



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Enrika Liukpetrytė

**GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ AUTOMATIZUOTO ARMAVIMO
ALGORITMO SUKŪRIMAS, TAIKANT KOMPIUTERIŲ MOKYMĄ
DEVELOPMENT OF AUTOMATED REINFORCEMENT ALGORITHM
FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING MACHINE
LEARNING**

Baigiamasis magistro darbas

Statinio informacinio modeliavimas studijų programa, valstybinis kodas 6211EX045

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Juozas Valivonis
(Vardas, pavardė)

(Data)

Enrika Liukpetrytė

**GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ AUTOMATIZUOTO ARMAVIMO
ALGORITMO SUKŪRIMAS, TAIKANT KOMPIUTERIŲ MOKYMĄ**
**DEVELOPMENT OF AUTOMATED REINFORCEMENT ALGORITHM FOR
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING MACHINE LEARNING**

Baigiamasis magistro darbas

Statinio informacinis modeliavimas studijų programa, valstybinis kodas 6211EX045

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vadovas

doc. dr. Vladimir Popov
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2022

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų
rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos
aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Enrika Liukpetrytė, 20153312

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinio informacinis modeliavimas, SIMfm-20

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

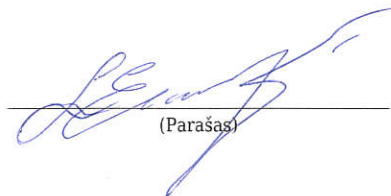
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2022 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Gelžbetoninių konstrukcijų automatizuoto armavimo algoritmo sukūrimas, taikant kompiuterių mokymą“ patvirtintas dekanų potvarkiu Nr. , yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Vladimir Popov. Mano darbo vadovas docentas daktaras Vladimir Popov.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Enrika Liukpetrytė
(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Statybos inžinerijos mokslo kryptis
Statybos inžinerijos studijų kryptis
Statinio informacinis modeliavimas studijų programa, valstybinis kodas 621H20006

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)

Juozas Valivonis
(vardas, pavardė)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr. 1
Vilnius

Studentui (ei) Enrika Liukpetrytei
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema Gelžbetoninių konstrukcijų automatizuoto armavimo algoritmo sukūrimas, taikant kompiuterių mokymą

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2022 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

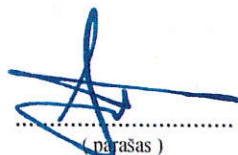
Sukurti taikomosios programos prototipą, skirtą automatizuoti surenkamojo gelžbetoninio elemento (kolonos) armatūros modeliavimo procesus.

Tiriamąojo darbo uždaviniai:

- 1) Sukurti programinio įrankio prototipą, skirtą automatizuoti gelžbetoninės kolonos armavimo procesą ir atlikti tyrimą, identifikuojant ekspertinius inžinierių armavimo sprendinius.
- 2) Parengti kompiuterių mokymo modelį, mokymui panaudojant jau atlikto statistinio tyrimo rezultatus.
- 3) Įvertinti kiekvieno kompiuterių mokymo modelio algoritmo prognozes, nustatant universaliausią armavimo sprendinį imonėje.
- 4) Palyginti darbo našumą laiko trukmės prasme, atliekant armavimą automatizuotu ir rankiniu būdu.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas


(parašas)

doc. dr. Vladimir Popov

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau


(parašas)

..... Enrika Liukpetrytė
(vardas, pavardė)

2020-11-05
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinio informacinio modeliavimo** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Gelžbetoninių konstrukcijų automatizuoto armavimo algoritmo sukūrimas, taikant kompiuterių mokymą**

Autorius **Enrika Liukpetrytė**

Vadovas **Vladimir Popov**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šiuo metu kompiuterinio projektavimo programinė įranga leidžia armatūros detalizavimą atlikti tik rankiniu būdu. Dėl mechanškai atliekamų, pasikartojančių armatūros modeliavimo veiksmų pateikiami skirtingi armavimo sprendiniai įmonėje, kyla neapibrėžtumų dėl inžinierių klaidų ir kitų rizikos šaltinių. Tokiu atveju išauginamos statybos projekto laiko ir ekonominės sąnaudos. Šios problemos paskatina susikonsoliduoti į automatizuotą armavimą atliekančio įrankio kūrimą bei pritaikymo galimybes.

Pirmoje dalyje išnagrinėtos gelžbetoninių konstrukcijų technologijų vystymo tendencijos ir supažindinama su projektavimo problemomis. Antroje dalyje pateikiamos išvalgos, kaip gali būti įgyvendinamas automatizuotas armavimas, taikant klasikinį programavimą bei dirbtinį intelektą. Trečioje darbo dalyje aprašoma praktinė automatizuoto armavimo įgyvendinimo galimybė. Sukurtas taikomosios programos prototipas, veikiantis tradicinio programavimo ir kompiuterių mokymo algoritmų pagrindu. Pateikiami prototipo rezultatai parodo, kad įrankis padidina inžinierių darbo efektyvumą bei gali taikyti kompiuterių mokymo algoritmus, ieškant unifikuotų armavimo sprendinių.

Darbą sudaro: įvadas, trys pagrindinės dalys, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis: 102 p. teksto, 89 iliustracijos, 13 lentelių, 60 literatūros šaltinių. 9 darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: armavimo procesas, gelžbetoninė konstrukcija, automatizuotas projektavimas, taikomosios programos prototipas, kompiuterių mokymas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Building Information Modelling** study programme Master Graduation Thesis

Title **Development of Automated Reinforcement Algorithm for Reinforced Concrete Structures using Machine Learning**

Author **Enrika Liukpetrytė**

Academic supervisor **Vladimir Popov**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

BIM software allows reinforcement detailing process only manually. Due the mechanical, repetitive reinforcement modeling actions unequal solutions are provided in each company. Furthermore, the time and economic costs of a construction project are increased and these problems lead a focus on the automated reinforcement tool creation.

In the first part the development trends and design problems of reinforced concrete constructions are explained. In a second part are provided insights how theoretically automated reinforcement can be implemented and how artificial intelligence could work in this case. In the third part explained practical automated reinforcement investigation. The prototype, based on classical programming and machine learning algorithms has been developed. Results show the raising efficiency of engineers time and proves that machine learning in search of universal solutions can be applied.

Structure: introduction, three main parts, conclusions, references. Thesis consists of: 102 pages of text without appendixes, 89 illustrations, 13 tables, 60 bibliographical sources, 9 annexes.

Keywords: reinforcement detailing, reinforced concrete structure, automated design, application prototype, machine learning.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	10
LENTELIŲ SĄRAŠAS	14
SANTRUMPŲ IR SĄVOKŲ ŽODYNĖLIS.....	15
IVADAS	16
1. GELŽBETONINIŲ SURENKAMŲJŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO APŽVALGA ...	19
1.1. Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų technologijų raida.....	19
1.2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo automatizacijos prielaidos ir galimybės	22
1.2.1. Statinių konstrukcijų projektavimo procesas.....	22
1.2.2. Projektiniai (BIM) modeliai	23
1.2.3. CAD/CAE modelių integracijos scenarijai	24
1.2.4. Vienpusiai ir dvipusiai duomenų mainų srautai	26
1.3. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo programinės įrangos vystymo raida.....	27
1.3.1. 2D CAD sistemos ir jų technologiniai apribojimai	28
1.3.2. „Pereinamoji“ 2D/3D CAD technologija gelžbetoninių konstrukcijų projektavime.	28
1.3.3. 3D CAD parametrinio modeliavimo (BIM) sistemos	29
1.3.4. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo sistemų analizė.....	30
1.3.5. Šiuolaikinių BIM technologijų raida	32
1.4. Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo problematika	33
1.4.1. Nepakankamai efektyvus darbo problema.....	33
1.4.2. Klaidos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo etape	34
1.4.3. Suvienodinti gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo sprendiniai.....	36
1.5. Pirmojo skyriaus išvados	37
2. TEORINĖ GELŽBETONINIŲ SURENKAMŲJŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO PROBLEMŲ SPRENDIMO GALIMYBĖ	39
2.1. Dirbtinio intelekto aprašymas ir panaudojimas statybos sektoriuje	39
2.2. Kompiuterių mokymo apžvalga	40
2.2.1. Prižiūrimasis mokymas ir jo taikymas.....	43
2.2.2. Neprižiūrimasis mokymas ir jo taikymas	44

2.2.3.	Pastiprinamasis mokymas ir jo taikymas	44
2.2.4.	Gilusis mokymas ir jo taikymas	45
2.3.	Tyrimo metu taikomi kompiuterių mokymo algoritmai.....	46
2.3.1.	Regresijos metodas	46
2.3.2.	K – artimiausio kaimyno paieškos metodas	47
2.3.3.	Neuroninių tinklų metodas	48
2.3.4.	Sprendimų medžio metodas.....	50
2.4.	Kompiuterių mokymo veikimo principas.....	52
2.5.	Taikomosios programos prototipas automatizuotam armavimui atlikti	54
2.6.	Antrojo skyriaus išvados	55
3.	AUTOMATIZUOTO ARMAVIMO PROCESO ĮGYVENDINIMAS	56
3.1.	BIM modelio sintezė projektavime	56
3.1.1.	LOD koncepcijos pritaikymas atliekant armavimą rankiniu būdu.....	59
3.1.2.	LOD koncepcijos pritaikymas atliekant armavimą automatizuotu būdu	61
3.2.	Automatizuoto armavimo prototipo koncepcija	61
3.2.1.	Automatizuoto armavimo prototipo kūrimo pradžia	61
3.2.1.1.	Armavimo parametrų identifikavimas	63
3.2.1.2.	Centralizuota automatizuoto armavimo prototipo veikimui reikalinga informacija	67
3.2.2.	Automatizuoto armavimo prototipo kūrimo pabaiga	67
3.3.	Automatizuoto armavimo prototipo realizavimas ir numatoma nauda	68
3.3.1.	Prototipo veikimo principas.....	69
3.3.2.	Prototipo parinktys	69
3.4.	Automatizuoto armavimo prototipo taikymas kolonos elemento armavimui	71
3.5.	Alternatyvus armavimo sprendinys, taikant kompiuterių mokymo modelį	86
3.5.1.	Duomenų rinkimas ir paruošimas.....	87
3.5.2.	Metodo ir algoritmo parinkimas	89
3.5.3.	Parametrų nustatymas ir modelio architektūros kūrimas	89
3.5.4.	Modelio testavimas ir treniravimas	92
3.5.5.	Algoritmų generuojami spėjimai	92

3.5.6. Algoritmų prognozių rezultatų vertinimas	97
3.6. Darbo efektyvumo nustatymas	97
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	100
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	103
LITERATŪROS SĄRAŠAS	105
PRIEDAI.....	110

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Daugiaaukščio namo statybai pirmą kartą naudojamas ferozinis cementas. Ši konstrukcinė sistema sudaryta iš metalinio armatūros tinklo ir betoninio sluoksnio (Elliot & Hamid, 2017)	20
1.2 pav. Modulinio pastato karkaso pavyzdys (Elliot & Hamid, 2017).....	21
1.3 pav. Mišrios konstrukcijos pavyzdys. Laikantysis karkasas sudarytas iš surenkamųjų gelžbetoninių kolonų ir tuščiavidurių perdangų, atremtų ant tėjinio profilio metalinių sijų (Elliot & Hamid, 2017)	21
1.4 pav. Architekto ir konstruktoriaus bendradarbiavimo schema (Eastman et al., 2011).....	22
1.5 pav. Dokumentacijos parengimas techninio ir darbo projekto stadijose, rengiant statinio projekto konstrukcinę dalį (Popov, 2021)	23
1.6 pav. Projektiniai pastato modeliai: (a) architektūrinis (fizinis) objektinis; (b) konstrukcinis (fizinis) objektinis; (c) analitinis (elgsenos) (Popov, 2021).....	24
1.7 pav. Pirmasis CAD/CAE sistemų integracijos scenarijus (Popov, 2021)	25
1.8 pav. Antrasis sistemų integracijos scenarijus (Popov, 2021).....	25
1.9 pav. Vienpusiai ir dvipusiai duomenų srautai (Popov, 2021)	26
1.10 pav. <i>Bentley Rebar</i> – programa, pritaikyta gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui (Popov, 2021)	28
1.11 pav. Pagrindiniai statybos projekto sudedamieji elementai (Ulubeyli et al., 2014)	34
1.12 pav. Gelžbetoninių tiltų deformacijas ar griūtis sukeliančios priežastys (Galvao et al., 2018).....	35
1.13 pav. Sijos armavimo alternatyvos (Dahlgren & Svensson, 2013).....	36
2.1 pav. Skaitmenizacijos įgyvendinimo laipsnis įvairiose statybos srityse (Berger, 2016).....	39
2.2 pav. Automatizuoto armavimo pavyzdys Tekla Structures programoje (Heiskanen, 2018).....	40
2.3 pav. Aalto universitete vykdomas mokslinis projektas DiCtion (DiCtion: Digitalising..., 2019).....	40
2.4 pav. Kompiuterių mokymo taikymas įvairiose srityse (Alzubi et al., 2018).....	41
2.5 pav. Kompiuterių mokymo metodų grupės (Bunker & Thabtah, 2019)	43
2.6 pav. Prižiūrimojo kompiuterių mokymo struktūra (Alzubi et al., 2018).....	43
2.7 pav. Neprižiūrimojo kompiuterių mokymo struktūra (Alzubi et al., 2018)	44
2.8 pav. Giliojo mokymo taikymą atvaizduojantis grafikas (Brownlee, 2016).....	45
2.9 pav. Linijinės regresijos modelio schema (Čekanavičius & Murauskas, 2014).....	46
2.10 pav. Rezultatų išdėstymas, pagal linijinės regresijos funkciją (Kavitha & Varuna, 2016)	47
2.11 pav. Artimiausio kaimyno paiešką atvaizduojanti modelio veikimo schema (Schlenker, 2018).....	47
2.12 pav. Neuronų ląstelės sandara (Makinde et al., 2012).....	48
2.13 pav. Dirbtinis neurono modelis, pagal mokslininkus McCulloch ir Pitts (Doherty & Moores, 1999).....	49
2.14 pav. Neuroninių tinklų paslėptųjų sluoksnių struktūra (sudaryta autoriaus, remiantis Nielsen, 2015).....	49
2.15 pav. Bendra sprendimo medžio struktūra (Arain, 2021)	50
2.16 pav. Sprendimo medžio atšakų schemas pavyzdys (Li, 2019).....	50
2.17 pav. Pavyzdinis sprendimo medžio padalijimo struktūros atvaizdavimas (Li, 2019)	51
2.18 pav. Žingsniai kompiuterių mokymo modeliui treniruoti (Alzubi et al., 2018)	52

3.1 pav. Bendras architektūrinis pastato modelis, sukurtas <i>Autodesk Revit</i> programos aplinkoje. Tiriamojo darbo objektas priklauso šiam modeliui.....	57
3.2 pav. Išgrynintas konstrukcinis (objektinis) pastato modelis, atvaizduojantis tik laikančiąsias projektuojamo pastato konstrukcijas	57
3.3 pav. Analitinis konstrukcinis modelis <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i> programos aplinkoje	58
3.4 pav. Gamybinis gelžbetoninių elementų modelis – FIM (angl. <i>Fabrication Information Model</i>).....	58
3.5 pav. Elementų projektavimo eiga, kai armavimas detalizuojamas rankiniu būdu	60
3.6 pav. Projektavimo eiga, naudojant automatizuoto armavimo įrankį.....	61
3.7 pav. Kolonos armavimo procesas.....	62
3.8 pav. Nustatyta armavimo proceso seka (armavimo žemėlapis pagrindinės sudedamosios dalys).....	63
3.9 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti 3D geometrijos projektavimo veiksmus.....	64
3.10 pav. Kolonos grafiniai parametrai, užkoduojami <i>Tekla Structures</i> programos aplinkoje	64
3.11 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti gulsčiosios skersinės armatūros projektavimo veiksmų eigą	65
3.12 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti išilginės armatūros projektavimo veiksmų eigą	65
3.13 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti papildomos gulsčiosios armatūros projektavimo veiksmų eigą	66
3.14 pav. Prototipo koncepciją ir sąsają su <i>Tekla Structures</i> programa atvaizduojanti schema	68
3.15 pav. Programinio kodo fragmentas, parodantis, kaip programavimo kalba atpažįsta grafinį kolonos elementą	69
3.16 pav. Pradinis automatizuoto armavimo prototipo programos langas. Šis langas matomas, kol nepasirinktas grafinis elementas <i>Tekla Structures</i> aplinkoje.....	69
3.17 pav. Pagrindinis automatizuoto armavimo papildinio programos langas	70
3.18 pav. Papildomas prototipo langas apsauginiam sluoksniui nurodyti skirtingose kolonos elemento plokštumose.....	71
3.19 pav. Kolonos armavimo rezultatai <i>Tekla Structures</i> aplinkoje.....	72
3.20 pav. Tiriamojo objekto skaičiuojamosios analizės rezultatai, pateikiami su nuorodomis į prototipo parinktį.....	73
3.21 pav. 20-ies inžinierių sugeneruoti kolonos armavimo rezultatai, atvaizduojami skersiniame pjūvyje	73
3.22 pav. Išilginės armatūros kampinių strypų diametro pasirinkimas	75
3.23 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „a“	76
3.24 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „b“	76
3.25 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų pasirinkimas kraštinėje „a“ kiekis.....	77
3.26 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų pasirinkimas kraštinėje „b“ kiekis	77
3.27 pav. Gulsčiosios skersinės armatūros diametro ir formos pasirinkimas.....	78
3.28 pav. Gulsčiosios skersinės armatūros lankstinių pasirinkimas ir strypų kiekis.....	78

3.29 pav. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „a“	80
3.30 pav. Papildomos gulsčiosios skersinės armatūros, vidiniams išilginiams strypams „surišti“, lankstinių formos tipai, išdėstymas kraštinėje „a“	80
3.31 pav. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas, kraštinėje „b“	82
3.32 pav. Papildomos gulsčiosios skersinės armatūros, vidiniams išilginiams strypams „surišti“, lankstinių formos tipai, išdėstymas kraštinėje „b“	82
3.33 pav. Stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „a“	83
3.34 pav. Stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „b“	83
3.35 pav. Pateikiamas detalus inžinieriaus Nr. 1 armavimo rezultatas*	84
3.36 pav. Universaliausias armavimo sprendinys, nustatytas remiantis inžinierių subjektyvia nuomone	85
3.37 pav. Statistinio tyrimo rezultatų vertinimas	85
3.38 pav. Klasikinio taikomosios programos prototipo ir kompiuterių mokymo modelio susiejimas.....	86
3.39 pav. Prototipo veikimo schema, parodanti klasikinio programavimo ir kompiuterių mokymo esminius skirtumus (Geisslinger, 2019)	87
3.40 pav. Išplėstinio duomenų rinkinio fragmentas (iš viso 85 eil.), paruoštas kompiuterių mokymo modelio treniravimui esant modelio architektūrai Nr.3, rinkinys sudarytas pagal aprašytus inžinierių armavimo rezultatus	88
3.41 pav. Pirmoji modelio architektūra, įvesties duomenys.....	90
3.42 pav. Pirmoji modelio architektūra, išvesties prognozės	90
3.43 pav. Antroji modelio architektūra, įvesties duomenys	90
3.44 pav. Antroji modelio architektūra, išvesties prognozės.....	91
3.45 pav. Trečioji modelio architektūra, įvesties duomenys	91
3.46 pav. Trečioji modelio architektūra, išvesties prognozės	91
3.47 pav. Kompiuterių mokymo modelio rezultatų vertinimas, taikant sprendimų medžio metodą, pagal modelio architektūrą Nr. 1	92
3.48 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, taikant sprendimų medžio metodą, pagal modelio architektūrą Nr. 2 ir Nr. 3.....	92
3.49 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 1	93
3.50 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 2	93
3.51 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 3	94
3.52 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, pagal architektūrą Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3: neuroninių tinklų algoritmo pateikiami rezultatai	94
3.53 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, pagal modelio architektūrą Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3: K – artimiausio kaimyno paieškos algoritmo veikimu paremto modelio sugeneruotos prognozės	95

3.54 pav. Išvesties duomenys, atlikus kompiuterių mokymo modelių algoritmų testavimą.....	96
3.55 pav. Laiko trukmė atliekant rankinį ir automatizuotą armavimą: 1 – 10 inžinierių rezultatai	99
3.56 pav. Laiko trukmė atliekant rankinį ir automatizuotą armavimą: 11 – 20 inžinierių rezultatai	99
3.57 pav. Laiko skirtumas armuojant rankiniu ir automatizuotu būdu: 1 – 10 inžinierių rezultatai	99
3.58 pav. Laiko skirtumo armuojant rankiniu ir automatizuotu būdu: 11 – 20 inžinierių rezultatai.....	99

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.2 lentelė. Skirtingų BIM programinės įrangos paketų parinkčių palyginimas	30
1.3 lentelė. BIM programinės įrangos paketų privalumų ir trūkumų analizė.....	31
1.1 lentelė. Populiariausi 3D gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo įrankiai ir jų galimybės, projektuojant gelžbetonines konstrukcijas (Eastman et al., 2013)	32
1.4 lentelė. Dažniausios gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo klaidos (Galvao et al., 2018)	35
2.1 lentelė. Keturių technologijų konvergencija (Laskowski, 2017).....	41
2.2 lentelė. Kompiuterių mokymo taikymui reikalingi duomenys (Bhatti, 2019)	42
2.3 lentelė. Kompiuterių mokymo modelių palyginimas (Ullah et al., 2018).....	45
3.1 lentelė. LOD specifikacija pagal BIM FORUM rekomendacijas, surenkamosios gelžbetoninės kolonos elementui (Ruškys, 2019).....	59
3.2 lentelė. Inžinierių armavimo rezultatų (naudojant prototipą) suvestinė programoje Microsoft Excel.....	74
3.3 lentelė. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, lankstinio pasirinkimas kraštinėje „a“	79
3.4 lentelė. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „b“	81
3.5 lentelė. Laiko trukmės rezultatai, palyginama trukmė modeliavimo rankiniu ir automatizuotu būdu.....	98
3.6 lentelė. Laiko trukmės rezultatų vidurkis	100

SANTRUMPŲ IR SĄVOKŲ ŽODYNĖLIS

2D (angl. *Two dimensional space*) – dvimatė erdvė.

3D (angl. *Three dimensional space*) – trijų dimensijų erdvė.

AEC (angl. *Architecture, Engineering and Construction*) – nuo 2000 m. Jungtinėje Karalystėje įkurta organizacija, apibrėžianti architektūros, inžinerijos ir statybos sritis.

AI (angl. *Artificial Intelligence*) – dirbtinis intelektas, gebantis mokytis iš praeityje sukauptų duomenų ir pritaikyti „išmoktą informaciją“ ateities prognozių spėjime.

BIM (angl. *Building Information Modeling*) – statinio informacinis modeliavimas.

CAD (angl. *Computer Aided Design*) – kompiuterinis projektavimas.

CAE (angl. *Computer Aided Engineering*) – kompiuterinė skaičiuojamoji analizė.

FIM (angl. *Fabrication Information Modeling*) – gamybos stadijos informacinis modelis.

IFC (angl. *Industrial Foundation Classes*) – neutralusis skaitmeninis formatas.

LOD (angl. *Level of Development*) – grafinės informacijos išvystymo lygis.

Darbo projektas – pagal STR 1 04.04:2017 reglamentą „projekto antrasis etapas, techninio projekto tąsa, kuriame detalizuojami techninio projekto sprendiniai ir pagal kurį atliekami statybos darbai“.

Duomenys (angl. *Data*) – formalizuotos informacijos rinkinys: skaičiai, paveikslai ir kt.

Kompiuterių mokymas (angl. *Machine learning*) – dirbtinio intelekto taikymo sritis, apibrėžianti kompiuterio gebėjimą imituoti žmogaus elgesį, remiantis modelio sugeneruotais spėjimais (angl. *Predictions*).

Nestruktūrizuoti duomenys – duomenys, kurie nėra struktūrizuoti pagal iš anksto nustatytus duomenų modelius ir schemas, t. y. duomenys nėra organizuoti, iš anksto pažymėti etiketėmis ar atributais (angl. *Unlabelled*), pagal kuriuos būtų galima nesunkiai nustatyti ryšius surinktiems duomenims (Hurwitz & Kirsch, 2018).

Struktūrizuoti duomenys – iš anksto susisteminti, metodiškai apdoroti duomenys.

Techninis projektas – pagal STR 1 04.04:2017 reglamentą „projekto pirmuoju etapu rengiamas normatyvinių statybos techninių dokumentų nustatytos sudėties dokumentas, kuriame pateikiami statytojo sumanyto statinio sprendiniai ir kuris skirtas statybą leidžiančiam dokumentui gauti“.

IVADAS

Temos problematika

Nuo pat BIM (angl. *Building Information Modeling*) sąvokos atsiradimo pradžios šių technologijų pritaikomumas pasirodė turintis didelį potencialą efektyvinti statybos sektoriaus veiklą diegiant įvairias inovatyvias sistemas, plečiant programinės įrangos galimybes. Daugelio atliktų tyrimų autorių nuomone, esamos programinės įrangos funkcijų ir parinkčių tobulinimas yra neatsiejama BIM raidos dalis (Oti et al., 2016).

Didžiausias BIM technologijų pritaikomumas bei vystymas pastebimi projektavimo etape. Šiuo metu gelžbetoninių elementų armavimas detalizuojamas rankiniu būdu. Dėl to gelžbetoninių elementų modeliavimo metu neretai kyla įvairių neapibrėžtumų, neišvengiama inžinierių klaidų rizika ir dėl to neretai padidėja statybos projekto laiko ir ekonominės sąnaudos. Taigi išskiriamos kelios esminės gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo problemos: projektuotojų klaidų rizikos tikimybė, nepakankamas projektuotojų darbo efektyvumas bei unifikuotų armavimo sprendinių, pagal gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo įmonėje taikomą praktiką, stoka.

Pastaruoju metu projektuotojai vis dažniau diskutuoja apie poreikį tobulinti programinę įrangą, skirtą maksimaliai eliminuoti rankinį armatūros modeliavimo darbą. Idėjai įgyvendinti galimi tokie sprendimo būdai:

- 1) naujų programų, leidžiančių atlikti integruotą projektavimą pagal įvestus skaičiuojamosios analizės rezultatus kūrimas;
- 2) naujų programinių papildinių esamoms kompiuterinio projektavimo sistemoms kūrimas.

Tokie taikomieji programiniai įrankiai turėtų integruotas parinktis, padedančias paspartinti projektuotojų atliekamą darbą bei identifikuoti dažniausiai įmonėje naudojamus konstrukcijų armavimo sprendinius.

Baigiamojo darbo aktualumas

Baigiamajame darbe keliama hipotezė, kad projektavimo procesas gali būti automatizuotas taikant klasikinio programavimo ir kompiuterių mokymo algoritmus. Kadangi kompiuterių mokymas yra viena dirbtinio intelekto taikymo sričių, tai svarbu pridurti, kad dirbtinis intelektas ir jo metodai plačiai naudojami daugelyje sektorių: nuo aukštųjų technologijų kūrimo iki medicinos, socialinių mokslų ir ekonomikos sričių (Chui et al., 2018). Pastebima, kad dirbtinio intelekto naudojimas vis labiau skatinamas architektūros, inžinerijos bei statybos srityse. BIM technologijų naudojimu paremtas pastatų projektavimas leidžia kaupti didelius duomenų kiekius apie esamus ir būsimus pastatus ir tai suteikia potencialią galimybę vis dažniau naudoti dirbtinio intelekto metodus statybos sektoriaus problemoms spręsti.

Būtina pabrėžti, kad dirbtinio intelekto taikymas yra aktuali tema globaliu mastu. Vienas iš pavyzdžių, nurodančių inovacijų taikymo svarbą įvairiose visuomeninėse srityse, yra Europos Komisijos 2018 m. balandžio mėn. valstybių narių parengtas dirbtinio intelekto vystymo ir naudojimo skatinimo planas *Artificial Intelligence for Europe*. Dokumente nagrinėjami technologiniai, etiniai, teisiniai, socialiniai bei ekonominiai aspektai, siekiant sustiprinti Europos Sąjungos mokslinių tyrimų ir pramonės pajėgumus, sutelkiant išmaniųjų technologijų kūrimą ir dirbtinio intelekto diegimą Europos piliečių ir ekonomikos labui (Craglia et al., 2018).

Baigiamojo darbo tyrimo objektas

Surenkamųjų gelžbetoninių konstrukcijų ir jų elementų (kolonų) armavimo proceso automatizavimas.

Baigiamojo darbo tyrimo tikslas

Sukurti taikomosios programos prototipą, skirtą automatizuoti surenkamojo gelžbetoninio elemento (kolonos) armatūros modeliavimo procesus.

Tiriamąojo darbo uždaviniai

- 1) Sukurti programinio įrankio prototipą, skirtą automatizuoti kolonos armavimo procesą ir atlikti tyrimą, identifikuojant ekspertinius inžinierių armavimo sprendinius.
- 2) Parengti kompiuterių mokymo modelį, panaudojant jau atlikto statistinio tyrimo rezultatus.
- 3) Įvertinti kiekvieno kompiuterių mokymo modelio algoritmo prognozes, nustatant universaliausią armavimo sprendinį įmonėje.
- 4) Palyginti darbo našumą laiko trukmės prasme, atliekant armavimą automatizuotu ir rankiniu būdu.

Baigiamojo darbo tyrimo metodai

- Mokslinės literatūros analizė.
- Eksperimentas, panaudojant taikomosios programos prototipą, paremtą klasikinio programavimo algoritmo veikimu.
- Eksperimentas, panaudojant kompiuterių mokymo modelį bei jo algoritmus armatūros parametų prognozėms nustatyti.

Baigiamojo darbo struktūra

Baigiamasis darbas, be įvado ir išvadų, suskirstytas į tris dalis. **Pirmoje darbo dalyje** apžvelgiama gelžbetoninių konstrukcijų technologijų vystymo tendencijos ir raida. Supažindinama su gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo problemomis atsižvelgiant į projektuotojų klaidų riziką,

nepakankamą darbo našumą bei universalių projektavimo sprendinių trūkumą. **Antrajame skyriuje** aptariamos automatizuoto armatūros modeliavimo įgyvendinimo galimybės teorine prasme. Trumpai aprašomas taikomosios programos, naudojant klasikinio programavimo algoritmus, veikimas bei pateikiamas dirbtinio intelekto panaudojimas moksliniame darbe: metodika, veikimo principai, algoritmai ir kt. **Trečiasis skyrius** skirtas tyrimo įgyvendinimui ir rezultatų vertinimui. Praktinio eksperimento metu analizuojamas realus automatizuoto armavimo proceso įgyvendinimas. Pirmiausia atliekama analizė, kokie duomenys reikalingi automatizuotam armavimui atlikti, sukuriamas prototipo koncepcija. Toliau renkami armavimo sprendinių duomenys, naudojant klasikinio programinio algoritmo veikimu paremtą automatizuoto armavimo prototipą. Tokiu būdu identifikuojami inžinierių ekspertiniai armavimo sprendiniai kolonos elementui ir surinkti duomenys toliau panaudojami kompiuterių mokymo modeliui treniruoti bei testuoti. Toliau atliekamas sugeneruotų kompiuterių mokymo modelių algoritmų pateikamų prognozių vertinimas, identifikuojant universaliausią (unifikuotą) armavimo sprendinį įmonėje. Paskutiniame poskyryje atliekamas darbo našumo armuojant rankiniu ir automatizuotu būdais palyginimas, įvertinami armavimo trukmės rezultatai. Baigiamasis darbas užbaigiamas pateikiant išvadas bei rekomendacijas.

1. GELŽBETONINIŲ SURENKAMŲJŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO APŽVALGA

1.1. Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų technologijų raida

Gelžbetoninių konstrukcijų sąvoka ir klasifikacija

Gelžbetonis yra kompozitinė statybinė medžiaga, sudaryta iš betono, armuoto plieno armatūra (Kudzys, 1992). Dėl savybės atlaikyti dideles apkrovas, gelžbetonis naudojamas pastatų laikančiosioms konstrukcijoms gaminti. Pagal autorių A. Kudzį (1992), išskiriami tokie iš gelžbetonio statomi įvairios paskirties statiniai: civiliniai, pramoniniai, žemės ūkio ir transporto paskirties, įvairios talpyklos, bokštinių konstrukcijų stiebai ir kiti unikalūs statiniai. Gelžbetoninės konstrukcijos gali būti: monolitinės, surenkamosios bei surenkamosios ir monolitinės (Kudzys, 1992).

Lyginant su kitais statinių konstrukcijų tipais ir medžiagomis, iš kurių gaminami laikantieji elementai, gelžbetoninės konstrukcijos dažnai naudojamos statyboje. Bendrai gelžbetoninių konstrukcijų privalumai yra tokie:

- 1) architektūrinių formų įvairovė (pavyzdžiui: galimybė perdengti didelius tarpatramius, platus fasado sprendinių ir paviršiaus apdailos įrengimo spektras);
- 2) galimybė statyti daugiaaukščius pastatus;
- 3) didelė laikomoji galia;
- 4) atsparumas aplinkos poveikiams;
- 5) plačios pritaikomumo galimybės (pavyzdžiui: lengvai formuojamos antramos, angos, integruojama elektros ir šilumos tiekimo instaliacijos įranga);
- 6) atsparumas ugniai;
- 7) ilgaamžiškumas;
- 8) išankstinio įtempimo galimybė;
- 9) racionalus medžiagų eikvojimas;

Papildomai išskiriami tokie surenkamųjų gelžbetoninių konstrukcijų privalumai:

- 1) surenkamųjų elementų gamyba fabrikuose užtikrina aukštus gaminių kokybės standartus;
- 2) galimybė montuoti greitai;
- 3) galimybė montuoti šaltuoju metų laiku;
- 4) patogus transportavimas;
- 5) ekonomiškai pagrįstos statybvietės išlaidos;
- 6) galimybė pritaikyti pažangią, automatizuotus procesus atliekančią įrangą gamybos ir montavimo procesų metu.

Taigi, šios savybės yra pagrindinės, lemiančios kasmet vis didėjančią surenkamųjų gaminių paklausą, įgyvendinant statybos projektus (International Federation for Structural Concrete (fib), 2014).

Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų vystymo etapai

Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų atsiradimas sukėlė perversmą statyboje nuo XX a. pr. Autoriai Elliotas ir Hamidas pabrėžia tendenciją, kad sparčiausiai šios konstrukcijos vystėsi modernizacijos ir industrializacijos laikotarpiu, kuris prasidėjo pasibaigus Antrajam pasauliniam karui. Tuo metu visame pasaulyje išpopuliarėjo daugiaaukščių gelžbetoninių pastatų statyba. Metams bėgant gelžbetoninės surenkamosios konstrukcijos buvo tobulinamos ir jų paklausa statybos sektoriuje išliko iki šių dienų. Toliau aprašomi esminiai gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų vystymo etapai (Elliot & Hamid, 2017).

1 etapas – gelžbetonio atsiradimas statyboje (1920-1940 m.) (žr. 1.1 pav.). Gelžbetonio atsiradimas siejamas su ferozinio cemento pritaikymu statyboje (angl. *Ferro – cement*) bei įtemptojo betono technologija (angl. *Prestressed concrete*). Šios technologijos leido tobulinti gaminių dizainą, garantuoti atsparumą aplinkos poveikiui, atlaikyti didesnes apkrovas ir užtikrinti ilgaamžiškumą (Elliot & Hamid, 2017).



1.1 pav. Daugiaaukščio namo statybai pirmą kartą naudojamas ferozinis cementas. Ši konstrukcinė sistema sudaryta iš metalinio armatūros tinklo ir betoninio sluoksnio (Elliot & Hamid, 2017)

2 etapas – masinė gamyba ir standartizavimas (1945-1970 m.) (žr. 1.2 pav.). Šis etapas siejamas su tikslu atstatyti pokario Europą ir plėtoti statybą Pietryčių Azijoje, panaudojant surenkamuosius gaminius: gelžbetonines sienas ir kolonas, tuščiavidures perdangas. Istoriniame kontekste tuo metu vyravo terminas *modulinis karkasas* (angl. *Modular building frames*). Tokio tipo laikantieji karkasai buvo masiškai statomi, panaudojant surenkamosios sienos, perdangos ir kolonos konstrukcinius elementus.



1.2 pav. Modulinio pastato karkaso pavyzdys (Elliot & Hamid, 2017)

3 etapas – palengvintų (angl. *Lightweight*) ir didesnius tarpatramius perdengiančių (angl. *Long – span*) konstrukcijų naudojimas ir plėtra (1970-2000 m.) (žr. 1.3 pav.). Šis etapas susijęs su lengvesnių ir didesnius tarpatramius perdengiančių gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų kūrimu. Pradėti gaminti kompozitiniai gaminiai.



1.3 pav. Mišrios konstrukcijos pavyzdys. Laikantysis karkasas sudarytas iš surenkamųjų gelžbetoninių kolonų ir tuščiavidurių perdangų, atremtų ant tėjinio profilio metalinių sijų (Elliot & Hamid, 2017)

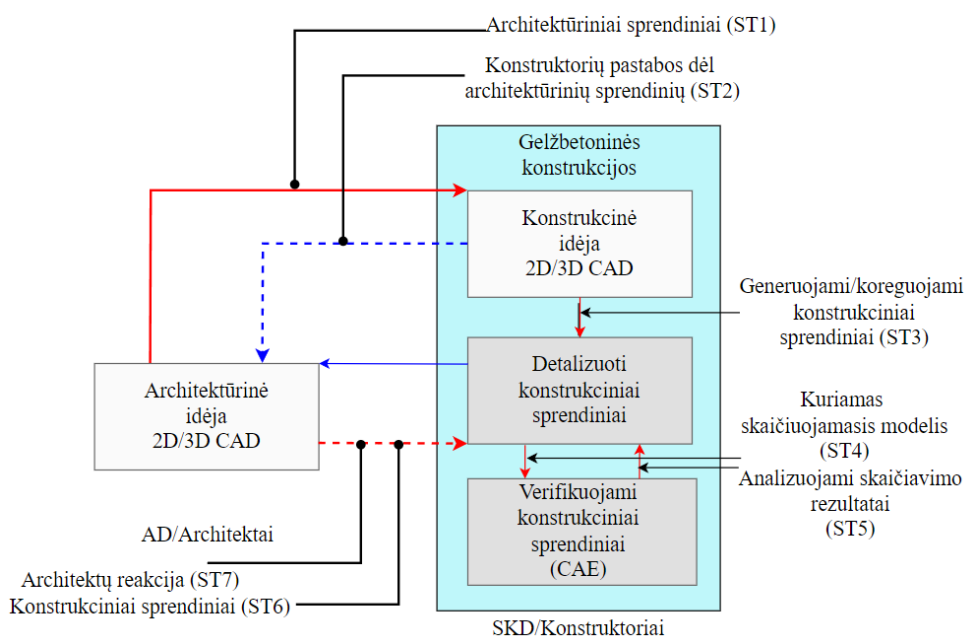
4 etapas – gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimas ir gamyba, atsižvelgiant į šiluminių savybių išsaugojimą (2000 m. – dabar). Dėmesys skiriamas sąvokos „šalčio tiltas“ tyrimui. Atsirado energijos taupymo sąvoka, atkreipianti dėmesį į gelžbetonio energetinį efektyvumą ir šiluminę varžą. Manoma, kad nuo 2000-ųjų metų prasidėjo tvarios, energiją taupančios statybos era.

Nuo 2010-ųjų metų vystomas gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų skaitmenizavimo laikotarpis, siejamas su pažangiu projektavimu skaitmeninėje erdvėje, t. y. nuo elemento koncepcijos sukūrimo iki paruošimo gamybai. Konstrukcinių elementų skaitmenizavimo procesams įgyvendinti naudojama statinio informacinio modeliavimo (BIM) sąvoka, leidžianti kurti ir valdyti virtualius esamų ir būsimų statinių architektūrinius, konstrukcinius ir gamybinius modelius. Anot autorių Popovo ir Grigorjevos, bet kokio tipo konstrukcijoms, įskaitant gelžbetonines surenkamąsias konstrukcijas, kompiuterinio projektavimo technologijos padeda automatizuoti ir paspartinti elementų brėžinių kūrimą bei kitos lydinčios dokumentacijos generavimą, reikalingą objekto paruošimui gamybos ir montavimo stadijai (Popov & Grigorjeva, 2010).

1.2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo automatizacijos prielaidos ir galimybės

1.2.1. Statinių konstrukcijų projektavimo procesas

Tradicinis projektavimo procesas neįsivaizduojamas be nuolatinio bendradarbiavimo tarp architektų, konstruktorių ir kitų sričių inžinierių. Projekte yra daug užduočių, kurias skirtingų projekto disciplinų atstovai turi atlikti suderintu laiku, siekiant numatytų projekto rezultatų. Pavyzdžiui, visi architektūriniai sprendiniai turi būti paremti statybinių konstrukcijų skaičiavimais ir analize (žr. 1.4 pav.). Paprastai konstruktoriaus ir architekto bendradarbiavimo procesas prasideda nuo architektūrinių sprendinių idėjos, kuri toliau turi būti įvertinta konstruktorių dėl jos realizavimo galimybių (Eastman et al., 2011).



1.4 pav. Architekto ir konstruktoriaus bendradarbiavimo schema (Eastman et al., 2011)

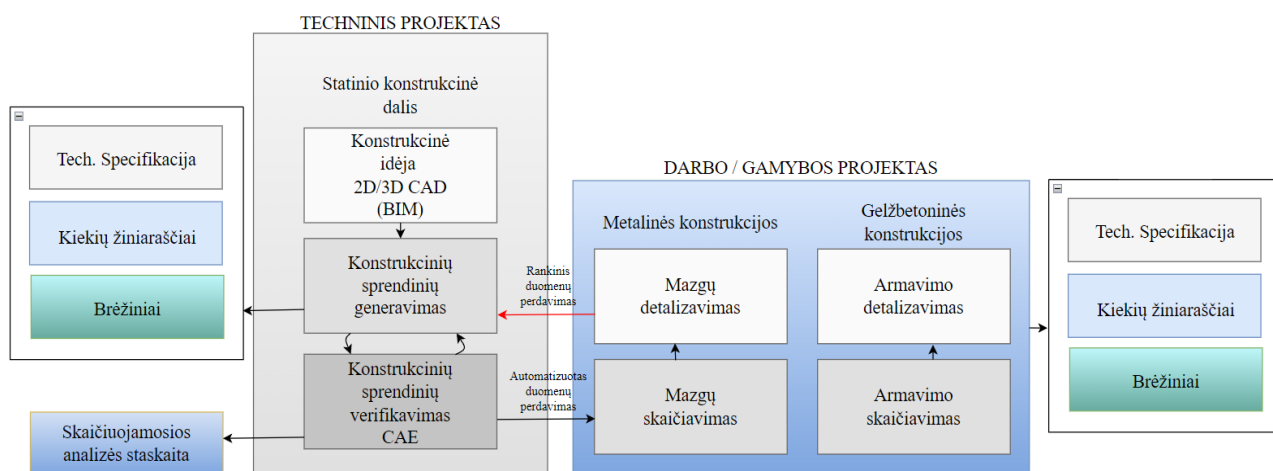
Žemiau aprašyta, kaip vyksta architektūrinių sprendinių virsmas konstrukciniais:

- 1) pradinės architekto idėjos įgyvendinimas projektuojamo pastato laikančiųjų konstrukcijų atžvilgiu;
- 2) inžinierius formalizuoja realią konstrukciją arba jos dalį, paverčiant ją skirtingo detalumo idealizuota skaičiuojamąja schema (analitinis modelis);
- 3) konstruktorius koreguoja idėją pagal gautus analizės modelio rezultatus;
- 4) architekto ir konstruktoriaus bendro darbo realizavimas.

Atlikus konstrukcinių ir architektūrinių sprendinių tarpusavio derinimo darbus, tie patys sprendiniai toliau vystomi ir detalizuojami iki galutinių, skaičiavimais patvirtintų konstrukcinių sprendinių. Taigi šių disciplinų atstovų nuolatinis ir nuoseklus bendradarbiavimas – itin svarbus sėkmingam statybos projekto įgyvendinimui (Eastman et al., 2011).

Remiantis STR 1.04.04:2017 „Statinio projektavimas, projekto ekspertizė“ reikalavimais, priėmus suderintus architektūrinius ir konstrukcinius sprendinius, toliau numatoma konstrukcijų projektavimo proceso pabaiga, t. y. išleidžiami techninio ir darbo projektų dokumentacijos rinkiniai. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo proceso metu, techninio ir darbo projekto stadija apima (žr. 1.5 pav.):

- 1) techninės specifikacijos išleidimą;
- 2) brėžinių ir kiekių žiniaraščių generavimą;
- 3) skaičiuojamosios analizės ataskaitos generavimą, pagal *verifikuotus* ar *detalizuotus* konstrukcinius sprendinius.



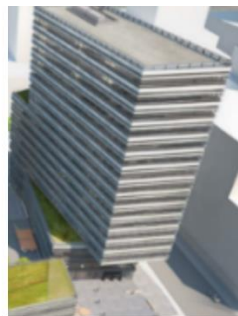
1.5 pav. Dokumentacijos parengimas techninio ir darbo projekto stadijose, rengiant statinio projekto konstrukcinę dalį (Popov, 2021)

Svarbu paminėti, kad pagal šiuolaikinę projektavimo proceso koncepciją, visi techninio ir darbo projekto stadijose priimti architektūriniai bei konstrukciniai sprendiniai turi būti pagrįsti informacija, sugeneruota naudojant projektinius pastato modelius (Popov, 2021).

1.2.2. Projektiniai (BIM) modeliai

Pagal BIM metodologiją, visi būsimąjo pastato architektūriniai, konstrukciniai bei inžineriniai sprendiniai, pirmiausia turi būti sukuriami grafinio modeliavimo CAD sistemoje. Kai šioje sistemoje suprojektuoti modeliai bei lydinčioji dokumentacija yra pakankamai detalūs, t. y. aiški geometrija, matmenys bei medžiagų savybės, toliau atliekama pastato elgsenos analizė CAE (angl. *Computer Aided Engineering*) sistemoje tam, kad galėtume skaičiavimais pagrįsti pastato formą ir kt. parametrus (Popov, 2021)

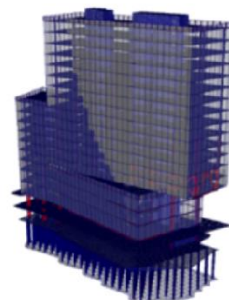
Pagrindinis projektavimo proceso tikslas – 3D virtualaus pastato konstrukcijų modelio, papildyto atributine informacija, sukūrimas. Šis modelis svarbus ieškant projektinių sprendinių, didinant darbo procesų efektyvumą bei reikalingas projektinei dokumentacijai generuoti. Toliau išskiriami tokie projektiniai pastato modelių tipai (žr. 1.6 pav.):



(a) Architektūrinis objektinis (fizinis) pastato modelis



(b) Konstrukcinis objektinis (fizinis) pastato modelis



(c) Analitinis - skaičiuojamasis (elgsenos) pastato modelis

1.6 pav. Projektiniai pastato modeliai: (a) architektūrinis (fizinis) objektinis; (b) konstrukcinis (fizinis) objektinis; (c) analitinis (elgsenos) (Popov, 2021)

Objektinis (fizinis) modelis – projektinis (CAD) modelis, apibrėžiantis esmines statinio savybes (forma, tūriai, medžiagos ir jų charakteristikos), kurie taip pat skirti imituoti elementų ryšių su kitais objektais, nustatymui, kolizijų aptikimui. Objektinis modelis įprastai skirstomas pagal disciplinas:

- 1) architektūrinis – objektinis (fizinis) modelis parodo bendrą pastato sandarą, erdves bei funkcionalumą;
- 2) konstrukcinis – objektinis (fizinis) modelis – paprastai sudarytas tik iš konstrukcinių laikančiųjų statinio elementų;
- 3) inžinerinių sistemų – objektinis (fizinis) modelis – modelis, atvaizduojantis pastato šildymo, vėdinimo, vandentiekio ir kt. inžinerinių sistemų komponentus, jungtis.

Analizės (elgsenos) modelis – projektinis (CAE) modelis, reikalingas atlikti konstrukcijos elgsenos tyrimą, analizuoti įtempių ir deformacijų būvį, spręsti atsparumo tikrinimo ar projektavimo uždavinius. Analitinis modelis kuriamas konstrukcinio modelio pagrindu tam, kad būtų galima atlikti jo analizę ir projektavimą specializuotoje baigtinių elementų analizės programoje.

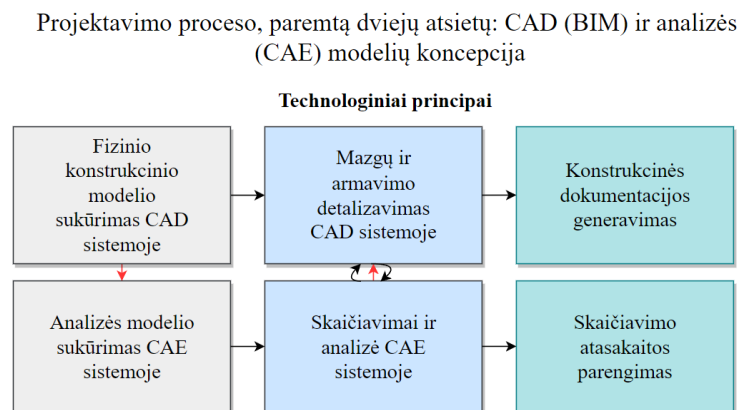
1.2.3. CAD/CAE modelių integracijos scenarijai

Išsiaiškinus, kokie galimi skaitmeninių pastatų modelių tipai, toliau kalbama apie BIM metodologijos taikymo naudą įprastame statybos projekte, kuri nusakoma galimybe susieti grafinius ir skaičiuojamuosius modelius tarpusavyje, užtikrinant vientisą projektavimo procesą (Popov, 2021).

Kompiuterinio projektavimo (CAD) ir inžinerinės analizės (CAE) sistemų kūrimas prasidėjo nuo 1960-ųjų metų, o spartesnis taikymas vyko XX a. pab. (Gigante, 2019). Nuo grafinio projektavimo ir inžinerinės analizės programinės įrangos atsiradimo pradžios šios sistemos buvo vystomos kaip atskiros, viena nuo kitos nepriklausomos kryptys. Ši tendencija atspindėjo faktinį projektuotojų padalijimą pagal disciplinas, pavyzdžiui: architektus, konstruktorius, inžinerinių sistemų projektuotojus. Kadangi kiekvienas projektuotojas atliktas individualias užduotis turėjo perduoti kitai disciplinei numatyto duomenų rinkinio pavidalu, tai, laikui bėgant, pasikartojančių

duomenų rinkinių kūrimas skirtingų disciplinų projektuotojams tapo nepatogus, kilo grėsmė prarasti informaciją, nebuvo įgyvendintas nuolatinis ir nenutrūkstamas informacijos perdavimo procesas. Dėl šių priežasčių kilo poreikis šiuolaikinėse automatizuoto projektavimo sistemose diegti skirtingų lygių integraciją tarp grafinės ir skaičiuojamosios analizės aplinkos (Popov, 2021).

Anot Popovo (2021), projektavimo procese galima išskirti tam tikrus kompiuterinio projektavimo ir skaičiuojamosios analizės tarpusavio integracijos scenarijus. Pirmasis scenarijus paremtas dviejų, tarpusavyje nesusietų, grafinio (CAD) ir skaičiuojamojo (CAE) modelių koncepcija (žr. 1.7 pav.)

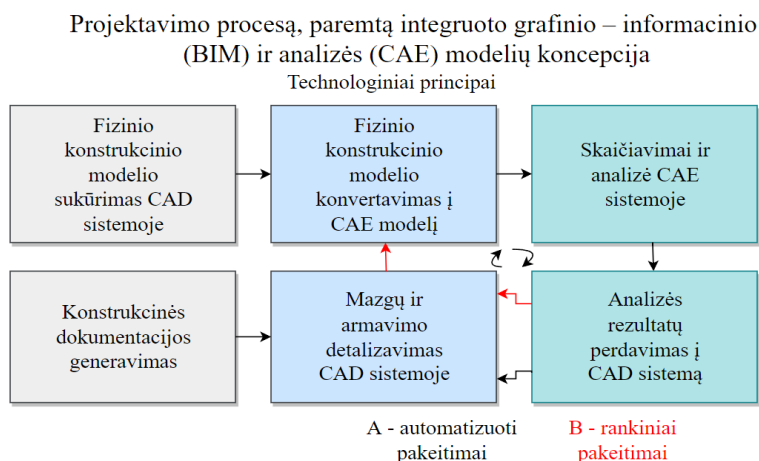


1.7 pav. Pirmasis CAD/CAE sistemų integracijos scenarijus (Popov, 2021)

Ši koncepcija realizuojama įgyvendinus šiuos etapus:

- 1) fizinio konstrukcinio modelio sukūrimas CAD sistemoje;
- 2) analizės modelio sukūrimas CAE sistemoje
- 3) analizė CAE sistemoje;
- 4) mazgų bei armavimo detalizavimas CAD sistemoje;
- 5) konstrukcinės dokumentacijos generavimas;
- 6) skaičiavimų ataskaitos parengimas.

Antrasis scenarijus paremtas integruoto grafinio informacinio (BIM) ir skaičiuojamosios analizės (CAE) modelių koncepcija (žr. 1.8 pav.) (Popov, 2021).



1.8 pav. Antrasis sistemų integracijos scenarijus (Popov, 2021)

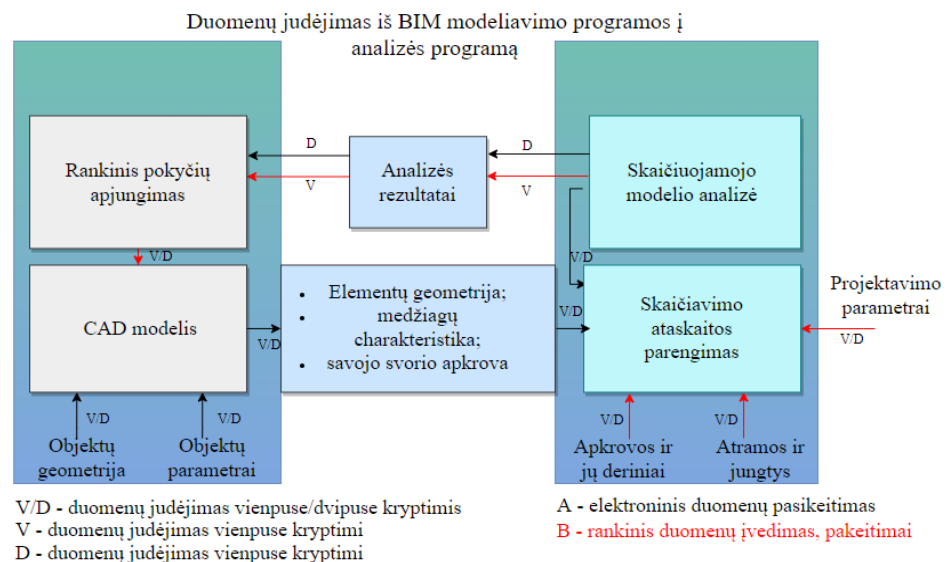
Ši koncepcija realizuojama įgyvendinus šiuos etapus:

- 1) fizinio konstrukcinio modelio sukūrimas CAD sistemoje,
- 2) fizinio konstrukcinio modelio konvertavimas į CAE sistemos modelį;
- 3) skaičiavimai ir analizė CAE sistemoje;
- 4) analizės rezultatų perdavimas į CAD sistemą;
- 5) armavimo detalizavimas CAD sistemoje;
 - automatizuotas;
 - rankinis;
- 6) brėžinių ir žiniaraščių generavimas.

1.2.4. Vienpusiai ir dvipusiai duomenų mainų srantai

CAD ir CAE sistemų tarpusavio susiejimas yra naudingas ir naudojamas iki šių dienų, nes leidžia taikyti galingas kompiuterinio projektavimo programų galimybes skaičiuojamojo modelio sukūrimui arba perkėlimui į analizės programą iš architektūrinių statybinių brėžinių bei užtikrina vieningą bei ištisinį projektavimo procesą. Priklausomai nuo to, ar duomenų srautas tarp dviejų programų yra vienos ar dviejų krypčių, išskiriami tokie duomenų apsikeitimo lygiai (žr. 1.9 pav.):

- 1) vienos krypties duomenų judėjimas iš kompiuterinio modeliavimo (CAD) programos į skaičiuojamosios analizės (CAE) programą;
- 2) dviejų krypčių duomenų judėjimas iš kompiuterinio modeliavimo (CAD) programos į skaičiuojamosios analizės (CAE) programą ir atgal (Popov, 2021).



1.9 pav. Vienpusiai ir dvipusiai duomenų srantai (Popov, 2021)

Pirmuoju atveju modeliavimo programoje 3D modeliui priskiriamos medžiagų savybės, konstrukcijų matmenys. Paruoštas modelis importuojamas į analizės programą, kurioje modeliui priskiriamos apkrovos, aprašomos elementų jungtys. Toliau pagal gautus analizės rezultatus

inžinierius *rankiniu būdu* atnauja konstrukcijas modeliavimo programoje. Taip pat svarbu pasakyti, kad šis duomenų mainų tipas paprastai taikomas pirmajam CAD/CAE modelių integracijos scenarijui.

Antruoju atveju modeliavimo programoje pastato 3D modeliui taip pat pirmiausia priskiriamos medžiagų savybės, konstrukcijų matmenys. Esminis skirtumas pastebimas grafinio modelio importavimo į skaičiavimo programą metu, kai per atskirą programinę sąsają (angl. *API - Application Programming Interface*) ar standartizuotais (CIS/2, SDNF, STP) bei neutraliais (IFC) failų formatais, modelis automatiškai importuojamas į analizės programą. Toliau skaičiavimo programoje elementams priskiriamos apkrovos, aprašomos jungtys. Gavus analizės rezultatus, inžinierius nusprendžia, kurie pakeitimai modeliavimo programoje gali būti padaryti automatiškai, todėl eliminuojamas konstrukcijų atnaujinimas rankiniu būdu. Svarbu paminėti, kad šis duomenų srauto tipas paprastai taikomas antrajam CAD/CAE modelių integracijos scenarijui (Popov, 2021).

1.3. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo programinės įrangos vystymo raida

Šiuolaikinės kompiuterinio projektavimo programos buvo vystomos iš pirmųjų grafinių elementų kūrimo taikomųjų programų. Pagal kompiuterinio projektavimo technologijų vystymo raidą, pirmiausia buvo kuriamos plokštuminio (2D) braižymo sistemos. Šių sistemų populiarumas ilgainiui sumažėjo dėl nepakankamo vizualumo bei informatyvumo, ribotų apsisiekimo duomenimis galimybių, integracijos tarp projekto dalyvių stokos, didelės duomenų nesutapimo rizikos bei fragmentiškų, pasikartojančių veiksmų. Pastarosios priežastys lėmė, kad nuo 2009-ųjų metų tradicinės 2D (plokštuminės) kompiuterinio projektavimo technologijos pamažu virto į modernesnes 3D objektinio – parametrinio projektavimo sistemas. Patobulintos kompiuterinio projektavimo sistemos iki šiol palengvina projektuotojų atliekamą darbą, nes tokio pobūdžio programos leidžia:

- 1) atlikti objektų braižymą plokštumoje ir trimatėje erdvėje;
- 2) atspindėti inžinieriaus suprojektuotą grafinį rezultatą erdvėje;
- 3) apžiūrėti grafinius objektus pagal sugeneruotas objekto projekcijas trimatėje erdvėje;
- 4) keisti grafinius ir atributinius objektų parametrus, pavyzdžiui: padidinti ar sumažinti objektą, pridėti ar atimti tam tikrus komponentus, priskirti medžiagų charakteristikas;
- 5) vykdyti parametrines grafinių objektų transformacijas;
- 6) generuoti asociatyvią su modeliu informaciją: kiekių žiniaraščius, brėžinius.

Toliau pateikiamas detalus kompiuterinio projektavimo programinės įrangos vystymo aprašymas, nusakantis, kaip grafinio dizaino sistemos buvo tobulinamos: nuo brėžinių rengimo plokštumoje iki 3D objektinių – parametrinių elementų kūrimo šiuolaikinėse automatizuoto projektavimo sistemose. Taip pat aprašomas kompiuterinio projektavimo programinių įrankių

vystymas, pritaikant programos funkcijas specializuotiems gelžbetoniniams elementams modeliuoti grafinėje aplinkoje.

1.3.1. 2D CAD sistemos ir jų technologiniai apribojimai

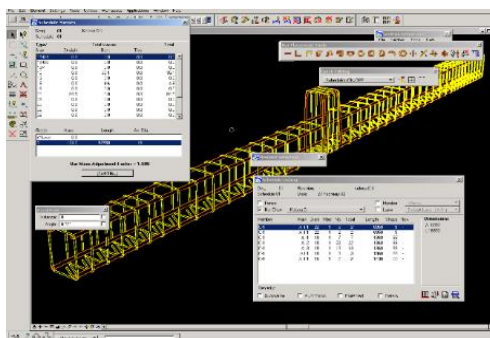
3D projektavimo technologijų atsiradimui didelę įtaką turėjo 2D CAD technologija, neretai vadinama „popierine“. 2D braižymo technologija konstrukcijų projektavime, po rankinio braižymo etapo, sukėlė perversmą, tačiau populiarį išliko neilgai dėl tam tikrų šios technologijos trūkumų (Popov, 2021). Vienas esminių 2D projektavimo technologijos apribojimų – brėžinių rengimas 2D erdvėje, kurioje ne visada pastebimi objektų susikirtimai. Kadangi brėžiniai rengiami pagal individualų inžinierių vizualinį suvokimą, neretai pastebimos klaidos, analizuojant skirtingus to paties elemento projekcinius vaizdus (Migilinskas, 2021). Be to, naudojant tradicinę 2D projektavimo technologiją konstrukcinė dokumentacija kuriama ir koreguojama rankiniu būdu, dėl ko gerokai išauga laiko ir darbo apimtys.

Tradicinės 2D projektavimo praktikos atveju skaičiuotiniai konstrukcijų modeliai analizės programoje modeliuojami iš naujo ir yra nepriklausomi nuo kartu kuriamų brėžinių. 2D projektavimo technologijos atveju nėra galimybės panaudoti sukurtų brėžinių skaičiavimo tikslais. Taigi 2D projektavimo technologijos palaipsniui buvo atsisakoma dėl ribotų apsieitimo duomenimis galimybių, informacijos nesutapimo tikimybės bei didelės rankinio darbo apimtys.

1.3.2. „Pereinančioji“ 2D/3D CAD technologija gelžbetoninių konstrukcijų projektavime

Svarbu pabrėžti, kad gelžbetoninių konstrukcijų projektavime pirmieji armavimo brėžiniai buvo generuojami naudojant kompiuterizuotus braižymo įrankius, tokius kaip *Autodesk AutoCAD*. Išleistas į rinką šis programinis įrankis labai greitai pakeitė rankinį braižymą, suteikdamas galimybę skaitmeniniu būdu generuoti konstrukcinius brėžinius, žiniaraščius ir kitą 2D dokumentaciją.

Vėliau šį įrankį pakeitė specializuotos 2D/3D modeliavimo programos. Šios programos turėjo integruotus įrankius armatūrai atvaizduoti plokštumoje ir ši funkcija buvo laikomu vienu didžiausiu privalumu ruošiant projekcinius vaizdus ir iš jų formuojant 3D gelžbetoninių konstrukcijų elementus. Tokių įrankių pavyzdžiais gali būti tokie įrankiai: *Multi-RC* ar *GEOPAK Rebar*. Pastaroji programa buvo patobulinta ir tapo žinoma kaip *Bentley Rebar* (žr. 1.10 pav.).



1.10 pav. Bentley Rebar – programa, pritaikyta gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui (Popov, 2021)

Ši programa buvo populiari iki 3D parametrizuoto armatūros modeliavimo programų taikymo, nes pasižymėjo itin patogiu valdymu, aukšto lygio programos funkcijų automatizavimu ir kitais privalumais, tokiais kaip:

- 1) lankstumas dirbant su DWG, DGN failų formatais, skirtais grafinei informacijai perduoti;
- 2) dinamiškas matmenų generavimas;
- 3) automatizuotas armatūros lankstinių žymėjimas (angl. *Labeling*);
- 4) tarptautinių kodavimo sistemų pritaikymas, pavyzdžiui: ACI/BS8666:2005;
- 5) automatiniai kiekių žiniaraščių atnaujinimai;
- 6) patogi sąsaja su *Bentley Microstation* platforma, *Bentley STAAD. Pro*, *Bentley Structural* ir *RM Bridge* programomis;
- 7) automatiškai generuojami 3D armavimo vaizdai iš projektuojamo gaminio plano, pjūvio ir frontalaus projekcinių vaizdų;
- 8) greitai sukuriami armatūros išdėstymo vaizdai;
- 9) automatizuota užduočių juosta leidžia sumažinti rankiniu būdu įvedamų duomenų kiekį;
- 10) platus modeliavimo galimybių spektras vartotojui leido kurti ir automatizuoti geometriškai sudėtingus gelžbetoninius gaminius: laiptus, kolonas, pamatus, atramines sienas ir kt. elementus.

Spartėjant informacinių technologijų ir programinės įrangos vystymo procesui *Bentley Rebar* evoliucionavo į 3D parametrizuoto konstrukcijų projektavimo programą, kuri šiuo metu vadinama *Bentley ProConcrete* (ProConcrete SS7: Concrete..., 2014).

1.3.3. 3D CAD parametrinio modeliavimo (BIM) sistemos

Pastato objektinis modelis kuriamas iš grafinių elementų su jiems priskirta atributine informacija apie objekto savybes, medžiagų charakteristikas, sąsaja su kitais elementais. Tokie 3D modelio elementai vadinami parametrizuotais.

Pagrindinės parametrinių objektų savybės yra šios:

- apima geometriją, t. y. visus su objektu susijusius grafinius duomenis ir taisykles;
- objekto parametrinės taisyklės padeda interaktyviai modifikuoti elementą. Pavyzdžiui, durys automatiškai integruojamos į sieną, šviesos jungiklis automatiškai atsiranda atitinkamoje padėtyje šalia durų ir t. t.;
- objektai gali atspindėti įvairias inžinieriui svarbias elemento savybes. Analizuojant trimatėje ardvėje modeliuojamos sienos elementą, sieną galime formuoti kaip vientisą tam tikros medžiagos komponentą arba „sulipdyti“ sieną iš skirtingų komponentų. Šiuo

atveju parametriškumas atspindi teiginį, kad jei pakeisime sieną sudarantį komponentą, tai interaktyviai pasikeis elemento svoris ir kt. parametrai;

- objektai turi galimybę gauti medžiagų savybių atributus, pavyzdžiui, akustiniai ar energetiniai duomenys.

Galiausiai iš mokslinės literatūros analizės matyti, kad parametrizuotų elementų samprata yra glaudžiai susijusi su BIM technologijomis, t. y. naujos kartos skaitmeninio modeliavimo programinė įranga pateikia įrankius ir funkcijas, leidžiančius kurti įvairių statybinių konstrukcijų parametrizuotus objektus, tarp jų ir gelžbetoninius surenkamuosius elementus (Eastman et al., 2013).

1.3.4. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo sistemų analizė

Šiuo metu rengiant statybus projektus, sparčiai didėja surenkamųjų elementų projektavimo poreikis. Surenkamieji pastatai vis dažniau vertinami kaip būdas pagaminti ir sumontuoti greitai ir kartu aukštus kokybės reikalavimus atitinkančią konstrukciją (AI and BIM..., 2019). Įvairių formų, unikalūs ir standartizuoti surenkamieji gelžbetoniniai gaminiai gali būti modeliuojami nuo gaminio konceptualaus sumanymo iki galutinės konstrukcijos, pritaikant šiuolaikinės kompiuterinio projektavimo programinės įrangos galimybes. Toliau pateikiama trumpa esamų gelžbetoninių konstrukcijų automatizuoto projektavimo programų apžvalga, t. y. pateikiama analizė, kokie dabartiniai programiniai įrankiai yra taikomi, atliekant gelžbetoninių konstrukcijų detalizavimą ir kokie įrankiai gali būti tinkamiausi, atsižvelgiant į procesų automatizavimo galimybes.

Analizuojamos ir palyginamos skirtingų BIM programinės įrangos paketų funkcijos ir parinktys, akcentuojant gelžbetoninių elementų rankinio bei automatizuoto armavimo ir brėžinių rengimo galimybes (žr. 1.1 lentelė.; Toliau pateikiami skirtingų BIM programinės įrangos paketų privalumai ir trūkumai gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo srityje.

1.2 lentelė.) (Rebar Modeling with Tekla..., 2022; Rebar Modeling in Revit..., 2022; IMPACT:Reinforcement..., 2022; Allplan Precast..., 2022; Reinforced concrete..., 2022).

1.1 lentelė. Skirtingų BIM programinės įrangos paketų parinkčių palyginimas

Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo programinės įrangos funkcijų tyrimas						
	Gelžbetoninių surenkamųjų gaminių modeliavimas	Rankinis armatūros modeliavimas	Automatizuotas armatūros modeliavimas, pagal gaminio geometrinius parametrus	Automatizuotas armatūros modeliavimas, pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus	Pusiau automatizuotas elementų brėžinių generavimas (angl. Shopdrawing)	Pusiau automatizuotas bendrinis, elementų montavimo planų generavimas (angl. General arrangement drawing)
	+	+	+/-	-	+	+
	+	+	-	-	+	+
	+	+	-	-	+	+
	+	+	-	-	+	+
	+	+	-	-	+	+

Toliau pateikiami skirtingų BIM programinės įrangos paketų privalumai ir trūkumai gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo srityje.

1.2 lentelė. BIM programinės įrangos paketų privalumų ir trūkumų analizė

	Programinės įrangos privalumai	Programinės įrangos trūkumai
	• Įvairių statybinių konstrukcijų projektavimui, labiausiai pritaikyta gelžbetoninėms konstrukcijoms projektuoti; • galimas dalinai automatizuotas armatūros modeliavimas, paremtas gaminio geometrija; • galimas automatizuotas surenkamųjų gaminių brėžinių generavimas; • galima integracija/programinis susiejimas, taikant Tekla OPEN API platformą; • įmanomas automatizuotas gaminių armavimas, paremtas sukaupta gelžbetoninių surenkamųjų gaminių duomenų baze.	• Kol kas negalimas visiškai automatizuotas armatūros modeliavimas, pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus.
	• Multidisciplinė platforma, tinka įvairaus tipo konstrukcijoms modeliuoti.	• Remiantis inžinierių atsiliepimais – nelankstus įrankis surenkamųjų gelžbetoninių gaminių projektavimo rinkai (trečiosios šalys reikalauja programinės įrangos paketų skirtingo pritaikymo, pagal įmonės standartus); • negalimas automatizuotas armavimas, paremtas duomenų bazės sukauptais duomenimis.
	• Automatizuotas gaminių brėžinių generavimas; • integracija su <i>Autodesk AutoCAD, Revit, BricsCAD</i>; puikus įrankis statybos darbų, procesų organizavimui, planavimui, gamybos ir montavimo eigos planavimui.	• Negalimas automatizuotas armatūros modeliavimas, pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus; • negalimas automatizuotas gaminių armavimas, paremtas sukaupta gelžbetoninių surenkamųjų gaminių duomenų baze; • programinė įranga, specializuota tik surenkamiesiems gelžbetoniniams gaminiams projektuoti; pritaikytas naudoti pagal skandinaviskus standartus.
	• Automatizuotas gaminių brėžinių generavimas; • geras įrankis vizualiniam konstrukcijos pateikimui, turi vizualizavimo funkcijas.	• Negalimas automatizuotas armatūros modeliavimas pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus; • negalimas automatizuotas gaminių armavimas, paremtas sukaupta gelžbetoninių surenkamųjų gaminių duomenų baze; • programinė įranga, specializuota tik surenkamiems gelžbetoniniams gaminiams projektuoti, nelankstus pritaikymas kito pobūdžio statybinėms konstrukcijoms.
	• Automatizuotas gaminių brėžinių generavimas; • sąsaja su inžinerinės analizės ir kompiuterizuotos gamybos sistemomis.	• Negalimas automatizuotas armatūros modeliavimas, pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus; • negalimas automatizuotas gaminių armavimas, paremtas sukaupta gelžbetoninių surenkamųjų gaminių duomenų baze.

Pagal atliktą atlikto gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo programinės įrangos funkcionalumo analizę nustatyta, kad vienintelės *Tekla Structures* programos vystytojai suteikia atvirojo kodo prieigą *Tekla OPEN API* programinių papildinių kūrimu užsiimantiems nepriklausomiems vartotojams. Dėl šios priežasties automatizuoto armavimo proceso idėja įgyvendinama pasirenkant būtent šį programinį paketą.

Mokslininkas C. Eastmanas (2013) kartu su kolegomis atliktame tyrime išskiria dažniausiai naudojamas parametrinio modeliavimo sistemas specifinėje gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo srityje (žr. 3.1 lentelė.).

3.1 lentelė. Populiariausi 3D gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo įrankiai ir jų galimybės, projektuojant gelžbetonines konstrukcijas (Eastman et al., 2013)

BIM programinės įrangos įrankių redagavimo ir atnaujinimo galimybės	Skaiciuojamoji analizė ir projektavimas		Detalizavimas		
	<i>Autodesk Revit Structure</i>	<i>SCIA Eng.</i>	<i>Allplan Eng.</i>	<i>Bentley ProConc rete</i>	<i>Trimble Tekla Structures</i>
Modeliuojamos armatūros pakeitimų fiksavimas visuose brėžiniuose ir jų vaizduose	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip
Vieno suarmuoto elemento armatūros pokyčių pritaikymas kitiems to paties tipo elementams	Taip	Ne	Ne	Ne	Ne
Automatinis armatūros parametrų atnaujinimas betoniniuose elementuose (angl. <i>Part</i>)	Taip	Taip	Ne	Taip	Taip
Armatūros išilginių strypų ir lankstinių grupių (angl. <i>Reinforcement association</i>) priskyrimas gelžbetoninio elemento pagrindiniam komponentui (angl. <i>Assemblies</i>)	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip
Atskirų armatūros strypų atskyrimas nuo grupės, pavienių strypų redagavimas	Dalinai	Taip	Taip	Taip	Taip
Armatūros strypų grupavimas	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip
Elementų sudarančių detalių ir papildomų komponentų hierarchijos lygiai	Taip	Ne	Taip	Ne	Taip

Anksčiau pateikta informacija parodo, kokiomis funkcijomis pasižymi pasirinktos programos gelžbetoninių gaminių projektavimo, skaičiavimo bei armatūros ir konstrukcinių jungčių detalizavimo fazėje.

1.3.5. Šiuolaikinių BIM technologijų raida

Pastatų informacinis modeliavimas neretai laikomas vienu iš būdų pritaikyti naujausias kompiuterines technologijas architektūros ir statybos srityse. Dabartinės BIM technologijos yra sparčiai pažengusios, kalbant apie kompiuterinio modeliavimo (CAD) sistemų vystymą bei galimybę integruoti įvairias technologijas, tokias kaip: papildytoji realybė, 3D lazerinis skenavimas, debesų kompiuterijos platformų naudojimas tarpdisciplininio bendradarbiavimo procese ir t. t.

Kalbant apie kompiuterinio projektavimo programų tobulinimą, vis dažniau akcentuojamos modeliavimo realiu laiku galimybės bei generatyvinio dizaino įrankių taikymas. Pastaroji technologija pasižymi aukšto lygio interaktyvumu bei leidžia inžinieriams optimaliai išnaudoti

pastato tūrį tvarumo, ekologiškumo, ekonomiškumo aspektais. Generatyvinio dizaino technologijos paremtos algoritminio projektavimo principu. Pagal įvesties į programą parametrus inžinieriai gali sukurti daug skirtingų sprendinių tai pačiai projektuojamai situacijai. Paprastai užtenka įvesti privalomas parinktis ir generatyvinio dizaino technologija pati sugeneruoja optimaliausią elemento ar bendrą konstrukcinio objekto sprendinį.

Šiuo metu paminėtų priemonių takymas BIM technologijų srityje nėra naujiena. Kadangi BIM technologijų raida yra nuolatinė ir nenutrūkstanti, tai natūralu, kad kyla klausimas, kaip toliau bus tobulinamas kompiuterinis projektavimas. CAD pramonėje vis labiau atsižvelgiama į procesų automatizavimo naudą ir svarbą. Automatizacija vis labiau skverbiasi į visas BIM programinės įrangos rinkas, o kompiuterinio projektavimo sistemos yra ne išimtis (Gigante, 2019). BIM sistemos numatytose duomenų bazėse geba nesudėtingai kaupti bei generuoti įvairaus formato duomenis apie projektuojamus pastatus. Kadangi duomenų kaupimas ir panaudojimas ateities sprendimų priėmimo yra dirbtinio intelekto (AI) veikimo pagrindas, tai tikėtina, kad BIM programinių įrankių vystymo eigoje vis dažniau bus minimas kompiuterių mokymo algoritmų integravimas, tobulinant kompiuterinio projektavimo sistemas (AI and BIM..., 2019).

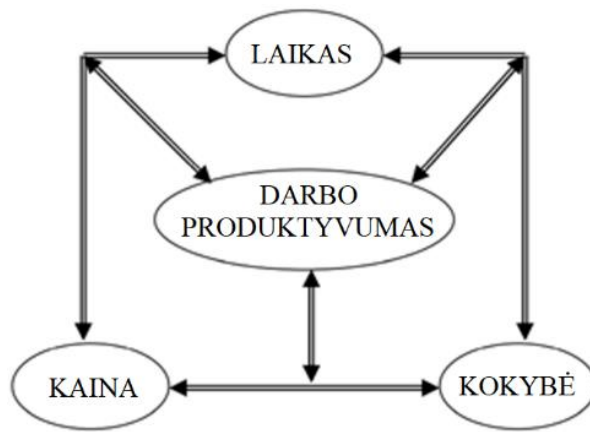
1.4. Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo problematika

Gelžbetoninių konstrukcijų elementų projektavimas iki šiol inžinierių atliekamas rankiniu būdu. Pastebėta, kad tokiu būdu atliekamas darbas gali sukelti tam tikras komplikacijas statybos projektuose. Kad išvengtume pasekmių statybos projektuose ir keltume statybos procesų automatizacijos lygį, turime tinkamai išanalizuoti problemas, su kuriomis susiduriama atliekant gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo darbus bei suprasti jas sukeliančias aplinkybes.

1.4.1. Nepakankamai efektyvus darbo problema

Daugelis statybos projekto specialistų, atsakingų už statinio konstrukcinės dalies rengimą teigia, kad sėkmingas statybos projektas itin priklauso nuo tinkamai įvertintų laiko, finansų ir kokybės aspektų. Idealiu atveju visi statybos projekto dalyviai turėtų stengtis sėkmingai įgyvendinti kiekvieną etapą tam, kad projektas būtų parengtas laiku, kokybiškai ir pagal ekonomiškai numatytas sąnaudas (Migilinskas, 2021). Kai kurių mokslininkų nuomonė sutampa su šiuo teiginiu. Pavyzdžiui, mokslininkas Ulubeyli's kartu su kolegomis atliko tyrimą ir išskyrė tokius esminius statybos projekto sėkmę lemiančius veiksnius (žr. 1.11 pav.):

- 1) laikas;
- 2) kaina;
- 3) kokybė.
- 4) darbo produktyvumas (Ulubeyli et al., 2014).



1.11 pav. Pagrindiniai statybos projekto sudedamieji elementai (Ulubeyli et al., 2014)

Šios sąvokos apima visus statybos projekto etapus ir dalyvius. Pavyzdžiui: jei suplanuotas projektas turi trumpą įgyvendinimo terminą, tai tikėtina, kad tai gali sumažinti projekto kainą, tačiau kyla didelė tikimybė, kad suprojektuotų elementų kokybė neatitiks esminių projekto pradžioje numatytų reikalavimų. Jei kokybė nėra užtikrinama, atsiradę projekto pakeitimai padidina projekto laiko ir finansinius kaštus. Todėl šių aspektų tinkamas tarpusavio sąveikos užtikrinimas yra ypač svarbus įgyvendinant statybos projektus.

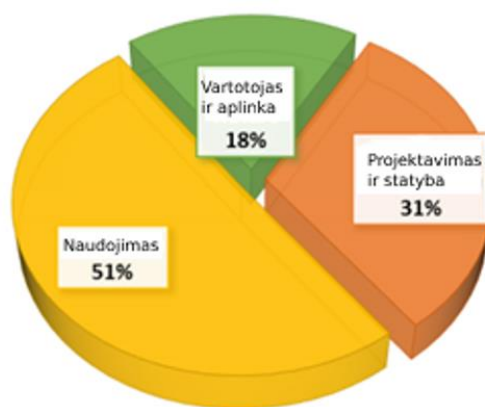
Kalbant apie projektavimo etapą svarbu akcentuoti, kad konstrukcijas projektuojantys inžinieriai pateiktą numatytą projektinę dokumentaciją (brėžinius, žiniaraščius, modelius) laiku ir be klaidų, t. y. kad nebūtų išauginami projekto kaštai dėl papildomo laiko, reikalingo pakeitimams atlikti. Apibrėžiami tokie projektuotojų darbo efektyvumą lemiantys veiksniai:

- 1) patirties ir žinių trūkumas;
- 2) neteisingai interpretuojami projektavimo sprendiniai;
- 3) prasta komunikacija tarp projektą koordinuojančių ir projektuojančių asmenų;
- 4) prastas laiko planavimas;
- 5) negebėjimas tinkamai atlikti projekto pakeitimus.

Taigi pagal šiuos veiksnius matome, kad nepakankamo projektuotojų darbo našumo problemos sprendimas yra svarbus konstrukcijų projektavimo efektyvumui didinti. Automatizuotas projektavimas gali eliminuoti minimus veiksniai ir tokiu būdu sumažinti laiko ir finansinius statybos projekto kaštus.

1.4.2. Klaidos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo etape

Remiantis mokslininko Galvao ir jo kolegų atlikto tyrimo duomenimis, pastebima, kad projektuojant gelžbetonines tiltų konstrukcijas, daugiau nei 30 % klaidų kyla statybos ir projektavimo etapų metu (žr. 1.12 pav.). Šis tyrimas parodo, kad egzistuoja galimos konstrukcijų deformacijos ar visiškas suirimas dėl rizikos, kurią sukelia netinkamai atliktas projektuotojų ar statytojų darbas.



1.12 pav. Gelžbetoninių tiltų deformacijas ar griūtis sukeliančios priežastys (Galvao et al., 2018)

Kadangi baigiamajame darbe nagrinėjamas projektavimo etapas, todėl svarbu identifikuoti, kokios dažniausiai pasikartojančios klaidos ir kolizijų tikimybė kyla būtent šiame etape. Pagal to paties autoriaus atliktos apklausos rezultatus (žr. 1.4 lentelė.) identifikuojamos projektavimo klaidos:

- 1) neteisingai įvertinti ar interpretuoti skaičiuojamosios analizės rezultatai;
- 2) kolizijos, kylančios dėl netinkamai suprojektuotos armatūros gelžbetoniniams elementams: neteisingas armatūros poreikis, strypų išdėstymas, skerspjūvis, nepakankamas armatūros strypų inkaravimo ar užlaidos ilgis (Galvao et al., 2018).

1.4 lentelė. Dažniausios gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo klaidos (Galvao et al., 2018)

Klaidų grupavimas	Galimų projektavimo klaidų sąrašas	Dažnis	Pasėkmių reikšmingumas
Projektavimo klaidos. Skaičiuojamoji analizė ir projektavimas	Klaidos dėl nevieningų projektavimo ir skaičiavimo normų tarp įvairių šalių	16	17
	Klaidos dėl projektavimo normų interpretavimo	9	20
	Klaidos dėl nepakankamo naudojimo apkrovos vertinimo	13	14
	Klaidos dėl nepakankamo nuolatinės apkrovos vertinimo	20	1
	Klaidos dėl netinkamo reikšmingiausio apkrovų derinio pasirinkimo	11	7
	Klaidos, atsirandančios dėl neteisingai įvertinto elementų svorio centro ar ekscentriciteto	18	11
	Klaida, apibrėžiant skerspjūvio šlyties centrą (sukimo efektai)	7	18
	Klaida, įvertinant poslinkio poveikį dėl šliaužimo, temperatūros pokyčių, antros eilės efektas	1	16
	Klaida apibrėžiant elemento išlinkio ilgį	12	10
	Klaida apibrėžiant tempimo lynus	15	8
Detalizavimas	Klaidos vertinant dekompresiją	14	19
	Klaida apibrėžiant hiperstatinius skaičiavimus	3	15
	Klaida įvertinant dirvožemio/geologines sąlygas	2	12
	Klaidos dėl nepakankamos patirties projektuojant sudėtingas konstrukcines sistemas	5	2
	Klaida modeliuojant jungtis tarp konstrukcinių elementų	8	5
	Klaida dėl projektavimo prielaidų ir detalizavimo taisyklių nuoseklumo	4	9
	Klaida skaičiuojant armatūros skerspjūvį	17	3
	Armatūros išdėstymo klaida (skersinės/išilginis tvirtinimas)	10	4

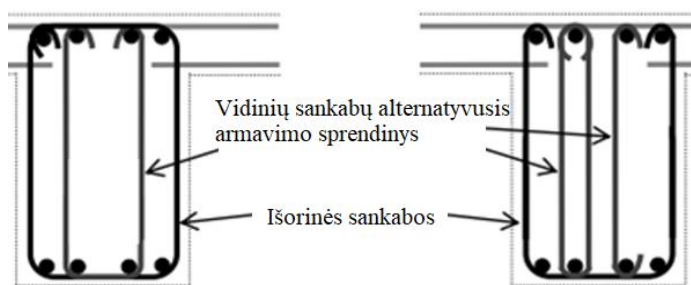
Iš 1.4 lentelėje pateiktų duomenų, pastebima, kad daugiausia susiduriama su nepakankama projektuotojų patirtimi, įvertinant skaičiuojamosios analizės rezultatus bei kolizijų rizika,

atsirandančia dėl neteisingai suprojektuotos ar poreikio netenkinančios armatūros gelžbetoniniuose elementuose. Taigi galima daryti išvadą, kad dėl projektuotojų klaidų kyla grėsmė neteisingam skaičiuojamosios analizės rezultatų interpretavimui ar nepakankamam gelžbetoninių elementų armavimui.

1.4.3. Suvienodinti gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo sprendiniai

Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo darbas yra itin atsakingas ir reikalauja specifinių inžinerinių žinių, erdvinio suvokimo. Neretai gelžbetoninių konstrukcijų projektavimu užsiimančioje įmonėje kyla situacijos, kuomet dėl prastos projektuotojų tarpusavio komunikacijos ir vidinės standartizuotos armavimo sistemos trūkumo tai pačiai situacijai suprojektuojami nevienodi armavimo sprendiniai, o tai padidina nepagrįstai skirtingų armatūros lankstinių kiekį. Nesuvienodinti surenkamųjų elementų armavimo sprendiniai paprastai išaugina surenkamųjų gaminių klojinių ruošimo laiką gamykloje, o tai padidina ir bendras statybos projekto ekonomines sąnaudas. Gamybiniame modelyje, esant tokiai pačiai elementų armavimo situacijai, šie kaštai gali būti sutaupomi sumodeliuojant ir pagal kiekių žiniarasčius užsakant kuo didesnę kiekį vienodų armatūros lankstinių.

Be to, universali armavimo projektavimo sistema gali ne tik suvienodinti armatūros sprendinius, bet ir teigiamai paveikti gelžbetoninių konstrukcijų projektavimu užsiimančios įmonės įvaizdį. Apie alternatyvių armavimo sprendinių atsiradimo problemą taip pat kalba mokslininkės Dahlgren ir Svensson (2013). Pateiktame paveiksle (žr. 1.13 pav.) pastebima, kad tai pačiai projektavimo metu atsirandančiai situacijai gali būti taikomi skirtingi armavimo sprendiniai (Dahlgren & Svensson, 2013). Tokiu atveju patvirtinama prielaida, kad atliekant armatūros projektavimo gelžbetoniniuose gaminiuose darbus, tai pačiai armavimo situacijai egzistuoja konstrukcinių sprendinių įvairovė.



1.13 pav. Sijos armavimo alternatyvos (Dahlgren & Svensson, 2013)

Automatizuoto armavimo įrankis galimai padėtų unifikuoti (standartizuoti) armavimo sprendinius pagal gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo įmonėje taikomą ilgametę patirtį ir maksimaliai sumažinti ne pagal normatyvinius reikalavimus atlikto armavimo riziką. Tikėtina, kad projektuotojai, naudodami tas pačias parinktis, galėtų sugeneruoti panašius ar net identiškus armavimo rezultatus.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados

Gelžbetoninės surenkamosios konstrukcijos pasižymi aukštais gaminių kokybės standartais, patogiu transportavimu, galimybėmis montuoti greitai ir bet kuriuo metų laiku bei automatizuotos įrangos pritaikymo galimybe gamybos ir montavimo procesų metu. Tad galima sakyti, kad šio tipo konstrukcijos laikomos potencialiu būdu sutaupyti statybos projekto kaštus, efektyvinant statybvietyje atliekamų darbų trukmę bei keliant statybos sektorių į aukštesnį technologiškumo lygį.

Šiuolaikiniai BIM programiniai įrankiai kilę iš bendro naudojimo kompiuterinio projektavimo programų. Besivystant kompiuterinio braižymo plokštumoje (2D) ir parametrizuoto projektavimo (3D) sistemoms, atsirado poreikis susieti atskirų projekto dalyvių bendrą darbą. Kuriant BIM projektus techninio ir darbo projektų rengimo metu itin svarbi nuolatinė komunikacija tarp architektų, konstruktorių ir kt. disciplinų atstovų (Popov, 2021). Galimybė kompiuterinio projektavimo (CAD) sistemas naudoti kartu su inžinerinių skaičiavimų (CAE) kompiuterizuotomis sistemomis palengvina tarpusavio bendradarbiavimo procesus. CAD ir CAE sistemų integralumo galimybės bei skaitmeninių duomenų mainai iki šiol leidžia pagerinti bendradarbiavimą, sumažinti projektavimo etape kylančią neapibrėžtumų tikimybę, pagreitinoti projekto atlikimo kokybę, užtikrinti efektyvios statybos ir gamybos principus bei užtikrinti ištisinį (nenutrūkstamą) projektavimo procesą.

Pastatų informacinis modeliavimas neretai laikomas vienu iš būdų pritaikyti naujausias kompiuterines technologijas architektūros ir statybos srityse. Šiuolaikinių BIM technologijų pažanga glaudžiai siejama su kompiuterinio projektavimo sistemų tobulinimu, paremtu algoritminiu projektavimu bei aukštųjų technologijų integracijos galimybėmis, pavyzdžiui, virtualiosios realybės, 3D lazerinio skenavimo pritaikymu statyboje. Manoma, kad kitas BIM pramonės vystymo etapas bus procesų automatizacija. Kadangi BIM sistemos turi galimybę duomenų bazėse kaupti informaciją apie projektuojamus bei eksploatuojamus pastatus, o duomenų rinkimas bei prognozių generavimas yra dirbtinio intelekto sistemų pagrindas, tai realu, kad BIM programinių įrankių vystymo kontekste vis dažniau bus minimas kompiuterių mokymo algoritmų panaudojimas.

Gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų populiarumas kasmet vis didėja (AI and BIM..., 2019), tai šių konstrukcijų projektavimu užsiimančios įmonės ieško galimybių, galinčių paspartinti projektavimo stadijos metu atliekamus darbus. Iki šių dienų gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo (CAD) programinė įranga leidžia armatūros modeliavimą atlikti tik rankiniu būdu. Dėl mechanškai atliekamų, pasikartojančių veiksmų bei nepakankamos projektuotojų kompetencijos, atliekant armatūros modeliavimo procesus, projektavimo etape kyla klaidų ir turi būti įgyvendinami projekto pakeitimai, dėl kurių padidėja bendri statybos projekto laiko bei ekonominiai kaštai. Be to, neretai toje pačioje projektavimo įmonėje nepakankamai dėmesio skiriama standartizuotos armavimo sistemos kūrimui. Taigi, baigiamajame darbe keliama hipotezė, kad pirmame skyriuje aptarta gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo problematika gali būti išspręsta, dėl galimybių

tobulinti esamą gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo programinę įrangą, leidžiančią automatizuoti armatūros modeliavimo procesus.

2. TEORINĖ GELŽBETONINIŲ SURENKAMŲJŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO PROBLEMŲ SPRENDIMO GALIMYBĖ

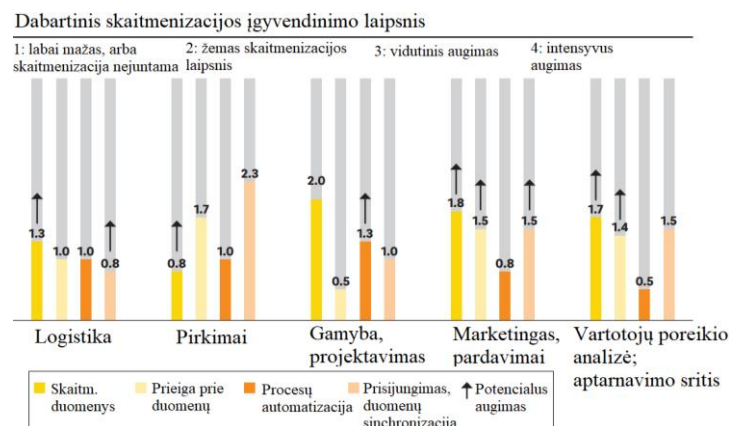
2.1. Dirbtinio intelekto aprašymas ir panaudojimas statybos sektoriuje

Dar visai neseniai AEC (angl. *Architecture, Engineering and Construction*) rinka susidūrė su nauja technologija, vadinama pastato informaciniu modeliavimu (BIM). Vos atsiradusi, ši technologija sukėlė perversmą statybos sektoriuje, suteikdama galimybę kurti virtualius pastatus prieš prasidedant faktinei statybai. Šiuo metu vis dažniau pastebima, kad statybos pramonėje atsiranda dar viena inovatyvi technologija, vadinama dirbtiniu intelektu, kurios pritaikymas siejamas su galimybe automatizuoti bet kokios srities procesus, kuriuose yra naudojamas kompiuteris. Šiuo metu viena populiariausių dirbtinio intelekto sričių problemų sprendime bei procesų automatizavime – kompiuterių mokymas (angl. *Machine learning*). Tyrinėdami kompiuterių mokymą, atkreipiame dėmesį į kompiuterio gebėjimą ne tik savarankiškai generuoti prognozes, bet ir pačiam pasirinkti teisingus spėjimus (Hurwitz & Kirsch, 2018). Šioje vietoje svarbu pasakyti, kad dirbtiniu intelektu pagrįstu algoritmu veikiančios sistemos yra visų automatizuotų sistemų pagrindas.

Pamažu procesų automatizacijos apibrėžimas pradėtas minėti ir pastato informacinio modeliavimo specialistų bendruomenėje. Mokslininkas Bergeris, kalbantis apie skaitmenizavimo bei automatizavimo svarbą statybų sektoriuje, išskiria keturis rodiklius, keliančius statybų srities technologijas į aukštesnį lygį (žr. 2.1 pav):

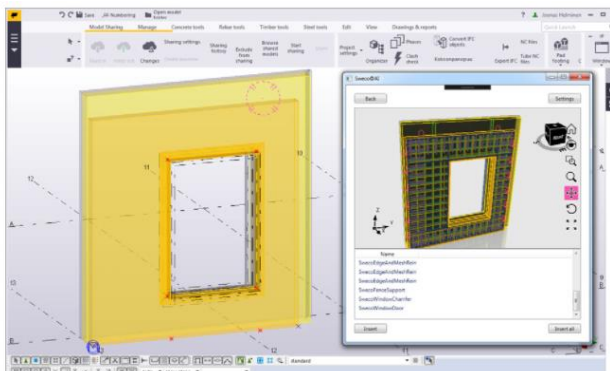
- 1) skaitmeninių duomenų rinkimas ir analizė;
- 2) veiklos sričių ryšys ir tarpusavio sinchronizacija;
- 3) mobili prieiga duomenims generuoti;
- 4) procesų automatizacija.

Pagal atlikto eksperimento duomenis pastebima, kad procesų automatizacijos rodiklis progresuoja lygiagrečiai kitų išvardintų rodiklių. Iš to galime spręsti, kad automatizacija yra auganti sritis konstrukcijų projektavimo ir gamybos procesų srityje (Berger, 2016).



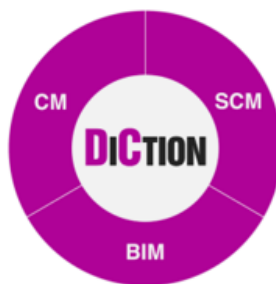
2.1 pav. Skaitmenizacijos įgyvendinimo laipsnis įvairiose statybos srityse (Berger, 2016)

Automatizacijos ir skaitmenizacijos technologijų diegimo svarbą konstrukcijų projektavimo srityje taip pat pastebi mokslininkas R. Farinha. Vienas svarbiausių mokslininko pasiekimų architektūros ir statybos inžinerijos srityse yra daugiasluoksnės sienos elemento automatizuoto armavimo proceso įgyvendinimas, naudojant programinį įrankį, susietą su *Tekla Structures* programos aplinka. Šis įrankis veikia dirbtinio intelekto sistemų pagrindu (žr. 2.2 pav.). Autoriaus teigimu, toks pasiekimas leidžia efektyvinti projektuotojo darbą ir maksimaliai sumažinti žmogiškojo faktoriaus klaidų riziką (Heiskanen, 2018).



2.2 pav. Automatizuoto armavimo pavyzdys *Tekla Structures* programoje (Heiskanen, 2018)

Taip pat statybinių konstrukcijų skaitmenizavimo ir automatizavimo procesų tobulinimas diegiant naujus įrankius, nagrinėjamas Suomijoje esančiame Aalto universitete (žr. 2.3 pav.).



2.3 pav. Aalto universitete vykdomas mokslinis projektas DiCtion (DiCtion: Digitalising..., 2019)

2019 metais pradėtas vystyti 12 inžinerių ir programuotojų komandos projektas *DiCtion*, kuriuo siekiama kurti ir išbandyti įvairius duomenų modelius ir technologijas, pagrįstus dirbtinio intelekto diegimu, siekiant pagerinti ne tik projektavimo etapo procesus, bet ir tiekimo grandinės statybvietėje produktyvumą (DiCtion: Digitalising..., 2019).

2.2. Kompiuterių mokymo apžvalga

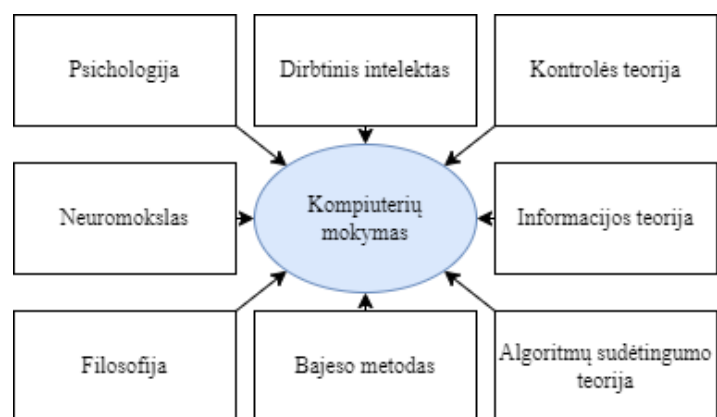
Kompiuterių mokymas taikomas įvairiose srityse dėl galimybės spręsti problemas apdorojant dideles duomenų imtis ir sugeneruoti spėjimus, analizuojant panašios problematikos uždavinius. Šiuo metu dirbtinio intelekto technologijų sferoje paplitusi 4 technologijų konvergencija SMAC (angl. *Social, Mobile, Analytic, Cloud*, liet. *socialinis, mobilus, analitinis, virtualusis*) (žr. 2.1 lentelė.),

leidžianti perkelti verslo modelius į skaitmeninę erdvę bei atverianti kelią nagrinėti didelius praeityje sukauptų duomenų kiekius bei prognozuoti vartotojų elgseną, naudojant dirbtinio intelekto sistemas, tokias kaip kompiuterių mokymas. Be to, šis keturių sričių suvienijimas padeda verslo įmonėms priartėti prie kliento sekant ir analizuojant skaitmeninius duomenis apie jį. Duomenys apie klientą ir jo poreikius renkami nuolat, vos tik vartotojas naudoja įrenginius, kuriuose yra jo sukurtos paskyros, pavyzdžiui: naudojant mobiliuosius įrenginius, socialinę žiniasklaidą, lojalumo kortelių programas ir naršymą svetainėse su turimais slapukais. Šių keturių technologijų tarpusavio ryšys sukuria konkurencinį pranašumą ir naujas verslo galimybes skaitmeninėje erdvėje veikiančioms įmonėms (Laskowski, 2017).

2.1 lentelė. Keturių technologijų konvergencija (Laskowski, 2017)

Socialinė medija	Išmanieji įrenginiai	Duomenų analitika	Debesų kompiuterija
Socialinės medijos platformos padeda verslo įmonėms rinkti ir analizuoti informaciją apie esamus ir potencialius klientus.	Mobilieji išmanieji prietaisai – įrankiai duomenims apie vartotojus ir jų poreikius rinkti.	Duomenų analitika leidžia įvairaus verslo kompanijoms nustatyti ir remtis ateities prognozėmis.	Debesų kompiuterija leidžia įmonėms lengviau rinkti duomenis (užtenka tik aktyvios interneto prieigos) ir pritaikyti prie rinkos ir vartotojų poreikių, reprezentuojant norimus duomenis skaitmeninėje erdvėje.

Mokslininkų Singho ir Dhimano (2021) manymu, dėl galimybės sparčiai generuoti didelius duomenų kiekius apie vartotojus ir sekti jų besikeičiančius poreikius vis dažniau taikomi kompiuterių mokymo algoritmai ir jų generuojamos prognozės. Kompiuterių mokymo modelis gali imituoti ir nuspėti žmogaus elgesį, t. y. jo ateities pasirinkimą. Pavyzdžiui, kiekvienas vartotojo atliktas veiksmas tampa sistemos savarankiško mokymosi pagrindu. Remiantis mokslininko Alzubi'o ir jo kolegų pateikiamomis įžvalgomis, kompiuterių mokymo modelių taikymas atveria kelią naudoti šio tipo mokymą darbui su duomenimis, atliekant įvairių sričių komercinius ir mokslinius tyrimus (Alzubi et al., 2018). Taigi galima teigti, kad šiuo metu kompiuterių mokymas vis plačiau taikomas kaip esminis duomenų analizės komponentas, gebantis pats atrasti pasikartojančias duomenų struktūras ir iš jų savarankiškai mokytis, nepriklausomai nuo taikymo srities. (žr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Kompiuterių mokymo taikymas įvairiose srityse (Alzubi et al., 2018)

Svarbu paminėti, kad kompiuterių mokymui būdingas ne atsitiktinis sprendinio parinkimas, o mokymasis, kaip pasirinkti teisingiausią sprendinį pagal modeliui pateiktus įvesties (angl. *Input*) ir išvesties (angl. *Output*) duomenis. Generuojamų spėjimų tikslumas tiesiogiai priklauso nuo duomenų bazėje esančių užduoties sprendinių skaičius, t. y. kuo daugiau duomenų bazėje įkelta teisingų užduoties sprendinių, tuo algoritmo atspėtos prognozės yra taiklesnės.

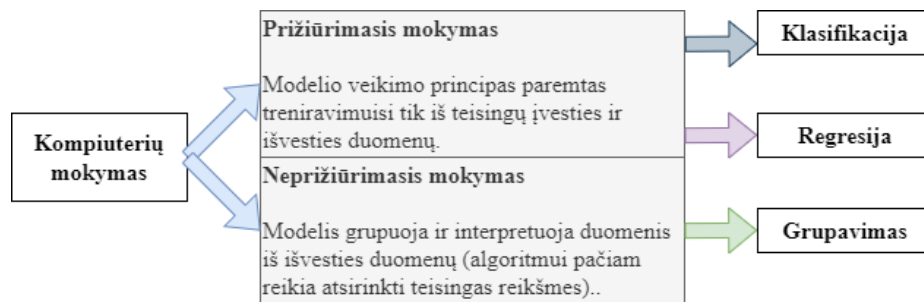
Mokslininko Meyfroidto ir jo kolegų teigimu kompiuterių mokymas yra daugiadisciplinė sritis, turinti sąsajų su tikimybių teorija, valdymo ir informacijos teorija, neurobiologija bei matematine statistika. Pastaroji sritis itin glaudžiai susijusi su kompiuterių mokymo samprata, nes sistemos mokymas ir statistika – metodai, skirti duomenų analizei ir sistemų prognozių teikimui (Meyfroidt et al., 2009) (žr. 2.2 lentelė.).

2.2 lentelė. Kompiuterių mokymo taikymui reikalingi duomenys (Bhatti, 2019)

	Statistika	Kompiuterių mokymas
Metodas	• Duomenų apdorojimo procesas	• Algoritminis modelis
Mokslų šaka	• Matematika	• Duomenų mokslas
Tikslas	• Hipotezės pagrindimas	• Nuspėjamumas, tikslumas
Duomenų imties dydis	• Bet kokio dydžio duomenų rinkinys (angl. Any Reasonable Set)	• Dideli struktūrizuoti bei nestrukūrizuoti duomenų kiekiai (angl. Big Data)
Kriterijai	• Sąlyginai nedidelio dydžio duomenų rinkinys	• Dideli struktūrizuoti bei nestrukūrizuoti duomenų kiekiai
Rezultatai, išvados	• Parametrų vertinimas, spėjimo reikšmės, klaidų vertinimas	• Tik spėjimo reikšmės
Modelio tipas	• Priklauso nuo modeliui reikalingų parametrų reikšmės	• Kryžminis (angl. Cross – validation) spėjimo tikslumo patvirtinimas
Įrankiai	• R	• Python
Aiškumas, tikslumas	• Aukštas	• Žemas

Kompiuterių mokymo modeliui pagal duomenų struktūrizavimą taikomi skirtingi metodai. Klasikinio programavimo atveju kompiuteriui yra pateikiamos taisyklės ir tam tikras kiekis duomenų. Kaip rezultatas gaunamas algoritmo sugeneruotas aiškus atsakymas, pavyzdžiui: *taip* – jei teigiamas rezultatas, *ne* – jei neigiamas rezultatas. Lyginant su klasikiniu programavimu, kompiuterių mokymo taikymo atveju modelio algoritmo pateiktas rezultatas nėra konkretus atsakymas, tai yra prognozė. Modelis kaip rezultatą pateikia taisykles arba spėjimus, kurie taikomi darbui su naujai pateiktais duomenimis ir sprendimų priėmimui ateityje.

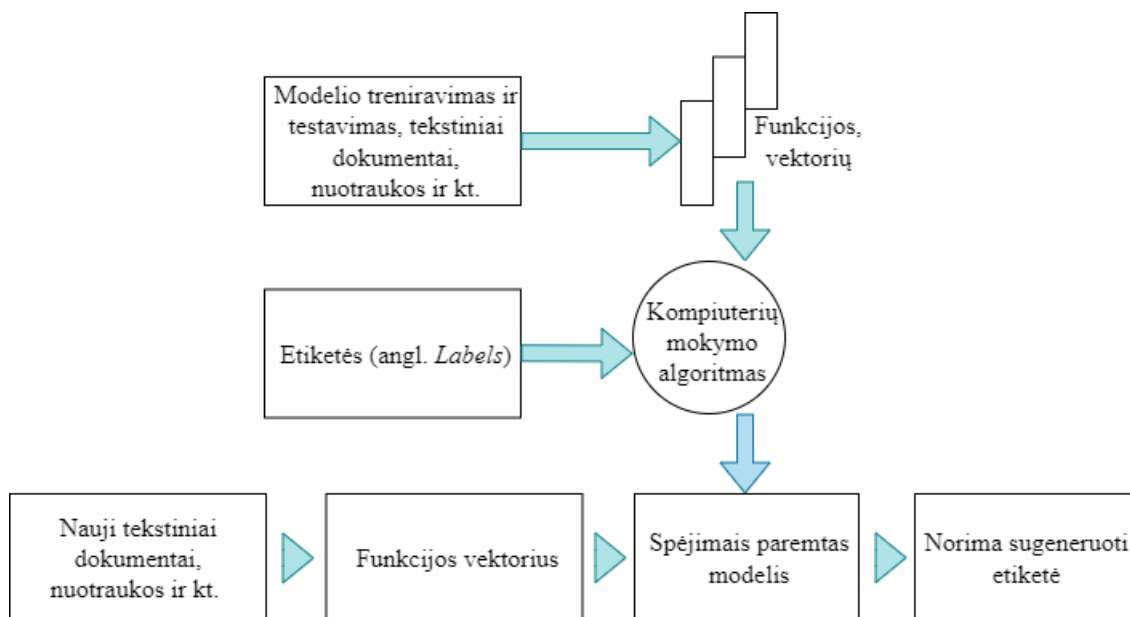
Pagal mokslininkus Bunkerį ir Thabtah (2019), dažniausiai išskiriamos keturios pagrindinės kompiuterių mokymo metodų grupės: prižiūrimasis, neprižiūrimasis, pastiprinamasis ir gilusis mokymas (žr. 2.5 pav.; 2.3 lentelė.) (Bunker & Thabtah, 2019).



2.5 pav. Kompiuterių mokymo metodų grupės (Bunker & Thabtah, 2019)

2.2.1. Prižiūrimasis mokymas ir jo taikymas

Paprasčiausias ir dažniausiai taikomas prižiūrimasis (angl. *Supervised learning*) kompiuterių mokymo metodas. Šiam kompiuterių mokymo metodui būdinga tai, kad modelis sukuriamas ir mokomas iš praeityje sugeneruotų teisingų įvesties bei išvesties duomenų (Alzubi et al., 2018). Pagal to paties autoriaus pateikiamą schemą (žr. 2.6 pav.) matome, kad prižiūrimojo mokymo algoritmui veikti turi būti: paruošiamas tekstinių, grafinių ir kt. pobūdžio duomenų rinkinys, numatoma algoritmo veikimo funkcija, pagal numatytą kompiuterių mokymo modelio architektūrą numatomas įvesties bei išvesties duomenų žymėjimas ir galiausiai atliekamas modelio treniravimas, testavimas, ženklinami gauti teisingi prognozių rezultatai.



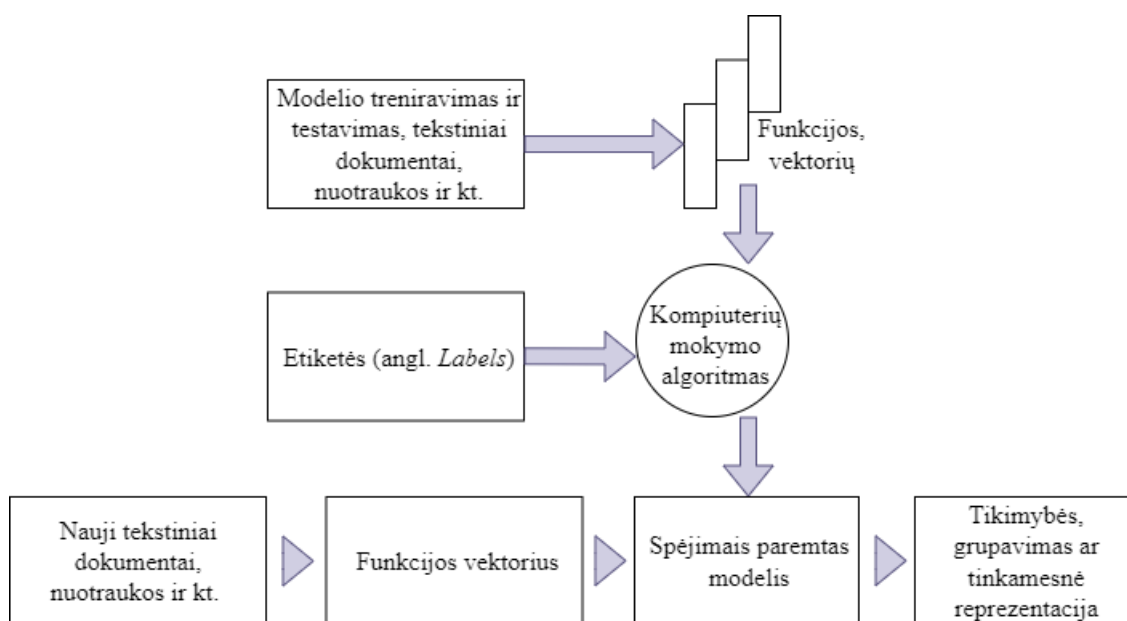
2.6 pav. Prižiūrimojo kompiuterių mokymo struktūra (Alzubi et al., 2018)

Reikėtų paminėti, kad taikant prižiūrimojo mokymo metodą ir algoritmus, iš pradžių turi būti paruošiamas struktūrizuotų duomenų rinkinys. Toliau numatomos teisingos kompiuterių mokymo modelio įvesties ir išvesties reikšmės, parametrai, modelio architektūra. Reikia pastebėti, kad šio metodo algoritmai atlieka išvesties rezultatų palyginimą su jam pateiktais pradiniais įvesties duomenimis. Daugelio autorių, tarp jų ir Alpaydino (2020), pabrėžiama, kad tokiu būdu identifikuojami nesutapimai ir modelis gali pats modifikuoti jo paties sugeneruotų spėjimų reikšmes.

Dažniausiai taikomi prižiūrimojo mokymo algoritmai: klasifikavimas ir regresija. Regresijos algoritmai paprastai naudojami tuo atveju, kai išvesties rezultatai gali turėti bet kokią kiekybinę reikšmę numatytoje aibėje, t. y. regresija taikoma tuo metu, kai darbui su kompiuterių mokymo modeliu naudojame skaitine verte išreikštus duomenis.

2.2.2. Neprižiūrimasis mokymas ir jo taikymas

Neprižiūrimasis mokymas (angl. *Unsupervised learning*) naudojamas darbui su nestruktūrizuotais duomenimis. Pagal pateiktą schemą (žr. 2.7 pav.), modelis sukuriamas bei mokomas panašiu principu, kaip ir taikant prižiūrimojo mokymo metodą, tačiau pastebima, kad taikant šį metodą kompiuterių mokymo modelį, numatyto algoritmo treniravimui ir testavimui naudojami duomenys nėra iš anksto ženklinami.



2.7 pav. Neprižiūrimojo kompiuterių mokymo struktūra (Alzubi et al., 2018)

Be to, neprižiūrimasis mokymas daugiausiai žinomas dėl galimybės grupuoti tam tikrų objektų rinkinius pagal panašius požymius turinčius objektus, tad šiam kompiuterių mokymo metodui dažniausiai taikomi grupavimo (angl. *Clustering*) algoritmai (Alzubi et al., 2018).

2.2.3. Pastiprinamasis mokymas ir jo taikymas

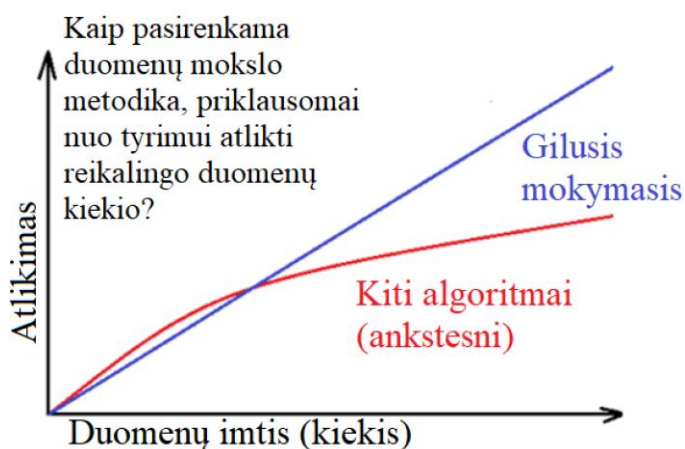
Pastiprinamasis mokymas (angl. *Reinforcement learning*) pasižymi tuo, jog modelis gauna informaciją apie aplinką ir savarankiškai išmoksta pasirinkti jam naudingus ar nenaudingus veiksmus. Algoritmo progresas priklauso nuo teisingai savarankiškai priimtų spėjimų kiekio, t. y. jei algoritmas priima neteisingus sprendimus, vadinasi jam reikės didesnės teisingų sprendimų įvesties. Šiam metodui būdingas didelis bandymų skaičius, tad tokio pobūdžio algoritmas geba pats prisitaikyti prie nuolat besikeičiančių sąlygų (Alzubi et al., 2018). Pastiprinamojo mokymo uždaviniams spręsti dažniausiai taikomi klasifikavimo ir *Monte Karlo* algoritmai.

2.3 lentelė. Kompiuterių mokymo modelių palyginimas (Ullah et al., 2018)

Palyginimo kriterijai	Prižiūrimasis mokymas	Neprižiūrimasis mokymas	Pastiprinamasis mokymas
- Modelio treniravimas; - pirmenybė; - tipas; - optimizavimo strategija; - paiškinimas.	- Būtinai duomenų žymėjimas; - pasikartojančios užduotys (įvesties ir išvesties duomenų analizė); - kompiuterių mokymas; - strategija priklauso nuo modelio mokymo algoritmo.	- Nežymimi duomenys; - grupavimas; - kompiuterių mokymas; - strategija priklauso nuo duomenų tipo ir jų klasifikavimo.	- Sistemos mokymas, atsižvelgiant į duomenų tarpusavio koreliaciją bei sąryšį su aplinka; - dirbtinis intelektas (elgsenos imitavimas); - kompiuterių mokymas; - strategija priklauso nuo modelio mokymo patirties; - dėl įgytos patirties, geba prisitaikyti prie besikeičiančių modelio sąlygų.

2.2.4. Gilusis mokymas ir jo taikymas

Remiantis mokslininko Vaišnoro (2020) išvalgomis, gilusis mokymas yra specifinis kompiuterių mokymo metodas, pasižymintis neuroninių tinklų algoritmo taikymui savarankiškam mokymuisi iš turimų duomenų. Šis kompiuterių mokymo metodas (žr. 2.8 pav.) sudarytas iš didelės imties neuroninių sluoksnių ir modelio pateikiamų spėjimų. Atitikimas norimiems pasiekti algoritmo prognozių rezultatams tiesiogiai priklauso nuo duomenų rinkinio (angl. *Dataset*) dydžio, t. y. kuo daugiau duomenų panaudojama modelio treniravimui, tuo tikslesnės algoritmo prognozės.



2.8 pav. Giliojo mokymo taikymą atvaizduojantis grafikas (Brownlee, 2016)

Gilusis mokymas remiasi sudėtingų neuroninių tinklų sistema siekiant imituoti žmogaus smegenų veiklą, kad būtų galima mokyti kompiuterius išspręsti nepakankamai apibrėžtas problemas. Pavyzdžiui: žmogus geba lengvai atpažinti skirtumus tarp skirtingų asmenų veidų, nes vienu metu geba įsiminti pakankamai daug išvaizdos bruožų. Kompiuteriui, priešingai nei natūraliai susiformavusiam intelektui, reikia perskaiciuoti didelius kiekius veido atpažinimui sugeneruotų dirbtinio intelekto algoritmų, kad galėtų atpažinti žmogaus tapatybę. Dažnai neuroninių tinklų ir giliojo mokymo algoritmai naudojami garso, vaizdo atpažinimo ir kt. kompiuterinėse programose (Pratuzaitė, 2020).

Be to, svarbu pridurti, kad giliojo mokymo technika pasižymi hierarchinių neuroninių tinklų taikymu, kad turėtų galimybę mokytis tiek iš neprižiūrimojo, tiek iš prižiūrimojo kompiuterių mokymo algoritmų.

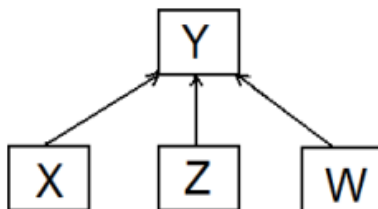
2.3. Tyrimo metu taikomi kompiuterių mokymo algoritmai

2.3.1. Regresijos metodas

Kaip jau žinoma iš Čekanavičiaus bei Murausko (2014) mokslinės literatūros, regresiją galima apibūdinti tokiu terminu: „tiriama vieno intervalinio kintamojo priklausomybė nuo vieno ar kelių, nebūtinai intervalinių, kintamųjų“. Regresijos algoritmas įprastai taikomas prižiūrimajam kompiuterių mokymui. Spėjimu paremtas modelis naudojamas ištirti panašių funkcijų, gautų iš paženklintų duomenų rinkinio, taikymą dar nepažymėtiems duomenims atliekant prognozavimą. Iš pradžių įsimenamos esamos duomenų rinkinio reikšmės ir po algoritmo mokymo nustatomos taisyklės ir prognozės, nusakančios, kaip reikšmės gali keistis.

Linijinė regresija

Baigiamajame darbe planuojama taikyti linijinę regresiją. Pagal mokslininkus Čekanavičių ir Murauską (2014), tiesinės regresijos modelis atspindi intervalinio kintamojo priklausomybę nuo kitų nepriklausomų kintamųjų. Pateikiama modelio schema (žr. 2.9 pav.).



2.9 pav. Linijinės regresijos modelio schema (Čekanavičius & Murauskas, 2014)

Taip pat mokslininkai Čekanavičius ir Murauskas (2014) apibrėžia regresijos modelio lygtį (žr. (1) formulę):

$$Y = C + b_1X + b_2Z + b_3W + e, \quad (1)$$

čia:

Y – priklausomas kintamasis;

X, Z, W – aiškinamieji kintamieji (regresoriai);

e – liekamoji paklaida;

C – pastovus dydis, konstanta;

b_1, b_2, b_3 – koeficientai.

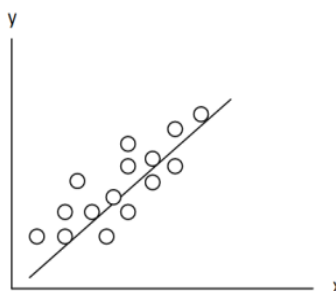
Tie patys mokslininkai pateikia papildomą regresijos lygtį apytikslei Y reikšmei nustatyti (žr. (2) formulę). Lygtis paprastai naudojama kokybinei ir kiekybinei kintamųjų priklausomybių analizei, prognozių nustatymui (Čekanavičius & Murauskas, 2014):

$$\bar{Y} = \bar{C} + \bar{b}_1 X + \bar{b}_2 Z + \bar{b}_3 W, \quad (2)$$

čia:

$\bar{C}$, $\bar{b}_1$, $\bar{b}_2 Z$, $\bar{b}_3 W$ – įverčiai, gaunami panaudojus imties duomenis.

Galiausiai gaunami rezultatai atvaizduojami tiesinės funkcijos pavidalo diagrama (žr. 2.10 pav.).

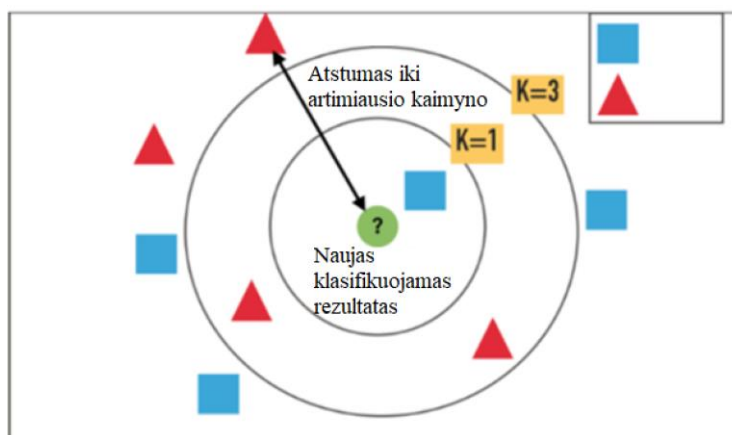


2.10 pav. Rezultatų išdėstymas, pagal linijinės regresijos funkciją (Kavitha & Varuna, 2016)

Iš pateikto grafiko galima matyti, kaip intervaliniai (aiškinamieji) kintamieji išdėstomi nepriklausomų kintamųjų rezultatų atžvilgiu po algoritmo mokymo, pagal linijinės regresijos modelio lygties sprendimą.

2.3.2. K – artimiausio kaimyno paieškos metodas

Šis algoritmas yra paprastas ir plačiai naudojamas siekiant analizuoti duomenis prižiūrimojo mokymo kontekste. K – artimiausio kaimyno paieškos algoritmas (angl. *K – Nearest Neighbour*) yra vienas dažniausiai taikomų kompiuterių mokymo algoritmų, naudojantis informaciją apie artimiausius kaimynus tam, kad galėtų sugenetuoti prognozes esamame duomenų rinkinyje. Kiekvieno naujo stebėjimo klasifikacija arba prognozė apskaičiuojama atsižvelgiant į nurodytą atstumą iki artimiausio nario, remiantis svertiniais vidurkiais (žr. 2.11 pav.) (Pratuzaitė, 2020).



2.11 pav. Artimiausio kaimyno paiešką atvaizduojanti modelio veikimo schema (Schlenker, 2018)

Mokslininkas Lubis kartu su kolegomis pateikia K – artimiausio kaimyno paieškos lygties (žr. (3) formulę) išraišką apytikslei Y reikšmei nusatyti (Lubis et al., 2020):

$$y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3)$$

čia:

x – duomenų vertė;

y – normalizacijos vertė;

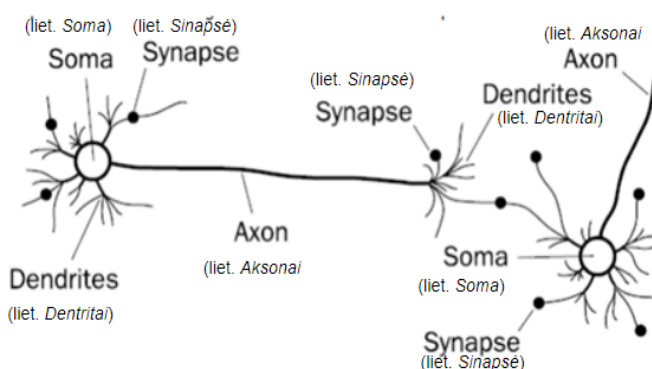
x_{min} – minimali vertinamo parametro vertė;

x_{max} – maksimali vertinamo parametro vertė.

Svarbiausios šiam algoritmui būdingos savybės: mažiausio atstumo nuo artimiausio kaimyno identifikavimas, atstumo tarp naujų ir pažymėtų duomenų skaičiavimas ir naujų prognozių generavimas, pagal pažymėtus duomenis.

2.3.3. Neuroninių tinklų metodas

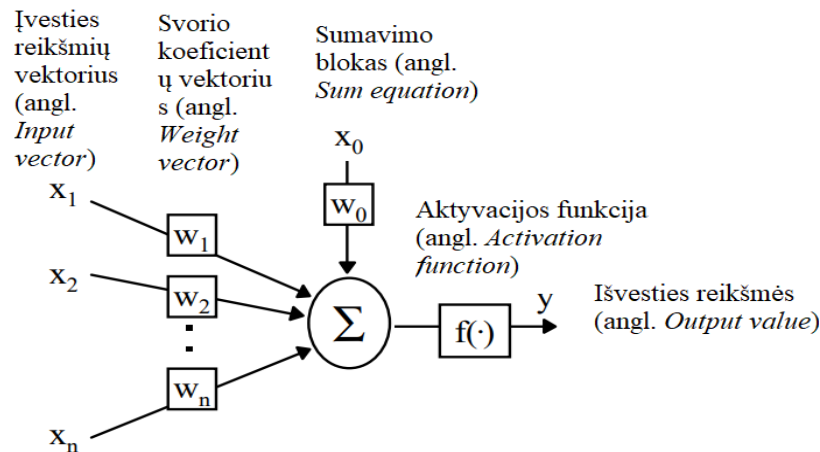
Vienas dažniausiai taikomų giliojo mokymo algoritmų – neuroniniai tinklai (angl. *Neural Networks*). Neurologijos mokslo prasme neuroniniai tinklai (žr. 2.12 pav.) yra tarpusavyje besijungiančios biologinės jungtys smegenyse. Neuroną sudaro: branduolys, šaknys (dendritai) ir ataugos (aksonai). Neuronų atšakos reikalingos susijungti su kitais neuronais ir suformuoti biologines jungtis, dar vadinamas sinapsėmis. Per sinapses neuronai geba siųsti signalus elektros impulso pavidalu kitiems neuronams ir taip adaptuotis prie aplinkos. Adaptacijos funkcija suvokiama kaip intelektą apibrėžianti priežastis, nes nuolat besikeisdami informacija, neuronai pradeda „savarankiško mokymosi“ procesą (Makinde et al., 2012).



2.12 pav. Neurono ląstelės sandara (Makinde et al., 2012)

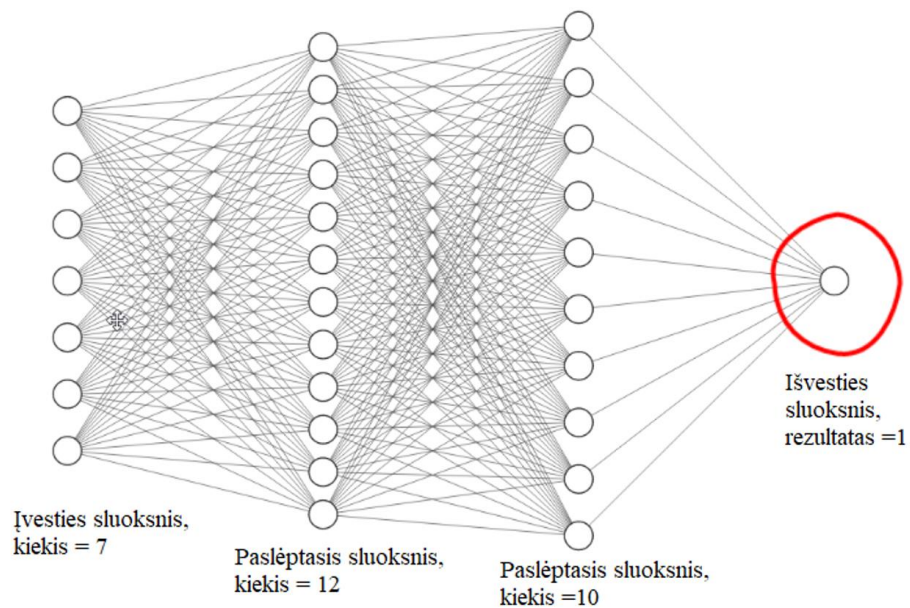
Pagal natūralaus neuroninio tinklo fiziologiją formuojamas jam analogiškas dirbtinis neuronų tinklas. Deja, dirbtinai suformuoti neuroniniai tinklai negeba perduoti signalų lygiagrečiai ir dėl šios priežasties neprilygsta natūraliai susiformavusio organizmo intelektui.

Pirmasis matematinis neurono atitikmuo sukurtas XX a. 5 deš. mokslininkų McCulloch'o ir Pitts'o (1943) (žr. 2.13 pav.).



2.13 pav. Dirbtinis neurono modelis, pagal mokslininkus McCulloch ir Pitts (Doherty & Moores, 1999)

Tam, kad būtų galima identifikuoti neurono veikimą, kiekvienai sugeneruotai sumai pritaikoma netiesinė funkcija f , dažniausiai vadinama aktyvacijos funkcija. Matematinė prasme kiekvienas neuronų tinklas gali turėti didelį kiekį skirtingų aktyvacijos funkcijų ir turi būti suskirstomas į sluoksnius, vadinamus paslėptaisiais (angl. *Hidden layer*) (McCulloch & Pitts, 1943) (žr. 2.14 pav.).



2.14 pav. Neuroninių tinklų paslėptųjų sluoksnių struktūra (sudaryta autoriaus, remiantis Nielsen, 2015)

Neuroninių tinklų algoritmai dažniausiai naudojami taikant prižiūrimąjį mokymą. Pagal Tautvaišą (2017) šio matematinio modelio lygtis (žr. (4) formulę) išreiškiama tokia formule:

$$y = f(\sum_{k=1}^n w_k * x_k), \quad (4)$$

čia:

y – neurono išvesties signalas (biologinis atitikmuo – aksonų funkcija);

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – neurono įvesties signalai (biologinis atitikmuo – dendritų funkcija);

$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ – svorio koeficientų reikšmės;

$f()$ – aktyvacijos funkcija.

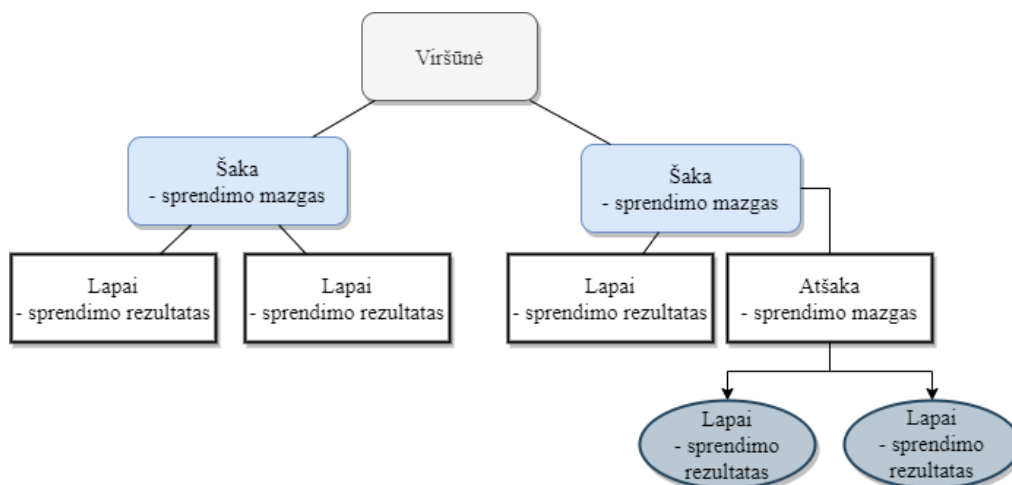
Kiekvienas įvesties signalas (x) turi būti dauginamas iš tam tikro svorio vertės (w) ir tokiu būdu įvesties duomenų reikšmė yra sustiprinama ar sumažinama. Galiausiai visos įvertintos reikšmės sumuojamos (sumavimo blokas „ Σ “ biologine prasme atitinka neuroninę jungtį – sinapsę), toliau panaudojama neuroninio tinklo aktyvacijos funkcija ir gaunamos išvesties prognozių reikšmės.

2.3.4. Sprendimų medžio metodas

Sprendimų medis (angl. *Decision Tree*) yra vienas intuityviausių prižiūrimojo mokymo taikymo algoritmų, kadangi pateikia aiškias prognozes ir taisykles, geba derinti įvairius duomenis bei yra itin atsparus trūkstantoms reikšmėms. Šio algoritmo pagrindinis tikslas – reprezentuoti visus galimus sprendimus pagal vizualiai pateikiamas medžio atšakas, t. y. galimus prognozių rezultatus.

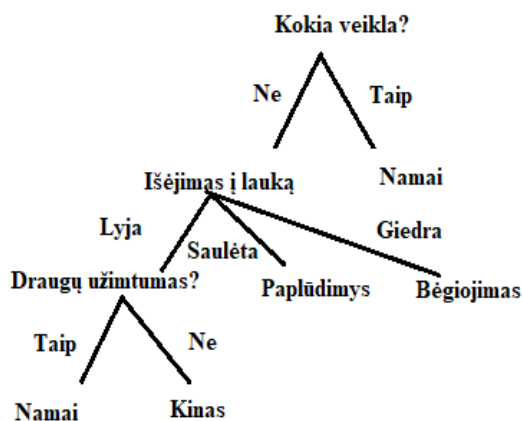
Sprendimų medžio algoritmo struktūra pasižymi tokiais bruožais (Omar et al, 2013):

- 1) viršūnė – tinkamiausias prognozės požymis;
- 2) šakos – požymiai, kuriuos modelis turi testuoti;
- 3) lapai – galutiniai sprendimo medžio prognozių rezultatai.



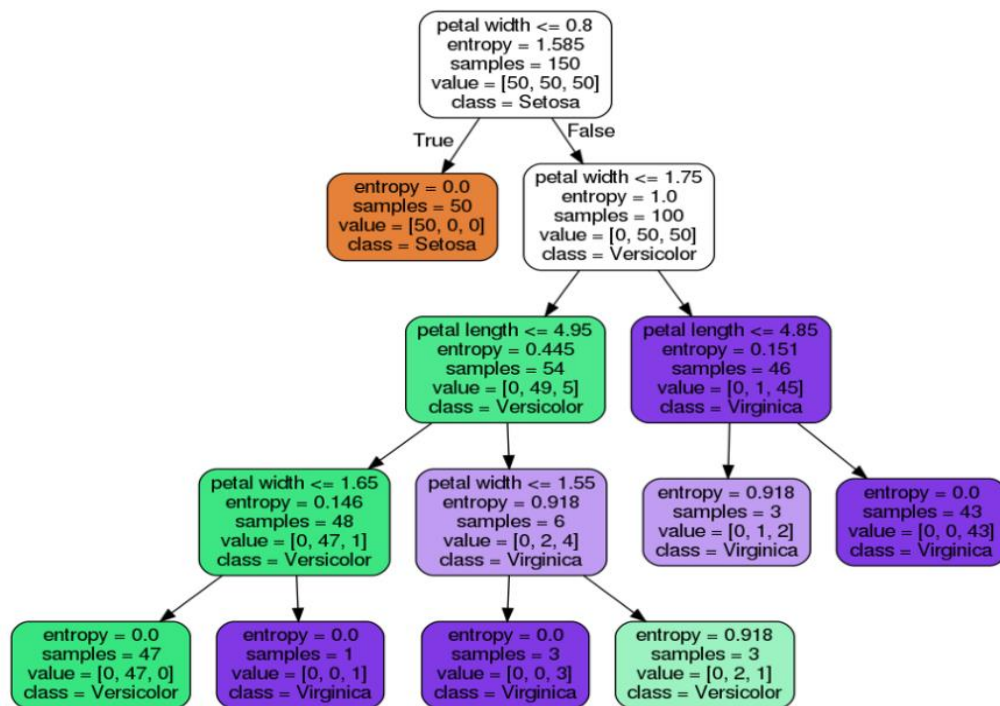
2.15 pav. Bendra sprendimo medžio struktūra (Arain, 2021)

Sprendimo medžiai paprastai formuojami iš eilės pagal pagrindines šakas iki kol pasiekiamas galutinis sprendinio rezultatas (žr. 2.15 pav.; 2.16 pav.).



2.16 pav. Sprendimo medžio atšakų schemas pavyzdys (Li, 2019)

Sprendimų medžio algoritmas paprastai naudojamas darbui su kiekybiniais duomenis. Atliekant ekperimentą, kurio metu prognozės rezultatas reprezentuoja tam tikrą klasę, dar vadinamas klasifikacijos sprendimų medžiu (angl. *Decision Tree Classification*). Klasės gali būti reprezentuojamos tik sveikaisiais skaičiais. Sprendimų medis taikant regresiją (angl. *Decision Tree Regressive*) naudojamas atliekant tyrimus taip pat su kiekybiniais duomenimis, siekiant prognozuoti tikslinių kintamųjų skaitines vertes (Šalkevičius, 2015).



2.17 pav. Pavyzdinis sprendimo medžio padalijimo struktūros atvaizdavimas (Li, 2019)

Dar svarbu pasakyti, kad sprendimų medžių algoritmas taikomas tada, kai yra aiškus iš anksto nustatytas kriterijus pagal kurį imtis yra padalinama į tam tikrą skaičių dalių. Naudojant šį algoritmą pirmiausiai randamas kintamasis, pagal kurį yra geriausiai atskiriamos klasės ir duomenys lengvai suskaidomi į atskiras imtis. Padalijimas vyksta iki tol, kol galiausiai lieka vienos klasės stebėjimai (žr. 2.17 pav.) (Li, 2019).

Sprendimų medžio sudarymas paremtas atsitiktinio įvykio tikimybių skaičiavimu (žr. (5) formulė) (Simanavičius, 2020):

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (5)$$

čia:

P – įvykio A tikimybė;

m – palankus įvykis;

n – nepalankus įvykis.

Atliekant mokslinį tyrimą svarbiausia apibrėžti, kas yra palankus įvykis. Tai galėtų būti modelio sugeneruotas tikslus armatūros strypo diametro skersmuo, išreikštas sveikąjo skaičiaus forma ir

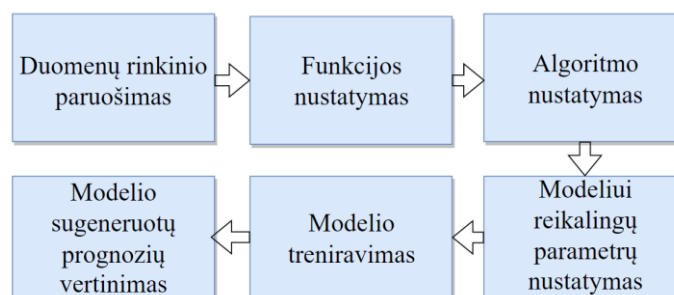
tinkamo armatūros sortimento režiuose, t. y. armatūros strypo diametro reikšmė gali būti tik tokios vertės: Ø6; Ø8; Ø10; Ø12; Ø16; Ø20; Ø25; Ø28; Ø32; Ø40. Sakykime, jei mes kaip įvestį sprendimų medžio algoritmui pateiktume išilginės armatūros strypo poreikį $A_s = 4,91 \text{ cm}^2$, tai, kaip išvestį sprendimų medžio algoritmas turėtų pateikti strypo diametro reikšmę Ø25.

Taip pat svarbu paminėti, kad sprendimų medis, taikant regresiją pasižymi strateginiu medžio padalijimu. Toks padalijimas tiesiogiai daro įtaką sprendimų kriterijų tikslumui. Svarbu paminėti, kad prireikus sprendimų medžio (taikant regresiją) algoritmo sugeneruotoms prognozėms gali būti skaičiuojama vidutinė kvadratinė paklaida (angl. *Mean Squared Error*) (Mazėtis, 2019). Ši paklaida skaičiuojama tam, kad būtų galima nuspręsti, ar padalinti mazgą į du ar daugiau submazgų ir išplėsti sprendimų medžio struktūrą (Drakos, 2019).

2.4. Kompiuterių mokymo veikimo principas

Kompiuterių mokymo modelio veikimo principas paremtas problemos iškėlimu, analize ir sprendimų diegimu problemai spręsti. Prieš pradėdant programuoti kompiuterių mokymo modelio algoritmus, turime nustatyti, kaip ir kokiais loginiais sprendiniais šią problemą galėtų išspręsti žmogus (angl. *Research the Problem*) (Medar et al., 2017). Be to, prieš kuriant kompiuterių mokymo modelį, svarbu kuo anksčiau numatyti algoritmų veikimą galinčius apriboti veiksnius, tokius kaip: nepakankamas informacijos kiekis, netinkamas pasirinktas sprendimo metodas, netinkamos programos taikymas, nekokybiški rezultatai ir kt. Todėl kiekvienai nagrinėjamai problemai itin svarbu pritaikyti tinkamus veiksmus sprendimų paieškai, kurie tenkintų kuo daugiau iš anksto numatytų reikalavimų ir apribojimų.

Mokslininko Alzubi 'o ir jo kolegų (2018) teigimu paprastai kompiuterių mokymo modelis sudaromas nuosekalia seka (žr. 2.18 pav.). Kiekvienam žingsniui priskiriama tam tikra užduotis, kuri laikui bėgant tampa pagrindu kitai užduočiai.



2.18 pav. Žingsniai kompiuterių mokymo modeliui treniruoti (Alzubi et al., 2018)

Duomenų rinkimas ir paruošimas (angl. *Data collection/Preparation of Dataset*)

Pagrindinė kompiuterių mokymo proceso užduotis – rinkti ir išsaugoti duomenis, kuriuos ateityje galima pateikti kaip naują įvestį į algoritmą. Bet kuriai problemai spręsti reikalingas didelis teisingai apdorotų duomenų kiekis.

Funkcijos parinkimas (angl. *Function selection*)

Duomenų apdorojimui ir pritaikymui modeliui generuojamos funkcijos, iš kurių ne visos tinkamos pasirinktam mokymo procesui, tad šiame etape būtina išgryninti svarbiausią funkcijų pogrupį.

Algoritmo parinkimas (angl. *Choice of Algorithm*)

Tam tikri algoritmai labiau tinkami tik tam tikros klasės problemai nagrinėti. Problemos klasifikuojamos į šias grupes:

- 1) **klasifikavimo problema** (angl. *Classification problem*) – problema, kurioje išvestis gali būti tik viena iš fiksuoto skaičiaus išvesties klasių, pavyzdžiui gaunami atsakymai: tiesa/netiesa;
- 2) **anomalijų aptikimo problema** (angl. *Anomaly detection problem*) – problema, analizuojanti tam tikrus modelio pokyčius. Pavyzdžiui, kredito kortelių įmonės naudoja anomalijų aptikimo algoritmus, skirtus rasti nukrypimą nuo įprasto ir klientui nebūdingo elgesio atliekant sandorį;
- 3) **regresijos problema** (angl. *Regression problem*) – regresijos algoritmai naudojami skaitiniams išvesties rezultatams gauti. Jie paprastai naudojami problemoms, susijusioms su kiekybiniais skaičiavimais;
- 4) **grupavimo problema** (angl. *Clustering problem*) – grupavimas priklauso neprižiūrimojo mokymo algoritmų kategorijai. Šie algoritmai bando išmokti duomenų struktūras ir bando kurti grupes, remiantis duomenų struktūros panašumais. Tada skirtingos grupės ženklinamos pagal atitinkamus požymius ir algoritmas į vieną iš grupių įtraukia naujus, nematytus duomenis;
- 5) **sustiprinimo problemos** (angl. *Reinforcement problem*) – problemos sprendimo algoritmai naudojami tada, kai sprendimas priimamas vadovaujantis ankstesne mokymo patirtimi. Kompiuterių mokymo modelis išmoksta vienaip ar kitaip elgtis, prisitaikant prie kintančios aplinkos, remdamasis padarytomis klaidomis.

Modelių ir parametrų pasirinkimas (angl. *Selection of Models and Parameters*)

Daugumai kompiuterių mokymo algoritmų reikalinga tam tikro pradinių teisingų duomenų intervencija į modelį nustatant tinkamiausias parametrų vertes.

Modelio treniravimas (angl. *Model training*)

Pasirinkus tinkamą algoritmą ir parametrų reikšmes, toliau modelis mokomas naudojant dalį modelio treniravimui skirtų duomenų.

Modelio vertinimas (angl. *Performance evaluation*)

Prieš diegiant „ištreniruotą“ modelį į tam tikrą sistemą, modelio veikimas turi būti testuojamas pagal jam įvedamus naujas, neatpažintas įvesties ir išvesties vertes. Šiame etape siekiama įvertinti modelio tikslumą (angl. *Accuracy*) ir našumą (angl. *Efficiency*), t. y. kiek daug išmokta pasitelkiant

įvairius parametrus. Jei modelis veikia netinkamai, tai turi būti peržiūrėti ir pakeičiami (koreguojami) algoritmo parametrai ir modelis dar sykį treniruojamas. Įgyvendinti modelio veikimo ir vertinimo etapai reikalauja atsakyti į klausimą: ar sukurtas modelis veikia tinkamai, t. y., ar išsprendžiama numatyta problema (Alzubi et al., 2018).

2.5. Taikomosios programos prototipas automatizuotam armavimui atlikti

Anot mokslininkės Struyk (2017), kiekvieno kompiuterio programinė įranga – duomenų ir instrukcijų rinkinys, nurodantis kompiuteriui komandas kaip, ką ir kada atlikti. Iš to galima teigti, kad kompiuterių techninė įranga negalėtų funkcionuoti be programinės įrangos pateikiamų nurodymų.

Programinė įranga paprastai skirstoma į *sistemų*, *programavimo* ir *taikomosios programinės įrangos* klases. Sistemų programinė įranga apima kompiuterio operacinės sistemos veiklą, įskaitant įrenginių tvarkyklę, konfigūracijos failus ir kitus pagrindinius sistemos komponentus. Ši įranga reikalinga kompiuterio aparatinės įrangos valdymui nurodant funkcijas, kurias sistema turi atlikti. Programavimo programinė įranga dar vadinama tarpine programine įranga, susiejanti sistemų ir taikomąsias programas tarpusavyje. Galiausiai taikomoji programinė įranga yra viena svarbiausių kompiuterinės programinės įrangos rūšių, nes ji sukuria ir palaiko tiesioginį ryšį su programos naudotoju. Ši įranga skirta vartotojų užduočių atlikimui, pavyzdžiui: tekstų apdorojimui, žiniatinklio naršymui, duomenų tvarkymui, grafiniams objektams kurti ir atvaizduoti (Struyk, 2017).

Atliekant mokslinį tyrimą, siekiama sukurti bei praktiškai panaudoti taikomosios programos prototipą, turintį programinę sąsają su *Tekla Structures* kompiuterinio projektavimo programa, skirta grafinių objektų modeliavimui 3D erdvėje. Prototipo veikimas numatomas pagal jam sugeneruotus **klasikinio programavimo bei kompiuterių mokymo** algoritmus, kurie sugeneruojami naudojant programą *Python*. Programiniame kode esanti informacija apie projektavimo normose „LST EN 1992-1-1:2005 Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės taisyklės“ esančius projektavimo apribojimus bei ekspertinius inžinierių sprendinius, leidžia įgyvendinti automatizuotą elemento armavimą pagal į prototipo parinktis įvestus skaičiuojamosios analizės rezultatus.

Idėja nusakoma tokia eiga: automatizuotas gelžbetoninio surenkamojo (kolonos) elemento automatizuotas armatūros modeliavimo procesas bus atliekamas per pateikiamą prototipo grafinę vartotojo sąsają – GUI (angl. *Graphical User Interface*). Pirmiausia nuskaitoma elemento geometrija, tada inžinierius turi užpildyti automatizuotam armavimui atlikti skirtus privalomus laukelius, ir galutinis erdvinis elemento armavimo rezultatas reprezentuojamas *Tekla Structures* programinės įrangos aplinkoje. Gautasis modelis turi atitikti LST EN 1992-1-1:2005 konstrukcijų projektavimo reikalavimus. Šio prototipo koncepcijos detalus aprašymas pateikiamas 3.3 bei 3.4 poskyriuose.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje aprašomos automatizuoto gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo proceso įgyvendinimo galimybės. Detaliai analizuojama viena plačiausiai procesų automatizavimui taikomų dirbtinio intelekto sričių – kompiuterių mokymas.

Dirbtinio intelekto sistemos vis dažniau taikomos įvairių technologijų srityse: nuo medicinos tyrimų iki naudojimo atliekant kompiuterinius skaičiavimus (angl. *Cloud computing*), tapatybės atpažinimo ir bepiločių sistemų kūrimo, taip pat elektroniniame versle ar socialinių tinklų sistemose, renkant duomenis apie nuolatinius vartotojus ir jų poreikius visame pasaulyje. Ne išimtis yra ir BIM technologijų sfera, kurioje vis dažniau kalbama apie dirbtinio intelekto technologijų panaudojimo potencialą statybų sektoriuje, kuriant įvairaus pobūdžio automatizuotas sistemas. Atlikti moksliniai eksperimentai parodo, kad dirbtinis intelektas vis sparčiau skverbiasi į statybų sektoriaus veiklos sritis. Mokslininko Bergerio (2016) atliktas statistinis tyrimas, kuriame nustatyta, kad statybos sektoriuje procesų automatizacija yra kylantis rodiklis. Kitų mokslininkų tyrimai susiję su dirbtinio intelekto pritaikymo galimybėmis, siekiant pagerinti įvairių gaminių projektavimo bei tiekimo grandinės statybvietėje procesus.

Susipažinus su statybų srityje vykdomais moksliniais tyrimais, kuriuose pradėtos taikyti dirbtinio intelekto sistemos, toliau apibrėžiamas ir palyginamas dirbtinio intelekto metodų taikymas su šiai sričiai artima statistikos mokslo šaka. Pateikiamas vienos populiariausių dirbtinio intelekto taikymo srities – kompiuterių mokymo, detalus aprašymas, t. y. teorine prasme nagrinėjami kompiuterių mokymo modelių tipai (prižiūrimasis bei kt.), prognozių generavimui taikomi regresijos, sprendimų medžio, K – artimiausio kaimyno paieškos bei neuroninių tinklų algoritmai bei modelio veikimo principas, t. y. paaiškinama, kaip turi būti identifikuojama problema nustatomos jos sprendimui tinkamos funkcijos. Taip pat apibrėžiami modeliui mokytis reikalingi įvesties bei išvesties parametrai, architektūra ir rezultatų vertinimas.

Kadangi baigiamajame darbe analizuojama kompiuterinio projektavimo programinė įranga, tai aprašytą kompiuterių mokymo metodiką siekiama pritaikyti armatūros modeliavimo procesų automatizacijai įgyvendinti, kuriant dirbtinio intelekto algoritmų pagrindu veikiančią programos papildinį.

Pabaigoje pateikiama programinės įrangos vystymo topologija ir automatizuoto armavimo įrankio, pagrįsto klasikinio programavimo ir kompiuterių mokymo algoritmų veikimu, sukūrimo idėja. Programinio įrankio grafinės vartotojo sąsajos sudėtyje (GUI) užkoduota informacija apie LST EN 1992-1-1:2005 pateiktas gelžbetoninių elementų armavimo taisykles bei ekspertinius inžinierių sprendinius – reikalinga automatizuoto armatūros modeliavimo proceso realizavimui. Šios idėjos praktinis įgyvendinimas analizuojamas ir aprašomas paskutiniame baigiamojo darbo skyriuje.

3. AUTOMATIZUOTO ARMAVIMO PROCESO ĮGYVENDINIMAS

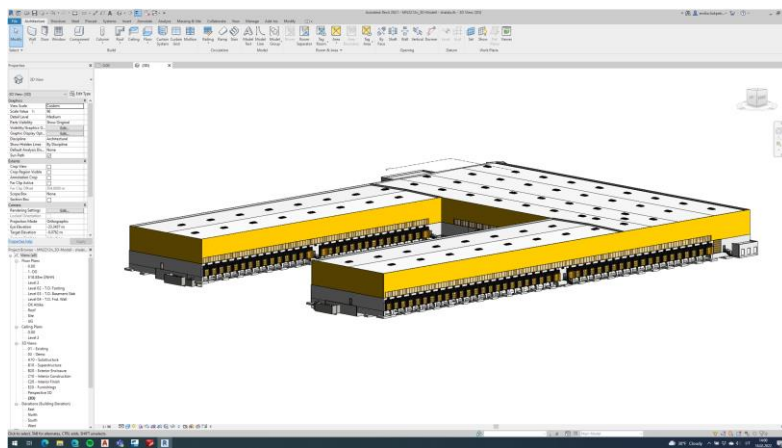
Šiame skyriuje aprašomas eksperimentinis tyrimas, kurio metu įgyvendinamas automatizuotas surenkamosios gelžbetoninės kolonos armatūros modeliavimo procesas. Kadangi mokslinio eksperimento pagrindinis tikslas siejamas su taikomosios programos kūrimu, tai pirmiausia nagrinėjama reali prototipo, skirta automatizuoti armatūros modeliavimo operacijas, įgyvendinimo koncepcija. Pradiniam prototipo veikimui sukuriamas bei taikomas klasikinis programinis algoritmas. Išbandant tradicinio programavimo algoritmo veikimu paremtą įrankio funkcionalumą, nustatomi dvidešimties inžinierių kolonos armavimo ekspertiniai sprendiniai, kurie kitame tyrimo etape duomenų rinkinio pavidalu panaudojami kompiuterių mokymo modelio algoritmų mokymui ir prognozių teikimui generuoti. Planuojama kompiuterių mokymo modelio algoritmus pritaikyti identifikuojant unifikuotą armavimo sprendinį įmonėje. Galiausiai šiame skyriuje atliekamas ir aprašomas inžinierių darbo efektyvumo, atliekant armavimą rankiniu ir automatizuotu būdu, palyginimas ir gautų rezultatų vertinimas bei formuojamos bendros atlikto eksperimento išvados.

3.1. BIM modelio sintezė projektavime

Pagal BIM metodologiją, statinio konstrukcinės ir architektūrinės dalies projektavimas kartu yra viena svarbiausių statybos projekto veiklų. Baigiamajame darbe kaip bendras architektūrinio – konstrukcinio bendradarbiavimo rezultatas analizuojamas konkretus pastatas – logistinės paskirties centras bei imituojamas jo kūrimo ciklas, apimant techninio ir darbo projekto rengimo stadijas. Svarbu paminėti, kad šiam modeliui taip pat priklauso ir mokslinio tyrimo objektas, t. y. konkretus surenkamosios gelžbetoninės kolonos elementas. Projektuojamo pastato BIM modelis vystymo ciklas pradedamas skirtingas disciplinas atstovaujančių projekto dalyvių pradinės idėjos realizavimo.

Pirmajame etape kuriamas **architektūrinis – konstrukcinis (objektinis) modelis** *Autodesk Revit* programos aplinkoje. Įprastai šį modelį sudaro (žr. 3.1 pav.):

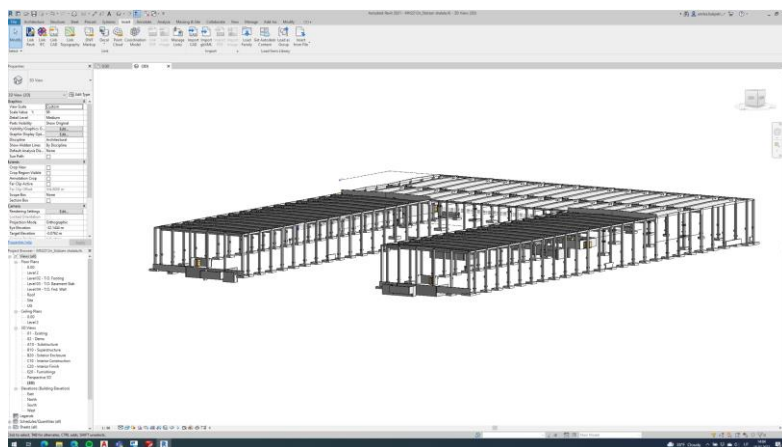
- architektūriniai fasadų komponentai;
- pastato pagrindinės laikančiosios konstrukcijos;
- atitvarinės konstrukcijos;
- langų ir durų komponentai;
- techninės įrangos komponentai;
- fasadų sistemų komponentai;
- išorės apdailos sprendiniai, medžiagiškumas;
- vidaus apdailos sprendimai, medžiagiškumas;
- kt.



3.1 pav. Bendras architektūrinis pastato modelis, sukurtas *Autodesk Revit* programos aplinkoje. Tiriomojo darbo objektas priklauso šiam modeliui

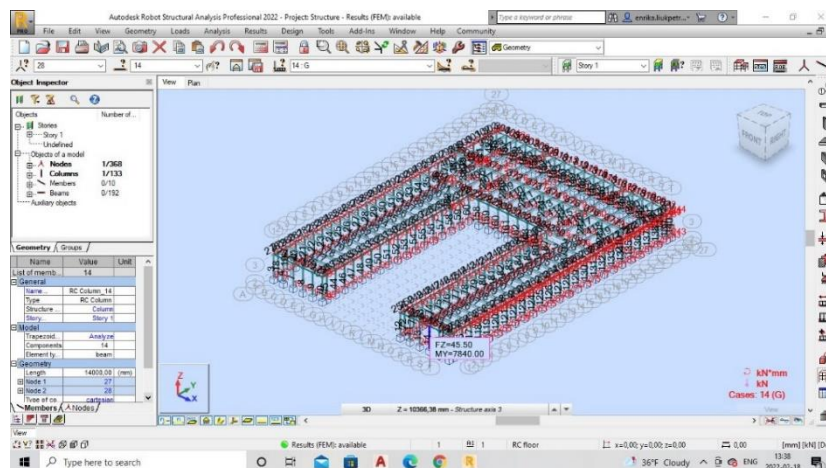
Kadangi bet kuris konstrukcinis ir daugelis susietų su juo architektūrinių (bei inžinerinių) sprendinių turi būti paremtas statybinių konstrukcijų (laikančiųjų pagrindinių ir pagalbinių) skaičiavimais, tai toliau techninio projekto stadijoje kuriamas skaičiuojamosios analizės modelis.

Antrajame etape išgrynintas laikančiųjų konstrukcijų **skaičiuojamosios analizės modelis** (t. y. modelis, kuriame išfiltruojami analizei nereikalingi architektūriniai komponentai) (žr. 3.2 pav.), pagal antrąją CAD/CAE sistemų integracijos scenarijų yra konvertuojamas iš grafinės kompiuterinio projektavimo *Autodesk Revit* į skaičiuojamosios analizės platformą *Autodesk Robot Structural Analysis* (žr. 3.3 pav.).



3.2 pav. Išgrynintas konstrukcinis (objektinis) pastato modelis, atvaizduojantis tik laikančiąsias projektuojamo pastato konstrukcijas

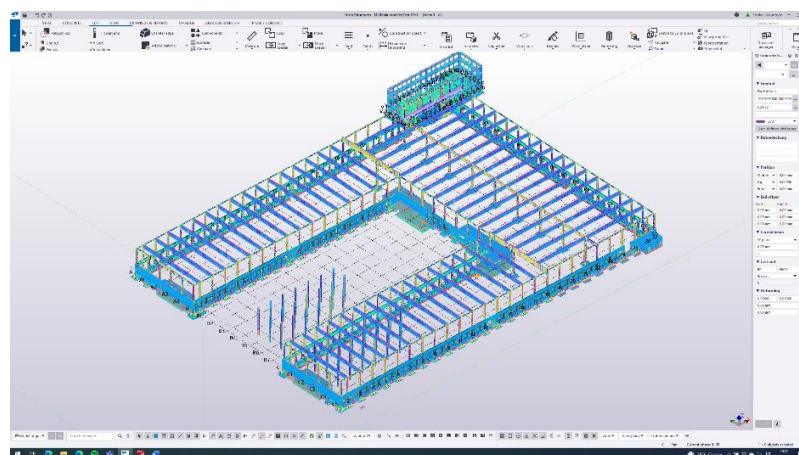
Be to, pagal duomenų apsieitimo lygį tarp CAD ir CAE sistemų taikomi dvipusiai duomenų mainai. Toliau analitiniam modeliui priskirtos apkrovos ir medžiagos, aprašomi elementų sujungimai ir kt. konstrukcijų elgsenai ištirti reikalingi parametrai. Iš gautos skaičiuojamosios analizės ataskaitos žinome tikslius kiekvieno konstrukcinio elemento, tarp jų ir gelžbetoninių surenkamųjų objektų, parametrus bei reikalingą armatūros poreikį. Šiuo etapu užbaigiama techninio projekto rengimo stadija ir nuo gamybinio modelio kūrimo – pradedama darbo projekto rengimo stadija.



3.3 pav. Analitinis konstrukcinis modelis Autodesk Robot Structural Analysis programos aplinkoje

Svarbu paminėti, kad analitinio modelio rezultatų ataskaitoje nurodomas armatūros poreikis visiems konstrukciniams elementams, įskaitant ir tiriamąjį objektą. Skaičiuojamosios analizės rezultatai bus naudojami įvesties duomenimis į taikomosios programos prototipo parinkčių laukelius automatizuotam armavimui atlikti. Prototipas ir jo veikimas detalčiau aprašomas kituose šio skyriaus poskyriuose.

Trečiajame etape, pagal gautus konstrukcijų skaičiuojamosios analizės rezultatus (2 stadijos modelis) bei architektūrinio – konstrukcinio (objektinio) modelio neutralius duomenų mainų (IFC) formatu pateiktus elementų geometrinius duomenis (1 stadijos modelis), darbo projekto stadijoje modeliuojamas **gamybinis konstrukcinis modelis** (žr. 3.4 pav.). Reikėtų pasakyti, kad konstrukcijų detalizavimas pradedamas tik tuomet, kai projektuotojai turi visą armavimui ir konstrukcinių mazgų modeliavimui reikalingą dokumentaciją, t. y. galutiniai darbo projekto konstrukciniai modeliai bei skaičiuojamosios analizės ataskaitoje pateikiami rezultatai.



3.4 pav. Gamybinis gelžbetoninių elementų modelis – FIM (angl. *Fabrication Information Model*)

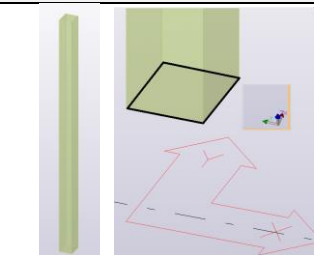
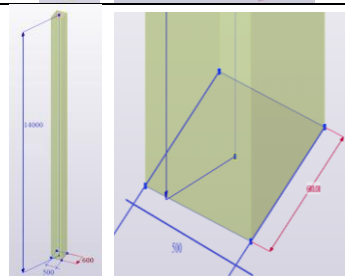
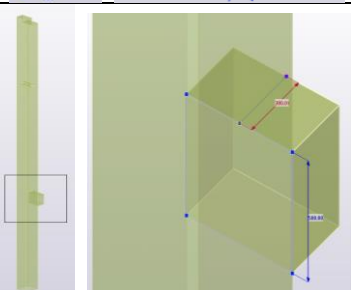
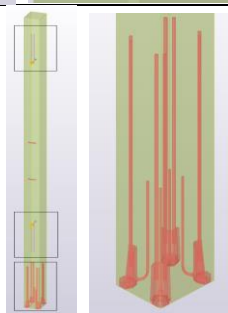
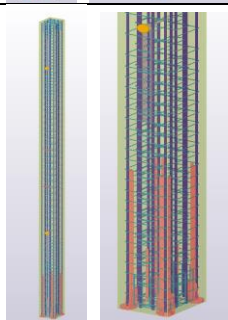
Pagal gautus skaičiuojamosios analizės tyrimo rezultatus, toliau kuriamas 3D konstrukcinio – gamybinis pastato modelis, kurio sudėtyje yra ir mokslinio tyrimo objektas. Gelžbetoninių konstrukcinių elementų armatūros detalizavimo darbai atliekami Tekla Structures programos

aplinkoje. Šio modelio rengimo metu paruošta darbo projekto konstrukcinės dalies dokumentacija – toliau naudojama elementų gamybai.

3.1.1. LOD koncepcijos pritaikymas atliekant armavimą rankiniu būdu

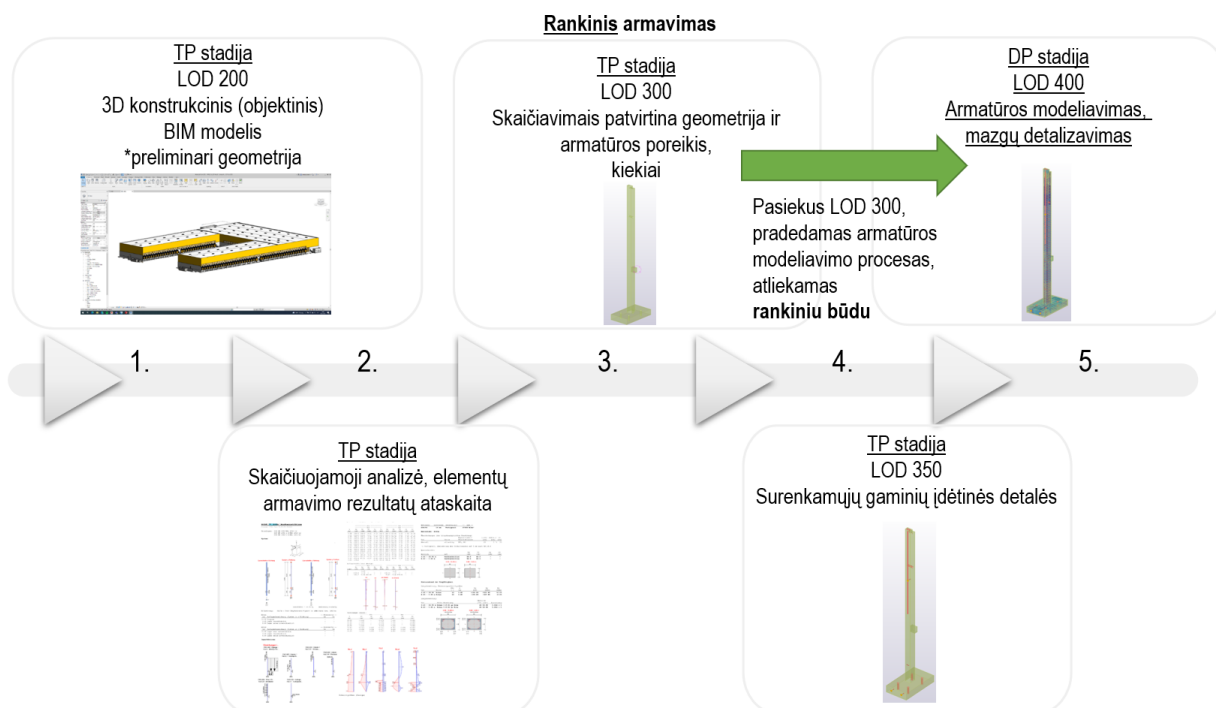
Pagal BIMForum (2019) rekomendacijas (žr. 3.1 lentelė.) surenkamųjų gelžbetoninių konstrukcinių elementų kūrimas vystomas nuosekliai, pagal techninio ir darbo projekto stadijas.

3.1 lentelė. LOD specifikacija pagal BIM FORUM rekomendacijas, surenkamosios gelžbetoninės kolonos elementui (Ruškys, 2019)

LOD	Surenkamosios gelžbetoninės kolonos elementas	Aprašymas
100		• Techninio projekto stadija; • elemento atvaizdavimas bendrame konstrukciniame modelyje; • elementai abstraktūs, skirti jų vietos pažymėjimui erdvėje; • kolonos skerspjūvio matmenys ir forma gali būti nežinomi.
200		• Techninio projekto stadija; • parenkami apytiksliai kolonos elemento skerspjūvio ir aukščio parametrai.
300		• Techninio projekto stadija; • parenkami tikslūs kolonos elemento skerspjūvio parametrai, aukštis; • modeliuojamos papildomos kolonos dalys: konsolės, pamatų padas ir kt.; • modeliuojamos jungtys su kitais elementais.
350		• Techninio projekto stadija; • modeliuojamos įdėtinės detalės kolonos elementui: • kolonos pamato varžtinė jungtis ir kt.; • modeliuojamos elementų tarpusavio jungtys, montažinės detalės; • surenkamosios gelžbetoninės kolonos kėlimo kilpos.
400		• Darbo projekto stadija; • įdėtinių detalių armavimas; • viso gaminio armavimas, pagal skaičiuojamosios analizės ataskaitoje pateikiamus rezultatus.

Toliau pateikiamas grafinio detalumo lygio (LOD) rengimo aprašymas surenkamųjų gelžbetoninių konstrukcijų modeliavimo kontekste, nuo pradinės geometrijos kūrimo iki paruošimo gamybai. Taigi techninio ir darbo projekto vystymo eigoje LOD klasifikacija įgyvendinama tam tikra seka.

1. Techninio projekto rengimo pradinėje stadijoje, į armatūros detalizavimo programą (šiuo atveju *Tekla Structures*) IFC formatu įkeliamas jau sukurtas konstrukcinis BIM modelis ir pagal šį modelį pradedamas kurti preliminaros geometrijos, t. y. LOD 200 grafinio detalumo lygio modelis.
2. Atliekama parengto architektūrinio – konstrukcinio (objektinio) modelio skaičiuojamoji analizė. Gaunami tikslūs konstrukcinių elementų geometriniai parametrai, mazgai. Parengti skaičiavimai nurodo tikslų armatūros poreikį projektuojamiems elementams.
3. Tęsiama gamybinio modelio projektavimo stadija. Gavus skaičiuojamosios analizės rezultatų ataskaitą, toliau tikslinama galutinė gamybinio modelio objektų geometrija.
4. Po elementų tikslių geometrinių parametrų patvirtinimo, gelžbetoniniams gaminiais integruojamos įdėtinės detalės ir techniniame projekte gamybiniais elementams priskiriamas LOD 350 grafinis išvystymo lygis.
5. Atlikus armatūros modeliavimo darbus, elementas pasiekia LOD 400 grafinį išvystymo lygį ir tampa gamybai paruoštu objektu, t. y. gaminys suarmuojamas pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus ir papildomai pridedama armatūra, skirta specialiai įdėtinėms detalėms, jei nebuvo to atlikta ruošiant LOD 350 stadijos elementą (Ruškys, 2019).

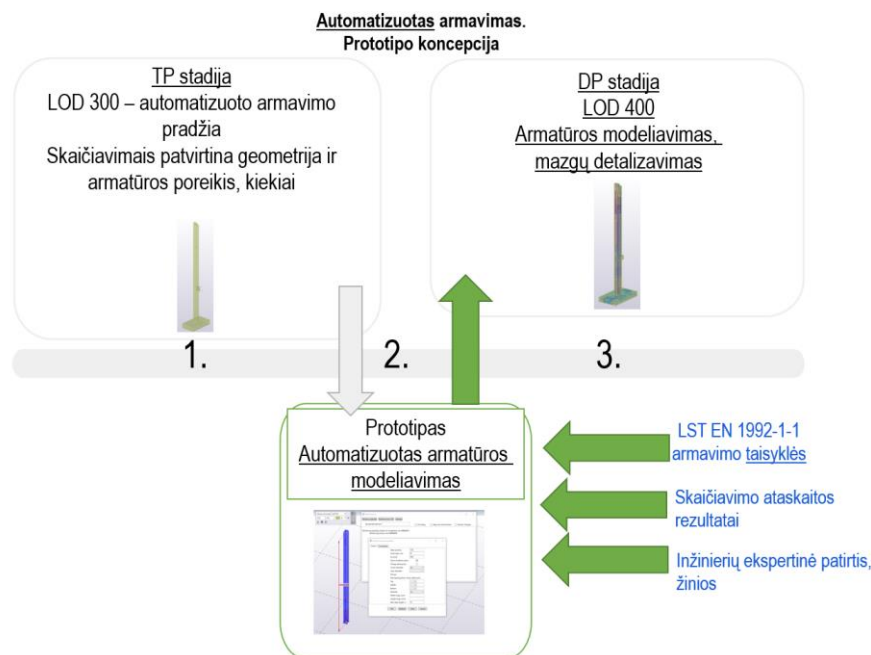


3.5 pav. Elementų projektavimo eiga, kai armavimas detalizuojamas rankiniu būdu

Taigi tokia įprasta darbo eiga atliekama statybos projekto eigoje, jei elementų armavimo modeliavimo procesas atliekamas **rankiniu būdu** (žr. 3.5 pav.).

3.1.2. LOD koncepcijos pritaikymas atliekant armavimą automatizuotu būdu

Pagal LOD klasifikaciją ir techninio bei darbo projekto vystymo nuoseklumą, **automatizuoto armavimo procesas** gali būti pradedamas pasiekus LOD 300 grafinio detalumo lygį. Prieš tai turi būti gauta ir patvirtinta skaičiuojamosios analizės ataskaita bei sumodeliuoti galutinės geometrijos surenkamieji objektai gamybiniame modelyje.



3.6 pav. Projektavimo eiga, naudojant automatizuoto armavimo įrankį

Pabaigus surenkamųjų gaminių geometrijos modeliavimą bei įdėtinių detalių įterpimo etapą, toliau, panaudojus automatizuoto armavimo prototipą, atliekamas automatizuotas armatūros modeliavimo procesas pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus (žr. 3.6 pav.).

Toliau pateikiama automatizuoto armatūros modeliavimo proceso koncepcijos įgyvendimo idėja ir panaudojimo galimybės.

3.2. Automatizuoto armavimo prototipo koncepcija

3.2.1. Automatizuoto armavimo prototipo kūrimo pradžia

Šiame poskyryje aprašoma, kaip gali būti įgyvendinamas armavimo procesas automatizuotu būdu. Pateikiamas prototipo kūrimo koncepcija bei galimybė susieti prototipą su specializuota konstrukcijų modeliavimo programa *Tekla Structures*.

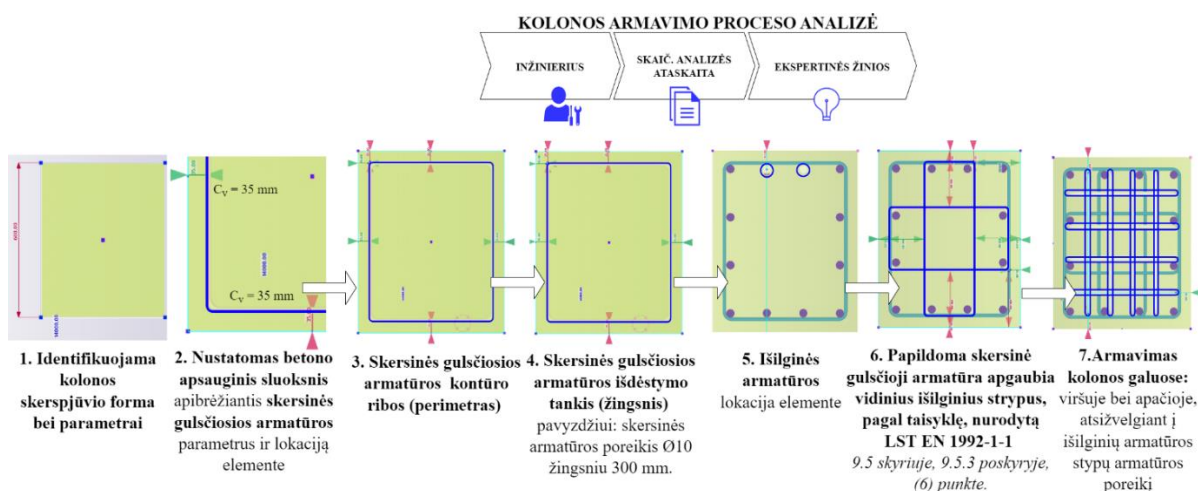
Norėdami patvirtinti prielaidą, kad automatizuoto armavimo procesas gali būti realiai įgyvendinamas, pirmiausia turime išanalizuoti, kokie duomenys reikalingi prototipui kurti.

Konceptualaus programinės įrangos prototipo parametrams nustatyti, turi būti įgyvendinti tokie žingsniai:

- 1) identifikuojama kolonos armavimo proceso nekintanti seka ir sukuriamas armatūros grupių tarpusavio priklausomybę atspindintis žemėlapis (angl. *Mapping*);
- 2) nustatomos armavimo proceso užduotys, pagal šiuos kriterijus:
 - armatūros pasikartojamumas;
 - pagrindžiamumas, remiantis standarto LST EN 1992-1-1:2005 taisyklėmis;
 - galimybė unifikuoti armavimo sprendinius;
- 3) nustatomos parinktys, pagal kurias sukuriamą taikomosios programos koncepcija;
- 4) įvertinamas programinės įrangos sugeneruotų rezultatų pateikimas, atitinkantis tikslumo ir patikimumo kokybės kriterijus.

1 žingsnis. Prototipo kūrimo procesas pradedamas vystyti nuo armavimo sekos tyrimo. Išnagrinėta kolonos elemento armavimo logika padeda suprasti, kad atliekami veiksmai yra kartotiniai ir armavimo seka – nekintanti (žr. 3.7 pav.). Nustatyta, kad pirmiausia Tekla Structures programos aplinkoje turi būti pasirinktas 3D grafinis elementas (angl. *Assembly*). Toliau pateikiami kolonos armavimo žingsniai:

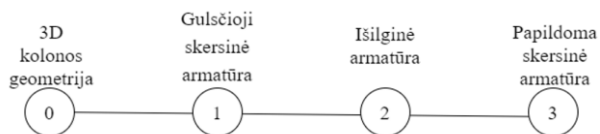
- 1) identifikuojama kolonos skerspjūvio forma bei tikslūs matmenys;
- 2) nustatomas surenkamojo gelžbetoninio gaminio betono apsauginis sluoksnis;
- 3) nustatomas gulsčiosios skersinės armatūros kontūras (angl. *Stirrup reinforcement*);
- 4) nustatomas gulsčiosios skersinės armatūros išdėstymas grafiniame elemente;
- 5) modeliuojama išilginė armatūra (angl. *Longitudinal reinforcement*);
- 6) modeliuojama papildoma gulsčioji skersinė armatūra, skirta vidiniams išilginiams armatūros strypams apgaubti (angl. *Strengthening reinforcement*);
- 7) atliekamas papildomos armatūros modeliavimas kolonos galuose.



3.7 pav. Kolonos armavimo procesas

Užbaigiant šį darbą galiausiai sudaromas armatūros grupių tarpusavio priklausomybę atspindintis **žemėlapis** (žr. 3.8 pav.).

Armavimo proceso užduočių nustatymas pagal pasikartojamumo, pagrindžiamumo taisyklėmis ir galimybės standartizuoti kriterijus



3.8 pav. Nustatyta armavimo proceso seka (armavimo žemėlapio pagrindinės sudedamosios dalys)

2 žingsnis. Taip pat derėtų paminėti, jog norint sukurti prototipą su optimaliu skaičiumi parinkčių. Įgyvendinant šį etapą, turime nustatyti ir susisteminti armavimo proceso užduotis, kurios gali būti *pasikartojančios* pagal LST EN 1992-1-1:2005 standarte apibrėžtas taisykles bei ekspertinius inžinierių sprendinius.

3 žingsnis. Atlikus pirmąsias dvi užduotis, formuojama prototipo koncepcija. Čia kalbama apie programos grafinės vartotojo sąsajos (GUI) kūrimą. Toliau plačiai paaiškinama, kaip kuriamos prototipo parinktys, siekiant maksimaliai sumažinti armatūros parametrų:

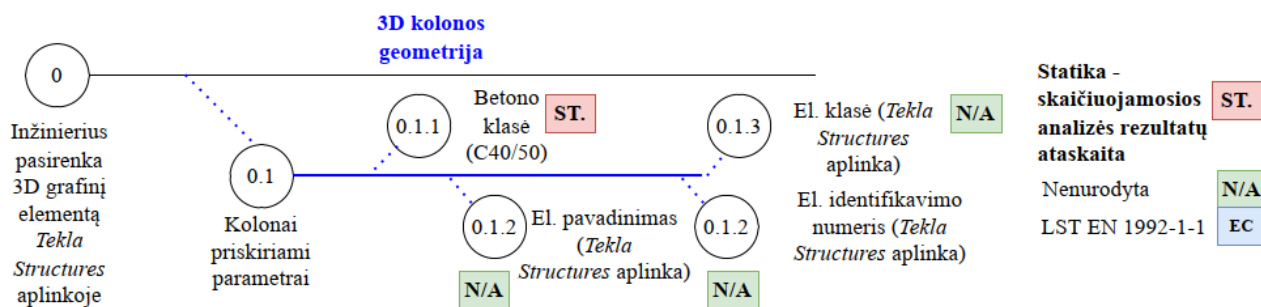
- įvesties į programą poreikį (žr. 3.2.1.1 poskyris);
- sutelkti prototipo veikimui reikalingą informaciją (LST EN 1992-1-1:2005 standartas, ekspertiniai sprendiniai, skaičiuojamosios analizės rez.) ir automatizuoti pasikartojančius procesus (žr. 3.2.2.2 poskyris).

3.2.1.1. Armavimo parametrų identifikavimas

Prototipo įvesties parinkčių pobūdis ir optimalus kiekis nustatomi išsiaiškinus, kokia kolonai suarmuoti reikalingų armatūros grupių (gulsčioji skersinė, išilginė, papildoma gulsčioji skersinė armatūra vidiniams išilginiams armatūros strypams apgaubti ir kt.) tarpusavio priklausomybė. Kadangi armatūra užima tam tikrą dalį bendro kolonos elemento tūrio, tai daroma prielaida, kad 3D elemento geometrijos pokyčiai tiesiogiai veikia armatūros projektinį sprendinį. Pateikiamas jau minėtas armavimo proceso žemėlapio detalus paaiškinimas.

- 1) Kolonos elemento geometrija: pasirinkus objektą automatizuoto armavimo prototipas pirmiausia turi identifikuoti elemento geometrinius duomenis. Kiekvienas *Tekla Structures* aplinkoje sumodeliuotas objektas turi turėti užkoduotus grafinius parametrus. Atpažinus šiuos parametrus *Tekla Structures* aplinkoje prototipas automatiškai sumodeliuoja armatūros pavienius strypus bei lankstinių grupes (žr. 3.9 pav.). Gelžbetoninės kolonos geometriniai parametrai turi tenkinti standarto LST EN 1992-1-1:2005 sąlygas:

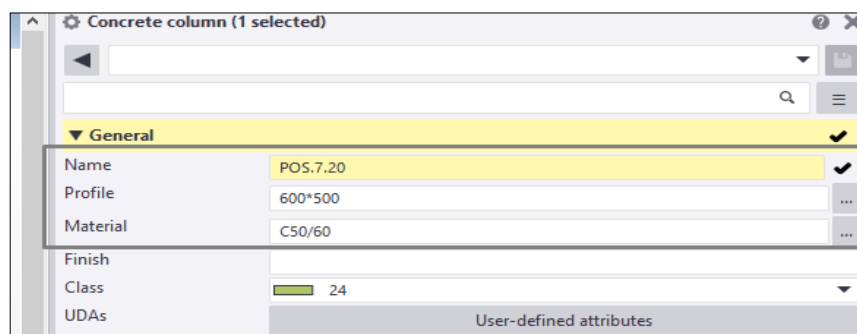
- LST EN ISO 1992-1-1 standartas, 5.3 skyrius, 5.3.1 poskyris, 7 punktas.
- LST EN ISO 1992-1-1 standartas, 9.5. skyrius, 9.5.1 poskyris, 1 punktas.



3.9 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapiu sudedamoji dalis, atspindinti 3D geometrijos projektavimo veiksmus

Kad prototipas galėtų atpažinti grafinio objekto parametrus, prieš tai jam turi būti priskirtos tokios savybės *Tekla Structures* (žr. 3.10 pav.) aplinkoje:

- kolonos elemento skerspjūvio parametrai (angl. *Profile*);
- betono klasė;
- kolonos elemento ilgis.



3.10 pav. Kolonos grafiniai parametrai, užkoduojami *Tekla Structures* programos aplinkoje

Toliau nustatyta, kad pagal konstrukcinius reikalavimus gelžbetoninės surenkamosios kolonos elementas privalo būti tinkamai suarmuotas skersine ir išilgine kryptimis.

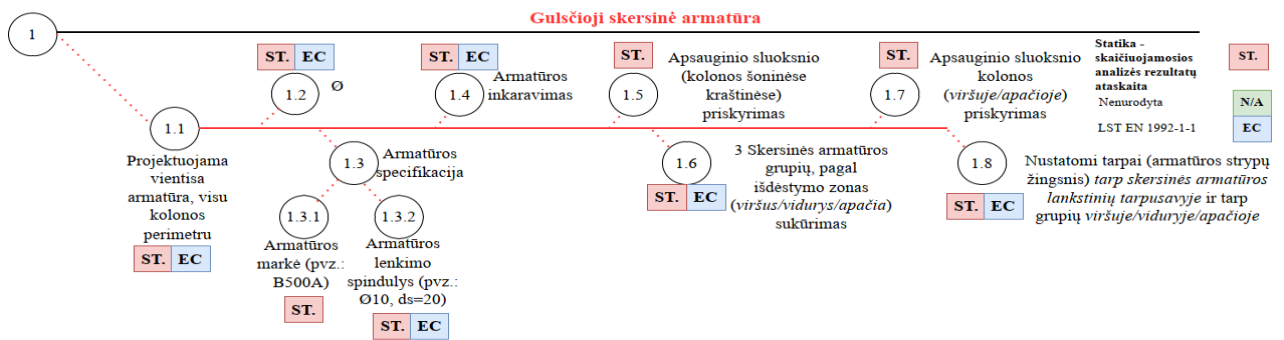
2) Armatūros grupės: skersinė gulsčioji armatūra. Skersinės armatūros lankstinio formą apibrėžia betono apsauginio sluoksnio vertė. Toliau nustatomas išdėstymo tankis, pagal skaičiuojamosios analizės ataskaitoje nurodytą armatūros poreikio reikšmę (žr. 3.11 pav.). Pagal LST EN 1992-1-1:2005 nurodytą informaciją skersinė armatūra turi būti sutankinta strypinio elemento atramos zonose, t. y. kolonos viršuje ir apačioje. Svarbu pabrėžti, kad skersinės armatūros sutankinimo zona kolonos viršutiniame ir apatiniame galuose paprastai lygi kolonos skerspjūvio didesniai kraštinės ilgiui. Galiausiai, skersinės armatūros kiekis arba išdėstymas (angl. *Spacing*) priklauso ir nuo kolonos aukščio.

Automatizuoto armavimo prototipe užkoduota informacija, kaip kolonos elementas turi būti armuojamas skersine kryptimi. Šios taisyklės aprašytos:

- LST EN 1992-1-1 standartas, 9.5 skyrius, 9.5.3 poskyris.

Taisyklė, apibrėžianti armatūros sutankinimo zoną kolonos galuose:

- LST EN 1992-1-1 standartas, 9.5 skyrius, 9.5.3 poskyris, (4), (5) punktai.



3.11 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti gulsčiosios skersinės armatūros projektavimo veiksmų eigą

Žinant gelžbetoninės kolonos elementui reikalingo betono apsauginio sluoksnio bei skersinės gulsčiosios armatūros parametrus, kuriama prototipo parinktis, leidžianti į atitinkamus laukelius įvesti:

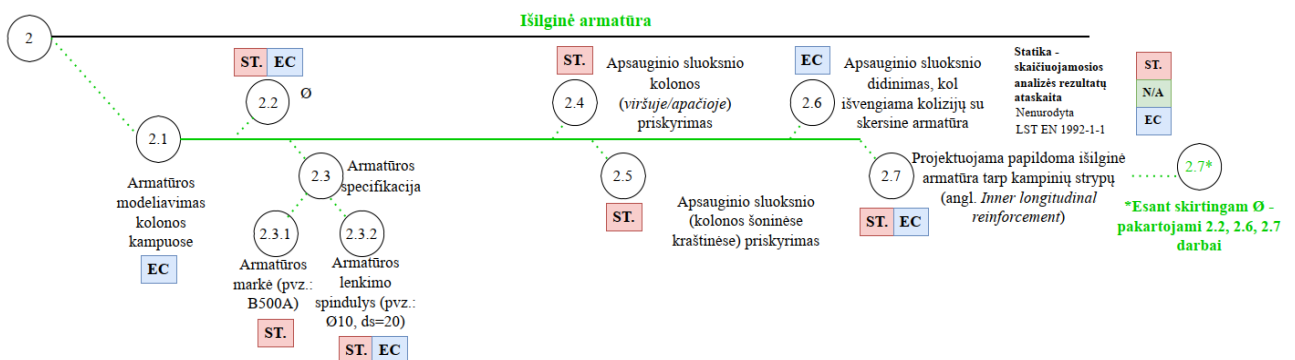
- 1) skersinės armatūros strypų diametro;
- 2) išdėstymo tankį (atstumą tarp strypų);
- 3) armavimo zonos ilgį kolonos viršuje, centrinėje dalyje bei apačioje.

Įvedus tinkamus duomenis į prototipą, gulsčioji skersinė armatūra automatiškai sumodeliuojama ir atvaizduojama *Tekla Structures* programos aplinkoje.

3) Armatūros grupės: išilginė armatūra. Automatizuoto armavimo prototipe turi būti užkoduota informacija, kaip kolonos elementas turi būti armuojamas išilgine kryptimi. Šios taisyklės aprašytos:

- LST EN 1992-1-1:2005 standartas, 9.5 skyrius, 9.5.2 poskyris „Išilginė armatūra“.

Svarbu paminėti, kad kintant išilginės armatūros strypų kiekiui, priklausomai nuo kolonos skerspjūvio parametrų, prototipas turi interaktyviai reaguoti į elemento geometrijos pokyčius ir iš naujo išdėstyti bei prireikus papildyti koloną naujais išilginiais strypais, kad būtų tenkinamas armatūros poreikis (žr. 3.12 pav.).



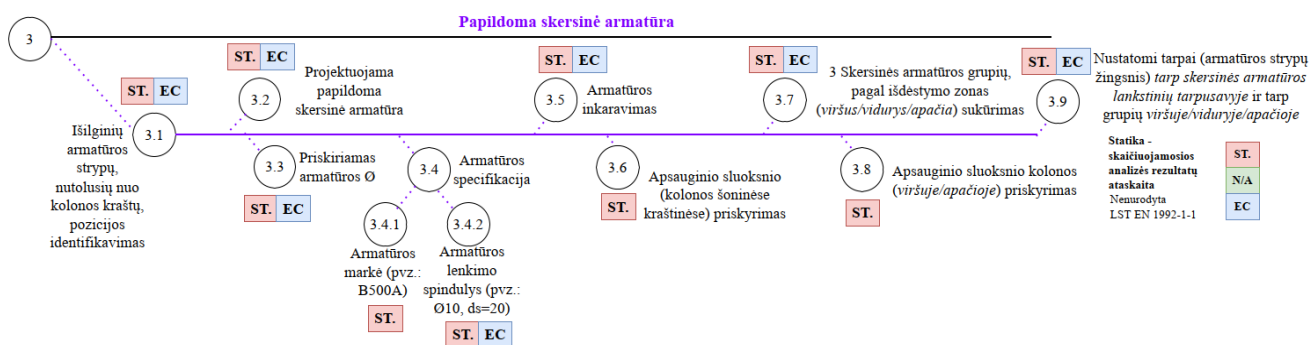
3.12 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti išilginės armatūros projektavimo veiksmų eigą

Nustatyti išilginės armatūros parametrai leidžia kurti prototipo parinktį, leidžiančią į atitinkamus laukelius įvesti išilginės armatūros poreikį (A_s , cm^2), armatūros strypų diametro ($\varnothing$) bei maksimalią išilginių strypų ilgį (pagal gamybos technologiją) vertes. Įvedus tinkamus duomenis

išilginė armatūra automatiškai sumodeliuojama ir atvaizduojama *Tekla Structures* programos aplinkoje.

4) Armatūros grupės: papildoma gulsčioji skersinė armatūra. Šios armatūros parametrai priklauso nuo kolonos skerspjūvio pločio ir ilgio matmenų. Automatizuoto armavimo prototipe užkoduota informacija, kokiais atvejais kolonos elementas turi būti armuojamas papildoma skersine armatūra (žr. 3.13 pav.). Taisyklės aprašytos:

- LST EN 1992-1-1:2005 standartas, 9.5 skyrius, 9.5.3 poskyris, (6) punktas.



3.13 pav. Išplėstinė armavimo proceso žemėlapis sudedamoji dalis, atspindinti papildomos gulsčiosios armatūros projektavimo veiksmų eigą

Paprastai papildoma armatūra modeliuojama, kai kolonos elementas turi vidinius išilginius armatūros strypus ir skersinės armatūros lankstinių šiems strypams apgaubti nepakanka. Ši armatūros grupė išdėstoma ne didesniu nei 150 mm atstumu nuo suvaržyto kampinės išilginės armatūros strypo. Taigi, jei prototipo parinktyse įvedamas vidinių išilginės armatūros strypų diametras, galima daryti prielaidą, kad papildoma gulsčioji skersinė armatūra automatiškai sumodeliuojama apgaubiant vidinius išilginius strypus ir atvaizduojama *Tekla Structures* programos aplinkoje.

5) Betono apsauginis sluoksnis: gelžbetoniniame elemente išilginės ir skersinės armatūros strypai turi būti modeliuojami atsižvelgiant į betono apsauginio sluoksnio reikšmę. Taisyklė, nusakanti prototipui, kaip atpažinti betono apsauginį sluoksnį, nurodyta:

- LST EN 1992-1-1:2005 standartas, 4.4 skyrius, 4.4.1 poskyris.

Taigi pagal išnagrinėtą armavimo proceso eigą, nustatyta gelžbetoninio surenkamojo kolonos elemento armatūros grupių tarpusavio priklausomybė. Atlikta analizė toliau naudojama nustatant reikalingų įvestį į prototipą duomenų pobūdį bei kiekį. Manoma, kad reikalingų įvesti į prototipą skaičiuojamosios analizės parametru kiekis yra toks:

- 1) 3D elemento geometrijos parametru nuskaitymas:
 - elemento aukštis (h , mm);
 - skerspjūvio plotis (a , mm);
 - skerspjūvio ilgis (b , mm).

2) Tiriamojo objektui suarmuoti reikalingi duomenys, gauti atlikus analitinio modelio simuliaciją (3.1 skyrius):

- armatūros skerspjūvio plotas (pvz.: $A_s = 58,90 \text{ cm}^2$);
- gulsčiosios skersinės armatūros strypų diametras (arba armatūros poreikis) ir išdėstymo tankis;
- betono apsauginis sluoksnis (pvz.: $C_v = 35 \text{ mm}$);
- armatūros klasė (pvz.: B500A);
- betono klasė (pvz.: C50/60).

3.2.1.2. Centralizuota automatizuoto armavimo prototipo veikimui reikalinga informacija

Remiantis atliktais stebėjimais ir įgyta patirtimi, daroma prielaida, kad, norint automatizuoti armatūros modeliavimo procesą, visa armavimui reikalinga informacija turi būti sutelkta ir užkoduota prototipo programiniame kode. Toliau pateikiamas šios prielaidos detalesnis paaiškinimas.

Skaičiuojamosios analizės ataskaitoje sugeneruoti armavimo rezultatai gali būti pateikiami ir interpretuojami dviem būdais:

- 1) skaičiuojamosios analizės rezultatai gali schematiškai atspindėti armavimo sprendinį;
- 2) pateikiama kiekybinė armatūros poreikio reikšmė, priklausomai nuo koloną veikiančios koncentruotos apkrovos.

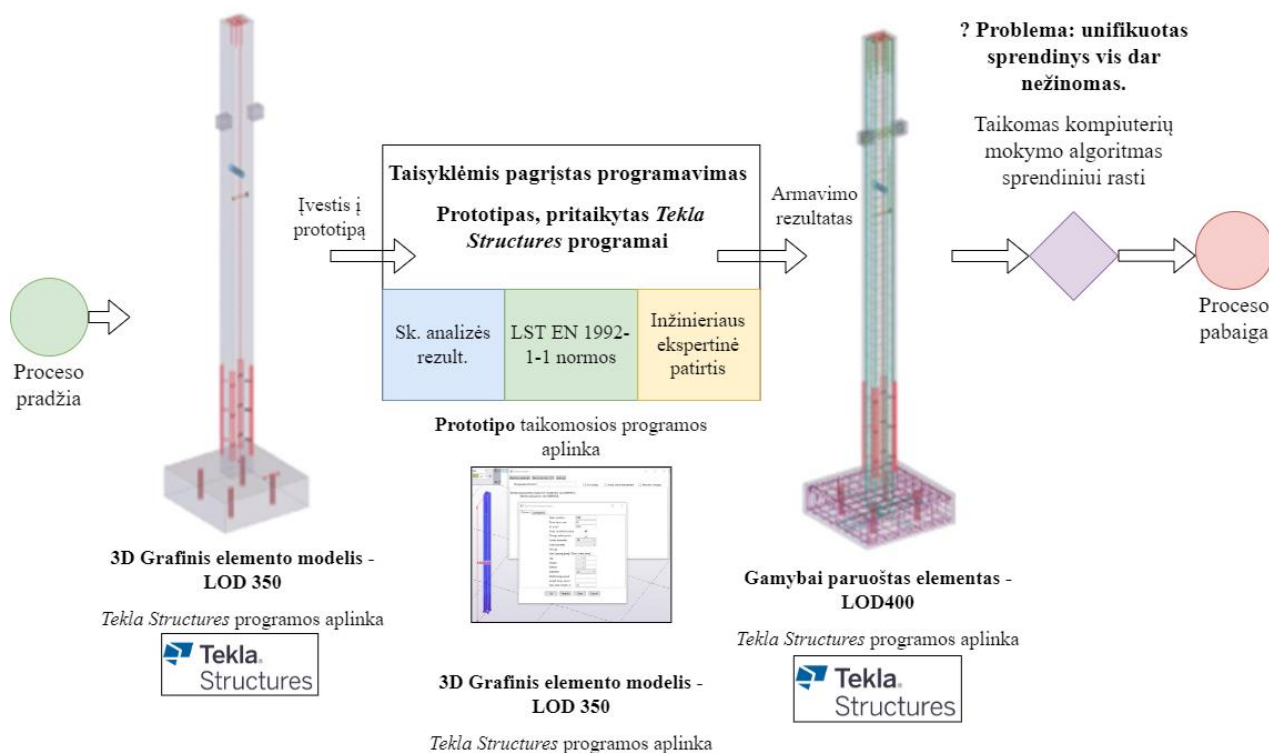
Tačiau realybėje skaičiavimai ne visada atitinka tikslią projektinę elemento geometriją ir pateikiamas armavimo sprendinys nevisada gali būti tinkamai pritaikomas ar pakankamai detalus. Tuomet inžinierius, detalizuodamas armavimo sprendinius, turi remtis ne tik standarto LST EN 1992-1-1:2005 taisyklėmis, bet ir turima ekspertine patirtimi (angl. *Engineers Knowledge*).

3.2.2. Automatizuoto armavimo prototipo kūrimo pabaiga

Pabaigus armavimo procesą projektavimo darbus atliekantis inžinierius turi patikrinti gamybai paruošto elemento kokybę. Kokybės užtikrinimas identifikuojamas **kaip 4 esminis prototipo kūrimo žingsnis**. Čia kalbama apie armavimo sprendinių atitikimą LST EN 1992-1-1:2005 standarto reikalavimams, skaičiuojamosios analizės rezultatams ir vidiniams gamybos technologiškumo kriterijams (pavyzdžiui: maksimalus armatūros strypo ilgis gali skirtis, priklausomai nuo gamyklos strypų suvirinimo galimybių). Jei elementas, kurio armavimas buvo atliktas automatizuotu būdu, atitinka inžinieriaus numatytus kokybės kriterijus, tai surenkamojo gelžbetonio elementas yra paruoštas gamybos etapui.

Galiausiai būtina atkreipti dėmesį, kad kuriamo prototipo veikimas numatomas pasitelkiant *Tekla Structures* programai pritaikytą atvirojo kodo *Tekla OPEN API* platformą. Pagrindinis platformos privalumas – suteikti programinės įrangos kūrėjams atvirą prieigą kurti tarpusavio sąsają ir vykdyti duomenų mainus su kompiuterinio grafinio projektavimo programa *Tekla Structures*.

Prototipas nėra integruojamas į *Tekla Structures* aplinką. Įrankis veikia kaip atskiras taikomosios programos langas, tačiau pritaikomas prie *Tekla Structures* programos funkcijų, t. y. vykdomas informacijos keitimasis tarp pagrindinės programos ir kuriamo prototipo (žr. 3.14 pav.).



3.14 pav. Prototipo koncepciją ir sąsają su *Tekla Structures* programa atvaizduojanti schema

Pagal nustatytus parametrus, sukurta prototipo grafinė vartotojo sąsaja, t. y. taikomosios programos langas, kuriame matomos prototipo funkcijos. Identifikuoti pagrindiniai armavimo parametrai, armatūros grupių tarpusavio priklausomybė bei sutelkta armavimo taisyklių informacija, buvo panaudoti kuriant optimalių skaičių prototipo parinkčių, kurias užpildžius, atliekamas automatizuoto armatūros modeliavimo procesas.

3.3. Automatizuoto armavimo prototipo realizavimas ir numatoma nauda

Tiriamąo darbo objekto apibūdinimas

Pagal nustatytą prototipo kūrimo koncepciją sukuriamas taikomosios programos įrankis, kuriuo atliekamas automatizuotas elemento armavimo procesas. Mokslinis tyrimas atliekamas su nesudėtingos geometrijos, stačiakampio skerspjūvio kolona, be pamato pado ir gembinių atramų sijoms ar perdangoms atremti, kurios skerspjūvio dydis: 500x600 (axb) mm; aukštis (h): 14000 mm; betono klasė: C50/60, armatūros klasė: B500A. Šiame skyriuje siekiama trumpai aprašyti prototipo funkcionalumą, t. y. kaip surenkamojo elemento parametrai turi būti įvedami į prototipo parinkčių laukelius ir numatomą prototipo teikiamą naudą.

3.3.1. Prototipo veikimo principas

Baigiamajame darbe taikomas automatizuoto armavimo prototipas, sukurtas klasikinio programinio algoritmo pagrindu ir susietas su *Tekla Structures* aplinka. Prototipo veikimas paremtas tokiu principu:

- 1) nuskaitoma pasirinktos kolonos geometrija *Tekla Structures* programos aplinkoje;
- 2) prototipas atpažįsta geometriją ir gautus duomenis automatiškai patikrina, kad atitiktų LST EN 1992-1-1:2005 standarte pateikiamas taisykles. Pavyzdžiui, nuskaitoma ir patikrinama informacija, ar kolona nėra atpažįstama kaip sienos elementas;
- 3) pateikiamas kodo fragmentas C# programavimo kalba (žr. 3.15 pav.);

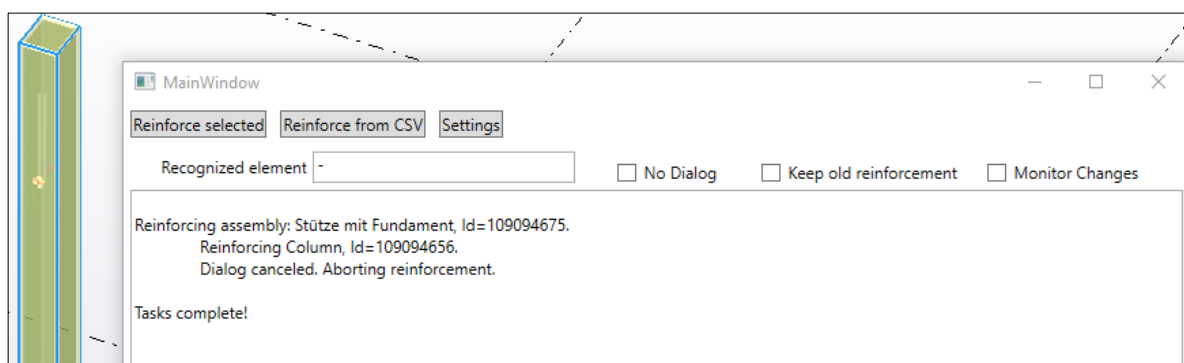
```
// Based on Eurocode 5.3.1 (7)
private static bool IsColumn(double height, double longerEdge, double shorterEdge)
{
    return height >= (3 * longerEdge) && longerEdge < (4 * shorterEdge);
}
```

3.15 pav. Programinio kodo fragmentas, parodantis, kaip programavimo kalba atpažįsta grafinį kolonos elementą

- 4) prototipas identifikuoja kolonos elementui užkoduotus grafinių ir atributinių parametrų duomenis iš *Tekla Structures* aplinkos. Svarbu pabrėžti, kad šie duomenys priskiriami *Tekla Structures* programos aplinkoje, prieš panaudojant prototipą, pavyzdžiui: betono klasė, elemento klasifikacijos numeris ir kt.;
- 5) proceso pabaigoje inžinierius turi užpildyti tam tikrus prototipo laukelius, kurie yra privalomi elementui suarmuoti. Taip pat svarbu paminėti, kad prototipas neleidžia atlikti automatizuoto armavimo, jei privalomi užpildyti laukeliai yra tušti.

3.3.2. Prototipo parinktys

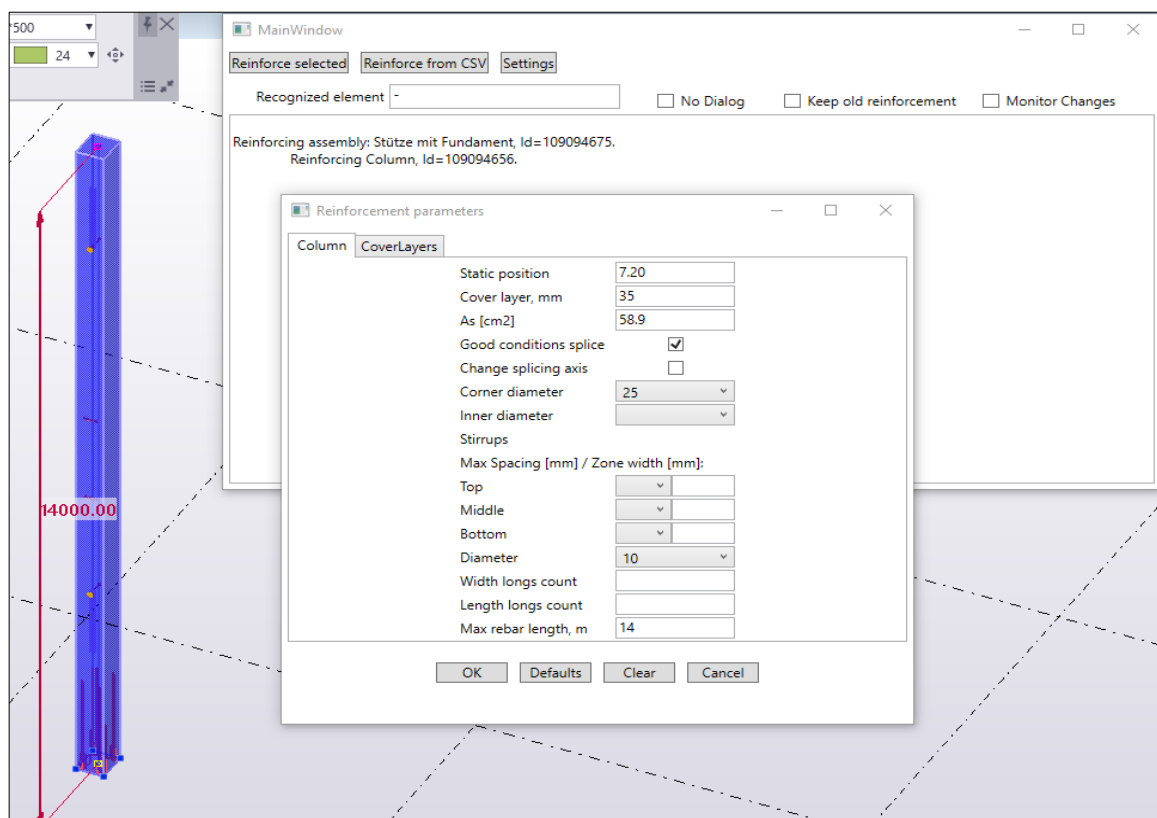
Naudojant įrankį eliminuojami rankinio armatūros modeliavimo veiksmai ir taip gali būti didinamas inžinieriaus darbo efektyvumas. Jei taikomas automatizuoto armavimo būdas, tai inžinieriui tereikia užpildyti atitinkamas prototipo parinktis ir automatiškai sukuriamas 3D elemento modelis su įterpta armatūra (žr. 3.16 pav.).



3.16 pav. Pradinis automatizuoto armavimo prototipo programos langas. Šis langas matomas, kol nepasirinktas grafinis elementas *Tekla Structures* aplinkoje

Automatizuoto armavimo prototipo pagrindiniame lange (žr. 3.17 pav.) esančios parinktys leidžia įvesti atitinkamus skaičiuojamosios analizės rezultatus.

1. Elemento pozicijos numeris projekte (angl. *Static position*).
2. Betono apsauginis sluoksnis C_v , mm (angl. *Cover layer*).
3. Išilginės armatūros poreikis A_s , cm^2 .
4. Išilginės armatūros, esančios kvadratinio skerspjūvio kolonos kraštuose, diametras (angl. *Corner diameter*). Šioje vietoje svarbu pridurti, kad jei skaičiuojamosios analizės rezultatuose yra nurodytas konkretus išilginės armatūros strypo diametras, tokiu atveju inžinierius gali prototipo laukelyje pasirinkti konkretų armatūros strypo diametrą, nurodytą skaičiuojamosios analizės rezultatų ataskaitoje. Inžinierius išilginei armatūrai nurodyti gali pasirinkti užpildyti armatūros poreikio (A_s , cm^2) arba diametro ($\varnothing$), vertę.
5. Vidinės išilginės armatūros diametras (angl. *Inner diameter*).
6. Skersinė gulsčioji armatūra – įvedami armatūros parametrai (angl. *Stirrup*):
 - skersinės armatūros lankstinių grupė, atitinkamu žingsniu (angl. *Max spacing*) kolonos viršuje (angl. *Top*);
 - apačioje (angl. *Bottom*);
 - viduryje (angl. *Middle*);
 - skersinės armatūros diametras (angl. *Diameter*).
7. Didžiausias išilginės armatūros strypo ilgis (angl. *Max rebar length*).



3.17 pav. Pagrindinis automatizuoto armavimo papildinio programos langas

Papildomas pagrindiniame prototipo lange (žr. 3.18 pav.) esantis nustatymas – betono apsauginis sluoksnis. Apsauginio sluoksnio reikšmės galima įvesti skirtingas, priklausomai nuo elemento plokštumos. Stačiakampio skerspjuvio kolonos elementas turi 6 šonines plokštumas, t. y. dvi plokštumos kolonos viršuje, apačioje bei 4 plokštumos kolonos šonuose (angl. *Left, Right, Front, Back*).

Cover Layers	
Top	35
Bottom	35
Left	35
Right	35
Front	35
Back	35

3.18 pav. Papildomas prototipo langas apsauginiam sluoksniui nurodyti skirtingose kolonos elemento plokštumose

Šio skyriaus pabaigoje svarbu pabrėžti, kokia galima prototipo taikymo nauda. Taigi naudojant šį įrankį:

- panaikinama tikimybė klaidingai sumodeliuoti elemento armatūrą, nes prototipas pagal atpažintą elemento grafinę informaciją automatiškai sumodeliuoja armatūros grupes, kurios atitinka LST EN 1992-1-1:2005 standarto reikalavimus;
- eliminuojamas pavienių armatūros strypų bei grupių braižymas *Tekla Structures* aplinkoje;
- eliminuojamas lankstinių formos modeliavimas;
- išlaikoma išilginės bei skersinės armatūros grupių teisinga išdėstymo hierarchija. Pavyzdžiui: iš pradžių modeliuojama skersinė armatūra, tada išilginė ir t. t.;
- esant elemento pakeitimams, prototipas gali būti dar kartą panaudojamas tam pačiam elementui. Armavimas pakeičiamas rankiniu būdu tik reikiamose vietose arba elementas gali būti perarmuotas panaudojant prototipą dar kartą ir tai leidžia sumažinti pakartotinai atliekamus kolonos projektavimo veiksmus.

Kitame skyriuje pateikiamas realus prototipo taikymo pavyzdys pasirinktam tyrimo objektui. Dvidešimties inžinierių atlikto armavimo taikant prototipą pavyzdį galima pamatyti **A.1 priede**.

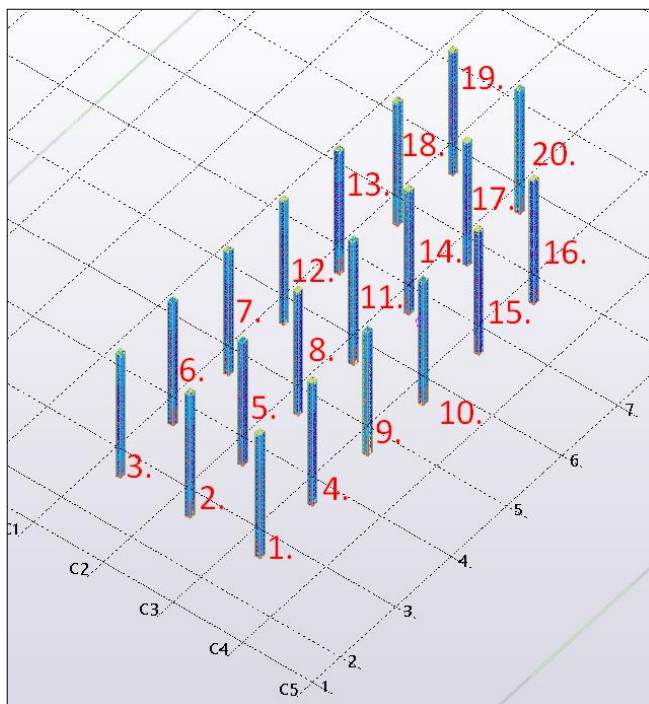
3.4. Automatizuoto armavimo prototipo taikymas kolonos elemento armavimui

Prieš kompiuterių mokymo taikymą moksliniame darbe, buvo atliktas bandomasis eksperimentas, t. y. statistinis tyrimas, siekiant parodyti, kaip veikia prototipo parinktys. Remiantis projektuotojų atlikto darbo stebėjimais, daroma prielaida, kad kiekvienas inžinierius, modeliudamas

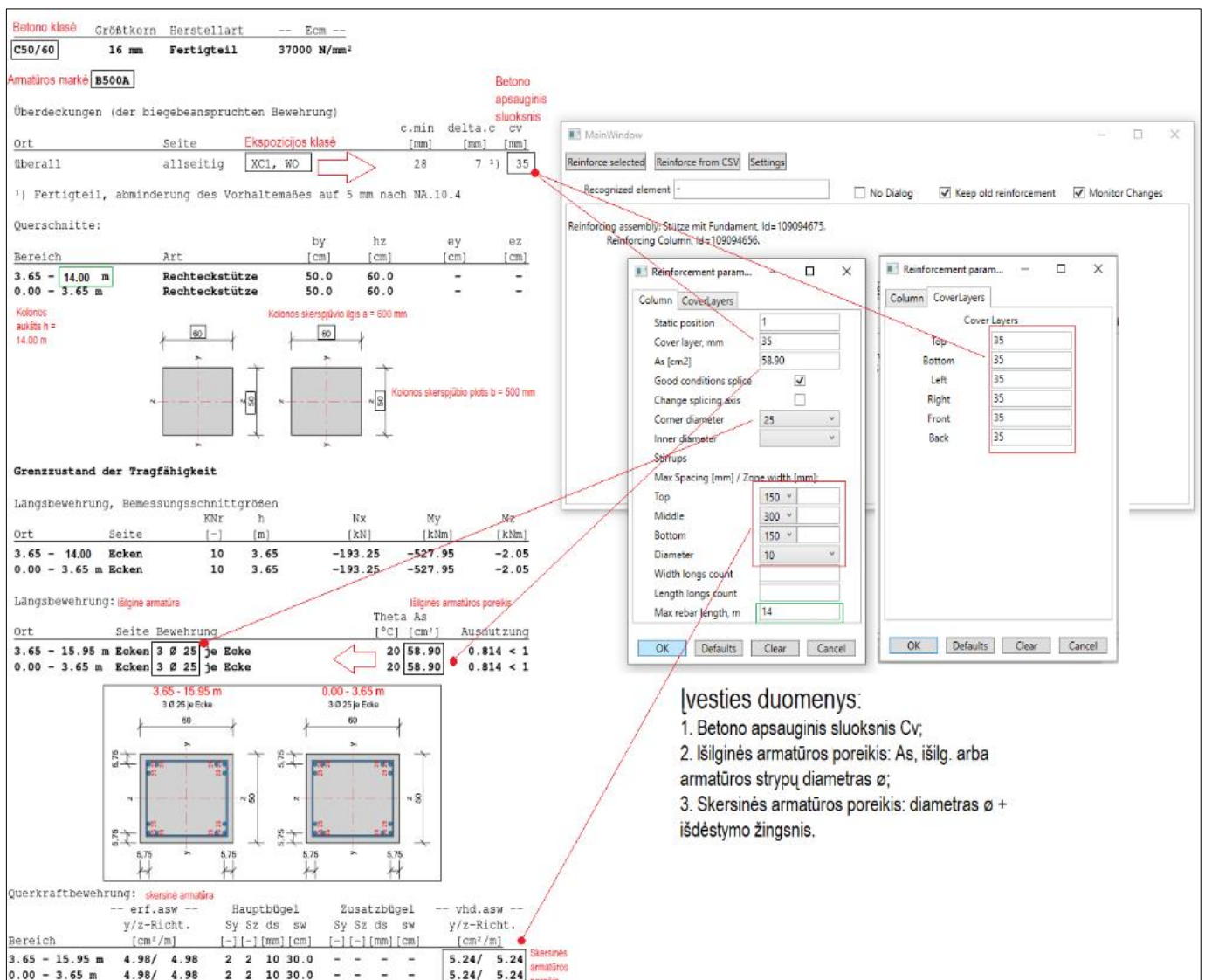
surenkamąjį gelžbetoninį gaminį pagal tuos pačius skaičiuojamosios analizės rezultatus, armavimo procesą gali atlikti skirtingai. Todėl atliekamas bandymas, demonstruojantis, kaip nevienodai gali būti priimami pasirinkto elemento armavimo sprendiniai toje pačioje projektavimo įmonėje (žr. 3.19 pav.).

Automatizuoto armavimo prototipas panaudojamas dvidešimties inžinierių ir pagal pradinis įvesties duomenis gaunama tiek pat skirtingų kolonos armavimo variantų. Kiekvienas inžinierius skaičiuojamosios analizės rezultatus gali skirtingai įvesti į prototipo parinkčių laukelius, tad sugeneruojami nevienodi armavimo sprendiniai. Tyrimo objekto skaičiuojamosios analizės rezultatų įvestis į programinį prototipą (žr. 3.20 pav.):

- 1) betono apsauginis sluoksnis C_v – 35 mm;
- 2) išilginės armatūros poreikis: $A_s = 58.90 \text{ cm}^2$ arba išilginės armatūros strypų diametras: Ø25;
- 3) gulsčiosios skersinės armatūros poreikis: Ø10/300 kolonos viduryje ir Ø10/150 kolonos galuose;
- 4) palankios aplinkos sąlygos (angl. *Good conditions*);
- 5) maksimalus armatūros strypo ilgis $L = 14000 \text{ mm}$ (angl. *Max rebar length*);
- 6) vidinių išilginės armatūros strypų diametras (angl. *Inner diameter*) – neprivaloma įvestis;
- 7) išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio plotį (angl. *Width length count*) neprivaloma įvestis;
- 8) išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio ilgį – neprivaloma įvestis (angl. *Length long count*).

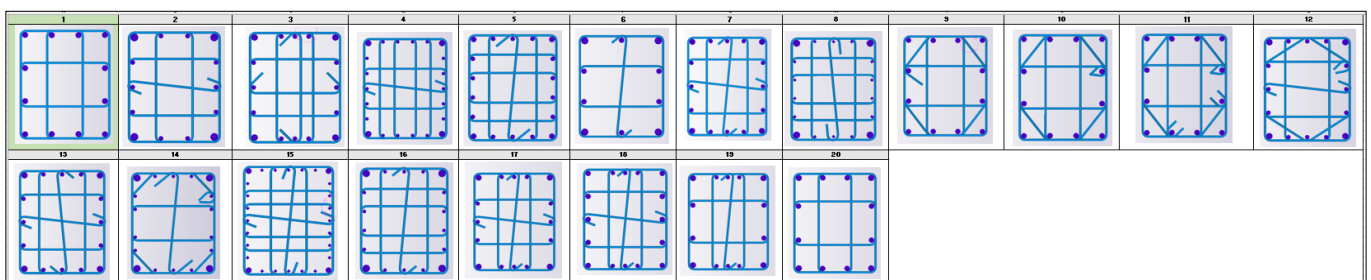


3.19 pav. Kolonos armavimo rezultatai Tekla Structures aplinkoje



3.20 pav. Tiriamojo objekto skaičiuojamosios analizės rezultatai, pateikiami su nuorodomis į prototipo parinktį

Atlikus tyrimą, gaunami to paties elemento skirtingi armavimo rezultatai (žr. 3.21 pav.; 3.2 lentelė.). Šie rezultatai bus naudojami kitoje tyrimo stadijoje, sudarant išplėstinį duomenų rinkinį, skirtą kompiuterių mokymo modelių treniravimui ir testavimui atlikti bei pateikti universalių armavimo rezultatų prognozes.



3.21 pav. 20-ies inžinierių sugeneruoti kolonos armavimo rezultatai, atvaizduojami skersiniame pjūvyje

3.2 lentelė. Inžinierių armavimo rezultatų (naudojant prototipą) suvestinė programoje *Microsoft Excel*

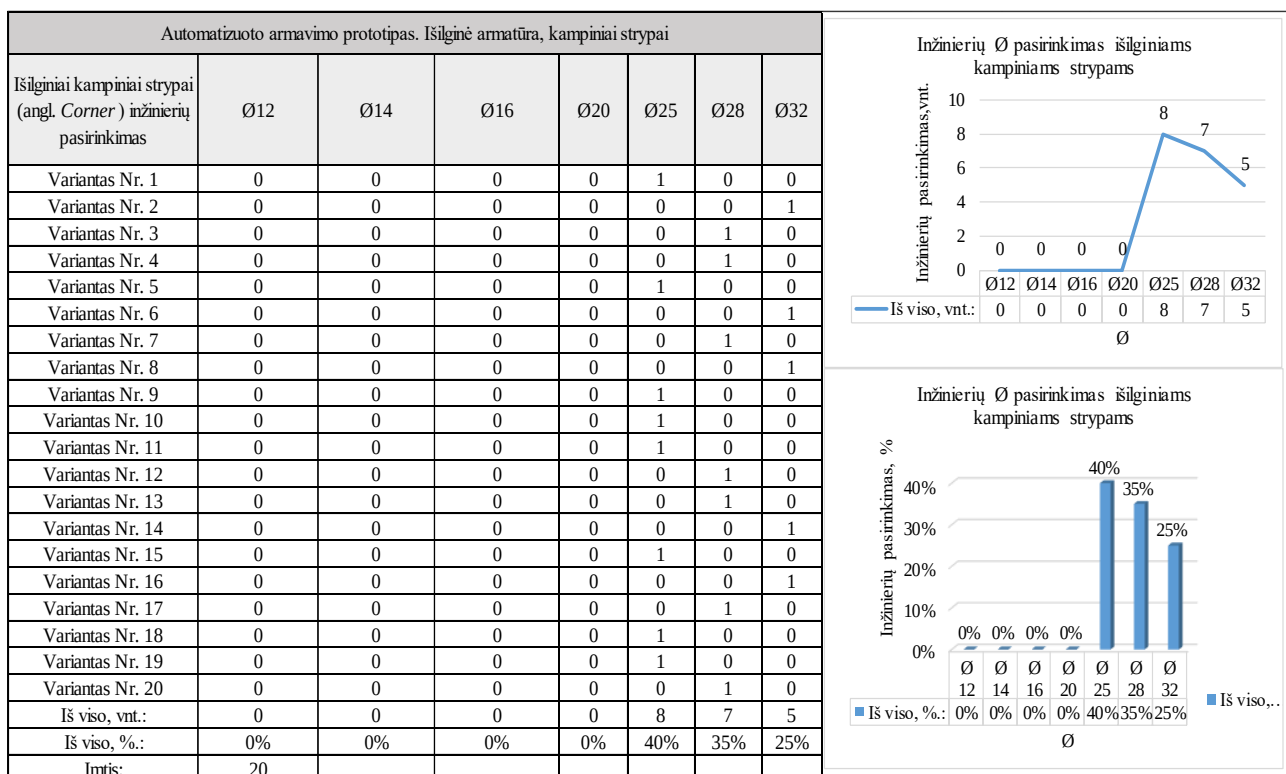
	Ben dra inf.	Inžinierių armavimo rezultatai, taikant prototipą																																													
		Geometrija			Išilginė armatūra						Skersinė gulsčioji armatūra						Papildoma gulsčioji skersinė armatūra												Viršaus/apacios armatūra (kolonos galuose)																		
		Beto no klasė	a, mm	b, mm	h, mm	C _v	A _s	Ø, ka m p.	Ø, a, vi d.	Kiek. (a), vid.	Ø, b, vid inia i	Kiek. (b), vid.	Ø	H _{top} - arma v. zonos ilgis kolon os virš.	Ži ng s- nis	H _{midl} - arma v. zonos ilgis kolon os vidur.	Ži ng s- nis	H _{bot} - arma v. zonos ilgis kolon os apač.	Ži ng sni s	Ø, a	Žings nis (a)	Forma a = 500 mm						Ø, b	Žings nis (b)	Forma b = 600 mm						Ø a	Kiek · (a)	Užlai dos ilgis (a)	Ø b	Kiek · (b)	Užlai dos ilgis (b)						
																																															
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6																																				

1.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440
2.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	32	20	2	20	3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	4	440	12	6	440
3.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	20	3	20	3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	1	0	0	10	300	1	0	1	0	0	0	12	6	440	12	6	440
4.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	16	4	16	5	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	1	0	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	6	440	12	7	440
5.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	20	3	20	4	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	1	12	6	440	12	6	440
6.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	32	25	1	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	0	0	1	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440
7.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	20	3	20	3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	6	440	12	6	440
8.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	32	16	3	16	4	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	1	12	5	440	12	6	440
9.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	1	0	0	12	4	440	12	6	440
10.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	25	2	25	2	10	3500	100	7000	300	3500	100	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	1	0	0	12	4	440	12	6	440
11.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	25	2	25	2	10	3500	100	7000	300	3500	100	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	1	0	0	12	4	440	12	4	440
12.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	20	3	20	3	10	3500	100	7000	300	3500	100	10	300	1	0	0	0	0	1	10	300	1	1	0	0	0	0	12	6	440	12	6	440
13.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	20	3	20	3	10	3500	100	7000	250	3500	100	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	5	440	12	6	440
14.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	32	16	3	16	4	10	3500	100	7000	250	3500	100	10	300	0	0	1	0	1	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	6	440	12	6	440
15.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	16	5	16	7	10	3500	100	7000	250	3500	100	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	1	12	7	440	12	8	440
16.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	32	16	3	16	4	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	1	12	6	440	12	6	440
17.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	20	3	20	3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	5	440	12	6	440
18.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	20	3	25	3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	1	0	0	0	0	12	6	440	12	6	440
19.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	20	3	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	1	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	6	440
20.	C50/60	500	600	14000	35	58,9	28	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440

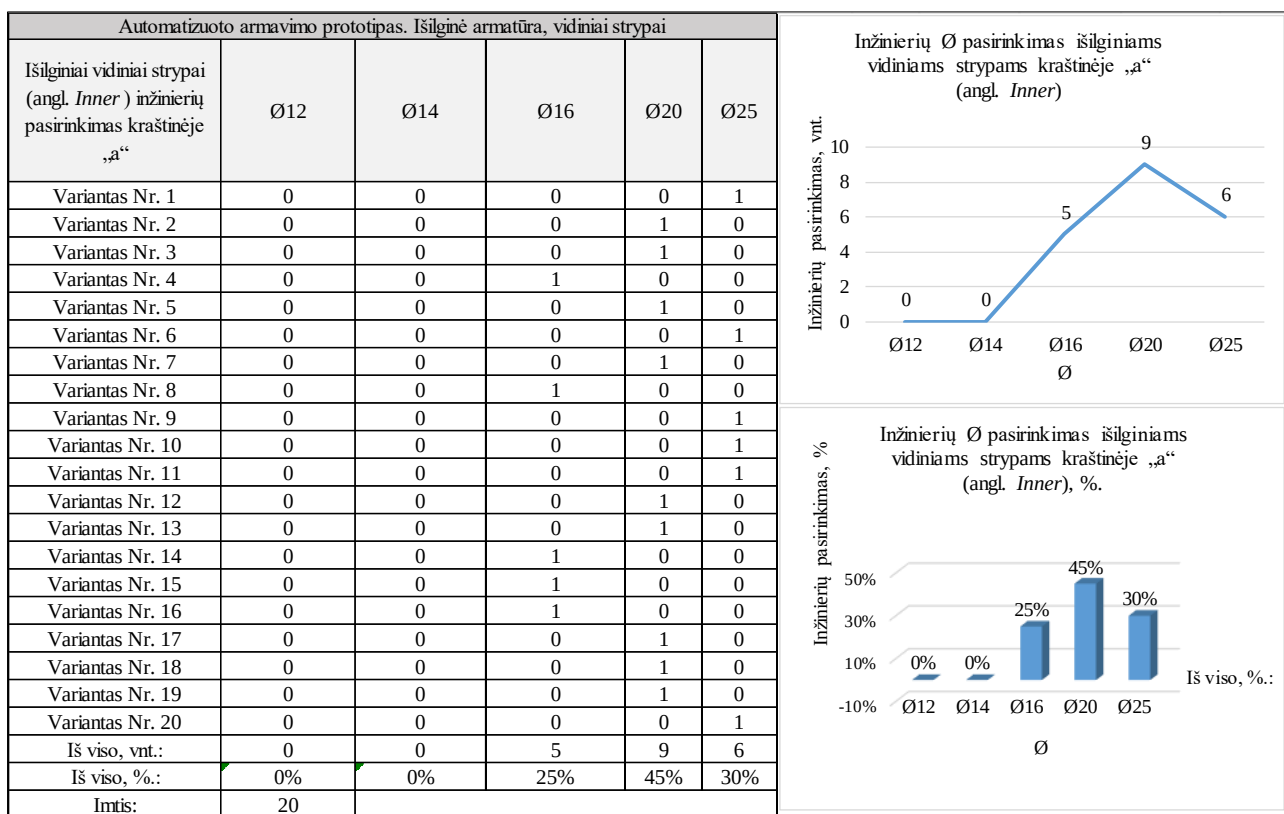
Toliau pateikiamas detalus armavimo rezultatų paaiškinimas, kokius armatūros strypų diametrus, kiekius, lankstinių formas, strypų išdėstymą ir kitus parametrus renkasi inžinieriai, naudodami automatizuoto armavimo prototipą. Tyrimo rezultatai parodo, kokia gali būti to paties elemento armavimo sprendinių įvairovė.

Statistiniame tyrime analizuojama, kaip keičiasi inžinierių armavimo sprendiniai:

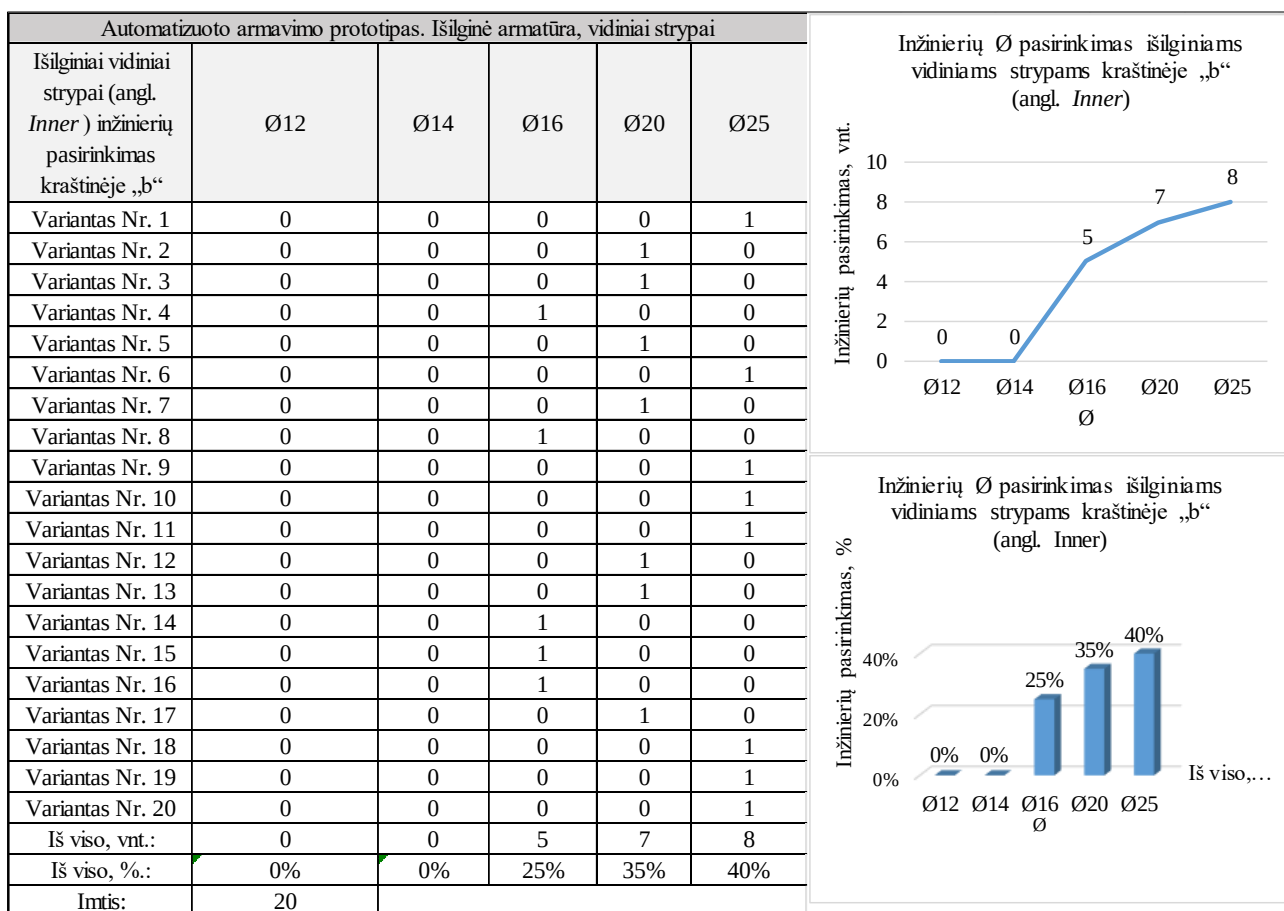
- 1) išilginės armatūros kampinių strypų diametro pasirinkimas (žr. 3.22 pav.);
- 2) išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „a“ (žr. 3.23 pav.);
- 3) išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „b“ (žr. 3.24 pav.);
- 4) išilginės armatūros strypų kiekis kraštinėje „a“ (žr. 3.25 pav.);
- 5) išilginės armatūros strypų kiekis kraštinėje „b“ (žr. 3.26 pav.);
- 6) gulsčiosios skersinės armatūros lankstinio pasirinkimas (žr. 3.27 pav.);
- 7) gulsčiosios skersinės armatūros strypų kiekis (žr. 3.28 pav.);
- 8) papildomos gulsčiosios skersinės armatūros lankstinio pasirinkimas kraštinėje „a“ (žr. 3.3 lentelė.; 3.29 pav.; 3.30 pav.);
- 9) papildomos gulsčiosios skersinės armatūros lankstinio pasirinkimas kraštinėje „b“ (žr. 3.4 lentelė.; 3.31 pav.; 3.32 pav.);
- 10) stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „a“ (žr. 3.33 pav.);
- 11) stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „b“ (žr. 3.34 pav.).



3.22 pav. Išilginės armatūros kampinių strypų diametro pasirinkimas

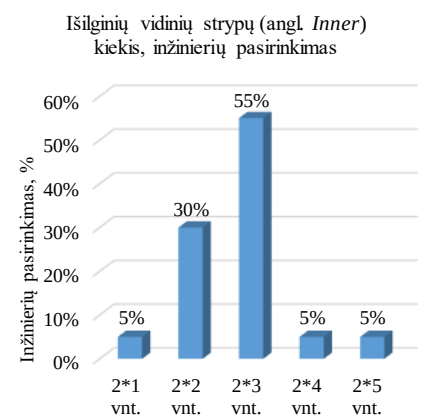
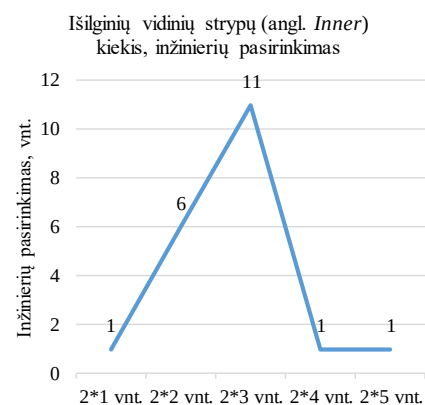


3.23 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „a“



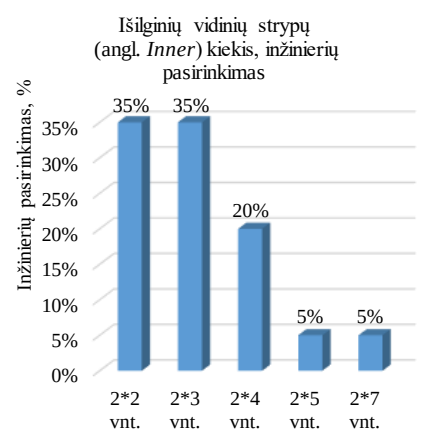
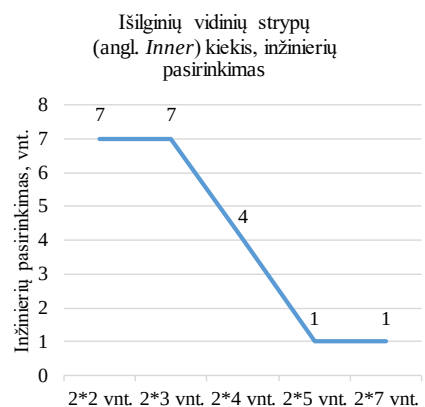
3.24 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų diametro pasirinkimas kraštinėje „b“

Automatizuoto armavimo prototipas. Išilginė armatūra kraštinėje „a“					
Išilginiai vidiniai strypai (angl. <i>Inner</i>) kiekis, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „a“	2*1 vnt.	2*2 vnt.	2*3 vnt.	2*4 vnt.	2*5 vnt.
Variantas Nr. 1	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 2	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 3	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 4	0	0	0	1	0
Variantas Nr. 5	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 6	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 7	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 8	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 9	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 10	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 11	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 12	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 13	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 14	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 15	0	0	0	0	1
Variantas Nr. 16	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 17	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 18	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 19	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 20	0	1	0	0	0
Iš viso, vnt.:	1	6	11	1	1
Iš viso, %:	5%	30%	55%	5%	5%
Imtis:	20				

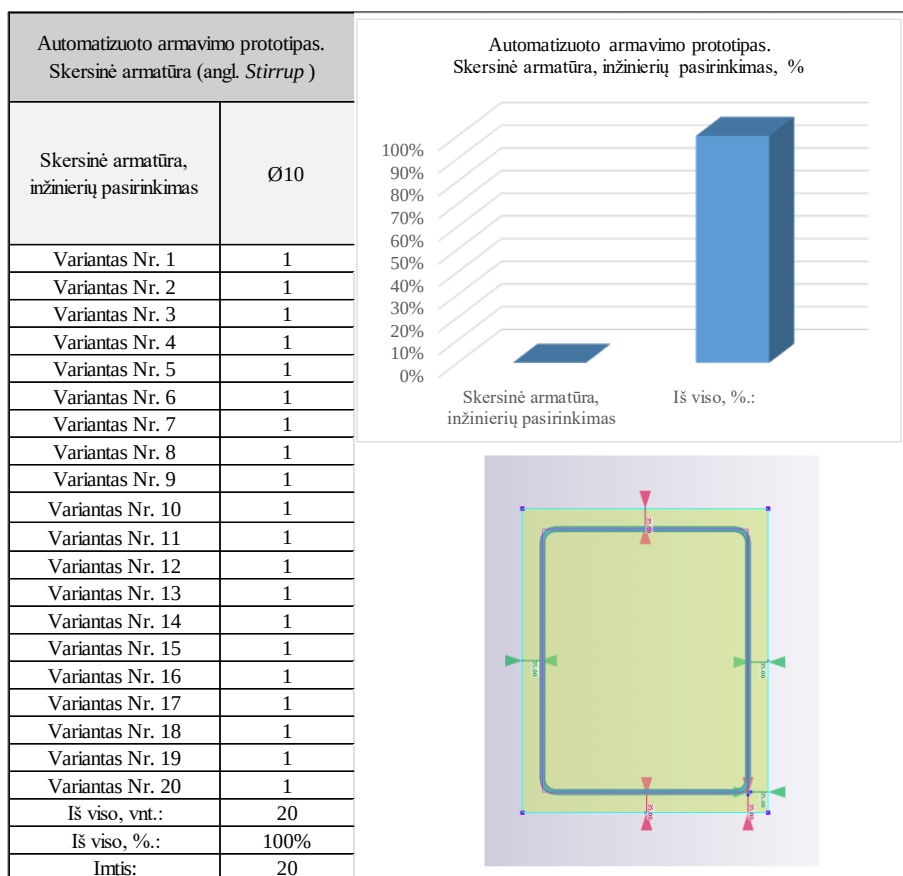


3.25 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų pasirinkimas kraštinėje „a“ kiekis

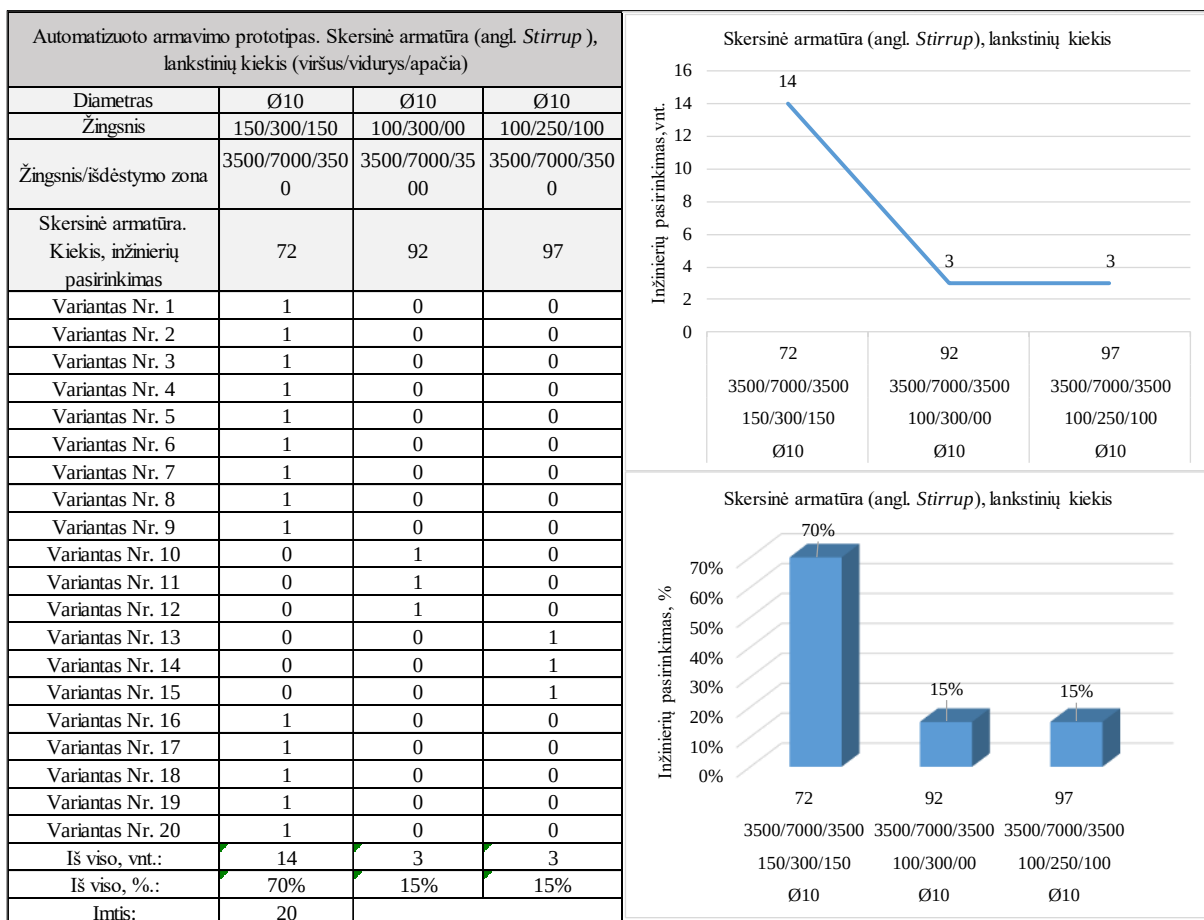
Automatizuoto armavimo prototipas. Išilginė armatūra kraštinėje „b“					
Išilginiai vidiniai strypai (angl. <i>Inner</i>) kiekis, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „b“	2*2 vnt.	2*3 vnt.	2*4 vnt.	2*5 vnt.	2*7 vnt.
Variantas Nr. 1	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 2	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 3	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 4	0	0	0	1	0
Variantas Nr. 5	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 6	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 7	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 8	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 9	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 10	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 11	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 12	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 13	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 14	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 15	0	0	0	0	1
Variantas Nr. 16	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 17	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 18	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 19	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 20	1	0	0	0	0
Iš viso, vnt.:	7	7	4	1	1
Iš viso, %:	35%	35%	20%	5%	5%
Imtis:	20				



3.26 pav. Išilginės armatūros vidinių strypų pasirinkimas kraštinėje „b“ kiekis



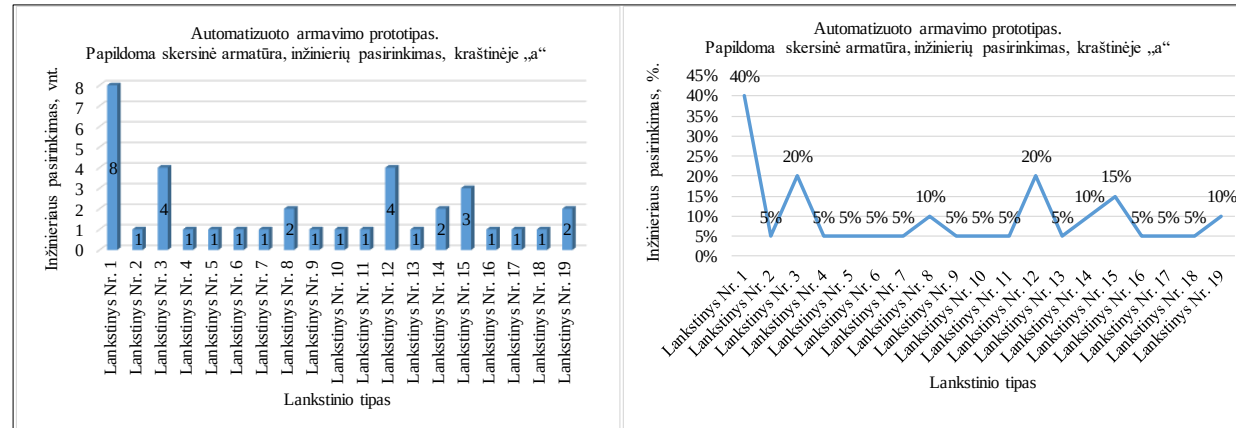
3.27 pav. Gulsčiosios skersinės armatūros diametro ir formos pasirinkimas



3.28 pav. Gulsčiosios skersinės armatūros lankstinių pasirinkimas ir strypų kiekis

3.3 lentelė. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, lankstinio pasirinkimas kraštinėje „a“

Automatizuoto armavimo prototipas. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas, kraštinė „a“																			
Lankstinio Nr.	Lankstiny Nr. 1	Lankstiny Nr. 2	Lankstiny Nr. 3	Lankstiny Nr. 4	Lankstiny Nr. 5	Lankstiny Nr. 6	Lankstiny Nr. 7	Lankstiny Nr. 8	Lankstiny Nr. 9	Lankstiny Nr. 10	Lankstiny Nr. 11	Lankstiny Nr. 12	Lankstiny Nr. 13	Lankstiny Nr. 14	Lankstiny Nr. 15	Lankstiny Nr. 16	Lankstiny Nr. 17	Lankstiny Nr. 18	Lankstiny Nr. 19
Variantas Nr. 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Variantas Nr. 10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Variantas Nr. 11	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Variantas Nr. 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Variantas Nr. 15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 18	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 19	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iš viso, vnt.:	8	1	4	1	1	1	1	2	1	1	1	4	1	2	3	1	1	1	2
Iš viso, %:	40%	5%	20%	5%	5%	5%	5%	10%	5%	5%	5%	20%	5%	10%	15%	5%	5%	5%	10%



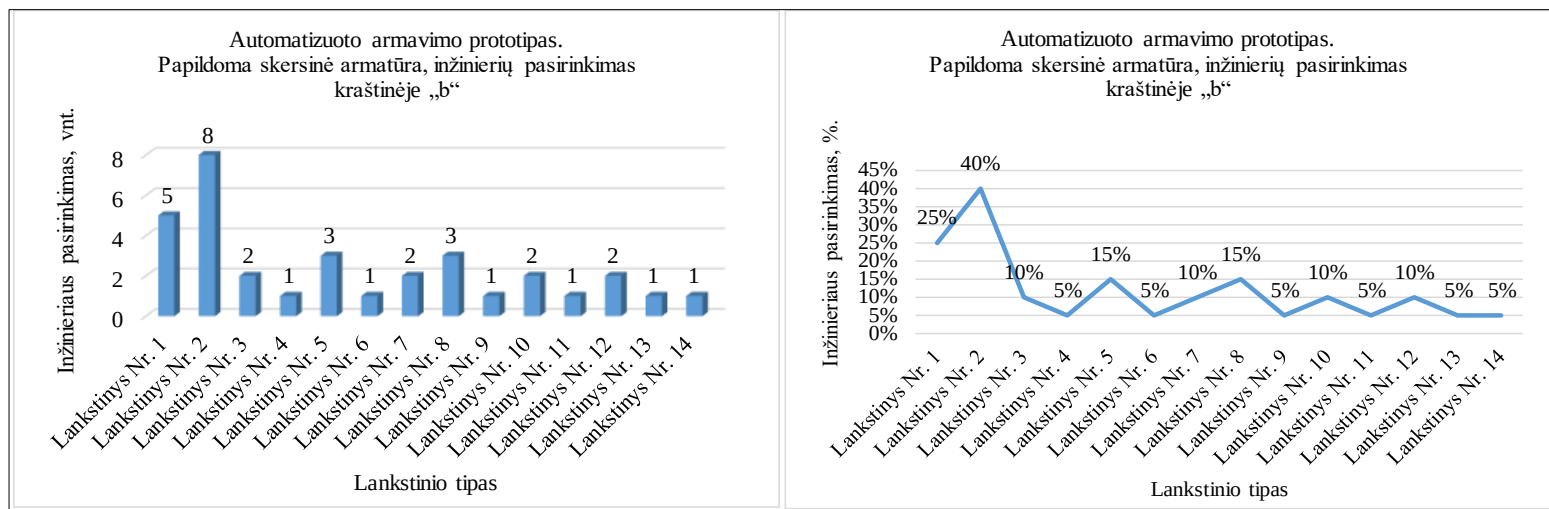
3.29 pav. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „a“

Papildoma skersinė armatūra, kraštinė „a“									
Eil. Nr.	1 (35/160/35/160)	2	3	4 (35/190/35/190)	5	6	7	8	9
Inž. Pasirinkimas	1;2;3;11;15;17;19;20	3	6,7,18,19	4;	8	5	9	10;11	12
Eil. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Inž. Pasirinkimas	15	11	18;16;13;5	4;	16;17	12;8;7	14	14	13
Eil. Nr.	19 (35/150/35/150)								
Inž. Pasirinkimas	9;10								

3.30 pav. Papildomos gulsčiosios skersinės armatūros, vidiniams išilginiams strypams „surišti“, lankstinių formos tipai, išdėstymas kraštinėje „a“

3.4 lentelė. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „b“

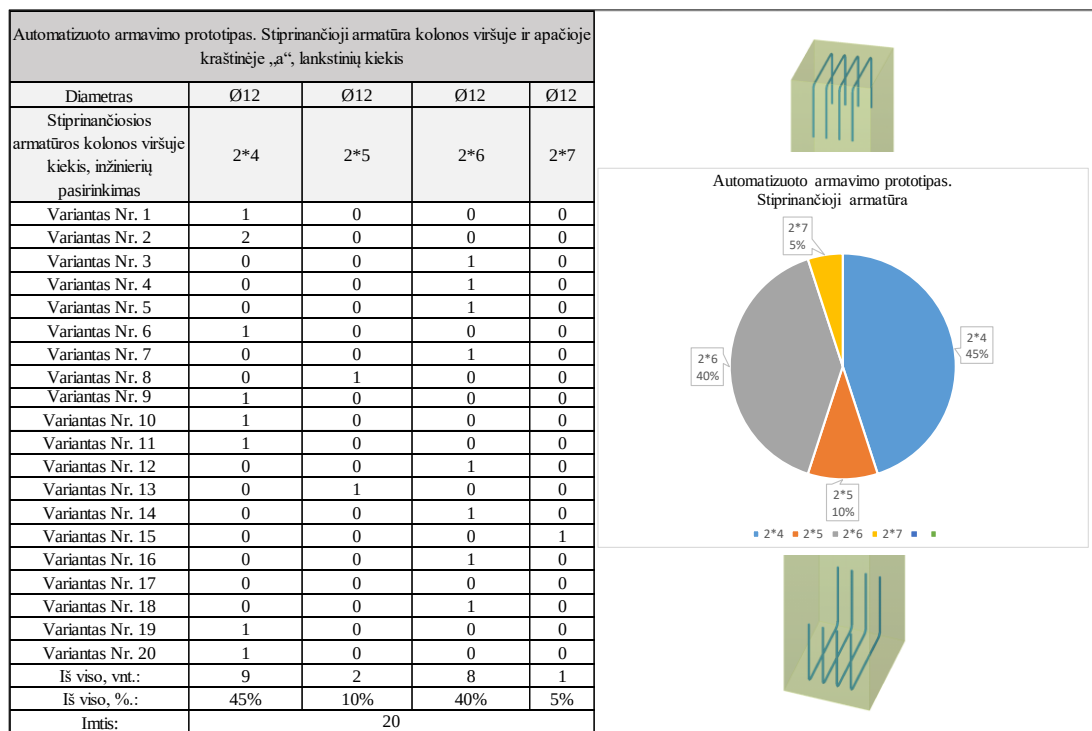
Automatizuoto armavimo prototipas. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas kraštinėje „b“														
Lankstinio Nr.	Lankstinys Nr. 1	Lankstinys Nr. 2	Lankstinys Nr. 3	Lankstinys Nr. 4	Lankstinys Nr. 5	Lankstinys Nr. 6	Lankstinys Nr. 7	Lankstinys Nr. 8	Lankstinys Nr. 9	Lankstinys Nr. 10	Lankstinys Nr. 11	Lankstinys Nr. 12	Lankstinys Nr. 13	Lankstinys Nr. 14
Variantas Nr. 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 7	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 8	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Variantas Nr. 12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Variantas Nr. 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Variantas Nr. 15	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 16	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Variantas Nr. 18	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Variantas Nr. 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Variantas Nr. 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Iš viso, vnt.:	5	8	2	1	3	1	2	3	1	2	1	2	1	1
Iš viso, %:	25%	40%	10%	5%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	5%	10%	5%	5%
Imtis:	20													



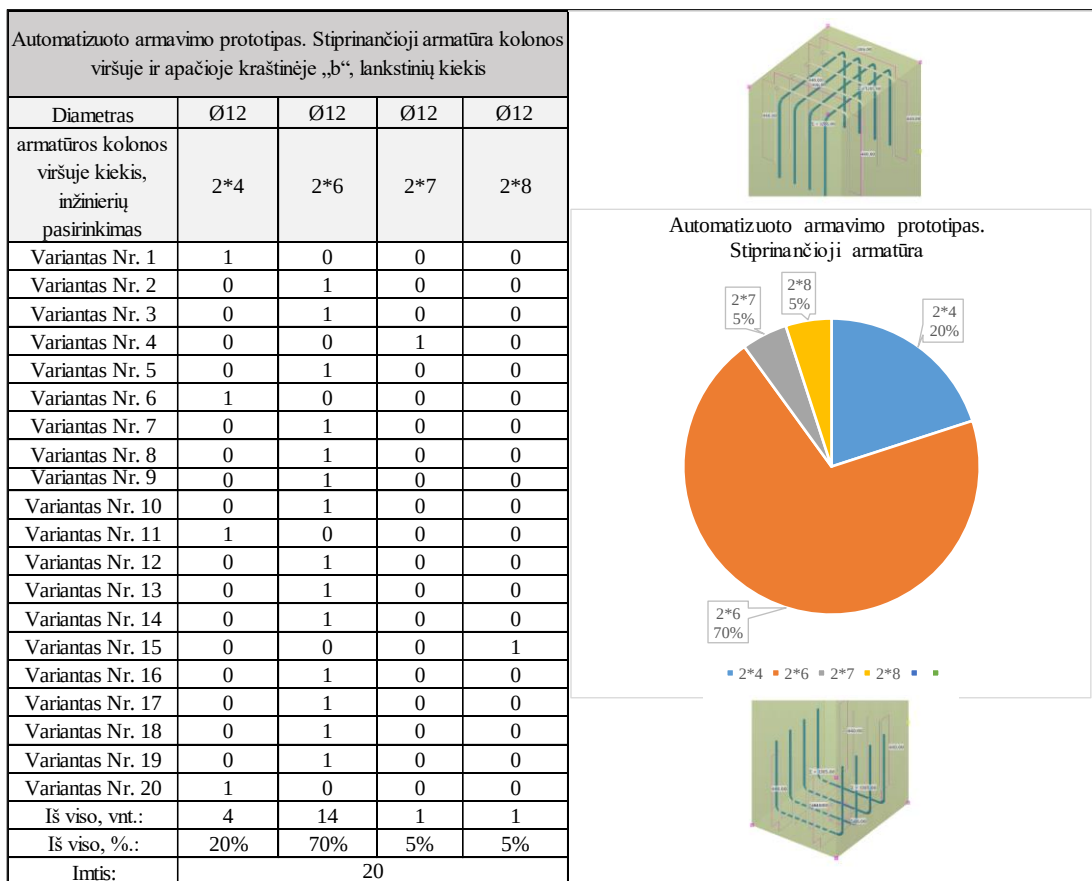
3.31 pav. Papildoma gulsčioji skersinė armatūra, inžinierių pasirinkimas, kraštinėje „b“

Papildoma skersinė armatūra, kraštinė „b“									
Eil. Nr.	1 (35/190/35/190)	2	3 (35/160/35/160)	4	5 (35/221/35/221)	6 (35/130/35/130)	7 (35/135/35/135)	8 (35/150/35/150)	9 (35/215/35/215)
Inž. Pasirinkimas	1;4;6;9;10	2;4;7;12;13;15;17;18	2;3	3	5;8;16	5	8;16	7;15;18	15
Eil. Nr.	10 (35/180/35/180)	11 (35/190/35/190)	12 (35/155/35/155)	13 (35/205/35/205)	14 (35/175/35/175)				
Inž. Pasirinkimas	19;20	11	12;13	14	17				

3.32 pav. Papildomos gulsčiosios skersinės armatūros, vidiniams išilginiams strypams „surišti“, lankstinių formos tipai, išdėstymas kraštinėje „b“

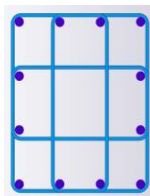
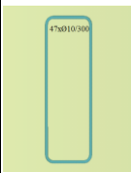
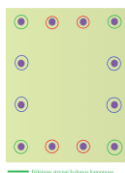
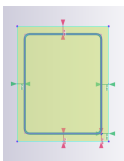
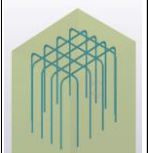
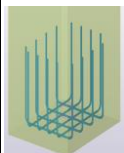


3.33 pav. Stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „a“



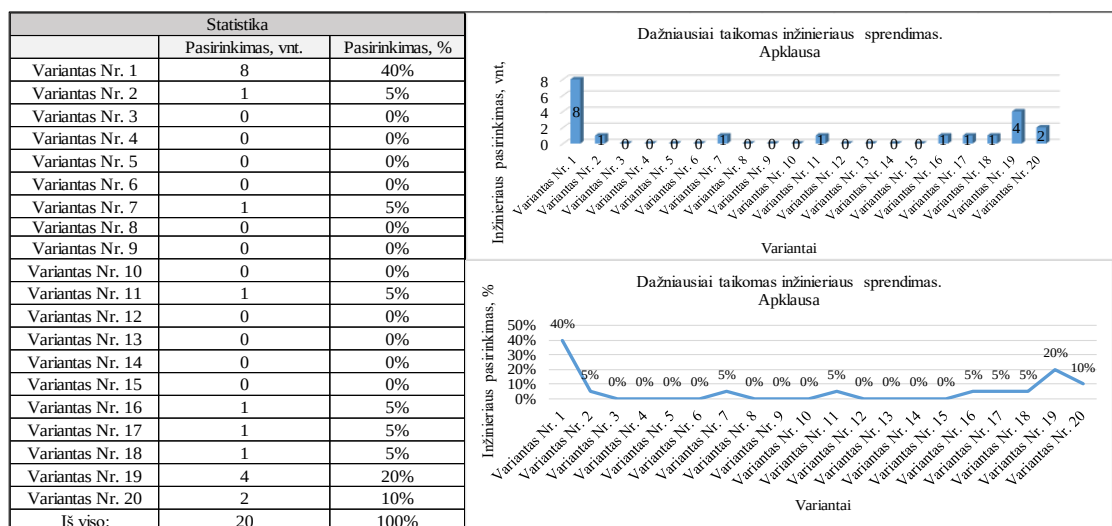
3. 34 pav. Stiprinančioji armatūra kolonos viršuje ir apačioje, lankstinių kiekis kraštinėje „b“

Kiekvieno inžinieriaus armavimo sprendinys išsaugomas ir surinkti duomenys sisteminami *Microsoft Excel* programoje (žr. 3.35 pav.). Šis duomenų rinkinys toliau bus naudojamas kompiuterių mokymo algoritmams treniruoti ir testuoti.

1.			Rezultatas							Laiko trukmė atliekant rankinį armavimą, min	Laiko trukmė atliekant automatizuotą armavimą (+patikra), min	Laiko skirtumas, min	Laiko skirtumas, %
										32,0	7,5	24,5	76,56
Įvesties duomenys			Rezultatai	Papildoma skersinė armatūra	Papildoma skersinė armatūra	Išilginė armatūra	Skersinė armatūra	Armavimas kolonos viršuje	Armavimas kolonos apačioje				
Elemento pozicija:	Neprivaloma		Elemento pozicija: 7.20	47xØ10/300	47xØ10/300	2*2xØ25 kampiniai; 2*2xØ25 (a) vidiniai; 2*2xØ25 (b) vidiniai	24xØ10/150 (0-3500mm); 24xØ10/300(3500-10500 mm); 24xØ10/150 (10500-14000mm)	4xØ12 (a); 4xØ12 (b)	4xØ12 (a); 4xØ12 (b)				
Betono apsauginis sluoksnis (mm):	Cv - 35 mm		Cv - 35 mm	1 More: RnD_ChSpIAxis : 0 RnD_ILLengthQ : -1 RnD_ILWidthQ : -1 RnD_MaxRbrLen : 14.00 RnD_StirrZoneBot : 3500.00 RnD_StirrZoneMid : 7000.00 RnD_StirrZoneTop : 3500.00 RnD_StirrMaxSpBot : 150.00 RnD_StirrMaxSpMid : 300.00 RnD_StirrMaxSpTop : 150.00 RnD_Long_Good : 1.00 RnD_Back_Cover : 35.00 RnD_Front_Cover : 35.00 RnD_Top_Cover : 35.00 RnD_Left_Cover : 35.00 RnD_Right_Cover : 35.00 RnD_Bottom_Cover : 35.00 Bewehrung (Reinforcement grade): B500A D_max [mm] : 16 Fixed drawing main view : Top Numbering : Standard As [cm2] : 58.9 Static Position : 7.20 RnD_StirrDia : 10 RnD_Crn_Long_Diam : 25 User field 3 : 35/1nz.1									
Išilginės armatūros poreikis:	As, išilg. = 58.90 cm ²		As, išilg. = 58.90 cm ²										
Palankios aplinkos sąlygos:	Taip		Taip										
Išilginė armatūra													
Išilginė armatūra (kampiniai) strypai: Ø	25		12xØ25										
Išilginė armatūra (vidiniai) strypai: Ø	Nenurodyta		-										
Skersinė armatūra													
	Maksimalus išdėstymo žingsnis (mm):	Išdėstymo zona (mm):											
Kolonos elemento viršus:	150	3500	24xØ10/150										
Kolonos elemento vidurys:	300	7000	24xØ10/300										
Kolonos elemento apačia:	150	3500	24xØ10/150										
Skersinės armatūros diametras: Ø	10												
Išilginė armatūra													
Išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio plotį	Neprivaloma												
Išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio ilgį	Neprivaloma												
Maksimalus armatūros strypo ilgis (m)	14												
Kolonos geometriniai duomenys													
Kolonos skerspjūvio plotis (mm):	500												
Kolonos skerspjūvio ilgis (mm):	600												
Kolonos aukštis (mm):	14000												
Betono klasė (mm):	C50/60												

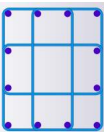
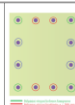
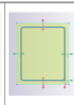
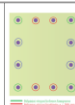
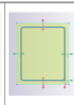
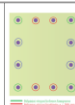
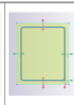
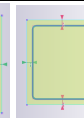
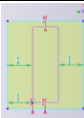
3.35 pav. Pateikiamas detalus inžinieriaus Nr. 1 armavimo rezultatas*

*Pastaba: inžinieriaus Nr. 1 armavimo rezultatas papildomai pateikiamas A.8 priede.



3.36 pav. Universaliausias armavimo sprendinys, nustatytas remiantis inžinierių subjektyvia nuomone

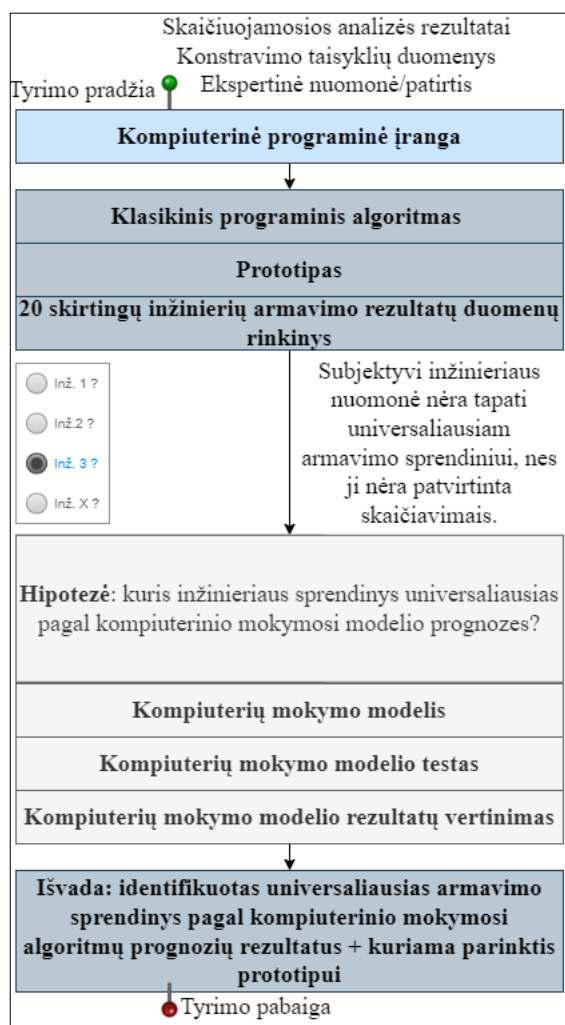
Pagal atliktą tyrimą nustatyta, kad tą patį elementą inžinieriai armuoja skirtingai (žr. 3.36 pav.). Atlikus papildomą apklausą kiekvienas inžinierius analizavo savo paties bei kolegų atliktus armavimo sprendinius ir identifiko, kuris armavimo sprendinys yra tinkamiausias, atsižvelgiant į armatūros svorio, armavimo kompleksiskumo, lankstinių formos ir kiekio kriterijus (žr. 3.37 pav.). Galiausiai nustatytas dažniausiai įmonėje taikomas inžinierių armavimo sprendinys, tačiau toks universaliausio armavimo sprendinio vertinimas nėra paremtas skaičiavimais, t. y. pasirinktas vadovaujantis tik subjektyvia inžinierių nuomone. Taigi kitame skyriuje siekiama išsiaiškinti, ar dirbtinio intelekto sistemos taikymas gali būti naudingas ieškant universaliausio armavimo sprendinio. Tikėtina, kad kompiuterių mokymo algoritmų sugeneruotų prognozių rezultatai galėtų tapti *papildoma prototipo parinktimi*, kurios naudojimas leistų inžinieriams suvienodinti elementų armavimo rezultatus toje pačioje įmonėje.

Programinio prototipo rezultatų vertinimas																		
Vertė	Kokybės kriterijai																	
MIN	Pagal armatūros svorį, kg	1093				Var. Nr. 15												
MIN	Pagal sprendinio kompleksiškumą inžinierių nuomone mažiausiai sudėtingas variantas:	<table><tr><td> Papildoma skersinė armatūra</td><td> Papildoma skersinė armatūra</td><td> Ilgiaji armatūra</td><td> Skersiniai armatūra</td><td> Armatūros būklės viršuje</td><td> Armatūros būklės apačioje</td></tr><tr><td>47x6010 (50)</td><td>47x6010 (50)</td><td>77x6012 kampiniai, 77x6012 (4) vidiniai, 77x6012 (3) vidiniai</td><td>24x6010 (10), 24x100x6010 (24x6010) 30x6010 (30x6010) 100x6010 (24x6010) 100x6010 (100x6010)</td><td>44x612 (4), 44x612 (8)</td><td>44x612 (4), 44x612 (8)</td></tr></table>				 Papildoma skersinė armatūra	 Papildoma skersinė armatūra	 Ilgiaji armatūra	 Skersiniai armatūra	 Armatūros būklės viršuje	 Armatūros būklės apačioje	47x6010 (50)	47x6010 (50)	77x6012 kampiniai, 77x6012 (4) vidiniai, 77x6012 (3) vidiniai	24x6010 (10), 24x100x6010 (24x6010) 30x6010 (30x6010) 100x6010 (24x6010) 100x6010 (100x6010)	44x612 (4), 44x612 (8)	44x612 (4), 44x612 (8)	Var. Nr. 1
 Papildoma skersinė armatūra	 Papildoma skersinė armatūra	 Ilgiaji armatūra	 Skersiniai armatūra	 Armatūros būklės viršuje	 Armatūros būklės apačioje													
47x6010 (50)	47x6010 (50)	77x6012 kampiniai, 77x6012 (4) vidiniai, 77x6012 (3) vidiniai	24x6010 (10), 24x100x6010 (24x6010) 30x6010 (30x6010) 100x6010 (24x6010) 100x6010 (100x6010)	44x612 (4), 44x612 (8)	44x612 (4), 44x612 (8)													
	Pagal skersinės armatūros lankstinių formą: inžinierių nuomone universaliausias variantas:					Var. Nr. 1												
MIN	Pagal skersinės armatūros lankstinių kiekį	72				Var. Nr. 1												
MIN	Pagal papildomos gulsčiosios skersinės armatūros lankstinių kompleksiškumą ir kiekį kraštinėje „a“	47				Var. Nr. 1												
MIN	Pagal papildomos gulsčiosios skersinės armatūros lankstinių kompleksiškumą ir kiekį kraštinėje „b“	47				Var. Nr. 1												

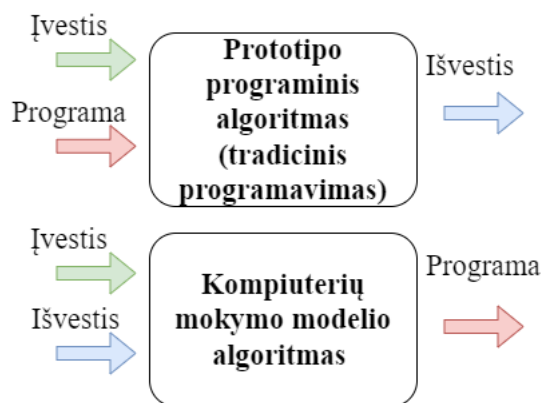
3.37 pav. Statistinio tyrimo rezultatų vertinimas

3.5. Alternatyvus armavimo sprendinys, taikant kompiuterių mokymo modelį

Šiame skyriuje siekiama patvirtinti prielaidą, ar galima nustatyti universaliausią armavimo sprendinį remiantis kompiuterių mokymo modelio algoritmo teikiamomis prognozėmis. Visų pirma, svarbu prisiminti, kad sukurto programinio prototipo veikimas paremtas klasikinio programinio algoritmo veikimu (žr. 3.38 pav.; 3.39 pav.). Pavyzdžiui, klasikinio programavimo atveju kaip įvesties duomenis algoritmui pateikiame armavimo taisykles (LST EN 1992-1-1:2005 standartas) bei geometrinius elemento parametrus ir kaip duomenų išvestį gauname visiškai suarmuotą LOD 400 grafinio išsivystymo lygio elementą. Kompiuterių mokymo modelio algoritmas veikia kitaip. Iš pradžių turi būti atliekamas elemento armavimo ir geometrijos parametrų įvesties ir išvesties duomenų rinkinio paruošimas ir kaip galutinį rezultatą algoritmas pateikia ne LOD 400 grafinio elemento rezultatus, bet prognozes (pasiūlymus), nurodančias kaip pagal pradinių duomenų rinkinį elementas gali būti suarmuotas. Toliau pateikiamas tyrimo metu atliekamas testas su skirtingais kompiuterių mokymo modelio algoritmais ir palyginamas sugeneruotų spėjimų (prognozių) tikslumas.



3.38 pav. Klasikinio taikomosios programos prototipo ir kompiuterių mokymo modelio susiejimas



3.39 pav. Prototipo veikimo schema, parodanti klasikinio programavimo ir kompiuterių mokymo esminius skirtumus (Geisslinger, 2019)

3.5.1. Duomenų rinkimas ir paruošimas

Universalaus sprendinio paieškos problemai spręsti, taikant kompiuterių mokymą, reikalingas teisingai apdorotų elemento geometrinius ir armavimo parametrus nusakančių įvesties ir išvesties duomenų rinkinys. Pradinių duomenų rinkinys algoritmui mokyti sudaromas iš jau atlikto ir 3.4 skyriuje aprašyto inžinierių eksperimento rezultatų. Visi kolonos armavimo ir geometriniai parametrai susisteminti *Microsoft Excel* programoje ir iš šios informacijos paruošiamas duomenų rinkinys modelio treniravimui ir testavimui. Taip pat svarbu paminėti, kad duomenų rinkinio apimtis priklauso nuo kompiuterių mokymo modelio funkcijų ir stebėjimų skaičiaus. Kitaip tariant, jei norime, kad kompiuterių mokymo modelis prognozuotų ir pateiktų 20 išvesties spėjimų reikšmių, tai reikia turėti bent 20 stebėjimų reikšmių (angl. *Observations*). Kadangi pagal numatytą kompiuterių mokymo modelio architektūrą duomenų išvestį sudaro daugiau kaip 20 spėjimų reikšmių, tai iš to sprendžiamo, kad mums *nepakanka tik dvidešimties inžinierių armavimo rezultatų* ir duomenų apimtį turime išplėsti (angl. *Scale*), tad kiekvieno rezultato eilučių skaičių padidiname. Tokiu atveju, kompiuterių mokymo modelio algoritmas turi pakankamai duomenų atlikti testą ir pateikti armavimo išvesties prognozes.

Duomenų rinkinį atsitiktine imtimi išplėčiame iki 85 pakartotinių eilučių: inž. Nr. 1 sprendinys – 32 eil.; inž. Nr. 2 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 3 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 4 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 5 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 6 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 7 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 8 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 9 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 10 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 11 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 12 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 13 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 14 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 15 sprendinys – 1 eil.; inž. Nr. 16 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 17 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 18 sprendinys – 4 eil.; inž. Nr. 19 sprendinys – 12 eil.; inž. Nr. 20 sprendinys – 6 eil. (žr. 3.40 pav.).

3.5.2. Metodo ir algoritmo parinkimas

Kompiuterių mokymo taikymo tyrimas atliekamas naudojant prižiūrimąjį mokymą. Šis metodas taikomas dėl tokių priežasčių:

- 1) algoritmui pateikiamos aiškiai apibrėžtos, struktūrizuotos elemento geometrinių ir armavimo parametrų vertės;
- 2) nustatyta kolonos elemento geometrinių bei atskirų armatūros grupių parametrų hierarchija ir tarpusavio priklausomybė, pavyzdžiui: išilginės armatūros strypų vieta grafiniame elemente priklauso nuo skersinės gulsčiosios armatūros pozicijos ir diametro bei armatūros apsauginio sluoksnio vertės. Tai padeda algoritmui eliminuoti nežinomus kintamuosius.

Tyrimas atliekamas taikant linijinę regresiją, nes analizė atliekama su kiekybiškai išreikštais skaitiniais duomenimis ir kompiuterių mokymo modeliui panaudoti tokie algoritmai:

- 1) sprendimų medžio;
- 2) sprendimų medžio, taikant regresiją;
- 3) neuroninių tinklų;
- 4) K – artimiausio kaimyno paieškos algoritmas.

3.5.3. Parametrų nustatymas ir modelio architektūros kūrimas

Kompiuterių mokymo algoritmui būtina pradinių duomenų intervencija į modelį pirminių armavimo prognozių pateikimui. Pagal atliekamą tyrimą nustatytos modelio įvesties ir išvesties parametrų vertės yra kolonos geometriniai ir skaičiuojamosios analizės ataskaitoje pateikiami armavimo duomenys, pagal kuriuos sukuriamas kompiuterių mokymo modelio architektūra. Detalus įvesties ir išvesties parametrų sąrašas pateikiamas **A.9 priede**.

Toliau pagal aprašytus parametrus sukuriami 3 skirtingi modelio architektūros variantai, kurių sudėtis pateikiama **A.7 priede**. Iš pateiktų paveikslų matoma, kokie parametrai priskiriami kiekvienos architektūros įvesties bei išvesties duomenims:

- 1) modelio architektūra Nr. 1 (žr. 3.41 pav.; 3.42 pav.);
- 2) modelio architektūra Nr. 2 (žr. 3.43 pav.; 3.44 pav.);
- 3) modelio architektūra Nr. 3 (žr. 3.45 pav.; 3.46 pav.).

Įvestis (angl. <i>Input</i>)					
Betono klasė (angl. <i>Concrete class</i>)	Kraštinės „a“ ilgis, mm	Kraštinės „b“ ilgis, mm	Kolonos aukštis - h, mm	Apsauginis sluoksnis (angl. <i>Cover layer</i>)	Išilginės armatūros poreikis - As, cm2
C50/60	500	600	14000	35	58,9

3.41 pav. Pirmoji modelio architektūra, įvesties duomenys

Išvestis (angl. <i>Output</i>)																																	
Kamp. išilginių strypų diam. (Ø)	Vid. strypų diametro s kraštinėje „a“	Vid. strypų kiekis kraštinėje „a“	Vid.strypų diametro kraštinėje „b“	Vid.strypų kiekis kraštinėje „b“	Ø - skersinis arm. strypo diametras	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos viršuje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm. strypų išdėstymas - <i>Spacing</i>	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos viduryje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm. strypų išdėstymas - <i>Spacing</i>	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos apačioje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm.s strypų išdėstymas - <i>Spacing</i>	Papild. skers. armatūros strypo diametro kraštinėje „a“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „a“ - <i>Spacing</i>	a						Papild. skers. armatūros s strypo diametro kraštinėje „b“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „b“ - <i>Spacing</i>	b						Strypo diametro s kraštinėje „a“	Lankstinių kiekis kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „a“ - Qty (a) bott	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „a“ užlaidos ilgis - LL (a) bott	Strypo diametro kraštinėje „b“	Lankstinių kiekis kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „b“ - Qty (b) bott	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „b“ užlaidos ilgis - LL (b) bott
25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440

3.42 pav. Pirmoji modelio architektūra, išvesties prognozės

Įvestis (angl. <i>Input</i>)						
Betono klasė (angl. <i>Concrete class</i>)	Kraštinės „a“ ilgis, mm	Kraštinės „b“ ilgis, mm	Kolonos aukštis - h, mm	Apsauginis sluoksnis (angl. <i>Cover layer</i>)	Išilginės armatūros poreikis - As, cm2	Kamp. išilginių strypų diam. (Ø)
C50/60	500	600	14000	35	58,9	25

3.43 pav. Antroji modelio architektūra, įvesties duomenys

Išvestis (angl. Output)																																
Vid. strypų diametro s kraštinėje „a“	Vid. strypų kiekis kraštinėje „a“	Vid.strypų diametras kraštinėje „b“	Vid.strypų kiekis kraštinėje „b“	Ø - skersinis arm. strypo diameteras	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos viršuje - Htop	Skersinė s arm. strypų išdėstymas - Spacing	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos viduryje - Htop	Skersinė s arm. strypų išdėstymas - Spacing	Skersinė s arm. armavimo zona kolonos apačioje - Htop	Skersinė s arm. strypų išdėstymas - Spacing	Papild. skers. armatūros strypo diametras kraštinėje „a“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „a“ - Spacing	a						Papild. skers. armatūros strypo diametras kraštinėje „b“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „b“ - Spacing	b						Strypo diametro s kraštinėje „a“	Lankstinių kolonos viršuje/apacioje kraštinėje „a“ - Qty (a) bott	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „a“ užlaidos ilgis - LL (a) bott	Strypo diametras kraštinėje „b“	Lankstinių kolonos viršuje/apacioje kraštinėje „b“ - Qty (b) bott	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „b“ užlaidos ilgis - LL (b) bott
25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440

3.44 pav. Antroji modelio architektūra, išvesties prognozės

Įvestis (angl. Input)										
Betono klasė (angl. Concrete class)	Kraštinės „a“ ilgis, mm	Kraštinės „b“ ilgis, mm	Kolonos aukštis - h, mm	Apsauginis sluoksnis (angl. Cover layer)	Išilginės armatūros poreikis - As, cm2	Kamp. išilginių strypų diam. (Ø)	Vid. strypų diametro s kraštinėje „a“	Vid. strypų kiekis kraštinėje „a“	Vid. strypų diametras kraštinėje „b“	Vid. strypų kiekis kraštinėje „b“
C50/60	500	600	14000	35	58,9	25	25	2	25	2

3.45 pav. Trečioji modelio architektūra, įvesties duomenys

Išvestis (angl. Output)																												
Ø - skersin ės arm. strypo diameter	Skersinė s arm. armavim o zona kolonos viršuje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm. strypų išdėstym as - <i>Spacing</i>	Skersinė s arm. armavi mo zona kolonos viduryje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm. strypų išdėstym as - <i>Spacing</i>	Skersinė s arm. armavi mo zona kolonos apačioje - <i>Htop</i>	Skersinė s arm.s strypų išdėstym as - <i>Spacing</i>	Papild. skers. armatūros strypo diametras kraštinėje „a“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „a“ - <i>Spacing</i>	a						Papild. skers. armatūros s strypo diametras kraštinėje „b“	Papild. skersinė armatūra, tarpai tarp strypų kraštinėje „a“ - <i>Spacing</i>	b						Strypo diametra s kraštinėj e „a“	Lankstinių kiekis kolonos viršuje/ap ačioje kraštinėje „a“ - Qty (a) bott	Lankstinio kolonos apačioje/virš uje kraštinėje „a“ užlaidos ilgis - LL (a) bott	Strypo diametras kraštinėje „b“	Lankstini ų kiekis kolonos viršuje/ap ačioje kraštinėje „b“ - Qty (b) bott	Lankstinio kolonos apačioje/virš uje kraštinėje „b“ užlaidos ilgis - LL (b) bott
10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440

3.46 pav. Trečioji modelio architektūra, išvesties prognozės

3.5.4. Modelio testavimas ir treniravimas

Pasirinkus algoritmą, parametrų reikšmės ir sudarius kompiuterių mokymo modelio architektūrą, toliau įgyvendinamas modelio testavimas. Kompiuterių mokymo modelio sugeneruotas prognozes siekiama panaudoti kuriant naują prototipo parinktį, leidžiančią suarmuoti elementą pagal algoritmo pasiūlytas universaliausio (unifikuoto) sprendinio prognozes. Tad pirmiausia atliekame testą ir įvertiname kokias taisykles ir spėjimus modelis apskritai gali pateikti bei identifikuojame, kurie algoritmai teikia artimiausias teisingam rezultatui prognozes.

Modelio treniravimui pateikiame naujus, „neatpažintus“ įvesties bei išvesties duomenis ir tokiu būdu siekiame įvertinti modelio tikslumą (angl. *Accuracy*), t. y. kiek daug ir kaip tiksliai modelis išmoko pagal įvestus parametrus bei numatytą architektūrą. Gavus atlikto testo rezultatus, toliau analizuojame pateikiamus spėjimus, t. y. kokius algoritmo parametrus būtina ar nebūtina keisti, kad prognozės būtų dar tikslesnės.

3.5.5. Algoritmų generuojami spėjimai

Sprendimų medis

Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas taikant sprendimų medžio metodą pagal modelio architektūrą Nr. 1: sprendimų medis *negeneruoja atšakų*, nes visos įvesties reikšmės buvo vienodos (žr. 3.47 pav.; 3.54 pav.).

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program.algoritmas
ML architektūra nr. 1	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	
ML architektūra nr. 2	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440		
ML architektūra nr. 3						10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440		

3.47 pav. Kompiuterių mokymo modelio rezultatų vertinimas, taikant sprendimų medžio metodą, pagal modelio architektūrą Nr. 1

Esant modelio architektūrai Nr. 2 ir Nr. 3 (žr. 3.48 pav.; 3.54 pav.), kai įvesties skiltyje vietoje armatūros poreikio įvedame išilginių strypų diametrą, gaunami rezultatai: sprendimų medis *pradeda kurti atšakų struktūrą*, pagrįstą parametrais, kurie modelio mokymo fazėje atrodė kintantys (pavyzdžiui.: armatūros poreikis A_s ir kampinės išilginės armatūros diametras).

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program.algoritmas
ML architektūra nr. 1	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	DT (non regressive)
ML architektūra nr. 2	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	DT (non regressive)	
ML architektūra nr. 3						10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	DT (non regressive)	

3.48 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, taikant sprendimų medžio metodą, pagal modelio architektūrą Nr. 2 ir Nr. 3

Tyrimo rezultatai leidžia teigti, kad taikant šį metodą galutinės prognozių reikšmės yra dažniausiai algoritmo kartojami armavimo parametrai. Šis algoritmas teorine prasme yra teisingas,

nes prognozių vertės yra diskrečios, t. y. pateikiamos sveikosiomis kiekybinėmis skaitinėmis vertėmis, atitinkančiomis norimus gauti armavimo rezultatus, tačiau akivaizdu, kad treniravimo metu nevykdoma duomenų interpoliacija. Pastebėta, kad pabaigus testą, rezultatais tampa tiesiog dažniausiai pakartoti armavimo parametrai.

Sprendimų medžio algoritmo pateikiami kolonos armavimo rezultatai palyginami su kitų algoritmų pateiktais spėjimais, esant skirtingai trijų tipų kompiuterių mokymo modelio architektūrai: Nr.1; Nr. 2 bei Nr. 3. Algoritmų sugeneruotų rezultatų palyginimas pateiktas **A.4, A.5, A.6 prieduose.**

Sprendimų medis (taikant regresiją)

Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 1 (žr. 3.49 pav.; 3.54 pav.): modelis prognozuoja panašius rezultatus pagal turimą duomenų rinkinį ir nurodo *optimalesnius parametrus lyginant su įprastu sprendimo medžio algoritmu*, bet to, akivaizdu, kad algoritmas vykdo *duomenų interpoliavimą* (formuojasi atšakos). Tačiau tam tikrų modelio prognozuotų parametrų realybėje nebūtų įmanoma gauti. Pavyzdžiui, nerealu gauti 26,643 diametro armatūros strypo vertę. Tuo remiantis galime daryti išvadą, kad didesniai šio modelio tikslumui pasiekti galimai reikalingas didesnis duomenų rinkinys modelio mokymui arba papildoma armatūros strypų sortimentą apibrėžianti sąlyga.

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program.algoritmas
ML architektūra nr. 1	26,643	22,143	2,446	23,214	2,411	10	3500	146,429	7000	298,21	3500	146,429	10	300	0,964	0	0,464	0,018	0,018	0	0	10	300	1	0,214	0,018	0,054	0	0,071	12	4,482	440	12	5,071	440	DT-R (regressive)		
ML architektūra nr. 2	23,718	2,256	24,872	2,103	10	3500	147,436	7000	300	3500	147,436	10	300	1	0	0,256	0	0	0	0	10	300	1	0,051	0	0,077	0	0,026	12	4,154	440	12	4,564	440	DT-R (regressive)			
ML architektūra nr. 3	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	0,833	0	0,167	0	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4,000	440	DT-R (regressive)			

3.49 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metoda (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 1

Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, kai taikomas sprendimų medžio metodas (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 2 (žr. 3.50 pav.; 3.54 pav.): kadangi šio tipo architektūroje modelio įvestyje naudojamas ne armatūros poreikio parametras, o išilginės armatūros strypo diametras, tai abu sprendimų medžio modeliai numato kelis sprendinius, priklausomai nuo kampinio išilginės armatūros strypo skersmens. Toliau pastebime, kad tam tikri dviejų modelių *parametrai pradeda skirtis ir tokiu atveju susiduriame su problema, kaip interpretuoti ir apdoroti nesuapvalintus algoritmo prognozių rezultatus.*

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program.algoritmas	
ML architektūra nr. 1	26,643	22,143	2,446	23,214	2,411	10	3500	146,429	7000	298,21	3500	146,429	10	300	0,964	0	0,464	0,018	0,018	0	0	10	300	1	0,214	0,018	0,054	0	0,071	12	4,482	440	12	5,071	440	DT-R (regressive)	
ML architektūra nr. 2		23,718	2,256	24,872	2,103	10	3500	147,436	7000	300	3500	147,436	10	300	1	0	0,256	0	0	0	0	10	300	1	0,051	0	0,077	0	0,026	12	4,154	440	12	4,564	440	DT-R (regressive)	
ML architektūra nr. 3						10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	0,833	0	0,167	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4,000	440	DT-R (regressive)

3.50 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 2

Kompiuterių mokymo modelio rezultatų vertinimas, taikant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 3: rezultatai parodo, kad atlikus modelio mokymą ir testavimą, gautosios rezultatų reikšmės *turi būti tikslinamos apvalinant iki sveikųjų verčių*, t. y. paverčiami diskrečiais skaičiais (žr. 3.51 pav.; 3.54 pav.).

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program.algoritmas
ML architektūra nr. 1	26,643	22,143	2,446	23,214	2,411	10	3500	146,429	7000	298,21	3500	146,429	10	300	0,964	0	0,464	0,018	0,018	0	0	10	300	1	0,214	0,018	0,054	0	0,071	12	4,482	440	12	5,071	440	DT-R (regressive)
ML architektūra nr. 2		23,718	2,256	24,872	2,103	10	3500	147,436	7000	300	3500	147,436	10	300	1	0	0,256	0	0	0	0	10	300	1	0,051	0	0,077	0	0,026	12	4,154	440	12	4,564	440	DT-R (regressive)
ML architektūra nr. 3						10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	0,833	0	0,167	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4,000	440	DT-R (regressive)

3.51 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, naudojant sprendimų medžio metodą (taikant regresiją), pagal modelio architektūrą Nr. 3

Sprendimų medžio (taikant regresiją) sugeneruotų prognozių atšakų struktūrą pagal modelio architektūrą Nr. 2 galima pamatyti **A.2 priede**. Pagal modelio architektūrą Nr. 3 galima pamatyti **A.3 priede**. Sprendimų medžio (taikant regresiją) algoritmo pateikiami kolonos armavimo rezultatai palyginami su kitų algoritmų pateikiamomis prognozėmis, esant skirtingai kompiuterių mokymo modelio architektūrai: Nr. 1; Nr. 2 bei Nr. 3. Algoritmų sugeneruotų rezultatų palyginimas pateiktas **A.4, A.5, A.6 prieduose**.

Neuroniniai tinklai

Kompiuterių mokymo modelio rezultatų vertinimas, taikant neuroninių tinklų metodą, pagal modelio architektūrą Nr. 1, Nr. 2; Nr. 3: pateikiamos modelio sugeneruotos *spėjimų reikšmės yra netikslios ir nediskrečios*. Tikėtina, kad šio modelio algoritmo pateikiamų spėjimų tikslumą galėtų pagerinti į modelį įvesta papildoma sąlyga, apibrėžianti galimą armatūros strypų sortimentą. Pastebima, kad negali būti panaudojamas Ø21,985 armatūros strypas ar gulsčiosios skersinės armatūros išdėstymas būti 144,85 mm žingsniu. Daroma dar viena prielaida, kad tikslesni modelio spėjimai galėtų būti ir padidinus modelio treniravimui skirtą duomenų rinkinį (žr. 3.52 pav.; 3.54 pav.).

Klasikinio programavimo algoritmo rezultata (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinio program.algoritmas
ML architektūra nr. 1	26,693	21,985	2,500	22,877	2,589	10,000	3500,000	144,646	7000,000	297,326	3500,000	144,635	10,000	300,000	0,964	0,018	0,429	0,018	0,018	0,018	10,000	299,999	1,000	0,286	0,018	0,036	0,000	0,089	12,000	4,607	439,999	12	5,089	440,000	NN (500e)	
ML architektūra nr. 2		23,540	2,328	24,751	2,194	10,002	3500,002	144,496	6999,997	298,649	3499,998	144,609	10,001	299,999	1,000	0,000	0,271	0,000	0,000	0,000	10,002	299,999	1,002	0,084	-0,003	0,108	-0,001	0,026	12,000	4,191	440,000	11,999	4,705	440,002	NN (500e)	
ML architektūra nr. 3						9,990	3499,988	150,188	7000,003	300,171	3500,004	150,059	10,000	299,994	0,998	0,004	1,008	-0,005	0,012	-0,005	10,019	299,996	1,008	0,021	-0,004	0,002	-0,007	-0,003	11,989	4,067	439,990	12,010	5,959	439,987	NN (500e)	

3.52 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, pagal architektūrą Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3: neuroninių tinklų algoritmo pateikiami rezultatai

Neuroninių tinklų algoritmo pateikiami kolonos armavimo rezultatai palyginami su kitų algoritmų pateikiamomis prognozėmis, esant skirtingai trijų tipų kompiuterių mokymo modelio architektūrai: Nr. 1; Nr. 2 bei Nr. 3. Algoritmų sugeneruotų rezultatų palyginimas pateiktas **A.4, A.5, A.6 prieduose**.

K – artimiausio kaimyno paieškos metodas

Kompiuterių mokymo modelio rezultatų vertinimas taikant K – artimiausio kaimyno metodą pagal modelio architektūrą Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3: visi metodai numato panašius prognozių rezultatus. Įdomu tai, kad šis modelis turi ribotą galimybę prognozuoti tam tikrus lankstinius kraštinėje „a“. Pavyzdžiui, trečiajai lankstinio formai algoritmas sugeneruoja reikšmę, lygią 0,4, t. y. nei 1 nei 0, todėl akivaizdu, kad turime koreguoti algoritmą ar didinti duomenų rinkinį. K – artimiausio kaimyno paieškos metodas taip pat, kaip ir neuroninių tinklų algoritmas, pateikia *ekstrapoliuotas prognozių reikšmes, kurios negali būti tiesiogiai konvertuojamos į realias programai tinkamas įvesties į programą reikšmes*: pavyzdžiui, negalime turėti armatūros lankstinio vertės Ø23. Be to, atlikus modelio mokymą, matome, kad gautąsias spėjimų reikšmes reikėtų apvalinti iki sveikųjų skaičių (žr. 3.53 pav.; 3.54 pav.).

Klasikinio programavimo algoritmo rezultatas (INŽ. NR. 1)	25	25	2	25	2	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	Klasikinis program. algoritmas
ML architektūra nr. 1	26,2	23	2,4	24	2,4	10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0,4	0	0	0	0	10	300	1	0,4	0	0	0	0	12	4,6	440	12	4,8	440	K Nearest
ML architektūra nr. 2		23	2,4	24	2,4	10	3500	140	7000	300	3500	140	10	300	1	0	0,4	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0,2	0	0,2	12	4,4	440	12	5,2	440	K Nearest
ML architektūra nr. 3						10	3500	150	7000	300	3500	150	10	300	1	0	0	0	0	0	0	10	300	1	0	0	0	0	0	12	4	440	12	4	440	K Nearest

3.53 pav. Kompiuterių mokymo modelio algoritmo pateikiamų prognozių vertinimas, pagal modelio architektūrą Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3: K – artimiausio kaimyno paieškos algoritmo veikimu paremto modelio sugeneruotos prognozės

K – artimiausio kaimyno paieškos algoritmo pateikiami kolonos armavimo rezultatai palyginami su kitų algoritmų pateikiamomis prognozėmis, esant skirtingai 3 tipų kompiuterių mokymo modelio architektūrai: Nr. 1; Nr. 2 bei Nr. 3. Algoritmų sugeneruotų rezultatų palyginimas pateiktas **A.4, A.5, A.6 prieduose**.

3.5.6. Algoritmų prognozių rezultatų vertinimas

Iš kompiuterių mokymo modelių algoritmų sugeneruotų prognozių rezultatų matome, kad tinkamiausias algoritmas yra *sprendimų medis*, nes rezultatai yra tikslūs bei diskretūs, t. y. pateikiami sveikaisiais skaičiais. Be to, šio algoritmo pateikiamos prognozės yra artimiausios inžinierių pateiktos ekspertinės nuomonės pasirinkimui, t. y. atitinka inžinieriaus Nr.1 sugeneruotą kolonos armavimo sprendinį. Tačiau taip pat pastebėta, kad šis algoritmas, pateikdamas galutinį spėjimą, *neatlieka interpoliavimo tarp įvesties duomenų, t. y. pastebima, kad sprendimų medis neformuoja jam būdingų atšakų*. Todėl manoma, kad šis algoritmas kaip spėjimo reikšmę pateikia dažniausiai algoritmo pakartotą eilutę (kadangi inžinieriaus Nr. 1 darbo rezultatas išplėstiniame duomenų rinkinyje sudaro didžiausią kiekį eilučių). Ateityje vertėtų bandyti tobulinti kitus algoritmus, kurie geba vykdyti duomenų interpoliavimą. Tai reiškia, kad *patobulinti kiti algoritmai galėtų sugeneruoti sudetingesnės formos armatūros lankstinių, skirtingo diametro pasirinkimą ir kt. įvairesnius prognozių rezultatus bei padėti modeliuoti skirtingas armavimo situacijas*.

Analizuojant kitų algoritmų rezultatus, nustatyta, kad sugeneruotos prognozių reikšmės yra nediskrečios, t. y. reikalauja papildomo apvalinimo į sveikąsias skaitines vertes. Dėl šios priežasties prognozuojamos reikšmės kol kas nėra tinkamos naudoti prototipe, prognozuojant unifikuotus armavimo sprendinius. Tikėtina, kad ši problema gali būti išspręsta:

- 1) atliekant modelio treniravimą su didesniu duomenų rinkiniu;
- 2) sukuriant atskirą modelį kiekvienam modelio architektūroje apibrėžtam armavimo ar geometriniam parametrui.

Manoma, kad galimai nesuapvalintų skaitinių reikšmių prognozių problema būtų išsprendžiama įvedus *papildomą sąlygą kompiuterių mokymo modelio algoritmams*, apibrėžiančią armatūros strypų diametro sortimento ribas, t. y. mes negalime gauti prognozės, kuri neatitinka armatūros strypų diametro realios vertės, kuri gali būti lygi: Ø6, Ø8, Ø10, Ø12, Ø14, Ø16, Ø20, Ø25, Ø28, Ø32. Todėl galima drąsiai teigti, kad tobulindami modelį turėtume iš anksto apibrėžti, kokie rezultatai gali būti teisingi, t. y. realiai įgyvendinami.

Atlikus rezultatų vertinimą, daroma išvada, kad tinkamai apibrėžtos algoritmo sąlygos galėtų generuoti tik teisingos vertės prognozes ir tokiu būdu visuomet gautume teisingai realizuotus armavimo sprendinius.

3.6. Darbo efektyvumo nustatymas

Viena esminių baigiamajame darbe analizuojamų gelžbetoninių surenkamųjų konstrukcijų projektavimo problemų yra nepakankamas projektuotojų darbo efektyvumas. Projektavimo proceso metu inžinieriai turi atlikti fragmenitškus ir rankiniu būdu atliekamus modeliavimo veiksmus. Ši problema gali būti sprendžiama taikant ankstesniuose skyriuose apibrėžtą automatizuoto armavimo

prototipą. Šio prototipo naudojimas kompiuterinio projektavimo sistemose leidžia paspartinti projektuotojų atliekamas armavimo procedūras ir tokiu būdu gali būti mažinama darbų atlikimo trukmė. Darbo efektyvumas nustatomas pagal dvidešimties inžinierių atliekamo darbo rezultatus (žr. 3.5 lentelė.). Inžinieriai kolonos elementą armuoja 2 skirtingais būdais: rankiniu ir automatizuotu (naudojant prototipą). Toliau nustatomas laiko trukmės skirtumas, įvertinama kiek automatizuoto armavimo prototipas gali paspartinti elemento armatūros detalizavimo trukmę.

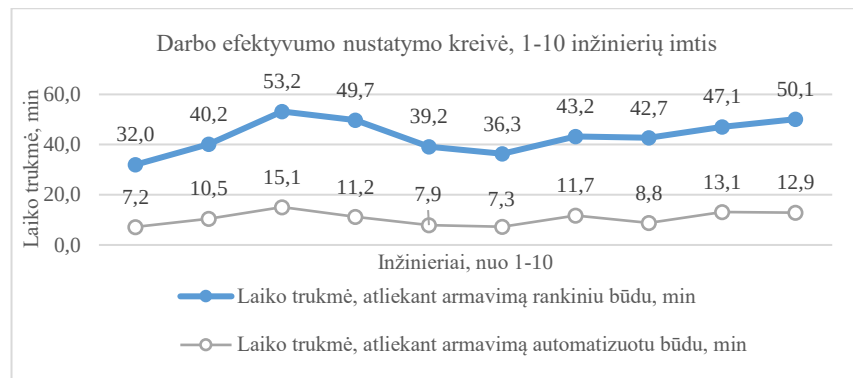
Kiekvieno inžinieriaus atliekami kolonos armavimo rezultatai ir laiko trukmės skaičiavimas fiksuojami armavimo proceso metu. Surinkus dvidešimties inžinierių atlikto darbo rezultatus, palyginama laiko trukmė atliekant tą patį armavimo darbą rankiniu ir automatizuotu būdu. Vertinama kiekvieno inžinieriaus armatūros modeliavimo darbo trukmė ir palyginami tokie kriterijai:

- 1) laiko trukmė atliekant rankinį ir automatizuotą armavimą (su papildoma armavimo patikra, tikrinant pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus), minutėmis (žr. 3.55 pav.; 3.56 pav.);
- 2) laiko skirtumas, minutėmis ir procentine išraiška (žr. 3.57 pav.; 3.58 pav.).

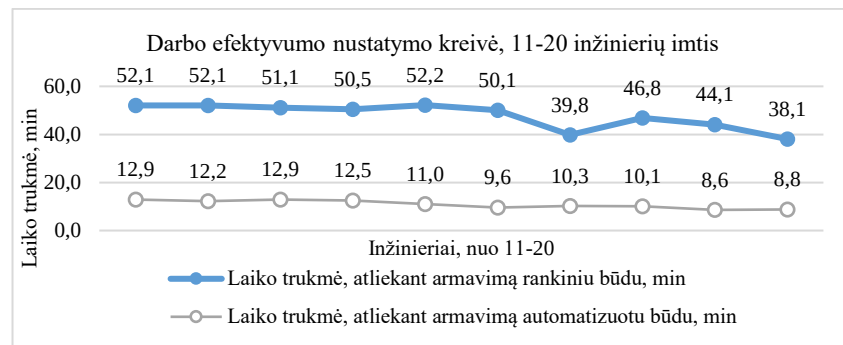
3.5 lentelė. Laiko trukmės rezultatai, palyginama trukmė modeliavimo rankiniu ir automatizuotu būdu

Inž. Nr.	Laiko trukmė atliekant armatūros modeliavimą rankiniu būdu, min	Laiko trukmė atliekant automatizuotą armavimą (+patikra), min	Laiko skirtumas, min	Laiko skirtumas, %
1.	32,00	7,50	24,50	76,56
2.	40,20	10,10	30,10	74,88
3.	53,20	15,10	38,10	71,62
4.	49,50	11,20	38,30	77,37
5.	39,20	9,00	30,20	77,04
6.	36,30	7,30	29,00	79,89
7.	43,20	11,20	32,00	74,07
8.	42,30	9,20	33,10	78,25
9.	47,10	13,10	34,00	72,19
10.	50,10	14,00	36,10	72,06
11.	52,50	13,10	39,40	75,05
12.	52,10	13,00	39,10	75,05
13.	51,10	14,10	37,00	72,41
14.	50,50	12,50	38,00	75,25
15.	52,10	11,00	41,20	78,79
16.	50,10	11,10	39,00	77,84
17.	39,50	10,30	29,20	73,92
18.	46,50	10,10	36,40	78,28
19.	44,10	9,10	33,00	79,37
20.	38,10	8,10	30,00	78,74

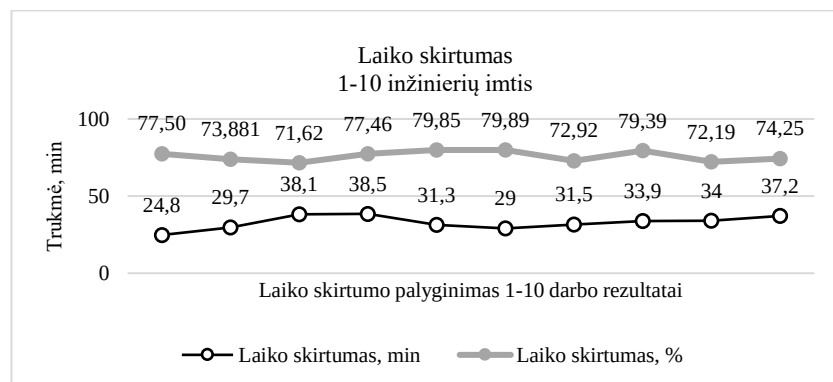
Toliau pateikiamas laiko trukmės palyginimas, atliekant armatūros modeliavimą tyrimo objektui rankiniu ir automatizuotu būdu, t. y. taikant prototipą.



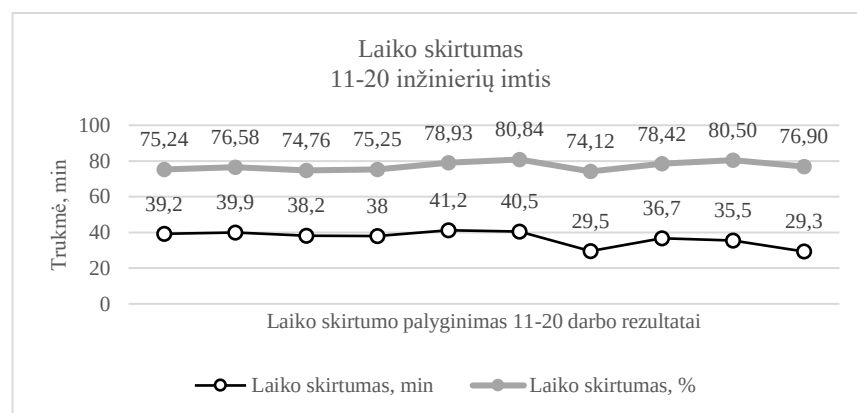
3.55 pav. Laiko trukmė atliekant rankinį ir automatizuotą armavimą: 1 – 10 inžinierių rezultatai



3.56 pav. Laiko trukmė atliekant rankinį ir automatizuotą armavimą: 11 – 20 inžinierių rezultatai



3.57 pav. Laiko skirtumas armuojant rankiniu ir automatizuotu būdu: 1 – 10 inžinierių rezultatai



3.58 pav. Laiko skirtumo armuojant rankiniu ir automatizuotu būdu: 11 – 20 inžinierių rezultatai

Darbo efektyvumas nustatomas išvedus dvidešimties inžinierių atlikto darbo laiko trukmės rezultatų vidurkį (žr. 3.6 lentelė.).

3.6 lentelė. Laiko trukmės rezultatų vidurkis

Laiko efektyvumo vertinimas			
Laiko trukmės vidurkis, atliekant rankinį armavimą, min	Laiko trukmės vidurkis, atliekant automatizuotą armavimą (+ patikra), min	Laiko skirtumo vidurkis, min	Laiko skirtumo vidurkis, %
45,47	11,01	34,47	75,93

Taigi, gauti rezultatai patvirtina teiginį, kad automatizuoto armavimo prototipas gali sumažinti inžinieriaus atliekamą surenkamosios kolonos elemento armavimo darbą iki 70 % arba 3 kartais, nei atliekant tą patį darbą rankiniu būdu.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

Eksperimentinėje darbo dalyje analizuojamas logistinės paskirties pastatas. Tyrimo pradžioje modeliuojami pastato architektūriniai bei konstrukciniai grafiniai elementai. Šiems elementams taip pat priskiriama atributinė informacija. Išgrynintas laikančiųjų konstrukcinių elementų (CAD) modelis kovertuojamas į skaičiuojamosios analizės (CAE) sistemą ir atliekamas pastato konstrukcijų analitinis tyrimas. Atlikus elgsenos simuliaciją, rezultatų ataskaitoje matome tikslius konstrukcinių elementų, tarp jų ir gelžbetoninių surenkamųjų objektų, parametrus bei reikalingą armatūros poreikį. Pradedama darbo projekto rengimo stadija ir pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus toliau kuriamas gamybinis modelis.

Remiantis LOD koncepcijos logika, pristatomos bendroji bei detalioji projekto vystymo schemos. Šios schemos apibrėžia pagrindinę mokslinio eksperimento idėją – eliminuoti projektuotojų rankinį armatūros modeliavimo darbą, t. y. pabaigus LOD 300 elementų vystymo fazę panaudoti papildomą programinį įrankį (prototipą), kuris, pagal užkoduotas armavimo taisykles bei integruotus ekspertinius inžinierių sprendinius, galėtų automatizuotu būdu atlikti armatūros modeliavimo veiksmus.

Toliau aprašoma, kaip gali būti įgyvendinamas armavimo procesas automatizuotu būdu. Prototipo kūrimas įgyvendinamas pagal 4 esminius žingsnius:

- 1) nustatoma armavimo proceso nekintanti seka, t. y. sukuriamas bei atvaizduojamas armatūros grupių tarpusavio sąsają ir armavimo eiliškumą atspindintis žemėlapis;
- 2) identifikuojamos armavimo proceso užduotys, pagal armatūros pasikartojamumo, pagrindžiamumo armavimo taisyklėms bei galimybės unifikuoti sprendinius, kriterijus;
- 3) apibrėžiama, kokia informacija turi būti sutelkta, t. y. užkoduota prototipo algoritmuose, kad armatūra būtų sumodeliuota teisingai, pritaikant armavimo taisykles bei ekspertines žinias. Be to, įgyvendinant šį etapą, nustatyta, pagal kokius armavimo

parametrus turi būti suformuotas optimalus skaičius parinkčių prototipo programiniame lange.

- 4) Kadangi kuriamas įrankis kol kas yra konceptualus, t. y. negali užtikrinti 100 % teisingo armatūros modeliavimo tikslumo, tai programinio prototipo sugeneruojamas armavimo rezultatas turi atitikti inžinieriaus kokybės patikros kriterijus.

Poskyris užbaigiamas aprašymu, koku būdu kuriamas programinis įrankis susiejamas su *Tekla Structures* programos aplinka.

Kitame etape pateikiama grafinė vartotojo sąsaja, aprašytas prototipo veikimo principas, t. y. kaip grafiniai objektai atpažįstami *Tekla Structures* programos aplinkoje. Aprašomos pagrindinės prototipo parinktys, sudarytos pagal ankstesniame poskyryje identifikuotus armavimo parametrus. Į numatytas prototipo parinktis įvedus numatytus armavimo parametrus, gauname automatizuotu būdu suarmuotą gelžbetoninės surenkamosios kolonos elementą.

Prototipo, paremto klasikinio programavimo algoritmais, veikimas išbandomas 20-ies armavimo sprendinių imtyje. Šiuos sprendinius pateikia inžinieriai, kurie tą patį kolonos elementą suarmuoja automatizuotu būdu, t. y. naudojant prototipą. Atlikto statistinio tyrimo metu gauti armavimo duomenys surenkami bei toliau panaudojami kompiuterių mokymo modelio algoritmų treniravimui bei testavimui, o statistinio tyrimo metu identifikuotas universaliausias sprendinys panaudotas vertinant kompiuterių mokymo algoritmų prognozių tikslumą.

Pagal inžinierių statistinio tyrimo duomenis, formuojamas armavimo rezultatų įvesties/išvesties į kompiuterių mokymo modelį duomenų rinkinys, panaudojamas algoritmų mokymui bei armavimo prognozių generavimui. Eksperimento metu nustatomos kompiuterių mokymo modelio algoritmų (sprendimų medžio, sprendimų medžio taikant regresiją, neuroninių tinklų bei K – artimiausio kaimyno paieškos metodai), pagal skirtingą modelio architektūrą, prognozių vertės ir atliekamas jų vertinimas palyginus su klasikinio programinio algoritmo pateiktais teisingais armavimo rezultatais.

Mokslinio tyrimo pabaigoje pateikiama kompiuterių mokymo modelio algoritmų sugeneruotų prognozių vertinimo analizė. Atlikus prognozių vertinimo etapą, galima daryti išvadą, kad sukurti dirbtinio intelekto pagrindu veikiantys algoritmai, gali būti panaudojami įgyvendinant automatizuoto armavimo procesą ir nuspėti unifikuoto armavimo sprendinio kolonos elementui rezultatą. Atlikus tyrimą nustatome, kad kompiuterių mokymo modelis taikant sprendimų medį, generuoja prognozę, kuri 100 % atitinka statistinio tyrimo metu inžinieriaus Nr. 1 kolonos armavimo rezultatą. Tad galima teigti, kad identifikavome universaliausią armavimo sprendinį, pritaikytą tiriamojo objekto užduočiai ir įsitikinome, kad kompiuterių mokymo algoritmų veikimu pagrįsta parinktis programiniame prototipe gali būti papildomai įdiegta ir siūlyti inžinieriams unifikuotus, pagal įmonės praktiką taikomus sprendinius.

Gauti eksperimento rezultatai patvirtina, kad automatizuoto armavimo prototipas gali sumažinti inžinieriaus atliekamą rankinį armatūros modeliavimo darbą pagal skaičiuojamosios analizės rezultatus. Remiantis eksperimento duomenimis, kolonos elemento armavimo procesas gali būti sutrumpintas iki 70 %, taigi galime konstatuoti, kad nepakankamai efektyvaus darbo problema šiuo atveju yra išsprendžiama.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Sukurtas taikomosios programos prototipas, veikiantis klasikinio programavimo bei kompiuterių mokymo algoritmų pagrindu, atlieka surenkamojo gaminio armavimo procesą automatizuotu būdu, tad galima teigti, kad eksperimento tikslas yra pasiektas.

Atlikus mokslinį darbą, sukurtas automatizuotą armavimą atliekančio programinio įrankio konceptas. Realizuotas *Tekla Structures* programos papildinys pritaikomas atliekant statistinį tyrimą, kuriuo norima nustatyti ekspertinius inžinierių sprendinius, panaudojamus kompiuterių mokymo modelio kūrimui bei algoritmų mokymui. Po kompiuterių mokymo modelio algoritmų mokymo fazės įvertinti armavimo prognozių rezultatai padeda išsiaiškinti unifikuotus inžinierių sprendinius įmonėje. Taigi, nustatyta, kad kompiuterių mokymo algoritmai gali būti naudingi, tobulinant tradicinio programavimo pagrindu veikiantį programinį papildinį. Be to, atlikta darbo našumo rankiniu ir automatizuotu būdu lyginamoji analizė, parodo, kad automatizuoas armavimo procesas gali būti paspartintas net keliais kartais. Tokiu būdu sutaupomos statybos projekto laiko bei ekonominės sąnaudos.

Prototipo taikymo nauda pasireiškia eliminuojant tikimybę klaidingai sumodeliuoti elemento armatūrą, nes automatizuotas armavimo procesas įgyvendinamas pagal LST EN 1992-1-1:2005 armavimo taisykles. Taip pat eliminuojamas armatūros rankinis modeliavimas *Tekla Structures* aplinkoje leidžia maksimaliai sumažinti fragmentiškus, pasikartojančius armatūros projektavimo veiksmus. Tačiau kol kas prototipas nėra pritaikytas sudėtingesnės geometrijos ar kito tipo surenkamiems gelžbetoniniams elementams armuoti automatizuotu būdu, tad kompiuterių mokymo modeliai gali būti tobulinami ir pritaikomi sudėtingesnių gelžbetoninių elementų automatizuoto armavimo procesui įgyvendinti. Manoma, kad pirmiausia reikėtų sukurti didelių armavimo rezultatų kiekius iš *Tekla Structures* aplinkos kaupiančią duomenų bazę ir atlikti tyrimą su didesne reikalingų kolonų ar kitų elementų imtimi. Tokiu atveju kompiuterių mokymo modelis galėtų atlikti didesnės apimties duomenų interpoliavimą ir pateikti tikslesnius, sveikaisiais skaičiais išreikštus bei įvairesnius armavimo sprendinių prognozių rezultatus. Svarbu paminėti, kad toliau būtų naudinga tirti kompiuterių mokymo modelio generuojamų prognozių patikimumą. Tokiu būdu gali būti iš anksto pagal užduotį ir pradinių duomenų rinkinį, t. y. be eksperimento, parinktas ir taikomas tinkamiausias prognozes generuojantis algoritmas.

Automatizuoto armavimo proceso įgyvendinimas, remiantis klasikinio programavimo taisyklėmis bei universalaus sprendinio identifikavimas, taikant kompiuterių mokymo algoritmus, gali būti idėja programinės įrangos vystymu užsiimančiam verslui, siekiant paspartinti projektavimo procesą bei eliminuoti žmogiškojo faktoriaus padaromų klaidų riziką. Taip pat svarbu paminėti, kad pagal kompiuterių mokymo modelio teikiamas galimybes ateityje būtų galima sugeneruoti net tik

įvairesnius armavimo sprendinius, bet ir parinkti optimaliausią armavimo rezultatą. Tikėtina, kad užtektų papildyti kompiuterių mokymo algoritmus armatūros svorio įvertinimo sąlyga ir modeliai galėtų prognozuoti racionaliausius armatūros strypų panaudojimo sprendinius. Tokiu būdu būtų sutaupomos statybos projekto lėšos, nepermokant už neefektyviai naudojamą armatūrą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Allplan Precast: solutions for precast industry. (2022). *Allplan-precast*. <https://www.allplan-precast.com/en>

Alpaydin, E. (2020). *Introduction to Machine Learning*. Londonas: The MIT Press.

Alzubi, J., Nayyar, A., Kumar., A. (2018). Machine Learning from Theory to Algorithms: An Overview. *Journal of Physics: Conference Series*, 1142, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1142/1/012012>

Arain, F. N. (2021). Decision Tree Classification Algorithm. *DevOps*. <https://www.devops.ae/decision-tree-classification-algorithm/>

Berger, R. (2016). A comprehensive guide to reinventing companies Mastering the Transformation Journey, Building Europe's road to "Construction 4.0. *Digitization in the construction industry*. <https://www.rolandberger.com/en/Media/Digitization-in-the-construction-sector.html>

Bhatti, B. (2019). How is Machine Learning Different from Statistics and Why it Matters. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/how-is-machine-learning-different-from-statistics-and-why-it-matters-5a8ed539976>

BIM FORUM 2019. Level of Development specification. Leidimas 2019.

Brownlee, J. (2016). What is Deep Learning? *Machine Learning Mastery*. <https://machinelearningmastery.com/what-is-deep-learning/>

Bunker, R., Thabtah, F. (2019). A Machine Learning Framework for Sport Result Prediction. *Applied Computing and Informatics*, 15(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2017.09.005>

Chui, M., Manyika, J., Miremadi, M., Henke, N., Chung, R., Nel, P. ir Malhotra, S. (2018). Notes from the AI frontier insights from hundreds of use cases. *McKinsey & Company*. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-applications-and-value-of-deep-learning>

Čekanavičius, V., Murauskas, G. (2014). *Taikomoji regresinė analizė socialiniuose tyrimuose*. 16 p. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.

Dahlgren, A., Svensson, L. (2013) *Guidelines and Rule for Detailing of Reinforcement in Concrete Structures A Compilation and Evaluation of Ambiguities in Eurocode 2*. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/188834/188834.pdf>

DiCtion: Digitalising construction workflows. (2019). *Aalto.fi*. <https://www.aalto.fi/en/diction>

- Doherty, S., Moores, J. (1999). *Control of pH in Chemical Processes Using Artificial Neural Networks*. Liverpool, Liverpool John Moores University.
- Drakos, G. (2019). Decision Tree Regressor explained in depth. *GD Coder*. <https://gdcoder.com/decision-tree-regressor-explained-in-depth/>
- Eastman, C., Sacks, R., Aram, S. (2013). Requirements for BIM platforms in the concrete reinforcement supply chain. *Automation in Construction*, 35, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.013>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Lee, G. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (2nd Edition). John Wiley & Sons Ltd.
- Elliot, K.S., Hamid, Z.A. (2017). *Modernisation, Mechanisation and Industrialisation of Concrete Structures. Historical and Chronological Development of Precast Concrete Structures*. John Wiley & Sons Ltd. <https://www.wiley.com/en-us/Modernisation%2C+Mechanisation+and+Industrialisation+of+Concrete+Structures-p-9781118876497>
- Craglia, M., Annoni, A., Benczur, P., Bertoldi, P., Delipetrev, P., De Prato, G., Feijoo, C., Fernandez, E., Gomez, E., Iglesias, M., Junklewitz, H., Lopez, M., Martens, B., Nascimento, S., Nativi, S., Polvora, A., Sanchez, I., Tolan, S., Tuomi, I., Vesnic, L. (2018). Artificial Intelligence: A European Perspective. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/936974>
- Galvao, N., Matos, J., Oliveira, D. ir Fernandes, J. (2018). Human Errors and Corresponding Risks in Reinforced Concrete Bridge. *IABSE Reports*. <https://doi.org/10.2749/kualalumpur.2018.0323>
- Geisslinger, M. (2019). Autonomous Driving: Object Detection using Neural Networks for Radar and Camera Sensor Fusion. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/342533976_Autonomous_Driving_Object_Detection_using_Neural_Networks_for_Radar_and_Camera_Sensor_Fusion
- Gigante, M. (2019). 2020 Trends for Computer-Aided-Design (CAD). *G2*. <https://www.g2.com/articles/computer-aided-design-cad-trends-2020>
- Heiskanen, A. (2018). How AI become a design adviser. *AEC-business*. <https://aec-business.com/how-ai-can-become-a-design-adviser/>
- Hurwitz, J, Kirsch, D. (2018). *Machine learning for Dummies* (IBM Limited Edition). John Wiley & Sons, Inc. <https://www.ibm.com/downloads/cas/GB8ZMQZ3>

IMPACT: Reinforcement Detailing Software. (2022). *Strusoft*. <https://strusoft.com/software/impact-precast/design-detailing/reinforcement/>

International Federation for Structural Concrete (fib). (2014). *Planning and design handbook on precast building structures: manual/textbook*. https://books.google.lt/books/about/Planning_and_design_handbook_on_precast.html?id=fkRsrgEACAAJ&redir_esc=y

Kavitha. S., Varuna. S. (2016). A Comparative Analysis on Linear Regression and Support Vector Regression. *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/get.2016.7916627>

Kudzys, A. (1992). *Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos*. Vilnius: Mokslas.

Laskowski, N. (2017). SMAC (social, mobile, analytics and cloud). TechTarget. <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/SMAC-social-mobile-analytics-and-cloud>

Li, L. (2019). Classification and Regression Analysis with Decision Trees. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/https-medium-com-lorli-classification-and-regression-analysis-with-decision-trees-c43cdbc58054>

LST EN 1992-1-1:2005 Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius: Lietuvos standarizacijos departamentas.

STR 1 04.04:2017. Statinio projektavimas, projekto ekspertizė. Vilnius, Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija

Lubis, A., Lubis, M., Khowarizmi, A. (2020). Optimization of distance formula in K-Nearest Neighbor method. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(1), 326-338. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i1.1464>

Makinde, R. , Ako, C, T. ir kt. (2012). Prediction of crude oil viscosity using feed-forward back-propagation neural network (FFBPNN). *Petroleum and Coal, ISSN 1337-7027*, 54(2), 120–131.

Mazėtis, S. (2019). *Sistemas mokymosi algoritmai klasifikavimui ir prognozavimui: magistro baigiamasis darbas*. Vilnius, Vilniaus universitetas. 19-20 p.

McCulloch, S., Pitts. W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>

Meyfroidt, G., Güiza, F., Ramon, J. ir Bruynooghe, M. (2009). Machine learning techniques to examine large patient databases. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 23(1), 127–143. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2008.09.003>

- Medar, R., Rajpurohit, V. S. ir Rashmi, B. (2017). Impact of Training and Testing Data Splits on Accuracy of Time Series Forecasting in Machine Learning. *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*. <https://doi.org/10.1109/iccubea.2017.8463779>
- Migilinskas, D. (2021). *Statybos projekto planavimo ir vykdymo informacinis modeliavimas: paskaitų konspektas*.
- Nielsen, M. A. (2015). Neural Networks and Deep Learning. *Determination Press*.
- Omar, S., Ngadi, A., & Jebur, H. H. (2013). Machine learning techniques for anomaly detection: an overview. *International Journal of Computer Applications*, 79(2), 33-41. <https://doi.org/10.5120/13715-1478>
- Oti, A.H., Tizani, W., Abanda, F.H., Jaly-Zada, A., Tah, J. H. M. (2016). Structural sustainability appraisal in BIM. *Automation in Construction*, 69, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.019>
- Popov, V., Grigorjeva, T. (2010). Statybinių konstrukcijų integruotas automatizuotas projektavimas. *Statybinės Konstrukcijos ir Technologijos*, 2(1), 31-37. <https://doi.org/10.3846/skt.2010.04>
- Popov, V. (2021). *Integruoto projekto rengimas: paskaitų konspektas*.
- Pratuzaitė, G. (2020). *Dirbtinio intelekto taikymo bankų sektoriuje tyrimas: magistro baigiamasis darbas*. Vilnius, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- ProConcrete SS7: Concrete Drawing Production: An Introduction/Quick-Start, with Best Practices Recommendations. (2014). *Bentley Systems*. https://documen.site/download/part-2-dynamic-views-workflow-11-min_pdf
- Reinforced Concrete Modeling and Detailing Software – ProConcrete. (2022). *Bentley*. <https://www.bentley.com/en/products/product-line/structural-detailing-software/proconcrete>
- Rebar Modeling in Revit: Keep It in Check. (2022). *Autodesk University*. <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Rebar-Modeling-Revit-Keep-It-Check-2019>
- Ruškys, D. (2019). *Integruotas gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo ciklas taikant pastato informacinio modeliavimo (BIM) technologiją: magistro baigiamasis darbas*. Vilnius, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Schlenker, L. (2018). k-NN — Getting to know your nearest neighbors. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/k-nn-getting-to-know-your-nearest-neighbors-b60399dc0f32>

- Singh, J., Dhiman, G. (2021). A survey on machine-learning approaches: Theory and their concepts. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.335>
- Simanavičius, N. (2020). Formuliu lapas – tikimybių teorija. *Matematikos pamokos*. <https://matematikospamokos.lt/2020/06/22/formuliu-lapas-tikimybiu-teorija/>
- Struyk, T. (2017). An Introduction to Application Software. *Technopedia*. <https://www.techopedia.com/2/28350/personal-tech/software-applications/an-introduction-to-application-software>
- Šalkevičius, J. (2015). *Maitinimo įstaigų reitingo prognozavimo statistinių modelių tyrimas*: magistro baigiamasis darbas. Kaunas, Kauno technologijos universitetas.
- Tautvaišas, S. (2017). *Gilaus mokymo algoritmų taikymas efektyviam sandorių vykdymui*: magistro baigiamasis darbas. Vilnius, Vilniaus universitetas.
- AI and BIM: The Future of Construction? (2019). *The CAD Room*. <https://www.thecadroom.com/are-ai-and-bim-the-future-of-construction/>
- Rebar Modeling with Tekla Structures. (2022). *Tekla*. <https://www.tekla.com/resources/tekla-structures-steel-tips/009-rebar-modeling>
- Ullah, Z., Xu, Z., Zhang, L., Zhang, L. ir Ullah, W. (2018). RL and ANN Based Modular Path Planning Controller for Resource- Constrained Robots in the Indoor Complex Dynamic Environment. *IEEE Access*, 6, 74557-74568. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2882875>
- Ulubeyli, S., Kazaz, A. ir Er, B. (2014). Planning Engineers' Estimates on Labor Productivity: Theory and Practice. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.004>
- Vaišnoras, Ž. (2020). Mašininio mokymosi metodų vystymas įsilaužimams aptikrti kompiuterių tinkluos: *mokslinė ataskaita DMSTI-DS-N009-20-11*. Vilniaus universitetas: duomenų mokslo ir skaitmeninių technologijų institutas.

PRIEDAI

A.1 priedas. Prototipo taikymas. Inžinieriaus Nr. 1 armavimo rezultatų atvaizdavimas

A.2 priedas. Sprendimų medžio struktūra (taikant regresiją), architektūra Nr. 2

A.3 priedas. Sprendimų medžio struktūra (taikant regresiją), architektūra Nr. 3

A.4 priedas. Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1, skirtingų algoritmų sugeneruoti prognozių rezultatai

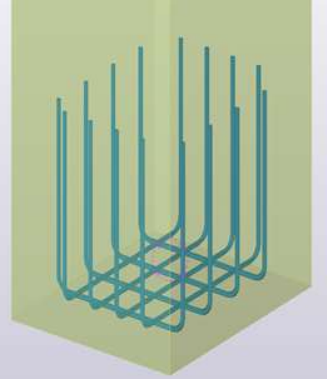
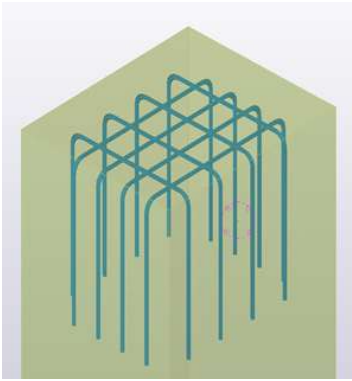
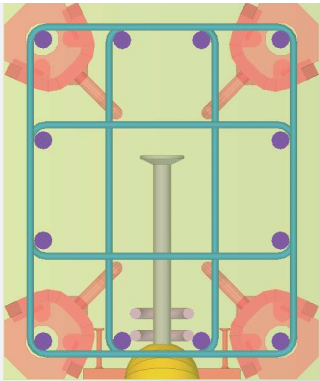
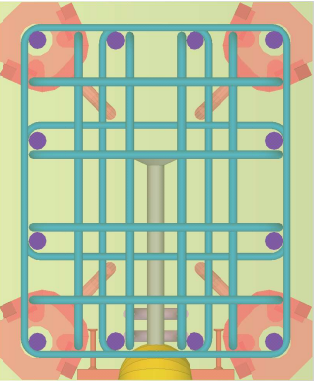
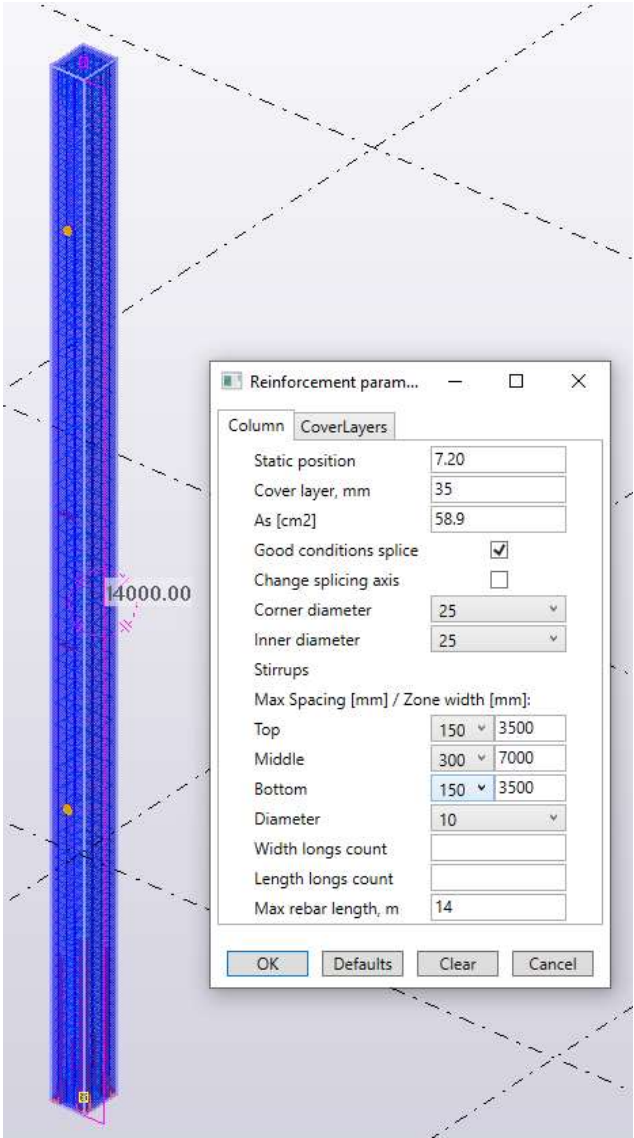
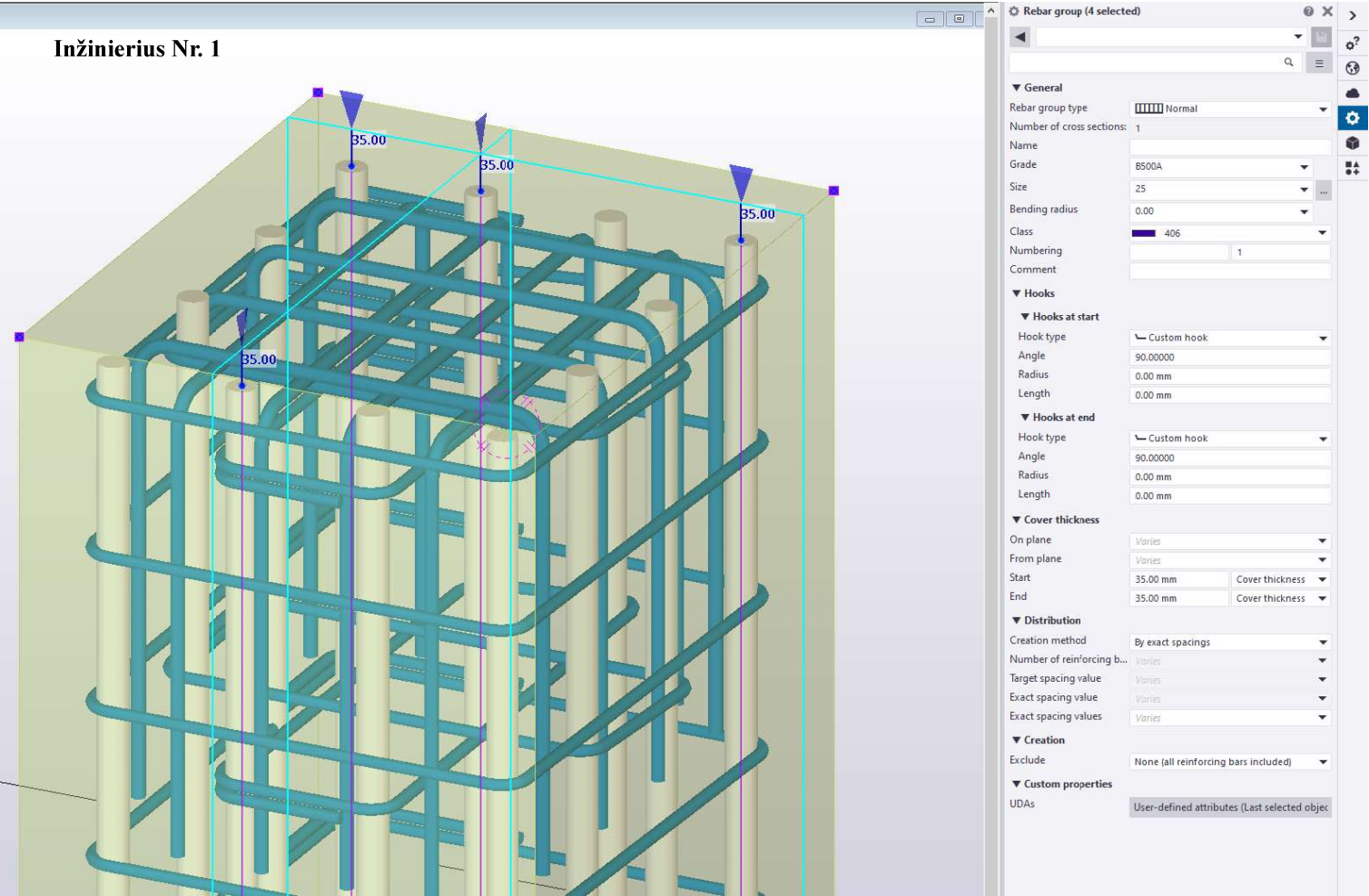
A.5 priedas. Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2, skirtingų algoritmų sugeneruoti prognozių rezultatai

A.6 priedas. Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3, skirtingų algoritmų sugeneruoti prognozių rezultatai

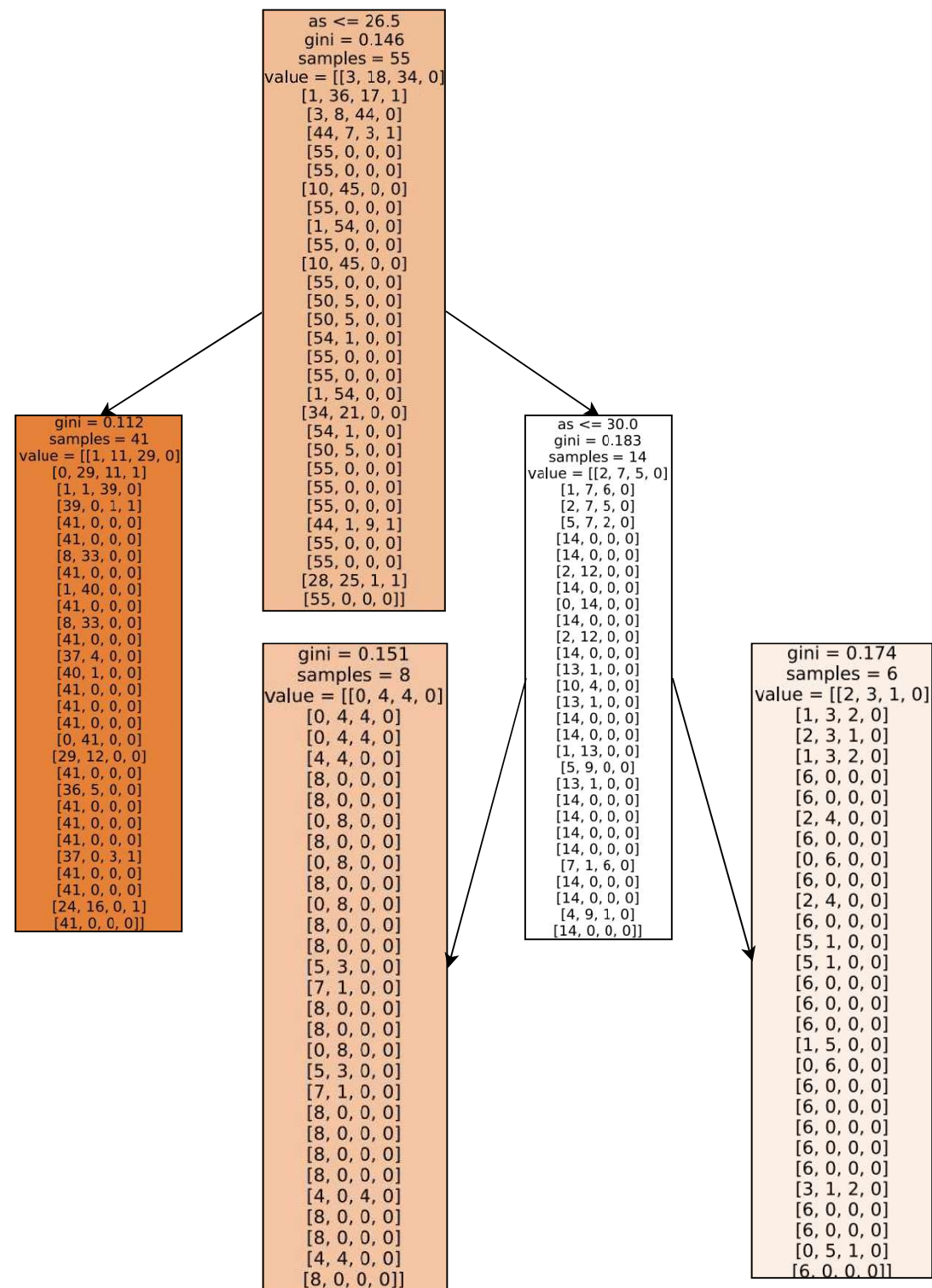
A.7 priedas. Kompiuterių mokymo modelio architektūros tipai

A.8 priedas. Detalus inžinieriaus Nr. 1 armavimo rezultatas

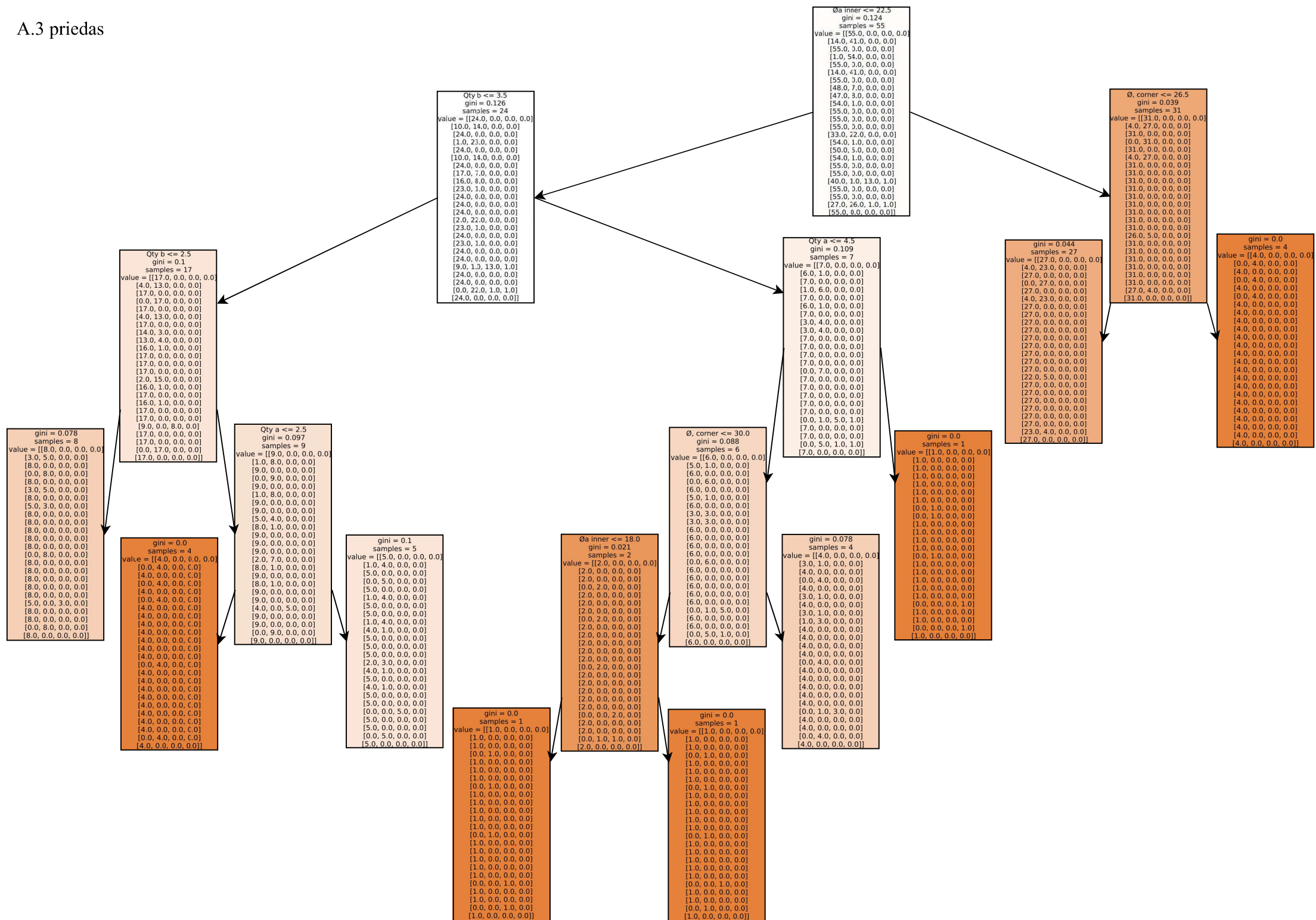
A.9 priedas. Kompiuterių mokymo modelio parametrai



A.2 priedas



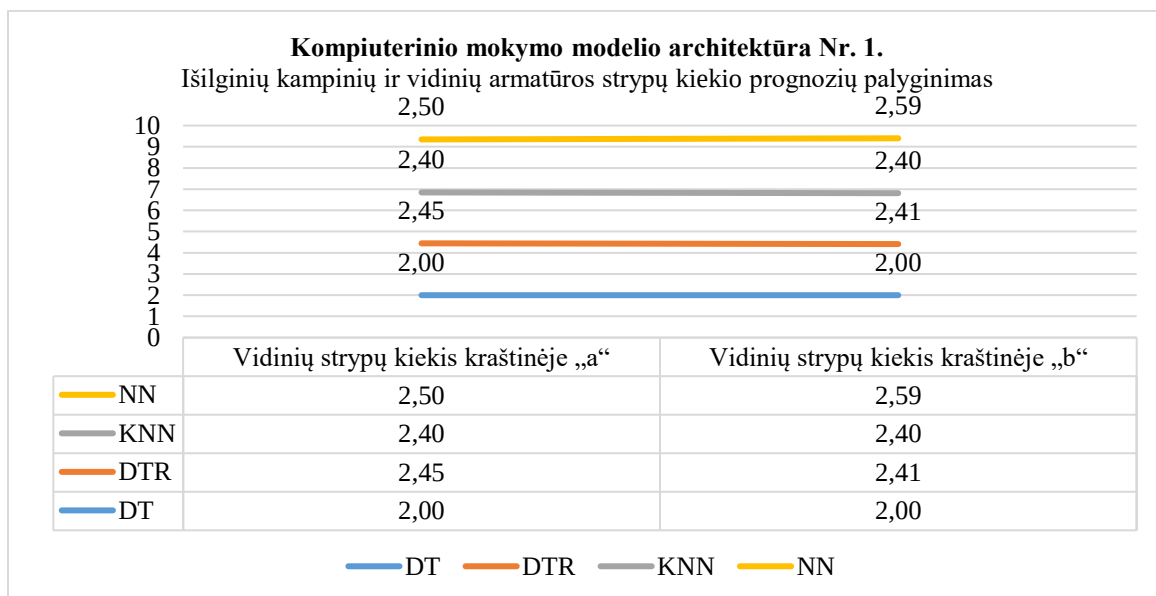
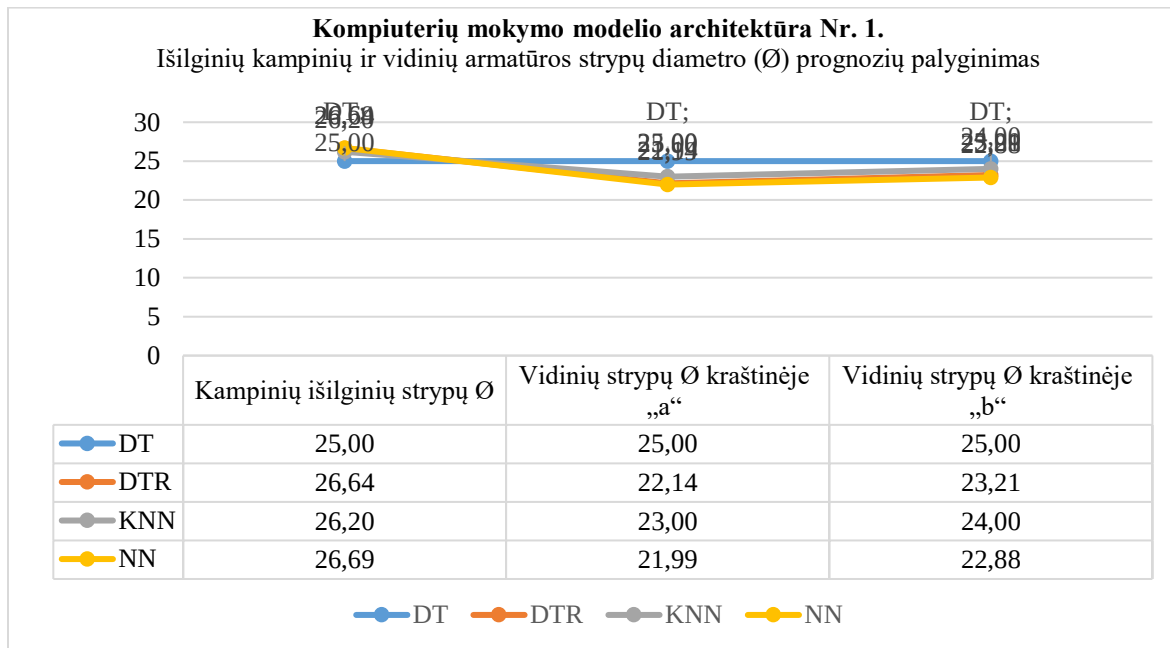
A.3 priedas



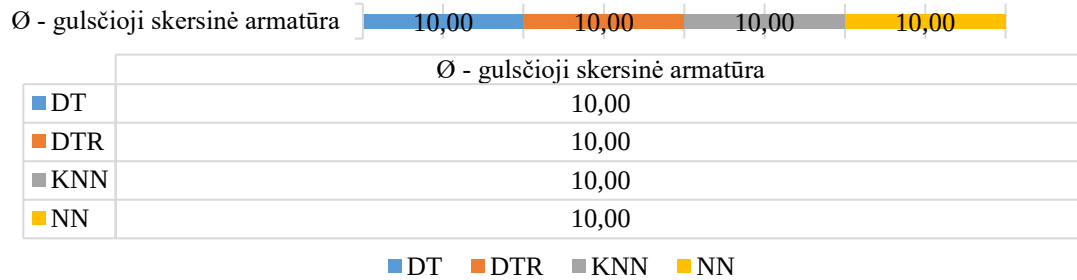
A.4 priedas

Sprendimų medžio (angl. *Decision Tree*, *DT*), sprendimų medžio su regresijos taikymu (angl. *Decision Tree Regression*, *DTR*), K – artimiausio kaimyno paieškos (angl. *K – Nearest Neighbour*, *KNN*) bei neuroninių tinklų (angl. *Neural Network*, *NN*) algoritmų teikiami kolonos armavimo prognozių rezultatai palyginami tarpusavyje esant skirtingai trijų tipų kompiuterių mokymo modelio architektūrai: Nr. 1, Nr. 2 bei Nr. 3.

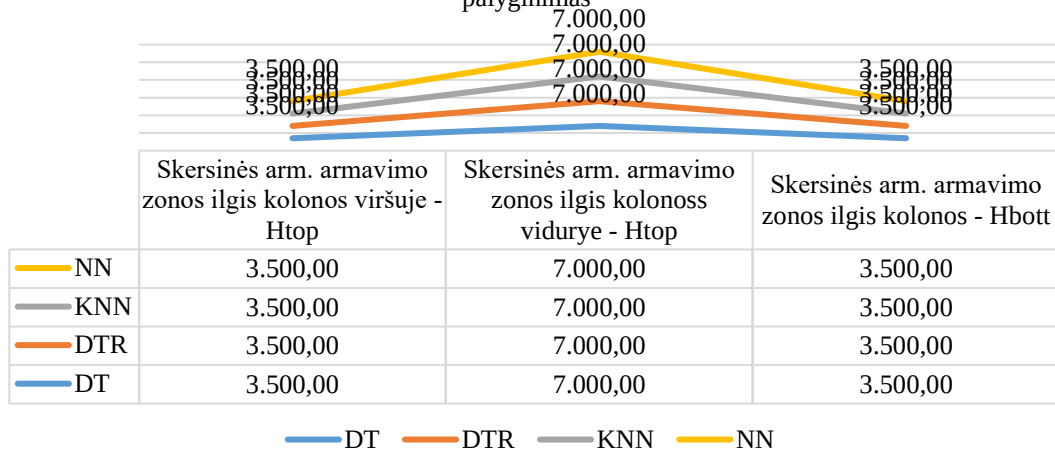
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1, skirtingų algoritmų sugeneruoti išvesties prognozių rezultatai.



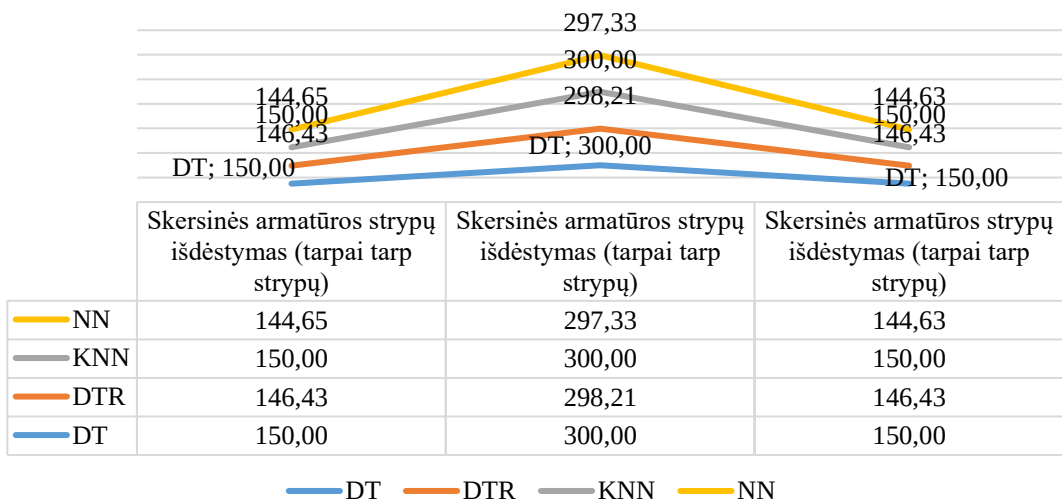
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.
Gulsčiosios skersinės armatūros strypų Ø, prognozių palyginimas



Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.
Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo zonos ilgis (mm), prognozių palyginimas

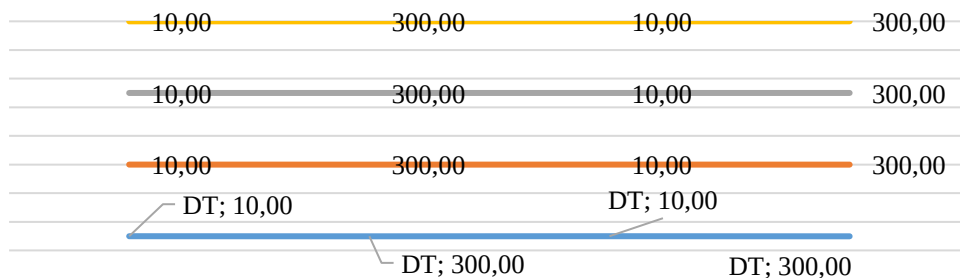


Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.
Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo žingsnis (tarpai, mm), prognozių palyginimas



Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio išdėstymo ir Ø prognozių palyginimas

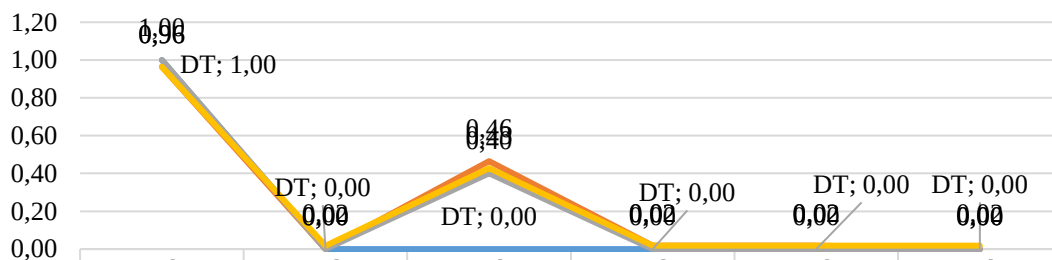


	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (a)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp stygų (a))	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (b)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp stygų (b))
NN	10,00	300,00	10,00	300,00
KNN	10,00	300,00	10,00	300,00
DTR	10,00	300,00	10,00	300,00
DT	10,00	300,00	10,00	300,00

DT DTR KNN NN

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „a“

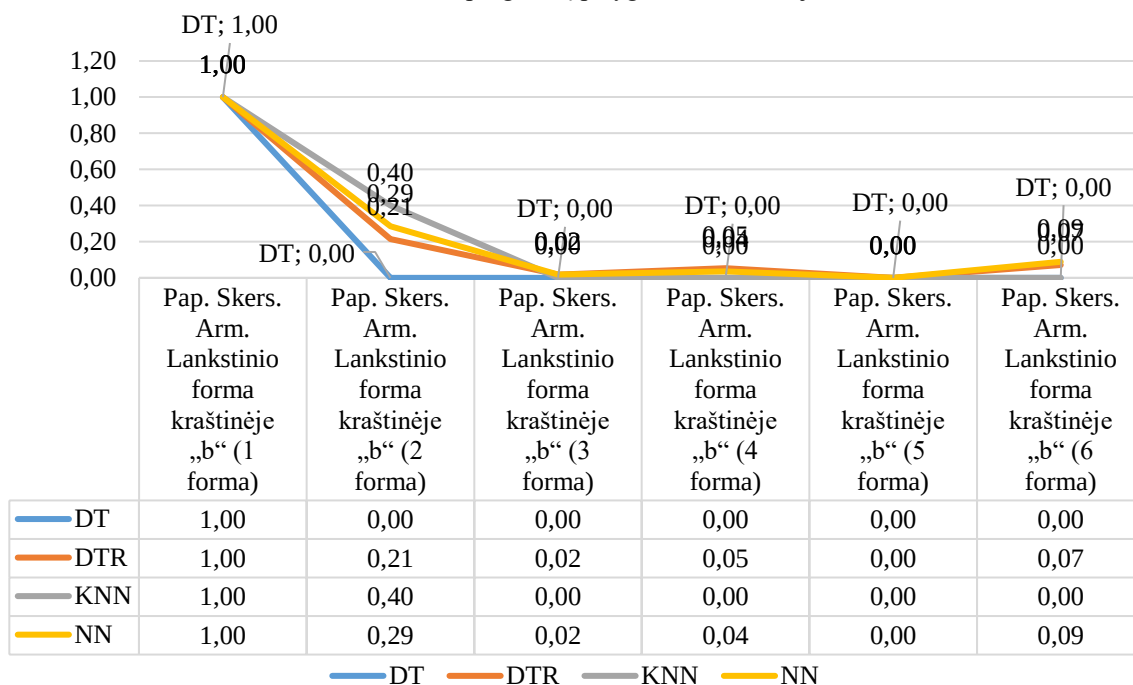


	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (1 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (2 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (3 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (4 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (5 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (6 forma)
DT	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DTR	0,96	0,00	0,46	0,02	0,02	0,00
KNN	1,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00
NN	0,96	0,02	0,43	0,02	0,02	0,02

DT DTR KNN NN

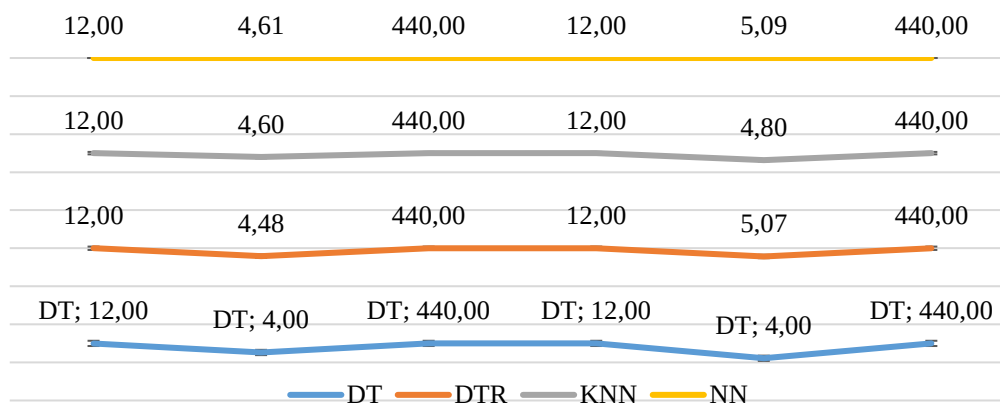
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „b“



Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 1.

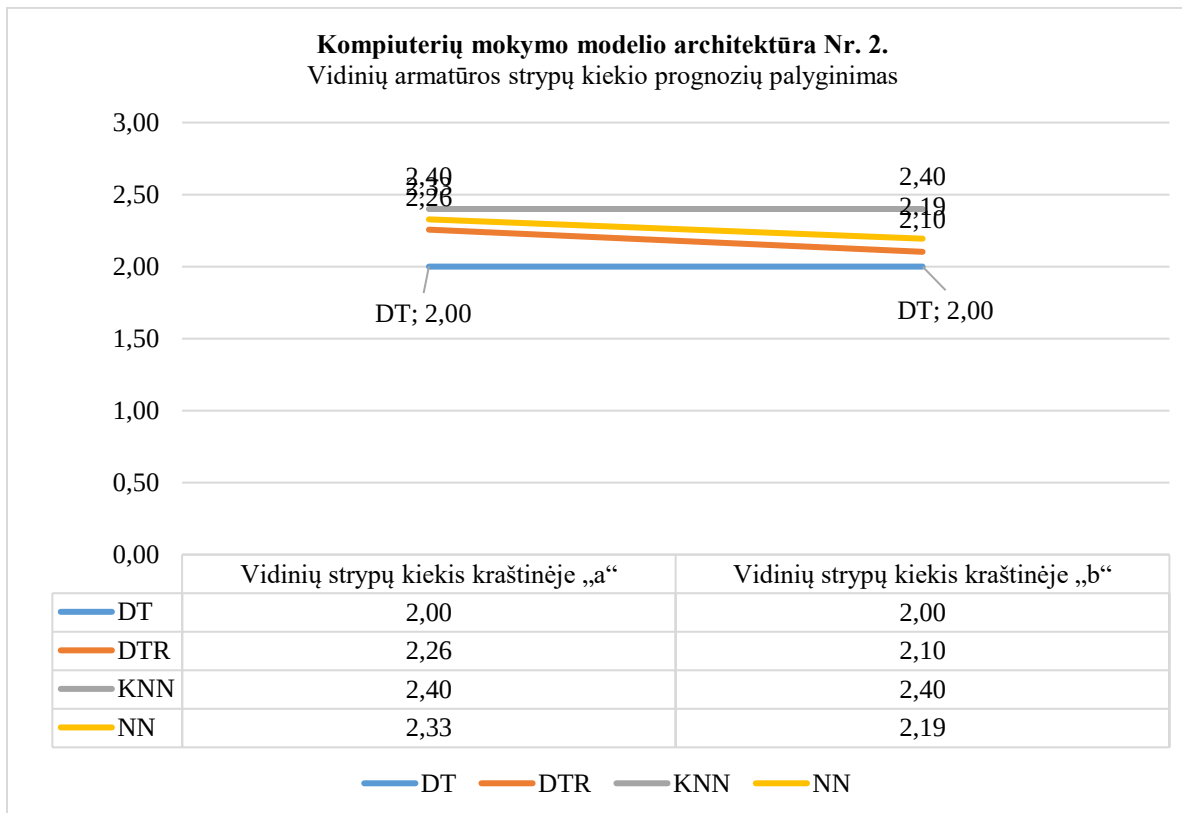
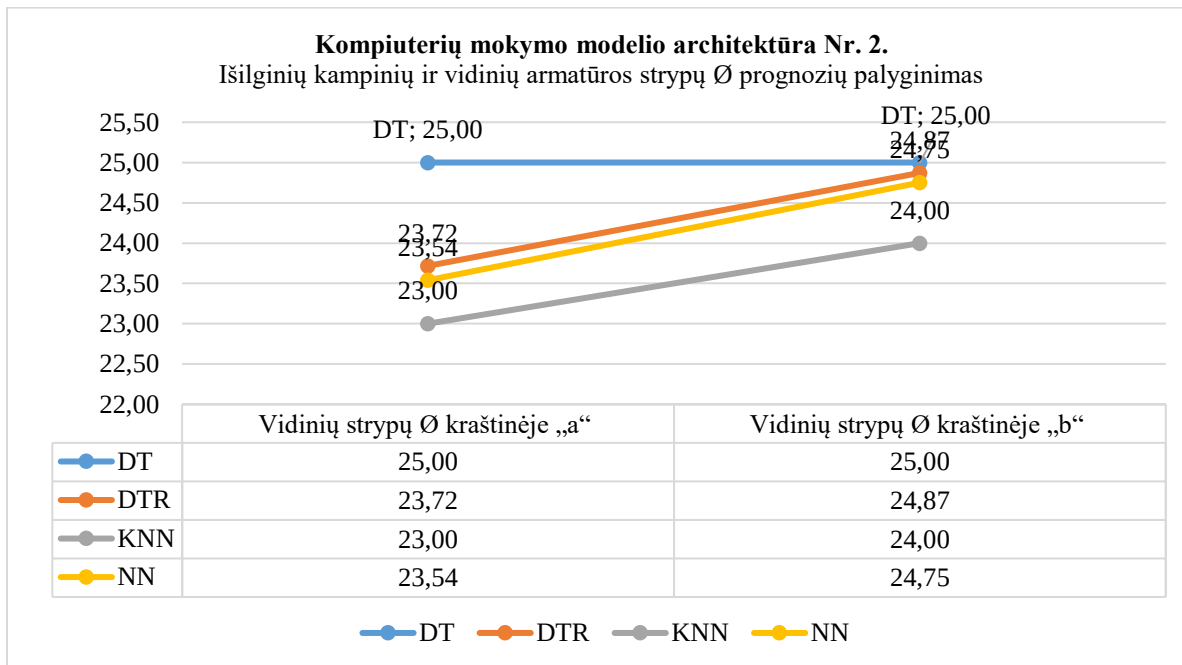
Armavimas kolonoas galuose: viršuje ir apačioje. Lankstinių Ø, kiekio ir užlaidos ilgio prognozių palyginimas



	Kolono armavimas viršuje ir apačioje, Ø (a)	Lankstinių kiekis kolono viršuje/apačioje kraštinėje „a“	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „a“ užlaidos ilgis	Kolono armavimas viršuje ir apačioje, Ø (b)	Lankstinių kiekis kolono viršuje/apačioje kraštinėje „b“	Lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „b“ užlaidos ilgis
NN	12,00	4,61	440,00	12,00	5,09	440,00
KNN	12,00	4,60	440,00	12,00	4,80	440,00
DTR	12,00	4,48	440,00	12,00	5,07	440,00
DT	12,00	4,00	440,00	12,00	4,00	440,00

A.5 priedas

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2, skirtingų algoritmų sugeneruoti išvesties prognozių rezultatai.

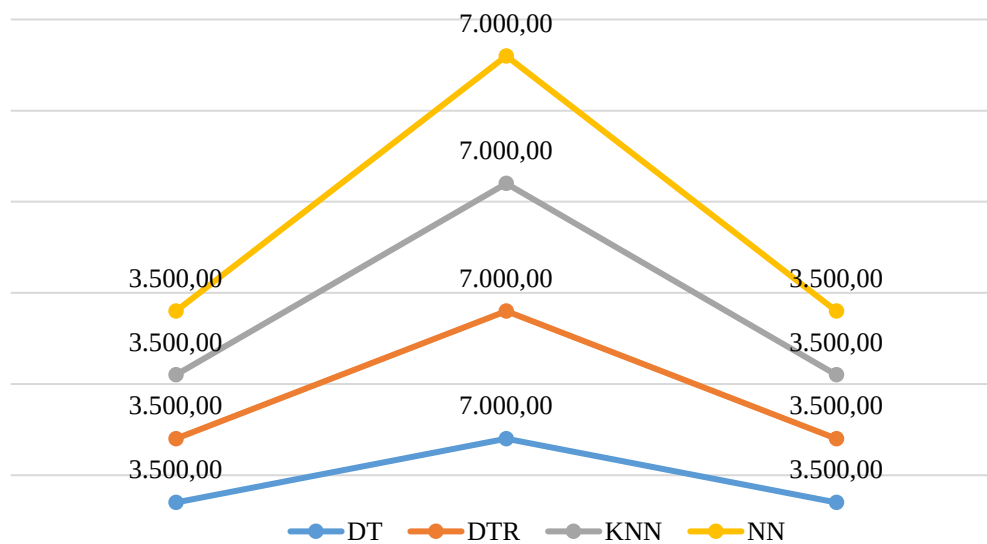


Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.
Gulsčiosios skersinės armatūros stygų Ø, prognozių palyginimas

	10,00	10,00	10,00	10,00
	Ø - gulsčioji skersinė armatūra			
■ DT	10,00			
■ DTR	10,00			
■ KNN	10,00			
■ NN	10,00			

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

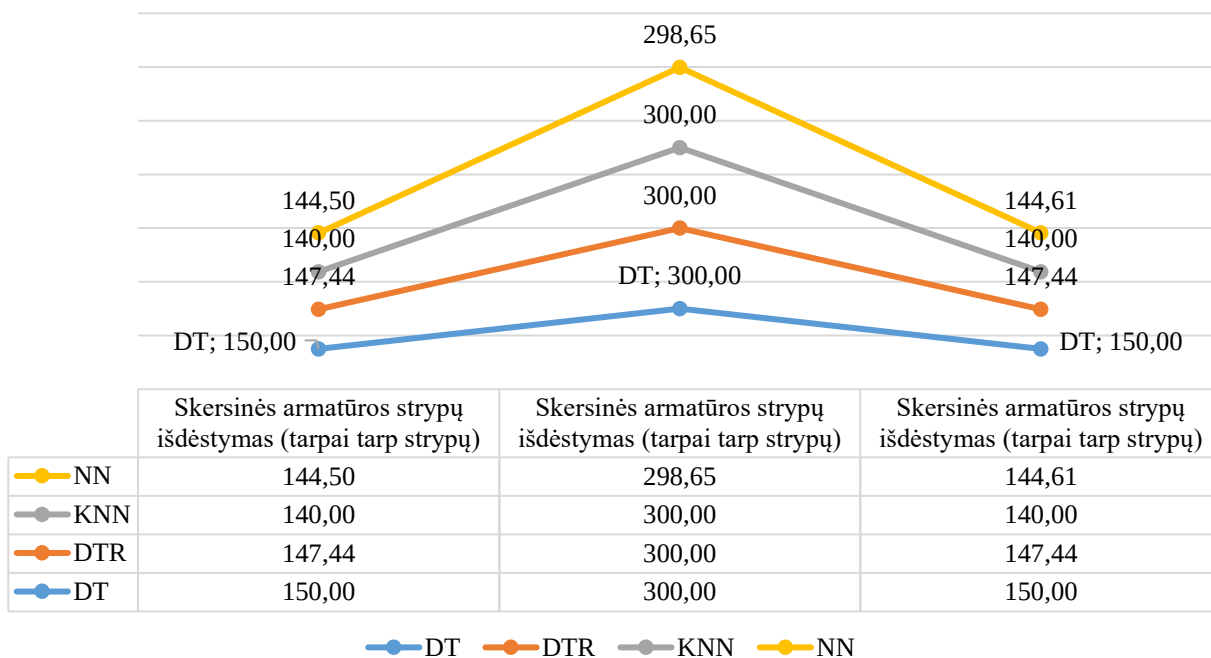
Gulsčiosios skersinės armatūros stygų išdėstymo zonos ilgis (mm), prognozių palyginimas,
mm



	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos viršuje - Htop	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos viduryje - Htop	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos - Hbott
■ NN	3.500,00	7.000,00	3.500,00
■ KNN	3.500,00	7.000,00	3.500,00
■ DTR	3.500,00	7.000,00	3.500,00
■ DT	3.500,00	7.000,00	3.500,00

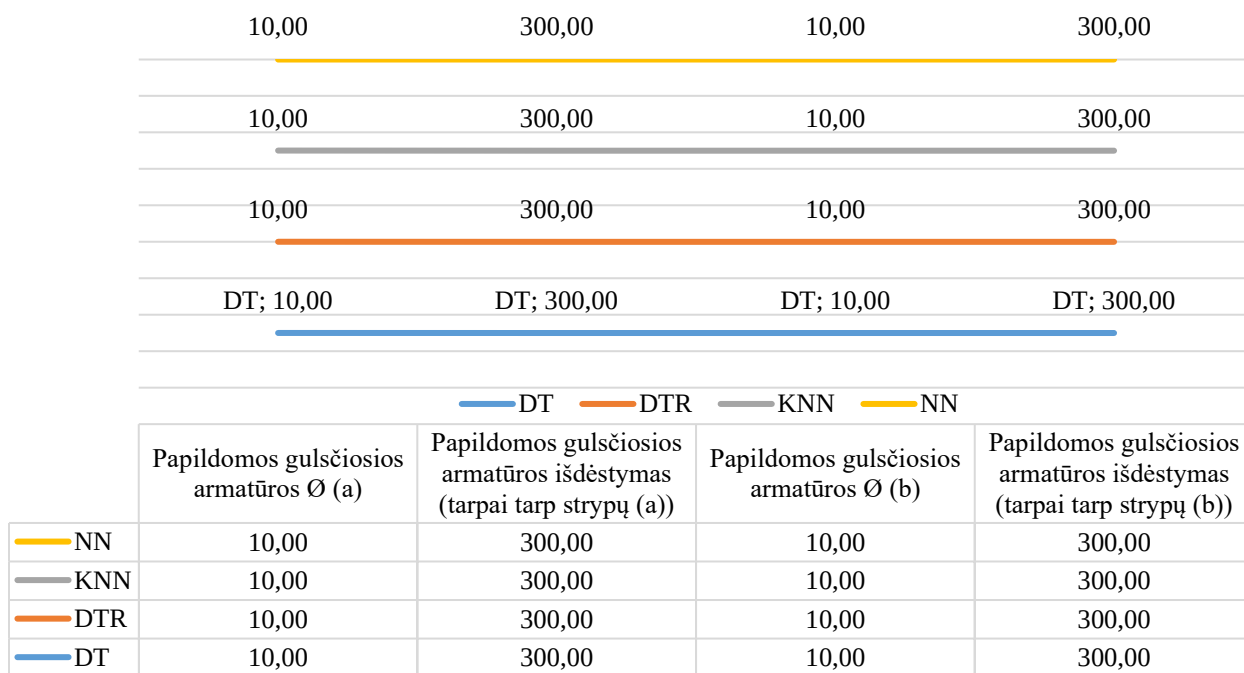
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo žingsnis (tarpai, mm), prognozių palyginimas



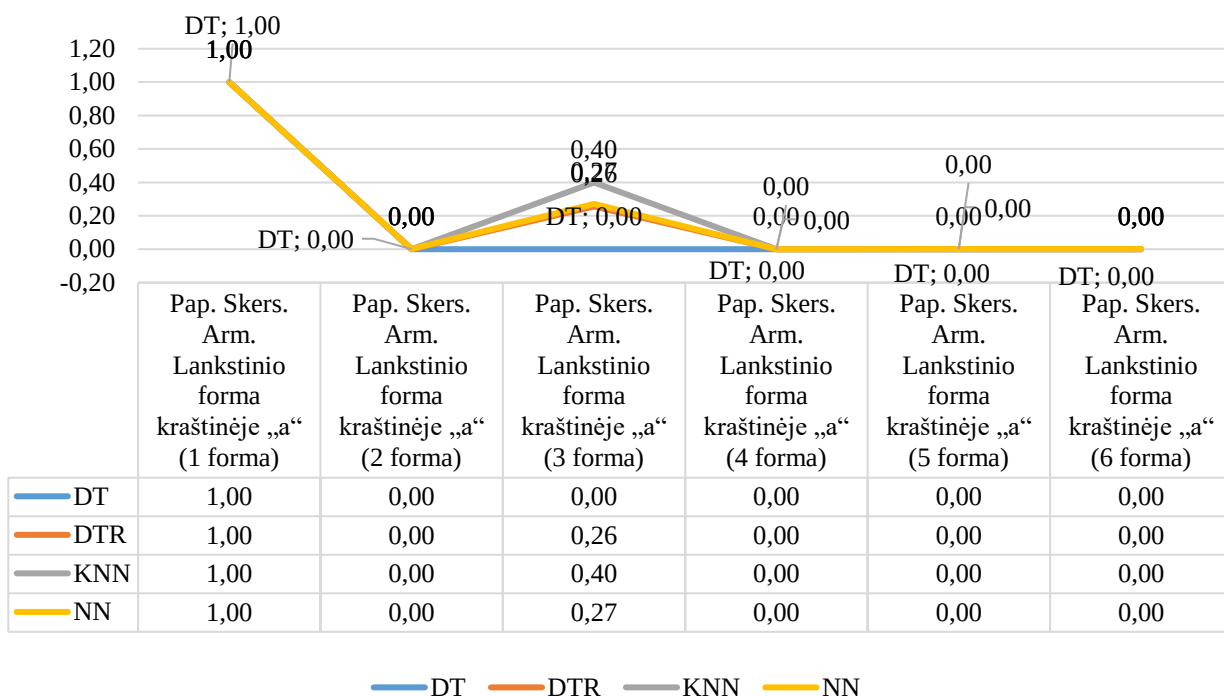
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

Papildomos skersinės armatūros strypų (vidiniams išilginiams strypams apgaubti) - lankstinio išdėstymo ir Ø prognozių palyginimas



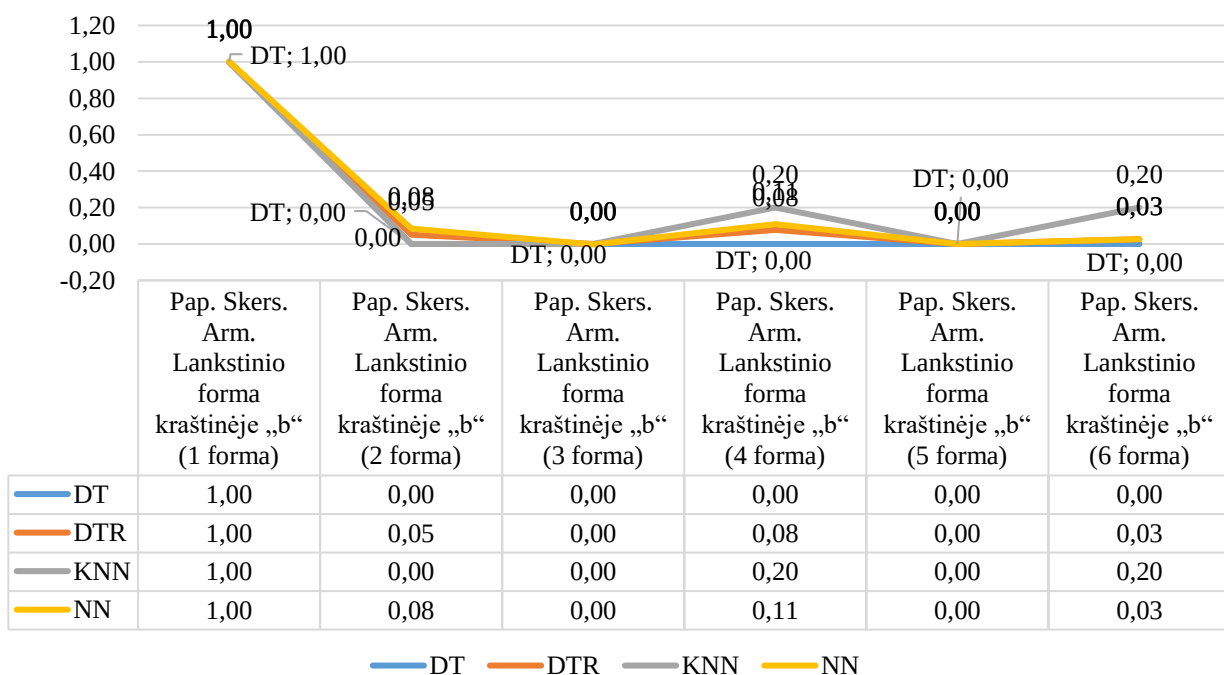
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „a“



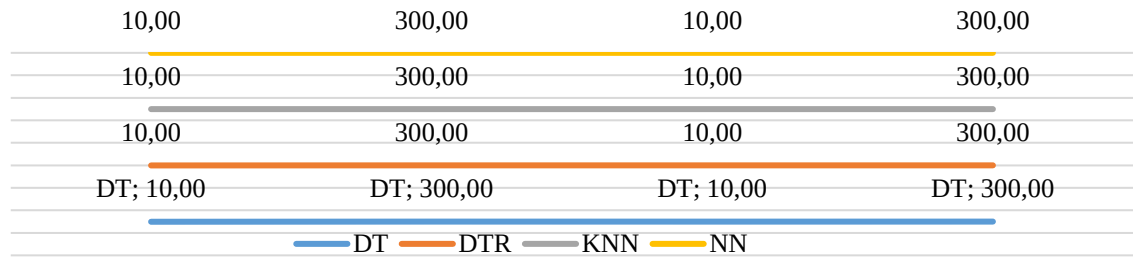
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „b“



Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 2.

Papildomos skersinės armatūros strypų (vidiniams išilginiams strypams apgaubti) - lankstinio išdėstymo ir Ø prognozių palyginimas



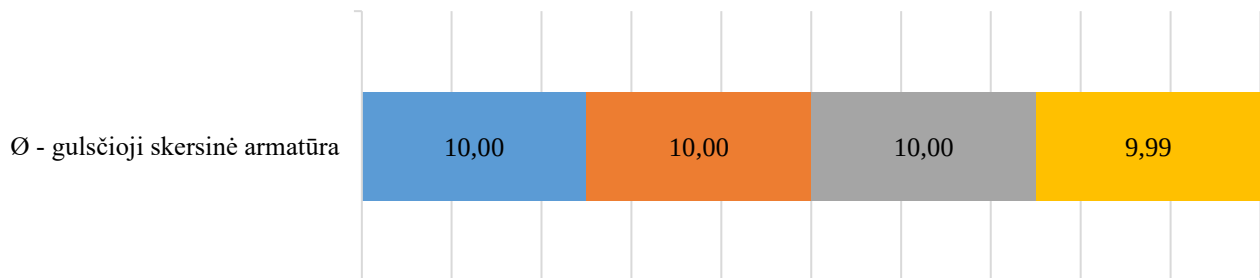
	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (a)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp strypų (a))	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (b)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp strypų (b))
NN	10,00	300,00	10,00	300,00
KNN	10,00	300,00	10,00	300,00
DTR	10,00	300,00	10,00	300,00
DT	10,00	300,00	10,00	300,00

A.6 priedas

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3, skirtingų algoritmų sugeneruoti išvesties prognozių rezultatai.

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo žingsnis (tarpai), prognozių palyginimas

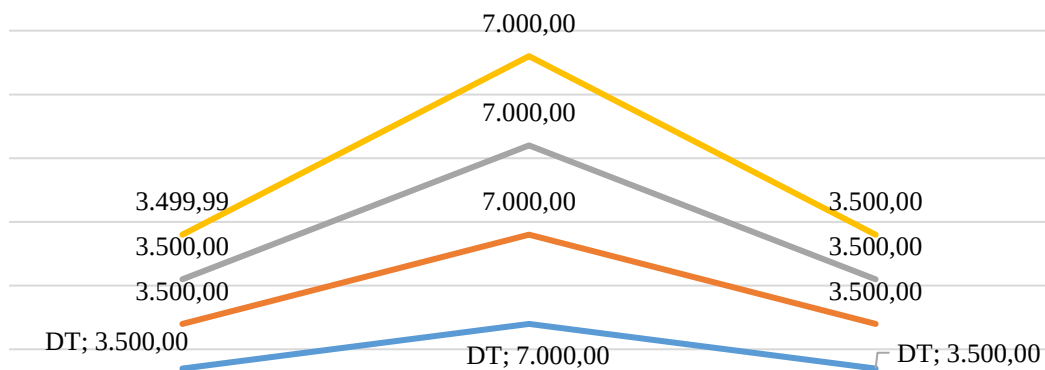


	Ø - gulsčioji skersinė armatūra
DT	10,00
DTR	10,00
KNN	10,00
NN	9,99

■ DT ■ DTR ■ KNN ■ NN

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo zonos ilgis (mm), prognozių palyginimas

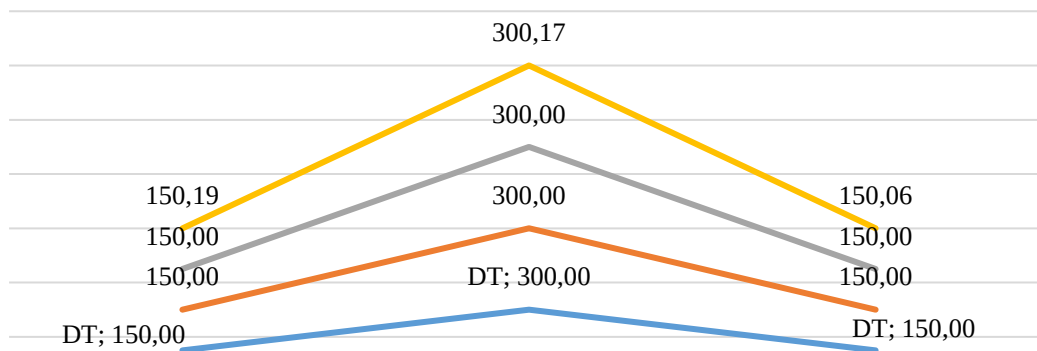


	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos viršuje - Htop	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos viduryje - Htop	Skersinės arm. armavimo zonos ilgis kolonos - Hbott
NN	3.499,99	7.000,00	3.500,00
KNN	3.500,00	7.000,00	3.500,00
DTR	3.500,00	7.000,00	3.500,00
DT	3.500,00	7.000,00	3.500,00

DT DTR KNN NN

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

Gulsčiosios skersinės armatūros strypų išdėstymo žingsnis (tarpai, mm), prognozių palyginimas

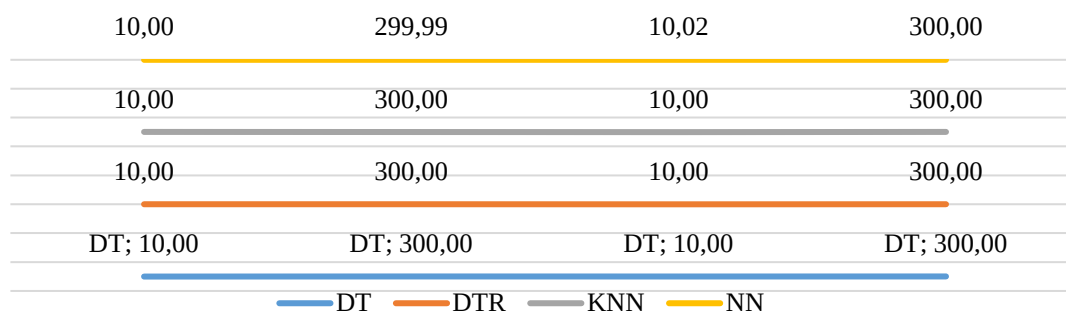


	Skersinės armatūros strypų išdėstymas (tarpai tarp strypų)	Skersinės armatūros strypų išdėstymas (tarpai tarp strypų)	Skersinės armatūros strypų išdėstymas (tarpai tarp strypų)
NN	150,19	300,17	150,06
KNN	150,00	300,00	150,00
DTR	150,00	300,00	150,00
DT	150,00	300,00	150,00

DT DTR KNN NN

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

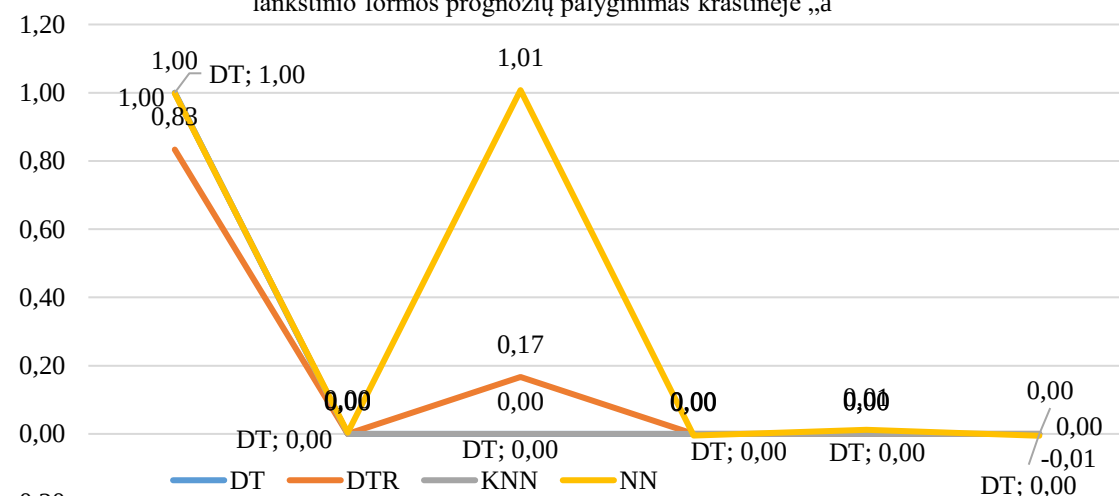
Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio išdėstymo ir Ø prognozių palyginimas



	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (a)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp stygų (a))	Papildomos gulsčiosios armatūros Ø (b)	Papildomos gulsčiosios armatūros išdėstymas (tarpai tarp stygų (b))
NN	10,00	299,99	10,02	300,00
KNN	10,00	300,00	10,00	300,00
DTR	10,00	300,00	10,00	300,00
DT	10,00	300,00	10,00	300,00

Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

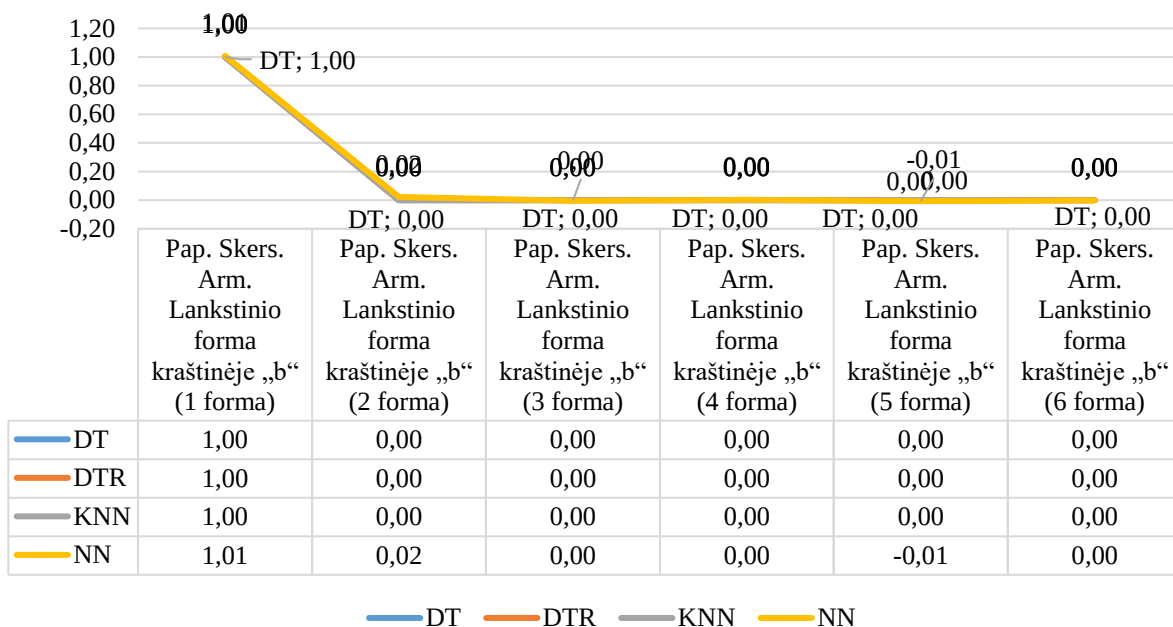
Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „a“



	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (1 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (2 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (3 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (4 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (5 forma)	Pap. Skers. Arm. Lankstinio forma kraštinėje „a“ (6 forma)
DT	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DTR	0,83	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
KNN	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NN	1,00	0,00	1,01	0,00	0,01	-0,01

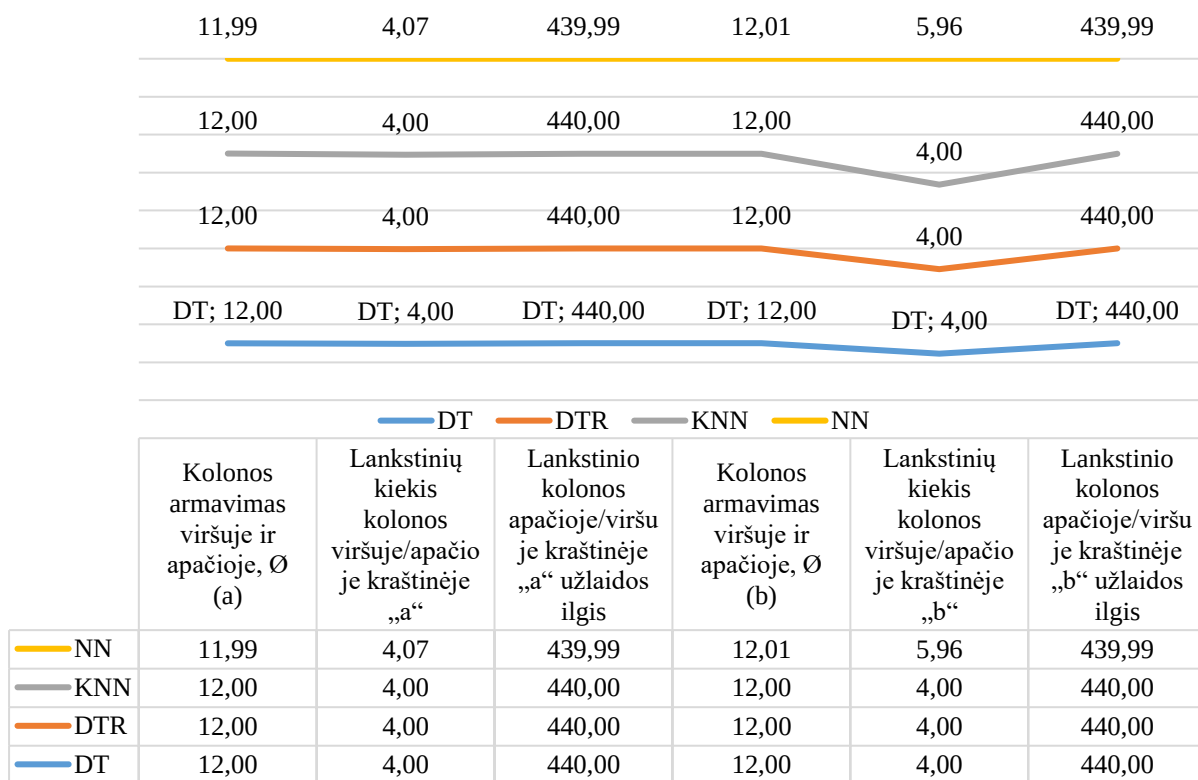
Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

Papildomos skersinės armatūros stygų (vidiniams išilginiams stygams apgaubti) - lankstinio formos prognozių palyginimas kraštinėje „b“

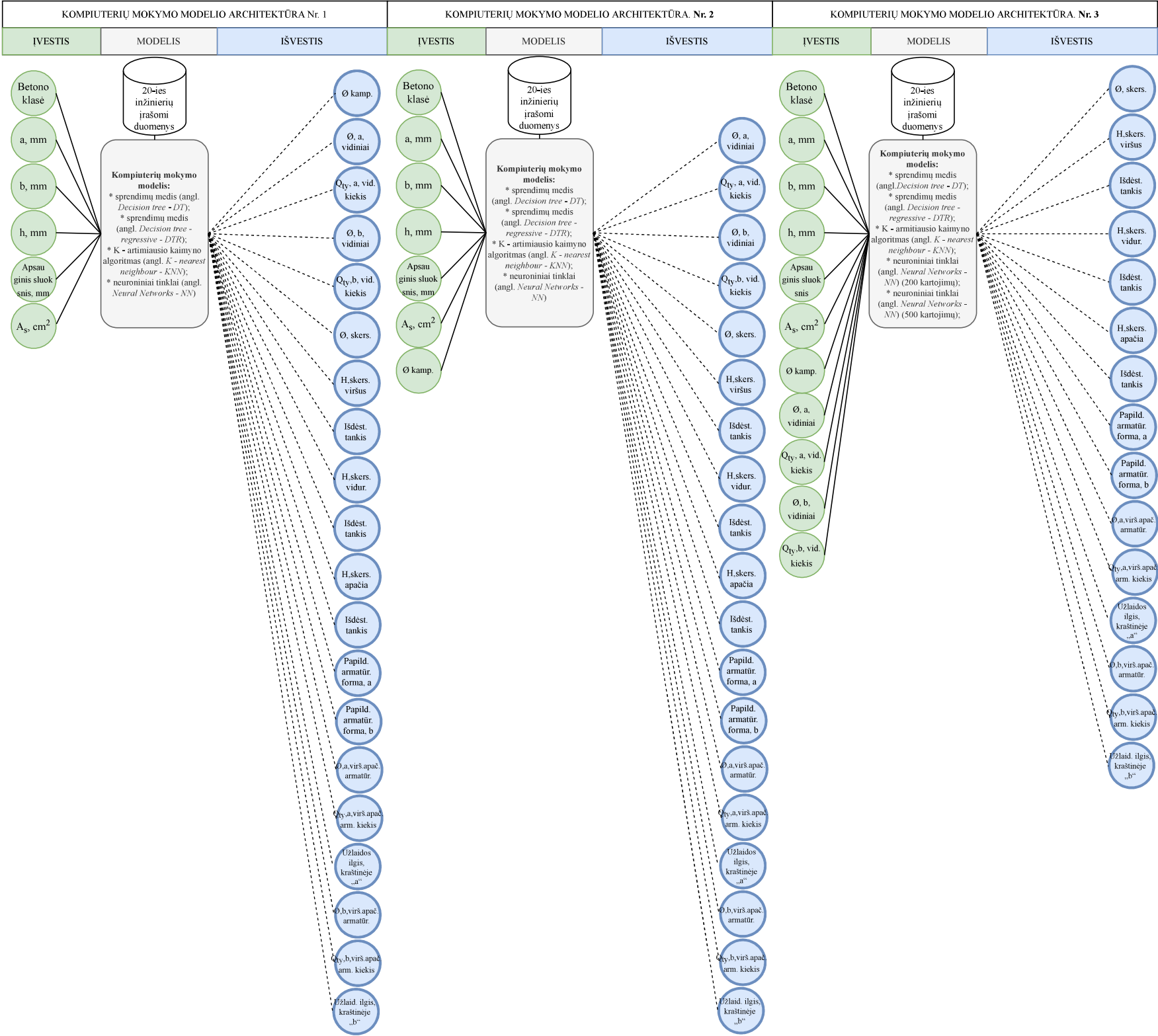


Kompiuterių mokymo modelio architektūra Nr. 3.

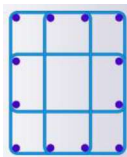
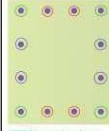
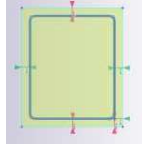
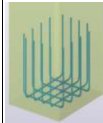
Armavimas kolonos galuose: viršuje ir apačioje. Lankstinių Ø, kiekio ir užlaidos ilgio prognozių palyginimas



A.7 priedas



A.8 priedas

1.			Rezultatas						Laiko trukmė atliekant rankinį armavimą, min	Laiko trukmė atliekant automatizuotą armavimą (+patikra), min	Laiko skirtumas, min	Laiko skirtumas, %																																																					
										32,0	7,5	24,5	76,56																																																				
Įvesties duomenys			Rezultatai	Papildoma skersinė armatūra	Papildoma skersinė armatūra	Išilginė armatūra	Skersinė armatūra	Armavimas kolonos viršuje	Armavimas kolonos apačioje																																																								
Elemento pozicija:	Neprivaloma		Elemento pozicija: 7.20	47xØ10/300	47xØ10/300	2*2xØ25 kampiniai, 2*2xØ25 (a) vidiniai, 2*2xØ25 (b) vidiniai	24xØ10/150 (0-3500mm); 24xØ10/300(3500-10500 mm); 24xØ10/150 (10500-14000mm)	4xØ12 (a); 4xØ12 (b)	4xØ12 (a); 4xØ12 (b)																																																								
Betono apsauginis sluoksnis (mm):	Cv - 35 mm		C _v - 35 mm	1 More: <table><tr><td>RnD_ChSplAxis</td><td>: 0</td></tr><tr><td>RnD_ILLengthQ</td><td>: -1</td></tr><tr><td>RnD_ILWidthQ</td><td>: -1</td></tr><tr><td>RnD_MaxRbrLen</td><td>: 14.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrZoneBot</td><td>: 3500.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrZoneMid</td><td>: 7000.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrZoneTop</td><td>: 3500.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrMaxSpBot</td><td>: 150.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrMaxSpMid</td><td>: 300.00</td></tr><tr><td>RnD_StirrMaxSpTop</td><td>: 150.00</td></tr><tr><td>RnD_Long_Good</td><td>: 1.00</td></tr><tr><td>RnD_Back_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>RnD_Front_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>RnD_Top_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>RnD_Left_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>RnD_Right_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>RnD_Bottom_Cover</td><td>: 35.00</td></tr><tr><td>Bewehrung (Reinforcement grade): B500A</td><td></td></tr><tr><td>D_max (mm)</td><td>: 16</td></tr><tr><td>Fixed drawing main view</td><td>: Top</td></tr><tr><td>Numbering</td><td>: Standard</td></tr><tr><td>As [cm2]</td><td>: 58.9</td></tr><tr><td>Static Position</td><td>: 7.20</td></tr><tr><td>RnD_StirrDia</td><td>: 10</td></tr><tr><td>RnD_Crn_Long_Diam</td><td>: 25</td></tr><tr><td>User field 3</td><td>: 35/Inz.1</td></tr></table>										RnD_ChSplAxis	: 0	RnD_ILLengthQ	: -1	RnD_ILWidthQ	: -1	RnD_MaxRbrLen	: 14.00	RnD_StirrZoneBot	: 3500.00	RnD_StirrZoneMid	: 7000.00	RnD_StirrZoneTop	: 3500.00	RnD_StirrMaxSpBot	: 150.00	RnD_StirrMaxSpMid	: 300.00	RnD_StirrMaxSpTop	: 150.00	RnD_Long_Good	: 1.00	RnD_Back_Cover	: 35.00	RnD_Front_Cover	: 35.00	RnD_Top_Cover	: 35.00	RnD_Left_Cover	: 35.00	RnD_Right_Cover	: 35.00	RnD_Bottom_Cover	: 35.00	Bewehrung (Reinforcement grade): B500A		D_max (mm)	: 16	Fixed drawing main view	: Top	Numbering	: Standard	As [cm2]	: 58.9	Static Position	: 7.20	RnD_StirrDia	: 10	RnD_Crn_Long_Diam	: 25	User field 3	: 35/Inz.1
RnD_ChSplAxis	: 0																																																																
RnD_ILLengthQ	: -1																																																																
RnD_ILWidthQ	: -1																																																																
RnD_MaxRbrLen	: 14.00																																																																
RnD_StirrZoneBot	: 3500.00																																																																
RnD_StirrZoneMid	: 7000.00																																																																
RnD_StirrZoneTop	: 3500.00																																																																
RnD_StirrMaxSpBot	: 150.00																																																																
RnD_StirrMaxSpMid	: 300.00																																																																
RnD_StirrMaxSpTop	: 150.00																																																																
RnD_Long_Good	: 1.00																																																																
RnD_Back_Cover	: 35.00																																																																
RnD_Front_Cover	: 35.00																																																																
RnD_Top_Cover	: 35.00																																																																
RnD_Left_Cover	: 35.00																																																																
RnD_Right_Cover	: 35.00																																																																
RnD_Bottom_Cover	: 35.00																																																																
Bewehrung (Reinforcement grade): B500A																																																																	
D_max (mm)	: 16																																																																
Fixed drawing main view	: Top																																																																
Numbering	: Standard																																																																
As [cm2]	: 58.9																																																																
Static Position	: 7.20																																																																
RnD_StirrDia	: 10																																																																
RnD_Crn_Long_Diam	: 25																																																																
User field 3	: 35/Inz.1																																																																
Išilginės armatūros poreikis:	As, išilg. = 58.90 cm ²		A _{s, išilg.} = 58.90 cm ²																																																														
Palankios aplinkos sąlygos:	Taip		Taip																																																														
Išilginė armatūra																																																																	
Išilginė armatūra (kampiniai) strypai: Ø	25		12xØ25																																																														
Išilginė armatūra (vidiniai) strypai: Ø	Nemurodyta		-																																																														
Skersinė armatūra																																																																	
	Maksimalus išdėstymo žingsnis (mm):	Išdėstymo zona																																																															
Kolonos elemento viršus:	150	3500	24xØ10/150																																																														
Kolonos elemento vidurys:	300	7000	24xØ10/300																																																														
Kolonos elemento apačia:	150	3500	24xØ10/150																																																														
Skersinės armatūros diametras: Ø	10																																																																
Išilginė armatūra																																																																	
Išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio plotį	Neprivaloma																																																																
Išilginės armatūros kiekis per kolonos skerspjūvio ilgį	Neprivaloma																																																																
Maksimalus armatūros strypo ilgis (m)	14																																																																
Kolonos geometriniai duomenys																																																																	
Kolonos skerspjūvio plotis (mm):	500																																																																
Kolonos skerspjūvio ilgis (mm):	600																																																																
Kolonos aukštis (mm):	14000																																																																
Betono klasė (mm):	C50/60																																																																

A.9 priedas

Parametrai kompiuterių mokymo modeliui sukurti:

- *betono klasė (angl. Concrete class);*
- *kraštinės „a“ ilgis, mm;*
- *kraštinės „b“ ilgis, mm;*
- *kolonos aukštis „h“, mm;*
- *apsauginis sluoksnis (angl. Cover layer);*
- *kampinių (angl. Corner) išilginių strypų diametras;*
- *vidinių (angl. Inner) išilginių strypų diametras kraštinėje „a“;*
- *vidinių strypų kiekis kraštinėje „a“;*
- *vidinių (angl. Inner) išilginių strypų diametras kraštinėje „b“;*
- *vidinių strypų kiekis kraštinėje „b“;*
- *skersinės gulsčiosios armatūros strypo diametras;*
- *skersinės gulsčiosios armatūros armavimo zona kolonos viršuje – H_{top} ;*
- *skersinės gulsčiosios armatūros strypų išdėstymas (angl. Spacing);*
- *skersinės gulsčiosios armatūros armavimo zona kolonos viduryje – H_{midd} ;*
- *skersinės gulsčiosios armatūros strypų išdėstymas (angl. Spacing);*
- *skersinės gulsčiosios armatūros armavimo zona kolonos apačioje – H_{bott} ;*
- *skersinės gulsčiosios armatūros strypų išdėstymas (angl. Spacing);*
- *papildomos gulsčiosios skersinės armatūros strypo diametras kraštinėje „a“;*
- *papildoma gulsčioji skersinė armatūra, tarpai tarp strypų (angl. Spacing), kraštinėje „a“;*
- *papildoma gulsčioji skersinė armatūra, forma kraštinėje „a“;*
- *papild.gulsčiosios skersinės armatūros strypo diametras kraštinėje „b“;*
- *papild. gulsčioji skersinė armatūra, tarpai tarp strypų (angl. Spacing), kraštinėje „b“;*
- *papildoma gulsčioji skersinė armatūra, forma kraštinėje „b“;*
- *armatūros kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „a“, strypo diametras;*
- *lankstinių kiekis kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „a“ ;*
- *lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „a“ užlaidos ilgis – $LL_{top/bott}$ (angl. LL – Leg lenght top/bottom);*
- *armatūros kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „b“, strypo diametras;*
- *lankstinių kiekis kolonos viršuje/apačioje kraštinėje „b“;*
- *lankstinio kolonos apačioje/viršuje kraštinėje „b“ užlaidos ilgis - $LL_{top/bott}$.*