

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

VYTAUTAS JANILIONIS

LOGISTIKOS CENTRO CILINDRINIŲ  
AUTOMATIZUOTŲ TRANSPORTAVIMO  
SISTEMŲ KŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija  
Technologijos mokslai, transporto inžinerija (03T)

2015, Kaunas

Darbas parengtas 2009–2014 m. Kauno technologijos universitete, transporto inžinerijos katedroje.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. dr. Žilvinas Bazaras (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

© V. Janilionis,  
2015

## Turinys

|  |     |
|--|-----|
| Žymėjimai.....   | 5   |
| Įvadas.....  | 8   |
| 1. Logistikos centro sistemų problematika ir analizė .....   | 11  |
| 1.1. Logistikos centro svarba ir aktualumas .....  | 11  |
| 1.2. Pagrindiniai logistikos centro sandėlio procesai.....   | 15  |
| 1.3. Logistikos centro sandėlio sistemų projektavimas ir efektyvumo vertinimas.....  | 19  |
| 1.4. Užsakymų surinkimo proceso tobulinimas.....   | 26  |
| 1.5. Pirmojo skyriaus išvados .....  | 39  |
| 2. AS/RS projektavimo, integravimo ir tyrimų metodikos.....  | 41  |
| 2.1. AS/RS struktūros ir valdymo projektavimas .....   | 41  |
| 2.2. AS/RS integravimas į automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą ....  | 46  |
| 2.3. AS/RS efektyvumo rodiklių tyrimų ir analizės modeliai.....  | 51  |
| 2.4. Antrojo skyriaus išvados .....  | 64  |
| 3. Cilindrinės AS/RS koncepcija ir modelis.....  | 65  |
| 3.1. Struktūros ir integravimo parametrų nustatymas.....   | 65  |
| 3.2. Valdymo algoritmų sudarymas.....  | 73  |
| 3.3. Imitacinių tyrimo modelių sudarymas .....   | 82  |
| 3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....   | 87  |
| 4. Cilindrinės AS/RS efektyvumo rodiklių analizė .....   | 88  |
| 4.1. Cilindrinės AS/RS struktūros ir SRM judėjimo parametrų įtakos sistemos pralaidumui tyrimas.....                           | 88  |
| 4.1.1 Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo įtakos maksimaliam cilindrinės AS/RS pralaidumui tyrimas .....             | 89  |
| 4.1.2 SRM keltuvų skaičiaus įtakos maksimaliam cilindrinės AS/RS pralaidumui tyrimas .....                                     | 96  |
| 4.1.3 $SRM_1$ ir $SRM_2$ maksimalių pralaidumų palyginimas.....  | 100 |
| 4.1.4 Cilindrinės AS/RS apkrautumo įvertinimas pagal transportuojamų krovinių srauto intensyvumą ir maksimalų pralaidumą ..... | 103 |
| 4.2. Krovinių transportavimo maršrutų sudarymo algoritmų lyginamoji analizė .....  | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3. Standartinės ir integruotos su cilindrine AS/RS užsakymų surinkimo sistemų palyginimas ..... | 112 |
| 4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados.....   | 118 |
| Darbo išvados .....   | 120 |
| Literatūros sąrašas .....   | 121 |
| Mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas.....  | 130 |
| Priedai.....  | 132 |

## ŽYMĖJIMAI

### Simboliai

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\tau$                | trukmė (bendruoju atveju)  |
| $t$                   | laiko momentas (bendruoju atveju)  |
| $d$                   | nuvažiuotas atstumas (bendruoju atveju)  |
| $SRM_i$               | sandėliavimo ir rinkimo mechanizmo (SRM) tipas                                   |
| $G_i$                 | SRM greitaveika  |
| $N_C$                 | krovinių sandėliavimo vietų skaičius viename C-AS/RS                             |
| $N_L$                 | C-AS/RS stelažų aukštų skaičius  |
| $L_{av}$              | krovinių atvežimo aukštas  |
| $L_{iv}$              | krovinių išvežimo aukštas  |
| $L_{ai}$              | krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija                                  |
| $N_{kelt}$            | SRM keltuvų skaičius   |
| $N_{av}$              | krovinių atvežimo vietų skaičius   |
| $N_{iv}$              | krovinių išvežimo vietų skaičius   |
| $N_{ai}$              | krovinių atvežimo / išvežimo vietų skaičius                                      |
| $a_{vert}$            | keltuvo vertikalios judėjimo pagreitis   |
| $v_{vert}$            | keltuvo vertikalios judėjimo greitis   |
| $a_{suk}$             | SRM sukimosi pagreitis   |
| $v_{suk}$             | SRM sukimosi greitis   |
| $\tau_{pp}$           | krovinių paėmimo / padėjimo trukmė   |
| $A_i$                 | krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas                             |
| $T_{vert}$            | SRM judėjimo vertikaliai santykinė trukmė  |
| $T_{suk}$             | SRM sukimosi santykinė trukmė  |
| $T_{pp}$              | SRM krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinė trukmė                         |
| $T_{prast}$           | SRM prastovos santykinė trukmė   |
| $T_{vert\ pp}$        | SRM judėjimo vertikaliai ir krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinė trukmė |
| $T_{vert\ suk}$       | SRM judėjimo vertikaliai ir sukimosi santykinė trukmė                            |
| $U_{CASRS}$           | C-AS/RS apkrautumas  |
| $\hat{\lambda}$       | sistemos pralaidumas arba aptarnautų krovinių srauto intensyvumas                |
| $\hat{\lambda}$       | sistemos pralaidumo vidurkis   |
| $\lambda_{max}$       | maksimalus sistemos pralaidumas  |
| $\Delta\lambda_{max}$ | maksimalių pralaidumų skirtumas arba santykinis skirtumas                        |

|  |   |
|--|---|
| $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_1-SRM_2}$      | maksimalių pralaidumų skirtumas arba santykinis skirtumas tarp $SRM_1$ ir $SRM_2$                         |
| $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_i}$ | maksimalių pralaidumų skirtumas arba santykinis skirtumas tarp $SRM_1$ ir $SRM_2$ valdomų algoritmu $A_i$ |
| $\eta$   | maksimalaus pralaidumo dalis  |
| $D_{SRM}$                                      | galimų SRM posūkio kampų aibė   |
| $N_D$  | posūkio kampų aibės dydis   |
| $r_k$  | posūkio kampas  |
| $D_{oper}$                                     | SRM posūkių kortežas  |
| $H_{oper}$                                     | aktyvių keltuvų kortežas posūkiuose   |
| $S_{oper}^*$                                   | keltuvų paskyrimo vietų kortežas posūkiuose   |
| $oper$   | SRM operacijos tipas  |
| $W_k$  | SRM operacijos dalies kortežas  |
| $USS_1$  | standartinė „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistema  |
| $USS_1^*$                                      | standartinė „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistema be rūšiavimo apribojimų ir „siaurų vietų“      |
| $USS_2$  | integruota „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistema su C-AS/RS                                      |
| $N_{sk}^{USS_1}$                               | standartinės užsakymų surinkimo sistemos stotelių skaičius  |
| $N_{sk}^{USS_2}$                               | integruotos užsakymų surinkimo sistemos stotelių skaičius   |
| $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2}$                  | užsakymų stotelių skaičiaus skirtumas tarp užsakymų surinkimo sistemų $USS_1$ ir $USS_2$                  |
| $N_{ASRS}$                                     | AS/RS stelažų eilių skaičius  |
| $\Delta \mathcal{L}^{USS_1-USS_1^*}$           | santykinis pralaidumo skirtumas tarp užsakymų surinkimo sistemų $USS_1$ ir $USS_1^*$                      |
| $\Delta \mathcal{L}^{USS_2-USS_1}$             | santykinis pralaidumo skirtumas tarp užsakymų surinkimo sistemų $USS_2$ ir $USS_1$                        |
| $R^2$  | determinacijos (apibrėžtumo) koeficientas   |
| $R_{kor}^2$                                    | koreguotas determinacijos koeficientas  |

## **Santrumpos**

AS/RS – automatizuota sandėliavimo ir rinkimo sistema (angl. *automated storage and retrieval system*)

C-AS/RS – cilindrinė automatizuota sandėliavimo ir rinkimo sistema (angl. *cylindrical automated storage and retrieval system*)

SRM – krovinių sandėliavimo ir rinkimo mechanizmas (angl. *storage and retrieval mechanism*)

SVS – sandėlio valdymo sistema (angl. WMS – *warehouse management system*)

PV – programuojamas valdiklis (angl. PLC – *programmable logic controller*)

VVS – verslo valdymo sistema (angl. ERP – *enterprise resource planning system*)

TVS – transporto valdymo sistema (angl. TMS – *transport management system*)

## **Apibrėžimai**

Užsakymų surinkimo sistema „Žmogus–Produkcija“ – neautomatizuota surinkimo sistema, kurioje kiekvienas sandėlio operatorius keliauja tarp sandėliavimo vietų, surenka produktus ir juos vežimėliu transportuoja į nustatytą vietą (angl. *Person To Goods manual order picking system*).

Užsakymų surinkimo sistema „Produkcija–Žmogus“ – automatizuota sistema, kurioje produktai automatiškai transportuojami iš sandėliavimo vietų į užsakymų surinkimo vietą panaudojant automatizuotas krovinių transportavimo sistemas (angl. *Goods To Person automated order picking system*).

Kroviny – tara su kroviniu (pvz., medinis padėklas arba kartoninė dėžė su produktais).

Kortežas – tam tikros aibės elementų baigtinė seka, kurioje elementai gali kartotis.

## IVADAS

Šiuolaikiniuose logistikos centruose pastebimai didėja kokybiniai ir kiekybiniai krovinių srauto aptarnavimo reikalavimai. Juos lemia augantys elektroninės prekybos mastai ir vartojimo poreikiai, nuolat susiduriama su logistikos procesų tobulinimo ir efektyvumo didinimo problemomis. Elektroninės prekybos teikiama privalumai leidžia geriau patenkinti individualių klientų poreikius, tačiau labai padidina logistikos centro operacijų sudėtingumą, sandėliuojamos produkcijos kiekį, asortimentą, surenkamų užsakymų skaičių, sumažina vidutinį surenkamo užsakymo dydį ir sukuria įvairių papildomų operacijų. Besikeičiantys reikalavimai veikia visus sandėlio procesus, tačiau labiausiai užsakymų surinkimą, kuris yra sudėtingiausias ir svarbiausias procesas efektyvinimo prasme ir sudaro 55 % valdymo kaštų. Vykdamas įvairius užsakymų surinkimo sistemų tyrimus ieškoma efektyvumo didinimo galimybių ir nustatyta, kad automatizuotos krovinių transportavimo sistemos leidžia reikšmingai padidinti logistikos procesų efektyvumą. Jos dar nelabai paplitusios Lietuvoje, tačiau labai plačiai naudojamos vakarų Europos ir Skandinavijos valstybėse, Japonijos bei Amerikos logistikos centruose, nes suteikia galimybę pakeisti produktų krovinių transportavimo principą sandėlyje. Jos sukuria „Produkcija–Žmogus“ tipo sistemas, kuriose produktų kroviniai iš sandėliavimo vietų yra automatiškai transportuojami į fiksuotas užsakymų surinkimo vietas ir rūšiuojami pagal įvairius kriterijus. Tokiu būdu pastebimai padidinamas proceso efektyvumas – minimizuojamas transportavimo ir produktų išrinkimo laikas, kuris dabar sudaro net 85 % viso užsakymų surinkimo proceso laiko klasikiniuose neautomatizuotose sistemose „Žmogus–Produkcija“.

Šiuolaikiniuose logistikos centruose plačiausiai taikomos automatizuotos sandėliavimo ir rinkimo sistemos (AS/RS) užsakymų surinkimo procesams tobulinti ir efektyvumui didinti, tačiau nepaisant visų privalumų jos reikalauja sudėtingų projektavimo ir valdymo sprendimų, taip pat palyginti didelių įdiegimo ir valdymo kaštų. Esminis šių sistemų trūkumas yra nelankstumas ir dėl jo atsirandantys įvairūs neigiamos įtakos sistemos efektyvumui turintys apribojimai, kuriuos siekiama pašalinti, tobulinant sistemų struktūrą ir valdymą. Tinkamas šių sistemų parinkimas ir suderinamumas su kitomis logistikos centro sistemomis tiesiogiai priklauso nuo adekvačių tyrimų ir analizės metodų pasirinkimo. Nors dauguma tyrėjų sistemų analizei siūlo taikyti supaprastintus analitinius modelius, tačiau šiuolaikinių sudėtingos struktūros ir valdymo automatizuotų transportavimo sistemų veikimas dinaminėje aplinkoje gali būti tinkamai įvertinamas tik sudarant ir tiriant jų imitacinius modelius. Todėl labai aktualu sudaryti išsamią tyrimų metodiką, kurioje imitacinis modeliavimas yra integruojamas su pažangiais statistinės analizės metodais, o gauti rezultatai leidžia kiekybiškai su priimtinu tikslumu įvertinti projektuojamos sistemos efektyvumo priklausomybę nuo pasirinktų struktūros ir valdymo parametrų.



**Darbo tikslas** – sukurti logistikos centro cilindrinės automatizuotos krovinių transportavimo sistemos koncepciją ir valdymo algoritmus, kurie padidintų užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumą.

**Uždaviniai:**

1. Išanalizuoti logistikos centrų automatizuotas krovinių transportavimo sistemas ir nustatyti jų integravimo į užsakymų surinkimo sistemą „Produkcija–Žmogus“ trūkumus ir problemas.
2. Pasiūlyti automatizuotos krovinių transportavimo sistemos patobulinimus, kurie padidintų užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumą.
3. Sudaryti patobulintos automatizuotos krovinių transportavimo sistemos analizės modelius, suteikiančius galimybę įvertinti jos efektyvumą, ir parinkti optimalius parametrus.
4. Įvertinti patobulintos automatizuotos krovinių transportavimo sistemos efektyvumo rodiklių priklausomybę nuo struktūros ir valdymo parametrų bei jos integracijos įtaką užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumui.

**Mokslinis naujumas**

Pasiūlyta naujo tipo C-AS/RS koncepcija ir valdymo algoritmai.

Pasiūlyti C-AS/RS integravimo į užsakymo rinkimo sistemas „Produkcija–Žmogus“ principai.

Sukurtas parametrizuotas C-AS/RS imitacinis modelis, leidžiantis tirti sistemą pasirenkant struktūros ir integravimo parametrus, valdymo algoritmus ir krovinių srautų intensyvumus.

Sudaryti regresiniai modeliai C-AS/RS efektyvumo rodikliams vertinti pagal struktūros ir valdymo parametrus.

**Praktinė vertė**

Pasiūlyta C-AS/RS koncepcija, kuri padidina užsakymų rinkimo sistemų „Produkcija–Žmogus“ efektyvumą ir išplečia jos funkcines galimybes: padidėja surinktų užsakymų skaičius, pagerėja sistemos lankstumas, optimizuojami žmogaus judesiai ir sumažėja klaidų tikimybė.

Sukurtas C-AS/RS parametrizuotas imitacinis modelis integruotas su statistinės analizės metodais ir leidžia žymiai sumažinti darbo sąnaudas tiriant ir projektuojant tokio tipo sistemas.

Sudarytos regresijos lygtys leidžia įvertinti C-AS/RS efektyvumo rodiklių priklausomybę nuo struktūros parametrų, valdymo algoritmų bei krovinių srautų intensyvumo ir yra pritaikomos tokio tipo sistemoms projektuoti ir integruoti į užsakymų rinkimo sistemas „Produkcija–Žmogus“.

### **Tyrimo objektas ir metodika**

Tyrimo objektas – logistikos centrų automatizuotos krovinių transportavimo sistemos.

Tyrimų metodika pagrįsta užsienio šalių mokslininkų atliktų darbų šioje srityje analize. C-AS/RS ir jos valdymo algoritmų tyrimui taikyti imitacinio modeliavimo metodai ir *AutoMod* programa, modeliavimo rezultatų analizei ir sistemos efektyvumo rodikliams vertinti – daugiamatės regresinės ir dispersinės analizės metodai bei SAS programa.

### **Ginamieji teiginiai**

Pasiūlyta naujo tipo C-AS/RS, kuri padidina užsakymų surinkimo sistemų „Produkcija–Žmogus“ efektyvumą ir išplečia jos funkcines galimybes.

Sukurti C-AS/RS tyrimų ir analizės modeliai sudaro sąlygas atlikti išsamius sistemos tyrimus, įvertinant jos efektyvumo rodiklius esant įvairioms struktūros ir valdymo parametrų kombinacijoms ir priimti pagrįstus sprendimus apie veikimą ir integravimą įvairaus detalumo sistemų projektavimo etapuose.

Nustatyti nepriklausomai veikiančios ir integruotos C-AS/RS efektyvumą lemiantys parametrai ir jų priklausomybė, kuri leidžia atlikti kompleksinį sistemos vertinimą ir tarpusavyje palyginti skirtingas konfigūracijas.

### **Darbo aprobavimas**

Pagrindiniai darbo rezultatai yra paskelbti 10 mokslinių publikacijų, iš kurių 3 išspausdintos žurnaluose („Transport“ 2013 ir „Transport“ 2015 (ISI Master list), „Transport Problems: an International Scientific Journal“). Darbo rezultatai pristatyti 5 tarptautinėse mokslinėse konferencijose Lietuvoje („ITELMS – 2009“, „ITELMS – 2010“, „Transport Means – 2010“, „ITELMS – 2011“, „ITELMS – 2012“), 1 tarptautinėje mokslinėje konferencijoje Lenkijoje („Transport problems 2012“) ir 1 mokslinėje konferencijoje Lietuvoje („Matematika ir matematinis modeliavimas –2009“).

### **Darbo apimtis ir struktūra**

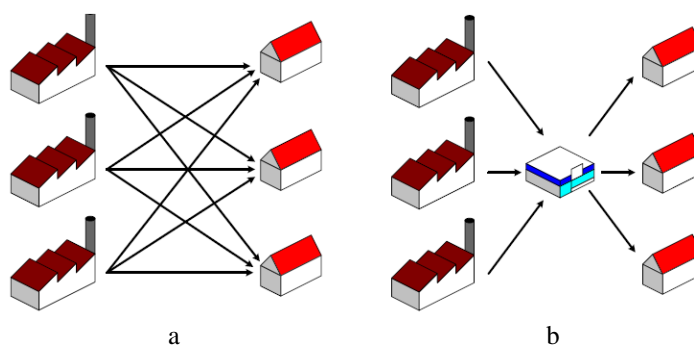
Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, priedai. Disertacijos apimtis – 142 puslapiai, iš kurių 11 puslapių sudaro priedai, tekste panaudota 19 numeruotų formulių, 59 paveikslai ir 14 lentelių. Literatūros sąrašą sudaro 125 šaltiniai.

Darbas atliktas vykdant Europos socialinio fondo projektą „Transporto statinių, transporto priemonių ir jų srautų inovatyvių tyrimo metodų ir sprendimų kūrimas bei taikymas“, projekto kodas VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-020.

# 1. LOGISTIKOS CENTRO SISTEMŲ PROBLEMATIKA IR ANALIZĖ

## 1.1. Logistikos centro svarba ir aktualumas

Logistikos centro sąvoka nėra vienareikšmė, todėl autoriai apibrėžia ją skirtingai, priklausomai nuo paskirties ir tyrimų krypties. Šiame darbe logistikos centras yra suprantamas kaip iš vieno ar kelių sandėlių susidedantis multimodalinis terminalas, kurio veikla yra susijusi su krovinių transportavimu, aptarnavimu, rūšiavimu ir sandėliavimu. Tai svarbi šiuolaikinės tiekimo grandinės dalis, nuo kurios tiesiogiai priklauso įmonės veiklos sėkmė [1]. Dauguma įmonių ieško galimybių tiekti savo produkciją klientams tiesiogiai, tačiau dažnai neįmanoma efektyviai suderinti produkcijos gamybos ir užsakymų įvykdymo terminų, todėl užsakymai dažniausiai yra vykdomi panaudojant sandėliuojamas produkcijos atsargas (1.1 pav.).



**1.1 pav.** Pagamintos produkcijos tiekimo klientams būdai: a – tiesioginis; b – iš sandėliuojamųjų atsargų [76]

Sandėliavimo procesas sukuria esminę jungtį tarp produktų gamybos ir jų tiekimo klientams, t. y. užsakymų vykdymo. Logistikos centro sandėlyje laikinai kaupiamos produkcijos atsargos ir užtikrinamas reikalingas produkcijos kiekis visoje tiekimo grandinėje. Tipinis produkcijos paskirstymo planavimas yra apibrėžiamas į sandėlį atvežamos iš tiekėjų ir išvežamos klientams produkcijos kiekiu bei srautų tvarkaraščiais, tuo pačiu metu suderinant ir produkcijos atsargų likučius sandėliuose, kad būtų išvengta srautų netolygumo. Vis dėlto šiuolaikiniai procesai reikalauja didesnių planavimo galimybių, kad būtų tiksliau įvertintas kiekvieno sandėlio efektyvumas pagal darbo resursų sąnaudas įvairiais laiko periodais, krovinių apdorojimo technologijas ir sandėlio išplanavimą. Akivaizdu, kad kiekvieno sandėlio efektyvumas tiesiogiai lemia visos įmonės tiekimo grandinės efektyvumą. Nesuderintas sandėlio operatorių apkrautumas gali turėti neigiamų pasekmių įmonės veiklai, nes esant dideliems apkrautumo svyravimams operatoriams teks arba dirbti viršvalandžius, arba jiems trūks darbo. Tokie netolygumai turi neigiamos įtakos ir sandėlio įrenginiams, nes dirbant maksimaliu režimu padidėja gedimo tikimybė [1].

Viena iš svarbių tiekimo grandinės savybių yra jos lankstumas, t. y. gebėjimas prisitaikyti prie pasikeitusių klientų reikalavimų, kurie paprastai vertinami dviem pagrindiniais aspektais – užsakymo dydžiu ir įvykdymo laiku. Priklausomai nuo šių parametrų reikšmingumo ir sąveikos, reikia pasirinkti skirtingas tiekimo grandinės valdymo strategijas tam, kad būtų užtikrintas nepertraukiamas įsipareigojimų klientams vykdymas [2]. Dabartinės rinkos tendencijos reikalauja, kad tiekimo grandinės būtų ypač lanksčios ir gebėtų greitai prisitaikyti prie pasikeitusių sąlygų. Todėl sandėliams keliamas reikalavimas aptarnauti įvairaus dydžio užsakymus, juos įvykdyti tą pačią arba ateinančią dieną bei garantuoti užsakymų surinkimo tikslumą ir tinkamą tiekiamų produktų būklę.

Sandėlių paskirtis yra sumažinti tiekimo grandinės transportavimo kaštus ir optimizuoti produkcijai pervežti reikalingo transporto kiekį, nes jie yra kritinė jungiamoji tiekimo grandinės dalis tarp tiekėjų ir klientų. Sandėlyje turint reikalingą produkcijos kiekį ir žinant užsakymų pristatymo vietas galima racionaliai parinkti transporto priemonių maršrutus ir jų krovumą, taip pat užtikrinti užsakymų įvykdymą laiku su minimaliais transportavimo kaštais. Labai svarbu tinkamai parinkti krovinių transportavimo priemones, nes kartais krovinius geriau transportuoti pilnais sunkvežimiais, kitu laikotarpiu dalis krovinių transportuoti geležinkelio vagonais ir sunkvežimiais, o dalis – mažesnėmis transporto priemonėmis, pvz., furgonais [3].

Tyrimai parodė, kad tinkamas sandėlių skaičius ir vietos parinkimas yra taip pat labai aktualus optimizuojant tiekimo grandinę. Dauguma logistikos operatorių siekia sumažinti sandėlių skaičių ir sujungti keletą sandėlių į vieną ir taip efektyviau kontroliuoti produkcijos srautus ir atsargas tiekimo grandinėje [4]. Vis dėlto šiuo atveju dažniausiai pailgėja užsakymų įvykdymo laikas, nes padidėja vidutinis atstumas nuo sandėlio iki klientų ir bendras užsakymų skaičius sandėlyje. Taigi, didinant sandėlių krovinių aptarnavimo apimtį, reikia atlikti išsamią sandėlio sistemų pokyčių analizę bei įvertinti jų įtaką visai tiekimo grandinei.

Be pagrindinės produkcijos atsargų kaupimo funkcijos, šiuolaikiniuose sandėliuose yra atliekama ir daug kitų papildomų funkcijų, pvz., tiesioginis atvykstančios produkcijos paskirstymas ir išsiuntimas be ilgalaikio sandėliavimo, užsakymų pakavimas pagal specialius klientų poreikius, iš klientų grąžinamos produkcijos aptarnavimas ir pan. [5].

Užsakymų aptarnavimas pagal individualius klientų poreikius, pvz., specialus produktų pakavimas, etikečių klijavimas, katalogų pridėjimas ir pan., yra sparčiai populiarėjančios paslaugos, nes šiuolaikiniai klientai siekia individualumo ir nori išsiskirti rinkoje, todėl įmonės teikdamos šią paslaugą pritraukia daugiau klientų ir turi pranašumą prieš kitas logistikos įmones [6]. Vis dėlto teikiant tokią paslaugą labai svarbu įvertinti jos poveikį tiek sandėlio sistemoms, tiek visai tiekimo grandinei ir nustatyti ribą, iki kurios gali būti tenkinami individualių klientų poreikiai, nes kartais geriau patenkinti daugumos klientų poreikius iš dalies, negu visiškai patenkinti pavienius klientus.

Tiesioginis atvežamos produkcijos paskirstymas be ilgalaikio sandėliavimo yra dažnas šiuolaikinių sandėlių procesas, nes tokiu būdu įmonės siekia taupyti sandėliavimo plotą, išvengti atskirų sandėliavimo ir užsakymų surinkimo procesų ir tam tikrą į sandėlį atvykstančią produkciją iš karto panaudoti užsakymų surinkimo procese. Sėkmingas šio proceso vykdymas priklauso nuo to, kaip efektyviai yra atliekamas krovinių atvežimo / išvežimo vartų priskyrimas atvykstančioms ir išvykstančioms transporto priemonėms ir trumpalaikio sandėliavimo ploto naudojimas [7].

Dauguma įmonių siekia suteikti klientams lankstumo ir garantijų, kad nekokybiškos ar nepatikusios prekės gali būti gražintos. Vis dėlto gražinamos produkcijos srutai yra atsitiktiniai ir juos sudėtingiau aptarnauti sandėlyje, nes ne visa gražinta produkcija (pvz., brokas) gali būti pakartotinai panaudojama užsakymų surinkimo procese, taip pat sunku prognozuoti tokios produkcijos kiekius ir optimaliai reguliuoti produkcijos likučius sandėliuose [8]. Gražinamos prekės taip pat reikšmingai veikia sandėlio procesus, nes atvykstančiuose kroviniuose produktai būna sumaišyti ir reikia atlikti papildomas perrinkimo operacijas, kad juos vėl būtų galima naudoti renkant užsakymus.

Naujausias iššūkis, su kuriuo susiduria šiuolaikinės tiekimo grandinės ir tuo pačiu logistikos centrų sandėliai, yra elektroninė prekyba. Dėl sparčiai augančio interneto vartotojų skaičiaus pasaulyje taip pat auga ir elektroninės prekybos mastai ir stipriai veikiami sandėlyje vykstantys procesai. Elektroninė prekyba reikalauja pokyčių visuose įmonės logistikos procesuose, nes išauga plataus asortimento poreikis, sumažėja vidutinio užsakymo dydis, išauga užsakymų skaičius ir nustatomi griežtesni reikalavimai užsakymų įvykdymo laikui ( dažnai reikalaujama užsakymus įvykdyti tą pačią arba ateinančių dieną) [9]. Įmonių, užsiimančių elektronine prekyba, tikslas yra klientams pasiūlyti kaip galima didesnę produkcijos asortimentą, tačiau tuo pat metu įmonės turi optimizuoti produkcijos likučius įvairiuose tiekimo grandinės taškuose ir kiek galima optimaliau atlikti produkcijos paskirstymą tarp sandėlių. Natūralu, kad siūlant didelį produkcijos asortimentą dažniausiai neįmanoma turėti visų produktų kiekviename sandėlyje ir dažnai reikia atlikti produkcijos pervežimus ir perskirstymą tarp sandėlių pagal numatomus klientų vartojimo įpročius kiekviename regione [10]. Elektroninės prekybos užsakymų įvykdymo laikas sandėlyje turi būti minimizuotas, todėl tokiuose sandėliuose dažnai naudojamos įvairios automatizuotos krovinių transportavimo technologijos, kurios padidina sandėlio užsakymų surinkimo pajėgumus ir tikslumą [11]. Transportuojant šio tipo užsakymus klientams taip pat susiduriama su įvairiomis pervežimo problemomis, nes klientų yra daug, jie nutolę įvairiais atstumais nuo sandėlio ir kiekvienas klientas užsakymą gali priimti tik tam tikru laiku. Išvežiojant elektroninės prekybos užsakymus reikia spręsti ir pakartotinio užsakymo pristatymo problemą, nes daugelio užsakymų nepavyksta pristatyti iš pirmo karto [12]. Patikimi ir sklandūs logistikos procesai yra labai svarbus elektroninės prekybos faktorius, nes daugumai klientų tai pagrindinis kriterijus sprendžiant apie įmonės patikimumą ir įsipareigojimų vykdymą [13]. Klientai paprastai linksta greitai pranešti neigiamą

informaciją apie vėluojančias ar transportavimo metu pažeistas prekes viešoje erdvėje, todėl aptarnaujant tokio tipo užsakymus labai svarbus efektyvus ir sklandus kiekvienos tiekimo grandinės dalies veikimas.

Daugumai šiuolaikinių sandėlių yra keliami reikalavimai funkcionuoti daugiakanalėje paskirstymo aplinkoje ir aptarnauti skirtingų tipų užsakymus, pvz., didmeninės, mažmeninės ir elektroninės prekybos. Produkcijos kiekiai ir užsakymų parametrai priklauso nuo paskirstymo kanalo, todėl sandėliuose, aptarnaujančiuose skirtingus kanalus, susiduriama su sandėlio sistemų ir procesų suderinamumo problemomis [14]. Pavyzdžiui, vidutinis mažmeninio užsakymo dydis yra didesnis už elektroninės prekybos, o elektroninės prekybos produkcijos asortimentas yra didesnis už mažmeninės, todėl šiems srautams aptarnauti reikia taikyti skirtingas technologijas ir valdymo strategijas.

Apklausa apie 2013–2018 logistikos centrų vystymosi tendencijas duomenimis, pasaulyje stebimas nuolatinis sandėlių skaičiaus augimas ir didėjantis sandėlyje vykstančių procesų sudėtingumas: 35 % respondentų nurodė, kad planuoja didinti sandėlių skaičių, 38 % – plėsti esamus sandėlius, o 54 % tikisi užsakymų skaičiaus ir produkcijos asortimento augimo [15]. Didėjantis sandėlyje vykstančių procesų sudėtingumas reikalauja ieškoti procesų efektyvinimo sprendimų, todėl net 70 % respondentų planuoja automatizuoti procesus, o 66 % – aprūpinti personalą technologijomis, padidinančiomis darbo našumą. Didėjantys produkcijos srautai sandėliuose ir procesų sudėtingumas bei augantis didelių sandėlių poreikis reikalauja efektyvių technologinių sandėlio sistemų sprendimų. Sandėlio funkcijų automatizavimas yra vienas iš pagrindinių veiksnių siekiant procesų tobulinimo ir efektyvinimo, kuris suprantamas kaip automatizuotas materialų produkcijos srautų transportavimas ir paskirstymas sandėlyje minimizuojant žmoniškųjų išteklių poreikį.

Automatizuotuose sandėliuose produkcijos srautų transportavimas ir paskirstymas vyksta konvejeriais, automatizuotomis sandėliavimo ir rinkimo sistemomis (AS/RS), automatizuotomis transporterių bei rūšiavimo sistemos, o sandėlio procesų valdymą atlieka sandėlio valdymo sistema (SVS) [16]. Kiekvienas automatizuoto sandėlio kroviny turi brūkšninį kodą ar kitą elektroninį žymeklį, kuriame saugoma krovinio informacija. Krovinio transportavimas sandėlyje atliekamas tam tikromis atkarpomis, kurios atitinka sandėlio srautų valdymo taškus. Kiekviename taške yra nuskaitoma elektroninio žymeklio informacija ir sandėlio valdymo sistema parenka tolesnį krovinio transportavimo maršrutą ir perduoda pranešimą žemesnio lygio įrangos valdymo sistemoms, pvz., konvejerių valdymo, kurios siunčia signalus konvejerių sistemos elementams, kad kroviny galėtų judėti pasirinktu maršrutu.

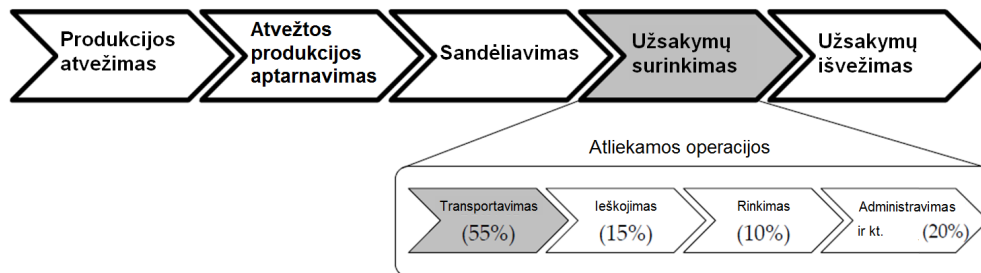
Žmogaus dalyvavimas automatizuoto sandėlio procesuose yra apribotas ir sukoncentruotas tik į nesudėtingų operacijų atlikimą, todėl tokio tipo sandėliai gali pasiekti didesnę našumą, minimizuoti personalo poreikį, užtikrinti, kad užsakymai būtų surenkami kokybiškai ir laiku, sumažinti klaidų tikimybę, išplėsti produkcijos atsargų valdymo galimybes. Nors automatizuoti sandėliai turi daug pranašumų prieš

neautomatizuotus, kuriuose dauguma procesų yra atliekami ir valdomi žmogaus, tačiau automatizavimas reikalauja didelių investicijų, apriboja sandėlio sistemų lankstumą ir galimybes prisitaikyti prie pasikeitusių verslo sąlygų ateityje [17, 18]. Sandėlių vystymosi tendencijos rodo, kad automatizuotų sandėlių sistemų skaičius ateityje tik didės dėl jų teikiamų privalumų, tačiau tokių sistemų projektavimo sprendimai turi būti priimami itin tiksliai įvertinant daugelį sistemos parametrų bei jų sąveikas [19]. Netinkamų sprendimų poveikis sistemos efektyvumui tikrai bus matomas, tačiau projektavimo klaidų taisymas šiuo atveju yra labai brangus arba neįmanomas. Todėl sprendimai turi būti priimami tik gerai išanalizavus projektuojamo sandėlio reikalavimus ir atlikus išsamią siūlomos automatizuotos sistemos analizę.

Šiuolaikiniams sandėliams keliami vis aukštesni reikalavimai dėl materialijų srautų aptarnavimo greičio ir kokybės, todėl sandėlio procesų efektyvinimo ir tobulinimo tyrimai yra svarbūs ir aktualūs, leidžia nustatyti kritinius sistemų taškus, surasti efektyvius procesų valdymo sprendimus ir optimizuoti sandėlio sistemas pagal pasirinktus parametrus.

## 1.2. Pagrindiniai logistikos centro sandėlio procesai

Logistikos centro sandėliuose yra skiriami šie pagrindiniai technologiniai procesai [20]: produkcijos atvežimas, atvežtos produkcijos aptarnavimas ir paskirstymas, sandėliavimas, užsakymų surinkimas ir jų išvežimas (1.2 pav.).



1.2 pav. Pagrindiniai sandėlio procesai [76]

Sandėliavimas ir užsakymų surinkimas yra pagrindiniai sandėlio procesai, turintys didžiausią įtaką sandėlio efektyvumui, ir nuo jų tiesiogiai priklauso visi kiti procesai. Vis dėlto visos sandėlio veiklos yra daugiau ar mažiau tiesiogiai priklausomos vienos nuo kitų, todėl sandėlyje būtina užtikrinti visų procesų suderinamumą ir sklandų veikimą. Sandėlio procesai vyksta dinaminėje aplinkoje ir yra veikiami atsitiktinių vidinių bei išorinių veiksnių, kurių poveikį efektyvumui sandėlio sistemos turi būti pajėgios minimizuoti [21]. Vidiniai veiksniai yra susiję su personalo valdymo problemomis ir įrenginių gedimais, todėl jų poveikį galima tiksliau prognozuoti bei parengti alternatyvius sandėlio valdymo planus tokiais atvejais. Kur kas sudėtingiau numatyti išorinius veiksnius, kurie gali atsirasti tiek įmonės tiekimo grandinės viduje, tiek išorėje. Pavyzdžiui, pasikeitus tiekimo

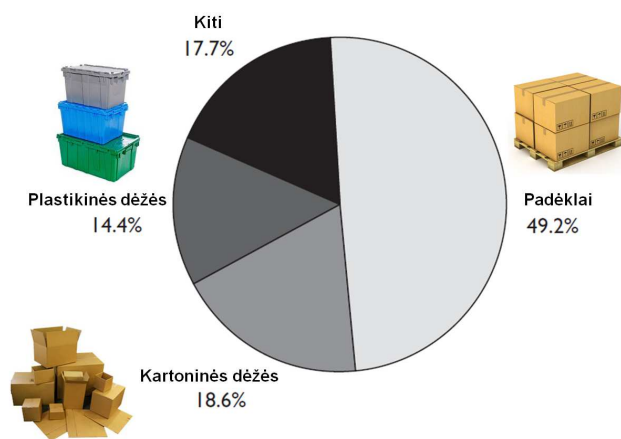
grandinės struktūrai ar ekonominei situacijai šalyje, gali kisti produkcijos srautai sandėlyje, užsakymų dydžiai ir kiekiai ar pan., todėl gali sumažėti ir sandėlio efektyvumas, kuris tokiu atveju neatitiks įmonės poreikių. Sandėlio sistemų planavimo ir projektavimo etapuose būtina įvertinti sandėlio procesus veikiančius atsitiktinius veiksnius, nustatyti jų poveikį sandėlio sistemoms ir apibrėžti ribinius sistemų veikimo atvejus.

Produkcijos atvežimo procesas apibrėžia sandėlio sąveiką su išorinėmis tiekimo grandinės sistemomis, kuriomis produkcija yra tiekama į sandėlį ir sukuriamas atvežamų krovinų srautas: kroviniai į sandėlį yra atvežami transporto priemonėmis, iškraunami prie atvežimo vartų, administruojami ir paruošiami tolesnėms operacijoms, pvz., sandėliavimui, tiesioginiam užsakymų surinkimui bei ilgalaikio sandėliavimo ar pan. Pagrindinis šio proceso tikslas yra minimizuoti atvykstančių transporto priemonių laukimo laiką sandėlyje, optimaliai sudarant krovinų atvežimo tvarkaraščius, parenkant iškrovimo vartus ir valdant krovinis aptarnaujančius resursus [22]. Produkcijos transportavimo kaštai gali sudaryti apie 30–60 proc. visų įmonės logistikos kaštų, todėl siūloma integruoti įmonės sandėlio valdymo ir transporto valdymo sistemas ir patobulinti produkcijos atvežimo procesą efektyviau valdant atvykstančios produkcijos srautus [23]. Sandėlio valdymo sistema planuoja užsakymus, valdo produkcijos likučius ir perduoda informaciją transporto valdymo sistemai, kuri automatiškai planuoja transportą produkcijos srautams paskirstyti.

Atvežtos produkcijos aptarnavimo metu produktai yra paruošiami sandėliuoti arba iš karto panaudojami užsakymų surinkimo procese. Atvežami kroviniai gali būti įvairių formų, t. y. padėklai, dėžės, maišai, palaidi produkcijos vienetai, sukrauti į jūrinį konteinerį, ir priklausomai nuo sandėlyje esančių sistemų ir vykstančių procesų krovinis reikia tinkamai paruošti sandėliuoti. Idealiu atveju krovinis užtenka tik administruoti ir perduoti duomenis sandėlio valdymo sistemai. Vis dėlto labai dažnai yra tikrinama krovinų kokybė, dėžės dedamos ant palečių arba nuo jų nuimamos, produkcijos vienetai kraunami į dėžes arba iš kartoninių dėžių yra kraunami į plastikines ir pan. Šiame procese yra svarbu optimaliai suderinti atvykstančių transporto priemonių srautus su krovinų paruošimo resursų pajėgumais ir užtikrinti, kad į sandėliavimo zoną patektų tik kokybiškai paruošta produkcija ir būtų išvengta prastovų ir klaidų surenkant užsakymus.

Pagrindinis sandėliavimo tikslas yra racionaliai paskirstyti produkciją į sandėliavimo vietas, kad sandėliavimo vietos būtų optimaliai užpildytos ir reikalinga produkcija būtų pasiekama per kuo trumpesnę laiką užsakymo surinkimo metu. Paprastai sandėlyje yra keletas skirtingo tipo sandėliavimo zonų, kurios yra skirstomos pagal krovinio tipą (padėklai arba už padėklą mažesni kroviniai), pagal produktų laikymo temperatūrą (šaldyti, atvėsinti arba aplinkos temperatūros), pagal užsakymų rinkimo reikalavimus (dalys užsakymų gali būti renkami pilnomis dėžėmis, o dalis – komplektuojant individualius produktų vienetus) ir pagal daugelį kitų kriterijų. Atlikti tyrimai parodė, kad sandėliuose apie 50 % visos produkcijos yra sandėliuojama ant padėklų, o likusi produkcija kito tipo taroje (1.3 pav.).





**1.3 pav.** Krovinių sandėliavimo taros tipų pasiskirstymas [24]

Planuojant sandėliavimo zonas labai svarbu tinkamai nustatyti jų dydžius, suderinti krovinių srautus, parinkti įrangą ir nustatyti optimalų produkcijos išdėstymą zonoje, kad vykdant užsakymų rinkimo procesą reikalinga produkcija būtų transportuojama į užsakymų surinkimo vietas per nustatytą laiką [25]. Sandėliavimo zonų planavimo etape reikia įvertinti ir prognozuojamus sandėliavimo zonų pokyčius ateityje, ir galimybes keisti zonų dydžius bei išplanavimus. Yra skiriamos trys pagrindinės produkcijos išdėstymo sandėliavimo zonoje strategijos: atsitiktinė (produkcija tolygiai paskirstoma tarp turimų sandėliavimo vietų), fiksuota (produkcija sandėliuojama tik į iš anksto priskirtas vietas) ir pagal produkcijos vartojimo klases (produktai yra suskirstomi pagal jų vartojimo dažnį ir kiekvienai klasei yra priskiriamos tam tikros sandėliavimo vietos zonoje). Taikant atsitiktinę strategiją, sandėliavimo vietos yra tolygiai užpildomos, o produktai tolygiai paskirstomi stelažuose, todėl yra efektyviai išnaudojamos sandėliavimo zonos [26]. Klasėmis pagrįsta strategija suskirsto produktus pagal jų suvartojimo dažnį užsakymų surinkimo procese, kiekvienai klasei nustato atitinkamą sandėliavimo vietų skaičių ir priskiria vietas stelažuose taip, kad populiariausi produktai yra greičiausiai pasiekiami užsakymų surinkimo metu [27]. Produktai yra sandėliuojami atsitiktinėse vietose savo klasėje, t. y. produktams taikoma atsitiktinė sandėliavimo strategija savo klasėje. Taikant fiksuotą sandėliavimo strategiją, kiekvienas produktas yra vertinamas pagal nustatytus kriterijus, kuriais remiantis jam yra parenkama sandėliavimo vieta. Vienas iš populiariausių kriterijų yra produkto generuojamo tūrio santykis su jo apyvartumu, kuris leidžia visus produktus klasifikuoti kriterijaus reikšmės didėjimo tvarka ir pagal tai parinkti sandėliavimo vietas [28]. Produktai su mažiausiais kriterijaus reikšmėmis yra sandėliuojami arčiausiai užsakymų rinkimo zonos, nes jie bus dažniausiai naudojami renkant užsakymus. Fiksuota sandėliavimo strategija leidžia efektyviau valdyti sandėliavimo zoną palyginti su klasėmis pagrįstąja, nes kiekvienas produktas yra įvertinamas atskirai; vis dėlto ji reikalauja ir daugiau valdymo resursų, nes nuolat reikia stebėti

planuojamus produktų pardavimus ir rinkos situaciją, kiek galima tiksliau įvertinti klasifikavimo kriterijų reikšmes ir nuolat perskirstyti produktus sandėliavimo zonoje. Sandėliavimo procesas tiesiogiai veikia užsakymų surinkimo procesą, nes keičiant produkcijos išdėstymą ir sandėliavimo zonų parametrus yra pasiekiamas skirtingas užsakymų surinkimo efektyvumas, todėl šiuos du procesus būtina optimaliai suderinti [29].

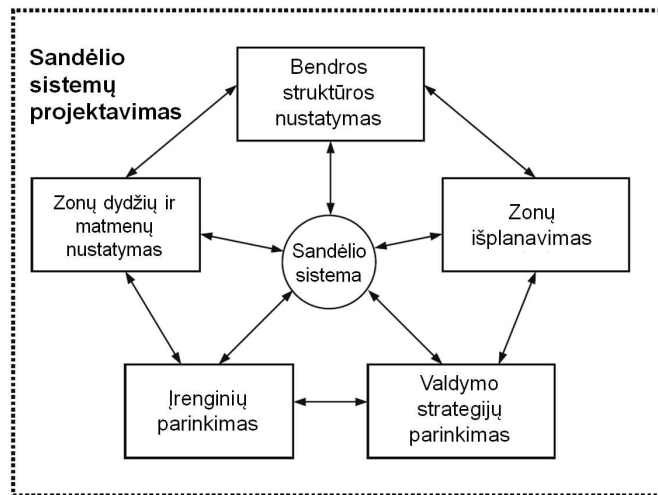
Užsakymų surinkimas yra svarbiausias ir sudėtingiausias sandėlyje vykstantis procesas, kurio metu kiekvienam klientui reikalingi produkcijos kiekiai yra surenkami iš sandėliavimo vietų, pakuojami ir paruošiami išvežti. Šiam procesui vidutiniškai skiriama net 55 % visų sandėlio valdymo kaštų. Nepriklausomai nuo to, koku būdu yra renkamas užsakymas, vidutiniškai net 55 % rinkimo laiko sudaro krovinių transportavimas tarp produkcijos sandėliavimo vietų, o reikiamų produktų ieškojimas ir išrinkimas bendrai užima apie 25 % laiko [31]. Praktiškai pasirenkami du pagrindiniai užsakymų surinkimo metodai – diskretusis (rinkimas pagal užsakymą) ir grupinis (rinkimas pagal produktą) užsakymų surinkimas. Diskrečiuoju metodu surenkant užsakymus, yra nustatoma užsakymų surinkimo seka ir jie yra renkami iš eilės, t. y. kiekvienas užsakymas yra visiškai pabaigiamas prieš pradėdant kitą. Šio metodo privalumai yra akivaizdūs, nes vienu metu yra aptarnaujamas tik vienas užsakymas, pabaigus užsakymą jį galima iš karto paruošti išvežti, sumažinama klaidų tikimybė, produktai renkami tik vieną kartą ir pagerinamas užsakymų surinkimo valdymas, nes realiu laiku galima stebėti užsakymų įvykdymo būseną. Vis dėlto pagrindinis šio metodo trūkumas yra žemas efektyvumas, nes kiekvienas užsakymas yra renkamas atskirai ir nėra minimizuojamas transportavimo ir produktų surinkimo laikas tarp „panašių“ užsakymų, kuriems reikalingi vienodi produktai [32]. Atliekant grupinį užsakymų surinkimą, užsakymai yra surenkami pagal produktą, t. y. yra žinomi tam tikro laikotarpio užsakymai ir visi jiems reikalingi produktai. Tuomet reikalingų produktų surinkimas yra paskirstomas tarp sandėlio resursų taip, kad bendras transportavimo ir produktų surinkimo laikas būtų minimalus [30]. Šiuo metodu surenkant užsakymus, kiekvienas sandėlio resursas visuomet aptarnauja keletą užsakymų vienu metu ir surinktus produktus arba jau pabaigtus užsakymus pristato į konsolidavimo zoną, kurioje produktai paskirstomi tarp aktyvių užsakymų ir užsakymai yra pabaigiami bei paruošiami išvežti. Šis metodas leidžia žymiai sumažinti transportavimo ir produktų surinkimo trukmę, tačiau reikalingas papildomas produktų perrinkimas ir padidėja klaidų tikimybė, nes keletas užsakymų yra renkami lygiagrečiai, sunkiau sekti užsakymų įvykdymo būseną, reikalingi sudėtingi produktų grupavimo ir likučių valdymo algoritmai.

Užsakymų surinkimo technologinius sprendimus galima suskirstyti į neautomatizuotus ir automatizuotus. Neautomatizuotos užsakymų surinkimo sistemos, arba „Žmogus–Produkcija“ tipo sistemos, pagrindiniai komponentai yra produktų sandėliavimo stelažai, sandėlio operatoriai ir produktų transportavimo priemonės (vežimėliai, autokrautuvai ir pan.). Šio tipo sistemose sprendžiami uždaviniai apima produktų išdėstymą stelažuose, užsakymų surinkimo maršruto sudarymą sandėlio operatoriams ir reikalingo operatorių skaičiaus nustatymą [33].

Neautomatizuotose sistemose daugiausiai yra naudojami grupinio užsakymų surinkimo metodai, nes diskretusis užsakymų surinkimas yra labai neefektyvus dėl didelių transportavimo ir produktų surinkimo laiko sąnaudų. Šiuolaikinės užsakymų surinkimo proceso automatizavimo galimybės yra labai plačios, nes, priklausomai nuo technologijos pasirinkimo, galima suprojektuoti ir visiškai automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą [34]. Vis dėlto tokio tipo sistemos yra labai ribotos ir nelanksčios, nes gali aptarnauti tik tam tikrus produktus, kurie buvo nustatyti projektavimo metu ir, pasikeitus produktams arba jų parametrų, sistemos dažnai neatitinka naujų reikalavimų, o jų atnaujinimo kaštai yra dideli. Dėl šios priežasties praktikoje plačiausiai taikomos automatizuotos „Žmogus–Produkcija“ tipo sistemos, kuriose operatorius atlieka tik surinkimo operaciją, t. y. paima reikalingą produkto vienetų kiekį iš produktų krovinių ir jį padeda į užsakymų krovinį. Šioje sistemoje operatoriui reikalingi produktų kroviniai automatiškai atvežami iš sandėliavimo vietų ir tokiu būdu minimizuojamas transportavimo ir produktų surinkimo iš sandėliavimo vietų laikas [35]. Šio tipo sistemose operatoriaus darbo vieta yra fiksuota ir minimizuotas jo judėjimas taip, kad jis galėtų visą dėmesį skirti pačiam užsakymo surinkimo procesui. Šiose sistemose produktai iš sandėliavimo vietų automatiškai transportuojami į užsakymo surinkimo vietą panaudojant transporterius, kranus, karuseles ir konvejerių sistemą [36, 37]. Kaip teigia dauguma autorių, užsakymų surinkimo proceso automatizavimas yra labai sparčiai plintantis reiškinys, kuriuo siekiama sumažinti šio proceso valdymo kaštus, padidinti sistemų efektyvumą, pagerinti užsakymų surinkimo kokybę ir sumažinti klaidų skaičių [37]. Šiame procese taikomi automatizuoti sprendimai leidžia reikšmingai sumažinti laiko sąnaudas, reikalingas transportavimui, produktų ieškojimui ir surinkimui, todėl yra surenkama daugiau užsakymų, sumažinamas reikalingų resursų skaičius, galima atlikti papildomas operacijas užsakymų surinkimo stotelėse. Tačiau tuo pat metu reikia pabrėžti, kad tinkamų technologijų parinkimas ir suderinamumas yra labai svarbus projektavimo uždavinys, nes reikia sukurti kiek galima universalesnę sistemą, kuri atitiktų ne tik esamus poreikius, bet ir numatomus įmonės verslo pokyčius ateityje bei sklandžiai bendradarbiautų su kitomis sandėlyje esančiomis sistemomis.

### **1.3. Logistikos centro sandėlio sistemų projektavimas ir efektyvumo vertinimas**

Sandėlio sistemų projektavimo procesą apibrėžia penki pagrindiniai sprendimai [20]: bendros sandėlio struktūros nustatymas, sandėlio funkcinų zonų dydžio ir matmenų įvertinimas, zonų išdėstymo ir sąveikos taškų plano rengimas, sandėlio techninės įrangos ir valdymo strategijų parinkimas (1.4 pav.). Bendros struktūros nustatymas apima pirminės sandėlio koncepcijos sukūrimą, materialiujų srautų įvertinimą, preliminarų funkcinų zonų ir jų tarpusavio sąveikų nustatymą.



1.4 pav. Pagrindiniai sandėlio sistemų projektavimo etapai [20]

Atlikta mokslinių darbų analizė parodė, kad labai mažai tyrimų sprendžia konceptualaus sandėlio planavimo problemas ir nėra sukurtos metodikos, kuri padėtų atlikti visavertį sandėlio planavimą ir suprojektuoti optimaliai veikiančias sandėlio sistemas, taip pat nėra apibrėžti teoriniai sandėlio struktūros ir koncepcijos kūrimo principai [38]. Visi šie trūkumai atsiranda dėl šio uždavinio sudėtingumo, nes pirminiame projektavimo etape reikia įvertinti pagrindinius sandėlio sistemų parametrus, jo statybos ir eksploataavimo kaštus, apibrėžti sistemų funkcionalumą ir parengti sandėlio specifikaciją tolesniems bei tikslesniems projektavimo etapams. Vienas iš pagrindinių veiksnių, ribojantis priimtino tikslumo struktūros įvertinimo modelių sukūrimą, yra sandėlio ir jo sistemų individualumas ir pritaikomumas tik konkrečioms problemoms spręsti. Kiekvienas sandėlys yra skirtas aptarnauti tam tikro tipo produkciją ir srautus, todėl bendro modelio kūrimas yra neįmanomas dėl skirtingų pramonės šakų specifikos ir egzistuojančios didelės produkcijos asortimento įvairovės. Taigi priimtino tikslumo modeliai gali būti kuriami tik tam tikrų uždavinių grupei, pvz., elektroninė prekyba maisto produktais arba drabužiais, nes labai subendrinti modeliai yra per daug abstraktūs ir netikslūs, o jų pritaikymas praktinėms problemoms spręsti yra labai ribotas.

Kita problema yra sandėlio sistemų projektavimas dinaminėje aplinkoje, atsižvelgiant į produkcijos srautų svyravimus, personalo valdymo problemas, įrangos gedimus ir pan. Struktūros nustatymo etape paprastai neįmanoma adekvačiai įvertinti sandėlio sistemų veikimo dinaminėje aplinkoje, todėl daromos prielaidos apie sistemų veikimo režimus ir planuojamą resursų rezervą. Pagal siūlomą bendrąją sandėlio planavimo metodiką pirminiame etape apibrėžiant sandėlio struktūrą yra atliekama išsami produkcijos srautų analizė, nustatomas sandėlio funkcionalumas, preliminariai parenkamos technologijos ir įvertinami sandėlio statybos bei eksploataavimo kaštai [39]. Šiame etape yra labai svarbu teisingai suprasti sandėliui

keliamus reikalavimus ir parengti kiek galima tikslesnį pirminį sandėlio projektą įvertinant esminius jo parametrus.

Sandėlio funkcinių zonų dydžio ir matmenų nustatymas yra kompleksinis uždavinys, kurio sprendimas priklauso nuo produkcijos likučių valdymo, sandėlio procesų ir personalo valdymo bei statinio projektavimo strategijų parinkimo. Šiame etape galima sudaryti bendrinį pagrindinių sandėlio funkcinių zonų dydžio nustatymo matematinį modelį, paremtą elementariomis prielaidomis, kurios leidžia įvertinti sandėlio statybos ir valdymo kaštus priklausomai nuo produkcijos asortimento [42]. Tokio tipo modelis yra universalus, tačiau dėl modelio sudarymo prielaidų jis tinka tik preliminariai ir apytiksliai įvertinti funkcinių zonų dydžius. Todėl paprastai naudojami specializuoti zonų dydžių įvertinimo modeliai, skirti konkrečiai sandėlio zonai įvertinti. Produkcijos sandėliavimo zonos dydis (talpa) yra nustatomas, įvertinus produkcijos srautus ir likučius sandėlyje kritiniais laiko periodais pagal pasirinktą produktų sandėliavimo strategiją, t. y. esant maksimaliam sandėlio sistemų apkrautumui. Mažiausiai sandėliavimo vietos reikia taikant atsitiktinę produktų sandėliavimo strategiją, tačiau ilgiau užtrunka užsakymų surinkimas palyginti su fiksuota sandėliavimo strategija, nes populiariausia produkcija yra sandėliuojama arčiausiai užsakymų surinkimo vietų [40]. Užsakymų surinkimo zonos dydis reikšmingai priklauso nuo aptarnaujamų produktų tipo, užsakymų dydžių, surinkimo strategijos ir zonos išplanavimo [41]. Produkcijos atvežimo ir užsakymų išvežimo zonų dydžiai priklauso nuo produkcijos srautų ir personalo valdymo strategijų. Sudarius individualius funkcinių zonų dydžių įvertinimo modelius, reikia taip pat įvertinti ir sąsajas tarp funkcinių zonų ir nustatyti kritinius sąveikos taškus, pvz., ar užsakymų išvežimo zona yra pakankamo dydžio ir ar gali aptarnauti visus surinktus užsakymus kritiniais laiko momentais. 1.2 pav. pateikta sandėlio procesų sąveikos schema rodo, kad visi sandėlio procesai yra glaudžiai susiję, todėl nustatant zonų dydžius yra labai svarbu įvertinti ir jų sąsajas. Nustačius zonų dydžius, galima apibrėžti jų matmenis priklausomai nuo turimų apribojimų – sandėlio grindų plotas, aukštis, įrenginių parametrai ir funkcionalumas, procesų valdymo strategijos ir pan. Šiuo atveju galima sudaryti bendrąją optimalių matmenų įvertinimo modelį, kuris minimizuoja sandėlio elektros energijos suvartojimą, gali būti išplėstas įtraukiant daugiau parametrų ir leidžia palyginti skirtingas sandėlių formas pagal statybos kaštus, funkcinių zonų užimamą grindų plotą ir tūrį [43]. Reikėtų pabrėžti, kad matmenų nustatymas labai priklauso nuo sandėlio zonų išdėstymo ir įrengimų išdėstymo zonose, todėl matmenų įvertinimo modeliuose turėtų būti vertinamas tik bendras funkcinių zonų tūris ir grindų plotas ir pagal tai preliminariai vertinami sandėlio statybos ir valdymo kaštai.

Zonų išplanavimo modeliai padeda nustatyti sistemų išdėstymą sandėlyje ir įrenginių išdėstymą kiekvienoje funkcinėje zonoje, t. y. nustatoma sandėliavimo zonų ir sistemų konfigūracija ir tikslūs sistemų sąsajos taškai. Vienas iš svarbiausių faktorių yra sandėliavimo stelažų parametrų ir išdėstymo nustatymas, t. y. stelažų eilių skaičiaus, fizinių matmenų ir konfigūracijos nustatymas, nuo kurio priklauso sandėlio ir užsakymų surinkimo strategijos bei įrenginių parinkimas [44].

Pavyzdžiui, trumpas stelažų eiles geriau naudoti neautomatizuotuose sandėliuose, nes vienoje eilėje vienu metu gali dirbti tik vienas operatorius ir nereikia spręsti operatorių prasielkimo problemos. Automatizuotuose sandėliuose geriau tinka ilgos stelažų eilės, nes tarp jų važinėja kranas, kuris aptarnauja daugiau krovinių palyginti su žmogumi, tačiau jo įrengimo ir eksploataavimo kaštai yra dideli, todėl reikia projektuoti stelažus minimizuojant kranų skaičių. Taip pat reikia nustatyti sandėlio operatoriaus užsakymų surinkimo proceso metu nueito kelio priklausomybę nuo skirtingų stelažų eilių išdėstymo, produkcijos sandėliavimo strategijų ir tarpų tarp stelažų eilių [45]. Kitas svarbus veiksnys yra sistemų krovinių atvežimo / išvežimo vietų nustatymas, kurios sudaro sąsajas tarp funkcinų zonų ir nuo jų išdėstymo priklauso aptarnautų krovinių skaičius, sandėlio operatorių arba kranų važiavimo atstumas ir laikas. Neautomatizuotuose sandėliuose krovinių atvežimo / išvežimo vietose sandėlio operatoriai gauna užsakymų surinkimo užduotis ir užsakymus taip pat pristato į šias vietas, todėl prieš parenkant užsakymų surinkimo strategiją šios vietos yra fiksuojamos. Pavyzdžiui, yra darbų, kuriuose palygintas skirtingų užsakymų surinkimo strategijų efektyvumas, kai atvežimo / išvežimo vietos yra sandėlio kampuose bei sudarytas analitinis sandėlio išplanavimo modelis, pagal kurį nustatyta ne tik optimali sandėliavimo zonos forma, bet ir produkcijos atvežimo bei surinktų užsakymų išvežimo vietos [46, 47]. Neautomatizuotuose sandėliuose atvežimo / išvežimo vietos gali būti bet kurioje sandėlio vietoje, o automatizuotuose sandėliuose jų pozicija priklauso nuo pasirinktų įrenginių galimybių ir konfigūracijos. Apibendrinant galima teigti, kad sukurti universalų išplanavimo modelį yra labai sunkus uždavinys. Todėl egzistuojantys modeliai apsiriboja tik keleto svarbiausių parametrų optimizavimu ir leidžia palyginti sandėlio išplanavimo alternatyvas pagal statybos, valdymo kaštus ir pan. bei padeda pasirinkti optimalų variantą, tenkinantį poreikius.

Parinkant įrenginius yra priimami technologiniai sprendimai kiekvienai sandėlio funkcinėi zonai ir nustatomas sandėlio automatizavimo lygis. Šiuolaikinėje rinkoje egzistuoja labai daug skirtingų materialiujų srautų aptarnavimo sistemų ir įrenginių, kurie leidžia sukurti įvairias sistemas nuo visiškai neautomatizuotų iki visiškai automatizuotų, todėl įvertinti kiekvieną pasirinkimo galimybę yra praktiškai neįmanoma. Pirminis sprendimas šiame etape yra kiekvienos sandėlio funkcinės zonos automatizavimo lygio nustatymas, kuris gali būti tiek visiškas, tiek dalinis ir yra apibrėžiamas kaip žmogaus atliekamų veiksmų pakeitimas automatiniais įrenginiais. Sprendimai dėl automatizavimo yra sudėtingi, todėl šiame procese paprastai dalyvauja skirtingų sričių specialistai, pvz., valdyba, inžinieriai ir finansų skyrius. Jie vertina šią problemą skirtingais aspektais ir priima sprendimus pagal tokius kriterijus: sandėlio valdymo kaštų sumažinimas, teikiamų paslaugų klientams kokybės pagerinimas, technologijų inovatyvumas, lankstumas, pritaikomumas ir jų valdymo sudėtingumas [52]. Kaip parodė atlikti tyrimai, technologijų inovatyvumas yra sąlygiškai svarbus kriterijus, nes kartais įmonės renkasi modernius technologinius sprendimus ir norėdamos išskirti save panašių įmonių rinkoje kaip siūlančias modernius materialiujų srautų aptarnavimo būdus ir taip pritraukti naujų

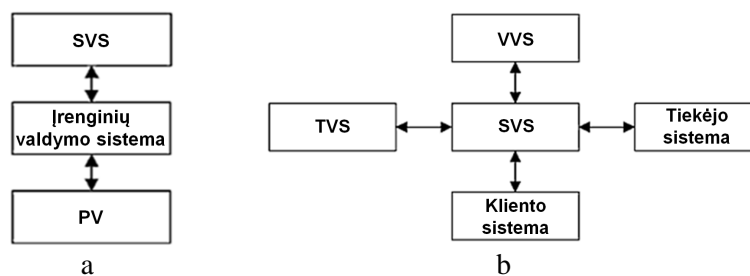
klientų. Sandėlio procesų automatizavimas yra vienas iš pagrindinių būdų siekiant didesnio sistemos efektyvumo, tačiau reikalauja įvairių problemų sprendimų. Vienas iš pagrindinių iššūkių yra tokio tipo sistemų nelankstumas [53]. Projektuojant automatizuotas sistemas yra siekiama suderinti jų modularumą, lankstumą ir efektyvumą, nes tam tikro tipo sistemoms tai įmanoma pasiekti, sukuriant automatizuotą sandėliavimo sistemą, kuri yra lengvai integruojama į įvairius sandėlio procesus ir padidina jų efektyvumą bei sumažina valdymo kaštus [54]. Vis dėlto praktiškai dažnai negalima suderinti proceso lankstumo su jo efektyvumu, nes tai yra arba labai brangu, arba neįmanoma. Pavyzdžiui, visiškai automatizuojant užsakymų surinkimo procesą galima pasiekti aukštą sistemos pralaidumą, kuris yra neįmanomas neautomatizuotai sistemai, tačiau užsakymų surinkimo tara turi būti visiškai standartizuota, užsakymai žinomi iš anksto, o sandėlio valdymo sistema pajėgi interpretuoti kiekvieno produkto parametrų rinkinį. Kadangi automatizuotos sistemos projektuojamos ne tik esamai situacijai, bet ir ateičiai, reikia iš anksto įvertinti, kaip keisis produkcijos asortimentas, užsakymų surinkimo tara, jos struktūra, kiekis ir pan. Bendrai galima teigti, kad didėjantis automatizuotos sistemos lankstumas yra tiesiogiai proporcingas didėjančiai sistemos kainai arba mažėjančiam sistemos pralaidumui, todėl siekiant racionalumo sistemą geriausia projektuoti pagal konkrečius reikalavimus. Automatizuojant procesą turi būti aiškiai apibrėžtas jo veikimas ir konkrečiai nurodyta, kaip materialūs srautai į procesą patenka, kaip yra jame aptarnaujami ir kaip iš jo išeina, taip pat įvertinti sistemos pokyčius ateityje, nes pagal šiuos duomenis bus parenkami sandėlio įrenginiai. Siūloma įrangos parinkimą išskaidyti į du etapus: pirmajame etape preliminariai nustatyti tinkamus įrenginių tipus, o antrame etape pasirinkti jau konkrečius įrengimus iš pirmame etape sudarytos pasirinkimų aibės ir juos išsamiai įvertinti [48]. Pagal pateiktą metodiką, pirmame etape yra formuluojamas paprastas materialijų srautų judėjimo uždavinys iš pirminio taško į galutinį tašką panaudojant bendrąjį transportavimo modelį, į kurį galima įtraukti įvairius parametrus apie srautą, įrenginius, ribines sąlygas ir pan. Šio uždavinio sprendimas leidžia preliminariai atrinkti potencialios įrangos tipus pagal pasirinktus parametrus. Nustačius įrenginių tipus, antrajame etape parenkami konkretūs įrenginiai ir nustatomi optimalūs jų parametrai. Įrenginių parinkimas yra sudėtingas daugiakriterinis sprendimų priėmimo uždavinys, kuriam negalima pritaikyti universalių sprendimų metodų, todėl dažnai siūloma taikyti analitiniais miglotosios logikos metodais pagrįstą įrenginių parinkimo ir vertinimo metodiką, kuri lygina alternatyvius sprendinius su optimaliu pagal kainą [49]. Atlikta įrenginių parinkimo modelių analizė parodė, kad šiuo metu dažniausiai taikomi analitiniai modeliai, kurių galimybės yra ribotos ir jie tinka tik nedidelėms sistemoms, kuriose nėra daug skirtingų įrenginių tipų [50]. Šiuose modeliuose optimizavimas atliekamas tik pagal kainą ir neįtraukiami kiti kriterijai, nes modeliai yra labai abstraktūs ir neatsižvelgia į specifinius sistemų reikalavimus. Savo darbe autoriai siūlo metodiką, kuri sprendžia pagrindines įrenginių parinkimo problemas, padeda sistemos reikalavimus klasifikuoti pagal prioritetus ir yra taikoma viso sandėlio projektavimo procese.

Pagal šią metodiką yra nustatomos galimos įrenginių klasės kiekvienai sandėlio funkicinei zonai ir toliau parenkami įrenginiai pagal pateiktus reikalavimus ir keliamus tikslus. Autoriai teigia, kad vienas iš pagrindinių dalykų, taikant bet kokią įrenginių parinkimo metodiką, yra reikalavimų ir tikslų suderinimas tarp sandėlio projektuotojų ir valdytojų. Kaip parodė atliktų įrenginių parinkimo modelių analizė, sukurti priimtino tikslumo universalų modelį yra praktiškai neįmanoma, todėl reikėtų susikcentruoti į mažesnės apimties modelius, kurie yra specializuoti tam tikroms įrangos klasėms, kūrimą. Pavyzdžiui, yra sudarytas krovinių transportavimo konvejerių parinkimo kompiuterinio modelio variantas, kuris įvertina 76 skirtingus konvejerių tipus ir parenka geriausiai reikalavimus atitinkančią konvejerių sistemą pagal daugiakriterinį vertinimo procesą [51]. Nepriklausomai nuo taikomos metodikos, įrenginių parinkimo sprendimų priėmimo pagrindas yra jų kainos ir efektyvumo priklausomybės nuo pasirinktų sistemos parametrų nustatymas.

Įrenginių parinkimo sprendimai yra lygiagrečiai derinami su jų valdymo strategijomis, kurios išsamiai apibrėžia sandėlyje vykstančių procesų eigą ir yra esminis sandėlio projektavimo sprendimas, kuris reikšmingai veikia anksčiau minėtus sprendimus. Skirtingų procesų valdymo strategijos yra glaudžiai susijusios tarpusavyje, todėl labai svarbu šias strategijas tinkamai parinkti sandėlio planavimo metu, nes pastačius sandėlį ir įdiegus sistemas tai padaryti gali būti labai brangu ir sudėtinga. Visus sandėlyje vykstančius procesus kontroliuoja ir valdo sandėlio valdymo sistema (SVS), kuri seka į sandėlį atvykstančią produkciją ir išvykstančius užsakymus, realiu laiku paskirsto užduotis sandėlio operatoriams ir įrenginiams, kaupia ir apdoroja produkcijos likučių, užsakymų surinkimo, personalo ir įrenginių valdymo duomenis. Pagrindiniai šios sistemos tikslai yra [55]: eliminuoti užsakymų surinkimo klaidas sekant kiekvieno produkto transportavimą sandėlyje; gauti, apdoroti ir perduoti kritinę sandėlio sistemų būsenos informaciją per minimalų laiką užtikrinant visišką sandėlio sistemų kontrolę; optimaliai paskirstyti užduotis tarp sandėlio resursų ir optimizuoti sandėliavimo zonų užpildymą krovinių. SVS siunčia sisteminius pranešimus kitoms sandėlio sistemoms – įrenginiai perduoda duomenis per nustatytas programines sąsajas, o sandėlio operatoriai gali juos perduoti keliais skirtingais būdais. Paprasčiausias perdavimo būdas yra popierinių užduočių lapų spausdinimas ir rankinis užsakymų patvirtinimas kompiuteryje. Automatizuotiems duomenų perdavimo būdams yra priskiriami radijo ryšio terminalai, kuriais galima identifikuoti produktą nuskaitant jo brūkšninį kodą, ir atrinkimo balsu sistema, kuri balso žinutėmis perduoda duomenis operatoriams per ausines, o operatoriai duomenis apie užduočių įvykdymą perduoda balsu per mikrofoną. Pagrindinis šios sistemos privalumas palyginti su radijo ryšio terminalais ir užduočių lapais yra visuomet laisvos operatoriaus rankos. Tai leidžia padidinti užsakymų surinkimo proceso efektyvumą ir sumažinti klaidų skaičių, nes operatoriaus veiksmai nėra ribojami dėl brūkšninių kodų nuskaitymo ar duomenų įvedimo klaviatūra. Atlikta maisto produktų užsakymų surinkimo sistemos analizė parodė, kad naudojant atranką balsu, klaidų skaičių galima sumažinti net 60 % ir ši



sistema leidžia reikšmingiausiai padidinti lėčiausiai dirbančių sandėlio operatorių efektyvumą [56].



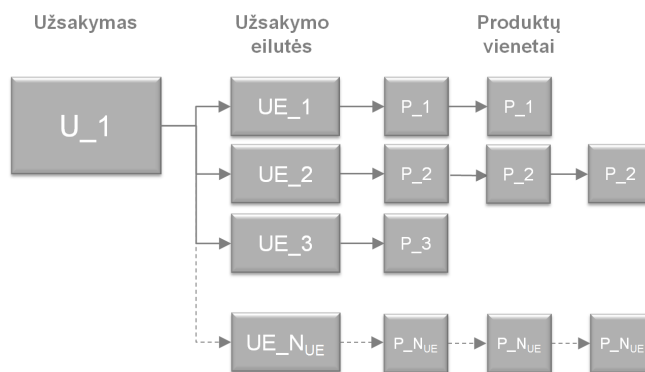
**1.5 pav.** Automatizuoto sandėlio valdymo sistemų sąsajos [57]: a – SVS sąsaja su materialiujų srautų valdymo sistemomis; b – SVS sąsaja su išorinėmis sandėlio sistemomis

1.5 pav. pavaizduota SVS sąsajos su įrenginiais schema: SVS turi sąsają su sandėlio įrenginių valdymo sistema, kuri valdo įrenginių operacijas ir perduoda sandėlio įrenginiams sisteminius pranešimus, kuriuos PV konvertuoja į įrenginių valdymo signalus ir juos interpretuoja. Vienas PV gali valdyti nuo vieno iki keleto įrenginių, pavyzdžiui, automatinio kranų variklis, konvejerio segmentas ar rūšiavimo įrenginys. Paprastai SVS yra integruojama į bendrą įmonės verslo valdymo sistemą (VVS) siekiant užtikrinti greitą ir tikslų sandėlio atsargų duomenų perdavimą kitoms VVS posistemėms, kurios apdoroja duomenis įvairiais pjūviais ir pagal gautus rezultatus sudaro gamybos, pirkimo, pardavimo ar rinkodaros planus. Tačiau sudėtingi šiuolaikiniai logistikos procesai reikalauja plėsti SVS galimybes, ją tiesiogiai integruojant su transporto valdymo sistema (TVS), tiekėjų ir klientų sistemomis [58]. Standartizuotų ir specializuotų SVS sistemų pasirinkimo ir įdiegimo analizė parodė, kad pirminis sistemos pasirinkimas turėtų būti siejamas su sandėlio sistemų valdymo sudėtingumo lygio nustatymu, kuris apibrėžiamas sandėlyje transportuojamų produktų skaičiumi ir surenkamų užsakymų eilučių skaičiumi per dieną [59]. Standartizuotos SVS tinka sandėliams su nesudėtingomis sistemomis, tačiau esant sudėtingiems procesams ir dideliame kiekiui įrenginių su sudėtingomis sąveikomis tarp sistemų, reikalingos specializuotos ir individualiems reikalavimams pritaikytos SVS. Tyrimų rezultatai taip pat parodė, kad projektuojant naujus sandėlius, sistemų funkcionalumą reikia derinti su būsimos SVS galimybėmis, nes nuo suderinamumo lygio priklauso ir sandėlio efektyvumas. Pagal sandėlio sistemų funkcionalumą ir SVS architektūrą sandėlio valdymo strategijos gali būti skirstomos į dvi pagrindines kategorijas [60]: produkcijos likučių valdymas – sandėliavimo strategijų rinkinys, kuris apibrėžia sandėliavimo zonų, produkcijos likučių ir asortimento valdymą, ir paklausos valdymas – užsakymų surinkimo strategijų rinkinys, apibrėžiantis užsakymų surinkimo metodiką. Taigi sandėliavimas ir užsakymų surinkimas yra pagrindiniai sandėlio procesai, kurių pagrindu turi būti projektuojamas sandėlys ir jo sistemos.

Projektuojant sandėlį, taip pat svarbu nustatyti jo efektyvumo vertinimo rodiklius, kuriais būtų galima remtis priimant įvairius techninius sprendimus ir įvertinti pasirinktas alternatyvas. Dauguma autorių, kurie nagrinėjo logistikos centrų efektyvumo vertinimo rodiklius, teigia, kad labai svarbu tikslingai parinkti rodiklius ir jų kieki, nes tai lemia sistemų vertinimo kokybę [61, 62]. Per mažas rodiklių skaičius gali neužtikrinti vertinimo objektyvumo, o didelis jų skaičius reikalauja sudėtingų vertinimo modelių ir metodikų, todėl svarbu tikslingai pasirinkti šiuos rodiklius. Pavyzdžiui, sandėlį vertinant pagal statybos kainą, sistemų pralaidumą, naudingo ploto išnaudojimą, aptarnavimo kainą ar pan., galima kiekybiškai palyginti technologinius sprendimus ir valdymo strategijas bei įvertinti jų tinkamumą keliamiems reikalavimams. Efektyvumo vertinimo modeliai yra sudaromi taikant imitacinio modeliavimo ir analitinius metodus, kurie leidžia įvertinti sandėlių sistemas pagal pasirinktus parametrus ir parinkti sandėlio resursus bei jų valdymo strategijas. Pavyzdžiui, buvo sudarytas transporterių skaičiaus nustatymo imitacinis ir analitinis modeliai pagal sandėlio talpą, kurie įvertina sandėlio užsakymų surinkimo sistemos efektyvumą pagal du esminius rodiklius – sistemos pralaidumą ir jos įrenginių apkrautumą [63]. Konceptualaus sistemų projektavimo etape pralaidumas ir apkrautumas leidžia pakankamai objektyviai įvertinti sistemą ir nustatyti, ar sistema bus pajėgi aptarnauti nustatytą krovinių srautą ir ar įrenginių apkrautumas neviršys nustatytos ribos. Vertinant šiuos rodiklius sistemos projektavimo ir valdymo kainos kontekste galima adekvačiai palyginti skirtingas sistemas ir nustatyti priklausomybę tarp sistemos kainos ir parametrų. Šiuolaikiniai sandėliai reikalauja sudėtingų valdymo sprendimų, todėl labai dažnai yra kuriami imitaciniai jų tyrimo modeliai, nes analitinių modelių taikymas yra ribotas dėl per didelio sistemų valdymo supaprastinimo.

#### 1.4. Užsakymų surinkimo proceso tobulinimas

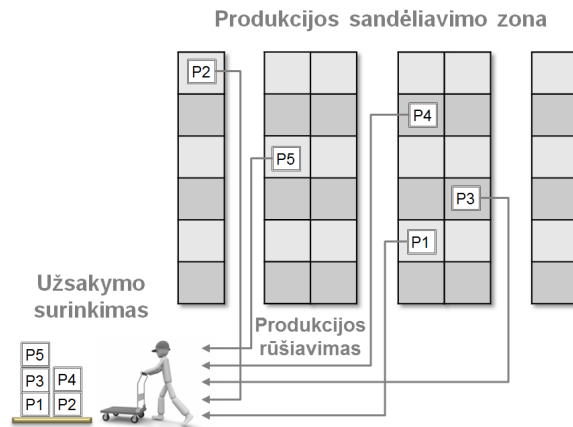
1.2 skyrelyje atlikta pagrindinių sandėlio procesų analizė parodė, kad užsakymų surinkimas yra svarbiausias ir sudėtingiausias sandėlio procesas, reikalaujantis daugiausia sandėlio valdymo kaštų, todėl labai aktualu yra šį procesą tobulinti ir didinti jo efektyvumą.



1.6 pav. Užsakymo struktūra

Užsakymų surinkimo proceso metu sandėliavimo zonoje yra surenkami nurodyti produktų kiekiai, iš kurių formuojami klientų užsakymai. Nepriklausomai nuo kliento pateikiamo užsakymo formato, sandėlio užsakymai yra pateikiami vykdyti naudojant standartizuotą formatą, kuriame nurodomas užsakymo numeris ir užsakymo eilutės, kurių kiekviena yra susieta su tam tikru produkto kiekiu (1.6 pav.). Pagrindinis užsakymo parametras yra jo dydis, kuris paprastai apibrėžiamas eilučių skaičiumi užsakyme, vidutiniu produkcijos vienetų skaičiumi eilutėje ir produkcijos vienetų skaičiumi užsakyme. Sandėlio užsakymai sukuria produkcijos srautus sandėlyje, kurie turi būti optimaliai paskirstomi tarp sandėlio resursų taip, kad užsakymai būtų įvykdomi laiku ir tiksliai. Priklausomai nuo sandėlio paskirties ir aptarnaujamų klientų, sandėlio užsakymų dydžiai gali sudaryti nuo vieno produkcijos vieneto iki kelių padėklų, todėl užsakymo dydis yra esminis kriterijus planuojant sandėlį.

Šiuolaikinės tiekimo grandinės vystymosi tendencijos rodo, kad sparčiai didėja siūlomos produkcijos asortimentas, mažėja vidutinis užsakymo dydis, tačiau didėja bendras aptarnaujamų užsakymų skaičius, ir klientai reikalauja užsakymus įvykdyti per minimalų laiką. Pagrindinė šių pokyčių priežastis yra nuolatinis elektroninės prekybos klientų augimas pasaulyje, kuris leidžia patogiai bet kurio laiku ir bet kurioje vietoje apsipirkti internete išvengiant apsilankymo daugelyje parduotuvių. Elektroninės prekybos užsakymai pasižymi mažu eilučių ir produkcijos vienetų skaičiumi, dideliu užsakymų skaičiumi, trumpu įvykdymo laiku ir paklausos bei sezoniškumo svyravimais [64]. Aptarnaujant elektroninės prekybos užsakymus yra labai svarbu turėti didelį produkcijos asortimentą ir didelius užsakymų surinkimo pajėgumus, kurie leistų daugumą užsakymų įvykdyti tą pačią arba kitą dieną. Elektroninės prekybos teikiama privalumais taip pat pastebimai naudojasi ir prekybininkai, kurie stengiasi sumažinti produkcijos sandėliavimo atsargas parduotuvėse, tuo pačiu sumažindami vidutinį užsakymo dydį iš tiekėjo, tačiau didindami bendrą užsakymų skaičių. Nors prekybininkų užsakymų dydžiai yra gerokai didesni už fizinių klientų pateikiamus užsakymus, tačiau prekybininkai turi daug papildomų reikalavimų užsakymų surinkimui. Vienas iš jų yra specialus produktų išdėstymas užsakymų surinkimo taroje pagal būsimą produktų išdėstymą parduotuvėje, kad būtų minimizuotas produkcijos iškrovimo ir pateikimo laikas klientams parduotuvėje. Kitas svarbus reikalavimas yra maksimalus užsakymų surinkimo taros užpildymas produktais, kad būtų sumažintas bendras užsakymui reikalingų krovinių skaičius, optimizuotas transporto priemonių krovimas ir minimizuoti transportavimo kaštai. Tokio pobūdžio reikalavimai sukuria papildomus apribojimus užsakymų surinkimo procese, nes produktai iš sandėliavimo vietų turi būti surenkami pagal iš anksto apibrėžtą seką, kuri užtikrina, kad užsakymo krovinio paruošimas atitiks kliento keliamus reikalavimus. Šiuolaikiniuose logistikos procesuose produktų rūšiavimas surenkant užsakymus yra labai plačiai taikomas, nes leidžia sumažinti surinktų užsakymų administravimo ir transportavimo kaštus, padidina surinkimo kokybę ir tolesnių užsakymų aptarnavimo etapų efektyvumą.

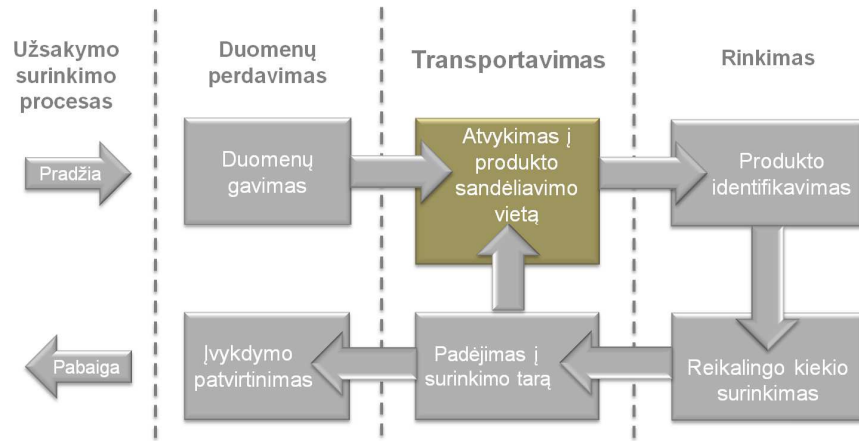


**1.7 pav.** Produkcijos rūšiavimas užsakyme

1.7 pav. pateiktas užsakymo surinkimo pagal nustatytą seką pavyzdys. Surinkimo sekos reikalavimai priklauso nuo tolesnių užsakymų aptarnavimo etapų, kuriuose siekiama didesnio efektyvumo įvairiais aspektais:

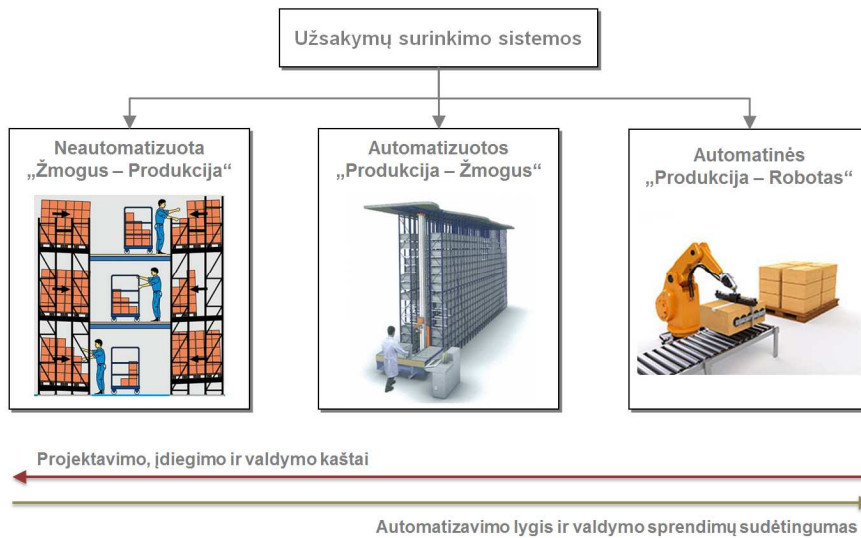
- Minimizuojamas užsakymų administravimo laikas išvežimo iš sandėlio ar atvežimo pas klientą metu, nes operatorius gali greitai patikrinti produkciją pagal pateiktą sąrašą, kuriame produktų seka atitinka jų seką užsakymo krovinyje.
- Minimizuojamas bendras užsakymo užimamas tūris ir padidintas transporto priemonių krovumas, nes parenkamas optimalus produktų išdėstymas užsakymo krovinyje.
- Minimizuojamas produktų išdėliojimo laikas parduotuvėje, nes produktai grupuojami atsižvelgiant į jų išdėstymo reikalavimus parduotuvėje ir nereikalauja papildomo rūšiavimo.
- Sumažėja produktų sugadinimo tikimybė transportavimo metu, nes produktus galima išdėstyti atsižvelgiant į jų pažeidžiamumą.
- Produktus transportuojant į užsakymų konsolidavimo zoną pagal nustatytą seką, galima visiškai automatizuoti pakavimo ir paruošimo išvežti procesus.

Produktų rūšiavimas užsakymų surinkimo metu reikšmingai padidina sandėlio sistemų valdymo sudėtingumą, tačiau tuo pat metu leidžia patenkinti augančius šiuolaikinės logistikos procesų reikalavimus. Sudėtingiems užsakymų surinkimo procesams yra nuolat sprendžiamos efektyvinimo problemos, tačiau pirmiausia reikia nustatyti šio proceso sudedamąsias dalis ir kiekvienai iš jų įvertinti efektyvumo didinimo galimybes pagal pasirinktus parametrus.



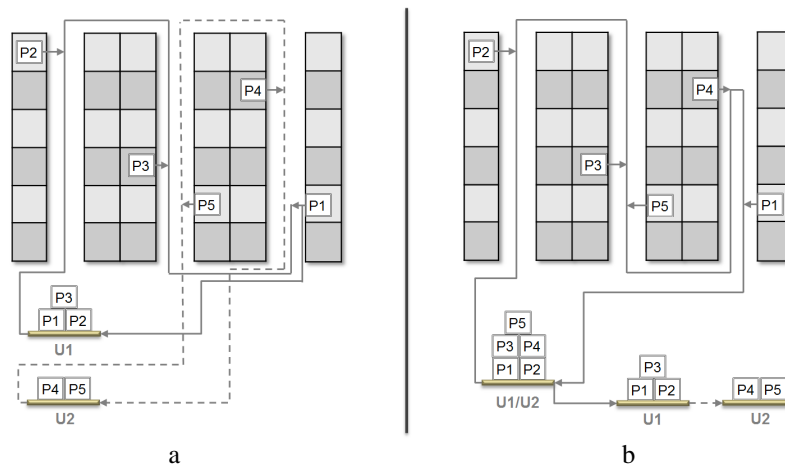
**1.8 pav.** Užsakymo surinkimo procesas

1.8 pav. pavaizduota principinė užsakymo surinkimo proceso schema su pagrindinėmis operacijomis – duomenų perdavimas, transportavimas ir rinkimas. Duomenų perdavimas gali užimti apie 10–20 % bendro laiko, todėl reikia pasirinkti priimtina ir efektyvą perdavimo būdą, kuris leidžia greitai ir aiškiai perduoti užsakymo surinkimo duomenis abiem kryptimis, t. y. surinkimo duomenų pateikimas ir įvykdymo duomenų priėmimas iš operatoriaus. Kaip parodė 1.3 skyrelyje atlikta duomenų perdavimo būdų sandėlyje analizė, taikant elektroninius perdavimo metodus, pvz., radijo ryšio terminalai ar surinkimo balsu sistema, galima reikšmingai padidinti užsakymų surinkimo sistemos efektyvumą ir sumažinti klaidų tikimybę. Transportavimas yra daugiausia laiko sąnaudų reikalaujanti proceso dalis, kuri gali sudaryti 50–70% bendro laiko priklausomai nuo sistemos. Todėl užsakymo surinkimo proceso efektyvinimo uždavinys dažnai laikomas transportavimo laiko minimizavimo uždaviniu. Transportavimo laiką iki tam tikro lygio galima mažinti, taikant įvairius operatorių maršruto optimizavimo algoritmus, tačiau didėjantis šiuolaikinių logistikos procesų sudėtingumas reikalauja ieškoti automatizuotų krovinių transportavimo sprendimų, reikšmingai sumažinančių transportavimo laiką ir žmogiškojo faktoriaus poveikį surinkimo procesui. Modernių logistikos centrų sandėliuose šis laikas yra sumažinamas, krovinių transportavimui panaudojant konvejerius ar AS/RS tipo sistemas. Rinkimo operacijos efektyvumas, kuris gali sudaryti 20–30% bendro laiko, priklauso nuo produktų išdėstymo sandėliavimo vietose ir užsakymo surinkimo vietos ergonomiškumo. Labai svarbu, kad operatoriaus darbo vieta būtų saugi, patogi ir optimizuota jo judėjimo prasme taip, kad reikalingo produkto vienetų skaičiaus surinkimas, sudėjimas į užsakymo krovinį ir perėjimas prie kito užsakymo būtų atliekami per minimalų laiką. Taigi, užsakymo surinkimo proceso efektyvumas priklauso nuo surinkimo sistemos, kuri pirmiausia turi atitikti keliamus projektinius reikalavimus, pasirinkimo, tuo pačiu siekiant anksčiau paminėtų proceso dalių optimizavimo.



1.9 pav. Užsakymų surinkimo sistemų klasifikacija

1.9 pav. pateikta užsakymų surinkimo sistemų klasifikacija pagal automatizavimo lygį. Daugumoje logistikos centrų sandėlių šiandien naudojamos „Žmogus–Produkcija“ tipo užsakymų surinkimo sistemos dėl jų visapusiško paprastumo ir lankstumo. Šio tipo sistemose užsakymai yra surenkami taikant diskretųjį arba grupinį metodą.

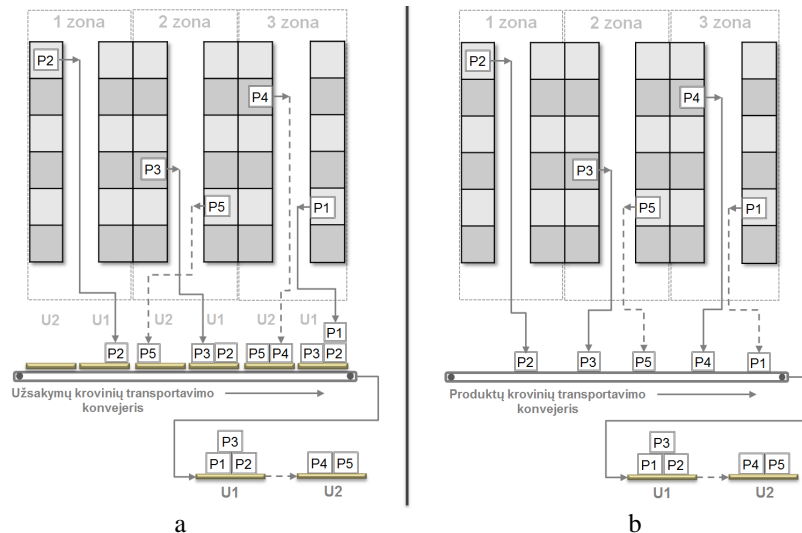


1.10 pav. Užsakymų surinkimo metodo maršrutai: a – diskretusis; b – grupinis

Mažiausiai projektavimo, įdiegimo ir valdymo kaštų reikalauja diskretusis užsakymų surinkimas, kurio metu operatorius surenka užsakymus vieną po kito, t. y. nepradedą kito užsakymo, nepabaigęs einamojo (1.10 pav. a). Šiam metodui taikyti reikalingi tik duomenų perdavimo įrenginiai ir neautomatizuotas surinktų užsakymų krovinų transportavimo įrenginys, kuriame operatorius galėtų sudėti krovinus.

Operatoriui perduodamos užsakymų surinkimo užduotys yra lengvai suprantamos ir surinkimo klaidų tikimybė yra maža, nes vienu metu surenkamas tik vienas užsakymas. Dažnai šis metodas yra vienintelis tinkamas, jei surenkami produktai yra didelių arba specifinių matmenų. Šio metodo esminis trūkumas yra labai didelis transportavimo laikas, nes kiekvieną užsakymą operatorius pradeda rinkti toje pačioje vietoje, į kurią grįžta po kiekvieno užsakymo įvykdymo. 1.10 pav. (a) pavaizduotas klasikinis „S formos“ užsakymo surinkimo maršrutas, kurio metu operatorius aplanko visas stelažų eiles su reikalingais produktais. Šis operatoriaus maršruto sudarymo algoritmas yra standartinis, tačiau transportavimo laiką galima sumažinti, taikant alternatyvius „vidurinio taško“, kai operatoriui leidžiama maksimaliai nueiti iki stelažų eilės vidurio paimti reikiamo produkto, arba „grįžimo“, kai operatorius po reikiamų produktų surinkimo visada grįžta į stelažų eilės pradžią, algoritmus [65].

Grupinis užsakymų surinkimo metodas yra kitas neautomatizuoto užsakymų surinkimo metodo pavyzdys, kuris operatoriams leidžia surinkti keletą užsakymų vieno maršruto per sandėliavimo zoną metu. Šis metodas yra labai tinkamas mažiems užsakymams, tarp kurių yra daug pasikartojančių produktų. Nors šis metodas pastebimai sumažina transportavimo laiką, palyginti su diskrečiuoju, tačiau reikalauja papildomo produktų rūšiavimo, pabaigus produktų surinkimo maršrutą (1. 10 pav.). Dinaminis užsakymų grupavimas yra labai efektyvus metodas surenkant elektroninės prekybos tipo užsakymus, kurie nėra iš anksto žinomi prieš pradedant surinkimo procesą, ir užduotys sandėlio operatoriams yra kuriamos dinamiškai, priklausomai nuo užsakymo priėmimo laiko sandėlio valdymo sistemoje [66].



**1.11 pav.** Zoninis užsakymų surinkimas: a – zonis diskretusis; b – zonis grupinis

Efektyvus užsakymų grupavimo metodas leidžia sumažinti vidutinį užsakymo surinkimo laiką, tuo pačiu metu sumažinant bendrą užsakymo įvykdymo ir

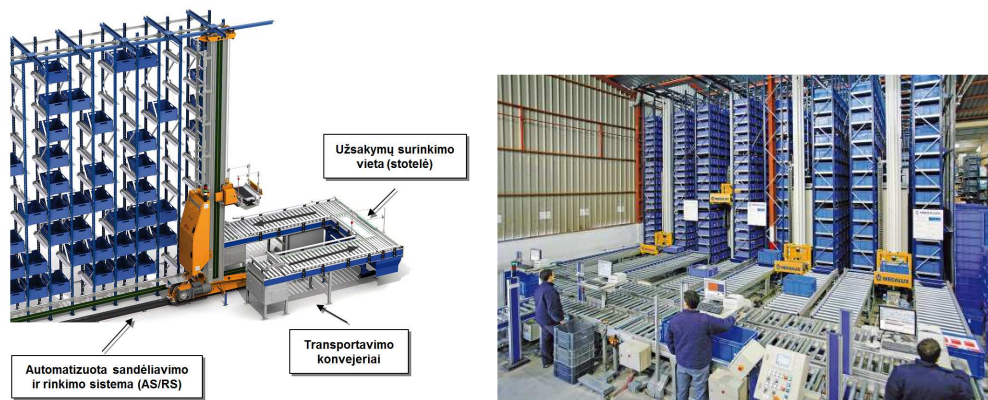
pristatymo laiką, taip pat reikalingą sandėlio operatorių skaičių. Zoninės užsakymų surinkimo sistemos principas yra padalinti produktų sandėliavimo zoną į mažesnes zonas, kuriose būtų sandėliuojami tik tam tikri produktai (1.11 pav.). Šiuo atveju žymiai sumažinamas transportavimo laikas, nes operatorius dirba tik vienoje zonoje, o surinkti produktai iš zonų dažniausiai pristatomi į užsakymų konsolidavimo zoną transportavimo konvejeriais. Zoninis metodas praktikoje gali būti taikomas dviem skirtingais būdais: zoninis diskretusis arba zoninis grupinis. Zoninis diskretusis metodas savo esme yra panašus į anksčiau minėtą diskretųjį užsakymų surinkimą, nes kiekvienas sandėlio operatorius vienu metu aptarnauja tik vieną užsakymą ar jo dalį ir surenka tik savo zonoje esančius reikalingus produktus. Šis metodas turi visus diskrečiojo metodo privalumus, tačiau papildomai leidžia sumažinti krovinių transportavimo laiką, nes operatoriaus darbo zona yra palyginti maža, o užsakymo krovinyms turi aplankyti tik tas sandėliavimo zonas, kuriose yra reikalingi produktai. Zoninio grupinio metodo principas ir privalumai yra tokie pat kaip ir grupinio metodo, nes operatoriai renka tik individualius produktus, kurie skirti tam tikrai užsakymų grupei, ir juos padeda ant sandėliavimo ir užsakymų konsolidavimo zonas jungiančio transportavimo konvejerio. Šis metodas taip pat leidžia naudoti skirtingas sandėliavimo sistemas ir užsakymų surinkimo būdus, pavyzdžiui, dalis užsakymo gali būti surenkama iš padėklų pilnomis dėžėmis, o dalis – iš dėžių atskirais produkto vienetais. Zoninis metodas yra labai lankstus ir leidžia reikšmingai sumažinti krovinių transportavimo laiką, nes galima apibrėžti įvairaus dydžio zonas priklausomai nuo produkcijos asortimento, užsakymų surinkimo reikalavimų ir operatorių pajėgumų. Taip pat kiekvienai zonai galima naudoti skirtingą sandėliavimo sistemą ir automatizacijos lygį, t. y. vienoje zonoje operatoriai gali rinkti produktus didesniais kiekiais tiesiogiai nuo padėklų, o kitoje – mažesnius kiekius iš dėžių; vienose zonose gali būti naudojamas neautomatizuotas valdymas, o kitose – iš dalies ar visiškai automatizuotas. Taikant zoninį užsakymų surinkimo metodą, reikia spręsti operatorių apkrautumo balansavimo, kuris reikšmingai priklauso nuo užsakymų dydžių, produkcijos asortimento ir zonų išdėstymo, problemą tarp skirtingų zonų [67].

Apibendrinant visas „Žmogus–Produkcija“ tipo užsakymų surinkimo sistemas, galima teigti, kad jos yra palyginti nesudėtingai diegiamos ir valdomos, yra lanksčios, nes jas galima nesudėtingai praplėsti arba sumažinti, faktiškai tinka visiems užsakymų ir produktų tipams (kartais tai yra tik vienintelis pasirinkimas) ir turi nemažai efektyvumo galimybių. Vis dėlto šios galimybės yra ribotos iki tam tikro lygio, nes šiose sistemose dominuoja žmogiškasis faktorius, dėl kurio didžiausia užsakymo surinkimo laiko dalis yra reikalinga kroviniams transportuoti ir produktams išrinkti.

„Produkcija–Žmogus“ tipo sistemų naudojimas žymiai padidina užsakymų surinkimo sistemų automatizacijos lygį ir leidžia pasiekti didesnę efektyvumą, kuris dažnai nėra įmanomas naudojant „Žmogus–Produkcija“ tipo sistemas. Pastarojo tipo užsakymų surinkimo sistemose sandėlio operatoriaus darbo vieta (užsakymų surinkimo stotelė) yra fiksuota ir apribota nedideliame judėjimo plote, kuriame

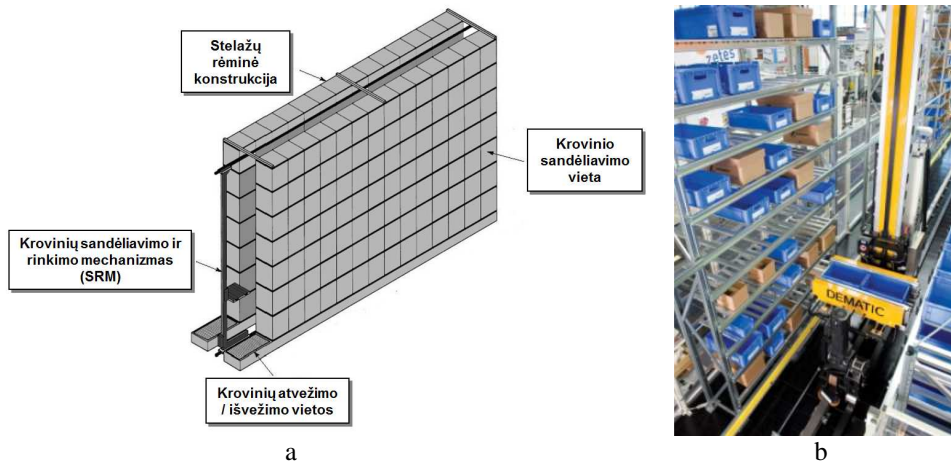


operatorius vykdo užsakymų surinkimą, o reikalingi produktai transportuojami į surinkimo stotelę automatiniiais įrenginiais.



**1.12 pav.** „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemos vizualizacija [68]

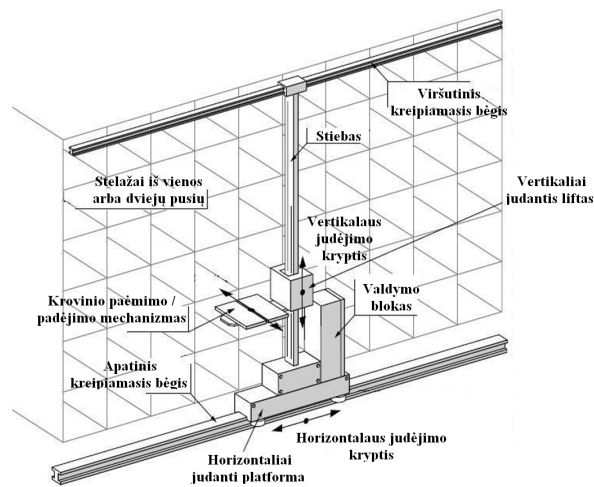
Principinius šios sistemos komponentus sudaro automatizuotos sandėliavimo ir rinkimo sistemos (AS/RS) blokas, užsakymų surinkimo stotelė ir produktų / užsakymų krovinių transportavimo konvejeriai, kurie sujungia sandėliavimo sistemą su surinkimo stotele (1.12 pav.). „Produkcija–Žmogus“ tipo sistemose yra automatizuoti produktų krovinių transportavimo į sandėliavimo vietą, jų paieškos ir išrinkimo procesai, o operatoriaus darbo vieta yra apribota nedideliame plote, į kurį automatiškai transportuojami produktų kroviniai iš sandėliavimo vietų, išvežama tuščia tara ir iš dalies užpildyti produktų kroviniai, atvežama tuščia tara ir išvežami surinkti užsakymų kroviniai [36]. Visų procesų valdymą ir kontrolę atlieka sandėlio valdymo sistema, kuri stebi atvykstančių užsakymų srautą, produkcijos atranką užsakymams ir produkcijos likučių valdymą. Užsakymų surinkimo užduotys stotelėje esančiam operatoriui yra automatiškai ir aiškiai pateikiamos ekrane, todėl operatorius gali greitai ir teisingai jas įvykdyti. Šio tipo sistemos yra beveik nepriklausomos nuo žmonių turimos darbo patirties, nes sprendimai yra priimami automatiškai, o operatoriui reikia tik paimti nurodytą produkto vienetų kiekį ir įdėti į aktyvaus užsakymo tarą pagal ekrane pateiktas lengvai suprantamas instrukcijas. Šios sistemos taip pat leidžia efektyviau užtikrinti produktų saugumą ir kontroliuoti personalo darbą, nes produktų krovinių būsenos duomenys sandėlyje yra nuskaitomi daugelyje sistemos vietų ir automatiškai perduodami į sandėlio valdymo sistemą. Projektuojant „Produkcija–Žmogus“ sistemos sandėliavimo zoną dažniausiai naudojama anksčiau minėta AS/RS tipo sistema, kuri yra populiariausia ir efektyviausia automatizuota krovinių transportavimo sandėlyje technologija, naudojama logistikos centrų sandėliuose ir gamybos pramonėje jau nuo 1950 metų [69]. Pagrindinė AS/RS paskirtis yra sumažinti ir optimizuoti produktų krovinių transportavimo ir atrankos laikus užsakymų surinkimo proceso metu. Šių sistemų panaudojimas leidžia padidinti užsakymų surinkimo sistemos pralaidumą, pagerinti surenkamų užsakymų kokybę ir sumažinti sandėlio operatorių skaičių.



1.13 pav. AS/RS [70]: a – pagrindiniai komponentai; b – vizualizacija

Standartinę AS/RS sudaro šie pagrindiniai komponentai (1.13 pav.):

- o plieninė stelažų rėminė konstrukcija, kurioje yra sandėliuojami kroviniai. Konstrukcijos gamybai naudojamas plienas, kurio stiprumas ir kietumas parenkamas priklausomai nuo sandėliuojamų krovinių svorio (plastikinės dėžės, padėklai ir pan.). Stelažų konstrukcija dažniausiai padalijama į fiksuoto dydžio krovinių sandėliavimo vietas, nes tada tiksliai galima nustatyti krovinių buvimo vietą pagal aukštą ir sandėliavimo vietą. Ši konstrukcija gali būti montuojama į jau pastatytą pastatą arba naudojama kaip pagrindinė pastato konstrukcija. Taip pat šia konstrukcija yra suformuojama viršutinė sandėliavimo ir rinkimo mechanizmo (SRM) atrama. Tokios konstrukcijos aukštis paprastai yra nuo 10 iki 45 metrų aukščio.

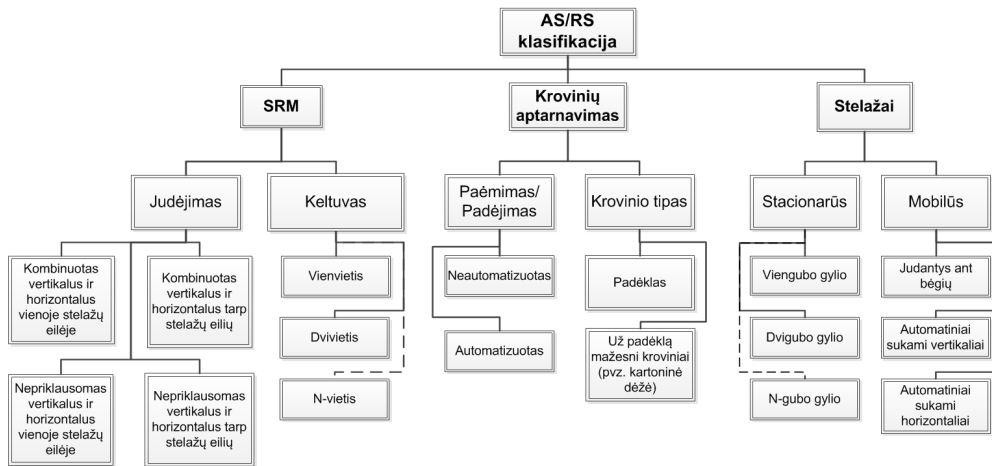


1.14 pav. SRM sandara

- sandėliavimo ir rinkimo mechanizmas (SRM), kuris transportuoja krovinius iš paėmimo vietų į sandėliavimo vietas (sandėliavimo procedūra) ir iš sandėliavimo vietų į padėjimo vietas pagal nustatytą seką (užsakymo rinkimo procedūra). SRM vienu metu gali judėti ir vertikaliai, ir horizontaliai, kad kuo greičiau pasiektų reikalingą krovinio sandėliavimo vietą stelažuose. Standartinį vienvietį SRM sudaro vertikalus stiebas, kuris yra montuojamas prie platformos su ratukais, važinėjančios horizontaliai tarp stelažų (1.14 pav.). Prie stiebo yra montuojamas vertikaliai judantis krovinų paėmimo ir padėjimo mechanizmas (keltuvas), o stiebas yra pritvirtintas prie stelažų viršuje esančio kreipiamojo bėgio, kuris užtikrina kranų centravimą judant tarp stelažų. Priklausomai nuo konfigūracijos, SRM keltuvas gali būti ir daugiavietis, t. y. vienu metu vežti daugiau nei vieną krovinį. Šiuolaikiniai padėklams skirti SRM paprastai vienu metu gali transportuoti iki dviejų padėklų, o mažesniems už padėklą kroviniams (pvz., kartoninės arba plastikinės dėžės) skirti SRM gali transportuoti 8 ar net šiek tiek daugiau krovinų.
- krovinų sandėliavimo vietas, kurios dažniausiai yra fiksuoto dydžio ir jose yra sandėliuojamas vienas krovinio vienetas. SRM transportuojamas krovinys gali būti padėklas, plastikinė ar kartoninė dėžė, specialus padėklas, ant kurio padėtas produktas ir pan. Produktų kroviniai paprastai būna vieno tipo ir fiksuoto dydžio, kad vienodomis sąlygomis galėtų būti transportuojami SRM ir sandėliuojami bet kurioje stelažo vietoje.
- krovinų atvežimo ir išvežimo vietas, kuriose kroviniai atvyksta arba išvyksta iš AS/RS ir yra sukuriama sąsaja su išorinėmis sistemomis. Standartinėje AS/RS konfigūracijoje šios vietos yra stelažų pabaigoje, tačiau jos gali būti išdėstytos bet kurioje vietoje pagal sistemai keliamus reikalavimus.

SVS perduoda atvežamų produktų krovinų ir užsakymams reikalingų išvežamų produktų krovinų vietas stelažuose duomenis kranų valdymo sistemai, kuri valdo krovinų paėmimo / padėjimo ir transportavimo mechanizmus. Kiekviena krovinio sandėliavimo vieta yra nurodoma unikaliu numeriu, kuris priskiriamas į sistemą atvykstantiems produktams su priklijuotais brūkšniniais kodais ar kitokio tipo elektroniniais identifikatoriais su užkoduota krovinio informacija. Krovinų paėmimo vietose yra nuskaitomi atvykstančio krovinio duomenys ir perduodami SVS, kuri parenka sandėliavimo vietą stelažuose. Užsakymų surinkimo metu SVS žino, kur ir kiek produkcijos vienetų yra stelažuose, ir pagal nustatytus kriterijus išrenka krovinį su reikalingu produktu ir sukuria transportavimo operaciją kranui. Kranas transportuoja krovinį į padėjimo vietą, kur krovinio informacija vėl perduodama SVS ir yra nustatomas tolesnis krovinio maršrutas sandėlyje.

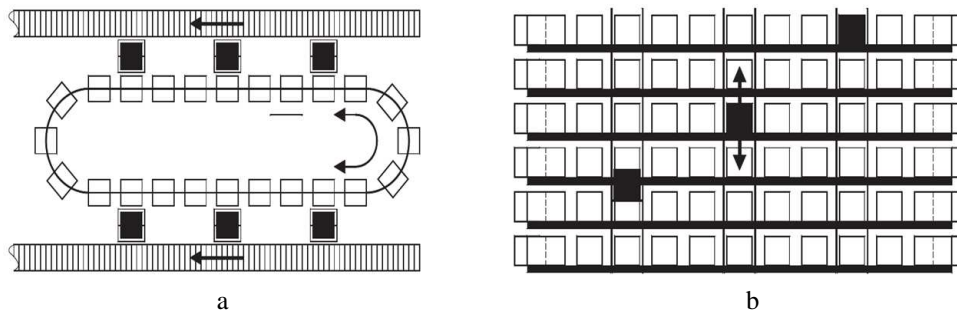
Sparčiai vystantis AS/RS technologijoms, tobulinamos šių sistemų galimybės, keičiasi konfigūracijos ir atsiranda naujų jų tipų [71, 72]. Sistemų klasifikacija pagal pagrindinius kriterijus yra pavaizduota 1.15 pav.



1.15 pav. AS/RS klasifikacija [69]

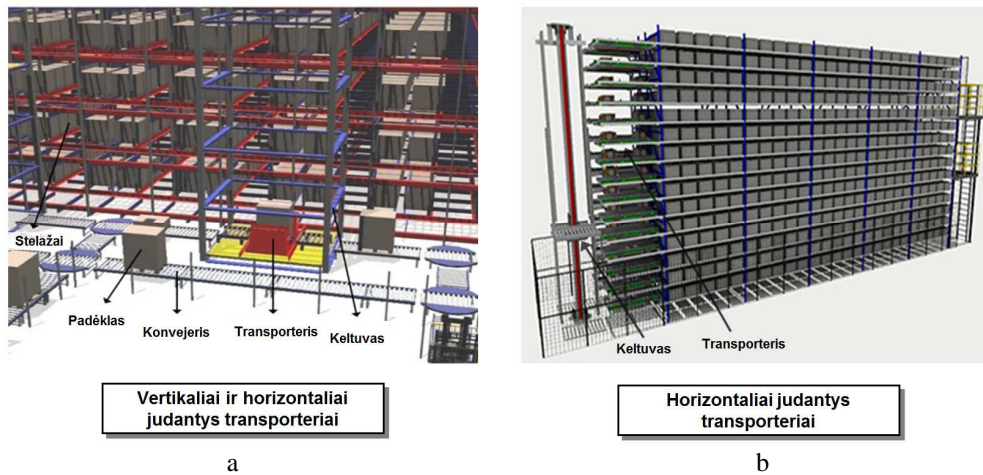
Visas AS/RS galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas – skirtos padėklams ir mažesniems už padėklą kroviniams (dėžėms). Nors abiejų tipų sistemas galima toliau klasifikuoti pagal tuos pačius kriterijus, tačiau skiriasi transportuojamų krovinių svoriai, todėl padėklams skirtos AS/RS turi mažiau konfigūravimo galimybių. Pati paprasčiausia padėklams skirta AS/RS konfigūracija, turinti vienvietį keltuvą ir viengubo gylio stacionarius stelažus, buvo aptarta anksčiau ir jos pavyzdys pateiktas 1.12–1.13 pav. Jeigu sistemoje nėra didelių krovinių srautų, tačiau reikalingas didelis sandėliavimo vietų skaičius, naudojami tarp stelažų eilių važinėjantys SRM, kurių kiekis nustatomas pagal sistemai keliamus pralaidumo reikalavimus. Esant dideliems padėklų srautams naudojami daugiaviečiai keltuvai. Vis dėlto dėl padėklų svorio dažniausiai naudojami vienviečiai arba dviviečiai keltuvai, o padėklų stelažai, nepriklausomai nuo SRM tipo, būna viengubo arba dvigubo gylio.

Dėžėms skirtų AS/RS veikimo ir valdymo principai yra labai panašūs į padėklų sistemas, tačiau dėl mažesnio transportuojamų krovinių svorio ir matmenų šių sistemų SRM gali judėti didesniais greičiais, keltuvų talpa gali siekti 8 ir daugiau krovinių, o stelažai paprastai būna bent dvigubo gylio. Dėl sąlygiškai didelio tokio tipo sistemų pralaidumo jos gali būti tiesiogiai sujungtos su automatizuota užsakymų surinkimo sistema (1.12 pav.). Šio tipo sistemose taip pat gali būti naudojami ir mobilieji stelažai (1.16 pav.), kurie gali būti valdomi nepriklausomai atskirais aukštais ir automatiškai atsukti į reikiamą padėtį, o SRM šiuo atveju užtenka judėti tik vertikalia trajektorija [73].



**1.16 pav.** AS/RS su mobiliaisiais stelažais [73]: a – vaizdas iš viršaus; b – vaizdas iš šono

Pagal naujausias AS/RS vystymosi tendencijas yra įmanomas nepriklausomas SRM judėjimas vertikalčiai ir horizontalčiai, t. y. keltuvai transportuoja krovinis tik vertikalčiai tarp stelažų aukštų, o transporteriai tik horizontalčiai tarp sandėliavimo vietų kiekviename aukšte. Šio tipo sistemos gali būti pritaikomos įvairaus tipo kroviniams transportuoti. Nepriklausomai judantys SRM gali pasiekti didesnius greičius, palyginti su standartiniu SRM (1.14 pav.), vienu metu transportuoti daugiau krovinų ir reikšmingai padidinant sistemos pralaidumą [74].



**1.17 pav.** AS/RS su nepriklausomais SRM [112, 113]: a – padėklams transportuoti skirta sistema; b – dėžėms transportuoti skirta sistema

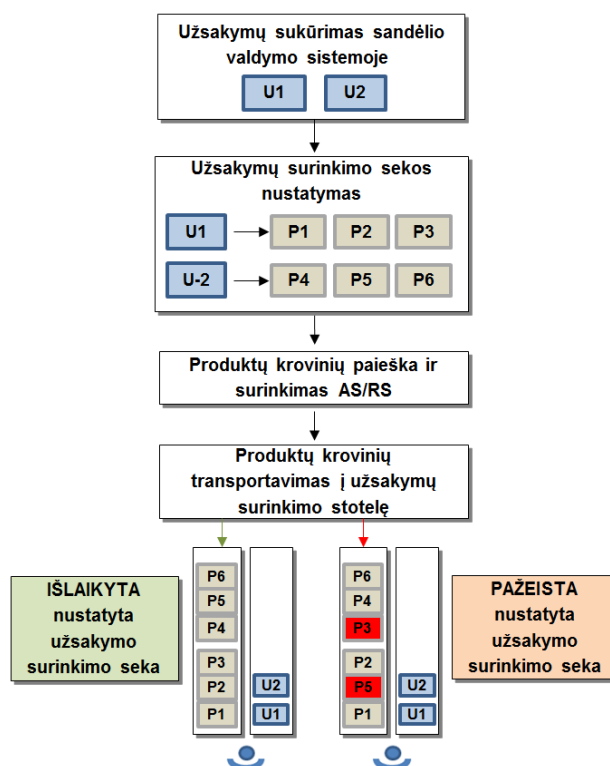
Padėklams skirtos sistemos pavyzdys pateiktas 1.17 (a) pav.: padėklai į šią sistemą atvyksta per krovinų atvežimo ir išvežimo vietas, kur yra paimami vertikalčiai judančio lifto. Priklausomai nuo sistemos konfigūracijos keltuvas gali paimti tik padėklą arba transporterį kartu su padėklą. Toliau keltuvas transportuoja padėklą (arba padėklą su transporteriu) į reikiamą aukštą, kur horizontalčiai judantis transporteris nuveža padėklą į pasirinktą sandėliavimo vietą. AS/RS su

nepriklausomais SRM pasižymi reikšmingai didesniu lankstumu palyginti su klasikinėmis AS/RS [75]. Šio tipo sistemose liftai gali perduoti ne tik krovinius, tačiau ir pačius transporterius kartu su kroviniu tarp aukštų, todėl visada galima parinkti tokį transporterių skaičių, kuris reikalingas planuojamam krovinių srautui aptarnauti, neprarandant galimybės sistemą išplėsti, ateityje pridėdant papildomų transporterių. Šiose sistemose transporteriai turi galimybę judėti ne tik tarp aukštų, bet ir tarp stelažų eilių, todėl galima optimaliai suderinti reikalingą sandėliavimo vietų skaičių su reikalingu transporterių, liftų bei atvežimo ir išvežimo vietų skaičiumi. AS/RS su nepriklausomais transporteriais skirtos dėžėms transportuoti paprastai yra tiesiogiai prijungiamos prie užsakymų surinkimo stotelių ir parenkamas maksimalus liftų ir transporterių skaičius, t. y. liftai kiekvienoje stelažų eilėje su transporteriais kiekviename aukšte. Kitas esminis šių sistemų privalumas yra nepertraukiamas funkcionavimas gedimo atveju. Jei sugenda standartinis SRM, blokuojamas priėjimas prie visų toje stelažų eilėje esančių krovinių, o nepriklausomų SRM atveju blokuojamas tik vienas aukštas vienoje eilėje arba dar mažesnė zona, jei transporteriai gali važinėti tarp stelažų eilių. Vis dėlto šio tipo AS/RS reikalauja sudėtingų valdymo algoritmų siekiant didelio efektyvumo, nes reikia optimaliai paskirstyti krovinių srautus tarp didelio kiekio resursų.

Visų tipų AS/RS gali būti naudojamos „Produkcija–Žmogus“ tipo užsakymų surinkimo sistemose ir leidžia reikšmingai padidinti užsakymų surinkimo efektyvumą įvairiais aspektais:

- optimizuojamas krovinių transportavimo laikas ir produktų atrinkimas iš sandėliavimo vietų stelažuose;
- visiškai automatizuoti produkcijos sandėliavimo ir atrinkimo procesai, kurie leidžia taikyti ir keisti įvairias valdymo strategijas ir efektyviai valdyti sandėliavimo zonoje vykstančius srautus;
- optimizuoja grindų plotą, nes AS/RS stelažai gali būti gerokai aukštesni už neautomatizuotų sandėlių;
- užtikrina visišką produkcijos kontrolę, nes produkcijos judėjimą kontroliuoja sandėlio valdymo sistema;
- optimizuoja produkcijos likučių papildymo srautą ir užtikrina, kad užsakymams reikalingi produktai būtų laiku pristatyti į sandėliavimo zoną;
- leidžia naudoti diskretųjį užsakymo surinkimo metodą, kuris užtikrina didelį tikslumą ir minimizuoja klaidų tikimybę;
- leidžia naudoti automatizuotas užsakymų surinkimo stoteles, kuriose yra optimizuojami operatoriaus judesiai ir pasiekiamas aukštas surinkimo efektyvumas bei optimalus darbo resursų išnaudojimas;
- leidžia sandėlio resursams dirbti lygiagrečiai; produktai į užsakymų surinkimo tarą gali būti surenkami pagal daugelį kriterijų ir reikalavimų, nes reikalingos strategijos yra įdiegiamos į sandėlio valdymo sistemą;
- sistemą ar jos dalį galima visiškai automatizuoti, sandėlio operatorius pakeitus automatiniais robotais.

Nors automatizuotos „Produkcija–Žmogus“ tipo sistemos turi daug pranašumų prieš neautomatizuotas sistemas, tačiau šiose sistemose susiduriama su produktų krovinių rūšiavimo problema pagal užsakymo surinkimo seką, kuri atsiranda dėl lygiagrečiai ir nepriklausomai veikiančių SRM (1.18 pav.).



**1.18 pav.** Produktų krovinių rūšiavimo problema pagal užsakymų surinkimo seką „Produkcija–Žmogus“ sistemose

Ši problema egzistuoja praktiškai visose didelio apkratumo šiuolaikinėse „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemose ir turi neigiamą poveikį bendram užsakymų surinkimo sistemos efektyvumui [79].

### 1.5. Pirmojo skyriaus išvados

1. Logistikos centrai sudaro esminę tiekimo grandinės dalį ir reikšmingai veikia bendrą jos efektyvumą.
2. Šiuolaikiniuose logistikos centruose nuolat susiduriama su krovinių transportavimo ir aptarnavimo operacijų tobulinimo ir efektyvinimo problemomis dėl augančių elektroninės prekybos mastų. Jie reikšmingai padidino sandėliuojamos produkcijos asortimentą ir surenkamų užsakymų skaičių. Siekiant tenkinti individualius klientų poreikius reikšmingai padidėjo pagrindinių sandėliavimo ir rinkimo operacijų bei papildomų operacijų skaičius ir sudėtingumas.

3. Automatizuotų krovinių transportavimo technologijų panaudojimas leidžia reikšmingai padidinti logistikos centrų operacijų efektyvumą, tačiau reikalauja sudėtingesnių projektavimo sprendimų ir išsamesnės daugiakriterinės sistemos analizės, palyginti su neautomatizuotomis operacijomis.
4. Užsakymų surinkimas yra svarbiausia ir sudėtingiausia logistikos centro operacija, kuri sudaro net apie 55 % visų valdymo kaštų, o 85 % operacijos laiko sudaro produkto transportavimas tarp produkcijos sandėliavimo vietų ir reikalingų produktų ieškojimas bei atranka. Todėl, siekiant bendro logistikos centro efektyvumo padidėjimo, yra tikslingiausia optimizuoti ir automatizuoti šią operaciją. Tai leidžia iš esmės pakeisti užsakymų surinkimo sistemos tipą iš „Žmogus–Produkcija“ į „Produkcija–Žmogus“, kurioje produktai yra transportuojami iš sandėliavimo vietų į užsakymų surinkimo vietą, panaudojant automatizuotas krovinių transportavimo technologijas, ir yra minimizuojama transportavimo, ieškojimo ir produktų atrankos trukmė.
5. Atliekant logistikos centro sistemų analizę reikia net tik parinkti optimalius sistemų fizinius struktūros parametrus, bet ir nustatyti jų priklausomybę nuo valdymo parametrų. Sistemos optimizavimas tik statinėje aplinkoje pagal struktūros parametrus yra nepakankamas, kadangi realioje dinaminėje aplinkoje vienodos struktūros sistemų efektyvumas reikšmingai priklauso nuo valdymo parametrų parinkimo. Konceptualiame sistemų efektyvumo vertinime ir palyginime pakanka naudoti du pagrindinius efektyvumo rodiklius – sistemos pralaidumą ir sistemos įrenginių apkrautumą. Jie leidžia adekvačiai palyginti skirtingas sistemas ir parinkti optimalius parametrus.
6. Užsakymų surinkimo efektyvumo didinimo poreikis kyla iš nuolat augančių klientų reikalavimų, iš kurių bene pagrindinis yra užsakymo produktų surinkimas pagal kliento nustatytą seką. Efektyvumas yra tiesiogiai priklausomas nuo užsakymų surinkimo sistemos tipo. Sistemų tipo „Produkcija–Žmogus“ panaudojimas leidžia reikšmingai padidinti efektyvumą, kuris neįmanomas neautomatizuotose sistemose „Žmogus–Produkcija“. AS/RS yra pagrindinė automatizuotos krovinių transportavimo sistemos dalis, kurią naudojant užsakymų surinkimo procese susiduriama su produktų krovinių rūšiavimo problema.

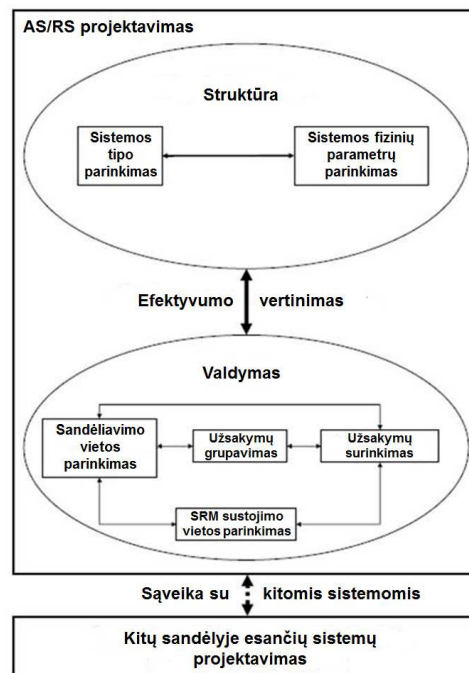


## 2. AS/RS PROJEKTAVIMO, INTEGRAVIMO IR TYRIMŲ METODIKOS

### 2.1. AS/RS struktūros ir valdymo projektavimas

Dėl sąlyginio sistemų nelankstumo konceptualaus AS/RS projektavimo uždaviniai reikalauja išskirtinio tikslumo ir detalumo, nes sistemos turi būti pajėgios apdoroti tiek dabartinius, tiek ateityje prognozuojamus krovinių srautus, išvengti esminių sistemos veikimo sutrikimų ir resursų perkrovimo [80]. Kadangi AS/RS struktūros ir įrangos pakeitimų įgyvendinimas yra gana sudėtingas, o kai kuriais atvejais net ir neįmanomas, reikia iš anksto įvertinti numatomus įmonės verslo pokyčius, ateityje projektuojant tokio tipo sistemas. AS/RS paprastai sudaro tik dalį visos sandėlio struktūros, todėl šios sistemos funkcionavimas yra reikšmingai veikiamas ir tuo pačiu metu pats veikia kitų sandėlyje esančių sistemų funkcionavimą. Krovinių srautų sulaikymai vienoje sistemoje sukelia trikdžius kitose sistemose, todėl labai svarbu tinkamai suderinti skirtingų sistemų sąveiką ir pajėgumus. Pagrindiniai visų AS/RS tikslai yra įvykdyti nustatytas sandėliavimo ir rinkimo užduotis per numatytą laiką ir minimizuoti sandėlio eksploatacijos kaštus.

Pagal 2.1 pav. pateiktą AS/RS projektavimo sprendimų klasifikaciją šių sistemų projektavimas susideda iš struktūros, valdymo strategijų parinkimo ir sąveikos su kitomis sistemomis nustatymo.



2.1 pav. AS/RS projektavimo sprendimų klasifikacija [69]

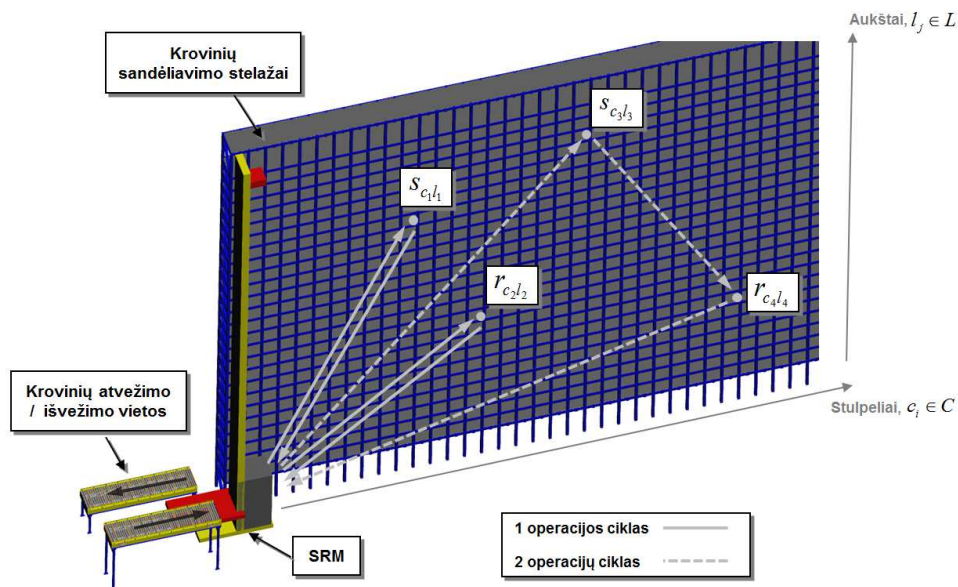
Projektuojant AS/RS struktūrą reikia pasirinkti sistemos tipą ir nustatyti sistemos parametrus, pvz., pagal 2.1 pav. pateiktą klasifikaciją, kuri atitiktų sistemai keliamus pralaidumo ir kainos reikalavimus [81]. Sistemos fiziniai parametrai apima įrenginių parametrų ir sandėliavimo stelažų konfigūracijos parinkimą pagal reikalingų sandėliuoti krovinių skaičių, turimą arba planuojamą pastatą, SRM tipą ir pan. Sistemos tipas ir jos fiziniai parametrai yra dvi viena nuo kitos tiesiogiai priklausančios sprendimų dalys, kurios privalo būti optimaliai suderintos sudarant efektyviai veikiančios sistemos struktūrą.

Sprendžiant tipinį AS/RS struktūros projektavimo uždavinį, reikalingas krovinių sandėliavimo vietų skaičius, o atvežamų ir išvežamų krovinių srautai paprastai yra nustatomi iš anksto ir atitinka sistemai keliamus reikalavimus. Pagal šiuos duomenis ir sandėlio pastato apribojimus (jei tokių yra) yra parenkami reikalingų matmenų stelažai su tam tikru eilių ir aukštų skaičiumi. Atlikti tyrimai parodė, kad tą patį sandėliavimo vietų skaičių gali atitikti daug skirtingų stelažų konfigūracijų, todėl parinkus tam tikrą stelažų eilių ir aukštų konfigūraciją, galima reikšmingai pagerinti SRM ciklą [82, 83]. Kiekvienas SRM tipas ir stelažų konfigūracija atitinka tam tikrą sistemos pralaidumą, todėl šie parametrai turi būti suderinti sistemos kainos, pralaidumo, integravimo su kitomis sistemomis ir išplėtimo galimybių atžvilgiais. Pavyzdžiui, turint vieną ilgą stelažų eilę su greitu vienviečiu SRM, ją galima išskaidyti į dvi trumpesnes eiles su lėtesniais SRM kiekvienoje eilėje ir pasiekti tokį patį sistemos pralaidumą, tačiau šiuo atveju reikia palyginti šių dviejų sistemų įdiegimo ir eksploatacijos kainas.

Nustačius reikalingų stelažų eilių skaičių ir pasirinkus SRM tipą, reikia nustatyti optimalų balansą tarp eilių ilgio ir aukščio. Kadangi standartiniai SRM važiuoja vienu metu abiem kryptimis ir turi 2 greičio (vertikalus ir horizontalus) ir 2 pagreičio parametrus, galima nustatyti optimalų stelažų ilgio ir aukščio santykį, kuris sumažina SRM krovinių transportavimo ciklo laiką [84, 85]. Paprastai stelažai būna stačiakampio formos ir turi vienodo dydžio krovinių sandėliavimo vietas. Šiuolaikinėms sistemoms yra keliami vis aukštesni pralaidumo ir integravimo reikalavimai, todėl sandėliavimo vietos gali būti skirtingų dydžių, sistema gali turėti keletą krovinių atvežimo ir išvežimo vietų ir pan [86].

Pagrindinę AS/RS kainos dalį sudaro struktūros elementai, todėl pirmiausia yra fiksuojami struktūros parametrai, o vėliau priimami sprendimai dėl valdymo strategijų. Pasirenkant SRM tipą būna preliminariai žinomos galimos valdymo strategijos, kurios apibrėžia sistemos veikimą ir gali būti modifikuojamos priklausomai nuo nustatytų struktūros parametrų.

Standartinio vienviečio SRM valdymas yra aprašomas vienos arba dviejų operacijų ciklu, kurio metu yra atliekamos krovinių sandėliavimo ir rinkimo operacijos [87]. Vienos operacijos ciklo metu SRM vykdo tik vieno tipo operaciją, t. y. sandėliuoja arba renka krovinius (2.2 pav.).



2.2 pav. 1 operacijos ir 2 operacijų SRM ciklo pavyzdys

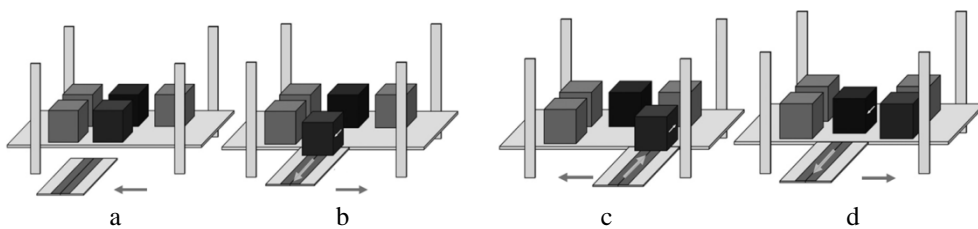
Vienos operacijos ciklo sandėliavimo operacija šiuo atveju yra vykdoma tokia tvarka: SRM paima krovinį iš atvežimo vietos, esančios stelažų eilės pradžioje; transportuoja krovinį iki tuščios sandėliavimo vietos stelažuose  $s_{c_1 l_1}$ , kur jis yra padedamas; o tuščias SRM grįžta į atvežimo / išvežimo vietą. Rinkimo operacija vykdoma analogiškai, tik atvirkštine tvarka: tuščias SRM važiuoja iki krovinio sandėliavimo vietos stelažuose  $r_{c_2 l_2}$ ; krovinytis paimamas iš sandėliavimo vietos; SRM transportuoja krovinį iki išvežimo vietos, kur jis yra padedamas ant transportavimo konvejerio.

2.2 pav. taip pat pateiktas ir dviejų operacijų ciklo pavyzdys, kurio metu vienvietis SRM vykdo sandėliavimo ir rinkimo operacijas, t. y. po sandėliavimo operacijos SRM negrįžta į atvežimo / išvežimo vietą ir iškart vykdo rinkimo operaciją. Dviejų operacijų ciklas yra vykdomas tokia tvarka: SRM paima krovinį iš atvežimo vietos, esančios stelažų eilės pradžioje; krovinytis transportuojamas iki tuščios sandėliavimo vietos stelažuose  $s_{c_3 l_3}$ , kur jis yra padedamas; tuščias SRM toliau važiuoja iki krovinio sandėliavimo vietos stelažuose  $r_{c_4 l_4}$  ir jį paima; SRM transportuoja krovinį iki išvežimo vietos, kur jis padedamas ant transportavimo konvejerio.

SRM valdymas dviejų operacijų ciklu leidžia pasiekti didesnę sistemos pralaidumą palyginti su vienos operacijos ciklu, tačiau AS/RS paprastai yra integruotos užsakymų surinkimo sistemos dalis ir, esant intensyviai užsakymų surinkimo srautui, SRM gali būti nustatytas vykdyti tik rinkimo operaciją, o sandėliavimo operacijas vykdyti sumažėjus užsakymų srautui [87]. SRM gali turėti

ir daugiaviečius keltuvus, kurie leidžia pasiekti dar efektyvesnius ciklus, pvz., SRM su dviviečiu keltuvu gali įvykdyti keturgubą ciklą ir vieno ciklo metu transportuoti iki 4 krovinį, t. y. 2 krovinį sandėliavimo ir 2 krovinį rinkimo operacijos, o esant triviečiam keltuvui SRM gali atlikti ir 6-operacijų ciklą. Skirtingų SRM ciklų įtakos sistemos efektyvumui tyrimai parodė, kad su didesniu keltuvų skaičiumi galima reikšmingai padidinti sistemos efektyvumą palyginti su vienviečiu keltuvu [81]. Tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad daugiaviečiai keltuvai yra brangesni ir reikalauja sudėtingesnių valdymo algoritmų, norint visiškai išnaudoti jų galimybes ir pasiekti gerų rezultatų.

Didesnių negu vieno krovinio gylio stelažų naudojimas leidžia geriau optimizuoti sandėliavimo plotą, tačiau, esant dideliu produkcijos asortimentui, vieno produkto krovinų skaičius stelažuose tampa artimas vienetui, todėl rinkimo metu reikalingas krovinys gali būti galinėje sandėliavimo vietoje ir būti užblokuotas priekyje esančio kito produktų krovinio [88]. Tokiu atveju SRM turi atlikti papildomą krovinų perdėjimo operaciją tam, kad galėtų paimti reikiamą krovinį (2.3 pav.).



**2.3 pav.** Krovinų perdėjimo operacijos etapai [88]

Krovinų perdėjimo operacijos metu SRM paima priekinėje sandėliavimo vietoje esantį krovinį (2.3 pav. a ir b etapai) ir transportuoja jį į arčiausiai esančią laisvą sandėliavimo vietą (2.3 pav. c etapas). Toliau SRM grįžta paimti reikalingo krovinio iš galinės sandėliavimo vietos, kurį transportuoja į atvežimo / išvežimo vietą (2.3 pav. d etapas). Projektuojant AS/RS ir sudarant SRM ciklą, visada stengiamasi minimizuoti perdėjimo operacijų skaičių, nes jos žymiai sumažina bendrąjį ciklo efektyvumą.

2.1 pav. pateiktos pagrindinės AS/RS valdymo strategijos. Sandėliavimo strategijos apibrėžia, kaip bus sandėliuojami į sistemą atvežami kroviniai. Praktikoje dažniausiai taikomos šios trys pagrindinės sandėliavimo strategijos: atsitiktinė, pagal produktų populiarumo klases ir fiksuota [89]. Taikant atsitiktinę sandėliavimo strategiją į AS/RS atvežami kroviniai yra sandėliuojami atsitiktinėse stelažų vietose. Ši strategija yra paprasčiausia įdiegimo prasme ir tolygiai užpildo sandėliavimo vietas stelažuose, tačiau nesuteikia galimybės optimizuoti SRM ciklo. Šią strategiją galima šiek tiek patobulinti dvigubo SRM ciklo atveju leidžiant atvykstantiems kroviniams sandėliavimo vietą rinktis arčiausiai kito išvykstančio krovinio. Šiuo atveju strategija yra tik iš dalies atsitiktinė, tačiau stelažai bus užpildomi tolygiai. Produktų sandėliavimas pagal populiarumo klases gali žymiai pagerinti SRM ciklą,

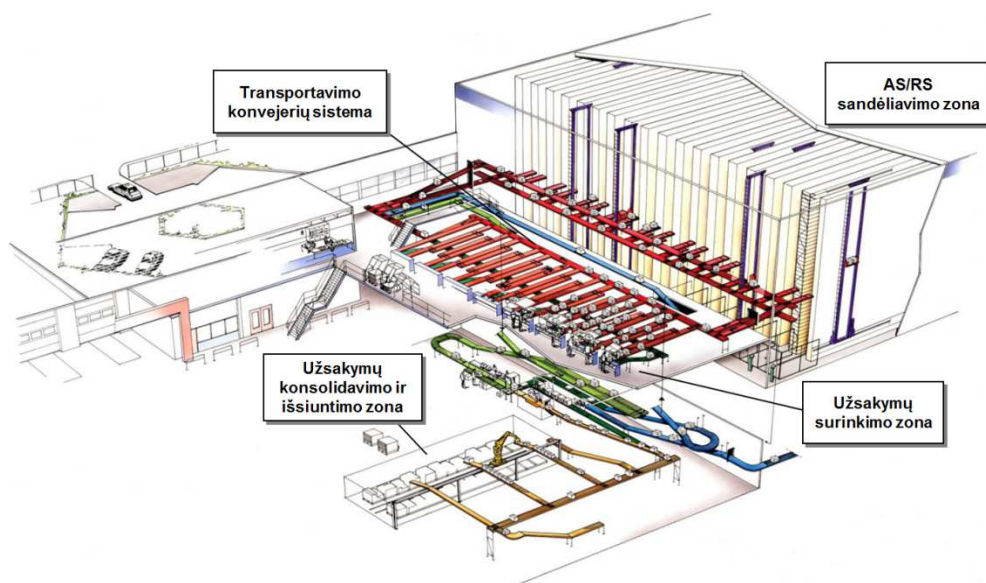
nes produktai yra suskirstomi į klases pagal jų populiarumą užsakymuose ir sandėliuojami taip, kad populiariausi produktai būtų stelažų eilės pradžioje, toliau mažesnio populiarumo, o eilės pabaigoje mažiausiai populiarius produktai. Kiekvienai produktų klasei išskiriamas tam tikras krovinių sandėliavimo vietų skaičius stelažuose, ir atvykstantiems kroviniams vietos parenkamos atsitiktinai iš atitinkamos grupės [90]. Atlikti tyrimai parodė, kad, taikant šią strategiją, galima reikšmingai padidinti sistemos pralaidumą, palyginti su atsitiktine sandėliavimo strategija [91]. Reikėtų pabrėžti, kad ši strategija taip pat žymiai priklauso nuo įmonės užsakymų profilio ir naudojamo produkcijos asortimento, nes jei įmonei yra sunku planuoti užsakymus (pvz., elektroninė prekyba) ir produktų negalima suskirstyti į klases, nes nuolat kinta jų populiarumas, tuomet šios strategijos teigiamas poveikis sistemos efektyvumui bus minimalus. Visų fiksuotų sandėliavimo strategijų tikslas yra parinkti konkrečią sandėliavimo vietą kiekvienam produktui pagal pasirinktus kriterijus, pvz., kiekvienam produktui yra priskiriamas apyvartumo koeficientas ir produktai su didžiausia šio koeficiento reikšme yra sandėliuojami stelažų eilės pradžioje. Kitas kriterijus gali būti numatomas produkto išvežimo laikas – anksčiausiai išvežami produktai sandėliuojami stelažų eilės pradžioje. Iš tiesų naudojamos ir įvairios hibridinės sandėliavimo strategijos, kurios sujungia kelias anksčiau minėtas strategijas, tačiau jos negali būti taikomos bendruoju atveju ir apibrėžiamos tik konkrečiai sistemai [92].

SRM sustojimo vietos parinkimo strategija nurodo, kur SRM turi važiuoti po paskutinės įvykdytos operacijos, jei būsimų operacijų sąrašas yra tuščias. Šios strategijos tikslas yra parinkti SRM sustojimo vietą taip, kad artimiausio ciklo laikas būtų minimizuotas [93]. Praktikoje skiriamos šios pagrindinės sustojimo vietos parinkimo strategijos: pasilikti paskutinės operacijos vietoje, važiuoti į krovinių atvežimo / išvežimo vietą, važiuoti į stelažų eilės vidurį. Visos trys strategijos yra statiškos, tačiau galima taikyti ir dinaminę strategiją, kuri parenka sustojimo vietą pagal prognozuojamą kitą SRM operaciją. Tačiau šios strategijos parinkimas turi prasmės tik nedidelio arba vidutinio apkrautumo sistemose, nes didelio apkrautumo sistemose SRM vykdomų operacijų sąrašas retai kada būna tuščias [94].

Užsakymų surinkimo strategijos apibrėžia taisykles, kaip užsakymams priskirti produktų kroviniai bus surenkami iš sandėliavimo vietų. Standartinis surinkimas yra vykdomas FIFO (angl. *First In First Out*) principu, t. y. visi užsakymai apdorojami iš eilės, pagal atvykimo į sistemą laiką. Užsakymai gali būti taip pat surenkami, siekiant minimizuoti SRM ciklo laiką pagal užsakymų įvykdymo prioritetus ir pan. [95]. Užsakymai grupuojami siekiant minimizuoti bendrą produktų krovinių srautą tarp AS/RS ir užsakymų surinkimo stotelių. Užsakymai yra grupuojami pagal sutampančius produktus ir grupėmis priskiriami užsakymų surinkimo stotelėms taip, kad iš kiekvieno į stotelę atvykusio krovinio produkto vienetai būtų dedami ne į vieną, tačiau į keletą užsakymų krovinių [96]. Šiuo atveju yra reikšmingai minimizuojamas iš AS/RS išvykstančių krovinių srautas, tačiau efektyvus grupavimas įmanomas ne visais atvejais ir priklauso nuo įmonės užsakymų profilio ir produkcijos asortimento.

## 2.2. AS/RS integravimas į automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą

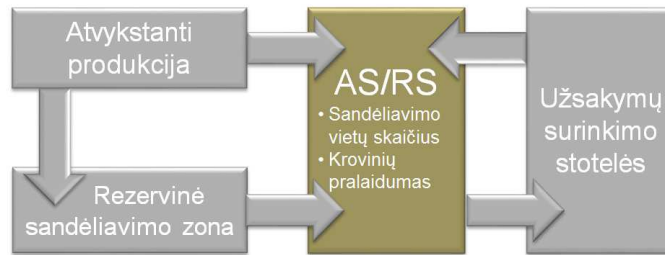
Visais AS/RS taikymo atvejais ši sistema tiesiogiai sąveikauja su kitomis logistikos sandėlio sistemomis, todėl AS/RS projektavimo sprendimai turi būti suderinti su kitomis sandėlio sistemomis, kad būtų užtikrintas sklandus visų sistemų funkcionavimas.



2.4 pav. Automatizuota užsakymų surinkimo sistema [97]

2.4 pav. pateiktas AS/RS automatizuotos užsakymų surinkimo sistemos pavyzdys, kuriame AS/RS atlieka savo standartines funkcijas – surenka krovinus užsakymams ir sandėliuoja atvežamus krovinus iš produkcijos priėmimo ir užsakymų surinkimo zonų. Į sandėlį atvežami produktų kroviniai yra paruošiami sandėliuoti AS/RS ir transportuojami ant konvejerių į sandėliavimo zoną, kurioje laukia užsakymų surinkimo operacijos. Užsakymų surinkimo operacijos metu sandėlio valdymo sistema sandėliavimo zonoje suranda užsakymams reikalingus produktų krovinus ir sukuria rinkimo operacijas SRM, kurie transportuoja krovinus į atvežimo / išvežimo vietas. Toliau produktų kroviniai transportuojami ant konvejerių į užsakymų surinkimo stoteles, kuriose sandėlio operatoriai atlieka užsakymų surinkimo operaciją ir paruošia užsakymų krovinus. Transportavimo konvejerių sistema sujungia kiekvieną AS/RS stelažų eilę su kiekviena užsakymų surinkimo stotele, todėl produktai iš bet kurios sandėliavimo vietos stelažuose gali būti transportuojami į bet kurią stotelę. Toks sistemos lankstumas leidžia keisti aktyvių stotelių skaičių priklausomai nuo krovinų srauto, o sugedus SRM, sistema gali ir toliau funkcionuoti, nes blokuojamas priėjimas tik prie vienoje stelažų eilėje esančios produkcijos, o reikalingus produktus dažniausiai galima surasti ir kitose stelažų eilėse. Surinkti užsakymų kroviniai transportuojami į užsakymų

konsolidavimo zoną, paruošiami išsiųsti ir pakraunami į išvykstančias transporto priemones.

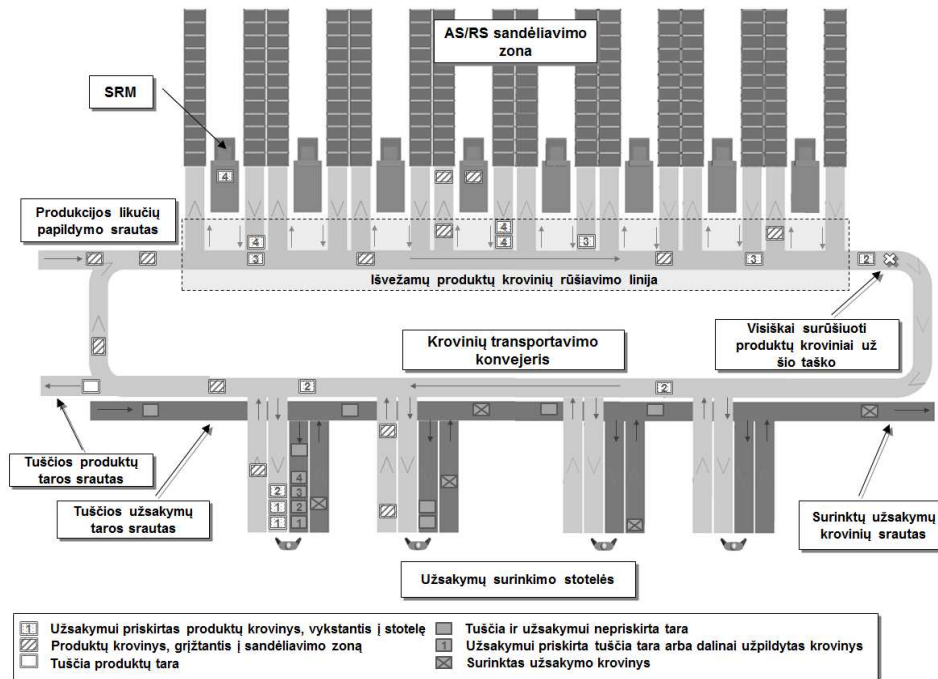


**2.5 pav.** Principinė AS/RS integravimo į automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą schema

2.5 pav. pateikta principinė AS/RS integravimo į automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą schema dažniausiai naudojama „Produkcija–Žmogus“ tipo sistemose. Integruojama AS/RS turi atitikti du pagrindinius užsakymo surinkimo proceso reikalavimus – užtikrinti reikalingą sandėliavimo vietų skaičių stelažuose visiems užsakymų rinkimo procese dalyvaujantiems produktų kroviniais ir reikalingą krovinių pralaidumą į užsakymų surinkimo stoteles. Sandėliavimo vietų skaičius yra nustatomas įvertinus produktų sandėliavimo galimybes AS/RS, jų suvartojimo kiekius užsakymų surinkimo proceso metu ir bendrą surenkamų užsakymų skaičių. Reikėtų pabrėžti, kad ne visi produktai gali būti sandėliuojami AS/RS dėl jų matmenų arba netinkamo produkto ir sandėliavimo vietos AS/RS kainų santykio (sandėliavimo vietos išlaikymo vertė gerokai viršija sandėliuojamo produkto vertę), todėl tokius produktus reikia nustatyti atliekant sandėlio produkcijos ir krovinių srautų analizę. Šiuolaikinėse didelio pralaidumo automatizuotose užsakymų surinkimo sistemose dažniausiai yra naudojama rezervinės sandėliavimo zonos ir AS/RS kombinacija, nes sandėliuose yra labai daug produkcijos, tačiau ne visi produktai dalyvauja užsakymų surinkimo procese vienu metu, arba turint tik vieną AS/RS neįmanoma jos efektyviai sujungti su užsakymų surinkimo stotelėmis. Automatizuotuose sandėliuose rezervinė zona paprastai būna sudaryta iš vienos ar kelių nuosekliai sujungtų AS/RS. Kadangi sistemos kaina yra tiesiogiai susijusi su jos pralaidumu, stengiamasi minimizuoti didžiausio pralaidumo AS/RS, sujungtos tiesiogiai su užsakymų surinkimo stotelėmis, dydį, prie jos prijungiant vieną ar daugiau mažesnio pralaidumo AS/RS. Kiekvienos AS/RS struktūros ir valdymo parametrai yra parenkami pagal 2.1 skyrelyje aprašytus metodus, užtikrinant, kad AS/RS arba jų kombinacija bus pajėgi transportuoti reikalingą krovinių srautą į užsakymų surinkimo stoteles. Fiksavus AS/RS pasirinkimą, tarp sistemos dalių nustatomos konvejerių jungtys, kurios turi sugebėti transportuoti reikalingus krovinių srautus, ir parenkamas užsakymų surinkimo stotelių skaičius, kuris efektyviai apkrauna AS/RS sistemą. Projektuojant transportavimo konvejerius, reikia nuspręsti, kaip AS/RS bus integruojama su

užsakymų surinkimo stotelėmis, kaip bus aptarnaujama ir transportuojama tuščia produktų ir užsakymų tara bei surinkti užsakymų kroviniai.

2.6 pav. pateikta supaprastinta (tik tiesioginės užsakymų surinkimo proceso dalys) standartinė „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo schema, kuri dažniausiai naudojama mažesniems už padėklą kroviniams (dėžėms) transportuoti ir aptarnauti [76, 77].



2.6 pav. „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemos schema

Sistemą sudaro trys pagrindinės dalys: sandėliavimo zona su integruota AS/RS, užsakymų surinkimo stotelės ir krovinų transportavimo konvejeriai. Sandėliavimo zoną sudaro reikalingo gylio stelažų eilių skaičius, kuris apibrėžia sandėliavimo vietų skaičių AS/RS ir yra nustatomas įvertinus užsakymų surinkimui reikalingą produkcijos asortimentą ir produkcijos suvartojimo dažnį užsakymų surinkimo metu. Kiekvienoje sandėliavimo vietoje yra laikomas vienas krovinys, paprastai tai plastikinė dėžė su vienos rūšies produkto vienetais. Standartinėje sistemos konfigūracijoje kiekvienoje stelažų eilėje yra vienas SRM, kurio tipas ir parametrai parenkami pagal į AS/RS atvežamų ir išvežamų krovinų srautų dydžius. Stelažų eilės pradžioje yra SRM krovinų atvežimo / išvežimo vietos su fiksuotos talpos konvejeriais, kurie sujungia AS/RS su krovinų transportavimo sistema į užsakymų surinkimo stoteles. Sandėliavimo srautą sudaro atvežami produkcijos likučių papildymo ir iš stelių grįžtantys iš dalies užpildyti produktų kroviniai, kurie yra sandėliuojami stelažuose, o vėliau renkami pagal stotelėse surenkamus užsakymus. Sandėlio valdymo sistema nuolat seka kiekvieno produkto kiekį



sistemoje ir generuoja produkcijos papildymo srautą iš kitų sandėliavimo sistemų pagal nustatytus parametrus. Iš dalies užpildytų produktų krovinių srautą sudaro tokie kroviniai, kuriuose po užsakymo surinkimo operacijos yra likęs bent vienas produkto vienetas. Sandėlio valdymo sistema kiekvienam atvykstančiam kroviniui parenka sandėliavimo vietą stelažuose ir krovinsys yra transportuojamas į atitinkamą atvežimo vietą ant konvejerio, kur laukia SRM sandėliavimo operacijos.

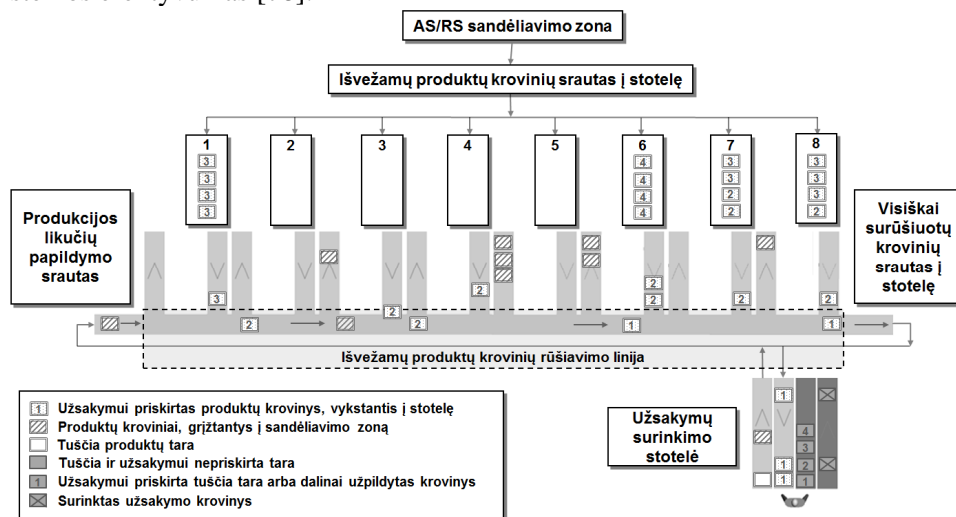
Produktų krovinių surinkimo srautą iš AS/RS sukuria sandėlio valdymo sistema, kuri nusprendžia, kada ir kuriuos užsakymus paleisti vykdyti į stoteles. Prieš paleisdama užsakymą vykdyti, sistema kiekvienai užsakymo eilutei suranda reikalingą produktų krovinių AS/RS su pakankamu vienetų skaičiumi ir sukuria krovinių rinkimo operaciją SRM. Bendru atveju kiekvienas užsakymas sukuria unikalią krovinių transportavimo grupę iš AS/RS į konkrečią stotelę, kurioje esantys produktai priklauso tik tam užsakymui ir negali būti naudojami surenkant kitus užsakymus. SRM atrinktus krovinius transportuoja į išvežimo vietas, kur jie patenka ant konvejerio ir yra transportuojami į priskirtą užsakymo surinkimo stotelę.

Produktai iš bet kurios stelažų eilės gali būti transportuojami į bet kurią stotelę, o produktų kroviniui atvykus į stotelę, operatorius iš jos paima reikalingą produkto vienetų kiekį ir įdeda į užsakymo krovinį. Vienas užsakymas gali sudaryti vieną arba keletą krovinių, o produktų paskirstymą į krovinius gali atlikti tiek sandėlio valdymo sistema, tiek pats operatorius surinkimo proceso metu. Užpildžius užsakymo krovinį, operatorius siunčia patvirtinimą sandėlio valdymo sistemai ir užsakymo krovinsys yra transportuojamas ant konvejerių į užsakymų konsolidavimo / išsiuntimo arba tolesnės operacijos zoną. Tuščia tara yra transportuojama į taros aptarnavimo zoną, o iš dalies užpildyti kroviniai grįžta į sandėliavimo zoną AS/RS.

„Produkcija–Žmogus“ sistemos veikimo principas yra paremtas lygiagrečiu didelio kiekio užsakymų aptarnavimu, todėl beveik visais atvejais AS/RS sudaro daugiau nei viena stelažų eilė tam, kad būtų pasiektas didelis šios sistemos pralaidumas visiems SRM dirbant lygiagrečiai ir nepriklausomai. Vykstant užsakymų surinkimo procesui, kiekvienas SRM nepriklausomai nuo kitų surenka užsakymams priskirtus produktų krovinius ir juos transportuoja į atvežimo / išvežimo vietas, kur kroviniai toliau patenka į transportavimo konvejerių sistemą. Idealiu atveju visi kroviniai iš AS/RS turėtų patekti ant rūšiavimo linijos be jokio užlaikymo, tačiau priklausomai nuo ASRS stelažų eilių skaičiaus, produkcijos asortimento dydžio ir produktų krovinių išdėstymo stelažuose, dažnai yra neįmanoma optimaliai paskirstyti krovinių srautą tarp nepriklausomai veikiančių SRM, todėl be papildomų priemonių neįmanoma užtikrinti reikalingos produktų krovinių sekos atvykimo į užsakymų surinkimo stotelę ir ši seka yra pažeidžiama, kaip buvo parodyta anksčiau 1.18 pav.

Iš esmės visose „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemose yra susiduriama su produktų krovinių rūšiavimo pagal užsakymų surinkimo seką stotelėje problema, tačiau poveikis sistemos efektyvumui priklauso nuo pasirinktos konfigūracijos. Praktikoje yra skiriami trys pagrindiniai šios problemos sprendimo būdai, iš kurių populiariausias yra rūšiavimo konvejerio linijos naudojimas [79].

Rūšiavimo linijos paskirtis yra užtikrinti produktų krovinių transportavimo seką į stotelę, kuri atitiktų stotelei priskirtų užsakymų surinkimo seką. Taikant šį metodą kroviniai yra sustabdomi ant rūšiavimo linijos įėjimo konvejerių prieš patenkant ant bendros linijos, kad būtų užtikrinta reikiama produktų pristatymo seka į stotelę. Tačiau krovinius užlaikant ant rūšiavimo linijos įėjimo konvejerio, po tam tikro laiko šis konvejeris yra užpildomas ir blokuojama SRM rinkimo operacija, nes SRM neranda laisvų atvežimo vietų, kuriose galėtų padėti krovinius. Dėl šios priežasties reikšmingai sumažėja SRM pralaidumas ir bendras visos užsakymų surinkimo sistemos efektyvumas [78].



2.7 pav. Išvežamų produktų krovinių rūšiavimo linijos schema

2.7 pav. pateikta supaprastina produktų krovinių rūšiavimo linijos veikimo schema vienos užsakymų surinkimo stotelės atveju. Šiame pavyzdyje užsakymų  $U_1$  ir  $U_2$  produktų krovinių sandėliavimo vietos pakankamai tolygiai pasiskirsčiusios tarp visų stelažų eilių, todėl ir visi SRM yra pakankami tolygiai apkraunami ir transportuoja krovinius į išvežimo vietas beveik vienu metu, o krovinių užlaikymas ant rūšiavimo linijos įėjimo konvejerių yra minimalus. Užsakymų  $U_3$  ir  $U_4$  krovinių sandėliavimo vietų pasiskirstymas yra netolygus, todėl visi produktų kroviniai iš stelažų eilės nr. 6 bus užlaikyti ant rūšiavimo linijos įėjimo konvejerių tol, kol visi užsakymo  $U_3$  produktų kroviniai pravažiuos pro šią stelažų eilę.

Antrasis transportavimo sekos užtikrinimo būdas yra produktų krovinių rūšiavimas pačioje stotelėje panaudojant greitą ir kompaktišką AS/RS tipo rūšiavimo įrenginį, kuris leidžia visiškai atsisakyti rūšiavimo ant konvejerio linijos ir yra pajėgus surūšiuoti visus į stotelę atvykstančius produktų krovinius pagal užsakymų surinkimo seką. Trečiasis siūlomas būdas yra produktų krovinių srauto iš AS/RS į stotelę ribojimas, vienu metu transportuojant tik vieno užsakymo produktų krovinius, t. y. AS/RS gali pradėti transportuoti būsimo užsakymo produktų krovinius tik paskutiniam kroviniumi iš aktyvaus užsakymo atvykus pas operatorių.

Šis būdas nereikalauja jokio rūšiavimo ir papildomų įrenginių stotelėje, tačiau labai riboja krovinių srautus sistemoje ir neleidžia pasiekti didelio užsakymų surinkimo efektyvumo sistemoje.

Produktų krovinių rūšiavimo problema yra ypač aktuali visiškai automatizuotose užsakymų surinkimo sistemose, kurių principinė schema beveik sutampa su 2.6–2.7 pav. pateikta „Produkcija–Žmogus“ sistemos schema, tik užsakymų surinkimo operatorius yra pakeičiamas automatiniu surinkimo įrenginiu. „Produkcija–Žmogus“ sistemose produktų seka užsakymo krovinyje kai kuriais atvejais gali būti ir neaktuali, todėl yra sumažinamas krovinių rūšiavimo apribojimas, nes griežta tvarka yra reikalinga tik tarp skirtingų užsakymų krovinių. Visiškai automatizuotose sistemose yra reikalinga griežta tvarka ne tik tarp užsakymų krovinių, bet ir tarp surenkamų produktų, nes sandėlio valdymo sistema nustato optimalią produktų surinkimo į užsakymų krovinių seką, kurią reikia išlaikyti iki pat atvykimo į stotelę.

### 2.3. AS/RS efektyvumo rodiklių tyrimų ir analizės modeliai

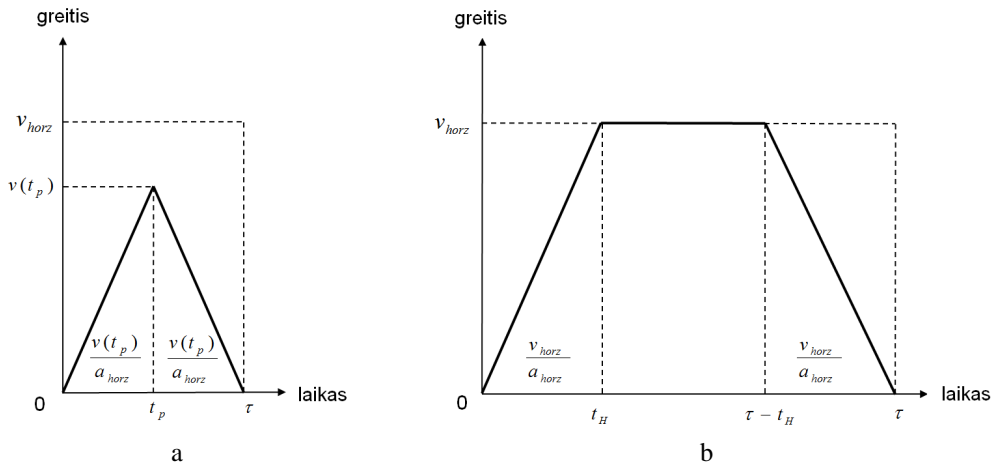
Automatizuotų sandėlių sistemos pasižymi dideliu dinamiškumu, sudėtingais valdymo algoritmais, daugialype sąveika tarp sistemų ir atskirų jos komponentų, todėl projektuojant tokio tipo sistemas būtina įvertinti jų efektyvumą panaudojant pasirinktus tyrimų ir analizės modelius. Efektyvumo vertinimo modeliai leidžia įvertinti projektuojamos sistemos ar jos dalies tinkamumą keliamiems reikalavimams ir nustatyti tobulinimo galimybes. Jie yra skirstomi į dvi pagrindines kategorijas – analitinius ir imitacinius.

Analitiniai modeliai yra nepakeičiami ankstyvuose sistemos planavimo etapuose, kai žinoma tik labai abstrakti informacija apie projektuojamą sistemą, nes leidžia greitai įvertinti sistemų efektyvumą, parinkti optimalias parametrų reikšmes ir palyginti alternatyvias konfigūracijas. SRM krovinių transportavimo laiko įvertinimo modelis yra dažniausiai taikomas AS/RS sistemų analizei ir leidžia įvertinti SRM krovinių sandėliavimo ir rinkimo operacijų laikus ir nustatyti bendrą SRM ciklo laiką, kuris yra atvirkščiai proporcingas sistemos pralaidumui – maksimaliam krovinių skaičiui, kurį SRM gali transportuoti iš atvežimo vietų į sandėliavimo vietas ir iš sandėliavimo vietų į išvežimo vietas per nustatytą laiko intervalą. Įvertinus vieno SRM pralaidumą yra nusprendžiama apie visos AS/RS dydį ir jos integravimą į užsakymų surinkimo sistemą, turint omenyje tai, kad sistemos pralaidumas proporcingai didėja didinant stelažų eilių skaičių.

Supaprastintuose SRM transportavimo laiko modeliuose daroma prielaida, kad SRM važiuoja pastoviu vidutiniu greičiu vertikaliai ir horizontaliai nepriklausomai. Taikant šią prielaidą ir atsitiktinę krovinių sandėliavimo strategiją (kroviniai yra sandėliuojami atsitiktinai parenkamose sandėliavimo vietose), vienviečio SRM 1 operacijos ciklo vidutinis krovinių transportavimo laikas yra lygus

$$E[\tau_{SC}] = \tau \left[ 1 + \frac{Q^2}{3} \right], \quad (2.1)$$

čia  $\tau = \max(\tau_V, \tau_H)$ ,  $Q = \min(\tau_V, \tau_H) / \tau$ ,  $\tau_V$  – maksimalus SRM važiavimo laikas vidutiniu greičiu  $v_{vert}$  vertikalia kryptimi,  $\tau_H$  – maksimalus SRM važiavimo laikas vidutiniu greičiu  $v_{horz}$  horizontalia kryptimi. Pagal šią metodiką taip pat yra sudaromi modeliai 2 operacijų ciklo, daugiaviečio ir nestandartinių SRM atveju esant įvairiems sandėliavimo ir rinkimo algoritmams [98]. Pagrindinis šių modelių trūkumas yra prielaida apie pastovų vidutinį SRM greitį, kuri yra labai reikšminga praktiniuose taikymuose, nes SRM vidutinį greitį galima apskaičiuoti tik žinant stelažų konfigūraciją ir judėjimo pagreičius abiem kryptimis. Dėl šios priežasties rekomenduojama rinktis tikslesnius SRM transportavimo laiko modelius, kuriuose yra įvertinami vertikalaus ir horizontalaus judėjimo pagreičiai.



**2.8 pav.** SRM horizontalaus judėjimo greičio ir laiko priklausomybė [99]: a – 1 tipas; b – 2 tipas

Šiuose modeliuose yra išskiriami du galimi SRM judėjimo su pagreičiu tipai [99], kurie pateikti 2.8 pav. SRM judant horizontaliai, kai nėra pasiekiamas maksimalus greitis  $v_{horz}$  ir tenkinama sąlyga  $\tau < 2v_{horz} / a_{horz}$  (1 judėjimo tipas), judėjimo greitis laiko momentu  $t$  yra lygus

$$v(t) = \begin{cases} a_{horz}t & t \in [0, t_p] \\ -a_{horz}(t - \tau) & t \in [t_p, \tau] \end{cases}, \quad (2.2)$$

čia  $t_p$  – stabdymo pradžios laiko momentas. Integruojant  $v(t)$  yra gaunamas SRM nuvažiuotas atstumas

$$d(t) = \int_0^{\tau} v(t)dt = \frac{a_{horz}}{4} \tau^2. \quad (2.3)$$

Antruoju atveju yra pasiekiamas maksimalus horizontalus greitis  $v_{horz}$ , tenkinama sąlyga  $\tau \geq 2v_{horz}/a_{horz}$  (2 judėjimo tipas), o judėjimo greitis laiko momentu  $t$  yra lygus

$$v(t) = \begin{cases} a_{horz}t & t \in [0, t_H] \\ v_{horz} & t \in [t_H, \tau - t_H] \\ -a_{horz}(t - \tau) & t \in [\tau - t_p, \tau] \end{cases} \quad (2.4)$$

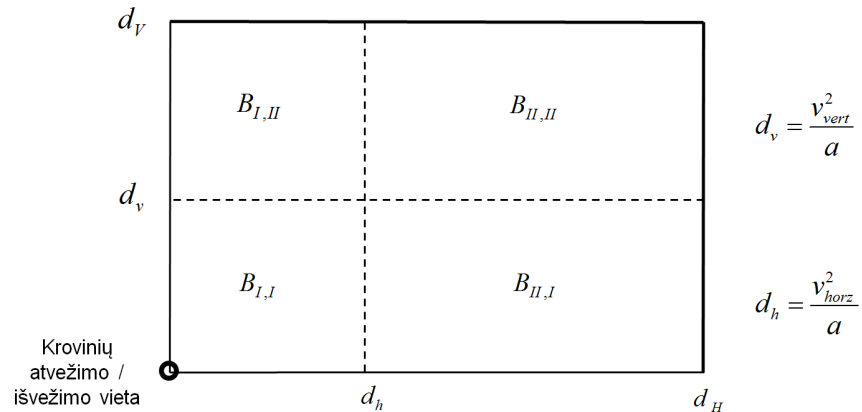
integruojant  $v(t)$  yra gaunamas SRM nuvažiuotas atstumas

$$d(t) = \int_0^{\tau} v(t) dt = v_{horz} \tau - \frac{v_{horz}^2}{a_{horz}}. \quad (2.5)$$

Kadangi  $v(t) = a_{horz}t$ , kai  $t \in [0, t_p]$ , ir  $v(t) = -a_{horz}(t - \tau)$ , kai  $t \in [t_p, \tau]$ , tai minimalus atstumas, reikalingas SRM pasiekti horizontalų greitį  $v_{horz}$ , yra lygus

$$d = \int_0^{\tau} v(t) dt = \frac{v_{horz}^2}{a_{horz}}. \quad (2.6)$$

Vertikalaus judėjimo atveju skaičiavimai yra analogiški. Įvertinant SRM judėjimą horizontalia ir vertikalia kryptimis vienu metu pagal du judėjimo tipus, visą įmanomą judėjimą galima suskirstyti į keturias būsenas  $B_{i,j}$ , kur  $i, j \in (I, II)$ , nurodo judėjimo tipą pagal 2.8 pav.: pavyzdžiui,  $B_{I,II}$  žymi pirmo tipo judėjimą vertikaliai ir antro tipo judėjimą horizontaliai (2.9 pav.).



2.9 pav. SRM judėjimo būsenos [99]

Vidutiniam SRM ciklo laikui apskaičiuoti yra sudaroma SRM judėjimo laiko  $t$  skirstinio funkcija, kuri įvertina SRM judėjimą visomis būsenomis pagal judėjimo

parametrų priklausomybes [101]. Stačiakampės stelažų formos ( $d_H > d_V$ ), viengubo ciklo, atsitiktinės sandėliavimo strategijos atveju ir esant prielaidai, kad  $a_{vert} = a_{horz} = a$ , ši funkcija yra lygi

$$G_k(t) = \begin{cases} \frac{a^2 t^4}{16d_H d_V}, & \text{kai } 0 \leq t \leq \tau_v \wedge k = \overline{1, 3} \\ \frac{at^2}{4d_H d_V} (v_{vert} t - v_{vert}^2 / a), & \text{kai } (\tau_v \leq t \leq \tau_h \wedge k = 1, 3) \vee (\tau_v \leq t \leq \tau_v \wedge k = 2) \\ \frac{1}{d_H d_V} (v_{horz} t - v_{horz}^2 / a) (v_{vert} t - v_{vert}^2 / a), & \text{kai } (\tau_h \leq t \leq \tau_v \wedge k = 1) \vee (\tau_h \leq t \leq \tau_H \wedge k = 3) \\ \frac{1}{d_H} (v_{horz} t - v_{horz}^2 / a), & \text{kai } (\tau_v \leq t \leq \tau_H \wedge k = 1) \vee (\tau_h \leq t \leq \tau_H \wedge k = 2) \\ \frac{at^2}{4d_H}, & \text{kai } \tau_v \leq t \leq \tau_h \wedge k = 2 \\ \frac{1}{d_V} (v_{vert} t - v_{vert}^2 / a), & \text{kai } \tau_H \leq t \leq \tau_v \wedge k = 3 \end{cases} \quad (2.7)$$

kur  $k$  žymi judėjimo parametrų sąlyginę priklausomybę:

- $\tau_v \leq \tau_h \leq \tau_v \leq \tau_H$ , kai  $k = 1$ ;
- $\tau_v \leq \tau_v \leq \tau_h \leq \tau_H$ , kai  $k = 2$ ;
- $\tau_v \leq \tau_h \leq \tau_H \leq \tau_v$ , kai  $k = 3$ ;

čia:

- $\tau_v$  – laikas, per kurį SRM nuvažiuoja vertikalų atstumą  $d_V$  nuo krovinių atvežimo / išvežimo vietos ir pasiekia greitį  $v_{vert}$ ,
- $\tau_v$  – laikas, per kurį SRM nuvažiuoja atstumą  $d_V$  per visą stelažų aukštį,
- $\tau_h$  – laikas, per kurį SRM nuvažiuoja horizontalų atstumą  $d_H$  nuo krovinių atvežimo / išvežimo vietos ir pasiekia greitį  $v_{horz}$ ,
- $\tau_H$  – laikas, per kurį SRM nuvažiuoja atstumą  $d_H$  per visą stelažų ilgį.

SRM judėjimo laiko  $t$  tankio funkcija yra  $g_k(t) = G'_k(t)$ , kai  $k = \overline{1, 3}$ , ir 1 operacijos ciklo vidutinis krovinių transportavimo laikas yra lygus

$$E[\tau_{SC}] = 2 \cdot \int_0^{\max(t_v, t_H)} t \cdot g_k(t) dt, \text{ kai } k = \overline{1, 3}. \quad (2.8)$$

Kaip ir supaprastintų transportavimo laiko modelių atveju, pagal šią metodiką gali būti sudaromi 2 operacijų ciklo ir sudėtingesni modeliai. Daugumoje analitinių modelių yra priimama, kad AS/RS sistemą sudaro viena stelažų eilė. Vis dėlto šiuolaikines sistemas dažniausiai sudaro daugiau nei viena stelažų eilė, todėl kuriami

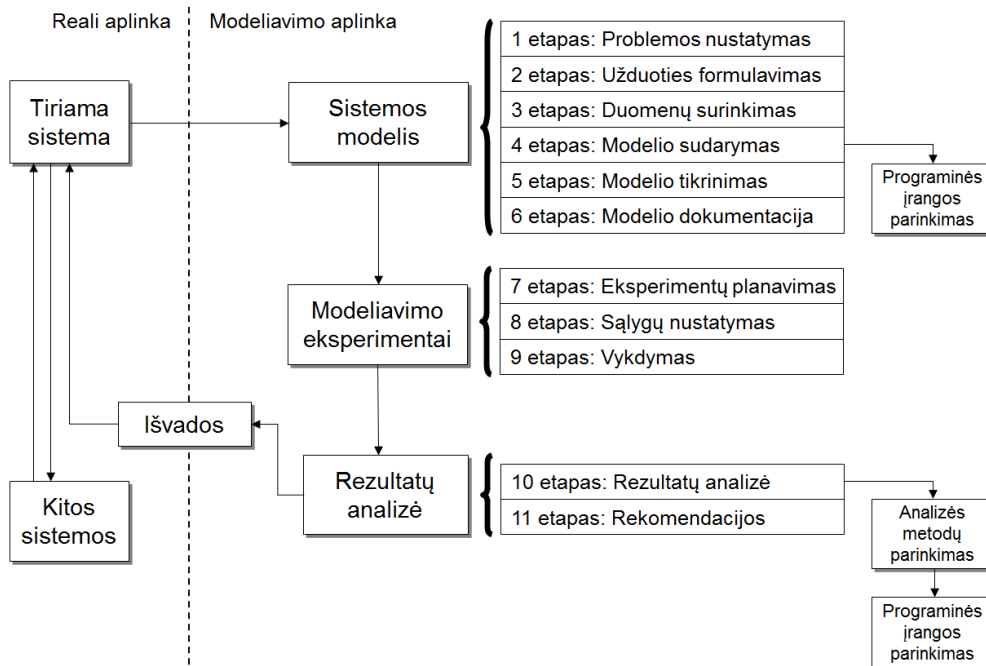
nauji modeliai sistemoms, kuriose vienas SRM gali aptarnauti keletą stelažų eilių įvertinant sandėliavimo struktūros ir judėjimo parametrų įtaką krovinių transportavimo laikui [100]. AS/RS taikymuose svarbu ne tik judėjimo parametrai, tačiau ir sistemos valdymo algoritmai, todėl sudaromi modeliai, kurie leidžia tirti judėjimo parametrų įtaką naudojant skirtingas krovinių sandėliavimo strategijas [101]. Sparčiai vystantis technologijoms yra tobulinamos tiek standartinės AS/RS sistemos, tiek kuriami nauji sistemų tipai, kurie reikalauja sudėtingesnių tyrimo modelių, pavyzdžiui, modeliai, skirti AS/RS su nepriklausomais SRM, kurie leidžia tirti šio tipo sistemas esant įvairiems struktūros parametrams, sandėliavimo ir SRM sustojimo vietos parinkimo algoritams [102]. Naujų AS/RS tipų atsiradimas taip pat reikalauja spręsti skirtingų AS/RS sistemų palyginimo problemas, pavyzdžiui, yra sudaromi standartinės AS/RS ir AS/RS su nepriklausomais SRM sistemų palyginimo modeliai pagal kainą ir pralaidumą naudojant skirtingas sandėliavimo struktūras, SRM judėjimo parametrų ir krovinių srautų intensyvumą [103].

Analitinių modelių taikymas pirminiuose sistemos projektavimo etapuose yra rekomenduojamas ir priimtinas, tačiau taikant šiuos modelius reikia patikrinti modeliuose daromų prielaidų adekvatumą ir įvertinti jų poveikį realiam sistemos taikymui, nes didelės paklaidos sumažina sistemos efektyvumo ir kainos įvertinimo tikslumą. AS/RS yra dinaminės sistemos su daugybe tarpusavyje sąveikaujančių elementų ir parametrų, todėl sudarant analitinius modelius būtina supaprastinti sudėtingus sistemoje vykstančius procesus. Analitinių modelių privalumai yra neginčijami ir jie dažnai naudojami imitacinių modelių adekvatumui patikrinti, todėl šių modelių taikymo galimybės ir ribojimai turėtų būti visada įvertinami prieš atliekant bet kurio tipo AS/RS analizę. Nagrinėjant standartinės AS/RS su nesudėtingais valdymo algoritmais ir nedideliu parametrų rinkiniu, galima apsiriboti tik analitiniais modeliais, kurie leidžia sumažinti sistemos projektavimo kaštus ir neprarasti tikslumo.

Vis dėlto šiuolaikiniai AS/RS tipai, konfigūracijos ir jų taikymai dažnai negali būti aprašomi esamais analitiniais modeliais dėl sistemų sudėtingumo, todėl yra sudaromi imitaciniai tokių sistemų modeliai [104]. Pagrindinis imitacinių modelių privalumas yra neribotos taikymo galimybės, leidžiančios įvertinti bet kokio lygio sąveikas tarp sistemos komponentų ir spręsti bet kokio sudėtingumo uždavinius. Imitacinių modelių taikymas leidžia sukurti ar įvertinti įvairius euristinius sistemų valdymo algoritmus, kurie optimizuotų sandėliavimo ir rinkimo operacijas įvairiems AS/RS tipams [105, 106].

2.10 pav. pateikta imitacinių modelių sudarymo ir analizės metodikos schema apibūdina pagrindinius modelių sudarymo ir analizės etapus. Viena iš pagrindinių imitacinių modelių problemų yra jų nelankstumas ir palyginti ilgas sudarymo laikas, todėl reikia tikslingai parinkti sistemos parametrus, kurie bus perkeltami iš realios veikimo aplinkos į modeliavimo aplinką. Sudarant AS/RS sistemų modelius, paprastai yra įtraukiami tik tie parametrai, kurie tiesiogiai veikia SRM krovinių transportavimo laiką, o apie kitus parametrus ir sąveiką su kitomis sistemomis yra daromos atitinkamos prielaidos. Modeliavimo parametrų rinkinys turi būti

parenkamas taip, kad sistemos modelis būtų kiek galima artimesnis realiai sistemai, tačiau tuo pačiu rinkinys turėtų būti ir optimalus siekiant minimizuoti modelio sudarymo laiką.



2.10 pav. Imitacinių sistemų tyrimo modelių sudarymo ir analizės metodika

Esminiai sistemos modelio sudarymo etapai yra problemos nustatymas, t. y. modelio tikslų iškėlimas, ir modeliavimo užduoties formulavimas, t. y. modelio išsamumo ir prielaidų nustatymas. Suformulavus klaidingą modeliavimo problemą ir užduotį, paprastai surenkami netikslūs duomenys, į modelį įtraukiama per daug arba per mažai realios sistemos parametru, todėl gaunamos klaidingos išvados apie tiriamą sistemą. Modelio sudarymo procesas yra gana sudėtingas ir dažnai reikalauja pakartotinio tam tikrų etapų vykdymo. Pavyzdžiui, tikrinant modelį gali paaiškėti, kad į modelį buvo įtraukta per mažai parametru, todėl reikia tikslinti modeliavimo užduotį ir pakartotinai grįžti į duomenų surinkimo etapą.

Imitacinio modelio galimybės, sudarymo kokybė ir laikas yra tiesiogiai priklausomi nuo pasirinktos programinės įrangos. Įvertinus pagrindines materialijų srautų modeliavimo programas pagal įvairius kriterijus [107, 108], šiame darbe buvo pasirinkta specializuota ir plačiausiai taikoma *AutoMod* imitacinio modeliavimo programa, turinti AS/RS, automatinių transporterių ir konvejerių sistemų modeliavimo posistemes [109, 110].

*AutoMod* imitacinio modeliavimo programinė įranga leidžia sudaryti bet kokio dydžio bei detalumo sistemų imitacinius modelius, kuriuos galima naudoti planuojant, projektuojant, analizuojant bei plėtojant įvairias sistemas. *AutoMod*



sujungia 3-D grafikos elementus, didelį pasirinkimą specializuotų sistemų šablonų ir objektų, leidžiančių sudaryti išsamų tiriamos sistemos imitacinį modelį. *AutoMod* modelių sudarymo galimybės lėmė programos pasisekimą tarp įvairių pramonės, logistikos, aptarnavimo ir kitų įmonių, siekiančių optimaliai išnaudoti resursus. *AutoMod* programinės įrangos paketas apima šias posistemas:

- *AutoMod* – modelių sudarymo ir vykdymo aplinka.
- *AutoStat* – modelio statistinės analizės ir sistemų optimizavimo posistemė.
- *AutoView* – modelio vizualizacijos posistemė, kuria galima sukurti sistemos veikimą iliustruojančius vaizdo klipus.
- *Model Communications Module (MCM)* – modelio sąsajos posistemė, kuria galima sujungti modelį su išorinėmis įrenginių valdymo sistemomis.

*AutoMod* programinėje įrangoje yra realizuoti specializuoti materialiujų srautų judėjimo sistemų šablonai: AS/RS, automatinųjų transporterių ir konvejerių sistemos. *AutoMod* modelio veikimo metu nustatyti kroviniai vykdo modelyje aprašytus veiksmus, t. y. kroviniai yra transportuojami srautų judėjimo sistemomis, nustatytuose procesų taškuose laukia eilėse prie sistemos resursų ir vykdo modelio kode aprašytus veiksmus. Kiekvienas krovinys modelyje gali:

- gauti ir naudoti sistemoje esančius resursus;
- laukti eilėje ir būti transportuojamas judėjimo sistemoje (AS/RS, konvejeriai, automatiniai transporteriai);
- keisti krovinio tipą ir sukurti naujus krovinis bet kuriame sistemos taške;
- būti užlaikomi bet kurioje proceso vietoje nurodytą laiką;
- keisti modelio kintamųjų reikšmes;
- nuskaityti informaciją iš įvairaus tipo duomenų failų ir duomenų bazių;
- laisvai judėti tarp sistemos procesų;
- vykdyti sąlyginius sakinius;
- panaudoti modelyje apibrėžtas funkcijas ir procedūras;
- atlikti matematinius skaičiavimus.

Apibendrinant galima teigti, kad *AutoMod* suteikia lanksčią modelio sudarymo struktūrą, kuri leidžia modeliuoti įvairaus tipo ir išsamumo materialiujų srautų judėjimo sistemas. Sudarius tiriamos sistemos imitacinį modelį yra atliekami modeliavimo eksperimentai, kurių tikslas yra surinkti duomenis apie sistemos resursų panaudojimą, aptarnautų krovinų skaičių ir krovinų transportavimo laikus sistemoje. Modeliavimo rezultatų analizei paprastai yra taikomi įvairūs statistinės analizės metodai, kuriais remiantis formuluojamos išvados apie tiriamą sistemą ir teikiamos rekomendacijos. Priklausomai nuo analizės išvadų, yra priimami atitinkami realios sistemos kūrimo ar valdymo sprendimai, bandoma užkirsti kelias galimoms problemoms arba ieškoma efektyviausių būdų joms spręsti.

Kaip jau buvo minėta, viena iš esminių imitacinių modelių problemų yra jų sąlygiškai ilgas kūrimo laikas. Ją galima spręsti, kuriant standartizuotus modelių komponentus. Jeigu taikomi technologiniai sprendimai gali būti standartizuoti, tuomet galima sukurti apibendrintą imitacinį modelį, kuriame realizuotos standartinės AS/RS konfigūracijos ir valdymo strategijos. Toks modelio lankstumas

tampa artimas analitinių modelių lankstumui, tačiau suteikia žymiai daugiau galimybių sistemos tyrimams pagal įvairius parametrų rinkinius. [111] pasiūlė standartinės AS/RS modeliavimo sistemą, kuri apima didžiąją dalį realiose sistemose taikomų parametrų ir valdymo strategijų. Sistema susideda iš aibės nepriklausomų elementų, kurie turi savo parametrų rinkinius ir gali būti sujungti įvairias būdais taip, kad atitiktų nagrinėjamos sistemos konfigūraciją. Apibendrintų modelių kūrimas yra esminis dalykas, jei norima išnaudoti imitacinių modelių privalumus ir priartėti prie analitinių modelių lankstumo reikšmingai sumažinant modeliui sudaryti reikalingą laiką.

Atlikus literatūros analizę bendru atveju nustatyta, kad tiriant automatizuotus logistikos centrų sandėlius su sudėtingais valdymo algoritmais, dažniausiai naudojamas imitacinis modeliavimas, o jo rezultatų analizei statistikos metodai – aprašomoji statistika, hipotezių tikrinimas, pasiklivimo intervalai, tiesinė ir netiesinė regresinė analizė, dispersinė analizė [104, 105, 106, 111].

Pavyzdžiui, viename darbe autoriai sudarė daugialypės regresijos matematinį modelį padėklų transportavimo AS/RS sistemai su nepriklausomais SRM pagal stelažų struktūros parametrus, kuris leidžia tirti krovinių transportavimo laiko priklausomybę nuo sistemos stelažų eilių skaičiaus, jų ilgio ir aukščio [112]. Kitame darbe AS/RS su nepriklausomais SRM sistemos modeliavimo rezultatams buvo pritaikyta daugialypė dispersinė analizė ir nustatyti SRM sustojimo vietos, krovinių atvežimo / išvežimo vietos išdėstymo ir SRM ciklo sudarymo algoritmų faktorių bei jų sąveikų įtaka sistemos pralaidumui, SRM apkrautumui ir krovinių transportavimo sistemoje laikui [112]. Panašiai daugialypė dispersinė analizė buvo pritaikyta ir dėžių transportavimo AS/RS sistemai su nepriklausomais SRM ir nustatyti faktoriai ir jų sąveikos labiausiai veikiančios sistemos efektyvumą [113].

Vienas iš pagrindinių šio darbo uždavinių – įvertinti C-AS/RS efektyvumo rodiklių skirtumus ir priklausomybes nuo struktūros parametrų ir SRM judėjimo parametrų. Šiems uždaviniams spręsti siūloma naudoti regresinės analizės ir dispersinės analizės metodus. Regresijos modelis susieja kintamąjį  $Y$ , vadinamą priklausomu kintamuoju, su kitais – nepriklausomais kintamaisiais  $X_1, X_2, \dots, X_K$ . Panaudojus regresijos lygtį, galima su tam tikru patikimumu prognozuoti, pavyzdžiui, efektyvumo rodiklio (priklausomojo kintamojo  $Y$ ) reikšmes pagal nepriklausomų kintamųjų (SRM keltuvų vertikalaus judėjimo ir sukimosi greičiai bei pagreičiai, transportuojamų krovinių srautų intensyvumai ir t. t.). Dažniausiai taikomas tiesinės regresijos modelis

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K + \varepsilon . \quad (2.9)$$

Daugialypės tiesinės regresinės analizės modelį patogiausia užrašyti naudojantis matricomis [116]. Tarkime, kad turime  $n$  priklausomo kintamojo stebėjimų  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  ir  $n$  kiekvieno nepriklausomo kintamojo  $X_j, j=1, \overline{K}$  stebėjimų  $X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}$ . Tuomet modelį galime užrašyti taip

$$Y = X\beta + \varepsilon , \quad (2.10)$$

čia

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1K} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nK} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_K \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix},$$

ir  $Y$  –  $(n \times 1)$  matmenų priklausomo kintamojo reikšmių vektorius,  $X$  –  $n \times (K+1)$  matmenų nepriklausomų kintamųjų reikšmių matrica,  $\beta$  –  $(K+1)$  matmenų regresijos lygties koeficientų vektorius,  $\varepsilon$  –  $(n \times 1)$  matmenų atsitiktinių paklaidų vektorius [119].

Daugialypės tiesinės regresinės analizės modelyje kintamieji  $Y, X_1, X_2, \dots, X_K$  yra kiekybiniai, išmatuoti intervalų, santykių skalėse arba dvireikšmiai kintamieji (dichotominiai kintamieji). Tiesinės regresinės analizės modelį galima taikyti, jeigu duomenys tenkina tam tikras sąlygas. Didžioji dalis regresinės analizės prielaidų – tai reikalavimai, kuriuos turi tenkinti atsitiktinės paklaidos  $\varepsilon_i$ , kurios parodo, kiek stebėtoji  $Y$  reikšmė skiriasi nuo reikšmės, kurią gautume prognozuodami pagal regresijos lygtį. Pagrindinės tiesinės regresinės analizės prielaidos yra šios: atsitiktinės paklaidos  $\varepsilon_i$  yra normaliai pasiskirstę atsitiktiniai dydžiai, visų  $\varepsilon_i$  vidurkiai lygūs nuliui,  $E\varepsilon_i = 0$ , visų  $\varepsilon_i$  dispersijos lygios (homoskedastiškumo prielaida)  $D\varepsilon_i = \sigma^2$  ir duomenyse nėra išskirčių [117].

Sudarant regresijos modelį logistikos sistemoms, kurios priklauso nuo kokybinių parametru (pvz., yra skirtingi krovinų transportavimo mechanizmai arba krovinų transportavimo maršruto sudarymo algoritmas ir t. t.), jis papildomas dvireikšmiais kokybiniais kintamaisiais, kurie dar vadinami pseudokintamaisiais. Visi dvireikšmiai kintamieji gali įgyti tik dvi reikšmes. Pavyzdžiui,  $Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 X + \varepsilon$ , čia  $D \in \{0,1\}$ . Kai kategorinis kintamasis turi  $m > 2$  kategorijų, jis keičiamas  $(m-1)$  dvireikšmiu kintamuoju. Galima sudaryti regresijos lygtis su dvireikšmių kintamųjų sąveika  $Y = \beta_0 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 + \beta_3 (D_1 \times D_2) + \varepsilon$  arba su tolydžiųjų ir pseudokintamųjų sąveikomis, pvz.,  $Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 X + \beta_3 (D \times X) + \varepsilon$  [118]. Regresinė analizė yra pagrindinis metodas, taikomas logistikos sandėlių transportavimų sistemų efektyvumo rodikliams analizuoti [112], todėl jį aptarsime plačiau.

Tarkime,  $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K + \varepsilon$  išreiškia tiesinę regresinę priklausomybę populiacijoje (populiacijos regresijos funkcija), čia  $\varepsilon$  yra populiacijos paklaida (paklaida gaunama pakeičiant tikrąją priklausomybės formą tiesine), o  $\beta_j$  – nežinomi populiacijos regresijos funkcijos koeficientai,  $j=0,1,\dots,K$ . Iš imties žinome tik keletą šios funkcijos realizacijų  $y_i$ , atitinkančių fiksuotas nepriklausomų kintamųjų reikšmes  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iK})$ ,  $i=1, \dots, n$ . Remiantis šiais

duomenimis, panaudojus mažiausiųjų kvadratų metodą, randami populiacijos regresijos lygties koeficientų  $\beta_j$  įverčiai  $b_j, j=0,1,\dots,K$ .

Regresijos lygties koeficientų įvertiniai gaunami, taikant mažiausių kvadratų metodą, t. y. ieškoma koeficientų vektoriaus  $\beta$  įvertinio  $b$ , minimizuojančio funkciją [117],

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon'\varepsilon = (Y - X\beta)'(Y - X\beta) \rightarrow \min . \quad (2.11)$$

Sprendžiant lygčių sistemą  $\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$ , gaunamas mažiausių kvadratų įvertinys,

$b = (X'X)^{-1}X'Y$ . Šis įvertinys turi geras savybes: jis yra nepaslinktas  $Eb = \beta$ , o regresijos koeficientų kovariacijų matricos  $covb = \sigma^2(X'X)^{-1}$  įstrižainės elementai yra įvertinių  $b_1, b_2, \dots, b_K$  dispersijos [117].

Jeigu kintamieji netinka tiesinei regresijai, juos bandoma transformuoti. Dažnai ši problema sprendžiama logaritmuojant tiek priklausomą kintamąjį, tiek dalį nepriklausomų kintamųjų. Kartais į regresijos modelį įtraukiami kintamieji, pakelti atitinkamais laipsniais, arba įtraukiamos dviejų ir daugiau kintamųjų tarpusavio sąveikos (sandaugos). Jeigu kintamųjų negalima transformuoti taip, kad jie tiktų tiesinei regresinei analizei, tuomet taikoma netiesinė regresinė analizė, kuri realizuota daugumoje statistikos paketų (SAS, SPSS, STATISTICA, STATA, R ir kt.), tačiau čia susiduriama su „pradinio taško“ parinkimo optimizavimo algoritmui problema, t. y. sunku rasti funkcijos  $L$  globalų minimumą [119, 120, 121]. Todėl dažniausiai pirmiausia bandoma ne taikyti netiesinę regresinę analizę, bet transformuoti duomenis taip, kad jie tiktų daugialypei tiesinei regresinei analizei.

Pagal imties daugialypės tiesinės regresijos funkciją  $\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_KX_K$  prognozuojamos vidutinės  $Y$  reikšmės fiksuotoms nepriklausomų kintamųjų reikšmėms. Sudarius regresijos lygtį, reikia nustatyti, ar gauta regresijos lygtis gerai atitinka duomenis. Regresijos funkcija tuo geriau atitinka tyrimo duomenis, kuo mažesni skirtumai yra tarp stebėtų reikšmių  $Y_i$  ir pagal imties regresijos funkciją apskaičiuotų prognozių. Šis skirtumas vadinamas liekamąja paklaida arba tiesiog trumpai liekana (angl. *residual*)  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ , čia  $e_i$  – liekana,  $Y_i$  – stebėta reikšmė,  $\hat{Y}_i$  – pagal regresijos lygtį apskaičiuota reikšmė. Vieni iš svarbiausių regresijos modelio tinkamumo matų yra koreguotas apibrėžtumo koeficientas  $R_{kor}^2$  (angl. *Adjusted R Square*  $R_{adj}^2$ ) ir standartinė įverčio paklaida (angl. *standard error of estimate*), dažnai vartojamas ir kitas jo pavadinimas – standartinė regresijos paklaida. Tarkime, kad pagal stebėjimo rezultatus  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iK}, y_i)$ ,  $i = 1, n$ , gavome imties regresijos lygtį. Liekanų (liekamųjų paklaidų) kvadratų suma (angl. *error sum of square*)

$$SS_e = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2, \text{ tuomet } SS_e/n \text{ yra nekoreguota vidutinė kvadratinė}$$

paklaida,  $\frac{SS_e}{n-K-1}$  – vidutinė kvadratinė paklaida (angl. *Mean square error*),

$$s_e = \sqrt{\frac{SS_e}{n-K-1}} \text{ – standartinė įverčio paklaida (toliau tekste vadinama standartinė}$$

regresijos paklaida). Ji apibūdina  $Y$  reikšmių sklaidą apie regresijos funkciją, kuri nepaiškinama tiesine regresija. Kuo standartinė regresijos paklaida arčiau nulio, tuo modelis tikslesnis.

Koreguotas apibrėžtumo koeficientas  $R_{kor}^2$  atsižvelgia į imties didumą  $n$  ir nepriklausomų kintamųjų skaičių regresijos lygtyje  $K$ . Jis parodo, kurią priklausomo kintamojo  $Y$  sklaidos dalį apie vidurkį galima paaiškinti  $Y$  tiesine regresija nepriklausomų kintamųjų  $X_1, X_2, \dots, X_K$  atžvilgiu [116]. Kuo  $R_{kor}^2$  artimesnis vienetui, tuo didesnė sklaidos dalis paaiškinama tiesine regresija, t. y. tuo tiksliau regresijos funkcija aprašo kintamąjį  $Y$ .

Prognozuojant priklausomo kintamojo  $Y$  individualias ir vidutines reikšmes duotoms nepriklausomų kintamųjų reikšmėms, skaičiuojami vidurkio ir individualių reikšmių prognozių pasiklovimo intervalai [115]. Apskaičiuotus  $Y$  prognozės vidutinių reikšmių pasiklovimo intervalų apatinius (LMCI – angl. *Lower Mean Upper Confidence Interval*) ir viršutinius rėžius (UMCI – angl. *Upper Mean Confidence Interval*) fiksuotoms  $X$  reikšmėms ir  $Y$  individualių reikšmių prognozavimo pasiklovimo intervalų apatinius ir viršutinius rėžius (LICI ir UICI (angl. *Lower and Upper Individual Confidence Interval*) statistikos paketai (SAS, SPSS ir kiti) įrašo į duomenų matricą arba vaizduoja grafiškai [120, 121].

Sprendžiant logistikos sandėlių transportavimo sistemų efektyvumo rodiklių regresinės analizės uždavinius dažnai kyla klausimas, ar nepriklausomas kintamasis  $X_j$  turi įtakos efektyvumo rodiklio ( $Y$ ) kitimui. Paprastai  $X_j$  įtaka  $Y$  kitimui tikrinama nuline hipoteze  $H_0 : \beta_j = 0$ , t. y. koeficientas prie  $X_j$  populiacijos regresijos lygtyje lygus nuliui. Alternatyvioji hipotezė  $H_a : \beta_j \neq 0$  reiškia tiesinės priklausomybės tarp  $X_j$  ir  $Y$  egzistavimą,  $j=1,2,\dots,K$ . Hipotezėms apie regresijos lygties koeficientus tikrinti naudojamos Stjudento statistikos

$$T_j = \frac{b_j}{s_{b_j}} \sim St(n-K-1), \quad j=0,1,\dots,K. \quad (2.12)$$

Jeigu nulinė hipotezė atmetama, tai koeficientas  $\beta_j$  statistiškai reikšmingai skiriasi nuo nulio, t. y.  $Y$  reikšmės priklauso nuo  $X_j$ . Populiacijos koeficientų  $\beta_j$  pasiklovimo intervalai (su pasiklovimo lygmeniu  $1-\alpha$ ) randami pagal formulę:

$$b_j - t_{1-\alpha/2;n-K-1} \cdot s_{b_j} \leq \beta_j \leq b_j + t_{\alpha/2;n-K-1} \cdot s_{b_j}, \quad (2.13)$$

čia  $t_{\alpha/2; n-K-1}$  pažymėtas Stjudento skirstinio su  $n-K-1$  laisvės laipsniais  $\alpha/2$  kvantilis,  $j=0, 1, \dots, K$ .

Lygindami koeficientus  $\beta_j$  tarpusavyje mes negalime nustatyti kintamųjų  $X_j$  santykinės svarbos prognozuojant  $Y$ , nes  $\beta_j$  didumas priklauso nuo  $X_j$  matavimo vienetų ir nuo duomenų sklaidos. Todėl dažnai reikia ieškoti ir standartizuotosios tiesinės regresijos funkcijos [115]. Priklausomas kintamasis  $Y$  ir nepriklausomi kintamieji  $X_1, X_2, \dots, X_K$  keičiami  $z$ -reikšmėmis ir mažiausiųjų kvadratų metodu randami standartizuotieji koeficientai  $\beta_j^*$ ,  $j=1, \overline{K}$ . Pagal standartizuotus koeficientus  $\beta_j^*$  galima nuspręsti, koks kintamasis  $X_j$  daro didesnę įtaką  $Y$  prognozei. Absoliučiuoju didumu didesnis  $\beta_j^*$  rodo didesnę  $Y$  priklausomybę nuo  $X_j$  [115].

Daugialypės regresinės analizės modelis geriausiai tinka prognozuoti, kai visi nepriklausomi kintamieji  $X_1, X_2, \dots, X_K$  stipriai koreliuoja su  $Y$ , o tarpusavyje nekoreliuoja arba koreliuoja silpnai. Kai tarp nepriklausomų kintamųjų  $X_1, X_2, \dots, X_K$  yra stipriai koreliuojančių, susiduriame su multikolinearumo problema. Dėl kintamųjų multikolinearumo negalima gerai atskirti koreliuojančių kintamųjų įtakos  $Y$  prognozei, atsiranda „ne tas“ regresijos funkcijos koeficiento ženklas, regresijos lygties koeficientai tampa labai nestabilūs – keli papildomi arba pašalinti stebėjimai gali žymiai juos pakeisti [122]. Kintamųjų multikolinearumas nustatomas skaičiuojant įvairias statistikas. Dažniausiai yra naudojamas dispersijos mažėjimo daugiklis (angl. *Variance Inflation Factor*)  $VIF_j$ . Jeigu  $4 < VIF_j < 10$ , galima įtarti, kad kintamasis  $X_j$  yra multikolinearus (nuo vidutinio iki stipraus), jeigu  $VIF_j \geq 10$  – kintamasis  $X_j$  „per daug multikolinearus“ [122]. Multikolinearumui mažinti universalių metodų nėra. Paskelbtuose darbuose nėra vienos nuomonės šiuo klausimu. Dažnai siūloma padidinti imtį, atsisakyti dalies multikolinearių kintamųjų ir keisti kintamuosius pagrindinėmis komponentėmis [116, 122].

Kai imtis nedidelė, tai net ir vienas, labai nuo kitų besiskiriantis stebėjimas gali statistiškai reikšmingai pakeisti regresijos lygties koeficientų įverčius, todėl, sudarant regresijos modelius, svarbu nustatyti, ar duomenyse nėra išskirčių. Lyginant kiekvienam stebėjimui apskaičiuotas įtakos matų reikšmes su ribinėmis reikšmėmis yra identifikuojamos išskirtys [115]. Išskirtims nustatyti dažniausiai naudojama standartizuotoji liekana (angl. *standardized residual*), kuri gaunama iš liekanos  $e_i$  (angl. *residual*) atėmus liekanų imties aritmetinį vidurkį ir padalijus iš standartinio nuokrypio. Standartizuotųjų liekanų vidurkis lygus 0, o standartinis nuokrypis lygus 1. Stebėjimas laikomas išskirtimi, jeigu standartizuotosios liekanos absoliutinis didumas viršija 3 standartinius nuokrypius [115]. Kiti išskirčių radimui naudojami matai pateikti [116, 122].

Dar vienas metodas, kuris dažnai naudojamas vertinant logistikos sistemos krovinių transportavimo sistemos efektyvumo rodiklių skirtumus esant skirtingiems struktūros parametrams, yra dispersinė analizė. Vienfaktorinės dispersinės analizės

modelyje atsitiktinio dydžio  $Y$  skirstinys gali priklausyti nuo faktoriaus  $A$ , kuris įgyja  $I$  skirtingų reikšmių  $a_1, a_2, \dots, a_I$ . Pagal faktorių  $A$  skiriame  $I$  nepriklausomų populiacijų. Kiekvienoje populiacijoje matuojame tą patį sistemos efektyvumo rodiklį ( $Y$ ), išmatuotą intervalų arba santykių skalėje. Populiacijos, kurioje faktorius  $A$  įgyja reikšmę  $A=a_i$ , kintamąjį žymėsime  $Y_i$ , o jo imties vidurkį –  $\bar{Y}_i$ . Dispersinės analizės modelių yra daug [115, 122]. Plačiau aptarsime tik dispersinės analizės modelį su pastoviais faktoriais, kuris dažniausiai taikomas šiame darbe tiriamoms sistemoms.

Tarkime, kad stebimo atsitiktinio dydžio  $Y$  skirstinys priklauso nuo faktoriaus  $A$ , kuris yra  $I$  skirtinguose lygmenyse. Taigi turime  $I$  imčių, kurios kiekvienos

$$\text{didumas yra } n_i, i=1, I, n = \sum_{j=1}^I n_j.$$

Kiekvieną stebėjimą  $y_{ij}$  išskaidome į du dėmenis:  $y_{ij} = \beta_i + e_{ij}$ ,  $j=1, \dots, n_i$ ,  $i=1, \dots, I$ , čia  $\beta_i$  – nežinomi populiacijų vidurkiai  $M(Y_i) = \beta_i$ , o  $e_{ij}$  – nepriklausomi atsitiktiniai dydžiai, kurių skirstinys standartinis normalusis  $N(0, \sigma^2)$ .

Nulinė vienfaktorinės dispersinės analizės hipotezė teigia, kad visi populiacijų kintamųjų vidurkiai yra lygūs  $H_0: \beta_1 = \dots = \beta_I$ . Nulinei hipotezei tikrinti naudojama

Fišerio statistika [115].  $F = \frac{\overline{SS}_A}{SS_e}$ , čia  $SS_A = \sum_{i=1}^I (\bar{y}_i - \bar{y}_..)^2 n_i$  – nuokrypių kvadratų

suma, apibūdinanti faktoriaus  $A$  poveikį stebimo atsitiktinio dydžio  $Y$  vidurkiui;

$SS_e = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$  – nuokrypių kvadratų suma, apibūdinanti atsitiktinių klaidų

faktoriaus  $E$  poveikį stebimo atsitiktinio dydžio  $Y$  vidurkiui, kurį modelyje nusako atsitiktinis dydis  $e_{ij}$ ;  $\bar{y}_..$  – imties  $Y$  empirinis vidurkis;  $\bar{y}_i$  – imties  $Y_i$  empirinis

vidurkis;  $SS_p = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_..)^2$  – bendroji nuokrypių kvadratų suma;

$SS_p = SS_A + SS_e$ ;  $\overline{SS}_A = \frac{1}{I-1} SS_A$ ,  $\overline{SS}_e = \frac{1}{n-I} SS_e$  – nuokrypių kvadratų vidurkiai

(imties faktorinė ir liekamoji dispersijos).

Jeigu  $H_0$  neatmetama, tai stebėjimų duomenys nulinei hipotezei neprieštarauja, t. y. galime manyti, jog faktorius  $A$  neveikia stebimojo (tiriamojo) atsitiktinio dydžio  $Y$  vidurkio. Jeigu stebėjimai neprieštarauja nulinei hipotezei  $H_0$  apie vidurkių lygybę, tai analizę galima tuo ir užbaigti. Tokiu atveju visus stebėjimus galime sujungti į vieną didumo  $n$  imtį, gautą stebint normalųjį atsitiktinį dydį su vidurkiu  $\beta_0$  ir dispersija  $\sigma_e^2$ . Priešinga išvada retai kada tenkina tyrinėtoją, nes natūraliai kyla klausimas, kaip  $Y$  priklauso nuo faktoriaus  $A$  lygmenų. Kokie

faktoriaus lygiai yra nehomogeniškumo priežastis? Ar galima faktoriaus A lygmenis sujungti į grupes taip, kad grupių viduje vidurkių skirtumas būtų nereikšmingas? Šiam uždaviniui spręsti galima naudoti daugkartinius palyginimus [116].

Daugkartiniai lyginimų kriterijai skirstomi į apriorinius ir aposteriorinius (*post hoc*). Aprioriniai lyginimai planuojami prieš dispersinę analizę arba vietoje jos. Aposterioriniai (*post hoc*) lyginimai vykdomi po to, kai jau žinomi analizės rezultatai (hipotezės apie kelių vidurkių lygybę tikrinimo rezultatai). Yra daug skirtingų aposteriorinių daugkartinių lyginimų kriterijų: LSD (angl. *Least Significant Difference* – mažiausiai reikšmingo skirtumo), Benferonio (Bonferroni), Sidak'o, Šefe (Scheffe) R-E-G-W F (Ryan-Einot-Gabriel-Welsch F kriterijus), R-E-G-W Q (Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Q kriterijus), S-N-K (Student-Newman-Keuls, Tjukio (Tukey), Tjukio b (Tukey b), Duncan, Hochberg GT2, Gabriel, Waller-Duncan. Dunnett kriterijai taikomi, kai lyginamų populiacijų dispersijos yra lygios. Tamhane T2, Dunnett T3, Games-Howell, Dunnett C kriterijai, taikomi, kai lyginamų populiacijų dispersijos nėra lygios [119, 120]. Kiekvienas iš jų turi pranašumų ir trūkumų. Vieni kriterijai taikomi, kai visų lyginamų imčių didumai vienodi, kitus galima taikyti, kai imčių didumai nevienodi. Vieni kriterijai taikomi, kai visų populiacijų dispersijos yra lygios, kitus galima taikyti ir kai dispersijos nelygios. Vieni kriterijai dažniau randa statistiškai reikšmingus skirtumus, kiti – rečiau (konservatyvesni kriterijai).

Taikant Fišerio kriterijų populiacijų dispersijos turi būti lygios. Jeigu hipotezė apie dispersijų lygybę atmetama, tuomet hipotezei apie vidurkių lygybę tikrinti vietoje Fišerio kriterijaus naudojamas Welch arba Brown-Forsythe kriterijus [115].

#### **2.4. Antrojo skyriaus išvados**

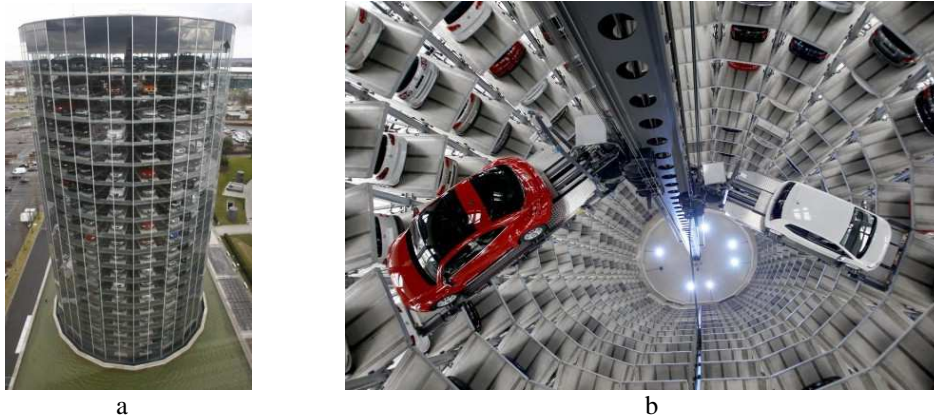
1. Įvertinus naujų automatizuotų krovinių transportavimo sistemų funkcines galimybes, patobulinta klasikinių AS/RS projektavimo metodika, kuri leidžia kurti sistemos koncepciją, nustatyti jos struktūrą ir sąveiką su kitomis logistikos centro sistemomis bei parinkti valdymo strategijas.
2. Nustatytos produktų krovinių rūšiavimo problemos ir pasiūlyti AS/RS integravimo į automatizuotą užsakymų surinkimo sistemą „Produkcija–Žmogus“ principai.
3. Nustatyta, kad AS/RS tyrimuose naudojamų analitinių metodų taikymas yra nepriimtinas dėl šių sistemų struktūros ir valdymo algoritmų sudėtingumo, todėl analizei pasirinktas imitacinio modeliavimo metodas.
4. Sudaryta kombinuota tyrimų ir rezultatų analizės metodika, kuri leidžia adekvačiai įvertinti darbe tiriamas sistemas ir kurioje imitacinis modeliavimas integruojamas su pažangiais statistinės analizės metodais.



### 3. CILINDRINĖS AS/RS KONCEPCIJA IR MODELIS

Remiantis antrojo skyriaus išvadomis šiame darbe yra siūloma Cilindrinės automatizuotos sandėliavimo ir rinkimo sistemos (C-AS/RS) koncepcija, ją integruojant į užsakymo rinkimo sistemą ir sprendžiant produktų krovinių rūšiavimo problemas. C-AS/RS išplečia užsakymų rinkimo sistemos funkcines galimybes, t. y. greitis, lankstumas, ergonomiškumas (optimizuoja žmogaus judesius), sumažina klaidų tikimybę bei užimamą erdvę. Dėl nagrinėjamų procesų sudėtingumo sistemos tyrimams taikomi imitacinio modeliavimo ir statistinės analizės metodai bei vizualizacija.

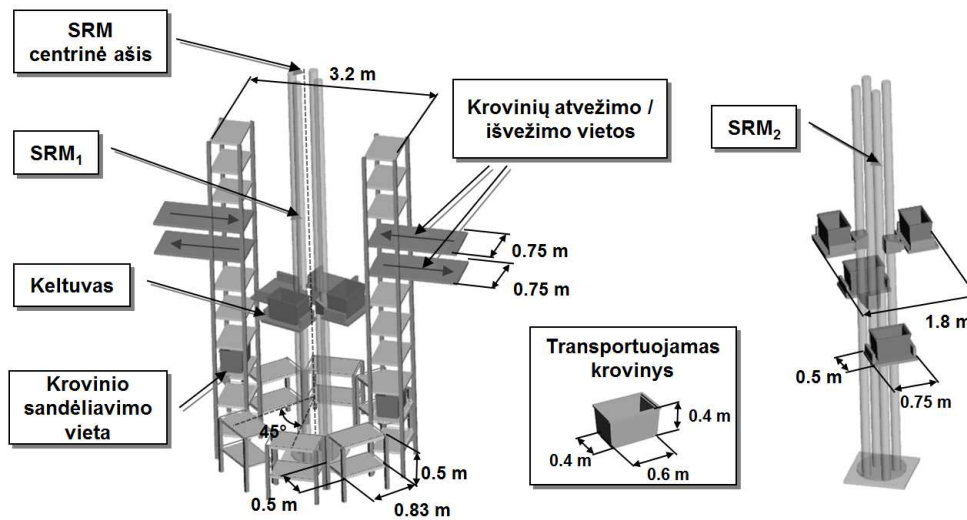
#### 3.1. Struktūros ir integravimo parametrų nustatymas



**3.1 pav.** Automatizuota *Volkswagen* automobilių sandėliavimo ir rinkimo sistema: a – išorinis vaizdas; b – vidinis vaizdas [123]

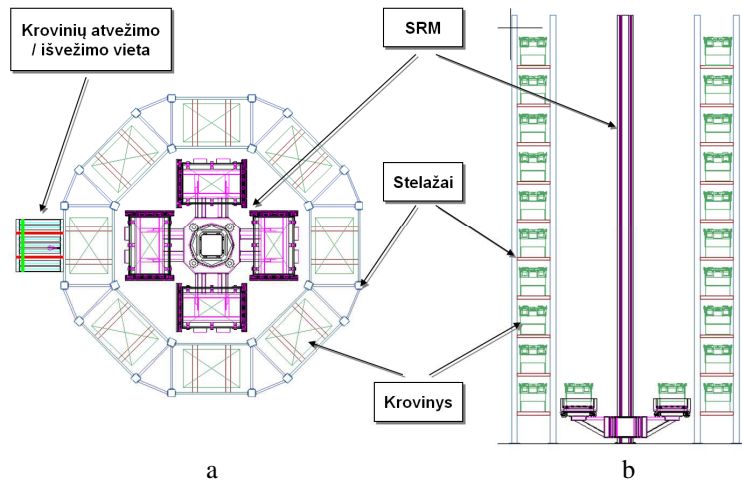
Šiame darbe siūlomos C-AS/RS koncepcijos sukūrimo principai yra paremti šalia *Volkswagen* automobilių gamyklos Wolfsburg mieste Vokietijoje esančios automatizuotos automobilių sandėliavimo ir rinkimo sistemos veikimo principais [123]. Sistemą sudaro ovalo formos stelažai, kuriuose yra sandėliuojami automobiliai ir stelažų centre esantis automatizuotas automobilių sandėliavimo ir rinkimo mechanizmas, transportuojantis automobilius 2 m/s greičiu (3.1 pav.). Klientai, nusprendę įsigyti automobilį šioje gamykloje, gali tiesiogiai stebėti, kaip jų pasirinktas automobilis automatiškai yra išrenkamas iš stelažų ir transportuojamas į išvežimo vietą greičiau nei per 1 minutę ir 44 sekundes. Naudojant šią sistemą, klientai gali įsigyti automobilius su nuliniu kilometražu, nes automobilių nereikia nuvairuoti į sandėliavimo vietas ir vėliau jų iš ten paimti.

Panaudojus automatizuotos automobilių sandėliavimo sistemos veikimo principus, šiame darbe buvo sukurta C-AS/RS koncepcija, naudojama greitam mažesnių už padėklą krovinių sandėliavimui ir rinkimui.



3.2 pav. C-AS/RS struktūra

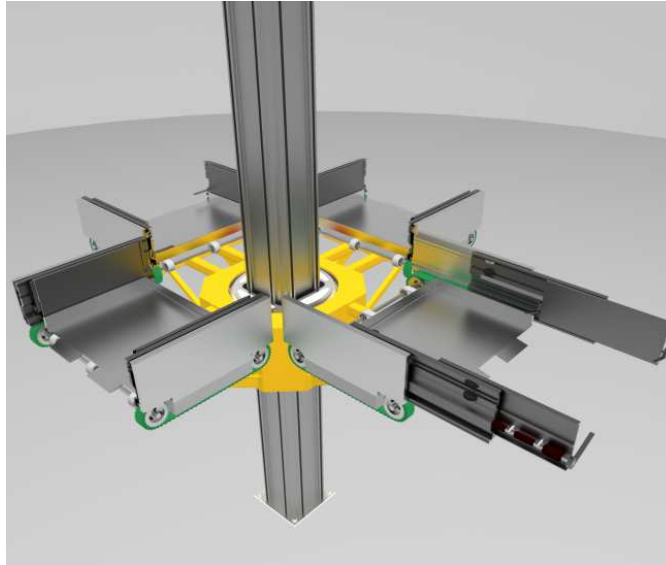
3.2 pav. pateikti pagrindiniai darbe siūlomos C-AS/RS struktūros komponentai. Sistema yra sudaryta iš daugumai AS/RS būdingų standartinių komponentų: sandėliavimo stelažų, SRM ir krovinių atvežimo / išvežimo vietų su integruotais transportavimo konvejeriais. Sistema yra modulinė, nes dauguma sistemos komponentų gali būti modifikuojami pagal individualius reikalavimus, kompaktiška ir nesudėtingai integruojama su kitomis sandėlio sistemomis.



3.3 pav. C-AS/RS sandėliavimo stelažų konstrukcija: a – vaizdas iš viršaus, b – vaizdas iš šono

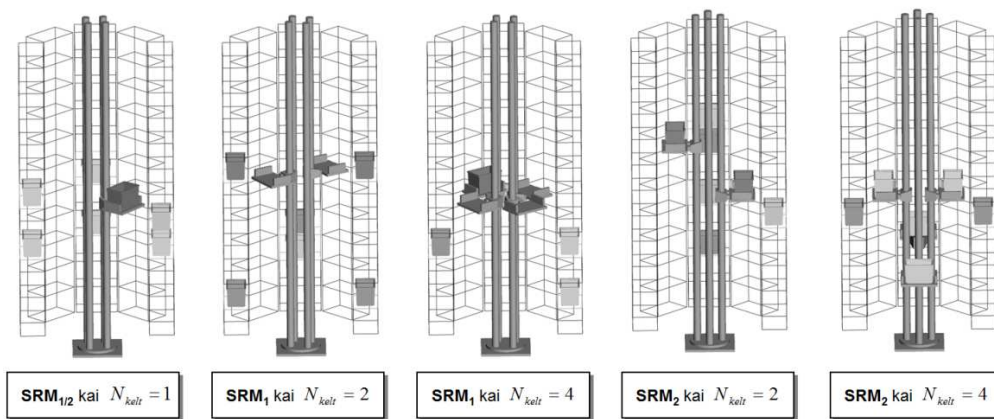
3.3 pav. pavaizduota aštuoniakampė cilindro formos C-AS/RS sandėliavimo stelažų konstrukcija, kuri susideda iš fiksuoto skaičiaus  $N_C = 8$  stulpelių ir kintamo

skaičiaus aukštų  $N_L$ , išdėstyty aplink SRM taip, kad jam sukantis aplink savo ašį ir judant vertikalia kryptimi, bet kuris krovinis transportavimo keltuvas galėtų pasiekti krovinis bet kurioje sandėliavimo vietoje. Stelažai yra padalinti į sandėliavimo vietas, kurių kiekvienoje vienu metu galima sandėliuoti vieną krovinį. Konstrukcija yra lanksti aukštų skaičiaus pasirinkimo atžvilgiu, t. y. keičiant aukštų skaičių pagal projektuojamos sistemos reikalavimus, galima nustatyti sandėliavimo vietų skaičių. Kaip parodyta 3.3 pav., pasirinktos sandėliavimo vietos gali būti pakeistos krovinų atvežimo / išvežimo vietomis su integruotais krovinų transportavimo konvejeriais, tokiu būdu sukuriant C-AS/RS sąsają su kitomis sandėlio sistemomis. Ši sistema yra taip pat lanksti ir sąsajos su kitomis sistemomis atžvilgiu, nes atvežimo / išvežimo vietas galima suprojektuoti bet kurioje stelažų vietoje ir C-AS/RS pritaikyti prie kitų sandėlyje esančių sistemų.



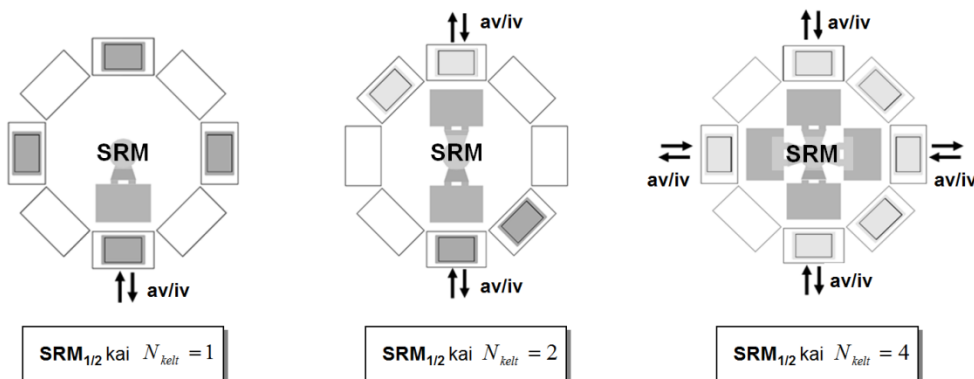
**3.4 pav.** SRM modelio su 4 keltuvais vizualizacija

3.4 pav. pateikta darbe siūlomo SRM vizualizacija su 4 keltuvais ( $N_{kelt} = 4$ ). Šios sistemos SRM yra taip pat modulinis, t. y. galima parinkti reikalingą keltuvų skaičių ( $N_{kelt}$ ) nuo 1 iki 4 priklausomai nuo projektuojamos sistemos reikalavimų. Rekomenduojama rinktis SRM su 1, 2 arba 4 keltuvais, nes šiuo atveju galima išlaikyti SRM simetriškumą stelažų atžvilgiu, t. y. keltuvus galima išdėstyti taip, kad kiekvienas keltuvas visada galėtų pasiekti sandėliavimo vietą. Darbe taip pat yra siūlomi du SRM tipai –  $SRM_1$  ir  $SRM_2$ , kurie gali būti pasirenkami įvertinus reikalingą sistemos pralaidumą, projektavimo, įdiegimo ir eksploatavimo kaštus.



3.5 pav. SRM modifikacijos

3.5 pav. pavaizduotos darbe siūlomos SRM modifikacijos su 1, 2 ir 4 keltuvais. Sistemoje su  $SRM_1$  visi krovinių transportavimo keltuvai yra sujungti vertikalaus judėjimo prasme, t. y. SRM sukantis aplink savo ašį ir judant vertikaliai, visi keltuvai juda kartu ta pačia trajektorija.  $SRM_2$  yra patobulinta mechanizmo versija, kuri leidžia kiekvienam keltuvui judėti vertikaliai nepriklausomai nuo kitų, t. y. visi keltuvai yra sukami kartu, tačiau gali nepriklausomai važiuoti į reikiamą aukštą. Sistemoje su  $SRM_2$  yra tikėtinas didesnis krovinių pralaidumas, tačiau šių sistemų projektavimas yra sudėtingesnis ir reikalauja papildomų įrenginių nepriklausomam vertikaliam keltuvų judėjimui ir sudėtingesnių valdymo algoritmu, palyginti su  $SRM_1$ , todėl tokių sistemų projektuotojai turi įvertinti šiuos esminius sistemų skirtumus įvairiais aspektais.

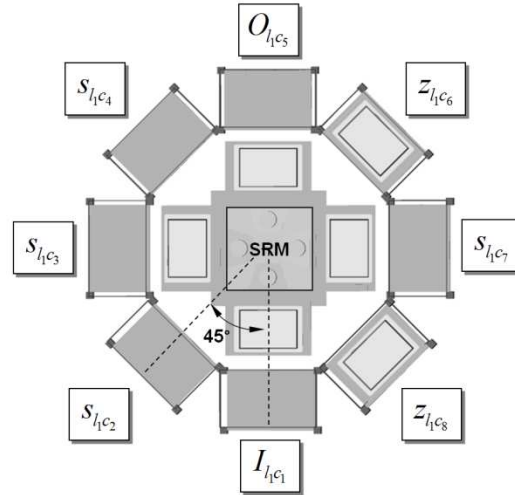


3.6 pav. C-AS/RS krovinių atvežimo / išvežimo vietų išdėstymas

3.6 pav. pateiktos siūlomos krovinių atvežimo / išvežimo (av/iv) vietų išdėstymas ir skaičius  $N_{av} / N_{iv}$  stelažuose priklausomai nuo pasirinktos SRM

konfigūracijos. Kadangi SRM su 2 arba 4 keltuonais gali transportuoti keletą krovinių vienu metu, todėl, parenkant atvežimo / išvežimo vietų skaičių, rekomenduojama taikyti sąlygą  $N_{av} = N_{iv}$  ir vietas išdėstyti taip, kad SRM vienu metu galėtų paimti arba padėti maksimalų krovinių skaičių šiose vietose ir krovinių paėmimo / padėjimo trukmė būtų minimali.

SRM vykdo krovinių sandėliavimo ir rinkimo operacijas cilindro formos stelažų, kuriuose sandėliavimo vietų skaičius yra  $(N_L \cdot N_C) - (N_{av} + N_{iv})$ , viduje.



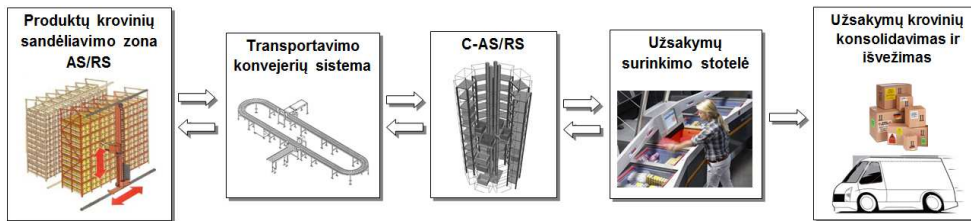
**3.7 pav.** C-AS/RS vieno stelažų aukšto pavyzdys

3.7 pav. pateiktas vieno C-AS/RS sandėliavimo struktūros aukšto vaizdas iš viršaus su pažymėtais stelažų vietų tipais:  $I_{l_1c_j}$  – krovinių atvežimo vietos,  $O_{l_1c_j}$  – krovinių išvežimo vietos,  $s_{l_1c_j}$  – tuščios sandėliavimo vietos ir  $z_{l_1c_j}$  – sandėliavimo vietos su kroviniiais. Visos vietos yra išdėstytos stulpeliuose  $c_j \in C$ , kur  $C = \{c_j | j = \overline{1, N_C}\}$ , ir aukštuose  $l_i \in L$ , kur  $L = \{l_i | i = \overline{1, N_L}\}$ , ir jas galima suskirstyti į keturias nepriklausomas vietų aibes pagal jų paskirtį: krovinių atvežimo vietos  $S_I = \{I_{l_1c_j} | l_i \in L, c_j \in C\}$ , išvežimo vietos  $S_O = \{O_{l_1c_j} | l_i \in L, c_j \in C\}$ , tuščios sandėliavimo vietos  $S_{ST} = \{s_{l_1c_j} | l_i \in L, c_j \in C\}$  ir sandėliavimo vietos su kroviniiais  $S_{RT} = \{z_{l_1c_j} | l_i \in L, c_j \in C\}$ . Visų tipų vietų aibių sąjunga  $S_I \cup S_O \cup S_{ST} \cup S_{RT}$  apibrėžia C-AS/RS krovinių sandėliavimo struktūrą.

SRM gali sukis aplink savo ašį greičiu  $v_{suk}$  (laipsn./s) su pagreičiu  $a_{suk}$  (laipsn./s<sup>2</sup>), keltuonai gali judėti vertikaliai aukštyn ir žemyn greičiu  $v_{vert}$  (m/s) su pagreičiu  $a_{vert}$  (m/s<sup>2</sup>) ir paimti arba padėti krovinius iš sandėliavimo vietų per laiką

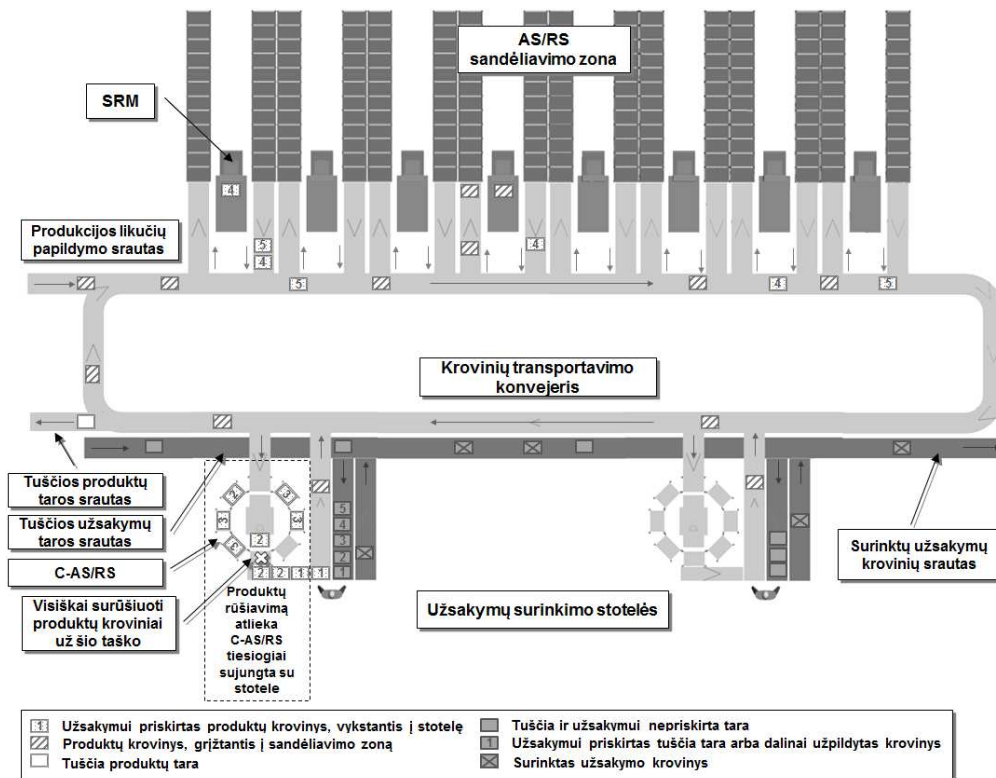
$\tau_{pp}$  (s). Tam, kad keltuvas galėtų pasiekti paskyrimo vietą, SRM turi pasisukti tam tikru kampu ir atvažiuoti į reikalingą aukštą, todėl tikslinga apibrėžti visų galimų SRM posūkių kampų aibę  $D_{SRM} = \{r_k \mid r_k = 45^\circ \cdot \alpha, \alpha = \overline{-3, 4}, k = \overline{1, 8}\}$ , kuri yra dydžio  $N_D$  ir kiekvienas elementas  $r_k$  žymi galimą SRM posūkio kampą, centrinės ašies atžvilgiu, išreikštą laipsniais. Kai SRM važiuoja nuo vienos vietos į kitą, kiekvienas keltuvas yra pasukamas  $\pm d_{c_{j_1} c_{j_2}}$  laipsniais tarp stulpelių  $c_{j_1}$  ir  $c_{j_2}$  ( $j_1, j_2 = \overline{1, N_C}$ ) per laiką  $\tau_{c_{j_1} c_{j_2}}$  ir kiekvienas keltuvas nuvažiuoja vertikalių atstumą  $d_{l_{i_1} l_{i_2}}$  tarp aukštų  $l_{i_1}$  ir  $l_{i_2}$  ( $i_1, i_2 = \overline{1, N_L}$ ) per laiką  $\tau_{l_{i_1} l_{i_2}}$ . Taigi, jei SRM transportuoja krovinį tarp dviejų tuščių sandėliavimo vietų  $s_{l_{i_1} c_{j_1}}$  ir  $s_{l_{i_2} c_{j_2}}$ , tai kiekvieno keltuvo bendras keliavimo laikas yra lygus  $\max(\tau_{c_{j_1} c_{j_2}}, \tau_{l_{i_1} l_{i_2}})$  įvertinant, kad keltuvai gali judėti vertikaliai, o SRM gali sukis aplink savo ašį tuo pačiu metu.

Pagrindinė šiame darbe siūlomos C-AS/RS paskirtis yra jos integravimas į 2.6 pav. pateiktą „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemą, siekiant išspręsti produktų krovinį rūšiavimo problemą ir padidinti bendrą užsakymų surinkimo sistemos efektyvumą.



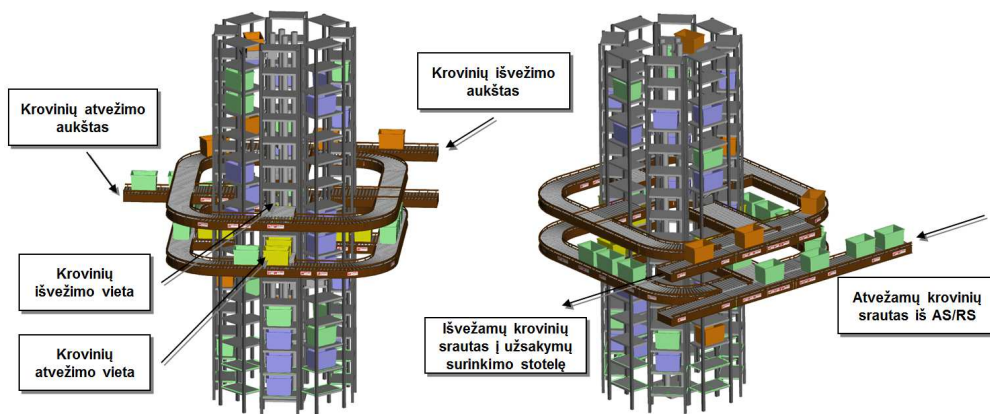
3.8 pav. C-AS/RS integravimo į užsakymų surinkimo sistemą schema

3.8 pav. pavaizduota principinė C-AS/RS integravimo į užsakymų surinkimo sistemą schema. Šioje automatizuotos užsakymų surinkimo sistemos konfigūracijoje C-AS/RS yra tiesiogiai sujungta su krovinį transportavimo konvejerių sistema ir užsakymų surinkimo stotele ir tokiu būdu užtikrina reikalingą krovinį pristatymo seką operatoriui atlikdama jų trumpalaikį sandėliavimą ir rinkimą pagal sandėlio valdymo sistemos nustatytą užsakymų surinkimo seką. C-AS/RS panaudojimas leidžia visiškai atsisakyti 2.2 skyrelyje aprašytų krovinį rūšiavimo linijos apribojimų, dėl kurių kroviniai yra užlaikomi ant rūšiavimo linijos įėjimo konvejerių, blokuojama SRM krovinį rinkimo operacija ir sumažėja AS/RS pralaidumas bei bendras visos užsakymų surinkimo sistemos efektyvumas.

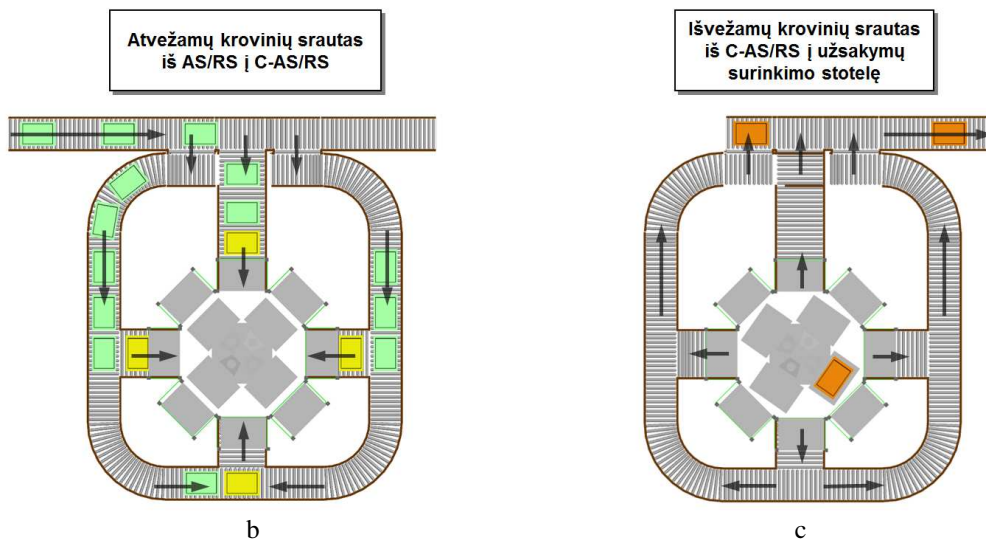


3.9 pav. „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistema su integruota C-AS/RS

3.9 pav. pateikta darbe siūloma patobulinta „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistemos schema, kurioje prie kiekvienos užsakymų surinkimo stotelės yra integruota C-AS/RS. „Produkcija–Žmogus“ užsakymų surinkimo sistema veikia tokiais pačiais principais, kaip aprašyta 2.2 skyrelyje, t. y. sandėlio valdymo sistema nustato užsakymų surinkimo seką kiekvienoje stotelėje ir sukuria produktų krovinų srautą iš AS/RS į stoteles, kuriame kiekvieno užsakymo produktų kroviniai sudaro unikalią krovinų transportavimo grupę. Produktų kroviniai yra transportuojami iš AS/RS bet kokia seka į C-AS/RS, kurioje yra atliekamas trumpalaikis krovinų sandėliavimas ir rinkimas rūšiuojant pagal sandėlio valdymo sistemos nustatytą užsakymų surinkimo seką stotelėje.



a



b

c

**3.10 pav.** C-AS/RS integravimo su konvejerių sistema pavyzdys su  $SRM_2$ , kai  $N_{kelt} = 4$ : a – erdvinis vaizdas; b – krovinių atvežimo aukšto vaizdas iš viršaus; c – krovinių išvežimo aukšto vaizdas iš viršaus

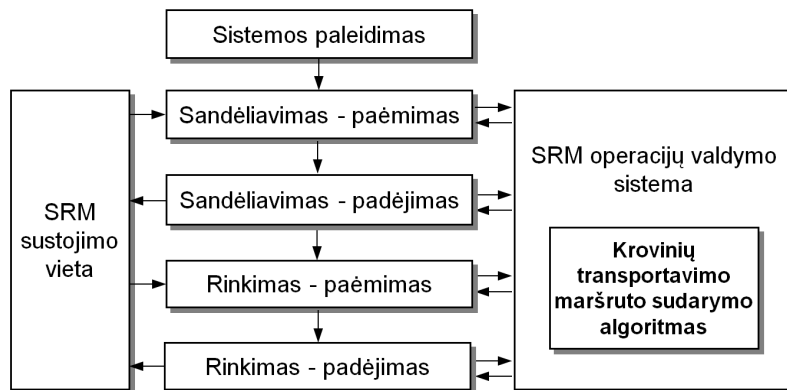
3.10 pav. pateiktas C-AS/RS integravimo su konvejerių sistema pavyzdys, kuriame krovinių srautai yra aptarnaujami skirtinguose aukštuose. Iš AS/RS atvežamų krovinių srautas yra tolygiai paskirstomas tarp krovinių atvežimo vietų taip, kad visi SRM keltuvai būtų vienodai apkrauti sandėliavimo operacijos metu. Krovinių išvežimo aukšte SRM padeda krovinius ant išvežimo konvejerių ir kroviniai yra transportuojami į užsakymų surinkimo stotelę. Atvežimo / išvežimo konvejerius galima integruoti pasirinktuose stelažų aukštuose ir tokiu būdu racionaliai suderinti C-AS/RS su kitomis sandėlio sistemomis.



### 3.2. Valdymo algoritmų sudarymas

Efektyviam C-AS/RS valdymui yra reikalingi intelektualūs įrenginių valdymo sprendimai, kurie ne tik užtikrintų optimalų sistemos funkcionavimą, bet ir patikimą sąsają su kitomis sandėlio sistemomis. C-AS/RS valdymo sistemai yra keliamas uždavinys racionaliai suderinti aptarnaujamų krovinių srautus ir minimizuoti SRM krovinių transportavimo laiką, kad būtų pasiektas reikalingas sistemos našumas.

Kaip įprasta AS/RS sistemose, C-AS/RS veikimas yra sudarytas iš ciklų, kurie susideda iš šių operacijų: sandėliavimo–paėmimo (SP), sandėliavimo–padėjimo (SD), rinkimo–paėmimo (RP) ir rinkimo–padėjimo (RD). Kiekvienos operacijos krovinių transportavimo maršruto planavimą ir vykdymą atlieka SRM operacijų valdymo sistema, kuri yra aktyvuojama kiekvieną kartą, kai SRM pabaigia einamąją operaciją arba prieš jam vykstant į sustojimo vietą. Vykdamas SRM operacijas, C-AS/RS įrenginių valdymo sistemos nuolat perduoda informaciją operacijų valdymo sistemai, siekiant užtikrinti efektyvią SRM judėjimo kontrolę.



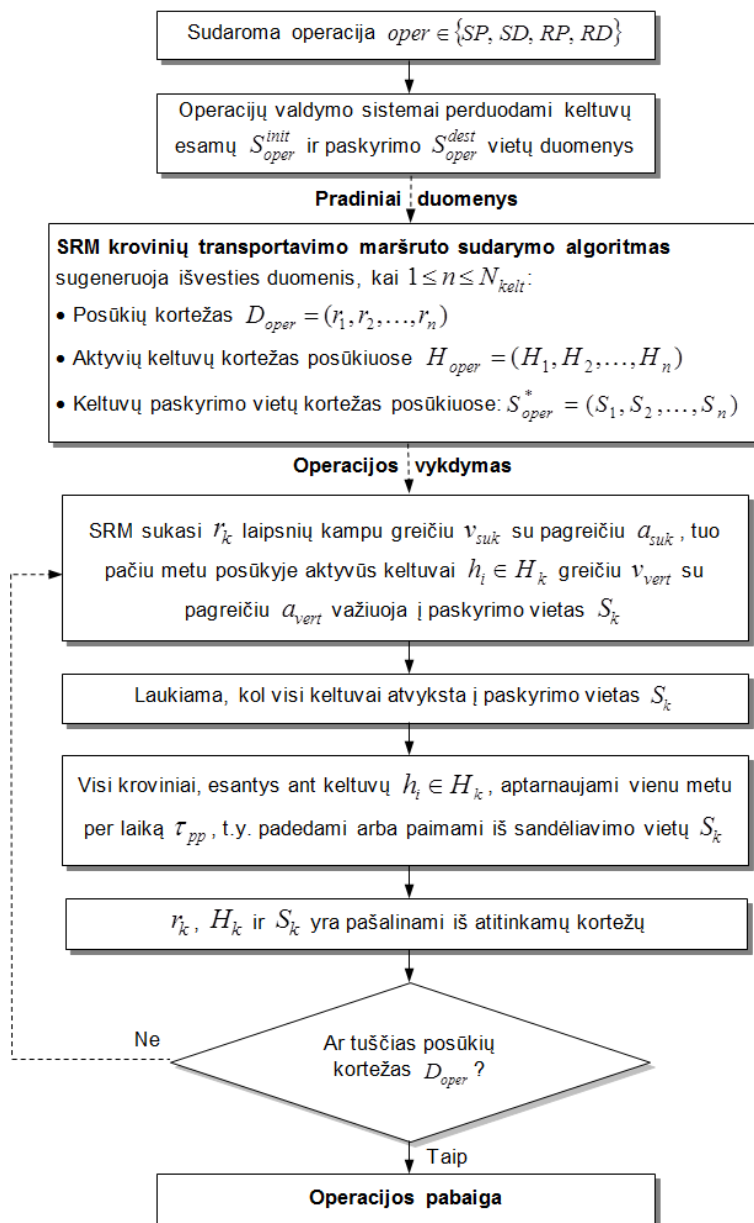
3.11 pav. SRM ciklo vykdymo schema

3.11 pav. pateikta SRM ciklo operacijų vykdymo schema, sudaryta pagal standartinius principus, taikomus bet kurio tipo AS/RS, kuriose SRM atlieka nustatytą skaičių operacijų ciklo metu priklausomai nuo turimų keltuvų skaičiaus. Prieš pradėdant sandėliavimo–paėmimo operaciją, esamos SRM keltuvų pozicijos duomenys yra perduodami operacijų valdymo sistemai ir pagal grąžinamus duomenis, SRM keltuvai važiuoja į krovinių atvežimo vietas, kur paima sandėliavimo laukiančius krovinius. Kroviniams yra parenkamos arčiausiai atvežimo vietų esančios sandėliavimo vietos ir sukuriama sandėliavimo–padėjimo operacija, kurios metu SRM keltuvai važiuoja į kiekvieno krovinio sandėliavimo vietą ir juos padeda. Pagal panašius principus yra sudaromos ir rinkimo operacijos. Kroviniai iš sandėliavimo vietų yra surenkami pagal sandėlio valdymo sistemos nurodytą seką, kurios sudarymo principai priklauso nuo konkretaus sistemos taikymo. Rinkimo–paėmimo operacijos metu SRM keltuvai važiuoja į kiekvieno nurodyto krovinio paskyrimo vietą ir juos paima. Surinkus visus reikalingus krovinius, yra sukuriama rinkimo–padėjimo operacija, kurios metu SRM keltuvai transportuoja

krovinius į išvežimo vietas, kur juos padeda ant konvejerių ir baigia visą ciklą. Priklausomai nuo krovinių srautų valdymo reikalavimų, SRM gali vykdyti sandėliavimo ir rinkimo operacijas skirtinga tvarka nei nurodyta 3.11 pav. Jeigu pabaigęs operaciją SRM negauna duomenų iš operacijų valdymo sistemos apie tolesnes operacijas, tuomet SRM keltuvai važiuoja į nustatytą sustojimo vietą. Kadangi ankstesniuose AS/RS sistemų tyrimuose buvo parodyta, kad SRM sustojimo vieta turi reikšmingos įtakos sistemos pralaidumui tik esant mažam įrenginių apkrautumui, o šiame darbe siūlomos sistemos veikimas yra numatytas didelio apkrautumo sąlygomis, todėl priimama, kad SRM pasilieka paskutinėje įvykdytos operacijos vietoje, kurioje ir laukia kitos operacijos. Šiame darbe taip pat priimama, kad SRM yra planuojama tik tolesnė operacija, tačiau iš principo sistemos galimybės leidžia planuoti ir daugiau operacijų į priekį, siekiant padidinti bendrą sistemos pralaidumą tam tikrais atvejais.

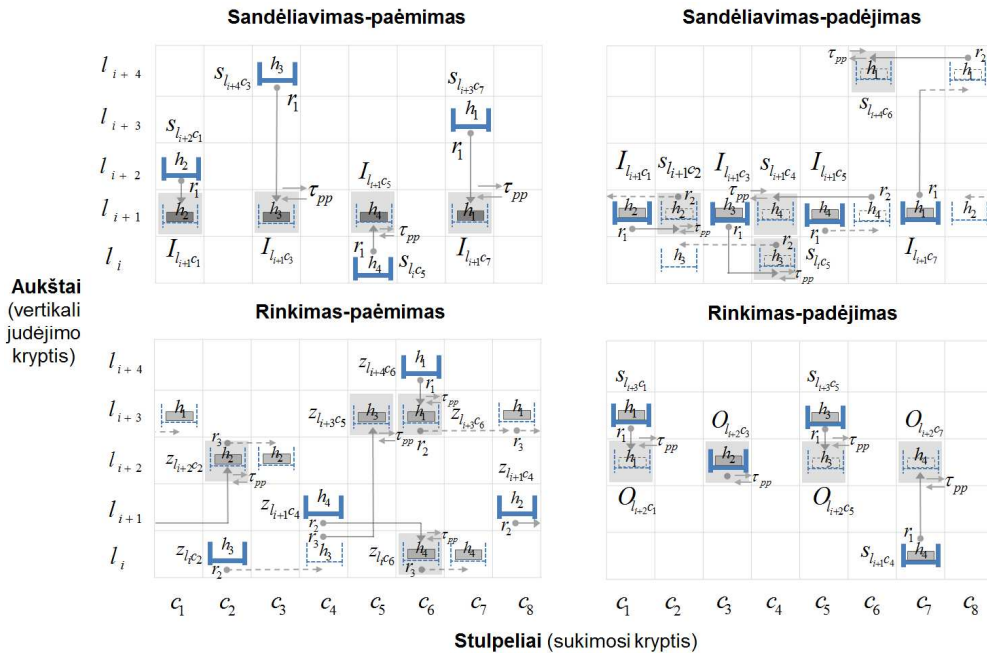
Esminė operacijų valdymo sistemos dalis yra krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas, kuris minimizuoja bendrą visų SRM keltuvų keliavimo laiką, reikalingą transportuoti visą operacijai priskirtų krovinių grupę. Algoritmas įvertina įvairius krovinių transportavimo scenarijus tarp esamų ir paskyrimo vietų laiko prasme pagal važiavimo atstumus ir SRM techninius parametrus ir išrenka scenarijų su bendru minimaliu transportavimo laiku. Prieš pradėdant kiekvieną SRM operaciją, valdymo sistemai yra perduodamos esamų keltuvų vietų  $S_{oper}^{init} \subseteq S_{SP} \cup S_{SD} \cup S_{RP} \cup S_{RD}$  ir tikslo vietų  $S_{oper}^{dest} \subseteq S_{oper}$  aibės, kur  $oper \in \{SP, SD, RP, RD\}$  nurodo aktyvios operacijos tipą. Pagal šią informaciją operacijų valdymo sistema atlieka krovinių transportavimo ciklo planavimą tarp pradinių ir tikslo vietų ir perduoda SRM įrenginiams tokią informaciją:

- kintamo ilgio ir fiksuotos sekos SRM posūkių kampų kortežas (angl. *tuple*)  $D_{oper} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ , kur  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ , apibrėžia posūkių seką, kurią SRM turi įvykdyti, kad kiekvienas keltuvai pasiektų savo tikslo vietą stelažuose;
- kiekviename SRM posūkyje aktyvių keltuvų kortežas  $H_{oper} = (H_1, H_2, \dots, H_n)$ , kur  $1 \leq n \leq N_{kelt}$  ir kiekvienas kortežo elementas  $H_k$  yra taip pat kortežas, sudarytas iš aktyvių keltuvų numerių  $h_i$  ( $1 < i < n$ ) kiekviename posūkyje  $r_k$ ;
- paskyrimo vietų kortežas  $S_{oper}^* = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ , kur  $1 \leq n \leq N_{kelt}$  ir kiekvienas kortežo elementas  $S_k$  yra taip pat kortežas, sudarytas iš aktyvių paskyrimo vietų, kurios atitinka SRM keltuvų numerius, apibrėžtus kortežu  $H_k$  kiekviename posūkyje  $r_k$ .



3.12 pav. SRM operacijų valdymo schema

3.12 pav. pateikta SRM operacijų vykdymo schema parodo, kaip C-AS/RS įrenginių valdymo sistemos interpretuoja gautus operacijos vykdymo duomenis ir užtikrina, kad būtų laikomasi nustatytos posūkių kampu sekos  $D_{oper}$  ir keltuvai  $H_{oper}$  būtų transportuojami į paskyrimo vietas  $S_{oper}$  po kiekvieno posūkio.



3.13 pav. SRM ciklo operacijų vykdymo pavyzdys

3.13 pav. pateikta C-AS/RS stelaų struktūros projekcija į dvimatę koordinacių sistemą, apibrėžtą aukštai  $l_i \in L$  ir stulpeliais  $c_j \in C$ , kurioje pavaizduota  $SRM_2$ , kai  $N_{LHD} = 4$  ciklo operacijų vykdymo seka:

- **Sandėliavimas-paėmimas.** Pradinė SRM keltuvų vieta yra apibrėžta kortežu  $S_{SP}^{init} = (s_{l_{i+3}c_7}, s_{l_{i+2}c_1}, s_{l_{i+4}c_3}, s_{l_{i+1}c_5})$ , kurio kiekvienas elementas nurodo atitinkamo keltuvo iš kortežo  $H_{SP}^{init} = (h_1, h_2, h_3, h_4)$  vietą. Pradinė vieta šiuo atveju sutampa su paskutinės operacijos baigimo vieta. Prieš SRM keltuvams pradėdant važiuoti iš esamos vietos, operacijų valdymo sistema sudaro tikslo vietų aibę  $S_{SP}^{dest} = \{I_{l_{i+1}c_7}, I_{l_{i+1}c_1}, I_{l_{i+1}c_3}, I_{l_{i+1}c_5}\}$  kortežo  $S_I$  pagrindu. SRM reikia atlikti posūkius  $D_{SP} = (r_1) = (0^\circ)$  tam, kad aktyvūs keltuvai  $H_{SP} = (H_1) = (h_1, h_2, h_3, h_4)$  pasiektų krovinių atvežimo vietas  $S_{SP}^* = (S_1) = (I_{l_{i+1}c_7}, I_{l_{i+1}c_1}, I_{l_{i+1}c_3}, I_{l_{i+1}c_5})$  ir paimtų ten esančius krovinius. Krovinių atvežimo vietas turėtų būti išdėstytos stelažuose taip, kad reikalingas SRM posūkių skaičius būtų minimalus ir visi kroviniai būtų paimami vienu metu per laiko intervalą  $\tau_{pp}$ .
- **Sandėliavimas-padėjimas.** SRM keltuvai važiuoja iš krovinių atvežimo vietų  $S_{SD}^{init} = S_{SP}^*$  į paskirtas tuščias sandėliavimo vietas stelažuose

$S_{SD}^{dest} = \{s_{l_{i+4}c_6}, s_{l_{i+1}c_2}, s_{l_{i+1}c_5}, s_{l_{i+1}c_4}\}$ . SRM yra reikalingi posūkiai  $D_{SD} = (r_1, r_2) = (45^\circ, -90^\circ)$ , kuriuos atlikus aktyvūs keltuvai  $H_{SD} = (H_1, H_2) = ((h_2, h_3), (h_1, h_4))$  pasieks tikslo vietas  $S_{SD}^* = (S_1, S_2) = ((s_{l_{i+1}c_2}, s_{l_{i+1}c_5}), (s_{l_{i+4}c_6}, s_{l_{i+1}c_4}))$ , kur padės transportuojamus krovinius.

- **Rinkimas–paėmimas.** SRM keltuvai važiuoja iš krovinių sandėliavimo vietų  $S_{RP}^{init} = S_{SD}^*$  į rinkimo vietas  $S_{RP}^{dest} = \{z_{l_{i+3}c_6}, z_{l_{i+2}c_2}, z_{l_{i+3}c_5}, z_{l_{i+1}c_6}\}$ . SRM yra reikalingi posūkiai  $D_{RP} = (r_1, r_2, r_3) = (0^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$ , kuriuos atlikus, aktyvūs keltuvai  $H_{RP} = (H_1, H_2, H_3) = (h_1, (h_2, h_4), h_3)$  pasieks tikslo vietas  $S_{RP}^* = (S_1, S_2, S_3) = (z_{l_{i+3}c_6}, (z_{l_{i+2}c_2}, z_{l_{i+1}c_6}), z_{l_{i+3}c_5})$ , kur paims ten esančius krovinius.

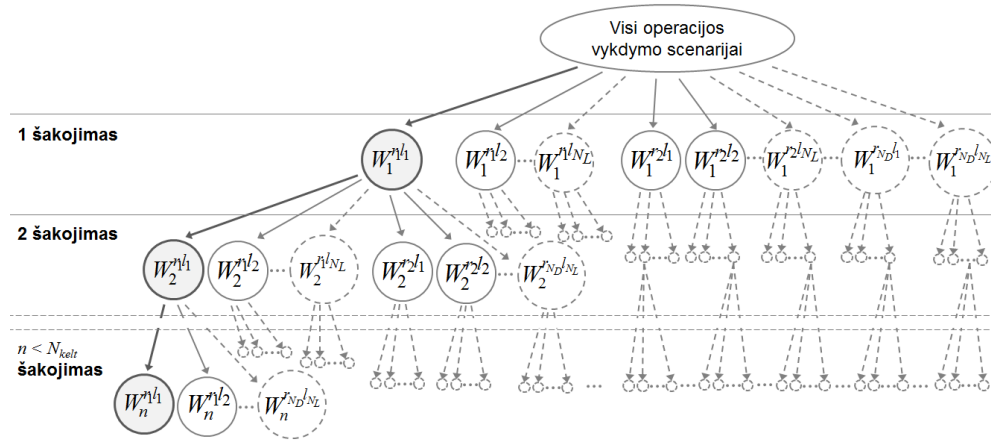
- **Rinkimas–padėjimas.** Su visais surinktais krovinių SRM keltuvai važiuoja iš rinkimo vietų  $S_{RD}^{init} = S_{RP}^*$  į sistemos išvežimo vietas  $S_{RD}^{dest} = \{O_{l_{i+2}c_1}, O_{l_{i+2}c_3}, O_{l_{i+2}c_5}, O_{l_{i+2}c_7}\}$ . SRM yra reikalingi posūkiai  $D_{RD} = (r)_1 = (0^\circ)$ , kuriuos atlikus, aktyvūs keltuvai  $H_{RD} = (H_1) = (h_1, h_2, h_3, h_4)$  pasieks paskyrimo vietas  $S_{RD}^* = (S_1) = (O_{l_{i+2}c_1}, O_{l_{i+2}c_3}, O_{l_{i+2}c_5}, O_{l_{i+2}c_7})$  ir padės transportuojamus krovinius. Kaip ir atvežimo, išvežimo vietas taip pat turėtų būti išdėstytos stelažuose taip, kad SRM reikalingas posūkių skaičius būtų minimalus ir visi kroviniai būtų padedami ant išvežimo konvejerių vienu metu per laiką  $\tau_{pp}$ .

Įvykdžius 3.13 pav. pateiktą ciklą, SRM keltuvai pasilieka operacijos paskutinėje vietoje arba pradeda naują ciklą pagal analogišką seką.

Kiekvienai SRM operacijai krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas apibrėžia operacijos įvykdymo seką, reikalingą aptarnauti nurodytus krovinius. Pagal C-AS/RS veikimo principą, SRM yra sukamas aplink centrinę ašį ir po kiekvieno posūkio aktyvūs keltuvai važiuoja į reikalingą aukštą, kuriame padeda arba paima krovinius, taigi SRM posūkio kampai  $r_k \in D_{oper}$  ( $k = \overline{1, n}$ ,  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ) kiekvieną operaciją padalina į atskiras dalis  $W_{oper} = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ , kur kiekviena dalis  $W_k$  ( $k = \overline{1, n}$ ,  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ) yra aprašoma kortežu  $W_k = (r_k, H_k, S_k)$  su tolesniais elementais: posūkis  $r_k \in D_{oper}$ , posūkyje aktyvių keltuvų kortežas  $H_k \in H_{oper}$  ir kiekvieną keltuvą atitinkančių paskyrimo vietų kortežas  $S_k \in S_{oper}^*$ . Kiekvieną operacijos dalį SRM gali įvykdyti per laiką  $\tau_{W_k}$ , tuomet bendras operacijos laikas

yra  $\tau_{oper} = \sum_{k=1}^n \tau_{W_k}$  ( $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ), kurią minimizuoja krovinių transportavimo

maršruto sudarymo algoritmas. Kadangi kiekviena sandėliavimo vieta yra apibrėžiama stulpeliu ir aukštu, todėl idealiu atveju algoritmas gali atlikti pilną perrinkimą įvertindamas visus galimus operacijos vykdymo scenarijus pagal SRM posūkių  $r_k \in D_{oper}$  aibę ir visas pasiekiamas vietas aukštuose  $l_j \in L$  ir stulpeliuose  $c_j \in C$  po kiekvieno posūkiu. Įvertinus visus galimus operacijos vykdymo scenarijus ir apskaičiavus SRM operacijos laiką  $\tau_{oper}$  kiekvienam scenarijui, bus surastas greičiausias operacijos vykdymo scenarijus su minimaliu laiku, tačiau prireiks  $(N_C \cdot N_L)^{N_{kelt}}$  skaičiavimų šiam uždaviniui išspręsti, o tai yra nepriimtina daugeliu atvejų. Šis uždavinys darbe sprendžiamas sudarant optimalų paieškos algoritmą, paremtą šakų ir ribų metodu, kuris yra vienas iš pagrindinių įrankių sprendžiant visiško perrinkimo problemas [125]. Šakų ir ribų metodo taikymui yra aprašomi tokie elementai: sprendinio paieškos medis su pilnus arba dalinius sprendinius žyminčiomis viršūnėmis, ribų įvertinimo funkcija, medžio šakojimo ir kirtimo, viršūnių parinkimo ir optimalaus sprendinio nustatymo taisyklės.

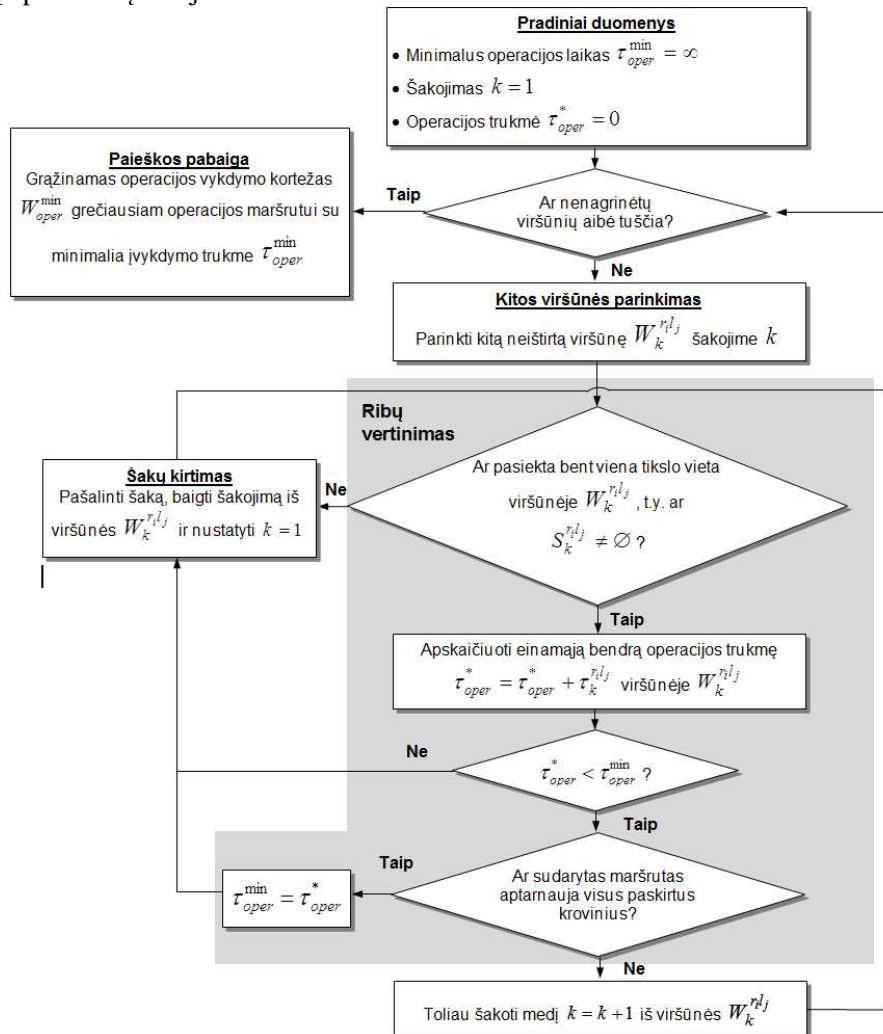


3.14 pav. Greičiausio krovinų transportavimo maršruto paieškos medis

3.14 pav. pateiktas optimalaus SRM operacijos maršruto sudarymo sprendinių paieškos medis pagal šakų ir ribų metodą. Šakojimo proceso metu visų galimų sprendinių aibė yra suskaidoma į mažesnius dalinių sprendinių poaibius, kurie atitinka medžio viršūnes, o briaunos atitinka ryšį tarp kamieninio poaibio ir jo atšakinių poaibių, kurie gaunami šakojimo metu. Kiekviena medžio viršūnė žymi vieną operacijos dalį  $W_k^{r_i l_j}$  ( $k = \overline{1, n}$ ,  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ), kuri įvertina SRM aptarnautų krovinų skaičių, jam atlikus posūkį kampu  $r_i \in R$  ( $i = \overline{1, N_D}$ ) ir keltuvams nuvažius į aukštą  $l_j \in L$  ( $j = \overline{1, N_L}$ ), t. y. algoritmas patikrina, kiek krovinų SRM aptarnautų, jei būdamas dabartinėje vietoje atliktų posūkį  $r_i$  ir kiekvienas keltuvas nuvažiuotų į aukštą  $l_j$  ir atitinkamą stulpelį  $c_m$  ( $m = \overline{1, N_C}$ ), kur galėtų

padėti arba paimti krovinį. Medžio šaknis apibrėžia visų galimų sprendimų aibę ir kiekviena viršūnė išaugina  $N_D \cdot N_L$  naujų šakų. 3.14 pav. ryškiau pažymėtas pilno SRM operacijos maršruto pavyzdys.

Esminis šakų ir ribų metodo tikslas yra auginti tik „perspektyvias“ šakas su galimais sprendiniais ieškomo globalaus minimumo kryptimi. Algoritmo tikslas yra surasti tokį SRM operacijos maršruto įvykdymo scenarijų, kurio metu visi tikslo kroviniai yra aptarnaujami per mažiausią laiką  $\tau_{oper}^{min}$ , kuris yra globalus minimumas visų sprendinių aibėje.

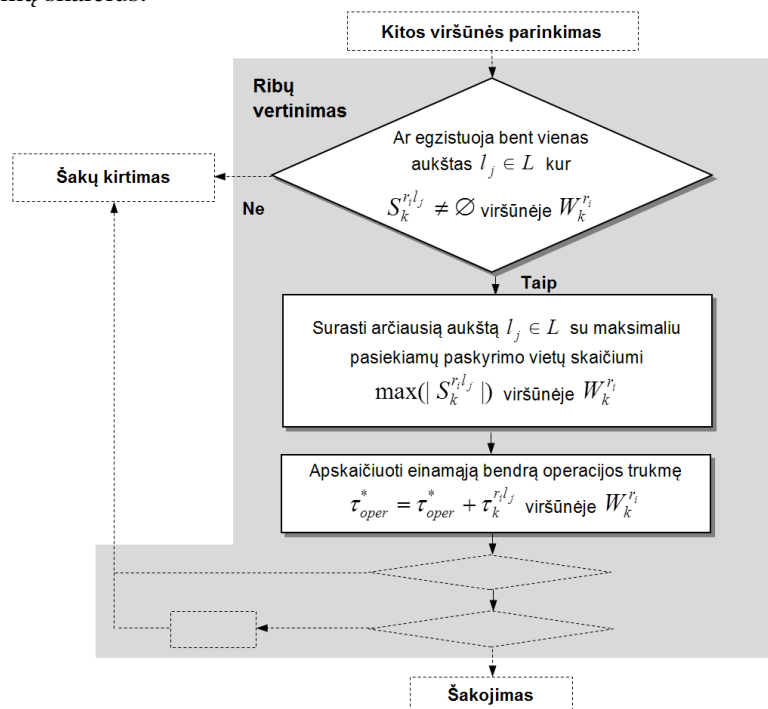


3.15 pav. Greičiausio SRM krovinų transportavimo maršruto sudarymo algoritmas  $A_1$

3.15 pav. pateikta šiame darbe siūlomo greičiausio SRM krovinų transportavimo maršruto sudarymo algoritmo  $A_1$  schema. Ribų vertinimo metu

apskaičiuojamas bendras maršruto laikas po kiekvienos iteracijos  $k$  ir stabdomas medžio šakojimas „neperspektyvia“ kryptimi, kurioje bendras maršruto laikas tik didės arba operacijos dalies metu nė vienas SRM keltuvas negalės aptarnauti krovinį, t. y. kiekvienas SRM posūkis turi būti toks, kad bent vienas keltuvas galėtų aptarnauti krovinį. Algoritme taikoma „pirmas giliausias“ medžio auginimo strategija, t. y. šakojimas pradedamas nuo pirminės viršūnės, kuri yra šakojama kiek galima giliau tol, kol pasiekiamas ieškomas sprendinys arba pasiekama atšakų neturinti viršūnė. Pagal šią strategiją sprendinių medis yra auginamas greičiausiai ir greičiausiai randamas pirmasis sprendinys – minimalus laikas  $\tau_{oper}^{\min}$ , per kurį SRM įvykdytų visą operacijos maršrutą ir aptarnautų visus krovinis. Toliau ieškant kiekvieno kito sprendinio, kiekvienoje viršūnėje bendras maršruto laikas  $\tau_{oper}^*$  yra lyginamas su turimu geriausiu sprendiniu ir, jei tenkinama sąlyga  $\tau_{oper}^* < \tau_{oper}^{\min}$ , algoritmas toliau ieško geresnio sprendinio iš esamos viršūnės. Paieška baigiama, kai visos galimos medžio viršūnės buvo patikrintos ir grąžinamas geriausias rastas sprendinys.

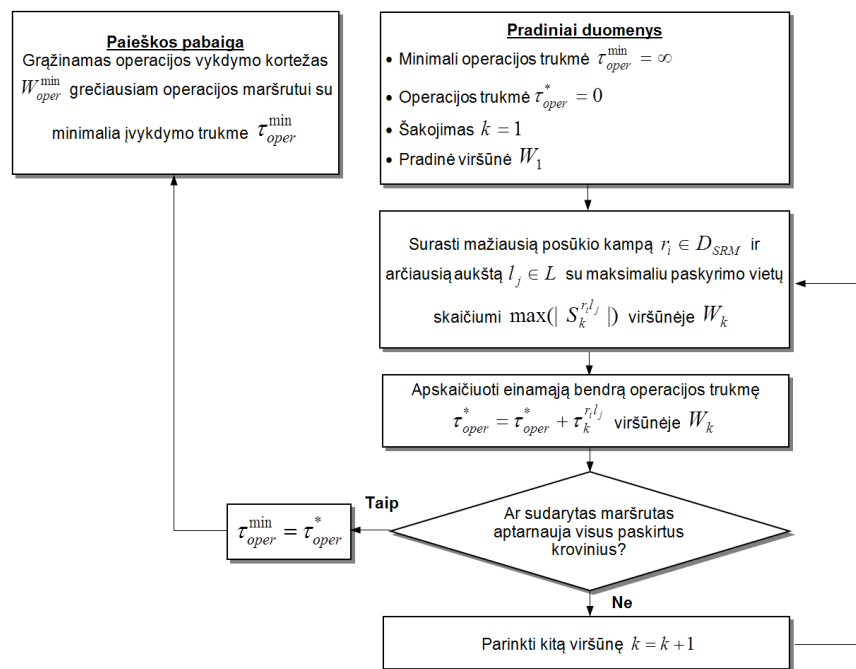
Kadangi optimaliam algoritmui reikia daug skaičiavimų, šiame darbe taip pat siūlomi alternatyvūs operacijos maršruto sudarymo algoritmai  $A_2$  ir  $A_3$ , kuriems prognozuojamas mažesnis tikslumas, tačiau reikalingas žymiai mažesnis skaičiavimų skaičius.



3.16 pav. Ribų vertinimas maršruto sudarymo algoritme  $A_2$



Algoritmas  $A_2$  sudarytas taip pat naudojant šakų ir ribų metodą, o skirtumas (palyginti su  $A_1$ ) yra tik ribų vertinimo dalyje (3.16 pav.). Šiame algoritme sprendinių paieškos medis yra sudaromas tik pagal SRM posūkių aibę  $D_{oper}$ , įvertinant visus galimus SRM posūkių  $r_i \in R$  ( $i = \overline{1, N_D}$ ) scenarijus operacijos maršruto metu ir kiekvienoje operacijos dalyje  $W_k^{r_i}$  ( $k = \overline{1, n}$ ,  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ) ieškant arčiausio aukšto  $l_j \in L$  ( $j = \overline{1, N_L}$ ), kuriame aktyvūs keltuvai galėtų vienu metu per laiką  $\tau_{pp}$  aptarnauti maksimalų krovinių skaičių, t. y. būtų pasiektas maksimalus paskyrimo vietų skaičius  $\max(|S_k^{r_i l_j}|)$ . Aukštų  $l_j \in L$  paieška priklauso nuo pasirinkto SRM tipo: sistemose su  $SRM_1$  visiems keltuvams ieškomas bendras arčiausias aukštas; sistemose su  $SRM_2$  kiekvienam keltuvui atskirai ieškomas arčiausias aukštas. Sprendiniui gauti šis algoritmas daugiausiai turi įvertinti  $(N_C)^{N_{kelt}} \cdot N_L$  viršūnių, o tai yra  $(N_L)^{N_{kelt}-1}$  kartų mažiau, palyginti su optimaliu algoritmu  $A_1$ .



3.17 pav. SRM krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas  $A_3$

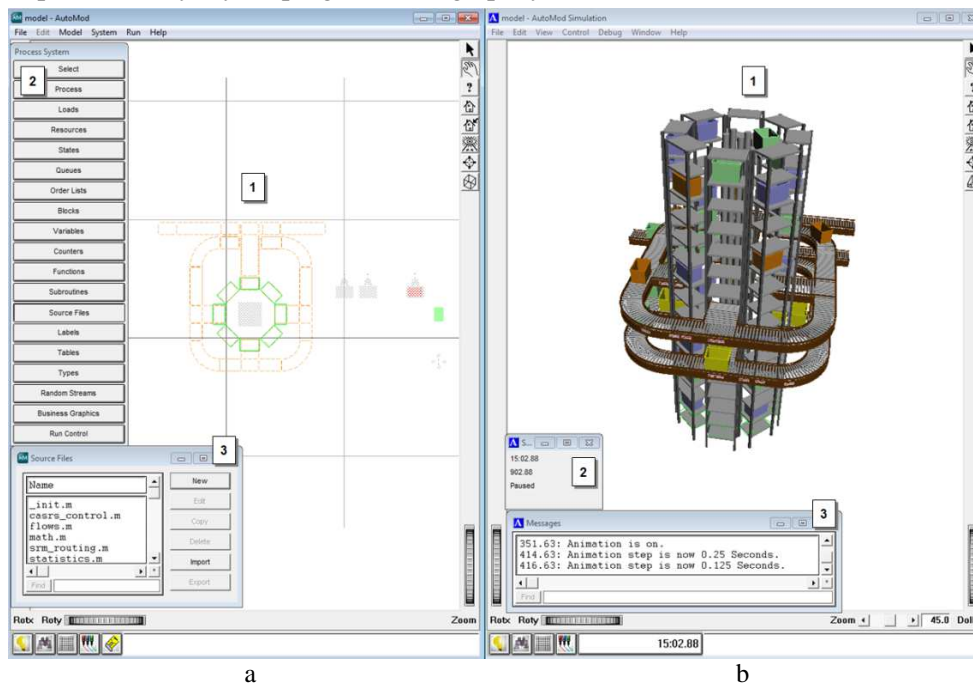
Algoritmo  $A_3$  sudarymo principas yra paremtas atskiru operacijos maršruto dalies  $W_k$  optimizavimu, kiekvienoje dalyje ieškant mažiausio posūkio kampo  $r_i \in D_{SRM}$  ( $i = \overline{1, N_R}$ ) ir arčiausio aukšto  $l_j \in L$  ( $j = \overline{1, N_L}$ ), kuriame aktyvūs

keltuvai galėtų vienu metu per laiką  $\tau_{pp}$  aptarnauti maksimalų krovinių skaičių, t. y. būtų pasiektas maksimalus paskyrimo vietų skaičius  $\max(|S_k^{t,j}|)$ . Kadangi šis algoritmas atlieka tik vienos maršruto dalies, o ne bendrą viso maršruto optimizavimą kaip algoritmuose  $A_1$  ir  $A_2$ , todėl sudarant operacijos krovinių surinkimo maršrutą, reikia įvertinti tik  $N_C \cdot N_L \cdot N_{kelt}$  viršūnių. Operacijos maršruto sudarymo schema šiam algoritmui pateikta 3.17 pav.

Visi nagrinėjami algoritmai yra visiškai suderinti su darbe siūlomais SRM tipais  $SRM_1$  ir  $SRM_2$ , tačiau praktinė šių algoritmų realizacija kiekvienam SRM tipui nežymiai skiriasi dėl skirtingų SRM keltuvų vertikalios judėjimo savybių – nepriklausomo kiekvieno keltuvo judėjimo  $SRM_2$  atveju ir bendru visų keltuvų judėjimu sistemoje su  $SRM_1$ .

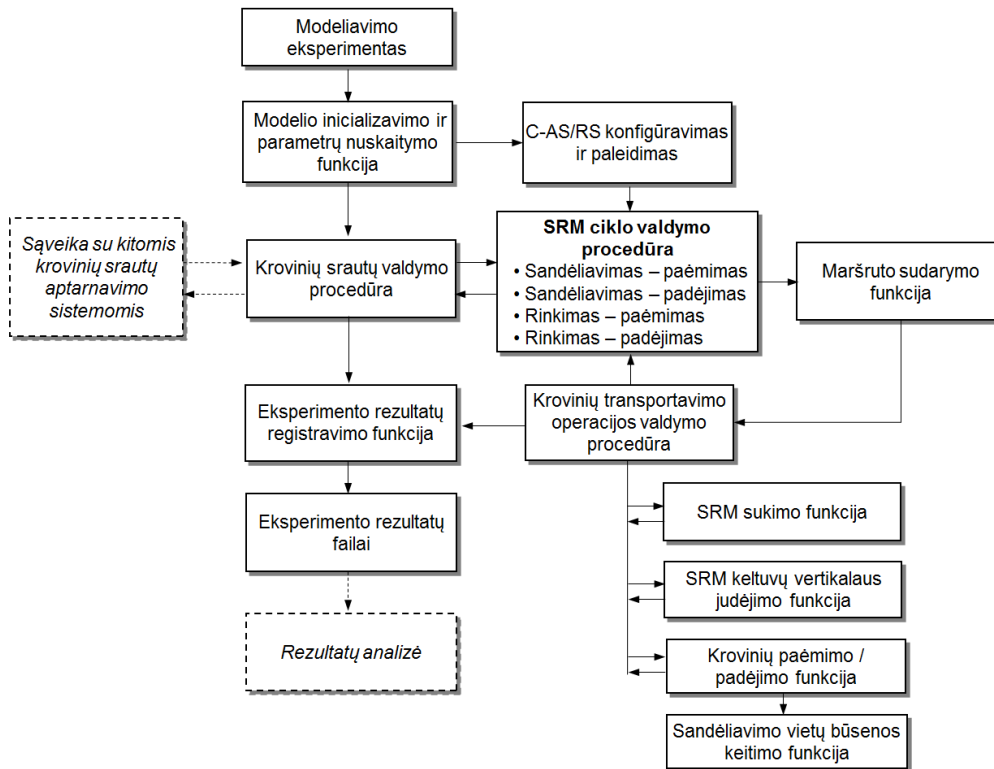
### 3.3. Imitacinių tyrimo modelių sudarymas

Išsamiais darbe siūlomos sistemos C-AS/RS tyrimams buvo sudarytas parametruotas imitacinis modelis su specializuota materialijų srautų modeliavimo sistema *AutoMod*. 3.18 pav. pateikti modelio sudarymo ir modeliavimo eksperimento vykdymo programos langų pavyzdžiai.



**3.18 pav.** *AutoMod* programos langų pavyzdžiai: a – modelio sudarymo aplinka (1 – modelio objektų grafinė vizualizacija, 2 – procesų sistemos įrankių juosta; 3 – programos kodo failai); b – modeliavimo eksperimento vykdymo aplinka (1 – modelio veikimo grafinė vizualizacija; 2 – modeliavimo laikas; programos sisteminiai pranešimai)

Modelis buvo sudarytas *AutoMod* modeliavimo aplinkoje, panaudojant pagrindinius procesų sistemos objektus: krovinus, eiles, resursus, skaitiklius, įvairių tipų kintamuosius, procedūras, funkcijas ir modelio programos kodo failus. Taip pat buvo panaudoti ir specializuoti automatinių transporterių ir konvejerių sistemų modeliavimo objektai. *AutoMod* modelis yra valdomas iš krovinio perspektyvos, t. y. sugeneruoti įvairių tipų ir paskirties kroviniai vykdo programos kodo failuose aprašytas procedūras, kuriose yra atliekami įvairūs veiksmai su kroviniais – transportavimas ant konvejerio ar transporterio, užlaikymas imituojant operacijos vykdymo laiką, matematinių skaičiavimų atlikimas, naujų krovinų sukūrimas, duomenų failų nuskaitymas, rezultatų spausdinimas ir pan.



3.19 pav. C-AS/RS imitacinio modelio veikimo schema

3.19 pav. pavaizduota sudaryto C-AS/RS imitacinio modelio veikimo schema. Sudarytas sistemos modelis buvo patikrintas, prieš jį naudojant modeliavimo eksperimentams: patikrintas modelio parametrų nuskaitymas, sistemos ir srautų valdymo funkcijų ir procedūrų veikimas, rezultatų registravimo ir spausdinimo funkcijos. Kiekvienas modeliavimo eksperimentas yra pradedamas sistemos parametrų nuskaitymu iš išorinio tekstinio failo. Pagrindiniai C-AS/RS modelio parametrai yra pateikti 3.1 lentelėje.

### 3.1 lentelė. C-AS/RS modelio parametrai

| Parametras  | Aprašymas  |
|-------------|--|
| $SRM$       | SRM tipas  |
| $N_{kelt}$  | SRM keltuvų skaičius   |
| $A$         | Krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas               |
| $N_L$       | Stelažų aukštų skaičius  |
| $L_{ai}$    | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinacija          |
| $N_{ai}$    | Krovinių atvežimo / išvežimo vietų skaičius, kai $N_{av} = N_{iv}$ |
| $a_{vert}$  | Keltuvo vertikalaus judėjimo pagreitis, (m/s <sup>2</sup> )        |
| $v_{vert}$  | Keltuvo vertikalaus judėjimo greitis, (m/s)                        |
| $a_{suk}$   | SRM sukimosi pagreitis (laipsn./s <sup>2</sup> )                   |
| $v_{suk}$   | SRM sukimosi greitis (laipsn./s)                                   |
| $G$         | SRM judėjimo greittaveika  |
| $\tau_{pp}$ | Krovinio paėmimo / padėjimo trukmė (s)                             |

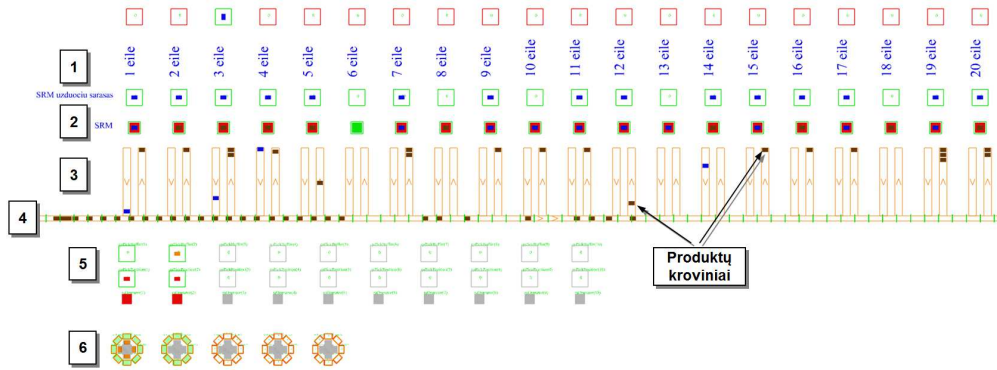
Modelio paleidimo metu lygiagrečiai yra kviečiamos C-AS/RS konfigūravimo ir krovinių srautų valdymo procedūros. Konfigūravimo procedūroje yra nustatomi C-AS/RS judėjimo ir struktūros parametrai ir sistema paruošiama krovinių srautui aptarnauti. Priklausomai nuo modeliavimo eksperimento srautų valdymo procedūra gali sugeneruoti atvežamų ir išvežamų krovinių srautus arba sukurti sąsają tarp C-AS/RS ir kitų sistemų, t. y. aptarnauti iš išorinių sistemų atvežamus ir į jas išvežamus krovinius. SRM ciklo valdymo procedūroje yra apdorojami krovinių duomenys ir sudaromi operacijų duomenų rinkiniai, kurie perduodami krovinių transportavimo operacijos maršruto sudarymo funkcijai. SRM ciklas modelyje yra vykdomas pagal 3.11 pav. pateiktą operacijų seką. Maršruto sudarymo funkcijoje yra realizuoti visi trys 3.2 skyrelyje paminėti maršruto sudarymo algoritmai ir konkretus algoritmas yra parenkamas priklausomai nuo parametro  $A$  reikšmės. Pagal pradinius operacijos duomenis ir pasirinktą algoritmą maršruto sudarymo funkcija grąžina operacijos vykdymo duomenis  $W_{oper} = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ , kur  $W_k = (\overline{r_k}, H_k, S_k)$  ( $k = 1, n$ ,  $1 \leq n \leq N_{kelt}$ ), kurie toliau perduodami operacijos vykdymo procedūrai. Kiekviena operacija yra vykdoma pagal 3.12 pateiktą veiksmų seką. Operacijos vykdymo metu yra kviečiamos SRM sukimo ir keltuvų vertikalaus judėjimo funkcijos, kurios pasuka SRM nurodytu kampu ir transportuoja keltuvus į paskyrimo aukštą tam, kad būtų pasiektos paskyrimo vietos stelažuose. Keltuvui atvykus į paskyrimo vietą, yra kviečiama krovinių paėmimo / padėjimo funkcija ir kroviniai yra padedami arba paimami iš stelažų. Priklausomai nuo modeliavimo eksperimento yra kviečiama sandėliavimo vietų būsenos keitimo funkcija, kuri

atnaujina sandėliavimo vietos užimtumo duomenis. Modeliavimo eksperimento metu yra registruojami ir spausdinami į išorinius failus 3.2 lentelėje pateikti sistemos veikimo rodikliai, kurie toliau analizuojami taikant statistinės analizės metodus. Sistemos galimybės leidžia SRM sukintis, (keltuvams) judėti vertikaliai, paimti / padėti krovinius, taip pat lygiagrečiai atlikti ir šiuos veiksmus: judėti vertikaliai ir sukintis, judėti vertikaliai ir paimti / padėti krovinius (tik  $SRM_2$ ). Taigi,  $SRM_1$  gali būti 4 skirtingose būsenose, o  $SRM_2$  – 5 būsenose. Kiekvieno imitacinio modeliavimo eksperimento metu buvo renkami duomenys apie santykinę šių būsenų trukmę.

**3.2 lentelė.** C-AS/RS efektyvumo analizėje naudojami rodikliai

| Rodiklis            | Rodiklio apibrėžimas   |
|---------------------|--|
| $\lambda$           | <b>Pralaidumas.</b> Transportuojamų krovinių srauto intensyvumas (krov./val. – krovinių skaičius per valandą)                            |
| $\lambda_{\max}$    | <b>Maksimalus pralaidumas</b> (maksimalus galimas transportuojamų krovinių srauto intensyvumas), krov./val.                              |
|                     | <b>SRM būsenų santykinės trukmės</b>   |
| $T_{vert}$          | SRM judėjimo vertikaliai santykinė trukmė, %   |
| $T_{suk}$           | SRM sukimosi santykinė trukmė, %   |
| $T_{pp}$            | SRM krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinė trukmė, %  |
| $T_{prast}$         | SRM prastovos santykinė trukmė, %  |
| $T_{vert\cdot pp}$  | SRM judėjimo vertikaliai ir paėmimo / padėjimo būsenos santykinė trukmė ( $SRM_1 T_{vert\cdot pp} = 0$ , nes toks veiksmas negalimas), % |
| $T_{vert\cdot suk}$ | SRM judėjimo vertikaliai ir sukimosi santykinė trukmė, %   |
| $U_{CASRS}$         | C-AS/RS apkrautumas $U_{CASRS} = 1 - T_{prast}$ , dalimis arba procentais  |
|                     | $T_{vert} + T_{suk} + T_{pp} + T_{vert\cdot pp} + T_{vert\cdot suk} + T_{prast} = 100\%$   |

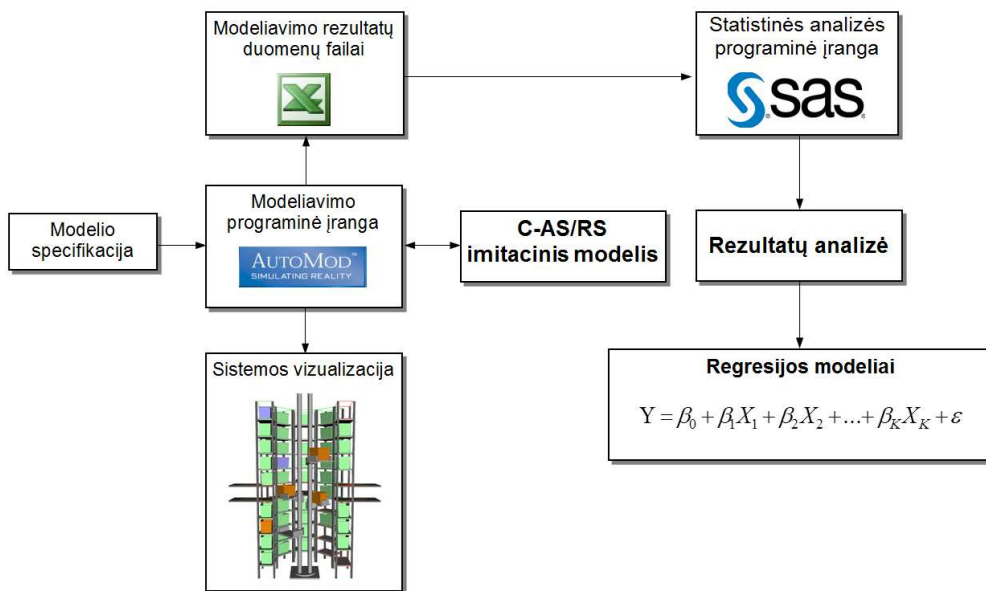
Siekiant nustatyti produktų krovinių rūšiavimo įtaką standartinės užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ pralaidumui ir jos įrenginių apkrautumi bei gautus rezultatus palyginti su patobulinta sistema, kurioje C-AS/RS integruota užsakymų surinkimo stotelėje, buvo sudarytas užsakymų surinkimo imitacinis sistemos „Produkcija – Žmogus“ modelis (3.20 pav.).



**3.20 pav.** Imitacinio užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ modelio realizacija *AutoMod* programa: 1 – AS/RS stelažų eilės, 2 – SRM; 3 – produktų krovinų atvežimo / išvežimo konvejeriai; 4 – produktų krovinų transportavimo iš / į užsakymų surinkimo stotelę konvejeriai; 5 – užsakymų surinkimo stotelės; 6 – integruotos C-AS/RS

Darbe sudarytame užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ imitaciniame modelyje realizuoti standartinės sistemos „Produkcija–Žmogus“ (2.6 pav.) bei patobulintos sistemos su integruota C-AS/RS funkcionalumai (3.9 pav.).

Šiame darbe imitacinio modeliavimo galimybės yra derinamos su pažangiais statistinės analizės metodais ir siūloma šių metodų integravimo metodika pagal 3.21 pav. pateiktą schemą.



**3.21 pav.** Imitacinio modeliavimo ir statistinės analizės metodų integravimas

Sudarytos sistemos tyrimo metodikos tikslas yra išanalizuoti C-AS/RS sistemą modeliavimo aplinkoje ir pagal gautus skaičių duomenis sudaryti sistemos efektyvumo vertinimo matematinius modelius, kuriuos galėtų naudoti sistemų projektuotojai, siekiantys įvertinti ir palyginti tokių sistemų efektyvumą. Pirminiame planavimo etape yra parengiama modelio specifikacija, t. y. apibrėžiamas imitacinio modelio išsamumas ir modeliavimo prielaidos, parametrai, valdymo algoritmai ir kiti sistemos analizei būtini procesai. Panaudojant imitacinio modeliavimo sistemos objektus yra sukuriama sistemos modelis, kuris atitinka planavimo etape apibrėžtą specifikaciją. Modelis naudoja įvesties parametrų aibes, kurios aprašo pasirinktus sistemos testavimo scenarijus ir grąžina išvesties duomenis, pagal kuriuos yra sudaromi sistemos efektyvumo rodiklių vertinimo matematiniai modeliai. Darbe naudojama programa *AutoMod* taip pat turi ir išsamią 3D modelio grafinę vizualizacijos posistemę, kuri leidžia stebėti sistemos modelio veikimą laike ir padeda geriau suprasti sistemoje vykstančius procesus ir nustatyti problemas. Darbe siūlomos sistemos atveju vizualizacija leidžia įvertinti modelio adekvatumą pakankamai tiksliai, neturint realiai veikiančio sistemos prototipo.

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Pasiūlyta naujo tipo cilindrinės automatizuotos sandėliavimo ir rinkimo sistemos (C-AS/RS) koncepcijos struktūra, kuri integruojama į užsakymų surinkimo sistemą „Produkcija–Žmogus“, siekiant išspręsti transportuojamų krovinių rūšiavimo problemas ir padidinti užsakymų surinkimo efektyvumą.
2. Sudarytas optimalus C-AS/RS sandėliavimo ir rinkimo operacijos krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas bei pasiūlyti du alternatyvūs algoritmai, kurių tikslumas yra artimas optimaliam, tačiau žymiai sumažinamos reikalingų skaičių apimtys, sudarant krovinių transportavimo maršrutą. Visi sudaryti algoritmai yra universalūs ir pritaikomi bet kokiai C-AS/RS konfigūracijai.
3. Panaudojus programinę įrangą *AutoMod*, sudaryti imitaciniai C-AS/RS struktūros ir valdymo parametrų bei integruotos užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumo tyrimo modeliai. Modelių integravimas su daugialypės regresijos ir dispersinės analizės metodais leidžia nustatyti C-AS/RS efektyvumą pagal įvairius parametrų rinkinius, įvertinti integruotos sistemos poveikį užsakymų surinkimo sistemos efektyvumui bei sudaryti parametrų ir efektyvumo rodiklių priklausomybės matematinius modelius, kuriuos galėtų naudoti sistemų projektuotojai tokioms sistemoms įvertinti ir palyginti.

#### 4. CILINDRINĖS AS/RS EFEKTYVUMO RODIKLIŲ ANALIZĖ

Šio skyriaus tyrimų tikslai: 1) įvertinti darbe pasiūlytos C-AS/RS struktūros parametrų (SRM tipo, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinacijų, keltuvų skaičiaus), SRM judėjimo parametrų (keltuvų vertikalios judėjimo ir sukimosi greičių bei pagreičių), krovinių paėmimo / padėjimo trukmių, krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmų ir transportuojamų krovinių srautų intensyvumų įtaką pagrindiniams sistemos efektyvumo rodikliams (pralaidumui ir apkrautumui); 2) iširti C-AS/RS integravimo įtaką standartinės užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumo rodikliams.

Siekiant išsiaiškinti sistemos „siauras vietas“ (angl. *bottleneck*), kurios mažina C-AS/RS efektyvumą, analizuojamos ir SRM buvimo kiekvienoje būsenoje santykinės trukmės, santykinų trukmių skirtumai bei jų priklausomybės nuo C-AS/RS struktūros ir SRM judėjimo parametrų.

C-AS/RS efektyvumo rodiklių analizė atlikta, panaudojus šiame darbe sukurtą ir *AutoMod* programinėje aplinkoje realizuotą C-AS/RS imitacinį modelį. Jis leidžia vykdyti modeliavimo eksperimentus ir vertinti C-AS/RS efektyvumo rodiklius turint įvairius C-AS/RS struktūros, SRM judėjimo, krovinių transportavimo maršrutų sudarymo algoritmų ir transportuojamų krovinių srautų intensyvumų parametrų rinkinius. Modeliavimo rezultatų analizei panaudoti aprašomosios statistikos, pasiklovimo intervalų radimo, hipotezių tikrinimo, parametrinės ir neparametrinės dispersinės bei regresinės analizės metodai. Sudaryti modeliavimo rezultatų statistiniai analizės modeliai įgyvendinti panaudojus programinę įrangą SAS [119].

##### 4.1. Cilindrinės AS/RS struktūros ir SRM judėjimo parametrų įtakos sistemos pralaidumui tyrimas

Šio skyrelio tyrimų tikslas – nustatyti ir palyginti maksimalius C-AS/RS pralaidumus  $\lambda_{\max}$  (krov./val.) esant įvairiems C-AS/RS struktūros parametrams ir skirtingoms SRM greitaveikoms, iširti, kokie parametrai daro didžiausią poveikį sistemos pralaidumui, kaip priklauso sistemos pralaidumas nuo krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmų, kiekybiškai įvertinti skirtumus. Šiems uždaviniams spręsti sudaryti dispersinės ir regresinės analizės modeliai. Tyrimai atlikti abiem SRM tipams  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$  su skirtingais keltuvų skaičiais  $N_{kelt} \in \{1, 2, 4\}$  ir trimis skirtingomis SRM greitaveikomis: lėta  $G_1 = (v_{vert} = 1 \text{ m/s}, a_{vert} = 4 \text{ m/s}^2, v_{suk} = 33,75 \text{ laipsn./s}, a_{suk} = 67,5 \text{ laipsn./s}^2)$ , vidutine  $G_2 = (v_{vert} = 2 \text{ m/s}, a_{vert} = 5,5 \text{ m/s}^2, v_{suk} = 45 \text{ laipsn./s}, a_{suk} = 90 \text{ laipsn./s}^2)$  ir greita  $G_3 = (v_{vert} = 3 \text{ m/s}, a_{vert} = 7 \text{ m/s}^2, v_{suk} = 56,25 \text{ laipsn./s}, a_{suk} = 135 \text{ laipsn./s}^2)$ . Atliekant tyrimus, buvo keičiamas krovinių paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp} \in \{1, 1,25, 1,5, 1,75, 2\}$  [s] ir fiksuoti šie parametrai: stelažų aukštų skaičius  $N_L = 15$ , krovinių atvežimo /



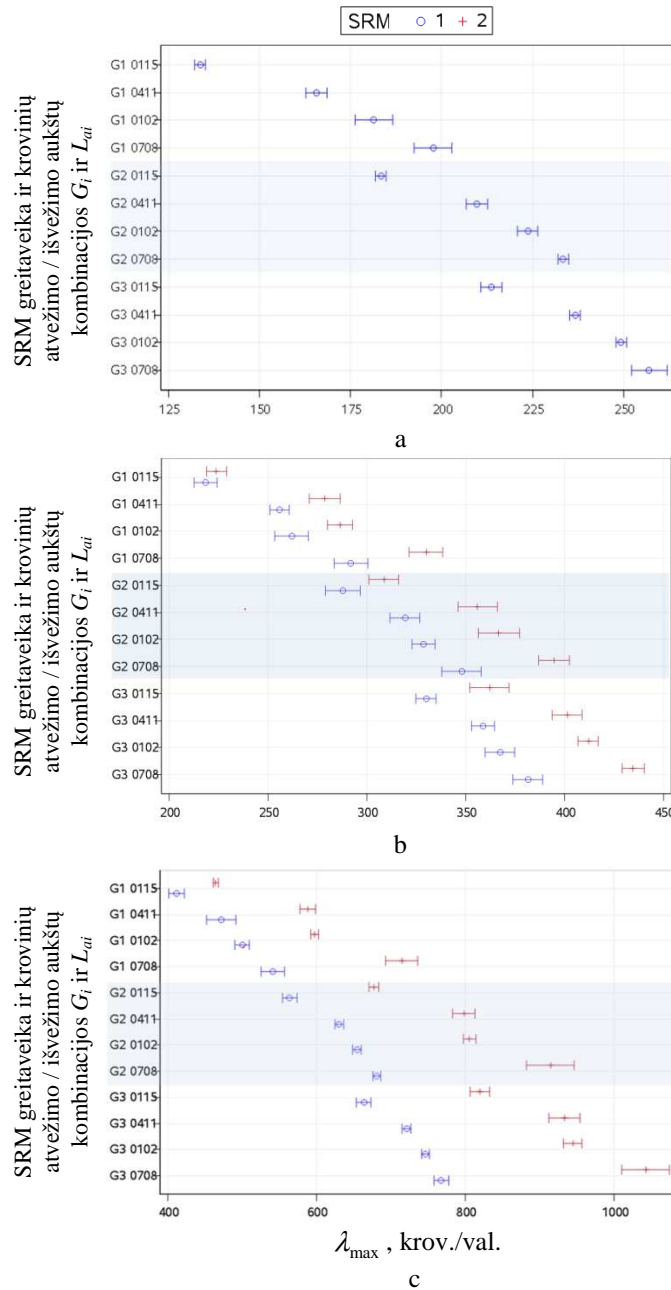
išvežimo vietų skaičius ir išdėstymas stelažuose –  $N_{av} = N_{iv} = N_{kelt}$ , krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmas  $A_1$ .

#### 4.1.1 Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo įtakos maksimaliam cilindrinės AS/RS pralaidumui tyrimas

Tyrimo tikslas – palyginti įvairias krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinacijas  $L_{ai}$  tarpusavyje ir nustatyti optimalią kombinaciją, kuriai esant maksimalus pralaidumas  $\lambda_{max}$  yra didžiausias įvairiems SRM tipams ir greitaveikoms. Optimalios krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacijos  $L_{ai}$  parinkimas yra svarbus uždavinys, nes, projektuojant automatizuotas krovinių transportavimo sistemas, reikia sukurti efektyvias jungtis tarp posistemių, kurios sugebėtų aptarnauti pageidaujamo intensyvumo krovinių srautus.

Pagal gautus modeliavimo rezultatus apskaičiuoti maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  vidurkiai esant skirtingoms tiriamų faktorių kombinacijoms. Sudarius dispersinės analizės modelį, patikrintos hipotezės apie maksimalaus pralaidumo vidurkių lygybę esant skirtingiems faktorių lygmenims, apskaičiuoti vidurkių ir jų skirtumų 95 % pasiklovimo intervalai. Panaudojus regresinę analizę, rastos maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  bei SRM buvimo kiekvienoje būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinių paėmimo / padėjimo trukmės pagal krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitaveika [115, 116, 117]. Gauti rezultatai pateikti 4.1–4.3 lentelėse, 4.1–4.3 pav. ir 1 priede.

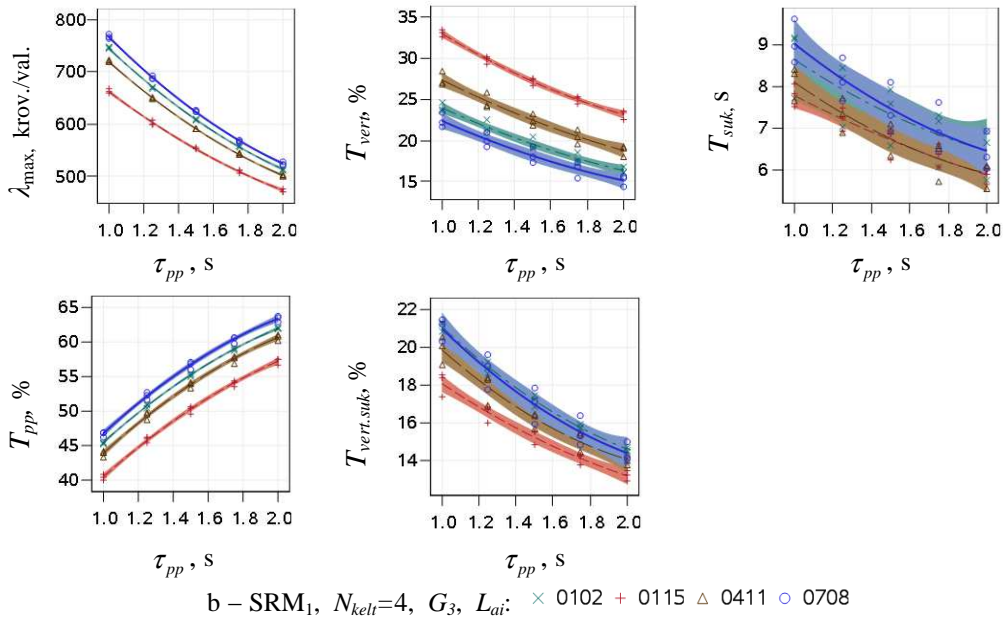
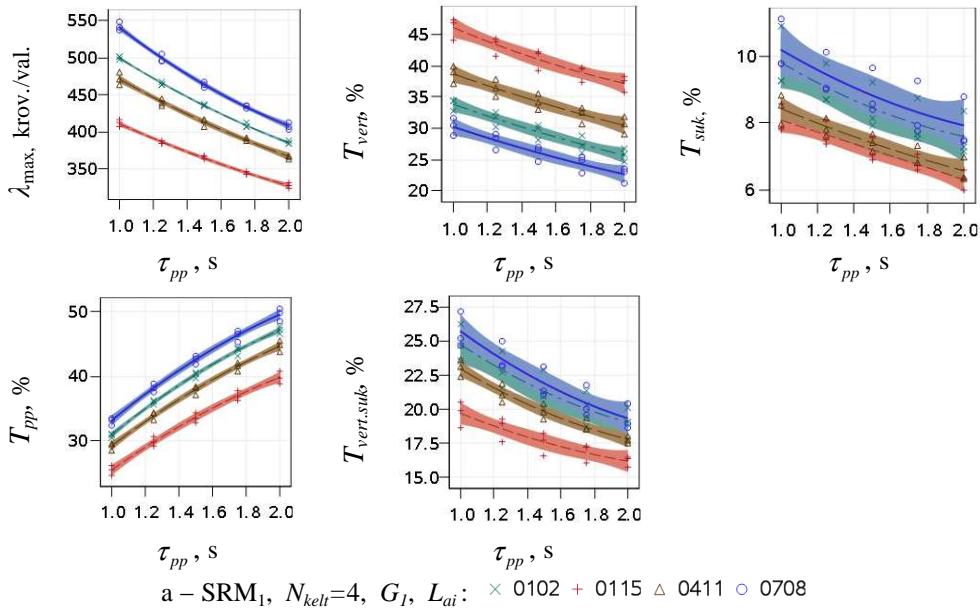
Pagal gautus analizės rezultatus nustatyta, kad visais atvejais geriausia krovinių atvežimo / išvežimo vietas išdėstyti gretimuose viduriniuose stelažų aukštuose ( $L_{ai} = 0708$ ), nes tuomet yra pasiekiamas didžiausias pralaidumas  $\lambda_{max}$ . Mažiausias pralaidumas visais atvejais pasiekiamas, kai  $L_{ai} = 0115$ . Pavyzdžiui, sistemose su 4 keltuvais ir greitaveika  $G_3$ , kai  $L_{ai} = 0708$ , gaunamas didžiausias pralaidumas:  $\lambda_{max} = 768$  krov./val. su  $SRM_1$  ir  $\lambda_{max} = 1043$  krov./val. su  $SRM_2$ . Šiose sistemose pralaidumas nežymiai sumažėja, jei krovinių atvežimo / išvežimo vietos išdėstytos gretimuose apatiniuose (arba viršutiniuose) stelažų aukštuose, kai  $L_{ai} = 0102$  – nustatytas 21 krov./val. (2,7 %) sumažėjimas sistemose su  $SRM_1$  ir 98 krov./val. (9,4 %) sistemose su  $SRM_2$ , palyginti su rezultatais, gautais, kai  $L_{ai} = 0708$ , o kitų parametų reikšmės yra tos pačios. Reikšmingiausias sumažėjimas lyginamose sistemose buvo nustatytas, kai krovinių atvežimo / išvežimo vietos išdėstytos labiausiai nutolusiuose aukštuose ( $L_{ai} = 0115$ ) – 104 krov./val. (13,5 %) sistemose su  $SRM_1$  ir net 223 krov./val. (21,4 %) sistemose su  $SRM_2$ , lyginant su rezultatais, kai  $L_{ai} = 0708$ . Sistemose su  $SRM_1$ , sumažinus atstumą tarp krovinių atvežimo / išvežimo aukštų nuo 14 ( $L_{ai} = 0115$ ) iki 7 ( $L_{ai} = 0411$ ), sistemos pralaidumas padidėja 57 krov./val. (8,5 %), lyginant su  $L_{ai} = 0115$ , o maksimalaus pralaidumo vidurkio sumažėjimas, lyginant su optimaliu išdėstymu  $L_{ai} = 0708$ , šiuo atveju yra 47 krov./val. (6,1 %).



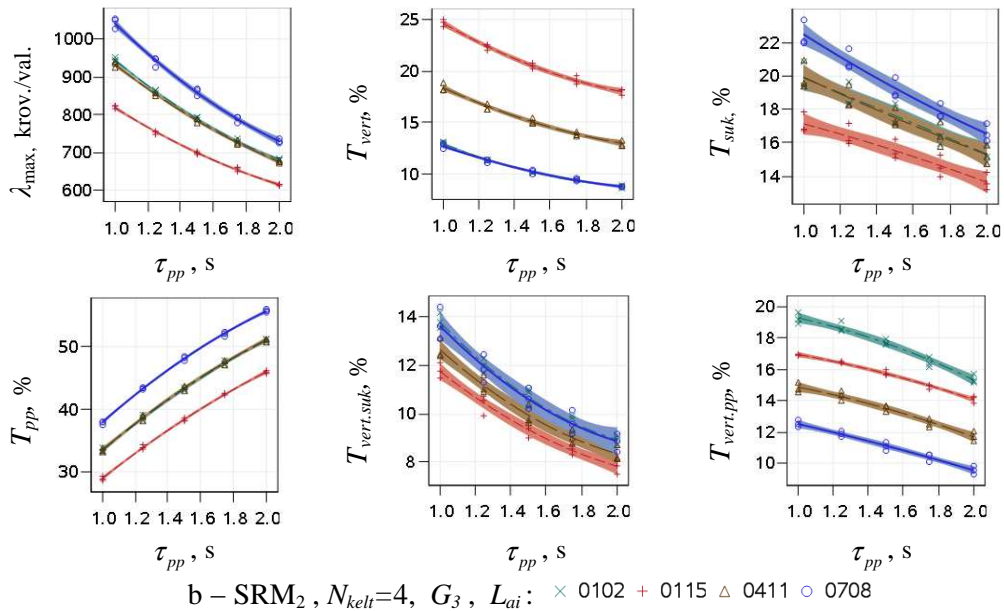
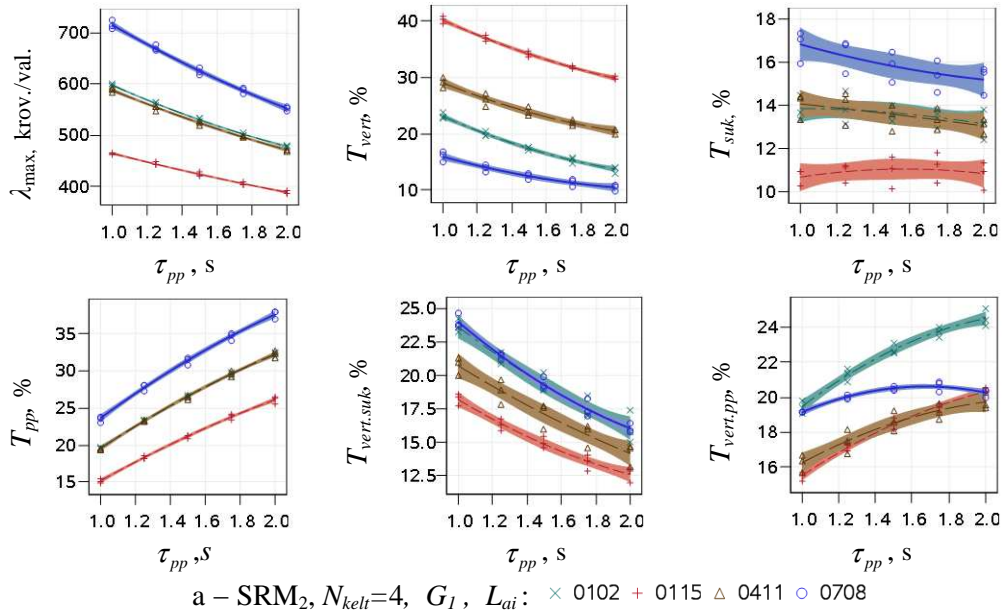
**4.1 pav.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  imties vidurkiai ir vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal SRM tipus, krovinų atvežimo / išvežimo aukštų kombinacijas  $L_{ai}$  ir SRM greitaveikas  $G_i$  (a –  $N_{kelt} = 1$ ,  $\tau_{pp} = 2$ ; b –  $N_{kelt} = 2$ ,  $\tau_{pp} = 2$ ; c –  $N_{kelt} = 4$ ,  $\tau_{pp} = 1$ )

**4.1 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  imties vidurkiai ir vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal SRM tipus, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacijas  $L_{ai}$  ir SRM greitaveikas ( $N_{kelt}=4, \tau_{pp}=1$ )

| SRM tipas        | SRM greitaveika | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija $L_{ai}$ | $\lambda_{\max}$ imties vidurkis, krov./val. | $\lambda_{\max}$ vidurkio 95 % pasiklovimo intervalas |                              |
|------------------|-----------------|--|--|---|------------------------------|
|                  |                 |  |  | Apatinis režis, krov./val.                            | Viršutinis režis, krov./val. |
| SRM <sub>1</sub> | G <sub>1</sub>  | 0102   | 500,0  | 495,7   | 504,3                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0115   | 412,0  | 402,1   | 421,9                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0411   | 472,0  | 452,1   | 491,9                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0708   | 541,3  | 526,2   | 556,5                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0102   | 654,7  | 648,9   | 660,4                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0115   | 564,0  | 554,1   | 573,9                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0411   | 630,7  | 624,9   | 636,4                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0708   | 681,3  | 675,6   | 687,1                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0102   | 746,7  | 740,9   | 752,4                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0115   | 664,0  | 654,1   | 673,9                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0411   | 721,3  | 715,6   | 727,1                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0708   | 768,0  | 758,1   | 777,9                        |
| SRM <sub>2</sub> | G <sub>1</sub>  | 0102   | 597,7  | 592,5   | 602,8                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0115   | 464,7  | 461,8   | 467,5                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0411   | 588,7  | 578,3   | 599,0                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0708   | 714,7  | 693,3   | 736,1                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0102   | 806,0  | 797,4   | 814,6                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0115   | 677,3  | 671,1   | 683,6                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0411   | 798,7  | 783,5   | 813,8                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0708   | 914,7  | 882,7   | 946,6                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0102   | 944,7  | 932,2   | 957,2                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0115   | 820,0  | 806,9   | 833,1                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0411   | 933,3  | 912,7   | 954,0                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0708   | 1042,7                                       | 1010,7  | 1074,6                       |



**4.2 pav.** SRM<sub>1</sub> su 4 keltuvas maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  ir buvimo kiekvienoje būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinių paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  (regresijos kreivės su 95 % vidurkio pasiklovimo juosta) pagal krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymą kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitaveiką (a –  $G_1$ ; b –  $G_3$ )



**4.3 pav.** SRM<sub>2</sub> su 4 keltuvas maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  ir buvimo kiekvienoje būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinų paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  (regresijos kreivės su 95 % vidurkio pasiklovimo juosta) pagal krovinų atvežimo/išvežimo aukštų išdėstymo kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitaveiką (a – G<sub>1</sub>; b – G<sub>3</sub>)

**4.2 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo skirtumų  $\Delta \lambda_{\max}$  imties vidurkiai ir skirtumų vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal SRM tipą, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitaveiką ( $N_{kelt}=4$ ,  $\tau_{pp}=1$ ; visi vidurkių skirtumai yra statistiškai reikšmingi,  $p<0,05$ )

| SRM tipas        | SRM greitaveika | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija | $\Delta \lambda_{\max}$ imties vidurkis, krov./val. | $\Delta \lambda_{\max}$ vidurkio 95 % pasiklovimo intervalas |                              |
|------------------|-----------------|---|---|---|--|------------------------------|
|                  |                 |   |   |   | Apatinis rėžis, krov./val.                                   | Viršutinis rėžis, krov./val. |
| SRM <sub>1</sub> | G <sub>1</sub>  | 0102  | 0115  | 88,0  | 79,5   | 96,5                         |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0102  | 0411  | 28,0  | 9,2  | 46,8                         |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0102  | 0708  | -41,3   | -55,2  | -27,5                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0115  | 0411  | -60,0   | -76,6  | -43,4                        |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0115  | 0708  | -129,3  | -141,8   | -116,9                       |
|                  | G <sub>1</sub>  | 0411  | 0708  | -69,3   | -85,9  | -52,7                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0102  | 0115  | 90,7  | 82,5   | 98,9                         |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0102  | 0411  | 24,0  | 18,8   | 29,2                         |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0102  | 0708  | -26,7   | -31,9  | -21,4                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0115  | 0411  | -66,7   | -74,9  | -58,5                        |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0115  | 0708  | -117,3  | -125,5   | -109,1                       |
|                  | G <sub>2</sub>  | 0411  | 0708  | -50,7   | -55,9  | -45,4                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0102  | 0115  | 82,7  | 74,5   | 90,9                         |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0102  | 0411  | 25,3  | 20,1   | 30,6                         |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0102  | 0708  | -21,3   | -29,5  | -13,1                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0115  | 0411  | -57,3   | -65,5  | -49,1                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0115  | 0708  | -104,0  | -113,1   | -94,9                        |
|                  | G <sub>3</sub>  | 0411  | 0708  | -46,7   | -54,9  | -38,5                        |

Didesni maksimalaus pralaidumo skirtumai buvo nustatyti sistemose su SRM<sub>2</sub>, sumažinus atstumą tarp krovinių atvežimo / išvežimo aukštų iki 7, maksimalus sistemos pralaidumas padidėja 113 krov./val. (13,8 %), lyginant su  $L_{ai} = 0115$ , o maksimalaus pralaidumo sumažėjimas, lyginant su optimaliu išdėstymu  $L_{ai} = 0708$ , yra 109 krov./val. (10,5 %). Kitose C-AS/RS konfigūracijose su  $N_{kelt} \in \{1, 2\}$  nustatytos panašios maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  ir krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo  $L_{ai}$  priklausomybės: sistemose su parametrais  $N_{kelt} = 1$  ir G<sub>3</sub> didžiausias skirtumas 78 krov./val. (27,8 %) tarp maksimalių

pralaidumų yra, kai  $L_{ai} = 0708$  ir  $L_{ai} = 0115$ , sistemose su  $N_{kelt} = 2$  ir  $SRM_1$  šis skirtumas yra 101 krov./val. (22,4 %) ir 136 krov./val. (28,4 %) sistemose su  $SRM_2$ , kai kitų parametrų reikšmės yra tos pačios. Lėtesnėms SRM šie skirtumai yra didesni (4.1–4.3 lentelės).

**4.3 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo skirtumų  $\Delta\lambda_{max}$  imties vidurkiai ir skirtumų vidurkių 95 % pasiklojimo intervalai esant skirtingiems SRM tipams, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacijoms  $L_{ai}$  ir SRM greitaveikoms (kai  $N_{kelt}=4$  ir  $\tau_{pp}=1$ ; \* pažymėti nereikšmingi vidurkių skirtumai,  $p>0,05$ )

| SRM tipas        | SRM greita-veika | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija | Krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija | $\Delta\lambda_{max}$ imties vidurkis, krov./val. | $\Delta\lambda_{max}$ vidurkio 95 % pasiklojimo intervalas |                              |
|------------------|------------------|---|---|---|--|------------------------------|
|                  |                  |   |   |   | Apatinis rėžis, krov./val.                                 | Viršutinis rėžis, krov./val. |
| SRM <sub>2</sub> | $G_1$            | 0102  | 0115  | 133,0   | 128,7  | 137,3                        |
|                  | $G_1$            | 0102  | 0411  | 9,0   | 0,3  | 17,7                         |
|                  | $G_1$            | 0102  | 0708  | -117,0  | -137,0   | -97,0                        |
|                  | $G_1$            | 0115  | 0411  | -124,0  | -133,5   | -114,5                       |
|                  | $G_1$            | 0115  | 0708  | -250,0  | -270,9   | -229,1                       |
|                  | $G_1$            | 0411  | 0708  | -126,0  | -144,0   | -108,0                       |
|                  | $G_2$            | 0102  | 0115  | 128,7   | 121,5  | 135,8                        |
|                  | * $G_2$          | 0102  | 0411  | 7,3   | -5,2   | 19,9                         |
|                  | $G_2$            | 0102  | 0708  | -108,7  | -138,1   | -79,3                        |
|                  | $G_2$            | 0115  | 0411  | -121,3  | -134,4   | -108,3                       |
|                  | $G_2$            | 0115  | 0708  | -237,3  | -267,8   | -206,9                       |
|                  | $G_2$            | 0411  | 0708  | -116,0  | -142,9   | -89,1                        |
|                  | $G_3$            | 0102  | 0115  | 124,7   | 113,0  | 136,4                        |
|                  | * $G_3$          | 0102  | 0411  | 11,3  | -5,7   | 28,4                         |
|                  | $G_3$            | 0102  | 0708  | -98,0   | -125,7   | -70,3                        |
|                  | $G_3$            | 0115  | 0411  | -113,3  | -130,3   | -96,3                        |
|                  | $G_3$            | 0115  | 0708  | -222,7  | -250,2   | -195,2                       |
|                  | $G_3$            | 0411  | 0708  | -109,3  | -135,6   | -83,1                        |

Analizuojant rezultatus (4.2–4.3 pav. ir 1 priedas) nustatyta, kad krovinių paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  ir krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinacija  $L_{ai}$  daro didelį poveikį ne tik maksimaliam pralaidumui  $\lambda_{max}$ , SRM

krovinių paėmimo / padėjimo būsenos  $T_{pp}$  santykinei trukmei, bet ir SRM judėjimo vertikaliai santykinei trukmei  $T_{vert}$ . Esant visoms tirtoms parametų kombinacijoms, SRM judėjimo vertikaliai santykinė trukmė  $T_{vert}$  buvo didžiausia, kai  $L_{ai} = 0115$ , ir mažiausia, kai  $L_{ai} = 0708$ . Išsamesnis SRM būsenų santykinių trukmių vidurkių priklausomybių nuo sistemos parametų tyrimas pateiktas skyreliuose 4.1.3, 4.2 ir 2 priede.

Apibendrinant gautus rezultatus nustatyta, kad krovinių atvežimo / išvežimo konvejerius geriausia integruoti gretimuose aukštuose stelažų viduryje. Jeigu tai neįmanoma, sistemos pralaidumas sumažės nežymiai, juos integruojant bet kuriuose, gretimuose aukštuose, nes, didėjant atstumui tarp aukštų, nustatytas reikšmingas maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  sumažėjimas.

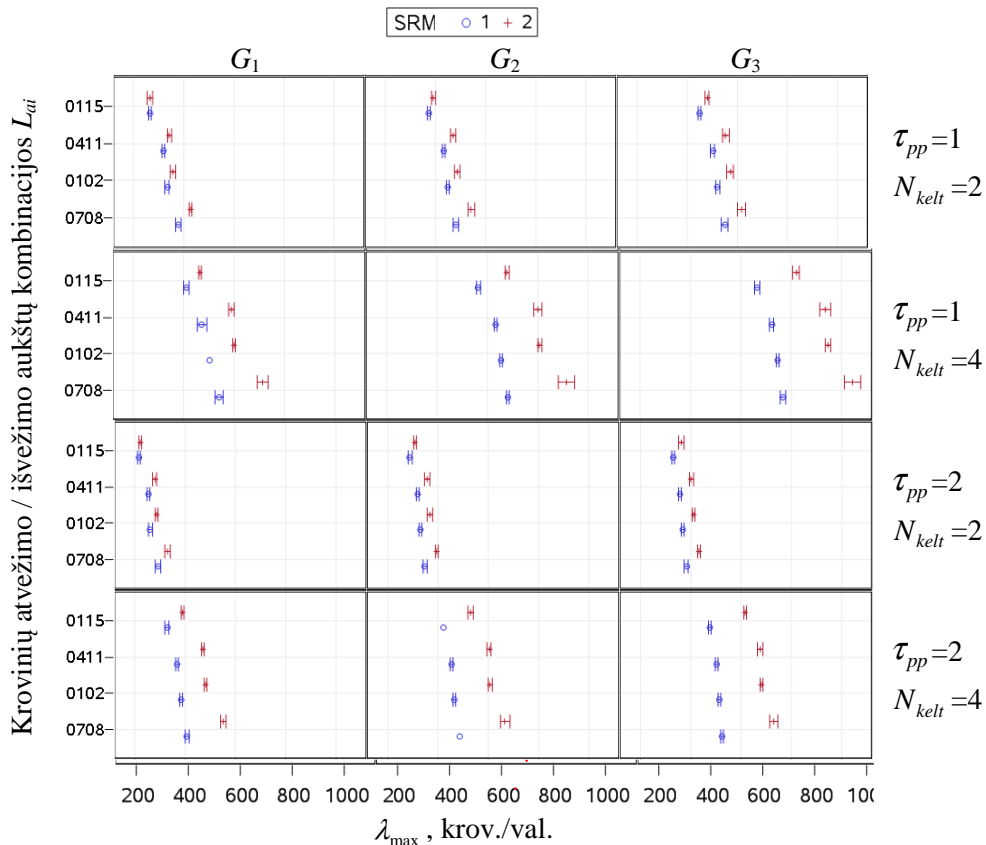
#### **4.1.2 SRM keltuvų skaičiaus įtakos maksimaliam cilindrinės AS/RS pralaidumui tyrimas**

Su C-AS/RS imitaciniu modeliu buvo atlikti eksperimentai, kurių tikslas įvertinti SRM keltuvų skaičiaus  $N_{kelt}$  poveikį maksimaliam sistemos pralaidumui  $\lambda_{max}$  pagal SRM greitaveiką ir krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinaciją. Analizuojant modeliavimo rezultatus apskaičiuoti maksimalaus pralaidumo vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai, panaudojus dispersinę analizę [115] patikrintos hipotezės apie maksimalaus pralaidumo vidurkių lygybę esant skirtingiems faktorių lygmenims (SRM keltuvų skaičius; SRM greitaveika, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija, krovinių paėmimo / padėjimo trukmė). Taip pat apskaičiuoti SRM maksimalaus pralaidumų skirtumų imties vidurkiai ir skirtumų vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal keltuvų skaičių, kai SRM greitaveikos yra vienodos, o krovinių atvežimo / išvežimo vietų išdėstymas yra optimalus, t. y.  $L_{ai} = 0708$  (4.1.1 skyrelyje buvo nustatyta, kad tokia aukštų kombinacija užtikrina didžiausią maksimalų C-AS/RS pralaidumą), kai krovinių paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp} = 1$ . Gauti rezultatai pateikti 4.4–4.5 lentelėse ir 4.4 pav. Kadangi esant vienodoms parametų reikšmėms imitaciniai eksperimentai buvo atlikti su skirtingais pradiniais pseudoatsitiktinių skaičių generatorių nustatymais, rezultatų analizei buvo naudojama blokuotųjų duomenų dispersinė analizė [116], patikrintos hipotezės apie vidurkių porų lygybę ir apskaičiuoti mažiausių kvadratų vidurkių skirtumų pasiklovimo intervalai. Gauta, kad visi vidurkiai statistiškai reikšmingai skiriasi, nes atitinkamos hipotezių tikrinimo p-reikšmės mažesnės už pasirinktąjį reikšmingumo lygmenį ( $\alpha = 0,05$ ).

Pagal gautus rezultatus (4.4–4.5 lentelės) nustatytas maksimalaus sistemos pralaidumo  $\lambda_{max}$  vidurkis ir vidurkio 95 % pasiklovimo intervalas kiekvienai C-AS/RS konfigūracijai su skirtingais SRM tipais, keltuvų skaičiais, judėjimo ir krovinių paėmimo / padėjimo parametrais. Valdymo ir struktūros prasme paprasčiausia yra  $N_{kelt} = 1$  sistemos konfigūracija, kuri leidžia pasiekti didžiausią



vidutinį maksimalų pralaidumą  $\lambda_{\max} = 357$  krov./val. sistemoje su parametrais  $L_{ai} = 0708$ ,  $\tau_{pp} = 1$  ir  $G_3$  (4.4 lentelė). Sistemoje padidinus keltuvų skaičių iki  $N_{kelt} = 2$ , vidutinis maksimalus pralaidumas padidėja iki  $\lambda_{\max} = 549$  krov./val. sistemoje su  $SRM_1$  ir iki  $\lambda_{\max} = 615$  krov./val. sistemoje su  $SRM_2$ , kai kitų parametrų reikšmės lieka tos pačios. Palyginus  $N_{kelt} = 1$  ir greitos greitaveikos  $G_3$  sistemą su  $N_{kelt} = 2$  ir lėtos greitaveikos  $G_1$  sistema, buvo nustatytas tik 23 krov./val. (6,1 %) maksimalių pralaidumų vidurkių skirtumas, kai naudojamas  $SRM_1$  ir 69 krov./val. (16,2 %), kai naudojamas  $SRM_2$ , o krovinių paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp} = 1$ . Didžiausi C-AS/RS pralaidumai yra pasiekiami  $N_{kelt} = 4$  sistemose – 1043 krov./val. sistemoje su  $SRM_2$  ir 768 krov./val. sistemoje su  $SRM_1$ , kai  $L_{ai} = 0708$ ,  $\tau_{pp} = 1$  ir  $G_3$ .



**4.4 pav.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  imties vidurkiai ir vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal SRM tipus, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacijas  $L_{ai}$ , keltuvų skaičių ir krovinių paėmimo / padėjimo trukmę  $\tau_{pp}$

**4.4 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  imties vidurkiai ir vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal SRM tipą, keltuvų skaičių  $N_{kelt}$  ir SRM greitaaveiką  $G$ , ( $L_{ai}=0708$ ,  $\tau_{pp}=1$ )

| SRM tipas       | Keltuvų skaičius $N_{kelt}$ | SRM greitaaveika $G$ | $\lambda_{\max}$ imties vidurkis, krov./val. | $\lambda_{\max}$ vidurkio 95 % pasiklovimo intervalas |                              |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|--|---|------------------------------|
|                 |                             |                      |  | Apatinis režis, krov./val.                            | Viršutinis režis, krov./val. |
| $SRM_1 / SRM_2$ | 1                           | $G_1$                | 254,3  | 248,6   | 260,1                        |
|                 | 1                           | $G_2$                | 314,0  | 309,0   | 319,0                        |
|                 | 1                           | $G_3$                | 357,0  | 352,0   | 362,0                        |
| $SRM_1$         | 2                           | $G_1$                | 380,0  | 370,1   | 389,9                        |
|                 | 2                           | $G_2$                | 482,0  | 472,1   | 491,9                        |
|                 | 2                           | $G_3$                | 549,3  | 536,8   | 561,8                        |
|                 | 4                           | $G_1$                | 541,3  | 526,2   | 556,5                        |
|                 | 4                           | $G_2$                | 681,3  | 675,6   | 687,1                        |
|                 | 4                           | $G_3$                | 768,0  | 758,1   | 777,9                        |
| $SRM_2$         | 2                           | $G_1$                | 426,7  | 419,1   | 434,3                        |
|                 | 2                           | $G_2$                | 542,7  | 530,2   | 555,2                        |
|                 | 2                           | $G_3$                | 615,3  | 600,2   | 630,5                        |
|                 | 4                           | $G_1$                | 714,7  | 693,3   | 736,1                        |
|                 | 4                           | $G_2$                | 914,7  | 882,7   | 946,6                        |
|                 | 4                           | $G_3$                | 1042,7                                       | 1010,7  | 1074,6                       |

Sistemose su  $SRM_1$  ir  $N_{kelt}=4$  pasiekiamas net 411 krov./val. (115,1 %), o sistemose su  $SRM_2$  686 krov./val. (192,2 %) didesnis vidutinis maksimalus pralaidumas palyginti su  $N_{kelt}=1$  sistema esant vienodoms kitų parametų reikšmėms (4.5 lentelė). Reikšmingas maksimalaus pralaidumo vidurkio padidėjimas gaunamas ir, lyginant su  $N_{kelt}=2$  sistemomis, esant vienodiems parametrams – 219 krov./val. (40 %) ( $SRM_1$ ) ir 427 krov./val. (69,4 %) ( $SRM_2$ ). Palyginus  $N_{kelt}=2$  ir greitos greitaaveikos  $G_3$  sistemą su  $N_{kelt}=4$  lėtos greitaaveikos  $G_1$  sistema (4.4 lentelė), nebuvo nustatyta reikšmingo skirtumo tarp maksimalių pralaidumų vidurkių (8 krov./val., 1 %), kai naudojama  $SRM_1$ , tačiau naudojant

$SRM_2$ , skirtumas išaugo iki 99 krov./val. (16 %), kai krovinių paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp}=1$ .

**4.5 lentelė.** To paties tipo SRM maksimalių pralaidumų skirtumo imties vidurkiai ir skirtumų vidurkių 95 % pasiklovimo intervalai pagal keltuvų skaičių  $N_{kelt}$  ir SRM greitaveiką  $G$ , ( $L_{ai}=0708$ ,  $\tau_{pp}=1$ , visi vidurkių skirtumai yra statistiškai reikšmingi,  $p<0,05$ )

| SRM tipas | SRM greitaveika $G$ | Keltuvų skaičius $N_{kelt}$ | Keltuvų skaičius $N_{kelt}$ | $\Delta \mathcal{M}_{max}$ imties vidurkis, krov./val. | $\Delta \mathcal{M}_{max}$ vidurkio 95 % pasiklovimo intervalas |                              |
|-----------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|---|------------------------------|
|           |                     |                             |                             |  | Apatinis režis, krov./val.                                      | Viršutinis režis, krov./val. |
| 1         | $G_1$               | 1                           | 2                           | -125,7   | -133,9  | -117,5                       |
| 1         | $G_1$               | 1                           | 4                           | -287,0   | -300,3  | -273,7                       |
| 1         | $G_1$               | 2                           | 4                           | -161,3   | -173,8  | -148,9                       |
| 1         | $G_2$               | 1                           | 2                           | -168,0   | -176,3  | -159,7                       |
| 1         | $G_2$               | 1                           | 4                           | -367,3   | -372,3  | -362,4                       |
| 1         | $G_2$               | 2                           | 4                           | -199,3   | -207,5  | -191,1                       |
| 1         | $G_3$               | 1                           | 2                           | -192,3   | -203,2  | -181,5                       |
| 1         | $G_3$               | 1                           | 4                           | -411,0   | -419,3  | -402,7                       |
| 1         | $G_3$               | 2                           | 4                           | -218,7   | -229,2  | -208,2                       |
| 2         | $G_1$               | 1                           | 2                           | -172,3   | -178,7  | -166,0                       |
| 2         | $G_1$               | 1                           | 4                           | -460,3   | -480,1  | -440,6                       |
| 2         | $G_1$               | 2                           | 4                           | -288,0   | -306,9  | -269,1                       |
| 2         | $G_2$               | 1                           | 2                           | -228,7   | -239,5  | -217,8                       |
| 2         | $G_2$               | 1                           | 4                           | -600,7   | -631,6  | -569,7                       |
| 2         | $G_2$               | 2                           | 4                           | -372,0   | -399,7  | -344,3                       |
| 2         | $G_3$               | 1                           | 2                           | -258,3   | -271,9  | -244,7                       |
| 2         | $G_3$               | 1                           | 4                           | -685,7   | -716,6  | -654,7                       |
| 2         | $G_3$               | 2                           | 4                           | -427,3   | -454,2  | -400,4                       |

### 4.1.3 SRM<sub>1</sub> ir SRM<sub>2</sub> maksimalių pralaidumų palyginimas

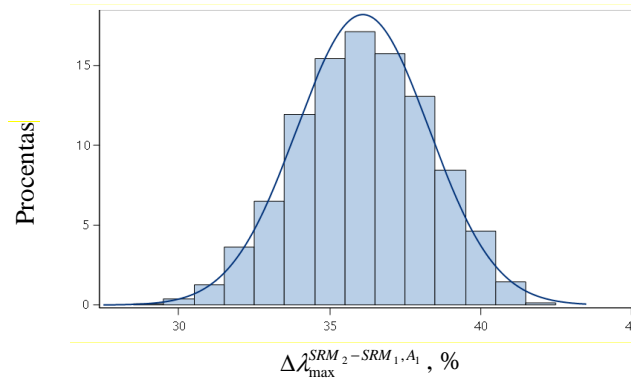
Tyrimo tikslas – palyginti SRM<sub>1</sub> ir SRM<sub>2</sub> maksimalius pralaidumus pagal SRM keltuvų skaičių, kai SRM greitaveikos yra vienodos. 4.6 lentelėje pateikti skirtumų tarp SRM<sub>1</sub> ir SRM<sub>2</sub> pralaidumų vidurkiai ir jų 95 % pasiklivimo intervalai pagal keltuvų skaičių, kai krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinacija yra optimali ( $L_{av}=0708$ ), o krovinio paėmimo / padėjimo operacija yra greita ( $\tau_{pp}=1$ ). Rezultatų analizei panaudota blokuotųjų duomenų dispersinė analizė, patikrintos hipotezės apie skirtumų vidurkių reikšmingumą ir apskaičiuoti vidurkių skirtumų pasiklivimo intervalai. Gauta, kad visi vidurkių skirtumai yra statistiškai reikšmingai, nes atitinkamos hipotezių tikrinimo p-reikšmės mažesnės už pasirinktąjį reikšmingumo lygmenį ( $\alpha=0,05$ ).

**4.6 lentelė.** Maksimalių pralaidumų skirtumų tarp SRM<sub>1</sub> ir SRM<sub>2</sub> imties vidurkiai ir vidurkių skirtumų 95 % pasiklivimo intervalai pagal keltuvų skaičių, kai SRM greitaveikos vienodos ( $L_{ai}=0708$ ,  $\tau_{pp}=1$ , visi vidurkių skirtumai yra statistiškai reikšmingi,  $p<0,05$ )

| SRM <sub>1</sub> keltuvų skaičius $N_{kelt}^{SRM_1}$ | SRM <sub>2</sub> keltuvų skaičius $N_{kelt}^{SRM_2}$ | $\Delta_{\max}^{SRM_1-SRM_2}$ imties vidurkis, krov./val. | $\Delta_{\max}^{SRM_1-SRM_2}$ vidurkio 95 % pasiklivimo intervalas |                              |
|--|--|---|--|------------------------------|
|  |  |   | Apatinis rėžis, krov./val.   | Viršutinis rėžis, krov./val. |
| 1  | 2  | -172,3  | -178,7   | -166,0                       |
| 1  | 4  | -460,3  | -480,1   | -440,6                       |
| 1  | 2  | -228,7  | -239,5   | -217,8                       |
| 1  | 4  | -600,7  | -631,6   | -569,7                       |
| 1  | 2  | -258,3  | -271,9   | -244,8                       |
| 1  | 4  | -685,7  | -716,6   | -654,7                       |
| 2  | 2  | -46,7   | -55,0  | -38,4                        |
| 2  | 4  | -334,7  | -352,8   | -316,6                       |
| 2  | 2  | -60,7   | -71,2  | -50,2                        |
| 2  | 4  | -432,7  | -461,5   | -403,9                       |
| 2  | 2  | -66,0   | -78,9  | -53,1                        |
| 2  | 4  | -493,3  | -521,1   | -465,6                       |
| 4  | 2  | 114,7   | 102,0  | 127,4                        |
| 4  | 4  | -173,3  | -191,0   | -155,6                       |
| 4  | 2  | 138,7   | 128,1  | 149,3                        |
| 4  | 4  | -233,3  | -264,0   | -202,7                       |
| 4  | 2  | 152,7   | 140,2  | 165,2                        |
| 4  | 4  | -274,7  | -303,5   | -245,9                       |

Siekiant nustatyti, nuo kokių SRM parametrų labiausiai priklauso  $SRM_1$  ir  $SRM_2$  maksimalaus pralaidumo skirtumas, buvo atliktas išsamus tyrimas, kurio tikslas – įvertinti santykinis skirtumas  $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_2-SRM_1, A_1}$  tarp  $SRM_2$  ir  $SRM_1$ , kai keltuvų skaičius  $N_{kelt} = 4$ , o maršruto sudarymo algoritmas yra optimalus ( $A_1$ ). Iš viso atlikti 29400 imitaciniai eksperimentai pagal visas galimas šių SRM judėjimo parametrų reikšmių kombinacijas: keltuvų vertikalaus judėjimo greitis  $v_{vert} \in \{1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 3\}$  [m/s] ir pagreitis  $a_{vert} \in \{4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7\}$  [m/s<sup>2</sup>], SRM sukimosi greitis  $v_{suk} \in \{33,75; 39,375; 45; 50,625; 56,25\}$  [laipsn./s] ir pagreitis  $a_{suk} \in \{67,5; 78,75; 90; 101,25; 112,5; 123,75; 135\}$  [laipsn./s<sup>2</sup>], krovinio paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp} \in \{1; 1,25; 1,5; 1,75; 2\}$  [s].

Gauta, kad maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $SRM_2$  ir  $SRM_1$   $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_2-SRM_1, A_1}$  vidurkis yra 36,1 %, mažiausias santykinis skirtumas – 28,4 %, didžiausias santykinis skirtumas – 42,6 %, o santykinio skirtumo skirstinys yra normalusis (4.5 pav.).



**4.5 pav.**  $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_2-SRM_1, A_1}$  – maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $SRM_2$  ir  $SRM_1$  empirinis skirstinys (maršruto sudarymo algoritmas  $A_1$ ,  $N_{kelt} = 4$ ,  $n = 29400$ )

Siekiant išsiaiškinti, kokie SRM judėjimo parametrai daugiausiai veikia  $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  – maksimalaus pralaidumo santykinį skirtumą tarp  $SRM_1$  ir  $SRM_2$  – buvo sudaryti tiesinės regresinės bei neparimetrinės netiesinės regresinės analizės modeliai [115].

Lyginant tiesinės regresijos lygties koeficientus tarpusavyje, negalima nustatyti, kokie nepriklausomi kintamieji daro didesnę poveikį skirtumui  $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$ , nes koeficientų prie nepriklausomų kintamųjų didumas priklauso nuo jų matavimo vienetų ir duomenų sklaidos. Todėl reikia ieškoti

standartizuotosios tiesinės regresijos funkcijos [115]. Priklausomas kintamasis  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  ir nepriklausomi kintamieji  $v_{vert}$ ,  $a_{vert}$ ,  $v_{suk}$ ,  $a_{suk}$ ,  $\tau_{pp}$  buvo keičiami z-reikšmėmis ir mažiausiųjų kvadratų metodu randami standartizuotieji koeficientai. Tuomet pagal standartizuotus koeficientus nustatyta, kokie nepriklausomi kintamieji daro didesnę poveikį skirtumui  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$ . Standartizuotas koeficientas, kurio modulis didesnis, rodo didesnę skirtumo  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  priklausomybę nuo nepriklausomų kintamųjų. Gauta standartizuota tiesinės regresijos funkcija

$$\begin{aligned} \overline{\Delta} \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1} = & -0,0431 \cdot \overline{\ln}(v_{vert}) + 0,4576 \cdot \overline{\ln}(v_{suk}) - \\ & -0,1828 \cdot \overline{\ln}(a_{vert}) + 0,1661 \cdot \overline{\ln}(a_{suk}) + 0,6515 \cdot \overline{\ln}(\tau_{pp}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

ir tiesinės regresijos funkcija

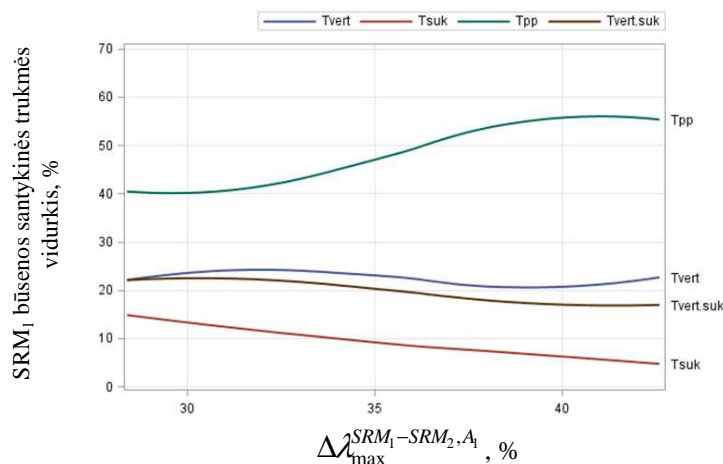
$$\begin{aligned} \Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1} = & 9,3851 - 0,275 \cdot \ln(v_{vert}) + 5,5543 \cdot \ln(v_{suk}) - \\ & - 2,1524 \cdot \ln(a_{vert}) + 1,5814 \cdot \ln(a_{suk}) + 5,8296 \cdot \ln(\tau_{pp}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Sudaryto regresijos modelio koreguotas determinacijos koeficientas yra  $R_{kor}^2=0,7$ ,  $S_e=1,2$ , pagal  $t$  kriterijų visi regresoriai yra statistiškai reikšmingi ( $p<0,0001$ ), multikolinearumo nėra (visi  $VIF \leq 1$ ), lygties koeficientų ženklai atitinka koreliacijas, esminių išskirčių nėra, visos likusios tiesinės regresijos prielaidos yra taip pat patenkinamos.

Standartizuotos tiesinės regresijos lygtis leidžia teigti, kad labiausiai skirtumą  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  veikia parametru  $\tau_{pp}$  (standartizuotas koeficientas 0,6515) ir  $v_{suk}$  (standartizuotas koeficientas 0,4576) didinimas. Daug mažiau santykinį skirtumą veikia  $a_{suk}$  (standartizuotas koeficientas 0,1661).

Gauta tiesinės regresijos lygtis rodo, kad didinant SRM judėjimo parametru  $\tau_{pp}$ ,  $v_{suk}$  ir  $a_{suk}$  vertes, didėja skirtumo vidurkis  $\Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$ . Panaudodami regresijos lygtį, galime kiekybiškai įvertinti SRM judėjimo parametru įtaką santykinio skirtumo vidurkiui  $\Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$ . Pavyzdžiui, jeigu 1% padidinsime  $\tau_{pp}$ , o kitus parametrus paliksime nepakitusiųs, tai  $\Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  padidės 0,058%, jeigu 1% padidinsime  $v_{vert}$ , tai  $\Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  padidės 0,056%.

Panaudojus neparametrinės regresijos metodą (LOESS [116]) ir SAS sistemą [119], buvo tirtos  $SRM_1$  būsenų santykinų trukmių vidurkių priklausomybės nuo  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  – maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $SRM_1$  ir  $SRM_2$ . Gauti neparametrinės regresijos funkcijų grafikai pateikti 4.6 pav.



**4.6 pav.**  $SRM_1$  būsenų santykinų trukmių vidurkių priklausomybės nuo  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  – maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $SRM_1$  ir  $SRM_2$ , maršruto sudarymo algoritmas  $A_1$ ,  $n=29400$

Mažiausias 28,4 % santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  gautas, kai  $T_{vert}=22,7\%$ ,  $T_{pp}=40,6\%$ ,  $T_{suk}=14,7\%$ ,  $T_{vert.suk}=21,2\%$ , ( $T_{prast}=0,8\%$ ), o SRM judėjimo parametrai  $v_{vert}=3$ ,  $a_{vert}=6$ ,  $v_{suk}=33,75$ ,  $a_{suk}=67,5$ ,  $\tau_{pp}=1$ . Didžiausias 42,1 % santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  gautas, kai  $T_{vert}=22,7\%$ ,  $T_{pp}=56,3\%$ ,  $T_{suk}=5\%$ ,  $T_{vert.suk}=15,4\%$ , ( $T_{prast}=0,6\%$ ), o SRM judėjimo parametrai  $v_{vert}=1,3$ ,  $a_{vert}=6,5$ ,  $v_{suk}=56,25$ ,  $a_{suk}=135$ ,  $\tau_{pp}=2$ . Šiuo atveju SRM būsenų trukmės pasiskirsto netolygiai, „siaura vieta“ yra krovinių paėmimo / padėjimo veiksmai (jų trukmė sudaro 56,3 %  $SRM_1$  darbo laiko),  $SRM_2$  geriau išnaudoja savo privalumus (vienu metu skirtinguose aukštuose paimti / padėti krovinius ir galimybę greičiau atlikti sukimosi veiksmus), todėl santykinis skirtumas padidėja 13,7 %.

Matome (4.6 pav.), kad didėjant krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinės trukmės  $T_{pp}$  vidurkiui ir mažėjant santykinės trukmės  $T_{suk}$  vidurkiui bei labai mažai keičiantis  $T_{vert}$  ir  $T_{vert.suk}$  vidurkiams, santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_1-SRM_2, A_1}$  padidėja nuo 28,4 % iki 42,1 %.

#### 4.1.4 Cilindrinės AS/RS apkrautumo įvertinimas pagal transportuojamų krovinių srauto intensyvumą ir maksimalų pralaidumą

Ankstesniuose skyreliuose pateikti C-AS/RS maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  tyrimai, kai jos apkrautumas  $U_{CASRS}$  buvo artimas vienetui. Realiai projektuojamose sistemose transportuojamų krovinių srauto intensyvumai yra

mažesni už maksimalų ( $\lambda < \lambda_{\max}$ ). Dažnai reikalaujama, kad apkrautumas būtų nedidesnis už 0,9 ( $U_{CASRS} \leq 0,9$ ). Norint įvertinti C-AS/RS maksimalų pralaidumą prie skirtingų sistemos apkrautumų, reikia atlikti labai daug imitacinių eksperimentų. Darbe pasiūlyta šio uždavinio apytikslio sprendimo metodika. Uždavinys sprendžiamas dviem etapais: a) C-AS/RS modeliujama prie nedidelio skaičiaus transportuojamo krovinių srauto intensyvumo reikšmių  $\lambda = \eta \cdot \lambda_{\max}$ ,  $\eta = \{0,3; 0,6; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95\}$ ; b) pagal gautus modeliavimo rezultatus sudaromos regresijos lygtys vidutiniam apkrautumui  $\hat{U}_{CASRS}$  prognozuoti. Matome (4.7 pav.), kad  $U_{CASRS}$  apytiksčiai galima prognozuoti pagal tiesinės regresijos modelį  $\hat{U}_{CASRS} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot \eta$ , tačiau gautas prognozavimo tikslumas buvo nepakankamas. Todėl buvo sudaryti tikslesni regresiniai modeliai pagal SRM tipą ir keltuvų skaičių, kurie įvertina ir C-AS/RS „smauros vietos“ parametą  $\tau_{pp}$ .

$$\hat{U}_{CASRS} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot \eta + \hat{\beta}_2 \cdot \eta \cdot \tau_{pp} + \hat{\beta}_3 \cdot \ln(\eta) + \hat{\beta}_4 \cdot \ln(\eta) \cdot \tau_{pp}. \quad (4.3)$$

Šių modelių regresijos lygties parametrų įverčiai ir modelio tinkamumo rodikliai pateikti 4.7 lentelėje. Sudarytų regresijos modelių koreguoti determinacijos koeficientai yra artimi vienetui,  $R_{kor}^2 > 0,98$ , visi modeliai tenkina prielaidas.

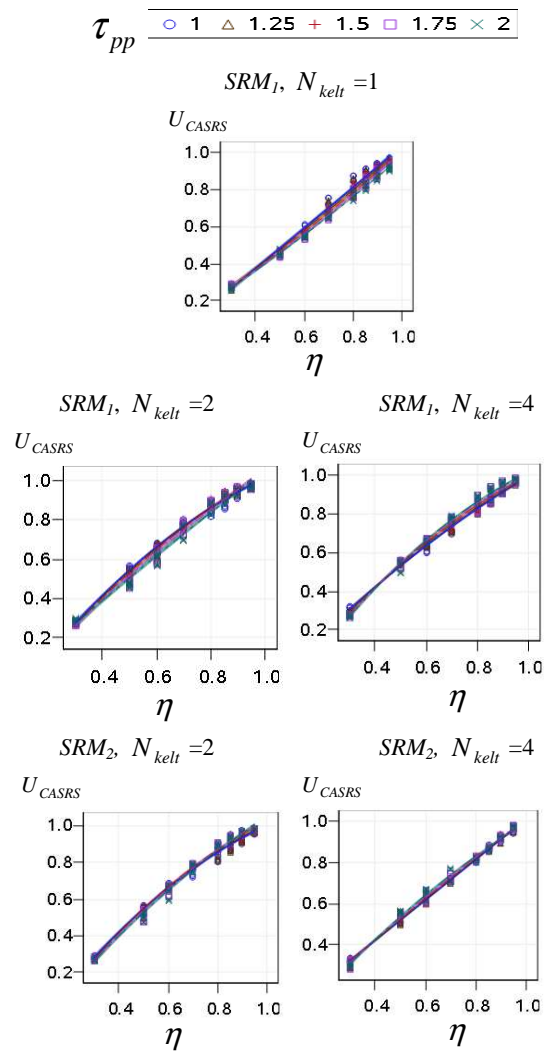
**4.7 lentelė.** C-AS/RS apkrautumo prognozavimo regresijos modelių parametrų įverčiai, kai  $n=360 \cdot 5=1800$

| Regresijos modelio numeris  |                 | 1                  | 2                | 3                | 4                | 5                |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| SRM tipas                   |                 | SRM <sub>1</sub>   | SRM <sub>1</sub> | SRM <sub>1</sub> | SRM <sub>2</sub> | SRM <sub>2</sub> |
| Keltuvų skaičius $N_{kelt}$ |                 | 1                  | 2                | 4                | 2                | 4                |
| Regresoriai                 | Parametrai      | Parametrų įverčiai |                  |                  |                  |                  |
| Konstanta                   | $\hat{\beta}_0$ | -0,240             | 0,3071           | 0,5453           | 0,5223           | 0,1799           |
| $\eta$                      | $\hat{\beta}_1$ | 1,337              | 0,7414           | 0,3931           | 0,4753           | 0,8081           |
| $\eta \cdot \tau_{pp}$      | $\hat{\beta}_2$ | -0,058             | -                | 0,0459           | 0,0259           | 0,0128           |
| $\ln(\eta)$                 | $\hat{\beta}_3$ | -0,02              | 0,1701           | 0,020            | 0,2891           | 0,0940           |
| $\ln(\eta) \cdot \tau_{pp}$ | $\hat{\beta}_4$ | -                  | 0,0302           | 0,0065           | 0,0328           | -                |
| Modelio tinkamumo rodikliai |                 |                    |                  |                  |                  |                  |
| $R_{kor}^2$                 |                 | 0,982              | 0,985            | 0,991            | 0,981            | 0,994            |
| $S_e$                       |                 | 0,024              | 0,029            | 0,02             | 0,025            | 0,02             |

Gautos regresijos lygtys gerai prognozuoja C-AS/RS vidutinį apkrautumą ir yra naudingos praktiniuose taikymuose. Nustačius maksimalų C-AS/RS pralaidumą  $\lambda_{\max}$ , neatliekant papildomų imitacinių eksperimentų, galima įvertinti C-AS/RS



apkratumą prie mažesnių transportuojamų krovinių srautų intensyvumų  $\lambda = \eta \cdot \lambda_{\max}$ ,  $0,3 \leq \eta \leq 0,95$ . Tai svarbu integruojant C-AS/RS į automatizuotą logistikos sandėlio transportavimo sistemą, kai reikia suderinti atskirų posistemių apkratumus. Gauti rezultatai panaudoti 4.3 skyrelyje, nustatant AS/RS stelažų eilių skaičių pagal duotą C-AS/RS apkratumą.



**4.7 pav.** C-AS/RS maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  daugiklio  $\eta$  ir apkratumo  $U_{CASRS}$  priklausomybės pagal SRM tipą, keltuvų skaičių ir krovinių paėmimo / padėjimo trukmę

## 4.2. Krovinių transportavimo maršrutų sudarymo algoritmų lyginamoji analizė

Tyrimo tikslas – atlikti SRM krovinų transportavimo maršruto sudarymo algoritmų  $A_i$ ,  $i=1, \dots, 3$  poveikio C-AS/RS maksimaliam pralaidumui lyginamąją analizę, įvertinti poveikį pagal skirtingas sistemos parametrų kombinacijas, kurias sudaro SRM tipas  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$ , keltuvo vertikalaus judėjimo greitis ( $v_{vert}$ ) ir pagreitis ( $a_{vert}$ ), SRM sukimosi greitis ( $v_{suk}$ ) ir pagreitis ( $a_{suk}$ ), krovinio paėmimo / padėjimo trukmė ( $\tau_{pp}$ ).

C-AS/RS parametrai buvo suskirstyti į keičiamus ir fiksuotus parametrų rinkinius. Fiksuotų parametrų rinkinį sudaro C-AS/RS struktūros parametrai: sandėliavimo vietų skaičius  $N_L \cdot N_C = 15 \cdot 8$ , SRM keltuvų skaičius  $N_{kelt} = 4$ , krovinų atvežimo / išvežimo vietų skaičius  $N_{ai} = 4$  ir jų išdėstymo stelažų aukštuose kombinacija  $L_{ai} = 0708$ . Ankstesniuose skyriuose pateiktuose tyrimuose nustatyta, kad krovinų atvežimo / išvežimo konvejeriai turėtų būti integruojami kaip galima arčiau vidurinio stelažų aukšto ir išdėstyti taip, kad visi SRM keltuvai vienu metu galėtų paimti arba padėti krovinus jų atvežimo / išvežimo aukštuose.

Keičiamų parametrų rinkinius sudaro: krovinų transportavimo maršruto sudarymo algoritmas  $A \in \{A_1, A_2, A_3\}$ ; SRM tipas  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$ ; keltuvo vertikalaus judėjimo greitis  $v_{vert} \in \{1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 3\}$  [m/s] ir pagreitis  $a_{vert} \in \{4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7\}$  [m/s<sup>2</sup>]; SRM sukimosi greitis  $v_{suk} \in \{33,75; 39,375; 45; 50,625; 56,25\}$  [laipsn./s] ir pagreitis  $a_{suk} \in \{67,5; 78,75; 90; 101,25; 112,5; 123,75; 135\}$  [laipsn./s<sup>2</sup>]; krovinio paėmimo / padėjimo trukmė  $\tau_{pp} \in \{1; 1,5; 2; 1,25; 1,75\}$  [s].

Esant fiksuotai sistemos struktūrai, galima nustatyti maksimalų greičiausio krovinų transportavimo maršruto paieškos medžio dydį kiekvienam maršruto sudarymo algoritmui: optimalaus algoritmo  $A_1$  maksimalus medžio dydis yra  $(N_C \cdot N_L)^{N_{kelt}} = (8 \cdot 15)^4$ . Jis parodo didžiausią medžio viršūnių skaičių, kurį reikia įvertinti sudarant krovinų transportavimo maršrutą. Algoritmų  $A_2$  ir  $A_3$  medžių dydžiai yra žymiai mažesni palyginti su  $A_1$  – atitinkamai  $(N_C)^{N_{kelt}} \cdot N_L = (8)^4 \cdot 15$  ( $A_2$ ) ir  $N_C \cdot N_L \cdot N_{kelt} = 8 \cdot 15 \cdot 4$  ( $A_3$ ) viršūnės.

Panaudojus modeliavimo eksperimentų rezultatus, regresinės analizės metodus ir programinę įrangą SAS, kiekvienai SRM tipo  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$  ir maršruto sudarymo algoritmo  $A \in \{A_1, A_2, A_3\}$  kombinacijai sudaryti 6 regresijos modeliai, kurie prognozuoja C-AS/RS vidutinį maksimalų pralaidumą  $\hat{\lambda}_{\max}$  pagal SRM judėjimo ir krovinų paėmimo / padėjimo trukmės parametrus.

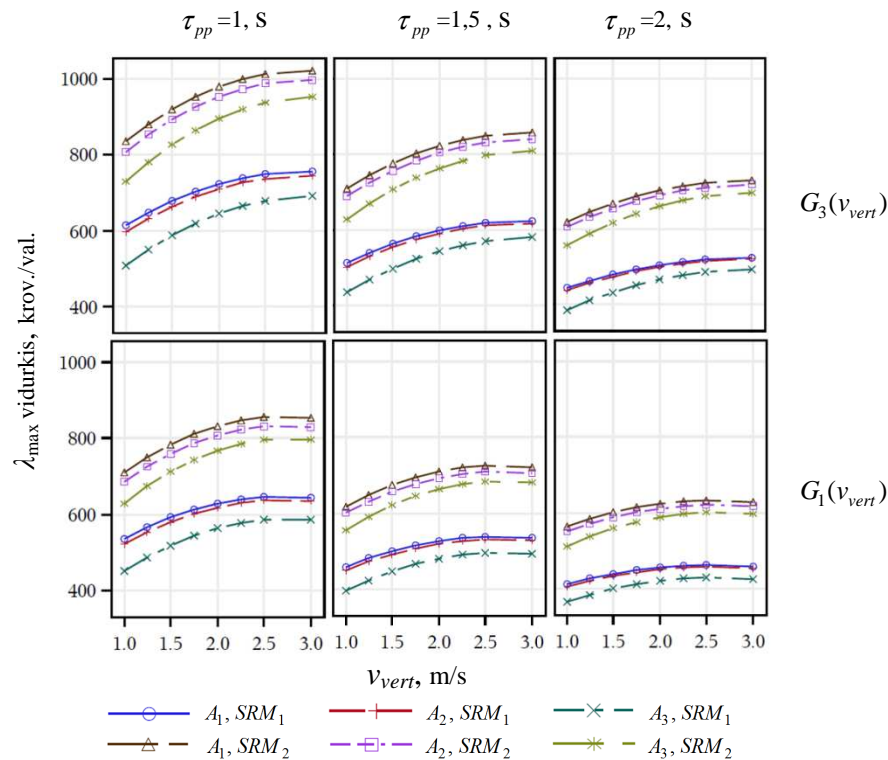
**4.8 lentelė.** C-AS/RS maksimalaus pralaidumo vidurkio prognozavimo regresijos modelių parametru įverčiai (n=29400·6=176400)

| Regresijos modelio numeris   |                    | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | 6                     |
|------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SRM tipas                    |                    | SRM <sub>1</sub>      | SRM <sub>1</sub>      | SRM <sub>1</sub>      | SRM <sub>2</sub>      | SRM <sub>2</sub>      | SRM <sub>2</sub>      |
| Maršruto sudarymo algoritmas |                    | A <sub>1</sub>        | A <sub>2</sub>        | A <sub>3</sub>        | A <sub>1</sub>        | A <sub>2</sub>        | A <sub>3</sub>        |
| Regresoriai                  | Parametrai         | Parametru įverčiai    |                       |                       |                       |                       |                       |
| Konstanta                    | $\hat{\beta}_0$    | 163,93                | 145,66                | 19,23                 | 131,56                | 79,45                 | 37,68                 |
| $v_{vert}$                   | $\hat{\beta}_1$    | 288,04                | 295,35                | 331,32                | 372,45                | 367,98                | 391,34                |
| $v_{vert}^2$                 | $\hat{\beta}_2$    | -57,02                | -57,85                | -65,10                | -73,42                | -72,12                | -75,85                |
| $a_{vert}$                   | $\hat{\beta}_3$    | 33,93                 | 33,48                 | 31,31                 | 36,01                 | 34,48                 | 33,34                 |
| $a_{vert}^2$                 | $\hat{\beta}_4$    | -2,48                 | -2,50                 | -2,40                 | -2,73                 | -2,65                 | -2,62                 |
| $v_{suk}$                    | $\hat{\beta}_5$    | 7,80                  | 7,57                  | 7,40                  | 13,14                 | 13,86                 | 11,97                 |
| $v_{suk}^2$                  | $\hat{\beta}_6$    | -0,0740               | -0,0714               | -0,0716               | -0,1207               | -0,1265               | -0,1111               |
| $a_{suk}$                    | $\hat{\beta}_7$    | 1,43                  | 1,33                  | 0,93                  | 2,14                  | 2,0454                | 1,6120                |
| $a_{suk}^2$                  | $\hat{\beta}_8$    | -6,0610 <sup>-3</sup> | -5,5910 <sup>-3</sup> | -3,9810 <sup>-3</sup> | -9,2010 <sup>-3</sup> | -8,9510 <sup>-3</sup> | -7,0810 <sup>-3</sup> |
| $v_{vert} \cdot a_{vert}$    | $\hat{\beta}_9$    | 4,100                 | 4,187                 | 4,226                 | 4,440                 | 4,401                 | 4,727                 |
| $v_{suk} \cdot a_{suk}$      | $\hat{\beta}_{10}$ | 7,45·10 <sup>-3</sup> | 7,06·10 <sup>-3</sup> | 3,72·10 <sup>-3</sup> | 1,34·10 <sup>-3</sup> | 1,28·10 <sup>-3</sup> | 9,25·10 <sup>-3</sup> |
| $a_{vert} \cdot a_{suk}$     | $\hat{\beta}_{11}$ | 0,01202               | 0,01007               | 0,01187               | 0,01750               | 0,01712               | 0,0156                |
| $v_{vert} \cdot v_{suk}$     | $\hat{\beta}_{12}$ | 0,2088                | 0,2134                | 0,4897                | 0,3892                | 0,4010                | 0,5708                |
| $\tau_{pp}$                  | $\hat{\beta}_{13}$ | -77,81                | -69,09                | -5,37                 | -56,42                | -24,60                | -9,61                 |
| $\tau_{pp}^2$                | $\hat{\beta}_{14}$ | 61,49                 | 59,79                 | 47,27                 | 74,35                 | 68,24                 | 58,71                 |
| $\tau_{pp} \cdot v_{suk}$    | $\hat{\beta}_{15}$ | -103,34               | -106,69               | -114,51               | -129,05               | -126,81               | -125,04               |
| $\tau_{pp} \cdot a_{vert}$   | $\hat{\beta}_{16}$ | -13,97                | -13,97                | -13,048               | -14,70                | -13,97                | -13,28                |
| $\tau_{pp} \cdot v_{suk}$    | $\hat{\beta}_{17}$ | -2,89                 | -2,76                 | -2,789                | -4,612                | -4,975                | -4,219                |
| $\tau_{pp} \cdot a_{suk}$    | $\hat{\beta}_{18}$ | -0,6198               | -0,5511               | -0,3734               | -0,8969               | -0,8541               | -0,6470               |
| $\tau_{pp} \cdot v_{vert}^2$ | $\hat{\beta}_{19}$ | 18,32                 | 18,71                 | 19,39                 | 22,63                 | 22,05                 | 20,82                 |
| $\tau_{pp} \cdot a_{vert}^2$ | $\hat{\beta}_{20}$ | 0,7948                | 0,8229                | 0,7669                | 0,8570                | 0,8221                | 0,7823                |
| $\tau_{pp} \cdot v_{suk}^2$  | $\hat{\beta}_{21}$ | 0,0239                | 0,0227                | 0,0230                | 0,0361                | 0,0393                | 0,0333                |
| $\tau_{pp} \cdot a_{suk}^2$  | $\hat{\beta}_{22}$ | 2,03·10 <sup>-3</sup> | 1,80·10 <sup>-3</sup> | 1,28·10 <sup>-3</sup> | 2,87·10 <sup>-3</sup> | 2,80·10 <sup>-3</sup> | 2,17·10 <sup>-3</sup> |
| $R_{kor}^2$                  |                    | 0,996                 | 0,996                 | 0,993                 | 0,992                 | 0,993                 | 0,992                 |
| $S_e$                        |                    | 4,79                  | 4,52                  | 5,91                  | 8,67                  | 7,98                  | 8,35                  |
| $C_p$                        |                    | 23                    | 23                    | 21,92                 | 23                    | 23                    | 22,48                 |

Visų sudarytų regresijos modelių struktūra yra vienoda:

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{\max} = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot v_{vert} + \hat{\beta}_2 \cdot v_{vert}^2 + \hat{\beta}_3 \cdot a_{vert} + \hat{\beta}_4 \cdot a_{vert}^2 + \hat{\beta}_5 \cdot v_{suk} + \\ & + \hat{\beta}_6 \cdot v_{suk}^2 + \hat{\beta}_7 \cdot a_{suk} + \hat{\beta}_8 \cdot a_{suk}^2 + \hat{\beta}_9 \cdot v_{vert} \cdot a_{vert} + \hat{\beta}_{10} \cdot v_{suk} \cdot a_{suk} + \\ & + \hat{\beta}_{11} \cdot a_{vert} \cdot a_{suk} + \hat{\beta}_{12} \cdot v_{vert} \cdot v_{suk} + \hat{\beta}_{13} \cdot \tau_{pp} + \hat{\beta}_{14} \cdot \tau_{pp}^2 + \hat{\beta}_{15} \cdot \tau_{pp} \cdot v_{vert} + \\ & + \hat{\beta}_{16} \cdot \tau_{pp} \cdot a_{vert} + \hat{\beta}_{17} \cdot \tau_{pp} \cdot v_{suk} + \hat{\beta}_{18} \cdot \tau_{pp} \cdot a_{suk} + \hat{\beta}_{19} \cdot \tau_{pp} \cdot v_{suk}^2 + \\ & + \hat{\beta}_{20} \cdot \tau_{pp} \cdot a_{vert}^2 + \hat{\beta}_{21} \cdot \tau_{pp} \cdot v_{suk}^2 + \hat{\beta}_{22} \cdot \tau_{pp} \cdot a_{suk}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

čia  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{22}$  – regresijos parametru įverčiai, kurių reikšmės pateiktos 4.8 lentelėje. Regresijos modeliai yra sudaryti tik iš statistiškai reikšmingų regresorių ( $p < 0,01$ ). Visuose sudarytuose modeliuose yra tenkinamos regresijos prielaidos ir gautos didesnės nei 0,99 koreguoto determinacijos koeficiento  $R_{kor}^2$  reikšmės.



**4.8 pav.** C-AS/RS maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  vidurkio priklausomybės nuo SRM tipo, SRM greitaveikos, krovinio paėmimo / padėjimo trukmės, vertikalios judėjimo greičio ir krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmo

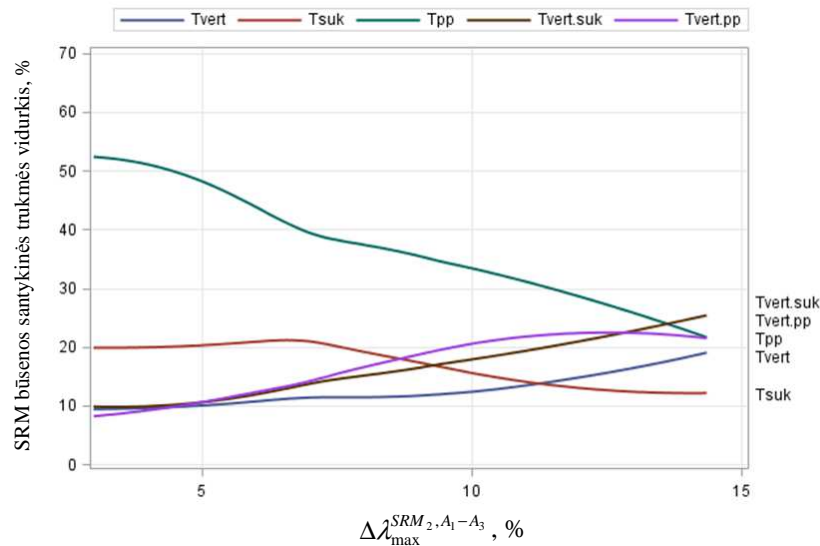
Įvertinus gautus rezultatus, galima teigti, kad  $\hat{\lambda}_{\max}$  reikšmingai priklauso nuo SRM tipo ir maršruto sudarymo algoritmo. 4.8 pav. pavaizduotos regresijos funkcijos, kurios parodo  $\hat{\lambda}_{\max}$  priklausomybę nuo parametrų  $v_{vert}$ ,  $\tau_{pp}$ , kai kiti sistemos parametrai ( $v_{suk}$ ,  $a_{suk}$  ir  $a_{vert}$ ) yra fiksuoti. Regresijos funkcijos grupuotos pagal greitaveikas  $G_1$  ir  $G_3$ ,  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$  ir krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmus  $A \in \{A_1, A_2, A_3\}$ .

Abu SRM tipai  $SRM_1$  ir  $SRM_2$  buvo palyginti esant vienodiems parametrų rinkiniams ir nustatyta, kad visais atvejais didžiausios vidutinio maksimalaus pralaidumo  $\hat{\lambda}_{\max}$  reikšmės yra gaunamos sistemose su  $SRM_2$ . Didžiausias vidutinis maksimalus pralaidumas  $\hat{\lambda}_{\max}=1043$  (krov./val.) buvo pasiektas sistemoje su  $SRM_2$  ir parametrais  $A_1$ ,  $\tau_{pp}=1$  ir  $G_3$ , o sistemoje su  $SRM_1$  ir tais pačiais parametrais buvo pasiektas pralaidumas  $\hat{\lambda}_{\max}=768$  ( $\hat{\lambda}_{\max}$  sumažėjimas, lyginant su  $SRM_2$  – 26,3 %). Visose tirtose sistemose su  $SRM_1$  buvo pasiektas 22,2–31,6 % mažesnis maksimalus pralaidumas, palyginti su sistemomis  $SRM_2$ . Taip pat palyginus sistemų su  $SRM_1$  ir  $SRM_2$  maksimalius pralaidumus, sistemose su  $SRM_1$  buvo nustatytas vidutiniškai  $26,5 \pm 1,0$  % mažesnis pralaidumas, kai krovinių transportavimo maršruto sudarymui buvo naudojamas algoritmas  $A_1$ ,  $25,9 \pm 1,1$  %, mažesnis pralaidumas naudojant  $A_2$  ir  $28,4 \pm 1$  % naudojant  $A_3$  (4.9 lentelė).

**4.9 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  santykiniai skirtumai tarp C-AS/RS su skirtingais SRM tipais ir maršruto sudarymo algoritmais

| Skirtumo skaičiavimo grupė |                              | $\lambda_{\max}$ santykinio skirtumo (%) aprašomoji statistika |      |          |                        |
|----------------------------|------------------------------|--|------|----------|------------------------|
| SRM                        | Maršruto sudarymo algoritmas | Min  | Max  | Vidurkis | Standartinis nuokrypis |
| $\Delta(SRM_1-SRM_2)$      | $A_1$                        | 23,2   | 29,1 | 26,5     | 1,0                    |
| $\Delta(SRM_1-SRM_2)$      | $A_2$                        | 22,2   | 28,5 | 25,9     | 1,1                    |
| $\Delta(SRM_1-SRM_2)$      | $A_3$                        | 25,5   | 31,6 | 28,4     | 1,0                    |
| $SRM_1$                    | $\Delta(A_1-A_2)$            | -1,0   | 4,0  | 1,5      | 0,7                    |
| $SRM_1$                    | $\Delta(A_1-A_3)$            | 3,7  | 19,2 | 10       | 2,8                    |
| $SRM_1$                    | $\Delta(A_2-A_3)$            | 3,4  | 16,1 | 8,6      | 2,3                    |
| $SRM_2$                    | $\Delta(A_1-A_2)$            | 0,2  | 5,1  | 2,4      | 0,7                    |
| $SRM_2$                    | $\Delta(A_1-A_3)$            | 3,0  | 14,4 | 7,6      | 2,0                    |
| $SRM_2$                    | $\Delta(A_2-A_3)$            | 2,1  | 10,4 | 5,3      | 1,7                    |

Palyginus C-AS/RS maksimalaus pralaidumo santykinius skirtumus pagal SRM tipą ir maršruto sudarymo algoritmą nustatyti tik nedideli skirtumai tarp sistemų, naudojančių algoritmus  $A_1$  ir  $A_2$  krovinių transportavimo maršrutui sudaryti. Nustatyta, kad sistemos su  $SRM_1$  ir  $A_2$  pasiektas vidutiniškai  $1,5 \pm 0,7$  % mažesnis maksimalus pralaidumas  $\hat{\lambda}_{\max}$ , lyginant su  $A_1$ , o sistemose su  $SRM_2$  šis skirtumas buvo  $2,4 \pm 0,7$  %. Tačiau sudarant krovinių transportavimo maršrutą su  $A_2$ , reikia įvertinti  $(N_L)^{N_{LHD}-1} = 15^3$  mažiau viršūnių greičiausio maršruto paieškos medyje palyginti su optimaliu maršruto sudarymo algoritmu  $A_1$ . Pavyzdžiui, sistema su parametrais  $SRM_2$ ,  $\tau_{pp} = 1$ ,  $G_3$  ir  $v_{vert} = 1$  pasiekia pralaidumą  $\hat{\lambda}_{\max} = 825$ , naudojant  $A_1$  ir tik 2,4 % mažesnę pralaidumą  $\hat{\lambda}_{\max} = 805$ , naudojant maršruto sudarymo algoritmą  $A_2$ . Pagal gautus rezultatus taip pat nustatyta, kad sistemose su  $SRM_1$  maršrutui sudaryti, naudojant algoritmą  $A_3$ , buvo pasiektas  $10 \pm 2,8$  % mažesnis vidutinis maksimalus pralaidumas, sistemose su  $SRM_2$  –  $7,6 \pm 2$  % mažesnis vidutinis maksimalus pralaidumas, lyginant su optimaliu maršruto sudarymo algoritmu  $A_1$ .



**4.9 pav.** SRM būsenų santykinė trukmių vidurkių priklausomybės nuo  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1-A_3}$  – maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $SRM_2$ , valdomų algoritmais  $A_1$  ir  $A_3$ , ( $n=29400$ )

Mažiausias 3,0 % santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  gautas, kai  $T_{vert} = 9,1 \%$ ,  $T_{pp} = 50,4 \%$ ,  $T_{suk} = 19,2 \%$ ,  $T_{vert-suk} = 10,8 \%$  ir  $T_{vert-pp} = 10,1 \%$ , ( $T_{prast} = 0,4 \%$ ), o SRM judėjimo parametrai yra  $v_{vert} = 2,25$ ,  $a_{vert} = 6$ ,  $v_{suk} = 56,25$ ,  $a_{suk} = 67,5$  ir  $\tau_{pp} = 2$ . Šiuo atveju „siaura vieta“ yra krovinių paėmimo / padėjimo veiksmai (jų trukmė sudaro 50,4 % viso SRM darbo laiko), optimalus valdymo algoritmas  $A_1$  negali visiškai išnaudoti savo galimybių, todėl santykinis skirtumas yra mažas. Didžiausias 14,4 % santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  gautas, kai  $T_{vert} = 17,5 \%$ ,  $T_{pp} = 25,1 \%$ ,  $T_{suk} = 10,7 \%$ ,  $T_{vert-suk} = 22,8 \%$ ,  $T_{vert-pp} = 23,4 \%$ , ( $T_{prast} = 0,5 \%$ ), o SRM judėjimo parametrai yra  $v_{vert} = 1$ ,  $a_{vert} = 4,5$ ,  $v_{suk} = 56,25$ ,  $a_{suk} = 135$  ir  $\tau_{pp} = 1$ . Šiuo atveju visų SRM būsenų trukmės pasiskirsto tolygiau, optimalus valdymo algoritmas  $A_1$  gali geriau panaudoti savo galimybes, todėl santykinis skirtumas padidėja daugiau kaip 4 kartus. Nustatyta, kad sparčiai mažėjant krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinės trukmės  $T_{pp}$  vidurkiui ir lėtai didėjant  $T_{vert}$ ,  $T_{vert-pp}$ ,  $T_{vert-suk}$  vidurkiams bei praktiškai nekintant  $T_{suk}$  santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  padidėja nuo 3 % iki 6–7 % (4.9 pav.). Išliekant panašioms tendencijoms, bet papildomai mažėjant  $T_{suk}$ , santykinis skirtumas  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  padidėja iki 14,4 % (4.9 pav.).

Siekiant ištirti, kaip atskiri judėjimo parametrai veikia skirtumą, buvo sudarytas regresijos modelis, apibūdinantis santykinio skirtumo vidurkio  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  priklausomybę nuo SRM judėjimo parametrų

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3} = & 6,6405 - 4,9085 \cdot \ln(v_{vert}) - 0,0504 \cdot \ln(v_{suk}) - \\ & - 0,24 \cdot \ln(a_{vert}) + 1,2394 \cdot \ln(a_{suk}) - 3,3950 \cdot \ln(\tau_{pp}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Šio modelio koreguotas determinacijos koeficientas yra labai geras  $R_{kor}^2 = 0,9$ ,  $S_e = 0,64$ ,  $C_p = 6$ , pagal  $t$  kriterijų visi regresoriai yra statistiškai reikšmingi, duomenims būdingas nedidelis heteroskedastiškumas ir nedidelis normalumo prielaidos pažeidimas, visos likusios tiesinės regresijos prielaidos yra patenkinamos, multikolinearumo nėra (visi VIF < 1), lygties koeficientų ženklai atitinka koreliacijas, esminių išskirčių nėra.

Regresijos lygtis rodo, kad  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$  mažėja, didinant SRM judėjimo parametrų  $v_{vert}$ ,  $a_{vert}$ ,  $v_{suk}$ ,  $\tau_{pp}$  vertes, ir didėja, didinant sukimosi pagreitį  $a_{suk}$ . Panaudodami sudarytą regresijos lygtį galime kiekybiškai įvertinti SRM judėjimo parametrų įtaką santykinio skirtumo vidurkiui  $\Delta \lambda_{\max}^{SRM_2, A_1 - A_3}$ . Pavyzdžiui, jeigu 1 % padidinsime  $v_{vert}$ , o kitus parametrus paliksime nepakitusiųs, tai skirtumas

$\Delta \hat{\lambda}_{\max}^{SRM_2, A_1-A_3}$  sumažės 0,049 %, analogiškai 1 % padidinus  $\tau_{pp}$ , santykinis skirtumas vidutiniškai sumažėja 0,034 %. Analogiško tyrimo rezultatai sistemai su SRM<sub>1</sub> pateikti 2 priede.

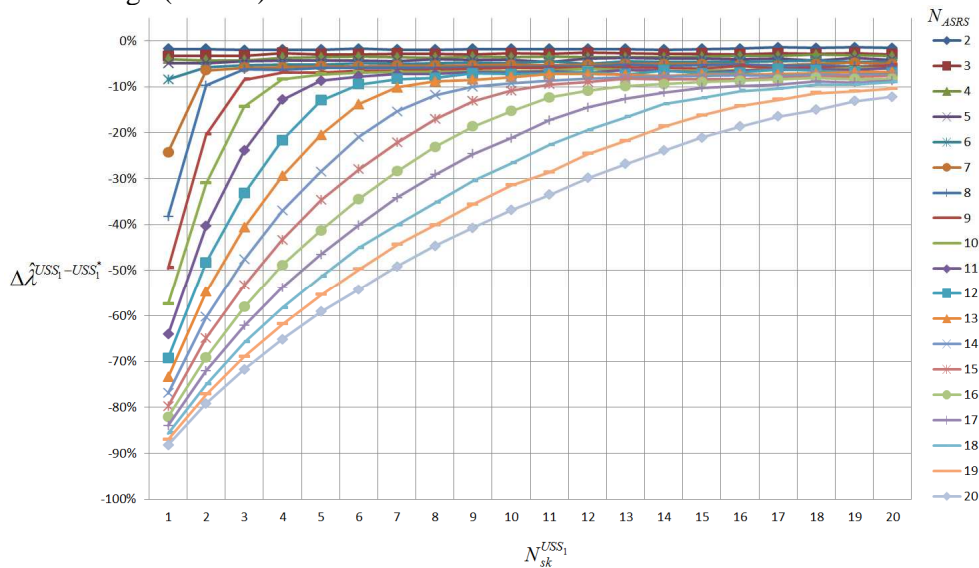
### 4.3. Standartinės ir integruotos su cilindrine AS/RS užsakymų surinkimo sistemų palyginimas

Tyrimo tikslas – nustatyti produktų krovinių rūšiavimo įtaką standartinės užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ (toliau tekste  $USS_1$ ) efektyvumo rodikliams (pralaidumui ir apkrautumui) ir gautus rezultatus palyginti su integruotos sistemos ( $USS_2$ ) rezultatais pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{sk}^{USS_1} \in \{1, 2, \dots, 20\}$  ir  $N_{ASRS} \in \{2, 3, \dots, 20\}$ . Pirmiausiai buvo tiriama tik standartinė sistema, kurioje produktų kroviniai rūšiuojami pagal stotelėje nustatytą užsakymų surinkimo seką, ir lyginama su srautų prasme suderinta standartinė sistema ( $USS_1^*$ ) be rūšiavimo apribojimų ir „siaurų vietų“.  $USS_1^*$  visada tenkina sąlygą  $\lambda_{ASRS} = \lambda_{konv} = \lambda_{USS_1^*}$ . Į sistemą  $USS_1^*$ , kurią sudaro  $N_{ASRS}$  stelažų eilių, iš AS/RS transportuojamas  $\lambda_{ASRS}$  intensyvumo produktų krovinių srautas. Konvejerių sistema parinkta taip, kad užtikrintų krovinių srauto pralaidumą  $\lambda_{ASRS} = \lambda_{konv}$ . Prijungtų stotelių skaičius  $N_{sk}^{USS_1}$  parinktas taip, kad stotelių bendras pralaidumas užtikrintų iš AS/RS transportuojamų produktų krovinių srauto aptarnavimą, t. y.  $\lambda_{USS_1^*} = \lambda_{ASRS} = \lambda_{konv}$ . Darbe nenagrinėjami konkrečių, realiose sistemose naudojamų, įrenginių parametrai, bet jų reikšmės yra praktikoje naudojamų įrenginių parametrų reikšmių ribose. Modeliavimo eksperimentams pasirinkta AS/RS sistema, kuri užtikrina pastovų vienos stelažų eilės  $\lambda_{ASRS}^{SRM} = \lambda_{ASRS} / N_{ASRS} = 100$  krov./val. vidutinį pralaidumą. Atlikti modeliavimo eksperimentai su visomis stelažų eilių  $N_{ASRS}$  ir stotelių skaičiaus  $N_{sk}^{USS_1}$  kombinacijomis, t. y. tirtos tokios užsakymų surinkimo sistemos konfigūracijos, kuriose maksimalus pralaidumas yra nuo 200 iki 2000 krov./val., ir nustatyti pralaidumo santykiniai skirtumai  $\Delta \lambda^{USS_1 - USS_1^*}$  tarp sistemos su produktų krovinių rūšiavimo apribojimu ir sistemos be apribojimų. Gauti rezultatai pateikti 4.10 pav.

Mažose sistemose, kai  $N_{ASRS} \in \{2, \dots, 6\}$ , sistemos pralaidumo sumažėjimas dėl produktų krovinių rūšiavimo neviršija 9 % ir nepriklauso nuo prijungtų stotelių skaičiaus. Didesnėse sistemose, kai  $N_{ASRS} \in \{7, \dots, 10\}$  ir  $N_{sk}^{USS_1} = 1$ , pralaidumo sumažėjimas siekia vidutiniškai 24–57 %, tačiau stotelių skaičių padidinus iki



$N_{sk}^{USS_1} = 2$ , kai  $N_{ASRS} \in \{7, 8\}$ , pralaidumo sumažėjimas jau tampa nereikšmingas (iki 10 %). Kai  $N_{ASRS} = 9$  arba  $N_{ASRS} = 10$ , reikia prijungti atitinkamai  $N_{sk}^{USS_1} = 3$  arba  $N_{sk}^{USS_1} = 4$  stoteles, kad neigiamas rūšiavimo poveikis sumažėtų iki nereikšmingo (iki 9 %).



**4.10 pav.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_1$  ir  $USS_1^*$  vidurkio  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_1 - USS_1^*}$  priklausomybės nuo stotelių skaičiaus  $N_{sk}^{USS_1}$ , kai  $N_{ASRS} \in \{2, 3, \dots, 20\}$

Papildomos stotelės prijungimas sistemose su 7–10 stelažų eilėmis ir viena stotele ( $N_{sk}^{USS_1} = 1$ ) leidžia reikšmingai padidinti sistemos pralaidumą, vidutiniškai 17–29 %. Toliau didinant stotelių skaičių nuo 2 iki 3, sistemos pralaidumas vidutiniškai padidėja 1–16 %, o didinant stotelių skaičių nuo 3 iki 4 – padidėja labai mažai, vidutiniškai tik 0–6 %. Nustatyta, kad sistemose  $N_{ASRS} \in \{7, \dots, 10\}$ ,  $N_{sk}^{USS_1} = 1$  neigiamą rūšiavimo poveikį jos pralaidumui galima reikšmingai sumažinti prijungus tik 1 papildomą stotelę ( $N_{sk}^{USS_1} = 2$ ), o tolesnis stotelių skaičiaus didinimas yra ne toks reikšmingas.

Sistemose su dideliu sandėliavimo vietų skaičiumi AS/RS, kai  $N_{ASRS} \in \{11, 12, \dots, 20\}$ , produktų krovinių rūšiavimo poveikis sistemos pralaidumui yra reikšmingas visais atvejais (4.10 pav.): kai  $N_{sk}^{USS_1} = 1$  ir  $N_{ASRS} \in \{11, 12, 13\}$ , sistemos pralaidumas vidutiniškai sumažėja 64–73 %; kai  $N_{ASRS} \in \{14, 15, 16\}$

sumažėja 76–82 %; kai  $N_{ASRS} \in \{17, 18, \dots, 20\}$  sumažėja net 84–88 %. Nustatyta, kad sumažinti neigiamą rūšiavimo poveikį iki nereikšmingo (iki 10 %), kai  $N_{ASRS} \in \{11, 12, 13\}$ , reikia prijungti atitinkamai  $N_{sk}^{USS_1} = \{5, 6, 7\}$  stoteles, kai  $N_{ASRS} \in \{14, 15, 16\}$  atitinkamai  $N_{sk}^{USS_1} = \{10, 11, 13\}$  stoteles, o didžiausioms sistemoms, kai  $N_{ASRS} \in \{17, 18, \dots, 20\}$ , reikia prijungti daugiau nei  $N_{sk}^{USS_1} \geq 16$  stotelių. Sistemose, turinčiose  $N_{ASRS} \in \{11, 12, \dots, 16\}$  stelažų eilių ir  $N_{sk}^{USS_1} = 1$  stotelę, vienos papildomos stotelės prijungimas leidžia padidinti sistemos pralaidumą vidutiniškai 13–23 %, o sistemose, turinčiose  $N_{ASRS} \in \{17, 18, \dots, 20\}$  stelažo eilių, pralaidumo padidėjimas siekia tik 9–12 %. Nustatyta, kad sistemose, turinčiose  $N_{ASRS} \in \{11, 12, \dots, 16\}$  stelažo eilių ir dvi stoteles ( $N_{sk}^{USS_1} = 2$ ), kiekvienos papildomos stotelės prijungimas iki  $N_{sk}^{USS_1} = 5$  leidžia padidinti sistemos pralaidumą vidutiniškai po  $10,6 \pm 3$  %, o naujų stotelių prijungimas vidutiniškai padidina pralaidumą tik po  $1,2 \pm 2$  %. Panašūs rezultatai gauti ir didžiausiose sistemose, kai  $N_{ASRS} \in \{17, 18, \dots, 20\}$ . Kiekvienos papildomos stotelės prijungimas nuo  $N_{sk}^{USS_1} = 2$  iki  $N_{sk}^{USS_1} = 5$  leidžia padidinti sistemos pralaidumą vidutiniškai po  $7,5 \pm 1$  %, o naujų stotelių prijungimas vidutiniškai padidina pralaidumą tik po  $2,9 \pm 1,8$  % kiekvienai naujai stotelei. Nustatyta, kad sistemose su dideliu sandėliavimo vietų skaičiumi, kai  $N_{ASRS} \in \{11, 12, \dots, 20\}$ , stotelių skaičius turi reikšmingą poveikį sistemos pralaidumui, todėl į tokio tipo sistemas tikslinga integruoti C-AS/RS.

Panaudojus integruotą su C-AS/RS užsakymų surinkimo sistemos modelį, atliktas tyrimas, kurio tikslas – kiekybiškai įvertinti integracijos poveikį sistemos pralaidumui. Buvo lyginami standartinės ( $USS_1$ ) ir integruotos sistemos ( $USS_2$ ) pralaidumo santykiniai skirtumai. Integravimui buvo pasirinktos šios C-AS/RS modifikacijos:  $N_{kelt} = 4$ , krovinių atvežimo / išvežimo konvejeriai integruoti stelažų viduryje ( $L_{at} = 0708$ ), greitaveikos  $G \in \{G_1, G_2, G_3\}$ ,  $SRM \in \{SRM_1, SRM_2\}$ , krovinių paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp} \in \{1; 1,25; 1,5; 1,75; 2\}$ . Integruotos sistemos  $USS_2$  palyginimas su standartine  $USS_1$  atliktas, kai  $N_{sk}^{USS_1} \in \{1, 2, \dots, 20\}$ ,  $N_{ASRS} \in \{3, 4, \dots, 20\}$ . Kadangi viena užsakymų surinkimo stotelė buvo integruota su viena C-AS/RS, todėl stotelės pralaidumas šiuo atveju yra lygus C-AS/RS pralaidumui. Įvertinus C-AS/RS pralaidumą esant  $U_{CASRS} = 0,9$  apkrautumui pagal 4.1.4 skyrelyje pateiktus tyrimų rezultatus, kiekvienai integruotai sistemai nustatytas AS/RS stelažų eilių skaičius pagal prognozuojamą C-AS/RS pralaidumą:

$$N_{ASRS}^{USS_2} = \left\lfloor \frac{(\lambda_{\max} \cdot U_{CASRS}) \cdot N_{sk}^{USS_2}}{\lambda_{ASRS}^{SRM}} \right\rfloor, \text{ kai } N_{ASRS}^{USS_2} \leq N_{ASRS}, \quad (4.6)$$

čia „ $\lfloor \cdot \rfloor$ “ žymi apvalinimo iki mažesnio sveiko skaičiaus (ang. *floor*) matematinę funkciją,  $N_{sk}^{USS_2}$  – stotelių skaičius su integruota C-AS/RS. Pagal pasirinktus C-AS/RS parametrus ir 4.6 formulę buvo nustatyti C-AS/RS integravimo į užsakymų surinkimo sistemą „Produkcija–Žmogus“ parametrai, kurie pateikti 3 priede.

Modeliavimo eksperimentai buvo atlikti visoms 3 priede pateiktoms parametru kombinacijoms ir nustatyti pralaidumo santykinio skirtumo tarp integruotos ( $USS_2$ ) ir standartinės užsakymų surinkimo sistemų ( $USS_1$ ) vidurkiai  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$ .

Mažesnėse sistemose, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \leq 10$ , reikšmingas sistemos pralaidumo santykinio skirtumo vidurkio padidėjimas (daugiau kaip 10 %) buvo nustatytas tik keletui sistemos konfigūracijų. Iš viso buvo palygintos 45 sistemos konfigūracijos ir tik 14 konfigūracijų buvo nustatytas reikšmingas  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  padidėjimas (4.10 lentelė, čia  $C$  – sistemos konfigūracijos numeris).

**4.10 lentelė.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \leq 10$

| C  | $N_{ASRS}^{USS_2}$ | $N_{sk}^{USS_2}$ | SRM              | G              | $\tau_{pp}$ | $\hat{\lambda}_{USS_2}$ | $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}, \%$ |      |      |
|----|--------------------|------------------|------------------|----------------|-------------|-------------------------|--|------|------|
|    |                    |                  |                  |                |             |                         | $N_{sk}^{USS_1}$                         |      |      |
|    |                    |                  |                  |                |             |                         | 1  | 2    | 3    |
| 28 | 7                  | 1                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | 1,5         | 673                     | 26,7                                     |      |      |
| 27 | 7                  | 1                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>2</sub> | 1,25        | 674                     | 27,0                                     |      |      |
| 32 | 8                  | 1                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | 1,25        | 757                     | 53,0                                     |      |      |
| 33 | 8                  | 1                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>2</sub> | 1           | 757                     | 53,2                                     |      |      |
| 37 | 9                  | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>3</sub> | 2           | 870                     |  | 21,3 |      |
| 38 | 9                  | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | 1,75        | 873                     |  | 21,7 |      |
| 40 | 9                  | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>1</sub> | 1           | 873                     |  | 21,7 |      |
| 39 | 9                  | 1                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> | 1           | 845                     | 85,9                                     | 17,9 |      |
| 35 | 9                  | 2                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>1</sub> | 2           | 870                     |  | 21,3 |      |
| 42 | 10                 | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>3</sub> | 1,75        | 963                     |  | 39,6 | 12,3 |
| 43 | 10                 | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | 1,25        | 967                     |  | 40,2 | 12,9 |
| 41 | 10                 | 2                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | 1,5         | 963                     |  | 39,5 | 12,2 |
| 44 | 10                 | 3                | SRM <sub>1</sub> | G <sub>1</sub> | 1,75        | 983                     |  |      | 14,6 |
| 45 | 10                 | 2                | SRM <sub>2</sub> | G <sub>1</sub> | 1,75        | 960                     |  | 39,2 | 11,9 |

4.10 lentelėje pateikti, pralaidumo santykinio skirtumo tarp užsakymų surinkimo sistemų  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai  $\Delta\hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$ , esant skirtingoms sistemos konfigūracijoms. Reikšmingiausi pralaidumo padidėjimai buvo nustatyti integruojant C-AS/RS su parametrais  $SRM_2$ ,  $G \in \{G_2, G_3\}$ ,  $\tau_{pp} \in \{1; 1,25\}$ . Didžiausias – 86 % – pokytis buvo nustatytas integruojant C-AS/RS, kurios parametrai yra  $SRM_2$ ,  $G_3$  ir  $\tau_{pp}=1$  ( $C = 39$ ). Nustatyta, kad tik 5 sistemos konfigūracijos  $C \in \{39, 41, 42, 43, 45\}$  leidžia sumažinti reikalingų stotelių skaičių bent  $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 1$  išlaikant reikšmingą pralaidumo padidėjimą, palyginti su standartine sistema. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad mažesnėse sistemose, kai  $N_{ASRS} \leq 10$ , C-AS/RS integravimas leidžia padidinti užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ efektyvumą tik tam tikrais atvejais ir reikšmingai nesumažina reikalingų stotelių skaičiaus, palyginti su standartine sistema  $USS_1$ .

Sistemose su didesniu stelažų eilių skaičiumi ( $N_{ASRS}^{USS_2} \geq 11$ ) reikšmingas pralaidumo padidėjimas buvo nustatytas visose konfigūracijose (4.11–4.12 lentelės, 4 priedas).

**4.11 lentelė.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai  $\Delta\hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \in \{11, \dots, 16\}$

| C  | $N_{ASRS}^{USS_2}$ | $N_{sk}^{USS_2}$ | SRM     | G     | $\tau_{pp}$ | $\hat{\lambda}_{USS_2}$ | $\Delta\hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}, \%$ |       |      |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|----|--------------------|------------------|---------|-------|-------------|-------------------------|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|--|
|    |                    |                  |         |       |             |                         | $N_{sk}^{USS_1}$                        |       |      |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|    |                    |                  |         |       |             |                         | 2                                       | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |  |  |  |  |  |
| 50 | 11                 | 3                | $SRM_1$ | $G_1$ | 1,5         | 1073                    |   | 28,0  | 11,8 |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 48 | 11                 | 2                | $SRM_2$ | $G_2$ | 2           | 1053                    | 60,3                                    | 25,7  |      |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 55 | 12                 | 2                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1,25        | 1151                    | 85,4                                    | 43,4  | 22,2 | 10,1 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 56 | 12                 | 2                | $SRM_2$ | $G_3$ | 2           | 1144                    | 84,2                                    | 42,5  | 21,5 |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 59 | 13                 | 2                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1           | 1233                    | 109,7                                   | 59,7  | 34,3 | 19,1 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 58 | 13                 | 2                | $SRM_2$ | $G_3$ | 1,75        | 1242                    | 111,2                                   | 60,9  | 35,2 | 20,0 | 10,6 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 67 | 14                 | 3                | $SRM_1$ | $G_1$ | 1           | 1356                    |   | 85,1  | 53,7 | 35,3 | 22,4 | 14,3 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 65 | 14                 | 2                | $SRM_2$ | $G_2$ | 1,25        | 1320                    | 137,7                                   | 80,2  | 49,6 | 31,7 | 19,1 | 12,0 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 71 | 15                 | 3                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1,75        | 1440                    |   | 105,4 | 69,2 | 46,8 | 33,1 | 23,1 | 15,6 | 10,4 |      |  |  |  |  |  |
| 72 | 15                 | 2                | $SRM_2$ | $G_3$ | 1,5         | 1404                    | 166,2                                   | 100,3 | 65,0 | 43,1 | 29,8 | 20,0 | 12,8 |      |      |  |  |  |  |  |
| 79 | 16                 | 3                | $SRM_1$ | $G_2$ | 1,25        | 1535                    |   | 128,8 | 87,5 | 63,2 | 46,1 | 33,8 | 24,5 | 17,8 | 13,1 |  |  |  |  |  |
| 76 | 16                 | 2                | $SRM_2$ | $G_2$ | 1           | 1493                    | 201,5                                   | 122,5 | 82,5 | 58,8 | 42,2 | 30,2 | 21,2 | 14,7 | 10,0 |  |  |  |  |  |
| 55 | 12                 | 2                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1,25        | 1151                    | 85,3                                    | 43,4  | 22,2 | 10,0 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 56 | 12                 | 2                | $SRM_2$ | $G_3$ | 2           | 1144                    | 84,2                                    | 42,5  | 21,5 |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |

Įvertinus gautus modeliavimo rezultatus, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 11$ , nustatytos sistemos konfigūracijos, kurios leidžia padidinti pralaidumą vidutiniškai 60 %, kai  $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 0$  ir 25 %, kai  $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 1$  ( $C = 48$ ). Reikšmingi pralaidumo pokyčiai buvo nustatyti ir sistemose su  $SRM_1$  ( $C = 50$ ) – 28 % ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 0$ ) ir 12 % ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 1$ ). Toliau didėjant stelažų eilių skaičiui  $N_{ASRS}$ , reikšmingai didėja pralaidumo skirtumas tarp sistemų ir mažėja reikalingų stotelių skaičius. Kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 13$ ,  $C = 59$  ir  $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 0$ , pralaidumas vidutiniškai padidėja 110 % ir išlieka pakankamai reikšmingas (19,5 %) sumažinus stotelių skaičių trimis ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 3$ ). Kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 16$ , C-AS/RS su  $SRM_2$  integravimas leidžia padidinti sistemos pralaidumą vidutiniškai 202 % ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 0$ ,  $C = 76$ ) ir sumažinti stotelių skaičių ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 8$ ). C-AS/RS su  $SRM_1$  ( $C = 79$ ) taip pat leidžia reikšmingai padidinti pralaidumą ir sumažinti stotelių skaičių: 63 % ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 3$ ) ir 10 % ( $\Delta N_{sk}^{USS_1-USS_2} = 8$ ).

**4.12 lentelė.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \in \{17, \dots, 20\}$

| C   | $N_{ASRS}^{USS_2}$ | $N_{sk}^{USS_2}$ | SRM     | G     | $\tau_{pp}$ | $\hat{\lambda}_{USS_2}$ | $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}, \%$ |       |       |       |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |
|-----|--------------------|------------------|---------|-------|-------------|-------------------------|--|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|
|     |                    |                  |         |       |             |                         | $N_{sk}^{USS_1}$                         |       |       |       |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |
|     |                    |                  |         |       |             |                         | 2  | 3     | 4     | 5     | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   |  |  |  |  |
| 81  | 17                 | 4                | $SRM_1$ | $G_1$ | 1,25        | 1638                    |  |       | 108,3 | 80,0  | 22,2 | 12,4 |      |      |      |      |  |  |  |  |
| 82  | 17                 | 3                | $SRM_2$ | $G_1$ | 1,25        | 1620                    |  | 152,4 | 106,0 | 78,0  | 20,8 | 11,2 |      |      |      |      |  |  |  |  |
| 87  | 18                 | 3                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1,25        | 1718                    |  | 179,6 | 128,6 | 96,5  | 30,0 | 18,3 | 10,6 |      |      |      |  |  |  |  |
| 84  | 18                 | 3                | $SRM_1$ | $G_2$ | 1           | 1707                    |  | 177,8 | 127,1 | 95,3  | 29,1 | 17,6 |      |      |      |      |  |  |  |  |
| 90  | 18                 | 2                | $SRM_2$ | $G_3$ | 1           | 1663                    | 269,2                                    | 170,6 | 121,3 | 90,2  | 25,8 | 14,5 |      |      |      |      |  |  |  |  |
| 95  | 19                 | 4                | $SRM_1$ | $G_1$ | 1           | 1829                    |  |       | 152,4 | 116,4 | 40,5 | 27,6 | 18,2 | 12,1 |      |      |  |  |  |  |
| 94  | 19                 | 3                | $SRM_2$ | $G_3$ | 2           | 1806                    |  | 206,1 | 149,2 | 113,7 | 38,7 | 26,0 | 16,7 | 10,7 |      |      |  |  |  |  |
| 101 | 20                 | 3                | $SRM_1$ | $G_3$ | 1           | 1884                    |  | 233,4 | 170,4 | 130,5 | 49,0 | 34,2 | 23,6 | 15,7 | 10,8 |      |  |  |  |  |
| 97  | 20                 | 5                | $SRM_1$ | $G_2$ | 2           | 1937                    |  |       |       | 137,0 | 53,2 | 37,9 | 27,1 | 19,0 | 13,9 | 10,1 |  |  |  |  |
| 96  | 20                 | 3                | $SRM_2$ | $G_3$ | 1,75        | 1881                    |  | 233,0 | 170,0 | 130,2 | 48,8 | 34,0 | 23,5 | 15,6 | 10,6 |      |  |  |  |  |
| 100 | 20                 | 4                | $SRM_2$ | $G_1$ | 1,75        | 1913                    |  |       | 174,5 | 134,0 | 51,3 | 36,2 | 25,5 | 17,5 | 12,4 |      |  |  |  |  |

Didžiausi pralaidumo vidutiniai santykiniai skirtumai buvo nustatyti sistemose su dideliu sandėliavimo vietų skaičiumi AS/RS, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \in \{17, \dots, 20\}$ . Pavyzdžiui, sistemos konfigūracijos  $C \in \{87, 84\}$  leidžia vidutiniškai 178 % padidinti sistemos pralaidumą, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 18$  ir  $\Delta N_{sk}^{USS_1 - USS_2} = 0$ , bei sumažinti stotelių skaičių  $\Delta N_{sk}^{USS_1 - USS_2} = 11$ . Didžiausias vidutinis pralaidumo padidėjimas 269 % buvo nustatytas konfigūracijai  $C = 90$ , kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 18$  ir  $\Delta N_{sk}^{USS_1 - USS_2} = 0$ . Didžiausias sumažintas stotelių skaičius  $\Delta N_{sk}^{USS_1 - USS_2} = 15$ , palyginti su standartinė sistema, buvo nustatytas konfigūracijoms  $C \in \{96, 101\}$ , kai  $N_{ASRS}^{USS_2} = 20$ .

#### 4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Sudaryti statistiniai modeliai, kurie leidžia įvertinti C-AS/RS struktūros parametrų (SRM tipo, krovinių atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinacijų, keltuvų skaičiaus), SRM judėjimo parametrų (keltuvų vertikalų judėjimo ir sukimosi greičių bei pagreičių), krovinių paėmimo / padėjimo trukmių, krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmų ir transportuojamų krovinių srauto intensyvumo įtaką sistemos efektyvumo rodikliams.
2. Išanalizavus statistinių modelių taikymo rezultatus, nustatyta, kad C-AS/RS krovinių atvežimo / išvežimo konvejerius geriausia integruoti gretimuose aukštuose stelažų viduryje, tačiau sistemos pralaidumas sumažės nežymiai, jeigu jie integruojami ir kituose gretimuose aukštuose. Didėjant atstumui tarp konvejerių integravimo aukštų, esant įvairioms tirtoms sistemos konfigūracijoms, nustatytas reikšmingas vidutinis maksimalaus pralaidumo sumažėjimas. Greitoms sistemoms su 4 keltuvais šis pokytis yra mažiausias 13,5 %–28,4 %.
3. Apibendrinant priklausomybės nuo keltuvų skaičiaus tyrimą nustatyta, kad maksimalūs C-AS/RS krovinių vidutiniai pralaidumai yra pasiekiami SRM sistemose su 4 keltuvais, kurie yra atitinkamai 40–69,4 % ir 115,1–192,2 % didesni palyginti su 2 ir 1 keltuvo SRM sistemomis.
4. Pasiūlyta, nustatant C-AS/RS „siauras vietas“, analizuoti SRM buvimo kiekvienoje būsenoje santykinės trukmės, santykinų trukmių skirtumus bei jų priklausomybę nuo C-AS/RS struktūros ir SRM judėjimo parametrų. Gauta, kad maksimalaus pralaidumo skirtumui tarp SRM tipų, esant vienodoms kitų parametrų reikšmėms, labiausiai daro įtaką krovinių paėmimo / padėjimo trukmė ir SRM sukimosi greitis. Kintant krovinių paėmimo / padėjimo ir SRM sukimosi būsenų santykinėms trukmėms, maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp SRM tipų vidurkis yra intervale nuo 28,4 % iki 42,1 %.

5. Kiekvienai SRM tipo ir krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmo kombinacijai sudaryti regresijos modeliai, kurie tiksliai prognozuoja (visi  $R_{kor}^2 > 0,99$ ) vidutinį maksimalų C-AS/RS pralaidumą tirtose SRM judėjimo ir krovinių paėmimo / padėjimo trukmės parametrų aibėje ir gali būti taikomi projektuojant tokio tipo sistemas.
6. Nustatyta, kad C-AS/RS su darbe pasiūlytu greitesniu krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmu  $A_2$  maksimalus pralaidumas sistemose su  $SRM_1$  yra vidutiniškai  $1,5 \pm 0,7$  % ir sistemose su  $SRM_2$   $2,4 \pm 0,7$  % mažesnis, palyginti su optimaliu maršruto sudarymo algoritmu  $A_1$ . Naudojant kitą, darbe pasiūlytą algoritmą  $A_3$ , maksimalus pralaidumas sistemose su  $SRM_1$  ir  $SRM_2$  sumažėjo atitinkamai  $10 \pm 2,6$  % ir  $7,6 \pm 2,0$  %. Naudojant algoritmą  $A_2$ , žymiai sumažėja skaičiavimų apimtys, greičiausio krovinių transportavimo maršruto paieškos medyje reikia įvertinti  $(N_L)^{N_{ketr} - 1}$  mažiau viršūnių, palyginti su optimaliu algoritmu  $A_1$ , o maksimalus sistemos pralaidumas vidutiniškai sumažėja tik 1,5–2,4 %.
7. Nustatyta, kad standartinės užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ pralaidumas gali sumažėti iki 84–88 % dėl produktų krovinių rūšiavimo pagal užsakymų surinkimo seką stotelėje, o integravus C-AS/RS, tokių sistemų pralaidumą galima padidinti iki 269 % ir tuo pačiu sumažinti reikalingų užsakymų surinkimo stotelių skaičių iki 15.

## DARBO IŠVADOS

1. Išanalizavus logistikos centro krovinių transportavimo sistemas nustatyta, kad užsakymų surinkimas yra brangiausias procesas, sudarantis apie 55 % visų sandėlio valdymo kaštų, o 85 % laiko neautomatizuotuose sandėliuose sudaro krovinių surinkimas ir transportavimas į užsakymų surinkimo stotelę, todėl automatizuotos užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ taikymas yra ypač aktualus šiam procesui tobulinti ir efektyvumui didinti. Taikant AS/RS šiuolaikinėse užsakymų surinkimo sistemose „Produkcija–Žmogus“, susiduriama su produktų krovinių rūšiavimo problema, kuri žymiai sumažina šios sistemos efektyvumą.
2. Sukurta naujo tipo C-AS/RS koncepcija ir valdymo algoritmai, kurie išsprendžia transportuojamų krovinių rūšiavimo problemas, padidina automatizuotų transportavimo sistemų pralaidumą ir pagerina jų lankstumą.
3. Integruojant imitacinio modeliavimo, statistikos ir vizualizavimo metodus, sudaryti universalūs C-AS/RS struktūros, valdymo ir integravimo į užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ tyrimo modeliai, kurie palengvina ir pagreitina tokio tipo automatizuotų transportavimo sistemų analizę bei projektavimą.
4. Nustatyta, kad C-AS/RS krovinių atvežimo / išvežimo vietas geriausia išdėstyti gretimuose aukštuose stelažų viduryje, tačiau sistemos pralaidumas sumažės nežymiai, jei jos bus išdėstytos laisvai pasirenkamuose, gretimuose aukštuose; SRM su 4 keltuvais leidžia pasiekti maksimalų pralaidumą, kuris yra atitinkamai 40–69,4 % ir 115,1–192,2 % didesnis, palyginti su 2 ir 1 keltuvo SRM, o maksimalių pralaidumų skirtumai tarp SRM tipų yra 28,4 %–42,1 %.
5. Sudaryti regresijos modeliai kiekvienai SRM tipo ir krovinių transportavimo maršruto sudarymo algoritmo kombinacijai, kurie tiksliai prognozuoja (visi  $R_{kor}^2 > 0,99$ ) vidutinį maksimalų C-AS/RS pralaidumą tirtose SRM judėjimo ir krovinių paėmimo / padėjimo trukmės parametrų aibėje.
6. Nustatyta, kad SRM su 4 keltuvais naudojant darbe pasiūlytą valdymo algoritmą  $A_2$ , žymiai pagreitėja krovinių transportavimo maršruto paieška, nes maršruto paieškos medyje reikia įvertinti 3375 kartų mažiau viršūnių, palyginti su optimaliu algoritmu  $A_1$ , o maksimalus sistemos pralaidumas vidutiniškai sumažėja tik 1,5–2,4 %.
7. Nustatyta, kad standartinės užsakymų surinkimo sistemos „Produkcija–Žmogus“ pralaidumas gali sumažėti iki 84–88 % dėl produktų krovinių rūšiavimo pagal užsakymų surinkimo seką stotelėje, o integravus C-AS/RS, tokių sistemų pralaidumą galima padidinti iki 269 % ir tuo pačiu sumažinti reikalingų užsakymų surinkimo stotelių skaičių iki 15.



## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. SAINATHUNI, Bhanuteja, et al. The warehouse-inventory-transportation problem for supply chains. *European Journal of Operational Research*. 2014, 237(2), 690–700. ISSN 0377-2217.
2. WANG, Yi-Chi. Evaluating flexibility on order quantity and delivery lead time for a supply chain system. *International Journal of Systems Science*. 2008, 39(12), 1193–1202. ISSN 0020-7721.
3. CHU, Ching-Wu. A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. *European Journal of Operational Research*. 2005, 165(3), 657–667. ISSN 0377-2217.
4. MELACHRINOUDIS, E., and M. HOKEY. Redesigning a warehouse network. *European Journal of Operational Research*. 2007, 176(1), 210–229. ISSN 0377-2217.
5. HIGGINSON, J. K., and J. H. BOOKBINDER. *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer, New York: Springer US, 2005.
6. HERTZ, S., and M. ALFREDSSON. Strategic development of third party logistics providers. *Industrial Marketing Management*. 2003, 32(2), 139–149. ISSN 0019-8501.
7. YU, W., and P. J. EGBELU. Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*. 2008, 184(1), 377–396, ISSN 0377-2217.
8. DE BRITO M. P., and R. DEKKER, Modelling product returns in inventory control exploring the validity of general assumptions. *International Journal of Production Economics*. 2003, 81–82, 225–241. ISSN 0925-5273.
9. CHO, Jay Joong-Kun, et al. Logistics capability, logistics outsourcing and firm performance in an e-commerce market. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2008(5), 336–359. ISSN 0960-0035.
10. YANG, Shilei, et al. Heuristics for solving an internet retailer's dynamic transshipment problem. *Expert Systems with Applications*. 2014, 41(11), 5382–5389. ISSN 0957-4174.
11. HU, K.-Y., and T.-S. CHANG. An innovative automated storage and retrieval system for B2C e-commerce logistics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, 48(1-4), 297–305. ISSN 0268-3768.
12. MCLEOD, Fraser, et al. Transport impacts of local collection/delivery points. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2006, 307–317. ISSN 1367-5567.
13. RAMANATHAN, Ramakrishnan. The moderating roles of risk and efficiency on the relationship between logistics performance and customer loyalty in e-commerce. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2010, 46(6), 950–962. ISSN 1366-5545.
14. AGATZ, Niels A.H., et al. E-fulfillment and multi-channel distribution – A review. *European Journal of Operational Research*. 2008, 187(2), 339–356. ISSN 0377-2217.
15. Apklauso apie 2013-2018 logistikos centrų vystymosi tendencijas rezultatai. [Žiūrėta 2015-04-12] Prieiga per internetą:  
<http://www.supplychainteched.org/resources/motorola-whitepaper.pdf>

16. WANG, Qian, et al. A RFID-Based Automated Warehouse Design. In *Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on, April 16-18, 2010, Chengdu, China*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010. pp. 359–366 (vol. 6).
17. WANG, Qian, et al. A new-generation automated warehousing capability. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2010, 23(6), 565–573. ISSN 0951-192X.
18. BAKER, P., and Z. HALIM. An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management: An International Journal*. 2007, 12(2), 129–138. ISSN 1359-8546.
19. WANG, Jinhe, et al. Application of Automated Warehouse Logistics in Manufacturing Industry. In *Computing, Communication, Control, and Management, 2009. CCCM 2009. ISECS International Colloquium on , August 8-9, 2009, Sanya, China*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009. pp. 218–220 (vol. 4).
20. GU, Jinxiang, et al. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review . *European Journal of Operational Research*. 2010, 203(3), 539–549. ISSN 0377-2217.
21. GONG, Y., and R. B. M. DE KOSTER. A review on stochastic models and analysis of warehouse operations. *Logistics Research*. 2011, 3(4), 191–205. ISSN 1865-035X.
22. BOYSEN, N., and M. FLIEDNER. Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. *Omega*. 2010, 38(6), 413–422. ISSN 0305-0483.
23. MASON, Scott J., et al. Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2003, 39(2), 141–159. ISSN 1366-5545.
24. RUSHTON, Alan, Phil CROUCHER, Peter BAKER. *Handbook of Logistics and Distribution Management*. 4th ed. London: Kogan Page Publishers, 2010.
25. HERAGU, Sunderesh S., et al. Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*. 2005, 43(2), 327–338. ISSN 0020-7543.
26. PETERSEN, Ch. G., and G. AASE. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*. 2004, 92(1), 11–19. ISSN 0925-5273.
27. PETERSEN, Charles G., et al. Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2004, 34(7), 534–544. ISSN 0960-0035.
28. PETERSEN, Charles G., et al. Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage. *International Journal of Operations & Production Management*. 2005, 25(10), 997–1012. ISSN 0144-3577.
29. HSIEH, L.-F., and L. TSAI. The optimum design of a warehouse system on order picking efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, 28(5-6), 626–637. ISSN 0268-3768.

30. BOZER, Y. A., and J. W. KILE. Order batching in walk-and-pick order picking systems. *International Journal of Production Research*. 2008, 46(7), 1887–1909. ISSN 0020-7543.
31. DE KOSTER, René, et al. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2007, 182(2), 481–501. ISSN 0377-2217.
32. EISENSTEIN, Donald D. Analysis and optimal design of discrete order picking technologies along a line. *Naval Research Logistics*. 2008, 55(4), 350–362.
33. ROODBERGEN, Kees Jan, et al. Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouses. *IIE Transactions*. 2008, 40(11), 1032–1045. ISSN 0740-817X.
34. KIM, Byung-In, et al. Clustering-based order-picking sequence algorithm for an automated warehouse. *International Journal of Production Research*. 2003, 41(15), 3445–3460. ISSN 0020-7543.
35. DALLARI, Fabrizio, et al. Design of order picking system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, 42(1–2), 1–12. ISSN 0268-3768.
36. HWANG, Hark, et al. An integrated model for the design of end-of-aisle order picking system and the determination of unit load sizes of AGVs. *Computers & industrial engineering*. 2002, 42(2–4), 249–258. ISSN 0360-8352.
37. SHUHUA, M., and H. YANZHU. Research on the order picking optimization problem of the automated warehouse. In *Control and Decision Conference, 2009. CCDC'09. Chinese, June 17-19, 2009, Guilin, China*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009. pp. 990–993.
38. BAKER, P., and M. CANESSA. Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*. 2009, 193(2), 425–436. ISSN 0377-2217.
39. GOVINDARAJ, T., et al. Design of warehousing and distribution systems: an object model of facilities, functions and information. In *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on, October 8–11, 2000, Nashville, Tennessee, USA*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000. pp. 1099–1104 (vol. 2).
40. LEE, M.-K., and E. A. ELSAYED. Optimization of warehouse storage capacity under a dedicated storage policy. *International Journal of Production Research*. 2005, 43(9), 1785–1805. ISSN 0020-7543.
41. PETERSEN, Charles G. Considerations in order picking zone configuration. *International Journal of Operations & Production Management*. 2002, 22(7), 793–805. ISSN 0144-3577.
42. HERAGU, Sunderesh S., et al. Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*. 2005, 43(2), 327–338. ISSN 0020-7543.
43. COMPAGNO, Lucio, et al. Designing an Optimal Shape Warehouse. In *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2012, Revised Selected Papers, Part II, September 24–26, 2012, Rhodes, Greece*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. pp. 248–255.

44. HASSAN, Mohsen M.D. A framework for the design of warehouse layout. *Facilities*. 2002, 20(13-14), 432–440. ISSN 0263-2772.
45. BERGLUND, P., and R. BATTA. Optimal placement of warehouse cross-aisles in a picker-to-part warehouse with class-based storage. *IIE Transactions*. 2012, 44(2), 107–120. ISSN 0740-817X.
46. HO, Y.-C., and Y.-Y. TSENG. A study on order-batching methods of order-picking in a distribution centre with two cross-aisles. *International Journal of Production Research*. 2006, 44(17), 3391–3417. ISSN 0020-7543.
47. HUERTAS, José Ignacio. Layout evaluation of large capacity warehouses. *Facilities*. 2007, 25(7–8), 259–270. ISSN 0263-2772.
48. TELEK, Péter. Equipment preselection for integrated design of materials handling systems. *Advanced Logistic Systems*. 2013, 7(2), 57–66.
49. ONUT, Semih, et al. Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, 44(7-8), 818–828. ISSN 0268-3768.
50. HASSAN, Mohsen M.D. A framework for selection of material handling equipment in manufacturing and logistics facilities. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2010, 21(2), 246–268. ISSN 1741-038X.
51. FONSECA, Daniel J., et al. A knowledge-based system for conveyor equipment selection. *Expert Systems with Applications*. 2004, 26(4), 615–623. ISSN 0957-4174.
52. DADZIE, Kofi Q., et al. Influence in the organizational buying center and logistics automation technology adoption. *Journal of Business & Industrial Marketing*. 1999, 14(5-6), 433–444. ISSN 0885-8624.
53. VARILA, Mikko, et al. Effects of Automation on Cost Accounting: A Case Study in Warehouse Logistics. In *Proceedings of 7th Conference on Manufacturing Accounting Research, May 30–June 1, 2005, Tampere, Finland*. 2005.
54. WANG, Qian., et al. A new-generation automated warehousing capability. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2010, 23(6), 565–573. ISSN 0951-192X.
55. MIN, Hokey. The applications of warehouse management systems: an exploratory study. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2006, 9(2), 111–126, ISSN: 1367-5567.
56. BERGER, S. M., and T. D. LUDWIG. Reducing Warehouse Employee Errors Using Voice-Assisted Technology That Provided Immediate Feedback. *Journal of Organizational Behavior Management*. 2007, 27(1), 1–31. ISSN 0160-8061.
57. VAN DEN BERG, Jeroen P. *Integral Warehouse Management*. Utrecht: Management Outlook Publications, 2007 .
58. HELO, P., and B. SZEKELY. Logistics information systems: An analysis of software solutions for supply chain co-ordination. *Industrial Management & Data Systems*. 2005, 105(1), 5–18. ISSN 0263-5577.
59. FABER, Nynke, et al. Linking warehouse complexity to warehouse planning and control structure: An exploratory study of the use of warehouse management information systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2002, 32(5), 381–395. ISSN 0960-0035.

60. ACCORSI, Riccardo, et al. A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*. 2014, 65(1), 175–186. ISSN 0166-3615.
61. KRAUTH, Elfriede, et al. Performance indicators in logistics service provision and warehouse management—a literature review and framework. In *Euroma International Conference. June 19–22, 2005, Budapesht, Hungary*. Budapest: Diamond Congress Ltd, 2005. pp. 1–10.
62. GUNASEKARAN, Angappa, et al. Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International journal of operations & production Management*. 2001, 21(1-2), 71–87. ISSN 0144-3577.
63. HWANG, H. S., and G. S. CHO. A performance evaluation model for order picking warehouse design. *Computers & Industrial Engineering*. 2006, 51(2), 335–342. ISSN 0360-8352.
64. TARN, J. Michael, et al. E-fulfillment: the strategy and operational requirements. *Logistics Information Management*. 2003, 16(5), 350–362. ISSN 0957-6053.
65. HWANG, H., et. al An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system. *International Journal of Production Research*. 2004, 42(18), 3873–3889. ISSN 0020-7543.
66. HENN, Sebastian. Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse. *Computers & Operations Research*. 2012, 39(11), 2549–2563. ISSN 0305-0548.
67. PARIKH, P. J., and R. D. MELLER. Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2008, 44(5), 696–719. ISSN 1366-5545.
68. „Interlake Mecalux“ oficialus tinklapis. [žiūrėta 2015-03-21]. Prieiga per internetą: <http://www.interlakemecalux.com/>
69. ROODBERGEN, K. J., and I. F. A. VIS. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*. 2009, 194(2), 343–362. ISSN 0377-2217.
70. „Dematic“ oficialus tinklapis. [žiūrėta 2015-04-05]. Prieiga per internetą: <http://www.dematic.com/>
71. CHANG, T.-S., et al. The innovative conveying device application for transferring articles between two-levels of a multi-story building. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, 28(1-2), 197–204. ISSN 0268-3768.
72. ISMAIL, Napsiah, et al. A Statistical Travel Time Model for Miniload Automated Storage and Retrieval Systems with Open-Rack Structure. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Artificial Intelligence, {ICAI} 2008, July 14–17, 2008, Las Vegas, Nevada, USA*. Las Vegas, Nevada: CSREA Press, 2008. pp. 715–721.
73. LI, L., and Y. A. BOZER. Retrieval strategies for multi-tier automated carousel conveyors with multiple robots. *Simulation*. 2010, 86(7), 395–404. ISSN 0037-5497.
74. HU, Ya-Hong, et al. Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(6), 1515–1544. ISSN 0305-0548.

75. EKREN, B. Y., and S. S. HERAGU, Performance comparison of two material handling systems: AVS/RS and CBAS/RS. *International Journal of Production Research*. 2012, 50(15), 4061–4074. ISSN 0020-7543.
76. ANDRIANSYAH, Ricky, et al. A process algebra based simulation model of a miniload-workstation order picking system. *Computers in Industry*. 2011, 62(3), 292–300. ISSN 0166-3615.
77. GÜLLER, M., and T. HEGMANN. Simulation-Based Performance Analysis of a Miniload Multishuttle Order Picking System. In *Procedia CIRP. Variety Management in Manufacturing Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing System. April 28–30, 2014, Windsor, Ontario, Canada*. Windsor, Ontario: Elsevier B.V., 2014. pp. 475–480 (vol. 17).
78. GAGLIARDI, Jean-Philippe, et al. Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. 2015, 1–11.
79. ANDRIANSYAH, R. Ricky, et. al. Automated Order-picking Workstation Handling Out-of-sequence Product Arrivals. In *SIMULTECH 2011 - Proceedings of 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, July 29–31, 2011, Noordwijkerhout, The Netherlands*. Noordwijkerhout: SciTePress, 2011. pp. 283–292.
80. LERHER, T., and I. PONTRC. The design and optimization of automated storage and retrieval systems. *Strojnicki Vestnik*. 2006, 52(5), 268–291.
81. POTRČ, Iztok, et al. Simulation model of multi-shuttle automated storage and retrieval systems. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, 157–158, 236–244. ISSN 0924-0136.
82. ELDEMIR, Fahrettin, et al. New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization. *International Journal of Production Research*. 2004, 42(22), 4767–4783. ISSN 0020-7543.
83. MALMBORG, Charles J. Design optimization models for storage and retrieval systems using rail guided vehicles. *Applied Mathematical Modelling*. 2003, 27(12), 929–941. ISSN 0307-904X.
84. CHUN PARK, Byung. Performance of automated storage/retrieval systems with non-square-in-time racks and two-class storage. *International Journal of Production Research*. 2006, 44(6), 1107–1123. ISSN 0020-7543.
85. LERHER, Tone, et al. Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, 70(1-4), 97–115. ISSN 0268-3768.
86. SARI, Zaki, et al. Impact of pickup/delivery stations and restoring conveyor locations on retrieval time models of flow-rack automated storage and retrieval systems. *Production Planning and Control*. 2007, 18(2), 105–116. ISSN 0953-7287.
87. GUO, S.-M., and T.-P. LIU. Simulation Evaluation of Single Shuttle and Twin Shuttle AS/RS. *IJEBM*. 2008, 6(2), 106–115.
88. LERHER, Tone, et al. Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. 2010, 48(11), 3151–3172. ISSN 0020-7543.

89. KULTUREL, Sadan, et al. Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems. *IIE transactions*. 1999, 31(8), 739–749. ISSN 0740-817X.
90. YIN, Y.-L., and H. RAU. Dynamic selection of sequencing rules for a class-based unit-load automated storage and retrieval system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, 29(11–12), 1259–1266. ISSN 0268-3768.
91. HSIEH, S., and K.-C. TSAI. A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2001, 17(9), 683–691. ISSN 0268-3768.
92. CHEN, Lu, et al. The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage. *International Journal of Production Research*. 2010, 48(4), 991–1011. ISSN 0020-7543.
93. REGATTIERI, A., et al. The impact of dwell point policy in an Automated Storage/Retrieval System. *International Journal of Production Research*. 2013, 51(14), 4336–4348. ISSN 0020-7543.
94. MELLER, R. D., and A. MUNGWATTANA. AS/RS dwell-point strategy selection at high system utilization: A simulation study to investigate the magnitude of the benefit. *International Journal of production research*. 2005, 43(24), 5217–5227. ISSN 0020-7543.
95. GAGLIARDI, Jean-Philippe, et al. On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. 2014, 52(4), 1090–1099. ISSN 0020-7543.
96. WON, J., and S. OLAFSSON. Joint order batching and order picking in warehouse operations. *International Journal of Production Research*. 2005, 43(7), 1427–1442. ISSN 0020-7543.
97. „Vanderlande“ oficialus tinklapis. [žiūrėta 2015-04-09]. Prieiga per internetą: <https://www.vanderlande.com/>
98. SARI, Zaki, et al. Travel-time models for flow-rack automated storage and retrieval systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, 25(9–10), 979–987. ISSN 0268-3768.
99. LERHER, Tone, et al. Travel time models for automated warehouses with aisle transferring storage and retrieval machine. *European Journal of Operational Research*. 2010, 205(3), 571–583. ISSN 0377-2217.
100. LERHER, Tone, et al. Analytical travel time models for multi aisle automated storage and retrieval systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(3–4), 340–356. ISSN 0268-3768.
101. CHANG, Ding-Tsair, et al. The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE transactions*. 1995, 27(1), 108–111. ISSN 0740-817X.
102. KUO, Po-Hsun, et al. Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies. *Applied Mathematical Modelling*. 2007, 31(10), 2332–2346. ISSN 0307-904X.

103. HERAGU, Sunderesh S., et al. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems. *International Journal of Production Research*. 2011, 49(22), 6833–6861. ISSN 0020-7543.
104. GAGLIARDI, Jean-Philippe, et al. Models for automated storage and retrieval systems: a literature review. *International Journal of Production Research*. 2012, 50(24), 7110–7125. ISSN 0020-7543.
105. VAN DEN BERG, J. P., and A. J. R. M. GADEMANN. Simulation study of an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*. 2000, 38(6), 1339–1356. ISSN 0020-7543.
106. RAU, H., and Y.-L. YIN. Dual commands dispatching of a class-based unit-load automated storage and retrieval system using multi-pass simulation with generic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007, 33(5–6), 530–539. ISSN 0268-3768.
107. VERMA, Rajesh, et al. A critical evaluation and comparison of four manufacturing simulation softwares. *Kathmandu university journal of science, Engineering and technology*. 2009, 5(1), 104–120. ISSN 1816-8752.
108. XUSONG, X., and X. HONGBIN. Research on AS/RS simulation modeling and evaluating based on flexsim software. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on, September 21–25, 2007, Shanghai, China*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007. pp. 4375–4378.
109. LEBARON, T., and C. JACOBSEN. The simulation power of Automod. In *Proceedings of the 39th conference on Winter simulation: 40 years! The best is yet to come, December 9–12, 2007, Washington, D.C., USA*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007. pp. 210–218.
110. WANG, S., and L. ZHAO. Optimization and Simulation of AS/RS Area Distribution Based on AutoMod. In *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, March 27–31, 2009, Wuhan, China*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009. pp. 1–4.
111. GAGLIARDI, Jean-Philippe, et al. A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014, 25(1), 193–207. ISSN 0956-5515.
112. EKREN, B. Y., and S. S. HERAGU. Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*. 2010, 48(21), 6257–6274. ISSN 0020-7543.
113. EKREN, Banu Y., et al. Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Computers & Industrial Engineering*. 2010, 58(1), 175–185. ISSN 0360-8352.
114. CARLO, H. J., and I. F. A. VIS. Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles. *International Journal of Production Economics*. 2012, 140(2), 844–853. ISSN 0925-5273.
115. TABACHNICK, Barbara. G., and Linda. S. FIDELL. *Using Multivariate Statistics*. New Jersey: Pearson Press, 2007.



116. SAS Institute Inc. *SAS/STAT 13.2 Users Guide*. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc., 2014.
117. ČEKANA VIČIUS, V., and G. MURAU SKAS. *Statistika ir jos taikymai. D.2*. Vilnius: TEV, 2004.
118. CHATTERJEE, S., and S. S. Jeffrey S. *Handbook of Regression Analysis*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
119. SAS 9.4 software. [žiūrėta 2015-03-30] Prieiga per internetą: <http://www.sas.com>
120. SPSS software. [žiūrėta 2015-04-30]. Prieiga per internetą: <http://www.spss.com>
121. STATA software. [žiūrėta 2015-04-30]. Prieiga per internetą: <http://www.stata.com> .
122. GOOD, P. I., and J. W. HARDIN. *Common Errors in Statistics (and How to Avoid Them)*. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley& Sons, Inc., 2009.
123. WASHINGTON, Simon P., Matthew G. KARLAFTIS, Fred L. MANNERING. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 2003.
124. „Autostadt” oficialus tinklapis. [žiūrėta 2015-04-20]. Prieiga per internetą: <http://www.autostadt.de/en/explore-the-autostadt/car-towers/>
125. MOCCIA, Luigi, et al. A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2006, 53(1), 45–59.

## MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

### Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose

1. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. The design and investigation of two storage/retrieval mechanisms of the cylindrical automated storage and retrieval system // Transport: research journal of Vilnius Gediminas Technical University and Lithuanian Academy of Sciences. Vilnius: Technika ; London : Taylor & Francis. ISSN 1648-4142. 2013, Vol. 28, no. 4, p. 352–360. DOI: 10.3846/16484142.2013.864700. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); COMPENDEX; ICONDA; SCOPUS; PaperChem; Mechanical and Transportation Engineering Abstracts; CSA Technology Research Database; CSA/ASCE Civil Engineering Abstracts; Aerospace & High Technology Database; Earthquake Engineering Abstracts; 0,500]
2. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Comparison of routing algorithms for storage and retrieval mechanism in cylindrical AS/RS // Transport: research journal of Vilnius Gediminas Technical University and Lithuanian Academy of Sciences. Vilnius: Technika; London: Taylor & Francis. ISSN 1648-4142 / eISSN 1648-3480. 2015. [0,500]  
Prieiga per DOI: <http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2014.995130>

### Kituose Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose (Proceedings ir kt.)

1. **Janilionis, Vytautas;** Janilionis, Vytautas. Regression models for predicting loads transfer time in automatic warehouse palletizing system // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2009: proceedings of the 5th international conference, June 04–05, 2009, Panevėžys, Lithuania / Kaunas University of Technology Panevezys Institute. Panevezys Technology and Science Park, Warsaw Motor Transport Institute, Tallin University of Technology, Riga Technical University. Kaunas : Technologija, 2009. ISBN 9789955257059. p. 142–148. [Conference Proceedings Citation Index; 0,500]
2. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Investigation of split-platform automated storage/retrieval system performance // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2010: proceedings of the 5th international conference, June 03–04, 2010, Panevėžys, Lithuania / Kaunas University of Technology Panevezys Institute. Panevezys Technology and Science Park, Warsaw Motor Transport Institute, Tallin University of Technology, Riga Technical University. Kaunas : Technologija, 2010. ISBN 9789955258360. p. 142–148. [Conference Proceedings Citation Index; 0,500]

3. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Comparison of models for analysis of split-platform automated storage and retrieval systems // *Transport Means - 2010* : proceedings of the 14th international conference, October 21–22, 2010, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, IFTOMM National Committee of Lithuania, SAE Lithuanian Branch, The Division of Technical Sciences of Lithuanian Academy of Sciences, Klaipėda University, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-296X. 2010, p. 183–187. [Conference Proceedings Citation Index; 0,500]
4. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Two storage strategies analysis of new cylindrical automated storage/retrieval system // *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2011*: proceedings of the 6th international conference, May 05–06, 2011, Panevėžys, Lithuania / Kaunas University of Technology Panevezys Institute. Panevezys Technology and Science Park, Intelligent Transport Systems, Poland, Tallin University of Technology, Riga Technical University. Kaunas : Technologija, 2011. ISBN 9786090200544. p. 94–98. [Conference Proceedings Citation Index; 0,500]
5. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Impact of input/output position locations to the performance of C-AS/RS with autonomous load handling devices // *Intelligent technologies in logistics and mechatronics systems, ITELMS'2012* : proceedings of the 7th international conference, May 03-04, 2012, Panevėžys, Lithuania / Kaunas University of Technology Panevezys Institute, Panevezys Technology and Science Park, Intelligent Transport Systems, Poland, Tallin University of Technology, Riga Technical University. Kaunas : Technologija, 2012. ISBN 9786090205716. p. 86–90. [Conference Proceedings Citation Index; 0,500]
6. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Performance comparison of cylindrical AS/RS with single and multi load handling devices // *Transport Problems : an International Scientific Journal = Problemy transportu*. Gliwice : Silesian University of Technology. ISSN 1896-0596. 2013, Vol. 8, iss. 4, p. 93–102. [Academic Search Complete; 0,500]

#### **Konferencijų pranešimų medžiagoje**

1. **Janilionis, Vytautas.** Simulation model and analysis of automatic warehouse palletizing system // *Matematika ir matematinis modeliavimas 2009* / Kauno Technologijos Universitetas. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-2757. 2009, T. 5, p. 49–53. [1,000]
2. **Janilionis, Vytautas;** Bazaras, Žilvinas. Performance analysis of the cylindrical AS/RS with multi load handling devices // *Transport Problems*, 27–29 June, 2012, Katowice-Ślemień, Poland : IV international conference proceedings. Katowice : Silesian University of Technology, 2012. (*Transport Problems : International Scientific Journal*, ISSN 1896-0596). ISBN 9788393523207. p. 231–237. [0,500]

## PRIEDAI

### 1 priedas. 4.1.1 skyriaus papildomi rezultatai

**P1.1 lentelė.** Maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  imties vidurkiai, standartiniai nuokrypiai pagal SRM greitaveiką  $G$ , SRM tipą, keltuvų skaičių  $N_{kelt}$ , krovinių paėmimo / padėjimo trukmę  $\tau_{pp}$  ir krovinių atvežimo / išvežimo aukštų kombinaciją  $L_{ai}$

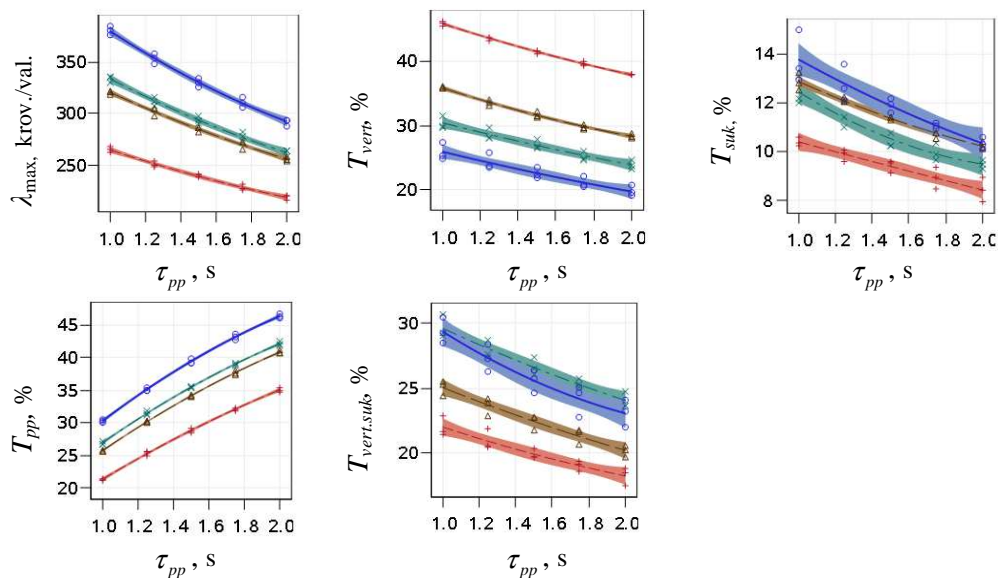
| $G$   | $SRM$ | $N_{kelt}$ | $\tau_{pp}$ | $L_{ai}$ | $\lambda_{\max}$<br>vidurkis | $\lambda_{\max}$<br>standartinis<br>nuokrypis |        |      |
|-------|-------|------------|-------------|----------|------------------------------|---|--------|------|
| $G_1$ | 1     | 1          | 1           | 0102     | 225,67                       | 2,08  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 156,00                       | 0,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 202,33                       | 2,08  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 254,33                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            | 2           | 0102     | 181,33                       | 2,08  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 133,67                       | 0,58  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 165,67                       | 1,15  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 197,67                       | 2,08  |        |      |
|       |       | 2          | 1           | 0102     | 334,00                       | 3,46  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 265,33                       | 3,06  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 320,67                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 380,00                       | 4,00  |        |      |
|       |       |            | 2           | 0102     | 262,00                       | 3,46  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 218,67                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 256,00                       | 2,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 292,00                       | 3,46  |        |      |
|       |       | 4          | 1           | 0102     | 500,00                       | 0,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 412,00                       | 4,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 472,00                       | 8,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 541,33                       | 6,11  |        |      |
|       | 2     |            | 0102        | 385,33   | 2,31                         |   |        |      |
|       |       |            | 0115        | 328,00   | 4,00                         |   |        |      |
|       |       |            | 0411        | 366,67   | 2,31                         |   |        |      |
|       |       |            | 0708        | 408,00   | 4,00                         |   |        |      |
|       | 2     | 2          | 1           | 0102     | 358,67                       | 4,16  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 264,00                       | 4,00  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 343,33                       | 4,16  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 426,67                       | 3,06  |        |      |
|       |       |            |             | 2        | 0102                         | 286,33  | 2,52   |      |
|       |       |            |             |          | 0115                         | 224,00  | 2,00   |      |
|       |       |            | 0411        |          | 278,67                       | 3,06  |        |      |
|       |       |            | 0708        |          | 330,00                       | 3,46  |        |      |
|       |       |            | 4           |          | 1                            | 0102  | 597,67 | 2,08 |
|       |       |            |             |          |                              | 0115  | 464,67 | 1,15 |
|       |       |            |             | 0411     |                              | 588,67  | 4,16   |      |
|       |       |            |             | 0708     |                              | 714,67  | 8,62   |      |
|       |       | 2          |             | 0102     | 478,67                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            |             | 0115     | 389,33                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            |             | 0411     | 470,67                       | 2,31  |        |      |
|       |       |            |             | 0708     | 552,00                       | 4,00  |        |      |

**P1.1 lentelė (tęsinys).**

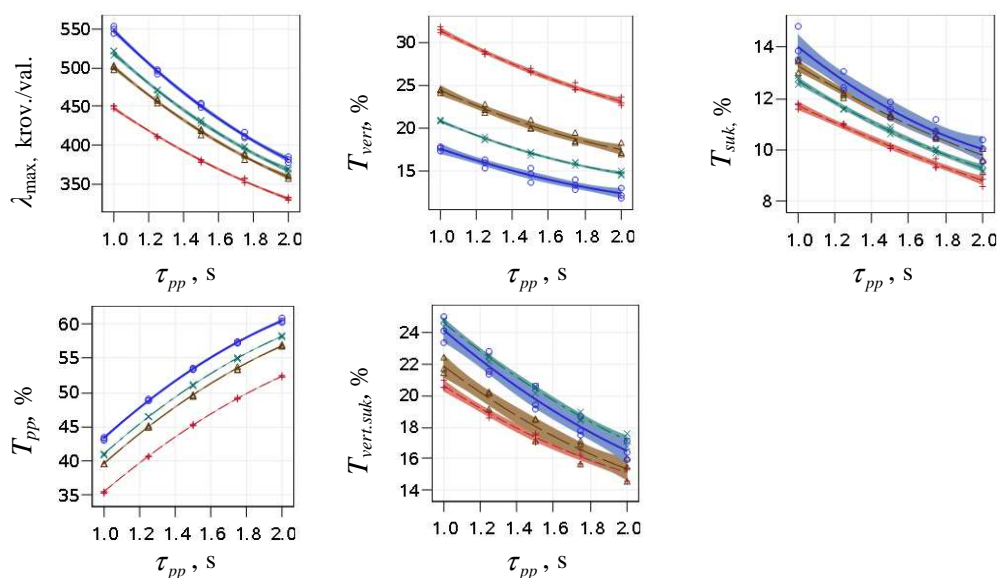
| $G$   | $SRM$ | $N_{kelt}$ | $\tau_{pp}$ | $L_{ai}$ | $\lambda_{max}$<br>vidurkis | $\lambda_{max}$<br>standartinis<br>nuokrypis |       |
|-------|-------|------------|-------------|----------|-----------------------------|--|-------|
| $G_2$ | 1     | 1          | 1           | 0102     | 296,00                      | 1,00   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 229,67                      | 1,15   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 273,00                      | 0,00   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 314,00                      | 2,00   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 223,67                      | 1,15   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 183,33                      | 0,58   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 209,67                      | 1,15   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 233,33                      | 0,58   |       |
|       |       | 2          | 1           | 0102     | 448,00                      | 2,00   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 373,33                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 430,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 482,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 328,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 288,00                      | 3,46   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 319,33                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 348,00                      | 4,00   |       |
|       |       | 4          | 1           | 0102     | 654,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 564,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 630,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 681,33                      | 2,31   |       |
|       | 2     |            | 0102        | 466,67   | 2,31                        |  |       |
|       |       |            | 0115        | 420,00   | 0,00                        |  |       |
|       |       |            | 0411        | 453,33   | 2,31                        |  |       |
|       |       |            | 0708        | 484,00   | 0,00                        |  |       |
|       | 2     | 2          | 1           | 0102     | 487,00                      | 3,61   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 391,67                      | 3,51   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 471,33                      | 4,16   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 542,67                      | 5,03   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 366,67                      | 4,16   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 308,67                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 356,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 394,67                      | 3,06   |       |
|       |       |            | 4           | 1        | 0102                        | 806,00                                       | 3,46  |
|       |       |            |             |          | 0115                        | 677,33                                       | 2,52  |
|       |       |            |             |          | 0411                        | 798,67                                       | 6,11  |
|       |       |            |             |          | 0708                        | 914,67                                       | 12,86 |
|       |       | 2          |             | 0102     | 607,33                      | 3,51   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 528,33                      | 4,04   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 602,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 666,67                      | 8,33   |       |

**P1.1 lentelė (tęsinys).**

| $G$   | $SRM$ | $N_{kelt}$ | $\tau_{pp}$ | $L_{ai}$ | $\lambda_{max}$<br>vidurkis | $\lambda_{max}$<br>standartinis<br>nuokrypis |       |
|-------|-------|------------|-------------|----------|-----------------------------|--|-------|
| $G_3$ | 1     | 1          | 1           | 0102     | 342,00                      | 0,00   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 279,33                      | 0,58   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 319,67                      | 1,15   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 357,00                      | 2,00   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 249,33                      | 0,58   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 213,67                      | 1,15   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 236,67                      | 0,58   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 257,00                      | 2,00   |       |
|       |       | 2          | 1           | 0102     | 520,00                      | 3,46   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 448,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 501,33                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 549,33                      | 5,03   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 367,33                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 330,00                      | 2,00   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 358,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 381,33                      | 3,06   |       |
|       |       | 4          | 1           | 0102     | 746,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 664,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 721,33                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 768,00                      | 4,00   |       |
|       | 2     |            | 0102        | 513,33   | 2,31                        |  |       |
|       |       |            | 0115        | 473,33   | 2,31                        |  |       |
|       |       |            | 0411        | 501,33   | 2,31                        |  |       |
|       |       |            | 0708        | 525,33   | 2,31                        |  |       |
|       | 2     | 2          | 1           | 0102     | 570,67                      | 5,03   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 479,00                      | 3,61   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 552,67                      | 5,77   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 615,33                      | 6,11   |       |
|       |       |            | 2           | 0102     | 412,00                      | 2,00   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 362,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 401,33                      | 3,06   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 434,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            | 4           | 1        | 0102                        | 944,67                                       | 5,03  |
|       |       |            |             |          | 0115                        | 820,00                                       | 5,29  |
|       |       |            |             |          | 0411                        | 933,33                                       | 8,33  |
|       |       |            |             |          | 0708                        | 1042,67                                      | 12,86 |
|       |       | 2          |             | 0102     | 681,00                      | 2,65   |       |
|       |       |            |             | 0115     | 614,67                      | 2,31   |       |
|       |       |            |             | 0411     | 676,00                      | 4,00   |       |
|       |       |            |             | 0708     | 729,33                      | 6,11   |       |

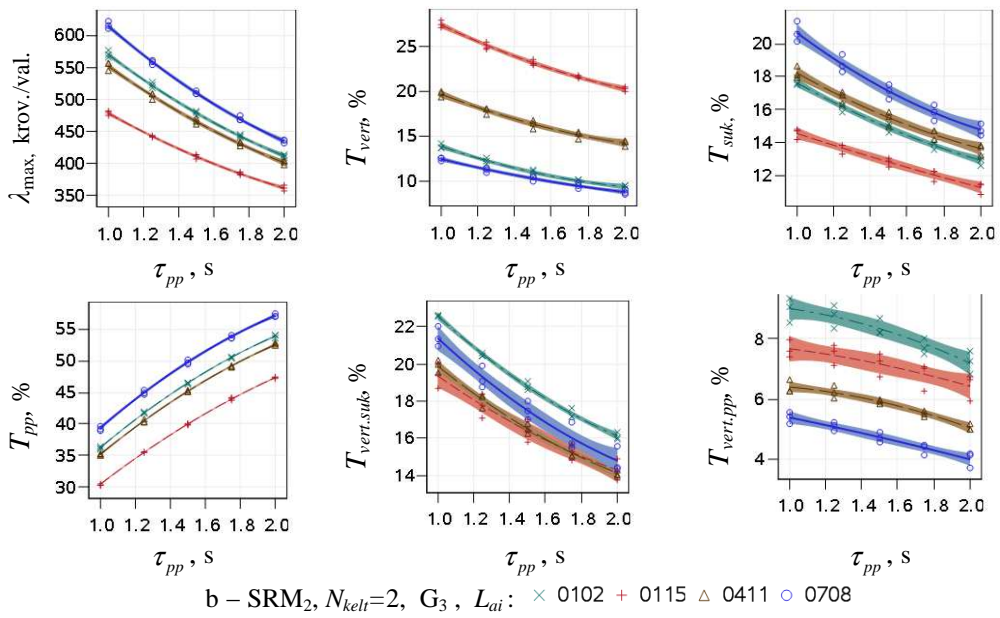
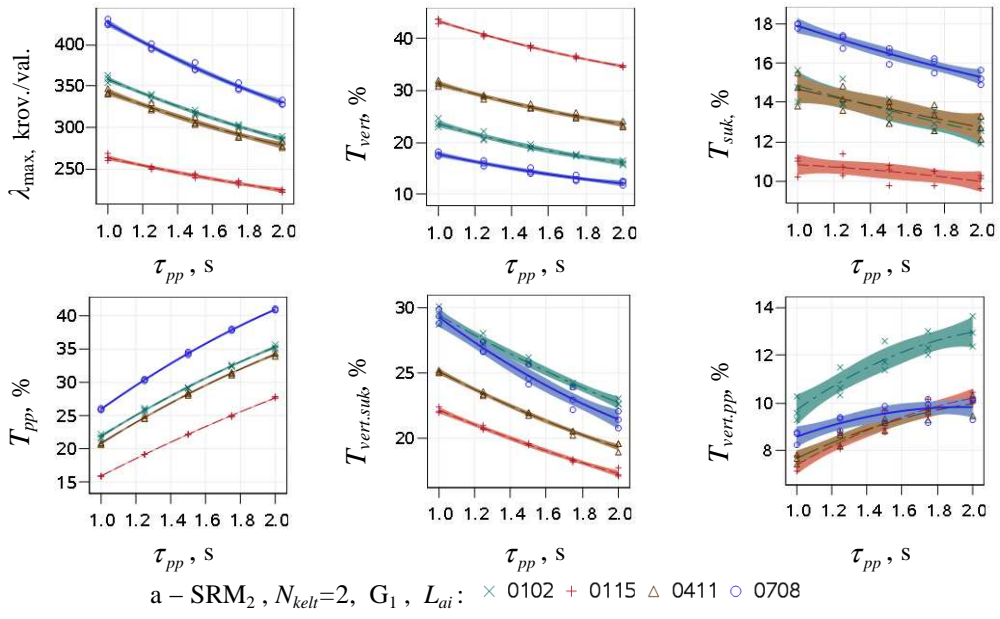


a – SRM<sub>1</sub>,  $N_{kelt}=2$ ,  $G_1$ ,  $L_{ai}$ : × 0102 + 0115 △ 0411 ○ 0708



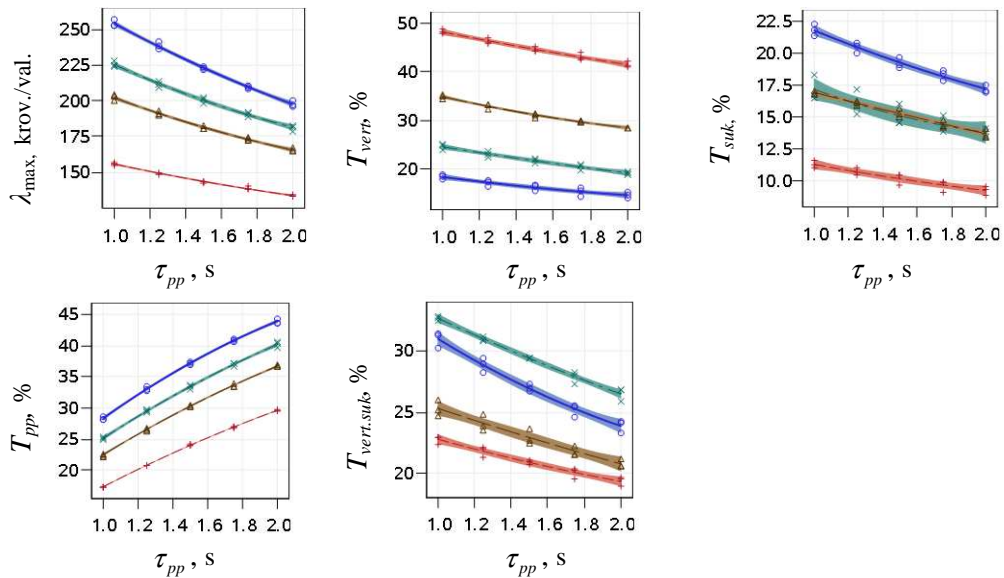
b – SRM<sub>1</sub>,  $N_{kelt}=2$ ,  $G_3$ ,  $L_{ai}$ : × 0102 + 0115 △ 0411 ○ 0708

**P1.1 pav.** SRM<sub>1</sub> su 2 keltuiais maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  ir buvimo kiekviename būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinų paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  (regresijos kreivės su 95 % vidurkio pasiklivimo juosta) pagal krovinų atvežimo/išvežimo aukštų išdėstymo kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitavieką (a –  $G_1$ ; b –  $G_3$ ).

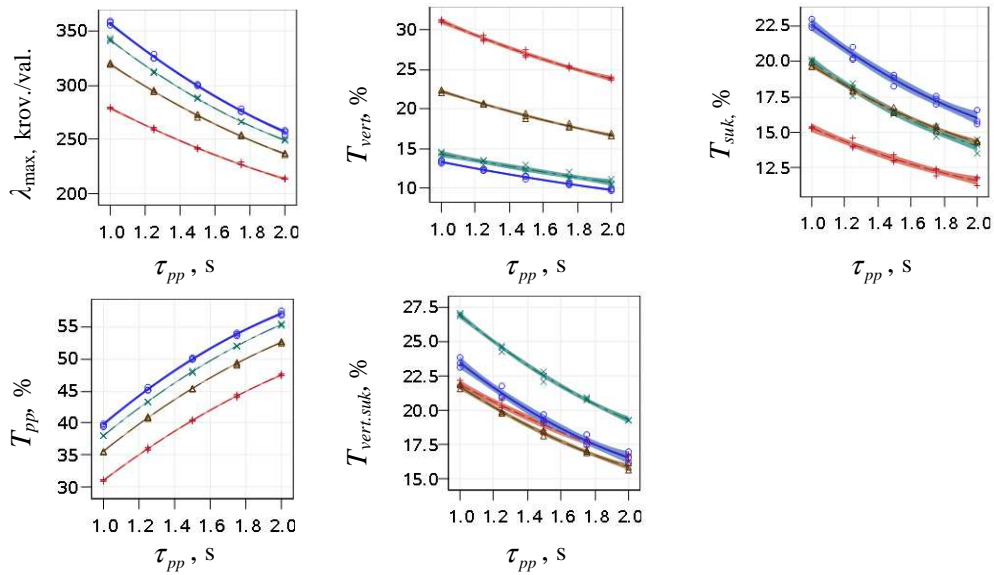


**P1.2 pav.** SRM<sub>2</sub> su 2 keltuvas maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{\max}$  ir buvimo kiekvienoje būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinų paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  (regresijos kreivės su 95 % vidurkio pasiklivimo juosta) pagal krovinų atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitavieką (a – G<sub>1</sub>; b – G<sub>3</sub>).





a – SRM<sub>1</sub>,  $N_{kelt}=1$ ,  $G_1$ ,  $L_{ai}$ : × 0102 + 0115 △ 0411 ○ 0708

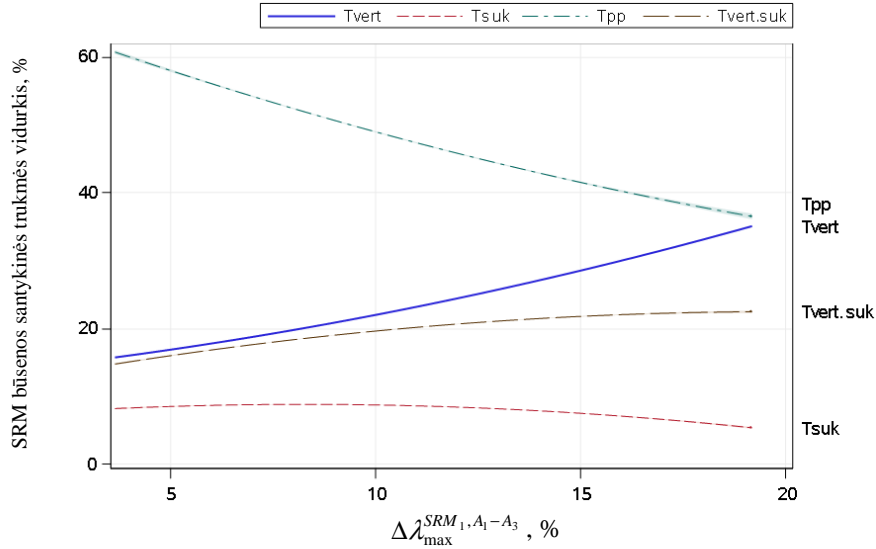


b – SRM<sub>1</sub>,  $N_{kelt}=1$ ,  $G_3$ ,  $L_{ai}$ : × 0102 + 0115 △ 0411 ○ 0708

**P1.3 pav.** SRM<sub>1</sub> su 1 keltuvas maksimalaus pralaidumo  $\lambda_{max}$  ir buvimo kiekvienoje būsenoje santykinų trukmių priklausomybės nuo krovinų paėmimo / padėjimo trukmės  $\tau_{pp}$  (regresijos kreivės su 95 % vidurkio pasiklovimo juosta) pagal krovinų atvežimo / išvežimo aukštų išdėstymo kombinaciją  $L_{ai}$  ir SRM greitavieką (a –  $G_1$ ; b –  $G_3$ )

**2 priedas. 4.2 skyriaus papildomi rezultatai**

SRM<sub>1</sub> mažiausias 3,7 % santykinis skirtumas  $\Delta\lambda_{\max}^{SRM_1, A_1-A_3}$  gautas, kai  $T_{vert}=17,5\%$ ,  $T_{pp}=57,7\%$ ,  $T_{suk}=8,8\%$  ir  $T_{vert-suk}=15,4\%$ , o SRM<sub>1</sub> judėjimo parametrai yra  $v_{vert}=3, a_{vert}=7, v_{suk}=56,25, a_{suk}=78,75$  ir  $\tau_{pp}=1,75$ . Šiuo atveju „siaura vieta“ yra krovinių paėmimo / padėjimo veiksmai (jų trukmė sudaro 57,7 % viso SRM darbo laiko), optimalus valdymo algoritmas  $A_1$  negali visiškai „atsiskleisti“, todėl santykinis skirtumas yra mažas.



**P2.1 pav.** SRM būsenų santykinų trukmių vidurkių priklausomybės nuo  $\Delta\lambda_{\max}^{SRM_1, A_1-A_3}$  – maksimalaus pralaidumo santykinio skirtumo tarp SRM<sub>1</sub> valdomų algoritmais  $A_1$  ir  $A_3$ , (n=29400)

Didžiausias 19,2 % santykinis skirtumas  $\Delta\lambda_{\max}^{SRM_1, A_1-A_3}$  gautas, kai  $T_{vert}=34,9\%$ ,  $T_{pp}=35,8\%$ ,  $T_{suk}=6,6\%$ ,  $T_{vert-suk}=22,1\%$ , ( $T_{prast}=0,6\%$ ), o SRM judėjimo parametrai yra  $v_{vert}=1, a_{vert}=6, v_{suk}=45, a_{suk}=123,75$  ir  $\tau_{pp}=1$ . Lyginant su mažiausio skirtumo atveju, daugiausiai pasikeitė  $T_{vert}$  vidurkis nuo 17,5 % iki 34,9 % (padidėjo 17,4 %) ir  $T_{pp}$  vidurkis sumažėjo nuo 57,7 % iki 35,8 %, (sumažėjo 21,9 %), t. y. visų SRM būsenų trukmės pasiskirstė tolygiau, optimalus valdymo algoritmas  $A_1$  geriau panaudojo savo galimybes optimizuojant krovinių transportavimo maršrutą, todėl santykinis skirtumas padidėja daugiau kaip 5 kartus. Nustatyta, kad sparčiai mažėjant krovinių paėmimo / padėjimo būsenos santykinės

trukmės  $T_{pp}$  vidurkiui ir didėjant  $T_{vert}$  vidurkiui bei labai mažai keičiantis  $T_{suk}$ , santykinio skirtumas  $\Delta \mathcal{L}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3}$  padidėja nuo 3,7 % iki 19,2 %.

Siekiant iširti, kaip atskiri judėjimo parametrai veikia skirtumą, buvo sudarytas regresijos modelis, apibūdinantis santykinio skirtumo vidurkio  $\Delta \hat{\mathcal{L}}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3}$  priklausomybę nuo SRM judėjimo parametrų

$$\Delta \hat{\mathcal{L}}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3} = 12,21 - 6,6256 \cdot \ln(v_{vert}) - 0,8813 \cdot \ln(v_{suk}) - 0,1841 \cdot \ln(a_{vert}) + 1,1594 \cdot \ln(a_{suk}) - 4,5813 \cdot \ln(\tau_{pp})$$

Šio modelio koreguotas determinacijos koeficientas yra labai geras  $R_{kor}^2 = 0,84$ ,  $S_e = 1,12$ ,  $C_p = 6$ , pagal  $t$  kriterijų visi regresoriai yra statistiškai reikšmingi, duomenims būdingas nedidelis heteroskedastiškumas ir nedidelis normalumo prielaidos pažeidimas, lygties koeficientų ženklai atitinka koreliacijas, visi VIF < 1, esminių išskirčių nėra, visos likusios tiesinės regresijos prielaidos yra patenkinamos, multikolinearumo nėra.

Regresijos lygties koeficientai rodo, kad  $\Delta \hat{\mathcal{L}}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3}$  mažėja, didinant SRM judėjimo parametrų  $v_{vert}$ ,  $a_{vert}$ ,  $v_{suk}$ ,  $\tau_{pp}$  vertes, ir didėja, didinant sukimosi pagreitį  $a_{suk}$ . Pagal regresijos lygtį galime kiekybiškai įvertinti SRM judėjimo parametrų įtaką santykinio skirtumo vidurkiui  $\Delta \hat{\mathcal{L}}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3}$ . Pavyzdžiui, jeigu 1 % padidinsime  $v_{vert}$ , o kitus parametrus paliksime nepakitusius, tai  $\Delta \hat{\mathcal{L}}_{\max}^{SRM_1, A_1 - A_3}$  sumažės 0,049 %, analogiškai padidinus 1 %  $\tau_{pp}$  skirtumas vidutiniškai sumažės 0,034 %.

**3 priedas. C-AS/RS integravimo parametrai**

| C-AS/RS parametrai |         |             |                 |                                 | Integruotos sistemos AS/RS stelažų eilių skaičius $N_{ASRS}^{USS_2}$ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|---------|-------------|-----------------|---------------------------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $G_i$              | $SRM_j$ | $\tau_{pp}$ | $\lambda_{max}$ | $\eta$ , kai $U_{CASRS} = 90\%$ | Stotelių skaičius su C-AS/RS, $N_{sk}^{USS_2}$                       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         |             |                 |                                 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |    |    |    |    |
| $G_1$              | $SRM_1$ | 1           | 768             | 0,88                            | 6  | 13 | 20 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 689             | 0,88                            | 6  | 12 | 18 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 625             | 0,89                            | 5  | 11 | 16 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,75        | 568             | 0,89                            | 5  | 10 | 15 |    |    |    | 20 |    |    |    |
|                    |         | 2           | 525             | 0,885                           | 4  | 9  | 13 |    |    |    | 18 |    |    |    |
|                    | $SRM_2$ | 1           | 1043            | 0,895                           |  | 18 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 940             | 0,895                           | 8  | 16 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 860             | 0,885                           | 7  | 15 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,75        | 788             | 0,885                           | 6  | 13 |    |    |    |    |    |    | 20 |    |
|                    |         | 2           | 729             | 0,88                            | 6  | 12 |    |    |    |    |    |    | 19 |    |
| $G_2$              | $SRM_1$ | 1           | 681             | 0,89                            | 6  | 12 |    | 18 |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 617             | 0,89                            | 5  | 10 |    | 16 |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 565             | 0,89                            | 5  | 10 |    | 15 |    |    |    |    |    | 20 |
|                    |         | 1,75        | 520             | 0,89                            | 4  | 9  |    | 13 |    |    |    |    |    | 18 |
|                    |         | 2           | 484             | 0,84                            | 4  | 8  |    | 12 |    |    |    |    |    | 16 |
|                    | $SRM_2$ | 1           | 915             | 0,88                            | 8  | 16 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 836             | 0,88                            | 7  | 14 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 769             | 0,88                            | 6  | 13 |    |    |    |    |    | 20 |    |    |
|                    |         | 1,75        | 714             | 0,88                            | 6  | 12 |    |    |    |    |    | 18 |    |    |
|                    |         | 2           | 667             | 0,88                            | 5  | 11 |    |    |    |    |    | 17 |    |    |
| $G_3$              | $SRM_1$ | 1           | 541             | 0,89                            | 4  | 9  |    |    | 14 | 19 |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 499             | 0,86                            | 4  | 8  |    |    | 12 | 17 |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 464             | 0,83                            | 3  | 7  |    |    | 11 | 15 |    |    |    | 19 |
|                    |         | 1,75        | 435             | 0,82                            | 3  | 7  |    |    | 10 | 14 |    |    |    | 17 |
|                    |         | 2           | 408             | 0,81                            | 3  | 6  |    |    | 9  | 13 |    |    |    | 16 |
|                    | $SRM_2$ | 1           | 715             | 0,885                           | 6  | 12 | 18 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,25        | 669             | 0,885                           | 5  | 11 | 17 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,5         | 624             | 0,885                           | 5  | 11 | 16 |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |         | 1,75        | 587             | 0,885                           | 5  | 10 | 15 |    |    |    | 20 |    |    |    |
|                    |         | 2           | 552             | 0,885                           | 4  | 9  | 14 |    |    |    | 19 |    |    |    |

4 priedas. 4.3 skyriaus papildomi rezultatai

**P4.1 lentelė.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai  $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \in \{11, \dots, 15\}$

| C  | $N_{ASRS}^{USS_2}$ | $N_{sk}^{USS_2}$ | SRM | G     | $\tau_{pp}$ | $\hat{\lambda}_{USS_2}$ | $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}, \%$ |       |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|----|--------------------|------------------|-----|-------|-------------|-------------------------|--|-------|-------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|--|
|    |                    |                  |     |       |             |                         | $N_{sk}^{USS_1}$                         |       |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|    |                    |                  |     |       |             |                         | 2  | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |  |  |  |  |  |
| 49 | 11                 | 2                | 1   | $G_3$ | 1,5         | 1050                    | 59,9                                     | 25,3  |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 50 | 11                 | 3                | 1   | $G_1$ | 1,5         | 1073                    |  | 28,0  | 11,8  |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 48 | 11                 | 2                | 2   | $G_2$ | 2           | 1053                    | 60,3                                     | 25,7  |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 46 | 11                 | 2                | 2   | $G_1$ | 1,25        | 1050                    | 59,9                                     | 25,3  |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 47 | 11                 | 2                | 2   | $G_1$ | 1,5         | 1047                    | 59,5                                     | 24,9  |       |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 55 | 12                 | 2                | 1   | $G_3$ | 1,25        | 1151                    | 85,4                                     | 43,4  | 22,2  | 10,0 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 57 | 12                 | 2                | 1   | $G_2$ | 1           | 1146                    | 84,6                                     | 42,8  | 21,7  |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 53 | 12                 | 3                | 1   | $G_2$ | 2           | 1164                    |  | 45,01 | 23,6  | 11,3 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 51 | 12                 | 3                | 1   | $G_1$ | 1,25        | 1170                    |  | 45,8  | 24,2  | 11,9 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 56 | 12                 | 2                | 2   | $G_3$ | 2           | 1144                    | 84,2                                     | 42,5  | 21,45 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 52 | 12                 | 2                | 2   | $G_2$ | 1,75        | 1145                    | 84,3                                     | 42,6  | 21,6  |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 54 | 12                 | 2                | 2   | $G_1$ | 1           | 1139                    | 83,5                                     | 41,9  | 21,0  |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 59 | 13                 | 2                | 1   | $G_3$ | 1           | 1233                    | 109,7                                    | 59,7  | 34,4  | 19,2 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 62 | 13                 | 3                | 1   | $G_3$ | 2           | 1265                    |  | 63,8  | 37,8  | 22,2 | 12,7 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 61 | 13                 | 3                | 1   | $G_2$ | 1,75        | 1256                    |  | 62,78 | 36,9  | 21,4 | 11,9 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 63 | 13                 | 4                | 1   | $G_1$ | 2           | 1275                    |  |       | 38,9  | 23,2 | 13,5 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 58 | 13                 | 2                | 2   | $G_3$ | 1,75        | 1242                    | 111,2                                    | 60,9  | 35,3  | 20,0 | 10,6 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 60 | 13                 | 2                | 2   | $G_2$ | 1,5         | 1237                    | 110,3                                    | 60,2  | 34,7  | 19,5 | 10,1 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 67 | 14                 | 3                | 1   | $G_1$ | 1           | 1356                    |  | 85,1  | 53,7  | 35,3 | 22,4 | 14,3 |      |      |  |  |  |  |  |
| 66 | 14                 | 4                | 1   | $G_1$ | 1,75        | 1366                    |  |       | 54,7  | 36,3 | 23,2 | 15,1 | 10,5 |      |  |  |  |  |  |
| 65 | 14                 | 2                | 2   | $G_2$ | 1,25        | 1320                    | 137,7                                    | 80,2  | 49,6  | 31,7 | 19,1 | 11,3 |      |      |  |  |  |  |  |
| 64 | 14                 | 3                | 2   | $G_1$ | 2           | 1347                    |  | 83,8  | 52,6  | 34,4 | 21,5 | 13,5 |      |      |  |  |  |  |  |
| 71 | 15                 | 3                | 1   | $G_3$ | 1,75        | 1440                    |  | 105,5 | 69,2  | 46,8 | 33,2 | 23,1 | 15,6 | 10,4 |  |  |  |  |  |
| 69 | 15                 | 3                | 1   | $G_2$ | 1,5         | 1434                    |  | 104,6 | 68,5  | 46,2 | 32,6 | 22,6 | 15,2 |      |  |  |  |  |  |
| 68 | 15                 | 4                | 1   | $G_1$ | 1,5         | 1465                    |  |       | 72,1  | 49,2 | 35,4 | 25,2 | 17,6 | 12,2 |  |  |  |  |  |
| 72 | 15                 | 2                | 2   | $G_3$ | 1,5         | 1404                    | 166,2                                    | 100,4 | 65,0  | 43,1 | 29,4 | 20,1 | 12,2 |      |  |  |  |  |  |
| 70 | 15                 | 3                | 2   | $G_1$ | 1,75        | 1436                    |  | 104,8 | 68,2  | 46,3 | 32,8 | 22,7 | 15,3 | 10,0 |  |  |  |  |  |

**P4.2 lentelė.** Pralaidumo santykinio skirtumo tarp  $USS_2$  ir  $USS_1$  vidurkiai

$\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}$  pagal skirtingas sistemos konfigūracijas, kai  $N_{ASRS}^{USS_2} \in \{16, \dots, 20\}$

| C   | $N_{ASRS}^{USS_2}$ | $N_{sk}^{USS_2}$ | SRM | G     | $\tau_{pp}$ | $\hat{\lambda}_{USS_2}$ | $\Delta \hat{\lambda}^{USS_2-USS_1}, \%$ |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|-----|--------------------|------------------|-----|-------|-------------|-------------------------|--|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|--|
|     |                    |                  |     |       |             |                         | $N_{sk}^{USS_1}$                         |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
|     |                    |                  |     |       |             |                         | 2  | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   |  |  |  |  |  |
| 74  | 16                 | 3                | 1   | $G_3$ | 1,5         | 1530                    |  | 127,9 | 86,9  | 62,8  | 45,7  | 33,4 | 24,2 | 17,5 | 12,8 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 79  | 16                 | 3                | 1   | $G_2$ | 1,25        | 1535                    |  | 128,7 | 87,5  | 63,3  | 46,2  | 33,8 | 24,6 | 17,8 | 13,1 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 78  | 16                 | 4                | 1   | $G_2$ | 2           | 1553                    |  |       | 89,8  | 65,2  | 47,9  | 35,4 | 26,1 | 19,2 | 14,5 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 75  | 16                 | 5                | 1   | $G_1$ | 2           | 1568                    |  |       |       | 66,8  | 49,4  | 36,7 | 27,3 | 20,4 | 15,6 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 77  | 16                 | 2                | 2   | $G_3$ | 1,25        | 1493                    | 201,5                                    | 122,5 | 82,4  | 58,6  | 42,2  | 30,2 | 21,2 | 14,6 | 10,0 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 76  | 16                 | 2                | 2   | $G_2$ | 1           | 1493                    | 201,6                                    | 122,5 | 82,5  | 58,9  | 42,3  | 30,2 | 21,2 | 14,7 | 10,1 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 73  | 16                 | 3                | 2   | $G_1$ | 1,5         | 1527                    |  | 127,6 | 86,6  | 62,5  | 45,5  | 33,2 | 23,9 | 17,3 | 12,6 |      |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 81  | 17                 | 4                | 1   | $G_1$ | 1,25        | 1638                    |  |       | 108,4 | 79,9  | 60,7  | 46,2 | 35,9 | 27,7 | 22,2 | 12,4 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 83  | 17                 | 5                | 1   | $G_1$ | 1,75        | 1660                    |  |       |       | 82,4  | 62,9  | 48,2 | 37,8 | 29,4 | 23,8 | 13,9 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 80  | 17                 | 3                | 2   | $G_2$ | 2           | 1618                    |  | 152,2 | 105,9 | 77,8  | 58,8  | 44,5 | 34,3 | 26,2 | 20,7 | 11,1 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 82  | 17                 | 3                | 2   | $G_1$ | 1,25        | 1620                    |  | 152,4 | 106,0 | 77,9  | 58,9  | 44,6 | 34,5 | 26,3 | 20,8 | 11,2 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 87  | 18                 | 3                | 1   | $G_3$ | 1,25        | 1718                    |  | 179,6 | 128,6 | 96,5  | 73,6  | 59,1 | 47,3 | 37,2 | 29,9 | 18,3 | 10,6 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 88  | 18                 | 4                | 1   | $G_3$ | 2           | 1724                    |  |       | 129,4 | 97,2  | 74,2  | 59,6 | 47,7 | 37,7 | 30,4 | 18,7 | 10,9 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 84  | 18                 | 3                | 1   | $G_2$ | 1           | 1707                    |  | 177,8 | 127,1 | 95,3  | 72,5  | 58,1 | 46,3 | 36,4 | 29,1 | 17,6 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 85  | 18                 | 4                | 1   | $G_2$ | 1,75        | 1729                    |  |       | 130,1 | 97,8  | 74,7  | 60,2 | 48,2 | 38,2 | 30,9 | 19,1 | 11,4 |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 90  | 18                 | 2                | 2   | $G_3$ | 1           | 1663                    | 269,2                                    | 170,6 | 121,3 | 90,2  | 68,1  | 54,0 | 42,5 | 32,9 | 25,8 | 14,5 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 86  | 18                 | 3                | 2   | $G_2$ | 1,75        | 1706                    |  | 177,7 | 127,0 | 95,2  | 72,4  | 58,0 | 46,2 | 36,3 | 29,1 | 17,5 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 89  | 18                 | 3                | 2   | $G_1$ | 1           | 1705                    |  | 177,5 | 126,9 | 95,0  | 72,3  | 57,9 | 46,1 | 36,2 | 29,0 | 17,4 |      |      |      |      |  |  |  |  |  |
| 95  | 19                 | 4                | 1   | $G_1$ | 1           | 1829                    |  |       | 152,4 | 116,4 | 91,8  | 73,2 | 60,6 | 49,4 | 40,5 | 27,6 | 18,2 | 12,1 |      |      |  |  |  |  |  |
| 93  | 19                 | 5                | 1   | $G_1$ | 1,5         | 1848                    |  |       |       | 118,6 | 93,8  | 74,9 | 62,3 | 50,9 | 41,9 | 28,9 | 19,5 | 13,2 |      |      |  |  |  |  |  |
| 91  | 19                 | 6                | 1   | $G_1$ | 2           | 1858                    |  |       |       |       | 94,8  | 75,9 | 63,2 | 51,8 | 42,7 | 29,6 | 20,1 | 13,9 | 10,3 |      |  |  |  |  |  |
| 94  | 19                 | 3                | 2   | $G_3$ | 2           | 1806                    |  | 206,1 | 149,2 | 113,7 | 89,4  | 71,0 | 58,6 | 47,5 | 38,7 | 25,9 | 16,8 | 10,7 |      |      |  |  |  |  |  |
| 92  | 19                 | 4                | 2   | $G_1$ | 2           | 1822                    |  |       | 151,4 | 115,5 | 91,0  | 72,5 | 59,9 | 48,8 | 39,9 | 27,1 | 17,8 | 11,6 |      |      |  |  |  |  |  |
| 101 | 20                 | 3                | 1   | $G_3$ | 1           | 1884                    |  | 233,4 | 170,4 | 130,5 | 105,8 | 85,0 | 70,0 | 58,8 | 49,0 | 34,2 | 23,6 | 15,7 | 10,6 |      |  |  |  |  |  |
| 102 | 20                 | 4                | 1   | $G_3$ | 1,75        | 1907                    |  |       | 173,7 | 133,4 | 108,4 | 87,3 | 72,1 | 60,8 | 50,9 | 35,8 | 25,2 | 17,2 | 12,1 |      |  |  |  |  |  |
| 99  | 20                 | 4                | 1   | $G_2$ | 1,5         | 1909                    |  |       | 173,9 | 133,6 | 108,6 | 87,4 | 72,3 | 60,9 | 51,0 | 35,9 | 25,3 | 17,3 | 12,2 |      |  |  |  |  |  |
| 97  | 20                 | 5                | 1   | $G_2$ | 2           | 1937                    |  |       |       | 136,9 | 111,6 | 90,2 | 74,8 | 63,3 | 53,2 | 37,9 | 27,1 | 18,9 | 13,9 | 10,1 |  |  |  |  |  |
| 96  | 20                 | 3                | 2   | $G_3$ | 1,75        | 1881                    |  | 232,9 | 170,0 | 130,2 | 105,8 | 84,8 | 69,8 | 58,6 | 48,8 | 33,9 | 23,9 | 15,6 | 10,6 |      |  |  |  |  |  |
| 98  | 20                 | 3                | 2   | $G_2$ | 1,5         | 1881                    |  | 232,9 | 169,9 | 130,1 | 105,5 | 84,7 | 69,7 | 58,6 | 48,8 | 33,9 | 23,4 | 15,5 | 10,6 |      |  |  |  |  |  |
| 100 | 20                 | 4                | 2   | $G_1$ | 1,75        | 1913                    |  |       | 174,5 | 134,0 | 108,9 | 87,8 | 72,6 | 61,3 | 51,3 | 36,2 | 25,5 | 17,5 | 12,5 |      |  |  |  |  |  |