



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

Gitana Straukaitė

**KROVOS DARBŲ OPTIMIZAVIMAS KONTEINERIŲ
TERMINALE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr . Narimantas Listopadskis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

KROVOS DARBŲ OPTIMIZAVIMAS KONTEINERIŲ
TERMINALE

Baigiamasis magistro projektas
Taikomoji matematika (kodas 612G10003)

Vadovas

Doc. dr. Narimantas

Listopadskis

(2015 – 06 – 05)

Recenzentas

Lekt. dr. Kęstutis Lukšys

(2015 – 06 – 05)

Projektą atliko

Gitana Straukaitė

(2015 – 05 – 22)

KAUNAS, 2015

Straukaitė G. Loading optimization in container terminal. *Masters's work in applied mathematics* / supervisor dr. assoc. prof. N. Listopadskis; Kaunas University of Technology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Department of Applied mathematics.

Kaunas, 2015. – 57 p.

SUMMARY

The container terminal train load minimization problem is considered in this thesis. The combinatorial complexity of the problem prevents the use of the Brute-Force search to obtain the exact solution, thus several approximation algorithms are considered.

Problems of low dimension, comprised of a short container list, are solved using Brute-Force search, while the solutions to more complex problems are approximated using Monte Carlo or genetic algorithms. Analysis of the influence of the approximation method parameters on the quality of the solution is performed. All algorithms are implemented using MATLAB.

Part of this thesis was presented in the conference “Matematika ir matematikos dėstymas - 2015”.

Turinys

ĮVADAS	6
1. TRANSPORTO SISTEMOS FUNKCINIAI KOMPONENTAI	7
1.1. Kroviniai ir jų struktūra	7
1.2. Krovinių gabenimo konteineriuose ypatybės.....	8
1.2.1. Konteinerių privalumai ir trūkumai	10
1.3. Konteinerių terminalo struktūra	11
1.3.1. Konteinerių kėlimo bei sandėliavimo technika.....	12
1.4. Geležinkelių transporto reikšmė konteinerių terminale	16
1.4.1. Krovos darbų klasifikacija geležinkelio transporto terminale	17
2. UŽDAVINIŲ SPRENDIMO ALGORITMAI IR METODAI	21
2.1. Uždavinių sprendimo algoritmų klasifikacija.....	22
2.2. Pasirinkto uždavinio matematinė formuluotė ir tikslo funkcija.....	24
2.3. Pilnas perrinkimas.....	25
2.4. Monte Karlo metodas.....	26
2.5. Genetinis algoritmas	27
2.5.1. Elitinė atranka	28
2.5.2. Turnyrinė atranka.....	29
2.5.3. Kryžminimas.....	29
2.5.4. Mutacija	31
2.6. Genetinio algoritmo paieškos strategijos	32
3. TYRIMO DUOMENYS IR REZULTATAI	33
3.1. Pilno perrinkimo rezultatai	33
3.1.1. Traukinio sąstato pakrovimas	33
3.1.2. Traukinio sąstato pakrovimas su apribojimais.....	35
3.2. Tyrimo rezultatai Monte Karlo metodu	36
3.3. Genetinio algoritmo realizacija.....	37
3.3.1. Generacijų (kartų) skaičiaus parametro tyrimas	38
3.3.2. Elito skaičiaus parinkimas populiacijos dydžiui.....	39
3.3.3. Populiacijos dydžio tyrimas	40
3.3.4. Mutacijos tikimybės tyrimas.....	41
3.3.5. Kryžminimo metodų palyginimas.....	43
4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA.....	43
IŠVADOS	46
LITERATŪROS SĄRAŠAS	47
PRIEDAI.....	49
Priedas 1. <i>bruteForce2.m</i> funkcijos rezultatai, kai $P = 4$, $N = 5$ ir $M = 3$	49

Priedas 2. Važtaraštis workingScript3	53
Priedas 3. Kryžminimo metodų rezultatai	57

IVADAS

Aktyvėjant tarptautinei prekybai ir ryškėjant tam tikroms transporto rūšių savybėms, suaktyvėja tarptautinių krovinių vežimai. Todėl būtina atkreipti dėmesį į veiksnius, darančius įtaką bendrųjų krovinių vežimų, kaip transporto sistemos, veiksmingumui, t.y. bendrųjų sąnaudų, laiko, greičio, saugumo, paslaugų kokybės, paslaugų pastovumo, valstybinių institucijų, transporto priemonių techninius veiksnius, susijusius su krovinio charakteristikomis, paslaugų prieinamumu, paslaugų spektru bei lankstumu.

Transportui tenka svarbus vaidmuo kuriant materialines vertybes, racionaliai išdėstant šalies teritorijoje gamybinės jėgas, įsisavinant gamtos turtus. Transportas būtinas vežti krovinius tarp įmonių, taip pat įmonių viduje, rajonų, šalių.

Kombinatorinis optimizavimas tai procesas, kurio metu sprendžiami tokie optimizavimo uždaviniai, kur siekiama surasti užduoties sąlygą tenkinantį sprendinį. Tiksliai išspręsti kombinatorinio uždavinį yra labai sunku, tačiau atskirų uždavinių sprendimui yra sukurta nemažai metodų, kurie gana kokybiškai randa ieškomus sprendinius. Šiais laikais, kai technologijos sparčiai vystosi, atsirado daugiau galimybių spręsti kombinatorinio optimizavimo problemas.

Šiame darbe planuojama tirti tokį traukinio sąstato pakrovimo uždavinį, kai į sąstatą kraunami tik 20 ft ir 40 ft ilgio konteineriai ir jie pakraunami tiltiniu kranu, siekiant minimizuoti susidarantį atstumą.

Darbo tikslas – remiantis pateiktu važtaraščiu rasti tokį konteinerių rinkinį, kurį pakraunant į traukinio sąstatą, susidaręs atstumas būtų minimalus.

Darbo uždaviniai:

- įvykdyti pilno perrinkimo algoritmą, remiantis nedidelės apimties važtaraščiu;
- sumodeliuoti imitacinį traukinio sąstato pakrovimo uždavinį, remiantis Monte Karlo metodu;
- nustatyti genetinio algoritmo tinkamumą, pakrovimo uždaviniams spręsti, įvertinant jo parametrų pasirinkimą;

Kai visuose metoduose vertinamas minimalus atstumas ir, juo remiantis, randamas optimalus konteinerių išdėstymas sąstata.

1. TRANSPORTO SISTEMOS FUNKCINIAI KOMPONENTAI

Transporto sistema pagal funkcinis komponentus sudaryta iš tokių transporto šakų:

- biotransporto;
- geležinkelių;
- automobilių;
- jūrų;
- vidaus vandenu;
- oro;
- miesto elektrinio;
- vamzdynų.

Biotransportui priklauso specialūs pėsčiųjų ir dviračių takai, dviračiai, velomobilai.

Geležinkelių transportui priklauso bendro naudojimo geležinkeliai, geležinkelių atšakos, riedmenys, traukos priemonės, ryšių, signalizacijos ir energijos tiekimo įrenginiai, stotys ir kiti inžinerijos statiniai tiesiogiai geležinkelių transportui aptarnauti.

Automobilių transportui priklauso keliai, transporto priemonės, technologiniai įrenginiai, stotys ir kiti inžinerijos statiniai.

Jūrų transportui priklauso laivybos linijos, jūrų uostai, jūrų švyturiai ir kiti navigacijos ženklai bei techniniai įrenginiai, reguliuojantys laivybą ir garantuojantys jų saugą, laivai, didelė įvairovė terminalų bei kitų uosto statinių.

Vidaus vandenu transportui priklauso laivuojami vandens keliai, laivai ir kitos plaukiojimo priemonės, uostai, prieplaukos, navigacijos ženklai.

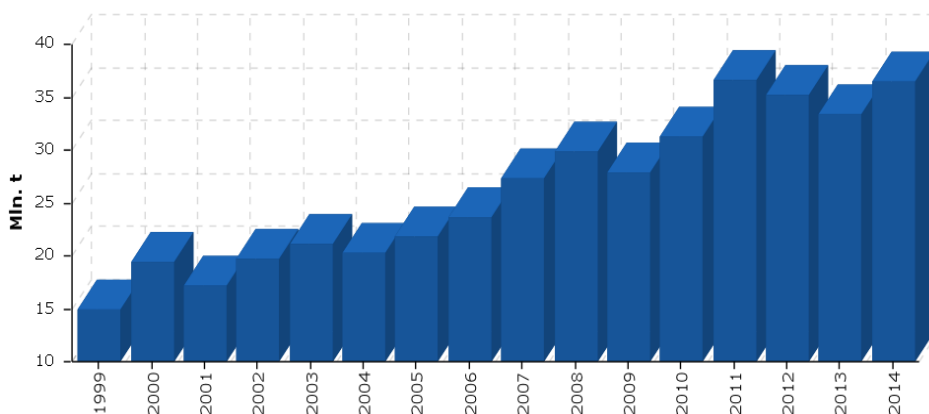
Oro transportui priklauso oro trasos, oro uostai, aerodromai ir lėktuvai.

Miestų elektriniam transportui priklauso elektrinės kontaktinės linijos, elektrinės transporto priemonės, technologiniai įrenginiai ir kiti inžinerijos statiniai.

Vamzdynų transportui priklauso naftotiekio ir dujotiekio vamzdynų linijos technologiniai įrenginiai, inžinerijos statiniai [1].

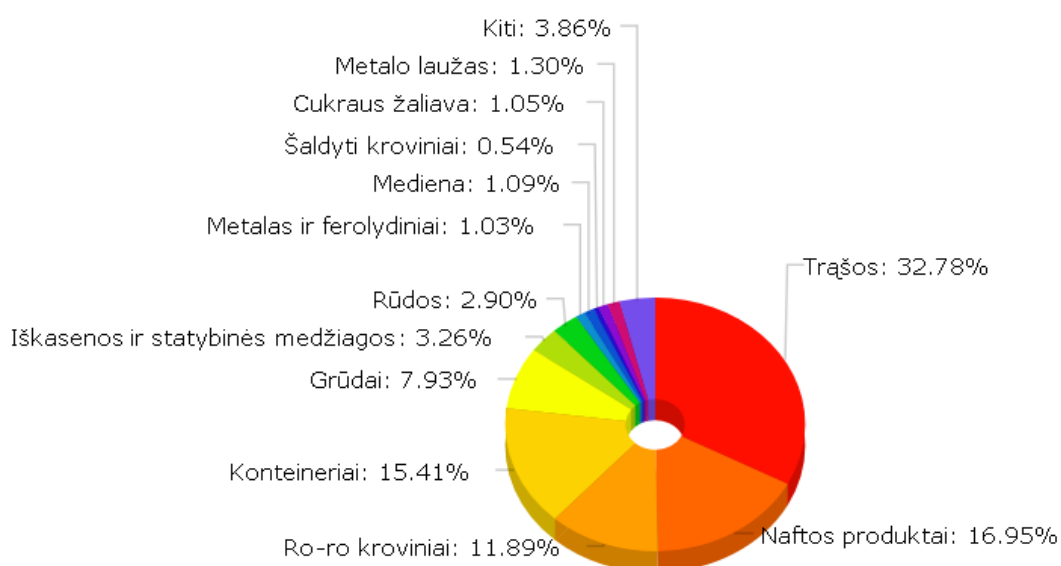
1.1. Kroviniai ir jų struktūra

Stebint lietuvišką konteinerių realizavimo statistiką, Klaipėdos uostas perkrauna daugiausia konteinerių lyginant su kitais Baltijos šalių uostais [2]. Nuo 1999 m. iki 2014 m. krova padidėjo 143,2 %. Per 2014 m. Klaipėdos uoste pakrauta 36,1 mln. t krovinių, tai 9 % daugiau nei per 2013 m. (žr. 1.1 paveikslą)



1.1 pav. Krovos dinamika Klaipėdos uoste (mln. t) 1999 – 2014 m.

Remiantis statistikos duomenimis, galima pažiūrėti kokia yra krovinių struktūra, ji pavaizduota 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Klaipėdos uosto krovinių struktūra

Procentinė diagrama rodo, kad konteineriai užima išties nemažą dalį krovinių struktūroje.

1.2. Krovinių gabenimo konteineriuose ypatybės

Konteinerizacija yra pasaulinė tendencija, kuri pakeitė krovinių aptarnavimo bei uosto įrengimų reikalavimus, nepaprastai pakeitė uosto veiklą; kontrastas tarp konteinerių ir ankstesnių krovimo operacijų yra netikėtai didelis: pirmiausia, tai sutrumpino laiką kurį laivas praleidžia uoste, sumažino darbo jėgos reikalavimus, pareikalavo nemažų investicijų bei itin kvalifikuotos darbo jėgos. Krova konteineriais įgavo didesnę svarbą 1970-aisiais, kai prekyba jais augo tris kartus greičiau nei tradicinė prekyba krovinių. 1980 metais prekyboje konteineriai dar daugiau naudojami nei tradiciniai krovos būdai.

Taigi, pirmieji konteineriai – kroviniams gabenti pritaikytos metalinės dėžės – pradėtos naudoti prieš 50 metų. Europoje, kaip visame pasaulyje, pastaruoju metu sparčiai populiarėja krovinių gabenimas konteineriais. Teoriškai vertinant, ideali krovinių transportavimo priemonė yra geležinkelio platforma arba automobilio priekaba: visas jų ant kelio užimamas plotas kartu yra ir kroviniui sukrauti skirtas plotas. Deja ir platforma, ir priekaba pačios nevažiuoja, joms reikia vilkiko.

Krovinių vežimas konteineriuose dėl savo universalumo tampa pagrindine krovinių vežimo paslaugų plėtros kryptimi. Konteineriai – tai transporto įrenginiai skirti vežti paketuotus krovinius, palaidus krovinius maišuose, statybines ir buitines technikas, baldus ir kitus krovinius, kurie bijo atmosferinio poveikio. Konteineris yra transporto talpykla, kuri dėl tvirtos konstrukcijos ir ilgo naudojimo laiko, kai gali būti panaudojamas pakartotinai, pagaminta taip, kad ją galima vežti įvairiomis transporto priemonėmis ir perkrauti iš vienos transporto priemonės į kitą, lengvai sukraunama ir iškraunama, yra ne mažesnio kaip 1 kub. metro vidinio tūrio [3].

Siekiant užtikrinti saugumą ir apsaugoti nuo gedimo bei pakenkimų kraunant, vežant, iškraunant ir saugant kroviniai dedami į tara. Tara turi atitikti vežamo krovinio rūšį ir charakterį, būti pakankamai patvari, kad būtų galima naudoti krovimo mechanizmus, krauti keliais aukštais ir t.t. Vežant krovinį įpakuotą taroje, jo masė išreiškiama dvejopai: neto – krovinio masė ir bruto – krovinio masė su tara [4].

Siekiant apsaugoti krovinį nuo smūgių, vibracijos, krovinio grobstymo, naudojamos specialios pakuotės. Iš jų narveliai bei įvairių konstrukcijų konteineriai. Optimali krovinių pakuotė suteikia galimybę transportavimo vienetams stambinti – paruošti transportinius krovinius [3].

Konteineriai sukurti itin sunkiems kroviniams gabenti, jie drąsiai kraunami vienas ant kito. Plieninės pakuotės turi atlaikyti atšiaurų aplinkos poveikį – sūraus jūros vandens purslus, temperatūrų svyravimus (žr. 1.3 pav.).



1.3 pav. Konteinerių transportavimas jūra

Jūriniai konteineriai yra standartinės formos ir suformuoti taip, kad galėtų būti glaudžiami ir dedami vienas ant kito tarsi kubeliai. Vieną ant kito galima sudėti dvylika tuščių konteinerių [4].

Standartiniai ISO konteineriai yra 2,5x2,5 m skerspjūvio. Konteinerių ilgis – 3, 6, 9, 12 metrų. Labiausiai paplitę 6 metrų ilgio konteineriai. Atsižvelgiant į sienos konstrukciją, kuri labai svarbi kai kuriems kroviniams, konteineriai skirstomi į tris pagrindinius tipus:

- **plonasieniai konteineriai.** Jie neturi šiluminės izoliacijos ir tik apsaugo krovinius nuo atmosferos poveikio ir nuo grobstymo;
- **izolijuojantieji konteineriai.** Jie neturi temperatūros reguliavimo sistemos, tačiau pagaminti storomis sienomis iš medžiagos, mažinančios šilumos nuostolius ir saugančios šilumą, kad kroviniai negestų, išliktų švieži ir sausi, arba neužšaltų žemoje temperatūroje;
- **refrižeratoriniai konteineriai** su šaldymo įrenginiu arba be jo. Kai kurie konteineriai prijungiami prie laivo šaldymo sistemos, o sausumoje – prie nedidelių šaldymo įrenginių. Refrižeratoriniai įrenginiai sumažina konteinerio vidaus gabaritus, o kartu ir naudingąjį tūrį

Plačiau kalbant apie konteinerius yra ir kitų konteinerių tipų [5].

Universalūs konteineriai. Į jų vidų galima patekti per galines duris, o atitinkamose vietose yra krovinio tvirtinimo taškai.

Konteineriai pakraunami per viršų. Jie skirti ilgiems, sunkiems arba gremėzdiškiems kroviniams. Stogas ir viršutinė sija nuimami, kad galima būtų krauti krovinį per duris ir per viršų.

Puskonteineriai. Jie naudojami sunkiems, masyviems kroviniams, pavyzdžiui, metaliniams vamzdžiams vežti. Normalių gabaritų konteineris, prikrautas tokių krovinių, viršytų normalų konteinerio svorį,

Konteineriai be šoninių sienų. Skirti specialiai pavojingiems kroviniams. Šio tipo konteineriai turi standų stogą, jų šonai apvesti vielos tinklu.

Platforminiai konteineriai. Tai rėmas su tam tikru pagrindu, kurio galuose įtvirtinamos sudedamos sienelės. Jie turi įtaisą transportuojamam kroviniui įtvirtinti.

Konteineriai biriesiems kroviniams gabenti. Jie skirti granuluotiems ir milteliniams kroviniams gabenti, turi tris pakrovimo angas ir iškrovimo angą gale, per kurią išpilamas kroviny.

Cisterniniai konteineriai. Tai cisterna ant standartinio rėmo, pagal gabaritus ji atitinka standartinį konteinerį [6].

1.2.1. Konteinerių privalumai ir trūkumai

Konteinerių privalumai gali būti suformuoti taip:

- konteineriai jungia daug nedidelių siuntų arba įpakuotus krovinius, sudarydami vienetinę siuntą;
- toks jungtinis krovinyš apdorojamas greičiau ir lengviau;
- maži pakavimo reikalavimai. Daug paprastesnis pakavimo būdas leidžia patalpinti daugiau krovinių;
- lengviau vežti krovinius, nes jie geriau sudėti negu laisvai gulinčios siuntos;
- ekonomiškas, kadangi pilnai pakrautas konteineris ekonomiškiausiai išnaudoja erdvės tūrį ir laive, ir vagone, ir automobilyje;
- supaprastėja dokumentų rengimas;
- sumažėja draudimo išlaidos;
- konteinerizacija leidžia plėtoti integruotus mišrius vežimus nuo sandėlio iki sandėlio (geležinkelis-jūra-geležinkelis, geležinkelis-jūra-kelias ir t.t.).

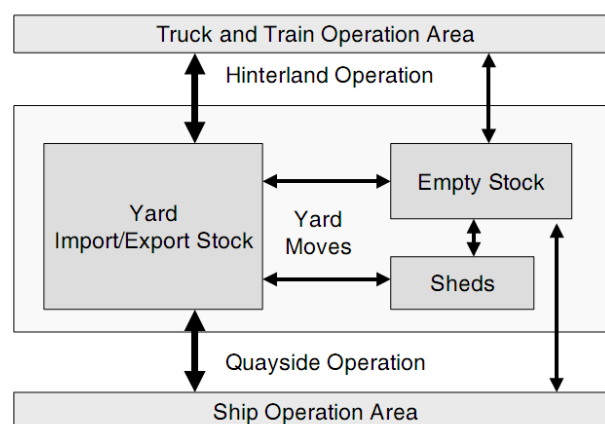
Konteinerių trūkumai būtų tokie:

- nepritaikyti europadėklams;
- didelis taros svoris;
- dažnai per sunkūs kelių transportui.

Kartu pateikti išvardyti privalumai byloja apie konteinerizacijos naudą. Nepaisant trūkumų, vežėjų firmų reakcija, diegiant konteinerius, rodo, kad dėl šių privalumų sumažėja išlaidos ir atitinkamai mažesni tarifai [6].

1.3. Konteinerių terminalo struktūra

Konteinerių terminalas yra vieta konteinerių krovimui ir iškrovimui nuo laivų ar kitos transportavimo priemonės. Bendruose terminuose, konteinerių terminalas yra rajonas, prieinamas sunkvežimiams, geležinkeliui ar jūriniam transportui (žr. 1.4 pav.).



1.4 pav. Operacijų rajonai uosto konteinerio terminale ir transporto srautas

Konteinerių terminalas gali būti klasifikuojamas į tris tipus:

- jūrų uosto konteinerių terminalas;
- geležinkelio konteinerių terminalas;
- šalies vidaus konteinerių terminalas.

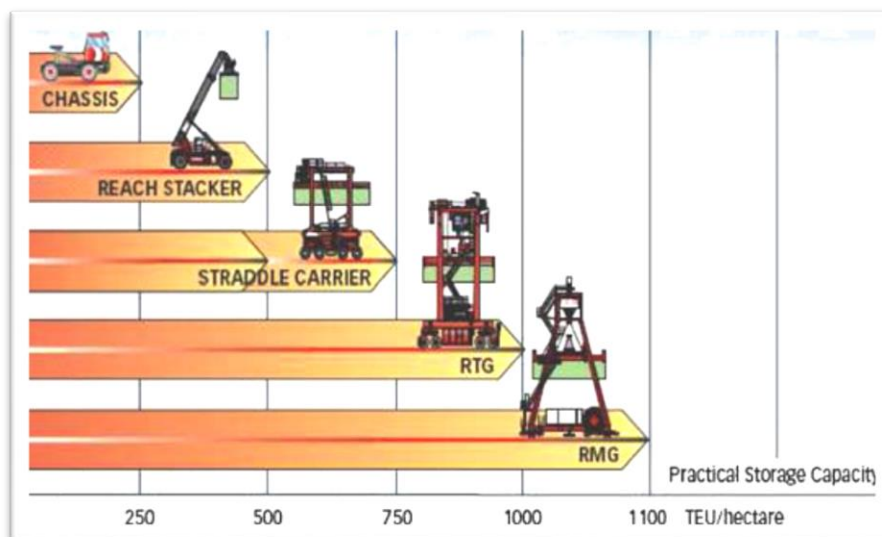
Kai laivas atvyksta į uostą, jis yra priskirtas į tam tikrą vietą ir, prisišvartavęs po krantinės keliamuoju kranu (ang. Quay crane (QC)), iš jo konteineriai yra iškraunami šiuo kranu ir pakraunami ant sunkvežimių, po to vežami į sandėliavimo vietą laikymui. Sandėliuojamame plote konteineriai kraunami į blokus. Terminale esanti technika, kaip kranai ar konteinerių vežėjai (ang. Straddle carriers), aptarnauja blokus. Krantinėje prie laivo priskiriama tiek keliamųjų kranų, kad iškrautų konteinerius. Konteinerio vežėjas gali ir vežti konteinerius į tam tikras vietas, ir sukaupti juos krūvoje.

Konteineriai kaupiami blokuose tam tikrą periodą, kol su jais nėra vykdoma kokių nors operacijų. Kai konteineriai yra reikalingi eksplotavimui, jie specialia technika yra ištraukiami iš krūvos ir sunkvežimiais išvežami arba vežami iki traukinio ar laivo. Kiekvienas procesas konteinerių terminale labai priklauso nuo ankstesnio. Visos operacijos uoste, išskyrus išorinių sunkvežimių išvykimą ir atvykimą, yra kontroliuojamos uosto.

Dauguma konteinerių terminalų naudoja sukomplektuotas įrangas, kaip konteinerių vežėjai, keliamieji kranai ir kombinuotų priekabų sistemos. Tačiau kai kurie terminalai, kaip terminalas Roterdame, yra pusiau automatizuoti. Tokiuose terminaluose automatizuotos savaeigės transporto priemonės (ang. Automated guided vehicles (AGVs)) yra panaudotos konteinerių transportavimui. Taip pat gali būti sudarytas procesas iš automatinių keliamųjų kranų. Praktiškai, konteinerių, kurie turi būti iškrauti nuo ar pakrauti ant laivo, skaičius yra gana didelis, nuo 500 iki 2500 konteinerių [7].

1.3.1. Konteinerių kėlimo bei sandėliavimo technika

Kadangi konteineriai yra dideli ir sunkūs, todėl reikalinga specializuota darbo įranga tam, kad juos vežiotų terminalo viduje. Konteinerių terminalas konteineriams aprūpina vietą, mechaninius prietaisus bei darbo režimus, kuriais remiantis vyksta konteinerių perkėlimas. Konteinerių teritorija yra medžiagų apdorojimo/laikymo vieta, visiškai panaudota pilniems ir/ar tuštiems konteineriams [8, 9].



1.5 pav. Skirtingi darbo įrangos ir jų krovimo gebėjimo tipai

Bendra informacija, tam tikros detalės, techninės įrangos konteinerių apdorojimui yra pateikta projektavimo žurnaluose, specializuotose parduotuvėse, brošiūrose, ar žiniatinklyje, tiekėjų materialios darbo įrangos ir paslaugų konteineriams sektoriuje [10, 11]. Bendra įranga, tokių kaip važiuokle pagrįstas transporteris, konteinerių vežėjai (SCs), pasiekiamumo krautuvas (RS), keliamasis kranas guminiiais ratais (RTMG) bei keliamasis kranas su turėklais (RMG), yra 1.5 paveiksle palyginti, išreiškiant krovimo gebėjimu.

Per praėjusį dešimtmetį technologija ir automatizavimas buvo įvesti į konteinerių verslą, kad pagerintų efektyvumą, padidėjimo gebėjimą ir atitiktų būsimą paklausą. Be to, staigus krovinių apimtys vystymasis labai padidino apkrovimus konteinerių terminaluose. Naujovės elektronikoje, informacijos technologijose ir automatizavime privertė uosto valdžios organus priimti aukštesnes technologijas, kad susidorotų su sparčiai augančiu vystymusi. Toliau trumpai apžvelgiama įranga, kuri panaudota tam, kad perkeltų konteinerius.

Dauguma terminalų naudoja žemiau pateiktą įrangą:

Automatizuota savaeigė transporto priemonė (AGV)

Automatizuotą savaeigę transporto priemonę (ang. Automated guided vehicles (AGVs)) vairuoja automatinė kontrolės sistema, kuri pakeičia vairuotojo vaidmenį, ir važiuoja nurodytais keliais, kurie gali būti lengvai pakeičiami [12].

AGVs yra panaudoti, kad pervežtų konteinerius terminalo teritorijos viduje, juos pakrauna ir iškrauna automatizuoti keliamieji kranai. Platus AGVs naudojimas konteinerių terminaluose pasireiškia jų gebėjimu pasiekti aukštus reikalavimus: didelis konteinerių pralaidumas, nuolatinės operacijos 24 valandas per dieną, 365 dienas per metus, aukštą valdomumą ir patikimumą, aukštus

saugumo standartus, automatizuotą ir nuoseklią konteinerio apdorojimo operaciją, taip pat sumažina naudojimo kainas [13].

Skirtingai nuo kitų vežimo priemonių AGVs nesugeba pakrauti ir iškrauti konteinerius savarankiškai. Visada yra būtinas keliamasis kranas, kad įvykdytų šitas operacijas. Tačiau ši sistema nėra efektyviai įkainuota, nes ji neleidžia aukštai krauti ir reikalingi platūs keliai važiavimui per terminalą. Kaip atrodo ši transporto priemonė pateikta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Automatizuota savaeigė transporto priemonė (AGV)

Konteinerių vežėjai (SCs)

Konteinerių vežėjai (ang. Straddle carriers (SCs)), kaip pateikta 1.7 paveiksle, yra keturratinės transporto priemonės, kurios sugeba dideliais greičiais parinkti ir padėti konteinerį jam skirtoje vietoje. Jie yra naudojami tam, kad susidorotų su skirtingais konteinerių dydžiais ir su skirtingu transporto priemonę keliančiu gebėjimu.



1.7 pav. Konteinerių vežėjas (SC)

SC yra dažnai naudojamas kur operacijos greitis yra svarbus. Jie standartinė forma dažniausiai naudojami sukomplektuotam tarpgalutiniam transportui trumpuose nuotoliuose, įprastai, tarp krantinės pusės ir konteinerių laikymo vietos. SCs išlieka populiarūs dėl savo palyginti žemos pirkimo kainos, mažesnės vietos išsivystymo kainos ir savo ekonominių bei lanksčių operacijų [7]. Tačiau SCs turi mažiau efektyvios erdvės, žemesnį naudojamą gebėjimą ir mažiau

tinkamas į aukštesnį automatizavimą, taip pat turi didesnę prastovos trukmę bei aukštesnę laikymo kainą [14].

Pasiekiamumo krautuvas (RS)

Pasiekiamumo krautuvas (ang. Reach stacker (RS)) yra šakutės tipo pakėlimas su teleskopiniu bumu ir aukščiausio pakėlimo pritvirtinimu, panaudotu pakėlimui ir konteinerių krovimui. Jo konstrukcija leidžia pasiekti konteinerius už pirmos eilės, kad jį pakeltų. 1.8 paveikslas rodo pasiekiamumo krautuvą, kuris naudojamas konteinerių terminale. Jo svarbiausia užduotis sukrauti konteinerius ir pakrauti juos į sunkvežimius, traktorius ar traukinius. Jie gali sukrauti konteinerius iki 3 konteinerių aukščio ir gali pasiekti maksimalų aukštį, ekvivalentų 5 konteinerių aukščiui.



1.8 pav. Pasiekiamumo krautuvas (RS)

Kraunantys kranai

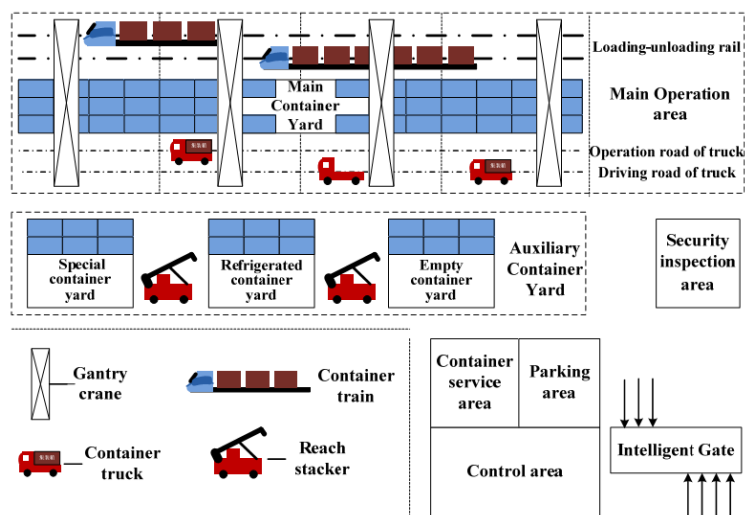
Kraunantys keliamieji kranai yra panaudoti talpinimui ir paėmimui konteinerių krūvoje. Šitos formos keliamieji kranai yra žinomi kaip tiltinis keliamasis kranas (ang. Rail Mounted Gantry Crane (RMGC)) ar keliamasi kranas guminiiais ratais (RTGC) [15, 16]. RMGC juda ant bėgių, normaliai aptarnaujantis konteinerių laikymo bloką, esantį krano pločio ribose. Ši priemonė pateikta 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Tiltinis keliamasis kranas (RMGC)

1.4. Geležinkelių transporto reikšmė konteinerių terminale

Vertinant krovinių gabenimą sausuma geležinkelio transportu, stebimas žymus šios transporto sistemos pranašumus lyginant su automobilių transportu. Krovinių automobiliais krovinius galima vežti į įvairias, net pačias atokiausias vietas, tačiau ir kelių transportas turi trūkumų, todėl ieškoma alternatyvių būdų gabenti krovinius dideliais atstumais. Vienas iš būdų yra geležinkelis. Juo dažniausiai vežami sunkūs kroviniai. Tačiau geležinkelio transporto priemonės yra nepakankamai „vikrios“ [17].



1.10 pav. Geležinkelio padėtis konteinerių terminale

Geležinkelis – bėginė transporto priemonė, tad ne visada gali pristatyti krovinį „nuo durų iki durų“. Tai skatina sudaryti transporto grandines su automobilių transportu. Vežant grandine, atsiranda sunkumų: perkraunant krovinį sugaištama daug laiko, rizikuojama prekes pažeisti, perkraunant gali jų pavogti. Geležinkeliai norėdami to išvengti, siūlo įvairių krovos priemonių ir konteinerių. Atsiranda galimybė sudaryti krovos ir transportavimo vienetus, galima sparčiau gabenti krovinį bei apsaugoti nuo pažeidimų [18]. Nors šiuo būdu krovinių transportavimas užtrunka kiek ilgiau nei jų gabenimas automobiliais, tačiau nuo to nei kiek nenukenčia krovinių saugumas. Gabenant krovinius geležinkeliais transporto išlaidos vidutiniškai sumažėja trečdaliu, nei juos gabenant autotransportu.

Pramonės revoliucijos laikotarpiu geležinkelių transportu kroviniai buvo vežami dideliais atstumais ir to meto sąlygomis palyginti greitai ir pigiai. Geležinkelis vienodai tinka vežti tiek vienetinius, tiek masinius krovinius, nes galima parinkti tinkamus vagonus. Geležinkelio pervežimuose plačiausiai naudojami konteineriai. Didelis geležinkelio privalumas – krovos darbų mechanizavimas.

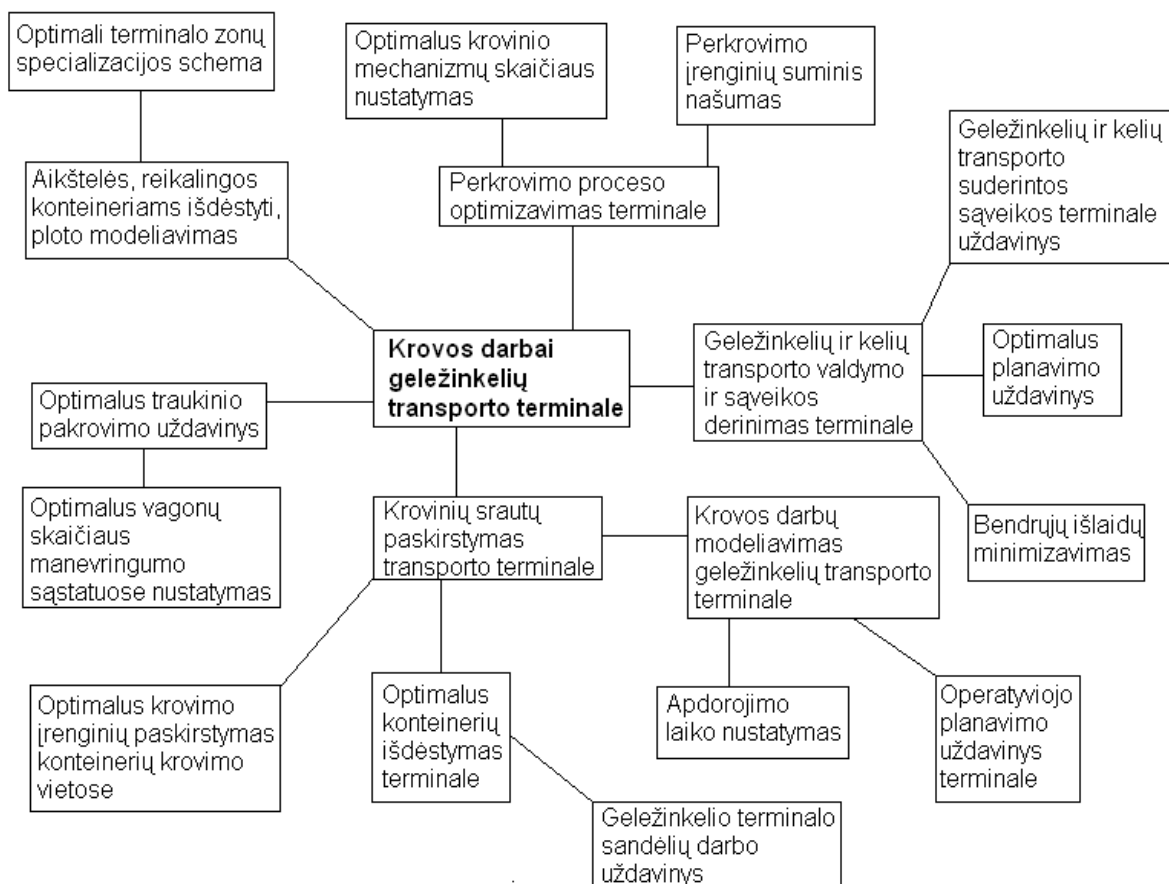
Pagrindinės geležinkelio transporto ypatybės yra patikimumas, reguliarumas, universalumas, galimybė vežti įvairiarūšius krovinius nepriklausomai nuo metų laiko ar klimato sąlygų.

Visa geležinkelio sistemos veikla nukreipiama taip, kad būtų kuo geriau ir efektyviau panaudojamos šios transporto rūšies savybės ir pranašumai [3].

1.4.1. Krovos darbų klasifikacija geležinkelio transporto terminale

Geležinkelių transporto terminale atliekamos tokios technologinės operacijos: krovinių iškrovimas iš vagonų, sandėliavimas, grupavimas, paskirstymas pagal vežimo kryptis, tiesioginis krovimas iš kelių transporto priemonių į vagonus arba iš vagonų tiesiog į kelių transporto priemones. Tam reikia turėti tam tikrų įrenginių: krovimo, rūšiavimo, įrenginių kroviniams gabenti terminalo teritorijoje ir kt. Taigi geležinkelio terminalo darbuotojai turi optimaliai suderinti įvairius technologinius krovinių apdorojimo procesus terminale taip, kad būtų kuo mažiau kelių transporto priemonių ir vagonų prastovų [19].

Įvertinant sudėtingą operacijų vykdymą konteinerių terminale galima glausčiau apibūdinti jame sprendžiamus uždavinius, susijusius su krovos darbais. 1.11 paveiksle pateikta krovos darbų klasifikacija.

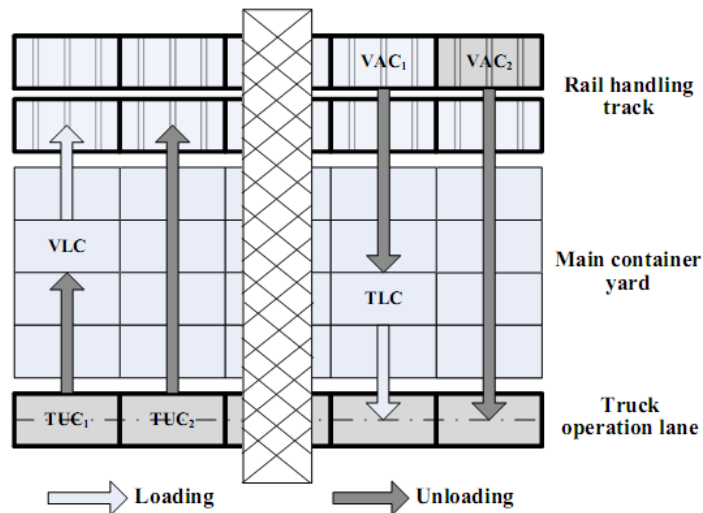


1.11 pav. Krovos darbų klasifikacija geležinkelių transporto terminale

Galima trumpai ir matematiškai apibrėžti kelis krovos darbus, kurie pateikti šioje klasifikacijoje.

Operatyviojo planavimo uždavinys terminale.

Suformuluosime operatyviojo planavimo uždavinį geležinkelių transporto terminale. Kaip vaizdinę šio uždavinio iliustraciją galima pateikti 1.12 paveiksle pavaizduotą procesą.



1.12 pav. Operatyviojo planavimo uždavinio terminale vaizdinė iliustracija

Padarysime šias prielaidas: planavimo intervalu visiškai išnaudojamas bendras krovimo įrenginių našumas, pakankamas reikiamiems darbams atlikti. Naudosime žymenis:

x_{fj} ir x_{fj}^0 – atitinkamai skaičius tuščių ir pakrautų i tipo vagonų, gabenamų iš krovinių punkto f į paskirties punktą j ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, $f = \overline{1, F}$);

p_{ij} – pakrovimas i tipo vagonų, važiuojančių iš f į punktą j ;

z_{ik} – k tipo krovimo mašinų skaičius punkte ($k = \overline{1, l}$);

q_{jk} – k tipo krovimo mašinų našumas apdorojant krovinius j ;

u_{ij} – vagonų, važiuojančių į krovimo frontą j , skaičius;

L_j – krovimo fronto j ilgis, matuojamas vagonų skaičiumi;

ω_{h_jz} – h tipo automobilių, važiuojančių į krovimo frontą j ir į paskirties punktą z ($z = \overline{1, R}$, $h = \overline{1, H}$), skaičius;

Jeigu žinomi toliau vardinami dydžiai: pakrautų ir tuščių i tipo vagonų, laukiančių iškrovimo ir pakrovimo, x_i^0 ir x_i skaičius; k tipo krovimo įrenginių – z_k ir h tipo automobilių skaičius – Ω_h ; j tipo krovinių pakrovimo ir iškrovimo skaičius Q_j ; krovinių, atvežamų ir išvežamų kelių transportu

į paskirties punktą z skaičius π_z krovimo fronte j ; laukiančių krovimo į vagonus krovinių skaičius; planavimo intervalo trukmė T ir t_0 , tai optimalaus planavimo uždavinį bendruoju atveju galima suformuluoti taip:

$$F^* = \min \sum_{j,i,k,h} f(x_{fij}, x_{fij}^0, z_{jk}, u_j, \omega_{hir}) \times r(x_{fij}, x_{fij}^0, z_{ik}, u_j, \omega_{hir}) \geq 0; \quad (1.1)$$

Šio uždavinio apribojimus ir daugiau informacijos galima rasti [19] šaltinyje.

Geležinkelio terminalo sandėlių darbo uždavinys.

$\Omega(t)$ – krovinių, esančių terminale momentu t , kiekis; Ω_0 – krovinių, esančių terminale iki momento $t=0$, kiekis; g – didžiausias traukinio sąstate galimas krovinių kiekis; h^s – didžiausias krovinių kiekis, kurį gali vežti automobilis; Ω^* – didžiausias terminale saugomas krovinių kiekis.

Turi būti įvykdytos šios sąlygos:

$$\Omega(t) \leq \Omega^* \quad \forall t \in [0, T];$$

$$\Omega(t) \leq \Omega^* - g \quad \forall t \in [t_1, t_2, \dots, t_n];$$

Bei kitas sąlygas, pateiktas literatūros šaltinyje [19].

Tušti riedmenys geriausiai išnaudojami taip paskirsčius kelių transporto ir geležinkelių terminalo darbą, kad funkcija $\sum_i \left[\sum_{t=t_i+i}^{t_i+2\tau} \Omega(t) - g \right]$ pasiektų didžiausią reikšmę ir būtų laikomasi visų išvardytų ribojimų.

Taigi įvykdžius visas išvardytas sąlygas išnagrinėtą uždavinį matematiškai galima suformuluoti taip:

$$\max \sum_{i=1}^n \left[\sum_{t=t_i+i}^{t_i+2\tau} \Omega(t) - g \right] \quad (1.2)$$

Suformuluotas geležinkelių ir kelių transporto sąveikos modelis leidžia tiksliai suderinti šių transporto rūšių darbą terminale.

Optimalus traukinio pakrovimo uždavinys.

Pateikiama optimizavimo problema, kurios tikslas yra optimalus traukinio pakrovimo planas automatiniuose terminaluose. Imitacinė iliustracija pateikta 1.13 paveiksle.



1.13 pav. Optimalaus traukinio pakrovimo uždavinio vaizdinė iliustracija

Užduotis vykdoma konteinerių krovimu ant platforminių vagonų su tikslu maksimizuoti traukinio pakrovimą atsižvelgiant į [20] darbe pateiktus apribojimus.

Naudojami tokie žymenys:

C – konteinerių skaičius sukrautoje vietoje;

S – traukinio vagonų skaičius;

π_i – i -tojo konteinerio prioritetas (dėl komercinių priežasčių), ($i = \overline{1, C}$);

ω_i – i -tojo konteinerio svoris, išreikštas tonomis;

l_i – i -tojo konteinerio ilgis (kaip 20 ft, 30 ft, 40 ft arba 45 ft);

μ_s – vagono ilgis (kaip 20 ft arba 40 ft), ($s = \overline{1, S}$);

$x_{i,s} \in \{0,1\}$, $i = \overline{1, C}$, $s = \overline{1, S}$ su $l_i = \mu_s$ lygu 1, jeigu i -tasis konteineris priskirtas s -tajam vagonui, ir 0 kitu atveju.

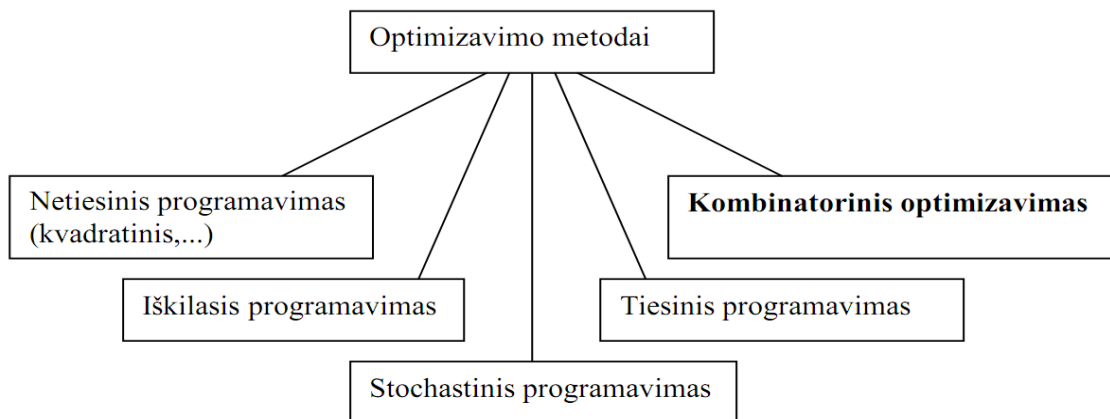
Aptartą maksimizavimo uždavinį matematiškai galima suformuluoti taip:

$$\max \sum_{i=1}^C \pi_i \cdot \omega_i \cdot l_i \cdot x_{i,s}. \quad (1.3)$$

Pateikta (1.3) funkcija maksimizuoja pakraunamų konteinerių skaičių, suteikiant pirmenybę ilgesniems, sunkesniems ir prioritetiniems konteineriams.

2. UŽDAVINIŲ SPRENDIMO ALGORITMAI IR METODAI

Optimizavimo metodai yra plati matematikos šaka, jungianti įvairių sričių optimizavimo uždavinius. Pagal tai, kokio tipo uždaviniai nagrinėjami, optimizavimo metodus galima suklasifikuoti.



2.1 pav. Optimizavimo metodų rūšių klasifikacija

Kombinatorinis optimizavimas nagrinėja tokias problemas, kurių visų galimų sprendimų aibė yra baigtinė ar bent jau skaiti. Nesunku suvokti, kad bet kurių vykdomų krovos darbų aibė yra baigtinė. Kombinatorinio optimizavimo algoritmai sprendžia uždavinius, ieškodami optimalaus sprendinio didelėje sprendinių aibėje, sumažindami jos tikrąjį dydį ir efektyviai ją tirdami [21, 22].

Kombinatorinio optimizavimo uždavinio samprata

Daugumos praktikinių ir teorinių optimizavimo uždavinių svarba susideda iš geriausios kintamųjų konfigūracijos paieškos. Spręsdami kombinatorinio optimizavimo uždavinį, ieškosime optimalaus sprendinio baigtinėje skaičiojoje aibėje.

Kombinatorinio optimizavimo uždavinys $KOU = (X, P, Y, f, extr)$ formaliai apibrėžiamas tokiu būdu, kur:

- X – diskrečioji sprendinių aibė, kurioje apibrėžtos f ir P ;
- P – sprendinių, tenkinančių apribojimus, predikatas $P: X \rightarrow \{0,1\}$, čia $P = 0$, jei apribojimai netenkinami ir $P = 1$, jei atvirkščiai;
- Y – tenkinančių apribojimus sprendinių aibė;
- f – tikslo funkcija, kur $f: Y \rightarrow R$;
- $extr$ – tikslo funkcijos ekstremumas (minimumas ar maksimumas).

Y dažnai vadinama paieškos arba sprendinių, tenkinančių apribojimus, erdve. Tam, kad išspręsti kombinatorinio optimizavimo uždavinį, reikia rasti tokį sprendinį $y^* \in Y$, prie kurio tikslo funkcijos reikšmė būtų minimali (arba maksimali), t.y. $f(y^*) \leq f(y)$ arba $f(y^*) \geq f(y)$, $\forall y \in Y$.

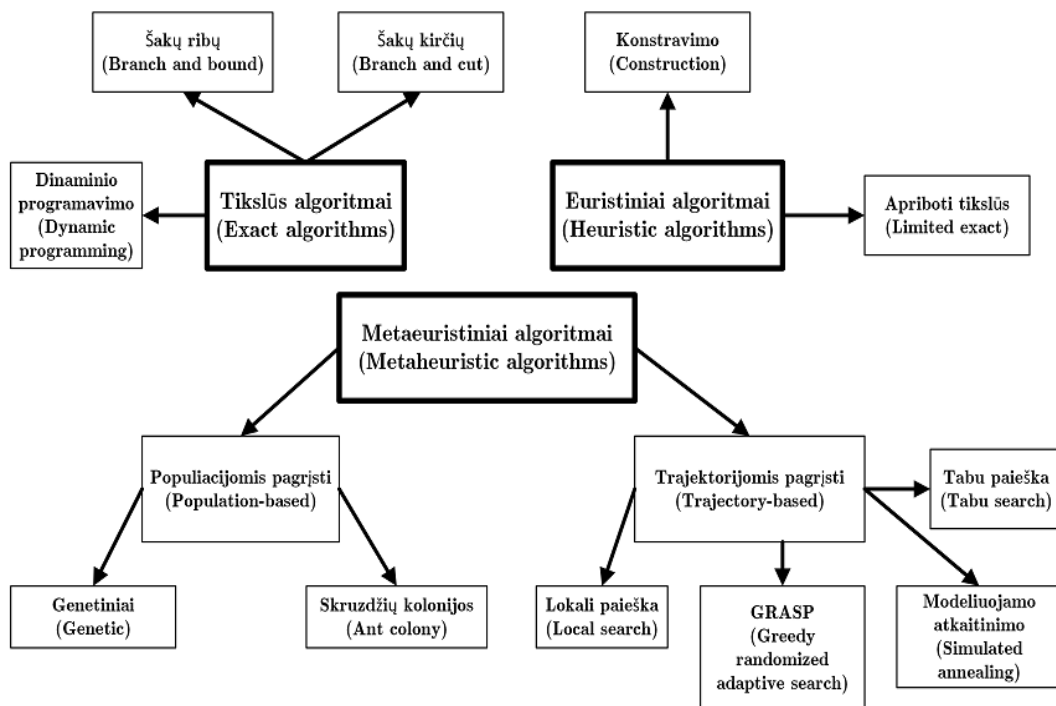
Tuomet y^* vadinamas uždavinio globaliai optimaliuoju sprendiniu ir aibė $Y^* \subseteq Y$ – globaliai optimalių sprendinių aibė. Dažniausiai aibę Y^* sudaro vienas sprendinys.

Kombinatorinio optimizavimo uždaviniams spręsti naudojami godžios atsitiktinės adaptyviosios paieškos (greedy randomized adaptive search), lokalsios paieškos (local search) [23], modeliujamo atkaitinimo (simulated annealing) [23], kvantinio atkaitinimo (quantum annealing), paieškos su draudimais (tabu search), šakų ir ribų (branch and bound) metodai, spiečių (swarm) [24], genetiniai (genetic) algoritmai [24], skruzdžių kolonijos optimizacija (ant colony optimization) ir daugelis kitų.

2.1. Uždavinių sprendimo algoritmų klasifikacija

Visus krovos darbų ar apskritai kombinatorinio optimizavimo uždavinių sprendimo metodus – algoritmus galima būtų suskirstyti į tris pagrindines grupes: tikslicius, euristinius ir metaeuristinius.

Pirminiai suformuluoti uždaviniai yra tiesinio programavimo ir jiems spręsti gali būti naudojamos standartinės tiesinio programavimo programos. Tačiau daugumos uždavinių apimtis yra labai didelė, todėl uždavinių sprendimui ypač svarbūs euristiniai ir metaeuristiniai algoritmai, kurie leidžia gauti nebūtinai optimaliausią, bet pakankamai kokybišką duoto uždavinio sprendinį. Pagrindinės uždavinių sprendimo algoritmų rūšys pavaizduotos 2.2 paveiksle. Trumpai aptarsime pagrindines klases.



2.2 pav. Dalinė uždavinių algoritmų klasifikacija

Tikslūs algoritmai.

Tikslūs metodai, kurie ne tik suranda uždavinio sprendinį, bet ir įrodo jo optimalumą praktiškai nėra naudojami, kadangi jų vykdymo laikas nors ir trumpesnis nei pilno perrinkimo $O(n!)$, vistiek yra per ilgas. Mažos apimties uždaviniams spręsti (kai $n < 20$) galima sėkmingai pritaikyti dvi pagrindines tikslų algoritmų klases: dinaminio programavimo ir šakų algoritmus.

Dinaminio programavimo algoritmuose uždavinys rekursiškai padalijamas į mažesnių uždavinių rinkinį ir ieškoma šių uždavinių optimumų. Pagrindinė idėja remiasi Belo principu, kuris teigia, kad optimalaus sprendinio dalis yra optimalus sprendinys sumažintam uždaviniui [25]. Šakų ir ribų metodas dalija ne uždavinį, o jo sprendinius į klases, kiekvienai priskirdamas tam tikrą ribą pasinaudojant tikslo funkcija. Tos klasės, kurių kokybiškiausias sprendinys prastesnis nei nurodyta riba, nukertamos.

Euristiniai algoritmai.

Euristiniai metodai priklauso nuo konkretaus nagrinėjamo uždavinio. Pagrindiniai euristikų taikymai uždavinių sprendime sutinkami konstravimo ir apribotuose tiksluosiuose algoritmuose. Konstravimo metodas absoliučiai priklausomas nuo euristikos, kuri taikoma konstruojant sprendinį, o apribotas tikslusis algoritmas – nuo uždavinio.

Metaeuristiniai algoritmai.

Metaeuristiniai algoritmai praktikoje taikomi dažniausiai. Pagrindinė jų idėja nepriklauso nuo nagrinėjamo kombinatorinio optimizavimo uždavinio, tačiau realizacijos detalės turi didelę įtaką sprendinio kokybei, taigi pritaikyti metaeuristinį algoritmą konkrečiam optimizavimo uždaviniui nėra triviali užduotis. Yra nemažai aspektų, pagal kuriuos visos metaeuristikos gali būti išskirstomos į klases, tačiau vienas dažniausiai taikomų yra tai, su kiek sprendinių vienu metu dirba algoritmas.

Trajektorijomis pagrįsti algoritmai vienu metu nagrinėja vieną sprendinį ir taip apibrėžia paieškos trajektoriją, kurią sudaro vienas po kito išrikiuoti skirtingų iteracijų sprendiniai. Vienas paprasčiausių trajektorijomis pagrįstų metaeuristinių algoritmų yra lokali paieška. Jos veikimo principas paprastas: pradedama nuo atsitiktinai pasirenkamo sprendinio ir ieškoma sprendinio kaimyno, su kuriuo tikslo funkcijos reikšmė būtų mažesnė.

Modeliuojamo atkaitinimo algoritmas įkvėptas metalo grūdinimo procedūros. Pagrindinės šio plačiai žinomo metodo problemos susijusios su temperatūros režimo parinkimu.

Tabu paieška skiriasi nuo lokalsios paieškos tuo, kad į trumpai atmintyje laikomą tabu sąrašą surašomos tam tikros neseniai aplankyti sprendinių savybės ir šių sprendinių aplankyti antrą kartą neleidžiama. Tokiu būdu priverčiama paiešką tęsti plačiau nei lokalsios paieškos atveju.

GRASP (Greedy randomized adaptive search procedure) yra euristinių konstravimo metodų ir lokalsios paieškos derinys, tačiau jis vis tiek dažniausiai klasifikuojamas prie metaeuristinių metodų.

Pirmoje algoritmo vykdymo fazėje vykdomas konstravimo metodas su pasirinkta euristika, o antroje taikoma specialiai parinkta lokali paieška, pakeičianti pirmosios fazės sprendinį ir įvertinanti jo tinkamumą.

Populiacijomis paremti metaeuristiniai metodai vienu metu dirba su ištisa sprendinių aibe. Genetiniai algoritmai kiekvieną sprendinį interpretuoja kaip tam tikrą chromosomą. Kiekvienoje iteracijoje chromosomos yra kryžminamos pasirinktu būdu ir gaunama nauja chromosomų aibė. Kitos iteracijos populiacija sudaroma su didesne tikimybe renkantis tas chromosomas, kurių tikslo funkcija yra mažesnė. Kad metodas neužstrigtų lokaliame minimume, su nedidele tikimybe kiekvienai chromosomai gali būti pritaikyta mutacija.

Skruzdžių kolonijos algoritmai imituoja skruzdes, ieškančias maisto. Pirmiausia kiekviena skruzdė (kuri atitinka sprendinį) atsitiktinai apieško savo kaimynystę. Jeigu čia randa maisto (tikslo funkcija maža), grįždamos paskleidžia feromonus, kuriuos pajutusios kitos skruzdės eina apieškoti tos pačios kaimynystės. Dažniausiai feromonai kiekvienoje iteracijoje mažinami pastoviu daugikliu (feromonų garavimas), kad nuolat atsinaujintų ir neužstrigtų lokaliame minimume.

2.2. Pasirinkto uždavinio matematinė formuluotė ir tikslo funkcija

Nagrinėsime tokį traukinio sąstato pakrovimo uždavinį, kai į sąstatą kraunami tik 20 ft ir 40 ft ilgio konteineriai ir jie pakraunami tiltiniu kranu, pavaizduotu 1.13 paveiksle. Šitas procesas labai panašus į 2.3 paveikslą, tik jame nedalyvauja sunkvežimiai ir yra pakraunami tik vienu tiltiniu kranu. Kraunamų konteinerių padėties sandėliavimo krūvoje pažymimos (x, y, z) koordinatėmis.

Pradžioje nagrinėsime uždavinį, kai $z = 0$, t.y. konteineriai sandėliavimo vietoje išdėlioti viename aukštyje. Kandangi nagrinėjami tik dviejų ilgių konteineriai, todėl tarkime, kad traukinio sąstato ilgis $L = 20 \cdot P$, $P \in \mathbb{N}$, t.y. sąstatas suskirstytas į 20 ft ilgio vagonus – jei bus 20 ft ilgio konteineris, jis užims vieną 20 ft ilgio vagoną, o jei 40 ft ilgio konteineris, jis užims du 20 ft ilgio vagonus.

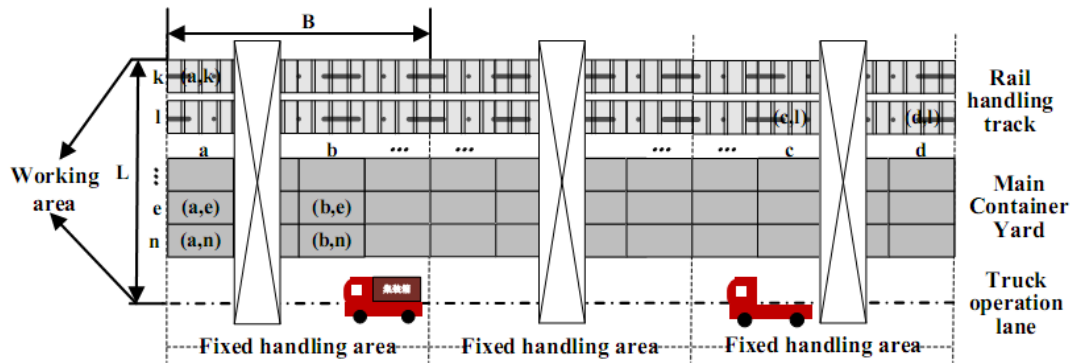
Tarkime į sąstatą dedamų 20 ft ilgio konteinerių skaičių žymėsime n , o 40 ft ilgio konteinerių skaičių žymėsime m . Tada galimos (n, m) poros:

$$(n, m) \in \left\{ (P, 0); (P-2, 1); \dots; (P-2k, k); \dots; \left(P-2 \cdot \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor \right) \right\}.$$

Taigi yra $\left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor + 1$ skirtingų būdų parinkti imamų konteinerių rūšių skaičiui. Be to, pažymėsime, kad N – iš viso turimų 20 ft ilgio konteinerių skaičius, M – iš viso turimų 40 ft ilgio konteinerių skaičius bei reikalausim, kad $N \geq P$ ir $M \geq \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor$.

Iš N 20 ft ilgio konteinerių parinkti n atsižvelgiant į tvarką yra $\frac{N!}{(N-n)!}$, analogiškai iš M 40 ft ilgio konteinerių parinkti m yra $\frac{M!}{(M-m)!}$ būdų. Šiuos pasirinkimus sumaišyti yra $\frac{(n+m)!}{n!m!}$ būdų.

Tuomet iš viso būdų surikiuoti konteinerius sąstate yra $S = \frac{(n+m)!}{n!m!} \cdot \frac{N!}{(N-n)!} \cdot \frac{M!}{(M-m)!}$.



2.3 pav. Pasirinkto uždavinio vaizdinė iliustracija

Apibrėžiant tikslo funkciją traukinio sąstatą formuosime koordinacių plokštumoje ant X ašies, t.y. $y = 0$, o susandėliuotus konteinerius žemiau jos. Tarkime, kad pradinė kranų (x_0^{krn}) ir krašto (x_0^{krt}) (prie kurio dedamas konteineris) pozicijos yra pradiniam taške $[0,0]$. Kadangi sąstatą formuojame ant X ašies, tai tikslo funkcija apsiraušytų taip (kur $y_0 = 0$):

$$\min \sum_{k=1} \left(2|y_k - y_0| + |x_k - x_{k-1}^{krn}| + \left| x_k - \frac{l_k}{2} - x_{k-1}^{krt} \right| \right) \quad (2.1)$$

$$\sum_k l_k = L. \quad (2.2)$$

2.1 išraiškoje tikslo funkcijos reikšmė gražina minimalų tiltinio kranų nueitą atstumą sukrovus atrinktą konteinerių rinkinį iš visos galimos konteinerių rinkinių aibės S . Apribojimu 2.2 reikalaujama, kad parinktų konteinerių ilgių suma būtų lygi sąstato ilgiui, t.y. nėra vežami tušti ar neapkrauti vagonai.

2.3. Pilnas perrinkimas

Pilnasis perrinkimas yra tikslusis algoritmas, sprendžiant kombinatorinio optimizavimo uždavinius. Šiuo algoritmu tikslo funkcija yra skaičiuojama kiekvienam galimam uždavinio sprendiniui. Mūsų aprašytam uždaviniui darant pilną perrinkimą iš viso reikia perrinkti

$$\sum_{k=0}^{\lfloor \frac{P}{2} \rfloor} \frac{(P-2k+k)!}{(P-2k)!k!} \cdot \frac{N!}{(N-P+2k)!} \cdot \frac{M!}{(M-k)!} \quad (2.5)$$

variantų.

Pagrindinis šio algoritmo minusas yra tai, kad didelės apimties uždaviniams jis reikalauja labai daug laiko paieškai, taigi šio algoritmo pritaikyti paraktiškai beveik neįmanoma.

2.4. Monte Karlo metodas

Monte Karlo metodas – skaičiavimo algoritmas, pagrįstas statistiniu modeliavimu ir gautų rezultatų apdorojimu statistiniais metodais. Šis metodas leidžia brangiai kainuojančius bandymus pakeisti modeliavimu kompiuteriu ir labai sumažina tyrimų trukmę. Monte Karlo metodai dažniausiai naudojami fizinių ir matematinių sistemų modeliavimui, kai neįmanoma gauti tikslių rezultatų naudojant deterministinį algoritmą.

Norint atlikti labai sudėtingą skaičiavimą, reikalaujantį ištyrinėti didelę duomenų erdvę, galima tą patį skaičiavimą atlikti tik su keletu atsitiktinai parinktų duomenų. Atsitiktinai parinkti duomenys dažniausiai būna „tipiški“, todėl natūralu tikėtis, kad ir atliktas skaičiavimas ne itin daug skirsis nuo tikslo.

Mūsų atveju, remiantis pateiktu važtaraščiu generuojami atsitiktiniai sprendiniai - konteinerių rinkiniai, kurie užpildo visą pakraunamo traukinio sąstato ilgį. Pradžiai apsibrėžiame sumą

$$SS = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{P}{2} \rfloor} \frac{(P-2k+k)!}{(P-2k)!k!} \cdot \frac{N!}{(N-P+2k)!} \cdot \frac{M!}{(M-k)!} \quad (2.4)$$

bei sumą

$$S(k) = \frac{(P-2k+k)!}{(P-2k)!k!} \cdot \frac{N!}{(N-P+2k)!} \cdot \frac{M!}{(M-k)!} \quad (2.5)$$

Tuomet parametą k parenkame su tikimybe $p = \frac{S(k)}{SS}$. Atsitiktinai iš N parenkama $P-2k$ 20 ft ilgio konteinerių, atsitiktinai iš M parenkama k 40 ft ilgio konteinerių ir atsitiktinai sumaišoma šią seką sudėjus. Galiausiai kiekvienam rinkiniui apskaičiuojama tikslo funkcijos reikšmė.

2.5. Genetinis algoritmas

Genetiniai algoritmai ir jų sudarymo principas buvo pasiūlytas XX-ojo amžiaus pabaigoje [26]. Pradedant Holland'o pirmuoju darbu, genetiniai algoritmai buvo sėkmingai išbandyti, sprendžiant įvairius kombinatorinio ir kitus optimizavimo uždavinius, pvz., tokius kaip tvarkaraščių sudarymo, duomenų talpinimo ir kt.

Genetinių algoritmų veikimo principas pagrįstas evoliucijos, vykstančios gyvoje gamtoje. Pagrindinės sąvokos, kurios naudojamos modeliuojant biologinės evoliucijos procesus, yra „individas“ ir „populiacija“. „Individas“ yra tam tikras elementarus, daugiau neskaidomas objektas. Mažesnė ar didesnė „individų“ grupė sudaro „populiaciją“. Dar svarbus dalykas yra „individo tinkamumas“ – savotiška individo vertė. „Individo tinkamumą“ galima traktuoti kaip „individo“ sugebėjimo sėkmingai prisitaikyti, išlikti ir reprodukuotis laipsnį.

Vietoje sąvokų „individas“, „populiacija“, „individo tinkamumas“ optimizavime naudojamos tradicinės įprastos sąvokos: „individas“ – atskiras sprendinys, „populiacija“ – sprendinių aibė, o „individo tinkamumas“ yra asocijuojamas su tikslo funkcijos reikšme duotajam sprendiniui. Kaip gyvosios gamtos evoliucijoje išlieka tik „vertingiausi“ „individai“, taip ir optimizuojant siekiama gauti kuo „geresnį“ sprendinį, t.y. sprendinį su kuo mažesne (ar didesne) tikslo funkcijos reikšme.

Genetiniuose algoritmuose „individai“ yra vaizduojami sprendiniais, kurie yra koduojami chromosomomis. Kiekvienas optimizuojamos funkcijos nežinomas kintamasis yra užkoduojamas simbolių, vaizduojančių genus, rinkiniu, kurie apjungiami į chromosomas. Optimizavimo metu yra ieškoma ne vieno galimo sprendinio, o jų aibės, t.y. sprendžiant uždavinį yra operuojama ne su viena chromosoma, o su jų „populiacija“.

Genetiniai algoritmai priklauso metaeuristinių metodų šeimai, kuriems būdingos tokios savybės:

1. Operuojama su viena ar keletą leistinų sprendinių „populiacijų“.
2. Atskiri sprendiniai iš vienos ar kelių „populiacijų“ parenkami tolimesniam nagrinėjimui ir apdorojimui, teikiant pirmenybę tiems sprendiniams, kurie turi „geresnes“ tikslo funkcijos reikšmes – siejama su atrankos procedūra.
3. Naudojamos euristinės procedūros, skirtos naujiems, leistiniams sprendiniams formuoti, dalinant gautą „populiaciją“ į sprendinių poras ir operuojant su šiomis poromis - kryžminimas.
4. Naudojant taisykles naujiems sprendiniams generuoti iš atskirų anksčiau gautų sprendinių – mutacija.

Paskutinių trijų savybių realizavimas leidžia populiaciją atnaujinti iteraciniu būdu, paliekant joje „geriausius“ sprendinius.

Žinoma daug įvairių būdų, kaip atlikti „sprendinių – tėvų“ parinkimo, kryžminimo, mutavimo bei populiacijos sprendinių atnaujinimo procedūras. „Sprendinių – tėvų“ poros gali būti parenkamos, atsižvelgiant į jų tinkamumą, t.y. tikslo funkcijos reikšmę, ir į galimybes gauti „vertingus“ „sprendinius – vaikus“. Kryžminimo bei mutavimo procedūros gali būti atliktos įvairiais būdais, beje, jos gali būti apjungtos ir į vieną procedūrą. Atrankos metu galima pakeisti visus einamosios populiacijos narius (sprendinius) naujai gautais „vaikais“ arba taikyti įvairius atrankos metodus, pavyzdžiui, turnyrinę, elitinę, proporcingumo atranką ir pan. Svarbu pažymėti, kad genetinio algoritmo realizacija labai priklauso nuo sprendinių kodavimo būdo.

Galime bendrais bruožais aptarti genetinio algoritmo etapus.

Imkime, jog genetiniame algoritme pateikiamas genas, mūsų atveju, tai tiesiog konteineris.

Genetinė paieška pradedama sudarant pradinę populiaciją (konteinerių rinkinių). Dažniausiai pradinė populiacija parenkama atsitiktinai (mūsų atveju, pradinė populiacija generuojama Monte Karlo metodu), o po to ji yra optimizuojama kituose algoritmo žingsniuose.

Sudarius pradinę populiaciją (konteinerių rinkinius), su ja atliekamos operacijos, modeliuojant evoliucinį procesą, kurio svarbiausi principai yra paveldimumas, mutacija ir atranka. Populiacijos evoliucionavimas modeliuojamas remiantis tokiomis taisyklėmis:

1. Iš pradinės populiacijos, surikiuotos pagal tikslo funkcijos reikšmę didėjimo tvarka, procentaliai atrenkama elitinė populiacija, kurią vadinsime „elitu“;
2. Chromosomos (konteinerių rinkiniai) suskirstomos poromis, pagal turnyrinę atranką, kurios apsieičia savo genų (konteinerių) rinkinių dalimis, t.y. jos yra kryžminamos;
3. Kiekvienam populiacijos chromosomų genui (konteineriui) taikomas mutacijos operatorius, kuris su tam tikra tikimybe gali pakeisti geną chromosomoje;
4. Kryžminimo ir mutavimo metu gautos chromosomos (konteinerių rinkiniai) sudaro tarpinę populiaciją.
5. Iš „elito“ ir tarpinės populiacijos sudaroma nauja populiacija.

Verta paminėti tai, kad čia pateikta tik viena iš galimų genetinio algoritmo vykdymo būdų.

2.5.1. Elitinė atranka

Atranka, kuri yra svarbus evoliucinio proceso etapas, užtikrinantis chromosomų dalyvavimą formuojant būsimas kartas. Dalyvavimo tikimybės yra nevienodos ir priklauso nuo chromosomos vertės, kurią apsprendžia chromosomą (konteinerių rinkinį) atitinkanti tikslo funkcijos reikšmė. Todėl sprendiniai (konteinerių rinkiniai), kuriuos atitinka „geresnė“ tikslo funkcijos reikšmė, turi daugiau šansų dalyvauti formuojant tarpinę populiaciją. Priklausomai nuo atrankos operatorių, išskiriami keli pagrindiniai atrankos būdai: turnyrinis, elito, proporcingasis ir kiti.

Elitinė atranka yra ignoruojantis įprastą eigą, tačiau labai efektyvus variantas, kai konstruojant naują populiaciją, leidžiama kelioms „geriausioms“ chromosomoms perreiti į naują populiaciją visai nepakitus.

2.5.2. Turnyrinė atranka

Atranka yra procesas, kurio metu tėvinės struktūros yra išrenkamos naujų kartų formavimui. Naujos kartos vėliau gali pakeisti senų kartų atstovus.

Populiacijos individai pagal tikslo funkcijos reikšmes atrenkami sekančios kartos generavimui. Geriausi individai turi didžiausią tikimybę į sekančią kartą. Iš jų pritaikant kryžminimo ir mutacijos metodus, generuojami palikuonys.

Turnyrinėje atrankoje atsitiktinai pasirenkama iš populiacijos t chromosomų (konteinerių rinkinių), iš kurių išrenkama geriausi (kur t – dalyvių skaičius).

2.5.3. Kryžminimas

Kryžminimo operacija yra pasirinktų sekų suporavimas dauginimosi fazėje tam, kad suformuotume naujos kartos individus. Jungiant „gerus“ genus iš dviejų sekų, tikimasi, kad rezultatas bus tik geresnė seka. Žinoma, tai įvyksta ne visada, bet bendru atveju šiuo metodu gaunamos sėkmingos kartos [27].

Kryžminimas leidžia efektyviai perrinkti didelį kiekį variantų, kadangi pradiniai sprendiniai formuojami atsitiktiniu būdu, tuo pat metu užtikrina ir tam tikrą sprendinių konvergavimą. Dažniausiai genetiniuose algoritmuose naudojama „dviejų tėvų“ schema.

Kadangi mūsų sprendžiamame uždavinyje chromosomos genai yra priklausomi vienas nuo kito (kiekvienas genas sekoje gali pasikartoti tik vieną kartą), standartiniai kryžminimo metodai (tokie kaip vieno, dviejų, daugelio taškų kryžminimas, atsitiktinis kryžminimas [28] ir pan.) negalimi. Dėl šios priežasties sugalvojau keletą kryžminimo metodų, kurie tinka nagrinėjamai užduočiai spręsti:

- Skėlimas pusiau, neatsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką;
- Skėlimas pusiau, atsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką.

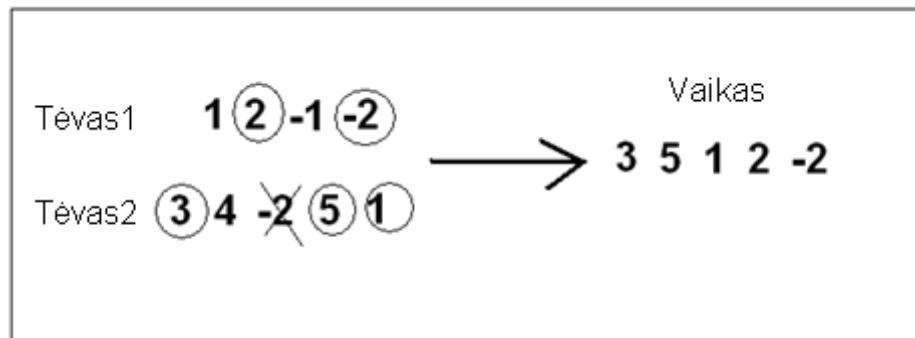
Skėlimas pusiau, neatsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką

Tarkime 20 ft ilgio konteinerius žymėsime teigiamais sveikaisiais skaičiais, o 40 ft ilgio konteinerius – neigiamais. Taip visame darbe bus koduojami konteineriai. Kadangi neatsižvelgiama į konteinerių išrikiavimo tvarką, tuomet konteinerių rinkiniai [1 2 -1 3] ir [3 -1 2 1] yra lygūs.

Šio kryžminimo eiga būtų tokia:

1. Tarkime pasirenkame $\left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor \times 20$ ft vertės konteinerių iš pirmo tėvo. Čia susidaręs konteinerių rinkinys gali viršyti 20 ft ilgį.
2. Iš antro tėvo sudarome aibę konteinerių, nepakliūnančių į vaiką. Jeigu įmanoma, atsitiktinai iš šios aibės pasirenkame $\left(P - \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor \right) \times 20$ ft vertės konteinerių ir dedame į vaiką. Jei galutinai užpildyti reikiamos erdvės iš antro tėvo turimų konteinerių nepavyksta, tuomet papildome iš pirmo tėvo. Jeigu ir pirmame tėve nėra reikiamo ilgio konteinerio, atsitiktinai pasirenkame iš nepanaudotų konteinerių aibės.

Pasirinkę $P = 6$, kryžminimo metodo pavyzdį pateiksime 2.4 paveiksle. Čia iš pirmo tėvo imame $\left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor \times 20 = 60$ ft vertės konteinerių.



2.4 pav. Kryžminimo metodas, neatsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką

Aptarkime kitą kryžminimo metodą.

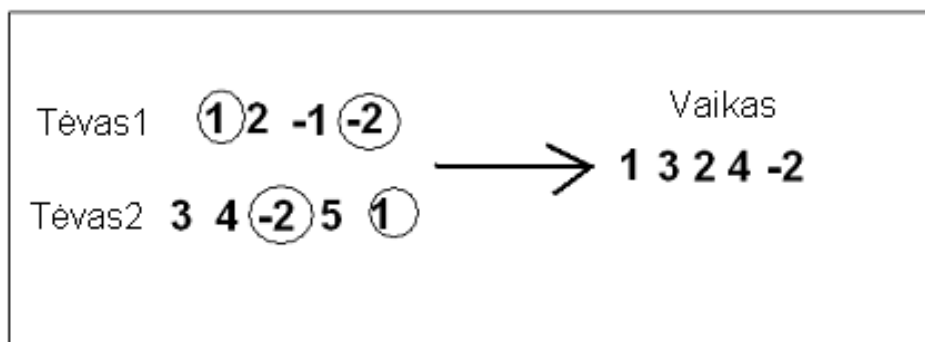
Skėlimas pusiau, atsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką

Kadangi šiame metode atsižvelgiama į konteinerių išrikiavimo tvarką, tuomet konteinerių rinkiniai [1 2 -1 3] ir [3 -1 2 1] yra skirtingi.

Šio kryžminimo eiga būtų tokia:

1. Tarkime surandami bendri elementai ir paliekami tose pačiose pozicijose kaip ir pirmame tėve.
2. Suformuojamos „laisvos“ vietos vaiko chromosomoje.
3. Einama per vaiko chromosomą ieškant „laisvos“ vietos.
4. „Laisva“ vieta užpildoma imant pirmą iš kairės nepanaudotą elementą. Pirmą imama iš vieno tėvo, tada iš antro, tada vėl iš pirmo ir t.t. Tikimybė, nuo kurio tėvo pradės imti, lygi 0.5.

Pasirinkę $P = 6$, kryžminimo metodo pavyzdį pateiksime 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Kryžminimo metodas, atsižvelgiant į konteinerių išrikiavimo tvarką

Remiantis šiais kryžminimo metodais tiriamojoje dalyje bus realizuojami genetiniai algoritmai.

2.5.4. Mutacija

Tam, kad būtų galima išlaikyti natūraliems evoliucijos metodams būdingą įvairovę, o taip pat neleisti populiacijai sukongverguoti į stipriausius individus, įvedamas genų individuose pakeitimas – genų mutacija.

Kadangi chromosomos genai yra tarpusavyje priklausomi, be to, gali įgyti reikšmes iš nustatytos aibės, todėl mutacijos metodų aibė susiaurėja.

Atsitiktinė mutacija

Tai mutacija, kai chromosomoje atsitiktinai permaišomi visi genai. Mutacijos operatorius pasirinktiems sprendiniams atlieka atsitiktinius pakeitimus su nurodyta tikimybe. Daugeliu atvejų rekomenduojama mutuoti vaikus.

Mutacija vykdoma tokiais žingsniais:

1. Nurodomas maksimalus bandymų skaičius naujo geno (konteinerio) parinkimui.
2. Tuomet ciklas vykdomas per kiekvieną geną ir sprendžiama ar daryti mutaciją, atsižvelgiant į mutacijos tikimybę.
3. Kol renkami netinkami genai (konteineriai), parenkamas atsitiktinis numeris važtaraštyje ir tą numerį atitinkantis konteineris.
4. Tikrinama ar atrinktas konteineris yra to pačio tipo (ilgio) ir, ar nesutampa su jau esančiais.
5. Jeigu buvo parinktas geras geno pakaitalas, atrinktą geną pakeičiame naujuoju.

Jeigu bandymų skaičius užsibaigs ir nebus ką pakeisti, tuomet vaiko nemutuosime. Kita vertus, mutacija neturi sukelti chaoso ir išsigimimo populiacijoje, kurie gali įvykti, jei mutacijos tikimybė yra didelė.

2.6. Genetinio algoritmo paieškos strategijos

Norint ištirti visas genetinio algoritmo paieškos strategijas, reikia ištestuoti visas galimas strategijos elementų (atrankos metodai, kryžminimo metodai, mutacijos metodai ir kt.) kombinacijas. Strategijų tyrime taip pat naudojami ir kiti parametrai. Tokie, kaip:

- Mutacijos tikimybė;
- Kryžminimo tikimybė;
- Populiacijos narių skaičius;
- Generacijų (kartų) skaičius.

Visi šie parametrai tik dar padidina strategijų skaičių. Savaime suprantama, visų galimų variantų su skirtingomis mutacijos, kryžminimo tikimybėmis bei populiacijos narių skaičiumi ištirti neįmanoma, taigi šie parametrai genetiniam algoritmui parenkami priklausomai nuo dėsningo ir tikslo funkcijos reikšmės kitimo.

Bandymai atliekami su atsitiktinai sugeneruota konteinerių aibe. Tam, kad gautųsi palyginami rezultatai, visos strategijos tiriamos tai pačiai konteinerių aibei.

3. TYRIMO DUOMENYS IR REZULTATAI

Nagrinėsime suformuluotą (2.2 skyrelis) krovos uždavinį. Duotam uždavinio sprendimui susidarysime prototipinius važtaraščius. Važtaraščiai bus sugeneruoti sukurtos programinės įrangos pagalba pagal šiuos parametrus:

- Konteinerio numeris, kur 20 ft ilgio konteineriai numeruojami teigiamais sveikaisiais skaičiais, o 40 ft ilgio konteineriai – neigiamais sveikaisiais skaičiais;
- Konteinerio padėtis, išreikšta x ir y koordinatėmis;
- Konteinerio ilgis, išreikštas pėdomis (ft) (pvz. 20 ft arba 40 ft).

Įvykdžius krovos darbus, bus rastas konteinerių rinkinys, kurio tikslo funkcija bus mažiausia. Tai priklausys nuo to, koks bus konteinerių skaičius važtaraštyje ir kaip sėkmingai pavyks išspręsti uždavinį.

Šiame skyrelyje pateiksime traukinio sąstato pakrovimo algoritmų skaičiavimo rezultatus. Taip pat panagrinėsime šių rezultatų priklausomybę nuo pagrindinių algoritmo parametrų. Tai atlikti yra svarbu, nes nuo teisingo parametrų parinkimo didžiąja dalimi priklauso algoritmų rezultatų kokybė ir jų tinkamumas užduočiai spręsti.

3.1. Pilno perrinkimo rezultatai

Sprendžiant didelės apimties uždavinius pilnas perrinkimas dažniausiai neįmanomas. Tačiau apsibrėžiant nedidelės apimties uždavinį, galima pabandyti realizuoti šį metodą mūsų uždavinio sprendimui. Visi skaičiavimai bus atliekami remiantis (2.5) išraiška, programiniėje realizacijoje nurodant sąstato ilgį ir turimų konteinerių N ir M kiekius. Iš pastarųjų bus formuojami konteinerių rinkiniai, kuriais būtų galima užpildyti reikiamo ilgio sąstatą, peržiūrint visus galimus variantus.

3.1.1. Traukinio sąstato pakrovimas

Šio pilno perrinkimo metodo vykdymui užduotis pateikta žemiau.

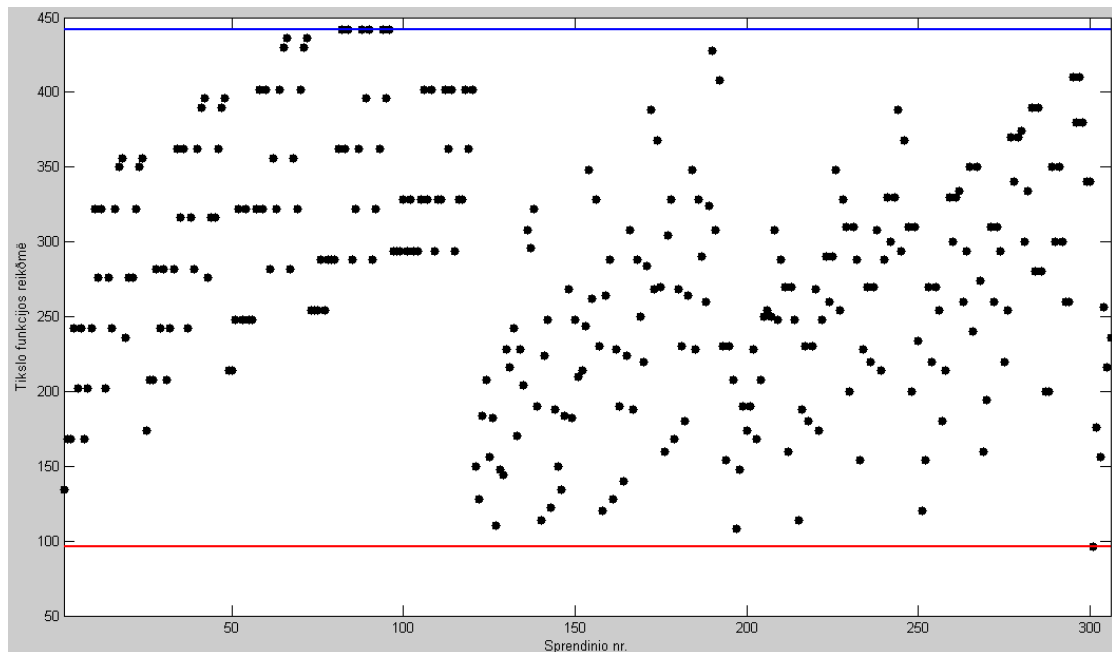
Duota važtaraštyje N ir M kiekiai atitinkamų konteinerių, kurie užima tam tikras vietas sandėliavimo krūvoje, tačiau išvažiuojamo traukinio sąstato ilgis ribotas ir visų konteinerių sukrauti nepavyks. Todėl vykdant pilną perrinkimą, reikia parinkti tokį konteinerių rinkinį, kuris tilps į sąstatą ir jo tikslo funkcijos reikšmė bus minimali.

Pateikiant šio metodo veikimo principą, naudosimės važtaraščiu pateiktu 3.1 paveiksle.

V =				
1	13	-5	0	20
2	33	-5	0	20
3	53	-5	0	20
4	73	-5	0	20
5	93	-5	0	20
-1	10	-9	0	40
-2	50	-9	0	40
-3	90	-9	0	40

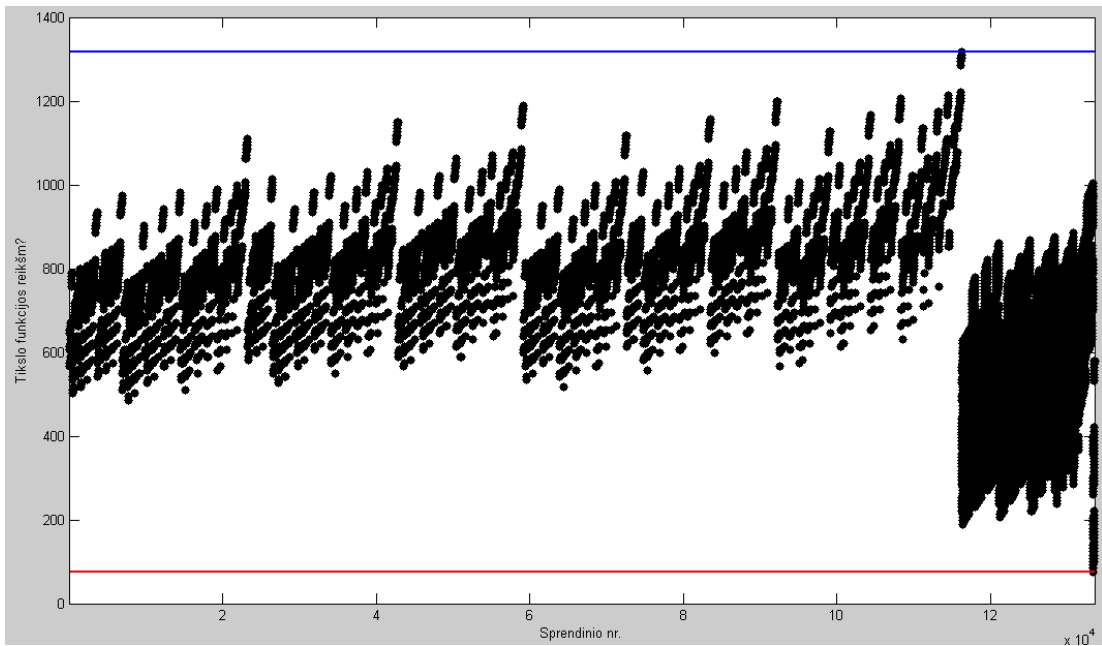
3.1 pav. Važtaraščio duomenys, vykdant pilną perrinkimą

Ieškosime sprendinio su parametrais $P = 4$, $N = 5$ ir $M = 3$. Įvykdžius *bruteForce2.m* funkciją gavome (žr. 1 priedas), kad minimali tikslo funkcijos reikšmė lygi 96, o šią tikslo funkciją atitinkantis konteinerių rinkinys yra $[-1,-2]$. Pabandykime išsiaiškinti, ar šis konteinerių rinkinys yra vienintelis, turintis šią reikšmę. Tam leksikografinė tvarka išdėstysime sprendinius ir apskaičiavę kiekvieno tikslo funkciją, rezultatus pateiksime 3.2 paveiksle, iš kurio matyti, kiek yra sprendinių, atitinkančių minimalią ar maksimalią reikšmę.



3.2 pav. Pilnas perrinkimas, kai $P = 4$, $N = 5$ ir $M = 3$

Paeksperimentuokime, kaip bus pasiskirsčiusi tikslo funkcija, kai paliksime tą patį sąstato ilgį, o turimų konteinerių kiekius padidinsime. Šiuo atveju tikslo funkcijos pasiskirstymas pateiktas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Pilnas perrinkimas, kai $P = 4$, $N = 20$ ir $M = 15$

Iš tendencijų matyti, kad mažiausias tikslo funkcijų reikšmes turi ilgesniųjų konteinerių rinkiniai.

Atsižvelgiant į tai, kad tiltinis kranas bėgiais juda lygiagrečiai X ašiai, o ant jo pakabinta strėlė – lygiagrečiai Y ašiai, tuomet tikslo funkcijos reikšmes galima išskaidyti į x ir y komponentes. Įžvalgos rezultatai, kai $P = 4$, $N = 5$ ir $M = 3$, pateikti 1-ame priede. Šie rezultatai naudingi norint įvertinti sunaudotos energijos kaštus.

3.1.2. Traukinio sąstato pakrovimas su apribojimais

Paanalizuokime dar vieną realybėje sutinkamą traukinio pakrovimo uždavinį su apribojimais.

Šio pilno perrinkimo metodo vykdymui užduotis skambėtų taip:

Duota važtaraštyje N ir M kiekiai atitinkamų konteinerių, kurie užima tam tikras vietas sandėliavimo krūvoje, ir yra duota jo vieta išvažiuojamo traukinio sąstate. Todėl vykdant pilną perrinkimą reikia rasti, kokia tvarka tie konteineriai pakraunami, kad tikslo funkcija būtų minimali.

Iš sąlygos žinome, kad konteinerių sąstate bus tiek pat kiek jų pateikta važtaraštyje. Tarkime, kad x_0 – keliamojo kranu strėlės startinė pozicija. Apsibrėžiame matricą

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & j & \dots & n \\ l_1 & l_2 & \dots & l_j & \dots & l_n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_j & \dots & i_n \end{bmatrix},$$

kur j yra vietos numeris, l_j yra j -osios vietos ilgis, o i_j nurodo,

kurį konteinerį dėti į j -tąją vietą. Šiam uždaviniui išspręsti, reikia peržiūrėti visas vietų užpildymo kombinacijas (vietų kėlinius), kurių skaičius yra $n!$, bei apskaičiuoti tikslo funkcijų reikšmes.

Įvykdę *tempScript.m* funkciją, su pateikta tokia $T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 20 & 20 & 40 & 20 & 20 & 40 & 40 & 20 \\ 4 & 5 & -3 & 3 & 2 & -1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$

matrica ir naudojantis 3.1 paveiksle pateiktu važtaraščiu, gauname tikslo funkcijos reikšmę lygią 1068. Vietos užpildomos tokia tvarka [6 2 5 3 4 7 1 8], o šias vietas atitinkantys konteineriai imami tokia tvarka [-1 5 2 -3 3 -2 4 1].

Palyginimui būtų galima įvykdyti *bruteForceOneComb.m* funkciją, kuri pritaiko pilną perrinkimą be apribojimų, kai jau parinkti konteineriai, bet reikia rasti jų išrikiavimą, kad tikslo funkcija būtų minimali. Tikslo funkcijos reikšmė lygi 726, o konteineriai į traukinio sąstatą kraunami tokia tvarka [1 -1 2 3 4 5 -3 -2]. Tad, jei visi konteineriai keliauja vienam užsakovui, konteinerius rekomenduojama krauti, remiantis pilno perrinkimo be apribojimų rezultatais.

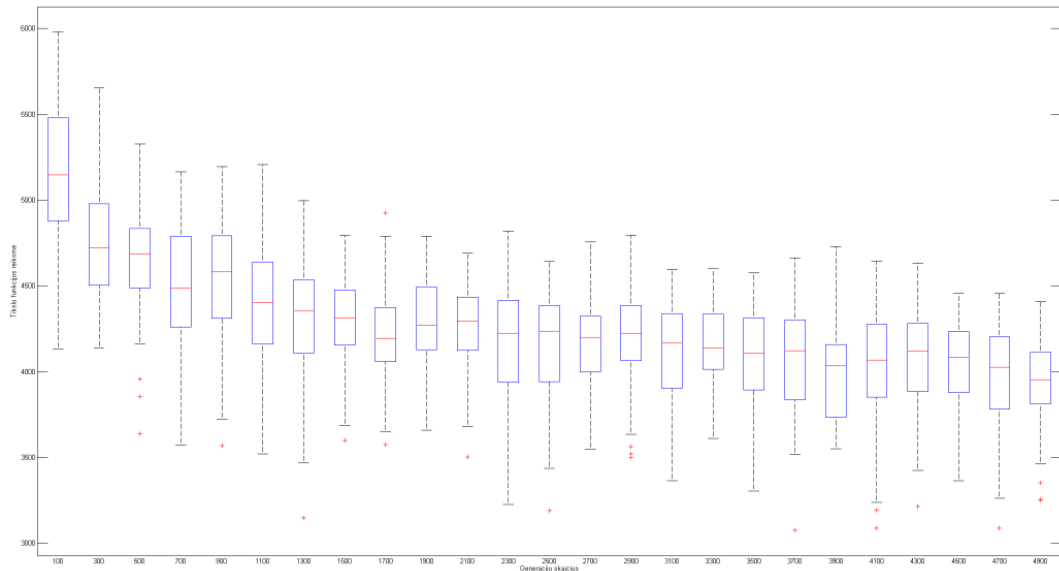
3.2. Tyrimo rezultatai Monte Karlo metodu

Kadangi realus traukinio sąstato pakrovimo uždavinys yra daug sudėtingesnis procesas, nei prieš tai realizuoti pavyzdžiai. Todėl šiam uždaviniui imituoti formuosime didesnę važtaraštį (*workingScript3*), pateiktą 2-ame priede. Šiuo metodu sprendžiama problema aprašyta žemiau.

Duota važtaraštyje N ir M kiekiai atitinkamų konteinerių, kurie užima tam tikras vietas sandėliavimo krūvoje, tačiau išvažiuojamo traukinio sąstato ilgis ($L=20 \cdot P$) ribotas ir visų konteinerių sukrauti nepavyks. Todėl, vykdant Monte Karlo metodą, sugeneruojami NN skaičius atsitiktinių konteinerių rinkinių, kurie užpildytų visą pakraunamo traukinio sąstato ilgį ir apskaičiuojama kiekvieno rinkinio tikslo funkcijos reikšmė.

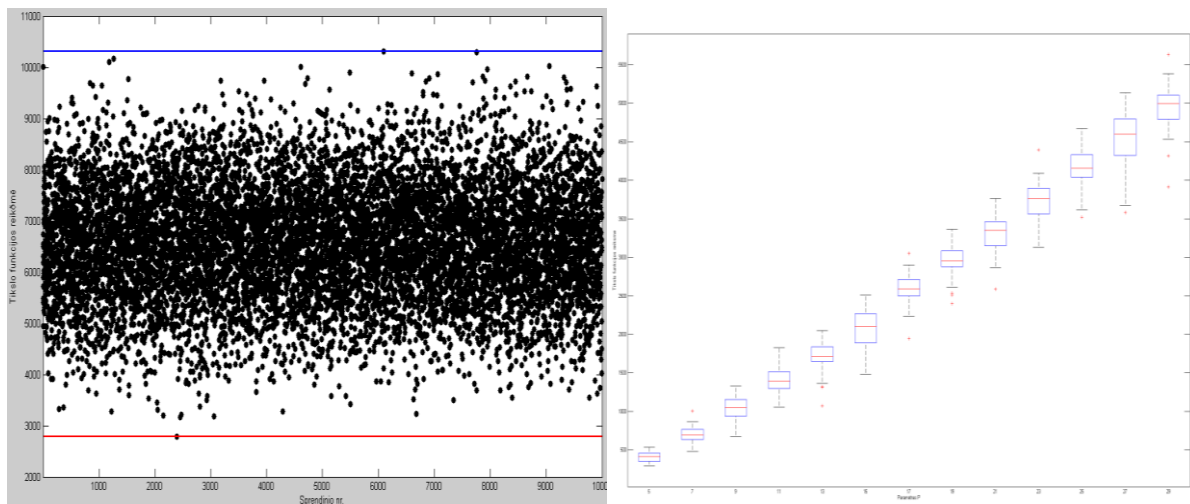
Paėmę fiksuotą traukinio sąstato ilgį, paanalizuosime generuojamų sprendinių skaičių. Rezultatai pateikti 3.4 paveiksle.

Matoma aiški tendencija, kad kuo daugiau generuojamų sprendinių, tuo mažesnė gaunama tikslo funkcijos reikšmė.



3.4 pav. Monte Karlo metodas, kai P - fiksuotas, o generacijų skaičius NN - kinta

Fiksuodami generuojamų sprendinių skaičių, palyginkime rezultatus keičiant parametą P .



3.5 pav. Monte Karlo metodas, kai $NN = 10000$, o parametras P kinta

Remiantis 3.5 paveiksle pavaizduotais rezultatais, galima teigti, kad tikslo funkcijos reikšmė įgyja dažniausiai vidutinio „gerumo“ reikšmes ir tiesiogiai priklauso nuo P parametro, t.y. kuo ilgesnį sąstatą krausime, tuo tikslo funkcija bus didesnė.

3.3. Genetinio algoritmo realizacija

Visa genetinio algoritmo realizacija vykdoma naudojantis važtaraščiu, sugeneruotu programinės įrangos pagalba. Jo formavimas pateikiamas funkcijoje *workingScript3*, o rezultatas 2-ame priede.

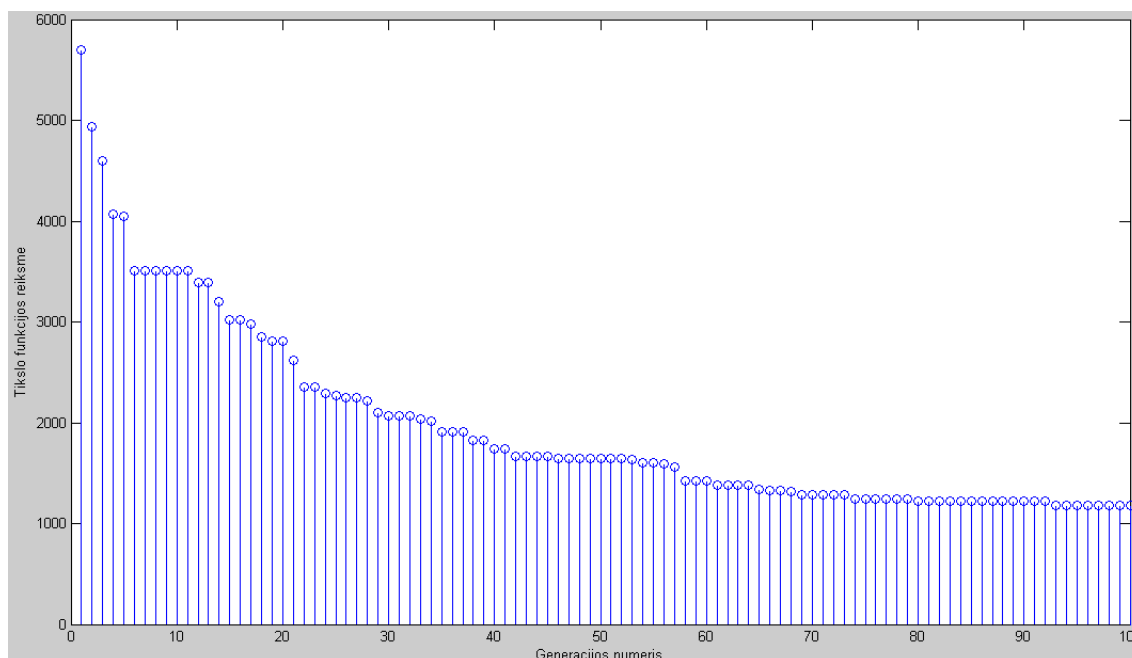
Pradinė populiacija yra sugeneruota remiantis Monte Karlo metodu. Darbo metu nekeičiami genetinio algoritmo parametrai yra šie:

- Dalyvių skaičius turnyrinėje atrankoje (toursize) = 10.
- Laimėjimo tikimybė (pwin) = 0.5.
- $P = 25$, kur $P = \text{Sąstato ilgis} / 20$.

Bei fiksuojamas pakartojimų skaičius (repeats) = 10.

Visų kitų parametru, kaip populiacijos dydis, elito dydis, generacijų skaičius, kryžminimo būdas ar mutacijos tikimybė, įtaka bus nagrinėjama tolimesniuose skyreliuose fiksuojant traukinio sąstato ilgį.

Įvykdę pagrindinę genetinio algoritmo funkciją su laisvai pasirenkamais parametrais, (pvz. `geneticDirect(500,20,100,0,01,10,0.5,V,25)`) 3.6 paveiksle pastebime tikslo funkcijos kitimo tendenciją nuo pasirinkto generacijų skaičiaus.



3.6 pav. Genetinis algoritmas su laisvai pasirenkamais parametrais

Remiantis tuo galima pradėti tirti, kokią įtaką tikslo funkcijai turi parinktas generacijų (kartų) skaičius.

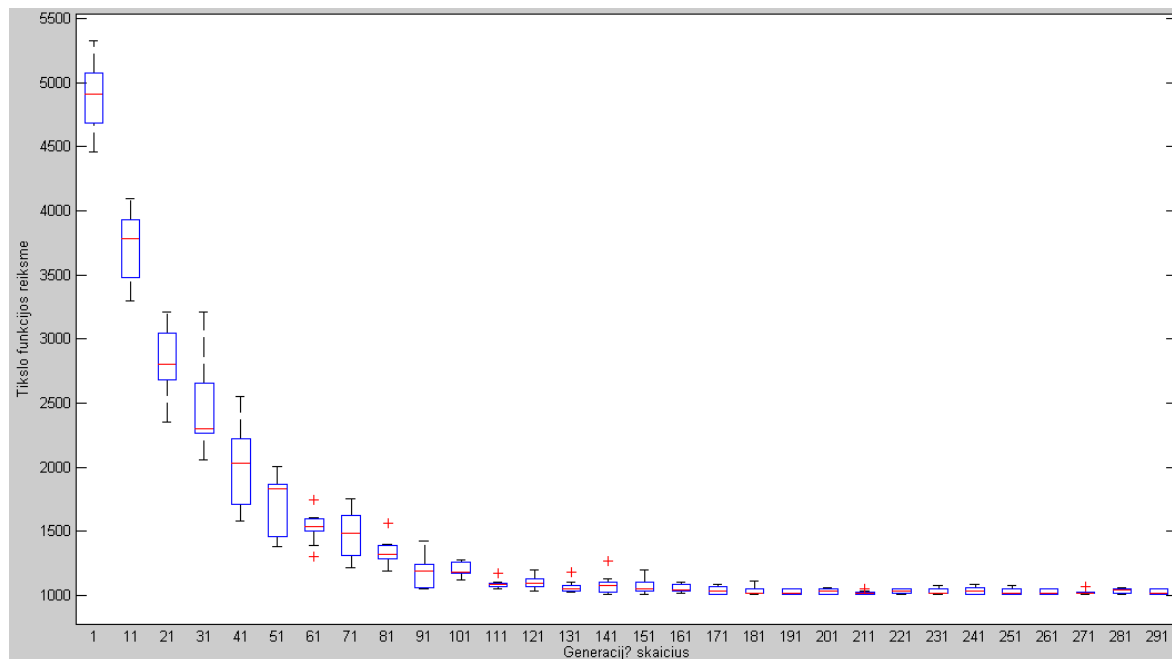
3.3.1. Generacijų (kartų) skaičiaus parametro tyrimas

Generacijų skaičius – vienas iš svarbiausių genetinio algoritmo parametru. Nuo šio parametro reikšmės priklauso tikimybės, rasti geriausią sprendinį, dydis bei algoritmo vykdymo „kaštai“ kompiuterio resursų prasme. Didesnės šio parametro reikšmės leidžia algoritmo evoliuciniams

procesams geriau atskleisti savo veiklos rezultatus ir taip pastebėti jų trūkumus ar privalumus. Tuo pabandykime įsitikinti, kintant generacijų skaičiui nuo 1 iki 300 žingsniu 10.

3.7 paveiksle pateikiame apskaičiuotos tikslo funkcijos reikšmės nuo minėto generacijų skaičiaus parametro kitimo priklausomybės grafiką, kai likusiems pagrindiniams genetinio algoritmo parametrams priskirtos tokios reikšmės:

- Populiacijos dydis = 300.
- Elito skaičius = 20.
- Mutacijos tikimybė = 0.03.



3.7 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo generacijų (kartų) skaičiaus kitimo intervale (1, 300)

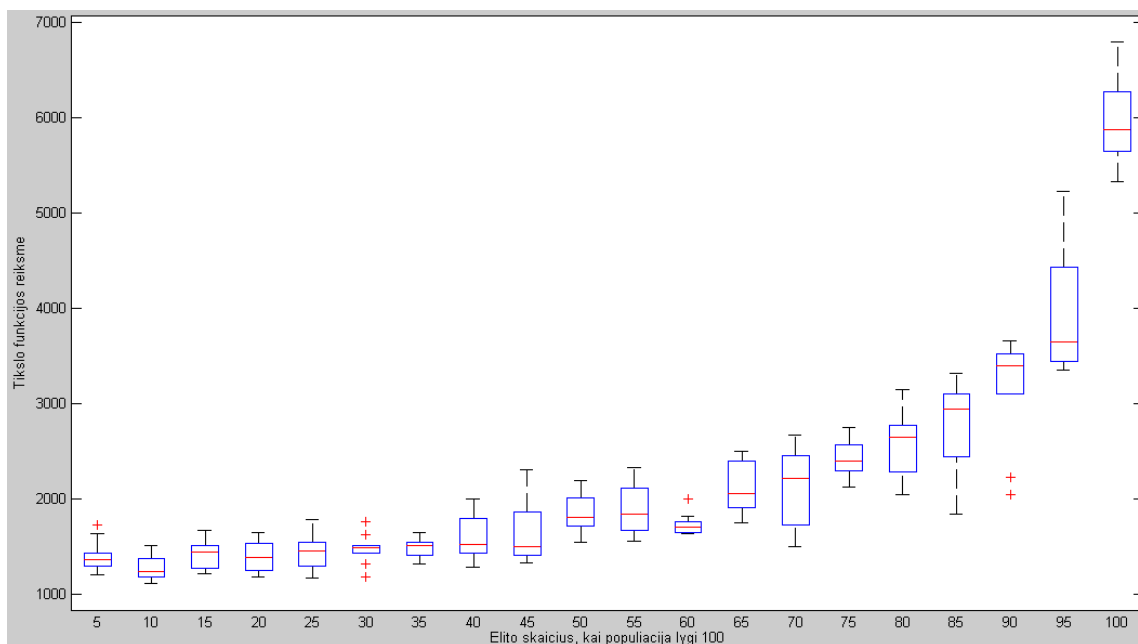
Iš grafiko matyti aiškus tikslo funkcijos kitimas, atsižvelgiant į generacijų skaičių. Nuo tam tikro generacijų skaičiaus tikslo funkcijos reikšmių pokytis labai neryškus. Tad tam, kad neapkrauti skaičiavimo proceso ir sutrumpinti programos darbo laiką, generacijų skaičių galima pasirinkti jau nuo 100-to ir gauti pakankamai tikslius skaičiavimo rezultatus.

3.3.2. Elito skaičiaus parinkimas populiacijos dydžiui

Dabar stebint genetinio algoritmo parametrus, pabandykime įvertinti kokį procentą, nuo generuojamos populiacijos, turi sudaryti elitas.

Paėmę atsitiktinį populiacijos dydį – 100 konteinerių rinkinių, tirsime tikslo funkcijos reikšmės priklausomybę nuo elito skaičiaus, kai likusiems pagrindiniams genetinio algoritmo parametrams priskirtos tokios reikšmės:

- Populiacijos dydis = 100.
- Generacijų (kartų) skaičius = 100.
- Mutacijos tikimybė = 0.03.



3.8 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo elito skaičiaus kitimo nurodytai populiacijai

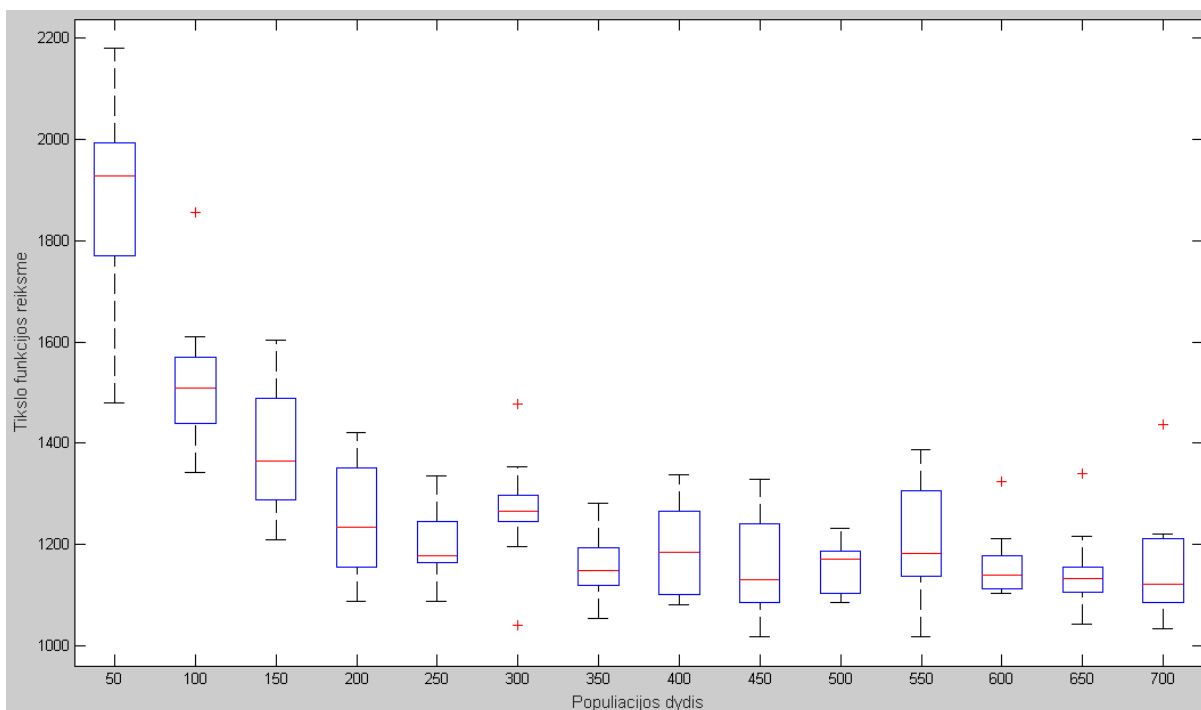
Iš 3.8 paveikslo matyti, kad nerekomenduotina elito skaičiaus imti daugiau nei 35 % nagrinėjamos populiacijos. Jei elitas parenkamas per didelis, tai visa populiacija linkusi konverguoti į šią genomą. Dėl šios priežasties yra stabdomas genetinio algoritmo progresas.

3.3.3. Populiacijos dydžio tyrimas

Dar vienas iš svarbiausių genetinio algoritmo parametrų yra populiacijos dydis. Didesnės šio parametro reikšmės padidina sprendinių (kandidatų) skaičių, dėl to padidėja algoritmo pasirinkimo galimybė. Tuo pabandykime įsitikinti, kintant populiacijos dydžiui nuo 50 iki 700 žingsniu 50.

3.9 paveiksle pateikiame apskaičiuotas tikslo funkcijos reikšmės nuo populiacijos dydžio parametro kitimo priklausomybės grafiką, kai likusiems pagrindiniams genetinio algoritmo parametrams priskirtos tokios reikšmės:

- Generacijų (kartų) skaičius = 100.
- Elito skaičius = 25.
- Mutacijos tikimybė = 0.03.



3.9 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo populiacijos dydžio kitimo intervale (50,700)

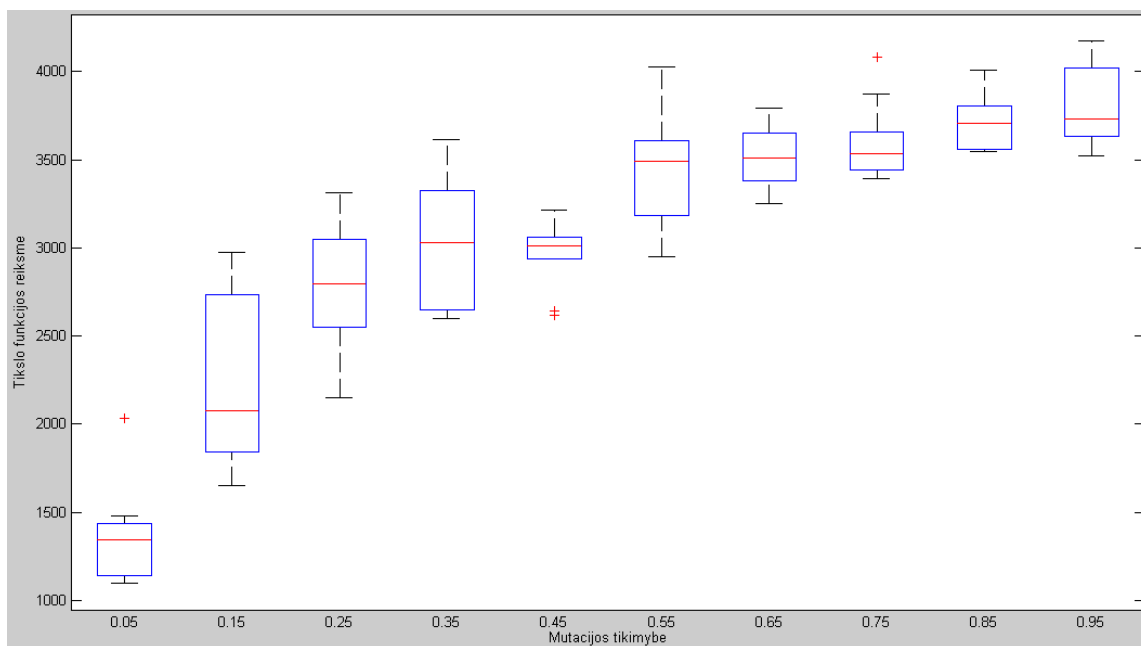
Remiantis 3.9 paveikslu, rekomenduotinas populiacijos dydis yra nuo 350 konteinerių rinkinių.

3.3.4. Mutacijos tikimybės tyrimas

Dviem etapais pabandydysime išsiaiškinti nagrinėjamam uždaviniui rekomenduojamą mutacijos tikimybės reikšmių intervalą. Pradžiai panagrinėsime platesnį tikimybės pasiskirstymą intervale (0,1).

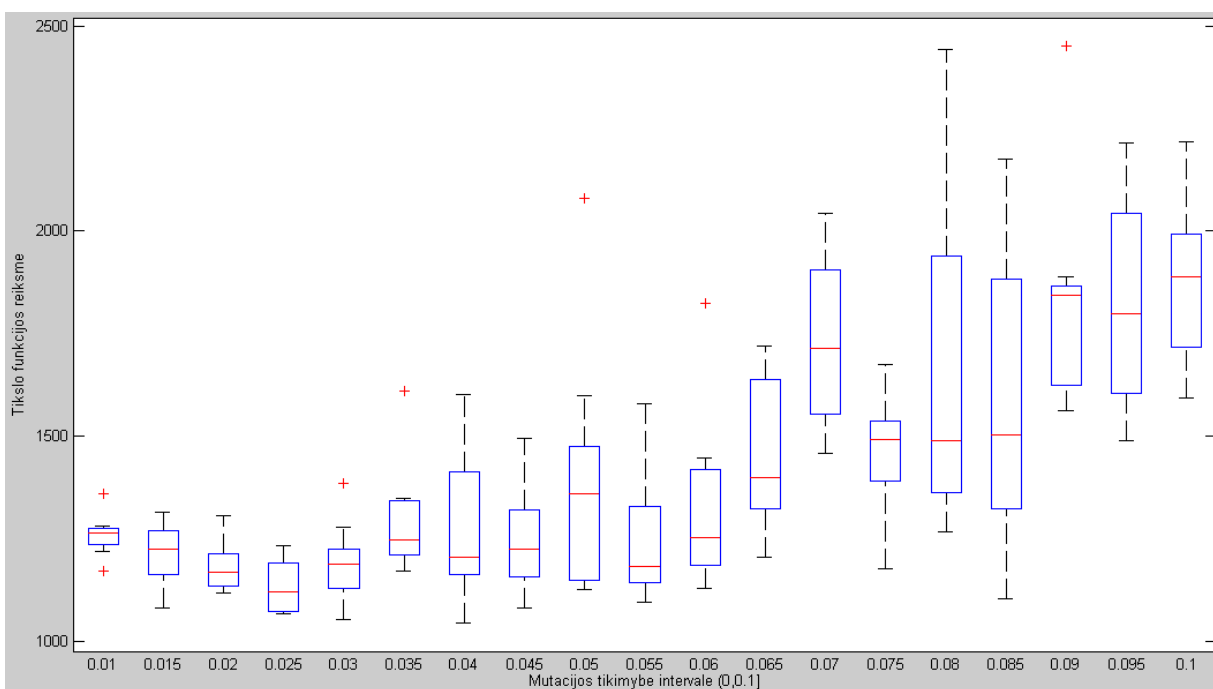
3.10 paveiksle pateikiame apskaičiuotas tikslo funkcijos reikšmės, nuo mutacijos tikimybės parametro kitimo intervale (0,1), priklausomybės grafiką, kai likusiems pagrindiniams genetinio algoritmo parametrams priskirtos tokios reikšmės:

- Generacijų (kartų) skaičius = 100.
- Elito skaičius = 25.
- Populiacijos dydis = 350.



3.10 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo mutacijos tikimybės kitimo intervale (0,1)

Pastebėję, kad iki mutacijos tikimybės reikšmės 0.15 tikslo funkcijos rezultatai geriausi, todėl tiksliname mutacijos tikimybės įtaką tikslo funkcijai, nurodę intervalą (0,0.1).



3.11 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo mutacijos tikimybės kitimo intervale (0,0.1)

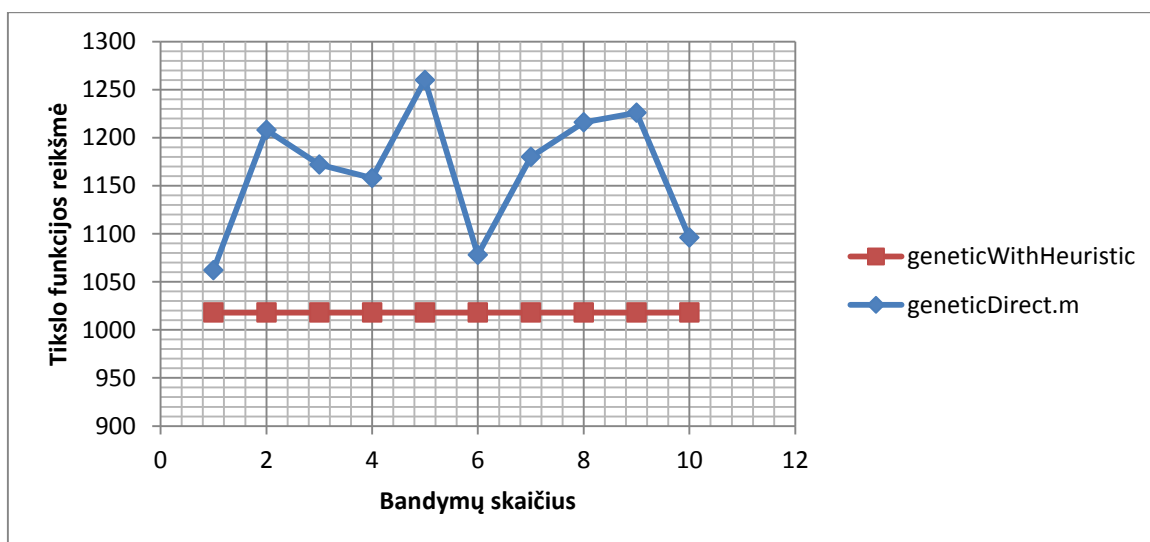
3.11 paveiksle galima pastebėti, jog mutacijos tikimybę rekomenduotina rinktis iš intervalo (0,0.035).

3.3.5. Kryžminimo metodų palyginimas

Žinant, kad kryžminimas leidžia efektyviai perrinkti didelį kiekį variantų, kadangi pradiniai sprendiniai formuojami atsitiktiniu būdu, tuo pat metu užtikrina ir tam tikrą sprendinių konvergavimą. Palyginsime 2.5.3 skyrelyje pateiktus kryžminimo metodo būdus.

Kaip ir visuose genetinio algoritmo parametrų tyrimuose, naudosime *workingScript3* važtaraštį. Tam, kad palygint kryžminimo metodus, po 10 kartų įvykdysime skirtingas genetinio algoritmo funkcijas *geneticDirect.m* ir *geneticWithHeuristic.m*. Jos skiriasi tuo, kad funkcija *geneticDirect.m*, vykdant kryžminimą, atsižvelgia į chromosomų tvarką, o funkcija *geneticWithHeuristic.m* vykdo chromosomų kryžminimą pagal euristiką ir neatsižvelgia į tvarką.

Bandymų rezultatai ir grafinais kiekvieno metodo pavyzdžiai nurodomi 3-iaame priede. Jų palyginimą pagal tikslo funkcijos reikšmes grafiškai galima pavaizduoti 3.12 paveiksle



3.12 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo kryžminimo metodo

Kaip pastebime, pagal euristiką vykdomo genetinio algoritmo tikslo funkcija po 100 generacijų visuose bandymuose išliko nepakitusi, tačiau, stebint 3-iaame priede pateiktą procesą, per greit nusistovėjusi tikslo funkcija stabdo genetinio algoritmo natūralų procesą. Kadangi algoritme vykdomi kryžminimai, atrankos bei mutacija labai įtakoja pačią tikslo funkciją, todėl artimesnis evoliucijos procesui yra vykdoma *geneticDirect.m* funkcija.

Įvertinus ir atsižvelgiant į atliktus tyrimus išvadų skyrelyje apibendrinsime rezultatus.

4. PROGRAMINĖ REALIZACIJA

Darbo rezultatų išvedimui naudojama programinės įrangos MATLAB pagalba. Tai daugiaplatformė MathWorks programinė įranga, skirta įvairių mokslo šakų problemoms spręsti, ypač matematinėms. Dabar tai didžiulis galingas paketas, turintis savitą lengvai perprantamą

programavimo kalbą. Nors simbolinėms matematinėms manipuliacijoms geriau tinka Maple ir Mathematica produktai, bet MATLAB kaip programavimo kalba turi didesnę lankstumą, kuris naudingas įvairiems fizikos, biologijos bei kitiems matematiniais modeliams kurti ir tirti. MATLAB pagrindinės taikymo sritys:

- Matematika ir skaičiavimai;
- Algoritmų sudarymas;
- Skaičiavimo eksperimentai, imitacinis modeliavimas;
- Duomenų analizė, rezultatų tyrimas, vizualizacija ir kt.

Dauguma darbe naudojamų funkcijų yra skirtos konkrečiam uždavinio rezultatui išvesti ir pademonstruoti. Toliau šiame skyriuje pateikiame svarbiausių darbe naudotų programinės įrangos funkcijų trumpą aprašymą.

Kad būtų aiškiau, funkcijas suskirstome pagal panaudojimą atitinkamuose metoduose.

Pilnas perrinkimas:

- *bruteForce2.m* – grąžina minimalią ir maksimalią tikslo funkcijos (atstumo) reikšmes ir atitinkamus konteinerių išdėstymus, remiantis leksikografinė tvarka nubraižo 3.2 ir 3.3 paveiksluose pateiktus grafikus bei sukuria lentelę *lentele.xls* formatu, kurioje pateiktos tikslo funkcijų reikšmių x ir y dedamosios, funkcijos viduje nurodant parametrą P ir važtaraštį, kuriame $N \geq P$ ir $M \geq \left\lfloor \frac{P}{2} \right\rfloor$.
- *fitFunXY(A,V)* – apskaičiuoja bendrą tikslo funkcijos reikšmę pagal konteinerių rinkinį A ir važtaraštį V , bei atskiria tikslo funkcijos x ir y dedamąsias.
- *bruteForceOneComb(A,V)* – pritaiko pilną perrinkimą, kai jau parinktas konteinerių rinkinys A iš važtaraščio V , bet reikia rasti konteinerių išsirikiavimą rinkinyje. Taip pat grąžina konteinerių kombinaciją, turinčią mažiausią tikslo funkciją, prieš tai išdėstydamas visas galimas kombinacijas.

Pilnas perrinkimas su apribojimais:

- *bruteForceWithConstraints(x₀,L,I,V)* – vykdo pilną perrinkimą su apribojimais, kai nurodoma pradinė krano strėlės koordinatė x_0 , konteinerių ilgių vektorius L , konteinerio vietos sąstate vektorius I ir važtaraštis V . Ši funkcija paleidžiama per skriptą pavadinimu *tempScript.m*.
- *tempScript.m* – grąžina visas imamų konteinerių tvarkas, randa kiekvienos tvarkos tikslo funkciją ir pabaigoje nurodo minimalią konteinerių užpildomų vietų tvarką, nurodo kurie tai konteineriai bei jų tikslo funkciją.

Monte Karlo metodas:

- *monteCarlo(V,P,NN)* – iš važtaraščio V atsitiktinai sugeneruoja NN sprendinių (konteinerių rinkinių), kurie tilptų į traukinio sąstato ilgį $L = 20 \cdot P$, $P \in \mathbb{N}$. Taip pat gražina minimalią ir maksimalią tikslo funkcijos (atstumo) reikšmes ir atitinkamus konteinerių išdėstymus ir nubraižo 3.5(1) paveiksle pateiktą grafiką.

Genetinis algoritmas:

- *geneticWithHeuristic(popsiz, elit, genercount, crossprob, mutprob, toursiz, pwin, V, P)* – nurodant atitinkamus parametrus, funkcija pritaiko genetinį algoritmą, kuomet chromosomose nekreipiama dėmesio į konteinerio išsidėstymo tvarką. Skaičiuoja pagal euristiką, naudojant turnyrinę atranką, surašiuoja chromosomas po kryžminimo, vykdo mutaciją ir vėl perskaičiuoja tikslo funkcijos reikšmes, gražina 3.6 paveiksle pavaizduotą grafiką, mažiausią rastą reikšmę ir ją atitinkantį konteinerių rinkinį. Prieš funkciją reikia nurodyti važtaraštį *workingScript3*;
- *tournamentSelection(pop, vals, toursiz, 2, pwin)* – atrenka chromosomas (konteinerių rinkinius) iš populiacijos *pop*, pagal tikslo funkcijos reikšmę *vals*, nurodomas dalyvių skaičių *toursiz* į kryžminimo populiaciją turnyro būdu ir gražina 2 geriausius tėvus, su laimėjimo tikimybe *pwin*.
- *randomHalfCrossover(par1, par2, P, V)* – kryžminimas skeliant pusiau neatsižvelgiant į tvarką, nurodant turnyro metu laimėjusius tėvus *par1* ir *par2*, atsižvelgiant į sąstato ilgį $L = 20 \cdot P$, $P \in \mathbb{N}$ ir važtaraštį V .
- *mutateChromosome(chrom, mutprob, V)* – vykdoma vaikų mutacija, kiekvienos chromosomos *chrom* geną pakeičiant kitu tos pačios rūšies genu, nepatenkančiu į chromosomą, su mutacijos tikimybe *mutprob* iš važtaraščio V . Jei bandymų skaičius pasibaigia ir nėra kuo pakeisti geną, tuomet mutacija neįvyksta.
- *geneticDirect(popsiz, elit, genercount, mutprob, toursiz, pwin, V, P)* – remiantis atitinkamais parametrais, pritaiko genetinį algoritmą, kuomet kreipiamas dėmesys į konteinerių išsidėstymo tvarką.
- *randomSubsetOrderCrossover(par1, par2, V)* – kryžminimo metodas, atsižvelgiant į tėvų *par1* ir *par2* konteinerių išsidėstymo tvarką. Ieškoma bendrų genų ir jie dedami į vaiko *child* chromosomą tose pačiose pozicijose, kaip ir pirmame tėve.

Pastaba. Vykiant *monteCarlo.m*, *geneticDirect.m* bei *geneticWithHeuristic.m* funkcijas prieš jas nurodoma važtaraščio sukūrimo funkcija *workingScript3*.

IŠVADOS

1. Pilnojo perrinkimo algoritmas labiau tinkamas naudoti mažesnės apimties (t.y. iki $P = 6$) pakrovimo uždaviniams optimizuoti.
2. Remiantis atsitiktinių sprendinių generavimu Monte Karlo metodu pastebėjome, kad mažesnė tikslo funkcija randama generuojant kuo daugiau sprendinių.
3. Tiriant genetiniu algoritmu tikslo funkcijos priklausomybę nuo generacijų (kartų) skaičiaus, gauta, kad rekomenduojamas generacijų skaičiaus parinkimas nuo 100.
4. Įvertinat tikslo funkcijos priklausomybę nuo pradinės populiacijos dydžio, gauta, kad pradinė populiacija turi viršyti 350 chromosomų (konteinerių rinkinių).
5. Tiriant elito skaičių populiacijoje, nustatyta, kad jis neturėtų viršyti 35 % populiacijos dydžio.
6. Remiantis tikslo funkcijos priklausomybės nuo mutacijos tikimybės tyrimu, gauta, kad ji turi patekti į (0,0.035) intervalą.
7. Palyginus kryžminimo metodus, nutarta chromosomas (konteinerių rinkinius) kryžminti atsižvelgiant į konteinerių išsidėstymo tvarką.
8. Apjungiant genetinio algoritmo parametrų tyrimus, paaiškėjo, kad šį algoritmą rekomenduotina vykdyti, pateikiant *geneticDirect.m* funkciją su atitinkamai ištirtais parametrais, pvz.: *geneticDirect(350,20,100,0,025,10,0.5,V,25)*.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Baublys, A.; Vasiliauskas, A. V. *Transporto infrastruktūra*. Vilnius: Technika, 2011. 12-13 p.
2. Klaipėdos jūrų uosto statistika [interaktyvus]. Klaipėda, 2015 [žiūrėta 2015 01 25]. Prieiga per internetą: <http://www.portofklaipeda.lt/uosto-statistika>
3. Minalga, R. *Logistika*. Vilnius: Petro ofsetas, 2001.
4. Baublys, A. *Krovinių vežimas*. Vilnius: Technika, 2002.
5. Vasiliauskas, A. V. *Krovinių vežimo technologijos*. Klaipėda, 2013. 184 p.
6. Geležinkeliai. Bendrasis kursas. Vilnius: Technika, 2009. 197-200 p.
7. Ioannou, E. B.; Kosmatopoulos, J. H.; Collinge, A.; Liu, C.I.; Asef-Vaziri, A. *Cargo Handling Technologies*. Los Angeles, California: University of Southern California Center for Advanced Transportation Technologies, 2000.
8. Dirk, K.; Sefan, V.; Robert, S. *Container Terminal Operation and Operation Research. A Classification and literature Review*. OR Spectrum, 26 (1),2004, p. 3-49.
9. Henesey, L. E. *Multi-Agent Systems for Container Terminal Management*. Kalskrona, Sweden: Kaserntryckeriet, 2006, p. 4-72.
10. Kalmar. Kalmar Industries Corporate [online]. [veiwed 17 02 2015]. Available from: <http://www.kalmarind.com>.
11. Noell. Noell Crane System [online]. [viewed 17 02 2015]. Available from: <http://www.noellcranesystems.com/index.php>.
12. Egbelu, P. T. Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules. *International Journal of production Research*, 22 (3), 1984, p. 359-374.
13. Evers, J.; Koppers, S. J. Automated Guided vehicle Traffic Control at a Container Terminal. *Transportation Research*, 30 (1), 1996, p. 21-34.
14. Siemens, A. G. Siemens – crane solutions – ports and terminals – straddle carrier, 2007(I) [online]. [viewed 19 02 2015]. Available from: <http://www.automation.siemens.com/mc/cranes/en/c5eb153c-a15e-11d7-b54c-0050da4caaa9/index.aspx>.
15. Siemens, A. G. Siemens – crane solutions – ports & terminals – rail mounted gantry (RMG) cranes, 2007(II) [online]. [viewed 19 02 2015]. Available from: <http://www.automation.siemens.com/mc/cranes/en/c5eb153b-a15e-11d7-b54c-0050da4caaa9/index.aspx>.
16. Siemens, A. G. Siemens – crane solutions – ports & terminals – rubber tired gantry (RTG) cranes, 2007(III). [online]. [viewed 19 02 2015]. Available from:

- <http://www.automation.siemens.com/mc/cranes/en/c5eb153a-a15e-11d7-b54c-0050da4caaa9/index.aspx>.
17. Bischof, K. D.; Meister, H.; Pyell, G. ir kt. *Ekspedicinių ir transporto įmonių vadyba*. Vilnius: Presvika.
 18. Minalga R. *Tarptautinė logistika*. Vilnius: Homo Liber, 2004.
 19. Baublys, A. Transporto rūšių sąveika. Vilniu: Technika, 2007. 77-81, 88-97 p.
 20. Anghinolfi, D.; Caballini, C.; Sacone, S. Optimizing train loading operations in innovative and automated container terminals. Cape Town, South Africa: Preprints of the 19th World Congress, 2014.
 21. NEOS Guide Optimization Tree. [online]. [viewed 17 03 2015]. Available from: <http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/OptWeb/index.html>.
 22. Žilinskas, A. Matematinis programavimas. 2005. 7-176 p.
 23. Corry P., Kozan E. Optimised loading patterns for intermodal trains. *OR Spectrum*, 30(4), p. 721-750.
 24. Guo P., Cheng W., Liang J. Particle Swarm Optimization for Gantry Crane Scheduling with Interference Constraints. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(9): 2012, p. 1117-1123.
 25. Puglierin, F. A bandit-Inspired Memetic Algorithm for Quadratic Assignment Problems. [online]. [viewed 25 03 2015]. Available from: http://www.ai.rug.nl/~mwiering/Thesis_Francesco_Puglierin.pdf.
 26. Holland, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
 27. Harmeling, S. Solving Satisfiability Problems with Genetic Algorithms, 2000 [online]. [viewed 29 03 2015]. Available from: http://ida.first.fraunhofer.de/~harmeli/pubs/genetic_sat.pdf.
 28. Yu, H.; Marinescu, D. C.; Wu, A. S. A Genetic Approach to Planning in Heterogeneous Computing Environments, 2003. [online]. [viewed 29 03 2015]. Available from <http://www.cs.ucf.edu/~ecl/papers/0304.hcw.pdf>.

PRIEDAI

Priedas 1. *bruteForce2.m* funkcijos rezultatai, kai $P = 4$, $N = 5$ ir $M = 3$.

Minimalios ir maksimalios tikslo funkcijos reikšmės, bei jas atitinkantys konteinerių rinkiniai:

minimum = 96.0

min point =

-1

-2

maximum = 442.0

max point =

3

4

5

1

Visų galimų sprendinių tikslo funkcijų reikšmės ir atskirtos x ir y komponentės:

Eil. nr.	Tikslo f.	Tikslo f. x	Tikslo f. y	Rinkinys	Eil. nr.	Tikslo f.	Tikslo f. x	Tikslo f. y	Rinkinys
1	134	94	40	[1,2,3,4]	154	348	310	38	[3,-3,1]
2	168	128	40	[1,2,4,3]	155	262	224	38	[-3,1,3]
3	168	128	40	[1,3,2,4]	156	328	290	38	[-3,3,1]
4	242	202	40	[1,3,4,2]	157	230	192	38	[1,4,-1]
5	202	162	40	[1,4,2,3]	158	120	82	38	[1,-1,4]
6	242	202	40	[1,4,3,2]	159	264	226	38	[4,1,-1]
7	168	128	40	[2,1,3,4]	160	288	250	38	[4,-1,1]
8	202	162	40	[2,1,4,3]	161	128	90	38	[-1,1,4]
9	242	202	40	[2,3,1,4]	162	228	190	38	[-1,4,1]
10	322	282	40	[2,3,4,1]	163	190	152	38	[1,4,-2]
11	276	236	40	[2,4,1,3]	164	140	102	38	[1,-2,4]
12	322	282	40	[2,4,3,1]	165	224	186	38	[4,1,-2]
13	202	162	40	[3,1,2,4]	166	308	270	38	[4,-2,1]
14	276	236	40	[3,1,4,2]	167	188	150	38	[-2,1,4]
15	242	202	40	[3,2,1,4]	168	288	250	38	[-2,4,1]
16	322	282	40	[3,2,4,1]	169	250	212	38	[1,4,-3]
17	350	310	40	[3,4,1,2]	170	220	182	38	[1,-3,4]
18	356	316	40	[3,4,2,1]	171	284	246	38	[4,1,-3]
19	236	196	40	[4,1,2,3]	172	388	350	38	[4,-3,1]
20	276	236	40	[4,1,3,2]	173	268	230	38	[-3,1,4]
21	276	236	40	[4,2,1,3]	174	368	330	38	[-3,4,1]
22	322	282	40	[4,2,3,1]	175	270	232	38	[1,5,-1]
23	350	310	40	[4,3,1,2]	176	160	122	38	[1,-1,5]

24	356	316	40	[4,3,2,1]	177	304	266	38	[5,1,-1]
25	174	134	40	[1,2,3,5]	178	328	290	38	[5,-1,1]
26	208	168	40	[1,2,5,3]	179	168	130	38	[-1,1,5]
27	208	168	40	[1,3,2,5]	180	268	230	38	[-1,5,1]
28	282	242	40	[1,3,5,2]	181	230	192	38	[1,5,-2]
29	242	202	40	[1,5,2,3]	182	180	142	38	[1,-2,5]
30	282	242	40	[1,5,3,2]	183	264	226	38	[5,1,-2]
31	208	168	40	[2,1,3,5]	184	348	310	38	[5,-2,1]
32	242	202	40	[2,1,5,3]	185	228	190	38	[-2,1,5]
33	282	242	40	[2,3,1,5]	186	328	290	38	[-2,5,1]
34	362	322	40	[2,3,5,1]	187	290	252	38	[1,5,-3]
35	316	276	40	[2,5,1,3]	188	260	222	38	[1,-3,5]
36	362	322	40	[2,5,3,1]	189	324	286	38	[5,1,-3]
37	242	202	40	[3,1,2,5]	190	428	390	38	[5,-3,1]
38	316	276	40	[3,1,5,2]	191	308	270	38	[-3,1,5]
39	282	242	40	[3,2,1,5]	192	408	370	38	[-3,5,1]
40	362	322	40	[3,2,5,1]	193	230	192	38	[2,3,-1]
41	390	350	40	[3,5,1,2]	194	154	116	38	[2,-1,3]
42	396	356	40	[3,5,2,1]	195	230	192	38	[3,2,-1]
43	276	236	40	[5,1,2,3]	196	208	170	38	[3,-1,2]
44	316	276	40	[5,1,3,2]	197	108	70	38	[-1,2,3]
45	316	276	40	[5,2,1,3]	198	148	110	38	[-1,3,2]
46	362	322	40	[5,2,3,1]	199	190	152	38	[2,3,-2]
47	390	350	40	[5,3,1,2]	200	174	136	38	[2,-2,3]
48	396	356	40	[5,3,2,1]	201	190	152	38	[3,2,-2]
49	214	174	40	[1,2,4,5]	202	228	190	38	[3,-2,2]
50	214	174	40	[1,2,5,4]	203	168	130	38	[-2,2,3]
51	248	208	40	[1,4,2,5]	204	208	170	38	[-2,3,2]
52	322	282	40	[1,4,5,2]	205	250	212	38	[2,3,-3]
53	248	208	40	[1,5,2,4]	206	254	216	38	[2,-3,3]
54	322	282	40	[1,5,4,2]	207	250	212	38	[3,2,-3]
55	248	208	40	[2,1,4,5]	208	308	270	38	[3,-3,2]
56	248	208	40	[2,1,5,4]	209	248	210	38	[-3,2,3]
57	322	282	40	[2,4,1,5]	210	288	250	38	[-3,3,2]
58	402	362	40	[2,4,5,1]	211	270	232	38	[2,4,-1]
59	322	282	40	[2,5,1,4]	212	160	122	38	[2,-1,4]
60	402	362	40	[2,5,4,1]	213	270	232	38	[4,2,-1]
61	282	242	40	[4,1,2,5]	214	248	210	38	[4,-1,2]
62	356	316	40	[4,1,5,2]	215	114	76	38	[-1,2,4]
63	322	282	40	[4,2,1,5]	216	188	150	38	[-1,4,2]
64	402	362	40	[4,2,5,1]	217	230	192	38	[2,4,-2]
65	430	390	40	[4,5,1,2]	218	180	142	38	[2,-2,4]
66	436	396	40	[4,5,2,1]	219	230	192	38	[4,2,-2]
67	282	242	40	[5,1,2,4]	220	268	230	38	[4,-2,2]
68	356	316	40	[5,1,4,2]	221	174	136	38	[-2,2,4]
69	322	282	40	[5,2,1,4]	222	248	210	38	[-2,4,2]

70	402	362	40	[5,2,4,1]	223	290	252	38	[2,4,-3]
71	430	390	40	[5,4,1,2]	224	260	222	38	[2,-3,4]
72	436	396	40	[5,4,2,1]	225	290	252	38	[4,2,-3]
73	254	214	40	[1,3,4,5]	226	348	310	38	[4,-3,2]
74	254	214	40	[1,3,5,4]	227	254	216	38	[-3,2,4]
75	254	214	40	[1,4,3,5]	228	328	290	38	[-3,4,2]
76	288	248	40	[1,4,5,3]	229	310	272	38	[2,5,-1]
77	254	214	40	[1,5,3,4]	230	200	162	38	[2,-1,5]
78	288	248	40	[1,5,4,3]	231	310	272	38	[5,2,-1]
79	288	248	40	[3,1,4,5]	232	288	250	38	[5,-1,2]
80	288	248	40	[3,1,5,4]	233	154	116	38	[-1,2,5]
81	362	322	40	[3,4,1,5]	234	228	190	38	[-1,5,2]
82	442	402	40	[3,4,5,1]	235	270	232	38	[2,5,-2]
83	362	322	40	[3,5,1,4]	236	220	182	38	[2,-2,5]
84	442	402	40	[3,5,4,1]	237	270	232	38	[5,2,-2]
85	288	248	40	[4,1,3,5]	238	308	270	38	[5,-2,2]
86	322	282	40	[4,1,5,3]	239	214	176	38	[-2,2,5]
87	362	322	40	[4,3,1,5]	240	288	250	38	[-2,5,2]
88	442	402	40	[4,3,5,1]	241	330	292	38	[2,5,-3]
89	396	356	40	[4,5,1,3]	242	300	262	38	[2,-3,5]
90	442	402	40	[4,5,3,1]	243	330	292	38	[5,2,-3]
91	288	248	40	[5,1,3,4]	244	388	350	38	[5,-3,2]
92	322	282	40	[5,1,4,3]	245	294	256	38	[-3,2,5]
93	362	322	40	[5,3,1,4]	246	368	330	38	[-3,5,2]
94	442	402	40	[5,3,4,1]	247	310	272	38	[3,4,-1]
95	396	356	40	[5,4,1,3]	248	200	162	38	[3,-1,4]
96	442	402	40	[5,4,3,1]	249	310	272	38	[4,3,-1]
97	294	254	40	[2,3,4,5]	250	234	196	38	[4,-1,3]
98	294	254	40	[2,3,5,4]	251	120	82	38	[-1,3,4]
99	294	254	40	[2,4,3,5]	252	154	116	38	[-1,4,3]
100	328	288	40	[2,4,5,3]	253	270	232	38	[3,4,-2]
101	294	254	40	[2,5,3,4]	254	220	182	38	[3,-2,4]
102	328	288	40	[2,5,4,3]	255	270	232	38	[4,3,-2]
103	294	254	40	[3,2,4,5]	256	254	216	38	[4,-2,3]
104	294	254	40	[3,2,5,4]	257	180	142	38	[-2,3,4]
105	328	288	40	[3,4,2,5]	258	214	176	38	[-2,4,3]
106	402	362	40	[3,4,5,2]	259	330	292	38	[3,4,-3]
107	328	288	40	[3,5,2,4]	260	300	262	38	[3,-3,4]
108	402	362	40	[3,5,4,2]	261	330	292	38	[4,3,-3]
109	294	254	40	[4,2,3,5]	262	334	296	38	[4,-3,3]
110	328	288	40	[4,2,5,3]	263	260	222	38	[-3,3,4]
111	328	288	40	[4,3,2,5]	264	294	256	38	[-3,4,3]
112	402	362	40	[4,3,5,2]	265	350	312	38	[3,5,-1]
113	362	322	40	[4,5,2,3]	266	240	202	38	[3,-1,5]
114	402	362	40	[4,5,3,2]	267	350	312	38	[5,3,-1]
115	294	254	40	[5,2,3,4]	268	274	236	38	[5,-1,3]

116	328	288	40	[5,2,4,3]	269	160	122	38	[-1,3,5]
117	328	288	40	[5,3,2,4]	270	194	156	38	[-1,5,3]
118	402	362	40	[5,3,4,2]	271	310	272	38	[3,5,-2]
119	362	322	40	[5,4,2,3]	272	260	222	38	[3,-2,5]
120	402	362	40	[5,4,3,2]	273	310	272	38	[5,3,-2]
121	150	112	38	[1,2,-1]	274	294	256	38	[5,-2,3]
122	128	90	38	[1,-1,2]	275	220	182	38	[-2,3,5]
123	184	146	38	[2,1,-1]	276	254	216	38	[-2,5,3]
124	208	170	38	[2,-1,1]	277	370	332	38	[3,5,-3]
125	156	118	38	[-1,1,2]	278	340	302	38	[3,-3,5]
126	182	144	38	[-1,2,1]	279	370	332	38	[5,3,-3]
127	110	72	38	[1,2,-2]	280	374	336	38	[5,-3,3]
128	148	110	38	[1,-2,2]	281	300	262	38	[-3,3,5]
129	144	106	38	[2,1,-2]	282	334	296	38	[-3,5,3]
130	228	190	38	[2,-2,1]	283	390	352	38	[4,5,-1]
131	216	178	38	[-2,1,2]	284	280	242	38	[4,-1,5]
132	242	204	38	[-2,2,1]	285	390	352	38	[5,4,-1]
133	170	132	38	[1,2,-3]	286	280	242	38	[5,-1,4]
134	228	190	38	[1,-3,2]	287	200	162	38	[-1,4,5]
135	204	166	38	[2,1,-3]	288	200	162	38	[-1,5,4]
136	308	270	38	[2,-3,1]	289	350	312	38	[4,5,-2]
137	296	258	38	[-3,1,2]	290	300	262	38	[4,-2,5]
138	322	284	38	[-3,2,1]	291	350	312	38	[5,4,-2]
139	190	152	38	[1,3,-1]	292	300	262	38	[5,-2,4]
140	114	76	38	[1,-1,3]	293	260	222	38	[-2,4,5]
141	224	186	38	[3,1,-1]	294	260	222	38	[-2,5,4]
142	248	210	38	[3,-1,1]	295	410	372	38	[4,5,-3]
143	122	84	38	[-1,1,3]	296	380	342	38	[4,-3,5]
144	188	150	38	[-1,3,1]	297	410	372	38	[5,4,-3]
145	150	112	38	[1,3,-2]	298	380	342	38	[5,-3,4]
146	134	96	38	[1,-2,3]	299	340	302	38	[-3,4,5]
147	184	146	38	[3,1,-2]	300	340	302	38	[-3,5,4]
148	268	230	38	[3,-2,1]	301	96	60	36	[-1,-2]
149	182	144	38	[-2,1,3]	302	176	140	36	[-2,-1]
150	248	210	38	[-2,3,1]	303	156	120	36	[-1,-3]
151	210	172	38	[1,3,-3]	304	256	220	36	[-3,-1]
152	214	176	38	[1,-3,3]	305	216	180	36	[-2,-3]
153	244	206	38	[3,1,-3]	306	236	200	36	[-3,-2]

Priedas 2. Važtaraštis workingScript3

Kont. Nr	x kord.	y kord.	z kord.	Ilgis	Kont. Nr	x kord.	y kord.	z kord.	Ilgis
1	29	-10	0	20	-61	37	-60	0	40
2	45	-10	0	20	-62	60	-60	0	40
3	55	-10	0	20	-63	90	-60	0	40
4	75	-10	0	20	-64	115	-60	0	40
5	88	-10	0	20	-65	137	-60	0	40
6	100	-10	0	20	-66	162	-60	0	40
7	116	-10	0	20	-67	187	-60	0	40
8	133	-10	0	20	-68	215	-60	0	40
9	150	-10	0	20	-69	237	-60	0	40
10	165	-10	0	20	-70	260	-60	0	40
11	175	-10	0	20	-71	289	-60	0	40
12	195	-10	0	20	-72	312	-60	0	40
13	210	-10	0	20	-73	336	-60	0	40
14	222	-10	0	20	-74	362	-60	0	40
15	239	-10	0	20	-75	385	-60	0	40
16	250	-10	0	20	-76	410	-60	0	40
17	267	-10	0	20	-77	440	-60	0	40
18	285	-10	0	20	-78	465	-60	0	40
19	299	-10	0	20	-79	488	-60	0	40
20	315	-10	0	20	-80	510	-60	0	40
21	328	-10	0	20	-81	536	-60	0	40
22	340	-10	0	20	-82	562	-60	0	40
23	360	-10	0	20	-83	589	-60	0	40
24	375	-10	0	20	-84	610	-60	0	40
25	389	-10	0	20	-85	635	-60	0	40
26	404	-10	0	20	-86	661	-60	0	40
27	419	-10	0	20	-87	688	-60	0	40
28	432	-10	0	20	-88	714	-60	0	40
29	448	-10	0	20	-89	738	-60	0	40
30	461	-10	0	20	-90	762	-60	0	40
-1	39	-20	0	40	91	28	-70	0	20
-2	60	-20	0	40	92	41	-70	0	20
-3	86	-20	0	40	93	59	-70	0	20
-4	110	-20	0	40	94	71	-70	0	20
-5	135	-20	0	40	95	89	-70	0	20
-6	164	-20	0	40	96	101	-70	0	20
-7	189	-20	0	40	97	117	-70	0	20
-8	211	-20	0	40	98	133	-70	0	20
-9	240	-20	0	40	99	149	-70	0	20
-10	260	-20	0	40	100	160	-70	0	20
-11	287	-20	0	40	101	180	-70	0	20
-12	312	-20	0	40	102	194	-70	0	20
-13	339	-20	0	40	103	207	-70	0	20

-14	364	-20	0	40	104	222	-70	0	20
-15	386	-20	0	40	105	237	-70	0	20
-16	412	-20	0	40	106	251	-70	0	20
-17	437	-20	0	40	107	268	-70	0	20
-18	463	-20	0	40	108	283	-70	0	20
-19	489	-20	0	40	109	299	-70	0	20
-20	514	-20	0	40	110	314	-70	0	20
-21	536	-20	0	40	111	328	-70	0	20
-22	564	-20	0	40	112	342	-70	0	20
-23	588	-20	0	40	113	359	-70	0	20
-24	610	-20	0	40	114	373	-70	0	20
-25	635	-20	0	40	115	387	-70	0	20
-26	662	-20	0	40	116	405	-70	0	20
-27	690	-20	0	40	117	420	-70	0	20
-28	712	-20	0	40	118	433	-70	0	20
-29	738	-20	0	40	119	448	-70	0	20
-30	761	-20	0	40	120	463	-70	0	20
31	29	-30	0	20	-91	36	-80	0	40
32	41	-30	0	20	-92	61	-80	0	40
33	58	-30	0	20	-93	87	-80	0	40
34	74	-30	0	20	-94	111	-80	0	40
35	90	-30	0	20	-95	140	-80	0	40
36	105	-30	0	20	-96	161	-80	0	40
37	118	-30	0	20	-97	186	-80	0	40
38	130	-30	0	20	-98	211	-80	0	40
39	145	-30	0	20	-99	236	-80	0	40
40	161	-30	0	20	-100	262	-80	0	40
41	180	-30	0	20	-101	286	-80	0	40
42	191	-30	0	20	-102	315	-80	0	40
43	209	-30	0	20	-103	337	-80	0	40
44	221	-30	0	20	-104	361	-80	0	40
45	240	-30	0	20	-105	390	-80	0	40
46	252	-30	0	20	-106	415	-80	0	40
47	266	-30	0	20	-107	437	-80	0	40
48	281	-30	0	20	-108	460	-80	0	40
49	298	-30	0	20	-109	486	-80	0	40
50	312	-30	0	20	-110	512	-80	0	40
51	327	-30	0	20	-111	538	-80	0	40
52	344	-30	0	20	-112	561	-80	0	40
53	358	-30	0	20	-113	588	-80	0	40
54	373	-30	0	20	-114	614	-80	0	40
55	390	-30	0	20	-115	636	-80	0	40
56	401	-30	0	20	-116	660	-80	0	40
57	419	-30	0	20	-117	686	-80	0	40
58	434	-30	0	20	-118	711	-80	0	40
59	447	-30	0	20	-119	737	-80	0	40

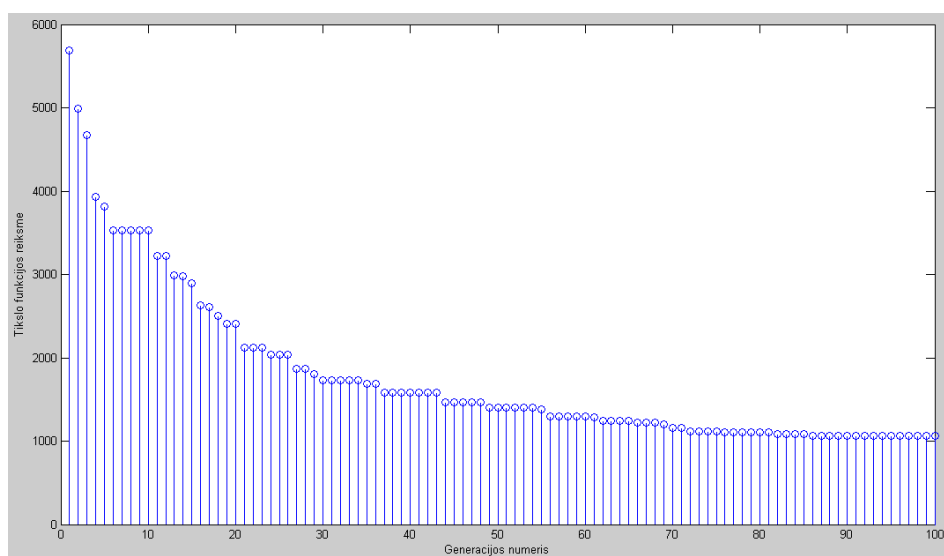
60	463	-30	0	20	-120	763	-80	0	40
-31	35	-40	0	40	121	25	-90	0	20
-32	60	-40	0	40	122	41	-90	0	20
-33	88	-40	0	40	123	59	-90	0	20
-34	114	-40	0	40	124	70	-90	0	20
-35	140	-40	0	40	125	90	-90	0	20
-36	160	-40	0	40	126	104	-90	0	20
-37	188	-40	0	40	127	117	-90	0	20
-38	212	-40	0	40	128	133	-90	0	20
-39	235	-40	0	40	129	146	-90	0	20
-40	262	-40	0	40	130	162	-90	0	20
-41	285	-40	0	40	131	180	-90	0	20
-42	314	-40	0	40	132	193	-90	0	20
-43	336	-40	0	40	133	208	-90	0	20
-44	363	-40	0	40	134	221	-90	0	20
-45	385	-40	0	40	135	237	-90	0	20
-46	413	-40	0	40	136	253	-90	0	20
-47	436	-40	0	40	137	269	-90	0	20
-48	463	-40	0	40	138	282	-90	0	20
-49	489	-40	0	40	139	297	-90	0	20
-50	514	-40	0	40	140	315	-90	0	20
-51	537	-40	0	40	141	325	-90	0	20
-52	560	-40	0	40	142	345	-90	0	20
-53	586	-40	0	40	143	360	-90	0	20
-54	615	-40	0	40	144	374	-90	0	20
-55	635	-40	0	40	145	385	-90	0	20
-56	664	-40	0	40	146	401	-90	0	20
-57	688	-40	0	40	147	417	-90	0	20
-58	715	-40	0	40	148	434	-90	0	20
-59	735	-40	0	40	149	445	-90	0	20
-60	762	-40	0	40	150	464	-90	0	20
61	25	-50	0	20	-121	35	-100	0	40
62	45	-50	0	20	-122	63	-100	0	40
63	55	-50	0	20	-123	87	-100	0	40
64	74	-50	0	20	-124	114	-100	0	40
65	89	-50	0	20	-125	139	-100	0	40
66	105	-50	0	20	-126	165	-100	0	40
67	115	-50	0	20	-127	190	-100	0	40
68	132	-50	0	20	-128	212	-100	0	40
69	146	-50	0	20	-129	239	-100	0	40
70	164	-50	0	20	-130	261	-100	0	40
71	177	-50	0	20	-131	285	-100	0	40
72	195	-50	0	20	-132	314	-100	0	40
73	206	-50	0	20	-133	338	-100	0	40
74	221	-50	0	20	-134	362	-100	0	40
75	235	-50	0	20	-135	390	-100	0	40

76	250	-50	0	20	-136	413	-100	0	40
77	270	-50	0	20	-137	438	-100	0	40
78	283	-50	0	20	-138	465	-100	0	40
79	298	-50	0	20	-139	489	-100	0	40
80	310	-50	0	20	-140	513	-100	0	40
81	330	-50	0	20	-141	536	-100	0	40
82	343	-50	0	20	-142	561	-100	0	40
83	357	-50	0	20	-143	590	-100	0	40
84	373	-50	0	20	-144	610	-100	0	40
85	387	-50	0	20	-145	637	-100	0	40
86	400	-50	0	20	-146	661	-100	0	40
87	416	-50	0	20	-147	690	-100	0	40
88	430	-50	0	20	-148	714	-100	0	40
89	446	-50	0	20	-149	738	-100	0	40
90	461	-50	0	20	-150	762	-100	0	40

Priedas 3. Kryžminimo metodų rezultatai

Bandymų sk.	geneticDirect.m	geneticWithHeuristic
1	1062	1018
2	1208	1018
3	1172	1018
4	1158	1018
5	1260	1018
6	1078	1018
7	1180	1018
8	1216	1018
9	1226	1018
10	1096	1018

geneticDirect(350,20,100,0.025,10,0.5,V,25)



geneticWithHeuristic(350,20,100,0.025,10,0.5,V,25)

