станица вишегрупног воза. Ипак, у досадашњој пракси специјална метода се најчешће примењивала у станицама са малим бројем колосека (*Ivić и др. 2007*). Број корака сортирања није ограничен и зависи од односа броја група у возу и расположивог броја колосека. Карактеристике ове методе могу се уочити на општем примеру формирања вишегрупног воза који у свом саставу има групе кола за g упутних станица, а само формирање се обавља на K колосека.

Након накупљања састава кола за вишегрупни воз, кола се разврставају према упутним станицама кроз неколико корака сортирања. У првом кораку

сортирања кола за упутне станице редних бројева од g до $g - K + 2$ остављају се на засебне колосеке, а сва остала кола заједно на први колосек. Затим следи прво састављање кола по колосецима и њихово обједињавање, почев од првог па до $K - 1$ колосека, у циљу припреме за други корак сортирања. У овом кораку сва кола станица редних бројева од $g - 1$ до $g - K + 2$ груписана су према редоследу станица, те се остављају на колосек K где се већ налазе кола упутне станице редног броја g . Групама кола на колосеку K додају се кола за станицу редног броја $g - K + 1$, а на остале колосеке сортирају се кола према следећем редоследу: на колосеку $K - 1$ кола за станицу редног броја $g - K$, на колосеку $K - 2$ кола станице редног броја $g - K - 1$ и тако редом до другог колосека где долазе кола за станицу редног броја $g - 2K + 3$. Сва преостала кола, за станице редних бројева 1 до $g - 2K + 2$, остављају се на први колосек. Након овог растављања врши се обједињавање кола по колосецима почев од првог до $K - 1$ колосека и њихово извлачење на извлачњак у циљу припреме за трећи корак сортирања чија је процедура слична претходно описаној. Овај процес наставља се све док не буду сортирана и кола за прву упутну станицу.

У циљу лакшег сагледавања процеса формирања вишегрупног воза по корацима сортирања дат је приказ на слици 4.4. Приказ се односи на случај када се на 3 колосека обавља сортирање накупљеног састава за 9 упутних станица.

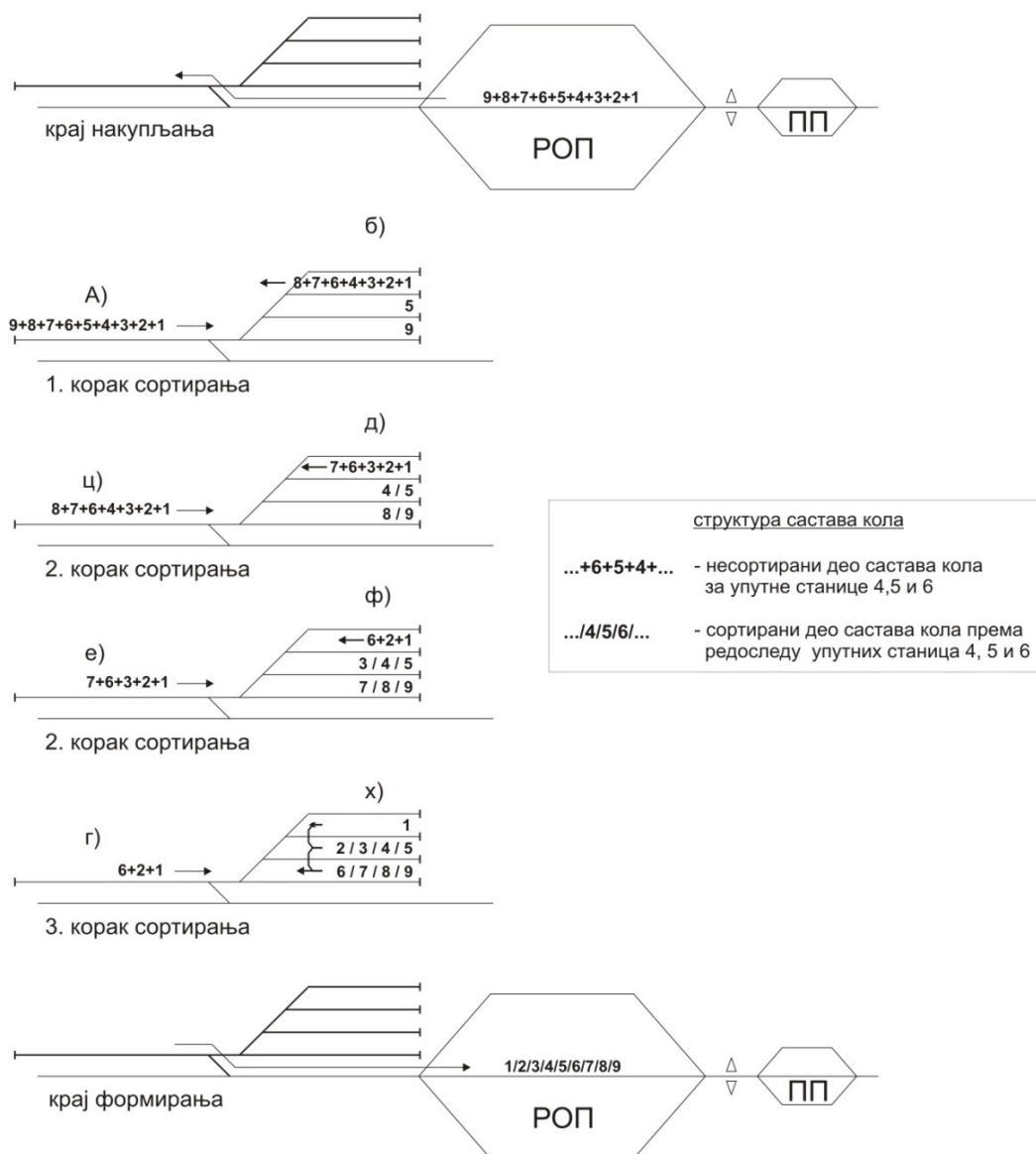
У првом кораку сортирања кола за упутне станице 9 и 8 издвајају се на трећем и другом колосеку, а сва остала кола заједно на првом колосеку. Затим следи састављање кола са првог и другог колосека и њихово обједињавање у циљу припреме за други корак сортирања. У другом кораку сортирања сва кола упутне станице 8 груписана су на почетку састава и остављају се на трећи колосек. Из несортираног дела састава кола за станицу 7 додају се сортираним групама кола на трећем колосеку, кола за станицу 6 издвајају се на другом колосеку, а сва преостала кола враћају се на први колосек. Након овог растављања врши се поновно обједињавање кола на првом и другом колосеку и њихова припрема за наредни корак сортирања. Овај процес наставља се кроз још два корака сортирања чиме се добија комплетно формиран састав према редоследу упутних станица.



Слика 4.4 Специјална метода формирања вишегрупног воза

Модификација специјалне методе постигнута је елиминисањем потребе за спајањем и обједињавањем издвојених група кола по завршетку сваког корака сортирања. Тиме се маневарски рад сваког наредног корака додатно олакшава због мањег броја кола који је потребно померати. Обједињавање састава кола издвојених по колосецима врши се само након последњег корака сортирања чиме се формира састав за вишегрупни воз према редоследу упутних станица. У случају примене модификоване специјалне методе, сортирање 9 група на 3

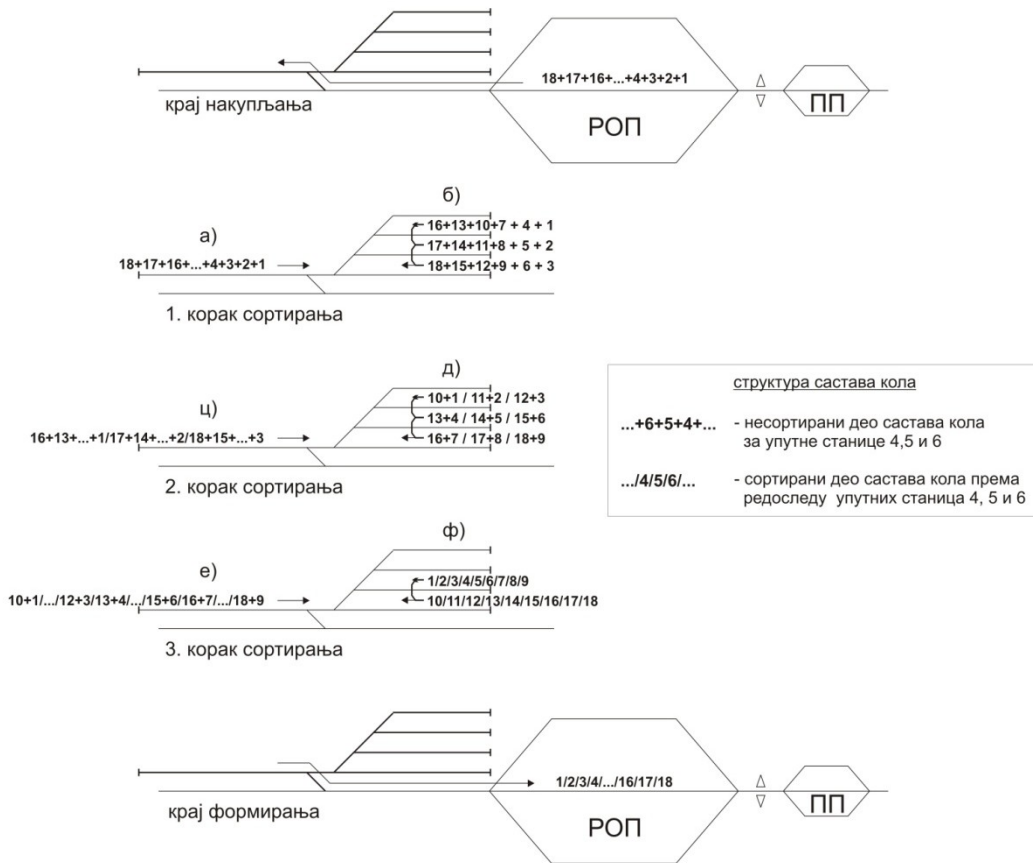
колосека врши се на следећи начин. У првом кораку сортирања на другом и трећем колосеку издвајају се кола упутних станица 5 и 9, а сва преостала кола накупљају се на првом колосеку. У наредним корацима померање се врши само са несортираним колима накупљеним на првом колосеку. У овим корацима на другом и трећем колосеку остављају се кола чији је редни број упутне станице за један мањи у односу на она која су у претходним корацима издвојена на колосецима. Процес формирања вишегрупног воза по корацима сортирања применом модификације специјалне методе приказан је на слици 4.5.



Слика 4.5 Специјална метода формирања вишегрупног воза - модификована

4.1.5 Метода обједињених група

У условима недовољног броја колосека, сортирање великог броја група g може се реализовати применом методе обједињених група. Ова метода заснива се на примени процеса сортирања група неком од претходних метода која је погодна за формирање воза који има упола мање упутних станица $\lfloor \frac{g}{2} \rfloor$. Обједињавање група врши се здруживањем кола упутних станица редних бројева: 1 и $(\lfloor \frac{g}{2} \rfloor + 1)$, 2 и $(\lfloor \frac{g}{2} \rfloor + 2)$, 3 и $(\lfloor \frac{g}{2} \rfloor + 3)$ итд. Да би се лакше уочиле карактеристике ове методе дат је пример (*Gašparik и др. 2011*) формирања вишегрупног воза који у свом саставу има кола за 18 упутних станица (слика 4.6).



Слика 4.6 Метода обједињених група за формирање вишегрупног воза

У првом кораку сортирања кола за упутне станице 1, 4, 7, 10, 13 и 16 остављају се на први колосек, кола за станице 2, 5, 8, 11, 14 и 17 на други, а кола за станице 3, 6, 9, 12, 15 и 18 на трећи колосек.

Процес сортирања кола наставља се извлачењем свих кола и формирањем обједињених група упутних станица: на првом колосеку здружују се групе 1 и 10, 2 и 11, 3 и 12, на другом колосеку 4 и 13, 5 и 14, 6 и 15, а на трећем колосеку 7 и 16, 8 и 17, 9 и 18.

У даљем поступку сортирања потребно је још једном извући сва кола и раставити обједињене групе. На крају овог корака добијају се два сортирана састава, на првом колосеку за првих девет и на другом за преосталих девет упутних станица. Процес формирања вишегрупног воза завршава се обједињавањем ова два састава и превлачењем на колосек са којег се врши отпрема.

4.2 Методе за симултано формирање вишегрупних возова

Методе за симултано формирање вишегрупних возова пружају могућност једновременог формирања више возова чиме се ублажава зависност укупног времена формирања од броја возова за отпрему. Почетак њихове примене везује се за време Првог светског рата када се јавила потреба формирања великог броја возова за снабдевање француске војске на фронту према Немачкој (*Bourgeois 1940*). С друге стране, настојања железничких управа да изврше концентрацију маневарског рада на што мањи број техничких теретних станица и отпочну примену „чврстог реда вожње“ и у теретном саобраћају актуелизује методе за симултано формирање вишегрупних возова.

Специфичност ових метода одражава се у делимичном формирању вишегрупних возова још у току расформирања приспелих возова. У току расформирања приспелих возова кола се накупљају према редоследу упутних станица, односно према групама кола која припадају упутним станицама истог редног броја без обзира на правац упућивања. Ово доводи до разлике у ангажованим колосечним капацитетима, а самим тим и у ефектима извршења целокупног процеса формирања. Симултане методе могу у великој мери побољшати параметре рада станица. Ове методе пружају могућност благовремене

отпреме вишегрупних возова у сноповима без ометања саобраћаја путничких возова на прикључним пругама. Ефикасна примена симултних метода захтева одговарајуће прилагођавање реда вожње и оспособљено маневарско особље за сложено маневрисање. Највећи недостатак им је осетљивост на могуће грешке и поремећаје у процесу накупљања и директно манифестовање последица на отпрему возова. У оквиру овог поглавља даће се преглед до сада формулисаних симултаних метода: елементарне, троугаоне и геометријске.

4.2.1 Елементарна метода

Елементарна метода за симултано формирање вишегрупних возова састоји се из две фазе. У првој фази врши се накупљање кола према упутним станицама. Расформирање приспелих возова обавља се тако што се кола која припадају упутним станицама истог редног броја накупљају заједно на засебним колосецима. Теоријски минималан број колосека за накупљање K_{nak} једнак је максималном броју упутних станица g_{ups}^{max} у неком од возова за формирање (4.6). Правило накупљања кола по колосецима k према (Belošević *u dr.* 2012b) дато је у изразу (4.7).

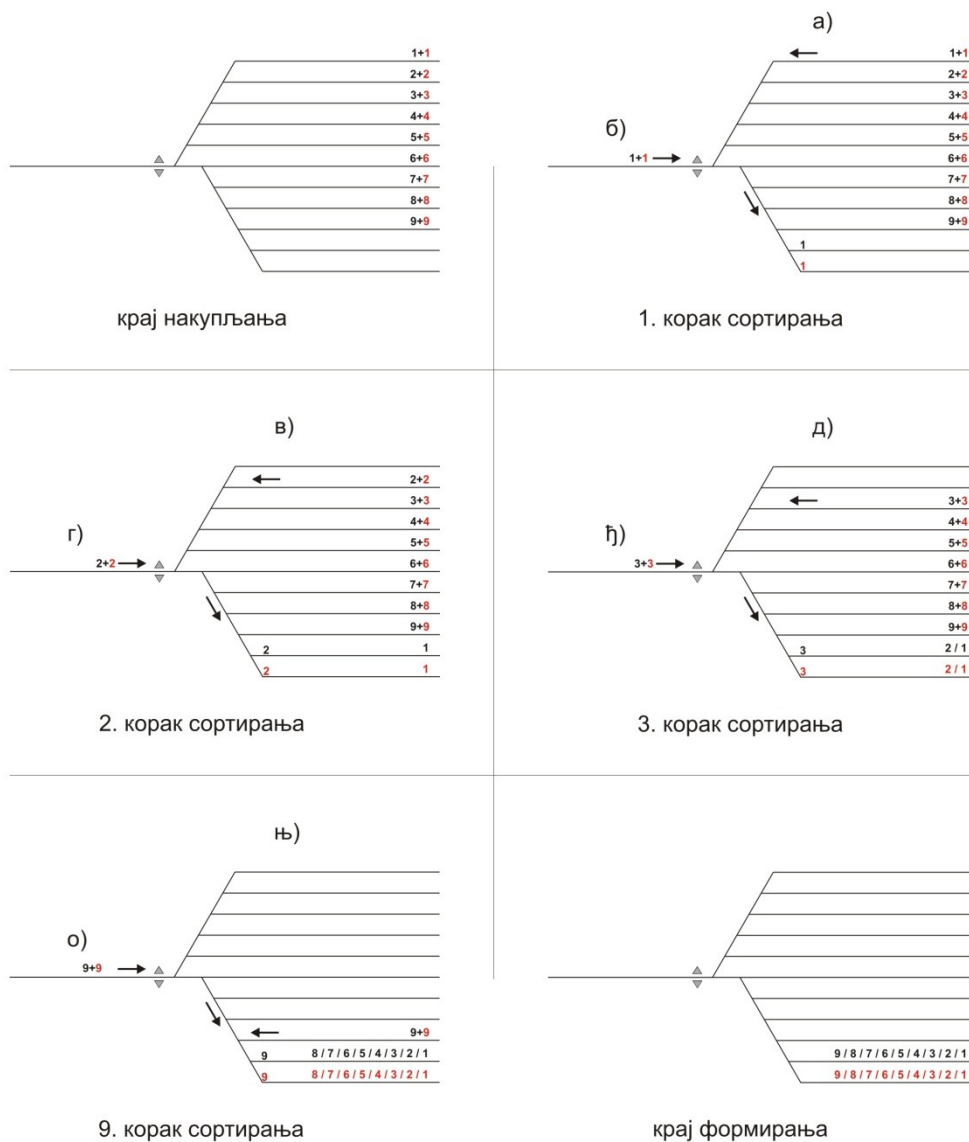
$$K_{nak} = g_{ups}^{max} \quad (4.6)$$

$$g_k = k, \quad k = 1, \dots, g_{ups}^{max} \quad (4.7)$$

где су:

- K_{nak} – број колосека за накупљање кола,
- g_{ups}^{max} – максималан број упутних станица у неком од возова за формирање,
- g_k – редни број упутних станица у возовима за које се кола накупљају на колосеку k .

Након завршеног накупљања отпочиње друга фаза формирања у којој се кола извлаче са колосека за накупљање и сортирају према припадајућим возовима. Процес формирања вишегрупних возова применом елементарне методе може се сагледати на примеру једновременог састављања два воза (A и B) који у свом саставу имају кола за 9 упутних станица (слика 4.7).



Слика 4.7 Елементарна метода за симултано формирање вишегрупних возова

У процесу накупљања, кола за упутне станице $1, 2, \dots, 9$ издвајају се на засебним колосецима. Појединачним извлачењем накупљених кола на овим колосецима врши се само сортирање кола према припадајућим возовима. На овај једноставан начин, кроз 9 корака сортирања, формиран су састави возова (A и B) према редоследу упутних станица.

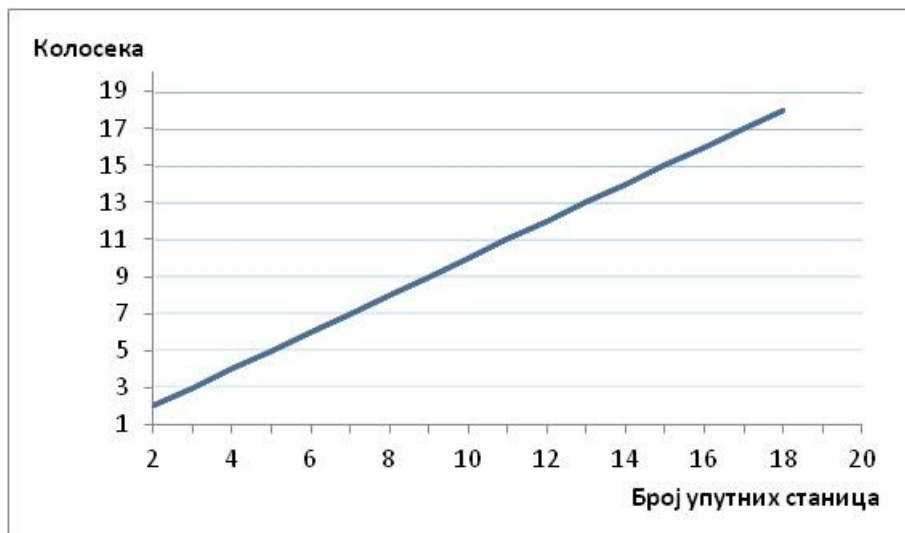
Елементарна метода омогућава формирање већег броја вишегрупних возова у условима великог броја колосека за накупљање (слика 4.8) уз минималан обим маневарског рада. Поменути обим маневарског рада може се сагледати на основу очекиваног броја померања по колима φ у фази сортирања (4.8). Како су сва кола

учествовала искључиво једном у току извлачења параметар φ има константну вредност 1 без обзира на број упутних станица по возовима (слика 4.9). Број помераних кола са којима је обављено сортирање кола у процесу формирања вишегрупних возова једнак је укупном броју кола у свим возовима.

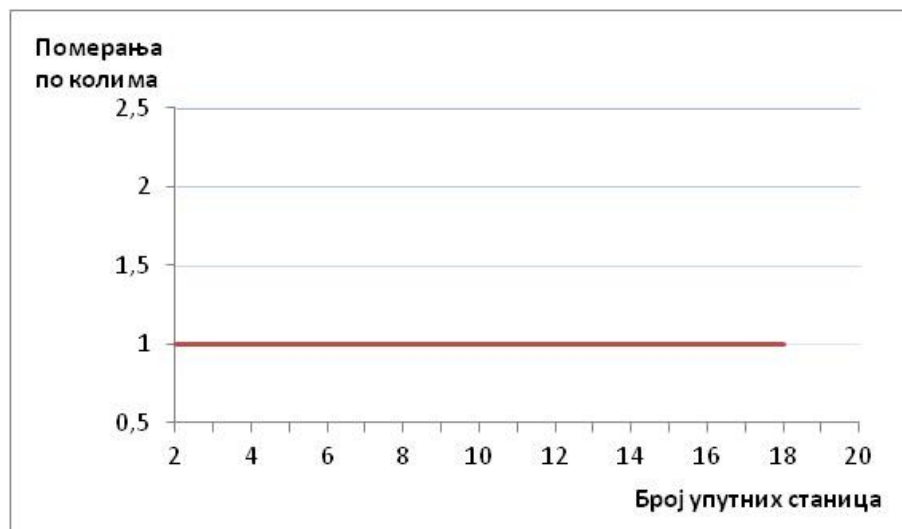
$$\varphi = \frac{T_{uk}}{W_{uk}} \quad (4.8)$$

где су:

- T_{uk} – очекивани број померања у фази сортирања кола и
- W_{uk} – укупан број накупљених кола за вишегрупне возове.



Слика 4.8 Потребан број колосека за накупљање - елементарна метода



Слика 4.9 Очекивани број померања у фази сортирања - елементарна метода

4.2.2 Трoугaонa мeтoдa

Teopијски oснoв трoугaoнe мeтoдe дeтaљнo јe прeдстaвљeн у рaду (*Daganzo и др. 1983*). Пpинципијeлнo и oвa мeтoдa сaстoји сe из двe фaзe. У пpвoј фaзи врши сe нaкyпљaњe кoлa, a у дpyгoј фaзи њихoвo сортирaњe. Сортирaњe кoлa врши сe јeдним дeлoм прeмa рeдним брoјeвимa yпyтних стaницa у вoзoвимa, a дpyгим дeлoм прeмa вoзoвимa кoјимa пpипaдajy. Вeзa измeђy мaксимaлног брoјa yпyтних стaницa у нeкoм oд вoзoвa g_{ups}^{max} и пoтpeбнoг брoјa кoлoсeкa зa нaкyпљaњe кoлa K_{nak} пpикaзaнa јe у слeдeћeм изрaзy:

$$K_{nak} = \begin{cases} \sqrt{2g_{ups}^{max}} - \frac{1}{2}; & \sqrt{2g_{ups}^{max}} - \frac{1}{2} \in N \\ \left\lceil \sqrt{2g_{ups}^{max}} - \frac{1}{2} \right\rceil; & \sqrt{2g_{ups}^{max}} - \frac{1}{2} \notin N \end{cases} \quad (4.9)$$

Пpавилo нaкyпљaњa кoлa прeмa (*Daganzo и др. 1983*) дaтo јe у изрaзy (4.10), пpи чeмy сe нa кoлoсeкy k нa мeстy i нaкyпљajy кoлa зa стaницe рeдних брoјeвa:

$$g_{k,i} = \frac{k(k-1)}{2} + ik + 1 + \frac{(i-1)(i-2)}{2}, \quad k = 1, \dots, K_{nak}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.10)$$

Општa зaкoнитoст нaкyпљaњa кoлa у пoстyпкy фoрмирaњa вишeгpyпних вoзoвa пpимeнoм трoугaoнe мeтoдe прeдстaвљeнa јe и у тaбeли 4.3.

Тaбeлa 4.3 Зaкoнитoст нaкyпљaњa кoлa - трoугaoнa мeтoдa

Кoлoсeк	Рeдни брoјeви yпyтних стaницa нaкyпљeних пo кoлoсeцимa	Општa зaкoнитoст нaкyпљaњa кoлa пo кoлoсeцимa
K_k	$\frac{k(k-1)}{2} + 1, \dots$	$g_{k,i} = \frac{k(k-1)}{2} + ik + 1 + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
1	1 3 5 8 12 17 ...	$g_{1,i} = 1 + 1i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
2	2 6 9 13 18 ...	$g_{2,i} = 2 + 2i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
3	4 10 14 19 ...	$g_{3,i} = 4 + 3i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
4	7 15 20 ...	$g_{4,i} = 7 + 4i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
5	11 21 ...	$g_{5,i} = 11 + 5i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$
6	16 ...	$g_{6,i} = 16 + 6i + \frac{(i-1)(i-2)}{2}$

Формирање вишегрупних возова применом троугаоне методе представиће се на примеру једновременог састављања два воза (*A* и *B*) који у свом саставу имају кола за 9 упутних станица (слика 4.10).

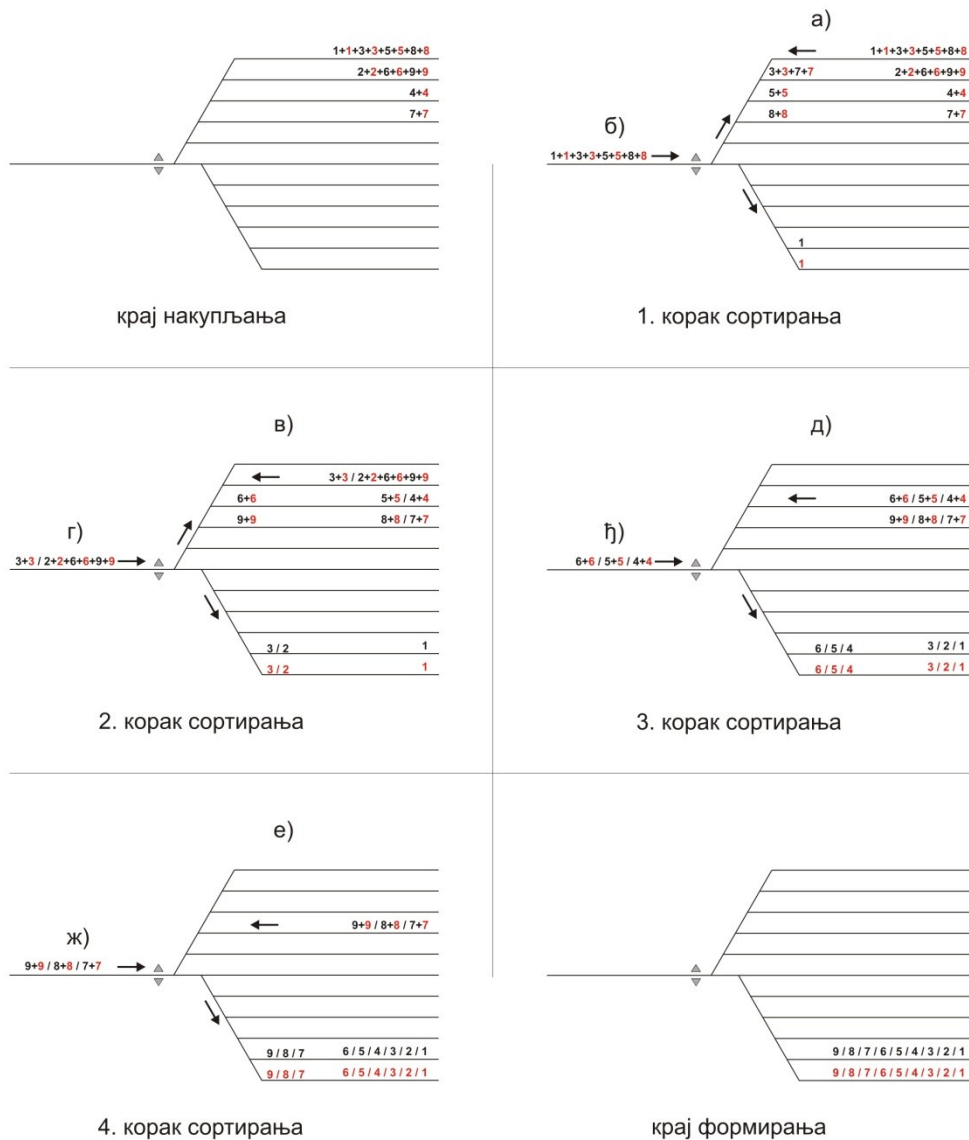
У процесу расформирања на првом колосеку накупљају се кола за упутне станице 1, 3, 5 и 8. На другом колосеку накупљају се кола за упутне станице 2, 6 и 9, док се на трећем колосеку накупљају кола само за упутне станице 4, а на четвртом колосеку кола за упутне станице 7.

Када се накупи довољан број кола за све вишегрупне возове приступа се сортирању кола. У првом кораку сортирања извлаче се накупљена кола са првог колосека и ранжирају тако да се кола за упутне станице 1 издвајају према припадајућим возовима (*A* и *B*) на колосецима групе за формирање. Кола упутних станица 3, 5 и 7 издвајају се и придружују колима на другом, трећем и четвртом колосеку.

Након завршеног ранжирања кола са првог колосека прелази се на други корак сортирања. Кола са другог колосека ранжирају се тако да се за упутне станице 2 и 3 издвајају према припадајућим возовима, а кола за упутне станице 6 свих возова придружују се колима на трећем колосеку, односно кола упутне станице 9 колима на четвртом колосеку.

Процес се наставља тако да се прво извлаче кола са трећег колосека и сортирају према припадајућим возовима, а затим и са четвртог колосека. Као резултат спроведене процедуре сортирања, формиран су састави за вишегрупне возове (*A* и *B*) према редоследу упутних станица.

За разлику од елементарне методе, код троугаоног сортирања на једном колосеку накупљају се кола за неколико упутних станица. Метода ангажује мањи број колосека (слика 4.11) што доводи до сложенијег плана сортирања, а самим тим и до пораста обима маневарског рада. Број извлачења износи 2 за сва кола изузев група кола $g_{k,1} = \frac{k(k-1)}{2} + 1$ које представљају „чеоне групе кола“ колосека *k* и које се извлаче само једном. Практично, то значи да „чеоне групе кола“ процес сортирања пролазе као код елементарне методе.



Слика 4.10 Трoугаона метода за симултано формирање вишегрупних возова

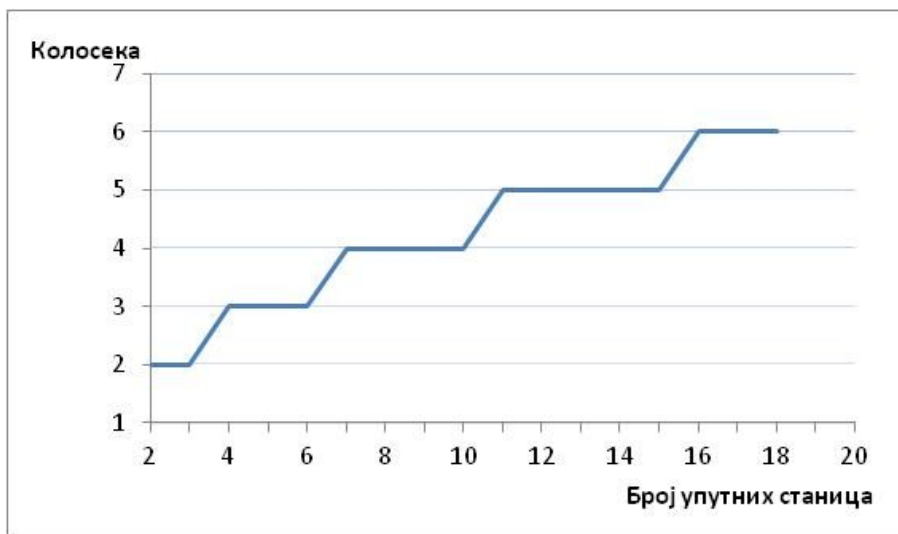
Очекивани број померања по колима φ у фази сортирања (4.11) има вредност у ограниченom интервалу $[1-2]$. Зависност овог параметра од броја упутних станица, у теоријским условима равномерне расподеле кола по упутним станицама чији је број једнак за све возове који се отпремају, приказана је на слици 4.12. Укупан број померених кола са којима је обављено сортирање кола у процесу формирања вишегрупних возова већи је од броја кола у свим возовима с обзиром да су нека кола у току сортирања два пута извлечена.

$$\varphi = \frac{(1w'_{uk} + 2w''_{uk})}{w_{uk}} = \frac{(1w'_{uk} + 2(w_{uk} - w'_{uk}))}{w_{uk}} = 2 - \frac{w'_{uk}}{w_{uk}} \quad (4.11)$$

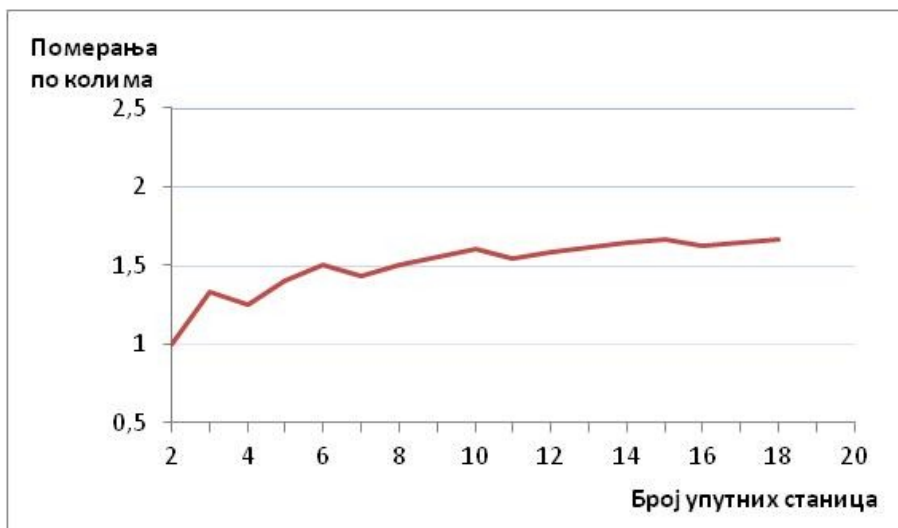
$$\varphi = 2 - \psi$$

где су:

- w'_{uk} – укупан број накупљених кола у „чеоним групама“ ,
- w''_{uk} – укупан број накупљених кола која нису у „чеоним групама“ и
- ψ – однос броја накупљених кола у „чеоним групама“ и укупног број накупљених кола.



Слика 4.11 Потребан број колосека за накупљање - троугаона метода



Слика 4.12 Очекивани број померања у фази сортирања - троугаона метода

4.2.3 Геометријска метода

Даљи развој метода за симултано формирање вишегрупних возова постигнут је формулисањем геометријске методе. Теоријски, ова метода омогућава још веће смањење потребног броја колосека за формирање возова. Детаљан опис методе дат је у радовима (Ivić *u др.* 2010, Belošević *u др.* 2011). Веза између максималног броја упутних станица у неком од возова g_{ups}^{max} и потребног броја колосека K_{nak} на којима се обавља накупљање кола и њихово сортирање према редним бројевима упутних станица дата је релацијом (4.12), а општа законитост накупљања кола на колосецима релацијом (4.13).

$$K_{nak} = \begin{cases} \log_2(g_{ups}^{max} + 1) ; \log_2(g_{ups}^{max} + 1) \in N \\ \lceil \log_2(g_{ups}^{max} + 1) \rceil ; \log_2(g_{ups}^{max} + 1) \notin N \end{cases} \quad (4.12)$$

$$g_{k,i} = 2^{k-1} + 2^k(i - 1), \quad k = 1, \dots, K_{nak}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.13)$$

Законитост на основу које се накупљају кола за вишегрупне возове по геометријској методи може се детаљније видети и у табли 4.4.

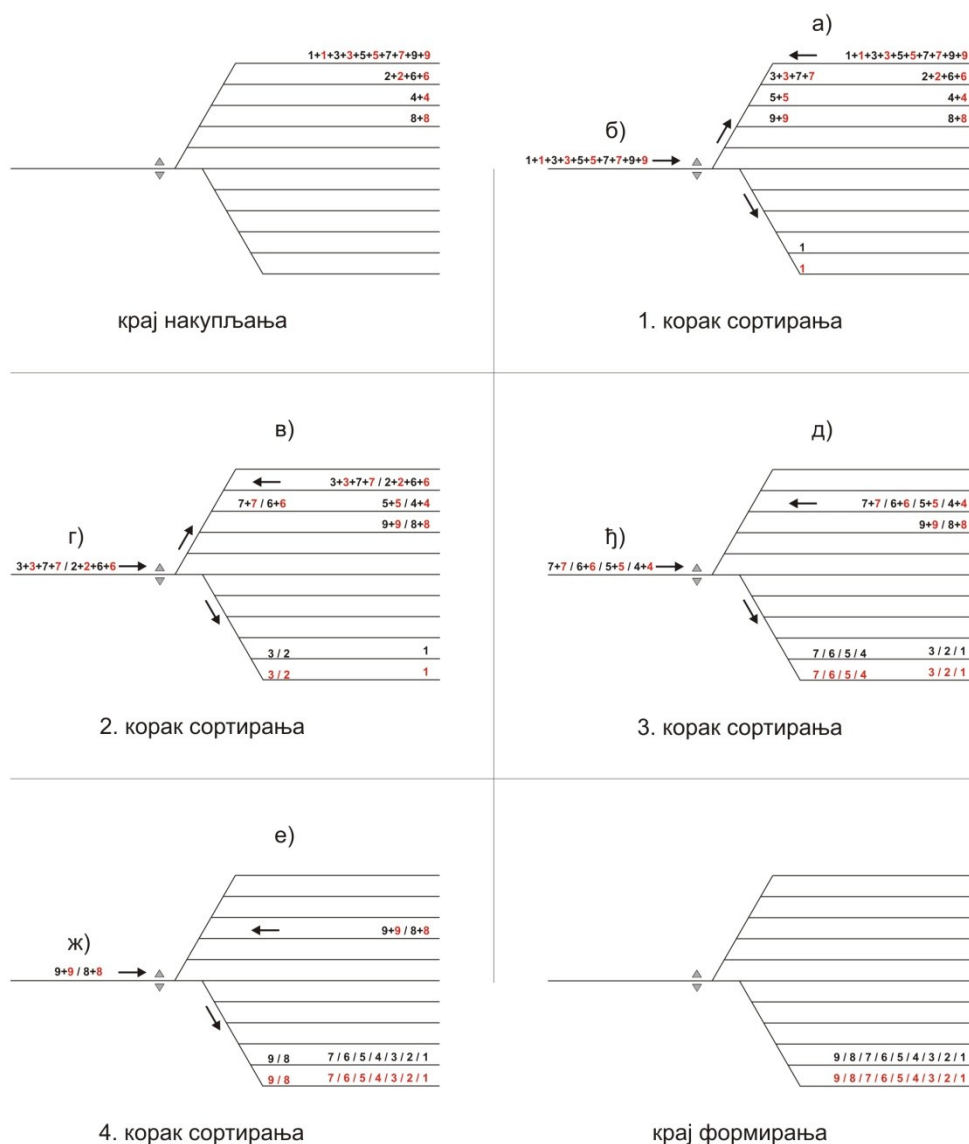
Табела 4.4 Законитост накупљања кола - геометријска метода

Колосек	Редни бројеви упутних станица накупљених по колосецима	Општа законитост накупљања кола по колосецима
K_k	$2^{k-1}, \dots$	$g_{k,i} = 2^{k-1}(1 + 2(i - 1))$
1	1 3 5 7 9 11 13 15 ...	$g_{1,i} = 2^0 + 2^1(i - 1)$
2	2 6 10 14 ...	$g_{2,i} = 2^1 + 2^2(i - 1)$
3	4 12 ...	$g_{3,i} = 2^2 + 2^3(i - 1)$
4	8 ...	$g_{4,i} = 2^3 + 2^4(i - 1)$
5	16 ...	$g_{5,i} = 2^4 + 2^5(i - 1)$

Као и у случајевима елементарног и троугоаног сортирања, формирање вишегрупних возова применом геометријске методе представиће се на примеру једновременог састављања два воза (*A* и *B*) који у свом саставу имају кола за 9 упутних станица (слика 4.13).

Накупљање кола за упутне станице 1, 3, 5, 7 и 9 врши се на првом колосеку, а на другом колосеку накупљање кола за упутне станице 2 и 6. На трећем и четвртном колосеку накупљају се засебно кола за упутне станице 4 и 8.

Када се накупи довољан број кола за све вишегрупне возове приступа се сортирању кола. Прво се извлаче накупљена кола са првог колосека и сортирају тако да се кола за упутне станице 1 појединих возова издвајају на посебне колосеке. Кола за упутне станице 3 и 7 ранжирају се на други колосек, за станице 5 на трећи колосек, а кола за станице 9 на четврти колосек.

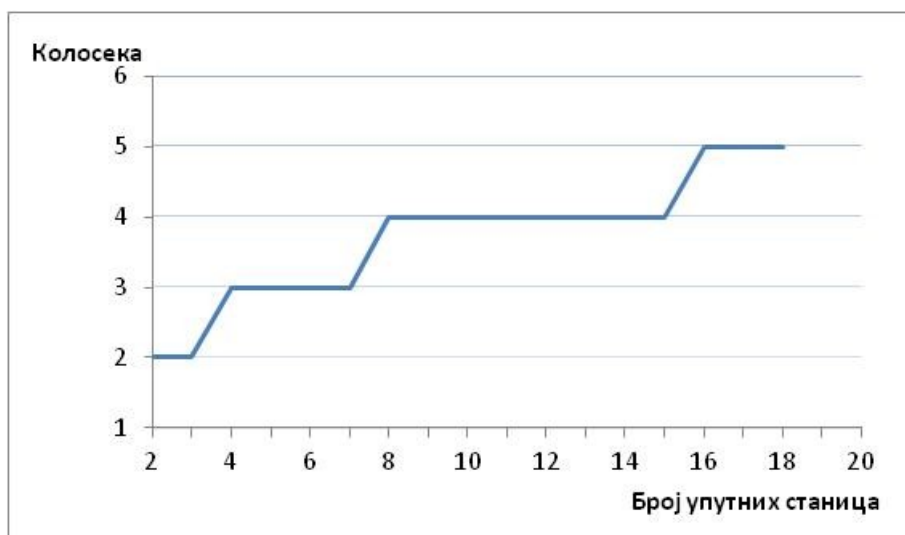


Слика 4.13 Геометријска метода за симултано формирање вишегрупних возова

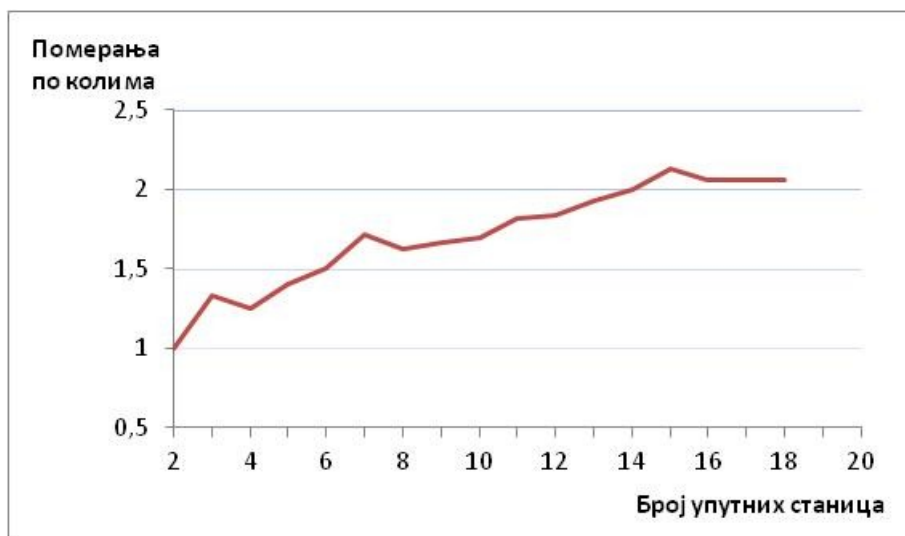
Након завршеног ранжирања кола са првог колосека приступа се извлачењу кола са другог. Кола за упутне станице 2 и 3 придружују се колима на колосецима за формирање састава, а кола за станице 6 и 7 свих возова издвајају се, заједно, на трећем колосеку. Кола са четвртог колосека за то време мирују.

Аналогно претходном процесу, сортирање се наставља кораком извлачења и сортирања кола са трећег колосека. Након њиховог премештања на колосеке за формирање састава извлаче се и преостала кола на четвртог колосеку чиме се завршава процес формирања састава вишегрупних возова *A* и *B*.

Смањење потребног броја колосека по геометријској методи (слика 4.14) одражава се на повећање обима маневарског рада. Зависност очекиваног број померања по колима и броја упутних станица, за теоријске услове равномерне расподеле кола по упутним станицама чији је број једнак за све возове који се отпремају, приказана је на слици 4.15. Као и код троугаоне методе и у овој методи најмањи број извлачења имају „чеоне групе кола“ које се извлаче само једном. За разлику од троугаоне методе број извлачења осталих група није ограничен на неку јединствену вредност, већ се мења са променом броја упутних станица и може износити највише $\lceil \log_2 g_{ups}^{max} \rceil$. У случају геометријског сортирања „чеона група“ колосека *k* је група $g_{k,1} = 2^{k-1}$.



Слика 4.14 Потребан број колосека за накупљање - геометријска метода



Слика 4.15 Очекивани број померања у фази сортирања - геометријска метода

4.3 Резиме

Формирање вишегрупних возова може се вршити применом класичних или симултаних метода. Класичне методе су у пракси чешће коришћене и карактерише их појединачно формирање возова. Овим методама се процес накупљања кола потпуно раздваја од њиховог сортирања. Прво се кола накупљају посебно према ранжирним задацима плана формирања вишегрупних возова, а затим се за сваки појединачни ранжирни задатак кола сортирају према упутним станицама. Потребан број колосека за накупљање кола за све класичне методе је исти и зависи од броја ранжирних задатака, док се број колосека на којима се накнадно сортирају кола разликује у односу на примењену методу формирања и у зависности је од броја упутних станица по возовима. Основни недостатак ових метода огледа се у директној зависности укупног времена формирања од броја вишегрупних возова, што ограничава и искључује њихову ефикасну употребу у случају већег броја возова.

Методе за симултано формирање вишегрупних возова карактерише једновремено формирање више возова које започиње још у процесу расформирања. Кола вишегрупних возова накупљају се заједно, при чему број колосека зависи од највећег броја упутних станица једног воза и самог плана сортирања кола. Формирање вишегрупних возова може се реализовати

једноставним планом сортирања кола ангажујући већи број колосека или сложеним планом сортирања ангажујући мањи број колосека. Свака симултана метода има своје специфичности у погледу потребних колосечних капацитета и квалитета рада станице, па могућност примене метода треба посматрати у складу са њиховим основним карактеристикама. Елементарна метода омогућава формирање возова издвајајући кола за упутне станице на засебним колосецима, након чега је довољно само сортирати кола према припадајућим возовима. С друге стране, геометријска метода теоријски ангажује најмањи број колосека примењујући најсложенији план сортирања. Поред метода које примењују најједноставнији и најсложенији план сортирања кола, вишегрупне возове могуће је формирати и методама различите сложености плана сортирања. Једна од таквих је троугаона метода која ограничава маневарски рад на два померања по колима у току сортирања.

5 Технички и технолошки услови за примену метода за формирање вишегрупних возова

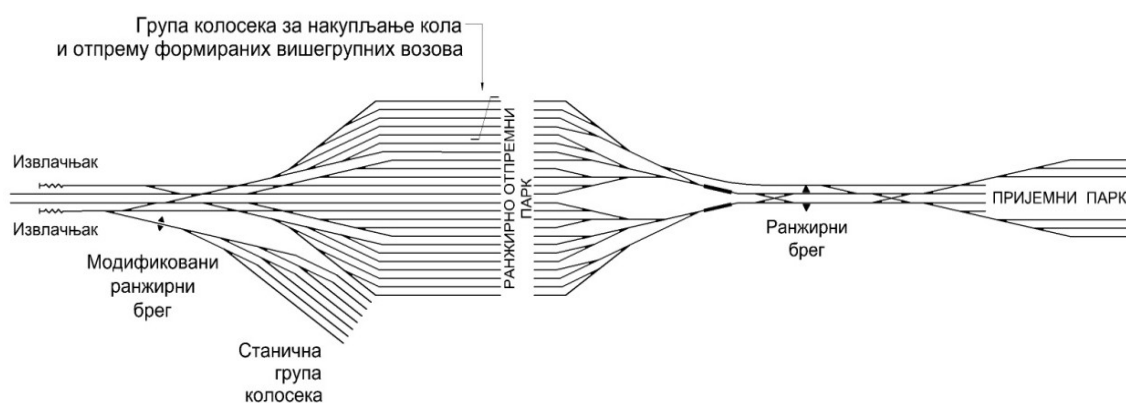
За практичну реализацију метода за формирање вишегрупних возова битно је анализирати техничке и технолошке услове маневарског рада у станици. Процес формирања возова захтева ангажовање адекватних станичних постројења и маневарских капацитета у комбинацији са одговарајућом организацијом и технологијом рада. Од избора станичних постројења, маневарских капацитета и технологије рада у великој мери зависе могућности примене метода за формирање вишегрупних возова.

Технички услови дефинишу структуру и капацитет колосечних и прерадних постројења потребних за реализацију примењених метода. Ови услови се односе на потребне колосечне групе и врсту прерадног постројења, потребан број и дужине колосека, примењене везе унутар колосечних група и везе између колосечних група и прерадног постројења. Такође, у ову групу услова сврставају се и захтеване техничко-експлоатационе карактеристике маневарских локомотива за рад на преради.

У току формирања вишегрупних возова неопходно је извршити низ технолошких активности и операција. Из тог разлога, поред техничке опремљености потребно је анализирати и технолошке услове који се односе на међусобну зависност активности и операција у току накупљања кола и формирања возова, редослед извршавања и нормирање времена њихове реализације.

5.1 Утицај колосечних и прерадних постројења на процес формирања вишегрупних возова

За формирање вишегрупних возова неопходна су колосечна постројења за накупљање и сортирање кола, али и постројења преко којих се обавља посматрани процес (слика 5.1). Структура ових постројења која се огледа у њиховом садржају и локацији готово је идентична, док се њихов облик и капацитет (у смислу броја и дужина колосека) разликује у зависности од примењене методе (Ivić *и др.* 2013).



Слика 5.1 Постројења за формирање вишегрупних возова

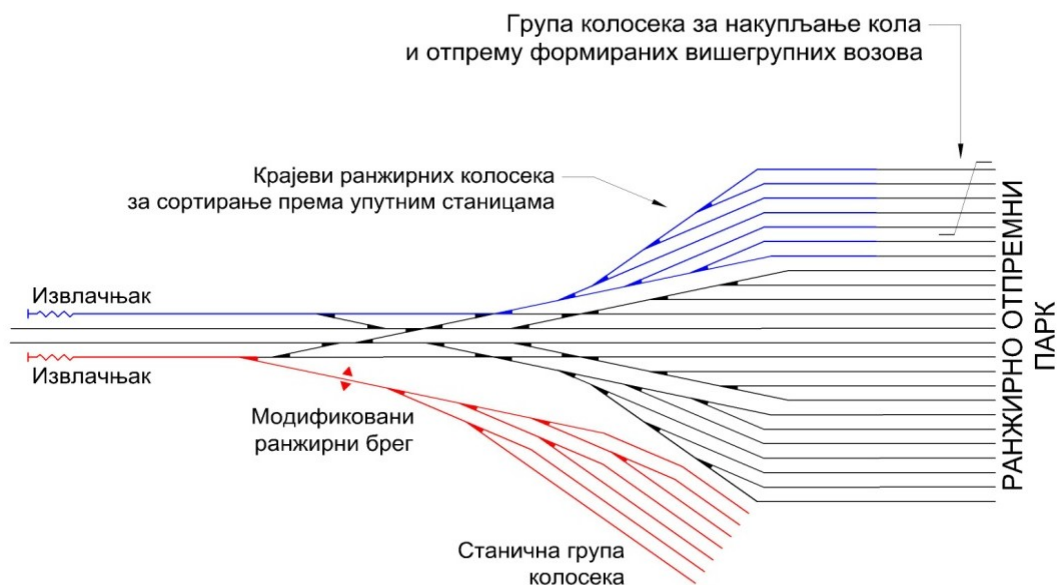
Накупљање кола за вишегрупне возове може се извршити на колосецима ранжирног или ранжирно-отпремног парка. За расформирање приспелих возова у циљу накупљања кола користи се ранжирни брег, а веома ретко извлачњак, док се за сортирање кола у току формирања може користити ранжирни брег, извлачњак или модификовани ранжирни брег. Модификовани ранжирни брег је конструкција изведена по истим принципима као и сам ранжирни брег, с тим што је знатно нижи и једноставнији. Овакав ранжирни брег обично се не опрема скупом опремом јер се не би могао рационално искористити.

У процесу завршног сортирања кола користе се колосеци ранжирног или ранжирно-отпремног парка (целом дужином или само крајеви ових колосека), а могуће је користити и посебну групу колосека. Ова посебна група колосека назива се станична група или група колосека за fino (ситно) ранжирање. Новоформирани возови обично се отпремају са ранжирно-отпремних колосека на којима се кола претходно накупљају и на које се враћају назад после завршеног сортирања.

5.1.1 Постројења за узастопно формирање вишегрупних возова

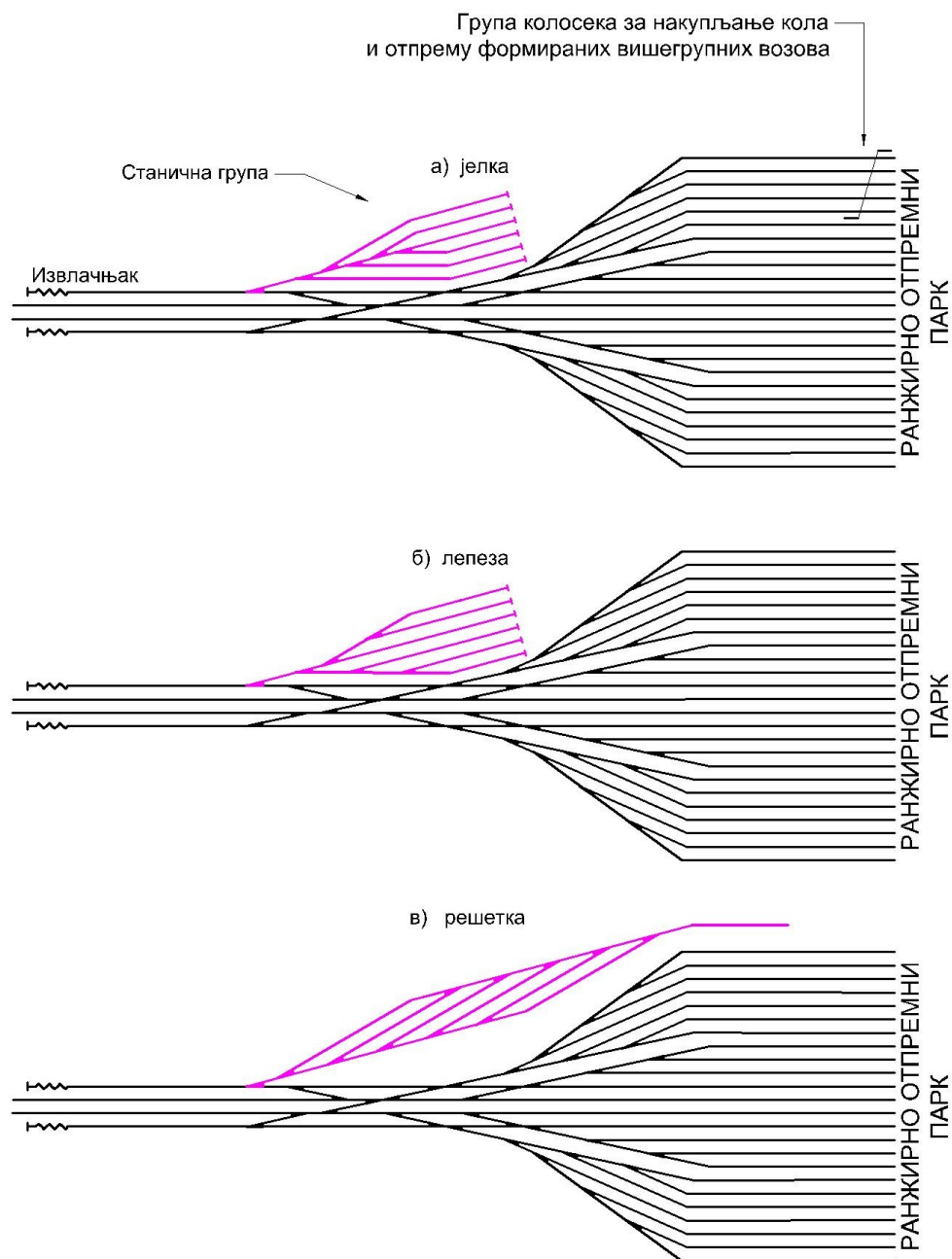
Број и намена колосека ранжирног или ранжирно-отпремног парка, на којима се накупљају кола за вишегрупне возове, везује се за број ранжирних задатака (за сваки ранжирни задатак по један колосек или се мањи ранжирни задаци обједињују на један колосек, а већи издвајају на посебне колосеке), док су дужине у функцији величине колског тока који припада датом ранжирном задатку. Сам процес расформирања обавља се, првенствено, преко ранжирног брега.

Сортирање кола према упутним станицама врши се на крајевима ранжирних колосека или на засебној групи колосека за фино ранжирање (слика 5.2). Коришћење крајева ранжирних колосека није рационално јер ремети отпрему возова, те уколико је неопходно користити ове колосеке препорука је да то буду мање фреквентни колосеци. За реализацију финог ранжирања кола према упутним станицама препоручује се пројектовање засебне групе колосека у односу на ранжирни парк, такозване станичне групе колосека. Ова група се састоји од извесног броја краћих колосека који су повезани извлачњак или модификованим ранжирним брегом. Осим тога, неопходно је обезбедити добру везу прерадног постројења са свим колосецима са којих се узимају и на које се остављају накупљена кола вишегрупних возова.



Слика 5.2 Постројења за узастопно формирање вишегрупних возова

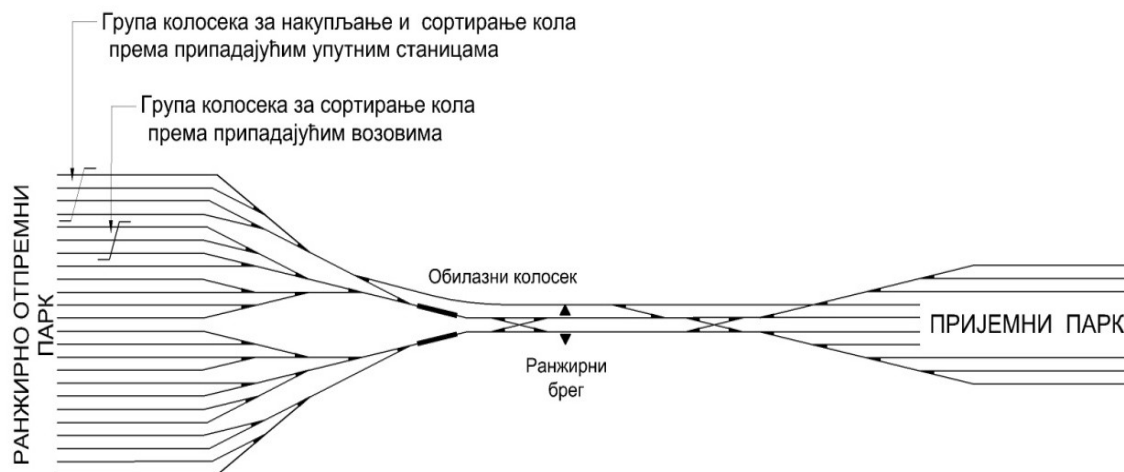
Облик и број колосека станичне групе може се мењати и прилагођавати локалним условима и потребама. Тако на пример, ови колосеци могу бити обликовани као слепи колосеци или као колосечна група обострано везана скретницама (Milošević 1973), могу да буду паралелни са извлачњаком или под одређеним углом (слика 5.3). Решење са обостраним везама колосека је скупље, али и ефикасније при пребацивању новоформираних возова у посебну отпремну групу, нарочито када се иста налази паралелно са ранжирном групом колосека.



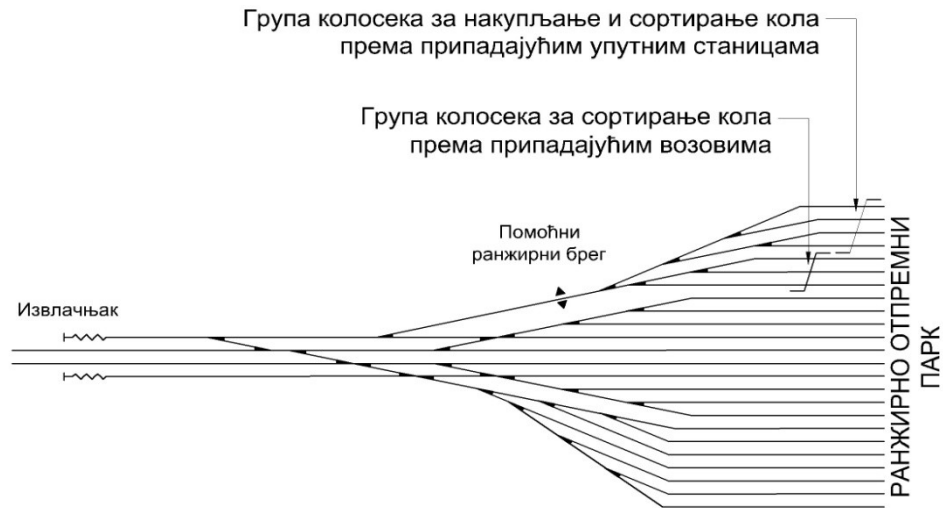
Слика 5.3 Облици станичне групе колосека

5.1.2 Постројења за симултано формирање вишегрупних возова

Прва фаза метода за симултано формирање вишегрупних возова (фаза накупљања кола према упутним станицама) и део друге фазе (фаза сортирања кола према упутним станицама) обављају се на колосецима ранжирног или ранжирно-отпремног парка. Други део друге фазе метода за симултано формирање (фаза сортирања кола према припадајућим возовима) обавља се на колосецима ранжирног или ранжирно-отпремног парка, а за елементарну методу може и на колосецима отпремног парка. Теоријски, за прерадно постројење може се користити било које претходно поменуто прерадно постројење, али због карактера рада (једновремено формирање већег броја возова) у пракси се користи ранжирни брег. За формирање вишегрупних возова може се користити ранжирни брег преко којег се обавља примарни ранжирни рад на растављању возова (слика 5.4) или засебан помоћни ранжирни брег на излазној страни ранжирног парка (слика 5.5). Помоћни ранжирни брег може имати мању висину и поједностављену конструкцију чиме се смањују трошкови изградње и одржавања.



Слика 5.4 Постројења за симултано формирање вишегрупних возова



Слика 5.5 Помоћна постројења за симултано формирање вишегрупних возова

Колосечне групе

Да би се што успешније реализовали многобројни технолошки задаци ранжирног (ранжирно-отпремног) парка потребно је груписати колосеке исте или сличне намене. У том смислу, најчешће се формирају групе колосека намењене накупљању кола за:

- једногрупне возове,
- вишегрупне возове,
- возове локалне робне станице,
- колску радионицу и
- друга постројења у станици.

Као што је већ поменуто, методе за симултано формирање вишегрупних возова захтевају две групе ранжирних колосека:

- групу колосека за накупљање и сортирање кола према припадајућим упутним станицама (у даљем тексту група за накупљање кола) и
- групу колосека за сортирање кола према припадајућим возовима (у даљем тексту група за формирање возова).

Да би се омогућило паралелно извођење што већег броја технолошких операција потребно је међусобно ускладити положаје свих група колосека у ранжирном парку. Распоред група колосека зависи од обима и структуре ранжирних задатака који су додељени станици у оквиру ранжирног система, од

садржаја и распореда главних и додатних постројења, решења колосечних веза, веза са депоом и веза са прикључним пругама (у случају ранжирно-отпремног парка).

Потребан број колосека

Минималан број колосека потребан за накупљање и сортирање кола према припадајућим упутним станицама дефинисан је у претходном поглављу (у оквиру теоријских поставки симултаних метода), док је број колосека за сортирање кола према припадајућим возовима једнак броју возова које треба истовремено формирати. Сходно томе, укупан број колосека у ранжирној станици неопходан за формирање вишегрупних возова K_{uk} износи:

$$K_{uk} = K_{nak} + K_{for} \quad (5.1)$$

где су:

- K_{nak} – потребан број колосека групе за накупљање кола и
- K_{for} – потребан број колосека групе за формирање возова.

Овде треба нагласити да се најмање један колосек групе за накупљање кола (колосек са кога се прво извлаче накупљена кола) може искористити за формирање састава једног вишегрупног воза. Уколико број упутних станица у возовима који се једновремено формирају није уједначен, онда постоји могућност да се укупан број колосека још редукује по истом принципу који је детаљније приказан у Прилогу 1.

Потребне дужине колосека

Дужине колосека за накупљање и сортирање кола према припадајућим упутним станицама су у директној зависности од величине колског тока вишегрупних возова и примењене методе за симултано формирање. Ово за последицу има неуједначене дужине колосека, а у неким случајевима и потребне велике дужине појединих колосека. Да би се омогућило међусобно повезивање колосека, њихове дужине морају бити уједначене и прилагођене условима експлоатације. То значи да ће се релативно кратки колосеци морати продужити, а сувише дугачки колосеци поделити на два или више колосека. Дужине колосека за сортирање кола према возовима и упутним станицама треба да омогуће

смештање формираних композиција возова које чекају на отпрему. Дужине вишегрупних возова се не разликују значајније од дужина једногрупних, тако да се ове дужине уклапају у планиране дужине колосека ранжирног парка.

При употреби ранжирног брега железничка кола се у процесу ранжирања крећу под дејством силе земљине теже која треба да омогући долазак кола на ранжирне колосеке. Како у процесу формирања не би дошло до застоја због потребе сабијања кола, пожељно је омогућити долазак кола до краја ранжирних колосека. То практично значи да дужине колосека за накупљање и сортирање кола треба да буду у складу са висином ранжирног брега.

Обликовање улазне и излазне скретничке лире

Основне поставке за обликовање улазне скретничке лире дате су у (*Marković & Ivić 2005*) и своде се на захтеве: формирања што краће скретничке лире, што бржег раздвајања путева вожњи при спуштању узастопних кола низ ранжирни брег и уједначености укупних отпора при спуштању кола на свим колосецима. Скраћивањем скретничке лире смањује се вероватноћа сустизања кола у процесу ранжирања и омогућава његово брже одвијање. С друге стране, потребно је испунити техничке услове међусобног положаја скретница, колосечних кочница и кривина. Како би се путеви вожње при спуштању кола што раније раздвојили, колосеци ранжирног парка се са улазне стране спајају у снопове. У један сноп може бити повезано 6, 8, 10 или 12 колосека (*Buzanov и др. 1969*). Повећање броја снопова, са истовременим смањењем броја колосека у њима, утиче на брже раздвајање кола при спуштању, али и повећава трошкове опремања ранжирном опремом. Обликовање скретничке лире на излазној страни ранжирног парка врши се применом стандардних принципа за формирање матичњака (*Ивић 2005*), без превасходних захтева за кратким матичњацима. Овакво повезивање колосека има за последицу да колосеци у оквиру истих снопова имају дужине које се могу знатно разликовати. При формирању излазне скретничке лире треба тежити повезивању колосека према технолошким задацима са довољним бројем паралелних веза.

При планирању улазне скретничке лире потребно је у подгрбинској зони остварити везе ранжирних колосека са прерадним постројењем пројектовањем једног или два обилазна колосека паралелно са ранжирним бреггом. У случају

накупљања кола на колосецима који нису директно везани са обилазним колосеком, њихово извлачење врши се преко излазне стране ранжирног парка и повратним кретањем преко једног од колосека из директно везаног снопа. У овом случају технологија рада се усложњава што утиче на продужавање времена формирања. Уколико се формирање вишегрупних возова врши помоћним ранжирним брегом поједностављене конструкције, састави се могу извлачити и директно преко ранжирног брега без потребе за изградњом обилазних колосека.

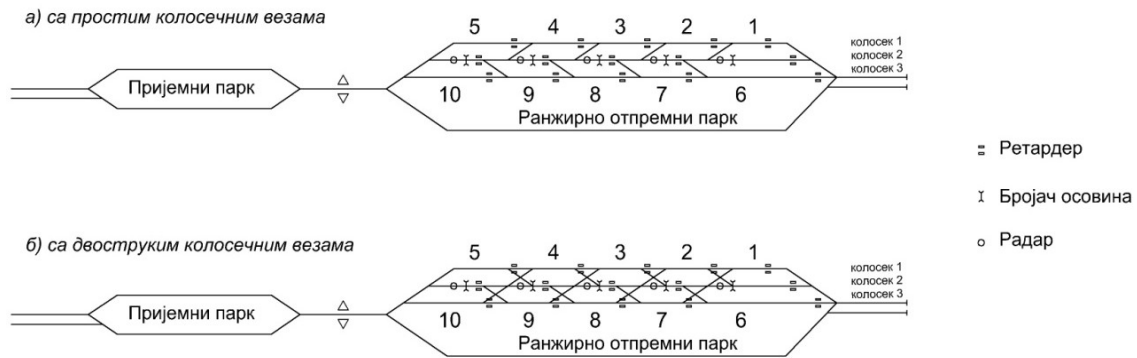
5.1.3 Специфична колосечна постројења за формирање вишегрупних возова

Тежња за што већим смањењем обима маневарског рада у процесу формирања вишегрупних возова довела је до развоја и примене специфичних техничких решења. Тако на пример, у (*Milošević 1979*) наводе се постројења која омогућавају формирање вишегрупних возова без допунског померања кола у процесу сортирања кола. Ова постројења била су примењена у станици Косуа (Јапан) и пројектована су на основу аналогије рада лучких колосечних постројења. Састоје се из три ранжирна колосека међусобно повезана већим бројем колосечних веза, најчешће простим или пак двоструким колосечним везама (слика 5.6). Поред тога сви ови колосеци морају да буду у паду од 2,5‰ и снабдевени колосечним кочницама, а средњи доставни колосек 50 до 80 mm издигнут у односу на крајње колосеке како би кола лакше одлазила на делове колосека према упутним станицама.

Поменута специфична колосечна постројења за формирање вишегрупних возова могу да буду:

- само са једном колосечном конструкцијом на којој се сортирање кола обавља за све возове након расформирања припелих возова и накупљања кола,
- са онолико колосечних конструкција колико има вишегрупних возова које треба формирати у станици у циљу потпуног обједињавања формирања ових возова и процеса расформирања и

- са одређеним бројем колосечних конструкција дефинисаним у складу са потребама и ефектима који се постижу делимичним обједињавањем процеса расформирања и формирања вишегрупних возова.



Слика 5.6 Специфична техничка решења за формирање вишегрупних возова

5.2 Утицај ангажованих маневарских локомотива на процес формирања вишегрупних возова

Маневарске локомотиве представљају ресурс чије техничко-експлоатационе карактеристике утичу на могућност и ефекте примене одређене методе за формирање вишегрупних возова. При примени класичних метода, маневарска локомотива врши доставе или одбачаје кола из маневарских састава у циљу њиховог ранжирања. У случају примене метода за симултано формирање вишегрупних возова, маневарска локомотива мора омогућити извлачење маневарског састава са колосека накупљања кола и њихово потискивање на ранжирни брег.

Обједињено извлачење свих кола са колосека представља најцелисходнију стратегију маневрисања у условима прераде на ранжирном брегу. Из тог разлога укупна маса накупљених кола на једном колосеку не сме прећи усвојену максималну дозвољену масу састава приближно прорачунату на основу (5.2), како по критеријуму кретања, тако и по критеријуму покретања из места маневарског састава.

$$Q_{ms} = \frac{F_v}{(\sum w + i_{sv})} - Q_l \quad [t] \quad (5.2)$$

где су:

- F_v – вучна сила маневарске локомотиве за посматрани услов маневрисања [N],
- $\sum w$ – укупан специфичан отпор састава за посматрани услов маневрисања [daN/t],
- i_{sv} – сведени нагиб на деоници извлачења [%] и
- Q_l – маса маневарске локомотиве [t].

5.3 Утицај примењене технологије рада на процес формирања вишегрупних возова







Технологија рада на формирању вишегрупних возова представља организациони систем активности (сачињених од различитих технолошких операција, маневарских операција, полувожњи или вожњи) у процесу накупљања кола, њиховог сортирања и завршног формирања вишегрупних возова. Кроз технолошки процес рада дефинише се начин и редослед извршавања поменутих активности, међусобна зависност као и нормирање њиховог трајања. Редослед извршавања и време трајања ових активности зависе од врсте постројења на преради и ангажованих капацитета. Примењена технологија рада треба да се заснива на адекватном избору техничких, технолошких и организационих мера за конкретне услове рада.

5.3.1 Технологија рада на извлачњаку

Извлачњак, као прерадно постројење у процесу формирања вишегрупних возова, првенствено се користи при примени метода за узастопно формирање. Технологија рада на извлачњаку може се реализовати маневрисањем са целим саставима или дељењем састава и маневрисањем са појединачним деловима. У оба ова случаја, маневрисање се врши доставом кола локомотивом или одбачајима кола. Одбачаји кола могу бити изоловани или серијски, при чему серијски одбачаји захтевају примену дужих извлачњака пројектованих у паду према колосечној групи.

Списак активности и редослед њиховог извршавања у процесу формирања вишегрупног воза на извлачњаку приказан је на слици 5.7. Формирање вишегрупног воза састоји се од активности празног кретања локомотиве по накупљени састав, извлачења састава на извлачњак, ранжирања кола према упутним станицама, обједињавања формираних група и пребацивања новоформираног састава на отпремни колосек. Ранжирање кола према упутним станицама реализује се кроз један или више корака сортирања. Сваки корак сортирања састоји се из доставе или одбачаја кола на колосеке станичне групе (према плану сортирања кола) и повлачења састава на извлачњак. Технологија рада на извлачњаку у процесу формирања вишегрупних возова зависи од примењене методе за формирање вишегрупног воза, броја упутних станица, величине састава и бројних претходно поменутих техничких услова узастопног формирања вишегрупних возова.

Проблем нормирања времена трајања појединачних активности технологије рада на извлачњаку детаљно је анализиран у (Čičak & Vesković 2005). Поред детаљног прорачуна трајања појединачних активности, технолошко нормирање могуће је извршити на основу упрошћених формула добијених обједињавањем и хронометарским снимањима.

Редни број	Активност	Време трајања
1.	Празно кретање локомотиве по накупљени састав	t_{pl} 
2.	Извлачење накупљеног састава на извлачњак	t_{iz} 
3.	Ранжирање кола према упутним станицама	$t_{ranž}$ 
4.	Обједињавање формираних група кола	t_{ob} 
5.	Пребацивања новоформираног састава на отпремни колосек	t_{preb} 
Укупно време трајања формирања вишегрупног воза		t_{form} 

Слика 5.7 Графикон технологије рада формирања вишегрупног воза на извлачњаку

Према истраживањима у раду (*Daganzo и др. 1983*) очекивано време трајања једног корака сортирања t_{sort} може се одредити на основу очекиваног броја маневарских операција (растављања или састављања) над саставом:

$$t_{sort} = a + b\gamma w_{sast} \quad [min] \quad (5.3)$$

где су:

- a, b – нормативни параметри линеарне зависности,
- γ – очекивани број маневарских операција по колима и
- w_{sast} – број кола у саставу.

На основу истраживања (*Beckmann & McGuire 1956*) очекивани број маневарских операција по колима једнак је вероватноћи да суседна кола не припадају групама кола која у посматраном кораку сортирања имају заједнички упутни колосек:

$$\gamma = 1 - \sum_{k=1}^K p_k^2 \quad (5.4)$$

где је:

- p_k – вероватоћа да се кола упућују на посматрани колосек k .

У раду (*Petersen 1977*) анализирано је формирање вишегрупних возова за више различитих теоријских сценарија формулисаних на основу односа броја колосека станичне групе и броја упутних станица, броја расположивих маневарских локомотива и међусобне расподеле маневарског рада. У условима једнаког броја колосека станичне групе и броја упутних станица вишегрупног воза, чиме је омогућено засебно издвајање кола сваке упутне станице на посебном колосеку (адекватно једнофазној методи), очекивани број маневарских операција по колима γ износи:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{g_{ups}} \frac{p_i^2}{1-p_i}} \quad (5.5)$$

где је:

- p_i – вероватоћа да кола припадају упутној станици i .

За случај равномерне расподеле кола по упутним станицама једначина (5.5) може се свести на директну зависност броја маневарских операција од броја упутних станица:


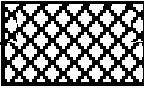


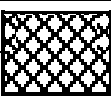

$$\gamma = \frac{g_{ups} - 1}{g_{ups}} \quad (5.6)$$

5.3.2 Технологија рада на ранжирном брегу

У условима обављања значајнијег обима ранжирног рада, с циљем убрзавања процеса расформирања и формирања, у техничким теретним станицама се за прерадно постројење усваја ранжирни брег. Управо из тих разлога, који произилазе из обједињеног формирања вишегрупних возова, методе за симултано формирање у основи захтевају примену ранжирног брега као прерадног постројења.

Овакво формирање вишегрупних возова реализује се кроз један или више узастопних корака сортирања над накупљеним колима. Редослед технолошких активности једног корака сортирања у току симултаног формирања вишегрупног воза на ранжирном брегу приказан је на слици 5.8.

Корак сортирања започиње празним кретањем локомотиве са ранжирног брега до састава на колосеку групе накупљања. Након приласка локомотиве врши се формирање састава и његова припрема за извлачење на ранжирни брег. Овом активношћу обухваћено је сабијање кола на колосеку накупљања и њихово међусобно квачење. Након припреме, маневарски састав се обилазним колосеком извлачи у пријемни парк или на извлачњак у зависности од распореда колосечних паркова техничке теретне станице. Након извлачења врши се промена смера кретања и састав се потискује до врха ранжирног брега. Непосредно пре приласка састава врху ранжирног брега отпочиње отквачивање кола и наставља се паралелно са процесом расформирања. Сам процес расформирања састава обавља се уобичајеним поступком ранжирања који зависи од степена опремљености ранжирног брега и аутоматизације рада станице. Тек по завршетку ранжирања последње групе кола маневарског састава може се приступити наредном кораку сортирања.

Редни број	Активност	Време трајања
1.	Празно кретање локомотиве са ранжирног брега до колосека групе накупљања	t_{pl} 
2.	Припрема маневарског састава на колосеку групе накупљања за извлачење	t_{prip} 
3.	Извлачења маневарског састава са колосека групе накупљања	t_{iz} 
4.	Потискивање маневарског састава до врха ранжирног брега	t_{pot} 
5.	Расформирање маневарског састава преко ранжирног брега	t_{rasf} 
Укупно време трајања корака сортирања кола на ранжирном брегу		t_{sort} 

Слика 5.8 Графикон технологије рада једног корака сортирања кола на ранжирном брегу

Како се у оквиру метода за симултано формирање вишегрупних возова кораци сортирања спроводе узастопно, ангажовање више локомотива у раду на брегу не доприноси значајнијем скраћивању технолошког интервала. Технолошки интервал ранжирног брега у процесу сортирања t_{sort}^i износи:

$$t_{sort}^i = t_{pl} + t_{prip} + t_{iz} + t_{pot} + t_{rasf} \text{ [min]} \quad (5.7)$$

Нормирање времена рада на ранжирном брегу могуће је извршити утврђивањем технолошког интервала корака сортирања на основу детаљних прорачуна трајања сваке активности посебно или као у случају рада на извлачњаку применом упрошћених формула добијених вучним прорачунима и хронометарским снимањем. При коришћењу упрошћених норматива претпостављене су линеарне зависности: маневарских вожњи од броја кола са којима се маневрише и маневарских операција од броја група кола маневарског састава унутар којих, на основу плана сортирања, могу изостати односне маневарске операције.

Очекивана вредност технолошког интервала ранжирног брега у процесу сортирања износи:

$$t_{sort}^i = \sum_i (a_{mv_i} + b_{mv_i} w_{sast}) + \sum_j (a_{mo_j} + b_{mo_j} g_{sast}) \quad [min]$$

$$t_{sort}^i = \sum_i (a_{mv_i} + b_{mv_i} w_{sast}) + \sum_j (a_{mo_j} + b_{mo_j} \gamma w_{sast}) \quad [min]$$
(5.8)

где су:

- a_{mv_i} , a_{mo_j} , b_{mv_i} , b_{mo_j} – нормативни параметри појединачних маневарских вожњи и операција,
 γ – очекивани број маневарских операција по једним колима и
 g_{sast} – број група кола у маневарском саставу.

Након сређивања једначине (5.8) добија се:

$$t_{sort}^i = \sum_i a_{mv_i} + \sum_j a_{mo_j} + \sum_i b_{mv_i} w_{sast} + \sum_j b_{mo_j} \gamma w_{sast} \quad [min]$$

$$t_{sort}^i = a + (b_1 + b_2 \gamma) w_{sast} \quad [min]$$
(5.9)

где су:

- a – нормативни параметар који се односи на део технолошког интервала корака сортирања који не зависи од величине маневарског састава,
 b_1, b_2 – нормативни параметри који се односе на део технолошког интервала корака сортирања који зависи од величине маневарског састава.

5.4 Резиме

На могућност примене неке од метода за формирање вишегрупних возова у великој мери утичу технички и технолошки услови под којима се реализује посматрани процес. Технички услови се односе на колосечне и прерадне

капацитете који треба да омогуће формирање вишегрупних возова. При планирању и саобраћајном пројектовању техничких теретних станица потребно је обратити пажњу на потребне колосечне групе у склопу ранжирног парка, на потребан број колосека, дужину тих колосека и примењене колосечне везе. Прерадно постројење и ангажована маневарска локомотива на преради такође спадају у групу техничких услова од којих зависе ефекти рада на формирању возова. За сам процес сортирања кола може се користити било који тип прерадног постројења и потребно га је усвојити у складу са обимом маневарског рада. Питање избора маневарске локомотиве своди се на испуњавање услова достизања задате брзине маневрисања и покретања маневарског састава из места. Поред техничких услова потребно је анализирати и извршити избор технологије рада. Избор технологије рада треба да се заснива на адекватном избору техничких, технолошких и организационих мера за конкретне услове рада.

6 Симулациона анализа метода за симултано формирање вишегрупних возова

Имајући у виду динамички и стохастички карактер рада техничких теретних станица, симулациони модели су се показали као ефикасан алат за њихову анализу. Декомпоновањем сложеног система техничке теретне станице на скуп једноставних подсистема, међусобно умрежених улазно-излазним везама, избегава се потреба за формулисањем аналитичког поступка до којег је за општи облик ранжирног система практично немогуће доћи. Симулација рада техничких теретних станица пружа могућност проучавања њиховог рада у одређеним условима, али и анализу рада у условима измењених околности кроз промену улазних величина и параметара (*Milinković 2012*).

Након фазе припремних активности у оквиру којих се дефинишу задатак симулационе студије, карактеристике и компоненте реалног система, у оквиру симулације система техничке теретне станице врши се креирање модела и тестирање кроз поступак *верификације* и *валидације* (*Раденковић и др. 2009*). Тек по потврђивању конзистентности добијених резултата (*верификација*) и веродостојности симулационог модела у опонашању ранжирног рада (*валидација*) стварају се услови за примену креираног модела и спровођење експеримената. У току спровођења експеримената излазни подаци се бележе и на крају статистички обрађују и визуелно представљају. Ове могућности, понављања извођења експеримената као и визуелног представљања излазних података, само су неке од предности симулација. Могућност да се експерименти понове велики број пута омогућава статистичко испитање квалитета добијених резултата, док визуелно представљање излазних података у виду графикана и анимација поједностављује и олакшава њихову обраду и анализу.

Постојећи специјализовани симулациони пакети (*Opentrack, Simyard, Villon...*) омогућавају прецизно опонашање саобраћајних и технолошких процеса у техничким теретним станицама користећи детаљне информације о колосечним постројењима, параметрима прикључних пруга, карактеристикама возних и маневарских средстава, реду вожње возова и технолошком процесу рада станице. Уколико пројектант не поседује неки од набројаних специјализованих симулационих пакета може креирати упрошћен симулациони модел применом неког од општих симулационих софтвера (*Arena, Flexim, Anylogic...*) или писањем кода у неком од симулационих програма (*GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT...*).

6.1 Симулациони модели метода за симултано формирање вишегрупних возова

Симулациони модели изграђени су и пројектовани да моделирају планове сортирања кола до сада формулисаних метода за симултано формирање вишегрупних возова. Основна идеја спроведеног истраживања је да се изврши симулација теоријских планова сортирања, а да се добијени резултати накнадно коригују и ускладе са ограничењима која произилазе из услова пројектовања и експлоатације ранжирних постројења. На овај начин добијају се показатељи процеса формирања засновани на техничко-технолошким условима који са довољном прецизношћу одражавају ранжирни рад у реалним условима.

За изградњу и накнадну анализу резултата симулационих модела метода за симултано формирање усвојени су следећи улазни параметри:

- Основа за моделирање процеса формирања вишегрупних возова је типско решење техничке теретне станице са узастопним распоредом колосечних паркова чије је идејно решење представљено у Прилогу 2.
- Максимална дужина једног колосека за накупљање кола, која је ограничена условом пројектовања ранжирног брега, одговара дужини за накупљање 50 кола. За прорачун максималне дужине колосека усвојена је висина ранжирног брега на основу анализе постојећих техничких теретних станица Железница Србије и региона. Основни отпори кола су узети према структури колског

парка на посматраним железничким мрежама, а остали потребни параметри (нпр. отпори средине, скретница...) усвојени су према (Buzanov и др. 1969, Marković & Ivić 2005).

- Максималан број кола у саставу са аспекта вучних карактеристика маневарске локомотиве износи 43 просечно товарених кола. За потребе овог истраживања усвојене су вучне карактеристике маневарских локомотива које се користе у поменутиим техничким теретним станицама.
- Времена трајања активности које су садржане у технолошком интервалу сортирања нормирана су на основу вучних прорачуна и одређених претпоставки о стохастичком карактеру трајања извршавања маневарских операција.

За маневарске вожње усвојено је да се реализују убрзавањем маневарског састава до одређене брзине, затим кретањем достигнутом брзином и на крају кочењем до заустављања. Утврђивање времена трајања овако дефинисаних маневарских вожњи вршено је на основу меродавних растојања према усвојеном идејном решењу техничке теретне станице и на основу претпоставке о њиховој линераној зависности од величине маневарског састава. За времена трајања маневарских операција претпостављена је троугаона расподела (6.1), а вредности параметара усвојене су у складу са истраживањима у оквиру студија и пројеката рађених на Катедри за експлоатацију железница, железничке пруге, станице и чворове.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & , \quad x < a \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & , \quad a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & , \quad c \leq x \leq b \\ 0 & , \quad x > b \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

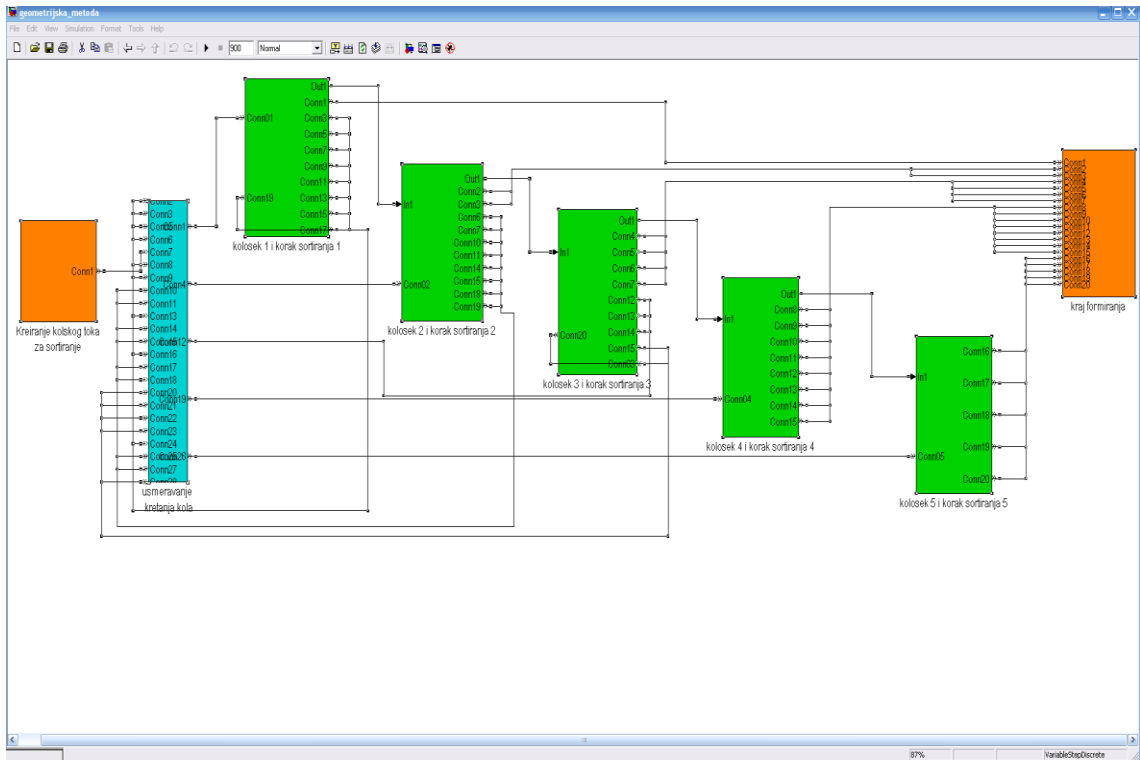
где су:

$f(x)$ – густина расподеле вероватноћа и
 a, b, c – параметри троугаоне расподеле.

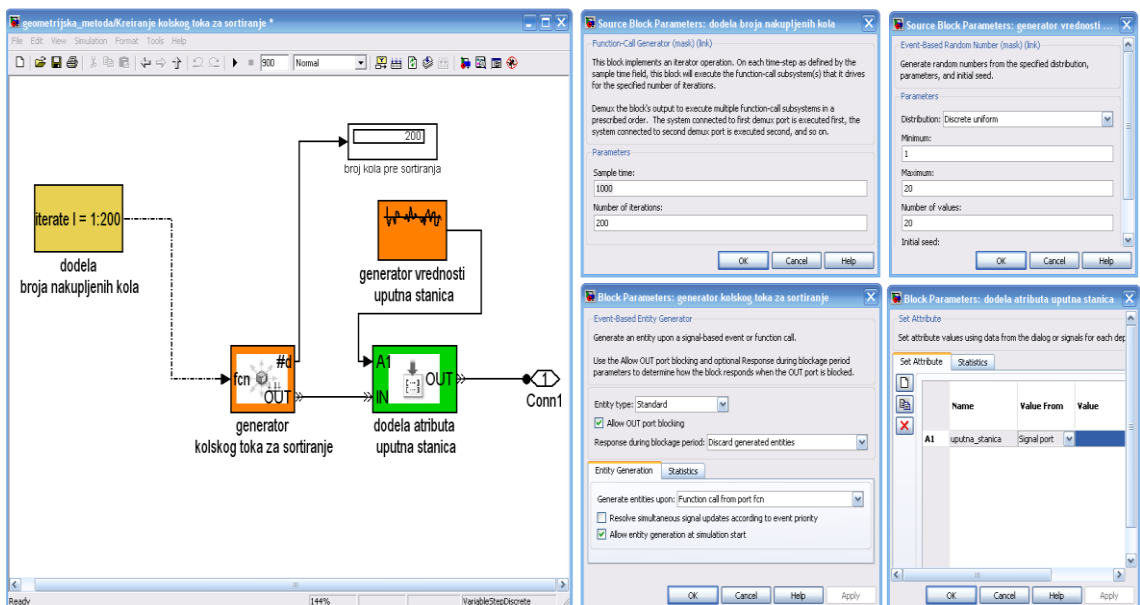
У оквиру рачунарске симулације извршена је анализа осетљивости метода на промену, како величине колског тока који треба једновремено формирати, тако и на број упутних станица у вишегрупним возовима. Анализирани су услови доласка колских токова у распону од 50 до 200 кола по циклусу формирања. Тестирање утицаја броја упутних станица формираних возова извршено је мењањем броја станица у распону од 5 до 20. Овај широки распон станица усвојен је како би одговарао условима формирања сабирних возова (број упутних станица за које се формира сабирни воз најчешће не прелази 10), али и условима формирања индустријских возова (број манипулативних места може износити 20, па чак и више). Како би се што јасније уочила зависност ефеката примењеног плана сортирања у односу на промену броја накупљених кола за сортирање и броја упутних станица, изабрана је равномерна расподела кола по упутним станицама. У циљу добијања релевантних показатеља извршено је по 100 симулација за сваки анализирани случај услова рада.

Симулациони модели изграђени су у програмском пакету SIMULINK и верификовани су поређењем излазних резултата са резултатима добијеним графичком методом. Изабрани програмски пакет пружио је могућност једноставног и брзог креирања модела коришћењем и прилагођавањем готових блокова из библиотека у којима су садржани потребни елементи за симулацију различитих система. Формирани симулациони модели садрже различите типове блокова генерисања трансакција, гранања и усмеравања трансакција, редова и уређаја обраде трансакција. Употребљени блокови међусобно су повезани у складу са технолошким процесом сортирања и у складу са функционалним везама између блокова. На слици 6.1 приказана је блок шема система плана сортирања применом геометријске методе као једне од разматраних метода за симултано формирање. Због сложености система, одређене групе блокова су обједињене и на шеми приказане као подсистеми.

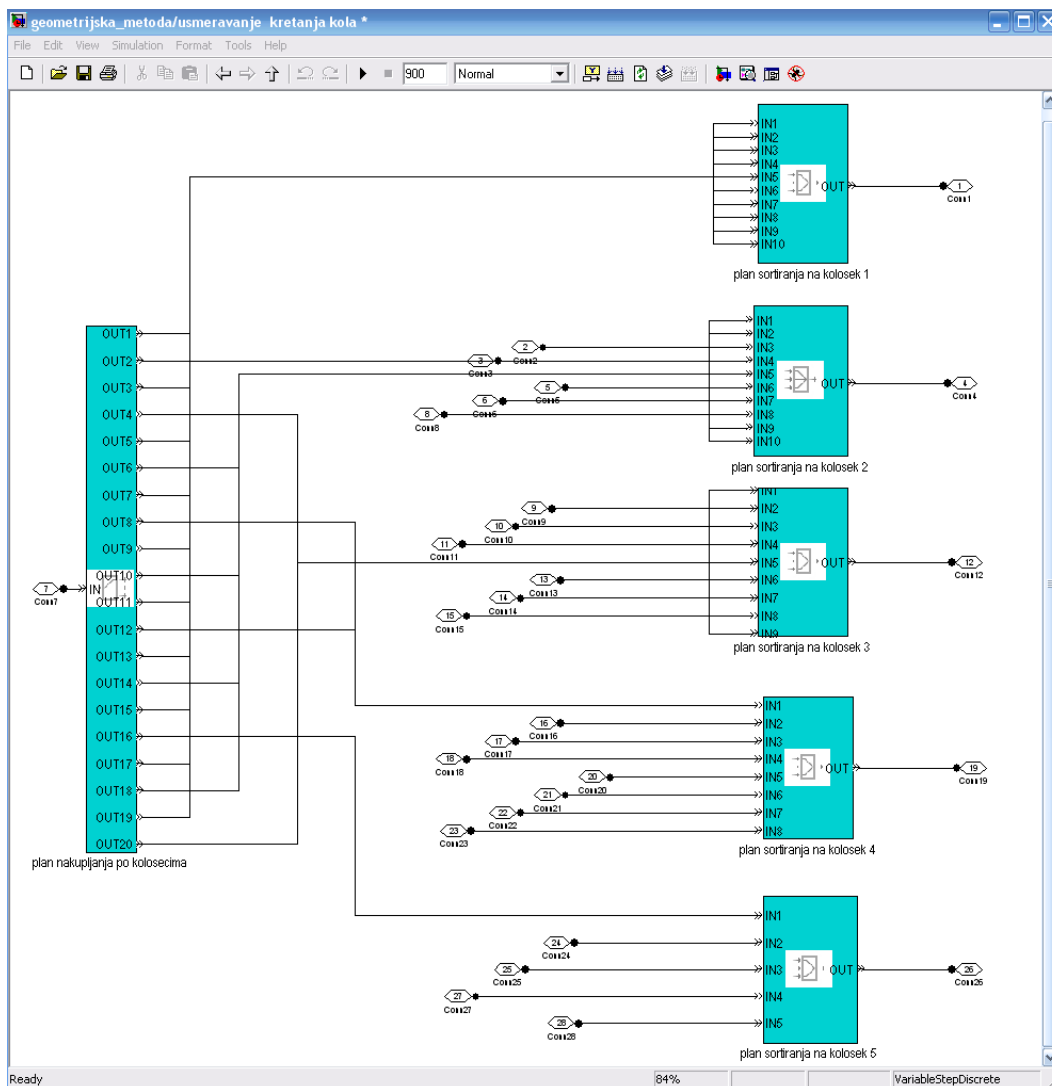
Блок шема система симултаног формирања вишегрупних возова започиње подсистемом креирања колског тока за сортирање у оквиру којег се генеришу трансакције (слика 6.2). Свакој генерисаној трансакцији (појединачним колима из колског тока) додељује се атрибут упутне станице за коју се кола упућују једним од возова које треба формирати. На основу додељених вредности атрибута упутне станице врши се усмеравање даљег кретања трансакција (слика 6.3).



Слика 6.1 Блок шема плана сортирања кола применом геометријске методе

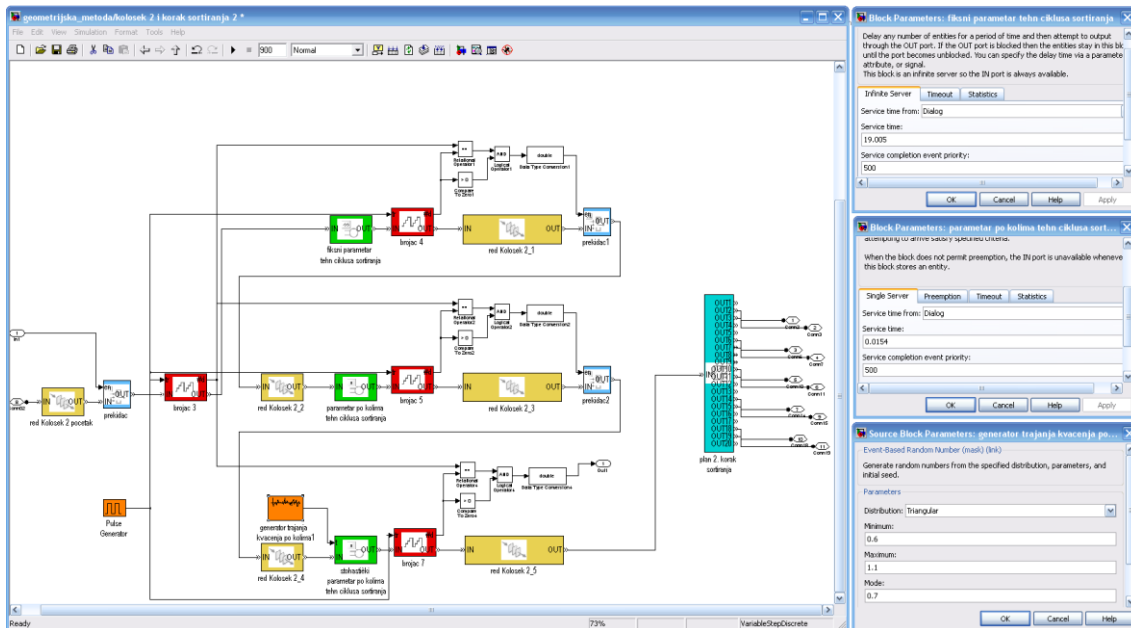


Слика 6.2 Подсистем креирања колског тока за сортирање



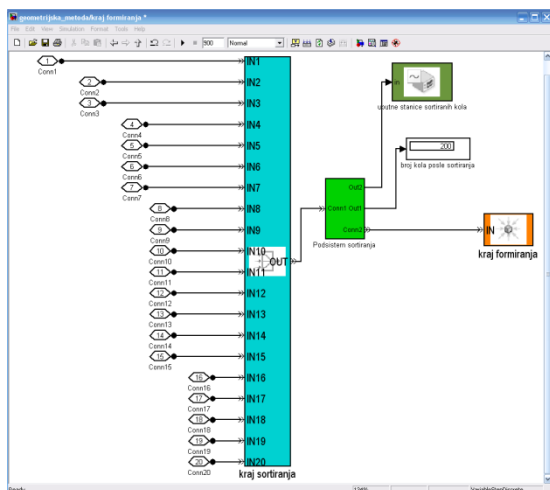
Слика 6.3 Подсистем плана сортирања

Подсистеми корака сортирања (слика 6.4) састоје се из више блокова редова и уређаја опслуживања. Сваки овај подсистем представља један теоријски колосек за накупљање и сортирање кола према упутним станицама на њему. Уређаји у оквиру подсистема представљају технолошке операције које се над тим колима врше у оквиру технолошког интервала корака сортирања, а у редовима се прикупљају подаци о чекању трансакција и њиховом броју испред сваког блока уређаја. Повезивање подсистема корака сортирања врши се у складу са логичким правилима и редоследом њиховог извршавања. Из тог разлога између подсистема корака сортирања успостављене су функционалне везе и логички прекидачи.

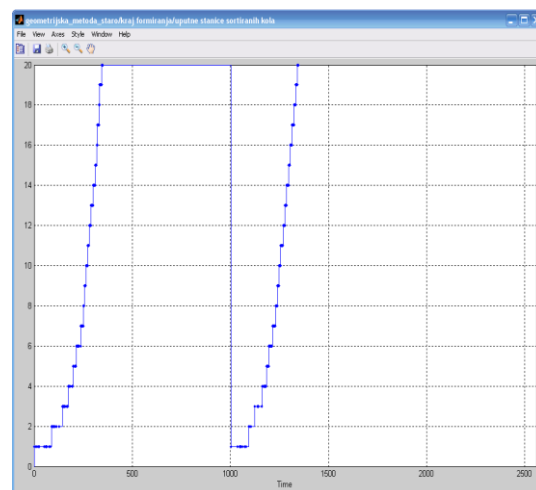


Слика 6.4 Подсистем корака сортирања

По проласку трансакција кроз модел, тј. пошто кола доспеју на колосеке формирања вишегрупних возова, трансакција се гаси у подсистему завршетка плана сортирања (слика 6.5). Резултати симулације могу се посматрати коришћењем више блокова, а за графичко приказивање на располагању су функције MATLAB-а (слика 6.6).



Слика 6.5 Подсистем завршетка плана сортирања



Слика 6.6 Истис резултата

6.2 Анализа резултата

У оквиру анализе резултата представљени су излазни резултати симулације значајни за планирање колосечних капацитета. Такође, анализирани су и показатељи квалитета рада станица, односно функционисања система применом посматраних метода за симултано формирање вишегрупних возова. Основни разлог оваквог избора показатеља јесте оцењивање новопроекттованих решења техничких теретних станица у циљу предузимања одговарајућих мера пре него што се станица изгради и пусти у експлоатацију. При анализирању резултата прво су сагледане теоријске вредности показатеља које не узимају у обзир пројектантска и експлоатациона ограничења. Након тога, анализиране су и вредности показатеља које се јављају у условима рада који укључују техничка и технолошка ограничења. Спровођење симулација над теоријским моделима и накнадно кориговање њихових резултата у складу са наведеним ограничењима омогућава међусобно поређење и анализирање метода, како за теоријске, тако и за реалне услове рада.

6.2.1 Ангажовање колосечних капацитета

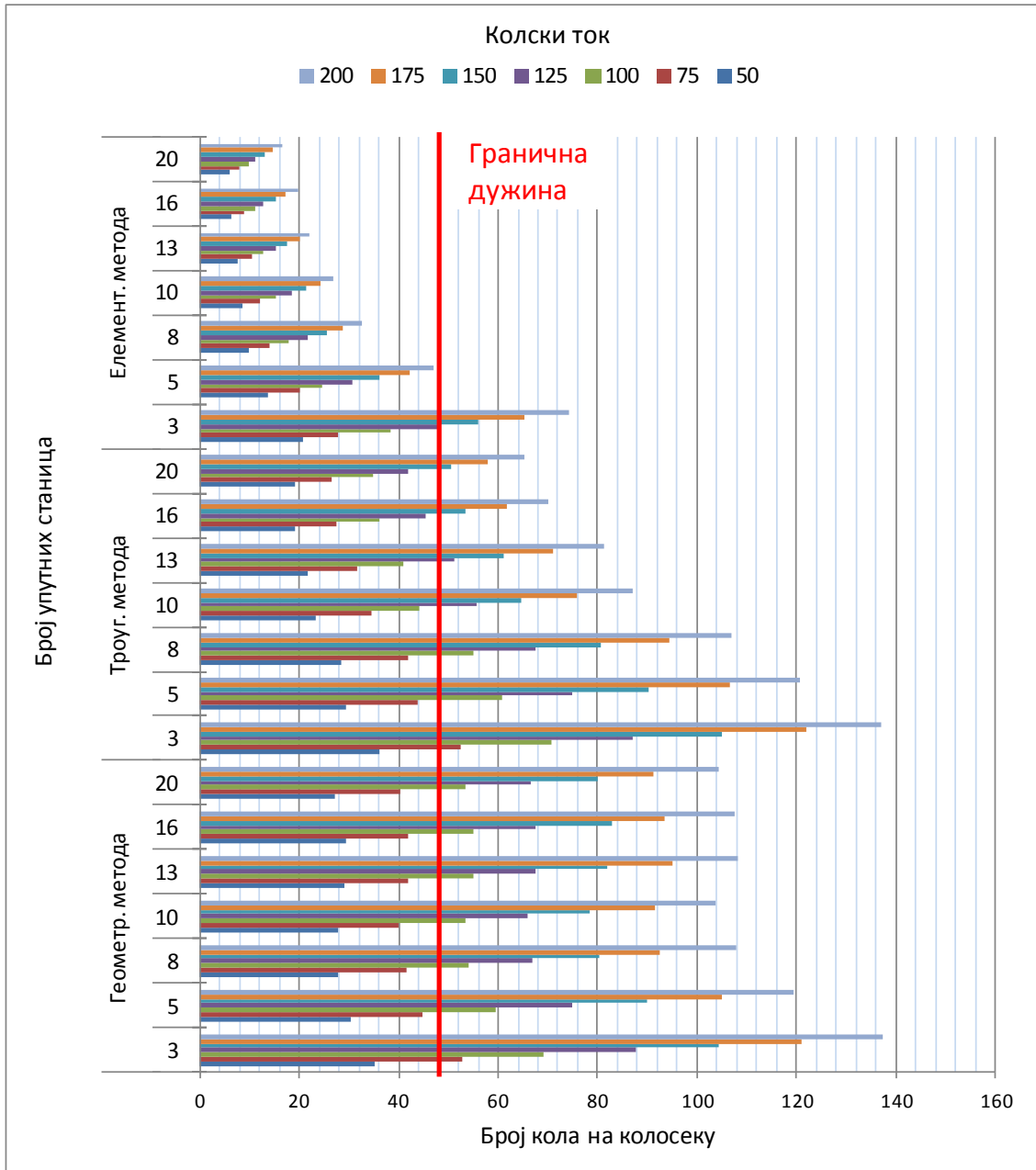
У оквиру овог истраживања првенствено је анализиран утицај плана сортирања кола метода за симултано формирање вишегрупних возова на ангажовање колосечних капацитета. Као што је већ познато на основу теоријских разматрања (Одељак 3.2), план сортирања кола директно утиче на потребне колосечне капацитете групе за накупљање. На другој страни, зависност колосечних капацитета групе за формирање од броја и дужине возова који се отпремају је дефинисана Одељком 5.1.2, па њихова детаљнија анализа овим симулационим моделом није обухваћена.

У показатеље значајне за планирање колосечних капацитета пре свега спадају потребан број колосека и њихове дужине. Поред ова два основна показатеља потребно је сагледати и уједначеност добијених дужина колосека. За меру уједначености узето је средње одступање дужина колосека, односно одступања појединачних дужина колосека у односу на просечну вредност.

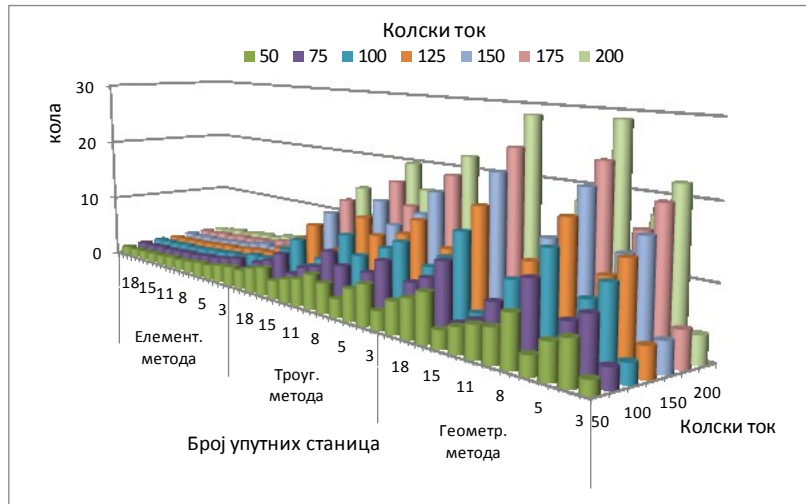
Теоријски потребан број колосека за накупљање и сортирање према броју упутних станица добија се на основу формулација зависности (4.6), (4.9), (4.12). Појединачне теоријске дужине колосека су у директној зависности од укупног броја накупљених кола. На слици 6.7 може се видети да максимална дужина колосека расте са величином колског тока, док повећање броја упутних станица доводи до умерених промена у тим дужинама. Међусобним поређењем метода уочава се да елементарна метода захтева далеко мање појединачне теоријске дужине колосека. Теоријске дужине појединачних колосека код геометријске методе су у основи нешто веће у поређењу са троугаоном методом. Све дужине су изражене у броју кола која се могу сместити на колосек.

Поред највеће дужине колосека, за адекватно планирање колосечних капацитета потребно је сагледати и дужине осталих колосека који улазе у састав колосечних група. На слици 6.8 дате су вредности одступања дужина колосека у односу на просечну вредност. Троугаону и геометријску методу карактерише велика неуједначеност колосека, што се посебно примећује за случајеве са 4, 5, 8, 10, 11, 16 и 18 упутних станица. Неуједначеност колосека за ове бројеве упутних станица је директна последица начина сортирања кола код поменутих метода.

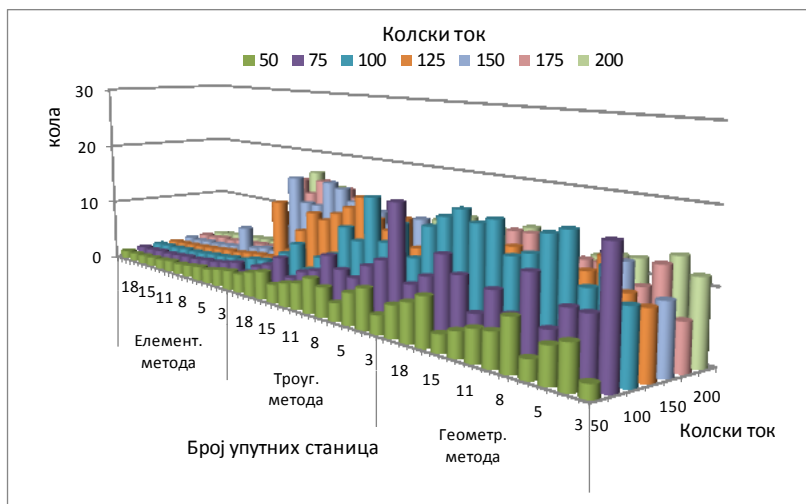
Детаљна анализа резултата појединачних теоријских дужина колосека (слика 6.7) указује да су неопходне дужине колосека за сортирање кола при коришћењу троугаоне и геометријске методе изузетно велике (у неким случајевима захтевају смештање 80 - 140 кола), што је неприхватљиво са аспекта експлоатације. Разлог је тај што на колосецима такве дужине кола са врха ранжирног брега не би стизала до одредишта (краја колосека) те би било неопходно обављати додатни маневарски рад, а то би знатно успоравало завршетак целог процеса. Због тога је неопходно, у циљу успостављања реалних релација, дужине ових колосека ограничити. Ово ограничење требало би да буде такво да колосеци својом дужином не превазилазе дужине колосека осталих група у ранжирном парку, а да појединачна одступања не износе више од 250 - 300 m. Потврда оваквог става може се видети и у резултатима стварних одступања дужина колосека приказаних на слици 6.9.



Слика 6.7 Појединачне теоријске дужине колосека



Слика 6.8 Теоријско одступање дужина колосека

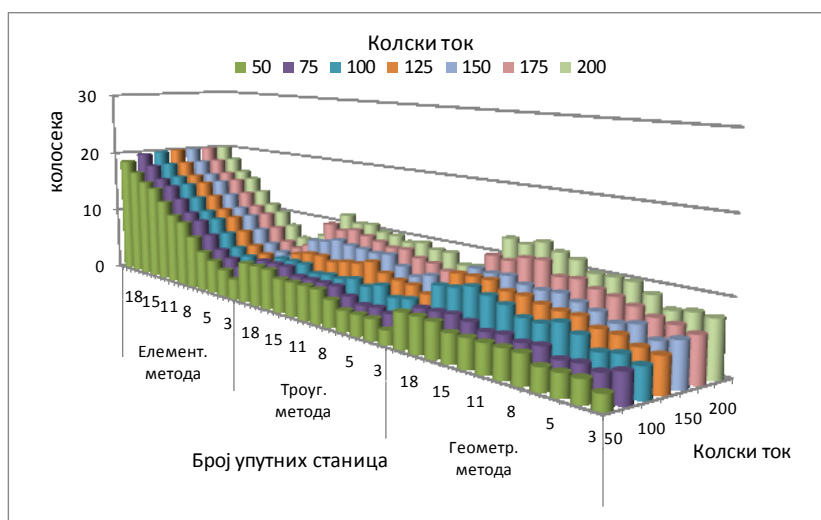


Слика 6.9 Стварно одступање дужина колосека

Као што је већ напоменуто, теоријске дужине колосека су у великом броју анализираних случајева далеко веће од допустивих вредности, што доводи до промене у стварној структури колосечних капацитета. Та промена се огледа у неминовном повећању броја колосека. Ограничена дужина и повећани број колосека узрокују уједначене дужине колосека при примени троугаоне и геометријске методе (слика 6.9). На другој страни елементарна метода има потпуну уједначеност колосека на нивоу теоријских поставки која се нарушава у изузетним случајевима великог броја накупљених кола.

Стваран број колосека за накупљање и сортирање кола према упутним станицама дат је на слици 6.10. На основу добијених резултата симулације уочава се релативна уједначеност потребног броја колосека према броју упутних станица.

На стваран број колосека у експлоатационим условима доминантан је утицај величине колског тока. За мање вредности броја накупљених кола (до 100 кола) стваран број колосека остаје у границама теоријских формулација. Са даљим повећањем броја накупљених кола потребан број колосека расте, при чему троугаона метода захтева најмањи број колосека. Иако теоријски геометријска метода ангажује најмањи број колосека, стваран број постаје знатно већи због великих појединачних дужина колосека. При примени елементарне методе број колосека и њихове дужине остају у границама теоријских формулација. На основу добијених резултата може се искључити могућност примене елементарне методе у условима великог броја упутних станица, јер се јавља потреба за великим бројем колосека релативно малих дужина.



Слика 6.10 Стваран број колосека

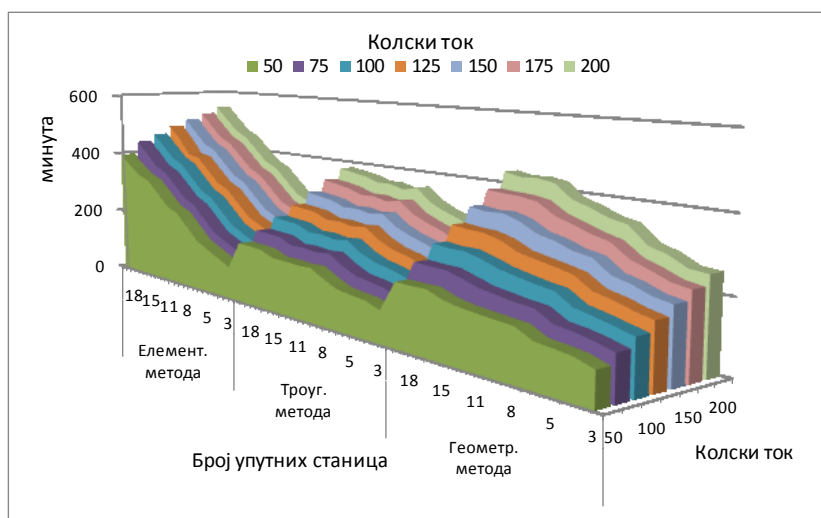
6.2.2 Квалитет рада станица

У групу показатеља квалитета рада станице могу се сврстати показатељи: утрошено време за извршавање одређеног процеса, остварени обим маневарског рада са колима или ангажовање маневарских локомотива. За потребе овог истраживања анализирано је време потребно за сортирање накупљених кола у процесу формирања вишегрупних возова и остварени обим маневарског рада са

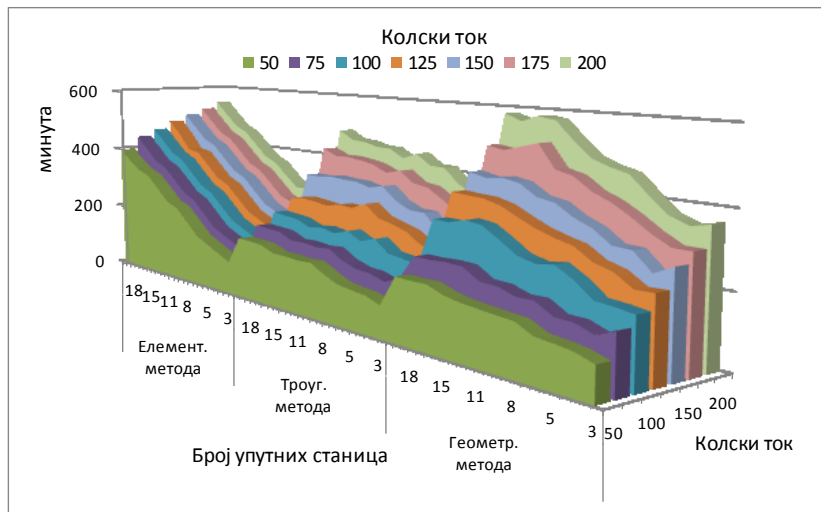
колима. Време потребно за сортирање кола представља време од тренутка када почиње прво извлачење кола или групе кола која су накупљена, па до тренутка када су састави сортирани и формирани према упутним станицама у возовима. Остварени обим маневарског рада са колима може се исказати:

- **укупним бројем извлачења**, одговара броју колосека на којима је обављено накупљање и сортирање кола према упутним станицама,
- **укупним бројем помераних кола**, обухвата сва померања кола у фази сортирања и
- **просечним бројем померања по колима**, представља однос укупног броја помераних кола и величине колског тока на формирању вишегрупних возова.

Теоријска и стварна укупна времена сортирања кола приказана су на слици 6.11 и слици 6.12. На основу релације (5.9) време реализације једног корака сортирања директно зависи од броја кола са којима треба обавити рад. Укупно време сортирања кола зависи од броја корака неопходних за сортирање кола чији број зависи од броја упутних станица. Експлоатациона ограничења утичу да време сортирања кола задржи тренд зависности у односу на величину колског тока, али умањују зависност времена сортирања од броја упутних станица. Разлог овоме је у чињеници да број извлачења (односно колосека на којима се врши накупљање) у реалним условима рада не зависи у толикој мери од броја упутних станица као у теоријским формулацијама, што се посебно односи на случајеве рада са великим бројем кола.



Слика 6.11 Теоријско време сортирања кола



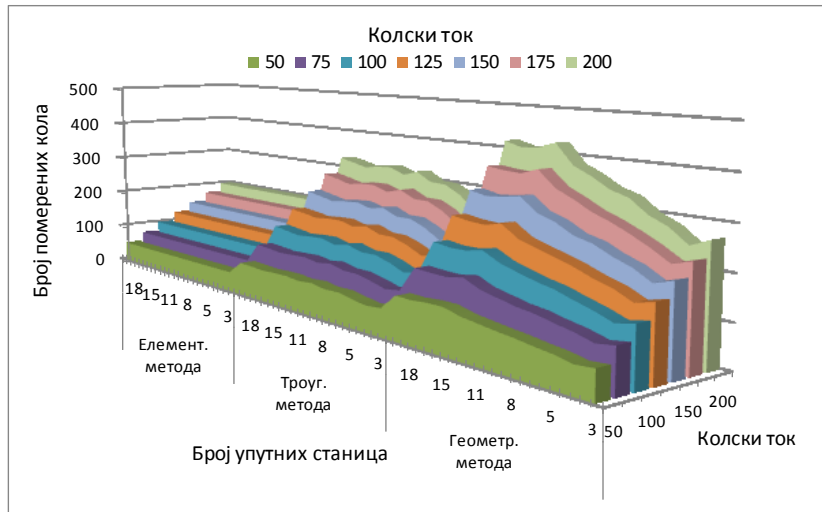
Слика 6.12 Стварно време сортирања кола

Међусобним поређењем метода за симултано формирање може се закључити да су времена сортирања кола применом геометријске и троугаоне методе мања у условима мањег обима рада и већег броја упутних станица. Елементарна метода има мање време сортирања у условима рада са већим бројем кола. Поређењем троугаоне и геометријске методе уочава се предност троугаоне методе која се огледа у мањој зависности од броја упутних станица.

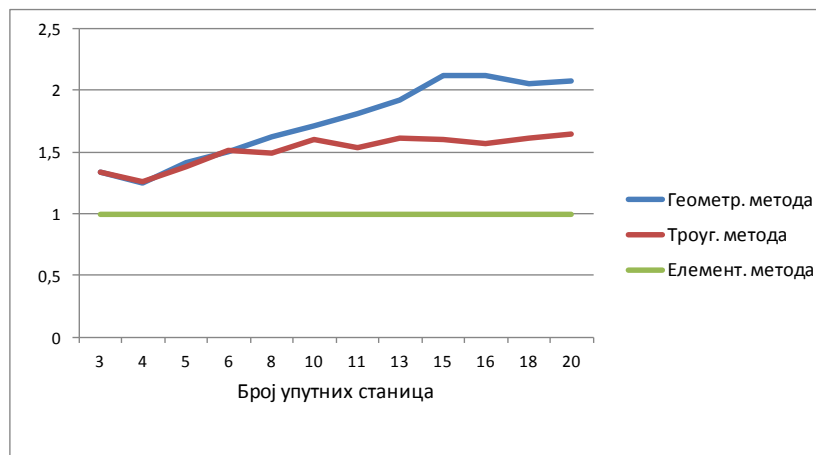
Укупан број помераних кола у току сортирања за реалне услове рада је остао исти на нивоу теоријског, док се на слици 6.13 лако може уочити зависност укупног броја помераних кола од примењене методе, величине колског тока и броја упутних станица.

До сличних закључака може се доћи и анализом просечног броја померања једних кола (слика 6.14). Формирање возова елементарном методом врши се тако што се сва кола померају само једном у процесу сортирања. Геометријска метода има тренд раста броја померања по колима са порастом броја упутних станица које превазилази два померања за већи број група (преко 15 упутних станица). Троугаона метода има нешто умеренији тренд раста који не прелази два померања по колима у процесу сортирања.

Кад је у питању анализа показатеља укупног броја извлачења тада за њега у целости одговара претходна анализа резултата везана за број колосека.



Слика 6.13 Укупан број помераних кола у току сортирања



Слика 6.14 Просечан број померања по колима

6.3 Резиме

У овом истраживању извршена је анализа ефеката примене метода за симултано формирање вишегрупних возова на колосечне капацитете техничких теретних станица и квалитет рада станице. Истраживањима је показано да ограничења са становишта експлоатације и пројектовања ранжирних постројења утичу и мењају коначне ефекте примењених метода у односу на теоријске формулације. Поређење метода извршено је на основу симулационих модела теоријских планова сортирања, а накнадно кориговање и усаглашавање са ограничењима проистеклим из процеса пројектовања и експлоатације ранжирних

постројења даје вредности показатеља које са довољном прецизношћу одражавају технолошки процес рада у реалним условима. На основу добијених резултата не може се дати јединствен одговор која метода је најцелисходнија. Број група кола на формирању и величина колског тока умногоме утиче на процес сортирања кола. Елементарна метода има најбоље укупне ефекте при формирању возова који се састоје из мањег броја група са великим бројем кола. Симулациони модели су показали да троугаоно и геометријско сортирање захтева приближно једнак број колосека, али да су укупне потребне дужине колосека веће при примени геометријске методе. Уједначеност добијених дужина колосека код ове две методе варира и зависи од броја група на формирању, док за исти број група кола долази до одступања у уједначености колосека са променом величине колског тока. Анализом резултата може се доћи до закључка да методе имају значајне разлике у погледу параметара квалитета рада станица, што посебно долази до изражаја у условима великог броја кола на формирању.

Пошто је број метода за симултано формирање, посматрајући планове сортирања кола, велики и експоненцијално расте са порастом броја група на формирању, даља истраживања ће се усмерити ка формулисању математичких модела за изналажење оптималних планова који зависе од броја група и величине колског тока. Ови математички модели би поред основних ограничења редоследа сортирања група у себи требали да садрже и техничко-технолошке услове, а кроз функцију циља да искажу трошкове система.

7 Математичка оптимизација симултаног формирања вишегрупних возова

Иако су истраживања на тему математичке оптимизације симултаног формирања вишегрупних возова започета крајем шездесетих година (*Koning & Schaltegger 1967*), комплексност маневарског рада и изражени утицај људског фактора на ток његовог извршавања су дуги низ година у пракси спречавали било какве промене и прилагођавања традиционалних планова сортирања кола. С друге стране, данашњи ниво техничке и технолошке развијености пружио је могућност аутоматизације рада и смањења маневарског особља на мањи број школованих оператера. Такође, интензиван развој рачунарства допринео је напретку математичких дисциплина и донео могућност оптимизације оперативног рада и решавања практичних примера релативно великих димензија. На тај начин, не само што су решавани проблеми у пракси, већ је теоријски доказивана комплексност проблема и практични аспект добијених резултата. Теоријске поставке, свакодневна потреба и технолошка развијеност довели су до актуелизовања истраживања у овој области.

У последњих десетак година покренуто је неколико пројеката који су подједнако укључили железничке управе и академске институције у реализацију истраживања математичке оптимизације капацитета техничких теретних станица. Дефинисање и класификација модела формирања вишегрупних возова, њихова математичка формулација, али и остварени практични резултати ових истраживања објављени су у радовима (*Gatto и др. 2006, Di Stefano и др. 2007, Jacob 2007, Hansmann & Zimmermann 2008*).

У циљу сагледавања актуелности теме математичке оптимизације симултаног формирања вишегрупних возова треба напоменути да су слична истраживања рађена и на тему оптимизације распоређивања путничких гарнитура, трамваја и аутобуса унутар сервисних постројења (*Blasum и др. 1999, Winter & Zimmermann 2000, Gallo & Di Miele 2001, Freling и др. 2005, Borndörfer & Cardonha 2012*). Као и у случају техничких теретних станица, циљ ових истраживања јесте минимизирање ангажованих капацитета и обима маневрисања у свакодневном раду.

7.1 Прелиминарне поставке математичке оптимизације

Математичка оптимизација се дефинише као проналажење глобалне екстремне вредности (максимума или минимума) функције циља, односно одређивање „најбољег“ или „најмање лошег“ решења из простора могућих у односу на услове и систем ограничења. Ако је простор у коме се врши претрага решења коначан или пребројиво бесконачан скуп онда је дефинисани проблем *комбинаторне (дискретне) оптимизације*, док је у супротном реч о *континуалној оптимизацији*. Проблем комбинаторне оптимизације формулише се на следећи начин (*Cvetković и др. 1996*).

Дат је коначан или пребројиво бесконачан скуп S и функција $f: S \rightarrow R$. Наћи минимум функције f на скупу S , тј. решити задатак:

$$\min_{x \in S} f(x) \tag{7.1}$$

где су:

- S – допустиви скуп,
- x – допустиво решење и
- f – функција циља.

Допустива решења x_{opt} називају се оптималним решењима проблема ако је испуњено $f(x_{opt}) = \min_{x \in S} f(x)$.

Како је $\max_{x \in S} f(x) = -\min_{x \in S} (-f(x))$, проблем максимизације се своди на проблем минимизације, па је довољно разматрати само један од ова два проблема.

За потребе спровођења истраживања у оквиру дисертације потребно је из проблема комбинаторне оптимизације издвојити класу бинарног целобројног програмирања (*Krumke 2006*):

$$\begin{aligned} \min \quad & c^t x \\ \text{Ax} \leq & b \\ x \geq & 0 \\ x \in & B^n \end{aligned} \tag{7.2}$$

где су:

- A – матрица реалних координата (димензије $m \times n$),
- b, c – вектори реалних координата (одговарајућих димензија),
- B^n – скуп n - торки бинарних координата.

Специфичност простора допустивих решења проблема бинарног целобројног програмирања, као и већине проблема комбинаторне оптимизације, онемогућава примену нумеричких метода заснованих на класичној математичкој анализи, већ се егзактно решавање ових проблема врши алгоритмима претраге скупа допустивих решења. Претраживање може бити потпуно или примењујући различите методе одсецања или гранања и ограничавања које гарантују оптималност добијеног решења. Потребно је нагласити два основна практична недостатка ових алгоритама. Први недостатак испољава се у случајевима решавања проблема великих димензија када је услед недостатка рачунарске меморије физички немогуће спровести претрагу до краја. Други недостатак је време рада рачунара при решавању. Овај недостатак испољава се и у неким случајевима решавања проблема малих димензија за које се оптимално решење може добити након извесног времена рада рачунара које је оцењено као неприхватљиво за практичне потребе.

7.2 Бинарна интерпретација процеса сортирања кола

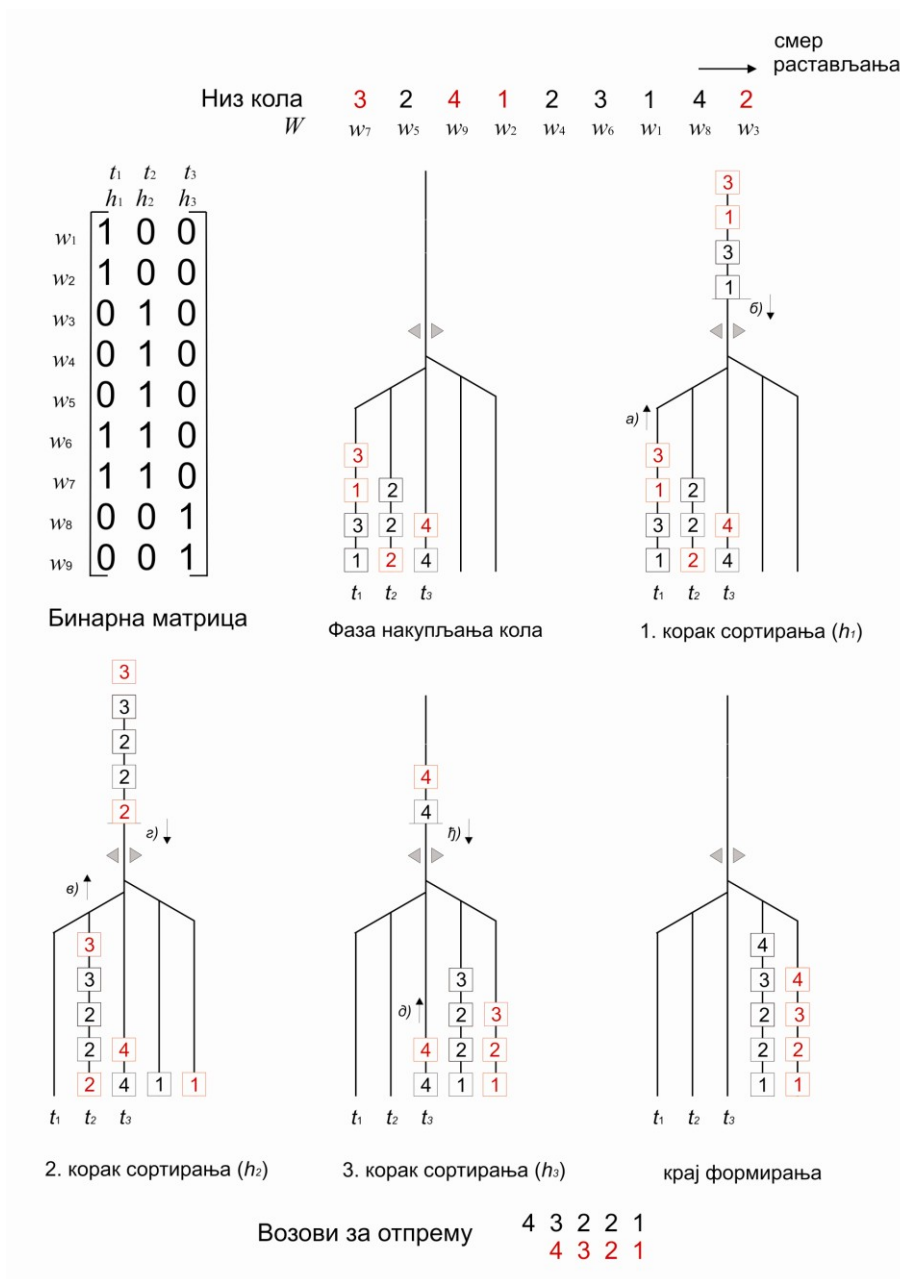
Задатак за одређену техничку теретну станицу која врши формирање вишегрупних возова у оквиру расподеле ранжирног рада на мрежи представља формирање n^v ($v = 1, \dots, m$) возова од накупљених N кола. Формирање возова врши се уврштавањем кола према редоследу упутних станица g_s ($s = 1, \dots, g_{max}$), при чему не морају сви возови имати максималан број станица g_{max} . Овај ранжирни задатак може се представити матрицом \mathbf{ST} у којој члан ST_s^v означава број кола које треба сортирати за упутну станицу s воза v .

Узимајући у обзир специфичност метода за симултано формирање вишегрупних возова, сва кола која припадају упутним станицама истог редног броја свих возова могу се објединити у блокове сортирања. На основу овога, претходна матрица своди се на вектор \mathbf{ST} у којем члан ST_s означава укупан број кола у блоку сортирања редног броја s . Разврставајући кола према редном броју припадајућег блока сортирања, накупљени колски ток од N кола представља се у форми растућег низа бројева $W = \{w_1, \dots, w_N\}$. Такође, колосецима у оквиру групе за накупљање кола, која има K колосека, додељују се ознаке k_j ($j = 1, \dots, K$).

У току симултаног формирања вишегрупних возова сортирање кола према припадајућим блоковима врши се етапно, при чему свако извлачење накупљених кола на једном колосеку представља засебан корак сортирања h_j ($j = 1, \dots, K$) вектора \mathbf{H} . Иако се теоријски колосеци могу вишеструко користити у току процеса сортирања, у практичној примени метода за симултано формирање не врши се поновно ранжирање кола на ослобођене колосеке. Претпостављајући ово ограничење, максималан број корака сортирања једнак је броју колосека групе за накупљање K .

На основу поменуте поставке симултаног формирања вишегрупних возова, процес накупљања и сортирања кола према припадајућим блоковима може се представити бинарном матрицом сортирања \mathbf{X} типа ($N \times K$). Елемент матрице x_j^i представља алокацију кола w_i у току корака сортирања h_j . Додељена вредност 1 означава да су кола учествовала у кораку h_j , односно да су у току сортирања извучена са колосека k_j . Насупрот томе, вредност 0 означава да кола нису учествовала и да нису померана у посматраном кораку сортирања.

Свака колона j бинарне матрице X представља састав кола који је извучен са колосека k_j , док свака врста i представља мапу кретања кола w_i у току процеса сортирања према припадајућим блоковима. Први члан сваке врсте који има вредност 1 означава колосек на који су кола упућена у процесу расформирања припелих возова, тј. у току фазе накупљања кола. Пример бинарне интерпретације плана сортирања кола дат је на слици 7.1 која илуструје сортирање 9 кола у оквиру формирања 2 четворогрупна састава.



Слика 7.1 Бинарна интерпретација плана сортирања кола

Врсте бинарне матрице могу се посматрати и као бинарни записи сортирања кола w_i чија нумеричка вредност износи $b_i = \sum_{j=1}^{K_{nak}} 2^{j-1} x_j^i$. Даља истраживања која ће бити представљена у оквиру ове дисертације заснивају се на следећој дефиницији допустивог односа бинарних записа за било који пар кола која учествују у сортирању.

Деф.: Ако је $B = \{b_1, \dots, b_N\}$ скуп бинарних записа сортирања за колски ток $W = \{w_1, \dots, w_N\}$, двоја кола w_i и w_j , $i < j$, промениће свој релативни положај у односу на почетак сортирања ако и само ако је $b_i < b_{i+1}$.

Из ове дефиниције допустивих међусобних релација бинарних записа произилази допустивост плана сортирања кола. Допустивост плана сортирања огледа се у томе да се кола са већим редним бројем припадајуће упутне станице по завршетку сортирања уврштавају у отпремни воз иза кола која имају мање редне бројеве упутних станица. Оригинална формулација ове дефиниције у виду премисе са доказом може се наћи у раду (*Jacob и др. 2011*) у коме су детаљно разматрана својства нумеричких вредности бинарних записа кола која учествују у сортирању.

Да би план сортирања кола био допустив потребно је да низ бинарних записа у скупу B буде растући, при чему се за сваки пар суседних кола тока W захтева испуњавање следећег услова. Уколико пар суседних кола припада различитим блоковима сортирања онда наредна кола морају имати бинарни запис са већом и само већом нумеричком вредношћу, док се за суседна кола истог блока не захтева овакав строг услов монотоности.

На основу претходно изложене интерпретације етапног тока сортирања кола у оквиру симултаног формирања вишегрупних возова може се формулисати *модел за одређивање плана сортирања кола* у форми бинарног целобројног програмирања (7.3) ÷ (7.7). Овај модел представља тривијалан приступ проблему, јер је заснован на претпоставци неограничених расположивих колосечних капацитета (неограничен број колосека неограничених дужина) и као такав се не може користити за решавање практичних проблема. С друге стране, модел се показао ефикасним и за услов ограниченог броја колосека (*Maue & Nunkesser 2009, Jacob и др. 2011*), а у дисертацији ће се користити као основ за развој сложених модела решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова.

$$\min \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i \quad (7.3)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i \geq 1, \quad i = 1 \quad (7.4)$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 1, \quad w_i \in F \quad (7.5)$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 0, \quad w_i \in W \setminus F \quad (7.6)$$

$$x_j^i \in \{0,1\}, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, i = \{1, \dots, N\} \quad (7.7)$$

где су:

W – колски ток за формирање вишегрупних возова,

F – подскуп колског тока W у којем се налазе кола чији се индекс припадајућег блока сортирања s разликује од односног индекса претходних кола,

N – укупан број накупљених кола,

η – горња граница броја корака сортирања,

i – индекс кола w у колском току,

j – индекс корака сортирања h и

$$x_j^i = \begin{cases} 1 & \text{– уколико кола } w_i \text{ учествују у извлачењу у току корака} \\ & \text{сортирања } h_j, \\ 0 & \text{– уколико кола } w_i \text{ не учествују у извлачењу у току} \\ & \text{корака сортирања } h_j. \end{cases}$$

Приликом одређивања плана сортирања настоји се минимизирати број померања кола који се на врло једноставан начин представља сумом вредности свих елемената бинарне матрице сортирања $\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i$ (7.3). Релација (7.4) условљава да прва кола колског тока сортирања учествују у процесу сортирања кола према упутним станицама. Улога овог ограничења је у онемогућавању

допустивости решења у којем се кола првих упутних станица директно накупљају на колосецима групе за формирање возова. Иако је овакво решење боље са аспекта ранжирног рада на сортирању, јер смањује укупан број померених кола, у пракси се оно избегава. Разлог је у пружању могућности коришћења ових колосека за неке друге намене док траје накупљање кола вишегрупних возова, које у највећем броју случајева траје знатно дуже од самог сортирања кола. Ограничења (7.5) и (7.6) интерпретирају основне услове који произилазе из дефиниције међусобног односа бинарних записа сортирања. Постављање услова бинарних вредности променљивих исказано је у (7.7).

7.3 Математички модели за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова

Предмет истраживања ове дисертације је креирање математичких модела који се могу користити за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова. Проблем симултаног формирања вишегрупних возова биће разматран с циљем:

- решавања проблема свакодневног рада техничких теретних станица,
- израде технолошког процеса рада техничких теретних станица за одређени краткорочни период (нпр. период важења реда вожње) и
- димензионисања потребних колосечних капацитета у оквиру пројеката изградње нових или реконструкције постојећих техничких теретних станица.

У том смислу може се извршити систематизација модела у зависности од тога да ли решавају проблеме оперативног, тактичког или стратешког планирања симултаног формирања вишегрупних возова. Поред систематског формулисања математичких модела, предмет истраживања примарно је усмерен на модел стратешког нивоа у циљу оптималног димензионисање потребних колосечних капацитета и подизање квалитета рада у техничким теретним станицама.

7.3.1 Проблем оперативног планирања

Техничке теретне станице свакодневно се, између осталог, сусрећу са проблемом да за конкретне услове, који су окарактерисани бројем и величином група кола вишегрупних возова, утврде такав план накупљања и сортирања кола који ће омогућити формирање возова у најкраћем временском периоду. Смањење времена формирања вишегрупних возова омогућава њихову благовремену отпрему, али и ослобађање капацитета за пријем и прераду нових возова што свакако утиче на повећање експлоатационе поузданости рада станице.

Важна карактеристика проблема оперативног нивоа је да се формирање возова врши у условима дефинисаних расположивих колосечних капацитета, како по питању броја колосека, тако и по питању њихове дужине. Дакле, у овом делу представиће се модел који се може користити у циљу оптимизације свакодневног оперативног рада, односно извршавања једног циклуса симултаног формирања вишегрупних возова.

У моделу за решавање оперативног планирања симултаног формирања вишегрупних возова минимизира се време формирања T_{form} , а разматрани модел се може приказати у следећем облику (7.8) ÷ (7.16):

$$\min T_{form} \quad (7.8)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j=1}^K 2^{j-1} x_j^i \geq 1, \quad i = 1 \quad (7.9)$$

$$\sum_{j=1}^K 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^K 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 1, \quad w_i \in F \quad (7.10)$$

$$\sum_{j=1}^K 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^K 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 0, \quad w_i \in W \setminus F \quad (7.11)$$

$$h_j - x_j^i \geq 0, \quad j = \{1, \dots, K\}, w_i \in F \quad (7.12)$$

$$h_j - h_{j+1} \geq 0, \quad j = \{1, \dots, K - 1\} \quad (7.13)$$

$$\sum_{i=1}^N l_i x_j^i \leq \vartheta L_j, \quad j = \{1, \dots, K\} \quad (7.14)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i x_j^i \leq Q_{max}, \quad j = \{1, \dots, K\} \quad (7.15)$$

$$x_j^i, h_j \in \{0,1\}, \quad j = \{1, \dots, K\}, i = \{1, \dots, N\} \quad (7.16)$$

где су поред већ уведених ознака:

K – број колосека групе за накупљање кола,

l_i – дужина кола i [m],

q_i – бруто маса кола i [t],

L_j – корисна дужина колосека j [m],

ϑ – коефицијент просторног искоришћења колосека,

Q_{max} – максимална дозвољена маса маневарског састава [t] и

$$h_j = \begin{cases} 1 & \text{– уколико се корак сортирања } h_j \text{ реализује,} \\ 0 & \text{– уколико се корак сортирања } h_j \text{ не реализује.} \end{cases}$$

Време формирања T_{form} једнако је збиру технолошких интервала корака сортирања t_i^{sor} . Технолошки интервал корака сортирања симултаног формирања вишегрупних возова дефинисан је у Одељку 5.3.2, а његово утврђивање врши се према релацији (5.9). Параметар γ , који представља очекивани број маневарских операција (састављања или растављања) по колима, требало би утврђивати засебно за сваки корак сортирања у зависности од броја кола и броја блокова у које су та кола уврштена у току односног корака. За потребе модела вредност параметра γ може се апроксимирати горњом границом која се јавља у случају елементарне методе формирања:

$$\gamma^* = \left(1 + \sum_{s=1}^{g_{max}} \frac{\left(\frac{ST_s}{\sum ST_s} \right)^2}{1 - \left(\frac{ST_s}{\sum ST_s} \right)^2} \right)^{-1} \quad (7.17)$$

где су:

γ^* – горња граница броја маневарских операција по колима и

ST_s – број кола у блоку сортирања ST_s ($s = 1, \dots, g_{max}$).

У складу са дефинисаним начином утврђивања технолошког интервала корака сортирања и усвојеним променљивама модела, функција циља израчунава се на основу следећег израза:

$$T_{form} = \sum t_i^{sor} = a \sum_{j=1}^K h_j + (b_1 + b_2 \gamma^*) \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N x_j^i \quad [min]$$

или у скраћеном облику: (7.18)

$$T_{form} = T_{form}^h \sum_{j=1}^K h_j + T_{form}^x \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N x_j^i \quad [min]$$

где су:

a, b_1, b_2 – нормативни параметри технолошког интервала корака сортирања.

Да би модел био применљив, потребно је поред основних ограничења плана сортирања (7.9) ÷ (7.11), која су идентична ограничењима (7.4) ÷ (7.6) претходног модела, сагледати и узети у обзир правила симултаног формирања, као и техничко-технолошке услове под којима се формирање спроводи.

Ограничења (7.12) и (7.13) моделирају основна правила симултаног формирања. Променљива корака сортирања h_j добија вредност 1 уколико постоје барем једна кола чији бинарни запис на позицији односног корака сортирања x_j^i има додељену вредност 1 (7.12). Променљивама h_j мора се додељивати вредност 1 искључиво према редоследу индекса j (7.13), што осликава правило концентрације рада на групу узастопних колосека. Ова концентрација поред рационалног ангажовања колосека, повећава безбедност и олакшава рад маневарском особљу.

Као што је већ напоменуто у оквиру поставке проблема оперативног планирања, симултано формирање вишегрупних возова врши се у условима ограничених колосечних капацитета. Према томе, сума појединачних дужина накупљених кола $\sum_{i=1}^N l_i x_j^i$ не сме бити већа од дужине односног колосека која се може искористити за накупљање кола ϑL_j (7.14). Још једно ограничење које произилази из групе техничко-технолошких услова је услов технологије

маневарског рада и расположивих маневарских капацитета. Како обједињено извлачење свих кола са колосека представља најцелисходнију технологију маневрисања у условима прераде на ранжирном брегу, укупна маса накупљених кола на једном колосеку не сме прећи максималну дозвољену масу састава Q_{ms} . Гранична вредност Q_{ms} прорачунава се на основу вучне силе ангажоване маневарске локомотиве (5.2). Овај услов исказан је у ограничењу (7.15) преко израза $\sum_{i=1}^N q_i x_j^i$ који представља стварну масу састава са којим се маневрише у односном кораку сортирања. Као и у случају основног модела за решавање плана сортирања кола, све променљиве у овом моделу узимају искључиво бинарне вредности (7.16).

Поред директног излазног резултата о времену формирања које се функцијом циља тежи минимизирати, анализом добијених вредности променљивих модела могу се индиректно сагледати и други параметри оперативног рада у току формирања вишегрупних возова. Добијене вредности бинарне матрице \mathbf{X} и бинарног вектора \mathbf{H} интерпретирају план померања кола у току корака сортирања и реализоване кораке сортирања и у потпуности осликавају квалитет решења.

7.3.2 Проблем тактичког планирања

Тактички ниво одлучивања има за циљ планирање и расподелу ресурса на краткорочном плану и од велике је важности за рад техничких теретних станица. На тактичком нивоу планирања дефинише се организација и технологија рада станица у складу са предвиђеним потребама, а самим тим утиче се на њихову прерадну моћ и трошкове који ће настати у току посматраног експлоатационог периода. У случају симултаног формирања вишегрупних возова краткорочно планирање најчешће се врши за период важења реда вожње и обухвата израду предлога технологије рада и намене колосечних капацитета у техничким теретним станицама. Ово планирање врши се на основу предвиђања о броју и саставу вишегрупних возова и јачини колских токова за све упутне станице. У моделу за решавање тактичког планирања симултаног формирања вишегрупних возова минимизирају се укупни трошкови експлоатације на годишњем нивоу TC_{eksp} .

Попут проблема на оперативном нивоу и проблеми тактичког планирања могу се решавати моделом који се заснива на познавању потпуних података о броју и дужини колосека групе за накупљање кола. У том случају модел за решавање проблема тактичког планирања задаје се у облику (7.8) ÷ (7.16) уз прилагођавање функције циља.

Како се тактички ниво односи на планирање капацитета и прерасподелу намене колосека ранжирног парка у оквиру израде технолошког процеса рада за период важења реда вожње, допуштена је релаксација ограничења расположивих колосечних капацитета. У том случају број колосека се не ограничава унапред дефинисаном групом колосека, него усвојеном горњом границом броја ранжирних колосека које је могуће наменити накупљању и сортирању кола према блоковима $K \rightarrow \eta$. Такође, ни дужине колосека не морају бити исказане конкретним појединачним дужинама, већ јединственом максималном дужином ранжирних колосека $L_j \rightarrow L_{max}$. Вредност L_{max} дефинише се у складу са постојећом висином ранжирног брега имајући на уму услов да спуштена кола низ ранжирни брег морају стићи до краја колосека без додатног маневарског рада (Одељак 5.1.2).

Представљени приступ проблему тактичког нивоа заснива се на моделу решавања проблема оперативног планирања (7.8) ÷ (7.16) уз поменута прилагођавања одређених ограничења и функције циља.

Модел решавања проблема тактичког планирања симултаног формирања вишегрупних возова може се приказати у облику (7.19) ÷ (7.27):

$$\min TC_{eksp} \quad (7.19)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i \geq 1, \quad i = 1 \quad (7.20)$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 1, \quad w_i \in F \quad (7.21)$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 0, \quad w_i \in W \setminus F \quad (7.22)$$

$$h_j - x_j^i \geq 0, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, w_i \in F \quad (7.23)$$

$$h_j - h_{j+1} \geq 0, \quad j = \{1, \dots, \eta - 1\} \quad (7.24)$$

$$l_{sr} \sum_{i=1}^N x_j^i \leq \vartheta L_{max}, \quad j = \{1, \dots, \eta\} \quad (7.25)$$

$$q_{sr} \sum_{i=1}^N x_j^i \leq Q_{max}, \quad j = \{1, \dots, \eta\} \quad (7.26)$$

$$x_j^i, h_j \in \{0,1\}, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, i = \{1, \dots, N\} \quad (7.27)$$

где су поред већ уведених ознака:

l_{sr} – просечна дужина кола [m],

q_{sr} – просечна бруто маса кола [t] и

L_{max} – максимална допуштена корисна дужина ранжирних колосека [m].

За потребе овог модела у годишње експлоатационе трошкове могу се уврстити трошкови задржавања кола у подсистему формирања вишегрупних возова, трошкови погонске енергије и трошкови одржавања са амортизацијом средстава рада. Са аспекта формирања вишегрупних возова трошкови ангажовања маневарских локомотива и особља (станичног и локомотивског) представљају неповратни трошак и не морају се укључити у оптимизациони поступак формирања вишегрупних возова. Другим речима, овај трошак везан је за рад целокупног система техничке теретне станице и као такав може се занемарити у оквиру посматраног проблема. Функција циља може се написати у облику израза:

$$TC_{eksp} = TC_{zk} + TC_{en} + TC_{odr} \quad [нов.јед.] \quad (7.28)$$

где су:

TC_{zk} – годишњи трошкови задржавања кола [нов.јед.],

TC_{en} – годишњи трошкови погонске енергије [нов.јед.] и

TC_{odr} – годишњи трошкови одржавања са амортизацијом [нов.јед.].

Појединачни трошкови експлоатације могу се прорачунати на следећи начин (Jokić 1979):

$$TC_{zk} = 365 e_{k\check{c}} N T_{form} \text{ [нов.јед.]} \quad (7.29)$$

$$TC_{en} = 365 e_g g \frac{T_{form}}{60} \text{ [нов.јед.]} \quad (7.30)$$

$$TC_{odr} = \frac{q}{100} n_{kol} I_{kol} \text{ [нов.јед.]} \quad (7.31)$$

где су:

$e_{k\check{c}}$ – просечна цена једног колског часа $[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{кол.час}}]$,

e_g – просечна цена нафте $[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{кг}}]$,

g – просечна потрошња горива манев. локомотиве $[\frac{\text{кг}}{\text{h}}]$,

q – коефицијент трошкова одржавања са амортизацијом у односу на инвестиције,

n_{kol} – број колосека и

I_{kol} – цена изградње једног ранжирног колосека $[\text{нов.јед.}]$.

У складу са једначинама (7.29) ÷ (7.31) и употребљеним променљивама у моделу, функцију циља можемо представити следећим изразом:

$$TC_{eksp} = \left(365 a \left(e_{k\check{c}} N + \frac{e_g g}{60} \right) + q I_{kol} \right) \sum_{j=1}^{\eta} h_j + \\ + 365 \left(e_{k\check{c}} N + \frac{e_g g}{60} \right) (b_1 + b_2 \gamma^*) \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i \text{ [нов.јед.]} \quad (7.32)$$

или у скраћеном облику:

$$TC_{eksp} = TC_{eksp}^h \sum_{j=1}^{\eta} h_j + TC_{eksp}^x \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i \text{ [нов.јед.]}$$

Као и у претходном моделу вредности матрице \mathbf{X} и вектора \mathbf{H} интерпретирају план померања кола у току корака сортирања и реализоване

коракe сортирања. Такође, њихова анализа омогућава сагледавање свих неопходних параметара квалитета решења укључујући и податак о неопходном броју колосека који је потребно наменити за накупљање кола у току симултаног формирања вишегрупних возова. Потребан број колосека групе за формирање возова одређује се независно, једноставном анализом планираног броја вишегрупних возова који се формира у станици.

7.3.3 Проблем стратешког планирања

Стратешко планирање у железничком саобраћају има за циљ доношење инвестиционих одлука везаних за дугорочну експлоатацију железничких пруга, станица или чворова. У том смислу на стратешком нивоу врши се планирање и саобраћајно пројектовање изградње нових или реконструкције постојећих техничких теретних станица. Стратешки ниво планирања симултаног формирања вишегрупних возова има за циљ димензионисање таквих колосечних капацитета који ће омогућити ефикасну технологију рада у складу са прогнозираним потребама за дужи низ година.

У моделу за решавање проблема стратешког планирања минимизирају се укупни сведени трошкови експлоатације и инвестиције за посматрани временски период. Овај модел решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова може се приказати у облику (7.33) ÷ (7.43):

$$\min TC \tag{7.33}$$

при ограничењима:

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i \geq 1, \quad i = 1 \tag{7.34}$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 1, \quad w_i \in F \tag{7.35}$$

$$\sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^i - \sum_{j=1}^{\eta} 2^{j-1} x_j^{i-1} \geq 0, \quad w_i \in W \setminus F \tag{7.36}$$

$$h_j - x_j^i \geq 0, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, w_i \in W \tag{7.37}$$

$$h_j - h_{j+1} \geq 0, \quad j = \{1, \dots, \eta - 1\} \quad (7.38)$$

$$y_j^i - x_j^i \geq 0, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, w_i \in W \quad (7.39)$$

$$l_{sr} \sum_{i=1}^N y_j^i \leq \vartheta L_{max}, \quad j = \{1, \dots, \eta\} \quad (7.40)$$

$$q_{sr} \sum_{i=1}^N x_j^i \leq Q_{max}, \quad j = \{1, \dots, \eta\} \quad (7.41)$$

$$l_{sr} \sum_{i=1}^N y_j^i - l_{sr} \sum_{i=1}^N y_{j'}^i \leq M(1 - h_j) + \Delta l_{max}, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, j' = \{1, \dots, \eta\} \quad (7.42)$$

$$x_j^i, y_j^i, h_j \in \{0, 1\}, \quad j = \{1, \dots, \eta\}, i = \{1, \dots, N\} \quad (7.43)$$

где су поред већ уведених ознака:

- M – довољно велики природан број,
 Δl_{max} – максимална допуштена разлика корисних дужина колосека у групи за накупљање $[m]$ и
- $$y_j^i = \begin{cases} 1 & \text{– уколико накупљање кола } w_i \text{ захтева додатну јединичну} \\ & \text{дужину односног колосека у току корака сортирања } h_j, \\ 0 & \text{– уколико накупљање кола } w_i \text{ не захтева додатну} \\ & \text{јединичну дужину односног колосека у току корака} \\ & \text{сортирања.} \end{cases}$$

Укупни трошкови TC обухватају почетна инвестициона улагања у изградњу колосечних капацитета и укупне сведене дисконтоване експлоатационе трошкове за посматрани временски период.

$$TC = I + V(TC_{eksp}) \quad [\text{нов.јед.}] \quad (7.44)$$

где су:

- I – инвестициони улагања у изградњу колосечних капацитета $[\text{нов.јед.}]$ и
 $V(TC_{eksp})$ – дисконтовани трошкови TC_{eksp} сведени на садашњу вредност $[\text{нов.јед.}]$.

Инвестициона улагања односе се на трошкове изградње колосека и различитих колосечних постројења које је неопходно уградити да би симултано формирање вишегрупних возова могло несметано да функционише. Неопходни колосечни капацитети за функционисање подсистема обухватају колосеке групе за накупљање кола и групе за формирање возова, обилазни колосек ранжирног брега, скретнице за повезивање колосека и колосечне кочнице. У циљу једноставније формулације функције циља модела, инвестиционе трошкове могуће је редуковати занемаривањем неповратних трошкова у које спадају инвестиције у колосечне капацитете групе за формирање возова и обилазни колосек.

Инвестиционе трошкове који фигуришу у функцији циља могуће је раздвојити на трошкове који зависе од броја колосека и трошкове који зависе од дужине колосека:

$$I = I^h + I^y \quad [\text{нов.јед.}] \quad (7.45)$$

где су:

- I^h – инвест. улагања у зависности од броја колосека [нов.јед.] и
- I^y – инвест. улагања у зависности од дужине колосека [нов.јед.].

Инвестициони трошкови који зависе од броја колосека обухватају трошкове колосечних веза и колосечних кочница по једном колосеку, а могу се апроксимирати трошковима 2 скретнице и 1 позиције колосечних кочница по колосеку.

Експлоатационе трошкове за сваку годину посматраног периода могуће је добити као и за потребе проблема тактичког нивоа. За разлику од тактичког планирања где се трошкови односе најчешће на једну годину експлоатације, на стратешком нивоу потребно је извршити дисконтовање експлоатационих трошкова насталих у току дугорочног периода експлоатације на садашњу вредност:

$$V(TC_{eksp}) = \sum_{i=1}^e \frac{TC_{eksp_i}}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^i} \quad [\text{нов.јед.}] \quad (7.46)$$

где су:

- e – експлоатациони период (најчешће 20 година) и
- r – стопа дисконтовања [%].

Као у случају једногодишњих експлоатационих трошкова и дисконтовани експлоатациони трошкови могу се раздвојити на трошкове који зависе од броја корака сортирања и трошкове који зависе од броја померања:

$$V(TC_{eksp}) = V(TC_{eksp}^h) + V(TC_{eksp}^x) = \sum_{i=1}^e \frac{TC_{eksp_i}^h}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^e \frac{TC_{eksp_i}^x}{(1+r)^i} \quad [\text{нов.јед.}] \quad (7.47)$$

У складу са релацијама (7.44) ÷ (7.47) функција циља може се представити изразом:

$$TC = (I^h + V(TC_{eksp}^h)) \sum_{j=1}^{\eta} h_j + V(TC_{eksp}^x) \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i + I^y \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N y_j^i \quad [\text{нов.јед.}]$$

или у скраћеном облику:

$$TC = TC^h \sum_{j=1}^{\eta} h_j + TC^x \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N x_j^i + TC^y \sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^N y_j^i \quad [\text{нов.јед.}] \quad (7.48)$$

Да би модел био применљив за димензионисање колосечних капацитета, поред ограничења (7.34) ÷ (7.38) која су идентична ограничењима (7.20) ÷ (7.24) предходног модела тактичког нивоа, потребно је узети у обзир и додатна ограничења везана за дужине колосека које су у моделу представљене уведеним променљивама y_j^i матрице Y . Међусобна зависност променљиве x_j^i (која описује померање кола w_i у току корака сортирања h_j) и променљиве y_j^i (која описује ангажовање јединичне дужине колосека за накупљање кола w_i на колосеку k_j у току корака сортирања h_j) представљена је ограничењем (7.39). Да би се омогућило сортирање кола w_i померањем кроз корак h_j неопходно је резервисати јединичну дужину колосека за накупљање односних кола на колосеку k_j . Дужине колосека се ограничавају релацијом (7.40) на максималну вредност L_{max} . Као и у моделу тактичког нивоа гранична дужина L_{max} добијена је на основу разматрања висине ранжирног брега и услова спуштања кола низ ранжирни брег.

Поред тога што колосеци морају бити барем једнаки дужини састава који ће се накупљати на њима у току сортирања, ограничење (7.39) оставља могућност да се дужине неких колосека повећају. Да би се омогућило међусобно повезивање колосека, њивове дужине морају бити уједначене што захтева продужавање релативно кратких колосека. Ограничење (7.42) онемогућава да разлика између дужина колосека буде већа од унапред дефинисане вредности Δl_{max} .

За разлику од предходних модела који су формулисани променљивама матрице X и вектор H модел за решавање стратешког проблема садржи и променљиве матрице Y . Уведене променљиве описују план ангажовања колосечних капацитета за потребне сортирања кола, односно дефинишу минималне потребне дужине колосека групе за накупљање кола. Потребни колосечни капацитети намењени групи за формирање возова могу се утврдити независно, једноставном анализом броја и дужина вишегрупних возова чије се формирање планира у станици.

Ако посматрани подсистем симултаног формирања вишегрупних возова у дужем временском периоду има тенденцију пораста обима рада поставља се питање његовог временског развоја. У овом делу укратко ће се предложити концепт модела за решавање проблема динамичког развоја колосечних капацитета. Овај проблем могуће је решити интегрисањем развијеног модела (7.19) ÷ (7.27) за решавање тактичког проблема формирања вишегрупних возова у методологију развоја ранжирних станица која се заснива на методи динамичког програмирања (*Jokić 1979*). Применом модела (7.19) ÷ (7.27) пронашли би се оптимални режими подсистема за посматрани временски период са итерационим кораком од годину дана. Ови резултати би даље послужили као улазни подаци методе динамичког програмирања. У оквиру поступка динамичког програмирања добијени параметри подсистема (годишњи трошкови експлоатације и потребна инвестициона улагања) за сваку годину и сваку могућу варијанту броја колосека користили би се за одређивање условно оптималног решења подсистема у свакој години које зависи искључиво од постигнутог оптималног стања у претходној години. Излазни резултат овако конципираног модела за решавање проблема стратешког планирања подсистема симултаног формирања вишегрупних возова био би термин план развоја групе колосека за накупљање усклађен са годишњим

плановима сортирања кола који за посматрани временски период има минималне сведене трошкове експлоатације и инвестиција. И у овом моделу развој колосечних капацитета групе за формирање возова решавао би се независно, једноставном анализом плана формирања вишегрупних возова у свакој години посматраног временског периода.

7.4 Сложеност решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова

Као што је већ наглашено, методе егзактног претраживања могуће је применити при решавању „лаких“ примера комбинаторних проблема чији су улазни подаци малих димензија. У општем случају, ове методе засноване на детерминистичким алгоритмима примењују се за решавање проблема за које је доказано да имају полиномијалну сложеност (P сложеност). Ипак, највећи број комбинаторних проблема има експоненцијалну сложеност (NP сложеност) и за њих је детерминистичким алгоритмима једино могуће проверити (верификовати) тачност понуђеног решења. Опширније о рачунарској комплексности и комплексности алгоритама може се наћи у (*Garey & Johnson 1979, Cormen и др. 2009*).

У основи проблема симултаног формирања вишегрупних возова налази се проналажење вредности бинарне матрице сортирања X које је комбинаторне природе. За улазне податке N кола колског тока накупљања на K колосека бинарна матрица X има укупно 2^{NK} могућих решења. Иако простор могућих решења матрице X експоненцијално расте са повећањем димензија проблема, одређивање плана сортирања кола за случај (не)ограниченог броја колосека неограничених дужина има P сложеност. Увођењем ограничених дужина колосека групе за накупљање проблем прераста у NP тежак. Доказ NP сложености овако постављеног проблема дат је у раду (*Jacob и др. 2011*). Како је одређивање плана сортирања кола у условима ограничених колосечних капацитета садржано у проблемима симултаног формирања вишегрупних возова сва три нивоа

планирања интуитивно се може извести закључак и о NP сложености ових проблема.

Модел за решавање проблема оперативног и тактичког планирања симултаног формирања вишегрупних возова поред променљивих матрице X имају и променљиве вектора H тако да је укупан број бинарних променљивих у овим моделима исти и износи $NK + K = K(N + 1)$. Модел за решавање проблема стратешког планирања је проширен бинарном матрицом променљивих Y истих димензија као и матрица X , па укупан број бинарних променљивих износи $K(2N + 1)$.

За потребе решавања случајева већих димензија приступа се приближном решавању, односно проналажењу *субоптималних* решења x^* . Један од приступа приближног решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова јесте коришћењем апроксимативних алгоритама. Апроксимативни алгоритми не дају доказано оптимална решења, али дају решења доказаног квалитета. Квалитет решења исказује се фактором апроксимације ρ који гарантује да ће добијено решење бити у најгорем случају ρ пута лошије од оптималног. Апроксимативни алгоритми до сада су коришћени при одређивању плана сортирања кола у условима ограничених колосечних капацитета (случај NP сложености). Приступ апроксимативног решавања овог проблема заснива се на свођењу проблема на P сложеност. Релаксација проблема постиже се заменом више појединачних ограничења дужине колосека групе за накупљање кола генералним ограничавањем укупне дужине колосека. Овакво решење накнадно се коригује и своди на допустиво решење и у односу на стварне дужине колосека и максималне масе састава при извлачењу. Фактор апроксимације до сада конструисаних алгоритама за одређивање плана сортирања кола износе 2 (Maue & Nunkesser 2009).

Поред одређивања плана сортирања кола у склопу метода за симултано формирање вишегрупних возова, у досадашњим радовима значајна пажња посвећена је конструисању апроксимативних алгоритама за решавање проблема једностепеног формирања (Dahlhaus и др. 2000b, Beygang и др. 2010).

7.5 Хеуристички приступ решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова

Данас, све популарнији приступ приближног решавања проблема јесте применом општих хеуристичких метода. Опште хеуристичке методе одликује брзо решавање, али без доказа о квалитету резултата који ће се добити. С друге стране, досадашњи емпиријски резултати решавања различитих оптимизационих проблема су задовољавајући и указују на могућност њихове примене. Из тих разлога ова дисертација има за циљ да покаже ефикасност и применљивост општих хеуристичких метода и у случају решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова. У оквиру даљих истраживања користиће се хеуристичке методе засноване на принципу локалног претраживања (*Aarts & Lenstra 2003*).

Насупрот систематичног и комплетног претраживања простора допустивих решења X , методе локалног претраживања решавање проблема започињу позиционирањем у неком почетном допустивом решењу x_0 које итеративним корацима настоје побољшати ограничавајући претрагу на мање делове простора X (слика 7.2). У сваком кораку, претраживање је усмерено на одређену околину допустивих решења $N(x)$, за коју важи $N(x) \subset X$ и у којој се x назива полазним решењем или центром те околине. Итеративно претраживање околине врши се према унапред дефинисаним правилима избора полазног решења, формирања суседних решења и заустављања локалне претраге.

На могућност проналажења квалитетних субоптималних решења x^* у великој мери утиче избор полазних решења итеративних претрага. До сада је развијено више механизма избора нових решења x у којима је и садржана суштинска разлика постојећих метода локалног претраживања.

Откривањем суседних решења која побољшавају функцију циља поступак локалног претраживања се продужава новим циклусима итеративне претраге у њиховим околинама. Крај претраге околине настаје испуњавањем услова заустављања. Услов заустављања испуњава се истицањем унапред дефинисаног периода претраге (израженог временски или бројем узастопних итерација у којима није дошло до побољшања функције циља) или услед немогућности проналажења следећег суседног решења.

Локално претраживање $LS(x_0)$	
1	Иницијализација: Генерисати почетно решење x_0 и утврдити $f(x_0)$; Дефинисати услов заустављања
2	$x^* \leftarrow x_0$ и $f^* \leftarrow f(x_0)$
3	Понављај циклус локалног претраживања:
4	$x \leftarrow x^*$ $n \leftarrow 0$
5	Понављај циклус претраживања околине:
6	$n \leftarrow n + 1$
7	1) Избор суседа: У околини $N(x)$ пронаћи суседно решење x'
8	2) Провера решења: Ако је $f(x') < f^*$ онда је $x^* \leftarrow x'$ и $f^* \leftarrow f(x')$
9	3) Избор полазног решења наредне итерације: Утврдити да ли $x \leftarrow x'$
10	док се не испуни услов заустављања
11	док има побољшања

Слика 7.2 Принцип локалног претраживања

7.5.1 Генерисање почетног решења

Локално претраживање започиње генерисањем почетног решења x_0 . За почетно решење може се узети произвољно решење из простора X или неко одређено решење добијено на основу познавања природе проблема.

У случају проблема симултаног формирања вишегрупних возова, почетно решење случајно се генерише произвољним додељивањем нумеричке вредности бинарног записа сортирања за свака појединачна кола из колског тока W . Да би решење било допустиво мора се накнадно кориговати у складу са основним условима међусобне допустивости бинарних записа и техничко-технолошким условима симултаног формирања.

Почетно решење не мора бити произвољно генерисани низ вредности бинарних записа сортирања кола, може се добити и на основу традиционалних метода за симултано формирање вишегрупних возова (Одељак 4.2). У овом случају, решење добијено елементарном, троугаоном или геометријском методом накнадно се коригује једино према техничко-технолошким условима и као такво постаје почетно решење претраживања. Овакав избор почетног решења доприноси побољшању квалитета и брзине решавања. Још квалитетније почетно позиционирање у поступку локалног претраживања постиже се ако се у току

конструкције низа вредности записа сортирања (на основу примењеног плана сортирања неке од традиционалних метода) истовремено врши и проверавање испуњености техничко-технолошких услова.

7.5.2 Формирање околине решења

Ефикасност методе засноване на принципу локалног претраживања зависи од начина и броја дефинисаних околина. Околину $N(x)$ чине сва суседна решења x' која се могу добити из решења x директном трансформацијом $t(x, x')$. Околине треба дефинисати тако да обезбеде интензивно претраживање усмерено проналажењу бољих решења, а са друге стране и произвољан избор решења усмерен ширем претраживању простора X . Приликом одређивања структуре околине треба водити рачуна о задовољавању следећих услова (Cvetković и др. 1996):

- симетричности, тј. уколико се решење x' налази у околини $N(x)$ онда се и решење x мора налазити у околини $N(x')$,
- достижности, тј. полазећи из било којег решења x низом трансформација треба омогућити долазак до било којег другог решења простора X ,
- једноставности трансформација, тј. трансформација треба да обезбеди лако и брзо генерисање суседних решења x' у околини $N(x)$ и
- избалансираности околине, тј. околина не треба да буде ни сувише велика ни сувише мала.

Основни проблем са којим се сусрећу методе локалног претраживања са једном великом околином $N(x)$ јесте време претраге. Претраживање простора X коришћењем само једне трансформације може бити временски захтевно, па се превазилажење овог проблема постиже увођењем већег броја мањих околина $N_k(x)$, $k = 1, \dots, k_{max}$. Приликом коришћења већег броја околина препоручује се да трансформације почетних околина буду што једноставније, а затим да се уводе сложеније комбиновањем претходних.

Начин дефинисања околина зависи од природе разматраног проблема, па се у складу са тим за потребе решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова могу користити следеће трансформације приликом креирања суседних решења околина $N_k(x)$:

- $k = 1$ (*елементарна промена*): Промена вредности бинарног записа сортирања само једних изабраних кола,
- $k = 2$ (*групна промена*): Промена вредности бинарног записа сортирања изабраних кола и свих наредних кола колског тока која имају исту вредност бинарног записа,
- $k = 3$ (*блок промена*): Промена вредности бинарног записа сортирања изабраних кола и свих наредних кола колског тока која припадају истом блоку сортирања,
- $k = 4$ (*произвољна промена*): Промена вредности бинарног записа сортирања изабраних кола и произвољног броја наредних кола колског тока и
- $k = 5$ (*комплетна промена*): Промена вредности бинарног записа сортирања изабраних кола и свих наредних кола колског тока.

На слици 7.3 илустративне су трансформације унутар предложених околина око истог полазног решења проблема симултаног формирања вишегрупних возова. Ради једноставне илустрације, допустивост суседног решења разматрана је искључиво са аспекта плана сортирања, односно међусобног односа вредности бинарних записа суседних парова кола. У циљу усмеравања претраге за бољим решењем, сваку предложену околинину могуће је поделити на две мање околине. Прва околина настаје трансформацијама увећања вредности бинарних записа сортирања, док друга околина настаје трансформацијама смањења вредности.

7.5.3 Поступак претраге околине

Након дефинисања трансформација које имају за циљ генерисање суседних решења, потребно је дефинисати приступ претрази околине решења и механизам избора нових полазних решења x .

	<i>блок сортирања</i>										
нум. вредност	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
бинарни запис	1	2	2	4	5	6	6	8	9	9	12
колски ток W	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}
произвољан корак трансформације	а) +1 б) -1										

Облици трансформације

k=1, елементарна промена

а)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	7	6	8	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	8	9	9	12

б)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	5	6	8	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	5	6	8	9	9	12

k=2, групна промена

а)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	8	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	8	9	9	12

б)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	8	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	8	9	9	12

k=3, блок промена

а)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	10	10	12

б)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	9	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	9	9	12

k=4, произвољна промена

а)

позиција: $W_k - W_9$	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	10	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	10	10	12

б)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	8	9	12
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	8	9	12

k=5, комплетна промена

а)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	10	10	13
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	7	7	9	10	10	13

б)

позиција: W_k	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
нови бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	8	8	11
						↓					
допустиви бинарни запис	1	2	2	4	5	5	5	7	8	8	11

Слика 7.3 Трансформације унутар предложених околина при решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова

Суседна решења могу се генерисати применом приступа детерминистичког или стохастичког претраживања. Детерминистичким приступом спроводи се потпуна претрага околине и у случају решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова решења се генеришу систематичним променама низова вредности бинарних записа сортирања. На другој страни, стохастичким приступом генерисање суседних решења је произвољно у оквиру посматране околине. Овим приступом не спроводи се потпуна претрага, већ се унапред ограничава број суседних низова вредности бинарних записа сортирања који ће се генерисати.

Најједноставнији механизам избора полазног решења x јесте произвољним избором (*Random Picking*), у смислу произвољног одлучивања да ли ће изабрано суседно решење постати ново полазно решење.

Механизам избора новог решења x може се унапредити ако се избор заснива на квалитету добијених суседних решења. У зависности од тога да ли се решава проблем оперативног, тактичког или стратешког планирања симултаног формирања вишегрупних возова, квалитет решења може се изразити преко вредности одговарајуће функције циља. Један од основних механизма који се заснива на мерењу вредности функције циља јесте механизам методе итеративног побољшања (*Iterative Improvement*). Механизам итеративног побољшања дозвољава искључиво замену полазног решења суседима који су „бољи“ по питању вредности функције циља (*Dong и др. 2009*). Разликују се две форме итеративног побољшања: форма најбољег побољшања (*Best Improvement*) и форма првог побољшања (*First Improvement*). Основни недостак метода итеративног побољшања јесте немогућност превазилажења локалних минимума до којих се долази коришћењем искључиво корака који воде бољем решењу.

Како појава локалних минимума у оптимизационим проблемима није реткост, у досадашњој литератури (*Spall 2003, Hoos & Stützle 2004*) доста пажње било је посвећено проналажењу могућности за њиховим превазилажењем. Најједноставнији (и најмање ефикасан) приступ превазилажењу локалних минимума јесте вишеструким понављањем поступка итеративног побољшања користећи произвољно генерисана почетна решења (*Multistart Iterative Improvement*).

Други приступ надоградње методе итеративног побољшања јесте кориговање механизма на начин да се у појединим случајевима дозволи да решења са „лошијом“ вредношћу функције циља постану полазна решења локалних претрага. Избор лошијег решења за полазно решење x може бити произвољан (*Random Iterative Improvement*) или применом теорије вероватноће (*Probabilistic Iterative Improvement*). Из групе метода итеративних побољшања коригованих применом теорије вероватноће може се издвојити метода симулираног каљења (*Simulated Annealing*) као широко распрострањена метода, заснована на аналогији са термичком обрадом материјала (*Kirkpatrick и др. 1983*).

Још један могући приступ за превазилажење достигнутог локалног минимума јесте применом већег броја околине за претраживање простора. Успешност замене једне велике околине $N(x)$ већим бројем мањих $N_k(x)$ темељи се на следећим чињеницама (*Hansen & Mladenović 2001*):

- локални минимум у односу на једну околину не представља нужно и локални минимум у односу на неку другу околину,
- глобални минимум је локални минимум у односу на све околине и
- локални минимума у односу на различите околине међусобно су блиски.

Овај приступ детаљно је разрађен и систематизован коришћењем детерминистичке, стохастичке или комбиноване форме претраживања у оквиру методе променљивих околине (*VNS – Variable Neighbourhood Search*), које су дефинисане и потом примењене за решавање различитих комбинаторних проблема (*Hansen и др. 2008, Vjelić и др. 2013*).

Применљивост хеуристичких метода локалног претраживања за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова тестирана је коришћењем више метода са различитим претходно поменутих механизмима избора полазних решења. На основу спроведених истраживања најбоље резултате показала је генерална метода променљивих околине (*GVNS* метода) чији ће се резултати детаљно анализирати у наредном поглављу.

GVNS метода представља комбинацију детерминистичке и стохастичке форме метода променљивих околине (слика 7.4). При решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова детерминистичка форма врши систематске претраге мањих околине $N_k(x)$, $k = 1, \dots, k_{max}$ и у оквиру њих

проналази „најбоље“ низове вредности бинарних записа x_k^* . Насупрот детерминистичкој, стохастичка форма произвољним променама вредности бинарних записа на нивоу ширих околина $N_l(x)$, $l = 1, \dots, l_{max}$ врши померање полазног решења x у чијој ће се околини поновити систематска претрага.

Генерална VNS метода $GVNS(x_0)$	
1	Иницијализација: Генерисати почетно решење x_0 и утврдити $f(x_0)$
2	$x^* \leftarrow x_0$ и $f^* \leftarrow f(x_0)$
3	$x \leftarrow x_0$
4	Понављај циклус $GVNS$ претраживања:
5	$l \leftarrow 1$
	<u># Стохастичка форма VNS методе</u>
6	Понављај циклус промене полазног решења x:
7	Изабрати суседно решење x' из $N_l(x)$ околине
8	$x \leftarrow x'$
	<u># Детерминистичка форма VNS методе</u>
9	$k \leftarrow 1$
10	Понављај циклус претраживања $N_k(x)$ околине:
11	У околини $N_k(x)$ пронаћи локални субоптимум x_k^*
	<u># Провера решења</u>
12	Ако је $f(x_k^*) < f^*$:
13	$x^* \leftarrow x_k^*$ и $f^* \leftarrow f(x_k^*)$
14	$x \leftarrow x^*$
15	$k \leftarrow 1$ и $l \leftarrow 1$
16	у супротном: $k \leftarrow k + 1$
17	док је $k \leq k_{max}$
18	$l \leftarrow l + 1$
19	док је $l \leq l_{max}$
20	док има побољшања

Слика 7.4 Генерална метода променљивих околина

У случају нових локалних побољшања записа сортирања кола x_k^* , процедура се враћа на почетак и по питању унутрашње претраге $N_k(x)$ околина и по питању промена полазног решења у спољашњим $N_l(x)$ околинама. Овакав поступак омогућава интензивну претрагу околине „добрих“ решења, али и произвољних околина у простору X . Процедура $GVNS$ методе зауставља се након неуспешног систематског претраживања свих околина произвољно добијених центара претраге.

7.6 Резиме

Математичко моделирање симултаног формирања вишегрупних возова може се постићи представљањем етапног тока сортирања кола у форми бинарног записа. На основу овакве интерпретације померања кола, одређивање плана сортирања кола формулише се као проблем бинарног целобројног програмирања.

Математички модел за одређивање плана сортирања кола користи се као основа за развој сложених модела решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова. Ови модели систематизовани су у зависности од тога да ли решавају проблем оператвног, тактичког или стратешког планирања, а међусобно се разликују према функцији циља коју минимизирају, према броју бинарних променљивих и броју ограничења. Поред директног излазног резултата о вредности функције циља, анализом добијених вредности променљивих у моделу могу се индиректно сагледати ефекти рада, али и ангажовани колосечни капацитети у зависности од нивоа планирања.

Одређивање плана сортирања кола у условима ограничених колосечних капацитета је *NP* тежак проблем и као такав садржан је у све три форме проблема симултаног формирања возова. С обзиром да се већина реалних проблема не може оптимално решити у условима ограниченог времена и меморије рада рачуна, потребно је испитати могућност примене хеуристичких метода за проналажење блиско оптималних решења. За потребе решавања овог проблема разматрана је применљивост хеуристичких метода локалног претраживања.

8 Тестирање модела и анализа добијених резултата

У складу са предметом истраживања ове дисертације, тестирање математичких модела за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова ограничиће се на модел стратешког нивоа планирања. Излазни резултати модела стратешког нивоа планирања анализираће се на основу показатеља ангажованих колосечних капацитета и квалитета рада у техничким теретним станицама.

Тестирање модела у сегменту добијања оптималних вредности реализовано је академском лиценцом комерцијалног програмског пакета *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2*. У оквиру овог оптимизационог пакета коришћена је егзактна метода мешовитог целобројног програмирања *CPLEX MIP Solver*, са стандардном конфигурацијом параметара. На основу прелиминарних истраживања утврђено је да егзактна метода у највећем броју случајева није у могућности да дође до оптималних решења због ограничења меморије. Из тог разлога, време извршавања примењеног програма ограничено је на $4 h$ ($14,400$ секунди). Алгоритми хеуристичких метода развијени су применом слободног програмског језика *Python 2.6*. Применљивост и ефикасност хеуристичког приступа тестирана је коришћењем одабраних метода локалног претраживања. На основу спроведених истраживања најбоље резултате показала је *GVNS* метода чији ће резултати бити детаљно упоређени са референтним вредностима егзактне методе. Сва истраживања спроведена су на рачунару конфигурације *Intel® Core™ i3-2350M* (брзина процесора: $2.30 GHz$, радна меморија: $4 GB$) уз коришћење оперативног система *Windows 7 Professional*.

8.1 Улазни подаци

Улазни подаци коришћени у математичком моделу за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова представљени су у табели 8.1. Део улазних података идентичан је подацима коришћеним у симулационој анализи традиционалних планова сортирања кола (Одељак 6.1). Ови подаци односе се на техничко-технолошке услове симултаног формирања, при чему су вредности исказане у складу са потребама модела. Други део података, који се пре свега односи на трошковне параметре функције циља, усвојен је према (*Baumgartner 2001*) и на основу стручне процене вредности.

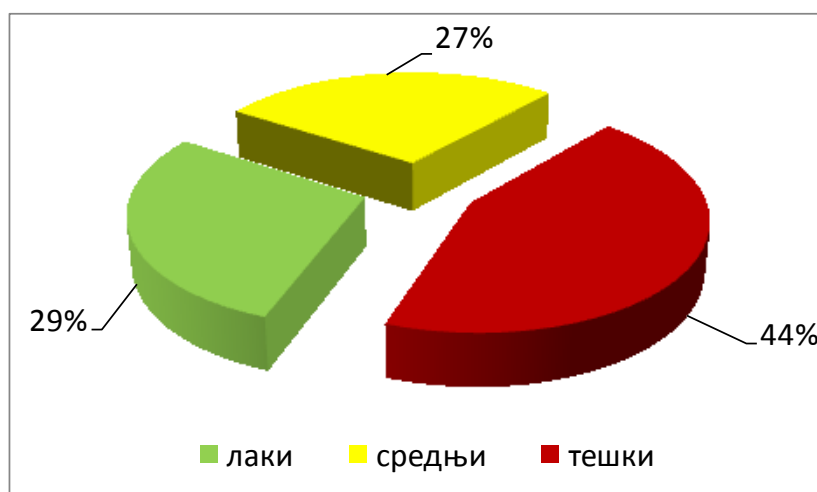
Табела 8.1 Улазни подаци математичког модела

Ознака	Параметар	Вредност
t_i^{sor}	- Техн. интервал корака сортирања	$12,3 + (0,4 + 0,7\gamma)w_{sas}$ [min]
L_{max}	- Максимална корисна дужина ранжирног колосека	1.000 [m]
Q_{max}	- Максимална дозвољена маса маневарског састава	1.400 [t]
Δl_{max}	- Максимална међусобна разлика дужина колосека унутар колосечних група	250 [m]
l_{sr}	- Просечна дужина кола	15 [m]
q_{sr}	- Просечна бруто маса кола	32 [t]
ϑ	- Коефицијент просторног искоришћења колосека	0.75
I^y	- Просечна цена изградње ранжирног колосека	280.000 $\left[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{km}}\right]$
I^x	- Просечна цена изградње колосечних веза и ранжирне опреме по једном ранжирном колосеку	165.000 $\left[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{колосек}}\right]$
$e_{k\check{c}}$	- Просечна цена колског часа	30 $\left[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{дан}}\right]$
e_g	- Просечна потрошња горива манев. локомотиве	16 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$
g	- Просечни цена нафте	0,5 $\left[\frac{\text{нов.јед.}}{\text{kg}}\right]$
q	- Коефицијент год. трошкова одржавања са амортизацијом у односу на инвестиције	0,12
r	- Стопа дисконтовања	10 [%]

8.2 Тестирање модела

Тестирање математичког модела извршено је за различите услове величине колског тока (у распону од 50 до 200 кола) и броја упутних станица (у распону од 3 до 20 станица). За сваки од укупно 84 анализирани случаја генерисан је по један задатак сортирања који је решен прво егзактном, а потом и одабраним хеуристичким методама. Приликом генерисања поменутих случајева задатака сортирања, расподела кола по упутним станицама у отпремним возовима је вршена на случајан начин. Приказ основних карактеристика математичког модела и резултата добијених применом егзактне методе дат је у Прилогу 3 (табела П4).

Комбиновањем различитих вредности величине колског тока и броја упутних станица добијени су задаци различитих нивоа сложености прорачуна. На основу могућности проналажења оптималног решења и времена извршавања примењеног програма за егзактно решавање генерисани случајеви су подељени у категорије лаких, средњих и тешких задатака (слика 8.1).



Слика 8.1 Подела тестираних задатака сортирања

Категорију лаких задатака сортирања чине задаци до чијих оптималних решења је могуће доћи кратким временом извршавања програма. За горњу границу времена рада рачунара усвојена је вредност од 300 секунди. Категорију проблема средње тежине чине задаци чије оптимално решење може да се добије релативно прихватљивим временом извршавања програма (усвојена горња

границу времена рада рачунара 4 h). У категорију тешких проблема уврштени су сви задаци сортирања чије оптимално решавање није могуће ни са 4 часа рада програма. У случају тешких задатака сортирања референтна вредност егзактне методе представљена је минималном добијеном вредношћу функције циља у току извршавања програма.

Детаљна структура тестираних задатака сортирања према сложености егзактног прорачуна приказана је на слици 8.2. На основу спроведених истраживања уочава се да за велики број задатака сортирања (44% тестираних случајева) није могуће потврдити оптималност добијеног референтног решења.

		КОЛСКИ ТОК						
		50	75	100	125	150	175	200
број угутних станица	3	1	1	1	3	3	5	7
	4	1	1	1	2	2	4	7
	5	1	2	2	2	5	5	5
	6	1	1	4	4	5	5	7
	8	1	2	4	5	6	7	7
	10	1	2	5	6	7	7	7
	11	1	3	6	7	7	7	7
	13	1	3	7	7	7	7	7
	15	1	5	7	7	7	7	7
	16	1	5	7	7	7	7	7
	18	2	5	7	7	7	7	7
	20	2	5	7	7	7	7	7

време извршавања програма		
лаки	1	0÷120
	2	120÷300
	3	300÷600
средњи	4	600÷1800
	5	1800÷7200
	6	7200÷14400
тешки	7	>14400

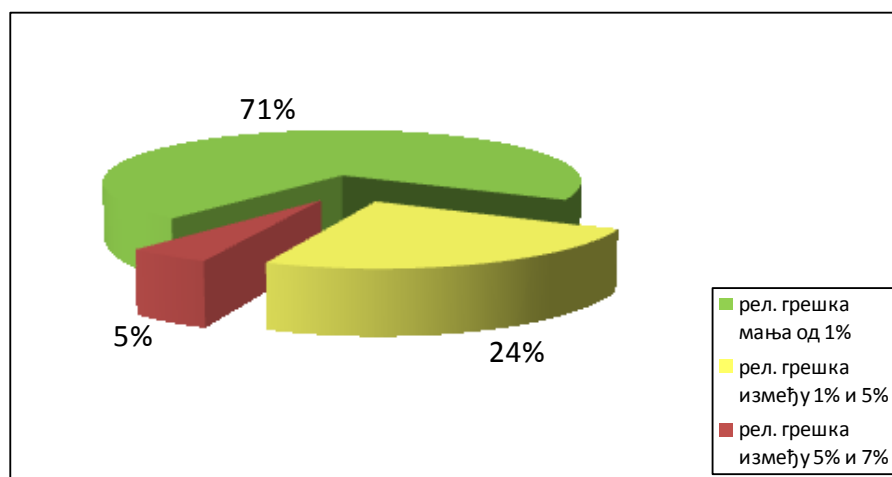
Слика 8.2 Структура генерисаних задатака сортирања према времену извршавања програма егзактне методе

Тестирањем више хеуристичких метода локалног претраживања уочено је да најбоље резултате даје метода променљивих околина и то форма *GVNS* (детаљно представљена у Одељку 7.5.3). Различити хеуристички приступи при решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова тестирани су спровођењем по 100 независних експеримената за сваки пример генерисаног задатка сортирања. У Прилогу 3 (табела П5) обједињени су излазни резултати спроведених истраживања *GVNS* методе. Обједињени резултати односе се на вредности функције циља, њихово одступање и време извршавања програма.

За сваки анализирани случај приказане су минимална и просечна добијена вредност функције циља у току експеримената. У анализираним случајевима

уочава се међусобна блискост минималне и просечне вредности, при чему је највећа разлика износила свега 5%. Блискост минималне и просечне вредности указује на мало расипање добијених резултата које је потврђено ниским вредностима стандардних одступања готово свих анализираних случајева.

Уобичајено сагледавање квалитета добијених решења при анализирању применљивости хеуристичких метода јесте на основу релативне грешке. На слици 8.3, која представља структуру анализираних случајева према вредности њихових релативних грешака појединачних случајева, уочава се висок квалитет добијених резултата. Наиме, у највећем броју случајева (више од 70%) релативна грешка износи мање од 1%, док највећа забележена грешка износи свега 7%.



Слика 8.3 Структура анализираних случајева

Време извршавања процедуре локалног претраживања умногоме зависи од броја околина и примењеног поступка њихове претраге. У анализираном поступку *GVNS* методе усвојен је број околина $N_k(x)$, $k = 5$, при чему је примењен механизам најбољег унапређења. У односу на оригиналну поставку *GVNS* методе, у овом моделу спроведен је стохастички поступак претраге околине. Број итеративних корака претраге је на основу бројних прелиминарних истраживања ограничен на вредност $\left\lceil \frac{Ng_{max}}{3} \right\rceil$. Усвајањем зависности броја итерација од величине колског тока и максималног броја упутних станица омогућено је прилагођавање методе карактеристикама разматраног задатка сортирања. Време извршавања процедуре *GVNS* методе је у прихватљивим

границама и за највећи број случајева износи мање од 120 s. У најдужим поступцима локалног претраживања (случајеви сортирања 200 кола за 15 и 20 упутних станица) просечно време извршавања програма износи нешто више од 300 s, што је мало изнад границе решавања лаких задатака егзактном методом.

Поред описаних излазних резултата *GVNS* методе у Прилогу 3 (табеле П6÷П10) приказани су излазни резултати тестирања осталих одабраних метода локалног претраживања. Анализом добијених резултата може се извести сличан закључак о њиховој применљивости, а тиме и о општој применљивости хеуристичког приступа при решавању проблема симултаног формирања вишегрупних возова.

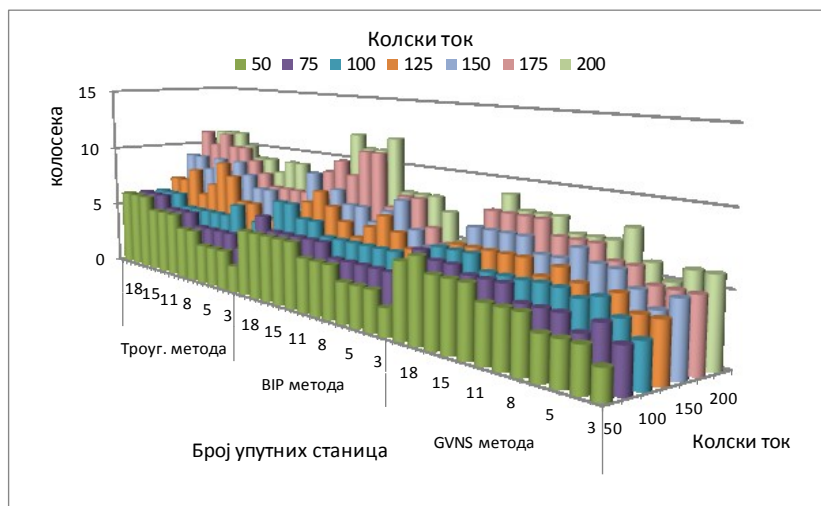
8.3 Анализа резултата

За потпуно сагледавање ефикасности математичког модела и хеуристичког приступа за његово решавање потребно је детаљније анализирати добијене резултате. Резултати су представљени у форми показатеља ангажованих колосечних капацитета и квалитета рада станице (Прилог 3 – табела П11). У току анализе појединачних показатеља, добијене вредности егзактним и хеуристичким приступом поређене су са вредностима добијеним применом троугаоне методе за симултано формирање. Ово поређење има за циљ сагледавање квалитета математичког модела у односу на методе са традиционалним плановима сортирања кола. Избор троугаоне методе извршен је на основу симулационе анализе традиционалних метода која је потврдила применљивост троугаоне методе у различитим условима величине колског тока и броја упутних станица.

Као у спроведеној симулационој анализи, ангажовани колосечни капацитети сагледани су на основу показатеља: потребног броја колосека, максималне потребне дужине колосека и међусобног одступања дужина колосека. За разлику од спроведене симулационе анализе, одступање дужина колосека у оквиру колосечне групе сагледано је у односу на колосек са највећом добијеном потребном дужином.

Потребан број колосека за накупљање и сортирање кола према упутним станицама дат је на слици 8.4. У категоријама лаких и средњих задатака сортирања за које је потврђена оптималност егзактног решења, добијени број потребних колосека

GVNS методом идентичан је броју колосека егзактних решења. Такође, у случајевима тежих задатака сортирања *GVNS* метода даје планове сортирања који ангажују и по неколико колосека мање у односу на планове сортирања до којих се дошло након 4h извршавања програма егзактне методе. У случајевима сортирања 200 кола за 15 и више упутних станица добијени просечан број колосека је мањи за 3 до 5 колосека, док је разлика већа од једног колосека добијена у још 9 случајева. Поређењем добијених резултата са троугаоном методом уочава се да је математички модел решен хеуристичком методом у више од 50% анализираних случајева дао боље резултате по питању потребног броја колосека. Иако се анализирани случајеви међусобно јако разликују по питању основних параметара задатака сортирања, добијене вредности потребног броја колосека на основу математичког модела не разликују се много и одговарају величинама типских колосечних група ранжирних паркова.



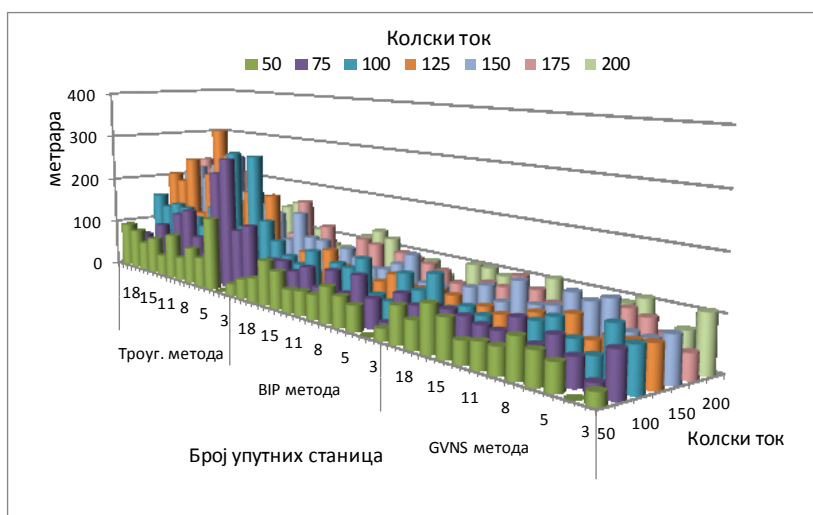
Слика 8.4 Потребан број колосека групе за накупљање

Укључивањем услова ограничених колосечних капацитета у математички модел, сва добијена решења егзактном или *GVNS* методом су допустива са аспекта техничких и технолошких услова јер не превазилазе дефинисану границу максималне дужине колосека. Овај услов је и у случајевима примене троугаоне методе постигнут накнадним кориговањем решења.

Поред ограничавања највеће дужине колосека, за адекватно планирање колосечних капацитета, потребно је сагледати и уједначити дужине осталих

колосека који улазе у састав колосечних група. На слици 8.5 дате су вредности средњег одступања колосека у односу на колосек са максималном дужином. Резултате добијене егзактном и *GVNS* методом карактерише висока уједначеност групе колосека за накупљање, а вредност посматраног показатеља само у малом броју случајева превазилази *100 m*. Ова уједначеност последица је дефинисања математичког модела у којем се једно од ограничења управо односи на максималну допуштену разлику дужина колосека.

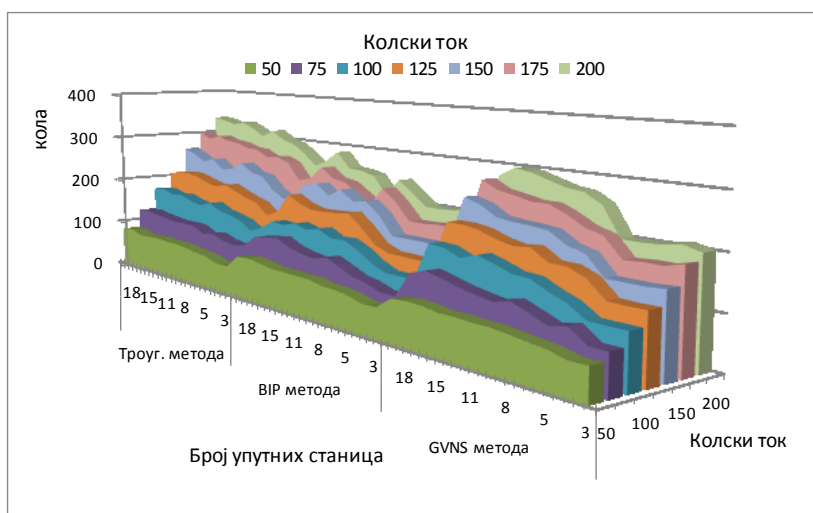
Приказани резултати јасно потврђују ефикасност предложеног математичког модела у односу на троугаону методу и применљивост хеуристичког приступа при његовом решавању са аспекта показатеља ангажовања колосечних капацитета.



Слика 8.5 Средње одступање дужина колосека у односу на колосек са највећом дужином у групи за накупљање

Квалитет рада станице и у овом случају сагледаће се преко показатеља оствареног обима маневарског рада и утрошеног времена за сортирање накупљених кола. Остварени обим маневарског рада најчешће се изражава бројем извлачења кола са колосека накупљања и укупним бројем померених кола. Пошто је број извлачења једнак броју потребних колосека, претходна анализа резултата математичког модела везана за број колосека у целости одговара и за показатељ броја извлачења. Такође, приликом поређења математичког модела са традиционалним методама може се закључити да уочено смањење потребног броја колосека у решењима математичког модела директно има за последицу смањење броја извлачења у односу на троугаону методу.

Укупан број померених кола у решењима добијеним *GVNS* методом одговара броју померених кола у решењима егзактне методе, изузев тежих случајева задатака сортирања у којима је он нешто већи (слика 8.6). Ово повећање проузроковано је смањеним бројем потребних колосека за које пронађено решење захтева нешто сложенији план сортирања са већим бројем померених кола. Иако је број потребних колосека смањен, укупан број померених кола у решењима математичког модела није се значајније повећао у односу на решења традиционалних метода. За решења добијена математичким моделом уочава се умерен раст укупног броја померених кола повећањем колског тока и броја упутних станица.

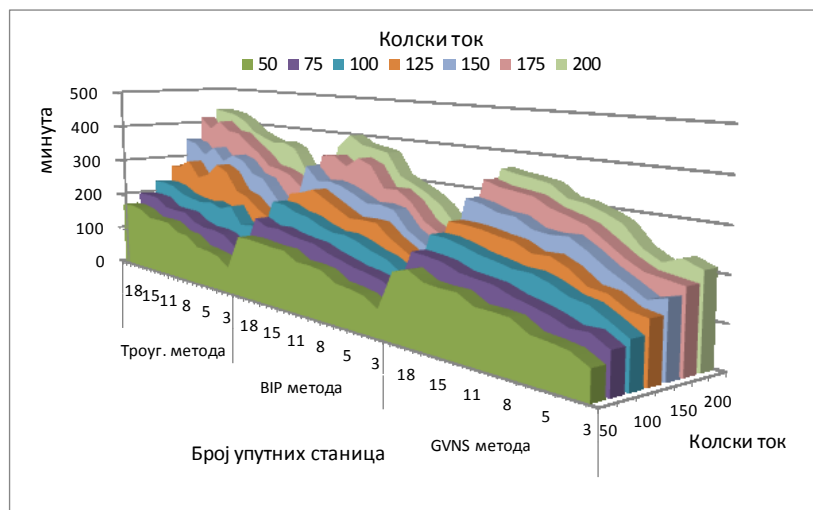


Слика 8.6 Укупан број померених кола у току формирања вишегрупних возова

Укупно утрошено време за сортирање кола у току симултаног формирања вишегрупних возова приказано је на слици 8.7. На основу резултата добијених егзактном и *GVNS* методом уочава се њихова идентичност и по питању показатеља времена сортирања кола. Резултати се међусобно разликују у просеку за мање од 1%, при чему је највећа разлика мања од 5%.

У поређењу са троугаоном методом показатељ времена сортирања кола је значајно побољшан, а сама зависност од величине колског тока и броја упутних станица је смањена. На основу комплетних резултата, математички модел даје решења која захтевају у просеку 10% мање времена, а са порастом сложености задатака сортирања квалитет решења према овом показатељу је већи. За теже

случајеве анализираних задатака време сортирања је смањено у односу на троугаону методу у просеку $15 - 20\%$, а у најбољем случају чак и 25% (случај сортирања 200 кола за 6 упутних станица).



Слика 8.7 Потребно време сортирања кола

8.4 Резиме

У овом делу дисертације извршено је тестирање предложеног математичког модела за решавање проблема стратешког нивоа планирања симултаног формирања вишегрупних возова. Поред основног тестирања могућности решавања проблема егзактним и хеуристичким методама, детаљно су анализирани и ефекти примене модела по питању потребних колосечних капацитета и квалитета рада техничких теретних станица.

Математички модел тестиран је за различите случајеве величине колског тока и броја упутних станица, а за сваки анализирани случај генерисан је по један задатак сортирања. Оваквим комбиновањем основних параметара добијени су задаци сортирања различитих нивоа сложености. На основу прелиминарних истраживања утврђено је да егзактна метода у највећем броју случајева није у могућности да дође до оптималних решења, па је време извршавања примењеног програма из практичних разлога ограничено на $4 h$. Поред егзактне методе, тестирано је и више хеуристичких метода за решавање посматраног проблема.

Добијени резултати показали су применљивост хеуристичког приступа, јер су се резултати у највећем броју случајева поклапали са решењима примењене егзактне методе. У значајном броју случајева тешких задатака сортирања, за које није добијена потврда оптималности, добијени резултати хеуристичким методама били су чак и бољи.

Решења егзактног и хеуристичког прорачуна детаљније су анализирана на основу показатеља ангажовања колосечних капацитета и квалитета рада станице. У току анализе појединачних показатеља, добијене вредности математичког модела упоређене су и са вредностима које би се добиле применом троугаоне методе симултаног формирања. Анализа показатеља потврдила је применљивост хеуристичког приступа у решавању математичког модела, али и ефикасност математичког модела у односу на одабрану методу традиционалног плана сортирања кола. Решења математичког модела давала су планове сортирања кола који су у највећем броју случајева ангажовали мањи број колосека уједначене дужине, сортирање кола било је брже, а у само неколико случајева и уз нешто већи укупан број померених кола у односу на троугаону методу.

9 Закључак

Реформом транспорта појединачних колских пошиљака и удруживањем националних железничких управа на међународном нивоу, вишегрупни возови све више добијају на значају кроз примену у сегменту даљинског саобраћаја. Даљински вишегрупни возови обједињују профитабилност железничког превоза на већим релацијама и флексибилност превоза појединачних колских пошиљака. С аспекта организације и управљања транспорта појединачних колских пошиљака највећи проблем је у оптимизацији колских токова и начину формирања даљинских возова. Формирањем даљинских вишегрупних возова смањује се задржавање кола ради накупљања, а самим тим и укупно време које кола проведу у техничким теретним станицама.

Формирање вишегрупних возова може се вршити применом класичних или симултаних метода. Класичне методе су у досадашњој пракси чешће коришћене и карактерише их појединачно формирање возова. Симултане методе формирања вишегрупних возова карактерише једновремено формирање више вишегрупних возова, а може се реализовати једноставним планом сортирања кола ангажујући већи број колосека или сложеним планом сортирања ангажујући мањи број колосека. Поред метода које примењују најједноставнији и најсложенији план сортирања кола, вишегрупне возове могуће је формирати и методама различите сложености плана сортирања. Свака симултана метода има своје специфичности у погледу потребних колосечних капацитета, па могућност примене метода треба посматрати у складу са њиховим основним карактеристикама.

Спроведена истраживања показала су да ограничења са становишта експлоатације и пројектовања ранжирних постројења умногоме утичу и мењају коначне ефекте примењених метода у односу на теоријске формулације. На основу добијених резултата не може се дати јединствен одговор која метода је најцелисходнија. Број група кола на формирању и величина колског тока утиче на процес сортирања кола, што посебно долази до изражаја у условима великог броја кола на формирању.

Пошто је број метода за симултано формирање, посматрајући планове сортирања кола, велики и експоненцијално расте са порастом броја група, примарна истраживања у дисертацији су усмерена на формулисање математичког модела за решавање проблема симултаног формирања вишегрупних возова који директно зависи од структуре колског тока за формирање. Математичко моделирање симултаног формирања вишегрупних возова постигнуто је представљањем етапног тока сортирања кола у форми бинарног записа. На основу овакве интерпретације померања кола, одређивање плана сортирања кола формулисано је као проблем бинарног целобројног програмирања.

Математички модел за одређивање плана сортирања кола коришћен је као основа за развој сложених модела решавања проблема симултаног формирања вишегрупних возова. Ови модели систематизовани су у зависности од тога да ли решавају проблем оператвног, тактичког или стратешког планирања, а међусобно се разликују према функцији циља коју минимизирају, према броју бинарних променљивих и врсти ограничења. Поред директног излазног резултата о вредности функције циља, ефекти рада на формирању вишегрупних возова се могу индиректно сагледати анализом добијених вредности променљивих у моделу.

Одређивање плана сортирања кола у условима ограничених колосечних капацитета је NP тежак проблем и као такав садржан је у све три форме проблема симултаног формирања возова. С обзиром да се већина реалних проблема не може оптимално решити, развијено је више алгоритама заснованих на методама локалног претраживања. Добијени резултати показали су применљивост хеуристичког приступа за решавање проблема. Поред основног тестирања могућности решавања проблема егзактним и хеуристичким методама, сагледани

су ефекти примене модела по питању потребних колосечних капацитета и квалитета рада техничких теретних станица. У току анализе појединачних показатеља, добијене вредности математичког модела упоређене су са вредностима које се добијају применом троугаоне методе за симултано формирања. Анализа показатеља потврдила је применљивост хеуристичког приступа у решавању математичког модела, али и ефикасност математичког модела у односу на одабрану методу традиционалног плана сортирања кола.

Даље истраживања проблема симултаног формирања вишегрупних возова траба усмерити на унапређење поступка једновременог формирања вишегрупних возова. Могући приступ унапређења овог поступка, кориговањем плана сортирања кола, приказан је у Прилогу 1. Математички модели развијени у дисертацији пружају могућност даље разраде у складу са представљеним принципом корекције плана сортирања кола. Предложено унапређење поступка једновременог формирања вишегрупних возова допринело би, пре свега, повећању искоришћености колосека у току ранжирног рада.

Даља истраживања могуће је усмерити на оптимизацију начина формирања возова у станици. Резултат истраживања био би модел за проналажење усклађеног рада на расформирању и формирању возова који би минимизирао трошкова прераде кола у техничким теретним станицама. Оваква истраживања имала би утицај на целокупну организацију колских токова и додатно би допринела оптимизацији плана формирања возова.

Такође, на пољу формирања вишегрупних возова потребно је наставити истраживања на тему класичних метода које би било усмерено ка детаљнијем дефинисању граница целисходне примене класичних и симултаних метода.

Литература

- [1] Aarts, E., Lenstra, J. K.: *Local Search in Combinatorial Optimization*, Princeton University Press, New Jersey (USA), 2003.
- [2] Adamko, N., Klima, V., Marton, P.: *Designing railway terminals using simulation techniques*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, 2010, pp. 57-67.
- [3] Ahuja, R., Jha, K., Liu, J.: *Solving Real-Life Railroad Blocking Problems*, Interfaces, Vol. 37, No. 5, 2007, pp. 404-419.
- [4] Arhangeljskij, E. V.: *Urovni zagruzki i potrebna mašćnost ustvoystv sortirovoćnih stancij*, Transport, Moskva (SSSR), 1975.
- [5] Baumgartner, J.: *Prices and Costs in the Railway Sector*, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne (Switzerland), 2001.
- [6] Beckmann, M. J., McGuire, C. B.: *Studies in the Economics of Transportation*, Oxford University Press, London (England), 1956.
- [7] Belošević, I., Ivić, M., Marković, M., Vesković, S., Pavlović, N., Milinković, S., Kosijer, M.: *Establishing Maneuver Work Indicators in the Pick-Up Train Forming Process Using the Simultaneous Method*, Proceedings of 19th International Symposium EURO-ŽEL 2011 - Recent Challenges for European Railways, Žilina (Slovak Republic), 2011, pp. 33-40.
- [8] Belošević, I., Ivić, M., Kosijer, M.: *Conditions for Simultaneous Formation of Multigroup Freight Trains*, Građevinar, Vol. 64, No. 7, 2012a, pp. 553-563.
- [9] Belošević, I., Ivić, M., Kosijer, M., Milinković, S.: *Infrastructure Requirements for the Simultaneous Feeder Train Formation*, Proceedings of 20th International Symposium EURO-ŽEL 2012 - Recent Challenges for European Railways, Žilina (Slovak Republic), 2012b, pp. 23-29.
- [10] Beygang, K., Krumke, S. O., Dahms, F.: *Train Marshalling Problem - Algorithms and Bounds (In Technical Report 132)*, University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2010.
- [11] Bjelić, N., Vidović, M., Popović, D.: *Variable neighborhood search algorithm for heterogeneous traveling repairmen problem with time windows*, Expert Systems with Applications, Vol. 40, No. 15, 2013, pp. 5997-6006.

- [12] Blasum, U., Bussieck, M. R., Hochstättler, W., Moll, C., Scheel, H.-H., Winter, T.: *Scheduling Trams in the Morning*, Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 49, No. 1, 1999, pp. 137-148.
- [13] Bohlin, M., Flier, H., Maue, J., Mihalák, M.: *Hump Yard Track Allocation with Temporary Car Storage*, 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome (Italy), 2011.
- [14] Bohlin, M., Dahms, F., Flier, H., Gestrelus, S.: *Optimal Freight Train Classification using Column Generation*, 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization and Systems, Ljubljana (Slovenia), 2012, pp. 10-22.
- [15] Borndörfer, R., Cardonha, C.: *A Binary Quadratic Programming Approach to the Vehicle Positioning Problem*, Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes - Proceedings of the Fourth International Conference on High Performance Scientific Computing, 2012, pp. 41-52.
- [16] Borndörfer, R., Fugenschun, A., Klug, T., Schlenchte, T., Schang, T., Schllendorf, H.: *Strategic freight train routing in macroscopic rail network*, 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis RailCopenhagen, Copenhagen (Denmark), 2012.
- [17] Bourgeois, R.: *Formation des trains de détail par la méthode de la formation simultanée*, Dunod, 1940.
- [18] Бошковић, Б.: *Модел формирања теретних возова ван техничких станица (докторска дисертација)*, Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, Београд, 2007.
- [19] Boysen, N., Fliedner, M., Jaehn, F., Pesch, E.: *Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications*, European Journal of Operational Research, Vol. 220, No. 1, 2012, pp. 1-14.
- [20] Buzanov, S., Karpov, A., Ricarev, M.: *Projektovanje mehanizovanih i automatizovanih ranžirnih postrojenja*, Zavod za novinsko-izdavačku i propagandnu delatnost JŽ, Beograd, 1969.
- [21] Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., Stein, C.: *Introduction to Algorithms*, The MIT Press, Cambridge (USA), 2009.
- [22] Crane, R. R., Brown, F. B., Blanchard, R. O.: *An Analysis of a Railroad Classification Yard*, Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 3, No. 3, 1955, pp. 262-271.
- [23] Cvetković, D., Čangalović, M., Dugošija, Đ., Kovačević-Vujčić, V., Simić, S., Vuleta, J.: *Kombinatorna optimizacija: matematička teorija i algoritmi*, Društvo operacionih istraživača Jugoslavije - DOPIS, Beograd, 1996.
- [24] Čičak, M., Vesković, S.: *Modeliranje tehnologije i kapaciteta ranžirnih stanica*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1992.
- [25] Čičak, M.: *Modeliranje u železničkom saobraćaju*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2003.

- [26] Čičak, M., Vesković, S.: *Organizacija železničkog saobraćaja II*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2005.
- [27] Daganzo, C. F., Dowling, R. G., Hall, R. W.: *Railroad classification yard throughput: The case of multistage triangular sorting*, Transportation Research Part A: General, Vol. 17, No. 2, 1983, pp. 95-106.
- [28] Daganzo, C. F.: *Static Blocking at Railyards: Sorting Implications and Track Requirements*, Transportation Science, Vol. 20, No. 3, 1986, pp. 189-199.
- [29] Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M., Ryan, J. F.: *The train marshalling problem*, Discrete Applied Mathematics, Vol. 103, No. 1–3, 2000a, pp. 41-54.
- [30] Dahlhaus, E., Manne, F., Miller, M., Ryan, J.: *Algorithms for Combinatorial Problems Related to Train Marshalling*, Proceedings of the 11th Australasian Workshop on Combinatorial Algorithms (AWOCA), Hunter Valley (Australia) 2000b, pp. 7–16.
- [31] Di Stefano, G., Maue, J., Modelski, M., Navarra, A., Nunkesser, M., Broek, J.: *Models for Rearranging Train Cars (In Technical Report TR-0089, ARRIVAL Project)*, 2007.
- [32] Dong, X., Huang, H., Chen, P.: *An iterated local search algorithm for the permutation flow shop problem with total flowtime criterion*, Computers & Operations Research, Vol. 36, No. 5, 2009, pp. 1664-1669.
- [33] Freling, R., Lentink, R. M., Kroon, L., Huisman, D.: *Shunting of Passenger Train Units in a Railway Station*, Transportation Science, Vol. 39, No. 2, 2005, pp. 261-272.
- [34] Fried, J.: *Competition Report 2010*, Deutsche Bahn AG, Berlin (Germany), 2010.
- [35] Gallo, G., Di Miele, F.: *Dispatching buses in parking depots*, Transportation Science, Vol. 35, No. 3, 2001, pp. 322-330.
- [36] Garey, M. R., Johnson, D. S.: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman & Company, New York (USA), 1979.
- [37] Gašparik, J., Dolinayova, A., Čamaj, J., Kendra, M., Mašek, J., Marton, P., Meško, R.: *Vlakotvorba a miestne dopravné procesy*, Vydala Univerzita Pardubice, Pardubice (Česká Republika), 2011.
- [38] Gatto, M., Jacob, R., Nunkesser, M.: *Optimization of a railway hub-and-spoke system: Routing and shunting (In Technical Report 477)*, ETH Zurich, 2006.
- [39] Gestrelus, S., Dahms, F., Bohlin, M.: *Optimisation of simultaneous train formation and car sorting at marshalling yards*, 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis RailCopenhagen, Copenhagen (Denmark), 2013.
- [40] Hansen, P., Mladenović, N.: *Variable neighborhood search: Principles and applications*, European Journal of Operational Research, Vol. 130, No. 3, 2001, pp. 449-467.
- [41] Hansen, P., Mladenović, N., Perez, M.: *Variable Neighborhood Search: Methods and Application*, 4OR, Vol. 6, No. 4, 2008, pp. 319-360.

- [42] Hansmann, R. S., Zimmermann, U. T.: *Optimal sorting of rolling stock at hump yard*, Mathematics - Key Technology for the Future, 2008, pp. 189-203.
- [43] Hauser, A., Maue, J.: *Experimental Evaluation of Approximation and Heuristic Algorithms for Sorting Railway Cars* (In *Experimental Algorithms*), No. 6049, Springer, Berlin (Germany), 2010, pp. 154-165.
- [44] Hiller, W.: *Ragierbahnhöfe*, Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin (Deutschland), 1983.
- [45] Hoos, H. H., Stützle, T.: *Stochastic Local Search: Foundations and Applications*, Morgan Kaufmann, San Francisco (USA), 2004.
- [46] Ivić, M.: *Optimizacija strukture i kapaciteta kolosečnih parkova tehničkih teretnih stanica (doktorska disertacija)* Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1992.
- [47] Ивић, М.: *Железничке пруге и станице - постројења за везу колосека*, Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, Београд, 2005.
- [48] Ivić, M., Marković, M., Marković, A.: *Effects of the Application of Conventional Methods in the Process of Forming the Pick-up Trains*, Yugoslav Journal of Operations Research, Vol. 17, No. 2, 2007, pp. 245-256.
- [49] Ivić, M., Marković, A., Milinković, S., Belošević, I., Marković, M., Vesković, S., Pavlović, N.: *Simulation Model for Estimating Effects of Forming Pick-Up Trains by Simultaneous Method*, Proceedings of 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague (Czech Republic), 2010.
- [50] Ivić, M., Belošević, I., Milinković, S., Kosijer, M., Pavlović, N.: *Track properties for formation of pick-up trains*, Građevinar, Vol. 65, No. 2, 2013, pp. 123-132.
- [51] Jacob, R.: *On shunting over a hump* (In *Technical Report 576*), ETH Zurich, 2007.
- [52] Jacob, R., Marton, P., Maue, J., Nunkesser, M.: *Multistage methods for freight train classification*, Networks, Vol. 57, No. 1, 2011, pp. 87-105.
- [53] Jagt, N.: *Position Paper on Single Wagon Load Services in Rail Freight Transport*, European Shippers' Council, Brussels (Belgium), 2010.
- [54] Jokić, M.: *Dinamički razvoj i optimizacija kapaciteta železničkih ranžirnih stanica (doktorska disertacija)*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1979.
- [55] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P.: *Optimization by Simulated Annealing*, Science, Vol. 220, No. 4598, 1983, pp. 671-680.
- [56] Koning, H., Schaltegger, P.: *Optimal Simultanformation von Nahgüterzügen in Rangierbahnhöfen*, Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn Kongress Vereinigung, Vol. 4, No. 1, 1967, pp. 1-18.
- [57] Koreškov, A. N.: *Vibor optimalnih uslovij raboti i tehničeskovje osnaščenija sortirovočnogo komplekta stanicij prijeto etičnom razvitii*, MIIT, Moskva (SSSR), 1969.

- [58] Krasensky, D.: *How to Boost the Efficiency of the Single Wagon Loads (SWL) using the Economic and Optimizing Tools*, Proceedings of 20th International Symposium EURO-ŽEL 2012 - Recent Challenges for European Railways, Žilina (Slovak Republic), 2012, pp. 155-162.
- [59] Krumke, S. O.: *Integer Programming: Polyhedra and Algorithms*, Technische Univerzitat Kaiserslautern, Kaiserslautern (Germany), 2006.
- [60] Lin, E., Cheng, C.: *A Rail Yard Simulation Framework and Its Implementation in Major Railroad in the U.S.*, Winter Simulation Conference, Austin (USA), 2009, pp. 2532-2541.
- [61] Marinov, M., Viegas, J.: *A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network*, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 1, 2011, pp. 516-539.
- [62] Marinov, M., Woroniuk, C., Zunder, T. H.: *Recent Developments with Single Wagon Load Services, Policy and Practice in Europe*, Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Wrocław (Poland), 2012, pp. 1097-1104.
- [63] Marković, M., Ivić, M.: *Bezbednost, proračun i ispitivanje grbine*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2005.
- [64] Márton, P.: *Experimental Evaluation of Selected Methods for Multigroup Train Formation*, Communications, Vol. 7, No. 2, 2005, pp. 5-8.
- [65] Márton, P., Maue, J., Nunkesser, M.: *An Improved Classification Procedure for the Hump Yard Lausanne Triage*, 9th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization and Systems (ATMOS'09), Copenhagen (Denmark), 2009.
- [66] Maue, J., Nunkesser, M.: *Evaluation of Computational Methods for Freight Train Classification Schedules* (In *Technical Report TR-0184, ARRIVAL Project*), 2009.
- [67] Milinković, S.: *Metodologija za utvrđivanje optimalnog rešenja rasputnice (doktorska disertacija)*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2012.
- [68] Milošević, B.: *Organizacija rada ranžirnih stanica*, Jugoslovenske železnice, Beograd, 1971.
- [69] Milošević, B.: *Stanična postrojenja*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1973.
- [70] Milošević, B.: *Železničke stanice i čvorovi - proračun staničnih kapaciteta*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1979.
- [71] Petersen, E. R.: *Railyard Modeling: Part II. The Effect of Yard Facilities on Congestion*, Transportation Science, Vol. 11, No. 1, 1977, pp. 50-59.
- [72] Popović, Z.: *Optimizacija ranžirno-otpremnog dela gravitacione ranžirne stanice (doktorska disertacija)*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2000.

- [73] Potthoff, G.: *Verkehrsströmungslehre*, Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin (Deutschland), 1977.
- [74] Selenik, O., Ferk, G. J.: *Wagonload cooperation in Europe (In Railway Transformation)*, Eurailpress, Hamburg (Germany), 2009. pp. 145-160.
- [75] Sotnikov: *Vzaimodajstije stancij i učastkov železnih dorog*, Transport, Moskva (SSSR), 1976.
- [76] Spall, J. C.: *Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation and Control*, John Wiley & Sons, Hoboken (USA), 2003.
- [77] Раденковић, Б., Станојевић, М., Марковић, А.: *Рачунарска симулација*, Саобраћајни факултет и Факултет организационих наука Универзитета у Београду, Београд, 2009.
- [78] Turnquist, M. A., Daskin, M. S.: *Queuing Models of Classification and Connection Delay in Railyards*, Transportation Science, Vol. 16, No. 2, 1982, pp. 207-230.
- [79] Winter, T., Zimmermann, U. T.: *Real-Time Dispatch of Trams in Storage Yards*, Annals of Operations Research, Vol. 96, No. 1, 2000, pp. 287-315.

ПРИЛОЗИ

Прилог I Коригована форма метода за симултано формирање вишегрупних возова

Теоријски, методе за симултано формирање вишегрупних возова захтевају две групе ранжирних колосека: групу за накупљање и сортирање кола према припадајућим упутним станицама и групу за сортирање кола према припадајућим возовима. То значи да по извлачењу кола са колосека накупљања ови колосеци остају некоришћени у даљем процесу, а формирање састава за вишегрупне возове врши се на посебној групи колосека. Корекцијом процеса сортирања кола, у смислу остваривања паралелног сортирања кола према припадајућим упутним станицама и према припадајућим возовима, целокупан процес формирања вишегрупних возова може се извршити у оквиру јединствене групе колосека. У овој коригованој форми метода за симултано формирање, након сваког корака сортирања ослобођени колосек се користити за формирање новог састава. Тиме се на колосецима накупљања кола врши комплетно сортирање кола и формирање састава за вишегрупне возове. Поред повећања искоришћености колосека ова корекција омогућава и смањење укупног броја потребних колосека за формирање вишегрупних возова.

У класичној форми метода за симултано формирање вишегрупних возова, накупљање кола врши се према редним бројевима упутних станица без обзира ком отпремном возу припадају. Коригована форма ових метода има измењени облик накупљања кола који карактерише формирање блокова. Блок кола у процесу накупљања формирају кола у зависности од редних бројева припадајућих упутних станица, али и од припадности возу. Блокови се сортирају према утврђеним шемама сортирања одговарајућих метода као што је представљено у одељку 4.2.

Кола првог отпремног воза групишу се у блокове, тако да редни број блока одговара редном броју припадајуће упутне станице. Кола другог воза групишу се у блокове од редног броја 2 па надаље, тако да је редни број блока за један већи од редног броја припадајуће упутне станице. Индексирање кола према блоковима осталих отпремних возова врши се у зависности од примењене методе. Изрази (П1.1), (П1.2) и (П1.3) представљају опште законитости уврштавања групе кола упутне станице редног броја i воза k у блок j у случају:

елементарне методе:

$$j = k + (i - 1), \quad i = 1 \dots g_k^{max} \quad (\text{П1.1})$$

троугаоне методе:

$$j = \frac{k(k - 1)}{2} + i, \quad i = 1 \dots g_k^{max} \quad (\text{П1.2})$$

геометријске методе:

$$j = 2^{k-1} + (i - 1), \quad i = 1 \dots g_k^{max} \quad (\text{П1.3})$$

где је:

g_k^{max} – највећи редни број упутне станице k -тог воза.

Законитост на основу које се обавља формирање блокова кола за вишегрупне возове по елементарној, троугаоној и геометријској методи може се видети и у таблама П1.1, П1.2 и П1.3.

Процес формирања вишегрупних возова применом кориговане форме елементарне, троугаоне и геометријске методе представљен је на примеру формирања четири вишегрупна воза неједнаког броја упутних станица. У случају неједнаког броја упутних станица, ефекат смањења потребног броја колосека је најизраженији што је и приказано на сликама П1, П2 и П3.

Табела П1 Формирање блокова кола вишегрупних возова применом елементарне методе

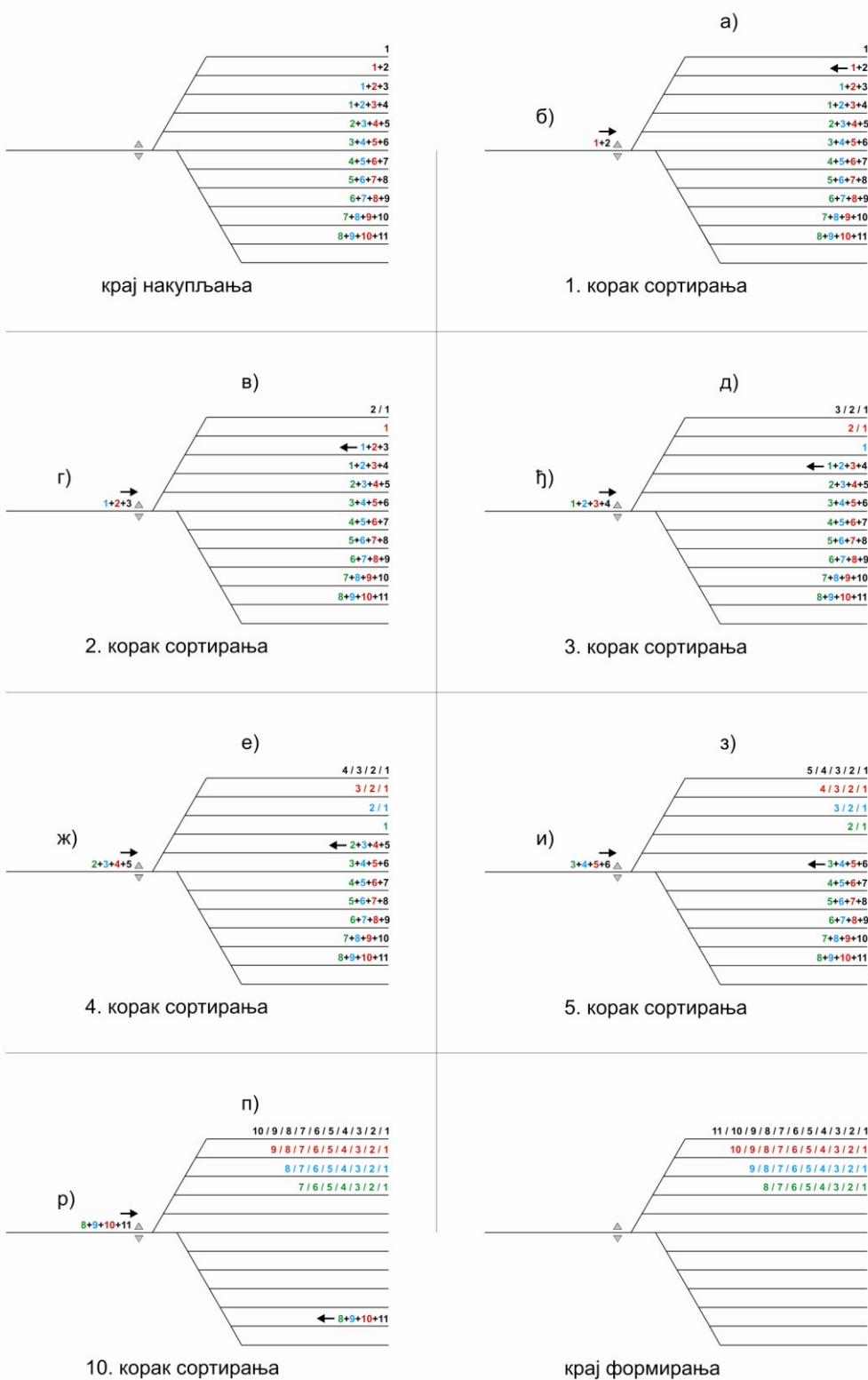
ВОЗ k	редни број блока b_j																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Редни број упутне станице i
2	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
3	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
4	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
5	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Табела П2 Формирање блокова кола вишегрупних возова применом троугаоне методе

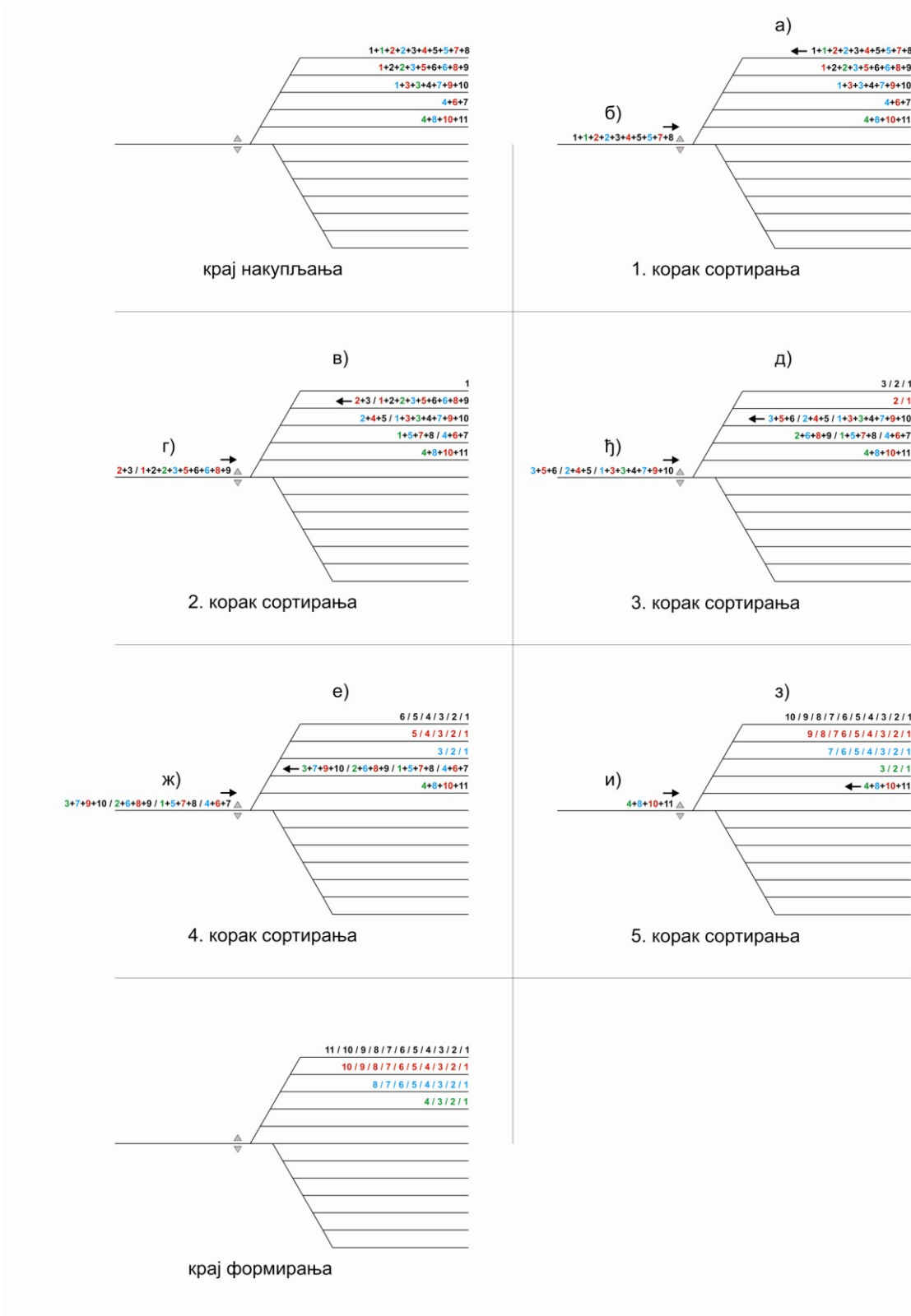
ВОЗ k	редни број блока b_j																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Редни број упутне станице i
2	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
3	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
4	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	

Табела П3 Формирање блокова кола вишегрупних возова применом геометријске методе

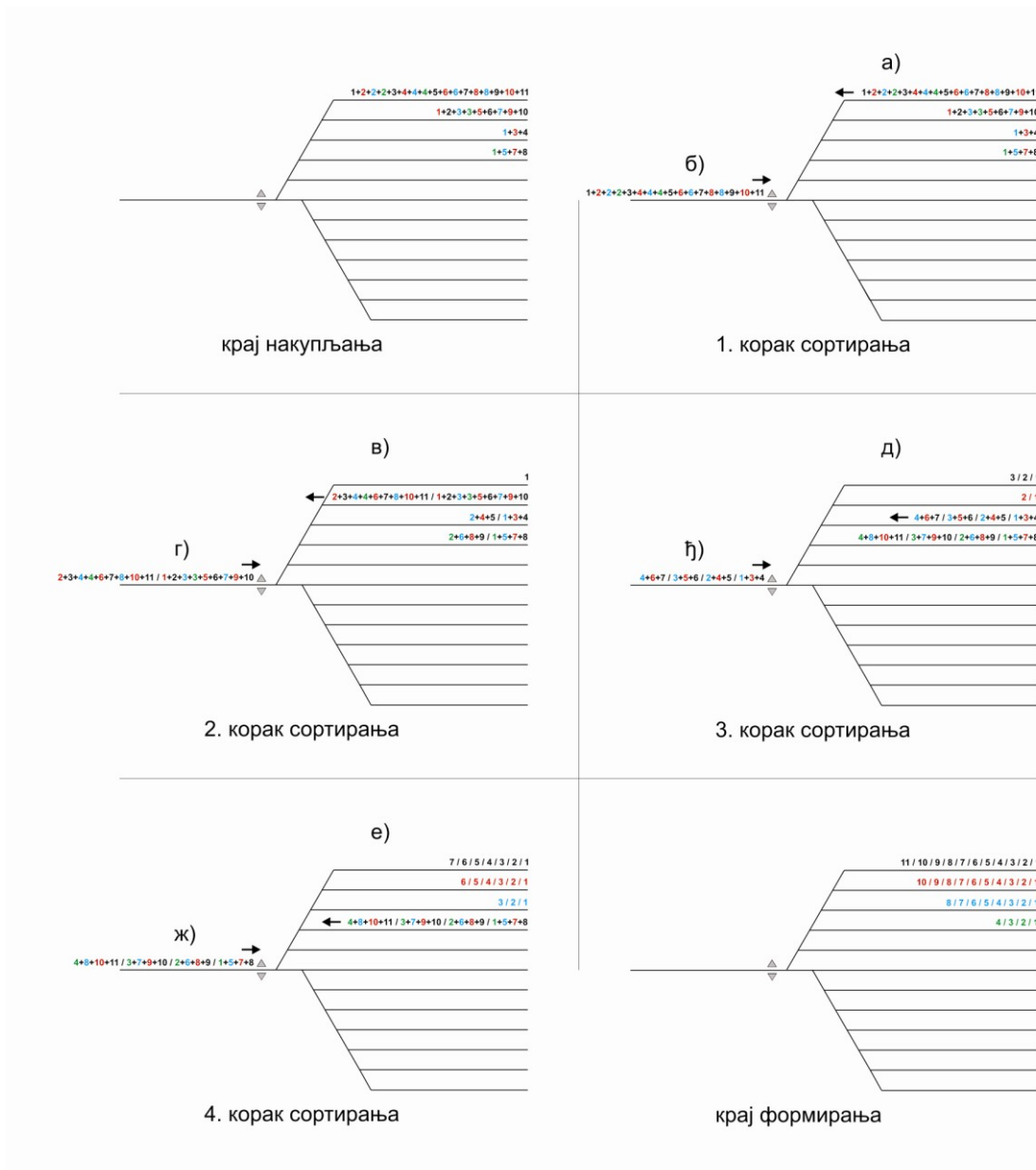
ВОЗ k	редни број блока b_j																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Редни број упутне станице i
2	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
3	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
4	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	



Слика III Коригована елементарна метода за симултано формирање вишегрупних возова



Слика П2 Коригована троугаона метода за симултано формирање вишегрупних возова

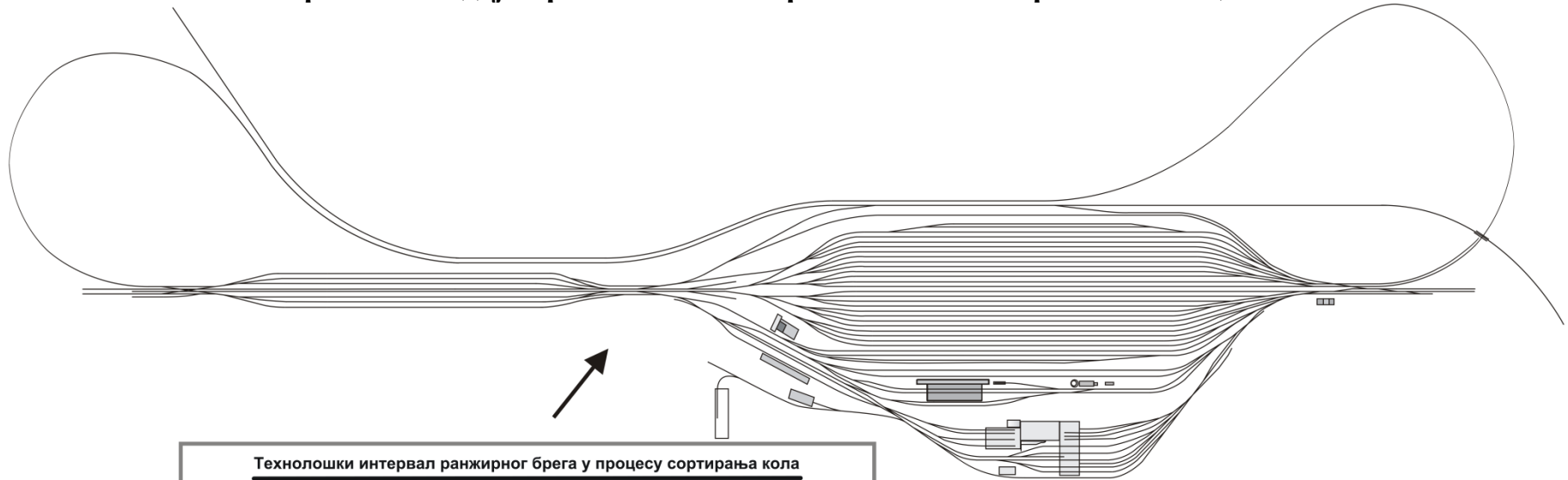


Слика ПЗ Коригована геометријска метода за симултано формирање вишегрупних возова

По отпочињању фазе сортирања кола (извлачење и сортирање кола са првог колосека), кола првог блока (кола која припадај упутној станици I у првом вишегрупном возу) враћају се на први колосек, док се сва друга кола према одговарајућој шеми сортирања блокова упућују на преостале колосеке (У случају елементарне методе овај корак се изоставља, јер се на првом колосеку накупљају искључиво кола првог блока). Овај колосек ће се у даљем току сортирања користити за уврштавање и осталих кола у састав првог воза према редоследу

упутних станица. Други корак сортирања започиње ослобађањем другог колосека. Како чеону групу овог колосека чини блок у оквиру којег се налазе кола за упутну станицу 2 првог воза и кола упутне станице 1 другог воза, ова кола ће се вратити на први и други колосек. Кола за први воз се уврштавају у састав на првом колосеку, а кола другог воза отпочињу формирање састава за овај воз на другом колосеку. Остала кола која су извучена у другом кораку се према одговарајућој шеми сортирања блокова упућују на преостале колосеке. У сваком наредном кораку сортирања ослобађа се по један колосек који се користи за формирање новог састава, а блокови се сортирају у зависности од примењене методе за симултано формирање вишегрупних возова.

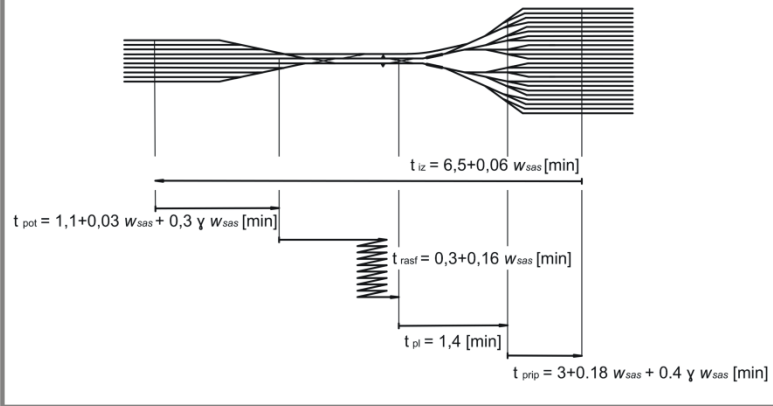
Прилог II Идејно решење анализирание техничке теретне станице



Технолошки интервал ранжирног брега у процесу сортирања кола

$$t_{\text{sort}} = t_{\text{pl}} + t_{\text{prip}} + t_{\text{iz}} + t_{\text{pot}} + t_{\text{rasf}}$$

$$t_{\text{sort}} = 12,3 + (0,4 + 0,7\gamma)w_{\text{sas}} \text{ [min]}$$



Прилог III Резултати тестирања математичког модела

Табела П4 Резултати добијени применом CPLEX MIP Solver-a

колски ток	макс. број упутних станца	број променљивих	број ограничења	вредност функције циља	време извршавања програма	статус решења
50 кола	3	2020	1529	80347,14	12,98	оптималност доказана
	4	2020	1529	94936,31	23,82	оптималност доказана
	5	2020	1529	104451,73	30,43	оптималност доказана
	6	2020	1529	109718,39	31,95	оптималност доказана
	8	2020	1529	125098,30	40,03	оптималност доказана
	10	2020	1529	132333,83	54,15	оптималност доказана
	11	2020	1529	132739,96	55,75	оптималност доказана
	13	2020	1529	147075,38	46,52	оптималност доказана
	15	2020	1529	147539,38	74,60	оптималност доказана
	16	2020	1529	153003,48	65,33	оптималност доказана
	18	2020	1529	157573,48	128,51	оптималност доказана
20	2020	1529	155728,71	168,64	оптималност доказана	
75 кола	3	3020	2054	129360,73	51,68	оптималност доказана
	4	3020	2054	147752,29	70,43	оптималност доказана
	5	3020	2054	162135,57	147,28	оптималност доказана
	6	3020	2054	171387,11	112,29	оптималност доказана
	8	3020	2054	191143,58	158,78	оптималност доказана
	10	3020	2054	206703,88	296,00	оптималност доказана
	11	3020	2054	214014,67	528,42	оптималност доказана
	13	3020	2054	220166,95	401,75	оптималност доказана
	15	3020	2054	231520,68	2080,84	оптималност доказана
	16	3020	2054	246446,18	2057,71	оптималност доказана
	18	3020	2054	242152,03	1820,48	оптималност доказана
20	3020	2054	252709,98	2467,95	оптималност доказана	
100 кола	3	4020	2579	177133,50	88,34	оптималност доказана
	4	4020	2579	207283,90	47,81	оптималност доказана
	5	4020	2579	230024,68	224,67	оптималност доказана
	6	4020	2579	250826,47	1133,68	оптималност доказана
	8	4020	2579	281870,81	1145,98	оптималност доказана
	10	4020	2579	303523,85	6384,33	оптималност доказана
	11	4020	2579	302611,26	9439,55	оптималност доказана
	13	4020	2579	324100,60	14400,23	оптималност није доказана
	15	4020	2579	335584,56	14400,28	оптималност није доказана
	16	4020	2579	350640,42	3213,78	оптималност није доказана
	18	4020	2579	357208,70	14400,54	оптималност није доказана
20	4020	2579	360974,73	14400,26	оптималност није доказана	

125 кола	3	5020	3104	263845,03	331,00	оптималност доказана
	4	5020	3104	269838,79	194,36	оптималност доказана
	5	5020	3104	303238,46	142,37	оптималност доказана
	6	5020	3104	332609,08	799,78	оптималност доказана
	8	5020	3104	379321,55	5246,07	оптималност доказана
	10	5020	3104	404068,79	8172,25	оптималност доказана
	11	5020	3104	420885,38	14400,24	оптималност није доказана
	13	5020	3104	441253,49	14400,82	оптималност није доказана
	15	5020	3104	463906,64	14400,29	оптималност није доказана
	16	5020	3104	487342,74	14400,20	оптималност није доказана
	18	5020	3104	477983,63	14400,37	оптималност није доказана
	20	5020	3104	480576,76	14400,46	оптималност није доказана
150 кола	3	6020	3629	349624,66	452,56	оптималност доказана
	4	6020	3629	342282,04	270,58	оптималност доказана
	5	6020	3629	384547,56	4657,03	оптималност доказана
	6	6020	3629	425979,77	2759,35	оптималност доказана
	8	6020	3629	478703,71	8293,61	оптималност доказана
	10	6020	3629	523449,24	14400,46	оптималност није доказана
	11	6020	3629	540000,73	14400,35	оптималност није доказана
	13	6020	3629	560070,92	14400,23	оптималност није доказана
	15	6020	3629	606126,29	14400,23	оптималност није доказана
	16	6020	3629	598934,30	14400,26	оптималност није доказана
	18	6020	3629	617197,57	14400,26	оптималност није доказана
	20	6020	3629	657744,29	14400,24	оптималност није доказана
175 кола	3	7020	4154	448632,60	1467,29	оптималност доказана
	4	7020	4154	466270,46	5157,27	оптималност доказана
	5	7020	4154	478016,87	959,98	оптималност доказана
	6	7020	4154	510530,71	4954,15	оптималност доказана
	8	7020	4154	585156,00	14400,23	оптималност није доказана
	10	7020	4154	655171,40	14400,35	оптималност није доказана
	11	7020	4154	675117,78	14400,32	оптималност није доказана
	13	7020	4154	727723,89	14400,51	оптималност није доказана
	15	7020	4154	776701,51	14400,42	оптималност није доказана
	16	7020	4154	749120,03	14400,26	оптималност није доказана
	18	7020	4154	791735,81	14400,37	оптималност није доказана
	20	7020	4154	804176,55	14400,32	оптималност није доказана
200 кола	3	8020	4679	546618,81	14400,29	оптималност није доказана
	4	8020	4679	599453,43	14400,29	оптималност није доказана
	5	8020	4679	567656,71	5372,62	оптималност доказана
	6	8020	4679	649511,08	14400,31	оптималност није доказана
	8	8020	4679	700633,30	14400,21	оптималност није доказана
	10	8020	4679	755771,82	14400,31	оптималност није доказана
	11	8020	4679	818272,49	14400,29	оптималност није доказана
	13	8020	4679	878932,53	14400,20	оптималност није доказана
	15	8020	4679	932351,53	1401,13	оптималност није доказана
	16	8020	4679	946474,23	14400,50	оптималност није доказана
	18	8020	4679	985935,99	14400,38	оптималност није доказана
	20	8020	4679	952806,66	14400,35	оптималност није доказана

Табела П5 Резултати добијени применом GVNS методе

КОЛЕСКИ ТОК	макс. број улутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	80347,14	80347,13	0,00	0,00	1,22
	4	94936,31	94936,30	0,00	0,00	1,67
	5	104451,73	104451,73	0,00	0,00	2,72
	6	109718,39	109718,39	0,00	0,00	2,55
	8	125098,30	127682,60	1102,93	0,02	4,07
	10	132333,83	132333,83	0,00	0,00	4,48
	11	132739,96	132739,96	0,00	0,00	4,94
	13	147075,38	148101,40	147,31	0,01	5,99
	15	147539,38	147941,02	471,69	0,00	9,10
	16	153003,48	153003,48	0,00	0,00	13,22
	18	162823,77	167409,45	1021,53	0,07	11,17
20	156790,90	157668,84	1015,91	0,01	13,72	
75 кола	3	129360,73	129360,73	0,00	0,00	3,75
	4	147752,29	147752,29	0,00	0,00	5,68
	5	162135,57	162945,31	224,76	0,01	6,69
	6	171387,11	171457,14	278,59	0,00	8,22
	8	191143,58	191143,58	0,00	0,00	7,86
	10	206703,88	206703,88	0,00	0,00	9,94
	11	214014,67	214438,01	252,20	0,00	15,83
	13	221405,37	221777,91	1152,74	0,01	19,14
	15	231520,68	231520,68	0,00	0,00	15,27
	16	247696,05	249122,40	1501,37	0,01	24,46
	18	258471,99	259245,08	792,69	0,07	30,12
20	253969,77	253969,77	0,00	0,00	20,60	
100 кола	3	177133,50	177133,50	0,00	0,00	6,41
	4	207283,90	207283,90	0,00	0,00	9,70
	5	230024,68	230024,68	0,00	0,00	13,47
	6	250826,47	254275,29	4160,90	0,00	20,19
	8	281870,81	283773,55	1384,33	0,00	23,86
	10	303523,85	309392,93	5382,86	0,03	41,74
	11	302611,26	315728,30	5927,51	0,05	31,29
	13	330678,63	331004,72	307,00	0,02	32,07
	15	343029,86	343029,86	0,00	0,02	35,09
	16	350640,42	350721,09	397,18	0,00	39,70
	18	353255,93	370748,77	6929,88	0,05	48,64
20	373946,64	378733,88	483,56	0,05	36,88	

125 кола	3	263845,03	263929,74	273,57	0,00	13,06
	4	269838,79	269838,79	0,00	0,00	15,12
	5	303238,46	303255,86	63,78	0,00	22,78
	6	334167,73	335844,19	3561,12	0,00	25,46
	8	380072,16	383099,96	1022,53	0,01	37,39
	10	404068,79	407503,70	8190,41	0,00	47,77
	11	420885,38	420885,38	0,00	0,00	49,46
	13	435435,10	450506,37	8470,48	0,03	55,28
	15	450161,00	458254,11	10951,96	-0,03	73,67
	16	460981,20	473910,55	8303,81	-0,02	69,45
	18	482449,82	482598,14	578,30	0,01	70,58
	20	483886,74	487862,77	1647,22	0,01	82,77
150 кола	3	373601,70	375083,49	2263,50	0,07	17,20
	4	342282,04	342282,04	0,00	0,00	21,79
	5	384547,56	384547,56	0,00	0,00	29,08
	6	425979,77	425979,77	0,00	0,00	40,17
	8	486283,10	491739,11	1898,29	0,03	59,47
	10	524021,33	535747,50	8360,19	0,03	107,40
	11	539428,64	545449,80	3975,18	0,02	107,59
	13	557505,47	557505,47	0,00	0,00	75,63
	15	592646,75	598098,25	3202,19	-0,01	124,21
	16	593764,12	596980,49	3588,04	-0,01	123,79
	18	614909,21	636166,16	11501,72	0,04	114,74
	20	644577,77	653721,83	2495,97	-0,01	130,08
175 кола	3	454502,80	454512,75	99,49	0,01	20,57
	4	466270,46	466510,73	515,43	0,00	28,38
	5	478016,87	478179,92	426,75	0,00	49,03
	6	510530,71	510530,70	0,00	0,00	57,61
	8	590452,36	591246,52	3150,49	0,01	152,31
	10	642047,00	646111,65	5024,59	-0,02	207,67
	11	675117,78	687488,59	5792,79	0,02	134,09
	13	702698,71	720338,35	2546,25	-0,01	113,52
	15	733714,45	759225,76	20240,28	0,00	154,28
	16	763984,51	781743,99	2690,63	0,04	135,95
	18	782528,24	787192,98	5365,29	-0,01	193,66
	20	817804,25	820486,81	1626,79	0,02	170,19
200 кола	3	555772,25	555938,16	483,08	0,02	35,11
	4	605174,33	607085,11	2397,32	0,01	44,30
	5	567656,71	567695,86	275,47	0,00	46,43
	6	613357,17	613357,17	0,00	-0,06	60,91
	8	700633,30	700633,30	0,00	0,00	110,04
	10	789872,26	789905,21	201,54	0,05	144,16
	11	818033,15	829907,75	4636,32	0,02	189,79
	13	844890,36	844890,36	0,00	-0,04	155,94
	15	894215,81	905672,36	2711,50	-0,03	318,20
	16	940687,53	940687,53	0,00	-0,01	124,04
	18	948955,25	949021,85	404,38	-0,04	189,76
	20	937644,22	944534,01	4766,83	-0,01	312,88

Табела П6 Резултати добијени применом методе најбољег унапређења

КОЛЕСКИ ТОК	макс. број улутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	80347,14	80347,13	0,00	0,00	0,05
	4	94936,31	94936,30	0,00	0,00	0,06
	5	104451,73	105345,42	1313,74	0,01	0,19
	6	109718,39	109718,39	0,00	0,00	0,09
	8	128157,63	128157,63	0,00	0,02	0,13
	10	132333,83	132333,83	0,00	0,00	0,16
	11	132739,96	132739,96	0,00	0,00	0,18
	13	148122,34	148122,34	0,00	0,01	0,21
	15	147539,38	148966,45	753,86	0,01	0,50
	16	158853,36	158853,36	0,00	0,04	0,26
	18	168119,02	168376,46	286,04	0,07	0,46
20	158832,63	160354,08	1263,08	0,03	0,96	
75 кола	3	129360,73	131670,99	3914,65	0,01	0,27
	4	147752,29	152057,57	4528,84	0,02	0,50
	5	162957,82	164590,45	1327,28	0,02	0,42
	6	181753,83	182287,79	1343,62	0,06	0,53
	8	191143,58	191143,58	0,00	0,00	0,28
	10	206703,88	206703,88	0,00	0,00	0,36
	11	214014,67	228162,10	10308,89	0,11	1,37
	13	221405,37	227046,98	2354,94	0,03	1,15
	15	231520,68	231520,68	0,00	0,00	0,55
	16	250706,50	255631,35	3248,06	0,05	1,02
	18	260049,73	260049,73	0,00	0,07	0,66
20	253969,77	253969,77	0,00	0,00	0,73	
100 кола	3	177133,50	180679,15	2963,53	0,01	0,33
	4	207283,90	217181,83	7916,67	0,04	0,89
	5	230024,68	239016,61	3455,31	0,04	1,26
	6	258997,34	266975,80	3478,60	0,07	0,77
	8	283014,99	293411,25	9826,22	0,02	3,46
	10	308362,71	324939,93	3244,05	0,07	2,13
	11	303755,44	322178,26	8817,98	0,07	2,77
	13	330678,63	332343,41	1035,25	0,03	1,76
	15	343029,86	345166,59	2701,78	0,02	2,31
	16	350640,42	358132,22	8860,51	0,01	3,08
	18	353828,02	376983,02	3912,05	0,05	4,06
20	378782,24	378782,24	0,00	0,05	1,32	

125 кола	3	263845,03	268669,51	3064,80	0,02	0,84
	4	269838,79	276031,24	5787,51	0,02	1,07
	5	303238,46	313764,86	10999,19	0,02	2,75
	6	343345,53	346676,43	4852,77	0,04	1,58
	8	403097,74	403097,74	0,00	0,06	0,79
	10	431973,65	431973,65	0,00	0,07	1,02
	11	439839,07	442758,77	3957,35	0,05	6,69
	13	435435,10	452472,56	12700,80	0,03	9,00
	15	451795,16	479110,32	7145,87	0,04	6,27
	16	460981,20	483438,72	10646,35	0,00	10,06
	18	482449,82	485560,47	3029,57	0,02	6,26
	20	487319,28	490847,64	1439,27	0,02	3,90
150 кола	3	373601,70	376873,22	2725,13	0,08	1,34
	4	342282,04	348293,70	3518,05	0,02	1,49
	5	384547,56	394409,42	7733,07	0,02	3,32
	6	425979,77	435263,76	9657,68	0,02	7,08
	8	491650,65	494255,34	3018,32	0,03	9,20
	10	540737,48	563283,03	7467,41	0,09	7,12
	11	539428,64	552003,86	3437,88	0,02	11,12
	13	557505,47	558475,41	1537,81	0,00	6,34
	15	594363,02	604327,00	5229,84	0,00	22,37
	16	593764,12	603083,28	4948,26	0,00	27,13
	18	614337,12	627301,16	10272,29	0,01	23,46
	20	651988,13	660232,19	5427,36	0,00	18,17
175 кола	3	454502,80	456432,86	2028,66	0,02	1,12
	4	466270,46	467689,09	632,30	0,00	1,90
	5	478016,87	482956,84	3292,19	0,01	4,58
	6	510530,71	519087,16	6939,58	0,01	6,91
	8	604806,81	618716,75	9582,47	0,05	17,28
	10	645156,10	668077,22	13263,67	0,01	24,19
	11	681059,04	698100,75	6780,13	0,04	17,21
	13	708423,52	724505,91	6112,26	-0,01	16,66
	15	733714,45	781843,11	28157,77	0,01	24,76
	16	757951,01	781609,11	5577,94	0,05	25,24
	18	791015,54	800355,07	7012,81	0,01	28,66
	20	818376,34	823213,94	3235,62	0,02	17,60
200 кола	3	555772,25	560464,76	3451,37	0,02	3,15
	4	605174,33	609555,21	2976,12	0,02	3,87
	5	567656,71	572394,50	2880,81	0,01	2,58
	6	613357,17	619845,42	5390,13	-0,05	9,83
	8	700633,30	716403,44	17628,82	0,01	21,03
	10	789872,26	799767,58	8466,37	0,06	21,33
	11	830495,32	840615,44	3814,16	0,03	11,20
	13	847906,66	864334,52	5640,97	-0,02	18,28
	15	904721,54	912125,15	6329,32	-0,02	51,44
	16	940687,53	940687,53	0,00	-0,01	5,29
	18	948955,25	952427,32	2154,42	-0,03	19,04
	20	941567,71	954481,61	6717,24	0,00	118,14

Табела П7 Резултати добијени применом методе првог унапређења

КОЛЕСКИ ТОК	макс. број упутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	80347,14	80347,13	0,00	0,00	80347,14
	4	94936,31	94936,30	0,00	0,00	94936,31
	5	104451,73	105800,30	1490,24	0,01	104451,73
	6	109718,39	109718,39	0,00	0,00	109718,39
	8	128157,63	128157,63	0,00	0,02	128157,63
	10	132333,83	132333,83	0,00	0,00	132333,83
	11	132739,96	132739,96	0,00	0,00	132739,96
	13	148122,34	148122,34	0,00	0,01	148122,34
	15	147539,38	148873,32	741,29	0,01	147539,38
	16	158853,36	158853,36	0,00	0,04	158853,36
	18	167059,97	168377,31	315,15	0,07	167059,97
20	158832,63	160306,67	1264,56	0,03	158832,63	
75 кола	3	129360,73	135480,18	6753,67	0,02	129360,73
	4	147752,29	152911,96	4444,24	0,02	147752,29
	5	162957,82	165137,81	1211,15	0,02	162957,82
	6	171387,11	184963,17	5796,71	0,07	171387,11
	8	191143,58	191143,58	0,00	0,00	191143,58
	10	206703,88	206703,88	0,00	0,00	206703,88
	11	214014,67	227926,91	10205,69	0,11	214014,67
	13	221405,37	227036,41	2293,52	0,03	221405,37
	15	231520,68	231520,68	0,00	0,00	231520,68
	16	250706,50	255503,56	3076,78	0,04	250706,50
	18	260049,73	260049,73	0,00	0,07	260049,73
20	253969,77	253969,77	0,00	0,00	253969,77	
100 кола	3	177133,50	181184,72	2882,32	0,03	177133,50
	4	207283,90	225961,99	12371,66	0,08	207283,90
	5	230024,68	244264,30	9468,65	0,05	230024,68
	6	250826,47	267737,18	2720,68	0,07	250826,47
	8	281870,81	295154,90	10713,82	0,03	281870,81
	10	303523,85	322226,12	6926,81	0,07	303523,85
	11	302611,26	318963,58	10155,16	0,06	302611,26
	13	330678,63	332583,69	920,15	0,03	330678,63
	15	338708,77	345490,13	2526,64	0,03	338708,77
	16	350640,42	358632,82	9575,04	0,01	350640,42
	18	353255,93	377148,93	3595,01	0,05	353255,93
20	375662,91	378782,24	0,00	0,05	375662,91	

125 кола	3	263845,03	269247,45	2914,37	0,02	263845,03
	4	269838,79	277244,14	6448,18	0,02	269838,79
	5	303487,16	328451,93	16510,24	0,09	303487,16
	6	343345,53	355231,82	9587,64	0,06	343345,53
	8	403097,74	403097,74	0,00	0,06	403097,74
	10	431973,65	431973,65	0,00	0,07	431973,65
	11	433208,89	445492,41	4737,54	0,06	433208,89
	13	435435,10	452589,06	12355,48	0,03	435435,10
	15	451795,16	480472,45	6844,47	0,04	451795,16
	16	460981,20	483614,10	10780,16	0,00	460981,20
	18	482449,82	486390,64	3394,09	0,02	482449,82
20	487319,28	490999,86	1286,01	0,02	487319,28	
150 кола	3	373601,70	378019,58	2968,22	0,08	373601,70
	4	342282,04	348259,08	3629,33	0,02	342282,04
	5	384547,56	399591,81	9570,35	0,04	384547,56
	6	427087,90	462071,42	18741,71	0,09	427087,90
	8	489934,38	499138,07	8419,77	0,04	489934,38
	10	541944,11	559659,24	7501,02	0,07	541944,11
	11	539428,64	552379,40	4776,13	0,02	539428,64
	13	556457,83	559956,27	2898,32	0,00	556457,83
	15	595842,29	612525,63	11642,30	0,01	595842,29
	16	593764,12	609404,45	11372,90	0,01	593764,12
	18	614909,21	633911,57	11170,84	0,03	614909,21
20	644714,09	660607,67	6905,13	0,00	644714,09	
175 кола	3	454502,80	456965,86	2018,55	0,02	454502,80
	4	466270,46	468209,77	1350,63	0,00	466270,46
	5	478016,87	485562,33	6404,04	0,01	478016,87
	6	510530,71	546298,38	22045,65	0,09	510530,71
	8	588582,28	623883,80	15131,02	0,06	588582,28
	10	647941,75	676112,99	14694,10	0,03	647941,75
	11	675117,78	695735,46	9731,56	0,03	675117,78
	13	707851,43	725112,32	8815,91	0,00	707851,43
	15	735736,21	771048,23	26007,43	-0,02	735736,21
	16	753633,78	781469,06	11063,48	0,04	753633,78
	18	785789,93	805096,02	10074,53	0,02	785789,93
20	817804,25	826963,50	6964,05	0,03	817804,25	
200 кола	3	555772,25	562053,11	4758,91	0,03	555772,25
	4	605174,33	611163,28	3680,25	0,02	605174,33
	5	567656,71	572257,45	2923,43	0,01	567656,71
	6	613357,17	624758,06	8664,63	-0,04	613357,17
	8	700633,30	769329,93	34456,28	0,10	700633,30
	10	789872,26	798892,73	8686,72	0,05	789872,26
	11	822272,97	838064,09	6140,48	0,02	822272,97
	13	846190,39	869725,07	14995,39	-0,02	846190,39
	15	900290,41	916565,55	10062,89	-0,02	900290,41
	16	940687,53	940687,53	0,00	-0,01	940687,53
	18	939904,44	952366,00	4879,07	-0,03	939904,44
20	946185,00	965761,25	13164,83	0,01	946185,00	

Табела П8 Резултати добијени применом методе симулираног каљења

колски ток	макс. број унутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	80347,14	80347,13	0,00	0,00	1,33
	4	94936,31	94936,30	0,00	0,00	1,83
	5	104451,73	104571,26	465,89	0,00	2,73
	6	109718,39	109718,39	0,00	0,00	2,77
	8	125098,30	125327,75	810,89	0,00	4,44
	10	132333,83	132333,83	0,00	0,00	4,80
	11	132739,96	132739,96	0,00	0,00	5,26
	13	147075,38	148069,99	229,62	0,01	6,41
	15	147539,38	148304,92	473,28	0,01	8,68
	16	158853,36	158853,36	0,00	0,04	7,92
	18	159646,63	167411,31	1471,75	0,07	10,40
20	157770,44	159031,79	611,56	0,02	12,61	
75 кола	3	129360,73	129541,57	1617,48	0,00	4,37
	4	147752,29	147809,58	251,79	0,00	5,43
	5	162135,57	164145,77	871,26	0,02	6,01
	6	171387,11	174501,80	5491,31	0,00	8,45
	8	191143,58	191143,58	0,00	0,00	8,67
	10	206703,88	206703,88	0,00	0,00	10,81
	11	214014,67	215020,98	2287,82	0,00	15,78
	13	220166,95	221659,03	909,40	0,01	19,83
	15	231520,68	231520,68	0,00	0,00	16,54
	16	249562,32	251168,51	1102,02	0,02	22,00
	18	258444,66	260003,84	239,78	0,07	20,21
20	253969,77	253969,77	0,00	0,00	22,42	
100 кола	3	177133,50	177133,50	0,00	0,00	6,34
	4	207283,90	212911,90	10989,43	0,00	9,81
	5	230024,68	230814,50	3489,24	0,00	14,12
	6	257669,14	258351,20	759,38	0,03	15,90
	8	281870,81	287873,61	7326,89	0,01	22,13
	10	303523,85	310080,57	6609,62	0,03	26,66
	11	302611,26	306533,92	4623,19	0,01	31,51
	13	330678,63	330871,71	272,22	0,02	31,35
	15	338708,77	342705,78	1145,32	0,02	35,82
	16	350640,42	351458,73	2121,53	0,00	41,36
	18	348021,16	365358,82	9064,82	0,02	49,97
20	373115,67	377474,74	2296,60	0,05	43,56	

125 кола	3	263845,03	264182,20	467,67	0,00	12,25
	4	269838,79	269909,04	307,78	0,00	15,07
	5	303238,46	311807,10	12922,00	0,00	21,90
	6	332609,08	347301,47	8773,51	0,03	22,32
	8	380072,16	389309,18	9690,69	0,01	31,32
	10	431973,65	431973,65	0,00	0,07	30,65
	11	426793,40	439169,91	4773,46	0,05	46,17
	13	435435,10	441152,60	6416,92	-0,01	56,96
	15	450161,00	451899,38	3491,66	-0,03	77,99
	16	460981,20	464910,04	6040,01	-0,05	77,21
	18	482449,82	482663,82	918,52	0,01	73,27
	20	470646,82	486991,60	3512,50	0,01	84,47
150 кола	3	373601,70	374067,93	2456,18	0,07	19,79
	4	342282,04	342359,89	341,07	0,00	20,56
	5	384547,56	388188,75	8911,71	0,00	29,16
	6	425979,77	444226,78	19742,00	0,00	43,17
	8	479483,72	490325,74	4821,74	0,03	55,66
	10	525800,05	543882,47	8140,82	0,04	78,43
	11	539428,64	543361,88	4443,51	0,01	74,39
	13	551019,40	556889,18	1971,98	0,00	72,72
	15	591502,57	605417,71	10347,56	-0,01	109,58
	16	593764,12	599784,71	6878,20	0,00	108,93
	18	613765,03	625284,49	10400,20	0,01	131,12
	20	638584,23	650429,76	6534,76	-0,01	144,16
175 кола	3	454502,80	454502,80	0,00	0,01	20,98
	4	466270,46	466316,15	193,60	0,00	30,32
	5	478016,87	478353,97	550,87	0,00	43,80
	6	510530,71	519218,06	18505,39	0,00	52,19
	8	582815,45	605987,55	12241,47	0,03	152,37
	10	642047,00	651358,06	10277,24	-0,01	113,09
	11	675117,78	681895,19	6449,47	0,01	118,83
	13	702698,71	711841,64	5049,65	-0,03	130,60
	15	733714,45	746068,72	13800,96	-0,05	173,11
	16	753061,69	769334,05	10122,49	0,02	173,11
	18	778199,16	792879,22	7742,32	0,00	192,07
	20	807315,13	820004,58	3890,05	0,02	193,53
200 кола	3	555772,25	555821,90	241,81	0,02	36,40
	4	605174,33	605250,29	240,60	0,01	50,50
	5	567656,71	567656,70	0,00	0,00	47,05
	6	613357,17	613889,49	1124,04	-0,06	70,28
	8	700633,30	723919,03	30429,17	0,01	121,64
	10	770512,23	790693,81	5496,15	0,05	125,49
	11	818033,15	822936,77	3728,01	0,00	150,73
	13	845525,68	854171,52	12383,77	-0,03	178,47
	15	895859,28	909879,88	7627,90	-0,03	201,53
	16	940687,53	940687,53	0,00	-0,01	160,29
	18	939904,44	948607,25	3102,80	-0,04	244,08
	20	939892,01	956316,53	8127,02	0,00	370,14

Табела П9 Резултати добијени применом VND методе

колски ток	макс. број унутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	-	80347,14	-	0,00	0,23
	4	-	94936,31	-	0,00	0,52
	5	-	104451,73	-	0,00	0,55
	6	-	109718,39	-	0,00	0,48
	8	-	128157,63	-	0,02	0,86
	10	-	132333,83	-	0,00	0,86
	11	-	132739,96	-	0,00	0,94
	13	-	148122,34	-	0,01	1,50
	15	-	147539,38	-	0,00	2,37
	16	-	153003,48	-	0,00	5,54
	18	-	166000,92	-	0,05	4,23
20	-	156790,90	-	0,01	5,10	
75 кола	3	-	129360,73	-	0,00	1,36
	4	-	147752,29	-	0,00	2,04
	5	-	162957,82	-	0,01	1,17
	6	-	171387,11	-	0,00	2,67
	8	-	191143,58	-	0,00	1,81
	10	-	206703,88	-	0,00	1,76
	11	-	214586,76	-	0,00	4,68
	13	-	221405,37	-	0,01	4,70
	15	-	231520,68	-	0,00	3,31
	16	-	247696,05	-	0,01	10,76
	18	-	258471,99	-	0,07	8,85
20	-	253969,77	-	0,00	6,02	
100 кола	3	-	177133,50	-	0,00	1,97
	4	-	207283,90	-	0,00	3,49
	5	-	230024,68	-	0,00	7,96
	6	-	259385,41	-	0,03	4,02
	8	-	281870,81	-	0,00	20,92
	10	-	314512,24	-	0,04	10,83
	11	-	318241,37	-	0,05	8,30
	13	-	330678,63	-	0,02	7,60
	15	-	343029,86	-	0,02	6,91
	16	-	350640,42	-	0,00	13,35
	18	-	370898,08	-	0,04	25,12
20	-	378782,24	-	0,05	10,48	

125 кола	3	-	263845,03	-	0,00	14,41
	4	-	269838,79	-	0,00	6,91
	5	-	303238,46	-	0,00	20,03
	6	-	334167,73	-	0,00	13,85
	8	-	403097,74	-	0,06	7,94
	10	-	431973,65	-	0,07	7,94
	11	-	420885,38	-	0,00	29,69
	13	-	456510,08	-	0,03	17,53
	15	-	459558,11	-	-0,01	40,01
	16	-	479014,29	-	-0,02	31,67
	18	-	482449,82	-	0,01	23,26
	20	-	487319,28	-	0,01	21,18
150 кола	3	-	373601,70	-	0,07	19,03
	4	-	342282,04	-	0,00	10,05
	5	-	384547,56	-	0,00	15,94
	6	-	425979,77	-	0,00	36,74
	8	-	493341,42	-	0,03	51,54
	10	-	568562,39	-	0,09	25,76
	11	-	550105,65	-	0,02	65,46
	13	-	557505,47	-	0,00	41,04
	15	-	592646,75	-	-0,02	139,61
	16	-	593764,12	-	-0,01	83,83
	18	-	641746,62	-	0,04	76,83
	20	-	655992,76	-	0,00	51,51
175 кола	3	-	454502,80	-	0,01	21,98
	4	-	466270,46	-	0,00	24,04
	5	-	478016,87	-	0,00	72,21
	6	-	510530,71	-	0,00	54,02
	8	-	590452,36	-	0,01	271,36
	10	-	642047,00	-	-0,02	880,56
	11	-	691577,02	-	0,02	146,87
	13	-	719589,07	-	-0,01	131,70
	15	-	779220,76	-	0,00	178,13
	16	-	782450,73	-	0,04	150,76
	18	-	785960,78	-	-0,01	1436,72
	20	-	822619,14	-	0,02	134,61
200 кола	3	-	555772,25	-	0,02	57,53
	4	-	605174,33	-	0,01	62,06
	5	-	567656,71	-	0,00	29,87
	6	-	613357,17	-	-0,06	59,23
	8	-	700633,30	-	0,00	197,67
	10	-	789872,26	-	0,05	291,02
	11	-	830947,74	-	0,02	386,97
	13	-	844890,36	-	-0,04	199,59
	15	-	904721,54	-	-0,03	1049,07
	16	-	940687,53	-	-0,01	105,64
	18	-	948955,25	-	-0,04	181,09
	20	-	937644,22	-	-0,02	976,39

Табела П10 Резултати добијени применом RVND методе

колски ток	макс. број унутних станица	мин. вредност функције циља	просечна вредност функције циља	ст. одс. вредности функције циља	рел. грешка прос. вредности функције циља	време извршавања програма
50 кола	3	491650,65	492531,02	762,15	0,03	491650,65
	4	536607,96	566638,15	7510,27	0,09	536607,96
	5	539428,64	545198,90	4053,06	0,02	539428,64
	6	557505,47	557539,79	196,17	0,00	557505,47
	8	592646,75	598391,54	3586,21	-0,01	592646,75
	10	593764,12	597168,62	3583,79	-0,01	593764,12
	11	614337,12	638148,77	10724,51	0,04	614337,12
	13	641581,00	654056,92	3111,75	-0,01	641581,00
	15	454502,80	454542,60	195,94	0,01	454502,80
	16	466270,46	466848,27	724,99	0,00	466270,46
	18	478016,87	478490,16	730,87	0,00	478016,87
20	510530,71	512669,92	2079,43	0,00	510530,71	
75 кола	3	590452,36	594829,79	7331,05	0,01	590452,36
	4	642047,00	648491,70	6425,77	-0,01	642047,00
	5	675117,78	688902,57	5873,50	0,02	675117,78
	6	707279,34	720132,12	3390,75	-0,01	707279,34
	8	733714,45	760532,84	20188,19	0,00	733714,45
	10	780474,97	782063,95	1263,06	0,04	780474,97
	11	782528,24	787545,01	4431,85	-0,01	782528,24
	13	817232,16	820719,48	1544,83	0,02	817232,16
	15	555772,25	556274,55	693,39	0,02	555772,25
	16	605174,33	606877,78	2404,81	0,01	605174,33
	18	567656,71	567950,37	755,68	0,00	567656,71
20	613357,17	613837,97	1015,08	-0,06	613357,17	
100 кола	3	700633,30	701396,33	1292,37	0,00	700633,30
	4	789872,26	790075,70	954,88	0,05	789872,26
	5	822272,97	832124,56	5991,69	0,02	822272,97
	6	844890,36	846603,09	4967,48	-0,04	844890,36
	8	898220,44	906800,32	2767,31	-0,03	898220,44
	10	940687,53	940687,53	0,00	-0,01	940687,53
	11	948955,25	949237,78	874,15	-0,04	948955,25
	13	937644,22	946244,32	4476,01	-0,01	937644,22
	15	80347,14	80347,13	0,00	0,00	80347,14
	16	94936,31	94936,30	0,00	0,00	94936,31
	18	104451,73	104451,73	0,00	0,00	104451,73
20	109718,39	109718,39	0,00	0,00	109718,39	

125 кола	3	128157,63	128157,63	0,00	0,02	128157,63
	4	132333,83	132333,83	0,00	0,00	132333,83
	5	132739,96	132739,96	0,00	0,00	132739,96
	6	148122,34	148122,34	0,00	0,01	148122,34
	8	147539,38	147978,32	489,78	0,00	147539,38
	10	153003,48	153214,51	1039,01	0,00	153003,48
	11	166000,92	167737,76	760,42	0,07	166000,92
	13	156790,90	157852,60	1025,19	0,02	156790,90
	15	129360,73	129360,73	0,00	0,00	129360,73
	16	147752,29	148175,53	616,18	0,00	147752,29
	18	162957,82	163174,67	491,46	0,01	162957,82
20	171387,11	171445,47	255,67	0,00	171387,11	
150 кола	3	191143,58	191143,58	0,00	0,00	191143,58
	4	206703,88	206703,88	0,00	0,00	206703,88
	5	214014,67	214456,01	338,55	0,00	214014,67
	6	221405,37	222705,99	2120,13	0,01	221405,37
	8	231520,68	231520,68	0,00	0,00	231520,68
	10	247696,05	249381,90	1501,88	0,02	247696,05
	11	258471,99	259292,42	792,21	0,07	258471,99
	13	253969,77	253969,77	0,00	0,00	253969,77
	15	177133,50	177250,29	352,15	0,00	177133,50
	16	207283,90	207505,01	572,73	0,00	207283,90
	18	230024,68	230594,92	1209,16	0,00	230024,68
20	257669,14	259322,37	1203,20	0,03	257669,14	
175 кола	3	281870,81	284463,51	2858,59	0,01	281870,81
	4	314512,24	316119,08	3307,15	0,04	314512,24
	5	302611,26	317886,87	4098,97	0,05	302611,26
	6	330678,63	331096,25	380,13	0,02	330678,63
	8	343029,86	343064,19	291,14	0,02	343029,86
	10	350640,42	350842,09	730,80	0,00	350640,42
	11	353255,93	372237,16	6759,52	0,05	353255,93
	13	378782,24	378782,24	0,00	0,05	378782,24
	15	263845,03	264483,10	919,11	0,00	263845,03
	16	269838,79	270420,60	1171,63	0,00	269838,79
	18	303238,46	303512,80	374,45	0,00	303238,46
20	334167,73	338023,96	4524,47	0,00	334167,73	
200 кола	3	403097,74	403097,74	0,00	0,06	403097,74
	4	431973,65	431973,65	0,00	0,07	431973,65
	5	420885,38	420901,42	160,39	0,00	420885,38
	6	435435,10	450797,31	7521,30	0,02	435435,10
	8	450161,00	463854,13	12901,73	-0,01	450161,00
	10	460981,20	474416,88	7929,00	-0,02	460981,20
	11	482449,82	482762,94	690,72	0,01	482449,82
	13	483886,74	488128,37	1642,55	0,01	483886,74
	15	373601,70	375544,51	2560,72	0,07	373601,70
	16	342282,04	342718,03	1063,23	0,00	342282,04
	18	384547,56	385524,93	1754,08	0,00	384547,56
20	425979,77	426514,46	576,28	0,00	425979,77	

Табела III Резултати у форми показатеља ангажованих колосечних капацитета и квалитета рада станице

колски ток	макс. број упутних станица	Егзактна метода (CPLEX BIP Solver)					GVNS метода					Троугаона метода				
		потребан број колосека	макс. дужина колосека [m]	прос. одст. колосека од макс. дужине [m]	време формирања [min]	број померања кола у току сортирања	потребан број колосека	макс. дужина колосека [m]	прос. одст. колосека од макс. дужине [m]	време формирања [min]	број померања кола у току сортирања	потребан број колосека	макс. дужина колосека [m]	прос. одст. колосека од макс. дужине [m]	време формирања [min]	број померања кола у току сортирања
50 кола	3	2	640	23	68	61	2	640	23	68	61	2	640	23	68	61
	4	3	400	0	90	60	3	400	0	90	60	3	400	0	90	60
	5	3	520	50	96	68	3	520	50	96	68	3	660	150	97	69
	6	3	560	60	100	72	3	560	60	100	72	3	560	60	100	72
	8	4	460	71	122	73	4	475	74	124	75	4	480	75	124	76
	10	4	460	49	127	79	4	460	49	127	79	4	460	49	127	79
	11	4	460	49	128	79	4	460	49	128	79	5	460	93	147	79
	13	5	380	45	148	80	5	380	42	149	81	5	380	42	149	81
	15	5	420	75	149	80	5	420	74	149	80	5	420	75	149	80
	16	5	460	90	153	85	5	460	90	153	85	6	340	60	167	78
	18	5	420	48	156	89	6	359	53	173	86	6	400	83	173	87
20	5	400	39	155	87	5	408	72	161	84	6	400	93	171	83	
75 кола	3	3	640	80	93	75	3	640	80	93	75	3	860	140	106	101
	4	4	400	19	117	75	4	400	19	117	75	3	800	125	109	95
	5	4	500	56	125	85	3	729	51	115	98	4	860	274	133	99
	6	4	580	94	131	91	4	558	77	131	91	4	860	240	141	108
	8	4	600	53	142	104	4	600	53	142	104	4	600	60	142	104
	10	4	700	90	151	116	4	700	90	151	116	4	700	90	151	116
	11	5	500	51	166	108	5	514	59	166	108	5	660	144	172	117
	13	5	560	84	170	112	5	535	61	170	113	5	640	132	172	116
	15	5	580	69	175	119	5	580	69	175	119	5	580	78	175	119
	16	5	640	84	184	132	5	574	73	190	127	6	540	98	197	123
	18	5	620	81	182	128	5	602	74	196	134	6	500	58	200	127
20	6	440	23	198	123	6	500	65	199	124	6	500	65	199	124	
100 кола	3	3	780	80	105	100	3	780	80	105	100	4	860	146	140	133
	4	4	660	105	130	100	4	660	105	130	100	5	860	279	161	122
	5	5	460	45	153	100	5	460	45	153	100	4	860	124	156	139
	6	5	520	51	163	113	5	627	64	160	121	6	860	280	202	146
	8	5	680	114	178	132	5	657	92	179	133	5	860	192	190	151
	10	5	700	90	189	145	5	695	77	192	148	5	860	153	201	164
	11	5	700	93	189	143	5	736	74	192	149	5	760	105	196	155
	13	5	680	39	199	157	5	711	40	201	160	5	800	120	201	160
	15	6	640	105	215	150	5	760	63	208	169	5	860	138	208	169
	16	6	640	72	221	158	6	640	72	221	158	6	780	143	227	167
	18	7	540	84	235	150	6	673	61	230	170	6	760	133	233	175
20	7	580	109	237	152	6	779	117	232	172	6	780	155	232	172	

125 кола	3	4	780	75	137	126	4	782	75	137	126	4	860	26	156	165
	4	4	720	71	144	125	4	720	71	144	125	5	860	192	177	151
	5	5	600	69	168	126	5	601	70	168	126	5	860	123	196	174
	6	6	540	85	190	126	4	843	54	173	156	6	860	193	223	181
	8	7	480	64	220	137	5	789	91	203	169	6	860	168	234	191
	10	6	620	53	221	165	6	644	43	221	169	8	860	266	283	202
	11	5	840	63	219	189	5	860	78	219	189	9	860	320	299	195
	13	6	720	78	237	185	6	750	62	237	186	7	860	216	266	200
	15	7	660	103	256	183	6	737	59	243	192	6	860	123	254	209
	16	8	520	47	275	182	6	765	66	251	203	8	860	244	296	214
	18	7	660	88	262	190	6	760	52	255	207	7	860	191	277	212
20	6	740	42	254	205	6	809	72	255	207	7	860	204	274	206	
150 кола	3	4	860	15	157	168	5	860	82	169	153	6	860	155	209	196
	4	4	840	68	157	150	4	840	68	157	150	5	860	93	195	184
	5	5	720	69	182	150	5	720	69	182	150	6	860	145	230	200
	6	6	720	117	204	150	6	720	117	204	150	7	860	161	269	226
	8	8	500	94	247	150	6	771	105	232	185	7	860	150	279	231
	10	7	640	77	254	187	7	742	114	256	193	8	860	180	313	248
	11	6	800	72	251	210	6	828	83	253	213	9	860	258	323	232
	13	7	700	88	269	204	6	840	78	257	216	8	860	219	303	227
	15	7	800	101	284	225	7	823	113	279	218	9	860	232	338	248
	16	8	600	60	292	208	7	731	68	282	221	8	860	197	313	239
	18	7	820	107	289	229	7	832	91	295	239	9	860	222	344	254
20	9	640	108	324	223	7	837	81	302	248	9	860	207	351	263	
175 кола	3	5	840	66	186	188	5	860	45	186	187	6	860	70	225	230
	4	5	860	69	192	178	5	860	68	192	178	7	860	171	253	221
	5	5	860	87	198	178	5	860	87	198	178	7	860	96	281	256
	6	6	720	95	219	175	6	720	95	219	175	7	860	75	293	266
	8	8	580	99	263	175	6	795	71	247	210	7	860	81	299	263
	10	8	660	105	287	208	7	735	81	275	219	8	860	128	331	276
	11	7	740	58	285	232	7	823	96	288	236	9	860	182	353	278
	13	11	500	110	338	194	7	832	74	299	250	10	860	216	380	286
	15	11	560	116	353	214	8	784	91	319	250	10	860	212	384	289
	16	9	620	75	328	232	8	855	109	325	256	11	860	240	409	297
	18	10	560	65	351	237	8	795	83	330	261	10	860	213	386	288
20	9	740	127	347	257	8	834	84	341	277	11	860	233	415	302	
200 кола	3	6	800	100	211	200	6	860	104	211	200	7	860	79	261	264
	4	6	860	100	227	208	6	860	67	227	208	7	860	107	269	251
	5	5	860	39	212	202	5	860	39	212	202	7	860	54	292	276
	6	7	680	66	253	200	6	820	105	234	200	9	860	157	347	293
	8	8	640	90	278	200	8	640	90	278	200	9	860	143	361	301
	10	8	660	75	297	223	7	860	85	297	253	8	860	51	357	317
	11	8	780	88	312	245	7	858	63	311	271	9	860	140	369	303
	13	12	520	117	368	210	7	860	56	316	275	9	860	113	383	319
	15	11	640	128	375	247	8	854	106	343	284	10	860	150	412	330
	16	11	620	112	381	254	8	860	56	350	294	11	860	203	428	324
	18	12	520	70	402	256	8	860	69	355	299	11	860	194	434	331
20	9	740	78	366	286	9	757	91	363	281	11	860	188	438	335	

Биографски подаци о кандидату

Иван Белошевић рођен је 02.02.1984. године у Чачку где је завршио основну школу и гимназију са одличним успехом. Саобраћајни факултет Универзитета у Београду уписао је 2003. год. и у току студија био је стипендиста Владе Републике Србије. Дипломирао је 2008. год. са просечном оценом 8,85. Дипломски рад са темом "Концепт решења Београдског железничког чвора" одбранио је са оценом 10 на Здруженој катедри за експлоатацију железница, железничке пруге, станице и чворове. Докторске академске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду уписао је 2009. год. На поменутиим студијама положио је све испите са просечном оценом 10.

Стручни испит за самостално обављање послова и задатака дипломираног инжењера саобраћаја у саобраћајно – транспортној служби на железници положио је 2010. год. Члан је међународног удружења *IAROR (International Association of Railway Operations Research)* и Друштва дипломираних инжењера железничког саобраћаја.

У периоду 22.12.2008. – 05.03.2010. год. радио је као сарадник у настави за ужу научну област "Планирање, пројектовање и одржавање железничке инфраструктуре" на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду. Тренутно је у звању асистента за поменуту ужу научну област на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду. Досадашњи педагошки рад Ивана Белошевића високо је оцењен од стране предметног наставника и студената. Активно учествује у истраживању и публикавању радова у научним часописима и на научним скуповима домаћег и међународног значаја. Један је од аутора на 30 радова публикованих у међународним и домаћим часописима као и у зборницима радова међународних и домаћих скупова. Као члан ауторског тима учествовао је у изради четири научно-истраживачке и стручне студије.

Прилог 1.

1 Изјава о ауторству

Потписан Иван Белошевић

Број уписа Д-2-07/08

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА
СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У
ТЕХНИЧКИМ ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта

У Београду, 09.07.2014. год.

И. Белошевић

Прилог 2.

2 Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Иван Белошевић

Број уписа Д-2-07/08

Студијски програм Саобраћај

Наслов рада ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА
СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У
ТЕХНИЧКИМ ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА

Ментор Проф. др Милош Ивић

Потписан Иван Белошевић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанта

У Београду, 09.07.2014. год.

И. Белошевић

Прилог 3.

3 Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ОПТИМИЗАЦИЈА КОЛОСЕЧНИХ КАПАЦИТЕТА ЗА
СИМУЛТАНО ФОРМИРАЊЕ ВИШЕГРУПНИХ ВОЗОВА У
ТЕХНИЧКИМ ТЕРЕТНИМ СТАНИЦАМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта

У Београду, 09.07.2014. год.

И. Белошевић